

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN ROBÓTICA INDUSTRIAL

**PEDRO MIGUEL ARDILA PIMIENTO
DIANA CAROLINA DULCEY DÍAZ
CRISTIAN URIEL MENDOZA CASTELLANOS
YEISSON RICARDO MENDOZA CASTELLANOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN ROBÓTICA INDUSTRIAL

**PEDRO MIGUEL ARDILA PIMIENTO
DIANA CAROLINA DULCEY DÍAZ
CRISTIAN URIEL MENDOZA CASTELLANOS
YEISSON RICARDO MENDOZA CASTELLANOS**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

**Director:
CARLOS BORRÁS PINILLA
Ing. Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios por darme vida para culminar mis metas; a mis padres y hermanos que con su apoyo incondicional y sus consejos me han guiado por este arduo trayecto; y a mis familiares, amigos y demás personas que me han acompañado hacia el camino al éxito.

PEDRO MIGUEL ARDILA PIMIENTO

DEDICATORIA

A mi familia: A mi abue por su constante apoyo y por ser una de mis mayores motivaciones, a mi padre por siempre estar ahí, a mi tia Gloria, mami Eliza, tía Lucy, tío Jairo, Diego y a Nano por ser parte de mi vida y sin ustedes esto no hubiese sido posible. A mi madre y a Ronny , a quienes siempre llevo en mis pensamientos.

A mis amigos: Lau por más de 20 años de amistad, a Nata y Diana K. por sus consejos y ser siempre mi polo a tierra, a Pacho por que la distancia no ha sido impedimento para mantener una amistad, a Aleja por su compañía y por compartir mis alegrías, a Martis por sus frases diarias de motivación, a Fabis, Henson, Quinti, Villo, por su cariño y compañía en estos años.

A mis profesores, compañeros de proyecto y compañeros de carrera por hacer parte de este proceso.

DIANA CAROLINA DULCEY DIAZ

DEDICATORIA

A mis padres quienes con su amor, esfuerzo y dedicación fueron partícipes de este gran logro.

A mis hermanos por sus enseñanzas y gratos recuerdos.

A mis amigos y compañeros que siempre me apoyaron en todo el proceso de formación y quienes contribuyeron a mi crecimiento personal.

A mi novia Magaly, quien fue el pilar que me sostuvo en tiempos difíciles y quien llena de momentos felices mi vida.

CRISTIAN URIEL MENDOZA CASTELLANOS

DEDICATORIA

A mis padres por su esfuerzo y apoyo en el cumplimiento de los sueños de sus hijos, su valor, amor y alegría han construido en mí las bases necesarias para alcanzar mis metas.

A mis hermanos de quienes aprendí grandes cosas y a quienes deseo los mejores éxitos en sus vidas, los recuerdos que quedan de nuestra infancia siempre serán gratos.

A mis amigos por su compañía y cariño, llenaron esta etapa de mi vida con momentos importantes que ayudaron a mi formación como persona y profesional.

A mi novia, su amor y apoyo han sido mi motor en los últimos meses y a quien debo parte de este logro.

YEISSON RICARDO MENDOZA CASTELLANOS

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por posibilitar nuestro crecimiento profesional.

A la escuela de Ingeniería Mecánica y su cuerpo docente por brindarnos las herramientas necesarias para nuestra formación.

A Carlos Borrás Pinilla, ingeniero mecánico, director del proyecto por su dedicación, apoyo, asesoría y orientación lo cual permitió el desarrollo y la culminación exitosa de este proyecto de grado.

A nuestros compañeros y familiares que siempre nos apoyaron

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	53
I SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	55
1. GENERALIDADES DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	56
1.1. ORGANIZACIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	57
1.2. TEMA DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	58
1.3. DIRECCIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN.	59
1.4. METODOLOGÍA DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN.	60
2. PLANEACIÓN	61
2.1. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO	63
3. EJECUCIÓN	71
3.1. ACTAS	72
3.2. TALLERES DE APLICACIÓN	73
4. FINALIZACIÓN	76

4.1. PRESENTACIONES	76
4.2. DOCUMENTO	77
4.3. TALLERES	79
II MEMORIAS Y RESULTADOS	80
5. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	81
5.1. ANTECEDENTES	83
5.2. EL NACIMIENTO DE LA ROBÓTICA	88
5.3. FILOSOFÍA DE LA ROBÓTICA	96
5.4. DEFINICIÓN DE ROBOT	98
5.4.1. Definición de robot industrial	99
5.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS	102
5.6. APLICACIONES	106
5.7. MERCADO Y TENDENCIAS DE LA ROBÓTICA	113
5.7.1. Mercado de los robots de servicio	119
5.8. CÉLULA DE TRABAJO	120
5.9. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ROBÓTICA	125
5.9.1. Métodos de análisis económico:	128
6. ESTADO DEL ARTE	134
6.1. ORGANISMOS INTERNACIONALES Y LOCALES QUE TRA- BAJAN EN EL ÁREA DE LA ROBÓTICA.	134
6.1.1. Organismos internacionales	136
6.1.2. Organizaciones y Asociaciones Locales.	140
6.2. EMPRESAS E INDUSTRIAS QUE FABRICAN Y/O COMER- CIALIZAN ROBOTS INDUSTRIALES..	147

6.3.	PRINCIPALES CENTROS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN EL ÁREA DE ROBÓTICA.	156
6.3.1.	Estado de la robótica en las principales universidades del mundo.	156
6.3.2.	Estado de la robótica en Colombia.	174
6.3.3.	Robótica en la universidad industrial de Santander	182
7.	MORFOLOGÍA DEL ROBOT	198
7.1.	ESTRUCTURA MECÁNICA DE UN ROBOT	198
7.1.1.	Tipos de articulaciones	199
7.1.2.	Configuraciones básicas de robots manipuladores industriales	199
7.1.3.	Transmisiones	206
7.1.4.	Reductores	209
7.1.5.	Accionamiento directo	211
7.2.	ACTUADORES	212
7.2.1.	Actuadores neumáticos	213
7.2.2.	Actuadores hidráulicos	215
7.2.3.	Actuadores eléctricos	217
7.2.4.	Actuadores piezoeléctricos	221
7.3.	SERVOMOTORES	223
7.3.1.	Modo de operación	224
7.3.2.	Servomotores de transmisión directa	224
7.4.	SENSORES	226
7.4.1.	Tipos de sensores	227
7.4.2.	Características de los sensores	229
7.4.3.	Sensores más usados en sistemas robóticos	232
7.5.	EFFECTORES FINALES	241
7.5.1.	Pinzas mecánicas	243

7.5.2.	Tipos de mecanismos de pinza	244
7.5.3.	Herramientas como efectores finales	247
8.	DESCRIPCIONES ESPACIALES Y TRANSFORMACIONES	248
8.1.	REPRESENTACIÓN DE LA POSICIÓN	249
8.2.	REPRESENTACIÓN DE LA ORIENTACIÓN	253
8.2.1.	Matrices de rotación	254
8.2.2.	Ángulos de Euler	258
8.2.3.	Par de rotación	261
8.2.4.	Cuaternios	262
8.3.	MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA	267
8.3.1.	Traslación	270
8.3.2.	Rotación	271
8.3.3.	Rotación y traslación conjuntamente	273
8.3.4.	Significado geométrico de las matrices homogéneas	276
8.3.5.	Matriz homogénea para múltiples giros y traslaciones	279
8.4.	NOMENCLATURA	280
8.5.	RELACIÓN Y COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL	281
8.5.1.	Ángulos de euler: Matriz de transformación homogénea.	283
8.5.2.	Par de rotación: matriz de transformación homogénea	284
8.5.3.	Par de rotación: Cuaternios	286
8.5.4.	Cuaternios: matriz de transformación homogénea	287
9.	CINEMÁTICA DE MANIPULADORES	291
9.1.	CINEMATICA DIRECTA	291
9.1.1.	Descripción de vínculos	292
9.1.2.	Solución por métodos geométricos	292
9.1.3.	Solución mediante matrices de transformación homogénea	294

9.1.4.	Solución mediante el Algoritmo de Denavit Hartenberg	297
9.1.5.	Solución mediante el uso de cuaternios	302
9.1.6.	Matriz Jacobiana	307
9.2.	CINEMATICA INVERSA	314
9.2.1.	Solución por métodos geométricos	315
9.2.2.	Solución por medio de la matriz de transformación homó- génea.	319
9.2.3.	Precision y repetividad en un robot industrial	325
9.3.	MATRIZ JACOBIANA INVERSA	327
9.3.1.	Matriz Jacobiana Pseudoinversa	329
9.3.2.	Configuraciones singulares en la matriz Jacobiana	330
10.	DINÁMICA DEL MANIPULADOR ROBÓTICO	331
10.1.	ACELERACIÓN DEL CUERPO RÍGIDO	332
10.2.	DISTRIBUCIÓN DE LA MASA	333
10.3.	ECUACIÓN DE NEWTON Y ECUACIÓN DE EULER	337
10.3.1.	Ecuación de Newton	337
10.3.2.	Ecuación de Euler	337
10.4.	ESTRUCTURA DE LAS ECUACIONES DINÁMICAS DE UN MANIPULADOR	338
10.4.1.	Ecuación en el espacio de estados	338
10.4.2.	Ecuación en el espacio de la configuración	338
10.5.	MODELO DINÁMICO POR FORMULACIÓN LAGRANGIA- NA	339
10.5.1.	Modelo dinámico de un robot partiendo del algoritmo computacional de Lagrange	344
10.6.	MODELO DINÁMICO DE UN ROBOT MANIPULADOR ME- DIANTE LA FORMULACIÓN DE NEWTON-EULER.	356

10.6.1. Algoritmo computacional del modelo dinámico de un robot de acuerdo a la formulación de Newton-Euler	357
10.7. SOLUCIÓN DEL MODELO DINÁMICO EN EL ESPACIO DE ESTADO	366
10.7.1. Aplicación del espacio de estado a la robótica	367
10.8. MODELADO DINÁMICO EN EL ESPACIO DE LA TAREA	369
11. GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS	372
11.1. TIPOS DE TRAYECTORIAS	373
11.1.1. Trayectorias punto a punto	374
11.1.2. Trayectorias coordinadas o isócronas	375
11.1.3. Trayectorias continuas	375
11.2. CONSIDERACIONES PARA PLANIFICACIÓN Y GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DE ARTICULACIONES	377
11.3. REPRESENTACIONES EN EL ESPACIO DE ARTICULACIÓN O INTERPOLACIÓN DE TRAYECTORIAS.	378
11.3.1. Interpoladores lineales	380
11.3.2. Interpolador spline cubico o polinomios cúbicos	381
11.3.3. Polinomios de grado 5	388
11.3.4. Interpolación trapezoidal	389
11.3.5. Otros interpoladores	392
11.3.6. Curvas De Bézier	393
11.4. MUESTREO DE TRAYECTORIAS EN EL ESPACIO CARTESIANO	396
11.5. PROBLEMAS GEOMÉTRICOS CON LAS RUTAS CARTESIANAS	397
11.6. GENERACIÓN DE RUTAS EN TIEMPO DE EJECUCIÓN	399
11.7. GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS SIN COLISIONES . .	403

12.CONTROL DE TRAYECTORIA	407
12.1. CONTROL LINEAL DE MANIPULADORES.	407
12.1.1. Sistemas Lineales De Segundo Orden.	408
12.1.2. Control Monoarticular	409
12.1.3. Esquema General De Control Monoarticular	414
12.2. CONTROL NO LINEAL DE MANIPULADORES.	421
12.2.1. Métodos de control no lineal para robots manipuladores	422
12.2.2. Control Adaptativo.	429
12.2.3. Control Robótico por Redes Neuronales	437
12.3. ASPECTOS PRÁCTICOS.	443
12.3.1. Índice de desempeño	444
12.3.2. Ajustes de los parámetros PID.	445
12.3.3. Flexión y osciladores estructurales.	446
13.CONTROL DE FUERZA EN MANIPULADORES ROBÓTICOS	449
13.1. EL PASO DEL CONTROL DE MOVIMIENTO AL CONTROL DE INTERACCIÓN	450
13.2. MEDICIÓN DE FUERZA	451
13.2.1. Transductor Nano17	453
13.2.2. Transductor Gamma	453
13.2.3. Transductor Omega250	454
13.3. SISTEMAS HÁPTICOS	456
13.4. CONTROL DE FUERZA DIRECTO E INDIRECTO	457
13.5. MODELAMIENTO DEL ENTORNO	458
13.6. CONTROL DE FUERZA	460
13.6.1. Control de fuerza con lazo interno de posición	461
13.6.2. Control de fuerza con lazo interno de velocidad	462
13.7. CONTROL HÍBRIDO POSICIÓN/FUERZA	462
13.8. CONTROL DE IMPEDANCIA	465

13.8.1. Control de impedancia con base en par	467
13.8.2. Control de impedancia con base en posición	467
13.8.3. Enfoque alternativo al control de impedancia	469
13.9. ESQUEMAS DE CONTROL DE ROBOT INDUSTRIALES EN LA ACTUALIDAD	470
13.10 APLICACIONES	471
14. PROGRAMACIÓN DE ROBOTS INDUSTRIALES	473
14.1. MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN DE ROBOTS	474
14.1.1. Programación por guiado	475
14.1.2. Programación textual	478
14.2. REQUERIMIENTOS DE UN SISTEMA DE ROBOTS.	481
14.2.1. Entorno de programación.	481
14.2.2. Modelado de entorno.	482
14.2.3. Especificación del movimiento.	482
14.2.4. Tipos de datos.	483
14.2.5. Comunicaciones.	483
14.3. ESPECIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS EN ROBOTS MA- NIPULADORES	486
14.4. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN.	487
14.4.1. Lenguaje de programación RAPID.	488
14.4.2. Lenguaje de programación V+	492
14.5. PROBLEMAS PECULIARES PARA LOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN EN ROBOTS	495
14.6. SISTEMAS DE PROGRAMACION FUERA DE LINEA (OLP)	497
14.6.1. Características básicas de los sistemas OLP	497

15.TÓPICOS ESPECIALES	501
15.1. INTELIGENCIA ARTIFICIAL	502
15.1.1. Reseña histórica de la inteligencia artificial:	503
15.1.2. Caracterización de la inteligencia artificial	506
15.1.3. La investigación en inteligencia artificial	507
15.1.4. Áreas de investigación:	509
15.1.5. Áreas de aplicación de la IA	510
15.1.6. Aplicaciones comerciales de la inteligencia artificial . . .	511
15.2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES	512
15.2.1. Reseña histórica:	512
15.2.2. La forma biológica:	515
15.2.3. Partes de una red neuronal artificial:	516
15.2.4. Características de una red neuronal artificial:	519
15.2.5. Implementación de las redes neuronales	523
15.2.6. Ventajas de las redes neuronales	525
15.2.7. Aplicaciones de las redes neuronales	526
15.3. NANO-ROBOTICA	528
15.3.1. Algunas invenciones nano-robóticas	529
15.4. ROBÓTICA Y VISIÓN ARTIFICIAL	533
15.4.1. Aplicaciones de la visión artificial	534
15.4.2. Componentes de un sistema de visión artificial	535
15.4.3. Función de la visión por computadora	537
15.4.4. Aplicaciones de la visión por computadora	539
15.4.5. Una Invenciones en Visión Artificial	542
15.5. SISTEMAS DE TELE-OPERACIÓN ROBÓTICA.	543
15.5.1. Estructura de un sistema tele-operado:	543
15.5.2. Funcionamiento de un robot tele-operado	545
15.5.3. Clasificación de sistemas tele-operados	549

15.5.4. Aplicaciones	550
15.5.5. Algunos robots desarrollados en Colombia	552
15.6. LA BIO-ROBOTICA.	555
15.6.1. Algunas invenciones bio-robóticas:	555
15.7. ROBOTS REDUNDANTES	558
15.7.1. Algunas invenciones de robots redundantes:	559
CONCLUSIONES	563
RECOMENDACIONES	567
BIBLIOGRAFÍA	569
ANEXOS	573

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Metodología seminario de investigación	60
2.1. Esquema general de la robótica industrial	62
3.1. Ejemplo de un acta.	73
3.2. Robot AL5B Lynxmotion	74
4.1. Diapositiva de inicio de sesión.	77
4.2. Ejemplo de diapositiva en las sesiones.	77
4.3. Winedt: Editor de texto en L ^A T _E X.	78
4.4. Base móvil	79
5.1. Reloj de agua diseñado por Ctecibus (270 D. C)	83
5.2. Pilas para beber agua.	84
5.3. Gallo de Estrasburgo	84
5.4. Estudio de robots humanoides. Leonardo Da Vinci	85
5.5. El pato mecánico	86
5.6. Telar De Vaucanson	87
5.7. El flautista	87

5.8. Muñeca musical. Droz	87
5.9. Una de las primeras maquinas herramientas	89
5.10. R.U.R. Rosum's Universal Robots	98
5.11. Yo robot	98
5.12. Que debe realizar un robot	99
5.13. Definicion de robot industrial	100
5.14. Clasificación de robots	102
5.15. Robot en trabajo de fundición	106
5.16. Robot soldador	108
5.17. Robot aplicando material	110
5.18. Robot para corte	111
5.19. Robot para manipulación de salas blancas	112
5.20. Ventas estimadas anuales de robots industriales en el mundo	115
5.21. Incorporación de robots. Comparativa por tipo de industria años 2008-2009	117
5.22. Número estimado de robots industriales funcionales por cada 10,000 em- pleados	118
5.23. Estimado de robots industriales en stock mundial de 2008 y 2009 y pro- nóstico para 2010-2013	119
5.24. Ventas hasta el 2009, en el 2009 y pronósticos 2010-2013 para robots de servicio de uso profesional	121
5.25. Ventas hasta el 2009, en el 2009 y pronósticos 2010-2013 para robots de servicio de uso personal	121
5.26. Tipos de disposición de células de trabajo	122
6.1. Distribución de la robótica industrial	135
6.2. Tipos de organizaciones	135
6.3. Miembros de las organizaciones internacionales	137
6.4. Principales centros de I+D	157
6.5. SAMM(Stanford Assistant Mobile Manipulator)	158

6.6. Robots escaladores	159
6.7. Helicóptero Autónomo	159
6.8. Robot Personal PR2	160
6.9. DASH Robot Hexápodo	161
6.10. Brazo robótico operado vía internet	162
6.11. Juego de evasión y búsqueda	163
6.12. Ciber arqueología	163
6.13. Reconocimiento de formas poligonales a partir de fotografías.	164
6.14. DAUR lámpara de escritorio robótica	165
6.15. MeBot del MIT	166
6.16. Actuadores MIT	167
6.17. Anémona publica	167
6.18. Vehículo robótico axel	168
6.19. Vehículo robótico con planeación basada en sensores de movimiento . .	169
6.20. Reconocimiento de actividades	169
6.21. Vehículo AVENUE	170
6.22. Pierna de la plataforma Stewart	171
6.23. Vigilancia inteligente	172
6.24. Identificación de personas en tiempo real	173
6.25. Estructura del cerebro	173
6.26. Interfaz Cerebro-Ordenador	174
6.27. Vehículo autónomo universidad de Oxford	175
6.28. UN-PIER	176
6.29. UN-ROVER	177
6.30. UN-BOT	177
6.31. UNROCA III	178
6.32. Logotipo del grupo GRIA	178
6.33. Robot SCARA 4 GDL	179

6.34. Robot seguidor	180
6.35. Robot Arcadio	181
6.36. Laboratorio de robótica	182
6.37. Grupo ERA	183
6.38. Centro de investigación en sistemas dinámicos multi-físicos, control y robótica DICBOT	184
6.39. Prototipo Robot PUMA de la UIS	186
6.40. Interfaz off-line de la implementación del algoritmo	187
6.41. Trayectoria simulada mediante la herramienta computacional desarrollada en MATLAB	190
6.42. Prototipo Robot cartesiano	192
6.43. Ensamble final de robot explorador móvil	193
6.44. Diagrama de flujo para el control de posición de las articulaciones.	195
6.45. Flujo de co-diseño	196
6.46. Respuesta simulada del sistema dinámico de un grado de libertad	197
6.47. Montaje de la tarjeta diseñada.	197
7.1. Tipos de articulaciones para robots	199
7.2. Las cuatro anatomías robot básico polar, cilíndrico, cartesiano y brazo articulado Scara	200
7.3. Robot coordenadas cartesianas	201
7.4. Robot RT33 -Configuración cilíndrica	202
7.5. Configuración básica de un robot cilíndrico	202
7.6. Unimate 2000. Configuración polar	203
7.7. Unimate 2000. Robot PUMA-Configuración angular	204
7.8. Robot SCARA	205
7.9. SCARA, Robot evolution	205
7.10. Sistemas de transmisión para robots	206
7.11. Engranajes.	207

7.12. Reductor HDUC.	210
7.13. Reductor CYCLO 6000	211
7.14. Robot AdeptThree-MV Robot.	212
7.15. Sistema de actuador.	213
7.16. Actuador hidraulico	216
7.17. Actuador eléctrico.	217
7.18. Motor DC.	218
7.19. Diseño de un actuador piezoeléctrico tipo pila.	222
7.20. Nanoposicionador tipo Flexure y scanner con amplificador de movimiento integrado	223
7.21. Componentes servomotor.	223
7.22. Expresión matemática servomotor.	226
7.23. Clasificación de los sensores según diversas especificaciones.	229
7.24. Características más relevantes de los sensores.	230
7.25. Sensores más usados en robótica.	232
7.26. Encoder.	233
7.27. Transformador lineal LVDT.	235
7.28. Galgasextensometricas.	238
7.29. Características de un LDR.	241
7.30. Efecto Final.	242
7.31. Clasificación efectores finales.	242
7.32. Pinzas mecánica.	243
7.33. Ventosas de fuelle.	245
8.1. Parámetros a conocer para la localización de un elemento	249
8.2. Tipos de coordenadas	250
8.3. Coordenadas cartesianas	250
8.4. Coordenadas polares	251
8.5. Coordenadas cilíndricas	252

8.6. Coordenadas esféricas	252
8.7. Formas de representar orientación	253
8.8. Rotación de un sistema móvil sobre un sistema fijo en 2D	255
8.9. Rotación del sistema OUVW sobre el eje OX-OU del sistema OXYZ	257
8.10. Rotación de un sistema de referencia móvil sobre un eje de un sistema OXYZ	257
8.11. Combinaciones más usadas de ángulos de Euler	258
8.12. Ángulos de Euler WUW	259
8.13. Ángulos de Euler WVW	260
8.14. Ángulos de Euler XYZ	261
8.15. Representación de la rotación de un sistema mediante par de rotación	262
8.16. Uso de la matriz de transformación homogénea	268
8.17. Sistema O'UVW representado en el sistema OXYZ	271
8.18. Representaciones de la matriz de transformación homogénea	273
8.19. Traslación seguida de rotación	276
8.20. Representación de la matriz noa	278
8.21. Sistemas de referencia asociado a múltiples sistemas de referencia.	280
8.22. Descomposición par de rotación: matriz de transformación homogénea	285
8.23. Relación entre métodos de representación espacial	288
8.24. Métodos de descripción espacial	289
9.1. Robot planar articular de 2 grados de libertad	293
9.2. Robot de 3 grados de libertad	293
9.3. Robot planar.	295
9.4. Transformaciones realizadas al sistema móvil	297
9.5. Brazo articulado AL5B.	300
9.6. Robot polar.	303
9.7. Jacobiana analítica directa e inversa.	309
9.8. Jacobiana geométrica directa e inversa.	311

9.9. Robot articular 4 DOF	316
9.10. Elementos 2, y 3 del robot visto en el plano z-r	317
9.11. Robot Planar.	320
9.12. Robot Esferico.	322
9.13. Formas de calcular la matriz jacobiana.	328
10.1. paralelepípedo con densidad uniforme	336
10.2. Robot polar vertical	342
10.3. Robot polar de 2 GDL en configuración horizontal	348
10.4. Elementos del robot polar de 2 GDLI	350
10.5. Robot polar de 2 GDLI	360
11.1. tipos de trayectorias	373
11.2. Representación de los tipos de trayectorias para un robot SCARA.	376
11.3. Un manipulador se mueve desde su posición inicial hasta su posición final de destino.	380
11.4. : Vista de la posición, velocidad y aceleración para un interpolador lineal.	382
11.5. : Posibles formas de ruta para una sola articulación.	383
11.6. Perfiles de posición velocidad y aceleración para un perfil cubico que inicia y termina inmóvil.	386
11.7. Puntos via con velocidades indicadas en los puntos indicados por las tangentes.	387
11.8. interpolador trapezoidal	389
11.9. Interpolador trapezoidal con velocidades iniciales y finales no nulas.	391
11.10 Polinomios de Bernstein de grado dos	394
11.11 Parábola de polígonos de control	395
11.12 Punto intermedio inalcanzable de un manipulador	398
11.13 zona de trabajo donde se alinearan los ejes de un manipulador.	398

11.14(a) Trayectoria para un manipulador de dos articulaciones por medio del espacio de trabajo. (b) Trayectoria en el espacio de configuración. . . .	404
11.15Representación del campo repulsivo de un obstáculo Q	405
11.16Comportamiento de un robot planar redundante de tres eslabones sometido a campos potenciales. (a) Estado inicial y final, (b) Estados intermedios debido al campo potencial artificial, y (c) Generación de la trayectoria libre de colisiones.	406
12.1. Control de manipuladores	408
12.2. Diagrama de bloques del control monoarticular	411
12.3. Robot manipulador de 2 grados de libertad	412
12.4. Diagrama de bloques del esquema de control del robot de 2 DOF . . .	415
12.5. Diagrama de bloques de una articulación	415
12.6. Esquema general de control con efectos de pre y re- alimentación. . . .	416
12.7. Esquema control pre alimentación.	416
12.8. Esquema control con realimentación.	418
12.9. Esquema control con re+ pre-alimentación.	420
12.10Esquema control con re+ pre-alimentación + Compensación por gravedad	421
12.11Métodos de control	422
12.12diagrama de bloque del esquema general de control para un robot manipulador.	423
12.13Desacoplamiento por inversión del modelo.	424
12.14Esquema control con re+ pre-alimentación.	426
12.15Diagrama de bloque del esquema de control PD+ para un manipulador	427
12.16Diagrama de bloque del esquema de control por par calculado	428
12.17Diagrama de bloques del modelo de control adaptativo básico	430
12.18Diagrama de bloques del modelo de control adaptativo con modelo de referencia	431

12.19	Diagrama de bloques del modelo de control adaptativo con modelo autorregresivo	434
12.20	Red neuronal de retropropagación de dos capas	438
12.21	Diagrama de bloques del sistema básico de control con RN	442
12.22	Diagrama de bode para un filtro de muesca	448
13.1.	Puente Wheatstone para el acondicionamiento de la señal	452
13.2.	Transductor ATI Nano17	454
13.3.	Transductor ATI Gamma	455
13.4.	Transductor Omega250	455
13.5.	Dispositivo háptico Phantom premium	457
13.6.	Diagrama sobre el control de fuerza	459
13.7.	Diagrama de bloques control de fuerza con lazo interno de posición . .	462
13.8.	Diagrama de bloques control de fuerza con lazo interno de velocidad . .	463
13.9.	Subdivisión del espacio de la tarea en el control híbrido posición/ fuerza	464
13.10	Enfoques del control de impedancia	466
13.11	Lazos de control en La técnica de control de impedancia con base en posición	468
13.12	RCC (remote center of compliance)	471
14.1.	Estructura general de la programación de robots	474
14.2.	Métodos de programación	475
14.3.	Sistema de Joystick	475
14.4.	Botonera de programación de robot industrial	476
14.5.	Robot Gaiotto. Ejemplo de robot con programación de guiado pasivo directo	477
14.6.	Definición de ángulos O-A-T.	480
14.7.	Sintaxis básica para movimientos en un lenguaje de programación. . . .	483
14.8.	Sintaxis de movimientos en el Lenguaje VALL II.	486

14.9. Estructura de un programa RAPID.	488
14.10Parámetros Lenguaje RAPID.	491
14.11Instrucciones con los parámetros del lenguaje RAPID.	491
14.12Tipos de programa en el sistema V+.	495
14.13Diagrama Pasos Programación OLP.	500
15.1. La inteligencia artificial y su pionero Seymour Papert	503
15.2. Algunos ejemplos de robots aplicando inteligencia artificial. a) monty robot humanoide ayudante de cocina de la empresa lynxmotion; b) robot barman barrobot ; c) Aibo, el perro , juega y muerde.	508
15.3. Prótesis de brazo completo y corazón artificial desarrollado por el profe- sor Emilio Sacristán en la UAM	508
15.4. Neurona biológica y sus partes.	513
15.5. Red neuronal artificial y sus diferentes partes	516
15.6. Funcionamiento general de una red neuronal artificial	517
15.7. Funciones de transferencia típicas	518
15.8. Algunos tipos de redes; monocapa, multicapa, recurrente	521
15.9. Nano-robot “araña molecular“	530
15.10nano-robot para ensamblajes de material	530
15.11futuro nano-robot destructor de moléculas cancerigenas	531
15.12Araña de 15 nano-metros	532
15.13Esquema entre la visión artificial y otras áreas afines	534
15.14Segmentación de un espacio para la orientación adecuada de un robot .	538
15.15Demostración de un robot con 40 brazos y visión artificial para recoger fresas en el centro tecnológico Adesva, en Lepe (Huelva).	542
15.16Así ve el robot cosechador de fresas las frutas, distinguiendo las maduras.	542
15.17Componentes de un sistema tele-operado (a) Estación de tele-operación, (b) Robot (esclavo)	544
15.18Muestra de un sistema ackerman	546

15.19	Robots con sistemas de locomoción por patas -Hexápodo. - Cuadrúpedo.	547
15.20	Vehículo tele-operad USMC	550
15.21	Robot Sojourner Rover	551
15.22	El ANDROS F6A	551
15.23	Robot tele-operado para manejo de líneas de alta tensión	552
15.24	Robot móvil teleoperado (RMTO I)	553
15.25	Software para la tel-operación del RMTO I	553
15.26	Dispositivo Robótico Para Caminar (DRC)	556
15.27	LSTAT / Serpiente Robot	557
15.28	Robot-cámara	557
15.29	Robot para toma de muestras	558
15.30	Robot cirujano Da Vinci	558
15.31	Movimientos posibles que podría realizar un manipulador redundante. .	559
15.32	Robot androide fabricado por Honda.	560
15.33	Robot tipo serpiente.	561
15.34	Robot tipo araña.	561
15.35	Esquema general de la robótica moderna	562

ÍNDICE DE CUADROS

1.1. Formación Ing. Carlos Borrás Pinilla	59
2.1. Empresas mas representativas en la industria	67
3.1. Asignación de roles para cada una de las sesiones.	72
3.2. Talleres de aplicación	75
5.1. Invenciones Famosas	88
5.2. Logros Históricos De La Robótica	90
5.3. Algunos de los desarrollos realizados en robótica de la UIS	95
5.4. Clasificación de robots según T.M. Knasel	105
5.5. Aplicaciones de robots industriales	107
5.6. Ventas anuales de robots industriales por países	132
5.7. Cantidad de robots acumulados por países	133
6.1. Organismos internacionales que trabajan en el área de la robótica	136
6.2. Organismos Locales que trabajan en el área de la robótica	141
6.3. Empresas mas representativas en la industria	147
7.1. Características reductores.	209

7.2. Modo de operación servomotores.	224
7.3. Comparación servomotores.	226
8.1. Ley de composición interna de los cuaternios	264
8.2. Comparación entre los diferentes métodos de representación espacial.	282
8.3. Comparación entre métodos de representación espacial.	290
9.1. Parámetros D-H.	300
9.2. Parametros D-H.	322
9.3. Matriz pseudoinversa.	329
10.1. Comparación entre los diferentes métodos de representación espacial.	348
10.2. Parámetros de D-H del robot polar de la imagen10.5.	361
13.1. Características principales del sensor Nano 17	454
13.2. Características principales del sensor Gamma	455
13.3. Características principales del sensor Omega250	456
14.1. Tipo de datos en lenguajes de programación	484
14.2. Otros comandos en VALL II.	487
14.3. Estructura de datos.	490
15.1. Logros Históricos De La Inteligencia Artificial.	504
15.2. Logros históricos de la investigación en redes neuronales artificiales.	514

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A Talleres de aplicación.	574
ANEXO B Especificaciones robot AL5B.	614

GLOSARIO

- **ACELERACIÓN DE EJE INDIVIDUAL:** Aceleración necesaria para generar el movimiento de un solo eje.
- **ACELERACIÓN DE TRAYECTORIA:** Aceleración obtenida bajo el control de trayectoria continúa, que genera la aceleración a lo largo de varios ejes, de tal forma que la interfase mecánica o el punto central especificado de la herramienta alcance la velocidad deseada a lo largo de una trayectoria requerida.
- **ACELERACIÓN:** Modificación de la velocidad de un punto considerado por unidad de tiempo.
- **ACTUADOR:** Mecanismo de potencia capaz de producir movimiento (por ejemplo un motor que transforma la energía eléctrica, hidráulica o neumática en movimiento del robot).
- **BASE:** Plataforma o estructura a la cual está acoplado el origen del primer elemento de la estructura articulada.
- **BRAZOS EJES PRINCIPALES:** Conjunto de articulaciones o uniones o ambas cosas, motorizadas acopladas entre sí, que forma una cadena que soporta, coloca en posición y orienta el muñón o un dispositivo terminal.
- **CARGA:** La carga es una función de la masa, del momento de inercia, de las fuerzas estáticas y dinámicas soportadas por el robot y es expresada bajo la forma de fuerza y de torque teniendo como punto de aplicación la interfase mecánica, la cual puede ser ejercida a lo largo de varios ejes de movimiento bajo condiciones específicas de velocidad y aceleración.
- **CARGA LÍMITE:** La carga máxima que puede ser aplicada a la interfase mecánica sin daño alguno o falla en el mecanismo del robot, bajo condiciones restringidas de funcionamiento comparativamente a las condiciones con carga nominal.

- **CARGA NOMINA:** Carga máxima que puede ser aplicada a la interfase mecánica en condiciones normales de funcionamiento, sin degradación de alguna especificación de desempeño anunciado. La carga nominal incluye los efectos inerciales del dispositivo terminal, los accesorios y las piezas (donde sea aplicable).
- **CICLO:** Ejecución del programa de una tarea.
- **CICLO ESTÁNDAR:** Secuencia de movimientos de un robot durante una tarea típica tomada como referencia, bajo condiciones específicas.
- **CONDICIONES NORMALES DE FUNCIONAMIENTO:** El dominio de condiciones ambientales (tales como temperatura, humedad, etc.) y otros efectos que puedan influir en el funcionamiento del robot (tales como inestabilidad en el suministro de electricidad, campos electromagnéticos, etc.) dentro de los cuales es garantizado el desempeño del robot, tal como se especifica por el fabricante.
- **CONTROL "POSE A POSE":** Método de control según el cual cada movimiento se desarrolla de acuerdo con las instrucciones que especifican solamente la siguiente pose: Los desplazamientos de los diferentes ejes pueden no estar coordinados entre sí y pueden ser ejecutados simultáneamente o consecutivamente. Las velocidades pueden no ser especificadas aquí por los datos de entrada.
- **CONTROL ADAPTANTE:** Proceso de control que ajusta los parámetros del sistema de control a partir de las condiciones detectadas durante el proceso.
- **CONTROL DE APRENDIZAJE:** Proceso de control en el cual la experiencia (obtenida durante los ciclos precedentes) es utilizada automáticamente para cambiar los parámetros o los algoritmos de control.
- **CONTROL DE TRAYECTORIA CONTINÚA:** Procedimiento de control mediante el cual dos o más movimientos controlados se desarrollan de acuerdo con

las instrucciones que especifican la siguiente pose requerida (obtenida normalmente por interpolación) y la velocidad requerida para aquella pose. La velocidad del movimiento de cada eje varía, se genera así una trayectoria deseada.

- **CONTROL POR SENSORES:** Proceso de control en el cual los movimientos efectuados por el robot o la fuerza que éste ejerce están ajustados de acuerdo con los datos de salida de sensores externos.
- **DEFORMACIÓN ESTÁTICA:** Desplazamiento máximo de la interfase mecánica por unidad de carga aplicada a esta.
- **DETENCIÓN:** Estado en el cual el robot se encuentra inmóvil.
- **DISPOSITIVO TERMINAL/EFECTOR FINAL:** Dispositivo diseñado específicamente para ser fijado a la interfase mecánica, que le permite al robot efectuar su tarea (por ejemplo sujetar, atornillar, manipular pistolas para soldar o pintar).
- **DISPOSITIVO DE ACOPLAMIENTO DEL DISPOSITIVO TERMINAL:** Brida de acoplamiento en la extremidad de la estructura articulada y dispositivos de fijación, o piezas complementarias que fijan el dispositivo terminal al de esta estructura articulada.
- **DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN:** Dispositivo terminal concebido para agarre y fijación.
- **EJE:** Dirección en la cual una parte del robot puede tener un movimiento lineal o angular. El número de ejes corresponde normalmente al número guiado de uniones, y mutua e independientemente conducidos.
- **EMPUJE MÁXIMO:** Empuje máximo (excluyendo todo efecto inercial) que puede ser aplicado en forma continua a la interfase mecánica, sin causar deterioro permanente de la mecánica del robot.

- **ESPACIO DE MOVIMIENTO:** Espacio que puede ser barrido por las partes en movimiento del robot, con excepción del dispositivo terminal y de la pieza.
- **ESPACIO DE TRABAJO:** El conjunto de poses relativas al sistema de coordenadas de la base que pueden ser alcanzadas por el punto de referencia del muñón pasador. El espacio de trabajo es aquel dentro del cual el robot no tiene limitaciones en el movimiento de los ejes secundarios diferentes a los impuestos por la junta misma.
- **ESPACIO MÁXIMO:** Es el espacio de movimiento más el espacio que puede ser barrido por el dispositivo terminal y la pieza.
- **ESPACIO OPERACIONAL:** Parte del espacio restringido que, en realidad, es usado durante la ejecución de los movimientos programados.
- **ESPACIO RESTRINGIDO:** Parte del espacio máximo que está restringido por dispositivos limitadores, los cuales fijan límites que no pueden ser excedidos en una eventual falla previsible del sistema de robot (célula robotizada).
- **ESTADO NORMAL DE FUNCIONAMIENTO (FUNCIONAMIENTO AUTOMÁTICO):** Estado en el cual el robot ejecuta sin falla las tareas programadas por ejecución continua del programa.
- **ESTRUCTURA ARTICULADA:** Conjunto de uniones y juntas que constituyen el brazo y el muñón.
- **EXACTITUD DE DISTANCIA:** Desviación en posición y en orientación entre la distancia comandada y la mediana de las distancias alcanzadas.
- **EXACTITUD DE POSE MULTIDIRECCIONAL:** Desviación entre las diversas medias de poses alcanzadas obtenidas por la misma pose comandada, repetida n veces, siguiendo tres direcciones perpendiculares.

- **EXACTITUD DE TRAYECTORIA:** Aptitud de un robot de hacer seguir en la interfase mecánica la trayectoria comandada en la misma dirección n veces.
- **EXACTITUD DE VELOCIDAD DE TRAYECTORIA:** Error entre la velocidad comandada y el valor medio de n repeticiones de la velocidad alcanzada, medida en la interfase mecánica.
- **EXACTITUD:** Desviación entre una pose comandada y la media de las poses alcanzadas, cuando es lograda la pose comandada siguiendo la misma dirección.
- **FLEXIBILIDAD:** Comportamiento flexible de un robot o de cualquier herramienta asociada en respuesta a fuerzas externas ejercidas sobre éste. Cuando este comportamiento es independiente de retroalimentación debida a datos aportados por sensores, se denomina manejabilidad pasiva; si no, será manejabilidad activa.
- **FLUCTUACIÓN DE VELOCIDAD DE TRAYECTORIA:** Desviación máxima para una misma velocidad comandada, entre las velocidades alcanzadas en el curso de una trayectoria.
- **GRADO DE LIBERTAD (DOF):** Una de las variables (máximo seis) necesarias para definir los movimientos de un sólido en el espacio.
- **INSTALACIÓN:** Operación que consiste en instalar el robot en su sitio, conectándolo a sus fuentes de alimentación y de potencia.
- **INTERFASE MECÁNICA:** Superficie de montaje colocada en la extremidad de la estructura articulada contiguo al dispositivo terminal.
- **JUNTA PRISMÁTICA; JUNTA DESLIZANTE:** Conjunto mecánico, constituido por dos miembros rígidos, que permite a uno de estos tener un movimiento lineal en contacto con el otro.
- **JUNTA ROTATIVA:** Ensamble mecánico que conecta dos miembros rígidos y que le permite a uno rotar respecto al otro, alrededor de un eje fijo.

- **MANIPULADOR DE ROBOT INDUSTRIAL:** Manipulador de varios grados de libertad, de control automático, reprogramable, de aplicación múltiple, móvil o estático destinado a ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial.
- **MANIPULADOR DE SECUENCIA FIJA:** Manipulador que efectúa cada etapa de una operación dada, de acuerdo con un esquema de movimientos predeterminados, el cual no puede ser cambiado sin una modificación física.
- **MANIPULADOR:** Máquina cuyo mecanismo está compuesto generalmente por una serie de segmentos articulados o deslizantes, unos respecto a los otros y cuyo propósito es el de agarrar o desplazar objetos o ambas cosas (piezas o herramientas) siguiendo generalmente, varios grados de libertad. Este puede ser controlado por un operador, un autómata programable o por cualquier sistema lógico (por ejemplo un dispositivo de leva, de lógica cableada, etc.).
- **Modo automático.** El modo operativo con el cual puede funcionar el sistema de control de un robot, de acuerdo con el programa de una tarea.
- **Modo manual:** El modo operativo con el cual puede ser operado el robot, por ejemplo, oprimiendo botones o mediante una palanca de control.
- **MODO OPERATIVO:** Un estado del sistema de control del robot.
- **MUÑÓN EJES SECUNDARIOS:** Conjunto de articulaciones motorizadas e interconectadas entre sí, entre el brazo y el dispositivo terminal, que soporta, coloca en posición y orienta este dispositivo.
- **OPERADOR:** Persona calificada, designada para poner en marcha, controlar y detener las operaciones previstas de producción de un robot o de un sistema robotizado.

- **PARADA DE EMERGENCIA:** Condición que bloquea todos los demás controles del robot, suspende la energía de los actuadores de los ejes, inicia la detención de todas las partes móviles y suprime la alimentación de otras funciones peligrosas controladas por el robot.
- **PAUSA:** Estado en el cual el funcionamiento del robot está interrumpido, pero que puede ser reasumido sin procedimiento especial.
- **POSE ACCIONADA:** Pose especificada por un programa de aprendizaje, programación por introducción manual de datos o programación analítica.
- **POSE ALCANZADA:** Pose alcanzada por el robot en respuesta a la pose accionada.
- **POSE:** Combinación de posición y orientación de una parte de un robot (por ejemplo su acoplamiento mecánico) o de una pieza en un sistema de coordenadas.
- **POSE DE ALINEAMIENTO:** Una pose específica del sistema de coordenadas de la interfase mecánica respecto al sistema de coordenadas de la base.
- **PROGRAMA DE UNA TAREA:** Conjunto de instrucciones sobre movimientos y funciones auxiliares que definen la tarea específica prevista del sistema de robot (célula robotizada); este tipo de programa es, normalmente, generado por el usuario.
- **PROGRAMACIÓN ANALÍTICA:** Método de programación en el cual las poses del dispositivo terminal de la trayectoria deseada son definidas en forma analítica (por ejemplo CAD/CAM).
- **PROGRAMACIÓN DIRIGIDA AL OBJETO:** Método de programación en el cual la tarea por ejecutar está definida, pero donde la trayectoria del dispositivo terminal no está impuesta a priori.
- **PROGRAMACIÓN POR APRENDIZAJE:** Programación que se realiza:

- Por conducto manual del dispositivo terminal.
 - Por conducto manual de un dispositivo mecánico de simulación.
 - mediante un pendiente de aprendizaje que mueva el robot a través de las acciones deseadas.
- **PROGRAMACIÓN POR INTRODUCCIÓN DE DATOS EN FORMA MANUAL:** Generación e introducción de programas al sistema de control del robot, por medio de conmutadores, clavijeros o teclados.
 - **PROGRAMADOR:** Persona calificada, designada para preparar el programa de una tarea.
 - **PUESTA EN SERVICIO:** Puesta en funcionamiento y verificación del sistema robotizado y control de las funciones del robot después de su instalación.
 - **PUNTO DE CENTRO DE HERRAMIENTA (TCP):** Punto real o virtual definido para una aplicación dada, con respecto al sistema de coordenadas de la interfase mecánica.
 - **PUNTO DE REFERENCIA DEL MUÑÓN PASADOR:** Es el punto de intersección de los dos primeros ejes secundarios o, en su defecto, un punto definido sobre el primer eje secundario.
 - **REPETICIÓN DE DISTANCIA:** Proximidad de convenio entre varias distancias alcanzadas para la misma distancia comandada, repetida n veces en la misma dirección.
 - **REPETICIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRAYECTORIA:** Proximidad de convenio entre las velocidades alcanzadas bajo las mismas condiciones.
 - **REPETICIÓN DE POSE:** Proximidad de convenio entre las posiciones y las orientaciones de las poses alcanzadas para la misma pose comandada, repetida n veces, siguiendo la misma dirección.

- **REPETICIÓN DE TRAYECTORIA:** Proximidad de convenio entre las trayectorias alcanzadas para la misma trayectoria comandada, en forma repetida n veces.
- **RESOLUCIÓN:** La distancia o el ángulo más pequeño que puede ser efectuado por cada eje del robot.
- **ROBOT "SCARA":** Robot rotoide, cuyos ejes de la rotativa del brazo son verticales, con flexibilidad horizontal.
- **ROBOT CARTESIANO (RECTANGULAR):** Robot cuya estructura mecánica del brazo está constituida por tres juntas prismáticas, cuyos ejes están dispuestos en un sistema de coordenadas cartesianas.
- **ROBOT CILÍNDRICO:** Robot cuya estructura mecánica del brazo está constituida por una junta simple y dos juntas prismáticas, cuyos ejes están dispuestos dentro de un sistema de coordenadas cilíndricas.
- **ROBOT MÓVIL:** Robot montado sobre una base móvil controlada automáticamente.
- **ROBOT PENDULAR:** Robot cuya estructura mecánica del brazo comprende un ensamble adicional "pivotante" del tipo junta universal (de cardán).
- **ROBOT POLAR (ESFÉRICO):** Robot cuya estructura mecánica del brazo está constituida por dos juntas simples y una junta prismática, cuyos ejes están dispuestos en un sistema de coordenadas polares.
- **ROBOT PÓRTICO:** Robot cuya estructura mecánica incluye un pórtico.
- **ROBOT REPROGRAMABLE POR APRENDIZAJE:** Robot capaz de ejecutar en forma repetitiva un programa de tarea, obtenido mediante programación de aprendizaje.

- **ROBOT ROTOIDE (ARTICULADO):** Robot cuya estructura mecánica del brazo comprende tres juntas rotativas (simples).
- **ROBOT VERTEBRAL ("DE SPIN"):** Robot cuya estructura mecánica del brazo está constituida de uno o más conjuntos de celdas, cada una de éstas "pivotando" alrededor del centro de la precedente.
- **ROBÓTICA:** Diseño, construcción y aplicación de los robots.
- **SISTEMA DE COORDENADAS DE LA BASE:** Sistema de coordenadas con respecto a la base del robot.
- **SISTEMA DE COORDENADAS DE LA INTERFASE MECÁNICA:** Sistema de coordenadas con respecto a la interfase mecánica.
- **SISTEMA DE COORDENADAS DE LAS JUNTAS:** Sistema de coordenadas con respecto a los ejes de las juntas. Estas coordenadas son definidas de acuerdo con las de la junta precedente, o a otro sistema de coordenadas.
- **SISTEMA DE COORDENADAS UNIVERSAL:** Un sistema de coordenadas relativo a la tierra o al piso del taller.
- **SISTEMA ROBOTIZADO:** Un sistema robotizado comprende:
 - El robot (hardware y software), consistente en el manipulador, móvil o no; en el suministro de potencia y en el sistema de control.
 - El dispositivo terminal o los dispositivos terminales.
 - Todos los equipos, los dispositivos o los sensores necesarios para que el robot lleve a cabo su tarea.
 - Todas las interfases de comunicación que pongan en operación y controlen el robot, equipos o sensores, mientras que estos dispositivos periféricos son supervisados por el sistema de control del robot.

- **SUPERFICIE DE FIJACIÓN DE LA BASE:** Superficie de conexión entre el robot y su periférico y sobre la cual es definido el sistema de coordenadas de la base.
- **TIEMPO DE CICLO** Tiempo requerido para llevar a cabo un ciclo.
- **TIEMPOS MÍNIMOS DE DESPLAZAMIENTO:** Tiempos transcurridos para recorrer una distancia o un ángulo predeterminado entre dos estados estacionarios de la interfase mecánica (tiempos de desplazamiento y de orientación, incluyen los tiempos de estabilización).
- **TORQUE MÁXIMO:** Es el valor máximo para el torque (con exclusión de todo efecto inercial) que puede ser aplicado en forma continua a la interfase mecánica, sin deterioro permanente de la mecánica del robot.
- **TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS:** El proceso de cambiar las coordenadas de una pose desde un sistema de coordenadas a otro.
- **TRAYECTORIA:** Trayectoria recorrida en el espacio por todo punto del robot o de la pieza y a lo largo de la cual la orientación del dispositivo terminal puede ser variable o no.
- **VELOCIDAD DE EJE INDIVIDUAL:** Velocidad de desplazamiento (o de posición) con el movimiento de un solo eje.
- **VELOCIDAD DE TRAYECTORIA:** Velocidad a lo largo de una trayectoria específica, obtenida por control de trayectoria continua que genera los componentes de velocidad a lo largo de varios ejes.
- **VELOCIDAD:** Desplazamiento cubierto por el punto bajo consideración por unidad de tiempo.

RESUMEN

TITULO:

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN ROBÓTICA INDUSTRIAL ¹

AUTORES²: PEDRO MIGUEL ARDILA PIMIENTO
DIANA CAROLINA DULCEY DIAZ
CRISTIAN URIEL MENDOZA CASTELLANOS
YEISSON RICARDO MENDOZA CASTELLANOS

PALABRAS CLAVE: Robótica industrial, manipulador, robot, control de trayectoria, control de fuerza, programación de robots.

DESCRIPCIÓN:

La robótica es una ciencia que reúne diversos campos de la ingeniería como lo son la mecánica, la electrónica, la inteligencia artificial y la ingeniería de control, entre otras, por esta razón es objeto de estudio en el presente trabajo de grado. La robótica industrial ha sido una de las aplicaciones de la robótica más significativas en la historia de la automatización, disminuyendo tiempos y costos de fabricación, logrando productos de calidad garantizada sin las desventajas de operarios humanos, los cuales se cansan y generan irregularidades en la línea de producción.

El estudio de la robótica es una de las ramas más grandes de investigación en diversas universidades alrededor del mundo, por tanto la necesidad que se indague más en esta ciencia en la universidad industrial de Santander se hace plausible, en consecuencia la investigación que se llevó a cabo es uno de los primeros pasos de esta universidad hacia el desarrollo de esta línea de investigación.

El seminario de investigación en robótica industrial se realiza para profundizar en este tema, generando un documento que sirva de base en el estudio de la cinemática, dinámica y control de manipuladores robóticos e implementar en próximos años una materia a nivel de pregrado con este contenido en la escuela de ingeniería mecánica.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: MSc Carlos Borrás Pinilla

ABSTRACT

TITLE:

SEMINARY OF INVESTIGATION IN INDUSTRIAL ROBOTIC³

AUTHORS⁴: PEDRO MIGUEL ARDILA PIMIENTO
DIANA CAROLINA DULCEY DIAZ
CRISTIAN URIEL MENDOZA CASTELLANOS
YEISSON RICARDO MENDOZA CASTELLANOS

KEY WORDS: Industrial robotic, manipulator, robot, move control, force control, robot programming.

DESCRIPTION:

Robotics is a science that combines a variety of engineering fields, such as mechanics, electronics, artificial intelligence, control engineering, among others, for this reason is being studied in this thesis. The robotics industry has been one of the applications of robotics more significant in the history of automation, reducing manufacturing time and costs, making high quality products guaranteed without the disadvantages of human operators, who get tired and cause irregularities in the production line.

The study of robotics is one of the largest branches of research at universities around the world, therefore the need to inquire more on this science in the Universidad Industrial de Santander is plausible, therefore this thesis is one of the first steps of the university towards the development of this research.

seminary of investigation in industrial robotic is done to develop this theme, generating a document as a basis in the study of kinematics, dynamics and control of robotic manipulators and implement in coming years a subject at the undergraduate level in the school of mechanical engineering.

³ Thesis

⁴ Physical-Mechanical Engineer Faculty , Mechanicla Engineer School, Director: MSc Carlos Borrás Pinilla

INTRODUCCIÓN

La evolución de la industria apunta hacia el mejoramiento y optimización de los procesos de producción, lo cual implica el buen desarrollo de la tecnología y la implementación de la misma. Una de dichas tecnologías es la robótica, la cual juega un papel fundamental en el desarrollo y optimización de los procesos productivos a nivel mundial ya que los manipuladores son sistemas confiables y flexibles que permiten precisión en las operaciones, garantizando productos de alta calidad. La flexibilidad de los sistemas robóticos modernos permite la adaptación de los manipuladores a diversas tareas sin necesidad de cambiar el sistema completo. Otras ventajas de la implementación de los robots en procesos industriales, son la calidad de los productos debido al control que existe en esta tecnología, y la seguridad ya que un manipulador puede encargarse de la realización de tareas que representen un peligro potencial o inminente para las personas o equipo. Es por esto que los robots hacen parte fundamental de la industria automotriz, nuclear, espacial, manufacturera entre otros.

La Universidad Industrial de Santander es una institución cuyo objetivo fundamental es fomentar el desarrollo de la región y del país por medio de la formación de profesionales competentes y capaces en los campos de formación que en ésta se manejan. Su misión implica la construcción, aplicación y divulgación del conocimiento científico, por lo que la investigación en el área de la robótica industrial, busca aportar para el cumplimiento de dicha misión, indagando y explorando en diversos campos con el fin de implementar nuevos programas que propendan por el continuo aumento de la calidad de la producción intelectual.

Con este proyecto de grado se buscó generar una base metodológica común para el seminario de investigación en robótica industrial, de forma que permita desarrollar esta línea de investigación en la Universidad Industrial de Santander y crear a futuro, una asignatura dirigida a los estudiantes de pregrado de la escuela de Ingeniería

Mecánica, no obstante debido a lo extenso y complejo del tema, es válido aclarar que este busca dar solo las bases conceptuales y no enfatizar o profundizar en cada uno de los tópicos.

Parte I

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

La Universidad Industrial de Santander brinda la opción de realizar un seminario de investigación, llamado también seminario alemán, desarrollado en la Universidad de Gottingen que Consiste en estudiar, discutir e intercambiar experiencias acerca de un tema en particular, en un grupo, en el cual sus participantes, se intercomunican exponiendo dicho tema, complementándolo, evaluándolo, aportando entre todos, sacando conclusiones y planteando nuevos interrogantes permitiendo que todo ello quede en memoria escritas. El grupo del seminario debe estar acompañado y guiado por un director que a partir de su experiencia y vasto conocimiento sobre el tema central permita cumplir los objetivos que se establezcan alcanzar.

El objetivo principal de esta actividad académica, es formar a los participantes para la investigación científica mediante el desarrollo de habilidades específicas aplicadas al

asumir los diferentes roles dentro del seminario. Dichas habilidades están orientadas a desarrollar la capacidad de lector crítico de resultados de investigación en cualquiera de las áreas del conocimiento, a fortalecer la capacidad de observar e identificar los problemas presentes en tópicos bajo análisis, a buscar respuestas a preguntas claves y sustentarlas teórica y metodológicamente en forma verbal y por escrito, y a identificar las relaciones del problema objeto de estudio con el contexto económico, político o social, a fin de enriquecer con una mirada integral, el conocimiento para el grupo de estudiantes.

El seminario de investigación, como herramienta para el desarrollo integral, presenta entre otras ventajas, adquirir el hábito de documentarse acerca del tema bajo estudio, experimentar la eficiencia del trabajo en equipo y usar y dominar distintas herramientas didácticas de apoyo al desarrollo de las sesiones. Para que se realice a buen término el seminario de investigación es importante que prime un ambiente amable y cooperativo, además que exista el diálogo para compartir los conocimientos adquiridos; los participantes deben tener una alta responsabilidad que les permita preparar de manera óptima cada sesión para lograr el aprendizaje esperado.

1.1. ORGANIZACIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

El Seminario de Investigación se compone de las siguientes actividades: la Relatoría, la Correlatoría, la Discusión y el Protocolo, las cuales deben girar en torno a un tema, del que se desprenden los subtemas a tratar durante las sesiones. Dichas actividades son responsabilidad de los integrantes del grupo, por lo cual a cada uno de ellos es asignado un rol, de carácter rotativo; es así como una persona que en una sesión asume el rol de correlator, en la siguiente puede ser el protocolante, es decir el responsable del protocolo.

Director	Carlos Borrás Pinilla
Participantes.	Pedro Miguel Ardila Pimiento Diana Carolina Dulcey Díaz Cristian Uriel Mendoza Castellanos Yeisson Ricardo Mendoza Castellanos

A los participantes se les asigna un rol diferente para cada sesión. Las sesiones se llevan a cabo en las instalaciones de maestría de la Escuela de Ingeniería Mecánica con asistencia abierta a la comunidad universitaria. El número de sesiones que abordan los temas y subtemas relacionados con el seminario son mostradas en el cuadro 2.1. Las sesiones se programan para una duración de 2 horas.

1.2. TEMA DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

La evolución de la industria apunta hacia el mejoramiento y optimización de los procesos de producción, lo cual implica el buen desarrollo e implementación de la tecnología. Una de dichas tecnologías es la robótica, la cual juega un papel fundamental en el desarrollo y optimización de los procesos productivos a nivel mundial ya que los manipuladores son sistemas confiables y flexibles que permiten precisión en las operaciones. La robótica en la industria busca reducir el número de horas de trabajo hombre gracias a que los manipuladores sustituyen ventajosamente a la mano de obra humana en las tareas repetitivas y en forma general al realizar trabajos en serie, con lo cual garantiza una velocidad de producción más elevada. Además que la flexibilidad de los sistemas robotizados modernos permiten la adaptación de los manipuladores a diversas tareas sin necesidad cambiar el sistema completo. Otras ventajas de la implementación de los robots en procesos industriales son la calidad de los productos debido al control

que existe en esta tecnología, y la seguridad ya que un manipulador puede encargarse de la realización de tareas que representen un peligro potencial o inminente para las personas o equipo. Es por esto que los robots hacen parte fundamental de la industria automotriz, nuclear, espacial, manufacturera entre otras.

Debido a lo anterior, el seminario de investigación se centra en el estudio de sistemas robóticos industriales, enfocado en su movimiento, control y sus aplicaciones.

1.3. DIRECCIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN.

La dirección del Seminario de Investigación en robótica industrial estuvo a cargo del profesor Carlos Borrás Pinillas, quien tiene la experiencia y conocimiento necesario para orientar el trabajo hacia los objetivos propuestos.

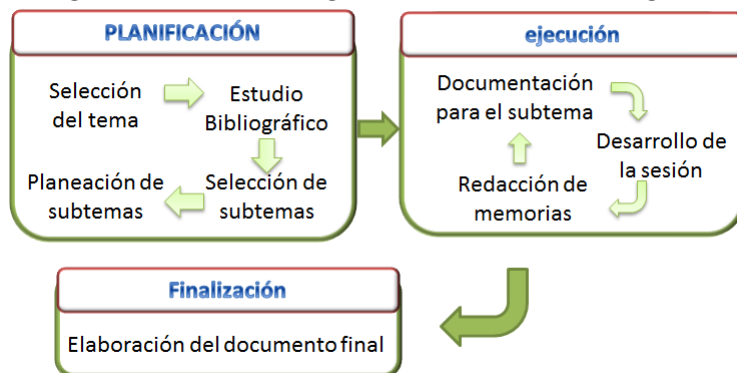
Cuadro 1.1: Formación Ing. Carlos Borrás Pinilla

Formación académica	
Doctorado	The University Of Oklahoma Aerospace And Mechanical Engineering Doctor Of Philosophy In Mechanical Engineering Micro Peristaltic Pump in Single Chip
Maestría/Magister	University Of Oklahoma Master Of Science In Mechanical Engineering Pattern Recognition of Hydraulic Backlash using Neural Network
Especialización	Universidad Industrial de Santander – UIS Especialización En Gerencia de Mantenimiento Mantenimiento Total Productivo Una Aproximación Colombiana
Perfeccionamiento	Japan International Cooperative Agency Oil Hydraulic And It's Application Fluid Power NO MONOGRAFIA. PROYECTOS DE ESTUDIOS EN FLUID POWER.
Pregrado/Universitario	Universidad Industrial de Santander – UIS Ingeniería Mecánica DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ELECTROVALVULAS HYDRAULICAS Y NEUMATICAS

1.4. METODOLOGÍA DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN.

Con base en los lineamientos establecidos por el modelo del Seminario Alemán y con el propósito de garantizar la fluidez de las sesiones y el cumplimiento de los objetivos planteados para el seminario, la metodología a desarrollar se esquematiza en la figura 1.1

Figura 1.1: Metodología seminario de investigación



CAPÍTULO 2

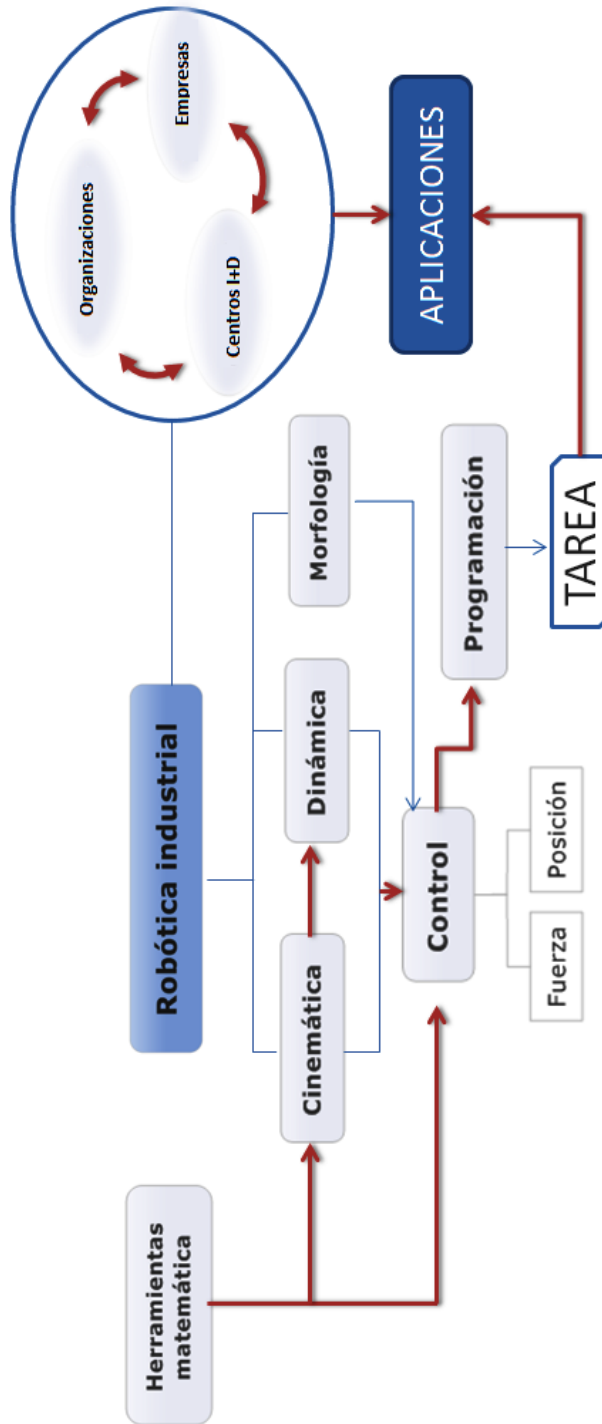
PLANEACIÓN

En esta fase se fijan los lineamientos bajos los cuales se desarrollará el seminario, se concreta que alcance tendrá y los resultados que se esperan obtener. El alcance del seminario depende del grado de profundidad del estudio, la formación de los participantes, la orientación y perfil del director, por lo tanto en esta etapa se incluye el estudio bibliográfico; los temas, subtemas; y la planeación y estructura de las sesiones.

Los alcances y objetivos del seminario son:

- Realizar un seminario de investigación en robótica industrial mediante la discusión crítica, propositiva y argumentativa de acuerdo a los lineamientos establecidos por la vicerrectoría académica en el acuerdo N° 004 de 2007 artículo 4 para los seminarios de investigación.
- Elaborar un documento síntesis original donde se recopilen los resultados de la investigación y la discusión realizada en cada sesión a partir de los resúmenes, las relatorías compiladas y los protocolos en el seminario de investigación de acuerdo con los siguientes temas :

Figura 2.1: Esquema general de la robótica industrial



1. Introducción
2. Estado del arte
3. Morfología.
4. Descripciones espaciales y transformaciones
5. Cinemática de manipuladores.
6. Dinámica de manipuladores.
7. Generación de trayectorias.
8. Control de movimiento.
9. Control de fuerza de manipuladores.
10. Programación de robots.
11. Tendencias y futuro de la robótica industrial

- Cumplir con los roles asignados a cada integrante del seminario de investigación.
- Elaborar presentaciones en PowerPoint y documentos síntesis en Latex de cada uno de los temas investigados, obtenidos de los las relatorías y los protocolos recopilados de cada sesión.
- Desarrollar programas en Matlab o Simulink alusivos a los temas que se encuentran en el temario del seminario.
- Realizar un taller práctico demostrativo mediante el uso de un modelo de manipulador con un mínimo de 3 grados de libertad.

2.1. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Para fundamentar el seminario inicialmente se reseñaron unas referencias bibliográficas que proporcionan los conocimientos básicos para el estudio de la robótica industrial. La bibliografía que se utilizó antes de dar comienzo al seminario fue:

- BARRIENTOS, Antonio. Fundamentos de Robótica. McGraw-Hill. Segunda Edición, 2007. Este texto permite una instrucción acerca de los aspectos mecánicos, las herramientas informáticas que permiten el control, la programación y el desarrollo de un robot, además expone las aplicaciones y beneficios que se obtienen con la utilización de la robótica industrial. También proporciona instrucciones, ejemplos y ejercicios de aplicación sobre la toolbox ROBOTIC de MATLAB.
- CRAIG, John. Introducción a la Robótica. Prentice Hall . Tercera Edición, 2006. Este libro ofrece información sobre la cinemática y dinámica de los actuadores robóticos, esta fuente bibliográfica es de gran importancia por sus capítulo dedicado al estudio de la generación de trayectorias, el control de movimiento, control de fuerza y lenguajes y sistemas de programación de robots. Consta también de una serie de ejercicios para desarrollar con la herramienta MATLAB.
- ASADA, H., SLOTINE, J.E. Robot Analysis and Control. John Wiley & Sons, Inc. 1986. Libro basado en el primer año del curso de robótica del M.I.T dedica sus páginas al estudio de las bases científicas en los aspectos centrales de la manipulación robótica. Cuenta con una amplia variedad de ejercicios de los cuales gran parte se han adaptado satisfactoriamente a la practica industrial o a temas de investigación avanzada.
- KELLY R., SANTIBANEZ V., LORIA A. Control of Robot Manipulators in Joint Space, Springer-Verlag. 2005. Un libro que suministra información muy completa en control de manipuladores robóticos, dando una introducción a los principales conceptos matemáticos y herramientas necesarias para el estudio del control robótico. Esta dividido entre 4 secciones en las cuales se aprecia una parte preliminar en forma de introducción, seguida por el control de posición, control de movimiento y finalizando con algunos temas avanzados. Es un libro dirigido a estudiantes en último año de pregrado o primer año de maestría.
- OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Prentice Hall. Cuarta Edi-

ción, 2003. Este libro da un tratamiento completo sobre el análisis y diseño de sistemas continuos de control de tiempo, el cual fue escrito para estudiantes de ingeniería de alto nivel. Se integra MATLAB en el texto, utilizando el programa para resolver todos los problemas, incluye material introductorio como , la transformación de Laplace de base, modelación matemática de sistemas dinámicos, la transferencia de modelos de función, estado de modelos espaciales, análisis de la respuesta transitoria de primera y sistemas de segundo orden, las acciones básicas de control, la raíz del análisis de lugar, el diseño y técnicas de compensación de frecuencia utilizando métodos de respuesta, y aplicaciones de análisis de estabilidad de Lyapunov para el diseño. En un apéndice se suministra el material de referencia necesario para el uso de MATLAB. Incluye gráficos, tablas, ecuaciones y ejemplos.

- SILICIANO, Bruno., KATHIB, Oussama. Springer Handbook of Robotics. Springer, 2008. Este texto condensa información no solo sobre robótica industrial sino sobre todo lo referente al campo de la robótica , cuenta con el aporte de las personas destacadas y reconocidas en la robótica actual. Está separado en secciones, empezando por fundamentos de robótica, que comprende la cinemática, cinética y control, seguida por estructura robótica, que trae criterios de diseño y evaluación, manipuladores redundantes, robots con partes flexibles, hasta llegar a la robótica y su interacción con la humanidad.
- KLAFTER, Richard D. Engineering an Integrated Approach. Prentice Hall. 1989. Además de tener la información básica sobre el análisis cinemático y dinámico, este libro contiene una buena investigación sobre los dispositivos sensoriales de los robots y consideraciones computacionales para los sistemas robóticos. También, presenta ejemplos de diseño y habla sobre las especificaciones comerciales y el proceso de selección de un motor en el diseño de una junta robótica.
- N. G. Hockstein, C. G. Gourin, R. A. Faust, D. J. Terris. Una historia de Robots:

De la Ciencia Ficción a la Robótica Quirúrgica. Springer, London, 17 de marzo 2007. Este paper contiene una breve visión histórica de la robótica desde sus inicios hasta hoy en día, centrándose en los desarrollos quirúrgicos. Presenta un panorama de varios dispositivos usados en esta rama y muestra algunos avances futuros.

- MITSI, S., BOUZAKIS, D. MANSOUR, G.,SAGRIS,D.,MALIARIS, G. Programación off-line de un robot industrial para manufactura. Aristoteles University of Thessaloniki, London, 10 de septiembre de 2004. Este artículo presenta consideraciones y algunas aplicaciones sobre la programación off-line aplicada a sistemas robóticos de manufactura, hablando sobre tópicos tales como cinemática, simulación grafica, planeación de movimiento entre otros.
- DONG, Dong-Sam.,GU, Young-Do. Sistemas Robótico Industrial con Control de Lógica Difusa y Redes Neuronales. Korea Maritime University. Busan, korea, 23 de mayo de 1997. Artículo donde se describe un estudio al control con redes neuronales y lógica difusa aplicado a sistemas robóticos industriales. En su contenido se encuentra el modelamiento del control de lógica difusa, algoritmos y simulación.
- RONALD, G.K.M., AARTS, Ben J.B., JONGER, ROB. Realistic Dynamics Simulation of an Industrial Robot With Joint Friction. Informatics in Control, Automation and Robotics I, 187-194. Netherlands. 2006. Este paper presenta una simulación dinámica realista de movimiento en lazo cerrado de un manipulador rígido de 6 GDL con fricción en las juntas, dando un tratamiento de la dinámica de un manipulador robótico en un caso complejo que posteriormente servirá para poder desarrollar modelamientos más complejos en futuros ejercicios que se presentaran a lo largo del seminario.

Luego de adquiridos los conceptos básicos sobre el tema se programa los temas y subtemas del seminario, relacionada en la tabla 2.1

Cuadro 2.1: Temas y subtemas

Tema	Subtema
INTRODUCCIÓN	Antecedentes.
	El nacimiento de la robótica
	Filosofía de la robótica
	Definición de robot
	Definición de robot industrial
	Clasificación de los robots
	Aplicaciones
	Mercado y tendencias de la robótica
	Mercado de los robots de servicio
	Células de trabajo
	Justificación económica de la implementación de la robótica
	Métodos de análisis económico
ESTADO DEL ARTE	Organizaciones.
	Empresas e industrias
	Centros de investigación y desarrollo
MORFOLOGÍA	Estructura mecánica de un robot.
	Actuadores
	Servomotores
	Sensores
	Efectores finales
DESCRIPCIONES/ TRANSFORMACIONES ESPACIALES	Representación de la posición.
	Representación de la orientación
	Matriz de transformación homogénea
	Nomenclatura
Continúa en la página siguiente	

Cuadro 2.1 – Continuación

Tema	Subtema
	Relación y comparación entre los distintos métodos de localización espacial
CINEMÁTICA DE MANIPULADORES	Cinemática directa.
	Cinemática inversa
	Matriz Jacobiana
DINÁMICA DE MANIPULADORES	Aceleración del cuerpo rígido.
	Distribución de la masa
	Ecuación de Newton
	Ecuación de Euler
	Modelo dinámico por formulación Langrangiana
	Modelo dinámico de un robot manipulador mediante la formulación de Newton-Euler
	Solución del modelo dinámico en espacio de estado
	Modelo dinámico en el espacio de la tarea
GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS	Tipos de trayectoria.
	Consideraciones para la planificación y generación de trayectorias de articulación
	Representación en el espacio de articulación con interpolación de trayectorias
	Muestreo de trayectorias en el espacio cartesiano
	Problemas geométricos con las rutas cartesianas
	Generación de rutas en tiempo de ejecución
	Generación de trayectorias sin colisiones
CONTROL DE TRAYECTORIAS	Control lineal de manipuladores.
	Control no lineal de manipuladores
Continúa en la pagina siguiente	

Cuadro 2.1 – Continuación

Tema	Subtema
	Aspectos prácticos
CONTROL DE FUERZA EN MANIPULADORES	El paso de control de movimiento al control de interacción.
	Medición de fuerza
	Sistemas Hápticos
	Control de fuerza directo e indirecto
	Modelamiento del entorno
	Control de esfuerzos
	Control híbrido posición/fuerza
	Control de impedancia
	Esquemas de control de robot industrial en la actualidad
	Aplicaciones
PROGRAMACIÓN DE ROBOTS INDUSTRIALES	Métodos de programación de robots.
	Requerimientos de un sistema de robots
	Especificación de movimientos en robots manipuladores
	Características básicas de los lenguajes de programación
	Problemas peculiares para los lenguajes de programación en robots
	Sistemas de programación fuera de línea (OLP)
TÓPICOS ESPECIALES	Inteligencia artificial.
	Redes neuronales artificiales
	Nanorobótica
	Robótica y visión artificial
	Sistemas de teleoperación robótica
	Biorrobótica)
	Robots redundantes

CAPÍTULO 3

EJECUCIÓN

En esta fase se realizó lo establecido en la planeación; la elaboración del documento por parte del relator señalado en cada subtema y el desarrollo de la sesión respectiva. En la tabla 3.1 se presenta dicha asignación de temas y los diferentes roles asignados para cada uno de los integrantes del grupo; tales roles son: Relator (R), correlator (C), protocolante (P), discursor (D) y apertura (A).

El protocolo para realizar cada sesión está compuesto de los siguientes pasos:

- Establecer un acta que tiene un número de registro, fecha, hora, roles, tema desarrollado, observaciones, conclusiones y tareas a realizar.
- Entregar un documento \LaTeX sobre el tema expuesto.
- Almacenar el documento de PowerPoint de la presentación realizada por el relator.



Cuadro 3.1: Asignación de roles para cada una de las sesiones.

Expositor	Carlos	Pedro				Yeisson				Cristian				Diana			
	Borras	Ardila				Mendoza				Mendoza				Dulcey			
Tema	A	R	C	P	D	R	C	P	D	R	C	P	D	R	C	P	D
1	X	X							X		X						X
2	X			X			X			X			X				
3	X				X			X						X	X		
4	X		X			X						X					X
5	X				X		X					X		X			
6	X			X		X					X						X
7	X	X						X					X		X		
8	X		X						X	X							X
9	X			X		X							X		X		
10	X		X						X			X		X			
11	X	X						X			X						X

3.1. ACTAS

Las actas son la comprobación escrita de lo que se analizó y desarrolló en cada sesión del seminario de una forma clara y concisa. Este es de gran importancia ya que es un insumo para la elaboración del informe final. Esta tiene un número de registro, fecha, hora, roles, tema desarrollado, desarrollo de la discusión, aportes de los participantes, preguntas, complementos sobre el tema, observaciones, conclusiones y tareas a realizar. El acta (Figura3.1) fue revisada por el director de proyecto el cual aportó para su mejoría.

Figura 3.1: Ejemplo de un acta.

 	
SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN ROBÓTICA INDUSTRIAL	
Fecha: 13 DE MAYO DE 2011	Hora: 11:00 a.m.
RELATOR: PEDRO MIGUEL ARDILA PIMENTO. CORRELATOR: CRISTIAN URIEL MENDOZA CASTELLANOS. PROTOCOLANTE: DIANA CAROLINA DULCEY DIAZ. DISCUSIÓN: YEIBSON RICARDO MENDOZA CASTELLANOS.	
DIRECTOR: ING. CARLOS BORRAS PINILLA	
TEMA: HISTORIA DE LA ROBÓTICA	
DESARROLLO DEL TEMA: <ul style="list-style-type: none"> • El tema inicio con una introducción acerca de la necesidad de los seres humanos de crear máquinas autómatas capaces de realizar tareas semejantes a las del hombre. • Continuando se realizó un paseo por la historia donde desde los antiguos griegos se hablaba de sistemas autómatas, pasando también por la edad media y el renacimiento. • Además se hizo una reseña histórica sobre el constante desarrollo y evolución que ha tenido la robótica desde los 80 hasta nuestros tiempos enunciando los principales logros en este tema. • La filosofía de la robótica es uno de los principales temas ya que este es la base literaria principal del cual los seres humanos se han inspirado para la creación de robots. • Ya entendiéndonos más en el tema definimos y clasificamos a un robot como un medio mecánico autónomo capaz de desarrollar diversas tareas donde puede ser un manipulador o un robot como tal; también es de importancia enunciar que las diferentes organizaciones a nivel mundial tales como la IFR, RIA, IRO, AFNOR, etc. Clasifican y definen a los robots desde diferentes puntos de vista. • Se hablo de las aplicaciones industriales que tiene un robot como soldadura, aplicación de material, procesos químicos, entre otros. 	
<ul style="list-style-type: none"> • Continuando se mostro como con las investigaciones y la evolución de la robótica la industria tubo un cambio importante en sus producción realizando gran cantidad de productos en poco tiempo y de buena calidad y también como por cause a la crisis económica de 2009 la robótica bajo su nivel de producción ya que las empresas tuvieron que recortar costos extras para innovar en sus plantas hasta que otra vez llegaran a una estabilidad económica. • Luego se demostró como es posible crear células de trabajo en su empresa para tener una línea de producción grande y de calidad a base de tecnología robótica teniendo encuenta varios parámetros tales como: la disposición de la célula, el control y lo más importante la justificación económica del ensamble de la célula. • Finalizando se hizo una breve introducción al tema de la sesión, morfología. 	
OBSERVACIONES: <ul style="list-style-type: none"> • La primera observación realizada por el director de proyecto fue el cambio del fondo de las diapositivas ya que este debe tener los logos representativos originales tanto de la universidad (UIS) como del grupo de investigación (DICBOT). • Todas las imágenes deben ir con su respectiva fuente de referencia. • Reorganizar la información en los temas de definición, clasificación de un robot y en el tema de morfología de robots por medio de mapas conceptuales y esquemas. • Realizar una profundización en el tema de mercado y tendencia de los robots. 	
CONCLUSIONES: La información recopilada fue la adecuada pero se debe reorganizar muy bien la información.	
PRÓXIMA TAREA A DESARROLLAR: Corregir el documento de la primera sesión y sus dispositivos, incluyendo las diferentes observaciones anteriormente mencionadas.	
_____ ING. CARLOS BORRAS PINILLA, ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.	

3.2. TALLERES DE APLICACIÓN

Se desarrollaron talleres aplicativos en la herramienta computacional MATLAB y/o SIMULINK con el fin de aterrizar y afianzar los conceptos discutidos en las sesiones. Dichos talleres fueron validados por las funciones de la Toolbox ROBOT para MATLAB/SIMULINK. Los enunciados, códigos y resultados son mostrados en el anexo A. Dichos talleres servirán como una herramienta para el aprendizaje de los interesados en el área de la robótica industrial, además de ser un recurso electrónico de gran potencial que servirá como base técnica para estudios, análisis e implementación de un sistema robotizado.

Se adquirió el robot didáctico AL5B de 5 grados de libertad (figura tal) de la compañía Lynxmotion accionado por servomotores y gobernado por la tarjeta controladora SSC-32 de la misma empresa, al cual se le añadió un sexto grado de libertad al brindarle

la rotación de la muñeca. Las especificaciones técnicas se anexan al final del documento (Anexo B).

El robot AL5B, figura 3.2, fue caso de estudio a lo largo del seminario, aplicando varias de los conceptos discutidos en la sesiones. En el cuadro3.2 se muestra una relación de los talleres realizados con respecto al tema correspondiente y a su implementación en robot Lynxmotion AL5B.

Figura 3.2: Robot AL5B Lynxmotion



Cuadro 3.2: Talleres de aplicación

TEMA	TALLER DE APLICACIÓN	DESCRIPCION
DESCRIPCIONES Y TRANSFORMACIONES ESPACIALES	Múltiples rotaciones	Rotacion multiple de un sistema de coordenadas
	Múltiples transformaciones	Múltiples traslaciones usando matrices de transformacion homogenas y cuaternios
CINEMÁTICA	cinemática directa	cinematica directa aplicada al robot didactico AL5B: Metodo geometrico
	cinemática inversa	cinematica inversa aplicada al robot didactico AL5B: Metodo geometrico
DINÁMICA	Modelo dinámico método Lagrange-Euler	Obtencion del modelo dinamico de un robot polar de 2 DOF y para el robot articulado AL5B mediante el metodo lagange-Euler
	Modelo dinámico método Newton-Euler	Obtención del modelo dinámico del robot articulado AL5B mediante el método Newton-Euler
GENERACIÓN DE TRAYECTORIA	Spline cubico	implementación de los métodos de generación de trayectoria, cinemática inversa y directa para el movimiento del robot articulado AL5B de 6 DOF
	curvas de vézier	
	seguimiento de trayectoria en espiral	
	seguimiento de trayectoria en line recta	
	Tarea de pick and place	
CONTROL DE TRAYECTORIA	control monoarticular	Control monoarticular del robot AL5B en Matlab

CAPÍTULO 4

FINALIZACIÓN

Finalizadas las sesiones se compilo una cantidad interesante de experiencias, información, documentos y conclusiones acerca de la robótica industrial. A continuación se describen las características de la utilidad del seminario.

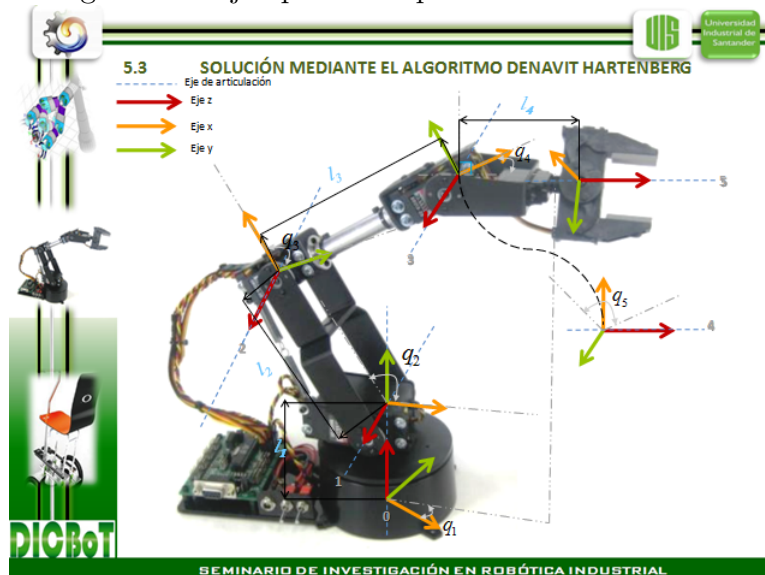
4.1. PRESENTACIONES

Se realiza para cada tema y subtema una serie de diapositivas que sirven como guía al expositor, y que dan orden lógico a la presentación y favorecen la comprensión del auditorio. Las presentaciones fueron hechas en PowerPoint con un ambiente representativo que garantizó la interiorización de los temas. Las diapositivas presentan los integrantes del seminario, institución, fecha, una introducción del tema estudiado, contenido, referencias bibliográficas y conclusiones. La figura 4.1 es la diapositiva de inicio en todas las sesiones y la figura 4.2 es un ejemplo de las de las diapositivas utilizadas.

Figura 4.1: Diapositiva de inicio de sesión.



Figura 4.2: Ejemplo de diapositiva en las sesiones.



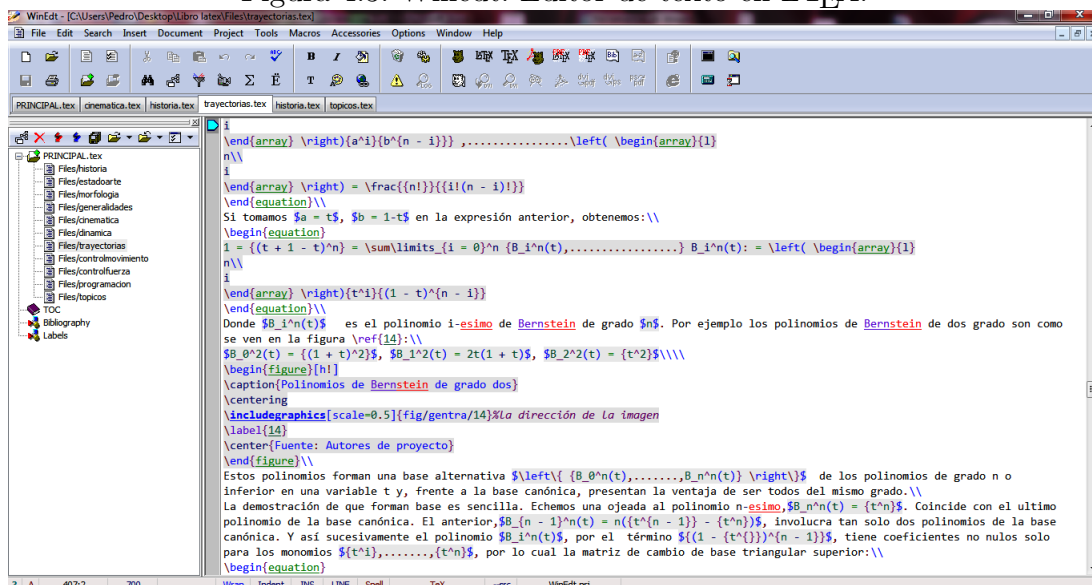
4.2. DOCUMENTO

El documento fue redactado según la norma NTC 1486. Este es el resultado de la apropiación de los conceptos básicos, la interpretación de las metodologías para el estudio y análisis de sistemas robóticos, la abstracción de los resultados entregados por las

publicaciones internacionales y la síntesis de los análisis en cada una de las sesiones.

- El texto fue redactado en WinEdt, el cual es un editor de texto potente y versátil para Windows con una fuerte predisposición hacia la creación de documentos L^AT_EX.
- L^AT_EX es un sistema de composición de textos que está formado mayoritariamente por órdenes construidas a partir de comandos de texto (en este caso por WinEdt), un lenguaje de bajo nivel, en el sentido de que sus acciones últimas son muy elementales, pero con la ventaja añadida de poder aumentar las capacidades utilizando comandos propios del texto. (figura 4.3)

Figura 4.3: WinEdt: Editor de texto en L^AT_EX.



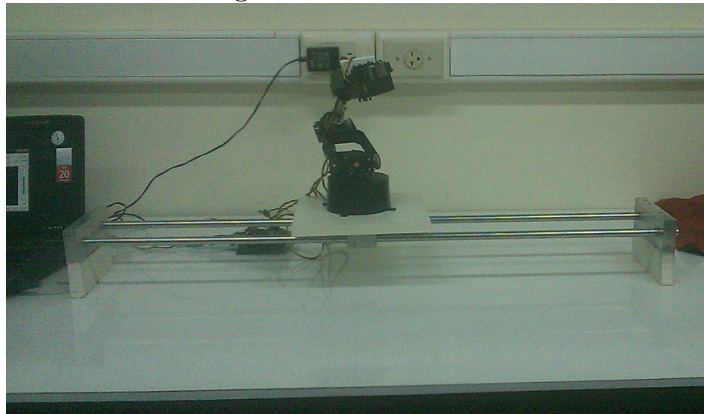
4.3. TALLERES

Los talleres demostrativos fueron realizados en su totalidad, mostrando una aplicación didáctica de los conceptos básicos de la robótica aplicados a un manipulador de seis grados de libertad, accionado por servomotores, en una celda de trabajo. Dichos talleres servirán como herramienta de apoyo para los interesados en el estudio y análisis de robots manipuladores industriales.

El robot didáctico AL5B fue el elemento de estudio a lo largo del seminario y los talleres en MATLAB fueron dirigidos al análisis de dicho manipulador. La aplicación práctica de los conceptos vistos permitió un mejor entendimiento del tema y desarrollo de las actividades programadas.

Finalmente, se aportó a la construcción de la base móvil (figura 4.4), para facilitar la implementación de un sistema motriz y posterior control, añadiéndole un séptimo grado de libertad.

Figura 4.4: Base móvil



Como resultado se presentaron talleres alusivos a 5 temas en específico según lo planeado, los cuales son presentados en detalle en los anexos A y B.

Parte II

MEMORIAS Y RESULTADOS

CAPÍTULO 5

INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA

El ser humano lleva siglos divagando con la creación de máquinas autónomas y manejables, capaces de llevar a cabo los trabajos más rigurosos. A finales del siglo XX ese sueño comenzó a ser real. Los robots ya han demostrado ser excelentes sustitutos de los humanos para llevar a cabo tareas repetitivas que no requieran capacidad de improvisación. Ya hay numerosos robots trabajando en minas y excavaciones petrolíferas, fabricando bienes de consumo en cadenas de montaje, explorando el espacio y combatiendo en guerras.

Una ventaja para las empresas es que los humanos necesitan descansos, salarios, comida, dormir, y una área segura para trabajar, los robots no. La fatiga y aburrimiento de los humanos afectan directamente a la producción de una compañía, los robots nunca se aburren por lo tanto su trabajo va a ser el mismo desde que abra la compañía hasta su cierre o puede trabajar las 24 horas dependiendo del sistema de productividad empleado.

La robótica es un concepto de dominio notorio. La mayor parte de la gente tiene una idea de lo que es la robótica, sabe sus aplicaciones y el potencial que tiene; sin embargo, no conocen el origen de la palabra robot, ni tienen idea del origen de las aplicaciones útiles de la robótica como ciencia.

La robótica como hoy en día se conoce, tiene sus orígenes hace miles de años. Nos apoyaremos en hechos registrados a través de la historia, e iniciaremos aclarando que antiguamente los robots eran conocidos con el nombre de autómatas, y la robótica no era reconocida como ciencia, es más, la palabra robot surgió mucho después del origen de los autómatas.

Algunos autores, consideran que el primer autómata en toda la historia fue Adán creado por Dios. De acuerdo a esto, Adán y Eva son los primeros autómatas inteligentes creados, y Dios fue quien los programó y les dio sus primeras instrucciones que debieran de seguir. Dentro de la mitología griega se puede encontrar varios relatos sobre la creación de vida artificial, por ejemplo, Prometeo creó el primer hombre y la primera mujer con barro y animados con el fuego de los cielos. De esta manera nos damos cuenta de que la humanidad tiene la obsesión de crear vida artificial desde el principio de los tiempos. Los hombres creaban autómatas como un pasatiempo, eran creados con el fin de entretener a su dueño. Los materiales que se utilizaban se encontraban al alcance de todo el mundo, como lo son, maderas resistentes, metales como el cobre y cualquier otro material moldeable, que no exigiera de algún tipo de transformación para poder ser utilizado en la creación de los autómatas. Estos primeros autómatas utilizaban, principalmente, la fuerza bruta para poder realizar sus movimientos. A las primeras máquinas herramientas que ayudaron al hombre a facilitarle su trabajo no se les daba el nombre de autómata, sino más bien se les reconocía como artefactos o simples máquinas.

5.1. ANTECEDENTES

A lo largo del desarrollo de la humanidad el hombre siempre ha tenido curiosidad por crear maquinas y dispositivos capaces de parecerse o igualarse, en algunos casos, a las funciones y movimientos de los seres vivos. En la antigua Grecia los mecanismos animados de Herón de Alejandría (85 d. C) y los bizantinos, se fabricaban modelos que se movían hidráulicamente, con dispositivos y palancas que tenían fines para entretener como por ejemplo: el reloj operado por agua de Ctecibius (figura 5.1); ellos tenían una palabra muy importante para denominar a estas maquinas: automatos de donde actualmente se derivó la palabra autómata que significa: máquina que imita la figura y movimiento de un ser animado.

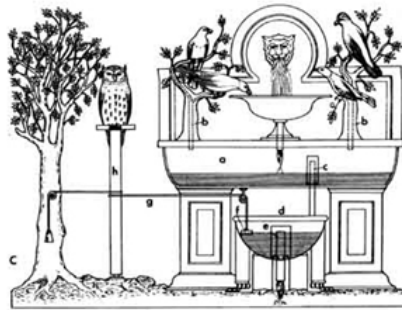
Figura 5.1: Reloj de agua diseñado por Ctecibius (270 D. C)



Fuente: The Industrial Robotics programming. J. Nrberto Pires. 2007

Los árabes (siglos VIII al XV) y su cultura adquirieron y propagaron los conocimientos de los griegos, manipulándolos para realizar mecanismos destinados a la diversión, dando así una aplicación práctica en la vida cotidiana de la realeza; un ejemplo de esto son los diversos sistemas automáticos para beber o lavarse con agua (figura 5.2).

Figura 5.2: Pilas para beber agua.



Fuente: The Industrial Robotics programming. J. Nrberto Pires. 2007

También de esta misma época existen otros autómatas de los que hasta hoy no hay más que referencias poco documentadas, como lo son: el hombre de hierro de Alberto Magno (1204-1282), la cabeza parlante de Roger Bacón (1214-1294). Otro sistema relevante de la época que nunca se encontró el autor de dicha maquina fue el gallo de Estrasburgo (1352), siendo el autómata más antiguo conservado en la actualidad el cuan asía parte del reloj de la torre de la catedral de Estrasburgo donde al dar la hora movía las alas y el pico (figura 5.3).

Figura 5.3: Gallo de Estrasburgo



Fuente: The Industrial Robotics programming. J. Nrberto Pires. 2007

No obstante en este mismo siglo el señor francés Guillaume Boucher diseño una fuente mágica y el alemán John Muller, dos siglos después diseñó un águila metálica que era capaz de volar.

Alguno de los representantes más relevantes en el renacimiento (siglos XV y XVI) se interesan por los ingenios descubiertos y desarrollados por los griegos; estas hazañas fueron realizadas por Leonardo Da Vinci (1452-1519) con su león mecánico, que se abría el pecho con su garra y mostraba el escudo de armas del reino; en España Juanelo Turriano (siglo XVI), realizo el hombre de palo construido para el emperador Carlos V, el cual era un autómata que tena forma de monje, andaba y movía la cabeza, ojos, boca y brazos.

Figura 5.4: Estudio de robots humanoides. Leonardo Da Vinci



Fuente: Evolution of robotic arms. Michael E. Moran. 2007

Entre los siglos XVII y XVIII se crearon algunos ingenios mecánicos que tenían algunas particularidades de los robots actuales. Estos fueron desarrollados en su gran mayoría por grupos dedicados a la relojería; la misión que tenía este tipo de mecanismos era la de entretener a las personas de las cortes y servir de atracción en las fiestas

y/o ferias. Estos sistemas autómatas podían representar figuras humanas, animales o pueblos enteros si era el caso; de acá podemos recalcar a Vaucanson con su pato mecánico y los muñecos de la familia Droz y de Mailladert (figura 5.5). Jacques Vaucanson (1709-1782) es considerado uno de los precursores de la robótica industrial pues es el creador de el primer telar mecánico (figura 5.6), también creo muñecos tal como el flautista (figura 5.7) capaz de tocar varias melodías y el pato que era capaz de graznar, beber, comer, digerir y evacuar.

Figura 5.5: El pato mecánico



Fuente: Robots Y Sistemas Sensoriales. Torres, M. Fernando. 2002

Pierre Jaquet Droz (1721-1790), relojero suizo junto con sus hijos Henri-Louis y Jaquet construyeron diversos prototipos capaces de escribir (1770), dibujar (1772), y tocar diversas melodías en un órgano (1773) (figura 5.8). También algo contemporáneo es la creación de Henry Maillardet que construyo una muñeca capas de dibujar.

Finalizando los siglos XVIII y comienzos del XIX se realizaron nuevas invenciones utilizadas en la industria textil tales como: la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), la

Figura 5.6: Telar De Vaucanson



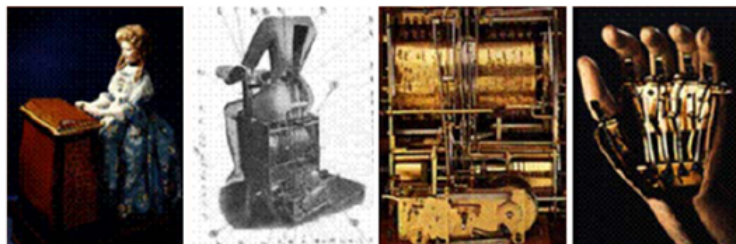
Fuente: Evolution of robotic arms. Michael E. Moran. 2007

Figura 5.7: El flautista



Fuente: Evolution of robotic arms. Michael E. Moran. 2007

Figura 5.8: Muñeca musical. Droz



Fuente: Evolution of robotic arms. Michael E. Moran. 2007

hiladora de Crompton (1779), el telar mecánico de Cartwright (1785) y el telar de Jacquard (1801); donde este último tenía un lenguaje de programación dado por una cinta de papel perforada para especificar las acciones de la máquina. A partir de entonces se empiezan a utilizar los diferentes dispositivos automáticos en la producción dando paso de esta manera a la automatización industrial.

Cuadro 5.1: Invenciones Famosas

AÑO	AUTOR	INVENCIÓN
1352	Desconocido	Gallo de Estrasburgo
1499	L. Da Vinci	León mecánico
1525	J Turriano	Hombre de palo
1738	J de Vaucanson	Flautista, pato, hiladora
1769	W. Von Kempelen	Jugador de ajedrez
1770	Familia Droz	Organista, dibujante
1805	H. Maillardet	Muñeca mecánica Capas de dibujar

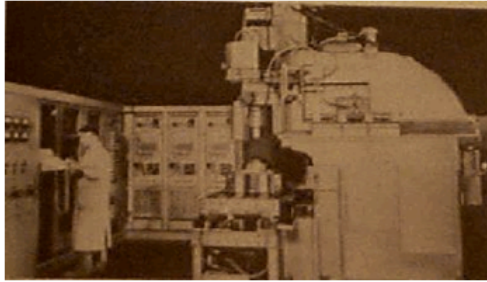
Fuente: Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. 1997.

5.2. EL NACIMIENTO DE LA ROBÓTICA

Dada terminada la segunda guerra mundial (siglo XX), los avances en la electrónica que iban asociados a los descubrimientos en otras técnicas como la mecánica, la hidráulica, neumática y la electricidad, da inicio las primeras máquinas-herramientas de control numérico. Dado a los constantes cambios en las tecnologías se introdujeron controles numéricos a las máquinas, lo cual hizo que estas fueran más flexibles desde el

punto de vista de la reconfiguración mediante sus programas preestablecidos (figura 5.9).

Figura 5.9: Una de las primeras maquinas herramientas



Fuente: www.lerainbow.blogspot.com

Más adelante con la llegada de el primer computador eléctrico, el manejo de las maquinas se hace más sofisticado y preciso; de esta manera las trayectorias o posiciones relativas de la herramienta de la maquina dejan de hacerse mediante la programación punto a punto, y comienza con el uso de un computador al que se le define una serie de parámetros como lo son: tipo de trayectoria (recta o curva), coordenadas de los puntos inicial y final (trayectoria recta) o radio de la trayectoria (trayectoria curva), entre otros. También se empiezan a descubrir más utilidades a la hora de manejar la maquina con una computadoras puesto que se pueden determinar cuándo una maquina debe cambiar la herramienta, o cuales deben ser las condiciones óptimas de trabajo (velocidad de giro, alimentación, otros.). En general la aparición de las computadoras ayudo al desarrollo tecnológico de las maquinas pues conforme la planificación de trayectorias y control el funcionamiento de la misma.

En la segunda mitad del siglo XX se supone el comienzo de la robótica industrial como hoy se conoce, dando así un antes y un después en el desarrollo industrial. Los avances tecnológicos como lo es el computador eléctrico, el control realimentado de accionadores, el uso de sensores, o la transmisión de potencia mediante engranajes fueron de

gran importancia en esos años. La tabla 5.2 muestra la revolución de la robótica con los logros más importantes durante el siglo XX.

Cuadro 5.2: Logros Históricos De La Robótica

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
1948	Goertz desarrolla un manipulador maestro-esclavo de tipo mecánico. Aparece el concepto de tele-operacion y sistemas tele-operados.
1952	El Instituto Tecnológico de Massachussets desarrollo una maquina prototipo de control numérico.
1954	Goertz desarrolla un manipulador maestro-esclavo de tipo eléctrico. Además incorpora a estos sensores de fuerza.
1954	George Devol diseña el primer robot programable, al que el llamo "Dispositivo de transferencia articulada programado."
1957	Cyril Walter Kenward patenta un robot.
1959	Aparece el primer robot comercial, conocido como "Unimate". Este robot estaba controlado por interruptores de fin de carrera y levas, y fue creado a partir del diseño de George Devol por Joseph Engelberger.
1962	Un robot Unimate con transmisión hidráulica que utilizaba control numérico para control del manipulador se instala en la fábrica de General Motors.

Continúa en la página siguiente

Cuadro 5.2 – Continuación de la página anterior

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
1962	H. A. Ernest publica el desarrollo de una mano mecánica, "MH-1", controlada por sensores táctiles.
1963	La American Machine y Foundry Company introducen el robot comercial "VERSATRAN".
1968	El Instituto de Investigación de Stanford desarrolla el robot móvil "Shakey". Este robot estaba dotado de diversos tipos de sensores como cámaras de visión y sensores táctiles, era capaz de moverse y reconocer objetos.
1970	Lunokhod 1, un robot ruso exploró la superficie lunar mediante control remoto desde la tierra.
1971	La Universidad de Stanford crea un pequeño brazo robot con accionamiento eléctrico.
1973	El Instituto de Investigación de Stanford desarrolla el primer lenguaje de programación de robots textual, conocido como WAVE.
1973	Bolles y Paul, del Instituto de Investigación de Stanford, utilizaron un brazo robot controlado por computadora que usaba realimentación visual y de fuerza para el montaje en la industria del automóvil.
1974	Se desarrolla el lenguaje de robots AL. La fusión de ambos lenguajes WAVE+AL daría al lenguaje comercial VAL.
1974	ASEA crea el robot IR6 de accionamiento completamente eléctrico.
Continua en la página siguiente	

Cuadro 5.2 – Continuación de la página anterior

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
1974	Kawasaki instala un robot para soldadura por arco para estructuras de motocicletas.
1974	Cincinnati Milacron crea el robot T3 por computador.
1975	Will y Grossman en IBM desarrollaron un manipulador controlado por computadora que usaba sensores de contacto y fuerza para realizar montajes mecánicos en maquinas de escribir.
1976	La NASA hace uso en el espacio del primer brazo robot.
1978	Se introduce el robot PUMA (maquina universal programada para el ensamblado) en tareas de montaje.
1979	La Universidad de Yamanashi en Japón desarrolla un robot de tipo SCARA destinado al montaje.
1982	IBM introduce el robot RS-1 para montaje.
1985	WASUBOT robot construido por la universidad de Waseda, Tokio, Japón. El WASUBOT podía tocar un instrumento de teclado después de leer una partitura de música.
1993	El robot caminante MARV es desarrollado en la Universidad del Oeste de Inglaterra en Bristol.
1996	Honda Motor Co. Ltda. Crea el robot humanoide P2 capaz de moverse de modo autónomo similar a un ser humano. El robot ASIMO resulto de la evolución de este prototipo.
Continua en la página siguiente	

Cuadro 5.2 – Continuación de la página anterior

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
1997	El robot Mars Phthfinder desarrollado por la NASA explora y recoge muestras de la superficie de Marte.
1999	Sony Corporación construye un robot de entretenimiento AIBO ERS-110 que reproduce el comportamiento de un perro.
2000	Friendly Robotics, compañía de robótica domestica, saca al mercado Robomow RL500, unos cortacéspedes robótico completamente automático.
2001	iRobot Corporation construye un robot domestico multiusos tele operado mediante la web.
2001	Construido por MD. Robotics, una empresa de Canadá, el sistema manipulador para la estación espacial SSMRS, es lanzado al espacio para realizar tareas de ensamblaje en la estación espacial internacional.
2004	Spirit visitó Marte, por primera vez, en 2004 y desde entonces ha regresado al planeta en diversas ocasiones y con diferentes misiones.
2008	Clara Vu, un arquitecto de software de automatización, realiza las pruebas de "Mr. Increíble", un prototipo de generación de robots, en la empresa Groton, el 29 de agosto 2008. Mr. Increíble es un sistema de manejo de contenedores para invernaderos, mover automáticamente las plantas en macetas en una red cada vez mayor a medida que crecen y necesitan más espacio.
Continua en la página siguiente	

Cuadro 5.2 – Continuación de la página anterior

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
2008	El Rover MSL está siendo ensamblado y probado para su lanzamiento en 2011.
2009	Lanzamiento del robot "Big Dog" del ejército de los Estados Unidos de América
2010	El Robonaut 2 también conocido como R2 es un robot astronauta diseñado por la NASA junto con General Motors.

Cabe destacar que los trabajos que condujeron al nacimiento de la robótica industrial tienen como inicio a los manipuladores mecánicos controlados por remoto, que llevo a los robots tele-operados. Estos sistemas de tipo "maestro-esclavo", buscaban imitar movimientos de un operador humano que controlaba sus extremidades; estos eran utilizados para manipular sustancias u objetos peligrosos. Por medio de los trabajos realizados por George Devol, comienzan a surgir los robots programados, donde al fusionar manipuladores mecánicos con técnicas de programación aparecen dispositivos que pueden ser utilizados para diferentes tareas de forma automática, con la posibilidad de ser reprogramadas y reconfiguradas con diferentes herramientas y ser destinadas a distintos ámbitos. Con el paso del tiempo se hizo necesario la sensorización de los robots; por ello comenzaron a producirse las primeras investigaciones y descubrimientos de diferentes tipos de sensores como: táctiles, ópticos, etc.

En cuanto al desarrollo que ha tenido la Universidad Industrial de Santander en la robótica, se han realizados proyectos de diversas aplicaciones en esta ciencia como lo son (tabla 5.3):

Cuadro 5.3: Algunos de los desarrollos realizados en robótica de la UIS

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
2005	PROTOTIPO DE UN ROBOT TIPO PUMA DE SEIS GRADOS DE LIBERTAD / ALFONSO GORKY PENA PARDO, JUAN GUILLERMO PÉREZ SARMIENTO, MARCO FIDEL SUAREZ SAAVEDRA ; DIRECTOR ROBERTO MARTÍNEZ ANGEL
2006	PLANEAMIENTO DE TRAYECTORIAS DE UN ROBOT MÓVIL / DIEGO ALEXANDER TIBADUIZA BURGOS ; DIRECTORES ROBERTO MARTÍNEZ ÁNGEL, JAIME BARRERO PERES
2007	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL NO AUTÓNOMO Y DE LA INTERFAZ GRAFICA DEL SOFTWARE DE DIRECCIONAMIENTO DEL MISMO / EDGAR SANTIAGO AGUILLON VESGA, DIANA MARCELA RUEDA TRIANA ; DIRECTOR JUAN CARLOS MORENO MUÑOZ
2009	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL AUTÓNOMO DE EXPLORACIÓN / DIEGO FERNANDO PINEDA Q., FREDY ALEXANDER PRADA L. ; DIRECTORES CARLOS BORRAS, JAIME BARRERO
Continua en la página siguiente	

Cuadro 5.3 – Continuación de la página anterior

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
2010	ROBOT CARTESIANO NEUMÁTICO PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS MECATRONICOS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN] / JHON EDISON BUITRAGO NUNEZ, NELSON GUSTAVO CEDIEL GOMEZ ; DIRECTOR JORGE ENRIQUE MENESES FLOR
2010	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HELIBOT 3 DOF (HELICÓPTERO DE 3GDL) COMO HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS DINÁMICOS E INGENIERÍA DEL CONTROL / ANDRÉS ALCIDES III BERMUDEZ ROA, MANUEL ANTONIO.
2010	REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL ARTICULAR DE ROBOT PUMA DE 6 GRADOS DE LIBERTAD Y SU RESPECTIVO SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA / MARTHA CECILIA GUTIERREZ TURIZZO ; DIRECTOR JAIME BARRERO PÉREZ

5.3. FILOSOFÍA DE LA ROBÓTICA

El término robot ha tenido su inicio al dispositivo electromecánico; el dramaturgo Karel Capek utiliza la palabra robota”(robot en español) que en eslavo significa labor o trabajo, donde este la utiliza en su obra R.U.R Rosum’s Universal Robots”(figura

5.10) que se estreno en Praga en 1920 y publicada en Inglaterra en 1922, donde este autor imagino sustitutos automatizados para suplir a los seres humanos, de modo que aquellos trabajaran sin descanso. La obra finaliza cuando los robots se rebelan contra los creadores humanos, aniquilando a la raza humana.

En 1926 aparece la primera película de robots Metrópolis. En 1939, Electro, habla sobre un robot caminante eléctrico y fue proyectada en la feria mundial de Nueva York. En los últimos años se han proyectado películas tales como Blade Runner, Terminator, entre otras que muestran mundos donde los robots conviven e interactúan con los humanos e incluso llegan a dominarlos. En la parte literaria la obra del escritor y científico Ruso Isaac Asimov (1920-1992) "zo robot"(figura 5.11) donde introduce según él las tres leyes que deben regir la inteligencia de los robots, es decir, la de los humanoides:

- Un robot no debe dañar a un ser humano, o por inacción, dejar que un ser humano sufra daño.

- Un robot debe obedecer las órdenes que le son dadas por un ser humano, excepto cuando estas órdenes estén en oposición con la primera ley.

- Un robot debe proteger su propia existencia hasta donde esta protección no esté en conflicto con la primera o segunda ley.

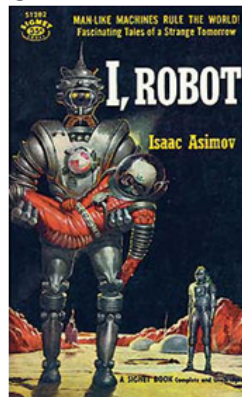
Donde de este modo plantea la solución a que los robots puedan ser causantes de la destrucción humana.

Figura 5.10: R.U.R. Rosum's Universal Robots



Fuente: www.u.arizona.edu

Figura 5.11: Yo robot



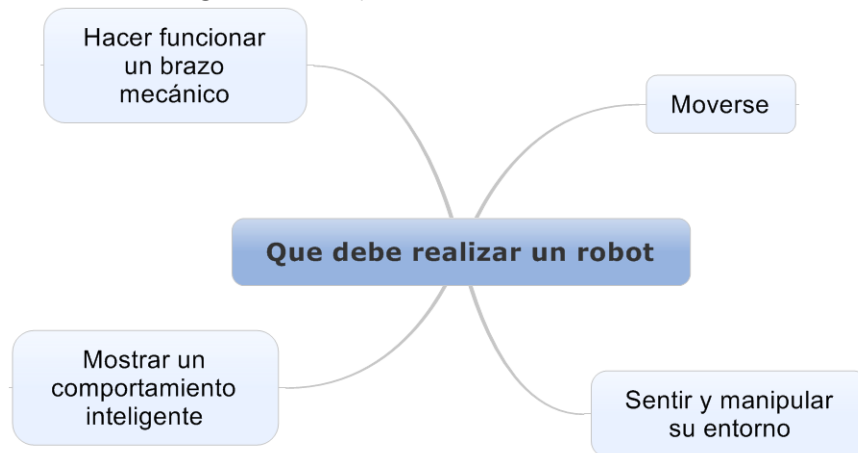
Fuente: www.u.arizona.edu

5.4. DEFINICIÓN DE ROBOT

Muchos definen un robot como un hombre-hecho-máquina que puede desarrollar trabajo normalmente desarrollado por humanos y otros trabajos más. Otros definen un robot como una unidad de movimiento múltiple con uno ó más brazos y articulaciones que es capaz de desarrollar muchas tareas diferentes. Aunque en general un robot es un sistema electromecánico que realiza tareas de forma autónoma, reaccionando inteligentemente con su entorno, no existe un consenso sobre cual máquina puede ser considerada

como robot y cual no, pero si existe un acuerdo general entre expertos y el público en que un robot debe realizar las siguientes tareas o parte de ellas. (figura 5.12)

Figura 5.12: Que debe realizar un robot



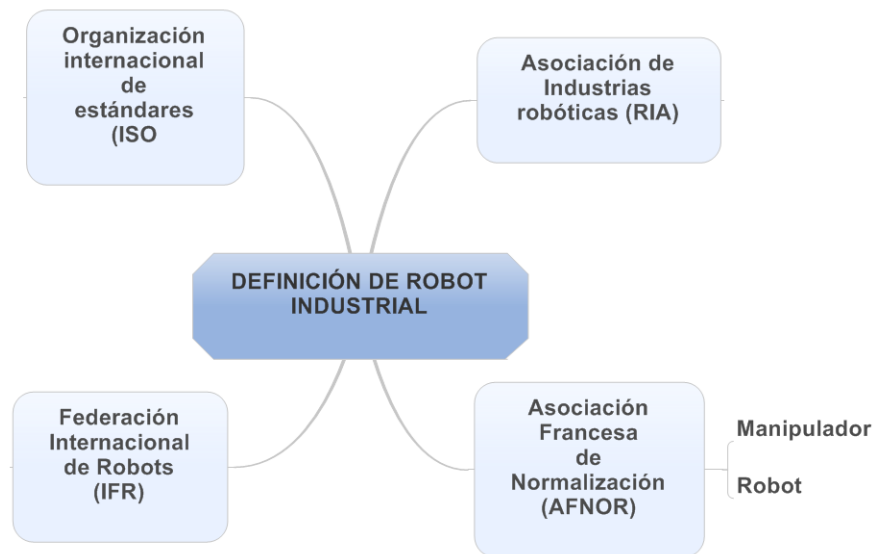
Fuente: Autores de proyecto

5.4.1. Definición de robot industrial

Existen varias dificultades al momento de establecer una definición formal de lo que es un robot industrial, la más notoria es la diferencia entre las nociones en el mercado japonés y el euro-americano, siendo un robot para los primeros un sistema mecánico con articulaciones móviles, destinado para la manipulación, mientras que para los segundos el concepto es más restrictivo, exigiendo una mayor complejidad, sobretodo en la parte de control. (figura 5.13)

Centrándose en el enfoque euro-americano, se tiene una concepción generalizada, pero es difícil ponerse de acuerdo para establecer una definición formal y debido a la evolución de esta ciencia, las definiciones previas se han ido modificando.

Figura 5.13: Definición de robot industrial

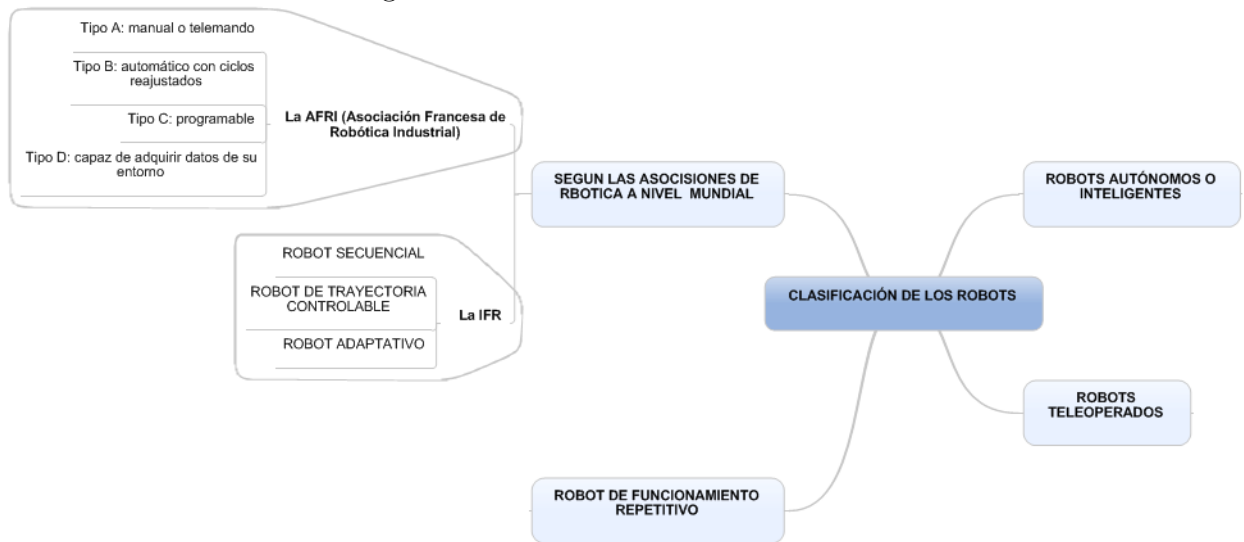


Fuente: Autores de proyecto

- *Una de las definiciones mas aceptadas comúnmente es la dada por la Asociación de Industrias robóticas (RIA, por sus siglas en ingles), para la cual:*
 - un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.
- *La Organización internacional de estándares (ISO, por sus siglas en ingles) modifica levemente esta definición, tal que:*
 - un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, con varios grados de libertad, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

- *La Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) primero define el concepto de manipulador y en base a este, se soporta el concepto de robot industrial tal que:*
 - **Manipulador:** Mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinados al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.
 - **Robot:** Manipulador automático servo controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Usualmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material
- *La Federación Internacional de Robots (IFR) define a un robot industrial como:*
 - “maquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento”. Hay que aclarar que la re-programabilidad y multifuncionalidad se consigues sin cambios físicos del robot.

Figura 5.14: Clasificación de robots



Fuente: Autores de proyecto

5.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS

Existen diversas clasificaciones de los robots, realizadas por diferentes entidades u organizaciones, que tienen autoridad sobre el tema, teniendo en cuenta varios criterios que van desde el grado de autonomía, hasta su aplicación. Estas son las más relevantes. *De acuerdo con su grado de autonomía los robots se clasifican en:*

- **Robots tele-operados:**

En los robots tele-operados, las tareas de percepción de entorno, manipulación y planificación compleja son controladas por humanos. Los sistemas evolucionados suministran realimentación sensorial del entorno y alternativamente el operario mueve una réplica del manipulador y este último reproduce los movimientos, o el operario controla los movimientos mediante un ordenador. Estos sistemas son muy útiles en operaciones remotas, difíciles de automatizar o cuando el entorno no está bien estructurado. La mayor dificultad de estos sistemas es el factor humano

que representa imprecisiones y la limitada capacidad de procesamiento numérico. En este tipo de robot se destacan los insectoides, humanoide y aplicaciones submarinas y espaciales.

- **Robot de funcionamiento repetitivo**

Es el sistema más usado en líneas de producción industrial, trabajan en entorno poco variantes, y su percepción del mismo no necesita un gran grado de complejidad. Se usa en tareas con un alto grado de repetitividad, son precisos y de una velocidad relativamente alta, lo cual, en consecuencia, aumenta la productividad, disminuye horas hombre de trabajo y puede librar a estos de tareas repetitivas, desgastantes e incluso peligrosas.

- **Robots autónomos o inteligentes**

Son los sistemas robóticos más evolucionados desde el punto de vista de procesamiento de información. Son capaces de percibir el entorno, modelarlo, planificar y realizar una tarea con un mínimo de supervisión humana y en muchos casos sin esta. Es capaz de trabajar en entornos dinámicos y poco estructurados. Emplea técnicas de inteligencia artificial y métodos simbólicos para el tratamiento basado en modelos geométricos del entorno, requiere de una gran capacidad de procesamiento para manejar la alta cantidad de información proveniente de los sensores y procesamiento de la misma mediante algoritmos para realizar una respuesta.

- **La AFRI** (Asociación Francesa de Robótica Industrial) presenta la siguiente clasificación de los robots (tabla 5.4):

- Tipo A Manipulador con control manual o telemando.

- Tipo B Manipulador automático con ciclos reajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
 - Tipo C Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimientos sobre su entorno.
 - Tipo D Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.
- **La IFR** da una clasificación especial para los robots industriales, tal que estos se dividen en:
 - **Robot secuencial:** También se conocen con el nombre de robots de aprendizaje. Son manipuladores programables: realizan una serie de movimientos destinados a realizar una tarea siguiendo un conjunto de instrucciones previamente programadas. En este caso, no es el operario el que se encarga de guiar los movimientos del manipulador, sino que el propio brazo del robot realiza esta tarea de forma automática siguiendo el programa establecido en su sistema de control.
 - **Robot de trayectoria controlable:** La trayectoria o el modo de movimiento asegura que el final del brazo del robot seguirá una trayectoria y orientación predecible (controlada) ya que el robot viaja de punto a punto. Las transformaciones entre coordenadas requeridas para el manejo de este hardware, son calculadas por el ordenador que dirige el sistema de control del robot. Este tipo de programación es menos probable que presente peligros en la seguridad de las personas o en los equipos.
 - **Robot adaptativo:** Estos robots pueden hacer elecciones limitadas o

Cuadro 5.4: Clasificación de robots según T.M. Knasel

Generación	Nombre	Tipo de control	Grado de movilidad	Usos mas frecuentes
1 ^a	Pick and place	Fines de carrera, aprendizaje	Ninguno	Manipulación, servicio de maquinas
2 ^a	Servo	Servocotrol, trayectoria continua, programación condicional	movilidad por vía	Soldadura, pintura
3 ^a	Ensamblado	Servos de precisión, visión, tacto, prog. Off-line	AGV (vehículo guiado autónomamente)	Guiado por vía
4 ^a	Móvil	Sensores inteligentes	Patas, ruedas	Mantenimiento, construcción
5 ^a	Especiales	Controladores con técnicas de IA	Andante, saltarin	Uso milita, uso espacial

Fuente: Autores de proyecto

tomar decisiones y reaccionar ante el entorno de trabajo.

5.6. APLICACIONES

Las áreas de aplicación de los robots han aumentado enormemente en los últimos 30 años, volviéndose elementos esenciales en industrias como la automotriz y la espacial, siendo parte vital en operaciones tales como soldadura, ensamblado, manipulado, pintura etc. Aunque cabe aclarar que gracias los avances recientes las aplicaciones se han extendido, de tal manera que se ven sistemas robóticos en agricultura, rescate de personas, medicina etc.

- En 1988 la IFR (federación Internacional de robótica) estableció la siguiente clasificación para aplicaciones de robots en la industria manufacturera (tabla 5.5).
- **Trabajos en fundición** Fue la fundición por inyección el primer campo en el

Figura 5.15: Robot en trabajo de fundición



Fuente: www.robotikka.com

que incursionó la robótica, en 1960. Dicho proceso consiste en inyectar el material en estado líquido en un molde constituido por 2 mitades, sostenidas por cilindros, hasta que se solidifique y posteriormente se retire de dicho molde. El robot realiza

Cuadro 5.5: Aplicaciones de robots industriales

Clasificación	Aplicación
110	Manipulación en fundición: 111 moldes, 119 Otros
130	Manipulación en moldeo de plásticos
140	Manipulación en tratamientos térmicos
150	Manipulación en forja y estampación
160	Soldadura: 161 Arco, 162 Punto, 163 Por Gas, 164 Por laser, 165 Otros
170	Aplicación de materiales: 171 Pintura, 172 Adhesivos y secantes, 179 Otros
180	Mecanización: 181 Carga y descarga de maquinas, 182 Corte mecánico, rectificado, desbarbado y pulido, 189 Otros
190	Otros procesos: 191 Laser, 192 chorro de agua, 199 Otros
200	Montaje: 201 Montaje mecánico, 202 Inserción, 203 unión por adhesivos, 204 unión por soldadura, 205 Manipulación para montaje, 209 Otros
210	Paletización
220	Medición, inspección y control de calidad
230	Manipulación de materiales
240	Formación, enseñanza e investigación
900	Otros

todas o varias de las siguientes tareas:

- Extracción de piezas del molde y transporte para un proceso posterior.
- Limpieza y mantenimiento de moldes.
- Colocación de piezas en moldes para embutido.

En estos sistemas robotizados las cargas son medianas y alta, sus campo de acción es grande y el sistema de control es relativamente sencillo.

■ Soldadura

Figura 5.16: Robot soldador



Fuente: www.exequiel-it.blogspot.com

Esta es una de las aplicaciones más populares en el campo de la robótica debido a la amplia implementación en la industria automovilística y demás, siendo la soldadura por punto un campo de aplicación más grande para la robótica que la soldadura por arco.

- *Soldadura por punto*

Existen 2 posibilidades al implementar un robot en un proceso de soldadura por punto, fijar los electrodos y manipular las piezas a soldar mediante el robot o fijar las piezas y manipular los electrodos. El optar por una u otra opción depende del peso, tamaño, forma y manejabilidad de las piezas. Los robots de soldadura por puntos tienen capacidad de carga entre 50 y 100 *Kg*, una estructura articular con un número suficiente de grados de libertad (5 o 6 robots redundantes) para un posicionamiento flexible en lugares de difícil acceso y normalmente cuenta con un control punto a punto (PTP).

- *Soldadura por arco*

La calidad de la soldadura por arco depende de muchos factores como lo son la distancia entre electrodo y pieza, velocidad de avance en la trayectoria, el ángulo de ataque del electrodo etc. Es por la necesidad de mantener constante los aspectos antes mencionados y el ambiente peligroso para trabajadores que se justifica la automatización de este proceso por medio de robots, los cuales, no precisan de una gran capacidad de carga, pero si de un control de trayectoria continua debido a que debe realizar cordones de soldadura, necesitan un amplio campo de trabajo y un nivel alto de grados de libertad (5 o 6), incorporando incluso un control en el movimiento de la base del robot para versatilidad en la ubicación y un mejor acceso a la pieza. También puede suspenderse sobre la pieza.

- **Aplicación de material.**

- *Pintura*

Figura 5.17: Robot aplicando material



Fuente: www.mountainbike.es

En este procedimiento se cubre una superficie tridimensional de geometría aleatoria, con una mezcla de aire y material (pintura) pulverizado por una pistola. Para la homogeneidad en el reparto de la pintura es necesario un control de la viscosidad, de la distancia entre la pistola y la pieza, número de pasadas y velocidad de dicha pistola. Además, el ambiente es altamente peligroso para un operario debido a la toxicidad de la atmósfera, al alto nivel de ruido, al riesgo de incendio entre otros. Por lo tanto en dicho proceso es factible el uso de robots, garantizando mejores acabados en la pintura y reduciendo riesgos. Normalmente estos son robots articulares, con más de 6 grados de libertad, con protección especial debido al entorno de trabajo, programación de trayectoria continua con aprendizaje por muestreo.

- *Adhesivos y sellantes*

En este proceso un cordón de material líquido o pastoso que se solidifica al contacto con el aire, se aplica a una pieza para sellarla o adherirla a otra. Acá el control de trayectoria es mediante trayectoria continua y es de vital importancia la sincronización entre la velocidad del manipulador y el caudal con el que se dispensa el material, puesto que el material aplicado en la trayectoria depende de estos dos factores.

- *Alimentación de máquinas*

Este proceso implica un riesgo para los operarios, quienes manipulan piezas que pueden estar calientes, filosas o pesadas, para introducirlas a maquinas exponiéndose a algún accidente. Además la repetitividad del proceso conlleva al cansancio de un trabajador y disminución en la velocidad de alimentación. Esto hace al dicho proceso perfecto para una posible manipulación mediante robots, los cuales, por lo general son de baja complejidad, bajo número de grados de libertad, trayectoria punto a punto, espacio de trabajo grande y un rango variable de carga a manipular.

- **Corte**

El robot transporta la herramienta de corte sobre la pieza y la desplaza según la

Figura 5.18: Robot para corte



Fuente: www.coco-pot.com

trayectoria de corte usando métodos no mecánicos de corte como laser, plasma, oxicorte y chorro de agua. Los robots empleados en este tipo de corte poseen un control de trayectoria continua y elevada precisión, un espacio de trabajo medio (1 a 3 metros) y generalmente están suspendidos sobre las piezas (figura 5.18).

- **Montaje**

El montaje representa una gran cantidad del costo de un producto y necesita de una alta habilidad, precisión y flexibilidad, por lo cual los robots, junto con los

elementos indicados, representan una gran ayuda. Un robot precisa de varios elementos como dispensadores y sensores especiales para la realización un montaje.

- **Control de calidad**

La tendencia es la automatización total de los procesos, entre esos el control de calidad, un ejemplo claro son los robots con sensores de tacto que constan de un palpador, el cual pueden situarse en diferentes puntos clave de la pieza para registrar sus dimensiones, gracias al control de posición del robot. Estos datos son usados para determinar posibles desviaciones en las dimensiones en los valores deseados.

- **Manipulación en salas blancas**

Ciertos procesos como la industria de los semiconductores y fabricación de far-

Figura 5.19: Robot para manipulación de salas blancas



Fuente: www.interempresas.net

macéuticos precisan de ambientes extremadamente limpios y/o controlados. En ellos la actividad del operador se ve limitada por las medidas especiales, como los trajes y controles rigurosos por ejemplo, y no por el trabajo en sí. Por ello se hace práctico el uso de manipuladores robóticos en las denominadas salas blancas.

5.7. MERCADO Y TENDENCIAS DE LA ROBÓTICA

El mercado de la robótica ha tenido un gran crecimiento desde su inicio a mediados del siglo XX, representando un mercado importante en la economía mundial. Podemos distinguir por ahora dos tipos de mercados de la robótica, el mercado de robots industriales y el mercado de robots de servicio.

- **Mercado de robots industriales**

En 2009 la crisis económica y financiera mundial causó una significativa caída en las ventas de robots industriales, en contraste con las del año anterior que ha sido uno de los más exitosos, tuvo un declive de 47 % (60,000 unidades).

En 2009, todas las regiones mostraron una caída significativa en la instalación de robots. Cerca de 30,100 robots industriales (50 % menos que en 2008) fueron suministrados a Asia, Nueva Zelanda y Australia. En el mercado principal, Japón, tuvo una impactante caída del 62 %. En Japón se ha visto un declive continuo desde 2006 en las inversiones en este campo.

El segundo más grande mercado en robótica de Asia, la República de Corea, vio un decremento sustancial después de un considerable crecimiento en 2008, de 11,600 pasó a 7,800 unidades. Incluso China, el mercado de crecimiento más rápido en el mundo hace algunos años, sintió los efectos de la crisis tanto como India. La venta de robots cayó 30 % en China a 5,500 unidades y en India, un pequeño pero prometedor mercado, vio un declive de 60 % a 360 unidades. Las ventas de robots cayeron significativamente en toda Asia, con excepción de Singapur que tuvo más unidades instaladas que India en 2009. En la siguiente tabla se puede apreciar el comportamiento del mercado desde 1992-2009.

En 2009 el envío de robots a Las Américas cayó en un 48 % pasando de 17,200 a 9000 unidades. Ya en 2008 la venta de robots a Estados Unidos, el mercado de robots más grande de las Américas, y Canadá había decrecido. Ambos países fueron

afectados fuertemente por la crisis que empezó a finales de 2007 que fue seguida por el colapso de mercados financieros en otoño del 2008. Todas las industrias fueron afectadas por la crisis económica, pero la más afectada fue la industria automotriz. La sobrecapacidad, reducción de demanda, el mal modelo político y la crisis económica afectó la industria automotriz especialmente en Norte América donde la capacidad de producción ha tenido que ser recortada o reducida. La inversión en robots industriales fue baja la primera mitad de 2009 y solo hasta el tercer cuarto de este mismo año se empezó a incrementar los envíos a Estados Unidos y Canadá, aun estando lejos de años más exitosos como 2005 y 2007. En estados unidos los envíos cayeron un 49 % a 6,800 unidades y en Canadá un 72 % a 500 unidades.

Los envíos a México incrementaron ligeramente en 2009 a 1,100 unidades, donde proveedores de automotores europeos y asiáticos aumentaron su capacidad de producción. México empezó a ganar importancia en la industria automotriz por razones económicas. En Argentina y Brasil también cayeron sustancialmente.

Las ventas de robots en Europa cayó un 41 % a 20,500 unidades, el número más bajo desde 1997. Entre 2005 y 2008 una fuerte tendencia a la automatización impulso la venta de robots. Esta tendencia ha disminuido debido a la baja económica en 2008 y 2009. Además todas las industrias han reducido su inversión en robótica especialmente el sector automotriz y se están centrando principalmente en reestructuración.

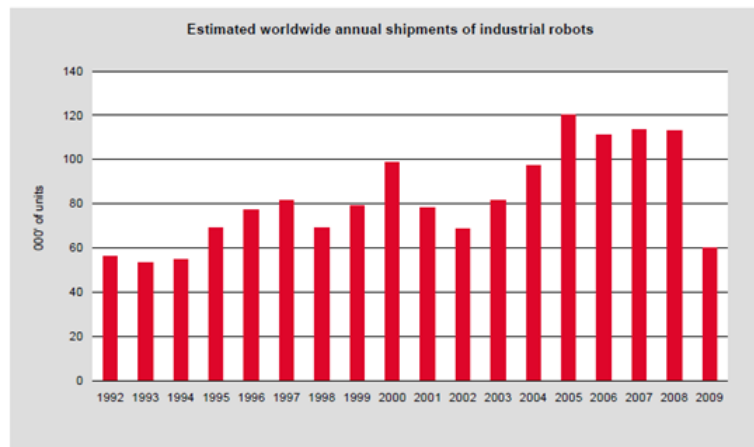
Después de tres años de un crecimiento continuo y alcanzar un tope de 15,100 unidades en 2008, los suministros de robots disminuyeron en un 44 % hasta 8,507 unidades. Hubo una gran reducción en el principal consumidor, la industria automotriz, pero igualmente se presentó un incremento o una leve caída en otras industrias que aun compran bajas cantidades como la industria de alimentos, bebidas, vidrio, semiconductores y la industria medica.

En Italia, segundo mercado más grande de Europa, mostro una baja de 40 % con

2,900 unidades siguiendo el decrecimiento mostrado desde 2007. De igual forma disminuyó en otros países de Europa siendo la Federación Rusa, Eslovaquia, Bélgica y la República Checa los únicos países que mostraron un incremento, pero el número de unidades sigue siendo bajo. En la figura 1.17 podemos ver la evolución del mercado de la robótica industrial entre 1992-2009.

En las tablas 5.6 y 5.7 (Mostrada al final del capítulo) tenemos el comportamiento

Figura 5.20: Ventas estimadas anuales de robots industriales en el mundo



Fuente: IFR Statistical Department

to en el mercado de la robótica industrial y cantidad de robots acumulados por países en el periodo 2004-2009. Desde la introducción de robots industriales en la industria en la década de los sesentas hasta finales de 2009 la venta de suministros de robots industriales ascienden a 2,300,000 unidades, sin embargo una parte de ellos han quedado fuera de servicio, según la IFR, el número de robots industriales operacionales hasta finales de 2009 se encuentra en el rango de 1,021,000 y 1,300,000 unidades. Este valor depende si tomamos la vida media de servicio de 12 años o 15 años como muestran estudios realizados por la IFR. En 2009 se vio una caída del 1% con respecto al año anterior en el stock mundial. Debido a la instalación y posterior explotación de un robot industrial se aplica mejor a unas industrias que a otras. Se debe a que las aplicaciones propias de estos sectores

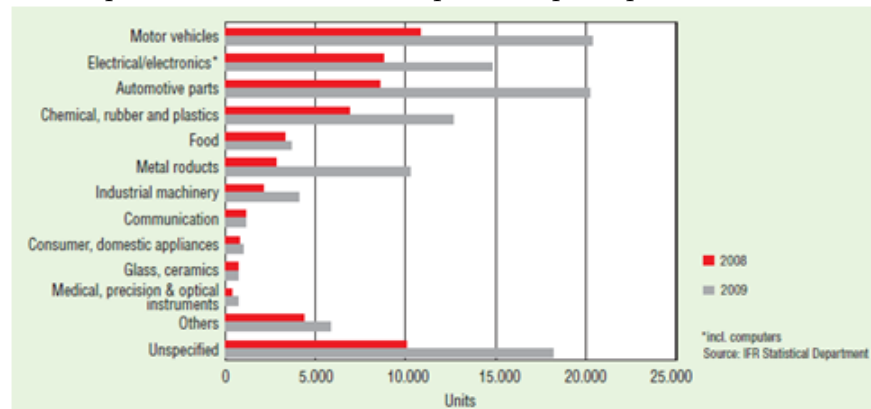
permiten un desempeño más rentable.

Entre las industrias más importantes tenemos: la industria automotriz la más importante industria de robots industriales, la industria eléctrica y electrónica, la industria de caucho y plásticos, la industria de comidas y bebidas, la industria de metales y maquinaria.

En la robótica automotriz se ha dado el caso en que las maquinas usadas han evolucionado a la par de las exigencias mecánicas. Esta industria empezó a desarrollarse a principio de la década de los noventa, debido a los modelos más grandes de camionetas y station wagons. Esta industria representa el 36 % de suministros totales de robots industriales en 2009, lo cual representa una caída de 52 % en comparación con el 2008. Esta caída se debe a que la aplicación de robots industriales en esta industria está saturada, por tanto algunos países han tenido que disminuir su capacidad de producción. La industria eléctrica y electrónica también es un campo importante de implementación de la robótica industrial (incluyendo computadores, radio, televisión, dispositivos de comunicación e instrumentos médicos, de precisión y ópticos). Después de una fuerte inversión en robótica para este sector entre 2004 y 2005, esta disminuyo entre 2006 y 2008. En 2009 se presentó una caída de 34 % a 10,855 unidades, siendo el 18 % de los suministros totales de robots industriales en este año. En todas las industrias de aplicación de robots industriales se presento una caída significativa después del 2008. En la industria del caucho y plásticos se paso de 15,000 a 5,800 unidades, representando un 10 % de los suministros totales del 2009. En la industria de alimentos hubo un declive de 10 % con solo 3,300 unidades, siendo un 5 % del total de suministros anual, y en la industria de la producción de metal y maquinaria una caída de 64 % con 5,253 unidades, 9 % del total de suministros anual. Antes del 2008 estas industrias mostraban un continuo crecimiento. En la figura 5.21 podemos observar el comportamiento del mercado en estos sectores.

El decremento generalizado del suministro de robots a los diversos sectores indus-

Figura 5.21: Incorporación de robots. Comparativa por tipo de industria años 2008-2009



Fuente: IFR Statistical Department

triales nos lleva a una caída del valor del mercado a \$ 3.8 billones de dólares (39 % menos que el año anterior), este valor no cubre el costo de software, periféricos y sistemas de ingeniería. Esto resultaría que el valor del mercado de los actuales sistemas robóticos sería dos o tres veces esta cantidad. Por tanto este mercado es valorado en \$ 12 billones de dólares en 2009.

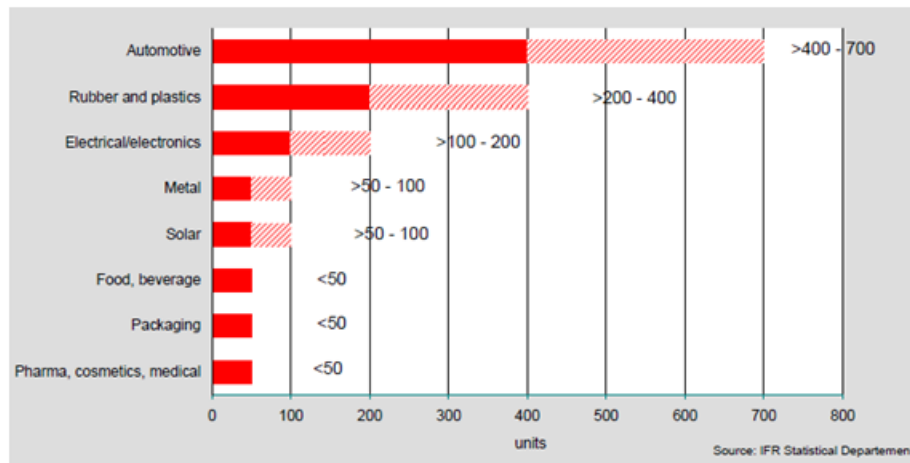
Si comparamos la distribución de robots industriales de multipropósito en varios países, el stock de robots, expresado en el número total de unidades, puede ser a veces una medida engañosa. Por eso se sugiere utilizar una medida llamada densidad de robots, que es el número de robots multipropósito por cada 10,000 personas empleadas en la industria de manufactura o industria automotriz o industria general (que es todas las industrias menos la automotriz). Según los cálculos realizados por la IFR solo Japón tiene un relativamente alto grado de densidad de robots en la industria general. Cabe resaltar que se debe a la gran cantidad de unidades robóticas en la industria electrónica. Por tanto hay posibilidad de instalaciones en otros sectores. En Alemania, Corea, Suecia y Finlandia esta densidad es de considerar pero igual aun puede incrementar. Si tenemos en cuenta el tamaño del país o el tamaño de su industria de manufactura encontramos que países como Estados Unidos, Brasil, Canadá, la mayor parte de Europa occidental y predomi-

nantemente en china se presenta un alto potencial de crecimiento en este sector de la industria. El crecimiento en los consumidores de esta tecnología y la demanda de calidad y productividad está elevando el gradualmente y de forma constante el desarrollo en este campo.

Una fuerte recuperación en las instalaciones de robots industriales en el mundo significara un crecimiento cerca del 27%, alrededor de 76,000 unidades. Los principales autores son China, la República de Corea y otros países del sur este asiático. Aunque los mercados de Japón y Estados Unidos tuvieron un crecimiento sustancial. Aunque la demanda domestica sigue débil. La principal causa de este crecimiento es la industria automotriz la cual ha vuelto a invertir en nuevas tecnologías, más capacidad y renovación de los sitios de producción. La industria general (todas menos la automotriz) que había incrementado su inversión entre 2005-2008 reanudara entre 2010-2013. En la figura 5.22 se muestra las tendencias de crecimiento al año 2013 de la densidad de robots en cada sector de la industria.

Aunque hay algunas razones para esperar un futuro brillante en la robótica: enor-

Figura 5.22: Número estimado de robots industriales funcionales por cada 10,000 empleados

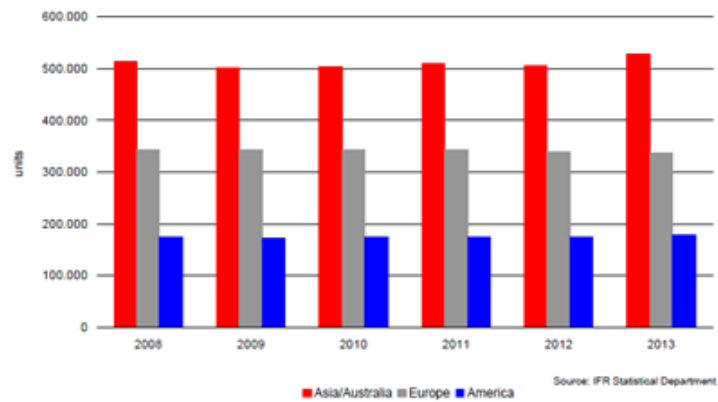


Fuente: IFR Statistical Department

mes mercados de consumidores se están abriendo China, India, Brasil y Rusia. La

normal competencia entre las compañías automotrices resulta en inversiones en instalaciones de producción para estos mercados. Compañías de altos recursos como las de bajos recursos tiene que reducir costos y garantizar una alta calidad para poder competir en el mercado mundial. En la figura 5.23 se muestra el crecimiento estimado en la cantidad de robots en el stock mundial.

Figura 5.23: Estimado de robots industriales en stock mundial de 2008 y 2009 y pronóstico para 2010-2013



Fuente: IFR Statistical Department

5.7.1. Mercado de los robots de servicio

Este mercado con prometedoras tendencias al crecimiento, que se justifican con la necesidad del aumento de productividad en sectores industriales poco automatizados (construcción, agricultura), automatizar trabajos en entornos peligrosos o en condiciones precarias (submarinos, ambientes contaminados, ambientes sucios, en el espacio), necesidad de prestaciones que no es capaz de dar un ser humano (fuerza elevada, precisión elevada), mejorar la calidad de vida (asistentes), y para entretenimiento. En 2009 se vendieron cerca de 76,600 robots de servicio para uso profesional, de los cuales el 30% fueron para aplicaciones de defensa, seguido por los robots de campo (especial-

mente robots ordeñadores) con 7%. Robots de construcción y demolición y plataformas robóticas móviles para uso general con 6% cada una, sistemas de logística 5%, rescate y aplicaciones de seguridad 4% serian los siguientes en esta lista.

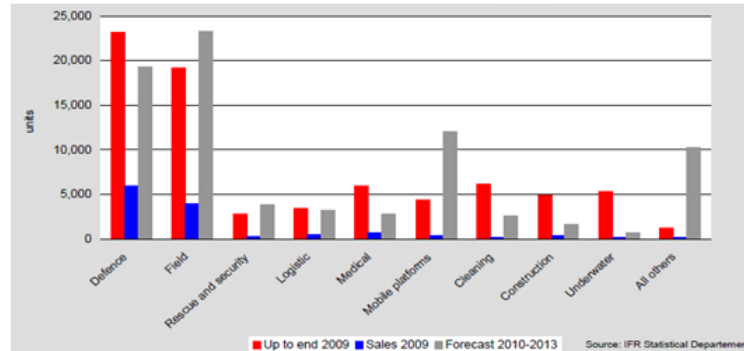
Las ventas de robots de servicio para uso personal y privado estuvieron cerca de 5,6 millones de unidades para robots de uso domestico y 3,1 millones de unidades para entretenimiento y ocio a finales del 2009. Se muestran aparte de los robots de servicio para uso profesional debido a que generalmente su precio es una fracción de estos, además se producen para un mercado masivo con precios y canales de distribución completamente diferentes. Hasta ahora los robots de servicio para uso personal o domestico se usan principalmente en el área de robots domésticos (esto incluye aspiradoras y cortadores de césped) y robots de entretenimiento y ocio (que incluye robots de juguete, robots educacionales). El mercado de robots asistentes para discapacitados es aun pequeño, pero se espera un crecimiento significativo en los próximos 10 años. Robots para transporte personal, seguridad del hogar y vigilancia también tomaran importancia en un futuro.

Se espera que en el periodo entre 2010-2013 el stock de robots de servicio para uso profesional se incremente alrededor de 80,000 unidades, fortaleciéndose en todos los campos de aplicación. Para los robots de servicio para uso personal se espera la venta de alrededor de 11,4 millones de unidades 6,7 en robots domésticos y 4,6 millones en robots de entretenimiento y ocio, por supuesto son de costo muy bajo. En las figuras 5.24 y 5.25 veremos las ventas hasta el 2009, en el 2009 y pronósticos para el 2013 en robots de servicio tanto profesionales como de uso personal.

5.8. CÉLULA DE TRABAJO

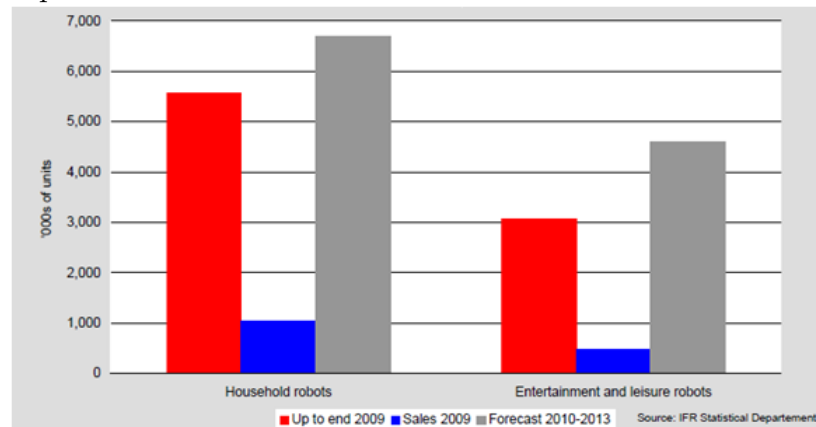
Un robot raramente trabaja como un sistema aislado, con el mismo y como único componente. Generalmente interactúa con diversos elementos los cuales cuentan con

Figura 5.24: Ventas hasta el 2009, en el 2009 y pronósticos 2010-2013 para robots de servicio de uso profesional



Fuente: IFR statistical department

Figura 5.25: Ventas hasta el 2009, en el 2009 y pronósticos 2010-2013 para robots de servicio de uso personal



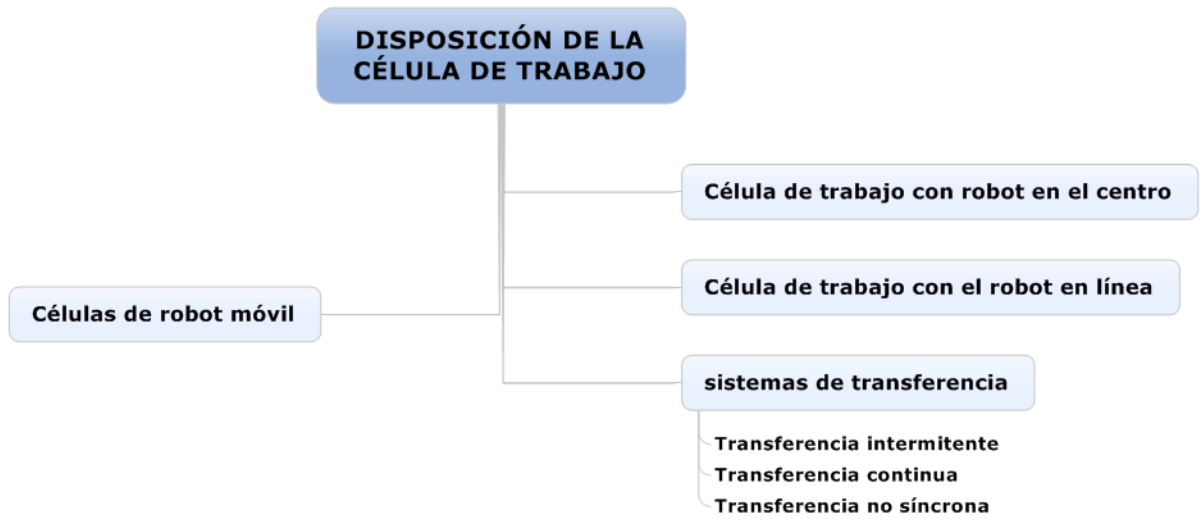
Fuente: IFR statistical department

disposiciones específicas. El robot y el equipo asociado forman una célula de trabajo.

- **Disposición de la célula de trabajo.**

Una célula de trabajo puede configurarse de diversas formas tomando como eje central el elemento robótico. Las disposiciones más básicas son:(figura 5.26)

Figura 5.26: Tipos de disposición de células de trabajo



Fuente: Autores de proyecto

- **Célula de trabajo con robot en el centro**

En este tipo de disposición el robot se ubica en el centro aproximado de la célula de trabajo, quedando total o parcialmente rodeado por el resto de elementos que constituyen dicha célula. Se usa frecuentemente en aplicaciones donde el robot le sirve a varias maquinas (carga-descarga de maquinas herramientas), en soldadura por arco, paletización o ensamblado y en general donde el robot debe alcanzar diversos puntos fijos en su espacio de trabajo.

- **Célula de trabajo con el robot en línea**

Con dicha disposición, el robot se localiza a lo largo de un transportador móvil u otro sistema de manejo y efectúa una tarea sobre el producto cuando viaja sobre el transportador. El ejemplo más representativo de esta disposición son las líneas de soldadura de carrocerías de vehículos, donde estas pasan secuencialmente frente a robots alineados sucesivamente, que realizan una serie de puntos de soldadura.

- **sistemas de transferencia.**

Existen tres tipos de sistemas de transferencia que se pueden utilizar con la configuración en línea:

- *Transferencia intermitente:* También llamada transferencia síncrona. En este tipo de transporte, la pieza se mueve con un desplazamiento conformado por arranques y paradas, avanzando de una estación de trabajo a otra y deteniéndose en frente de los robots (en posición estacionaria) mientras estos realizan una serie de tareas sobre dicha pieza. La ventaja principal de este tipo de transporte es que la pieza puede ubicarse en una posición y orientación fija, disminuyendo la complejidad del control sobre el robot.
- *Transferencia continua:* Se refiere a un sistema de transporte donde las piezas no se detienen en frente del robot y este deberá trabajar con la pieza en movimiento. Debido a esto, el transporte deberá limitar su velocidad de tal manera que permita el tiempo necesario para la realización de un ciclo de trabajo. Ya que la posición y/u orientación de la pieza cambia continuamente se presentan complicaciones al momento de realizar el trabajo sobre la pieza.
- *Transferencia no síncrona:* Es también llamado power-and-free. En este tipo de sistema de manejo de material, cada pieza se mueve independientemente a lo largo del transportador

- **Células de robot móvil.**

Son aquellas células donde el robot puede desplazarse a las distintas piezas del equipo dentro de la célula. Esto se logra con la adición de un grado de

libertad, que generalmente se hace montando el robot en una base móvil que se puede transportar sobre un sistema de rieles. Esta disposición es muy ventajosa ya que permite trabajar en campos de acción bastante amplios, servir a diversas maquinas con ciclos de trabajo relativamente largos, trabajando con una mientras las otras realizan sus funciones y permiten trabajar con sistemas de transferencia continua de modo que la posición relativa entre robot y pieza se mantenga fija mientras el primero realiza trabajo sobre el segundo.

■ **Características generales del sistema de control de la célula de trabajo.**

Una célula de trabajo debe responder a las premisas de automatización y flexibilidad que justifican su empleo. Es por esto que debe contar con un sólido sistema de control que deberá realizar principalmente las siguientes funciones:

- Control individual de cada uno de los dispositivos que compongan la célula de trabajo (robot, transporte, maquinas y demás).
- Sincronización de los diferentes dispositivos entre sí.
- Optimización del funcionamiento conjunto de los dispositivos, distribuyendo sus funciones de manera dinámica para evitar paradas por espera o acciones innecesarias.
- Detección, tratamiento y recuperación de situaciones anómalas.
- Interfaz con el usuario, mostrando la información adecuada para que en todo momento se conozca el estado actual del sistema y permitiendo el acceso, con

las restricciones pertinentes, al funcionamiento del mismo.

- Interfaz con otras células, para permitir la sincronización entre ellas y la optimización de los procesos.
- Interfaz con un sistema de control superior que realiza básicamente funciones de supervisión y actualización de programas en caso de algún cambio en los procesos.

Dependiendo de la complejidad del sistema, el mismo controlador del robot puede sincronizar las funciones de sus componentes con el mando del resto de dispositivos o implementar una estructura jerarquizada, en la cual un elemento central (PLC, ordenador, entre otros.). Mantenga la comunicación entre los elementos de la célula.

5.9. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ROBÓTICA

La implementación de un robot en cualquier industria requiere que se haga primero un análisis económico de la rentabilidad y viabilidad de la inversión, buscándose principalmente un rendimiento económico a corto o largo plazo, este análisis se convierte en casi indispensable cuando se trata de material tecnológicamente avanzado o en la automatización de un proceso ya conocido.

■ Factores económicos y datos básicos necesarios

Para realizar el análisis económico de un proyecto donde se adquiriera un robot

se necesita tener en cuenta una serie de factores claves y poseer la información básica acerca del proyecto.

- *Tipo de instalación*

Podemos tener dos posibles instalaciones. La primera, y la más aplicada, son para automatizar un proceso de producción que se realiza en buena medida en forma manual (célula robotizada), es relativamente fácil ya que es sencillo realizar una comparación entre los parámetros y tiempos de operación. La segunda es cuando la instalación de un robot sea catalogado de carácter novedoso, esto quiere decir que hay otras opciones que pueden ser implementadas, por tanto se deben considerar todas y escoger la que muestre más beneficio económico a la compañía, en este caso al ser una nueva aplicación no existen datos referentes a el desempeño de la robótica en este campo lo cual hace un poco más difícil la recolección de datos.

- *Datos Básicos de coste*

Como en cualquier proyecto, especialmente de ingeniería, se toman en cuenta dos tipos de coste: el coste de inversión y el coste de explotación. Tomaremos a continuación los costes para la implementación de una célula robotizada.

- **Coste de inversión:** se le dice a los costes que son necesarios para la implementación física. De los cuales los más importantes son:

Coste de adquisición del robot: donde no se considera la herramienta que está en el extremo del robot. El coste del robot puede variar enormemente debido a que robots más caros presentan mayor disponibilidad a diversas tareas y una mejor adaptabilidad que robots más baratos

Coste de herramientas y equipos especiales: la parte que realiza la tarea y equipos

especiales necesarios para ello, está directamente vinculado al costo del robot.

Coste de ingeniería e instalación: costes que tengan que ver con el manejo del robot, además del coste de planeación y diseño junto con los costes de instalación del sistema, también se tiene en cuenta los costes generados directamente por la inclusión del robot al proceso de fabricación, para obtener un panorama más completo a la hora de comparar esta solución con otras alternativas que la implementación de un robot.

■ **Costes y beneficios de explotación**

Donde encontramos los costes derivados de la utilización de la célula además del ahorro o beneficios que se obtengan. Algunos de estos costes son:

Mano de obra: aquí debemos comparar el coste que se ahorra por la mano de obra reemplazada y el coste de la nueva mano de obra requerida, tal como lo son los supervisores y los costes de planificación.

Mantenimiento: los costes derivados para el mantenimiento de los equipos en la planta, especialmente el mantenimiento requerido para el robot así como repuestos, en ese factor la mayoría de datos son supuestos, donde debe estipularse una cantidad de trabajo que se le exija al robot y los demás equipos.

Aumento de la calidad e incremento de productividad: el factor que muestra el beneficio de optar por un robot en el proceso de fabricación, ya que un robot puede trabajar grandes turnos realizando la tarea tan rápido como los operarios además de una forma más uniforme y consistente, garantizando una mejor calidad en el proceso.

Entrenamiento: se debe entrenar al personal que vaya a estar vinculado con el

robot, ya que este entrenamiento tiene que ser continuo se tiene en cuenta en gastos de explotación y no en gastos de inversión.

- **El robot como elemento principal del análisis económico.**

Entre los equipos de una planta el robot es sin duda el más importante o uno de los más importantes, por tanto tiene un trato especial. Ya se ha mencionado diferentes factores que trae consigo la implementación de un robot en una línea de producción (coste, mantenimiento, aumento de la productividad y calidad) pero falta mencionar la flexibilidad que le aporta al sistema.

La flexibilidad de un robot es una característica muy importante, ya que con el resto de equipos su ciclo de vida está ligado al ciclo de vida del producto, se cambia de producto y los equipos quedan obsoletos, al ser programable un robot se puede adaptar a diversas tareas, casi sin coste, desligándose del ciclo de vida del producto y contando con un ciclo de vida propio. Esto no garantiza que el robot cumpla con su nueva función tan bien como lo hizo para la función que fue seleccionado, pero se tienen muchas más posibilidades que se adapte mejor que otras herramientas.

5.9.1. Métodos de análisis económico:

Existen varios métodos aplicables para realizar el análisis económico de una inversión y poder decidir si esta será rentable o no. Son métodos de aplicación general a cualquier proyecto o inversión, aunque acá se particulariza para aquellos proyectos que incluyan la compra y utilización de robots. Los métodos a estudiar son:

- Periodo de recuperación

- Método de valor actual neto (VAN)
- Método de la tasa interna de la renta (TIR)

Cada uno de estos métodos es aplicable de forma independiente y sirven para realizar análisis parecidos; es preciso aclarar que cada empresa suele desarrollar sus propios procedimientos donde realizan un análisis particular de cada proyecto y valora los resultados según sus criterios a considerar.

- **Periodo de recuperación:**

El periodo de recuperación es aquel intervalo de tiempo que transcurre desde el comienzo del proyecto hasta q el flujo de caja (cash-flow) neto acumulado sea mayor que cero. Es decir que el nos indica desde cuando se empiezan a obtener ingresos positivos teniendo en cuenta las entradas y salidas desde el inicio del proyecto. Es por eso que busca el periodo de recuperación transcurra en el menor tiempo posible para que sea rentable el proyecto. Si el periodo de recuperación es cercano o superior al ciclo de vida del proyecto este se descartara automáticamente, ya que este no vale la pena porque o la ganancia será muy poca o nunca se llegara a recuperar la inversión.

El periodo de recuperación se mide normalmente en años (n).

Entonces:

$$\sum_{j=0}^n (R_j - C_j) = 0 \quad (5.1)$$

R_j y C_j : representan los ingresos y costes estimados durante el transcurso del año j .

Para simplificar la ecuación asumo que el cash-flow es contante durante la vida

del proyecto y despejo n de la ecuación:

$$-CI + n(R - C) = 0 \quad (5.2)$$

CI : representa el costo de inversión inicial.

$(R - C)$: flujo de caja anual.

Despejando n obtengo:

$$n = \frac{CI}{(R - C)} \quad (5.3)$$

Un gran inconveniente de este metodo es que no incluye el valor temporal del dinero.

■ Método del valor anual neto (VAN)

El método del VAN si tiene en cuenta el valor temporal del dinero y se considera q los elementos de coste de la inversión incluyen además de el precio del material a adquirir, el tipo de interés a pagar por financiaciones externas; también se considera los rendimientos futuros netos que se van a obtener de la inversión inicial.

Entonces consideramos a él VAN como l valor presente del cash-flow futuro, y se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{j=0}^n \frac{(R_j - C_j)}{(1 + i)^j} \quad (5.4)$$

R_j y C_j : representan los ingresos y costes estimados durante el transcurso del año j .

i : tipo de interés o rentabilidad esperado.

Es importante aclarar que si el VAN es positivo quiere decir que es una inversión rentable, y entre mayor sea el valor será mayor la rentabilidad; pero si él

VAN es negativo entonces supondrá q la inversión no es rentable.

En cuanto al valor de i se tomara el q la empresa esté dispuesto a arriesgar. En este método si es posible considerar el retorno de el robot, supniendo que al finalizar el proyecto este se puede retornar y se asume como una incognita M' , el VAN entonces será:

$$VAN = \sum_{j=0}^n \frac{(R_j - C_j)}{(1 + i)^j} + \frac{(M')}{(1 + i)^{n+1}} \quad (5.5)$$

Es importante notar que el valor de retorno del robot se considera al final del último año del proyecto.

- **Método de la tasa de interés de la renta (TIR)**

El método es muy similar al del VAN pero aunque su perspectiva es ligeramente distinta. Se trata de hallar la tasa de rendimiento que se va a obtener del proyecto es decir de la inversión. Si en el VAN se suponía una tasa de interés aceptable para el proyecto, en el TIR se trata de ver cuál es esa tasa de rendimiento máximo posible. Para esto se considera la misma fórmula del VAN , pero se considera que este es uno y que la tasa de rentabilidad i es desconocida. De esta ecuación se hallara i , y en base a ella se decidirá si merece acatar el riesgo que supone la inversión. En cuanto a lo demás es muy similar al VAN .

Cuadro 5.6: Ventas anuales de robots industriales por países

Country	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2009/2008 % change
America	15,400	21,986	17,910	19,582	17,192	8,992	-47.7
Argentina	17	65	36	141	150	45	-70.0
Brazil	208	320	430	703	781	495	-36.6
Chile	5	3	6	3	6	5	-16.7
Colombia				9	3		-100.0
North America** (Canada, México,USA)	15,170	21,567	17,417	18,722	16,242	8,417	-48.2
-Canada	440	3,079	1,737	3,025	1,813	513	-71.7
-Mexico	877	811	889	719	1,049	10,73	2.3
-Usa	13,853	17,677	14,791	14,978	13,380	6,831	-48.9
Peru		1	1		1		-100.0
Puertorico		30					
Venezuela				2	7	2	-71.4
Other America a/			20	2	2	28	1300.0
Asia/Australia	52,311	69,478	61,748	58,224	60,294	30,117	-50.8
China	3,493	4,461	5,770	6,581	7,879	5,525	-29.9
Hongkong	64	46	31	46	23	6	-73.9
India	369	450	836	928	883	363	-58.9
Indonesia	74	193	97	213	174	130	-25.3
Iran	106	60	2	1			
Japan	37,086	43,932	37,393	36,091	33,138	12,767	-61.5
Kuwait		1			1		-100.0
Macau		10					
Malaysia	250	243	248	478	370	209	-43.5
Oman		1					
Philippines	65	80	78	81	48	26	-45.8
Republic of Korea	5,457	13,006	10,756	9,048	11,572	7,839	-32.3
Saudi Arabia			2	3	1	2	100.0
Singapore a/	244	424	233	210	198	398	101.0
Taiwan	3,680	4,096	4,307	2,399	3,359	1,474	-56.1
Thailand	757	1,458	1,102	1,252	1,585	774	-51.2
United Arab Emirates		3		2	2	1	-50.0
Uzbekistán		4					
Vietnam	14	99	88	93	182	59	-67.6
Other Asia/Not specified by countries			32	11	42	35	-16.7
Australia	652	890	719	734	781	399	-48.9
New Zealand		23	53	53	56	110	96.4
Europe	29,409	28,432	30,385	35,204	34,695	20,483	-41.8
Austria	545	485	498	621	638	506	-20.4
Belarus		2	7	9	11	11	
Benelux	536	1,097	1,459	1,310	1,333	1,286	-3.5
-Belgium	339	468	681	510	561	672	19.8
-Netherlands	197	629	778	800	772	614	-20.5
Bulgaria		16	12	23	13	6	-53.8
Croatia		7	8	10	20	4	-80.0
Czech Rep.	163	513	551	836	795	257	67.7
Denmark	296	354	417	565	487	315	-35.3
Estonia	1	2		2	1	25	2400.0
Finland	401	556	321	358	331	276	-16.6
France	3,009	3,077	3,071	2,736	2,606	1,450	-44.3
Germany*	13,401	10,075	11,425	14,721	15,088	8,507	-43.6
Greece	3	10	17	54	59	39	-33.9
Hungary	77	183	142	195	247	197	-20.2
Iceland	6	1	6				
Ireland	17	90	70	97	52	30	-42.3
Israel	47	55	106	98	114	61	-46.5
Italy	5,679	5,425	5,108	5,811	4,793	2,883	-39.8
Latvia			1	2	2	2	
Lithuania	1	2		2	5	1	-80.0
Malta		1	1	3			
Norway	61	115	181	93	71	61	-14.1
Poland	75	224	379	505	897	322	-64.1
Portugal	211	144	268	292	208	269	29.3
Romania	18	26	16	51	74	53	-28.4
Russian Federation	24	49	41	219	165	268	62.4
Serbia			2	5	3		-100.0
Slovakia	39	181	46	106	208	233	12.0
Slovenia	15	84	115	164	158	66	-58.2
Spain*	2,826	2,709	2,409	2,295	2,296	1,348	-41.3
Sweden	833	939	865	1,046	1,100	587	-46.6
Switzerland	310	442	458	532	488	347	-28.9
Turkey	24	207	368	272	575	210	-63.5
Ukraine	6		2	11	4	3	-25.0
United Kingdom*	785	1,363	1,220	1,050	856	635	-25.8
Other Europe/Not specified by countries			793	1,112	998	223	-77.7
Africa	87	204	426	263	454	196	-56.8
Algeria				2		1	
Egypt		4	2		1	2	100.0
Morocco		1	6		1	28	2700.0
South Africa	87	192	406	247	431	155	-64.0
Tunisia		7	12	14	21	10	-52.4
Other Africa/Not specified by countries			583	384	337	230	-31.8
Total	97,207	120,100	111,052	113,652	112,972	60,018	-46.9

Fuente: Boletín AER-ATP N° 11

Cuadro 5.7: Cantidad de robots acumulados por países

Country	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2009/2008 % change
America	126,961	143,634	154,680	165,328	173,977	172,141	-1.1
Argentina	189	254	290	431	581	626	7.7
Brazil	2,352	2,672	3,102	3,805	4,586	5,081	10.8
Chile	5	8	14	17	23	28	21.7
Colombia				9	12	12	
North America (Canada, México, USA)	123,663	139,904	150,725	160,632	168,489	166,183	-1.4
-Canada							
-Mexico							
-USA							
Peru		1	2	2	3	3	
Puerto Rico		30	30	30	30	30	
Venezuela				2	9	11	22.2
Other America/	752	685	517	400	244	167	-31.6
Asia/Australia	443,193	481,652	479,027	497,756	514,914	501,422	-2.6
China	7,096	11,557	17,327	23,908	31,787	37,312	17.4
Hongkong	64	110	141	187	210	215	2.9
India	619	1,089	1,905	2,833	3,716	4,079	9.8
Indonesia	121	314	411	624	798	928	16.3
Iran	510	570	572	573	573	573	
Japan	356,483	373,481	351,658	356,240	355,562	332,720	-6.4
Kuwait		1	1	1	2	2	
Macao		10	10	10	10	10	
Malaysia	1,452	1,695	1,943	2,421	2,791	3,000	7.5
Oman		1	1	1	1	1	
Philippines	93	173	251	322	380	406	6.8
Republic of Korea*	51,302	61,576	68,420	71,942	76,923	79,003	2.7
Saudi Arabia			2	5	6	8	33.3
Singapore	5,443	5,463	5,292	4,407	3,510	3,408	-2.9
Taiwan	11,881	15,464	19,204	20,973	23,644	24,365	3.0
Thailand	1,014	2,472	3,574	4,826	6,411	7,185	12.1
United Arab Emirates		3	3	5	7	8	14.3
Uzbekistan		4	4	4	4	4	
Vietnam	14	113	201	294	476	535	12.4
Other Asia	2,931	2,639	2,553	2,043	1,389	962	-30.7
Australia	1,170	4,915	5,478	5,998	6,529	6,402	-1.9
New Zealand		23	76	129	185	295	59.5
Europe	279,019	295,918	314,473	328,890	343,329	343,661	0.1
Austria	3,907	4,148	4,382	1,761	5,122	5,398	5.4
Belarus		2	9	18	29	40	37.9
Benelux	8,749	9,362	10,128	10,648	11,124	44,678	5.0
-Belgium	5,987	6,124	6,331	6,301	6,276	6,448	2.7
-Netherlands	2,762	3,238	3,797	4,347	4,848	5,230	7.9
Bulgaria		16	28	51	64	70	9.4
Croatia		7	15	25	45	49	8.9
Czech Rep.	1,533	1,971	2,472	3,258	3,978	4,160	4.6
Denmark	2,342	2,681	3,013	3,514	3,891	4,078	4.8
Estonia	2	4	4	6	7	32	357.1
Finland	3,712	4,159	4,349	4,495	4,663	4,719	1.2
France	28,133	30,236	32,110	33,462	34,370	34,099	-0.8
Germany*	120,544	126,294	132,594	139,980	144,643	144,133	-0.4
Greece	63	73	90	144	203	242	19.2
Hungary	285	458	592	772	1,014	1,207	19.0
Iceland	6	7	13	13	13	13	
Ireland	31	121	191	288	340	370	8.8
Israel	141	196	302	400	514	575	11.9
Italy	53,244	58,198	58,898	61,589	63,051	62,242	-1.3
Latvia		1	1	3	5	7	40.0
Lithuania	1	1	3	3	8	9	12.5
Malta		1	2	5	5	5	
Norway	724	811	960	1,012	1,031	1,025	-0.6
Poland	643	846	1,213	1,704	2,548	2,805	10.1
Portugal	1,488	1,542	1,710	1,892	1,990	2,144	7.7
Romania	27	53	69	120	194	247	27.3
Russian Federation**	5,000	5,049	5,214	423	578	836	44.6
Serbia			2	7	10	10	
Slovakia	483	576	596	677	860	1,068	24.2
Slovenia	391	460	560	709	852	903	6.0
Spain	21,893	24,141	26,008	27,473	28,636	28,781	0.5
Sweden	7,341	8,028	8,245	8,830	9,426	9,396	-0.3
Switzerland	3,539	3,732	3,940	4,215	4,431	4,377	-1.2
Turkey	196	403	771	1,043	1,618	1,828	13.0
Ukraine	7	7	9	20	24	27	12.5
United Kingdom*	14,176	17,948	15,082	15,340	15,080	13,923	-7.7
Other Europe	418	407	898	1,990	2,962	3,167	6.9
Africa	430	634	1,060	1,323	1,777	1,973	11.0
Algeria				2	2	3	50.0
Egypt		4	6	6	7	9	28.6
Morocco		1	7	7	8	36	350.0
South Africa	430	622	1,028	1,275	1,706	1,861	9.1
Tunisia		7	19	33	54	64	18.5
Other Africa/not specified by countries			583	967	1,304	1,534	17.6
Total	848,603	922,838	948,823	994,264	1,035,301	1,020,731	-1.4

Fuente: Boletín AER-ATP N° 11

CAPÍTULO 6

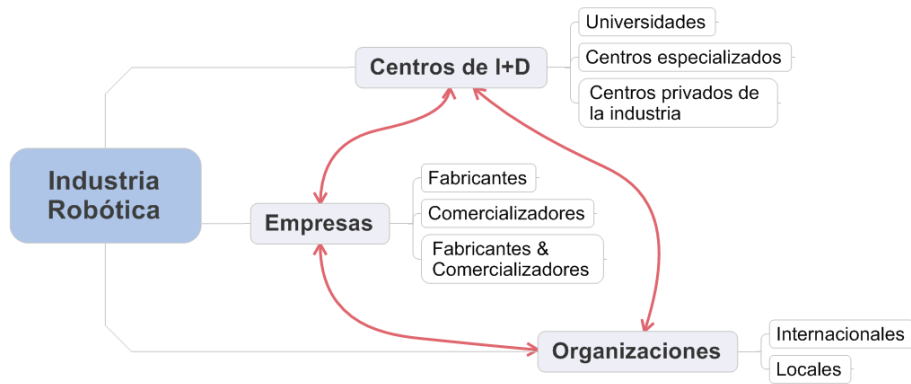
ESTADO DEL ARTE

Existen 3 aspectos fundamentales de la industria de la robótica como lo son: Organizaciones que trabajan por afianzar el campo de la robótica, empresas e industrias que fabrican y/o comercializan robots para aplicaciones industriales e Instituciones que aportan a la investigación y desarrollo de la robótica, que por lo general son universidades con programas y grupos especializados. La industria de la robótica se interrelacionan los componentes entre si como se muestra en la figura 6.1

6.1. ORGANISMOS INTERNACIONALES Y LOCALES QUE TRABAJAN EN EL ÁREA DE LA ROBÓTICA.

Existen un gran número de organizaciones que trabajan en el campo de la robótica. Estas congregan diferentes industrias e instituciones educativas para promover la investigación y desarrollo y para articular dicha industria. En la tabla 6.1 se muestran

Figura 6.1: Distribución de la robótica industrial



Fuente: Autores del proyecto.

algunas organizaciones y asociaciones existentes actualmente. Dichas organizaciones pueden tener un alcance local o internacional como se muestra en la figura 6.2

Figura 6.2: Tipos de organizaciones



Fuente: Autores del proyecto.

6.1.1. Organismos internacionales

Existen organizaciones internacionales que rigen, regulan y promueven el campo de la robótica a nivel industrial, las cuales, son conformadas por una serie de organizaciones locales, centros de investigación y desarrollo, empresas o corporaciones, entidades estatales y demás. Como se muestra en la figura 6.3. En la tabla 6.1 se muestran las organizaciones de carácter internacional más importantes.

Cuadro 6.1: Organismos internacionales que trabajan en el área de la robótica

organización	Aspecto	Información de contacto
<i>Federation of Robotics IFR</i>	INTERNACIONAL	sitio web oficial http://www.ifr.org/ direccion: Lyoner Str. 18 60528 Frankfur/ Alemania Telefono: +49-69-6603-1518 Fax:+49 69-6603-2697
<i>IEEE Robotic & Automation Society RAS</i>	INTERNACIONAL	sitio web oficial http://www.ieee-ras.org/ direccion: NA Telefono: +1 732 981 966 Fax:NA
<i>The European Robotics Technology Platform EUROP</i>	INTERNACIONAL EUROPA	sitio web oficial http://www.robotics-platform.eu direccion: Diamant Building Boulevard A. Reyers, 80-1030 Bruselas/Belgica Telefono: +49-69-6603-1518 Fax:+49 69-6603-2697
<i>Robotic Industries Association RIA</i>	INTERNACIONAL NORTE AMERICA	sitio web oficial http://www.robotics.org/ direccion: 900 Victors Way, Suite 140, Ann Arbor, Michigan 4810/Estados Unidos Telefono: +32 2706 8222 Fax:734.994.3338

Fuente: Autores de proyecto

- **International federation if robotics IFR (FRANKFURT/ALEMANIA)**

Figura 6.3: Miembros de las organizaciones internacionales



Fuente: Autores del proyecto.

La IFR (Federación internacional de robótica) fue establecida en 1987 en medio del 17º simposio internacional de robótica (ISR) como una organización sin ánimo de lucro para organizaciones robóticas de alrededor de 15 países, es la organización más grande del mundo en el área de la robótica.

Los propósitos de la IFR son promover y fortalecer la industria robótica mundial, proteger sus intereses financieros y crear conciencia sobre sus nuevas tecnologías. La IFR realiza investigación y desarrollo además de actuar como un punto focal para las organizaciones y los representantes gubernamentales en actividades relacionadas con la robótica de todo el mundo.

Los propósitos de la IFR son promover y fortalecer la industria robótica mundial, proteger sus intereses financieros y crear conciencia sobre sus nuevas tecnologías. La IFR realiza investigación y desarrollo además de actuar como un punto focal para las organizaciones y los representantes gubernamentales en actividades relacionadas con la robótica de todo el mundo.

ACTIVIDADES

- Ayuda a fabricantes y proveedores de la robótica a entrar en nuevos mercados y suministra información sobre los avances tecnológicos recientes.
 - Recopila datos del mercado teniendo como referencia encuestas, estudios estadísticas y otros datos obtenidos a nivel mundial sobre el uso de la robótica.
 - Establece vínculos y coopera activamente con organizaciones internacionales en el campo de la robótica.
 - Administra los lazos entre la industria robótica y las actividades de investigación y desarrollo en campos emergentes y tecnologías relacionadas.
 - Patrocina el simposio internacional de robótica.
 - Participa en el establecimiento de las normas internacionales para robots.
- **IEEE/RAS (robotics & automation society)**

En 1984 se crea el concejo de robótica y automatización de la IEEE el cual en 1987 toma el carácter de sociedad. Los objetivos de la IEEE RAS (sociedad de robótica y automatización) son de carácter científico, literario, educativo e investigativo. La sociedad se esfuerza por lograr avances teórico-prácticos de la robótica, automatización y otras ciencias afines para mantener altos estándares profesionales entre sus miembros siguiendo los estatutos de la IEEE.

ACTIVIDADES

La sociedad promueve la cooperación e intercambio de información técnica entre sus miembros y afiliados, además de promover la publicación de los trabajos técnicos de los mismos. La IEEE RAS cuenta con varios departamentos enfocados

en diferentes dependencias como lo son RAS investigación, RAS industria, RAS estudiantes, RAS conferencias y RAS publicaciones.

■ **The European Robotics Technology Platform EUROP.**

Es una entidad impulsada por la industria, fundada en 2005 para fortalecer la competitividad de I+D (investigación y desarrollo) y el mercado europeo en el área de la robótica. Realizó la agenda estratégica de investigación en robótica SRA (Strategic Research Agenda for European Robotics) la cual fue publicada en el 2009, para garantizar el beneficios de los fabricantes y mejorar el dialogo entre los principales actores industriales y académicos en esta área. La SRA trabaja en 5 capos de aplicación específico como lo son: industria, servicios profesionales, servicios domésticos, seguridad y aplicaciones espaciales.

ACTIVIDADES

- Promueve y difunde la SRA.
- Promueve y genera acciones para difundir la información y desarrollos recientes en medios de comunicación europeos.
- Genera vínculos entre la industria y entidades académicas para mejorar el dialogo entre estas.
- Congrega entes que trabajen con tópicos relacionados con la robótica para facilitar el intercambio de información.
- Asegura que la información relevante esta disponible para la comunidad que trabaja en aéreas de interés de la robótica.
- Trabaja en la articulación de los dominios de la robótica y facilita el intercambio de información entre ellos.

■ **Robotic Industries Association**

La Asociación industrial de robótica (RIA) fue fundada en 1974 y es el único grupo comercial in norte América organizado específicamente para servir a la industria de la robótica. Las compañías miembros incluyen los principales fabricantes de robots, proveedores de componentes grupos de investigación y firmas consultoras.

ACTIVIDADES

- Promueve la investigación y desarrollo en el área de la robótica.
- Brinda información y realiza estudios de mercado en áreas de robótica y automatización.
- Facilita información de investigaciones y desarrollos recientes a sus miembros (También facilita información gratuita al público en general)
- Facilita información sobre fabricantes, proveedores y productos.

6.1.2. Organizaciones y Asociaciones Locales.

- **AER-ATP (Asociación española de robótica y automatización tecnologías de la producción)/barcelona españa**

La AER nace en 1983 como organización sin ánimo de lucro con la finalidad de agrupar a los diferentes miembros o colectivos relacionados con la Robótica (AER) y la Automatización de las Tecnologías de la Producción (ATP) en España.

ACTIVIDADES

Cuadro 6.2: Organismos Locales que trabajan en el área de la robótica

organización	Aspecto	Información de contacto
AER-ATP	LOCAL España	sitio web oficial http://www.aeratp.com direccion:Barcelona/España/ Telefono: +93 215 57 60 Fax:+ 93 215 23 07
British Automation and Robot Association BA- RA	LOCAL Inglaterra, Gran Bretaña.	sitio web oficial http://www.bara.org.uk/ direccion: 34 Stafford Road, Surrey SM6 9AA wallington/Inglaterra/ Telefono: +49-69-6603-1518 Fax:+49 69-6603-2697
Italian Robotics and Automation Association SIRI	LOCAL ITALIA	sitio web oficial http://www.robosiri.it/ NA Telefono: NA Fax: NA
Japan Robot Association JARA	LOCAL JAPÓN	sitio web oficial http://www.ifr.org/ direccion: Lyoner Str. 18 60528 Frank- fur/Alemania Telefono: +49-69-6603-1518 Fax:+49 69-6603-2697
korea machine tool manufacturer's association komma	local KOREA	sitio web oficial http://www.komma.org direccion:4th f, tower cristal, 1008-1, seul/korea Telefono: +82 2-565-2721 Fax:+83-2-564-5639
swedish industrial robot association swira	Local Suecia	sitio web oficial http://www.swira.org direccion: YASKAWA Nordic AB Johnny Jarhal taiean Estocolmo/Suecia Telefono: NA Fax:NA
danish industrial robot association	local DINAMARCA	sitio web oficial http://www.dira.dk direccion: Att Soren Peter Johansen Fors- kerparken 10F 5230 Odense M Dinamar- ca Telefono: +45 72202859 Fax:63157062
vdma robotics + automation	Local 141 Alemania	http://www.vdma.org/ direccion: Lyoner Str. 18 60528 Frank- fur/Alemania Telefono: (+49 69) 66 03-18 57 Fax:+49 69) 66 03-28 57

- Consultoría permanente a empresas industriales usuarias.
- Información regular sobre la situación del sector a nivel nacional e internacional.
- Participación en las actividades de normalización, certificación y reglamentación en los diferentes campos que se integran (seguridad, comunicaciones, etc.).
- Apoyo a las actividades de exportación.
- Información y asesoramiento sobre las políticas de colaboración industrial y programas sectoriales de las administraciones públicas españolas y europeas.
- Elaboración y difusión de las estadísticas nacionales y mundiales del sector.
- Coordinación y desarrollo de cursos de formación.
- Acceso a bolsa de trabajo y a fondo documental del sector.
- Elaboración y difusión del catálogo sobre la "Oferta en Automatización de Tecnologías de la Producción y Robótica".
- Participación regular en la International FEDERATION OF ROBOTICS(IFR)
- Participación regular en EUROPEAN FACTORY AUTOMATION COMMITTEE (EFAC)

■ **British Automation and Robot Association BARA**

Los objetivos principales de la asociación británica de automatización y robot son promover el uso y ayudar al desarrollo de la automatización en la industria británica.

■ **Japan Robot Association JARA TOKYO /JAPON**

En 1971 se conformó una organización denominada "THE ROBOT INDUSTRIAL CONVERZACIONE", la cual se reorganizó formando THE JAPAN INDUSTRIAL ROBOT ASSOCIATION en 1972 y finalmente se estableció formalmente en 1973. EL nombre actual fue adoptado en 1994 con el fin de dar espacio a robots no industriales como robots personales.

La Asociación tiene como objetivo promover el desarrollo de la industria de fabricación de robots mediante el fomento de la investigación y el desarrollo de los sistemas asociados a esta tecnología. La Asociación se esfuerza por fomentar el uso de tecnología avanzada para mejorar el bienestar de la nación y a su vez contribuir al crecimiento económico y aumento de la calidad de vida.

ACTIVIDADES

- La Asociación promueve la estandarización en la industria del robot en compañía de la Japanese Industrial Standards (JIS), y de JARAS (Japan Robot Standards Association) y la realización de las deliberaciones sobre la norma ISO / TC 184/SC2.
 - Promover la investigación y el desarrollo (I+D) y la construcción de robots
 - Realiza estudios de mercado mediante encuesta e investigación sobre Pedidos producción y envíos de robots y sistemas robóticos
 - JARA formula políticas básicas para promover la industria de los robots en Japón.
 - Realiza dos exposiciones: la exhibición internacional de robots (The International Robot Exhibition) y la exhibición de tecnología de fabricación electrónica (The Electronic Manufacturing Process Technology Exhibition).
- **Italian robotics and automation association SIRI (Sinisello/Italia)**

Fue fundada en 1975 como una asociación sin ánimo de lucro con el fin de establecer espacios de discusión y toma de decisiones para personas y organizaciones interesadas en la investigación y desarrollo de actividades relacionadas con la robótica. Esta conformada por cuerpos de investigación, universidades, fabricantes, importadores y operadores en el área de la robótica. SIRI trabaja y coopera con la casas de publicaciones, editoriales y fabricantes.

ACTIVIDADES

- Organiza y patrocina congresos, seminarios, conferencias y talleres con el objetivo de difundir información y desarrollar el crecimiento profesional de personas que trabajan en el campo de la robótica.
 - promueve estudios e informes dirigidos a la adquisición de conocimientos de los problemas técnicos, sociales y económicos involucrados en la robótica y sus aplicaciones.
 - Colección y procesamiento de datos estadísticos sobre la producción y el consumo de robot en Italia.
 - la promoción y el patrocinio de cursos de formación para estudiantes y cursos de formación profesional para las personas que trabajan en el área.
 - la promoción y el patrocinio de publicaciones sobre la robótica y sus aplicaciones.
- **Korea machine tool manufacturer's association KOMMA Seúl/Corea**

Fue fundada en 1975 como una asociación sin ánimo de lucro con el fin de establecer espacios de discusión y toma de decisiones para personas y organizaciones interesadas en la investigación y desarrollo de actividades relacionadas con la robótica. Esta conformada por cuerpos de investigación, universidades, fabricantes,

importadores y operadores en el área de la robótica. SIRI trabaja y coopera con la casas de publicaciones, editoriales y fabricantes.

ACTIVIDADES

- Establece relaciones con organizaciones en el extranjero para el intercambio de información.
- Realiza políticas gubernamentales para el desarrollo de la tecnología de manufactura.
- Establece estrategias para la industria de las maquinas herramientas.
- Organiza comités para compartir intereses mutuos.
- Recolecta y analiza datos estadísticos acerca de las maquinas herramientas.
- Publica revistas mensuales que cubren los campos relacionados con maquinas herramientas.
- Organiza SIMTOS, (The Seoul International Machine Tool Show).

■ Robotic Association Taiwan ROBOAT

Fue creada en 1996 en Taiwán, copatrocinado por el ministerio de economía industrial, con el fin de promover el intercambio de información y la investigación y desarrollo de los sectores y áreas relacionadas con la robótica. Además crea oportunidades de negocio y genera actividades para la aceleración del desarrollo de esta industria.

ACTIVIDADES

- Promueve la investigación y el desarrollo en áreas relacionadas con la robótica
- Propende por el desarrollo de la industria.
- Realiza, coopera y patrocina seminarios, conferencias, exposiciones y eventos sobre robótica industrial.
- Genera nexos entre compañías e industrias.
- Establece estrategias para la industria.

■ **Swedish industrial robot association SWIRA**

Es una asociación comercial que tiene como objetivo ser un foro para unificar y congrega los entes interesados en la automatización y robótica en Suecia, además de fomentar el uso y su desarrollo. Cuenta con más de 40 empresas asociadas y varios grupos educativos entre universidades y centros de desarrollo.

ACTIVIDADES

- Promueve la investigación y desarrollo en áreas relacionadas con la robótica.
- Congrega entes que trabajen con tópicos relacionados con la robótica para facilitar el intercambio de información.
- Realiza estudios estadísticos sobre el mercado y la implementación de tecnologías relacionadas con la robótica.
- Realiza junto a organizaciones profesionales estudios, seminarios, talleres y simposios sobre automatización y robótica en Suecia.

Colombia no cuenta con un ente articulado y organizado que este enfocado en el área específica de la robótica y que vele por desarrollo de esta tecnología.

6.2. EMPRESAS E INDUSTRIAS QUE FABRICAN Y/O COMERCIALIZAN ROBOTS INDUSTRIALES..

Actualmente existe una gran cantidad de empresas encargadas de fabricar y/o comercializar elementos y sistemas robóticos alrededor de todo el mundo para suplir la demanda de estos, ya que este mercado se ha venido ampliando debido a los requerimientos de las industrias automotriz, de manufactura y fabricación, farmacéuticas entre muchas mas. A continuación se muestran las empresas más representativas a rededor del mundo que ejercen esta labor (tabla 6.4)

Cuadro 6.3: Empresas mas representativas en la industria.

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
ABB	www.abb.com	Soldadura por arco y puntos, Montaje, Corte/desbarbado, Inyección de metales a presión en molde, Pegado/sellado, Moldeado por inyección, Asistencia para mecanización, Manipulación de materiales, Recogida, Embalaje, Pulverización, Paletizado, Asistencia a prensa de rotura.
Continua en la pagina siguiente		

Cuadro 6.3 – Continuación de la página anterior

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
ADEPT	www.adept.com	Robots para peletizado, montaje, ensamblaje mecánico, ensamblaje eléctrico.
AEA	www.aeatech.com	Manejo de grandes cargas, Tareas dentro de centrales nucleares, Servicios militares en desactivación de minas y explosivos
ARRICK	www.robotics.com	Tareas automáticas y repetitivas, Aprovisionamiento, Manejo de cargas, Testado automático
BISIACH & CARRU	www.bisiachcarru.it	, Líneas de mecanizado y montaje robotizadas
BALLOTI SISTEMI	.ballottisistemi.com	Carretilla autoguiada por láser
CAMPETELLA	.campetella.it	Robots para la inyección de plásticos, Robots para la modelación de plásticos, ROBOTS ANTROPOMÓRFICOS,, También usos de peletizado, ensamblaje, manejo de cargas
CLOOS	www.cloos.de	Unión y montaje de pequeños componentes, Soldadura, Robots dirigidos a la automoción
Continua en la pagina siguiente		

Cuadro 6.3 – Continuación de la página anterior

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
COMAU	www.comau.com	Soldadura geométrica automática, Soldadura MIG automatizada, Sistemas de soldadura de cuerpo y Ensamblaje, Sistemas de transporte y manipulación, Ensamblado general, Sistemas integrados, Corte y soldadura por láser, Servicios de mantenimiento Sistemas de inspección visual, Sectores automoción, aeroespacial, defensa.
COMERCIAL BEANUVI	www.beauvi.com	Empresas que representa en España: Motorman, Talleres AR, Diplomatic, Univer, Control Techniques, DTC Tecnolog, LeroySomer, S.I.G., S.A. Phoenix Mecano España, Larzep
DENSO	www.densorobotics.com	Robots de 4, 5 y 6 ejes con múltiples Aplicaciones
EPSON	www.robots.epson.com	Módulos lineares robotizados, Robots tipo SCARA, Robots de brazo mecánico de 6 ejes
Continua en la pagina siguiente		

Cuadro 6.3 – Continuación de la página anterior

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
FANUC	www.fanucrobotics.com	Conado y sellado, Corte, Ensamblaje, Manipulación en fundiciones, Manipulación en máquinas de moldeo plástico, Manipulación forja y estampación, Peletizado / Manipulación, Pintura / Recubrimiento. Soldadura al arco y por puntos, Tratamiento.
GD CONVEY	www.gdconvey.com	Carretillas auto guiadas por láser, Desde la recepción de materiales, almacenaje, movimiento de mercancías en planta, preparación de pedidos, peletizado, distribución, así como integración máquinas de precisión o a medida, utilizando productos Propios y fabricados por otras empresas.
Continua en la pagina siguiente		

Cuadro 6.3 – Continuación de la página anterior

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
G.T.D.	www.gtd-industria.com	Carretilla auto guiada por láser, Transelevadores automáticos, Sistemas de gestión de almacenes, Estaciones de Soldadura Multipunto, Robots de Soldadura por puntos, Robots de Soldadura MIG, Robots de Soldadura Tucker, Sistemas de Comunicación y supervisión de los equipos de Soldadura, Células robotizadas
HITACHI	www.hitachi.es	Robots para soldadura
HYUNDAI	www.hyundairobotics.com	Robots eléctricos servo dirigidos de 6 ejes
INTELITEK	www.intelitek.com	Sistemas de navegación autónomos, Manejo de piezas Ensamblaje de piezas Robots principalmente encaminados a la formación
IROBOT	www.irobot.com	Robots domésticos de limpieza Robots de aplicaciones militares Robots auto guiados, de reconocimiento de Minas
Continua en la pagina siguiente		

Cuadro 6.3 – Continuación de la página anterior

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
ISE	www.ise.bc.ca/robotics	Robots para el relleno reposado automático de vehículos y cazas (aviones militares) Robots para tareas submarinas, Brazos mecánicos manipuladores autónomos
KAWASAKI	.kawasakirobotics.com	Robots de pintura Robots de pelletizado, Robots de aprovisionamiento, Robots de ensamblaje. Robots de alzado de cargas, Robots para el fabricado de metal (soldadura), Robots de empaquetado
KUKA	www.kuka.de	Robots de soldadura por arco y punto, Robots de soldadura por láser, Robots de corte por láser, Robots para sellado, Robots de ensamblaje, Robots de alzado de pesos. Robots de concatenado de prensas , Robots para salas blancas, Robots de pórtico, Robots de máxima precisión, Robots para el trabajo en fundición.
Continua en la pagina siguiente		

Cuadro 6.3 – Continuación de la página anterior

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
LABMAN	www.labman.co.uk	Robots para la dosificación de medicamentos, Robots para el análisis de agua, Robots para manejo de líquidos, Robots para sistemas de carga, Robots de auto-analizado, Robots para el testado de materiales, Robots para tareas específicas; Todo ello va dirigido al sector farmacéutico
LOCTITE	equipment.loctite.com	Robots tipo SCARA para dosificación de pegamento
LOMUSA	www.lomusa.com	Plegadora con robot
MANUTEC	www.manutec.de	Brazos mecánicos robotizados
MITSUBISHI	www.meau.com	Robots de articulación vertical Robots SCARA Robots para el microensamblaje
Continua en la pagina siguiente		

Cuadro 6.3 – Continuación de la página anterior

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
MOTOMAN	www.motoman.com	Robots de manipulación, Robots de plegado, Robots Gantry, Robots de pulido, Robots de paletizado, Robots de soldadura, Robots de corte por chorro de agua Robots de etiquetado, Robots de soldadura por láser, Robots de inyección de aluminio, Robots de corte por láser y plasma, Robots de soldadura por puntos y arco.
NACHI	nachirobotics.com	Robots de soldadura por arco y punto, Robots para el manejo de cargas, Robots para sellado, Robots de paletizado, Robots para el concatenado de prensas
OXIM	oxim.co.uk	Robots de brazo mecánico para aplicaciones médicas
PANASONIC	industrial.panasonic.com	Robots para soldadura por arco, Robots para corte por plasma, Robots para soldadura por puntos, Robots para manejo de cargas
Continua en la pagina siguiente		

Cuadro 6.3 – Continuación de la página anterior

EMPRESA	PÁGINA WEB	TIPO/APLICACIÓN
REIS	www.reisrobotics.com	Robots con brazo mecánico horizontales y Verticales, Robots con autonomía de desplazamiento. Robots para el peletizado, Robots de corte por láser
SCHILLING	www.schilling.com	Exoesqueleto asistido robóticamente, Sistema de taladrado submarino asistido remoto, Equipos para operar bajo el agua, brazos mecánicos, etc.
SEIKO	seikorobots.com	Fabrica robot manipuladores, soldadores.
SEPRO	seprorobotique.com	Robots saca coladas, Manipuladores simples, Pequeños robots para tareas de descarga simple en prensas pequeñas. Robots para automatizado de prensas medias y grandes. Robots de alta cadencia para prensas de pequeño tonelaje. Robots de 8 ejes simultáneos.
YAMAHA	yamaharobotics.com	Robots de tipo cartesiano, Robots de tipo brazo mecánico, Robots tipo SCARA, Múltiples aplicaciones. Robots de pocos ejes en general

6.3. PRINCIPALES CENTROS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN EL ÁREA DE ROBÓTICA.

Los centros de investigación y desarrollo (I+D), son por lo general Universidades que propenden por el desarrollo de la robótica y sus aplicaciones. Cabe resaltar que las empresas patrocinan dichos centros de investigación y la mayoría de los fabricantes poseen centros propios que articulan los avances recientes a sus tecnologías. En esta sección se limitara a hablar de las Universidades más reconocidas en este campo, sus centros de investigación y proyectos relevantes. En la figura 6.4 se muestra un esquema del contenido a desarrollar

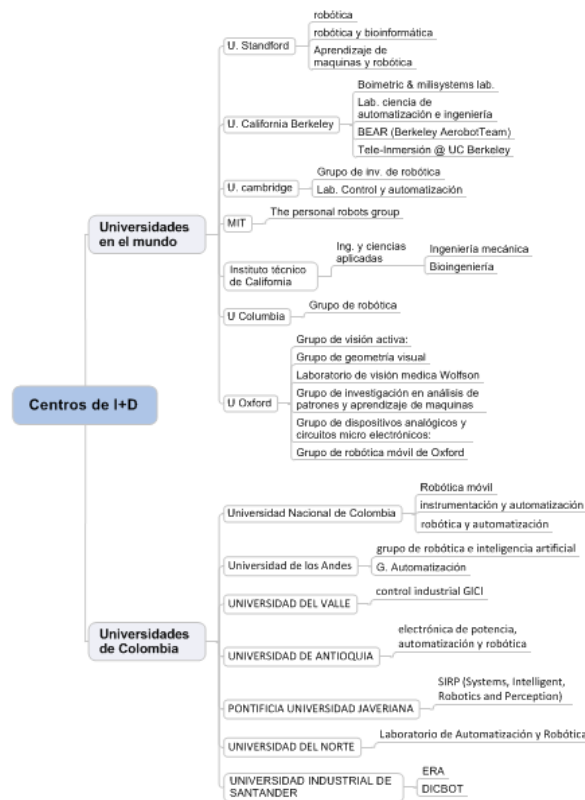
6.3.1. Estado de la robótica en las principales universidades del mundo.

- **Universidad de Stanford**

La investigación en robótica en esta universidad está a cargo del SAIL (The Stanford AI laboratory), el cual está involucrado no solo en este tema sino también temas como la bio-informática, sistemas multiagentes, redes neuronales, procesamiento de imágenes entre otros. Los principales grupos de investigación relacionados con robótica son los siguientes:

- **Robótica:** A cargo del profesor OussamaKhatib, persigue la investigación sobre el control robótico, interfaz háptica, manipulación móvil y la simulación. Donde se busca llevar la robótica más allá de las plantas de fabricación y llevarla al mundo cotidiano. Buscando desarrollar sistemas competentes, prácticos, confiables, seguros y fáciles de usar. La discusión se centra en las

Figura 6.4: Principales centros de I+D



Fuente: Autores del proyecto.

estrategias y los algoritmos asociados con los comportamientos autónomos necesarios para los robots para trabajar, ayudar y cooperar con los humanos. Estos modelos y algoritmos aportan mucho a los nuevos robots llevándolos a unas aplicaciones potenciales a esta tecnología emergente como robots quirúrgicos, la robótica industrial, la educación entre muchas otras. En la figura 6.5 se muestra la simulación del asistente de robots móviles desarrollado por este grupo.

- **Robótica y bioinformática:** a cargo del profesor Jean Claude Lamtombe, el objetivo de este grupo de investigación es crear agentes autónomos que sientan, planeen y actúen en el mundo real y/o virtual. Su trabajo se centra en el diseño de estructuras y algoritmos para representar, sentir, planear, con-

Figura 6.5: SAMM(Stanford Assistant Mobile Manipulator)

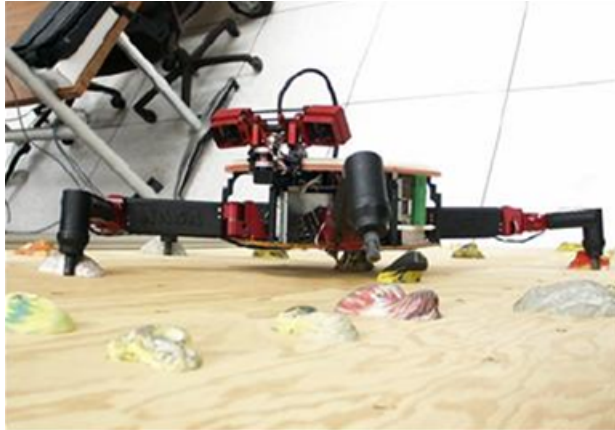


Fuente: <http://ai.stanford.edu/>.

trolar y hacer mover objetos físicos. Algunos temas específicos que se tratan son: la planeación de trayectorias sobre obstáculos, planificación óptima del movimiento utilizando ecuaciones dinámicas, planeación del movimiento para lograr tareas visuales, construcción de modelos 3D de entornos complejos, rastreo visual de objetos articulados, y razonamiento en mundos multiagentes. Las aplicaciones de estas investigaciones pueden ser en la cirugía asistida por robots, en la integración de diseño y fabricación, la adquisición y explotación de modelos geométricos 3D de objetos deformables. En la figura 6.6 se observa uno de los primeros robots escaladores.

- **Aprendizaje de máquinas y robótica:** por el profesor Andrew Y. Ng, cuya investigación se enfoca en el aprendizaje de máquinas para detección de minas, reconocimiento de patrones y control. Su trabajo se dirige a las propiedades matemáticas fundamentales del aprendizaje así como su aplicación práctica. Espera construir el mejor filtro de spam de código abierto del mundo, también dar solución a problemas de control como son el vuelo de helicópteros autónomos y robots andantes. Recientemente logró ser el primero en mantener el vuelo invertido con un helicóptero autónomo. Uno de

Figura 6.6: Robots escaladores



Fuente: <http://ai.stanford.edu/>.

los proyectos mas representativos es el desarrollo de helicopteros rototizados autonomos capaces de hacer el vuelo invertido sin asistencia alguna figura 6.7

Figura 6.7: Helicóptero Autónomo



Fuente: <http://heli.stanford.edu/>

- **Robótica:** otro grupo de investigación es encabezado por el profesor Ken Salisbury, su investigación tiene como objetivo facilitar una mayor interacción hombre-máquina, su nombramiento en el departamento de ciencias de la computación y cirugía muestra su interés en las aplicaciones médicas. Su

grupo patrocinado por el NIH (National Institutes of Health) está trabajando para crear un entorno de formación quirúrgico basado en simulación utilizando un multi-mano táctil y visual (simulación visual) para apoyar las habilidades quirúrgicas y entrenamiento de equipo. Además está desarrollando los sistemas mecánicos y de control para robots amigables que puedan trabajar en cooperación (y contacto) con humanos. Este trabajo se dirige hacia tareas autónomas y tele operativa así como la interacción humano-máquina. Algunos de las actividades previas del profesor Salisbury que han dado lugar a logros tecnológicos importantes son: la interfaz táctil PHANTOM de la SensAbleTechnology, el sistema quirúrgico Da Vinci de la compañía intuitiveSurgical y el brazo WAM de la compañía BarrettTechnology. Uno de los últimos desarrollos de este grupo es el robot PR2 capaz de desarrollar tareas sencillas y asistir personas discapacitadas (figura 6.8).

Figura 6.8: Robot Personal PR2



Fuente: Flirck.com foto de willowgarage

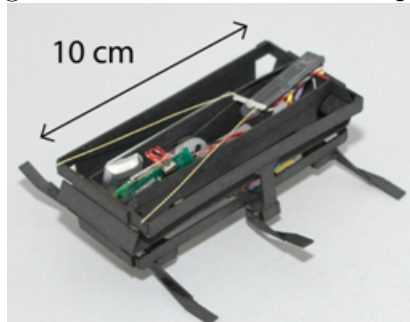
- **Universidad de California Berkeley**

La investigación en robótica es liderada en esta universidad por el laboratorio de

robótica y máquinas inteligentes. Donde algunos de los grupos que se especializan en los diversos campos de la robótica son:

- **Biomimetic Millisystems Lab:** dirigido por el profesor Ronald Fearing cuyo objetivo consiste en aprovechar las características de los animales, su locomoción, detección, mecánica, dinámica, estrategias de control, para implementarlos y mejorar radicalmente la capacidad de los milirobots. La investigación de este laboratorio va desde la comprensión fundamental de los principios mecánicos básicos a novedosas técnicas de fabricación para la integración del sistema de milirobots autónomos. Ultimamente se desarrolló un robot hexápodo que reproduce los movimientos de una cucaracha común, el cual se muestra en la figura 6.9.

Figura 6.9: DASH Robot Hexápodo



Fuente:<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~ronf/Biomimetics.html>

- **Laboratorio de la ciencia de automatización e ingeniería:** dirigido por el profesor Ken Goldberg, es un centro de investigación en robótica y automatización, con proyectos actuales en telerobótica operada por red, cirugía asistida por computadora, fabricación automatizada entre otros. Realizó el control remoto de un robot SCARA de 3 DOF mostrado en la figura 6.10
- **BEAR (Berkeley Aerobot Team):** dirigido por el profesor S. Shankar-Sastry, es un esfuerzo colectivo de investigación interdisciplinario que abarca disciplinas como teoría de sistemas híbridos, navegación, control, visión

Figura 6.10: Brazo robótico operado vía internet



Fuente: Collaborative Teleoperation on the Internet, IEEE ICRA 2000, San Francisco, CA. April, 2000.

computacional, comunicación y coordinación de múltiples agentes. Actualmente se operan 6 helicópteros completamente instrumentados, además de varios vehículos de ala fija y helicópteros que están bajo desarrollo. Están equipados con GPS/INS, cámaras y otros sensores a bordo, los cuales son usados para validar los algoritmos para los sistemas de control de los vehículos aéreos no tripulados (UAV). También cuentan con cuatro robots terrestres para juegos de evasión y búsqueda con los UAVs como se muestra en la figura 6.11 .

- **Tele-Inmersión @ UC Berkeley:** este grupo dirigido por la profesora Ruzena Bajcsy, busca como objetivo permitir a los usuarios ubicados en sitios geográficamente distantes colocarlos en tiempo real en un entorno simulado como si estuvieran compartiendo el mismo espacio físico. Se han necesitado varios investigadores en diferentes disciplinas como visión computacional, comunicación gráfica y por red. Esta tecnología podría ser usada en diferentes áreas como diseño CAD 3D, ergonomía, entretenimiento, aprendizaje y

Figura 6.11: Juego de evasión y búsqueda



Fuente: <http://bearcenter.berkeley.edu/projects/>

entrenamiento a distancia entre muchos otros. una de las pimeras implementaciones de esta tecnologia fua a la arqueologia, desarrollando un entorno simulado (figura 6.12)

Figura 6.12: Ciber arqueología



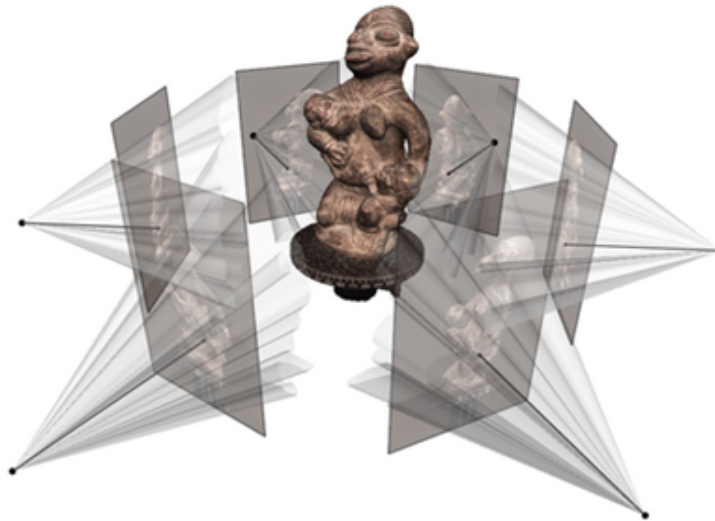
Fuente: <http://tele-immersion.citris-uc.org/cyberarchaeology/>

■ Universidad de Cambridge

La investigación en robótica en esta universidad esta a cargo del departamento de ingeniería, donde Roberto Cipolla es director y cuyas investigaciones se centran en visión computacional y robótica. Donde los principales temas de investigación son: detección de objetos (segmentación y reconocimiento), video segmentación y reconocimiento, robots guiados visualmente, entre otros. Además posee “**Robó-**

tica” una revista oficial de la IFR y de la asociación CLAWAR. En esta revista se encuentra material multidisciplinario de la robótica, donde aparecen los principales acontecimientos, aplicaciones, y principales investigaciones en este campo y en el de la automatización. También trata lo que esta ciencia produce en diversos aspectos tales como la industria, la salud, los aspectos socio económicos. Recientemente desarrolló un sistema de reconocimiento de formas poligonales(ver figura 6.13), con el cual se piensa desarrollar aplicaciones de control guiado por vision.

Figura 6.13: Reconocimiento de formas poligonales a partir de fotografías.



Fuente:<http://www.eng.cam.ac.uk/>

- **Massachusetts Institute of Technology (MIT)**

La investigación en el campo de la robótica está liderada por el grupo de robots personales (The personal robots group) que se centra en el desarrollo de los principios, técnicas y tecnologías para los robots personales. Donde uno de sus principales objetivos es desarrollar robots sociables que puedan trabajar con los seres humanos como iguales. Este grupo está dirigido por la profesora Cynthia Breazeal, quien ha tenido un gran reconocimiento en el campo de los robots so-

ciables, ha escrito más de 100 artículos para revistas y conferencias en temas como robótica autónoma, inteligencia artificial, interacción humano-robot, y aprendizaje en robots, además de un libro titulado “Designing Sociable Robots”. Ella y sus estudiantes han desarrollado numerosas criaturas robóticas. Algunos de los proyectos desarrollados son:

- **AUR lámpara de escritorio robótica:** El objeto de figura 6.14 es un asistente colaborativo de iluminación, que demuestra la interacción humano-robot, que sucede a la perfección iluminando el lugar preciso en el momento adecuado. Estas luces robóticas podrían desempeñar un papel de importancia en futuras salas de operaciones, taller de mecánica o en cualquier sitio donde se necesite una mano extra en la iluminación.

Figura 6.14: DAUR lámpara de escritorio robótica



Fuente:<http://robotic.media.mit.edu/projects>

- **MeBot:** es un avatar robótico semiautónomo que permite a la persona interactuar de una forma más rica con una audiencia de la que permite un celular o una video conferencia. Este robot fue diseñado para poder transmitir las partes no verbales de la comunicación social. Es capaz de comunicar algunas posturas del cuerpo, un amplio rango de movimientos de la cabeza y unos brazos muy expresivos. MeBot (figura 6.15) nos lleva a un futuro

donde se pueda tener una presencia remota ahorrando tiempo, sin perder la experiencia de “estar ahí”.

Figura 6.15: MeBot del MIT



Fuente:<http://robotic.media.mit.edu/projects>

- **Nuevos actuadores:** hasta la fecha, la industria ha sido la fuerza motora que ha hecho avanzar la tecnología en actuadores. Ahora enfrentamos nuevas motivaciones para el diseño de actuadores entre las cuales se encuentran: movimiento fluido, estabilidad, control continuo y que permitan una interacción táctil segura y significativa. Para estos fines el MIT está desarrollando nuevos actuadores (figura 6.16)donde sacrifica un poco la alta precisión por suavidad y calidad de movimiento, mientras se logra alcanzar el poder y la densidad de par adecuados para conducción de robots móviles.
- **Anémona pública:** En la figura 6.17 se muestra la anémona recreada de forma artificial que puede interactuar con el medio ya sea una caída de agua o un estanque y con otros aspectos de su entorno. Interactúa con el público por la orientación de sus movimientos usando un sistema de visión artificial estéreo, reacciona a la presencia de agentes extraños retrocediendo si se acerca demasiado.

■ **Instituto Tecnológico de California.**

Figura 6.16: Actuadores MIT



Fuente: <http://robotic.media.mit.edu/projects>

Figura 6.17: Anémona pública



Fuente: <http://robotic.media.mit.edu/projects>

La investigación en robótica y bioingeniería está a cargo del departamento de ingeniería mecánica y bioingeniería en la división de ingeniería y ciencias aplicadas. Están a cargo de este departamento el profesor Joel Burdick y su asistente la profesora MariaKoeper. Este grupo de investigación cubre ambos aspectos tanto la robótica como la bioingeniería y entre los actuales temas de interés están:

- **AXEL:** un vehículo robótico minimalista para terrenos extremos (figura 6.18), donde se busca su mínima complejidad y masa. Consiste básicamente en un vehículo de dos ruedas simétrico con un vínculo final. Axel está diseñado para realizar excursiones en terreno escarpado y tomar muestras en la superficie planetaria.

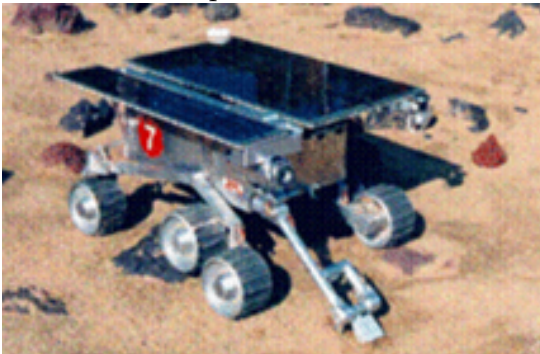
Figura 6.18: Vehículo robótico axel



Fuente: <http://robotics.caltech.edu/pablo/axel/home.html>

- **Planificación basada en sensores de movimiento y de proceso:** lo que refleja el estado actual del medio ambiente y planifica su ruta durante el proceso, a diferencia de la planificación clásica donde los datos geométricos del ambiente se daban por conocidos antes de la planeación. Los principales objetivos de son la planificación en ambientes desordenados, dinámicos e inciertos y algoritmos de planeación basados en sensores de movimiento. En la figura 6.19 se muestra un vehículo autónomo con esa tecnología implementada.
- **Reconocimiento de actividades:** Reconocimiento de actividades: es una investigación para desarrollar métodos que identifiquen y clasifiquen automáticamente “actividades.” en un flujo de datos, como secuencia de video. Una aplicación práctica y motivación es el seguimiento automatizado y el recono-

Figura 6.19: Vehículo robótico con planeación basada en sensores de movimiento



Fuente: <http://robotics.caltech.edu/wiki/index.php/MainPage>

cimiento del comportamiento de organismos biológicos en ambientes controlados (figura 6.20).

Figura 6.20: Reconocimiento de actividades



<http://robotics.caltech.edu/wiki/index.php/MainPage>

- **Universidad de Columbia** El profesor Peter K. Allen está a cargo del grupo de investigación en robótica de esta universidad, donde algunos de sus temas de investigación están construcción de geometría y fotometría adaptados a modelos 3D, micro manipulación, simulación de agarre 3D. Algunos de los proyectos que actualmente se están desarrollando son:

- **AVENUE:** El vehículo autónomo para exploración y navegación en ambientes urbanos se muestra en figura 6.21 . El objetivo de este proyecto automa-

tizar el proceso de modelamiento de un sitio urbano. El principal objetivo es lograr un modelo completo de un ambiente urbano que sea geoméricamente preciso, fotométricamente correcto y realista. Estos modelos pueden ser útiles el diseño de planos urbanos, la preservación de monumentos históricos y arqueológicos y en aplicaciones militares entre otras. El robot móvil va a la localización deseada y adquiere escaneos 3D de los edificios seleccionados e imágenes.

Figura 6.21: Vehículo AVENUE

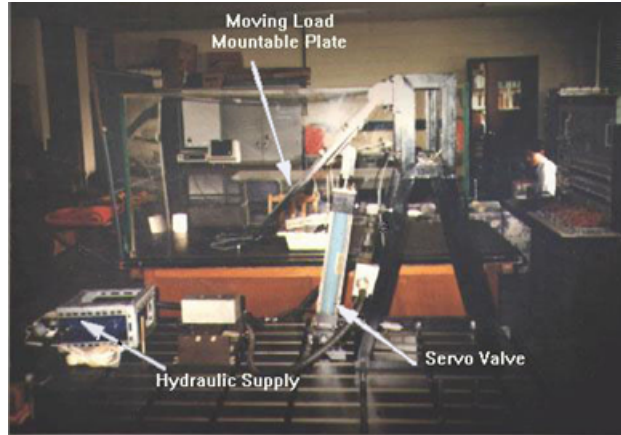


<http://www.cs.columbia.edu>

- **Plataforma Stewart y control de servo válvula electrohidráulica:** una plataforma Stewart es un mecanismo de seis grados de libertad que es comúnmente usado en simuladores de vuelo. Se usó un operador Euler para diseñar un controlador digital para tomar las ventajas del modelamiento analógico (que se hace en el dominio S de Laplace), este operador es tan fácil de usar como el operador de desplazamiento y a medida que el tiempo de muestreo se aproxima a cero, el modelo discreto de Euler se aproxima a su equivalente analógico. Usando este operador se diseñó un MRAC (Model-Referencing Adaptive Control) para controlar la posición de una de las piernas

electrohidráulicas de la plataforma.figura 6.22

Figura 6.22: Pierna de la plataforma Stewart



<http://www.cs.columbia.edu>

- **Universidad de Oxford** El grupo de investigación en robótica en esta universidad fue fundado por el profesor Michael Brady en 1985, reunió a un grupo de ingenieros que trabajaban en la investigación en robótica e inteligencia artificial, desde entonces el grupo ha crecido hasta estar dividido hoy en seis subgrupos de investigación que abarcan temas desde generación de imágenes medicas hasta robótica móvil. Estos grupos son:
 - **Grupo de visión activa:** este grupo busca avanzar en el conocimiento de la visión computacional (figura 6.23), particularmente en las áreas de detección y seguimiento de objetos en movimiento, y la recuperación de estructuras a partir de imágenes calibradas y parcialmente calibradas. Las investigaciones son dirigidas por los profesores David Murray e Ian Reid. Entre algunos de sus trabajos se encuentran: un algoritmo de visión de código abierto para unidades de proceso grafico, visión cognitiva, seguimiento paralelo y mapeo multiple.
 - **Grupo de geometría visual:** dirigido por el profesor Andrew Zisserman,

Figura 6.23: Vigilancia inteligente



<http://www.cs.columbia.edu>

es un grupo enfocado en el reconocimiento de geometrías en videos e imágenes para diversos usos. Entre sus proyectos actuales están: identificación de personas en tiempo real, reconocimiento del lenguaje de señas, clasificación de flores a través de imágenes, reconocimiento de interacciones en programas de televisión y el conteo de objetos en imágenes entre otros como se muestra en la figura 6.24.

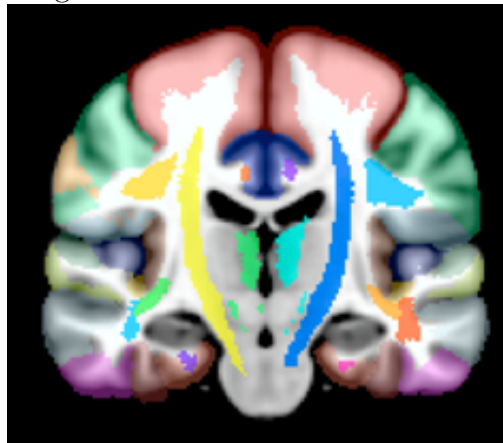
- **Laboratorio de visión medica Wolfson:** es parte del departamento de ciencias de la ingeniería. Llevan a cabo investigaciones en imágenes médicas y análisis de imágenes. A cargo del profesor Sir Michael Brady llevan a cabo investigaciones sobre el análisis de imágenes cancerígenas, intervenciones guiadas por imagen, análisis de imágenes cerebrales y del corazón, análisis cerebral (figura 6.25) entre otros temas más puntuales.
- **Grupo de investigación en análisis de patrones y aprendizaje de maquinas:** dirigido por el profesor Stephen Roberts, busca darle un razonamiento probabilístico a problemas de la ciencia, ingeniería e informática. Usan herramientas estadísticas, en particular en la inferencia bayesiana, la

Figura 6.24: Identificación de personas en tiempo real



Fuente: <http://www.robots.ox.ac.uk>

Figura 6.25: Estructura del cerebro



Fuente: <http://www.fmrib.ox.ac.uk/analysis>

inferencia de tratar racionalmente con la incertidumbre y la información en una serie de ámbitos donde se incluyen la astronomía, la biología, las finanzas, el procesamiento de señales y sistemas multi-agente (figura ??).

- **Grupo de dispositivos analógicos y circuitos micro electrónicos:** en

Figura 6.26: Interfaz Cerebro-Ordenador



Fuente: <http://www.fmrib.ox.ac.uk/analysis>

un grupo a cargo del profesor Steve Collins que pretende explotar el comportamiento de los dispositivos y circuitos simples para crear implementación eficiente con funciones útiles. Dentro de los temas actuales de investigación tenemos: detectores óptimos para el reconocimiento visual de objetos, comunicación inalámbrica entre micromachines, mejoramiento de la sensibilidad de los sensores MEMs de resonancia.

- **Grupo de robótica móvil de Oxford:** a cargo de Dr. Paul Newman, se dedica a investigar muchos aspectos de la autonomía móvil con especial énfasis en la percepción y comprensión de grandes espacios de trabajo. Una infraestructura duradera y una navegación libre son parte de la agenda de investigaciones en este grupo. Este es un problema de la ingeniería de información que abarca el aprendizaje permanente, múltiples sensores fusión/percepción, control, planificación, estimación de estados y software de ingeniería. En la figura 6.27 se muestra un vehículo autónomo programado y controlado como resultado de la investigación de este grupo.

6.3.2. Estado de la robótica en Colombia.

La robótica en Colombia es un campo en desarrollo que ha estado tomando fuerza en los últimos años, aunque ha sido enfocada más hacia el entretenimiento, y robots de servicios. En el área de manufactura se han dado pasos considerables, pero insuficientes

Figura 6.27: Vehículo autónomo universidad de Oxford



Fuente: <http://www.robots.ox.ac.uk/mobile/wikisite/pmwiki>

para llegar a ser competitivos con el mercado mundial. Por ello es que las universidades colombianas han reforzado sus investigaciones y han logrado resultados optimos.

- **Universidad Nacional de Colombia**

En esta universidad se tiene el grupo de investigación en plataformas robóticas que se creó en el 2001 como iniciativa de profesores y estudiantes que compartían su interés en el tema de la robótica. Empezando con pequeños proyectos y seminarios extraclase logra en el 2003 obtener la primera financiación de sus proyectos de desarrollo bajo el nombre de "semillero de diseño mecánico para robots móviles". Este grupo se dedica al desarrollo en proyectos tanto en robótica móvil como en robótica industrial. Estando a cargo de los docentes Ricardo Ramírez Heredia, Luis Miguel Mendez, Pedro Fabian Cárdenas y Jorge Sofrony Esmeal. Cuenta con tres grupos de trabajo entre los cuales son: el grupo de trabajo en robótica móvil, el grupo de trabajo en instrumentación y automatización, y el grupo de trabajo en robótica y automatización. Este último hace parte del instituto de ingenierías eléctrica, electrónica y afines (IEEE). Entre los proyectos desarrollados por esta

universidad tenemos:

- **UN-PIER (plataforma de investigación experimental en robótica):** uno de los primeros robots del grupo, desarrollado en 2001. Se trata de una plataforma modular diseñada para implementar y probar diferentes tareas para dotar de inteligencia al robot(figura 6.28).

Figura 6.28: UN-PIER



Fuente: <http://www.unrobot.unal.edu.co>

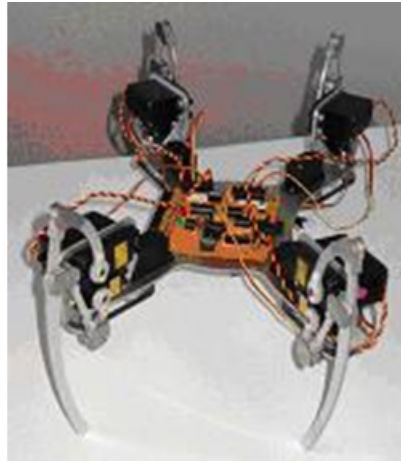
- **UN-ROVER:**(figura 6.29) desarrollado en la segunda mitad de 2003. El robot se desarrollo como una plataforma robusta para la exploración de terreno escabroso su diseño se basa en gran parte en el MarsSojourner. Es el robot insignia del grupo. Actualmente se está buscando desarrollar un sistema de navegación robusto para implementar a este robot.
- **UN-BOT:** desarrollado por el grupo en 2004. UN-BOT (figura 6.30) es un caminador cuadrúpedo que desarrolla una marcha regular, simétrica y estable, aunque un poco lenta. Se está rediseñando actualmente para la implementación de una caminata más dinámica.
- **UNROCA-III:** Caminador bípedo desarrollado por el grupo en 2004, la figura 6.31 muestra primer caminador del grupo que no requiere una plataforma de apoyo, cuenta con un sistema sensorial robusto para un mejor

Figura 6.29: UN-ROVER



Fuente: <http://www.unrobot.unal.edu.co>

Figura 6.30: UN-BOT



Fuente: <http://www.unrobot.unal.edu.co>

control de la estabilidad.

- **Universidad de los Andes**

Cuyo grupo de investigación GRIA (figura ??), grupo de robótica e inteligencia artificial. Este es un grupo de trabajo multidisciplinario con el fin de desarrollar proyectos en el campo de la ingeniería para promover el interés, la investigación y el desarrollo de las tecnologías que se involucran en este ámbito. Como presidente a cargo está Pedro García. Este grupo realiza una serie de charlas con el objetivo

Figura 6.31: UNROCA III



Fuente: <http://www.unrobot.unal.edu.co>

de relacionar a las personas con la robótica y/o con la inteligencia artificial, como por ejemplo, entre las charlas se encuentran, introducción a la robótica, principios de razonamiento en inteligencia artificial, diseño mecánico de robots cooperativos, y plataforma "beagle", programación en C y software libre.

Figura 6.32: Logotipo del grupo GRIA



Fuente: <http://gria.uniandes.edu.co>

■ UNIVERSIDAD DEL VALLE

Esta reconocida universidad tiene designada la tarea de investigación en el área de la robótica al laboratorio de robótica que esta a cargo del grupo de investigación en control industrial GICI. A cargo del profesor José Ramírez Scarpetta busca prestar asistencia académica a estudiantes de pregrado, posgrado y entes externos en las áreas de robótica, robótica avanzada y robótica industrial. Actualmente posee un robot SCARA (figura 6.33) de características industriales de cuatro GDL con una herramienta tipo electroimán, con su unidad de potencia, también posee un robot educativo Hero, mesa de dos GDL y un dispositivo cooperativo para un robot.

Figura 6.33: Robot SCARA 4 GDL



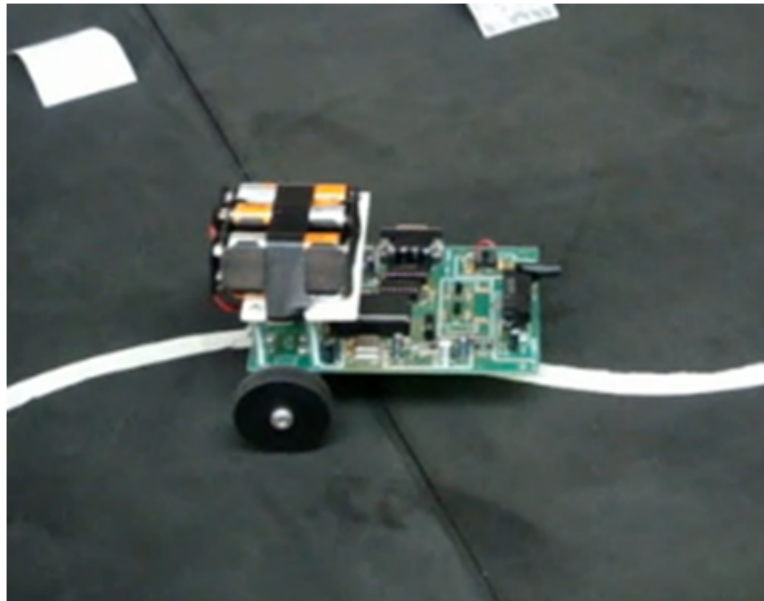
Fuente:<http://www.univalle.edu.co/automatica/investigacion/laboratoriosrobotica>

■ UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

La investigación en el ámbito de la robótica esta dirigida el grupo de electrónica de potencia, automatización y robótica. Cuenta con la participación de cuatro profesores de planta, uno ocasional, un profesor asistente y cinco docentes cátedra. Registrado en Colciencias como un grupo de clase B. la filosofía de trabajo se enmarca en la generación y gestión del conocimiento científico y tecnológico con

impacto y compromiso social, así como en la contribución en el crecimiento de una cultura investigativa. Sus líneas de investigación abarcan la automatización, sistemas de control moderno, visión artificial, robótica pedagógica y acondicionamiento de señales y electrónica de potencia. figura 6.34

Figura 6.34: Robot seguidor



Fuente:<http://gepar.udea.edu.co/>

- **PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**

Tiene el grupo de investigación SIRP (Systems, Intelligent, Robotics and Perception) a cargo del profesor titular Carlos Parra. Es una rama del departamento de electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana, donde la actividad de investigación se lleva a cabo por personal capacitado en ingeniería eléctrica y electrónica con el objetivo de implementar sistemas inteligentes tales como robots y sistemas de percepción, para cumplir las demandas de la industria y defensa (con fines humanitarios). Entre sus proyectos encontramos a Arcadio, un robot que detecta minas antipersonas, adquisición de variables de tráfico urbano usando visión ar-

tificial, reconocimiento de rostros entre otros.

- **Arcadio:**

El robot mostrado en figura 6.36 es un robot teleoperado móvil basado en un sistema de tracción diferencial que le permite desplazarse en un terreno desigual. La movilidad del robot se complementa con la capacidad de un manipulador de seis GDL, cuenta con seis cámaras, algunas de ellas son PTZ, lo que le permite al operador ver las características del terreno alrededor del robot remotamente. El objetivo del robot es manipular objetos sospechosos con el fin de evitar la pérdida de vidas humanas. Su medio de trabajo son zonas peligrosas y de conflicto. Este proyecto fue patrocinado por la marina Colombiana.

Figura 6.35: Robot Arcadio



Fuente:<http://www.gruposirp.org/sirp/sirp-research-CP-arcadio>.

- **UNIVERSIDAD DEL NORTE**

Las investigaciones están a cargo del Laboratorio de Automatización y Robótica

mostrado en la figura 6.36. Su enfoque esta dirigido a estudiar, investigar, desarrollar y aplicar soluciones en la automatización de equipos y sistemas productivos, valiéndose de técnicas avanzadas en sistemas sensoriales artificiales, máquinas de control numérico, PLC's, microcontroladores, métodos de Inteligencia Artificial aplicados a la producción y Robótica, tanto fija como móvil. Sus áreas de investigación abarcan los temas de robótica, sistemas inteligentes, investigación operativa y estadística, y producción automática. Entre sus proyectos encontramos: robots hexopodos, visión artificial para plataforma móvil, diseño y construcción de la estructura mecánica de un robot autónomo de limpieza, y la implementación de sistemas de visión artificial.

Figura 6.36: Laboratorio de robótica



Fuente:<http://www.uninorte.edu.co/noticiasuninorte/secciones>

6.3.3. Robótica en la universidad industrial de Santander

La robotica en la UIS se abordara desde 2 aspectos: Grupos de investigación y Tesis de pregrado o post grado.

Grupos de investigación en robótica

▪ Grupo de electrónica y robótica aplicada ERA

el grupo ERA (figura 6.37) es un semillero de investigación fundado en la universidad industrial de Santander a finales de 2004 con el fin de incentivar el desarrollo de proyectos interdisciplinarios entre los cuales se destacan la robótica y los sistemas embebidos.

Sus principales líneas de investigación son:

- Sistemas embebidos aplicados a sistemas robóticos.
- Desarrollo de plataformas robóticas móviles.
- Robots aéreos no tripulados (UAVs)

Figura 6.37: Grupo ERA



Fuente:<http://era.uis.edu.co>

▪ Centro de investigación en sistemas dinámicos multi-físicos, control y robótica DICBOT

El DICBOT (figura 6.38) es un grupo de investigación avalado por Colciencias Fundado en agosto de 2001 y liderado por el Profesor Carlos Borrás Pinilla.

Sus principales líneas de investigación son:

- Dinámica y Control lineal y no lineal
- Dinámica y Control de Potencia Fluida.
- Microsistemas multiphysicos.
- Robótica autónoma e industrial.

Cuenta con una amplia trayectoria: 18 artículos y 2 libros publicados, además ha desarrollado más de 20 proyectos y actualmente acoge estudiantes de pregrado para la realización de tesis y trabajos de grado afines a los temas de investigación.

Figura 6.38: Centro de investigación en sistemas dinámicos multi-fisicos, control y robótica DICBOT



Fuente:Grupo Dicbot

Tesis relacionadas con robótica realizadas en La Universidad Industrial de Santander

En la universidad industrial de Santander se han realizado algunos aportes a la robótica en general, mediante la modalidad de proyecto de grado tanto en programas de pregrado como en postgrado. A continuación se describen dichos proyectos.

- **Título: prototipo de un robot tipo puma de seis grados de libertad**

AUTORES: PEÑA PARDO, Alfonso Gorky, PÉREZ SARMIENTO, Juan Guillermo y SUÁREZ SAAVEDRA, Marco Fidel.

Escuela De Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones.

Año 2005

DESCRIPCIÓN: Trabajo de grado con el fin del desarrollo de una Celda de Manufactura conformada por un brazo mecánico de seis grados de libertad sobre una plataforma móvil. El proyecto buscaba la elaboración y montaje de los componentes mecánicos, la selección y adaptación del sistema de accionamiento con su correspondiente sistema de alimentación eléctrica, así como el diseño e implementación de una tarjeta de control con la cual se busca posicionar cada articulación. Se elaboraron los modelos digitales y los respectivos planos de las piezas mecánicas que conforman el robot, mediante software Solid Edge V12 con licencia académica. Una vez construidas las piezas mecánicas se implementó el control mono articular secuencial del manipulador, teniendo en cuenta que las tres primeras articulaciones del robot utilizan motores de corriente continua y las últimas 3 tiene como actuadores, servomotores y un émbolo en el efector final. (Ver figura 6.39)

Las diferentes rutinas de control se implementaron en el micro controlador MC68HC908GP32 de la familia Motorola. Como resultado de las pruebas realizadas al robot se obtuvo un error de precisión de aproximadamente 2 cm, una repetibilidad de 5 mm y un volumen de trabajo de $0,19m^3$.

■ **TITULO: Planeamiento de trayectorias de un robot móvil**

AUTOR: TIBADUIZA BURGOS, Diego Alexander.

Figura 6.39: Prototipo Robot PUMA de la UIS



Prototipo de un robot tipo puma de seis grados de libertad. Universidad Industrial De Santander. Bucaramanga, 2005

Escuela De Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Maestría en ingeniería.

AÑO: 2006

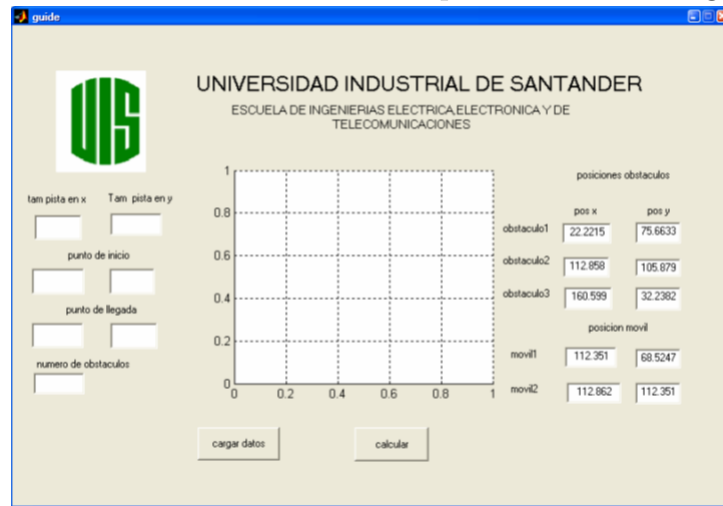
DESCRIPCIÓN En este trabajo de investigación se presenta el desarrollo de dos técnicas de planeamiento de trayectorias. Una de las técnicas es campos de potencial y la otra corresponde a los algoritmos genéticos.

Cada una de estas técnicas se probó sobre un sistema físico que consta de una pista de madera de 1,50 m x 2,40 m, un sistema de visión artificial, dos robots móviles tipo diferencial y unos obstáculos fijos en forma de tetraedro. El algoritmo de campos de potencial define unos pesos específicos al área de trabajo, para de esta manera diferenciar a los obstáculos y generar un camino libre de colisiones. El algoritmo genético emula tres operaciones básicas como son reproducción, cruce y mutación para crear trayectorias cada vez mejores en función de un peso específico.

Todo el sistema es censado con una cámara cuyas imágenes son procesadas por un computador, el cual genera la posición y orientación de cada objeto sobre el área de trabajo. Estos datos son leídos por los algoritmos de control, los cuales generan la trayectoria y envían por puerto serial a un módulo de RF para cada móvil.

El ambiente dinámico se simula con uno de los robots móviles, el cual posee un módulo de ultrasonido que censa el ambiente y se mueve por el sin ninguna trayectoria planeada. Además posee una interfaz gráfica que permite interactuar fácilmente al usuario con la planeación de trayectoria off-line, la cual se muestra en la figura 6.40

Figura 6.40: Interfaz off-line de la implementación del algoritmo



Fuente: PLANEAMIENTO DE TRAYECTORIAS DE UN ROBOT MÓVIL,
 Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, 2006

- **TITULO: ALGORITMOS GENETICOS APLICADOS AL PLANEAMIENTO DE TRAYECTORIAS DE UN ROBOT MOVIL**

AUTOR: NAVAS GOMEZ, OSCAR DARIO; ORTIZ ORTEGA, JOSE NIKO-

LAI

Escuela De Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Maestría en ingeniería.

AÑO: 2006

DESCRIPCIÓN En este documento se describe cómo se desarrolla una herramienta computacional basada en la técnica de inteligencia artificial denominada algoritmos genéticos y codificada en el lenguaje C# de la suite Visual Studio.NET, teniendo en cuenta el paradigma de la programación orientada a objetos. Esta herramienta permite profundizar en el tema del planeamiento de trayectorias en ambientes controlados tanto en modo online como de simulación, esto se demostró adaptándola a un sistema de visión y a un módulo de radiofrecuencia vinculado a un robot móvil pudiendo así probar la técnica desarrollada en una aplicación real. Además del algoritmo genético simple se incorporaron 2 nuevas técnicas basadas en el elitismo denominadas "Extinción" y "Sobreviviente" que constituyen un aporte al crecimiento de la computación evolutiva. Inicialmente se exponen los conceptos básicos de la inteligencia artificial y del planeamiento de trayectorias. El siguiente capítulo describe la codificación utilizada en el algoritmo genético implementado así como los diagramas de flujo que representan las operaciones genéticas, también se presenta la herramienta desarrollada y sus características de funcionamiento la cual se somete a pruebas de aplicación donde se extraen una serie de resultados que permiten concluir acerca del algoritmo implementado y sus alcances, estas se exponen en el capítulo de conclusiones y recomendaciones. Se incluyen una serie de anexos que incluyen el manual del usuario final y la descripción del marco de acción de la aplicación a la robótica móvil.

- **TITULO: PROGRAMACIÓN DE TAREAS Y PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA UN ROBOT MANIPULADOR ANTROPOMOR-**

FO DE SEIS GRADOS DE LIBERTAD

AUTOR: GRASS ARENAS, JAIRO ANDRÉS

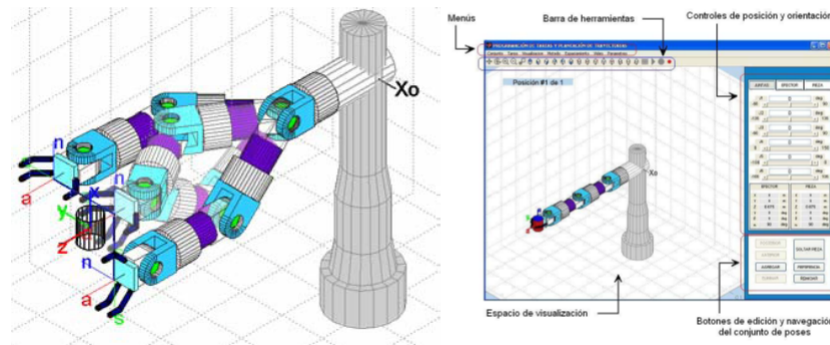
Escuela De Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Maestría en ingeniería.

AÑO: 2007

DESCRIPCIÓN Trabajo de grado donde se muestran detalles sobre programación de tareas y su aplicación en la herramienta desarrollada; el análisis y contraste de métodos de interpolación y de criterios de espaciamiento; y la adaptación realizada a la formulación de Newton-Euler (N-E) para la obtención del modelo dinámico del manipulador. La herramienta desarrollada en el entorno MATLAB ver figura 6.41 permite la construcción gradual de tareas en su programación gestual, y a partir de esta construcción, la obtención del conjunto de sentencias correspondientes a la programación textual de la tarea. Así mismo, es posible generar un conjunto de posiciones y trayectorias a partir de instrucciones contenidas en un archivo con extensión .txt. La herramienta permite además: la selección del método de interpolación y del criterio de espaciamiento de puntos de paso; la manipulación de cinco tipos de piezas diferentes; la simulación total o parcial de la tarea programada; y la creación de archivos de video al simular la tarea. En esta herramienta de programación de tareas se ha implementado la versión iterativa de la formulación de N-E para la solución del modelo dinámico inverso determinando los pares motores necesarios para la realización del movimiento deseado. Los resultados de las pruebas realizadas muestran una rápida convergencia de los algoritmos generados para la corrección de pares motores y para la determinación de los puntos de paso necesarios para el cumplimiento de la tolerancia designada en trayectorias definidas en coordenadas cartesianas. El algoritmo de corrección de pares no está ligado a la formulación de N-E empleada en este trabajo, y es

aplicable a la corrección de fuerzas en articulaciones prismáticas. Con base en el análisis realizado a los diferentes métodos de interpolación y en las simulaciones del sistema en lazo cerrado, se recomienda el empleo del método de aceleración sinodal desarrollado por el autor del presente trabajo de grado.

Figura 6.41: Trayectoria simulada mediante la herramienta computacional desarrollada en MATLAB



Fuente: Programación De Tareas Y Planeación De Trayectorias Para Un Robot Manipulador Antropomorfo De Seis Grados De Libertad. UIS. Bucaramanga, 2007.

- **TITULO: DOCUMENTACIÓN DEL PROTOCOLO NMEA0183 PARA LA APLICACIÓN EN UN ROBOT MÓVIL**

AUTOR: RAMIREZ PEDRAZA, Ingrid Alexandra

Escuela de Ingeniería Mecánica

AÑO: 2008

DESCRIPCIÓN Trabajo de grado de la especialización en ingeniería mecatrónica. Estudio del protocolo de transmisión de datos NMEA0183 de los sistemas de navegación global como primer paso para establecer las bases necesarias para realizar futuras aplicaciones. Los datos que maneja la norma NMEA 0183 se en-

cuentran organizados por medio de sentencias que tienen una función específica existiendo 3 clases básicas que son: del emisor, propietarias, de consulta. Las primeras indican la identidad de dispositivo emisor, las segundas fueron creadas por diferentes fabricantes de GPS, por último, las de consultas emitidas por un receptor para solicitar una información en particular. Se buscó un software freeware .“open Source”; la aplicación NMEA PARSER DEMO de Visualgps (VGPS) fue la apropiada. Esta es una aplicación Windows desarrollada en Microsoft Visual C/C++ versión 6.0, donde se muestra datos de sentencias básicas suministrando información sobre latitud, longitud, altitud, calidad de la señal y datos de los satélites en contacto con el GPS, número de sentencias recibidas, mediante una comunicación serial entre GPS y PC. Basado en el formato de las sentencias de la norma, la aplicación fue estructurada para analizar una sentencia por medio de una máquina de estado en donde se busca el comienzo y final de la sentencia, el campo de dirección, los datos, el cálculo del checksum, la información es almacenada, se llama la función apropiada para extraer los datos y mostrarlos en la ventana principal.

- **TITULO: Robot cartesiano neumático para el laboratorio de sistemas mecatrónicos de la escuela de ingeniería mecánica. Diseño y construcción.**

AUTOR: Jhon Edison Buitrago Núñez, Nelson Gustavo Cediél Gómez.

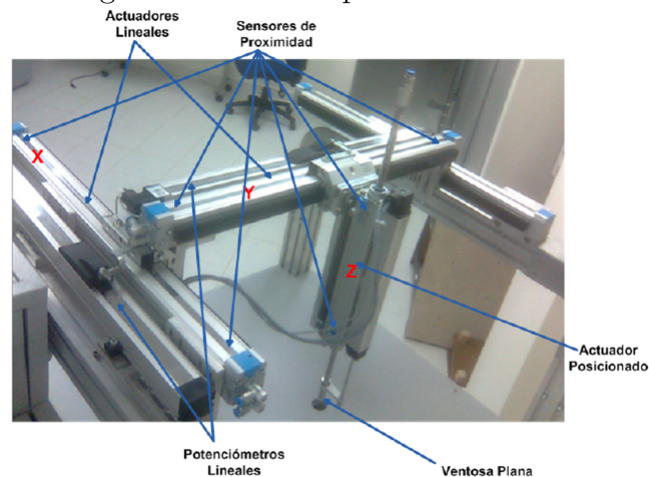
Escuela de Ingeniería Mecánica

AÑO: 2010

DESCRIPCIÓN: Proyecto realizado con el fin de fortalecer la formación de los estudiantes de ingeniería mecánica en el área de automatización industrial.

Para estos motivos se diseñó y construyó un sistema automático de control robot/manipulador cartesiano con tres grados de libertad y alimentación neumática mostrado en la figura 6.42. El sistema, cuenta con todos sus componentes organizados y conectados entre sí. Con este robot, el estudiante tiene la posibilidad de manipular gran variedad de equipos neumáticos y de control. Además, presenta la opción de programar estos equipos en dos modos diferentes de operación, como automatismo de eventos discretos o automatismo cuasi continuo. Con este sistema automático, se presenta la posibilidad de desarrollar nuevos lenguajes de programación, a diferencia de los sistemas ofrecidos en el mercado que se encuentran programados con un lenguaje por defecto. La estructura presenta excelente rigidez, ya que las columnas y las vigas están formadas por un grupo de perfiles ensamblados de aluminio estructural que reduce al máximo las deformaciones de esta. Para unir las vigas y las columnas, fue necesario el diseño de piezas que fueron fundidas y mecanizadas en aluminio.

Figura 6.42: Prototipo Robot cartesiano



Fuente: Robot cartesiano neumático para el laboratorio de sistemas mecatrónicos de la escuela de ingeniería mecánica. Diseño y construcción. UIS. Bucaramanga.

■ **TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL AUTÓNOMO DE EXPLORACIÓN**

AUTOR: : Diego Fernando Pineda Quijano, Fredy Alexander Prada Largo.

Escuela de Ingeniería Mecánica

AÑO: 2009

DESCRIPCIÓN: Proyecto de grado realizado con el objetivo dotar a la Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas de la Universidad Industrial de Santander, de una plataforma robótica que pueda utilizarse como herramienta de trabajo en un laboratorio de robótica móvil, tanto para la enseñanza y práctica, como para la investigación. El diseño CAD fue desarrollado utilizando SOLIDWORKS, los análisis estructurales se hicieron en ANSYSWORKBENCH y la manufactura fue asistida por MASTERCAM. El diseño de las tarjetas electrónicas fue realizado utilizando Eagle Layout, la programación de las librerías que facilitan el control del robot y los programas de prueba se hicieron en AVR Studio y la configuración del módulo Xbee pro de comunicación inalámbrica se hizo mediante la aplicación X-CTU de Digi-MaxStream.

Figura 6.43: Ensamble final de robot explorador móvil



Fuente:. Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Robot Móvil Autónomo De Exploración. UIS. Bucaramanga

El resultado es el prototipo de robot móvil explorador mostrado en la figura 6.43 , el cual cuenta con un sistema de locomoción apto para permitir su desplazamiento a través de ambientes externos poco agrestes, con capacidad de superar ciertos obstáculos y alta maniobrabilidad y estabilidad, un sistema de control basado en el microcontrolador ATmega 128 de ATMEL, capaz de recibir y procesar las señales recibidas de sus periféricos a través de buses de comunicación I2C, SPI, puertos de conversión analógica, puertos UART y puerto de expansión y de generar las ordenes al sistema de locomoción. El sistema de control permite la implementación de programas de navegación autónoma gracias a la utilización de un módulo de GPS para posicionamiento, una brújula electrónica para orientación y sensores de ultrasonido e infrarrojo para percepción del entorno. También permite el intercambio de datos entre el móvil y una estación remota de supervisión o control, por medio del módulo Xbee pro de comunicación inalámbrica.

- **TITULO: Rediseño e implementación de control articular robot puma de 6 grados de libertad y su respectivo sistema de alimentación eléctrica.**

AUTOR: : Marta Cecilia Gutiérrez Turizzo

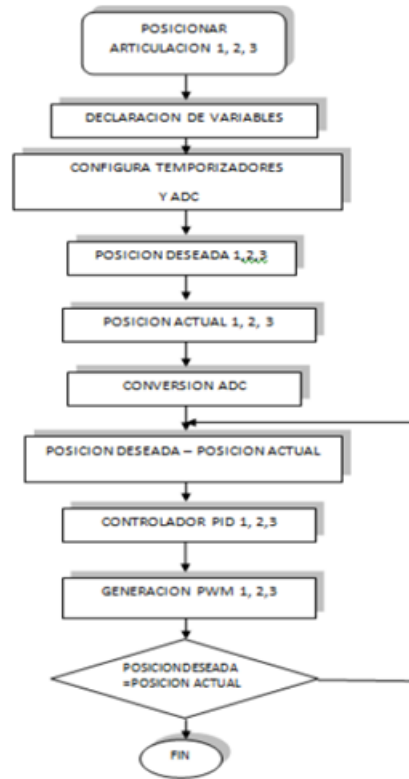
Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones

AÑO: 2010

DESCRIPCIÓN: trabajo de grado realizado con el fin de realizar el control de las articulaciones de un robot tipo puma con 6 grados de libertad, mediante el uso de un micro controlador y control PID. El diagrama de flujo de dicho control se muestra en la figura 6.44

- **TITULO: Diseño e implementación de la tarjeta para control de robot**

Figura 6.44: Diagrama de flujo para el control de posición de las articulaciones.



Fuente:Rediseño E Implementación De Control Articular Robot Puma De 6 Grados De Libertad Y Su Respectivo Sistema De Alimentación Eléctrica. UIS

puma ma2000

AUTOR:Nicolás Fernando Beltrán G., David Miguel Medina Rojas.

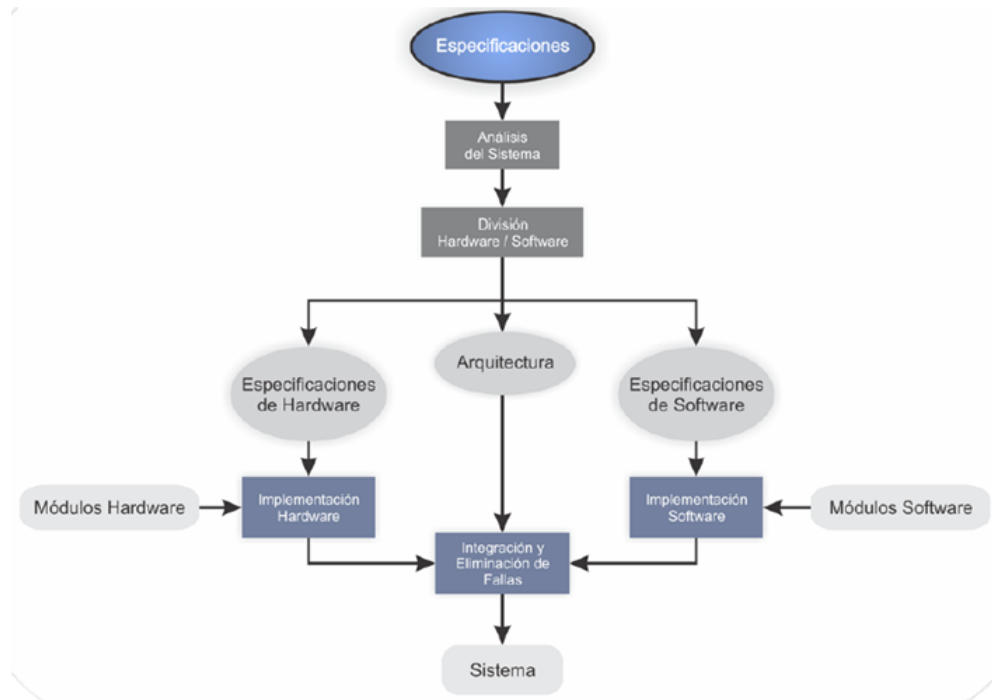
Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones

AÑO: 2011

DESCRIPCIÓN: trabajo de grado realizado con el fin de poner nuevamente en funcionamiento el robot de referencia PUMA MA2000 de 6 grados de libertad, adquirido por la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones

de la Universidad Industrial de Santander en 1995, para el montaje de piezas en máquinas de control numérico computarizado (CNC) que entró en desuso debido al daño de hardware y software del equipo central y a la falta de soporte técnico por parte del fabricante. El proceso de diseño se especificó de la según figura 6.45

Figura 6.45: Flujo de co-diseño

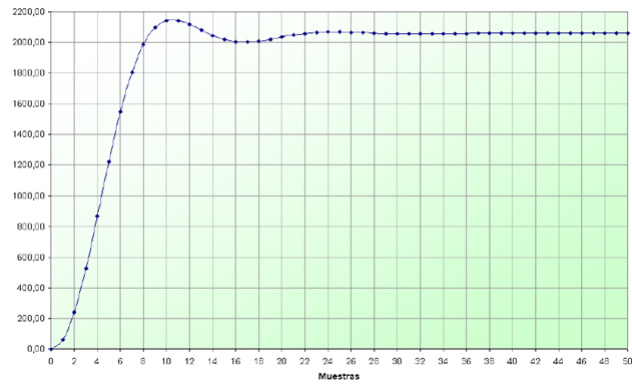


Fuente: Diseño E Implementación De La Tarjeta Para Control De Robot Puma Ma2000. UIS. Bucaramanga, 2011.

La tarjeta realiza un control PID de cada uno de los grados de libertad del robot manipulador. Arrojando la respuesta dinámica mostrada en la figura 6.47

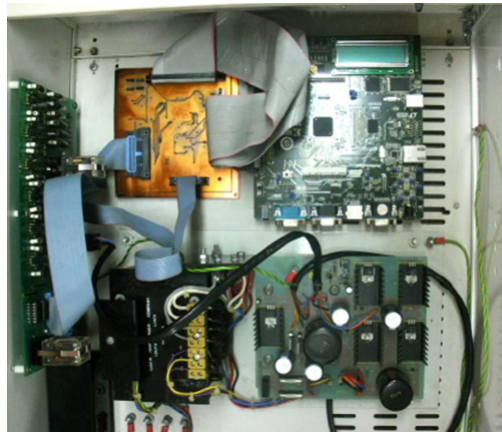
Como resultado final se desarrolló la tarjeta para el control de un robot PUMA MA2000, la cual se muestra en la figura 6.47

Figura 6.46: Respuesta simulada del sistema dinámico de un grado de libertad



Fuente: Diseño E Implementación De La Tarjeta Para Control De Robot Puma Ma2000. UIS. Bucaramanga, 2011.

Figura 6.47: Montaje de la tarjeta diseñada.



Fuente: Diseño E Implementación De La Tarjeta Para Control De Robot Puma Ma2000. UIS. Bucaramanga, 2011.

CAPÍTULO 7

MORFOLOGÍA DEL ROBOT

La morfología del robot se refiere a la descripción de componentes, partes y estructura mecánica de un manipulador. Un robot manipulador está formado por una serie consecutiva de eslabones y articulaciones que van a formar una cadena cinemática en la que hay solo una secuencia de eslabones sin que las dos puntas terminales de la cadena desde la base hasta el extremo final se unan. La morfología del robot permite el estudio de sus articulaciones, eslabones, espacio de trabajo y extremo final para determinar características y así lograr después la definición de la cinemática y dinámica del manipulador.

7.1. ESTRUCTURA MECÁNICA DE UN ROBOT

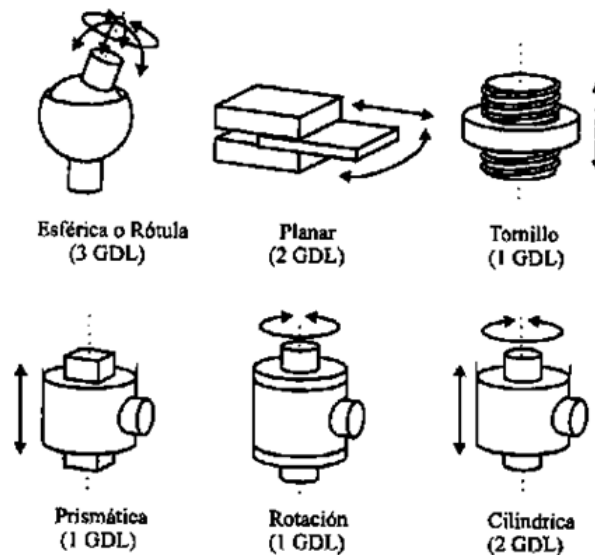
Un robot esta formado por una sucesión de elementos o eslabones que están unido por medio de articulación que van a permitir el movimiento entre cada eslabón. Los robots industriales tienen una configuración similar a la de un brazo humano, igual que el movimiento del brazo humano se analizara el brazo del robot según sus articulaciones,

los desplazamientos, giros y combinaciones que este pueda realizar, para esto se usan diferentes tipos de articulaciones.

7.1.1. Tipos de articulaciones

Los grados de libertad indicados en la figura 7.1, muestran los parámetros independientes que fijan la situación del órgano terminal. El número de grado grados de libertad en lo general es menor o igual al número de eslabones de la cadena cinemática.

Figura 7.1: Tipos de articulaciones para robots



Fuente: Fundamentos de robótica. Antonio Barrientos. 2007

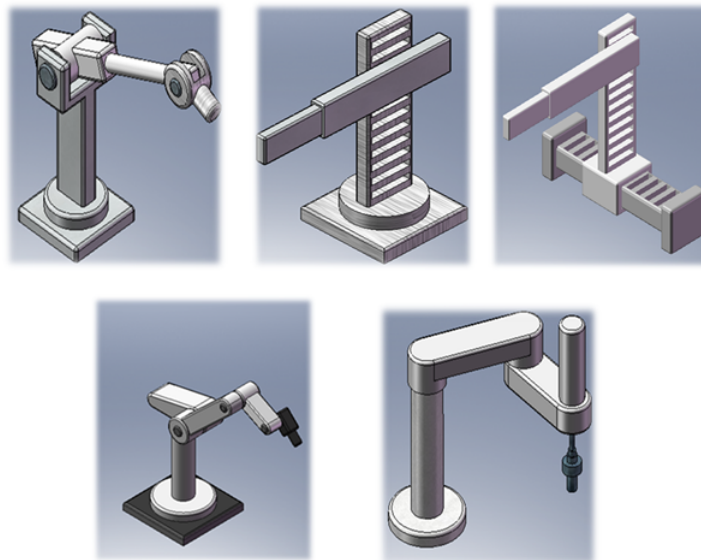
7.1.2. Configuraciones básicas de robots manipuladores industriales

La estructura característica de un manipulador consta por elementos con articulaciones entre ellos. En el último enlace se usa un efector final que será una pieza o un

dispositivo que realice operaciones.

Estas estructuras tienen diferentes propiedades en cuanto a espacio de trabajo y accesibilidad a posiciones. En la figura 7.2 se enseñan las cuatro anatomías de un robot.

Figura 7.2: Las cuatro anatomías robot básico polar, cilíndrico, cartesiano y brazo articulado Scara



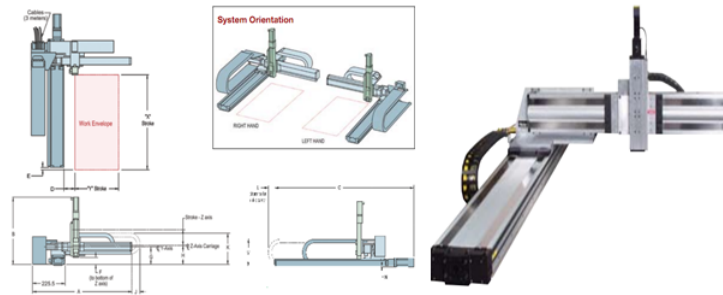
Fuente: Autores del proyecto.

Configuración cartesiana

Utiliza tres dispositivos deslizantes perpendiculares para construir los ejes x, y y z. Esta configuración también se conoce como *robot xyz* y *robot rectilíneo*. Cuando se desplaza los tres dispositivos deslizantes entre si el robot es capaz de operar dentro de una envolvente rectangular de trabajo. Esta configuración (figura 7.3) tiene tres articulaciones prismáticas, esta configuración es usual en estructuras industriales como pórticos.

La configuración debido a su aspecto se denomina ocasionalmente de caja. El robot

Figura 7.3: Robot coordenadas cartesianas



Fuente: Catalogo Parker-motion.

de pórtico es otro nombre utilizado para los robots cartesianos que suelen ser grandes y que tienen la apariencia de una grúa del tipo del pórtico. Entre las ventajas del robot cartesiano de estructura de caja es su estructura rígida, junto con la configuración cilíndrica, este tipo de robot es diseñado para una alta rigidez y una gran capacidad de transporte de carga. Se usa para penetrar a través de pequeñas aberturas, sin interferencia con los lados de dicha abertura.

En esta tipo de robot se simplifica la tarea del controlador que debe generar las órdenes para ejecutar una trayectoria definida mediante una secuencia de puntos expresados en coordenadas cartesianas. No es adecuada para acceder a puntos situados en dimensiones relativamente cerradas y su volumen de trabajo es reducido cuando se relaciona con el que se puede lograr con otras configuraciones.

Configuración cilíndrica

Esta conformación tiene dos articulaciones prismáticas y una de rotación. La posición se especifica de forma natural en coordenadas cilíndricas, esta configuración es usada en una célula flexible, con el robot situado en el centro de la célula sirviendo a diversas maquinas dispuestas radialmente a su alrededor. El robot de la figura 7.4 tienes

las características de una configuración cilíndrica.

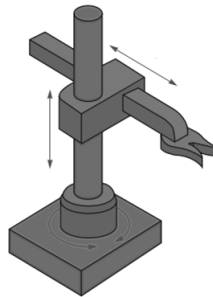
Figura 7.4: Robot RT33 -Configuración cilíndrica



Fuente: SEIKO Instruments.

Los ejes para las coordenada cilíndricas son θ (la base que es eje rotacional); R (alcance), el eje hacia adentro y hacia afuera; y Z el eje hacia arriba y hacia abajo (figura 7.5). El área de trabajo o célula de servicio por un robot de coordenadas cilíndricas es el espacio entre dos cilindros concéntricos de la misma altura.

Figura 7.5: Configuración básica de un robot cilíndrico



Fuente: Autores del proyecto.

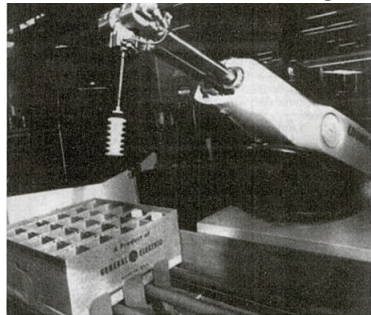
Los robots de coordenadas cilíndricas se pueden montar sobre una plataforma móvil para cubrir más espacio. En el extremo del brazo del robot esta la muñeca, los ejes de esta pueden girar, su rotación en un plano perpendicular al extremo del brazo, inclinarse también en un plano vertical a través del brazo, y virar la rotación en el plano

horizontal a través del brazo. Los ejes de la muñeca no cambian mucho la curvatura de trabajo si no que permite orientar la herramienta a un punto específico.

Configuración polar o esférica

Se caracteriza por tener dos articulaciones de rotación y una prismática. En este caso las variables articulares expresan la posición del extremo del tercer enlace en coordenadas polares. El robot esférico como el Unimate 2000 (figura 7.6) rota en su base, pivotes o se inclina en su hombro, y cuenta con extensión y retracción en su brazo; su área de funcionamiento es una porción de esfera, una ventaja es que tiene alcance por encima de él, como desventaja esta que su manufactura es integrada por computadora.

Figura 7.6: Unimate 2000. Configuración polar



Fuente: Introduction to Robotics. Saeed B. Niku. 2001

Las ventajas de un robot de configuración esférica o polar son:

- Bajo peso y mínima complejidad estructural.
- Compatibilidad con los robots, especialmente con las demás maquinas ubicadas en el mismo espacio de trabajo.

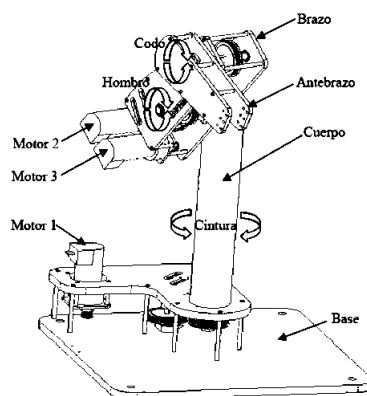
Entre sus desventajas se pueden mencionar:

- Torques grandes y necesarios.
- Capacidad limitada para evitar colisiones con los obstáculos.

Configuración angular

Esta configuración (figura 7.7) presenta tres articulaciones de rotación. La posición del extremo final se especifica de forma natural en coordenadas angulares. Uno de sus atributos es que tiene un mejor acceso a espacios cerrados. Es usado en robots manipuladores industriales. Su configuración es similar a la de un brazo humano. Está constituido por dos componentes rectos, que corresponden al antebrazo y brazo humano, montados sobre un pedestal vertical. Estos componentes están conectados por dos articulaciones giratorias que corresponden al hombro y al codo. Una muñeca esta unida al extremo del antebrazo, con lo que proporciona varias articulaciones suplementarias.

Figura 7.7: Unimate 2000. Robot PUMA-Configuración angular



Fuente: Tesis control de un robot tipo PUMA utilizando celdas neuronales analógicas.

Enrique Martinez. 2008

Configuración SCARA

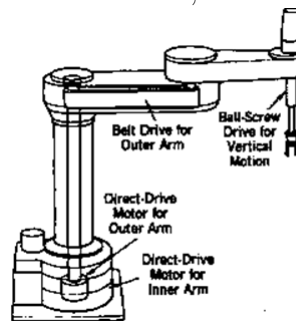
El robot SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly)(figura 7.8), está diseñado para realizar tareas de montaje en un plano. Formado por dos articulaciones de rotación con respecto a dos ejes paralelos, y una de desplazamiento en sentido perpendicular al plano. Es usado especialmente en ensamble de componentes electrónicos. Su configuración (figura 7.9) minimiza la deflexión del robot cuando carga un objeto cuando se esta moviendo a una velocidad programada, debido a que las fuerzas gravitatorias, centrifugas y de Coriolis no cargan la estructura tal como ocurren con las demás configuraciones.

Figura 7.8: Robot SCARA



Fuente: Catalogo JANOVE

Figura 7.9: SCARA, Robot evolution



Fuente: Robot evolution: the development of anthropotics. Mark Rosheim. 1994

7.1.3. Transmisiones

Las transmisiones se usan con el fin de reducir los momentos de inercia y vencer los pares estáticos, ya que con el utilizadas para convertir el movimiento circular en lineal o viceversa, lo que en ocasiones puede ser necesario. En la figura 7.10 se muestran las transmisiones típicas para robots.

Figura 7.10: Sistemas de transmisión para robots

Entrada- Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	-
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitado
	Cable	-	Deformabilidad
Circular-Lineal	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Linear-Circular	Paral. Articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Fuente: Fundamentos de robótica. Antonio Barrientos. 2007.

Hay que tener en cuenta que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado y a grandes distancias.

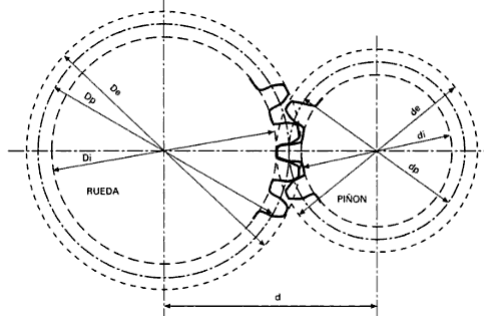
Engranajes

Se conoce con el nombre de tren de engranajes al conjunto de dos o más ruedas dentadas que tienen en contacto sus dientes de forma que, cuando gira una, giran las demás. Los engranajes son el medio de transmisión de potencia más utilizado. Tienen las siguientes ventajas:

- Las ruedas no pueden resbalar una con respecto a la otra.
- Transmiten grandes esfuerzos.
- La relación de transmisión se conserva siempre constante.

Se emplean para transferir un movimiento giratorio desde un eje a otro (figura 7.11). Este traspaso puede realizarse entre ejes paralelos (engranajes rectos), ejes en intersección o ejes sesgados.

Figura 7.11: Engranajes.



Fuente: Automatismos y cuadros eléctricos. José Roldan Vilorio. 2003

Los sistemas de engranaje desempeñan una función muy importante en la construcción y diseño de robots manipuladores. Sin embargo, es importante recalcar que estos sistemas aumentan notablemente el fenómeno de fricción y juego mecánico, en este sentido la tecnología de transmisión directa ofrece enormes ventajas.

Tornillos de potencia

Frecuentemente se utilizan para convertir un movimiento giratorio en un movimiento lineal. Los parámetros de un tornillo son p (paso del tornillo) que suele denominarse también intervalo. El paso determina la distancia que el tornillo recorre en una rotación

única.

Otros sistemas de transmisión

En estos se incluyen:

- **Transmisión por sistemas de poleas:** Se utilizan para transmitir potencia desde actuadores situados en la base del robot. En ocasiones la cuerda está constituida por fibras de acero o materiales sintéticos. Las articulaciones rotacionales pueden conectarse a una polea que es impulsada por un cable unido a un actuador giratorio.
- **Transmisión de cadena:** Estas operan con una relación constante. Debido a la interacción positiva entre la cadena y las ruedas dentadas, no se produce ningún deslizamiento. El paso de una cadena es la distancia entre centros de rodillos contiguos. La transmisión de la velocidad de rotación y de la potencia entre las ruedas dentadas sigue relaciones similares a las desarrolladas para engranaje.
- **Transmisiones armónicas:** Son productos patentados de USM, Inc. Se utilizan como elevadores o reductores de velocidad. Los ejes de entrada y salida están dispuestos a lo largo del mismo eje geométrico de modo que una transmisión armónica podría montarse en la parte frontal de un motor con el eje de salida saliendo por el mismo extremo. Las transmisiones armónicas pueden proporcionar cualquier relación de reducción desde 1:1 a infinito: 1, aunque suelen emplear el rango de 100:1. Son menos eficientes que los trenes de engranajes bien diseñados.

7.1.4. Reductores

Para el uso de reductores en robot es necesario cumplir con unas exigencias, estas debidas a las altas prestaciones que se le piden al robot en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento. Según la tabla 7.1 se muestran las características y valores típicos de los reductores para robóticas.

Cuadro 7.1: Características reductores.

CARACTERISITICAS	VALORES
<i>Relación de reducción</i>	50: 300
<i>Peso y tamaño</i>	0.1: 30 kg
<i>Momento de inercia</i>	10^{-4} kg m ²
<i>Velocidades de entrada máxima</i>	6000:7000
<i>Par de salida nominal</i>	5700 Nm
<i>Par de salida máximo</i>	7900 Nm
<i>Juego angular</i>	0: 2 "
<i>Rigidez torsional</i>	100:2000 Nm/rad
<i>Rendimiento</i>	85%-98%

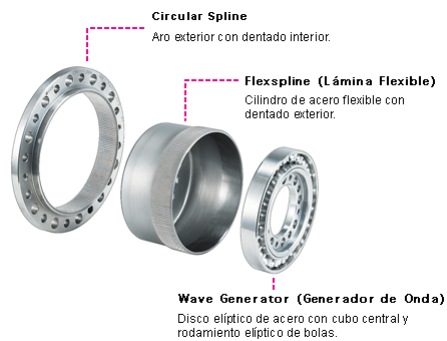
Fuente: Fundamentos de robótica. Antonio Barrientos. 2007.

Lo ideal en reductores para robótica es que tengan bajo peso, tamaño reducido, bajo rozamiento y que sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso, debido a que los robots trabajan en ciclos cortos que implican continuos arranques y paradas. Deben tener una alta rigidez torsional.

Los reductores más usados para robots son los HDUC (De la empresa Harmonic Drive) figura 7.12, estos tiene una corona exterior rígida con un dentado interior y un vaso flexible con dentado exterior que engrana en el primero. En el interior al vaso gira un rodamiento elipsoidal que deforma el vaso poniendo en contacto la corona exterior con la zona del vaso correspondiente al máximo diámetro de la elipse, al girar el

rodamiento elipsoidal, se obliga a que los dientes del vaso flexible engranen el uno al otro con los del dentado interior de modo que al haber una diferencia de dientes, tras una vuelta completa del rodamiento elipsoidal, el vaso flexible solo habrá avanzado Z dientes. En concreto, se consiguen reducciones de hasta 320, con una holgura cercana a cero y capacidad de transmisión de par de 5720 N.m.

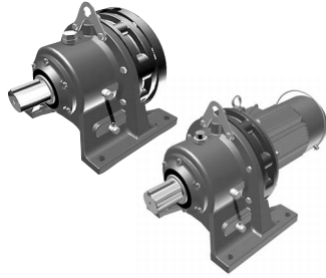
Figura 7.12: Reductor HDUC.



Fuente: www.harmonicdrive.de

Otro sistema de reducción de los reductores CYCLO figura 7.13, que se basa en el movimiento cicloidal de un disco de curvas movido por una excéntrica solidaria al árbol de entrada. Por cada revolución de la excéntrica el disco de curvas avanza un saliente rodando sobre los rodillos exteriores. Este avance arrastra a su vez a los pernos del árbol de salida que describirán una cicloide dentro de los huecos del disco de curvas. La relación de reducción estará dada por el número de salientes, para compensar los momentos de flexión y de las masas de cada disco en movimiento excéntrico, se usa dos discos desfasados entre sí 180°

Figura 7.13: Reductor CYCLO 6000 .



Fuente: www.smcyclo.com

7.1.5. Accionamiento directo

Existe en el mercado robots que tiene un accionamiento directo (DD, Direct Drive), con estos no se hace necesario a utilizar un reductor intermedio. Se usa exclusivamente para robots con accionamiento eléctrico. Surge de la necesidad de utilizar robots en aplicaciones que exigen combinar gran precisión con alta velocidad. Las ventajas de utilizar accionamientos directos son las siguientes:

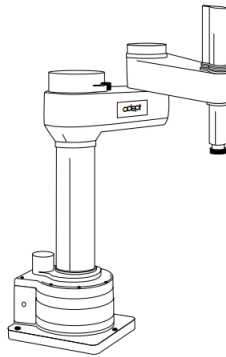
- Posicionamiento rápido y preciso, por que se evitan los rozamientos y juegos de las transmisiones y reductor.
- Aumento de las posibilidades de control del sistema a costa de una mayor complejidad.
- Simplificación del sistema mecánico al eliminarse el reductor.

Para este tipo de accionamiento se trabaja con motores que proporcionen un par elevado (unas 50-100 veces mayor que con reductor) a bajas revoluciones, manteniendo la máxima rigidez posible, por tal razón se usan motores síncronos y de continua sin

escobillas. También se usan motores de inducción de reluctancia variable.

En la mayoría de los casos este accionamiento se usa en robot tipo SCARA. El primer robot comercial con accionamiento directo fu un SCARA denominado AdeptOne (figura 7.14) en 1984, de la compañía Adept Technology, Inc.

Figura 7.14: Robot AdeptThree-MV Robot.



Fuente: Instruction Handbook. Adept. 1997

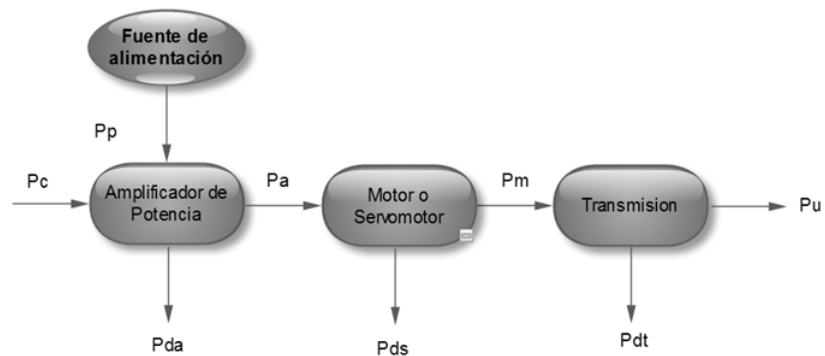
7.2. ACTUADORES

Su objetivo es generar el movimiento de los elementos que forman el robot, según las ordenes dadas por la unidad de control. En la figura 7.15 se muestran las entradas y salidas de un actuador.

Las conexiones entre todos los componentes de los actuadores se describen en la figura 7.15. Para elegir un actuador vale la pena empezar desde el requerimiento impuesto sobre la potencia mecánica, $-P_u$ por la fuerza y velocidad que describe el movimiento de articulaciones. Con base en la fuente de la potencia de entrada, $-P_a$ los actuadores pueden clasificarse en tres grupos:

- Actuadores neumáticos.

Figura 7.15: Sistema de actuador.



Fuente: Introducción a la Robótica. Kumar Subir Saha. 2008

- Actuadores hidraulicos.
- Actuadores electricos.

7.2.1. Actuadores neumáticos

Su fuente de energía es aire, aunque no consiguen una buena precisión de posicionamiento debido a la compresibilidad del aire, por tal razón son utilizados en manipuladores sencillo. Existen dos tipos de actuadores neumáticos: Cilindros neumáticos y motores neumáticos.

Cilindros neumáticos

Se consigue el desplazamiento de un embolo encerrado en un cilindro como resultado de la diferencia de presión a ambos lados.

En estos cilindros solo se persigue un posicionamiento en los extremos del mismo y no un posicionamiento continuo.

Pueden ser:

- **Simple efecto:**El embolo se desplaza en un sentido como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mientras que en el otro sentido se desplaza como consecuencia del efecto de un muelle.
- **Doble efecto:**El aire a presión es el encargado de empujar al embolo en las dos direcciones al poder ser introducido de forma arbitraria en cualquiera de las dos cámara.

Motores neumáticos

En los motores neumáticos se consigue el movimiento de rotación de un eje mediante aire presión. Se encuentran:

- **Motores de aletas rotativas:** Motores en los que sobre el rotor excéntrico están dispuestas las aletas de longitud variable. Al entrar aire a presión en uno de los compartimentos formados por dos aletas y la carcasa, estas giran hacia una situación en la que el compartimento tenga mayor volumen.
- **Motores de pistones axiales:** Se caracterizan por tener un eje de giro solidario a un tambor que se ve obligado a girar por las fuerzas que ejercen varios cilindros, que se apoyan sobre un plano inclinado. En los robots al usar un sistema de actuador neumático es necesario añadirle una instalación de aire comprimido que incluye: compresor, sistema de distribución, filtros, secadores, etc.

Ventajas

- Es la forma más económica de todos los actuadores.
- El aire comprimido puede almacenarse y transportarse fácilmente a través de largas distancias.
- El aire comprimido es limpio, a prueba de explosiones e insensible a fluctuaciones de temperatura.

- Estos actuadores tiene pocas partes móviles por lo que son muy confiables y ayudan a reducir los costos de mantenimiento.
- Tiene una acción y un tiempo de respuesta muy rápido, lo que permite ciclos de trabajo expeditos.
- Normalmente no se requiere ninguna transmisión mecánicas.
- Un sistema neumático es seguro.
- Son sistemas compactos.
- El control es sencillo.

Desventajas

- Debido a que el aire es compresible, el control de la precisión en la velocidad y la posición no es fácil de lograr. A menudo solo está disponible una secuencia limitada que opera con una velocidad fija.
- No son convenientes para mover cargas pesadas bajo control preciso, debido a la compresibilidad del aire. Esta compresibilidad requiere de la aplicación de mas fuerza de la que normalmente sería necesaria para asegurar que el actuador este firmemente en posición contra su tope en condiciones de carga.

7.2.2. Actuadores hidráulicos

El fluido de trabajo en actuadores hidráulicos(figura ?? son los aceites minerales que tiene una presión comprendida entre los 50 y 300 bar. El grado de compresibilidad de los aceites usados es muy inferior al aire, por lo tanto es más fácil en ellos realizar un control continuo, usando un servo control, ya que permiten desarrollar elevadas fuerzas y pares.

Tienen como ventaja una alta estabilidad frente a cargas estáticas, elevada capacidad de carga y relación potencia-peso, auto lubricación y robustez. Se usan en robots

Figura 7.16: Actuador hidraulico



Fuente: Catalogo Parker HY30-8200/S

que deban manejar grandes cargas.

Ventajas

- Alta eficiencia y alta relación potencia-tamaño.
- Es posible el control completo y preciso de la velocidad, posición y dirección de los actuadores.
- Ocurren pocos problemas de contragolpe debido a la rigidez e incompresibilidad del fluido, especialmente cuando el actuador actúa como la propia articulación o unión.
- Tienen mayor capacidad de carga que los demás tipos de actuadores.
- Se obtiene un accionamiento directo con simpleza mecánica.
- Son autolubrificantes y no corrosivos.
- Al tener presencia de unos acumuladores, el sistema puede responder a súbitas demandas de potencia.
- Tienen mayor capacidad para resistir cargas súbitas que los robots eléctricos.

Desventajas

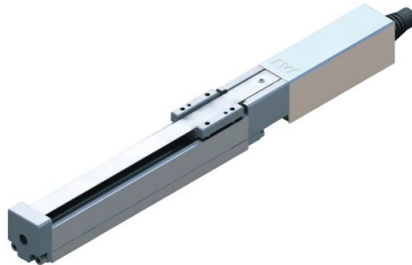
- Pueden darse fugas que causan una pérdida de rendimiento y contaminación general del área de trabajo.

- Mayor riesgo de incendios.
- La fuente de alimentación puede ser ruidosa.
- Cambio de temperatura alteran la viscosidad del liquido hidráulico, causando un movimiento lento del robot.
- Para robots mas pequeños, la energía hidráulica usualmente no es económicamente factible, pues que el costo de componentes hidráulicos no se reduce en proporción al tamaño
- El servo control de sistemas hidráulicos es complejo y no se entiende tan ampliamente como el servo control eléctrico

7.2.3. Actuadores eléctricos

Son los más usados para robots industriales debido a su sencillez y precisión, como el visto en la figura 7.17 .La fuente principal de energía de entrada es la energía eléctrica que fluye desde el sistema de distribución eléctrico.

Figura 7.17: Actuador eléctrico.



Fuente: Catalogo RoboCylinder

Motores de corriente continua (DC)

Están constituidos por devanados internos, inductor e inducido, que se alimentan con corriente continua:

- El campo magnético de dirección fija (excitación) es generado por el inductor que está situado en el estator.
- El giro del rotor es dado por el inducido debido a la fuerza de Lorentz que aparece como la unión de la corriente circulante por él y del campo magnético de excitación.

En los motores de corriente continua (figura 7.18) Para la conversión de energía eléctrica en mecánica de manera prolongada, se hace necesario que los campos magnéticos del estator y del rotor permanezcan estáticos entre sí.

Figura 7.18: Motor DC.



Fuente: Catalogo Maxon A-max motors

Pueden ser:

- **Motores de CD de imanes permanentes:** En el motor de imanes permanentes no se usa bobinas de campo y el campo es producido por los imanes permanentes. No requieren fuentes de energía de excitación para las bobinas de campo.
- **Motores de CD de imanes permanentes sin escobillas:** Consiste básicamente en una secuencia de la bobina del estator y un rotor de imanes permanentes, en

este motor el conductor de corriente esta fijo y el imán se mueve. Tienen ventaja sobre los anteriores pues tienen una mejor disposición de calor, hay una inercia reducida del rotor y son menos costosos.

Motores paso a paso

Son motores capaces de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos para su uso como accionamientos industriales. Tienen la ventaja que no necesariamente requieren un sistema de retroalimentación. Puesto que se trata de motores de control digital, no requieren el gasto adicional de equipos de conversión de digital a analógica cuando se conectan a un sistema de control por computadora, usualmente la flecha del motor gira en forma incremental en pasos iguales en respuesta a un tren de impulsos de entrada programado. El número de pulsos por unidad de tiempo determina la velocidad del motor. Una ventaja del motor de pasos es que la inercia del motor normalmente es baja y si más de un motor a pasos es accionado desde la misma fuente estos se mantendrán perfectamente sincronizados. Entre sus desventajas esta que tienen menor salida y eficiencia comparada con los otros tipos de motores, además las entradas y circuitos de accionamiento deben estar muy bien diseñados en relación con el par torsor y la velocidad requerida.

Existen tres tipos de motores paso a paso:

- **De imanes permanentes:** En estos el rotor posee una polarización magnética constante, gira para orientar sus polos de a cuerdo al campo magnético creado por las fases del estator. El rotor es de construcción de imanes permanentes y tiene cuatro polos. Cada polo esta enrollado con devanado de campo y las bobinas que hay en los pares opuestos de polos están en serie. Los ángulos de paso que se producen comúnmente en este tipo de motor son 1.8° , 7.5° , 15° , 30° , 34° y 90° .
- **De reluctancia variable:** En estos el rotor está formado por un material ferromagnético que tiende a orientarse de modo que facilite el camino de las líneas de

fuerza del campo magnético generado por la bobinas de estator. Para que gire el rotor determinados grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Esta forma del motor a pasos generalmente da ángulos de paso de 7.5° y 15°

- **Híbridos:** Combinan las características de los motores de reluctancia variable y de imanes permanentes. Los ángulos de paso normales son 0.9° y 1.8° .

Motores de corriente alterna (AC)

Los motores de corriente alterna pueden clasificarse en dos grupos, monofásicos y polifásicos, donde cada grupo esta subdividido en motores de inducción y motores síncronos. Los monofásicos se usan normalmente para requerimientos de baja potencia, mientras que los polifásicos para potencias mayores. Los motores de inducción son por lo regular más económicos que los que son síncronos. En su forma más sencilla el motor de corriente alterna consiste en electroimanes externos alrededor de un rotor central pero sin ninguna forma de conmutación mecánico para los electroimanes.

Son importantes en el campo de la robótica debido a:

- La construcción de rotores síncronos sin escobillas.
- Uso de convertidores estáticos que permiten variar la frecuencia con facilidad y precisión.
- Empleo de la microelectrónica que permite una gran capacidad de control.

El inductor se encuentra en el rotor, y está formado por imanes permanentes mientras el inducido está situado en el estator, y formado por tres devanados iguales decalados 120° eléctrico y se alimenta con un sistema trifásico de tensiones. En motores síncronos la velocidad de giro depende únicamente de la frecuencia de la tensión que alimenta el inducido, para variar esta con precisión, el control de velocidad se realiza

mediante un convertidor de frecuencia.

Motor de inducción monofásico con rotor jaula de ardilla

Motor hecho de barras de cobre o aluminio que caben en ranuras en los anillos de extremos para formar circuitos eléctricos completos. No hay conexiones eléctricas externas al rotor. Básicamente consiste en un rotor con un estator que tiene un conjunto de devanados. El motor no es de arranque automático.

- **Motor de inducción trifásico:** Tiene un estator con tres devanados ubicados con 120° aparte, donde cada devanado está conectado a una de las tres líneas del suministro. Posee arranque automático.
- **Motores síncronos:** Se utilizan motores síncronos cuando se requiere una velocidad precisa. No son de arranque automático por lo que tiene que emplearse un sistema para arrancarlos.

7.2.4. Actuadores piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos, por lo tanto, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

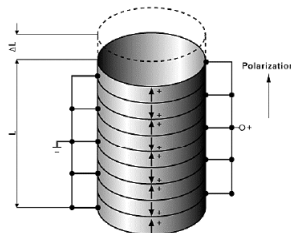
Un actuador piezoeléctrico es un dispositivo que genera movimiento (desplazamiento) empleando el fenómeno físico de la piezoelectricidad. Los actuadores que utilizan este efecto están disponibles desde hace aproximadamente 20 años y han cambiado el mundo del posicionamiento de precisión. El movimiento preciso que resulta cuando un campo eléctrico es aplicado al material, es de gran valor para nanoposicionamiento.

Ya que el efecto piezoeléctrico exhibido por materiales naturales tales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle, es muy pequeño, se han desarrollado nuevos materiales

con propiedades mejoradas, por ejemplo los materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos, como el BaTiO₃ y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT). Los cerámicos PZT, disponibles en muchas variaciones, son los materiales más ampliamente usados hoy para aplicaciones como actuadores o sensores

Los actuadores piezoeléctricos (figura 7.19) pueden operar en lazo abierto y lazo cerrado. En lazo abierto, el desplazamiento corresponde aproximadamente al voltaje manejado. Este modo es ideal cuando no es crítica la precisión de la posición absoluta o cuando la posición es controlada por datos que provee un sensor externo. Los piezoactuadores de lazo abierto exhiben histéresis y comportamiento *creep*. Los actuadores de lazo cerrado son ideales para aplicaciones que requieren alta linealidad, amplia estabilidad de posición, repetitividad y precisión. Este tipo de actuadores están equipados con sistemas de medición de posición que proveen resolución sub-nanométrica y ancho de banda hasta 10 KHz.

Figura 7.19: Diseño de un actuador piezoeléctrico tipo pila.



Fuente: Actuadores piezoelectricos. Miguel Rodriguez Cupich. 2000

Actuadores flexure: La mejor guía de precisión puede lograrse con el nanoposicionador "Flexure" (figura 7.20) el cual cuenta con un amplificador de movimiento integrado.

Figura 7.20: Nanoposicionador tipo Flexure y scanner con amplificador de movimiento integrado

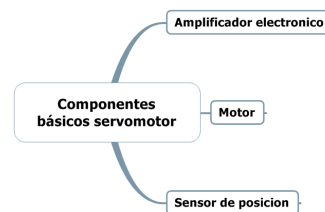


Fuente: Introducción a la Robótica. Kumar Subir Saha. 2008

7.3. SERVOMOTORES

Un servomotor está compuesto principalmente por tres elementos (figura 7.21): motor eléctrico, sensor de posición para medir el desplazamiento articular (rotacional o lineal) y el amplificador electrónico o servo amplificador constituido por un conjunto de microprocesadores y electrónica de potencia que se encarga de acoplar y acondicionar al motor la impedancia y señal del voltaje de baja potencia que proviene de la computadora o de un sistema mínimo digital

Figura 7.21: Componentes servomotor.

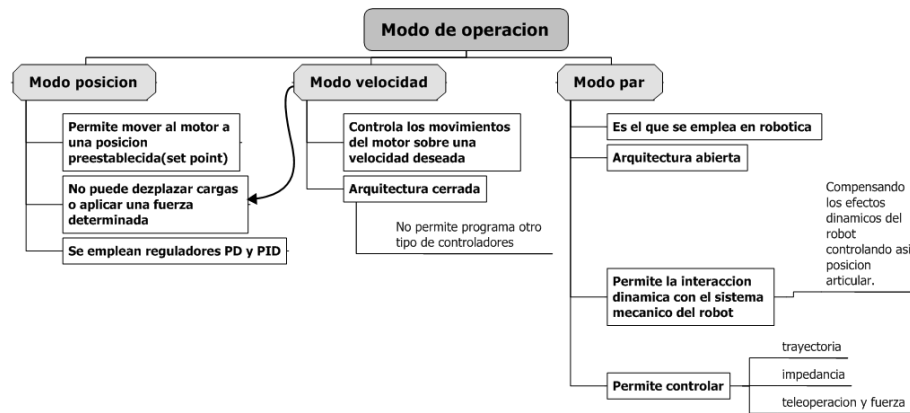


Fuente: Autores del proyecto.

7.3.1. Modo de operación

Los servomotores tienen tres modos de operación: posición, velocidad y par. Ver figura 7.2.

Cuadro 7.2: Modo de operación servomotores.



Fuente: Autores del proyecto.

7.3.2. Servomotores de transmisión directa

La transmisión directa representa la nueva tecnología de la robótica debido a las ventajas que tiene sobre los robots convencionales con sistema de engranaje. La transmisión directa consiste en que el rotor del motor funciona como una fuente par como se había mencionado en ítems anteriores. El diseño de robots a través de servomotores de transmisión directa presenta enormes ventajas, no solo en sus prestaciones sino también en el sentido de que resulta clave para propósitos de realizar investigación científica de

la robótica. Las características principales de los servomotores de transmisión directa son:

- Arquitectura abierta para la evaluación experimental de cualquier algoritmo de control.
- Funcionan como fuente de par.
- No hay pérdidas en la transmisión de energía.
- Reducción del fenómeno de fricción y juego mecánico
- No es necesario acoplamiento de engranajes
- No requieren calibración
- Modelado y programación sencilla

Un servomotor de transmisión directa es una fuente de par, esto indica que el par que proporciona como salida se mantiene en magnitud y signo independiente de la carga que se desplace. Matemáticamente la respuesta de un servomotor queda especificada por la función que se describe en la figura 7.22 a continuación se describe:

Actualmente los servomotores de transmisión directa se encuentran en la tercera generación (DrvGIII) y se les denomina como intelligent drive. Ahora incluyen un ambiente de programación para configurar el modo de trabajo. Dicho ambiente facilita la configuración de trabajo en modo par. En la tabla 7.3 se presenta una comparación según las características entre un servomotor de transmisión directa y uno de escobillas.

Figura 7.22: Expresión matemática servomotor.

$$\tau_{\text{aplicado}} = \begin{cases} \tau_{\text{aplicado}} & \text{si } \tau_{\text{solicitado}} > \tau_{\text{max}} \\ \tau_{\text{solicitado}} & \text{si } \tau_{\text{min}} \leq \tau_{\text{solicitado}} \leq \tau_{\text{max}} \\ \tau_{\text{min}} & \text{si } \tau_{\text{solicitado}} < \tau_{\text{min}} \end{cases}$$

Fuente: Robótica: Control de robots manipuladores. Fernando Reyes. 2011

Cuadro 7.3: Comparación servomotores.

CARACTERISTICAS	SERVOMOTOR DE TRANSMISIOND DIRECTA	SERVOMOTOR CON ESCOBILLAS
<i>Comutación</i>	Electrónica con retroalimentación de sensores de posición	Comutación por escobillas
<i>Mantenimiento</i>	No requiere	Mantenimiento periódico
<i>Relación velocidad/torque</i>	Mantiene el torque dentro del ancho de bando	Ancho de banda muy limitado; cuando la velocidad aumenta, el fenómeno de fricción reduce el torque por las escobillas
<i>Eficiencia</i>	Alta	Moderada
<i>Inercia del rotor</i>	Inercia baja; debido al imán permanente del rotor mejora la respuesta dinámica	Inercia muy alta que reduce la respuesta dinámica
<i>Juego mecánico</i>	No	Si
<i>Generación del ruido eléctrico</i>	Muy bajo	Alto, debido a la generación de arcos eléctricos por las escobillas
<i>Costos de fabricación</i>	Alto	Bajo
<i>Control</i>	Arquitectura abierta: robusto y eficiente	Arquitectura cerrada: esquemas de control tradicionales PD y PID
<i>Fricción</i>	Muy baja	Muy altas por las escobillas
<i>Fuente de par</i>	Fuente ideal	No funciona como fuente de par

Fuente: Robótica: Control de robots manipuladores. Fernando Reyes. 2011

7.4. SENSORES

Al igual que los seres animados, los robots necesitan reconocer el entorno donde se desenvuelven para la realización óptima de sus funciones, es decir, necesitan captar señales para reconocer el ambiente y actuar en base a estas. Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible

que es función de la variable medida. Por lo general, la energía usada para la medida es transducida en una señal eléctrica. En la mayoría de los casos, y en especial cuando se va a medir una magnitud mecánica, se evidencia la presencia de un elemento denominado sensor primario que convierte la variable de medida en una señal de medida, siendo el sensor electrónico es el que la transforma en señal eléctrica. Al conjunto completo se le conoce como sensor. Las magnitudes físicas a medir, más comunes, necesarias para que un robot tenga conocimiento de su entorno son:

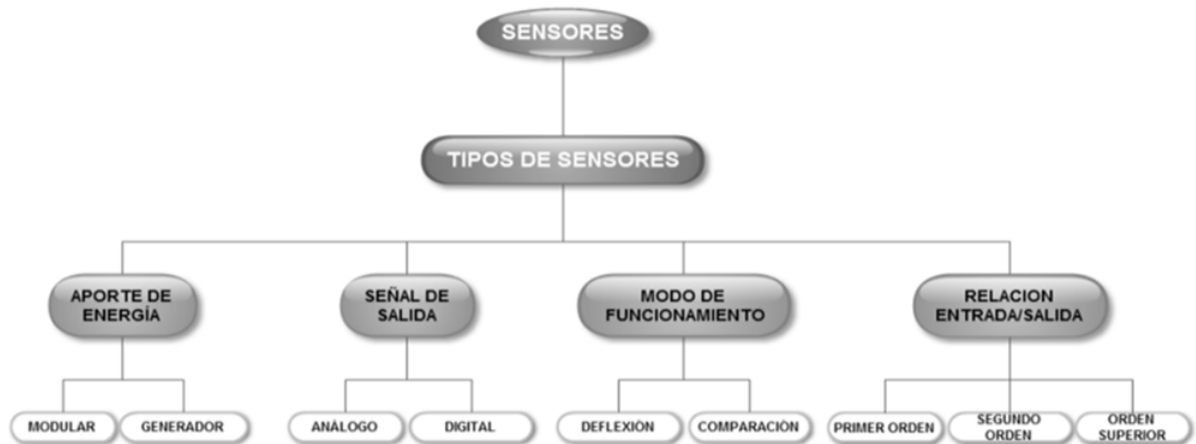
- Luz (con su gama de espectro: visible, infrarroja, ultravioleta).
- Sonido y ultrasonido.
- Gravedad (inclinación, posición).
- Temperatura.
- Humedad
- Presión y/o fuerza
- Velocidad
- Magnetismo
- Ubicación
- Proximidad
- Distancia

7.4.1. Tipos de sensores

Existen varias calificaciones de sensores dependiendo de sus características (figura 7.23). Los más importantes se describirán a continuación.

- **Según el aporte de energía:** Los sensores pueden ser modulares o generadores. Los sensores modulares o activos son aquellos en los cuales la energía de la señal de salida procede en su mayor parte de una fuente de energía auxiliar. La entrada solo controla la salida. En cambio, en los sensores generadores o activos la energía de la señal de salida procede de la señal de entrada
- **Según el aporte de energía:** Los sensores se pueden clasificar en análogos o digitales según la forma de la señal de salida. La señal de salida en los sensores análogos es continua, es decir que esta varia a nivel microscópico. En los sensores digitales la señal de salida esta discretizada, es decir, esta señal varía en saltos o pasos preestablecidos. En los sensores digitales la transmisión de su salida es más fácil, además de presentar mayor precisión y en muchas ocasiones mayor exactitud, es por esto que existen elementos que permiten realizar la transformación de una señal análoga a digital llamados conversores A/D (análogo/digital)
- **Según el modo de funcionamiento:** Estos pueden funcionar por deflexión o por comparación. En los primeros la magnitud medida produce un efecto físico que genera un efecto similar, pero opuesto, en alguna parte del instrumento y que está relacionado con alguna variable útil. En los sensores que funcionan por comparación se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto conocido opuesto al generado por la magnitud a medir.
- **Según la relación de entrada-salida:** Esta clasificación es muy importante cuando el sensor forma parte de un sistema de control de lazo cerrado. Un sensor puede ser de primer o segundo orden o de orden superior. El orden está relacionado con el número de elementos almacenadores de energía independientes que incluye el sensor y como consecuencia se verán afectadas la exactitud y velocidad de respuesta.

Figura 7.23: Clasificación de los sensores según diversas especificaciones.



Fuente: Autores del proyecto

7.4.2. Características de los sensores

Los sensores poseen características de su funcionamiento y desempeño. Antes de entrar a describir algunos de los sensores más usados en la robótica industrial, es conveniente familiarizarse con sus características(figura 7.24), las cuales pueden ser estáticas o dinámicas.

Características estáticas

Son aquellas a las cuales se refieren las variables cuando no están cambiando. Dichas características son:

- **Intervalo de medida (Range):** Comprende el conjunto de valores de la variable medida que están entre los límites superiores e inferiores de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento. Este describe los valores de la medición al que un sistema responderá adecuadamente, las medidas por

Figura 7.24: Características más relevantes de los sensores.



Fuente: Autores del proyecto

fuera de la gama o rango, no produce una salida útil.

- **Alcance (*span*):** Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.
- **La exactitud:** Es el grado de aproximación con el cual un sistema de medición indica el valor verdadero.
- **La precisión (*accuracy*):** Es el grado de dispersión de la medida cuando está se repite un número determinado de veces bajo las mismas condiciones.
- **La incertidumbre de la medida (*uncertainty*):** Es un parámetro que caracteriza el intervalo dentro del cual se cree con gran seguridad que se encuentra el verdadero valor medido.
- **Zona muerta (*dead zone or dead band*):** Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta.

- ***Sensibilidad (Sensitivity):*** Es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado del reposo.
- ***Repetitividad (repeatability):*** La Repetibilidad es la capacidad de reproducción de las posiciones de del índice de la señal de salida, del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo.
- ***Linealidad:*** Aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada. Se expresa en forma de desviación máxima con relación a una línea recta que pasa a través de los puntos dados correspondientes y a 0% y a 100% de la variable medida.
- ***Histéresis:*** Diferencia en el valor indicado para cualquier entrada particular cuando esa entrada tiene una dirección ascendente contra la dirección de entrada descendente.

Características estáticas

Son aquellas que se aplican cuando las variables están cambiando:

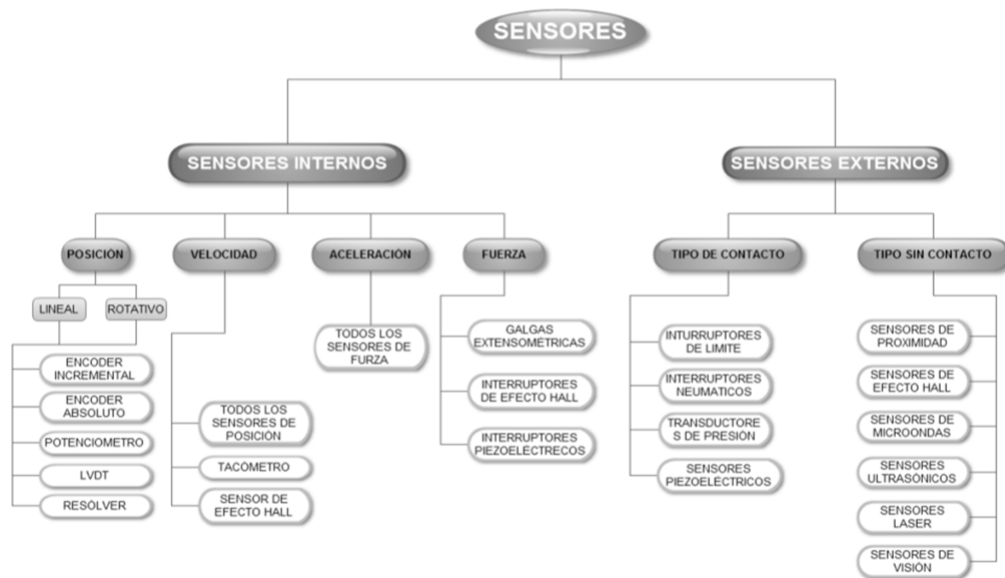
- ***Respuesta a la frecuencia:*** Variación con la frecuencia de la relación de amplitudes señal de salida/variable medida (y de la diferencia de fases entre la salida y la variable medida) para una medida de variación sinusoidal aplicada a un instrumento dentro de un campo establecido de frecuencias de la variable medida.
- ***Estabilidad:*** Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.
- ***Fidelidad:*** Capacidad de un instrumento para indicar o registrar correctamente un cambio en la variable de medida.

- **Respuesta en el tiempo:** Es la caracterización del comportamiento de la señal de salida con la variación de la variable de medida en el tiempo.

7.4.3. Sensores más usados en sistemas robóticos

En la figura 7.25 se describen los sensores más usados en la robótica según la variable de medida.

Figura 7.25: Sensores más usados en robótica.



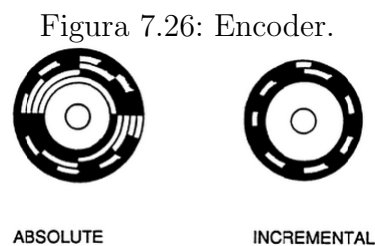
Fuente: Introducción a la Robótica. Kumar Subir Saha. 2008

Sensores internos

Los sensores internos son usados para monitorear el estado interno del robot, tal como posición, velocidad, aceleración, etc. en un momento o posición determinado. Con esta información se puede decidir el comando de control a usar. Dependiendo de lo que miden se pueden clasificar en sensores de posición, velocidad, aceleración o fuerza.

- **Sensores de posición:** Proporcionan información sobre la posición de cada articulación, que se traduce en el ángulo de la articulación. Con esta información se puede encontrar la posición del efector final a través de la cinemática directa. Algunos de estos sensores son:

Encóder: Dispositivo óptico digital que convierte en una secuencia de pulsos digitales el movimiento. Estos dispositivos pueden dar medidas relativas o absolutas dependiendo si se trata del conteo de un solo bit o la decodificación de un conjunto de bits, por esto pueden ser de tipo incremental o absoluto (figura 7.27. Y en cada uno de estos pueden ser tanto lineales como rotativos.



Fuente: Robotics In Service. Joseph Engelberger F. 1989.

Encóder lineal incremental: consiste en una escala transparente con una retícula opaca. En esta se encuentran una serie de ranuras separadas igualmente entre ellas, que pueden variar tanto en separación como en tamaño, una fuente de luz de un lado y unas celdas sensibles a esta luz del otro (fotodiodos). Estas celdas perciben el cambio en la luz produciendo un pulso el cual llega al controlador que lleva un conteo.

Encóder lineal absoluto: de funcionamiento parecido al encóder lineal incremental, con la diferencia de poder dar un valor de distancia recorrida en cualquier momento. Esto lo logra al añadir tiras de secuencias opacas y transparentes. En este caso

la salida es digital directamente, en este caso dependiendo si se encuentra en la parte opaca o transparente esto se traducirá en un valor de 1 o 0 respectivamente.

Encóder rotativo incremental: utilizando el mismo principio del encóder lineal, solo que ahora la tira de secuencias opacas y transparentes están a lo largo de un círculo, separadas aproximadamente por una distancia de 20 micras, para detectar el sentido de rotación hay dos conjuntos de líneas de retículas en diferentes círculos. Hay otro círculo con solo una línea de retícula el cual se usa solo para el conteo de revoluciones.

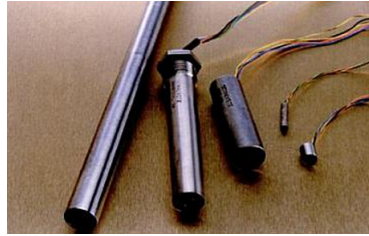
Encóder rotativo absoluto: con un funcionamiento parecido al del encóder lineal absoluto, en este encóder rotativo se encuentran diferentes tiras circulares de opacidades y transparencias que al igual que en el encóder mencionado la salida es digital. Estas tiras están directamente sobre el eje del motor o sobre algún engranaje adjunto a este para aumentar la precisión de la medición. A veces se usa tiras con escalas de grises para disminuir el ruido.

Potenciómetro: Es un dispositivo de resistencia variable que expresa desplazamientos lineales o angulares en términos de voltaje. Consiste en una clavija deslizante que hace contacto con un elemento resistivo; conforme se desplaza este punto de contacto la resistencia varia, en proporción al desplazamiento.

LVDT : El transformador diferencial lineal variable (LVDT)(figura 7.27) es uno de los sensores de desplazamiento más usados, debido a su alta precisión. Este dispositivo genera una señal de CA cuya magnitud se relaciona con el desplazamiento de un núcleo móvil. Básicamente es un núcleo férnico que se mueve en un campo magnético. Existe un núcleo central rodeado por dos bobinas secundarias y una bobina principal, conforme el núcleo se desplaza varia el campo magnético y por tanto, la magnitud del voltaje en las bobinas secundarias varía en función

de dicho desplazamiento, a través de un segmento considerable. Un Transformador diferencial rotatorio variable (RVDT) funciona bajo el mismo principio y está disponible en 40° de rango.

Figura 7.27: Transformador lineal LVDT.



Fuente: Electronica Analogica. SOS, Bravo Ignasi. 2006.

Sincronizadores y resolvers: Son elementos cuya señal de salida es análoga, por tanto debe transformarse a una señal digital por medio de un convertidor análogo/digital. Están conformados por un eje o flecha giratoria denominada rotor y una carcasa estacionaria llamada estator. En los sincronizadores y resolvers emplean rotores de un solo devanado que giran dentro de los estatores. En un sincronizador sencillo el estator cuenta con 3 devanados ubicados a 120° el uno del otro y conectados eléctricamente en “Y”. Un resolver cuenta con 2 devanados orientados a 90° .

Los resolvers modernos están disponibles sin escobillas ya emplean un transformador para acoplar las señales del rotor desde el estator al rotor. El devanado principal de este transformador se ubica en el estator y el secundario en el rotor. Otros resolvers emplean las tradicionales escobillas para acoplar la señal al estator. El rango común de trabajo de los resolvers está entre 2V y 40V RMS y frecuencias entre 400Hz y 10 KHz. En funcionamiento, el devanado de rotor se excita mediante una señal de CA con frecuencias de algunos KHz. La magnitud del voltaje inducido en cualquier devanado del estator es proporcional al seno del ángulo entre el eje de la bobina del rotor y el eje de la bobina del estator. En el caso del sincronizador el voltaje inducido en cualquier terminal del estator es la

suma vectorial de los voltajes a través de las dos bobinas conectadas

- **Sensores de velocidad** :Los sensores de velocidad realizan la lectura de la velocidad mediante la toma de medidas consecutivas de posición a intervalos constantes de tiempo o bien, por medio de la implementación de diversos principios:

Tacómetro:encuentran la velocidad de rotación en cualquier momento sin la necesidad de mucha carga computacional. Existen diversos tipos pero un diseño sencillo se basa en la regla de Fleming que dice ".el voltaje producido es proporcional al índice del acoplamiento inductivo". Básicamente consiste en un conductor (una bobina) es sujeta al eje rotativo, el cual se encuentra girando en un campo magnético (estator). Al aumentar la velocidad de rotación también lo hará el voltaje producido en las terminales de la bobina. Puede configurarse de manera contraria, colocando un imán en el eje rotativo y una bobina sobre el estator. El voltaje que se produce es proporcional a la velocidad de giro. Esta información se digitaliza inmediatamente por un convertidor análogo-digital que la envía a la computadora. Sensor de efecto hall: es otro dispositivo de medición de velocidad que consiste esencialmente en lo siguiente. Se utiliza un material conductor (chip hall) al cual se le suministra una diferencia de potencial en dos caras, se mide una señal de voltaje en las dos caras perpendiculares donde esta señal marcara cero a menos que se encuentre en un campo magnético que sea inducido en ángulo recto al chip. La magnitud de esta señal de voltaje será proporcional a la magnitud del campo que a su vez, ya que se usan imanes radiales, depende de la velocidad de giro del eje donde esté sujeta el imán.

- **Sensores de aceleración** :Al igual que con los sensores de velocidad se parte de la información otorgada por los sensores de posición, se podría usar el mismo mé-

todo y sacar una relación entre el cambio de velocidad (obtenida por los sensores de velocidad) en un lapso de tiempo, pero esta no es una forma eficiente de hacerlo puesto que implica una carga de trabajo pesado sobre la computadora. Otra forma de encontrar esta aceleración es a partir de la fuerza, que es el producto de la masa por la aceleración. Estas fuerzas se miden usando galgas extensométricas, que trabajan bajo la formula:

$$F = \frac{\Delta RAE}{RC} \quad (7.1)$$

Donde F: fuerza; ΔR : cambio de resistencia de la galga; A: área; E: módulo de elasticidad del material de la galga; R: resistencia original de la galga; y C: constante de deformación de la galga. Por tanto despejando la aceleración de la ecuación antes mencionada se obtiene:

$$a = \frac{\Delta RAE}{RCm} \quad (7.2)$$

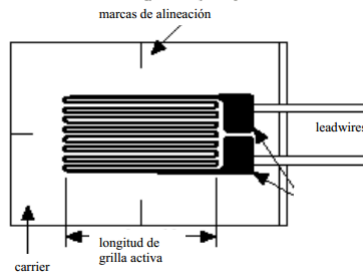
Al encontrar la velocidad y aceleración a partir de la diferenciación de la posición y velocidad, respectivamente, generalmente se amplía el ruido generado por el error en los datos medidos, si existe. Por tanto se tiene a usar integradores para obtener la posición, velocidad y aceleración a partir de la fuerza. Los integradores tienen a reducir el ruido.

- **Sensores de fuerza** : Existen varios principios físicos que permiten la detección de fuerza, entre esos los más comunes son el desplazamiento, el efecto hall y efecto piezoeléctrico.

Galgas extensométricas:El principio de este sensor se basa en el aumento de la resistencia de un conductor con su alargamiento. Dicho aumento se debe al incremento de la longitud del conductor y el decremento en el área del conductor.

Las galgas (figura 7.28) están hechas de conductores eléctricos de alambre o papel metálico grabado sobre un material base. Están pegados en la superficie donde se van a medir deformaciones unitarias, las cuales producirán cambios en las resistencias de las galgas, lo que se mide mediante su conexión al circuito e puente de wheastone como una de las 4 resistencias. Este método es económico y preciso, pero hay que tener cuidado con los cambios de temperatura ya que también habrán cambios en las resistencias por la variación de temperatura.

Figura 7.28: Galgas extensométricas.



Fuente: Galgas extensiométricas. SOSA, Javier. 2003

Sensor piezoeléctrico: Un material piezoeléctrico presenta un efecto conocido como efecto piezoeléctrico, el cual consiste en el desarrollo de un potencial eléctrico dentro de la red cristalina de dicho material al presentarse una deformación por el efecto de una fuerza, este efecto es reversible. Esto quiere decir que si se aplica un voltaje entre las superficies del cristal, este cambiara sus dimensiones físicas. La magnitud y polaridad de las cargas inducidas son proporcionales a la magnitud y dirección de la fuerza aplicada. Los materiales piezoeléctricos son cuarzo, turmalina, sal de rochalle y otros. El rango de fuerza de estos sensores es aproximadamente entre 1 a 20 kN. Son muy útiles para medir cambios instantáneos de fuerza (Fuerzas dinámica).

Detección con base en la corriente: Puesto que el par de torsión es proporcionado por un motor eléctrico, es una función de la corriente consumida y junto con las características del motor proporcionan la medición de par de torsión.

Sensores externos

Los sensores externos se usan, básicamente, para reconocimiento del entorno y de los objetos a manipular. Estos pueden ser de tipo contacto o tipo sin contacto.

- **Tipo sin contacto**

Sensor de proximidad: La detección de proximidad es la técnica que se usa para determinar la presencia o ausencia de objetos por medio de un sensor electrónico sin contacto. Existen 2 tipos de sensores de proximidad: inductivos o capacitivos.

Sensor de proximidad inductivo: todos estos tipos de sensores cuentan con 4 elementos básicos: Bobina de sensor y núcleo férnico, circuito detector, circuito oscilador y circuito de salida de estado solida.

El circuito oscilador genera un campo magnético, se centra en el eje del núcleo férnico que modela el campo y lo dirige hacia la cara del sensor. Cuando un elemento metálico se acerca a la cara y entra al campo magnético produce corrientes de Eddy. Esto causa una reducción en la amplitud de la señal del oscilador, la cual es captada por el circuito detector. El circuito detector se encenderá con una amplitud de operación específica. Esta señal enciende el circuito de estado sólido. Cuando el objeto sale del campo se presenta un aumento en la señal oscilante y si sobrepasa un valor límite captado por el circuito detector este se apagara y hará que la señal de salida regrese al estado normal o de apagado. EL rango usual de

detección es de 10 15 mm, aunque existen rangos hasta 100 mm

Sensor de proximidad inductivo: : Este sensor trabaja de manera muy parecida al sensor inductivo. Sin embargo el medio de detección es bastante distinto y se basa en la capacitancia dieléctrica. La función del detector capacitivo consiste en señalar un cambio de estado, basado en la variación del estímulo de un campo eléctrico. Los sensores capacitivos detectan objetos metálicos, o no metálicos, midiendo el cambio en la capacitancia, la cual depende de la constante dieléctrica del material a detectar, su masa, tamaño, y distancia hasta la superficie sensible del detector. Las características principales de estos sensores son:

- Pueden detectar objetos no metálicos
- Pueden detectar objetos de peso ligero o pequeños no detectables con finales de carrera.
- Ofrecen un rango alto de conmutación para una respuesta rápida en aplicaciones de conteo.
- Puede detectar objetos a través de barreras no metálicas (vidrio, plástico, etc.)
- Tienen vida útil alta.
- La salida de estado sólido proporciona una señal libre de rebotes.

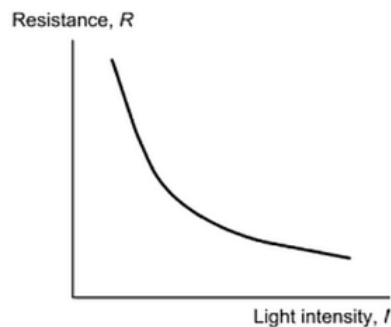
Aunque tiene limitaciones como que necesitan un rango extenso para la detección efectiva y les afecta el vaho y la humedad.

Sensor de desplazamiento de semiconductor: El sensor de desplazamiento de semiconductores usa un diodo emisor de luz (LED) de semiconductor o laser como fuente de luz, así como un detector sensible a la posición (PSD). La señal emisora (rayo láser) se enfoca sobre el objeto mediante un lente. El objeto refleja la luz, que luego se enfoca en el PSD creando un punto de luz. El punto de luz se

mueve cuando el objeto lo hace y posteriormente se detecta el movimiento de la pieza de trabajo mediante el movimiento del punto de luz.

Sensor de desplazamiento de semiconductor: Los LDR (Light-Depend Resistors) usan un material semiconductor cuyas características eléctricas varían de acuerdo a la cantidad de luz incidente. Los semiconductores más usados para la manufactura de LDRs son el sulfato de cadmio (CdS) y el selenio de cadmio (CdSe). Estos materiales son los más sensibles a la luz en el rango del espectro visible. Un típico LDR de CdS presenta una resistencia de 1M Ω en la oscuridad y menos de 1K Ω cuando está ubicado bajo una fuente de luz brillante. La variación de valor resistivo de un LDR tiene cierto retardo, que es diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro. Según la figura 7.29 se ve la variación de la resistencia del fotorresistor con respecto a la cantidad de luz.

Figura 7.29: Características de un LDR.



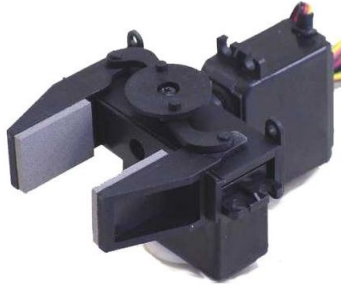
Fuente: Electronic circuits: fundamentals and applications. Mike Tooley, Michael H. Tooley. 2006

7.5. EFECTORES FINALES

El movimiento de un brazo robótico está provisto de una muñeca con un efector final, es frecuente tratarlo en dos pasos. Primero se mueve el brazo para posicional

el extremo del ultimo enlace, y luego se orienta la muñeca para que el efector final tenga la orientación adecuada figura 7.30 .

Figura 7.30: Efector Final.

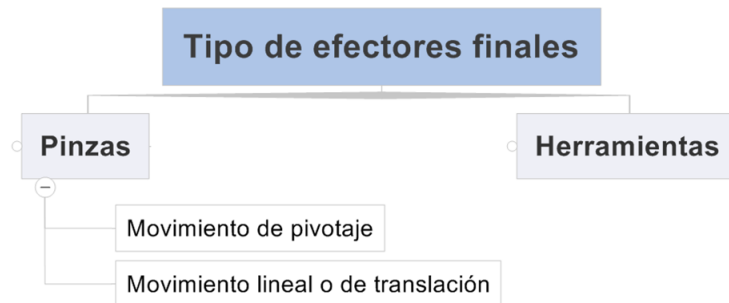


Fuente: Autores del proyecto.

En las tareas de montaje en un plano que se han mencionado, puede que no sea necesario ningún grado de libertad adicional ya que se trabaja siempre en dirección perpendicular al plano de montaje, tal como sucede en el montaje de componentes electrónicos.

En la figura figura 7.31 se muestra las categorías principales en las que se clasifican los efectores finales

Figura 7.31: Clasificación efectores finales.



Fuente: Autores del proyecto.

7.5.1. Pinzas mecánicas

Es un efector final que utiliza dedos mecánicos impulsados por un mecanismo para agarrar una pieza. Su función es trasladar algo a partir de un suministro de energía que origina una acción de agarre de los dedos sobre la pieza, este mecanismo debe ser capaz de abrir y cerrar los dedos y de aplicar la fuerza necesaria contra la pieza para sostenerlo de forma segura cuando se cierre la pinza. La forma de sujetar el objeto dentro de la pinza puede ser comprimiendo la pieza con los dedos, o sujetando la pieza mediante el rozamiento entre los dedos y la pieza figura 7.32.

Figura 7.32: Pinzas mecánica.



Fuente: www.tiendarobotica.com

Tipos de mecanismos de pinza

En esta clasificación las pinzas pueden impulsar la apertura y cierre de los dedos mediante alguno de los siguientes movimientos:

- **Movimiento de pivotaje:** En este movimiento los dedos giran en relación con los puntos fijos del pivotaje en la pinza para abrirla y cerrarla.
- **Movimiento lineal o de translación:** En el movimiento lineal los dedos se abren y cierran a través del movimiento paralelo a cada uno de los otros

dedos, esto se realiza por medio de carriles de guía de modo que la base de cada dedo se desliza a lo largo de un carril guía durante el movimiento. El movimiento de translación del dedo se debe realizar por medio de la unión que mantendrían los dedos en la dirección paralela a los otros durante la actuación.

Otra clasificación de las pinzas sería según el tipo de dispositivo cinemático que usa para actuar el movimiento del dedo, los tipos son:

- Actuación de articulación
- Actuación de engranaje y
- Actuación de leva
- Actuación de tornillo
- Actuación de cable y polea

7.5.2. Tipos de mecanismos de pinza

Hay una diversidad de otros tipos de dispositivos que pueden diseñarse para elevar y sujetar objetos.

Ventosas

Conocidas como casquetes de vacío (figura 7.33), pueden utilizarse como dispositivos de pinzas para manipular algunas clases de objetos. La capacidad de elevación de la ventosa depende del área efectiva del casquete y de la presión de aire negativa entre el casquete y el objeto. El área efectiva de la ventosa durante la operación

es aproximadamente igual al área no deformada determinada por el diámetro de la ventosa.

Figura 7.33: Ventosas de fuelle.



Fuente: Catalogo General GRIPSERVICE

Pinzas magnéticas

Son útiles para manipular materiales ferrosos, las ventajas de este tipo de pinzas son:

- Tiempos de captación pequeños.
- Se toleran variaciones en el tamaño de la pieza.
- Capacidad para manipular piezas mecánicas con agujeros.
- Solo requieren una superficie para agarre.

Y sus desventajas radican en:

- Magnetismo residual remanente en la pinza de trabajo.
- Problema de captar solamente una lámina a partir de una pila

Estas pinzas pueden usar electroimanes o imanes permanentes, las primeras son fáciles de controlar pero requieren una fuente de alimentación de corriente continua y una unidad de control adecuada. Los imanes permanentes aventajan a los electroimanes en que no necesitan una fuente de alimentación exterior, pero presentan un inconveniente en relación al control, para esto se usa un eyector que permita separar mecánicamente la pieza del imán.

Pinzas adhesivas

En estas una sustancia adhesiva realiza la acción de agarre, se usan para manipular tejidos y otros materiales livianos. Su limitación principal es que la sustancia adhesiva pierde su pegajosidad con un empelo repetido.

Ganchos, cucharas y otros dispositivos

Los ganchos se emplean como efectores finales para manipular contenedores de piezas y para cargar, descargar piezas que cuelguen de transportadores aéreos. Las cucharas y los calderos se usan para manipular materiales en forma de polvo o líquidos.

Existen dispositivos hinchables en los que el diafragma hinchable se expande para agarrar el objeto. La pinza aplica una presión de agarre uniforme contra la super-

ficie del objeto en lugar de una fuerza concentrada típica de una pinza mecánica.

7.5.3. Herramientas como efectores finales

La razón de utilizar una pinza en estas aplicaciones es que puede existir más de una herramienta a utilizar por el robot en el ciclo de trabajo. En la mayoría de las aplicaciones de robot en las que se manipula una herramienta esta última está unida directamente a la muñeca del robot; en estos casos la herramienta es el efector final. Las herramientas que tienen por función el manejo de piezas y materiales usan diferentes configuraciones de dedos articulados, medios magnéticos o de vacío. Estos aparatos se diseñan y emplean de acuerdo a la forma en que operarán y el grado de precisión exigido. Por ejemplo, se puede mover un material tomándolo directamente desde arriba, un costado, abajo, en el centro de gravedad de la pieza, etc., ejerciendo distintos esfuerzos en la pieza y en el robot. La pieza puede ser en extremo delicada, pequeña, o puede ser estable. También puede ser movido en forma indirecta, tomando una bandeja o pallet que contenga la pieza. Por otra parte, las herramientas que no tienen por objeto la manipulación y agarrar, son en su mayoría las destinadas a la soldadura por puntos y a la pintura con pistola. Otras aplicaciones incluyen otros tipos de soldado, sellado, quitar rebabas y múltiples trabajos menos comunes. Para ejecutar estas tareas los robots deben tener entre cinco y seis grados de libertad, para poder orientar correctamente la herramienta.

CAPÍTULO 8

DESCRIPCIONES ESPACIALES Y TRANSFORMACIONES

El estudio de la manipulación robótica lleva a tomar en cuenta la relación entre los objetos a manipular y la relación entre los objetos y el manipulador, para llevar a cabo satisfactoriamente con las tareas programadas. Para cumplir este cometido se necesita conocer perfectamente la posición y orientación (Figura 8.1) de todos los elementos que estén involucrados como herramientas, objetos a manipular, elementos del robot, entorno, entre otros. Por esta razón se procederá a explicar las herramientas matemáticas básicas necesarias para adquirir esta información y manipularla de una forma relativamente sencilla.

Las herramientas que se trataran no son exclusivas del campo de la robótica, siendo usadas usualmente en aeronáutica para el tratamiento de problemas de localización espacial. Dichas herramientas permitirán desarrollar métodos computacionales para el tratamiento de datos que permitirán posteriormente el análisis cinemático y dinámico necesarios para el control de los manipuladores. La primera parte consiste en las dis-

Figura 8.1: Parámetros a conocer para la localización de un elemento



Fuente: Autores de proyecto

tintas formas de representar posición y orientación de un cuerpo rígido y después los métodos que unen estos dos parámetros para formar una descripción espacial completa además de la forma de transformar la información de un método a otro.

8.1. REPRESENTACIÓN DE LA POSICIÓN

Para localizar un cuerpo en el espacio es necesario conocer su posición y orientación por esta razón se debe establecer un sistema de referencia en el cual se pueda especificar la relación que existe entre este y el cuerpo. El sistema de referencia más usado en la robótica y que se usara de aquí en adelante es el sistema cartesiano donde la posición se da con diferentes tipos de coordenadas donde se relacionan dos variables independientes para definir la ubicación de un cuerpo en un espacio 2D o tres en uno 3D. En la figura 8.2 se muestran los posibles sistemas de coordenadas usados.

El sistema cartesiano consiste en dos (X,Y) o tres ejes (X,Y,Z) perpendiculares entre sí que se cortan en un mismo punto al que se denomina origen (O) , por tanto dependiendo si se trata de la ubicación en un espacio 2D o 3D se tendrá el sistema ordenado OXY u $OXYZ$ respectivamente. Se dará una breve explicación de cada uno de ellos antes de proseguir con la representación de la orientación.

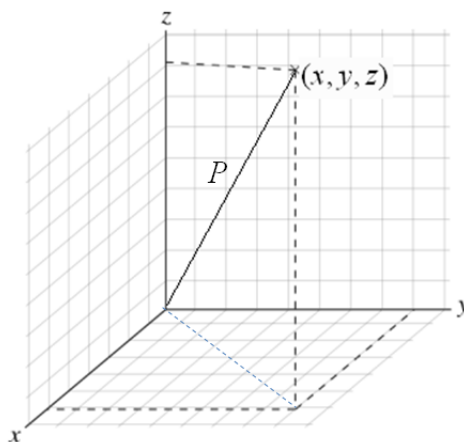
Figura 8.2: Tipos de coordenadas



Fuente: Autores de proyecto

- **Coordenadas cartesianas:** La ubicación de un punto a el cual está asociado a un vector P que empieza en el origen del sistema y termina en dicho punto y donde sus componentes, sean (x, y) o (x, y, z) , son las proyecciones de este vector con los ejes ordenados respectivos como se muestra en la figura 8.3.

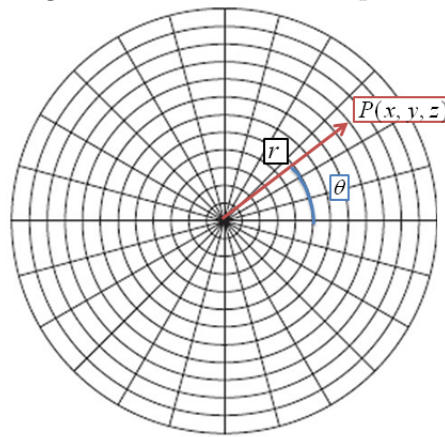
Figura 8.3: Coordenadas cartesianas



Fuente: Autores de proyecto

- **Coordenadas polares:** si se trabaja sobre un plano la posición de un punto o vector se puede dar mediante las coordenadas polares que consisten en dos variables r y θ , donde r representan la distancia del origen del sistema de referencia hasta el extremo del vector P y θ representa el ángulo que forma este vector con el eje ordenado OX . En la figura 8.4 se aprecia la representación de estas coordenadas.

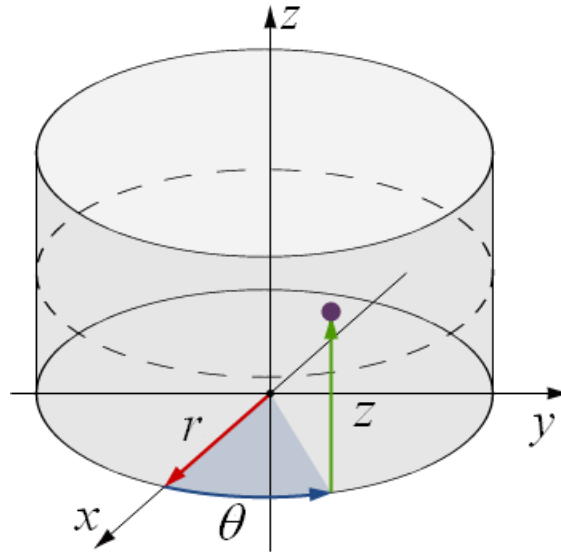
Figura 8.4: Coordenadas polares



Fuente: Autores de proyecto

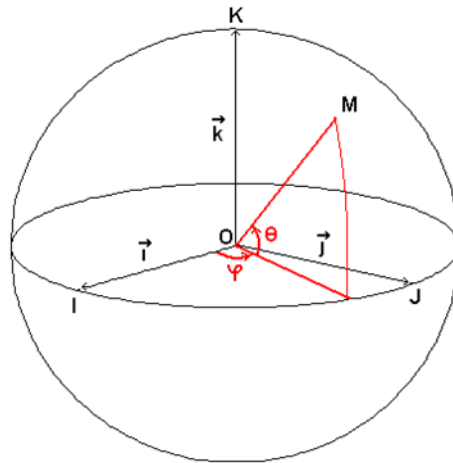
- **Coordenadas cilíndricas:** En un sistema tridimensional es usual usar las coordenadas cilíndricas que tienen el mismo razonamiento que las coordenadas polar en el plano OXY y donde la componente en Z es la componente del vector P sobre el eje OZ (figura 8.5).
- **Coordenadas esféricas:** al igual que con las coordenadas cartesianas y cilíndricas con las coordenadas esféricas (Figura 8.6) son usadas para realizar la localización de un vector o punto en el sistema de referencia cartesiano. En estas coordenadas se trabajan con tres variables r , θ y ϕ , manteniendo la misma definición de r y θ , que siguen siendo las coordenadas polares, y ϕ es el ángulo que forma el vector con el eje ordenado OZ .

Figura 8.5: Coordenadas cilíndricas



Fuente: Autores de proyecto

Figura 8.6: Coordenadas esféricas



Fuente: Autores de proyecto

8.2. REPRESENTACIÓN DE LA ORIENTACIÓN

Cuando se trata con sólidos o cuerpos rígidos en el espacio no basta solo con definir su posición sino también es necesario definir su orientación respecto a al sistema de referencia. En robótica este aspecto es esencial debido a que las tareas que realizará el manipulador son tareas de precisión donde la herramienta o pinza tendrá que orientarse en forma específica para obtener los resultados esperados. Esta rotación está estipulada por tres grados de libertad más, a parte de los tres grados de libertad usados para la representación de la posición, que describirán por completo un cuerpo rígido en el espacio. Para conocer esta orientación es habitual dotar al cuerpo rígido con su propio sistema ordenado, que es solidario a él, y después estudiar la relación espacial entre estos dos. Por lo general, esta relación está definida por la posición y orientación del sistema asociado con respecto al sistema de referencia. En esta primera parte se tendrá en cuenta la orientación haciendo coincidir el origen de ambos sistema y se describirán los métodos mostrados en la figura 8.7.

Figura 8.7: Formas de representar orientación



Fuente: Autores de proyecto

8.2.1. Matrices de rotación

El método más usado en robótica debido a su comodidad por tratarse de álgebra matricial. Se ilustra el punto de esta matriz con algunos ejemplos.

Si se tienen dos sistemas ordenados en el plano que coinciden en el origen OXY y OUV, siendo OXY el sistema de referencia fijo y OUV el sistema de referencia móvil solidario al objeto. Sus ejes ordenados tendrán sus vectores unitarios, i_x, j_y para el fijo y i_u, j_v para el móvil. Por tanto un vector P en este plano móvil estará dado por:

$$P = P_u i_u + P_v i_v \quad (8.1)$$

Donde también se puede expresar las componentes de este vector respecto al sistema de referencia fijo de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_x &= i_x \cdot P \\ P_y &= i_y \cdot P \end{aligned} \quad (8.2)$$

Al sustituir la ecuación 8.1 en el sistema de ecuaciones anterior se obtiene:

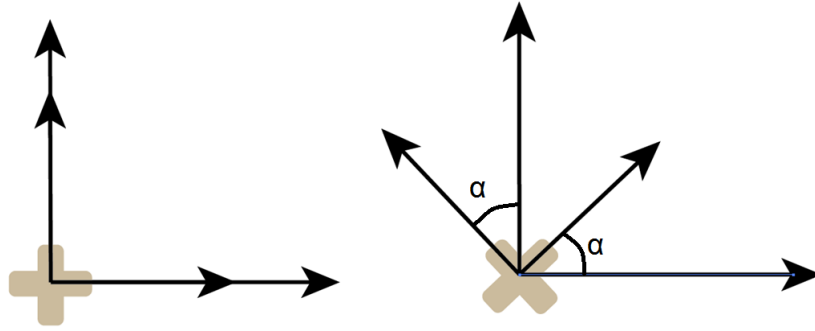
$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

Donde:

$$R = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v \\ j_y i_u & j_y j_v \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

R es la llamada matriz de rotación, que define la orientación del sistema de referencia móvil respecto al sistema de referencia fijo y sirve para transformar las coordenadas de un vector de un sistema a otro. También es llamada matriz de cosenos directores. Es fácil comprobar que se trata de una matriz ortogonal que cumple con $R^{-1} = R^T$. Cuando se trata de un caso en dos dimensiones esta matriz está definida por un único parámetro independiente. Si se considera la posición relativa de un sistema de referencia OUV girado un ángulo α (Figura 8.8) la matriz de rotación estaría dada por la siguiente

Figura 8.8: Rotación de un sistema móvil sobre un sistema fijo en 2D



Fuente: Autores de proyecto

igualdad:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \text{sen} \alpha \\ \text{sen} \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8.5)$$

Cuando $\alpha = 0$, R se iguala a la matriz identidad o unitaria.

Para un espacio tridimensional se sigue el mismo razonamiento. Suponiendo dos sistemas de referencia, uno fijo OXYZ y otro móvil OUVW, que coinciden en el origen y los vectores unitarios de estos sistemas de referencia son i_x, j_y, k_z , para OXYZ y i_u, j_v, k_w para OUVW. Un vector estaría definido en estos dos sistemas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_{uvw} &= [P_u, P_v, P_w]^T = P_u i_u + P_v j_v + P_w k_w \\ P_{xyz} &= [P_x, P_y, P_z]^T = P_x i_x + P_y j_y + P_z k_z \end{aligned} \quad (8.6)$$

Y al igual que en el caso de dos dimensiones se puede expresar las anteriores ecuaciones así:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

Donde:

$$R = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Esta matriz de rotación puede definirse simplemente como la proyección de cada vector unitario del sistema de referencia móvil sobre cada vector unitario del sistema fijo (Producto punto). Ya que cada vector unitario tendrá una componente en cada eje del otro sistema, es conveniente agruparlos en forma matricial, por esto se forma una matriz 3x3 la cual se ha denominado **matriz de rotación**. Con esta matriz se puede representar la orientación del sistema OUVW respecto al sistema OXYZ. También es llamada matriz de cosenos directores y es una matriz ortogonal por tanto la inversa será igual a su transpuesta $R^{-1} = R^T$.

Para estudiar más fácilmente las rotaciones en múltiples se empieza estableciendo el comportamiento de la matriz de rotación girando únicamente en uno de los ejes.

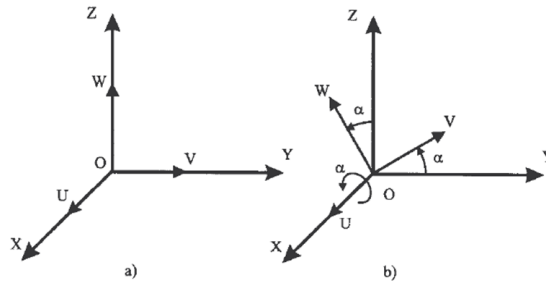
Si se tiene inicialmente los dos sistemas de referencia OXYZ y OUVW, y se gira sobre el eje coincidente OX y OU un ángulo α (figura 8.9), la matriz de rotación estará representada de la siguiente manera:

$$\text{Rotx}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\text{sen} \alpha \\ 0 & \text{sen} \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8.9)$$

Siguiendo el mismo procedimiento anterior se generan las matrices de rotación para cada eje ordenado, girando un ángulo ϕ en OY que coincide con OV (Figura 8.10 (a)) y un ángulo θ en el eje OZ que a su vez es coincidente con el eje OW (Figura 8.10(b)), estas matrices son: Estas tres matrices son conocidas como las matrices básicas de rotación para un sistema espacial de tres dimensiones.

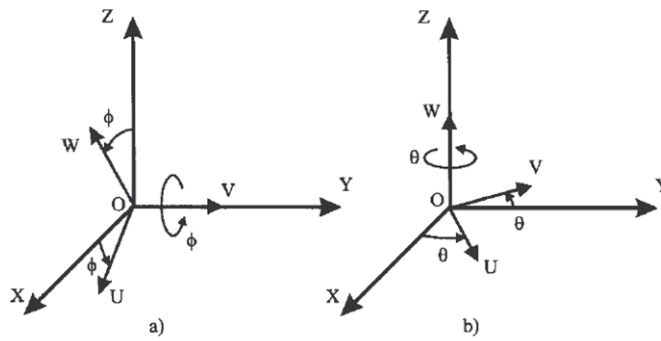
Dado el caso se puede expresar las rotaciones consecutivas en varios ejes ordenados como la multiplicación de las matrices básicas. Por tanto si se da una rotación de un

Figura 8.9: Rotación del sistema OUVW sobre el eje OX-OU del sistema OXYZ



Fuente: Autores de proyecto

Figura 8.10: Rotación de un sistema de referencia móvil sobre un eje de un sistema OXYZ



Fuente: Autores de proyecto

ángulo α , sobre el eje OX, después una con un ángulo ϕ en OY y finalmente una rotación de un ángulo θ en OZ, se puede expresar (Se cambió la representación del coseno por C y la del seno por S, para reducir el tamaño de la expresión) la rotación global de la siguiente forma:

$$T = \text{Rotz}(\theta)\text{Roty}(\phi)\text{Rotx}(\alpha) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} C\theta C\phi & -S\theta C\alpha + C\theta S\phi S\alpha & S\theta S\alpha + C\theta S\phi C\alpha \\ S\theta C\phi & C\theta C\alpha + S\theta S\phi S\alpha & -C\theta S\alpha + S\theta S\phi C\alpha \\ -S\phi & C\phi S\alpha & C\phi C\alpha \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

La cual depende del orden de las rotaciones a seguir, debido a que el producto de matrices no es conmutativo. En estos casos de giros las rotaciones están hechas respecto al sistema de referencia OXYZ.

8.2.2. Ángulos de Euler

Usados principalmente en aeronáutica, consiste en un método introducido por Leonhard Euler para describir la orientación de un sistema de referencia de ejes ortogonales solidario a un cuerpo rígido en movimiento, respecto a otro fijo. Consiste en tres ángulos ϕ , θ , ψ , que son los denominados ángulos de Euler, los cuales representan la rotación sobre tres ejes ortogonales, que definen la orientación del sistema móvil, OUVW, respecto al fijo. Según el orden con el que se hagan las rotaciones se obtendrá diferentes resultados, dando así 12 combinaciones posibles, las más usadas se muestran en la figura 8.11:

Figura 8.11: Combinaciones más usadas de ángulos de Euler



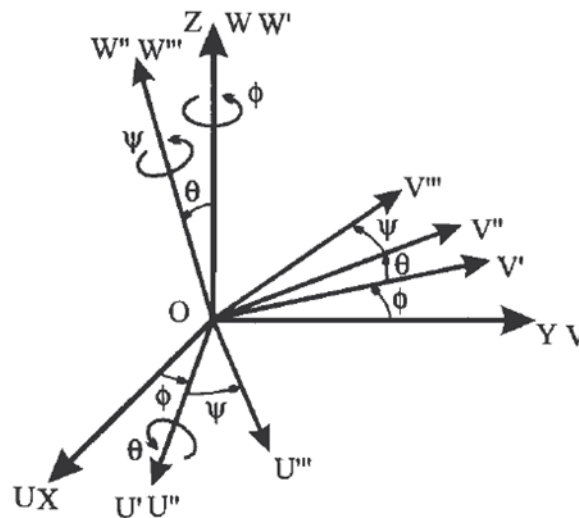
Fuente: Autores de proyecto

■ **Ángulos de Euler WUW**

En esta configuración se realizan giros sobre ejes antes girados. Inicialmente son coincidentes los ejes ordenados de los dos sistemas, OXYZ y OUVW, y se puede representar cualquier orientación siguientes pasos, es importante realizar estos giros en el orden especificado (figura 8.12).

- Se gira un ángulo ϕ al sistema de referencia OUVW respecto al eje OZ, coincidente con OW.
- Ahora se gira un ángulo θ al sistema OU'V'W' respecto al eje OU', convirtiéndose así en el sistema OU''V''W''.
- Ahora el nuevo sistema se gira un ángulo ψ en el eje OW'', llegando a la orientación final.

Figura 8.12: Ángulos de Euler WUW



Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

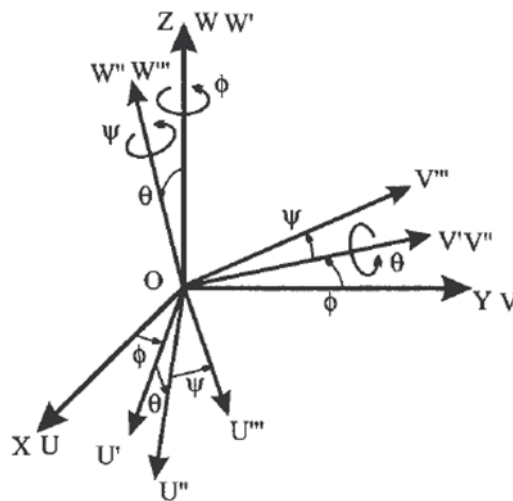
■ **Ángulos de Euler WVW**

Consiste básicamente en los mismos pasos explicados anteriormente, es otra con-

figuración usualmente usada.

- Se empieza con dos sistemas en una posición coincidente, se hace girar el sistema OUVW un ángulo ϕ respecto al eje OW.
- Seguidamente se gira al sistema OU'V'W' un ángulo θ sobre el eje OV'.
- Por último se gira un ángulo de ψ en torno al eje OW'' al sistema OU''V''W''.

Figura 8.13: Ángulos de Euler WWV



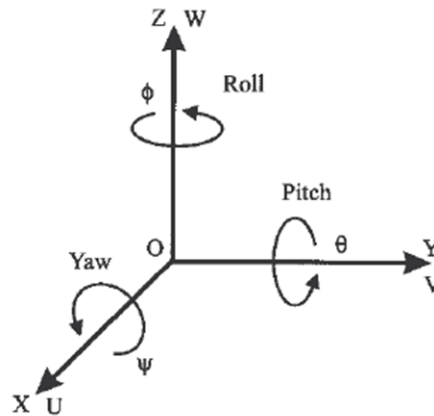
Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

■ Ángulos de Euler XYZ

A diferencia de las anteriores configuraciones de giro mostradas, esta configuración trabaja solo con ejes estáticos, los ejes ordenados del sistema fijo. Estos ángulos son generalmente usados en aeronáutica y son conocidos usualmente por guiñada, cabeceo y alabeo (Yaw, Pitch y Roll) el procedimiento sigue siendo el mismo que en las configuraciones anteriormente expuestas. Se empieza con un par de sistemas ortogonales OXYZ y OUVW coincidentes entre sí.

- Se gira al sistema OUVW un ángulo ϕ respecto al eje OX (conocido como Yaw o Guiñada).
- Se gira al sistema OUVW un ángulo θ respecto al eje OY (conocido como Pitch o Cabeceo).
- Se gira al sistema OUVW un ángulo ψ respecto al eje OZ (conocido como Roll o Alabeo).

Figura 8.14: Ángulos de Euler XYZ



Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

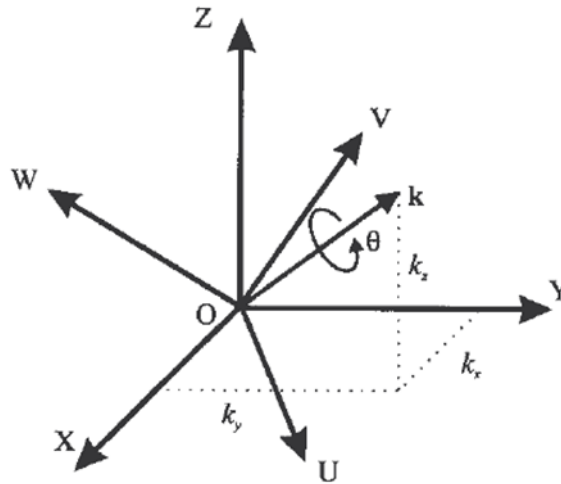
8.2.3. Par de rotación

Otra forma de representar la rotación de un sistema OUVW con respecto a un sistema de referencia OXYZ es mediante la definición de un vector k (k_x, k_y, k_z) y un ángulo θ , tal que el sistema OUVW corresponda al sistema OXYZ rotado un ángulo θ sobre el vector k , cuyo eje debe pasar por el origen de ambos sistemas como se muestra en la figura XX. Este par (k, θ) único es denominado par de rotación. Dicho método no permite realizar una visualización sencilla de la orientación, salvo en casos muy concretos en los que el vector k coincida con uno de los ejes coordenados del sistema OXYZ. El par de rotación correspondiente a la rotación de un ángulo θ sobre el eje de un vector k se representa por

$\mathbf{Rot}(k, \theta)$ y para definirlo es necesario definir cuatro parámetros distintos: (k_x, k_y, k_z, θ)
 La rotación de un vector \mathbf{P} un Angulo θ alrededor de un vector unitario k (figura hhhh)
 se realiza a través de la siguiente expresión:

$$\mathbf{Rot}(k, \theta) p = p \cos \theta + (k \times p) \text{sen} \theta + k (k \cdot p) (1 - \cos \theta) \quad (8.11)$$

Figura 8.15: Representación de la rotación de un sistema mediante par de rotación



Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

8.2.4. Cuaternios

Los cuaternios son otro método de representación de orientación y rotación bastante útil para aplicaciones computacionales ya que por sus propiedades, su consumo de recursos electrónicos es más económico que con otros métodos.

Definición Los cuaternios fueron definidos el irlandés William Rowan Hamilton (1805-1865), como una extensión de los números imaginarios. Los cuaternios se definen como un conjunto de números de la forma:

$$H = \{q_0e + q_1i + q_2j + q_3k : q_0, q_1, q_2, q_3 \in R\} \quad (8.12)$$

En donde i, j, k son tales que $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ Estos conjuntos de números tienen diversas aplicaciones, en especial en campos como la física, geometría, aviación, robótica entre muchas otras. La aplicación en robótica de estos números no es muy popular, aunque tiene una gran versatilidad al momento de realizar procedimientos computacionales.

Como ya se dijo, los cuaternios están constituidos por 4 componentes (q_0, q_1, q_2, q_3) que representan las coordenadas del cuaternio en las bases $[e, i, j, k]$ Normalmente a la componente en e (q_0) se le denomina parte escalar (s), mientras que a las componentes restantes, es decir en i, j, k , se les denomina parte vectorial (v) de modo que se puede representar como:

$$Q = q_0e + q_1i + q_2j + q_3k = [q_0, q_1, q_2, q_3] = (s, v) \quad (8.13)$$

Si se realiza un giro θ sobre un vector K , se puede definir un cuaternio para la representación de la orientación de la forma

$$Q = Rot(K, \theta) = \left(\cos \frac{\theta}{2}, k \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \right) \quad (8.14)$$

De esta consideración y gracias a las propiedades de los cuaternios se obtiene una importante herramienta analítica para el **giro y cambio de orientación**.

Algebra de cuaternios

- **producto**

Se define una ley de composición interna \circ (producto) para cada componente de los cuaternios la cual se muestra en la tabla 8.1. A continuación se describen algunas propiedades de los cuaternios, necesarias para la implementación de la representación de la orientación por este método.

Cuadro 8.1: Ley de composición interna de los cuaternios

\circ	e	i	j	k
e	e	i	j	k
i	i	$-e$	k	$-j$
j	j	$-k$	$-e$	i
k	k	j	$-i$	$-e$

Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

■ **Cuaternio conjugado**

A todo cuaternio Q se puede asociar el cuaternio conjugado Q^* , el cual se obtiene al mantener el signo de la parte escalar de Q y multiplicar por -1 el vector asociado al cuaternio, por tanto:

$$Q^* = q_0e - q_0i - q_0j - q_0k = [q_0, -q_1, -q_2, -q_3] = (s, -v) \quad (8.15)$$

■ **Operaciones algebraicas** Con los cuaternios se pueden realizar 3 operaciones algebraicas básicas: producto, suma y producto por un escalar.

El producto de cuaternios es una operación muy útil para la composición de transformaciones y viene dado por la expresión:

$$Q_3 = Q_1 \circ Q_2 = (s_1, v_1) \circ (s_2, v_2) = (s_1s_2 - v_1v_2, v_1 \times v_2 + s_1v_2 + s_2v_1) \quad (8.16)$$

Si se expresa componente a componente:

$$\begin{aligned} q_{30} &= q_{10}q_{20} - (q_{11}q_{21} + q_{12}q_{22} + q_{13}q_{23}) \\ q_{31} &= q_{10}q_{21} + q_{11}q_{20} + q_{12}q_{23} - q_{13}q_{22} \\ q_{32} &= q_{10}q_{22} + q_{12}q_{20} + q_{13}q_{21} - q_{11}q_{23} \\ q_{33} &= q_{10}q_{23} + q_{13}q_{20} + q_{11}q_{22} - q_{12}q_{21} \end{aligned} \quad (8.17)$$

De las expresiones anteriores se puede decir que la multiplicación de cuaternios no es conmutativa y por tanto:

$$Q_1 \circ Q_2 \neq Q_2 \circ Q_1 \quad (8.18)$$

La suma de dos cuaternios se define como:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = (s_1, v_1) + (s_2, v_2) = Q_3 = Q_1 \circ Q_2 = (s_1 + s_2, v_1 + v_2) \quad (8.19)$$

El producto de un cuaternio por un escalar es:

$$Q_3 = aQ_2 = a(s_2, v_2) = (as_2, av_2) \quad (8.20)$$

El producto de cuaternios es asociativo.

■ **Norma e inverso**

Se le denomina norma de Q a la cantidad real $(Q_0^2 + Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2)$ y se denota

$$\|Q\|$$

. Se deduce que el producto de un cuaternio por su conjugada es equivalente a su norma y se encuentra en la base real, es decir:

$$Q \circ Q^* = (Q_0^2 + Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2) = \|Q\| e \quad (8.21)$$

Y se cumple que el producto de las normas de cuaternios es igual a la norma del producto, es decir:

$$\|Q_1 \circ Q_2\| = \|Q_1\| \cdot \|Q_2\| \quad (8.22)$$

Por tanto, el Inverso de un cuaternio no nulo está dado por la expresión

$$Q^{-1} = \frac{Q^*}{\|Q\|} \quad (8.23)$$

Evidentemente $Q \circ Q^{-1} = Q^{-1} \circ Q = (1, 0, 0, 0) = e$ y $\|Q^{-1}\| = \frac{1}{\|Q\|}$

Uso de los cuaternios

Como ya se dijo, el cuaternio Q que representa un giro de valor θ sobre un eje k está dado por la expresión:

$$Q = Rot(k, \theta) = \left(\cos \frac{\theta}{2}, k \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \right) \quad (8.24)$$

La aplicación de la rotación de un vector r , descrita por un cuaternio Q vendrá definida por el producto

$$(0, r') = Q \circ (0, r) \circ Q^* \quad (8.25)$$

La composición de rotaciones con cuaternios es tan sencilla como multiplicar consecutivamente los cuaternios que representan las rotaciones aisladas, es decir, el resultado de rotar según el cuaternio Q_1 para posteriormente rotar según el cuaternio Q_2 , es el mismo que el de rotar un cuaternio Q_3 obtenido por la expresión:

$$Q_3 = Q_2 \circ Q_1 \quad (8.26)$$

Es importante mantener el orden de la multiplicación ya que, como fue mencionado anteriormente, la multiplicación de cuaternios no es conmutativa.

En el caso de adicionarle el efecto de traslación se procede de la siguiente manera: El resultado de aplicar una traslación de vector \mathbf{p} seguida de una rotación Q al sistema OXYZ, es un nuevo sistema OUVW, tal que las coordenadas de un vector \mathbf{r} en el sistema OXYZ, conocidas en OUVW, serán:

$$(0, r_{xyz}) = Q^\circ (0, r_{uvw})^\circ Q^* + (0, p) \quad (8.27)$$

Donde Q y p están definidos con respecto a los sistemas de referencia móviles. El resultado de primero rotar y luego trasladar al sistema vendrá dado por:

$$(0, r_{xyz}) = Q \circ (0, r_{uvw} + p) \circ Q^* \quad (8.28)$$

Donde p y Q están definidos con respecto a los sistemas de referencia móviles. Si se mantiene el sistema OXYZ fijo y se traslada el vector \mathbf{r} según \mathbf{p} y luego se rota según Q se obtendrá el vector r' de coordenadas:

$$(0, r') = Q^\circ (0, r + p)^\circ Q^* \quad (8.29)$$

Y si se aplica primero el giro y luego la traslación p al vector r , éste se convertirá en el r' a través de la expresión:

$$(0, r') = Q (0, r)^\circ Q^* + (0, p) \quad (8.30)$$

Se evidencia la practicidad computacional del empleo de los cuaternios al ser un método en que basta multiplicar cuaternios entre sí, lo cual se reduce al simple uso de productos y sumas. Además, su principal ventaja, pueden representar las rotaciones mediante 4 elementos, frente a los 9 utilizados en las matrices de rotación.

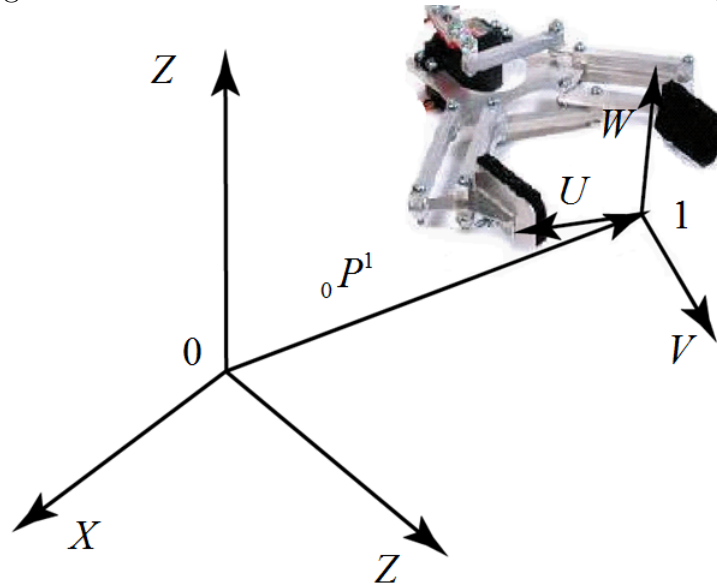
8.3. MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA

Los métodos anteriormente mencionados dan representación de la posición u orientación solamente, mientras que la matriz de transformación homogénea permite hacer una representación conjunta de ellas, por ejemplo en el sistema mostrado en la figura 8.16 un sistema móvil 1 se representa en el sistema de referencia fijo 0. Esta matriz es una herramienta (operador) que permite pasar un vector, o punto, de un sistema de

referencia a otro. Consiste en una matriz 4x4 que contiene la información de la orientación y posición del sistema de referencia en el cual está definido. En robótica cada articulación tiene ligada un sistema de referencia, esta herramienta es particularmente útil para llevar a cabo todos los cálculos necesarios para la planeación y control del movimiento del robot.

Coordenadas y matrices homogéneas

Figura 8.16: Uso de la matriz de transformación homogénea



Fuente: Autores del proyecto

Para representar la posición y la orientación de forma sencilla y conjunta se recurre a las coordenadas homogéneas, donde un vector n-dimensional estará definido por n+1 dimensiones. En el caso de un vector P de tres dimensiones $ai+bj+ck$, en coordenadas homogéneas tendrá un nuevo parámetro w el cual es un factor de escala y posee un valor arbitrario, en estas coordenadas será representado de la siguiente forma:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.31)$$

Si se toma el vector $n = 5i + 9j - 2k$, su representación sería:

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} 5 \\ 9 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 18 \\ -4 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 \\ 45 \\ -10 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (8.32)$$

Todos estos resultados son representaciones del mismo vector. Si se quiere representar un vector nulo sería $[0, 0, 0, n]^T$, donde n es un valor no nulo, si este es nulo sería para representar direcciones, pues representa vectores de longitud infinita.

Esta matriz está formada por cuatro submatrices que se distribuyen de la siguiente manera:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{P}_{3 \times 1} \\ \mathbf{f}_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rotacin & Traslacin \\ Perspectiva & Escalado \end{bmatrix} \quad (8.33)$$

Donde la matriz $R_{3 \times 3}$ representa la matriz de rotación, $P_{3 \times 1}$ es el vector de traslación, la submatriz $f_{1 \times 3}$ es una transformación de perspectiva y por último la submatriz $w_{1 \times 1}$. Generalmente solo es importante en robótica las matrices \mathbf{R} y \mathbf{P} siendo la matriz \mathbf{f} nula y el valor de \mathbf{w} igual a la unidad. Hay casos donde toman valores diferentes pero su uso es específico para otros campos. Las operaciones que se realizarán con esta matriz requiere que los vectores sobre los que se vaya a usar tengan 4 dimensiones también, las coordenadas homogéneas del vector.

1. Representar un sistema de referencia rotado y trasladado O'UVW respecto a un sistema de referencia OXYZ

2. Transformar un vector definido respecto a un sistema de referencia O'UVW a sus componentes en un sistema de referencia OXYZ
3. Rotar y trasladar vectores definidos respecto a un sistema de referencia OXYZ.

8.3.1. Traslación

Cuando se tiene una matriz de transformación homogénea de solo traslación, tomando como se dijo anteriormente los valores de las submatrices \mathbf{f} y \mathbf{W} como nula y la unidad respectivamente y el valor de \mathbf{R} como la matriz identidad, estará definida únicamente por el vector de traslación \mathbf{P} expresándose de la siguiente manera:

$$T(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.34)$$

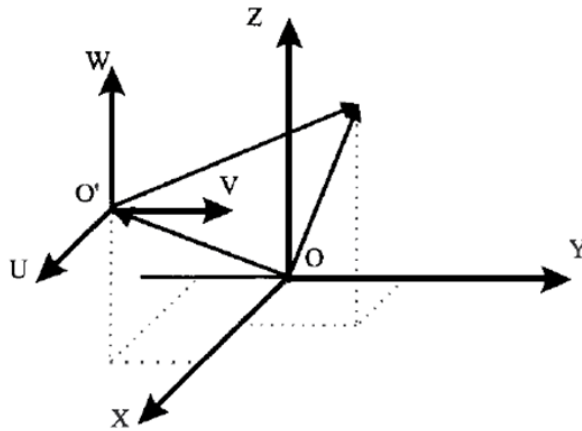
Usándola para transformar las coordenadas de un vector \mathbf{r} definido con respecto a un sistema ordenado O'UVW, solamente traslado respecto al sistema de referencia fijo OXYZ, en sus componentes en OXYZ.

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_u + P_x \\ r_v + P_y \\ r_w + P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.35)$$

Y por ultimo usándola para trasladar un vector \mathbf{r} definido respecto a un sistema de referencia fijo y convirtiéndolo en un nuevo vector \mathbf{r}' (figura 8.17).

$$\begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x + P_x \\ r_y + P_y \\ r_z + P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.36)$$

Figura 8.17: Sistema O'UVW representado en el sistema OXYZ



Fuente: Robotica.Craig,John J.2006.

8.3.2. Rotación

La matriz de transformación homogénea de solo rotación en alguno de los ejes principales de un sistema de referencia fijo OXYZ para describir la orientación de un sistema OX'Y'Z', usando como base las matrices de rotación mostradas anteriormente para este fin, serían:

$$\text{Rotx}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\text{sen} \alpha & 0 \\ 0 & \text{sen} \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.37)$$

$$\text{Roty}(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \text{sen} \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen} \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.38)$$

$$\text{Rotz}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\text{sen} \psi & 0 & 0 \\ \text{sen} \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.39)$$

También se puede definir un vector r , originalmente definido respecto a un sistema de referencia OUVW girado, en el sistema de referencia fijo, usando la matriz de transformación, de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.40)$$

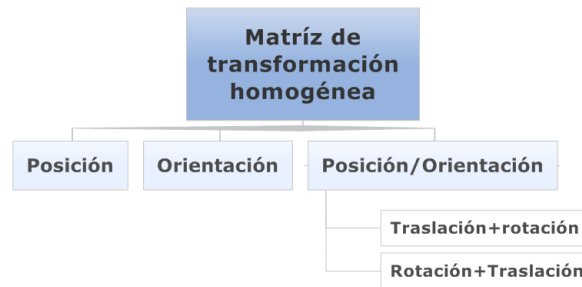
O rotar un vector r definido inicialmente en el sistema de referencia OXYZ para convertirlo en un vector r'

$$\begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.41)$$

8.3.3. Rotación y traslación conjuntamente

Una de las grandes ventajas de la matriz de transformación homogénea es trabajar conjuntamente la traslación y la rotación en una misma matriz, para esto que matriz de transformada estará formada por la matriz de rotación $R_{3 \times 3}$ y el vector de traslación $P_{3 \times 1}$ y por tanto podrá realizar representaciones de posición, orientación y una representación conjunta como muestra la figura 8.18. Debido a que la multiplicación de matrices no es conmutativa es necesario definir la secuencia de las traslaciones, rotación luego traslación o viceversa, se tomarán a consideración cada uno de estos casos para mostrar la importancia de este orden.

Figura 8.18: Representaciones de la matriz de transformación homogénea



Fuente: Autores de proyecto

■ Rotación seguida de traslación

Suponiendo que dos sistemas de referencia que coincidentes, $OXYZ$ y $OUVW$, y se realiza una rotación un ángulo ϕ sobre el eje OX y después se traslada este nuevo sistema de referencia rotado, $OU'V'W'$, por medio de un vector $P_{x,y,z}$ (figura 8.19), la matriz transformada quedaría expresada de la siguiente forma:

$$T = T(p)Rotx(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & \cos \phi & -\text{sen}\phi & P_y \\ 0 & \text{sen}\phi & \cos \phi & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.42)$$

Como se puede notar, es solamente agregar el vector P a la matriz de rotación sobre el eje OX de la que antes ya se había obtenido una expresión, siguiendo este razonamiento se puede concluir que la rotación de un ángulo θ sobre el eje OY con su respectiva traslación del vector P al igual con la rotación sobre el eje OZ de un ángulo ψ con esta misma traslación quedaran expresadas de la siguiente manera:

$$T = T(p)Roty(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen}\theta & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos \theta & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.43)$$

$$T = T(p)Rotz(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\text{sen}\psi & 0 & P_x \\ \text{sen}\psi & \cos \psi & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.44)$$

- **Traslación seguida de rotación**

Al igual que el desarrollo del anterior caso, se quiere obtener una expresión de la matriz de transformación homogénea cuando se realiza una traslación y después una rotación. Usando las matrices de rotación básicas se obtienen las siguientes expresiones para rotaciones de ángulos ϕ , θ , ψ en los ejes OX, OY, OZ respecti-

vamente.

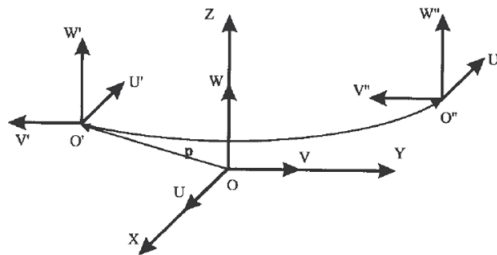
$$\begin{aligned}
 T = Rotx(\phi)T(p) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\text{sen} \phi & 0 \\ 0 & \text{sen} \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & \cos \phi & -\text{sen} \phi & P_y \cos \phi - P_z \text{sen} \phi \\ 0 & \text{sen} \phi & \cos \phi & P_y \text{sen} \phi + P_z \cos \phi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.45)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T = Roty(\theta)T(p) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen} \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen} \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen} \theta & P_x \cos \theta + P_z \text{sen} \theta \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ -\text{sen} \theta & 0 & \cos \theta & P_z \cos \theta - P_y \text{sen} \theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.46)
 \end{aligned}$$

$$T = T(p)Rotz(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\text{sen} \psi & 0 & 0 \\ \text{sen} \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\operatorname{sen} \psi & 0 & P_x \cos \psi - P_y \operatorname{sen} \psi \\ \operatorname{sen} \psi & \cos \psi & 0 & P_x \operatorname{sen} \psi + P_y \cos \psi \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.47)$$

Figura 8.19: Traslación seguida de rotación



Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

8.3.4. Significado geométrico de las matrices homogéneas

La matriz de transformación homogénea también suele expresarse de la siguiente manera:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.48)$$

Donde n , o , a representa la orientación y P es un vector que representa la posición. En la siguiente expresión se puede apreciar la forma de pasar un vector definido en un sistema de referencia OUVW a otro sistema de referencia OXYZ

$$r_{xyz} = \begin{bmatrix} n & o & a & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.49)$$

Si se supone que el vector r_{uvw} es igual a $[0, 0, 0, 1]^T$, se ubica el origen del sistema de referencia OUVW y la anterior ecuación queda:

$$r_{xyz} = \begin{bmatrix} n & o & a & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.50)$$

Siguiendo con estos supuestos usando vectores como $[1, 0, 0, 1]^T$, $[0, 1, 0, 1]^T$, $[0, 0, 1, 1]^T$, se observa que las columnas **n o a** representan la dirección de los ejes ordenados OU OV OW en el sistema de referencia OXYZ. Como se había mencionado antes la matriz **n o a** es una matriz ortogonal, y los vectores n, o y a forman una terna ortogonal, por tanto se cumple que:

$$\| n \| = \| o \| = \| a \| = 1 \quad (8.51)$$

$$n \times o = a \quad (8.52)$$

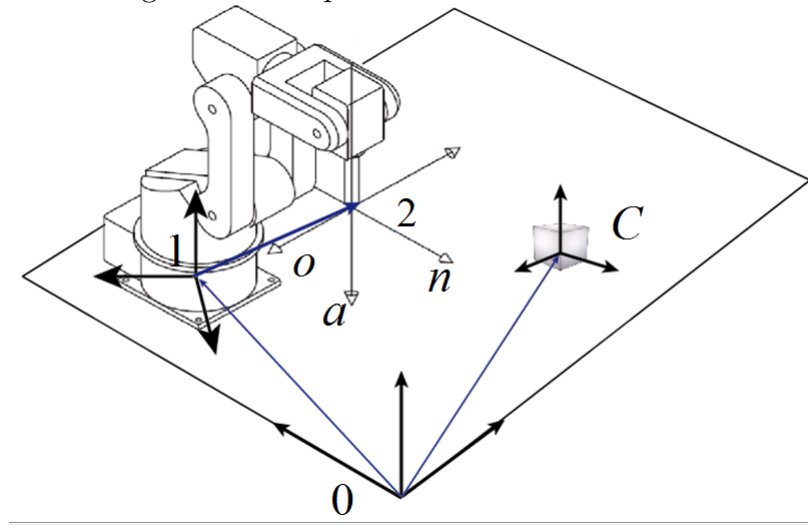
$$[noa]^{-1} = [noa]^T \quad (8.53)$$

Haciendo sencillo el cálculo de la matriz inversa T^{-1} que está dada por la siguiente expresión

$$T = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & -n^T P \\ o_x & o_y & o_z & -o^T P \\ a_x & a_y & a_z & -a^T P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.54)$$

El objetivo principal de esta matriz homogénea, aplicándola al campo de la robótica, es conocer la descripción (posición y orientación) del extremo de un robot, donde se toma un sistema de referencia móvil, con respecto a su base, donde está ubicado un sistema de referencia fijo. El sistema de referencia móvil está dado por los ejes n o a , donde el eje a será un eje de aproximación del extremo del robot a la pieza de trabajo, el eje o está definido por la pinza o herramienta en el extremo del robot y por último el eje n que se ubica de tal forma que se forme la terna ortogonal con los dos anteriores (figura 8.20).

Figura 8.20: Representación de la matriz noa



Fuente: Autores de proyecto

8.3.5. Matriz homogénea para múltiples giros y traslaciones

Cuando se trabajan rotaciones y traslaciones, de un sistema ordenado, una forma sencilla de trabajarlas conjuntamente es con la matriz de transformación homogénea, hasta ahora solo se han tomado casos de una traslación y una rotación. Cuando se tienen múltiples giros y traslaciones se puede encontrar esta matriz de transformación homogénea haciendo el producto consecutivo de las matrices básicas de rotación y traslación en el orden correcto en que fueron realizadas, esto es lo que se llama composición de matrices de transformación homogénea.

Un ejemplo sencillo sería encontrar la matriz de transformación cuando se realizan los tres giros básicos, giro de un ángulo ϕ sobre el eje OX, giro de un ángulo θ sobre el eje OY y por ultimo un giro de ψ sobre el eje OZ, para este caso la matriz de transformación homogénea sería:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\text{sen}\psi & 0 & 0 \\ \text{sen}\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\text{sen}\phi & 0 \\ 0 & \text{sen}\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.55)$$

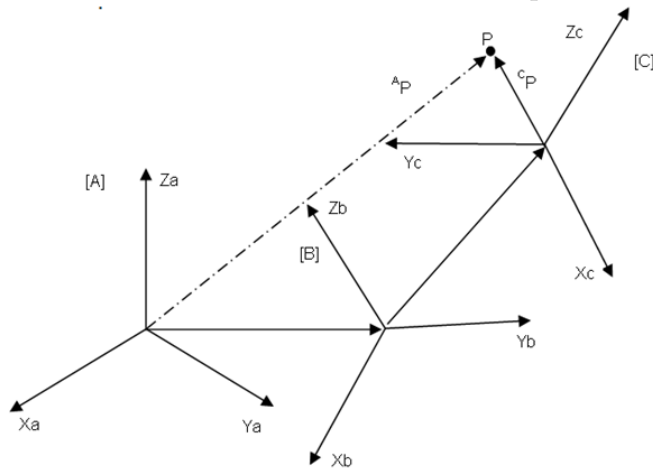
$$T = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\text{sen}\theta\text{sen}\phi - \cos\phi\text{sen}\psi & \text{sen}\psi\text{sen}\phi + \cos\psi\cos\phi\text{sen}\theta & 0 \\ \cos\theta\text{sen}\psi & \cos\psi\cos\phi + \text{sen}\psi\text{sen}\theta\text{sen}\phi & \cos\phi\text{sen}\psi\text{sen}\theta - \cos\psi\text{sen}\phi & 0 \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta\text{sen}\phi & \cos\theta\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.56)$$

En este caso esta matriz de transformación orienta un sistema de referencia partiendo del sistema de referencia fijo OXYZ, también se presentara el caso en el que se tiene que pasar de un sistema de referencia en movimiento al sistema de referencia fijo, para este caso la matriz de transformación se obtiene multiplicando en orden inverso al ejemplo anterior. Por tanto se puede representar rotaciones y traslaciones respecto al sistema

fijo o móvil solo cambiando el orden de las multiplicaciones sucesivas de las matrices básicas.

La composición de matrices homogéneas no solo sirve para estos casos donde se trabaja con las matrices básicas, en algunas ocasiones se presentara que la posición de un objeto o sistema de referencia está asociado a diversos sistemas de referencia (como se aprecia en la figura 8.21), por esta razón pueden existir diversas formas de obtener la descripción de la posición, tomando diversos caminos.

Figura 8.21: Sistemas de referencia asociado a múltiples sistemas de referencia.



Fuente: Autores de proyecto

8.4. NOMENCLATURA

Debido a la cantidad de sistemas de referencia que se usan en los cálculos de un manipulador robótico, se usa una nomenclatura particular para evitar confusiones. Cada sistema de coordenadas tiene un nombre, ya sea A, B, C, D, etc o 0, 1, 2, 3, 4 y así sucesivamente.

Cada vector estará denotado con un superíndice que dirá en que sistema de referencia

está definido.

Las matrices de rotación al igual que las matrices de transformación homogénea contarán con un subíndice y un superíndice de la siguiente forma ${}^i A_{i+1}$ que indica que es una matriz de transformación del sistema de coordenadas $i + 1$ respecto al sistema de coordenadas i .

De esta forma en si se quiere la una composición de matrices transformadas o de rotación se escribe de la siguiente forma:

$${}^0 T_5 = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 {}^4 T_5 \quad (8.57)$$

$${}^0 R_5 = {}^0 R_1 {}^1 R_2 {}^2 R_3 {}^3 R_4 {}^4 R_5 \quad (8.58)$$

8.5. RELACIÓN Y COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL

Los métodos antes descritos poseen diversas características y se hace necesario aclararlas y compararlas para esclarecer criterios de selección del método, ya que dependiendo de su uso será más adecuado la implementación de un método que otro.

- **Comparación de métodos de descripción espacial**

Dependiendo de la utilización del método estos se pueden comparar según los siguientes criterios.

1. Capacidad de representación agrupando posición y orientación.

Cuadro 8.2: Comparación entre los diferentes métodos de representación espacial.

CONFIGURACIÓN ESPACIAL	VENTAJA	DESVENTAJA	NOTA
Matrices de transformación homogénea	Representación conjunta de posición y orientación	Dificultad en aplicaciones computacionales	Método más utilizado por usar álgebra tradicional
	Facilidad con la que se puede realizar la composición de transformaciones.	Alto nivel de redundancia (necesita definir 12 componentes para solo 6 grados de libertad)	
	Sencillez al aplicar una transformación sobre un vector determinado a un sistema fijo		
Ángulos de Euler	Permiten una notación reducida (solo tres números reales)	Solo son capaces de representar orientación	Existe la posibilidad de 12 conjuntos distintos de ángulos de Euler, respecto a la secuencia de posibles rotaciones elementales
		La expresión de composición de rotaciones es compleja, esto limita su uso práctico en algunas aplicaciones	
Par de rotación	Es compacto (Solamente usa 4 parámetros para la descripción de orientación de un sistema con respecto a otro)	Solo se ocupa en la representación de orientaciones	Se puede aplicar para la rotación de un vector r un ángulo θ alrededor del eje k
		La expresión de composición de rotaciones es compleja, esto limita su uso práctico en algunas aplicaciones	
Cuaternios	Es posible componer rotaciones junto con traslaciones de forma simple y computacionalmente económica	Sus aplicaciones son muy limitadas	Es idónea para representar la orientación relativa de un sistema $O'UVW$ con respecto a otro, a través del uso de cuatro componentes

Fuente: Autores de proyecto

2. Interpretar la posición y orientación de un sistema que se rota y traslada en $O'UVW$ en relación a un sistema fijo de referencia $OXYZ$.
3. Expresar de un vector en coordenadas $O'UVW$ a las coordenadas del sistema de referencia $OXYZ$.
4. Rotación y traslación de un vector correspondiente a un sistema de referencia.

en la tabla 8.2, que muestra, se sintetizan los aspectos antes mencionados en ventajas, desventajas y notas extras.

8.5.1. Ángulos de euler: Matriz de transformación homogénea.

Como los ángulo de euler solo pueden representar la orientación, una matriz homogénea correspondiente solo tendrá definida la matriz de rotación R_{3x3} .

Para el paso de un sistema representado con ángulos de euler a el mismo representado con una matriz de transformación homogénea, basta con componer las matrices que representan los propios ángulos, por tanto para las diferentes configuraciones de ángulos de euler existirá una relación diferente.

Sistema ZXZ

como ya se mencionó, la matriz de transformación homogénea correspondiente a esta configuración viene dada por la siguiente expresión.

$$T_{ZXZ} = T(z, \phi)T(u, \theta)T(w, \psi) \quad (8.59)$$

en forma matricial es:

$$\begin{aligned} T_{ZXZ} &= \begin{pmatrix} C\phi & -S\phi & 0 & 0 \\ S\phi & C\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta & 0 \\ 0 & S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C\psi & -S\psi & 0 & 0 \\ S\psi & C\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} C\phi C\psi - S\phi C\theta S\psi & -C\phi S\psi - S\phi C\theta C\psi & S\phi S\theta & 0 \\ S\phi C\psi - C\phi C\theta S\psi & -S\phi S\psi + C\phi C\theta C\psi & -C\phi S\theta & 0 \\ S\theta S\psi & S\phi C\psi & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.60) \end{aligned}$$

De igual manera el paso del sistema girado mediante ángulos de euler a una matriz de transformación homogénea esta dado por:

$$T_{YZZ} = T(z, \phi)T(v, \theta)T(w, \psi) \quad (8.61)$$

Matricialmente

$$T_{ZYZ} = \begin{pmatrix} C\phi C\theta C\psi - S\phi S\psi & -C\phi C\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta & 0 \\ S\phi C\phi C\psi + C\phi S\psi & -S\phi C\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta & 0 \\ -S\theta S\psi & S\theta C\psi & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.62)$$

Para ángulos de Euler correspondientes a la configuración XYZ (Roll-Pitch-Yaw) se presenta la siguiente relación para su paso a la forma de matriz de transformada homogénea.

$$T_{XYZ} = T(z, \phi)T(y, \theta)T(x, \psi) \quad (8.63)$$

Y en forma matricial

$$\begin{aligned} T_{XYZ} &= \begin{pmatrix} C\phi & -S\phi & 0 & 0 \\ S\phi & C\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C\theta & 0 & S\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\psi & -S\psi & 0 \\ 0 & S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta S\psi + S\phi C\psi & 0 \\ S\phi C\phi C\psi + C\phi S\psi & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta S\psi - C\phi C\psi & 0 \\ -S\theta & S\theta C\psi & C\theta C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.64) \end{aligned}$$

Para la paso de forma inversa de se necesita resolver una serie de ecuaciones trigonométricas, lo cual no resulta un método sencillo.

8.5.2. Par de rotación: matriz de transformación homogénea

El par de rotación es otro método que únicamente permite representar la orientación y por lo tanto, al igual que con los ángulos de Euler, solo se podrá definir la matriz de

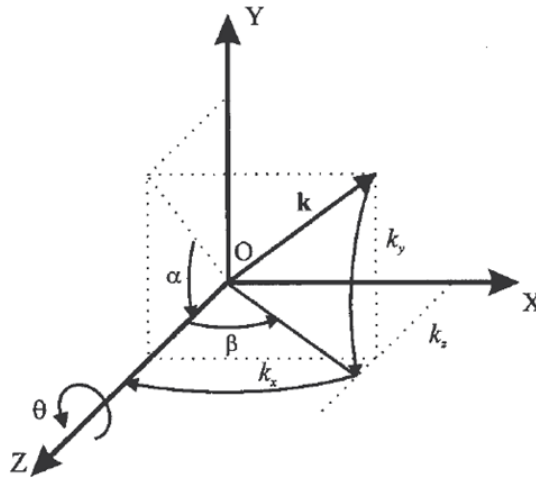
rotación R_{3x3} .

Si el objetivo es pasar un par de rotación, que representa la orientación de un sistema, a una matriz de transformación homogénea, se debe descomponer el giro de un ángulo θ alrededor de un eje $k(k_x, k_y, k_z)$ en la composición de rotaciones básicas que se puedan expresar mediante matrices básicas de rotación. Lo cual se consigue realizando una serie de rotaciones para alinear k con uno de los ejes coordenados, por ejemplo el eje OZ, girar un ángulo θ con respecto a él y deshacer las rotaciones previas hasta tener el vector k en su posición inicial, como se muestra en la figura 8.22, la descomposición es la siguiente:

$$T(k, \theta) = T(x, -\alpha)T(y, \beta)T(z, \theta)T(y, -\beta)T(x, \alpha) \quad (8.65)$$

Y sabiendo que

Figura 8.22: Descomposición par de rotación: matriz de transformación homogénea



Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

$$\begin{aligned} \text{sen} \alpha &= \frac{k_y}{\sqrt{k_y^2 + k_z^2}} \\ \text{sen} \beta &= k_x \end{aligned}$$

$$\cos \alpha = \frac{k_z}{\sqrt{k_y^2 + k_z^2}}$$

$$\cos \beta = \sqrt{k_y^2 + k_z^2}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene la expresión para pasar de un par de rotación a una matriz de transformada homogénea.

$$T(k, \theta) = \begin{pmatrix} k_x^2(1 - C\theta) + C\theta & k_x k_y(1 - C\theta) - k_z S\theta & k_x k_z(1 - C\theta) + k_y S\theta & 0 \\ k_x k_y(1 - C\theta) + k_z S\theta & k_y^2(1 - C\theta) + C\theta & k_y k_z(1 - C\theta) - k_x S\theta & 0 \\ k_x k_z(1 - C\theta) - k_y S\theta & k_y k_z(1 - C\theta) + k_x S\theta & k_z^2(1 - C\theta) + C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.66)$$

Por otro lado, si el objetivo es obtener un eje k y un ángulo θ de rotación equivalentes a una matriz de transformada homogénea dada tal que:

$$Rot = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & 0 \\ n_y & o_y & a_y & 0 \\ n_z & o_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.67)$$

La cual se puede igualar, componente a componente con la expresión 8.66 y considerando el ángulo θ entre 0° y 180° , se obtienen las siguientes relaciones:

$$tg\theta = \frac{\sqrt{(o_z - a_y)^2 + (o_x - n_z)^2 + (n_y - o_x)^2}}{(n_x + o_y + a_z - 1)}$$

$$k_x = \frac{o_z - k_y}{2sen\theta}; k_y = \frac{o_x - k_z}{2sen\theta}; k_z = \frac{o_y - k_x}{2sen\theta}$$

Estas consideraciones tienen una desventaja, ya que si θ se acerca a los valores de 0 y 180 aparecen problemas de indeterminación.

8.5.3. Par de rotación: Cuaternios

Un Cuaternios al igual que un par de rotación describe la rotación de un ángulo θ sobre un vector unitario k , y por la propia definición se sabe que

$$Q = \left(\cos \frac{\theta}{2}, k_x \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \right)$$

Que componente a componente es:

$$\begin{aligned} q_0 &= \cos \frac{\theta}{2} & q_2 &= k_y \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \\ q_1 &= k_x \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} & q_3 &= k_z \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \end{aligned}$$

Por otro lado, para cambiar un cuaternios a una par de rotación basta con emplear las expresiones inversas

$$\theta = 2 \cos^{-1} q_0$$

$$k_x = \frac{q_1}{(1-q_0^2)^{1/2}}; k_y = \frac{q_2}{(1-q_0^2)^{1/2}}; k_z = \frac{q_3}{(1-q_0^2)^{1/2}}$$

8.5.4. Cuaternios: matriz de transformación homogénea

La expresión para pasar de un cuaternio dado a su respectiva matriz de transformación homogénea es

$$T = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - \frac{1}{2} & q_1 q_2 - q_3 q_0 & q_1 q_3 + q_2 q_0 & 0 \\ q_1 q_2 + q_3 q_0 & q_0^2 + q_2^2 - \frac{1}{2} & q_2 q_3 - q_1 q_0 & 0 \\ q_1 q_3 - q_2 q_0 & q_2 q_3 + q_1 q_0 & q_0^2 + q_3^2 - \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.68)$$

Para la relación inversa (pasar de una matriz de transformación homogénea a un cuaternio) se aplica las siguientes expresiones:

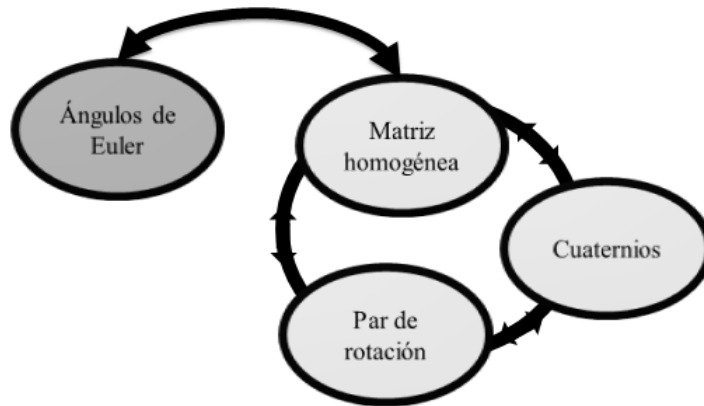
$$\begin{aligned} q_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{(n_x + o_y + a_z + 1)} & q_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{(-n_x + o_y - a_z + 1)} \\ q_1 &= \frac{1}{2} \sqrt{(n_x - o_y - a_z + 1)} & q_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{(-n_x - o_y + a_z + 1)} \end{aligned}$$

Debido a que estos métodos describen posición y orientación, existen relaciones para pasar de uno a otro. En la figura 8.23 se muestran las relaciones entre métodos de representación espacial y en la tabla 8.3 se describen las relaciones necesarias para ello.

Puesto que algunos métodos solo representan la orientación del manipulador no es posible establecer relaciones con métodos conjuntos de posición y orientación.

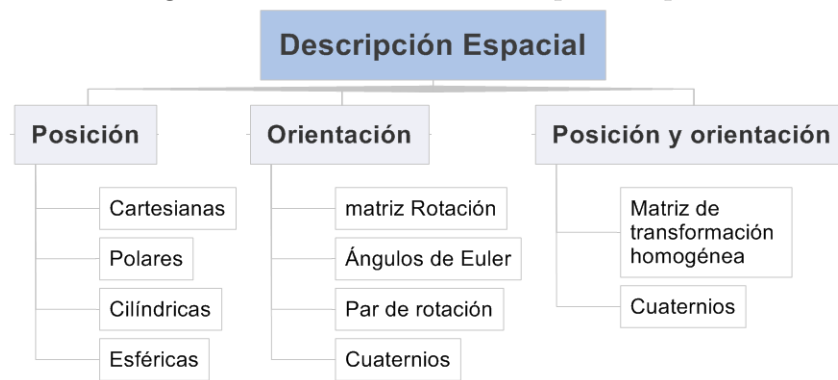
En síntesis la descripción espacial de un objeto se puede representar mediante varios métodos específicos. La selección o aplicación de uno de ellos depende de la situación o la forma en que sea más fácil recolectar los datos. La figura 8.24 muestra los posibles métodos desarrollados a lo largo del presente capítulo.

Figura 8.23: Relación entre métodos de representación espacial



Fuente: Autores de proyecto

Figura 8.24: Métodos de descripción espacial



Fuente: Autores de proyecto

Cuadro 8.3: Comparación entre métodos de representación espacial.

	Matriz homogénea	Cuaternios	Par de rotación
Matriz homogénea	—	$q_0 = \frac{1}{2}\sqrt{(n_x + o_y + a_z + 1)}$ $q_1 = \frac{1}{2}\sqrt{(n_x - o_y - a_z + 1)}$ $q_2 = \frac{1}{2}\sqrt{(-n_x + o_y - a_z + 1)}$ $q_3 = \frac{1}{2}\sqrt{(-n_x - o_y + a_z + 1)}$	$t\phi\theta = \frac{\sqrt{(o_x - o_y)^2 + (o_x - n_x)^2 + (n_y - o_x)^2}}{(o_x + o_y + o_z - 1)}$ $k_x = \frac{o_x - k_y}{2\text{sen}\theta}$; $k_y = \frac{o_x - k_x}{2\text{sen}\theta}$; $k_z = \frac{o_y - k_x}{2\text{sen}\theta}$
Cuaternios	$T = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - \frac{1}{2} & q_1q_2 - q_3q_0 & q_1q_3 + q_2q_0 & 0 \\ q_1q_2 + q_3q_0 & q_0^2 + q_2^2 - \frac{1}{2} & q_2q_3 - q_1q_0 & 0 \\ q_1q_3 - q_2q_0 & q_2q_3 + q_1q_0 & q_0^2 + q_3^2 - \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	—	$\theta = 2\cos^{-1}q_0$; $k_x = \frac{q_1}{(1 - q_0^2)^{1/2}}$ $k_y = \frac{q_2}{(1 - q_0^2)^{1/2}}$; $k_z = \frac{q_3}{(1 - q_0^2)^{1/2}}$
Par de rotación	$T(k, \theta) = \begin{pmatrix} k_x^2V\theta + C\theta & k_xk_yV\theta - k_zS\theta & k_xk_zV\theta + k_yS\theta & 0 \\ k_xk_yV\theta + k_zS\theta & k_y^2V\theta + C\theta & k_yk_zV\theta - k_xS\theta & 0 \\ k_xk_zV\theta - k_yS\theta & k_yk_zV\theta + k_xS\theta & k_z^2V\theta + C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$q_0 = \cos\frac{\theta}{2}$; $q_1 = k_x\text{sen}\frac{\theta}{2}$ $q_2 = k_y\text{sen}\frac{\theta}{2}$; $q_3 = k_z\text{sen}\frac{\theta}{2}$	—
Ángulos de Euler ZXZ	$T_{ZXZ} = \begin{pmatrix} C\phi C\psi - S\phi C\theta S\psi & -C\phi S\psi - S\phi C\theta C\psi & S\phi S\theta & 0 \\ S\phi C\psi - C\phi C\theta S\psi & -S\phi S\psi + C\phi C\theta C\psi & -C\phi S\theta & 0 \\ S\theta S\psi & S\phi C\psi & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	—	—
Ángulos de Euler ZYZ	$T_{ZYZ} = \begin{pmatrix} C\phi C\theta C\psi - S\phi S\psi & -C\phi C\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta & 0 \\ S\phi C\phi C\psi + C\phi S\psi & -S\phi C\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta & 0 \\ -S\theta S\psi & S\theta C\psi & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	—	—
Ángulos de Euler XYZ/RPY	$T_{XYZ} = \begin{pmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi\theta S\psi + S\phi C\psi & 0 \\ S\phi C\phi C\psi + C\phi S\psi & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta S\psi - C\phi C\psi & 0 \\ -S\theta & S\theta C\psi & C\theta C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	—	—

Fuente: Autores de proyecto

CAPÍTULO 9

CINEMÁTICA DE MANIPULADORES

La cinemática indica el problema de la descripción geométrica del movimiento en un sistema mecánico en donde no se van a tener en cuenta las fuerzas que producen este movimiento. La aplicación cinemática en manipuladores hace relación a las características geométricas basadas en el tiempo del movimiento. Se estudiarán la posición y orientación de los enlaces de los manipuladores.

9.1. CINEMATICA DIRECTA

El problema de la cinemática directa consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con relación a un sistema de coordenadas que se tomara como referencia, siendo conocidos los valores de las articulaciones y parámetros geométricos, de esta forma la cinemática directa de robots manipuladores industriales proporciona elementos para analizar y diseñar los movimientos de un robot.

9.1.1. Descripción de vínculos

Los vínculos se numeran empezando desde la base inmóvil del brazo, a la cual se llamara vinculo 0. El primer cuerpo móvil es el vinculo 1, y de esta forma sucesivamente, hasta el extremo del robot. Cuando se desean obtener las ecuaciones cinemáticas del mecanismo, un vínculo se considera solamente con un cuerpo rígido que define la relación entre dos ejes de articulaciones adyacentes de un manipulador. La posición de un robot en espacio tridimensional generalmente requiere de 6 coordenadas, 3 coordenadas representan la posición cartesiana del extremo final del robot (x, y, z) y 3 coordenadas para expresar la orientación de la herramienta de trabajo que estará denotada por los ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ) .

9.1.2. Solución por métodos geométricos

Consiste en obtener las relaciones de posición por procedimientos geométricos. Es utilizada solamente en robots de bajos grados de libertad ya que no existe una técnica específica para resolver el problema cinemático directo mediante este método.

Ejemplo 10.1

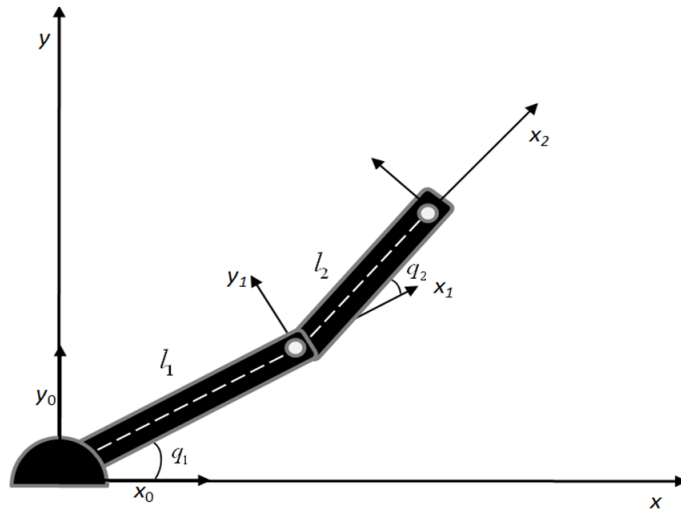
Se tiene un robot de dos grados de libertad determinar su cinemática. Para e robot de la figura 9.1se tiene que:

$$\begin{aligned}x &= l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\y &= l_1 \operatorname{sen} q_1 + l_2 \operatorname{sen}(q_1 + q_2) \\z &= 0\end{aligned}\tag{9.1}$$
$$\begin{bmatrix} n & o & a \end{bmatrix} = \operatorname{Rot}z(q_1 + q_2)$$

Ejemplo 10.2

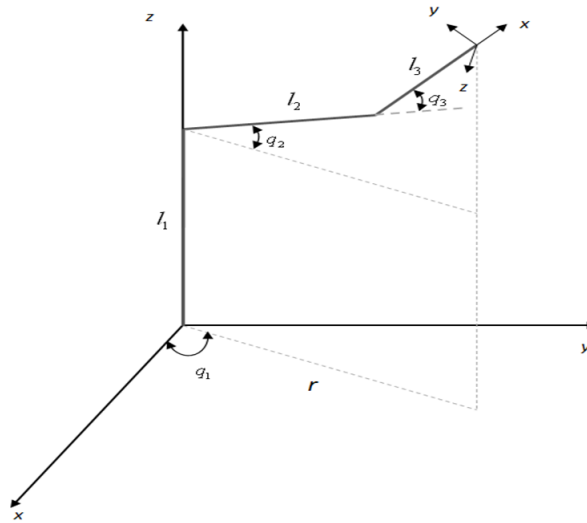
Determinar la cinemática del robot de 3 grados de libertad mostrado en la figura 9.2.

Figura 9.1: Robot planar articular de 2 grados de libertad



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 9.2: Robot de 3 grados de libertad



Fuente: Autores del proyecto.

se obtiene que :

$$\begin{aligned}
r &= l_2 \cos q_2 + l_3 \cos(q_2 + q_3) \\
z &= l_1 + l_2 \operatorname{sen} q_1 + l_3 \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \\
x &= r \cos q_1
\end{aligned}
\tag{9.2}$$

9.1.3. Solución mediante matrices de transformación homogénea

Este método más general permite determinar las ecuaciones cinemáticas de un brazo de robot restringiendo el problema cinemático a encontrar una matriz de transformación homogénea que enlaza la posición y orientación del extremo del robot a las coordenadas fijas ya establecidas en la base del robot y será función de las coordenadas articulares.

Para cada eslabón se denomina ${}^{i-1}A_i$ a la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre dos eslabones consecutivos, es decir 0A_1 describe la orientación y posición del sistema de referencia solidario a la base. Por ejemplo la posición y orientación del sistema asociado al tercer eslabón del robot con relación al sistema de coordenadas de la base se expresaría mediante la matriz 0A_3 .

$${}^0A_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \tag{9.3}$$

Cuando se consideran todo los grados de libertad, a la matriz se le denomina T . Es decir que si un robot tiene seis grados de libertad, se tiene que la posición y orientación del eslabón final vendrá dado por la matriz:

$$T = {}^0A_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \tag{9.4}$$

Esta matriz también dependerá del grado de libertad q_i , la expresión anterior puede

escribirse como:

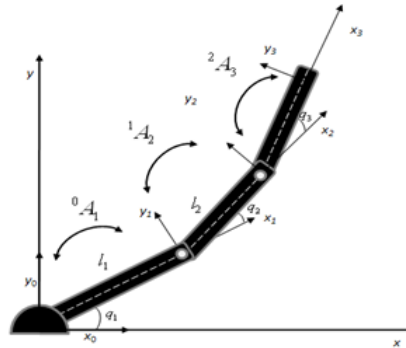
$$T(q_1 \dots q_n) = {}^0A_1(q_1) {}^1A_2(q_2) \dots {}^{n-1}A_n(q_n) \quad (9.5)$$

Para la solución del problema cinemática directo debe hacerse coincidir la matriz de transformación homogénea con la matriz de transformación homogénea $\begin{bmatrix} n & o & a & p \end{bmatrix}$ con la matriz de transformación homogénea T .

Ejemplo 10.3

Para el robot de la figura 9.3 se tiene que pasar del punto 0 a 3 es necesario:

Figura 9.3: Robot planar.



Fuente: Autores del proyecto.

El paso de 0-1, se consigue mediante un giro en q_1 entorno al eje z y una translación l_1 a lo largo del eje x_1 entonces:

$${}^0_1A_1 = Rotz(q_1)T(l_1, 0, 0) = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & \cos(q_1)l_1 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1)l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.6)$$

El paso de 1 a 2 se consigue mediante un giro q_2 en torno al eje z y un desplazamiento l_2 a lo largo del eje x_2 entonces:

$${}^1A_2 = Rotz(q_2).T(l_2, 0, 0) = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & \cos(q_2).l_2 \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2).l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.7)$$

El paso de 2 a 3 se consigue mediante un giro q_3 en torno al eje z y un desplazamiento l_3 a lo largo del eje x_3 entonces:

$${}^2A_3 = Rotz(q_3).T(l_3, 0, 0) = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\sin(q_3) & 0 & \cos(q_3).l_3 \\ \sin(q_3) & \cos(q_3) & 0 & \sin(q_3).l_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.8)$$

Por lo tanto

$$T = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2 + q_3) & -\sin(q_1 + q_2 + q_3) & 0 & \cos(q_1 + q_2 + q_3)l_3 + \cos(q_1 + q_2)l_2 + \cos(q_1)l_1 \\ \sin(q_1 + q_2 + q_3) & \cos(q_1 + q_2 + q_3) & 0 & \sin(q_1 + q_2 + q_3)l_3 + \sin(q_1 + q_2)l_2 + \sin(q_1)l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.9)$$

De lo cual se obtiene

$$x = \cos(q_1 + q_2 + q_3)l_3 + \cos(q_1 + q_2)l_2 + \cos(q_1)l_1 \quad (9.10)$$

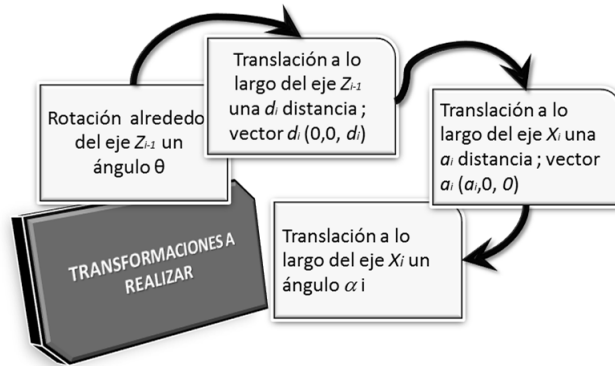
$$y = \sin(q_1 + q_2 + q_3)l_3 + \sin(q_1 + q_2)l_2 + \sin(q_1)l_1 \quad (9.11)$$

$$z = 0 \quad (9.12)$$

9.1.4. Solución mediante el Algoritmo de Denavit Hartenberg

Existen varios métodos para obtener el modelo de cinemática directa, pero dependiendo de los grados de libertad del problema se escoge la alternativa adecuada para su solución. Jaques Denavit y Richar S. Harteberg presentaron un procedimiento para obtener una mínima representación de la orientación y translación de robots manipuladores, este procedimiento es una herramienta apropiada para deducir las ecuaciones de cinemática directa de robots manipuladores. Este método fija la ubicación que tiene que ocupar cada sistema de coordenadas que está unido a cada eslabón de una cadena articulada, para de esta forma sistematizar la obtención de las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. Con este procedimiento es posible pasar de un eslabón al siguiente mediante 4 transformaciones básicas ligadas a la geometría del eslabón, a diferencia de las matrices de transformación homogénea que está determinada por seis grados de libertad. Las transformaciones a realizar en este método son las indicadas en la figura 9.4 :

Figura 9.4: Transformaciones realizadas al sistema móvil .



Fuente: Autores del proyecto.

Los cuatro parámetros de Denavit-Hartenberg $(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i)$ dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que le unen con el anterior y el siguiente. Estos parámetros representan:

θ_i Es el Angulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular eje z_{i-1} al utilizando la regla de la mano derecha. Se trata de un paramento que varia en articulaciones giratorias.

d_i es la distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $i - 1$ hasta la intersección z_{i-1} con el eje x_i .Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.

a_i es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i-esimo, en el caso de articulaciones giratorias. Cuando son articulaciones prismáticas, se debe calcular como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .

α_i Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} y el eje z_i medido en un plano perpendicular al eje x_i utilizando la regla de la mano derecha.

Realizando las transformaciones en el orden correcto, se tiene que:

$${}^{i-1}A_i = Rotz(\theta_i)T(0, 0, d_i)T(a_i, 0, 0)Rotx(\alpha_i) \quad (9.13)$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta_i & -\text{Cos}\alpha_i\text{Sen}\theta_i & \text{Sen}\alpha_i\text{Sen}\theta_i & a_i\text{Cos}\theta_i \\ \text{Sen}\theta_i & \text{Cos}\alpha_i\text{Cos}\theta_i & -\text{Sen}\alpha_i\text{Cos}\theta_i & a_i\text{Sen}\theta_i \\ 0 & \text{Sen}\alpha_i & \text{Cos}\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.14)$$

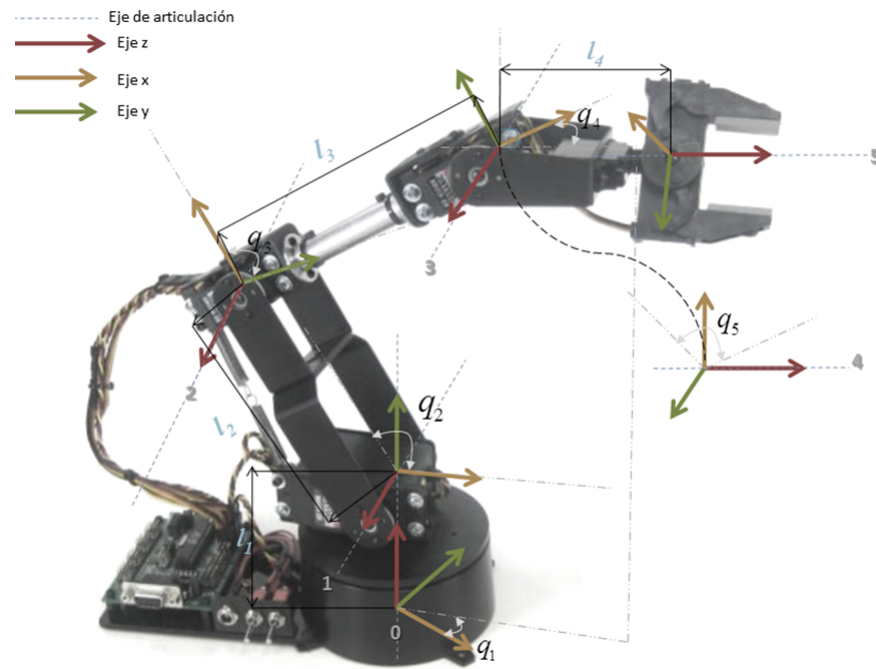
Las normas para que la matriz ${}^{i-1}A_i$ relaciones los sistemas S_{i-1} y S_i y de esta forma den solución a la cinemática directa son las siguientes:

- Numerar los eslabones desde el 1 que le corresponderá al primer eslabón móvil del sistema, hasta que pertenece al último eslabón. El 0 será el nombre dado al eslabón de la base fija del robot.
- Se numerara cada articulación iniciando con 1 que será para el primer grado de libertad, y concluyendo con n para el extremo del robot.
- A cada articulación se le sitúa su eje.
- Para i de 0 a $n - 1$, situar el eje z_i sobre el eje de la articulación $i + 1$.
- Localizar el origen del sistema de la base S_0 en cualquier sitio del eje z_0 ; x_0 e y_0 forman un sistema que cumplen con la regla de la mano derecha.
- Para de 1 a $n - 1$, posicionar el origen de S_i en la intersección del eje z_i con el eje z_{i-1} . Si no existe intersección el origen se ubica sobre la articulación.
- Luego se orienta x_i en la línea normal común entre z_{i-1} y z_i , después se situa y_i de tal manera que formen un sistema dextrógiro con z_0
- Posicionar S_n en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a estos dos.
- Determinar el ángulo que gira z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos, este ángulo está definido por θ_i .
- Obtener d_i que será la distancia desde el origen S_{i-1} hasta S_i medida en z_{i-1} .
- Obtener a_i que será la distancia desde el origen S_{i-1} hasta S_i medida en x_i .
- Determinar el ángulo α_i que gira x_i para que z_{i-1} quede en igual dirección que z_i .
- Desarrollar la matriz ${}^{i-1}A_i$.
- Obtener la matriz de transformación T que relaciona el sistema de la base del robot con el sistema del extremo.

Ejemplo 10.4

Desarrollar la resolución completa del problema cinemático para un robot didáctico AL5B de la empresa Lynxmotion (figura 9.5) siguiendo el algoritmo de Denavit-Hartenberg.

Figura 9.5: Brazo articulado AL5B.



Fuente: Autores del proyecto.

Los parámetros Denavit-Hartenberg son ((tablaa 9.6):

Cuadro 9.1: Parámetros D-H.

Articulación	θ	d	a	α
1	q_1	l_1	0	$\pi/2$
2	q_2	0	l_2	0
3	q_3	0	l_3	0
4	$q_4 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$
5	q_5	l_4	0	0

Fuente: Autores del proyecto.

Calculando las matrices de la expresión general se obtiene que:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & \text{sen}(q_1) & 0 \\ \text{sen}(q_1) & 0 & -\cos(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.15)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\text{sen}(q_2) & 0 & l_2 \cos(q_2) \\ \text{sen}(q_2) & \cos(q_2) & 0 & l_2 \sin(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.16)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\text{sen}(q_3) & 0 & l_3 \cos(q_3) \\ \text{sen}(q_3) & \cos(q_3) & 0 & l_3 \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.17)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_4 + \frac{\pi}{2}) & 0 & \text{sen}(q_4 + \frac{\pi}{2}) & 0 \\ \text{sen}(q_4 + \frac{\pi}{2}) & 0 & -\cos(q_4 + \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.18)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\text{sen}(q_5) & 0 & 0 \\ \text{sen}(q_5) & \cos(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.19)$$

Así pues se puede calcular la matriz T que indica la localización del sistema asociado al extremo del robot con respecto al sistema de referencia de la base del robot:

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 \quad (9.20)$$

$$T = \begin{bmatrix} S_1 S_5 - S_{234} C_1 C_5 & C_5 S_1 + S_{234} C_1 S_5 & C_{234} C_1 & C_1 (l_3 C_{23} + l_2 C_2 + l_4 C_{234}) \\ -C_1 S_5 - S_{234} C_5 S_1 & S_{234} S_1 S_5 - C_1 C_5 & C_{234} S_1 & S_1 (l_3 C_{23} + l_2 C_2 + l_4 C_{234}) \\ C_{234} C_5 & -C_{234} S_5 & S_{234} & l_1 + l_3 S_{23} + l_2 S_2 + l_4 S_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.21)$$

Como se ve en esta matriz queda reflejado el valor de la posición (p_x, p_y, p_z) y orientación (n, o, a) del extremo del robot en función de las coordenadas articulares.

9.1.5. Solución mediante el uso de cuaternios

Como método alternativo se usarán los cuaternios para representar las transformaciones de rotación y desplazamiento, el procedimiento consiste en encontrar una relación para la posición y orientación del sistema asociado al extremo del robot con respecto al asociado en la base. Dicha relación será función de la geometría del robot (longitud de los elementos y coordenadas articulares).

Para esto se localizan marcos de referencia en cada articulación, ya sean prismáticas o rotativas, comenzando con el sistema de referencia S_0 localizado en la base del robot y siguiendo la enumeración hasta llegar al sistema S_k en el extremo del robot.

Para obtener la relación entre S_0 y S_k se irá convirtiendo sucesivamente en S_0 en S_1 , luego S_2, S_3 y S_i en S_k , mediante las traslaciones y rotaciones necesarias. A continuación se muestra un método que permitirá un desarrollo sencillo de dichas transformaciones.

- Enumerar cada articulación del robot, comenzando con cero (0) a la base del robot.
- Ubicar un sistema de referencia en cada articulación, ya sea prismática o rotativa

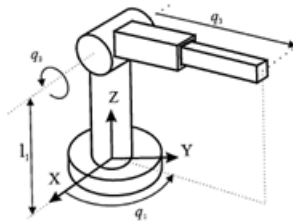
(no es necesario seguir las convenciones de DH, aunque es recomendable ubicar el eje z_i en el eje de la articulación si es rotativa y a lo largo de ella si es prismática)

- Determinar las transformaciones para pasar del sistema S_{i-1} a S_i (desplazamiento y rotación).
- Realizar las transformaciones mediante cuaternios sucesivamente hasta llegar al extremo del robot.

Ejemplo 10.5

La figura 9.6 representa un robot polar. Obtener el modelo cinemático mediante el uso de cuaternios.

Figura 9.6: Robot polar.



Fuente: Autores del proyecto.

Luego de haber ubicado los sistemas de referencia asociados a cada articulación, se establecen las transformaciones espaciales necesarias para convertir el sistema 0 (asociado a la base del robot) en el sistema 4 (ubicado en el extremo del robot).

- 1 Desplazamiento de S_0 una distancia l_1 y rotación de un ángulo q_1 alrededor de z_0 .
- Rotación de S_1 un ángulo q_2 alrededor de y_1 .
- Desplazamiento de S_2 una distancia q_3 a lo largo del eje z_2 y rotación q_3 alrededor de x_2 .

- Realizar las transformaciones mediante cuaternios sucesivamente hasta llegar al extremo del robot.

En forma abreviada las transformaciones son:

$$s_0 \rightarrow s_1 : T(z_0, l_1)Rotz(q_1) \quad (9.22)$$

$$s_1 \rightarrow s_2 : Roty_1(q_2) \quad (9.23)$$

$$s_2 \rightarrow s_3 : T(z_2, q_3) \quad (9.24)$$

Los cuaternios que describen las rotaciones y los vectores de desplazamiento P respectivos son:

$$Q_1 = (\cos(\frac{q_1}{2}), 0, 0, \text{sen}(\frac{q_1}{2})) \quad (9.25)$$

$$Q_2 = (\cos(\frac{q_2}{2}), 0, \text{sen}(\frac{q_2}{2}), 0) \quad (9.26)$$

$$Q_3 = (1, 0, 0, 0) \quad (9.27)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= [0, 0, l_1] \\ P_2 &= [0, 0, 0] \\ P_3 &= [0, 0, q_3] \end{aligned} \quad (9.28)$$

Las ecuaciones correspondientes a la descripción conjunta de posición y orientación de un objeto localizado en S_i por su vector de posición a_i y su cuaternos de rotación R_i en el sistema S_{i-1} son:

$$(0, a_{i-1}) = Q_i(0, a_i)Q_i^* + (0, p_i) \quad (9.29)$$

$$R_{i-1} = Q_i R_i \quad (9.30)$$

Donde P y Q son respectivamente el desplazamiento y posterior rotación que permiten convertir S_{i-1} en S_i (Se aclara que el símbolo para denotar producto entre cuaternios se ha obviado en estas expresiones). Aplicando las relaciones anteriores en forma reiterada a los sistemas de referencia S_0, S_1, S_2, S_3 se tiene que:

$$(0, a_0) = Q_1(0, a_1)Q_1^* + (0, p_1) \quad (9.31)$$

$$R_0 = Q_1 R_1 \quad (9.32)$$

$$(0, a_1) = Q_2(0, a_2)Q_2^* + (0, p_2) \quad (9.33)$$

$$R_1 = Q_2 R_2 \quad (9.34)$$

$$(0, a_2) = Q_3(0, a_3)Q_3^* + (0, p_3) \quad (9.35)$$

$$R_2 = Q_3 R_3 \quad (9.36)$$

Sustituyendo consecutivamente las expresiones, se obtiene:

$$(0, a_0) = Q_1 [Q_2 [Q_3(0, a_3)Q_3^* + (0, p_3)] Q_2^* + (0, p_2)] Q_1^* + (0, p_1) \quad (9.37)$$

$$(0, a_0) = Q_1 Q_2 Q_3(0, a_3)Q_3^* Q_2^* Q_1^* + Q_1 Q_2(0, p_3)Q_2^* Q_1^* + Q_1(0, p_2)Q_1^* + (0, p_1) \quad (9.38)$$

$$R_0 = Q_1 Q_2 Q_3 R_3 \quad (9.39)$$

Dichas expresiones representan la posición y la orientación de un objeto referido al sistema de referencia , en el sistema de referencia S_3 fijo S_0 .

Para el caso de interés dicho objeto se encuentra en el extremo del robot y para ello se tiene:

$$a_3 = (0, 0, 0) \quad (9.40)$$

$$R_3 = (1, 0, 0, 0) \quad (9.41)$$

Con lo que se completa el sistema de ecuaciones y es posible dar solución al problema cinemático directo por medio de este método.

Ejemplo 10.6

Para el caso particular en que los valores de las posiciones articulares son: l_1 es 15 cm.

$$q_1 = \frac{\pi}{2}; q_2 = \frac{\pi}{2}; q_3 = 20 [cm] \quad (9.42)$$

Se tiene:

$$P_1 = [0, 0, 15] \quad (9.43)$$

$$P_2 = [0, 0, 0] \quad (9.44)$$

$$P_3 = [0, 0, 20] \quad (9.45)$$

$$Q_1 = (\cos(\frac{\pi}{4}), 0, 0, \text{sen}(\frac{\pi}{4})) \quad (9.46)$$

$$Q_2 = (\cos(\frac{\pi}{4}), 0, \text{sen}(\frac{\pi}{4}), 0) \quad (9.47)$$

$$Q_3 = (1, 0, 0, 0) \quad (9.48)$$

Reemplazando estos valores en la expresión antes encontrada que representa la posición del extremo del robot con respecto de la base se obtienen los siguientes resultados:

$$(0, a_0) = [0, 0, 20, 15] \quad (9.49)$$

$$R_0 = [0, 5, -0, 5, 0, 5, 0, 5] \quad (9.50)$$

$$R_0 = (\cos(\frac{\pi}{3}), \text{sen}(\frac{\pi}{3}) \left\langle -\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right\rangle) \quad (9.51)$$

Donde R_0 representa una rotación de $\frac{2\pi}{3}$ alrededor del eje del vector $[-1, 1, 1]$.

9.1.6. Matriz Jacobiana

En el desarrollo del modelo cinemático se busca encontrar la relación entre las variables articulares y la posición y orientación del efector final del robot (la posición siendo generalmente expresada en coordenadas cartesianas y la orientación expresada por tres ángulos), no se tienen en cuenta fuerzas ni fricciones, pero si se necesita tener en cuenta las velocidades articulares para saber qué efecto tiene sobre el efector final, es decir, conocer que efecto tiene un movimiento diferencial en las variables articulares sobre las variables en el espacio de la tarea. Con esta relación se puede crear un sistema de control donde regulando las velocidades articulares produciendo un movimiento determinado en el extremos del robot, ya sea que describa un círculo moviéndose a velocidad

constante u otra tarea.

Este modelo diferencial viene determinado por la matriz Jacobiana, donde se relaciona las velocidades articulares con otro vector de velocidades expresado en un espacio distinto. Teniendo diferentes opciones a la hora de determinar este espacio, se toman las velocidades del extremo del robot según sus coordenadas cartesianas y su orientación según los ángulos de Euler $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ o también se pueden tomar con respecto a las velocidades tangenciales y angulares $(v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z)$. En el primer caso se llama matriz Jacobiana analítica, y para en el segundo suele llamarse matriz Jacobiana geométrica. Ambos casos permiten representar la velocidad del extremo del robot respecto a sus velocidades articulares. A continuación se explicara la forma de obtener ambas matrices Jacobianas y la relación entre ellas.

Matriz Jacobiana Analítica

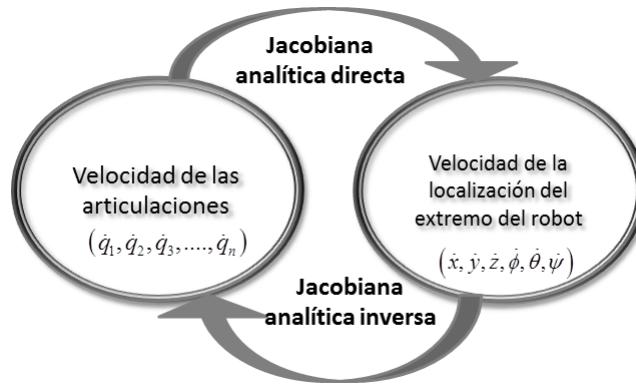
Como se explicó anteriormente, en esta Jacobiana se relaciona s la velocidad de las variables articulares $(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dots, \dot{q}_n)$ con las velocidades de locación del extremo del robot, su posición cartesiana (x, y, z) y su orientación en cualquiera de los métodos vistos anteriormente. En el esquema presentado en la La figura 9.7 del funcionamiento de esta matriz es el siguiente:

Para determinar la matriz Jacobiana analítica se necesita primero tener cada variable del extremo del robot $(x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ en función de las variables articulares matemáticamente se puede expresar así:

$$x = f_x(q_1, \dots, q_n) \quad (9.52)$$

$$y = f_y(q_1, \dots, q_n) \quad (9.53)$$

Figura 9.7: Jacobiana analítica directa e inversa.



Fuente: Autores del proyecto.

$$z = f_z(q_1, \dots, q_n) \quad (9.54)$$

$$\phi = f_\phi(q_1, \dots, q_n) \quad (9.55)$$

$$\theta = f_\theta(q_1, \dots, q_n) \quad (9.56)$$

$$\psi = f_\psi(q_1, \dots, q_n) \quad (9.57)$$

Si se deriva respecto al tiempo y usando la regla de la cadena se tiene:

$$\dot{x} = \sum_1^n \frac{\partial f_x}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (9.58)$$

$$\dot{y} = \sum_1^n \frac{\partial f_y}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (9.59)$$

$$\dot{z} = \sum_1^n \frac{\partial f_z}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (9.60)$$

$$\dot{\theta} = \sum_1^n \frac{\partial f_{\theta}}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (9.61)$$

$$\dot{\psi} = \sum_1^n \frac{\partial f_{\psi}}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (9.62)$$

Se puede expresar de forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_a \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (9.63)$$

$$\mathbf{J}_a = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{\psi}}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_{\psi}}{\partial q_n} \end{pmatrix} \quad (9.64)$$

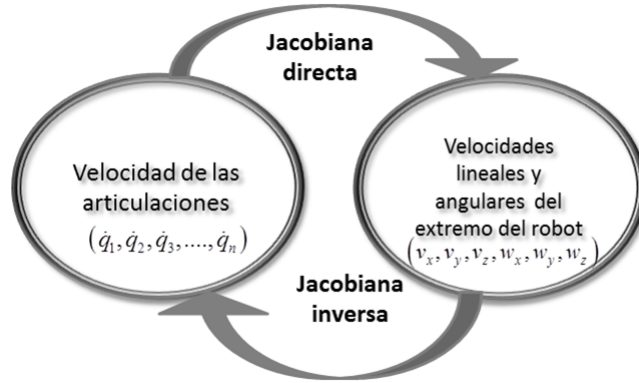
De esta forma se puede encontrar la matriz Jacobiana analíticamente, para que el concepto quede más claro, se hará un ejemplo donde se aplicaran las ecuaciones anteriormente mostradas.

Matriz Jacobiana Geométrica

En esta matriz Jacobiana a diferencia de la matriz analítica, no se busca relacionar las velocidades articulares con las velocidades de localización del efector final, sino la relación que existe entre las velocidades articulares con las velocidades tangenciales y angulares con respecto a un sistema de referencia, principalmente el sistema fijo en la base del robot figura 9.8.

Se puede representar con un esquema parecido al usado anteriormente.

Figura 9.8: Jacobiana geométrica directa e inversa.



Fuente: Autores del proyecto.

Esta llamada matriz Jacobiana geométrica o simplemente matriz Jacobiana, se puede obtener directamente de la matriz de transformación homogénea que resuelve el problema cinemático directo, $T = \begin{bmatrix} n & o & a & P \end{bmatrix}$, de esta matriz se conocen las coordenadas del extremo del robot (P_x, P_y, \dots, P_z) en función de las variables articulares (q_1, q_2, \dots, q_n) por tanto las velocidades lineales del extremo del robot serán simplemente la derivada respecto al tiempo del vector posición P , siendo definido de la siguiente forma:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x} = \dot{P}_x \quad (9.65)$$

La obtención de las velocidades angulares del extremo del robot (w_x, w_y, w_z) a partir de las velocidades articulares (q_1, q_2, \dots, q_n) se puede llevar a cabo gracias a la submatriz \mathbf{R} de la matriz de transformación homogénea.

Como se ha mencionado anteriormente esta es una matriz ortogonal (su inversa es

igual a su transpuesta) por tanto se puede decir:

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{R}^T = \mathbf{I} \quad (9.66)$$

Al derivar respecto al tiempo se obtiene:

$$\dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T + \mathbf{R} \cdot \dot{\mathbf{R}}^T = 0 \quad (9.67)$$

Introduciendo un nuevo parámetro S definiéndolo como:

$$\mathbf{S} = \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \quad (9.68)$$

La ecuación queda reducida a:

$$\mathbf{S} + \mathbf{S}^T = 0 \quad (9.69)$$

La ecuación queda reducida a:

$$\mathbf{S} + \mathbf{S}^T = 0 \quad (9.70)$$

Esta matriz S dará las velocidades angulares del extremo del robot, ya que esta se puede expresar de la siguiente manera:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix} \quad (9.71)$$

De esta forma se puede calcular la matriz Jacobiana a partir de la matriz de transformación homogénea, la cual está definida por las variables articulares. Este procedimiento es excesivamente complejo ya que se tiene que calcular la derivadas del vector P y de la submatriz de rotación. Existen procedimientos numéricos alternativos para facilitar el cálculo de esta matriz y su implementación computacional.

Obtención Numérica De La Matriz Jacobiana

Debido a la complejidad de cálculo de la matriz Jacobiana geométrica existen formas de obtenerla a partir de procesos más extensos pero de más fácil desarrollo computacional. Uno de estos métodos consiste en usar la información contenida en las matrices de transformación homogénea que llevan de un sistema de referencia a otro, las matrices ${}^{i-1}A_i$, ya que estas definen el modelo cinemático directo.

Cada matriz ${}^{i-1}A_i$ está expresada en función de las variables articulares q_i , de tal forma que para valores particulares de q_i se tendrá un valor particular para la matriz, por consiguiente la expresión generada será una expresión genérica al igual que dará una solución particular de las velocidades angulares y tangenciales.

En este método se utilizara la propagación de velocidades, es decir una pequeño desacoplo de las velocidades articulares para conocer la velocidad del efector final del robot. Primero se tendrá que definir algunas variables.

Se define 0z_i como el vector unitario en dirección del eje del eslabón $i+1$ definido respecto al sistema de referencia 0 (sistema de referencia fijo en la base del robot). Si se siguen las pautas del algoritmo de Denavith-Hartenberg, la matriz de transformación homogénea ${}^{i-1}A_i$ estará definida de la siguiente manera:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} {}^{i-1}n_i & {}^{i-1}o_i & {}^{i-1}a_i & {}^{i-1}p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.72)$$

Esta matriz contiene la información del sistema ordenado i (vectores directores y posición del origen) respecto al sistema $i-1$ entonces se obtiene que la matriz 0A_i sera

definida como:

$${}^0A_i = \begin{bmatrix} {}^0n_i & {}^0o_i & {}^0a_i & {}^0p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.73)$$

De esta matriz se puede extraer información específica como lo es el vector 0z_i que es la columna a de la matriz 0A_i , expresándose de la siguiente manera:

$${}^0Z_i = {}^0A_i(1 : 3, 3) \quad (9.74)$$

Se necesita definir además el vector iP_n , se sabe que el vector \mathbf{P} está definido por la cuarta columna de la matriz de transformación, el cual se puede obtener de la siguiente forma:

$${}^iP_n = {}^0A_n(1 : 3, 4) - {}^0A_i(1 : 3, 4) \quad (9.75)$$

Consiguiendo expresiones para estos vectores se puede conseguir la matriz Jacobiana como una matriz conformada por n vectores columna, de la siguiente manera:

$$\mathbf{J} = [\mathbf{J}_1 | \mathbf{J}_2 | \dots | \mathbf{J}_n] \quad (9.76)$$

Donde:

$$\mathbf{J}_i = \begin{cases} \begin{bmatrix} {}^0Z_{i-1} \times {}^{i-1}P_n \\ {}^0Z_{i-1} \end{bmatrix} & \text{rotacin} \\ \begin{bmatrix} {}^0Z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{traslacin} \end{cases} \quad (9.77)$$

9.2. CINEMATICA INVERSA

Por lo general las aplicación de robótica, se concentran en la descripción de posición y orientación del efector final con respecto a un sistema de coordenadas de referencia

fijas, por lo cual se hace necesario resolver el problema de cinemática directa y de la cinemática inversa.

La cinemática inversa se fundamenta en buscar las coordenadas articulares del robot y en general la geometría de cada articulación a partir de la posición y orientación deseada para el efector final, esto es un ejercicio de difícil solución, ya que contiene ecuaciones no lineales y múltiples soluciones.

El problema de la cinemática inversa se debe resolver en tiempo real en la mayoría de sus usos, y a diferencia de la cinemática directa se pueden tener distintas soluciones que posicionan y orientan el extremo del robot al mismo punto, por lo tanto es necesario hacer uso de una solución cerrada.

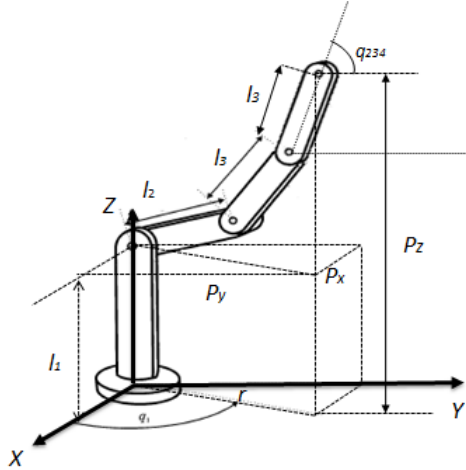
9.2.1. Solución por métodos geométricos

De igual forma que en la cinemática directa, el método geométrico aplicado a la cinemática inversa consta en encontrar el suficiente número de relaciones basadas en la geometría del robot por medio de las cuales se puedan hallar los valores de las coordenadas articulares en función de la posición y la orientación del extremo del robot. Es claro que dichas relaciones dependerán de la configuración del robot y sus dimensiones físicas.

Este método es viable para robots de pocos grados de libertad o para el caso en el que se consideren solo los primeros DOF para posicionar el extremo del robot.

A continuación se presenta la aplicación de este método para la clarificación del mismo. Los datos necesarios para definir completamente el robot son: su posición en el espacio y la orientación del efector final de la figura 9.9.

Figura 9.9: Robot articular 4 DOF



Fuente: Autores del proyecto.

Se llamara P_x , P_y y P_z a las coordenadas cartesianas del extremo del robot y q_{234} a la orientación del mismo.

Como se muestra en la figura 6.1 el análisis de este robot se facilita al trabajar en el plano rz; plano definido por la rotación del primer grado de libertad tal que:

$$q_1 = \tan^{-1}(P_y/P_x) \quad (9.78)$$

La distancia r al extremo del robot será:

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (9.79)$$

Ahora se procederá a calcular la ubicación del punto 3 con las siguientes relaciones:

$$r_3 = r - l_4 \cos(q_{234}) \quad (9.80)$$

$$z_3 = r - l_4 \sin(q_{234}) \quad (9.81)$$

Con lo que se determinan las posiciones:

$$P_{x3} = r_3 \cos(q_1) \quad (9.82)$$

$$P_{y3} = r_3 \text{sen}(q_1) \quad (9.83)$$

Con los datos obtenidos el problema de la figura 9.10.

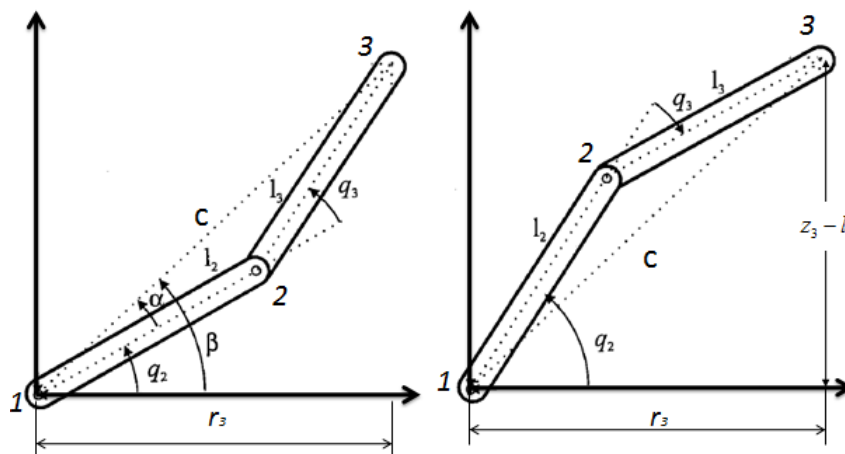
se reduce a solucionar el triangulo formado por los puntos 1, 2 y 3. Se definirá la distancia entre los puntos 1 y 3 como C, tal que

beginequation

$$C = \sqrt{r_3^2 + (z_3 - l_1)^2}$$

endequation

Figura 9.10: Elementos 2, y 3 del robot visto en el plano z-r



Fuente: Autores del proyecto.

Teniendo en cuenta que $\cos(180^\circ - \theta) = -\cos(\theta)$ y la ley del coseno se obtiene:

$$\cos(q_3) = \frac{c^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (9.84)$$

$$\text{sen}(q_3) = \pm \sqrt{1 - \cos^2(q_3)} \quad (9.85)$$

$$q_3 = \tan^{-1}(\pm \sqrt{1 - \cos^2(q_3)} / \cos(q_3)) \quad (9.86)$$

Donde el símbolo \pm indica las posiciones de codo arriba y codo abajo que pueden adoptar los eslabones. Se puede deducir de la figura ??.

que la posición articular del segundo eslabón es la diferencia entre β y α de tal manera que:

$$q_2 = \beta - \alpha \quad (9.87)$$

Donde

$$\beta = \cos^{-1}(r_3/c) \quad (9.88)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{c^2 + l_2^2 - l_3^2}{2cl_2}\right) \quad (9.89)$$

Análogamente al punto 3, se pueden calcular las coordenadas cartesianas del punto 2 encontrando la proyección sobre el plano r-z y transformándola de la siguiente manera.

$$r_2 = l_2 \cos(q_2) \quad (9.90)$$

$$z_2 = l_2 \sin(q_2) \quad (9.91)$$

Y por tanto

$$P_{x2} = r_2 \cos(q_1) \quad (9.92)$$

$$P_{y2} = r_2 \cos(q_1) \quad (9.93)$$

La posición articular del elemento 4 se encuentra fácilmente de la siguiente manera

$$q_4 = q_{234} - (q_2 + q_3) \quad (9.94)$$

Los valores de q_2, q_3 y q_4 nos permiten encontrar la posición de los puntos 1, 2, 3 y 4.

9.2.2. Solución por medio de la matriz de transformación homogénea.

Lo primero es obtener la expresión T que relaciona el sistema de referencia de la base del robot con el sistema de referencia asociado al extremo de este, es necesario determinar los parámetros de Denavit-Hartenberg y de esta forma buscar las articulaciones del extremo final del robot que quedara definida por los vectores n, o, a y p, tal que de esta forma se puedan manipular las ecuaciones resultantes de T con el fin de despejar $q_1, q_2 \dots q_{n-1}$.

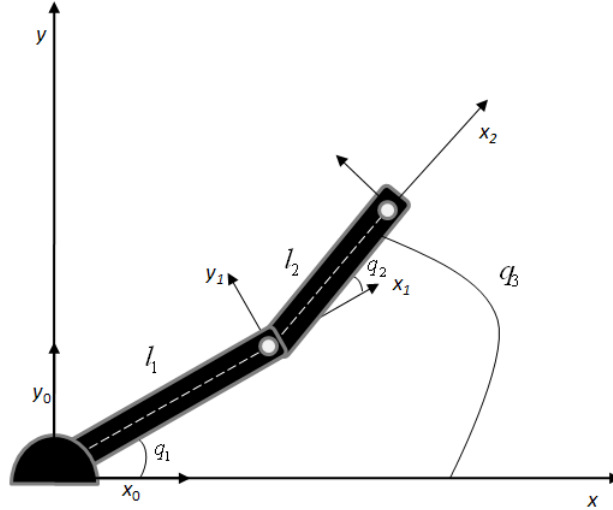
Ejemplo 10.7

Determinar la cinemática inversa por medio de matrices de transformación homogénea de un robot planar (figura 9.11).

Desarrollando 0A_2 .

$$\begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 & l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 & l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.95)$$

Figura 9.11: Robot Planar.



Fuente: Autores del proyecto.

Por lo tanto

$$p_x = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) \quad (9.96)$$

$$p_y = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (9.97)$$

Elevando al cuadrado cada termino de P y sabiendo que:

$$\cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos(\theta_1)\cos(\theta_2) - \sin(\theta_1)\sin(\theta_2) \quad (9.98)$$

$$\sin(\theta_1 + \theta_2) = \sin(\theta_1)\cos(\theta_2) + \cos(\theta_1)\sin(\theta_2) \quad (9.99)$$

$$p_x^2 = (l_1^2 C_1^2) + 2l_1 l_2 (C_1 C_2 - S_1 S_2) C_1 + l_2^2 (C_1 C_2 - S_1 S_2)^2 \quad (9.100)$$

$$p_y^2 = (l_1^2 S_1^2) + 2l_1 l_2 (S_1 C_2 - C_1 S_2)(S_1) + l_2^2 (S_1 C_2 - C_1 S_2)^2 \quad (9.101)$$

Sumando

$$p_x^2 + p_y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \text{Cos}(q_2) \quad (9.102)$$

Despejando

$$\text{Cos}(q_2) = \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (9.103)$$

Por propiedades trigonométricas

$$\text{Sen}^2\theta + \text{Cos}^2\theta = 1 \quad (9.104)$$

Entonces

$$\text{Sen}(q_2) = \sqrt{1 - \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right)^2} \quad (9.105)$$

Por lo que

$$\text{Tan}(q_2) = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right)^2}}{\frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}} \quad (9.106)$$

Como

$$q_3 = q_1 + q_2 \quad (9.107)$$

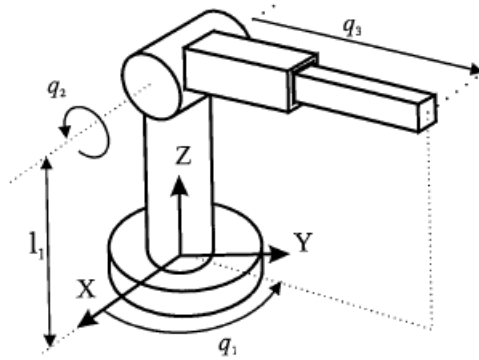
$$q_1 = q_3 - q_2 \quad (9.108)$$

$$q_1 = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) - \text{Tan}^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right)^2}}{\frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}} \right) \quad (9.109)$$

Ejemplo 10.8 para un robot polar:

Calculando los parametros D-H para la (figura 9.12).

Figura 9.12: Robot Esferico.



Fuente: Autores del proyecto.

Se tiene de la tabla 9.2).

Cuadro 9.2: Parametros D-H.

Articulación	Θ	D	a	α
1	q_1	l_1	0	90
2	q_2	0	0	-90
3	0	q_3	0	0

Fuente: Autores del proyecto.

Asi que:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & -\cos(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.110)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \text{Cos}(q_2) & 0 & -\text{Sin}(q_2) & 0 \\ \text{Sin}(q_2) & 0 & \text{Cos}(q_2) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.111)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.112)$$

$$T = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 \quad (9.113)$$

$$\begin{bmatrix} C_1C_2 & -S_1 & -C_1S_2 & -q_3C_1S_2 \\ C_2S_1 & C_1 & -S_1S_2 & -q_3S_1S_2 \\ S_2 & 0 & C_2 & l_1 + q_3C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.114)$$

Se tendrá que

$${}^1A_2 {}^2A_3 = ({}^0A_1)^{-1}T \quad (9.115)$$

Por lo que

$${}^0A_1^{-1} = \begin{bmatrix} \text{Cos}(q_1) & \text{Sin}(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_1 \\ \text{Sin}(q_1) & -\text{Cos}(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.116)$$

$${}^1A_2^{-1} = \begin{bmatrix} \text{Cos}(q_2) & \text{Sin}(q_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\text{Sin}(q_2) & \text{Cos}(q_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.117)$$

$${}^1A_3 = \begin{bmatrix} \text{Cos}(q_2) & 0 & -\text{Sin}(q_2) & -q_3\text{Sin}(q_2) \\ \text{Sin}(q_2) & 0 & \text{Cos}(q_2) & q_3\text{Cos}(q_2) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.118)$$

Recordando que que T es igual a:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.119)$$

Entonces $({}^0A_1)^{-1}T$ sera:

$$\begin{bmatrix} n_x C_1 + n_y S_1 & o_x C_1 + o_y S_1 & a_x C_1 + a_y S_1 & p_y S_1 \\ n_z & o_z & a_z & p_z - l_1 \\ n_x S_1 - n_y C_1 & o_x S_1 - o_y C_1 & a_x S_1 - a_y C_1 & p_x S_1 - p_y C_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.120)$$

De acá se determina que:

$$q_1 = \arctan \left[\frac{p_y}{p_x} \right] \quad (9.121)$$

Las otras ecuaciones salen de comparar el resultado de la matriz

$${}^2A_3 = ({}^1A_2)^{-1}({}^0A_1)^{-1}T \quad (9.122)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^2A_3 \quad (9.123)$$

$$p_z S_2 - l_1 S_2 + p_x C_1 C_2 + p_y C_2 S_1 \quad (9.124)$$

$$C_2(C_1 p_x + p_y C_1) + S_2(p_z - l_1) = 0 \quad (9.125)$$

$$-\frac{C_1 p_x + p_y C_1}{p_z - l_1} = \tan(q_2) \quad (9.126)$$

Y para determinar el numerador solo en función de p_x y p_y se usa trinomio cuadrado perfecto de tal manera que:

$$C_1 p_x + S_1 p_y = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (9.127)$$

Para hallar q_3 es necesario:

$$p_z C_2 - l_1 C_2 - p_x C_1 S_2 - p_y S_1 S_2 = q_3 \quad (9.128)$$

$$q_3 = C_2(p_z - l_1) - S_2 \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (9.129)$$

Quedando de esta forma definida la solución al problema cinemático inverso de el ejemplo planteado por las anteriores ecuaciones.

9.2.3. Precision y repetividad en un robot industrial

Actualmente muchos robots industriales se dirigen hacia puntos de destino que se les ha instruido. Un punto instruido es aquel donde el manipulador se mueve físicamente, después se leen los sensores de posición de articulación y se almacenan los ángulos

de articulación. Cuando se decide que el robot regrese a ese punto en el espacio, cada articulación se mueve al valor almacenado. En manipuladores simples del tipo instruir y reproducir como estos nunca tienen el problema de cinemática inversa, por causa a que los puntos de destino nunca se especifican en coordenadas cartesianas; entonces cuando un fabricante especifica con que precisión puede un manipulador regresar a un punto instruido, esta especificando la repetitividad del manipulador.

Siempre que se define una posición de destino y una orientación en términos cartesianos, debe hallarse la cinemática inversa del dispositivo para poder despejar los ángulos de articulación necesarios. Los sistemas que permiten describir destinos en términos cartesianos son capaces de mover el manipulador a puntos que nunca fueron instruidos; puntos en el espacio de trabajo a los cuales tal vez nunca haya estado antes. A esos puntos se les llamara puntos calculados. Dicha capacidad es necesaria para muchos trabajos de maniobra. Por ejemplo, si se utiliza un sistema de visión computacional para localizar una pieza que el robot debe sujetar, este debe poder moverse a las coordenadas cartesianas proporcionadas por el sensor de visión. La precisión con la que se puede llegar a un punto calculado se conoce como precisión del manipulador.

La precisión de un manipulador está influenciada por la repetitividad. Indudablemente la precisión se ve perturbada por la precisión de los parámetros que aparecen en las ecuaciones cinemáticas del robot. Si no se conocen bien los parámetros Denavit-Hartenberg las ecuaciones cinemáticas inversas calcularan valores de ángulos de articulación erróneos. Por esto, aunque la repetitividad de la mayoría de los manipuladores industriales es suficiente mente buena, la precisión es mucho peor y varia considerablemente de un manipulador a otro. Pueden pensarse en técnicas de calibración que permitan mejorar la precisión de un manipulador a través de la estimación de esos parámetros cinemáticas específicos del manipulador.

9.3. MATRIZ JACOBIANA INVERSA

Como se explico anterior mente la matriz Jacobiana nos da la relación entre las velocidades articulares y las velocidades lineales y angulares en el extremo del robot. Sin embargo si se quisiera controlar la velocidad de este efector final a un valor deseado, se tiene que calcular las velocidades articulares. Si se retoma la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_a \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad o \quad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (9.130)$$

Y despejando las velocidades articulares

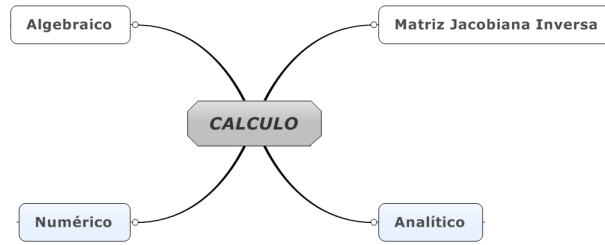
$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = J_a^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad o \quad \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (9.131)$$

Donde J_a^{-1} y J^{-1} representan la matriz Jacobiana inversa, analítica y geométrica respectivamente. En el siguiente esquema se muestran cuales serían las opciones para el cálculo de esta matriz.

Representado el calculo en la figura 9.13.

Algebraicamente esta matriz no siempre es fácil de calcular, e inclusive no siempre es calculable, debido a que es una matriz de orden 6x6 (cuando es cuadrada) y cuyos

Figura 9.13: Formas de calcular la matriz jacobiana.



Fuente: Autores del proyecto.

elementos son funciones trigonométricas, esta complejidad hace buscar otras formas de conseguir esta matriz inversa. Si se opta por el cálculo numérico pero esta solución nos obliga a encontrar primero un valor numérico para una configuración singular (q_1) e invertirla, existiendo enésimas posiciones donde el valor de la matriz Jacobiana cambia con cada una de ellas haciéndolo un cálculo tedioso y en algunos casos imposibles de hacer cuando el determinante la matriz es nulo. Una dificultad agregada sería el hecho que no siempre la Jacobiana es cuadrada, pasa cuando se tiene un mayor o menor número de grados de libertad que variables en el espacio de la tarea (normalmente 6), cuando es menor el robot se verá sometido a restricciones en su movimiento, y cuando es mayor se tendera que eliminar algunos grados de libertad.

Una alternativa diferente sería el cálculo analítico de la matriz Jacobiana inversa, partiendo del modelo cinemático inverso.

$$\begin{aligned}
 q_1 &= f_1(x, y, z, \phi, \theta, \psi) \\
 &\vdots \\
 q_n &= f_n(x, y, z, \phi, \theta, \psi)
 \end{aligned}
 \tag{9.132}$$

Y de la misma forma como se obtuvo la matriz Jacobiana analítica, esta matriz Jacobiana inversa queda definida así:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = J_a^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad J_a^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial \psi} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial \psi} \end{pmatrix} \quad (9.133)$$

9.3.1. Matriz Jacobiana Pseudoinversa

En aquellos casos donde la matriz Jacobiana no sea una matriz cuadrada, el robot posee menos grados de libertad que las variables en el espacio de la tarea o por el contrario es un robot redundante, se puede recurrir a una matriz pseudoinversa de la matriz Jacobiana. Esta matriz no representa una solución exacta a las ecuaciones anteriormente mostradas, pero si es la que menos desviación muestra con un error cuadrático mínimo (tabla ??).

Cuadro 9.3: Matriz pseudoinversa.

Matriz	Pseudoinversa	Descripción
$J_{m \times n} (m < n)$	$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$	Pseudoinversa por derecha, cuando se tiene un robot con más grados de libertad que velocidades en el espacio de la tarea (infinitos vector \dot{q} satisface las ecuaciones)
$J_{m \times n} (m > n)$	$J^+ = (J J^T)^{-1} J$	Pseudoinversa por izquierda, robots con menos grados de libertad que velocidades en el espacio de la tarea (ningún vector \dot{q} satisface las ecuaciones)

Fuente: Autores del proyecto.

9.3.2. Configuraciones singulares en la matriz Jacobiana

Son aquellas donde el determinante de la matriz Jacobiana se vuelve cero, por tanto el cálculo de una matriz inversa no se puede realizar. Al convertirse en cero el determinante, esto supondría un incremento infinitesimal en las coordenadas cartesianas, que lleva a un incremento infinitesimal en las coordenadas de los actuadores, lo cual representa velocidades articulares muy grandes que serían imposibles de alcanzar para los actuadores.

En las configuraciones singulares se pierden grados de libertad, por tanto algunos movimientos se vuelven imposibles de realizar. Todos los manipuladores robóticos presentan singularidades en los extremos del espacio de trabajo del robot.

A continuación se clasificarán estas singularidades en dos categorías:

- **Singularidades en la frontera del espacio de trabajo:** como se aprecia es cuando el robot se encuentra en alguno de sus extremos, ya sea el mayor o menor, en estos casos se pierden grados de libertad haciendo imposible alcanzar ciertas orientaciones.
- **Singularidades dentro del espacio de trabajo:** se presenta, generalmente, cuando se alinean dos o más ejes de las articulaciones del robot.

CAPÍTULO 10

DINÁMICA DEL MANIPULADOR ROBÓTICO

Con la dinámica del manipulador se describirá de forma explícita el vínculo entre la fuerza y el movimiento. Se estudiarán las relaciones, que expresan el movimiento debido a los momentos de torsión en el actuador o a las fuerzas externas presentes en el manipulador.

Estas ecuaciones relacionan matemáticamente:

- La localización del robot, su velocidad y aceleración.
- Las fuerzas y pares aplicadas en articulaciones o en el efector final.
- Los parámetros dimensionales del robot.

Con la obtención de estas, se logra la simulación, el diseño de la estructura y evaluación del control dinámico del robot, esta última permitiendo la precisión de los movimientos del robot. Para lograrlo, es necesario dar solución a dos problemas, el primero es cuando se conoce la trayectoria que debe describir el manipulador (q, \dot{q}, \ddot{q}) y se pretende conocer

el vector de momentos de torsión de la articulación y el segundo es cuando se aplica un momento de torsión a la articulación y se desea conocer como se moverá el mecanismo.

10.1. ACELERACIÓN DEL CUERPO RÍGIDO

Para cuerpos que presenten cambios en las velocidades angulares y/o lineales se tendrá que las aceleraciones lineales y angulares, las cuales están definidas como la derivada respecto al tiempo de las velocidades lineales y angulares respectivamente, como se muestra:

$${}^B\dot{V}_Q = \frac{d}{dt} {}^B V_Q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{{}^B V_Q(t + \Delta t) - {}^B V_Q(t)}{\Delta t} \quad (10.1)$$

$${}^A\dot{\omega}_B = \frac{d}{dt} {}^A \omega_B = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{{}^A \omega_B(t + \Delta t) - {}^A \omega_B(t)}{\Delta t} \quad (10.2)$$

Una conclusión importante del capítulo pasado fue encontrar las relaciones de velocidades entre los distintos sistemas ordenados que se ubican en un manipulador robótico, de ellas se pudieron obtener las siguientes expresiones:

$${}^A V_P = {}^A V_{P_{ORG}} + {}^A R_B {}^B V_P + {}^A \omega_B \times {}^A R_B {}^B P \quad (10.3)$$

$${}^A \omega_C = {}^A \omega_B + {}^A R_B {}^B \omega_C \quad (10.4)$$

Derivando estas expresiones podemos obtener las aceleraciones lineales y angulares. El resultado de esta derivada se muestra a continuación:

$${}^A\dot{V}_P = {}^A\dot{V}_{PORG} + {}^A R_B {}^B \dot{V}_P + 2 {}^A \omega_B \times {}^A R_B {}^B V_P + {}^A \dot{\omega}_B \times {}^A R_B {}^B P + {}^A \omega_B \times ({}^A \omega_B \times {}^A R_B {}^B P) \quad (10.5)$$

$${}^A \dot{\omega}_C = {}^A \dot{\omega}_B + {}^A R_B {}^B \dot{\omega}_C + {}^A \omega_B \times {}^A R_B {}^B \omega_C \quad (10.6)$$

10.2. DISTRIBUCIÓN DE LA MASA

debido a la gran complejidad que conlleva encontrar la inercia de un cuerpo rígido al cual se le permite moverse en tres dimensiones, por el número infinito de ejes de rotación que tendría, se debe encontrar una forma completa de caracterizar la masa de un cuerpo rígido. Para este fin se muestra el tensor de inercia, el cual generaliza la inercia de un cuerpo rígido, en una matriz de momento escalar.

Para esto se determina los tensores de inercia en relación con un sistema de referencia, se tomará el sistema de referencia unidos al cuerpo, aunque se puede conocer en cualquier sistema de referencia diferente.

El tensor de inercia relativo a un sistema de referencia A se expresa en forma de matriz como:

$${}^A I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (10.7)$$

en la cual cada elemento escalar están dados por:

$$\begin{aligned}
I_{xx} &= \int \int \int_v (y^2 + z^2) \rho d\nu; I_{xy} = \int \int \int_v xy \rho d\nu \\
I_{yy} &= \int \int \int_v (x^2 + z^2) \rho d\nu; I_{xz} = \int \int \int_v xz \rho d\nu \\
I_{zz} &= \int \int \int_v (x^2 + y^2) \rho d\nu; I_{yz} = \int \int \int_v yz \rho d\nu
\end{aligned} \tag{10.8}$$

Estas seis cantidades independientes dependerán para un cuerpo dado, de la posición y orientación del sistema de referencia en la que estén definidos. Cuando se alinean así los ejes del sistema de referencia se llaman ejes principales, y los momentos correspondientes son los momento principales de inercia.

Donde ρ es la densidad de material y $d\nu$ constituye los elementos del volumen diferencial. Estas seis ecuaciones dependen de la posición y orientación de la trama en la que se definan. Cuando se alineen los ejes de la trama de referencia se llaman ejes principales y los momentos de masas serán los momentos principales de inercia.

Para mirar como cambia el tensor de inercia bajo alguna traslación del sistema de coordenadas de referencia se usa el teorema de ejes paralelos, que permite relacionar el tensor de inercia en una trama cuyo origen esta en el centro de masa, con el tensor de inercia con respecto a otra trama de referencia. Cuando C se encuentra en el centro de masas del cuerpo y A es una trama trasladada de forma arbitraria, se define el teorema como:

$$\begin{aligned}
{}^A I_{zz} &= {}^C I_{zz} + m(x_c^2 + y_c^2) \\
{}^A I_{xy} &= {}^C I_{xy} - mx_c y_c
\end{aligned} \tag{10.9}$$

El teorema quedaría definido de forma vectorial matricial como:

$${}^A I = {}^C I + m [P_c^T P_c I_3 - P_c P_c^T] \tag{10.10}$$

Con los tensores es necesario tener en cuenta que:

- Si dos ejes de la trama de referencia forman un plano de simetría para la distribución de la masa del cuerpo, los productos de inercia que tenga como índice la coordenada que sea normal al plano de simetría serán cero.
- Los momentos de inercia siempre deben ser positivos. Los productos de inercia pueden tener cualquier signo.
- La suma de los tres momentos de inercia esta invariante bajo cambios de orientación en la trama de referencia
- Los valores propios de un tensor de inercia son los momentos principales para el cuerpo. Los vectores propios asociados son los ejes principales

EJEMPLO 10.1

encontrar el tensor de inercia para una paralelepípedo, el cual cuenta con una densidad volumétrica constante, respecto un sistema de referencia ubicado en una de sus esquinas, su representación gráfica junto con sus dimensiones son mostradas en la figura 10.1:

procediendo de acuerdo con las ecuaciones 10.8 el cálculo de los momentos de inercia sería:

$$I_{xx} = \int_0^h \int_0^l \int_0^w (y^2 + z^2) \rho dx dy dz$$

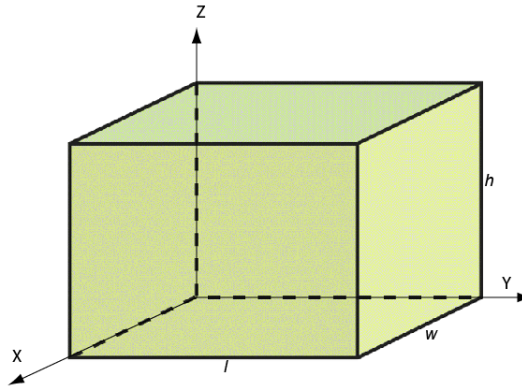
$$I_{xx} = \int_0^h \int_0^l (y^2 + z^2) w \rho dy dz$$

$$I_{xx} = \int_0^h \left(\frac{l^3}{3} + z^2 l \right) w \rho dz$$

$$I_{xx} = \left(\frac{hw l^3}{3} + \frac{h^3 w l}{3} \right) \rho$$

$$I_{xx} = \frac{m}{3} (l^2 + h^2)$$

Figura 10.1: paralelepípedo con densidad uniforme



Fuente: Autores de proyecto

Al realizar las estas ecuaciones con los otros valores de I_{yy} y I_{zz} se obtiene:

$$I_{yy} = \frac{m}{3} (w^2 + h^2)$$

$$I_{zz} = \frac{m}{3} (l^2 + h^2)$$

Ahora se procede a calcular los siguientes elementos del tensor de inercia:

$$I_{yz} = \int_0^h \int_0^l \int_0^w yz\rho dx dy dz$$

$$I_{yz} = w \int_0^h \int_0^l yz\rho dy dz$$

$$I_{yz} = \frac{wl^2}{2} \int_0^h z\rho dz$$

$$I_{yz} = \frac{\rho wl^2 h^2}{4}$$

$$I_{yz} = \frac{m}{4} lh$$

Al igual que en las integrales anteriores se puede de conseguir el resultado de las integrales faltantes permutando:

$$I_{xy} = \frac{m}{4} wl$$

$$I_{xz} = \frac{m}{4} hw$$

Por tanto el tensor de inercia resultante sería:

$$I = \begin{bmatrix} \frac{m}{3}(l^2 + h^2) & -\frac{m}{4}wl & -\frac{m}{4}hw \\ -\frac{m}{4}wl & \frac{m}{3}(w^2 + h^2) & -\frac{m}{4}hl \\ -\frac{m}{4}hw & -\frac{m}{4}hl & \frac{m}{3}(l^2 + w^2) \end{bmatrix}$$

10.3. ECUACIÓN DE NEWTON Y ECUACIÓN DE EULER

Conociendo la ubicación del centro de masas y el tensor de inercia del vínculo entonces su distribución de masa está caracterizada. La ecuación de Newton y la de Euler, muestran la relación de las fuerzas, inercias y aceleraciones.

10.3.1. Ecuación de Newton

La fuerza que actúa en el centro de masas y produce la aceleración del cuerpo se da mediante la ecuación

$$F = m\dot{v}_c \quad (10.11)$$

10.3.2. Ecuación de Euler

Cuerpo que gira con una velocidad angular ω y una aceleración angular $\dot{\omega}$, para determinar el momento \mathbf{N} que actúa sobre el cuerpo para producir movimiento se da por la ecuación

$$N = {}^c I \dot{\omega} + \omega \times {}^c I \omega \quad (10.12)$$

Donde ${}^c I$ es el tensor de inercia del cuerpo escrito en una trama C, cuyo origen se encuentra en el centro de masas.

10.4. ESTRUCTURA DE LAS ECUACIONES DINÁMICAS DE UN MANIPULADOR

10.4.1. Ecuación en el espacio de estados

Las ecuaciones que resultan de resolver el problema dinámico con la formulación de Newton-Euler se pueden representar simbólicamente para cualquier manipulador de la siguiente manera:

$$\tau = D(q) \cdot \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) \quad (10.13)$$

Donde D es una matriz de inercias cuya dimensión es $(n \times n)$ que depende de las variables articulares, H es un vector de términos centrífugos y fuerzas de coriolis de dimensión $(n \times 1)$ dependiente de las variables articulares y sus derivadas, C es un vector de fuerzas de gravedad $(n \times 1)$ dependiente de las variables articulares, y τ representa el vector de fuerzas o pares que se aplican a cada articulación.

10.4.2. Ecuación en el espacio de la configuración

Si se toma en cuenta que las matrices vinculadas a la ecuación en el espacio de estados solo H es función de Q Y \dot{q} por tanto se logra reescribir la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$\tau = D(q) \cdot \ddot{q} + B(q) \cdot [\dot{q}\dot{q}] + A(q) \cdot [\dot{q}^2] + C(q) \quad (10.14)$$

Donde la matriz B es una matriz de coeficientes de Coriolis de dimensión $n \times n(n - 1)/2$; $[\dot{q}\dot{q}]$ es un vector de productos de velocidades articulares de dimensión $(n(n - 1)/2 \times 1)$ dado por la expresión:

$$[\dot{q}\dot{q}] = [\dot{q}_1 \dot{q}_2 \quad \dot{q}_2 \dot{q}_3 \quad \dots \quad \dot{q}_{n-1} \dot{q}_n] \quad (10.15)$$

Y siendo A una matriz cuadrada de dimensión $n \times n$ de coeficientes centrífugos donde el vector $[\dot{q}^2]$ de dimensión $n \times 1$ dado por la siguiente expresión:

$$[\dot{q}^2] = [\dot{q}_1^2 \quad \dot{q}_2^2 \quad \dots \quad \dot{q}_n^2]^T \quad (10.16)$$

Se puede observar que la nueva expresión de la ecuación que define el modelo dinámico las matrices en él están en función de solo función de los valores de las variables articulares. Ahora la complejidad se encuentra en el cálculo de todos estos parámetros, además representa una importante ventaja en aplicaciones como el control computacional de los manipuladores, el cual se abordará más adelante.

10.5. MODELO DINÁMICO POR FORMULACIÓN LAGRANGIANA

La formulación Lagrangiana es un método de obtención del modelo dinámico a partir de un balance de energía, a diferencia del método de Newton-Euler el cual se basa en un balance de fuerzas dinámicas. Por esta razón al trabajar con expresiones escalares, como lo son las expresiones de energía, se puede formular la mecánica de una forma que es equivalente para cualquier sistema de coordenadas, sean cartesianas o no.

Definiendo primero una expresión para la energía cinética de un eslabón i -ésimo con la siguiente expresión:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i v_{C_i}^T v_{C_i} + \frac{1}{2} {}^i \omega_i^T I_i^i \omega_i \quad (10.17)$$

Donde se puede distinguir que el primer término de la ecuación representa la energía cinética producida por la velocidad lineal del eslabón y el segundo la producida por la velocidad angular del mismo. Por tanto la energía cinética del manipulador será la suma de las energías cinéticas de los eslabones, esto es:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i \quad (10.18)$$

Las velocidades angulares y lineales de cada eslabón es función de sus variables articulares ($[\dot{q}\dot{q}]$), por tanto la energía cinética del manipulador también es función de estas. La energía cinética del manipulador es definida mediante la siguiente expresión:

$$k(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (10.19)$$

Donde D es la matriz definida anteriormente como de inercias de dimensión $(n \times n)$. Esta ecuación puede verse como una expresión análoga a la conocida ecuación de energía cinética de masas puntuales:

$$k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (10.20)$$

Ahora se pasa a definir una ecuación para la energía potencial u de cada eslabón i , de la siguiente forma:

$$u_i = -m_i {}^0g^T p_{C_i} + u_{ref} \quad (10.21)$$

Al igual que la energía cinética, se hace una sumatoria de las energías potenciales de cada eslabón para calcular la energía potencial total del manipulador, que se representa de la siguiente expresión:

$$u = \sum_{i=1}^n u_i \quad (10.22)$$

Donde 0g es el vector gravedad de dimensión (3×1) ; es el vector que describe la ubicación del centroide del i -ésimo eslabón, que es solo función de las variables articulares (q), u_{ref} es una constante tomada arbitrariamente para que el valor mínimo de sea cero. Analizando la ecuación se puede observar que la energía potencial total es solo función de q .

Por tanto usando el Lagrangiano, que es una función que relaciona la energía cinética con la energía potencial para un sistema mecánico, se obtiene la siguiente expresión

para el manipulador:

$$L(q, \dot{q}) = k(q, \dot{q}) - u(q) \quad (10.23)$$

Y la ecuación de movimiento del manipulador será entonces:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (10.24)$$

Donde τ representa el vector que contiene los pares y fuerzas en los actuadores de las articulaciones. Esta ecuación se puede escribir también de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial k}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial k}{\partial q} + \frac{\partial u}{\partial q} = \tau \quad (10.25)$$

Ejemplo 10.2

Se tiene un robot manipulador de 2 grados de libertad como el que se muestra en la figura 10.2

los siguientes tensores de inercia:

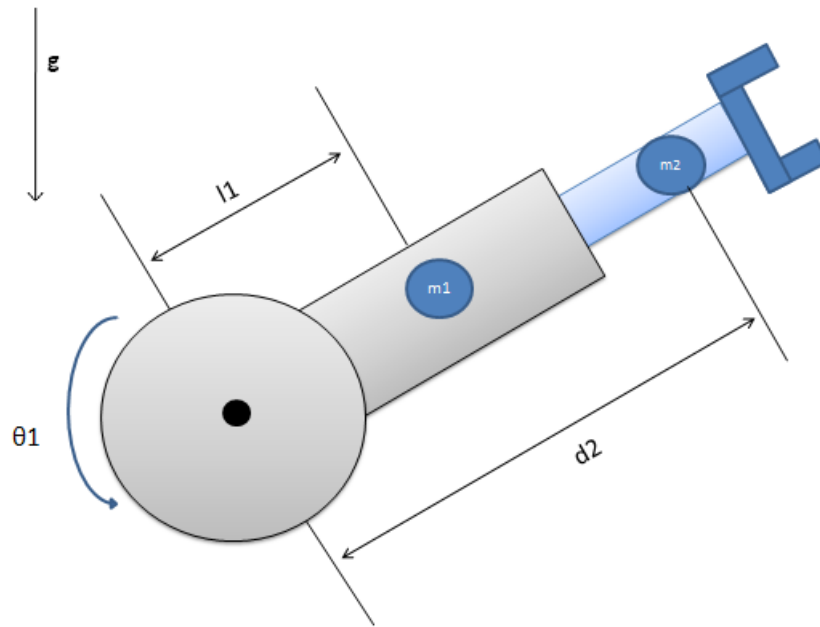
$$I_1 = \begin{bmatrix} I_{xx1} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy1} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz1} \end{bmatrix} \quad (10.26)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} I_{xx2} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy2} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz2} \end{bmatrix} \quad (10.27)$$

Las masa, longitudes y ángulos son las que se muestran en la figura, donde los valores θ_1 y d_2 son variables representando los grados de libertad. Se procederá a encontrar la energía cinética de cada eslabón así como su energía potencial, los cual permitirá encontrar las energías totales del manipulador, resolviendo así el modelo dinámico. Empezando por las energías cinéticas se tiene:

$$k_1 = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{zz1} \dot{\theta}_1^2 \quad (10.28)$$

Figura 10.2: Robot polar vertical



Fuente: Autores de proyecto

$$k_2 = \frac{1}{2}m_2(d_2^2\dot{\theta}_1^2 + \dot{d}_2^2) + \frac{1}{2}I_{zz2}\dot{\theta}_1^2 \quad (10.29)$$

Por tanto la energía cinética del manipulador, agrupando términos, sería:

$$k(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}(m_1l_1^2 + I_{zz1} + I_{zz2} + m_2d_2^2)\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{d}_2^2 \quad (10.30)$$

Ahora se procede con las energías potenciales:

$$\begin{aligned} u_1 &= m_1l_1g\text{sen}(\theta_1) + m_1l_1g \\ u_2 &= m_2gd_2\text{sen}(\theta_1) + m_2d_{2mx}g \end{aligned} \quad (10.31)$$

Por tanto la energía potencial total es:

$$u(q) = g(m_1l_1 + m_2d_2)\text{sen}(\theta_1) + m_1l_1g + m_2gd_{2mx} \quad (10.32)$$

Se calcula las derivadas parciales respecto a las variables articulares tal como se muestra en las ecuaciones que definen el modelo dinámico y se obtiene:

$$\frac{\partial k}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} (m_1 l_1^2 + I_{zz1} + I_{zz2} + m_2 d_2^2) \dot{\theta}_1 \\ m_2 \dot{d}_2 \end{bmatrix} \quad (10.33)$$

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \begin{bmatrix} 0 \\ m_2 d_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad (10.34)$$

$$\frac{\partial u}{\partial q} = \begin{bmatrix} g(m_1 l_1 + m_2 d_2) \cos(\theta_1) \\ gm_2 \text{sen}(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (10.35)$$

Ahora se calcula $\frac{d}{dt} \frac{\partial k}{\partial \dot{q}}$ tal que:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial k}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} (m_1 l_1^2 + I_{zz1} + I_{zz2} + m_2 d_2^2) \ddot{\theta}_1 + 2m_2 d_2 \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 \\ m_2 \ddot{d}_2 \end{bmatrix} \quad (10.36)$$

Se reemplaza en la ecuación que define el torque de los actuadores y se obtiene

$$\tau_1 = (m_1 l_1^2 + I_{zz1} + I_{zz2} + m_2 d_2^2) \ddot{\theta}_1 + 2m_2 d_2 \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 + g(m_1 l_1 + m_2 d_2) \cos(\theta_1) \quad (10.37)$$

$$\tau_2 = m_2 \ddot{d}_2 - m_2 d_2 \dot{\theta}_1^2 + gm_2 \text{sen}(\theta_1) \quad (10.38)$$

Por tanto si se retoma la ecuación

$$\tau = D(q) \cdot \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) \quad (10.39)$$

Se puede observar que para este robot la ecuación sería expresada de la siguiente manera

$$\tau = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + I_{zz1} + I_{zz2} + m_2 d_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2m_2 d_2 \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 \\ -m_2 d_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g(m_1 l_1 + m_2 d_2) \cos(\theta_1) \\ gm_2 \text{sen}(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (10.40)$$

Donde:

$$D(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + I_{zz1} + I_{zz2} + m_2 d_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (10.41)$$

$$H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 2m_2 d_2 \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 \\ -m_2 d_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad (10.42)$$

$$C(q) = \begin{bmatrix} g(m_1 l_1 + m_2 d_2) \cos(\theta_1) \\ gm_2 \text{sen}(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (10.43)$$

Partiendo de la ecuación de Lagrange y usando las matrices de transformación homogéneas, se logró estructurar un método para la obtención del modelo dinámico de un manipulador. Este presenta algunas operaciones redundantes, ya que las matrices de transformación son redundantes en si por la orto normalidad de la submatriz de rotación. Lo cual conlleva a que sea ineficiente en una aplicación computacional, el algoritmo computacional para este método muestra una complejidad de n^4 , pero lleva a ecuaciones bien estructuradas, ya que se aprecian fácilmente las fuerzas y torques que actúan sobre el manipulador.

10.5.1. Modelo dinámico de un robot partiendo del algoritmo computacional de Lagrange

Con el fin de encontrar las matrices D, HyC , que definen el modelo dinámico de un manipulador se creó este algoritmo, el cual consta de los siguientes pasos

- Asociar sistemas de referencia a cada eslabón de acuerdo a las normas Denavit-Hartenberg.
- Se obtiene cada matriz 0A_i para cada eslabón i .

- Obtener las matrices U_{ij} , de la siguiente manera:

$$U_{ij} = \frac{\partial^0 A_i}{\partial q_j} \quad (10.44)$$

Donde

$$\frac{\partial^0 A_i}{\partial q_j} = \begin{cases} {}^0A_{j-1}Q_j^{j-1}A_i & \text{si } j \leq i \\ [0] & \text{si } j > i \end{cases} \quad (10.45)$$

Con:

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10.46)$$

si la articulación i es de rotación. Si es prismático se utiliza la expresión

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10.47)$$

- Conseguir las matrices U_{ijk} de la siguiente forma:

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial q_k} = \frac{\partial}{\partial q_k} \left(\frac{\partial^0 A_i}{\partial q_j} \right) = \begin{cases} {}^0A_{j-1}Q_j^{j-1}A_{k-1}Q_k^{k-1}A_i; & \text{si } i \geq k \geq j \\ {}^0A_{k-1}Q_k^{k-1}A_{j-1}Q_j^{j-1}A_i; & \text{si } i \geq j \geq k \\ [0]; & \text{si } k > i \text{ o } j > i \end{cases} \quad (10.48)$$

- Conseguir las matrices de pseudoinercias J_i para cada eslabón, las cuales están

definidas por:

$$J_i = \begin{bmatrix} \int_i x_i^2 dm & \int_i x_i y_i dm & \int_i x_i z_i dm & \int_i x_i dm \\ \int_i y_i x_i dm & \int_i y_i^2 dm & \int_i y_i z_i dm & \int_i y_i dm \\ \int_i z_i x_i dm & \int_i z_i y_i dm & \int_i z_i^2 dm & \int_i z_i dm \\ \int_i x_i dm & \int_i y_i dm & \int_i z_i dm & \int_i dm \end{bmatrix} \quad (10.49)$$

Donde:

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-Ix_i + Iy_i + Iz_i) & Ix_i y_i & Ix_i z_i & \int_i m_i x_i \\ Ix_i y_i & \frac{1}{2}(Ix_i - Iy_i + Iz_i) & Iy_i z_i & \int_i m_i y_i \\ Ix_i z_i & Iy_i z_i & \frac{1}{2}(Ix_i + Iy_i - Iz_i) & \int_i m_i z_i \\ \int_i m_i x_i & \int_i m_i y_i & \int_i m_i z_i & \int_i m_i \end{bmatrix} \quad (10.50)$$

Con:

$$\begin{aligned} Ix_i &= \int_i (y_i^2 + z_i^2) dm & Iy_i &= \int_i (x_i^2 + z_i^2) dm & Iz_i &= \int_i (x_i^2 + y_i^2) dm \\ Ipq &= \int_i pqdmp \neq qp, q = x_i, y_i, z_i \end{aligned} \quad (10.51)$$

Esta matriz de pseudoinercias está definida para cada elemento i , por tanto cada integral será evaluada respecto a al sistema de coordenadas del elemento a evaluar.

- Conseguir la matriz D . Los elementos de esta matriz están dados por la siguiente expresión:

$$d_{ij} = \sum_{k=(mxi,j)}^n \text{Traza}(U_{kj} J_k U_{ki}^T) \quad (10.52)$$

Donde $i, j = 1, 2, 3$ hasta n ; n : numero de grados de libertad. Las matrices D, J son simétricas y por definición positivas.

- Conseguir los términos H dados por:

$$H = [h_i]^T \quad (10.53)$$

Con:

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m \quad (10.54)$$

Siendo

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n \text{Traza}(U_{ikm} J_j U_{ji}^T) \quad (10.55)$$

El término h_{ikm} representa la fuerza o par que se genera sobre el elemento i a causa del movimiento relativo entre los elementos k y m , por tanto:

$$\begin{aligned} h_{ikm} &= h_{imk} \\ h_{iii} &= 0 \end{aligned} \quad (10.56)$$

- Ahora se consigue la matriz C de la siguiente forma:

$$C = [c_i]^T \quad (10.57)$$

con

$$c_i = \sum_{j=1}^n (-m_j g U_{ji}^j r_j) \quad (10.58)$$

Donde g es el vector gravedad respecto al sistema fijo en coordenadas homogéneas $(gx_0, gy_0, gz_0, 0)$ y r es el vector de posición del centro de masa del elemento expresado en coordenadas homogéneas sobre el sistema de referencia del mismo elemento.

Cuadro 10.1: Comparación entre los diferentes métodos de representación espacial.

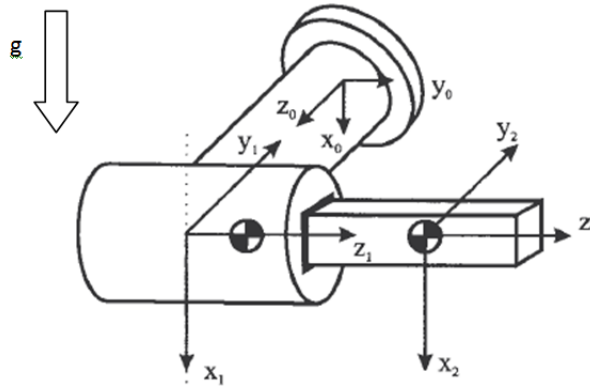
Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	0	0	-90
2	0	d_2	0	0

Fuente: Autores de proyecto

EJEMPLO 10.3

Encontrar el modelo dinámico de un robot polar de dos grados de libertad figura 10.3

Figura 10.3: Robot polar de 2 GDL en configuración horizontal



Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

Siguiendo los pasos descritos anteriormente se procede a calcular las matrices de transformación homogéneas. Los parámetros D-H son mostrados en la tabla 10.1

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\text{sen} \theta_1 & 0 \\ \text{sen} \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad {}^1A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10.59)$$

Por tanto:

$${}^0A_2 = {}^0A_1 {}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\text{sen} \theta_1 & -d_2 \text{sen} \theta_1 \\ \text{sen} \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & d_2 \cos \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10.60)$$

Se calcula las matrices $U : ij$:

$$U_{11} = \frac{\partial {}^0A_1}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -\text{sen} \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ \cos \theta_1 & 0 & -\text{sen} \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{12} = \frac{\partial {}^0A_1}{\partial d_2} = [0] \quad (10.61)$$

$$U_{21} = \frac{\partial {}^0A_2}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -\text{sen} \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & -d_2 \cos \theta_1 \\ \cos \theta_1 & 0 & -\text{sen} \theta_1 & -d_2 \text{sen} \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; U_{22} = \frac{\partial {}^0A_2}{\partial d_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\text{sen} \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10.62)$$

Se calcula las matrices U_{ijk} :

$$U_{111} = \frac{\partial U_{11}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 & 0 & \text{sen} \theta_1 & 0 \\ -\text{sen} \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; U_{112} = \frac{\partial U_{11}}{\partial d_2} = [0] \quad (10.63)$$

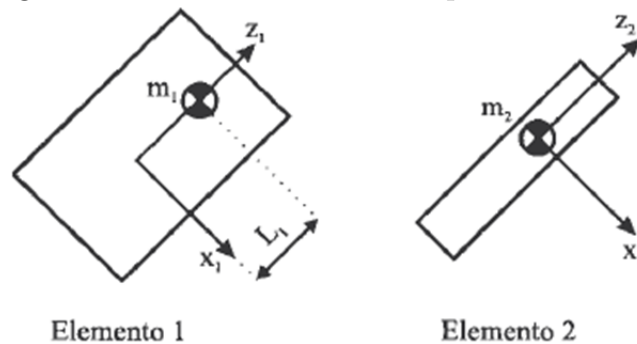
$$U_{121} = \frac{\partial U_{12}}{\partial \theta_1} = [0]; U_{122} = \frac{\partial U_{12}}{\partial d_2} = [0] \quad (10.64)$$

$$U_{211} = \frac{\partial U_{21}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 & 0 & \text{sen} \theta_1 & d_2 \text{sen} \theta_1 \\ -\text{sen} \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & -d_2 \cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; U_{212} = \frac{\partial U_{21}}{\partial d_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen} \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10.65)$$

$$U_{221} = \frac{\partial U_{22}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen} \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; U_{222} = \frac{\partial U_{22}}{\partial d_2} = [0] \quad (10.66)$$

Se calcula las matrices J_i de pseudoinercias, la figura 12.6 muestra como están ubicados los sistemas de coordenadas y los centros de masa:

Figura 10.4: Elementos del robot polar de 2 GDL



Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

De esta forma se calculan las matrices con la siguiente expresión:

$$J_i = \begin{bmatrix} \int_i x_i^2 dm & \int_i x_i y_i dm & \int_i x_i z_i dm & \int_i x_i dm \\ \int_i y_i x_i dm & \int_i y_i^2 dm & \int_i y_i z_i dm & \int_i y_i dm \\ \int_i z_i x_i dm & \int_i z_i y_i dm & \int_i z_i^2 dm & \int_i z_i dm \\ \int_i x_i dm & \int_i y_i dm & \int_i z_i dm & \int_i dm \end{bmatrix} \quad (10.67)$$

Desarrollando las integrales precisadas se encuentra que:

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 L_1^2 & m_1 L_1 \\ 0 & 0 & m_1 L_1 & m_1 \end{bmatrix} ; \quad J_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (10.68)$$

Calculo de las matrices d_{ij} :

$$d_{11} = \sum_{k=(mx1,1)}^2 \text{Traza}(U_{k1} J_k U_{k1}^T) = \text{Tr}(U_{11} J_1 U_{11}^T) + \text{Tr}(U_{21} J_2 U_{21}^T) \quad (10.69)$$

Se vuelve a usar la simplificación de representar el coseno (cos) con solo la letra C, al igual que el seno (sen) con la letra S:

$$\begin{aligned} d_{11} &= \text{Tr} \begin{bmatrix} C_1^2 L_1^2 m_1 & S_1 C_1 L_1^2 m_1 & 0 & 0 \\ C_1 S_1 L_1^2 m_1 & S_1^2 L_1^2 m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \text{Tr} \begin{bmatrix} C_1^2 d_2^2 m_2 & S_1 C_1^2 m_2 & 0 & 0 \\ S_1 C_1 d_2^2 m_2 & S_1^2 d_2^2 m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &= (C_1^2 + S_1^2) m_1 L_1^2 + (C_1^2 + S_1^2) d_2^2 m_2 = m_1 L_1^2 + m_2 d_2^2 \end{aligned} \quad (10.70)$$

$$\begin{aligned} d_{12} &= \sum_{k=(mx1,2)}^2 \text{Traza}(U_{k2} J_k U_{k1}^T) = \text{Tr}(U_{22} J_2 U_{21}^T) = \\ &= \text{Tr} \begin{bmatrix} S_1 C_1 d_2 m_2 & S_1^2 d_2 m_2 & 0 & 0 \\ -C_1^2 d_2 m_2 & -S_1 C_1 d_2 m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = S_1 C_1 d_2 m_2 - S_1 C_1 d_2 m_2 = 0 \end{aligned} \quad (10.71)$$

$$\begin{aligned}
d_{21} &= \sum_{k=(mx2,1)}^2 \text{Traza}(U_{k1}J_kU_{k2}^T) = \text{Tr}(U_{21}J_2U_{22}^T) = \\
&= \text{Tr} \begin{bmatrix} S_1C_1d_2m_2 & -C_1^2d_2m_2 & 0 & 0 \\ S_1^2d_2m_2 & -S_1C_1d_2m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = S_1C_1d_2m_2 - S_1C_1d_2m_2 = 0
\end{aligned} \tag{10.72}$$

$$\begin{aligned}
d_{22} &= \sum_{k=(mx2,2)}^2 \text{Traza}(U_{k2}J_kU_{k2}^T) = \text{Tr}(U_{22}J_2U_{22}^T) = \\
&= \text{Tr} \begin{bmatrix} S_1^2m_2 & -S_1C_1m_2 & 0 & 0 \\ -S_1C_1m_2 & C_1^2m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = S_1^2m_2 + C_1^2m_2 = m_2
\end{aligned} \tag{10.73}$$

Por tanto la matriz D sería:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1L_1^2 + m_2d_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \tag{10.74}$$

Se procede con el cálculo de las matrices h_{ikm} :

$$\begin{aligned}
h_{111} &= \sum_{j=\max(1,1,1)}^2 \text{Traza}(U_{j11}J_jU_{j1}^T) = \text{Tr}(U_{111}J_1U_{11}^T) + \text{Tr}(U_{211}J_2U_{21}^T) = \\
&= \text{Tr} \begin{bmatrix} -C_1S_1m_1L_1^2 & -S_1^2m_1L_1^2 & 0 & 0 \\ C_1^2m_1L_1^2 & C_1S_1m_1L_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \text{Tr} \begin{bmatrix} S_1C_1d_2^2m_2 & S_1^2d_2^2m_2 & 0 & 0 \\ C_1^2d_2^2m_2 & S_1C_1d_2^2m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} =
\end{aligned} \tag{10.75}$$

$$= -C_1S_1m_1L_1^2 + C_1S_1m_1L_1^2 - d_2^2S_1C_1m_2 + d_2^2S_1C_1m_2 = 0 \tag{10.76}$$

$$h_{112} = \sum_{j=\max(1,1,2)}^2 \text{Traza}(U_{j12}J_jU_{j1}^T) = \text{Tr}(U_{212}J_2U_{21}^T) = \tag{10.77}$$

$$= Tr \begin{bmatrix} C_1^2 d_2 m_2 & S_1 C_1 d_2 m_2 & 0 & 0 \\ S_1 C_1 d_2 m_2 & S_1^2 d_2 m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = C_1^2 d_2 m_2 + S_1^2 d_2 m_2 = d_2 m_2$$

$$h_{121} = \sum_{j=\max(1,2,1)}^2 Traza (U_{j21} J_j U_{j1}^T) = Tr (U_{221} J_2 U_{21}^T)$$

Ya que:

$$U_{221} = U_{212} \Rightarrow h_{121} = h_{112} = d_2 m_2 \quad (10.78)$$

$$h_{211} = \sum_{j=\max(2,1,1)}^2 Traza (U_{j11} J_j U_{j2}^T) = Tr (U_{211} J_2 U_{22}^T) = \quad (10.79)$$

$$= Tr \begin{bmatrix} -S_1^2 d_2 m_2 & S_1 C_1 d_2 m_2 & 0 & 0 \\ S_1 C_1 d_2 m_2 & -C_1^2 d_2 m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = -S_1^2 d_2 m_2 - C_1^2 d_2 m_2 = -d_2 m_2$$

$$h_{122} = \sum_{j=\max(1,2,2)}^2 Traza (U_{j22} J_j U_{j1}^T) = Tr (U_{222} J_2 U_{21}^T) = 0 \quad (10.80)$$

$$h_{212} = \sum_{j=\max(2,1,2)}^2 Traza (U_{j12} J_j U_{j2}^T) = Tr (U_{212} J_2 U_{22}^T) = \quad (10.81)$$

$$= Tr \begin{bmatrix} S_1 C_1 m_2 & -C_1^2 m_2 & 0 & 0 \\ S_1^2 m_2 & -S_1 C_1 m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = S_1 C_1 m_2 - S_1 C_1 m_2 = 0 \quad (10.82)$$

$$h_{221} = \sum_{j=\max(2,2,1)}^2 Traza (U_{j21} J_j U_{j2}^T) = Tr (U_{221} J_2 U_{22}^T) \quad (10.83)$$

Ya que:

$$U_{221} = U_{212} \Rightarrow h_{221} = h_{212} = 0 \quad (10.84)$$

$$h_{222} = \sum_{j=\max(2,2,2)}^2 \text{Traza}(U_{j22}J_jU_{j2}^T) = \text{Tr}(U_{222}J_2U_{22}^T) = 0 \quad (10.85)$$

Se calcula las matrices columna h_i :

$$\begin{aligned} h_1 &= \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 h_{1km} \dot{q}_k \dot{q}_m = h_{111} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{112} \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + h_{121} \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 + h_{122} \dot{d}_2 \dot{d}_2 = \\ &= 0 \cdot \dot{\theta}_1^2 + (d_2 m_2 + d_2 m_2) \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + 0 \cdot \dot{d}_2^2 = 2d_2 m_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \end{aligned} \quad (10.86)$$

$$\begin{aligned} h_2 &= \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 h_{2km} \dot{q}_k \dot{q}_m = h_{211} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{212} \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + h_{221} \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 + h_{222} \dot{d}_2 \dot{d}_2 = \\ &= -d_2 m_2 \dot{\theta}_1^2 + (0 + 0) \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + 0 \cdot \dot{d}_2^2 = -d_2 m_2 \dot{\theta}_1^2 \end{aligned} \quad (10.87)$$

Por tanto la matriz H estará dada por:

$$H = \begin{bmatrix} 2d_2 m_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ -d_2 m_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad (10.88)$$

Se procede con el cálculo de la los valores c_i :

$$c_i = \sum_{j=1}^N (-m_j g U_{j1}^j r_j) \quad (10.89)$$

Se sabe que el vector gravedad para este ejemplo en coordenadas homogéneas es:

$$g = [g, 0, 0, 0] \quad (10.90)$$

Y los vectores que indican la posición del centro de masa de cada eslabón respecto a su respectivo sistema de referencia son:

$$\begin{aligned} {}^1r_1 &= [0, 0, L_1, 1]^T \\ {}^2r_2 &= [0, 0, 0, 1]^T \end{aligned} \quad (10.91)$$

Reemplazando en la ecuación de c_i :

$$c_1 = -m_1[g, 0, 0, 0] \begin{bmatrix} -C_1L_1 \\ -S_1L_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - m_2[g, 0, 0, 0] \begin{bmatrix} -C_1d_2 \\ -S_1d_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = m_1gL_1C_1 + m_2gd_2C_1 \quad (10.92)$$

$$c_2 = -m_1[g, 0, 0, 0] [0] - m_2[g, 0, 0, 0] \begin{bmatrix} -S_1 \\ C_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = m_2gS_1 \quad (10.93)$$

Quedando la matriz C :

$$C = \begin{bmatrix} m_1gL_1C_1 + m_2gd_2C_1 \\ m_2gS_1 \end{bmatrix} \quad (10.94)$$

Con estas tres matrices (D, H, C) se soluciona la dinámica del manipulador usando la expresión:

$$\tau = D(q) \cdot \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) \quad (10.95)$$

llegando finalmente a la expresión que representa el modelo dinámico de un manipulador cilíndrico de GDL:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1L_1^2 + m_2d_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2d_2m_2\dot{\theta}_1\dot{d}_2 \\ -d_2m_2\dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1gL_1C_1 + m_2gd_2C_1 \\ m_2gS_1 \end{bmatrix} \quad (10.96)$$

Donde τ_1 y F_1 representan el torque que debe realizar el motor en la primera articulación y la fuerza del actuador en la segunda.

Se puede apreciar que los resultados obtenidos al resolver por ambos métodos este

robot polar de 2 GDL son iguales, con excepción de los tensores de inercia I_{xx1} y I_{xx2} los cuales se vuelven cero porque toda la masa está concentrada en sus respectivos centros de gravedad, comprobando que el algoritmo computacional puede ayudar a resolver este tipo de problemas en los casos en que los grados de libertad son mayores de tres, donde los cálculos que se incrementarían notablemente.

10.6. MODELO DINÁMICO DE UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE LA FORMULACIÓN DE NEWTON-EULER.

La elaboración del modelo dinámico de un robot a partir de la formulación Lagrangiana transfiere a un algoritmo con un valor computacional de orden $O(n^4)$. Es decir, el número de operaciones a realizar crece con la potencia cuarta del número de grados de libertad. En el caso habitual de robots de 6 grados de libertad, este número de operaciones hace al algoritmo presentado en el tema anterior, materialmente inutilizable para ser utilizado en tiempo real.

La formulación de Newton-Euler parte del equilibrio de fuerzas y pares para cada elemento es:

$$\begin{aligned}\sum F_i &= \frac{d}{dt}(m_i v_i) = m_i \dot{v}_i \\ \sum T_i &= \frac{d}{dt}(I_i \omega_i) = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i)\end{aligned}\tag{10.97}$$

Donde: F_i = son las fuerzas ejercidas sobre la barra i

T_i = son los pares ejercidos sobre la barra i en torno a su centro de masa

M_i = es la masa de la barra i

I_i = es el tensor de inercia de la barra i en torno a su centro de masas, expresado en el sistema de referencia (S_i)

v_i = son la velocidad y aceleración lineales del centro de masas de la articulación i

w_i = son la velocidad y aceleración angular de la articulación i

Un apropiado desarrollo de estas ecuaciones conduce a una formulación recursiva en la que se obtienen la posición, velocidad y aceleración del eslabón i referida a la base del robot a partir de los correspondientes del eslabón $i - 1$ y del movimiento relativo de la articulación i . De este modo, partiendo del eslabón 1 se llega al eslabón n . Con estos datos se procede a obtener las fuerzas y pares actuantes sobre el eslabón i referidos a la base del robot a partir de los correspondientes al eslabón $i + 1$, recorriéndose de esta forma todos los eslabones desde el eslabón n al eslabón 1.

El algoritmo se basa en operaciones vectoriales (con productos escalares y vectoriales entre magnitudes vectoriales, y productos de matrices con vectores) siendo más eficiente en comparación con las operaciones matriciales asociadas a la formulación Lagrangiana. De hecho, el orden de complejidad computacional de la formulación recursiva de Newton-Euler es $O(n)$ lo que indica que depende directamente del número de grados de libertad.

10.6.1. Algoritmo computacional del modelo dinámico de un robot de acuerdo a la formulación de Newton-Euler

El presente algoritmo presenta una forma computacional alternativa para el modelado dinámico de un robot manipulador.

- Se asigna a cada eslabón un sistema de referencia de acuerdo con las normas de D-H y establecer las condiciones iniciales.

Para el sistema de la base S_o

$${}^0w_0 = \text{velocidad angular} = [0, 0, 0]^T$$

$${}^0\dot{w}_0 = \text{aceleración angular} = [0, 0, 0]^T$$

$${}^0v_0 = \text{velocidad lineal} = [0, 0, 0]^T$$

${}^0\dot{v}_0 = \text{aceleración lineal} = [g_{x0}, g_{y0}, g_{z0}]^T$

${}^0\omega_0, {}^0\dot{\omega}_0, {}^0v_0$ Son típicamente nulos salvo que la base del robot este en movimiento.

$[g_{x0}, g_{y0}, g_{z0}]^T$ es el vector de gravedad expresado en S_o (habitualmente se toma el valor $[0, 0, -9,8]$ pues z_0 se sitúa vertical hacia arriba.) Para el extremo del robot se conocerá la fuerza y el par ejercidos externamente ${}^{n+1}f_{n+1}$ y ${}^{n+1}n_{n+1}$.

$Z_0 = [0, 0, 1]^T$

${}^i p_i =$ vector que une el origen S_{i-1} con el de S_i expresadas en $S_i = [a_i, d_i \text{sen}(\alpha_i), d_i \text{cos}(\alpha_i)]$

${}^i s_i =$ coordenadas del centro de masa del eslabón i respecto del sistema S_i

${}^i J_i =$ matriz de inercia del eslabón i expresado en un sistema paralelo al S_i y con el origen en el centro de masa del eslabón.

- Obtener las matrices de rotación y sus inversas (${}^{i-1}R_i$ y ${}^{i-1}R_i^{-1}$)

$${}^{i-1}R_i = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & S\alpha_i C\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i \end{pmatrix} \quad (10.98)$$

Además se tiene que

$${}^i R_{i-1} = {}^i R_{i-1}^{-1} = {}^i R_{i-1}^T \quad (10.99)$$

- Obtener la velocidad angular del sistema $\{S_i\}$

$${}^i \omega_i = {}^i R_{i-1} ({}^{i-1} \omega_{i-1}) + z_0 \dot{q} \quad (10.100)$$

Sí el eslabón i es de rotación.

$${}^i R_{i-1} {}^{i-1} \omega_{i-1} \quad (10.101)$$

Sí el eslabón i es de traslación.

- Obtener la aceleración angular del sistema $\{S_i\}$

$${}^i\dot{\omega}_i = {}^iR_{i-1} ({}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} + z_0\ddot{q}_i) \quad (10.102)$$

Sí el eslabón i es de rotación.

$${}^i\dot{\omega}_i = {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \quad (10.103)$$

Sí el eslabón i es de traslación.

- Obtener la aceleración lineal del sistema i :

$${}^i\dot{v}_i = {}^i\dot{\omega}_i {}^i p_i + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i p_i) + {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\dot{v}_{i-1} \quad (10.104)$$

Sí el eslabón i es de rotación.

$${}^i\dot{v}_i = \left\{ \begin{array}{l} {}^iR_{i-1}(z_0\ddot{q}_1 + {}^{i-1}\dot{v}_{i-1}) + {}^i\omega_i \times {}^i p_i + 2{}^i\omega_i \times {}^iR_{i-1}z_0 \\ + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i p_i) \end{array} \right\} \quad (10.105)$$

Sí el eslabón i es de traslación.

- Obtener la aceleración lineal del centro de gravedad del eslabón i :

$${}^i a_i = {}^i\dot{\omega}_i \times {}^i s_i + {}^i\dot{\omega}_i \times ({}^i\dot{\omega}_i \times {}^i s_i) + {}^i\dot{v}_i \quad (10.106)$$

- Obtener la fuerza ejercida sobre el eslabón i :

$${}^i f_i = {}^iR_{i+1} {}^{i+1}f_{i+1} + m_i {}^i a_i \quad (10.107)$$

- Obtener el par ejercido sobre el eslabón i :

$${}^i n_i = {}^iR_{i+1} [{}^{i+1}n_i ({}^{i+1}R_i {}^i p_i) \times {}^{i+1}f_{i+1}] + ({}^i p_i {}^i s_i) \times m_i {}^i a_i \quad (10.108)$$

$${}^i J_i {}^i \dot{\omega}_i + {}^i \dot{\omega}_i \times ({}^i J_i {}^i \omega_i)$$

- Obtener la fuerza o par aplicado sobre la articulación i :

$$\tau_i = {}^i n_i^T R_{i-1} z_0 \quad (10.109)$$

Sí el articulación i es de rotación.

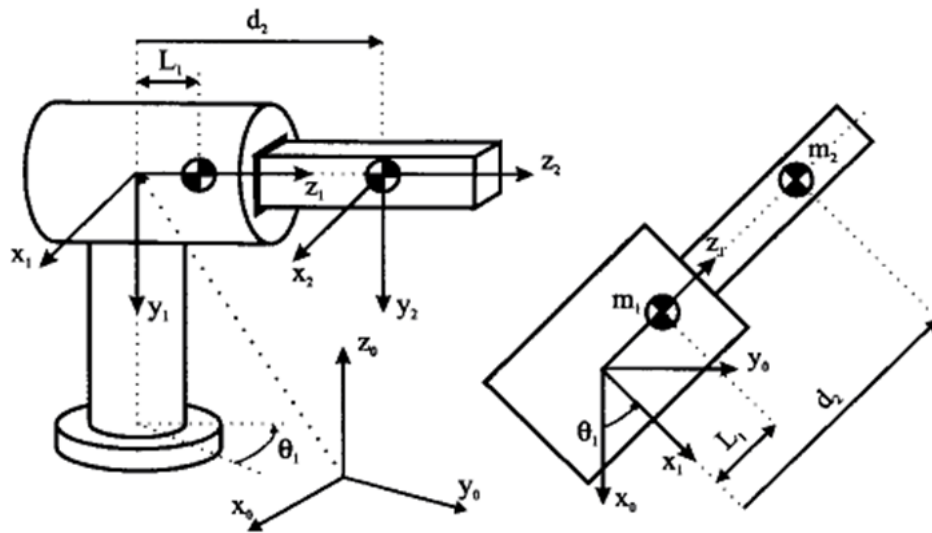
$$\tau_i = {}^i f_i^T R_{i-1} z_0 \quad (10.110)$$

Sí el articulación i es de traslación.

EJEMPLO 10.4

Obtención del modelo dinámico de un robot mediante la formulación de Newton-Euler

Figura 10.5: Robot polar de 2 GDL



Fuente: Fundamentos de Robótica, Barrientos, Antonio. 2007.

Siguiendo los pasos anteriormente mencionados lo siguiente a realizar establecer las condiciones iniciales en el manipulador, y realizando algunas contracciones para no ex-

Cuadro 10.2: Parámetros de D-H del robot polar de la imagen 10.5.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	0	0	-90
2	0	d_2	0	0

Fuente: Autores de proyecto

tender tanto el tratamiento matemático ($\cos\theta_1$ por C_1 y $\sin\theta_1$ por S_1):

$${}^0\omega_0 = [0, 0, 0]^T ; {}^0\dot{\omega}_0 = [0, 0, 0]^T ; {}^0v_0 = [0, 0, 0]^T ;$$

$${}^0\dot{v}_0 = -[g_{x0}, g_{y0}, g_{z0}]^T = -[0, 0, -g]^T = [0, 0, g]^T$$

Con la gravedad con un valor de 9.8 m/seg² y en dirección negativa del eje Z0.

$${}^1P_1 = [0, 0, 0]^T ; {}^2P_2 = [0, 0, d_2]^T$$

$${}^1s_1 = [0, 0, L_1] ; {}^2s_2 = [0, 0, 0]$$

$$z_0 = [0, 0, 1]^T$$

Las matrices de inercia son cero debido a que toda la masa está concentrada en el centro de gravedad, por tanto:

$${}^1I_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; {}^2I_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Se continúa encontrando las matrices de rotación de la forma $i-1R_i$:

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 \\ S_1 & 0 & C_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}; {}^1R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^0R_2 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 \\ S_1 & 0 & C_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1R_0 = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -S_1 & C_1 & 0 \end{bmatrix}; {}^2R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^2R_0 = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -S_1 & C_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ahora las velocidades angulares:

$${}^1\omega_1 = {}^1R_0 \left({}^0\omega_0 + z_0 \dot{\theta}_1 \right) = {}^1R_0 \cdot \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2\omega_2 = {}^2R_1 {}^1\omega_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo de aceleraciones angulares:

$${}^1\dot{\omega}_1 = {}^1R_0 \left({}^0\dot{\omega}_0 + z_0 \ddot{\theta}_1 \right) + {}^0\omega_0 \times z_0 \dot{\theta}_1 =$$

$$= \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -S_1 & C_1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2\dot{\omega}_2 = {}^2R_1 {}^1\dot{\omega}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo de la aceleración lineal de cada eslabón i

$${}^1\dot{v}_1 = {}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1P_1 + {}^1\omega_1 \times ({}^1\omega_1 \times {}^1P_1) + {}^1R_0 {}^0\dot{v}_0 =$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \\
&+ \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -S_1 & C_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&{}^2\dot{v}_2 = {}^2R_1 \left(z_0 \ddot{d}_2 + {}^1\dot{v}_1 \right) + {}^2\dot{\omega}_2 \times {}^2P_2 + 2{}^2\omega_2 \times \left({}^2R_1 z_0 \dot{d}_2 \right) + {}^2\omega_2 \times \left({}^2\omega_2 \times {}^2P_2 \right) = \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_2 \end{bmatrix} + \\
&+ 2 \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \right) = \\
&= \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dot{\theta}_1^2 d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ -g \\ \ddot{d}_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Se calcula la aceleración lineal del centro de gravedad de cada eslabón

$$\begin{aligned}
&{}^1a_1 = {}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1s_1 + {}^1\omega_1 \times \left({}^1\omega_1 \times {}^1s_1 \right) + {}^1\dot{v}_1 = \\
&= \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 L_1 \\ -g \\ -\dot{\theta}_1^2 L_1 \end{bmatrix} \\
&{}^2a_2 = {}^2\dot{\omega}_2 \times {}^2s_2 + {}^1\omega_2 \times \left({}^2\omega_2 \times {}^2s_2 \right) + {}^2\dot{v}_2 =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ -g \\ \ddot{d}_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ -g \\ \ddot{d}_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Cálculo de las fuerzas que actúan sobre los eslabones i

$$\begin{aligned}
&{}^2f_2 = {}^2R_3 {}^3f_3 + m_2 {}^2a_2 = {}^2R_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + m_2 \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ -g \\ \ddot{d}_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 \end{bmatrix} = \\
&\begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 m_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 m_2 \\ -gm_2 \\ \ddot{d}_2 m_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 m_2 \end{bmatrix} \\
&{}^1f_1 = {}^1R_2 {}^2f_2 + m_1 {}^1a_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 m_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 m_2 \\ -gm_2 \\ \ddot{d}_2 m_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 m_2 \end{bmatrix} \\
&+ m_1 \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 L_1 \\ -g \\ -\dot{\theta}_1^2 L_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 m_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 m_2 - \ddot{\theta}_1 L_1 m_1 \\ -g(m_1 + m_2) \\ \ddot{d}_2 m_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 m_2 - \dot{\theta}_1^2 L_1 m_1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Calculo de los pares que se ejercen en los eslabones i

$$\begin{aligned}
&{}^2n_1 = {}^2R_3 [{}^3n_3 + ({}^3R_2 {}^2P_2) \times {}^3f_3] + ({}^2P_2 + {}^2s_2) \times m_2 {}^2a_2 \\
&+ {}^2I_2 {}^2\dot{\omega}_2 + {}^2\omega_2 \times ({}^2I_2 \cdot {}^2\omega_2) =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \\
& = \begin{bmatrix} d_2 m_2 g \\ \left(-\ddot{\theta}_1 d_2^2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 d_2 \right) m_2 \\ 0 \end{bmatrix} \\
& {}^1 n_1 = {}^1 R_2 \left[{}^2 n_2 + ({}^2 R_1 {}^1 P_1) \times {}^2 f_2 \right] + ({}^1 P_1 + {}^1 s_1) \times m_2 {}^1 a_1 + {}^1 I_1 {}^1 \dot{\omega}_1 + {}^1 \omega_1 \times ({}^1 I_1 {}^1 \omega_1) = \\
& = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} d_2 m_2 g \\ \left(-\ddot{\theta}_1 d_2^2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 d_2 \right) m_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 m_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 m_2 \\ -g m_2 \\ \ddot{d}_2 m_2 - \dot{\theta}^2 d_2 m_2 \end{bmatrix} \right) + \\
& + \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 L_1 m_1 \\ -g m_1 \\ -\dot{\theta}_1^2 L_1 m_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \\
& = \begin{bmatrix} d_2 m_2 g \\ \left(-\ddot{\theta}_1 d_2^2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 d_2 \right) m_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 m_1 g \\ -\ddot{\theta}_1 L_1^2 m_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_2 m_2 + m_1 L_1) g \\ \left(-\ddot{\theta}_1 d_2^2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 d_2 \right) m_2 - \ddot{\theta}_1 L_1^2 m_1 \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Cálculo de la fuerza y pares en las articulaciones

$$F_2 = {}^2 f_2^T R_2^1 z_0 = \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_1 d_2 m_2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 m_2 \\ -g m_2 \\ \ddot{d}_2 m_2 - \dot{\theta}^2 d_2 m_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \ddot{d}_2 m_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 m_2$$

$$T_1 = \left(\ddot{\theta}_1 d_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 d_2 \right) m_2 + \ddot{\theta}_1 L_1^2 m_1$$

$$F_2 = \ddot{d}_2 m_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 m_2$$

Organizando las ecuaciones a una forma matricial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\ddot{\theta}_1 d_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{d}_2 d_2 \right) m_2 + \ddot{\theta}_1 L_1^2 m_1 \\ \ddot{d}_2 m_2 - \dot{\theta}_1^2 d_2 m_2 \end{bmatrix} \quad (10.111)$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 L_1^2 + m_2 d_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2m_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 d_2 \\ -\dot{\theta}_1^2 d_2 m_2 \end{bmatrix} \quad (10.112)$$

que es equivalente al resultado encontrado por el algoritmo computacional de Lagrange, solo que no hay efectos gravitatorios por tanto la matriz C es igual a cero.

10.7. SOLUCIÓN DEL MODELO DINÁMICO EN EL ESPACIO DE ESTADO

La solución en el espacio de estado es un método que busca dar solución a un sistema de ecuaciones que representa los estados de un sistema, las cuales relacionan las diferentes variables de las que depende y por ello se les denomina variables de estado. El método consiste en relacionar las variables de estado con su variación en el tiempo al presentarse perturbaciones, mediante el uso de una relación matricial de forma lineal. Dicha relación es

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (10.113)$$

Donde X es el vector de variables de estado, \dot{X} su variación con respecto al tiempo, U es la entrada o perturbación del sistema, A y B son respectivamente la matriz de coeficientes de las variables de estado y el vector de coeficientes de la entrada linealizada.

Aplicación del espacio de estado a la robótica Como ya se estableció, la ecuación que representa el modelo dinámico de un robot es

10.7.1. Aplicación del espacio de estado a la robótica

Como ya se estableció, la ecuación que representa el modelo dinámico de un robot es

$$\tau = D\ddot{q} + H + C \quad (10.114)$$

En donde D, H y C dependen de q, \dot{q} y por tanto es una expresión no lineal para la cual encontrar una solución analítica no es tarea sencilla.

Definiendo q, \dot{q} como variables de estado, reorganizando la ecuación 10.114 y aplicando la ecuación de estado se obtiene:

$$\ddot{q} = D^{-1}[\tau - (H + C)]$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + B \cdot U \quad (10.115)$$

Donde

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad y \quad U = D^{-1}[(H + C) - \tau] \quad (10.116)$$

Siendo A una matriz $2n \times 2n$, B una $2n \times n$ y U la entrada linealizada del sistema.

EJEMPLO 10.5

La aplicación del método de espacio de estado para el robot polar de 2 grados de libertad del ejemplo anterior se presenta a continuación: Del ejemplo anterior (figura 10.5) se obtuvo:

Que en forma matricial es:

$$T_1 = (m_1 L_1^2 + m_2 d^2) \ddot{\theta}_1 + 2d_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + (m_1 L_1 + m_2 d_2) g \cos \theta_1$$

$$F = m_2 \ddot{d}_2 - m_2 d_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 g \sin \theta_1 \quad (10.117)$$

Que en forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + N \quad (10.118)$$

Con

$$D = \begin{bmatrix} m_1 L_1^2 + m_2 d^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (10.119)$$

$$H + C = N = \begin{bmatrix} 2d_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + (m_1 L_1 + m_2 d_2) g \cos \theta_1 \\ -m_2 d_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 g \sin \theta_1 \end{bmatrix}$$

Usando las relaciones halladas para trabajar en el espacio de estado

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + B \cdot U \quad (10.120)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad y \quad U = D^{-1}[\tau - (H + C)] \quad (10.121)$$

Entonces

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1 L_1^2 + m_2 d^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix} \quad (10.122)$$

$$D^{-1}(\tau - N) = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1 L_1^2 + m_2 d^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 - (2d_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + (m_1 L_1 + m_2 d_2) g \cos \theta_1) \\ F_2 - (-m_2 d_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 g \sin \theta_1) \end{bmatrix} \quad (10.123)$$

$$U = \begin{bmatrix} \frac{-2d_2 m_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 - g \cos \theta_1 (m_1 L_1 + m_2 d_2 - T_1)}{m_1 L_1^2 + m_2 d_2^2} \\ \frac{d_2 m_2 \dot{\theta}_1^2 - m_2 g \sin \theta_1 - F_2}{m_2} \end{bmatrix} \quad (10.124)$$

Se establecen como variables de estado $[\theta_1, d_2, \dot{\theta}_1, \dot{d}_2]^T$ con lo que la ecuación de estado tendrá la forma de

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \theta_1 \\ d_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} + B \cdot U \quad (10.125)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} \frac{-2d_2m_2\dot{\theta}_1\dot{d}_2 - g \cos \theta_1 (m_1L_1 + m_2d_2 - T_1)}{m_1L_1^2 + m_2d_2^2} \\ \frac{d_2m_2\dot{\theta}_1^2 - m_2g \sin \theta_1 - F_2}{m_2} \end{bmatrix} \quad (10.126)$$

Con esta expresión es posible resolver computacionalmente el modelo cinemática directo del robot analizado, partiendo de condiciones iniciales de posición y velocidad y de una secuencia de pares y fuerzas a lo largo del tiempo puesto que:

$$\begin{aligned} \theta_1(j) &= \theta_1(j-1) + \dot{\theta}_1(j-1)\Delta t \\ d_2(j) &= d_2(j-1) + \dot{d}_2(j-1)\Delta t \end{aligned} \quad (10.127)$$

10.8. MODELADO DINÁMICO EN EL ESPACIO DE LA TAREA

En ocasiones es conveniente tener el modelo dinámico expresado como una relación entre la trayectoria del extremo del robot y las fuerzas y pares que en el se aplican. Si los datos son dados en referencia de un sistema de coordenadas fijo en el entorno de trabajo, se dice que se trabaja en el espacio de la tarea. Para encontrar una expresión del modelo dinámico se hará uso de la matriz Jacobiana donde $\dot{j} = J\dot{q}$ la cual, se derivara

con respecto al tiempo dando como resultado

$$\ddot{j} = \dot{J}\dot{q} + J\ddot{q} \quad ; \quad \ddot{q} = J^{-1}\ddot{j} - J^{-1}\dot{J}\dot{q} \quad (10.128)$$

Expresiones que relacionan la las aceleraciones cartesianas y articulares de manera directa e inversa.

Además, se recurrirá a que la potencia consumida por el robot, es la misma independientemente de si se evalúa en el espacio articular o en el espacio de trabajo, matemáticamente esto significa:

$$potencia = fuerza \cdot velocidad \Rightarrow T^T \dot{j} = \tau^T \dot{q} \quad (10.129)$$

Donde T^T es el vector de fuerzas y pares ejercidos en el extremo del robot expresado en el sistema de coordenadas de la base y τ^T el vector de pares y fuerzas ejercidas en cada articulación.

Al reemplazar las relaciones mencionadas y despejar adecuadamente se obtiene

$$\tau = J^T T \quad (10.130)$$

Expresión que relaciona las fuerzas y pares aplicados en el extremo del robot con los ejercidos en cada una de las articulaciones. Al sustituir las expresiones 10.128 y 10.130 en la expresión de modelo dinámico de un robot se obtiene:

$$\begin{aligned} \tau = D\ddot{q} + H + C \Rightarrow J^T T = DJ^{-1}\ddot{j} - DJ^{-1}\dot{J}\dot{q} + H + C \Rightarrow \\ T = (J^T)^{-1}DJ^{-1}\ddot{j} - (J^T)^{-1}DJ^{-1}\dot{J}\dot{q} + (J^T)^{-1}H + (J^T)^{-1}C \Rightarrow \end{aligned} \quad (10.131)$$

$$T = D_j \ddot{J} + H_j + C_j \quad (10.132)$$

con

$$D_j = (J^T)^{-1} D J^{-1}$$

$$H_j = (J^T)^{-1} (H - D J^{-1} \dot{J} \dot{q})$$

$$C_j = (J^T)^{-1} C$$

CAPÍTULO 11

GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS

Nos enfocaremos en los procedimientos para calcular una trayectoria que describa el movimiento deseado de un robot-manipulador en espacio multidimensional. Definiremos trayecto, que se refiere a un recorrido deseado en el tiempo de la posición, la velocidad y la aceleración para cada grado de libertad. Todo esto se realizara gracias a los modelos cinemático y dinámicos anteriormente vistos y nos permiten establecer las adecuadas tácticas de control del robot que excedan en una mayor calidad de sus movimientos.

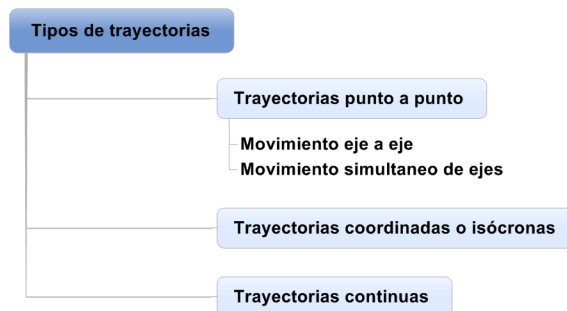
Esto encierra el problema de la comunicación hombre y manipulador en donde se muestra como deseamos definir una trayectoria o ruta a través del espacio. Para proveer una mejor descripción del movimiento de un manipulador, no se debería solicitar al usuario que escriba funciones complicadas de posición y tiempo para especificar la labor; Lo más conveniente es proporcionar la capacidad de definir trayectorias con simples representaciones del movimiento deseado y dejar que el sistema desarrolle los detalles. Un

ejemplo podría ser que el usuario especificara nada más que la ubicación y la orientación del destino que se desea para el efector final y dejar que el sistema resuelva la forma exacta de la ruta para llegar a ese punto, el tiempo del recorrido, el perfil de velocidad, entre otras especificaciones.

11.1. TIPOS DE TRAYECTORIAS

Para realizar una tarea determinada el robot debe moverse desde un punto inicial a un punto final. Este movimiento puede ser realizado según infinitas trayectorias espaciales. De todas ellas hay algunas que, bien por su sencillez de implementación por parte del control cinemático o bien por su utilidad y aplicación a diversas tareas, son las que en la práctica incorporan los robots comerciales. De este modo, puede encontrarse que los robots dispongan de trayectorias punto a punto, coordinadas y continuas (figura 11.1).

Figura 11.1: tipos de trayectorias



Fuente: Autores de proyecto

11.1.1. Trayectorias punto a punto

En este tipo de trayectorias cada articulación evoluciona desde su posición inicial a la final sin realizar consideración alguna sobre el estado o evolución de las demás articulaciones. Normalmente, cada actuador trata de llevar a su articulación al punto de destino en el menor tiempo posible, pudiéndose distinguir dos casos: movimiento eje a eje y movimiento simultaneo de ejes.

- **Movimiento eje a eje**

Solo se mueve un eje cada vez. Comenzara a moverse la primera articulación, y una vez que esta haya alcanzado su punto final lo hará la segunda, y a si sucesivamente. Este tipo de movimiento da obviamente como resultado un mayor tiempo de ciclo, teniendo como única ventaja un menor consumo de potencia instantánea por parte de los actuadores.

- **Movimiento simultaneo de ejes**

En este caso todos los actuadores comienzan simultáneamente a mover las articulaciones del robot a una velocidad específica para cada una de ellas. Dado que la distancia a recorrer y las velocidades serán en general diferentes, cada una acabara su movimiento en un instante diferente.

El movimiento del robot no acabara hasta que se alcance definitivamente el punto final, lo que se producirá cuando el eje más tarde concluya su movimiento. De esta manera, el tiempo total invertido en el movimiento coincidirá con el del eje que más tiempo emplee en realizar su movimiento particular, pudiéndose dar la circunstancia de que el resto de los actuadores hayan forzado su movimiento a una velocidad y aceleración elevada, viéndose obligados finalmente a esperar a la articulación mas lenta.

Por los motivos expuestos, las trayectorias punto a punto no están implementadas salvo en robots muy simples o con unidades de control muy limitadas.

11.1.2. Trayectorias coordinadas o isócronas

Para evitar que algunos actuadores trabajen forzando sus velocidades y aceleraciones, teniendo que esperar después la conclusión del movimiento de la articulación mas lenta, puede hacerse un cálculo previo, averiguando cual es esta articulación y que tiempo invertirá. Se ralentizara entonces el movimiento del resto de los ejes para que inviertan el mismo tiempo en su movimiento, acabando todos ellos simultáneamente. Se tiene así que todas las articulaciones se coordinan comenzando y acabando su movimiento a la vez, adaptándose todas a la más lenta.

El tiempo total invertido en el movimiento es el menor posible y no se piden aceleraciones y velocidades elevadas a los actuadores de manera inútil. Desde el punto de vista del usuario la trayectoria que describe el extremo del robot no es significativa, siendo esta impredecible, aunque como es obvio, un conocimiento del modelo y control cinemático del robot permitiría su cálculo.

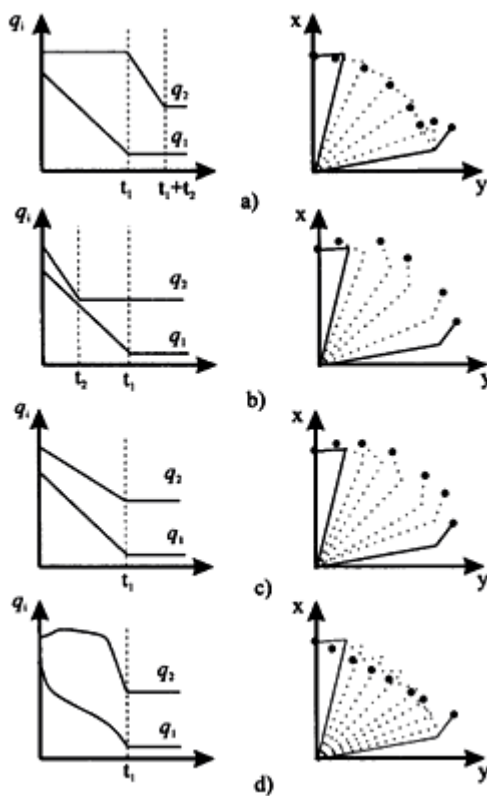
11.1.3. Trayectorias continuas

Cuando se pretende que la trayectoria que sigue el extremo del robot sea conocida por el usuario (trayectoria en el espacio cartesiano o de la tarea), es preciso calcular de manera continua las trayectorias articulares. Típicamente, las trayectorias que el usuario pretende que el robot describa son trayectorias en línea recta o en arco de círculo. El resultado será que cada articulación sigue un movimiento aparentemente caótico con posibles cambios de dirección y velocidad y sin coordinación con el resto de las articulaciones. Sin embargo, el resultado conjunto será que el extremo del robot describirá la

trayectoria deseada.

La Figura 11.2 representa las trayectorias articulares $q_1(t)$ y $q_2(t)$ y el resultado final en el espacio de la tarea (x, y) para un robot tipo SCARA correspondientes a los cuatro tipos de trayectorias indicadas. a) movimiento eje a eje, b) movimiento simultaneo de ejes, c) trayectoria coordinada, d) trayectoria continua rectilínea.

Figura 11.2: Representación de los tipos de trayectorias para un robot SCARA.



Fuente: Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. 1997

11.2. CONSIDERACIONES PARA PLANIFICACIÓN Y GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DE ARTICULACIONES

Para controlar un manipulador se requiere que la configuración de su brazo tanto en la posición inicial como en la final se especifique antes de que se planifique la trayectoria del movimiento. La planificación de una trayectoria de articulación interpolada para un robot demostró que son de interés las siguientes consideraciones (Paul 1972):

- Cuando se toma un objeto, el movimiento de la mano debe dirigirse hacia fuera del objeto; en otro caso la mano puede golpear la superficie soporte del objeto.
- Si especificamos una posición de partida (punto de despegue) a lo largo del vector normal a la superficie desde la posición inicial (es decir, el origen de sistema de coordenadas en la mano) pase a través de esta posición, entonces tenemos un movimiento de partida admisible. Si especificamos más aun el tiempo necesario para alcanzar esta posición, podríamos controlar la velocidad con la cual se despegue el objeto.
- El mismo conjunto de requisitos de despegue para el movimiento del brazo es también valido cuando nos acercamos a la posición final (es decir, debemos movernos en una dirección normal a la superficie y frenándonos cuando nos aproximemos a la posición final) de manera que se pueda obtener y controlar la dirección de aproximación correcta.
- De lo anterior tenemos cuatro posiciones para cada movimiento del brazo: inicio, despegue, asentamiento y final.
- Ligaduras de pasión:

- Posición inicial: serán velocidades y aceleraciones (normalmente nula).
 - Posición de despegue: movimiento continuo o puntos intermedios.
 - Posición de asentamiento: lo mismo que para la posición de despegue.
 - Posición final: serán la velocidad y aceleración (normalmente nulas).
- Además de estas ligaduras los extremos de todas las trayectorias de la articulación deben estar dentro de sus límites físicos y geométricos.
 - Consideraciones temporales:
 - Segmento de trayectoria inicial y final: el tiempo se basa sobre la velocidad de aproximación de la mano y desde la superficie y es un valor fijo que depende de las características de los motores de la articulación.
 - Puntos intermedios o segmentos a mitad de trayectoria: el tiempo se basa en la velocidad y aceleración máxima de las articulaciones, y se utiliza para normalizar el máximo de estos tiempos (es decir, el tiempo máximo de la articulación más lenta)

11.3. REPRESENTACIONES EN EL ESPACIO DE ARTICULACIÓN O INTERPOLACIÓN DE TRAYECTORIAS.

En esta parte consideraremos métodos de generación de rutas en los que las formas de estas (en espacio y en tiempo) se describen en términos de funciones de ángulos de articulación.

Cada punto de la ruta se especifica generalmente en términos de una posición y una orientación deseadas de la trama herramienta $\{T\}$ relativa a la trama estación $\{S\}$.

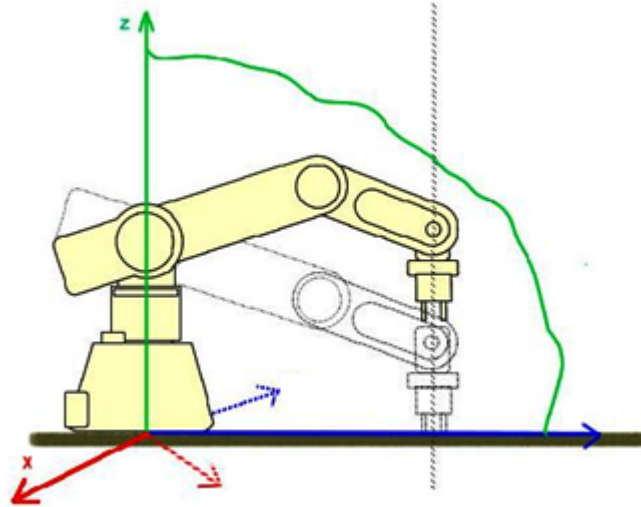
Cada uno de estos puntos vía se convierte en un conjunto de ángulos de articulación deseados mediante aplicación de la cinemática inversa. Después se encuentra una función uniforme para cada una de las n articulaciones que pasan a través de los puntos vía y que terminan en el punto de destino. El tiempo requerido por segmento es el mismo para cada articulación, de manera que todas las articulaciones llegaran al punto vía al mismo tiempo, produciendo por consecuencia la posición cartesiana deseada de $\{T\}$ en cada punto vía. Aparte de especificar la misma duración Para cada articulación. La determinación de la función del ángulo de articulación deseada. Para una articulación específica no depende de las funciones; Para las demás articulaciones, por ende, los esquemas de espacio de articulación logran la posición y la orientación deseadas en los puntos vía. En el trayecto entre los puntos vía, la forma de la ruta, aunque es considerablemente simple en el espacio de articulación, es compleja si se le describe en espacio cartesiano.

Los esquemas en el espacio de articulación son generalmente los mas fáciles de calcular y, como no hay una correspondencia continua entre el espació de articulación y el espacio cartesiano esencialmente no hay ningún problema con las singularidades del mecanismo.

Los tipos de interpoladores o maneras de llegar a generar los puntos en una trayectoria son:

- Interpoladores lineales
- Interpolador splin cubico o polinomios cúbicos
- Polinomios de grado 5
- Interpolación trapezoidal

Figura 11.3: Un manipulador se mueve desde su posición inicial hasta su posición final de destino.



Fuente: www.wiphala.net

- Otros interpoladores
- Curvas de Bézier

11.3.1. Interpoladores lineales

Supongamos que se pretende que una de las articulaciones del robot, pase sucesivamente por los valores q^i en los instantes t^i . Una primera solución a este problema consistiría en mantener constante la velocidad de movimiento entre cada 2 valores sucesivos q^{i-1}, q^i de la articulación. La trayectoria entre dos puntos q^{i-1}, q^i sería entonces:

$$q(t) = (q^i - q^{i-1}) \frac{t - t^{i-1}}{T} + q^{i-1} \quad (11.1)$$

donde $T = t^i - t^{i-1}$ y $t^{i-1} < t < t^i$

Como es incuestionable, esta trayectoria asegura la continuidad de la posición, pero origina saltos bruscos en la velocidad \dot{q} de la articulación, y consecuentemente precisa

de aceleraciones q de valor infinito (ver Figura 11.4), lo que en la practica no es posible. La selección de los instantes de paso t_i para los puntos q_i podrá haberse hecho según:

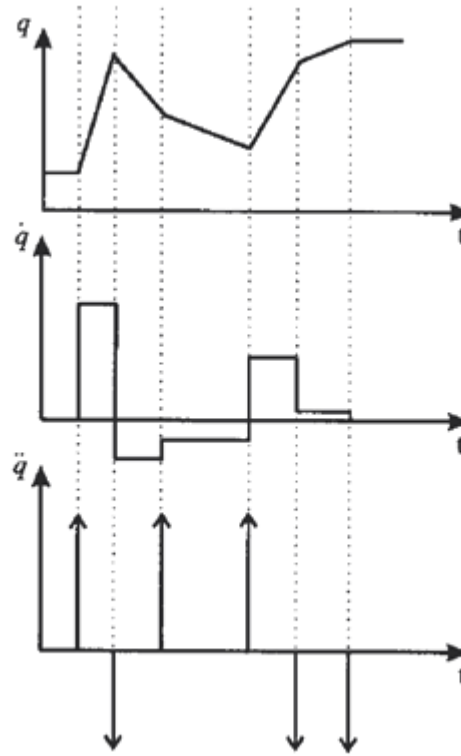
- Intentando que cada articulación q alcance el punto de destino en el menor tiempo posible sin considerar las demás articulaciones, lo que resultara en velocidades q constantes e iguales a la maxima.
- Ajustando los instantes de paso a los de la articulación que más tiempo precise, resultando movimientos coordinados.
- Seleccionando los tiempos a partir de las especificaciones dadas en el espacio de la tarea de modo que el extremo del robot describa una trayectoria predeterminada.

11.3.2. Interpolador spline cubico o polinomios cúbicos

Para asegurar que la trayectoria que une los puntos por los que tiene que pasar la articulación, considerada presente la continuidad en velocidad, puede recurrirse a utilizar un polinomio de grado 3 que una cada pareja de puntos adyacentes. De este modo, al tener cuatro parámetros disponibles se podrán imponer cuatro condiciones de contorno, dos de posición y dos de velocidad. Los valores de las velocidades de paso por cada punto deben por tanto ser conocidas a priori.

Se consigue así una trayectoria compuesta por una serie de polinomios cúbicos, cada uno valido entre dos puntos consecutivos. Este conjunto de polinomios concatenados, escogidos de modo que exista continuidad en la posición y velocidad, se denominan splines (cubicos, por ser de tercer grado).

Figura 11.4: : Vista de la posición, velocidad y aceleración para un interpolador lineal.



Fuente: Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. 1997

La expresión de la trayectoria que une dos puntos adyacentes ($q^i + q^{i+1}$) será:

$$q(t) = a + b(t - t^i) + c(t - t^i)^2 + d(t - t^i)^3 \quad (11.2)$$

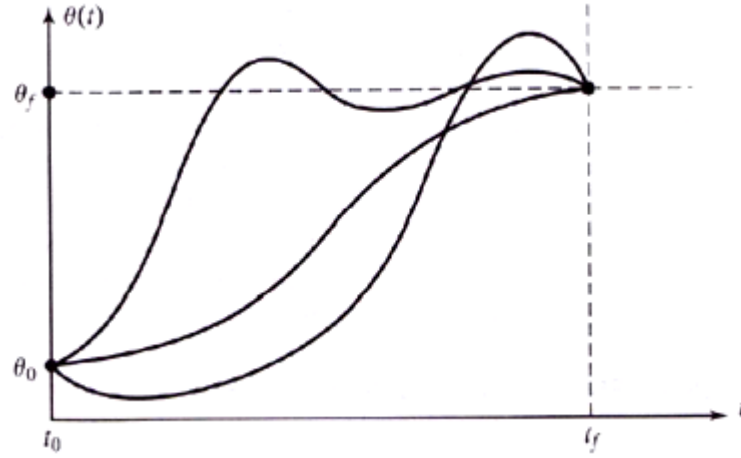
Donde $t^i < t < t^{i+1}$

$$a = q^i \quad (11.3)$$

$$b = \dot{q}^i \quad (11.4)$$

$$c = \frac{3}{T^2} (\dot{q}^{i+1} - \dot{q}^i) - \frac{1}{T} (\ddot{q}^{i+1} + 2\ddot{q}^i) \quad (11.5)$$

Figura 11.5: : Posibles formas de ruta para una sola articulación.



Fuente: Craig, John J. Robotica. Pearson Educación. 2006.

$$d = -\frac{2}{T^3}(\dot{q}^{i+1} - \dot{q}^i) - \frac{1}{T^2}(\dot{q}^{i+1} + \dot{q}^i) \quad (11.6)$$

$$T = t^{i+1} - t^i \quad (11.7)$$

Para poder calcular los valores de los coeficientes del polinomio cubico de la expresión anterior, es preciso conocer los valores de las velocidades de paso \dot{q} ; para ello existirán diferentes alternativas. Un primer criterio para seleccionar las velocidades de paso podría ser:

$$\dot{q}^i = \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{q^{i+1} - q^i}{t^{i+1} - t^i} + \frac{q^i - q^{i-1}}{t^i - t^{i-1}} \right] \right\} \quad (11.8)$$

si

$$\{ \text{signo}(q^i - q^{i-1}) = \text{signo}(q^{i+1} - q^i) \} \quad (11.9)$$

O también si: $q^{i-1} = q^i$ o $q^i = q^{i+1}$

Es cero si: $\{si\text{signo}(q^i - q^{i-1}) \neq \text{signo}(q^{i+1} - q^i)\}$

Esta selección es de sencilla realización y da como resultado una continuidad razonable en la velocidad. Sin embargo, no establece ninguna condición sobre la continuidad de la aceleración. Como alternativa pueden escogerse las velocidades de paso de modo que cada spline cubico sea continuo en posición, velocidad y aceleración con los dos polinomios adyacentes. De esta forma, los coeficientes de los $k - 1$ polinomios de tipo spline cubico que pasan por los puntos $q^i (i \in [1, k])$, asegurando la continuidad en posición, velocidad y aceleración de la trayectoria global, serán los dados por la expresión, donde las velocidades de paso por los puntos se obtienen de resolver el siguiente sistema de ecuaciones lineales de diagonal dominante:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} t^3 & 2(t^2 + t^3) & t^2 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & t^4 & 2(t^3 + t^4) & t^3 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & t^5 & 2(t^4 + t^5) & t^4 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & t^6 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^1 \\ \dot{q}^2 \\ \dot{q}^3 \\ \vdots \\ \dot{q}^k \end{bmatrix} = \\
 & = \begin{bmatrix} \frac{3}{t^2 t^3} \left[(t^2)^2 (q^3 - q^2) + (t^3)^2 (q^2 - q^1) \right] \\ \frac{3}{t^3 t^4} \left[(t^3)^2 (q^4 - q^3) + (t^4)^2 (q^3 - q^2) \right] \\ \vdots \\ \frac{3}{t^{k-1} t^k} \left[(t^{k-1})^2 (q^k - q^{k-1}) + (t^k)^2 (q^{k-1} - q^{k-2}) \right] \end{bmatrix} \quad (11.10)
 \end{aligned}$$

Como se observa, el sistema tiene $k - 2$ ecuaciones y k incógnitas, que son las distintas velocidades de paso por los k puntos. Para completar el número de ecuaciones de modo que el sistema este definido y se pueden añadir las siguientes condiciones:

$$\dot{q}^1 = \dot{q}^k = 0 \quad (11.11)$$

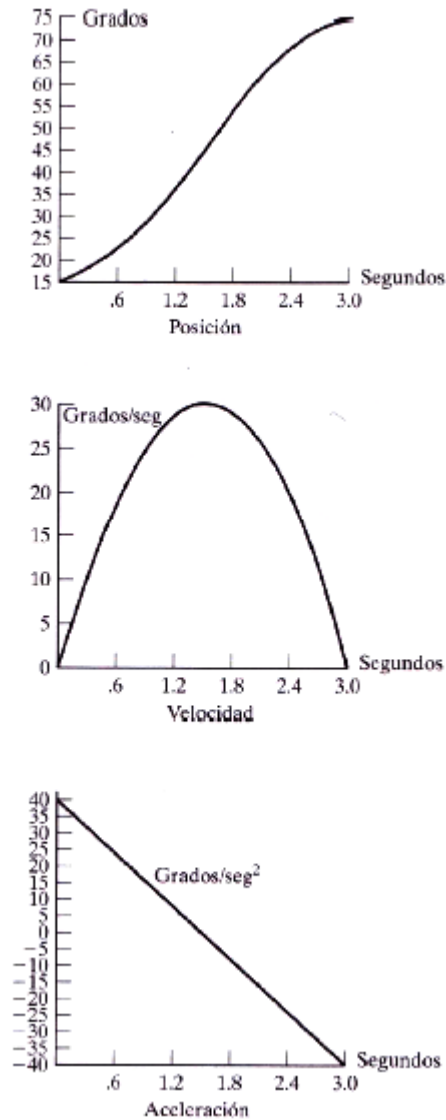
Es decir, que la articulación parte de y llega a una situación de reposo. Por tanto, las k ecuaciones lineales definidas en las dos expresiones anteriores, permiten obtener las k velocidades de paso necesarias para poder aplicar la ecuación principal del polinomio de los splines cúbicos, asegurando la continuidad hasta la segunda derivada de la trayectoria.

Una última alternativa para obtener las velocidades de paso q^i sería partir de las velocidades de paso deseadas en el espacio de la tarea. De este modo, lo mismo que el modelo geométrico del robot permite obtener las coordenadas articulares q a partir de las cartesianas j , el modelo cinemática (mediante el use de la Jacobiana) permitiría obtener las velocidades articulares q a partir de las cartesianas j . Sin embargo, es preciso en este caso considerar los problemas derivados de la posible existencia de puntos singulares en la trayectoria cartesiana escogida, que darían lugar a velocidades articulares infinitas no realizables por los actuadores.

Cuando utilizo la ecuación con puntos vías o puntos intermedios entre la posición inicial y final podrá especificar la velocidad deseada de la siguiente manera:

- El usuario especifica la velocidad deseada en cada punto vía en términos de velocidades cartesianas lineal y angular de la trama herramienta en ese instante.
- El sistema selecciona automáticamente las velocidades en los puntos vía mediante la aplicación de una heurística adecuada, ya sea en espacio cartesiano o de articulación.
- El sistema selecciona de manera automática las velocidades en los puntos vía de tal forma que la aceleración en los puntos vía sea continua.

Figura 11.6: Perfiles de posición velocidad y aceleración para un perfil cubico que inicia y termina inmóvil.



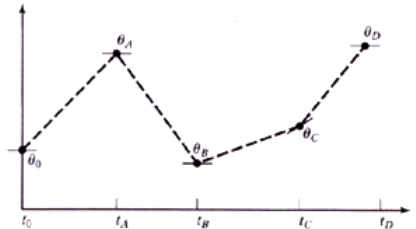
Fuente: Craig, John J. Robotica. Pearson Educación. 2006

En la primera opción, las velocidades cartesianas deseadas en los puntos vía se “asignan.”^a las proporciones de articulación deseadas, por medio del jacobiano inverso del manipulador evaluado en el punto vía. Si el manipulador se encuentra en un punto singular en un punto vía específico, entonces el usuario no puede asignar una velocidad arbitraria

en este punto. El esquema de generación de rutas tiene la útil capacidad de cumplir con una velocidad deseada que el usuario especifique, pero sería una carga requerir que el usuario siempre haga estas especificaciones. Por lo tanto, un sistema conveniente debería incluir la opción 2 o la 3 (o ambas).

En la opción 2 el sistema selecciona de manera automática velocidades intermedias razonables, por medio de algún tipo de heurística. Considere la ruta especificada por los puntos vía que se muestran para una articulación q en la figura 11.7.

Figura 11.7: Puntos vía con velocidades indicadas en los puntos indicados por las tangentes.



Fuente: Craig, John J. Robotica. Pearson Educación. 2006

En esta figura se opta por la razonable elección de velocidades de articulación en los puntos vía, según lo indicado con pequeños segmentos lineales que representan tangentes a la curva en cada punto vía. Esta elección es el resultado de aplicar una heurística simple en términos conceptuales y computacionales. Imagine los puntos vía conectados con segmentos de líneas rectas: si cambia de signo la pendiente de estas líneas en el punto vía, elija la velocidad cero; si la pendiente de estas líneas no cambia de signo, seleccione el promedio de las dos pendientes como velocidad del punto vía. De esta forma el sistema puede seleccionar la velocidad en cada punto con solo especificar los puntos vía deseados.

En la opción 3 el sistema selecciona las velocidades de forma tal que la aceleración sea continua en el punto vía; para ello se necesita un nuevo enfoque. En este tipo de trazador

o “spline” sustituimos las dos restricciones de velocidad en la conexión de dos polinomios cúbicos con las dos restricciones que especifican que la velocidad y la aceleración deben ser continua.

11.3.3. Polinomios de grado 5

La segunda de las alternativas para fijar la velocidad de paso, garantizaba la continuidad de las aceleraciones a costa de dejar libres los valores de las velocidades (no podían ser especificadas como condiciones de contorno). En el caso de que las velocidades de paso vengan impuestas por algún criterio externo (y sean, por tanto, condiciones de contorno) y se precise garantizar la continuidad de las aceleraciones, es necesario aumentar el grado del polinomio que define la trayectoria en cada intervalo hasta 5, disponiendo así de 6 parámetros que permiten ajustar las 6 condiciones de contorno:

$$q(t) = a + b(t - t^{i-1}) + c(t - t^{i-1})^2 + d(t - t^{i-1})^3 + e(t - t^{i-1})^4 + f(t - t^{i-1})^5 \quad (11.12)$$

Con $t^{i-1} < t < t^i$

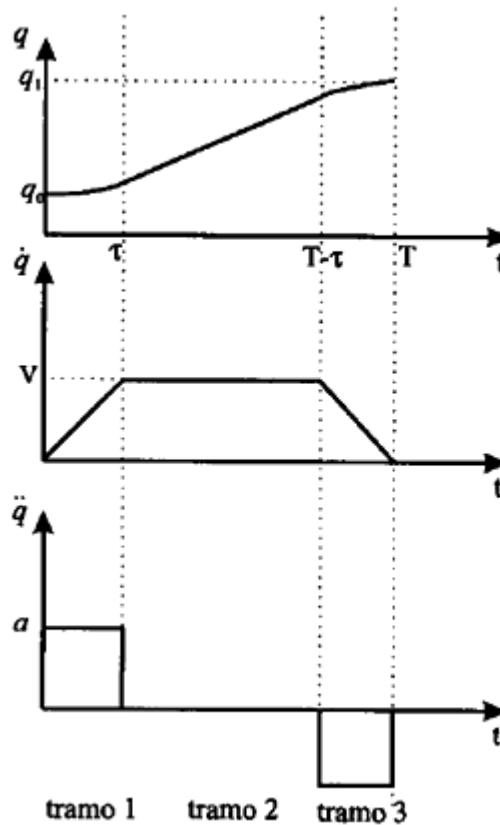
Condiciones de contorno: $q(t^{i-1}), \dot{q}(t^{i-1}), \ddot{q}(t^{i-1}); q(t^i), \dot{q}(t^i), \ddot{q}(t^i)$

La imposición de las 6 condiciones de contorno en cada tramo, permiten obtener los correspondientes coeficientes que definen el polinomio.

11.3.4. Interpolación trapezoidal

En los interpoladores vistos hasta el momento, se utiliza un polinomio de un grado determinado (1, 3 o 5) para unir dos puntos consecutivos de la trayectoria. El uso de polinomios de tercer grado permite asegurar que el polinomio pasa por los dos puntos y al mismo tiempo permite imponer los valores de velocidad de paso por los mismos. Sin embargo, al contrario de lo que ocurre con el interpolador de primer grado (lineal), la velocidad de la articulación durante el recorrido está variando continuamente, lo que exige un control continuo de la misma.

Figura 11.8: interpolador trapezoidal



Fuente: Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. 1997.

Una alternativa que proporciona una solución intermedia consiste en descomponer en

tres tramos consecutivos la trayectoria que une dos puntos q^0, q^1 . En el tramo central se utiliza un interpolador lineal, y por lo tanto la velocidad se mantiene constante, no siendo preciso imprimir aceleración alguna al actuador. En los tramos inicial y final se utiliza un polinomio de segundo grado, de modo que en el tramo 1 la velocidad varíe linealmente desde la velocidad de la trayectoria anterior a la de la presente, y en el tramo 3 varíe desde la velocidad de la trayectoria presente hasta la de la siguiente. Se tiene entonces que en los tramos inicial y final la aceleración toma valores constantes distintos de cero, mientras que en el tramo intermedio la aceleración es nula.

En el caso simple de una trayectoria con dos únicos puntos de velocidad inicial y final nula, se tiene (figura 11.9) que las ecuaciones de los tres tramos serían:

$$q(t) = \left\{ \begin{array}{l} q^0 + s\frac{a}{2}t^2 \dots\dots\dots t \leq \tau \\ q^0 - s\frac{v^2}{2a} + svt \dots\dots\dots \tau < t \leq T - \tau \\ q^1 + s\left(-\frac{aT^2}{2} + aTt - \frac{a}{2}t^2\right) \dots\dots\dots T - \tau < t < T \end{array} \right\} \quad (11.13)$$

$$\tau = \frac{v}{a}$$

$$T = s\frac{q^1 - q^0}{v} + \frac{v}{a}$$

v : velocidad máx permitida

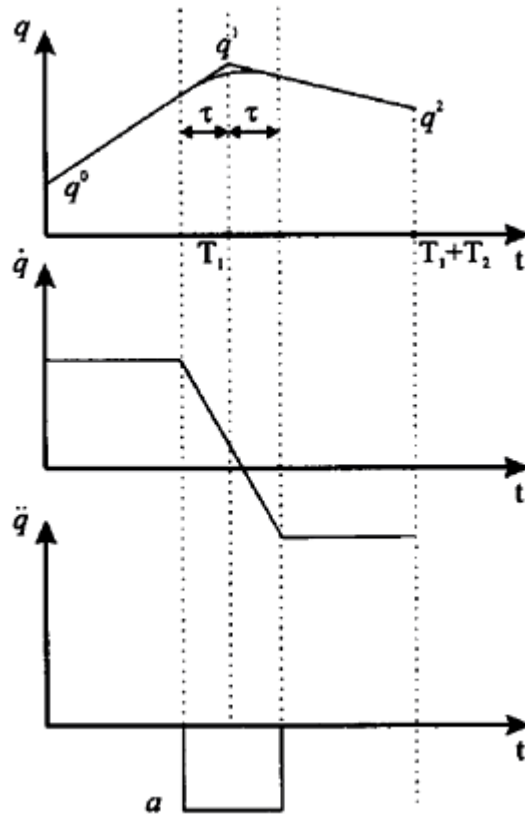
a : aceleración máx permitida

s : signo($q^1 - q^0$)

En el caso de tener una trayectoria formada por varios puntos, la velocidad de paso por los puntos intermedios no debería ser nula, puesto que esto daría lugar a un movimiento discontinuo del robot. Esta situación puede ser evitada si se permite que la trayectoria no pase exactamente por los puntos. La trayectoria final coincidiría con las trayectorias rectilíneas que unen los puntos dos a dos salvo en las cercanías de los mismos, donde un polinomio de 2º grado permitirá variar progresivamente la velocidad, evitando los valores infinitos de la aceleración.

Esta técnica, denominada ajuste parabólico, se aproxima al interpolador lineal tanto

Figura 11.9: Interpolador trapezoidal con velocidades iniciales y finales no nulas.



Fuente: Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. 1997.

más cuanto mayor sea la aceleración permitida, coincidiendo con aquel en el caso de aceleración infinita. Así, si se quiere pasar por los puntos \$q_0\$, \$q_1\$ y \$q_2\$ en los instantes \$t = 0\$, \$t = T_1\$ y \$t = T_1 + T_2\$, respectivamente, se tendrá que la ecuación de los tres tramos que componen la trayectoria que une dos puntos consecutivos sería:

$$q(t) = \left\{ \begin{array}{l} q^0 + \frac{q^1 - q^0}{T_1} t \dots\dots\dots, 0 \leq t \leq T_1 - \tau \\ q^1 + \frac{(q^1 - q^0)}{T_1} (t - T_1) + \frac{a}{2} (t - T_1 + \tau)^2 \dots\dots\dots T_1 - \tau < t < T_1 + \tau \\ q^1 + \frac{q^2 - q^1}{T_2} (t - T_1) \dots\dots\dots T_1 + \tau < t < T_1 + T_2 \end{array} \right\} \quad (11.14)$$

Donde a es la aceleración constante que permite cambiar la velocidad de un tramo al siguiente, siendo su valor:

$$a = \frac{T_1(q^2 - q^1) - T_2(q^1 - q^0)}{2T_1T_2\tau} \quad (11.15)$$

y 2τ es el tiempo utilizado en variar la velocidad del movimiento, estando repartido simétricamente respecto al instante T_1 . Lógicamente, cuanto mayor sea la aceleración a permitida menor será el tiempo de transición τ .

Asimismo, es fácil obtener el máximo error cometido entre la trayectoria ideal (pasando por q^1) y la real con el segmento parabólico. Este se produce en $t = T_1$ y toma el valor:

$$e = \frac{a}{2}\tau^2 = \frac{T_1(q^2 - q^1) - T_2(q^1 - q^0)}{4T_1T_2}\tau \quad (11.16)$$

11.3.5. Otros interpoladores

Diferentes tipos de interpoladores han sido propuestos y utilizados para conseguir unir los puntos de la trayectoria con funciones continuas, derivables dos veces y computacionalmente manejables. Aparte de las ya mencionadas, puede destacarse la utilización de funciones senoidales, que aseguran continuidad en todas las derivadas. De este modo, para unir dos puntos consecutivos podrían utilizarse funciones de la forma:

$$q(t) = a + bt + c\text{sen}(wt) \quad (11.17)$$

Imponiendo las condiciones de contorno en posición, velocidad y aceleración, se obtendrían los correspondientes coeficientes.

11.3.6. Curvas De Bézier

Para el diseño asistido por ordenador es conveniente emplear representaciones sencillas de curvas y superficies, que involucren operaciones elementales, como sumas y multiplicaciones. Por tanto, el candidato más razonable a primera vista son las parametrizaciones polinómicas. Así podríamos representar curvas polinómicas de grado n o inferior en una base distinta, distinta de la canónica $\{1, t, \dots, t_n\}$, que la proporcionan los polinomios de Bernstein, los mismos que se emplean en teoría de la aproximación para demostrar el teorema de Weierstrass de aproximación uniforme de funciones continuas por polinomios. Su construcción es muy sencilla a partir de la fórmula del binomio de Newton:

$$(a + b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} a^i b^{n-i}, \dots \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (11.18)$$

Si tomamos $a = t, b = 1 - t$ en la expresión anterior, obtenemos:

$$1 = (t + 1 - t)^n = \sum_{i=0}^n B_i^n(t), \dots B_i^n(t) := \binom{n}{i} t^i (1 - t)^{n-i} \quad (11.19)$$

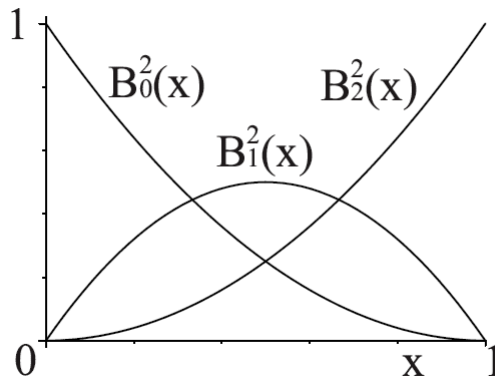
Donde $B_i^n(t)$ es el polinomio i -ésimo de Bernstein de grado n . Por ejemplo los polinomios de Bernstein de dos grado son como se ven en la figura 11.10:

$$B_0^2(t) = (1 + t)^2, B_1^2(t) = 2t(1 + t), B_2^2(t) = t^2$$

Estos polinomios forman una base alternativa $\{B_0^n(t), \dots, B_n^n(t)\}$ de los polinomios de grado n o inferior en una variable t y, frente a la base canónica, presentan la ventaja de ser todos del mismo grado.

La demostración de que forman base es sencilla. Echemos una ojeada al polinomio n -ésimo, $B_n^n(t) = t^n$. Coincide con el último polinomio de la base canónica. El

Figura 11.10: Polinomios de Bernstein de grado dos



Fuente: Autores de proyecto

anterior, $B_{n-1}^n(t) = n(t^{n-1} - t^n)$, involucra tan solo dos polinomios de la base canónica. Y así sucesivamente el polinomio $B_i^n(t)$, por el término $(1-t)^{n-1}$, tiene coeficientes no nulos solo para los monomios t^i, \dots, t^n , por lo cual la matriz de cambio de base triangular superior:

$$\begin{pmatrix} B_0^n(t) \\ \vdots \\ B_n^n(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & (-1)^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ t^n \end{pmatrix} \quad (11.20)$$

y, por ello, su determinante es el producto de los términos de la diagonal principal, que corresponden al coeficiente del monomio de menor grado de cada polinomio $B_i^n(t)$, que es no nulo, $\binom{n}{i}$. Con lo cual, el determinante es no nulo y los polinomios de Bernstein formando base de los polinomios de grado n o inferior.

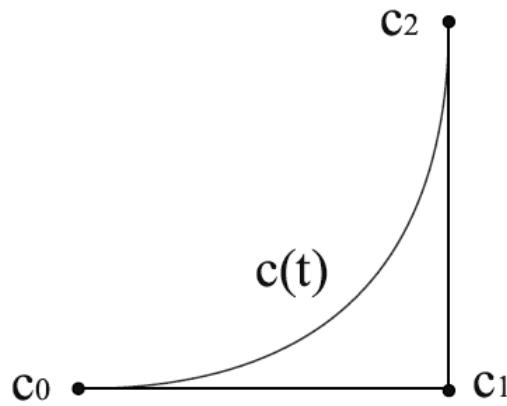
Podremos representar, pues, las curvas polinómicas de grado n como combinación de estos polinomios:

$$c(t) = \sum_{i=0}^n c_i B_i^n(t), \quad (11.21)$$

$$t \in [0, 1]$$

Donde todos los coeficientes c_i son puntos del plano o del espacio afín, según que la curva sea plana o espacial. A estos coeficientes los denominaremos vértices del polígono de control, $\{c_0, \dots, c_n\}$, de la curva de Bézier. Una curva de grado n tiene, pues, un polígono de control de $n + 1$ vértices.

Figura 11.11: Parábola de polígonos de control



Fuente: Autores de proyecto

Por ejemplo, una parábola con polígonos de control dados como se muestra en la figura 11.11, dado por $c_0 = (0, 0)$, $c_1 = (1, 0)$, $c_2 = (1, 1)$ esta parametrizada por:

$$c(t) = (2t - t^2, t^2) \quad (11.22)$$

$$c(t) = c_0 B_0^2(t) + c_1 B_1^2(t) + c_2 B_2^2(t) = (0, 0)(1 - t)^2 + (1, 0)2t(1 - t) + (1, 1)t^2 \quad (11.23)$$

$$c(t) = (2t - t^2, t^2) \text{ para } t \in [0, 1]$$

11.4. MUESTREO DE TRAYECTORIAS EN EL ESPACIO CARTESIANO

Como es de indicar, la trayectoria cartesiana mas común es la línea recta, utilizando también en ciertas ocasiones la trayectoria circular. Ambas pueden ser descritas con facilidad de manera analítica en función del tiempo, de modo que es fácil conocer las coordenadas cartesianas por las que se desea que pase el extremo del robot en un instante concreto.

En general, no es factible obtener a partir de esta descripción analítica de la trayectoria articular, siendo únicamente posible convertir una localización cartesiana n configuración articular a partir del modelo cinemático directo. Es por tanto, preciso seleccionar puntos de la trayectoria cartesiana (muestrear) para ser convertidos a su correspondiente configuración articular, siendo esta tarea función del control cinemático (inversa).

Pudiera parecer en comienzo conveniente tomar un alto número de puntos, puesto que a mayor numero de instantes en el que se muestrea mejor resultados se obtendrán, por lo que la trayectoria final pasara por todos estos puntos ajustándose con una mayor precisión. Por lo cual, se debe considerar que cada uno de estos puntos debe transformarse a sus coordenadas articulares y ser después utilizado alguno de los interpoladores enunciados anteriormente generamos la trayectoria articular. Por tanto, es claro que el costo computacional, limitado por la necesidad de una respuesta en tiempo real del control del robot, no es aconsejable que el número de puntos cartesiano a tomar crezca indiscriminadamente.

Por otra parte la no linealidad existente en el modelo geométrico del robot, indica que dependiendo de su cinemática y de la posición instantánea en cuestión, el error cometido entre la trayectoria resultante del extremo del robot y de la trayectoria cartesiana

deseada (que coincidiera en los punto seleccionados) puede variar enormemente. Entonces es conveniente decir no solo cuantos puntos se seleccionan, sino decir cuales con esos puntos, teniendo siempre como objetivo llegar a un compromiso entre el número de puntos seleccionados, y el error entre la trayectoria resultante y la deseada.

11.5. PROBLEMAS GEOMÉTRICOS CON LAS RUTAS CARTESIANAS

Tiempo de mezcla para cada grado de libertad deben ser iguales, esto garantiza que el movimiento resultante de todos los grados de libertad sea una línea recta en el espacio, debido a que todos los tiempos de mezcla son iguales la aceleración a usar en la mezcla de cada grado será distinta.

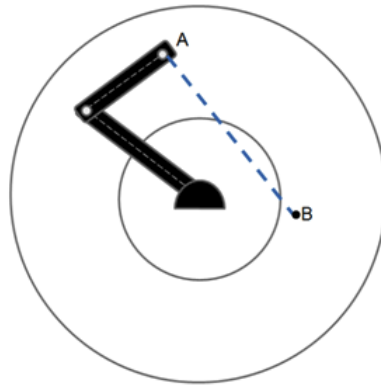
El método de generación de rutas por movimientos cartesianos tiende a tener contra-tiempos en relación con su espacio de trabajo. Existen varios tipos de problemas como son:

- **Puntos intermedios inalcanzables**

Este problema ligado con el volumen del trabajo del efector final, con respecto a su dirección final, es debido a que es probable que no todos los puntos vía que se asignan a la ruta lineal entre el efector final y su destino se encuentren dentro del volumen de trabajo.

El movimiento de A a B es posible en el espacio articular. Sin embargo la línea recta en el espacio cartesiano contiene puntos que no son alcanzables, este movimiento los puntos intermedios a lo largo de la ruta serian inalcanzables. Este es un ejemplo de una situación en la que una ruta en espacio de articulación se puede ejecutar fácilmente, pero una ruta en línea recta cartesiana fallaría.

Figura 11.12: Punto intermedio inalcanzable de un manipulador

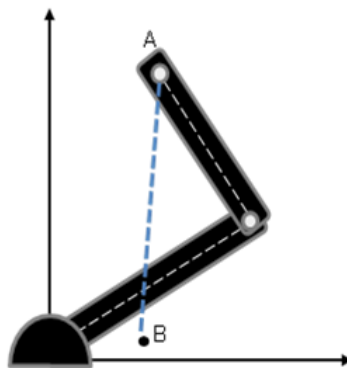


Fuente: Autores de proyecto

- **Velocidades de articulación altas cerca de una singularidad**

Se encuentran situaciones en el espacio de trabajo donde el manipulador le es inviable elegir velocidades de articulación finitas que realicen la velocidad que requiere el efector final en el espacio cartesiano, así que usualmente hay rutas que el manipulador no puede recorrer.

Figura 11.13: zona de trabajo donde se alinean los ejes de un manipulador.



Fuente: Autores de proyecto

En la situación de la figura 11.13 el extremo del robot está siguiendo una línea recta y se aproxima a una zona de trabajo donde se alinearan sus ejes, esto produce una singularidad. En esta caso, una o más la magnitud de las velocidades tiende hacia el infinito, como las velocidades del mecanismo tienen límites superiores esta situación genera que el manipulador se desvíe de la ruta deseada, este problema se puede resolver, limitando la velocidad del camino impuesto por el límite de velocidad de las articulaciones, pero de esta forma propiedades temporales se pierden.

- **Inicio y destino alcanzables en distintas soluciones**

Se puede dar el caso en el que los límites de las articulaciones van a restringir el número de soluciones con las que puede llegar a un punto dado en el espacio, por lo tanto surgirá un problema cuando el punto de destino no pueda alcanzarse en la misma solución física en la que se encuentra el robot desde el punto de inicio, para tratar estos problemas de rutas específicas en espacio cartesiano, los sistemas de control del manipulador deben soportar la generación de rutas en espacio de articulación y también en espacio cartesiano.

11.6. GENERACIÓN DE RUTAS EN TIEMPO DE EJECUCIÓN

Construir la trayectoria en términos de q, \dot{q}, \ddot{q} y proveer de esta información al sistema de control del manipulador, lo hace la rutina generada en los tiempos de ejecución.

- **Generación de rutas en el espacio de articulación:**

En los métodos de generación de trayectorias en el espacio de articulación no

existe un control entre las posiciones y orientaciones cartesianas entre cada dos puntos de paso consecutivos.

Para trazadores cúbicos, el generador de rutas lo calcula con la ecuación:

$$q(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (11.24)$$

Cuando finaliza un segmento se solicita de nuevo otros términos cúbicos, así que t regresa a cero y la generación continua.

Para trazadores lineales con mezclas parabólicas, se comprueba el valor del tiempo t en cada actualización para determinar si nos encontramos actualmente en la porción lineal o en la porción de mezcla del segmento, para la porción que es lineal la trayectoria lineal se calcula con:

$$q(t) = q_j + \dot{q}_{jk}t \quad (11.25)$$

$$\dot{q} = \dot{q}_{jk} \quad (11.26)$$

$$\ddot{q} = 0 \quad (11.27)$$

Donde t se refiere al tiempo que transcurre desde el j -ésimo punto vía y \dot{q}_{jk} se calcula en el tiempo de planeación de la ruta con la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_{jk} = \frac{q_k - q_j}{t_{djk}} \quad (11.28)$$

$$\ddot{q}_k = SGN(\dot{q}_{kl} - \dot{q}_{jk}) |\ddot{q}_k| \quad (11.29)$$

$$t_k = \frac{\dot{q}_{kl} - \dot{q}_{jk}}{\ddot{q}_k} \quad (11.30)$$

$$t_{jk} = t_{djk} - \frac{1}{2}t_j - \frac{1}{2}t_k \quad (11.31)$$

Y para la región de mezcla la trayectoria se calcularía con:

$$t_{inb} = t - \left(\frac{1}{2}t_j + \frac{1}{2}t_{jk}\right) \quad (11.32)$$

$$q = q_j + \dot{q}_{jk}(t - t_{inb}) + \frac{1}{2}\ddot{q}_k t_{inb}^2 \quad (11.33)$$

$$q = \dot{q}_{jk} + q_k t_{inb} \quad (11.34)$$

$$\ddot{q} = \ddot{q}_k \quad (11.35)$$

Donde estos términos se calculan en el tiempo de planeación de la ruta mediante las ecuaciones anterior y con:

$$\dot{q}_{(n-1)n} = \frac{q_n - q_{n-1}}{t_d(n-1)n - \frac{1}{2}t_n} \quad (11.36)$$

$$t(n-1) = t_a(n-1)n - t_n - \frac{1}{2}t_{n-1} \quad (11.37)$$

De forma continua, hasta que t se restablece a $\frac{1}{2}t_k$ cuando se introduce nuevos segmentos lineales, hasta pasar por todos los datos que representen los segmentos de la ruta.

■ **Generación de rutas de espacio cartesiano:**

En ocasiones es necesario especificar que el robot aparte de un punto hasta otro, limitando una línea recta a velocidad constante, es necesario seleccionar puntos intermedios lo necesariamente cercanos para que el control del robot consiga ajustar el punto final al que se necesita y para que la trayectoria sea la requerida.

Se usa el generador de rutas para la ruta del tradizador lineal con mezclas parabólicas. Los valores que se calculan señalan la posición y orientación cartesianas y no las valores de la variable de articulación, entonces se reescribe la ecuación en términos de x que será la componente del vector de posición y orientación cartesiana. En la porción lineal del segmento, cada grado de libertad en X se calcula como:

$$x = x_j + \dot{x}_{jk}t \quad (11.38)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_{jk} \quad (11.39)$$

$$\ddot{x} = 0 \quad (11.40)$$

En la región de mezcla, la trayectoria para cada grado de libertad se calcula como:

$$t_{inb} = t - \left(\frac{1}{2}t_j + t_{jk}\right) \quad (11.41)$$

$$x = x_j + \dot{x}_{jk}(t - t_{inb}) + \frac{1}{2}\ddot{x}_k t_{inb}^2 \quad (11.42)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_{jk} + \ddot{x}_k t_{inb} \quad (11.43)$$

$$\ddot{x} = \ddot{x}_k \quad (11.44)$$

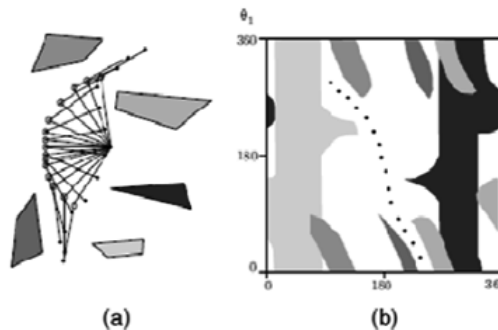
Todas estas variables son calculadas con el tiempo de planeación.

11.7. GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS SIN COLISIONES

Lo ideal al solucionar el problema de generación de trayectorias sería que, al darle las posiciones inicial y final, el sistema robótico generara una ruta eficiente y libre de colisiones con los posibles obstáculos presentes en la celda de trabajo. En la actualidad, existen varios métodos para este fin, aunque comercialmente no hay aplicaciones industriales debido a que las actividades en la industria son lo suficientemente controladas, mientras que en aplicaciones aeroespaciales esta área es de gran interés. Para este fin, el

sistema robótico debe tener un modelo bien definido del manipulador, el espacio de trabajo y de los posibles obstáculos que pueden ocasionar una colisión y en muchos casos, implementar técnicas que tomen decisiones acertadas, tales como agentes inteligentes. Los algoritmos de generación de trayectorias requieren de la definición de espacio de trabajo (W) y espacio de configuración (Q). (W) es el entorno o lugar geométrico donde interactúa el robot en forma real con su entorno (espacio cartesiano); el espacio (Q) se define como el conjunto de todas las posibles configuraciones cinemáticas de un robot y puede ser tratado como un espacio dimensional de orden dos, tres, cuatro o $n - dimensional$. La representación del espacio de configuración permite establecer al robot como punto dentro de un espacio n-dimensional, con lo cual se puede trazar una trayectoria continua libre de colisiones desde una configuración inicial (start) hasta una final (goal).

Figura 11.14: (a) Trayectoria para un manipulador de dos articulaciones por medio del espacio de trabajo. (b) Trayectoria en el espacio de configuración.



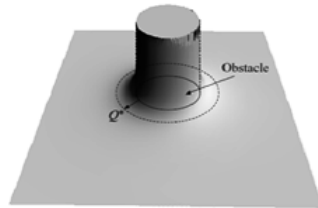
Fuente: Goldberg, K.. Planar Robot Simulator with Obstacle Avoidance
(Configuration Space). 2005

Existen muchos métodos para generar una ruta sin colisiones, de los cuales se destacan dos, denominados métodos globales y métodos locales. El primero de ellos está basado en la construcción completa del espacio de configuraciones libres y aborda el problema formando una representación de gráficos conectados del dicho espacio, buscando después

en el gráfico una ruta sin colisiones. El modelamiento de los obstáculos en el espacio de configuraciones por medio de ecuaciones exactas solo ha sido resuelto para casos particulares y relativamente sencillos, debido a su complejidad y por tanto se implementan técnicas que simplifican el proceso, por ejemplo al subdividir el espacio en pequeñas celdas, reduciendo el problema a la búsqueda de una sucesión de celdas adecuadas. Las técnicas basadas en este método aumentan exponencialmente de complejidad conforme hay un mayor número de grados de libertad.

Los métodos locales no necesitan de una descripción total del espacio de configuración o de trabajo. Se basa en suponer que el manipulador está bajo la influencia de un campo potencial artificial y en la creación de un polo artificial que atrae al manipulador, evitando a los obstáculos mediante la adjudicación de campos artificiales de potencia alrededor de ellos.

Figura 11.15: Representación del campo repulsivo de un obstáculo Q

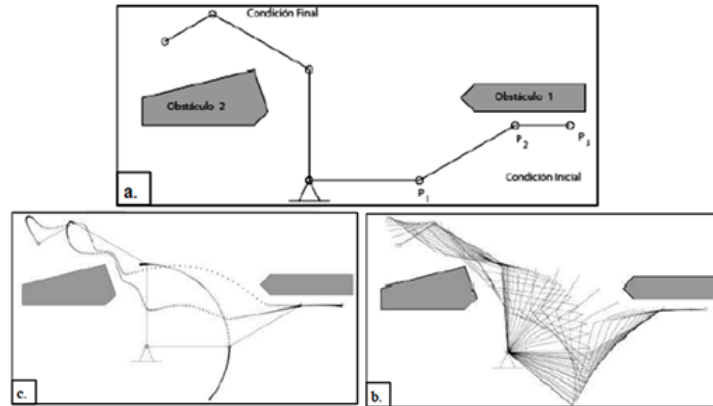


Fuente: Choset, H. y otros, Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation, Cambridge, Mass. MIT Press, 2005.

Por tanto la trayectoria se define mediante la evaluación del gradiente de la función potencial en la posición del robot, resultante del efecto de atracción del polo y la repulsión de los campos de cada obstáculo. Así, el movimiento de la (robot) puede ser tratado como un problema de optimización donde existe un mínimo global en el objetivo (polo) con un valor inicial en el punto de partida.

El inconveniente de esta técnica es la aparición de mínimos locales que podrían generar

Figura 11.16: Comportamiento de un robot planar redundante de tres eslabones sometido a campos potenciales. (a) Estado inicial y final, (b) Estados intermedios debido al campo potencial artificial, y (c) Generación de la trayectoria libre de colisiones.



Fuente: Cárdenas, Edwin F.- Mendez Luis M. Esmeral Jorge. Métodos para generar trayectorias libres de colisiones en entornos multidimensionales. Universidad nacional de Colombia, Revista Ingeniería e Investigación, Vol 31, No 2, pp 5-17, AUGUST 2011.

problemas de operación.

CAPÍTULO 12

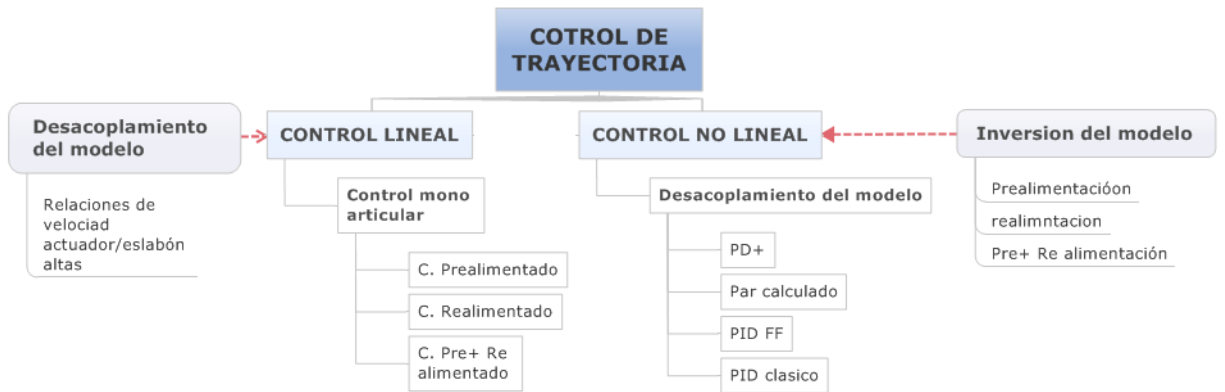
CONTROL DE TRAYECTORIA

Las aplicaciones industriales más comunes requieren que el movimiento del robot (articulaciones y efector final) recorra una trayectoria planteada o deseada. Para ello se han desarrollado diversas técnicas de control de lazo cerrado, realizando un feed-back de la posición y en algunos casos de la velocidad. En el presente capítulo se procederá a la explicación de las técnicas de control más usadas en el área de la robótica con aplicaciones industriales, las cuales pueden ser lineal o no lineal. En la figura 12.1 se muestra el esquema a desarrollar en el presente capítulo.

12.1. CONTROL LINEAL DE MANIPULADORES.

En este capítulo se estudiarán las técnicas de control lineal; técnicas usadas en sistemas que puedan modelarse aproximadamente a través de ecuaciones diferenciales lineales. Este método servirá para fundamentar la aplicación de control en sistemas más complejos como lo son los no lineales. Además, se usa un método simple que permita construir un sistema de control, que trate cada articulación con un sistema de control independiente, entonces un manipulador con N articulaciones, se tendrán N sistemas

Figura 12.1: Control de manipuladores



Fuente:Autores del proyecto

independientes de control de una entrada, una salida (SISO).

12.1.1. Sistemas Lineales De Segundo Orden.

Un sistema dinámico de masa-resorte es un ejemplo de una ecuación diferencial lineal de segundo orden, definida por:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0 \tag{12.1}$$

donde:

- m(masa del bloque unido al resorte),
- k(rigidez resorte),
- b(fricción).

Del estudio de ecuaciones diferenciales, se conoce que la forma de solucionar esta ecuación, depende de la raíces de la ecuación característica

$$ms^2 + bs + k = 0$$

$$s_{1,2} = \frac{-b}{2m} \pm \frac{\sqrt{b^2 - 4mk}}{2m} \quad (12.2)$$

Estas raíces determinaran la condición de los movimientos del sistemas, si la raíz es real, el comportamiento del movimiento será no oscilatorio y lento, si la raíz es un imaginario entonces el movimiento será oscilatorio. Por lo tanto, se tendrán tres clases de respuesta para estudiar el movimiento:

1. Respuesta sobreamortiguada Cuando , esto significa raíces reales y desiguales, sucede cuando la fricción controla el sistema.
2. Respuesta subamortiguada Cuando , esto denota raíces complejas, donde lo que domina es la rigidez y por lo tanto se produce un comportamiento oscilatorio.
3. Respuesta críticamente amortiguada Cuando , significa que la fricción y la rigidez están equilibradas, por lo cual genera la respuesta no oscilatoria más rápida posible. Este caso, sería la condición deseable, ya que anula las condiciones iniciales distintas de cero y regresa a su posición nominal en el menor tiempo posible, pero sin un comportamiento oscilatorio.

12.1.2. Control Monoarticular

Control en el que se ignora la interacción entre los grados de libertad del robot, se considera que un robot es de control monoarticular en la medida que las matrices D, H y C de la ecuación:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) + F_v\dot{q} \quad (12.3)$$

Se considerara que cada actuador integra un reductor, de tal forma que las posiciones de las articulaciones q se relacionen con las posiciones de los ejes de los actuadores q_a

con la relación:

$$q_a = Mq \quad (12.4)$$

donde M es la matriz diagonal de los factores de reducción, cuyos coeficientes tienen que ser mayores a 1, por lo tanto se tendrá que:

$$\begin{aligned} \dot{q}_a &= M\dot{q} \\ \ddot{q}_a &= M\ddot{q} \\ \tau_a &= M^{-1}\tau \end{aligned} \quad (12.5)$$

τ_a Expresa el par resultante en el eje del actuador.

La matriz de inercia , es una matriz diagonal, que está constituida por los elementos constantes de la diagonal principal de

$$D_{(q)} = D_1 + D_2(q) \quad (12.6)$$

D_1 es una matriz diagonal, que está constituida por los elementos constantes de la diagonal principal de $D_2(q)$. Esta representara el aporte de cada eslabón en la inercia que soportara el actuador.

Definida las anteriores variables de la relaciones 12.5 y 12.6, se reemplazan en la ecuación del modelo dinámico de robot, de tal forma se obtiene que:

$$\tau_a = M^{-1}D_1M^{-1}\ddot{q}_a + M^{-1}D_2M^{-1}\ddot{q}_a + M^{-1}H + M^{-1}C + M^{-1}F_vM^{-1}\dot{q}_a \quad (12.7)$$

Sí $f_v a$, es la matriz diagonal de constantes de rozamiento viscoso visto por los actuadores a la entrada del reductor. Entonces:

$$F_{va} = M^{-1}F_vM^{-1} \quad (12.8)$$

Y τ_p es considerado un par perturbador,

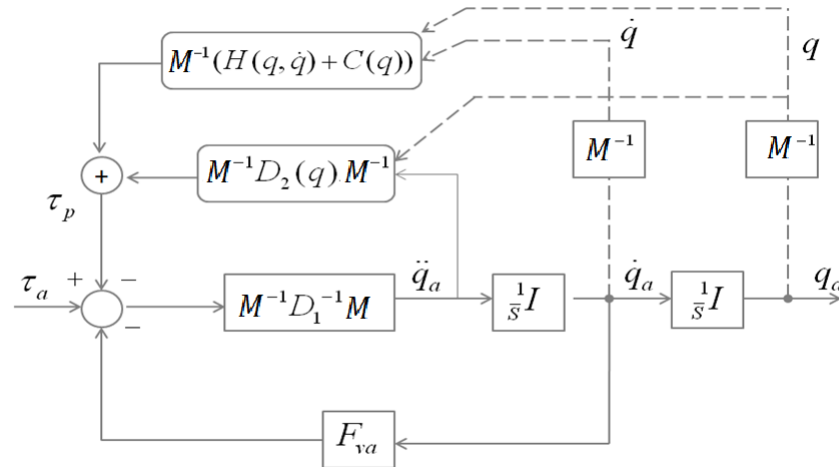
$$\tau_p = M^{-1}D_2M^{-1}\ddot{q}_a + M^{-1}H + M^{-1}C \quad (12.9)$$

se tiene que

$$\tau_a = M^{-1}D_1M^{-1}\ddot{q}_a + F_{va}\dot{q}_a + \tau_p \quad (12.10)$$

Para comprender mejor esta ecuación se hace uso del siguiente diagrama de bloques 12.2, que posibilita estimar en qué condiciones puede considerarse un robot como una serie de eslabones dinámicamente desacoplados, de tal forma que se pueda analizar con un control lineal.

Figura 12.2: Diagrama de bloques del control monoarticular



Fuente: Autores del proyecto

Bloques de forma cuadrada, están formados por las matrices diagonales constantes, esto indica el efecto que da el par del actuador sobre el movimiento de la articulación i .

Los bloques ovalados, dependerán de las variables que llegan a ellos a través de las flechas a tramos.

Los bloques fuera del recuadro no son constantes, sino que dependen de las posiciones

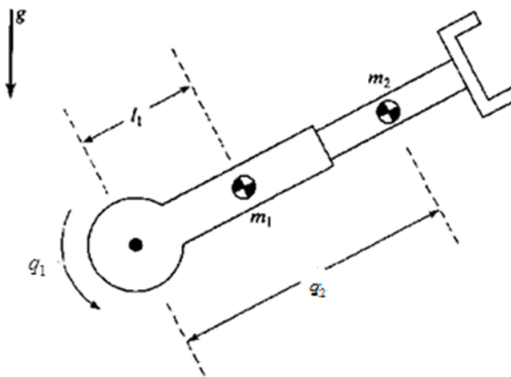
y velocidades de los ejes y representan el efecto τ_p que sobre la articulación i tiene el movimiento de los demás ejes.

Si las velocidades del movimiento de los actuadores (\dot{q}_a) son mucho mayores que las de las articulaciones (\dot{q}) se tiene que M será muy superior a la unidad, por lo que M^{-1} tendrá un valor reducido, y en consecuencia τ_p es despreciable frente τ_a y al par de rozamiento, si es así se considera las articulaciones del robot están desacopladas.

EJEMPLO 12.1

A continuación se hará el análisis de un robot de 2DOF mostrado en la figura 12.3, cuya dinámica fue descrita en el capítulo vdv

Figura 12.3: Robot manipulador de 2 grados de libertad



Fuente: Autores del proyecto

Los resultados del análisis dinámico arrojan los siguientes resultados:

$$D(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + I_{zz1} + I_{zz2} + m_2 d_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (12.11)$$

$$H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 2m_2 d_2 \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 \\ -m_2 d_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad (12.12)$$

$$C(q) = \begin{bmatrix} g(m_1 l_1 + m_2 d_2) \cos(\theta_1) \\ gm_2 \text{sen}(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (12.13)$$

Entonces, para el ejemplo específico en el que este robot esta accionado a través de reductores, en el que una vuelta del eje supondrá 100 vueltas del motor, y con un par de rozamiento viscoso 5 Nms/rad, asumiendo $m_1=10\text{kg}$, $m_2=1\text{ kg}$, $L_1=0.1\text{ m}$, $g= 10\text{ m/s}^2$ se tiene:

$$D(q) = \begin{bmatrix} m_1 L_1^2 + m_2 q_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (10 * 0,1^2) + (1 * q_2) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1 + q_2^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12.14)$$

$$H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 2m_2 q_2 \dot{q}_2 \dot{q}_1 \\ -m_2 q_2 \dot{q}_1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2q_2 \dot{q}_2 \dot{q}_1 \\ -d_2 \dot{q}_1^2 \end{bmatrix} \quad (12.15)$$

$$\begin{aligned} C(q) &= \begin{bmatrix} g(m_1 l_1 + m_2 q_2) \cos(q_1) \\ gm_2 \text{sen}(q_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 l_1 g \cos(q_1) + m_2 q_2 g \cos(q_1) \\ gm_2 \text{sen}(q_1) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 10 \cos(q_1) + 10q_2 \cos(q_1) \\ 10 \text{sen}(q_1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12.16)$$

Y siendo M la matriz diagonal del factor de reducción

$$M = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \quad (12.17)$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} q_{a1} \\ q_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,01 q_{a1} \\ 0,01 q_{a2} \end{bmatrix} \quad (12.18)$$

$$\begin{aligned} D_1 &= \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ D_2 &= \begin{bmatrix} q_2^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12.19)$$

$$MD_1^{-1}M = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 \\ 0 & 10^4 \end{bmatrix} \quad (12.20)$$

$$M^{-1}D_2M^{-1} = \begin{bmatrix} 10^{-4}q_2^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12.21)$$

$$q_2 = 0,01q_{a2}$$

$$M^{-1}D_2M^{-1} = \begin{bmatrix} 10^{-4}q_2^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-8}q_{a2}^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12.22)$$

$$M^{-1}D_2M^{-1} = \begin{bmatrix} 10^{-4}q_2^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-8}q_{a2}^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12.23)$$

$$M^{-1}(H + C) = \begin{bmatrix} \cos(q_1)/10 + (q_2 \cos(q_1))/10 + (q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2)/50 \\ \text{sen}(q_1)/10 - (q_2 \dot{q}_1^2)/100 \end{bmatrix} \quad (12.24)$$

$$F_{va} = M^{-1}F_vM^{-1} = \begin{bmatrix} 10^{-4}f_{v1} \\ 10^{-4}f_{v2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 * 10^{-4} \\ 5 * 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (12.25)$$

Usando la figura ?? para esta aplicación y de las matrices anteriores, sabiendo que:

$$q_1 = 0,01q_{a1} \quad (12.26)$$

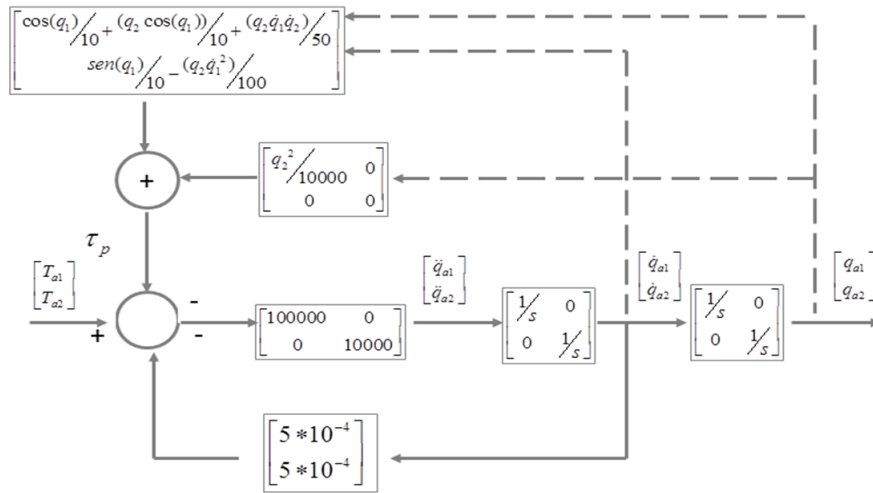
$$q_2 = 0,01q_{a2}$$

En el diagrama, se aprecia que el τ_p no contribuye fuertemente y por lo tanto se puede despreciar.

12.1.3. Esquema General De Control Monoarticular

Lo anterior visto, ayuda para determinar si el control de robot puede ser considerado como el control de n ejes independientes. La finalidad del control dinámico es originar, por medio de una trayectoria deseada para la articulación (q_d), la tensión de mando (u), tensión proporcionada por el convertidor digital analógico del sistema de control, de tal

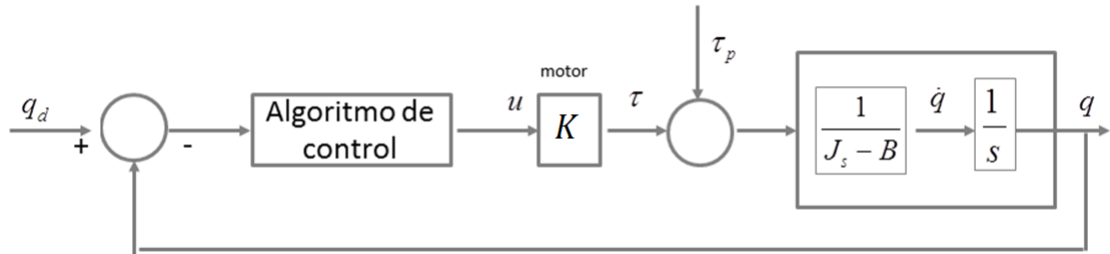
Figura 12.4: Diagrama de bloques del esquema de control del robot de 2 DOF



Fuente:Autores del proyecto

forma que q se aproxime tanto como se pueda a q_d . La figura ?? muestra el esquema que representa el control.

Figura 12.5: Diagrama de bloques de una articulación

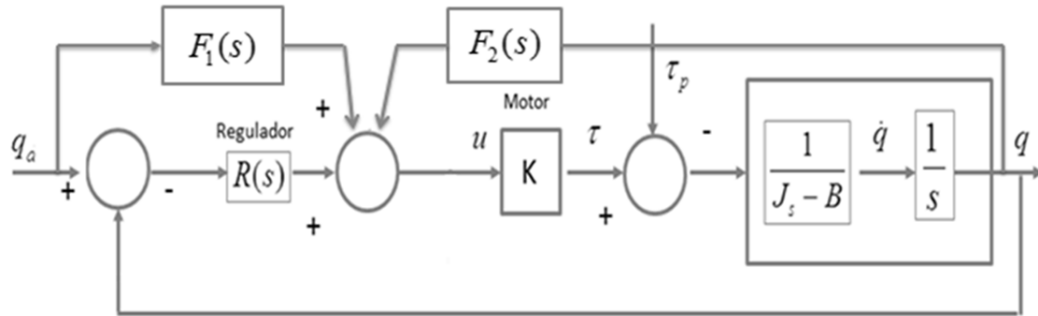


Fuente:Autores del proyecto

Donde τ es el par disponible a la salida del motor-reductor; τ_p es el par perturbador q_d y q son las trayectorias deseadas y reales de la articulación respectivamente.

Existe un esquema de control más completo, en el cual se incluyen 2 efectos, la pre-alimentación (Denotado por las funciones F_1 y F_2) y la realimentación. Dicho esquema se muestra en la figura 12.6 y puede tomarse los efectos de pre alimentación y realimentación por separado o trabajar conjuntamente.

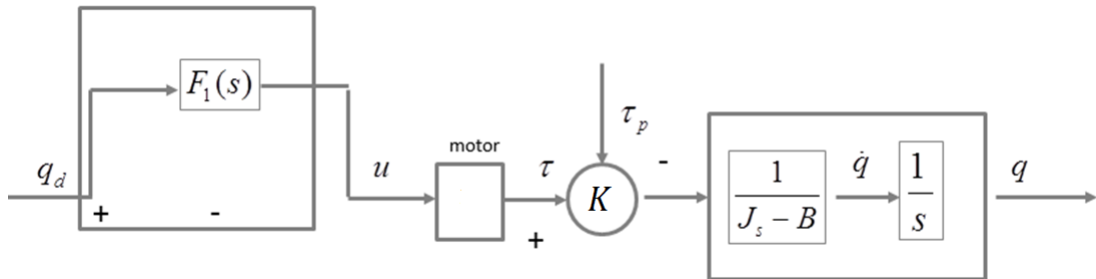
Figura 12.6: Esquema general de control con efectos de pre y re- alimentación.



Fuente:Autores del proyecto

Control Pre-Alimentado Por Inversión Del Modelo

Figura 12.7: Esquema control pre alimentación.



Fuente:Autores del proyecto

El control pre-alimentado mostrado en la figura 12.7 calcula un valor de torque en base al modelado del sistema. Escogiendo f_1 como la inversa de la función de transferencia del modelo del sistema

$$F_1(s) = \frac{1}{K}(J_s + B)s \quad (12.27)$$

Lo ideal es que , esto estará condicionada a:

- El conocimiento de K, J y B, determinados por el modelo del motor y la articulación. Pero estos valores son aproximados por lo tanto y no serán nunca iguales.

- No exista perturbaciones externas del robot ni pares procedentes del acoplamiento del movimiento de los demás grados de libertad(τ_p)

Para plantear el uso exclusivo de la pre-alimentación, es necesario asumir que se mantendrá inmóvil la articulación $\Delta q_d(t) = 0$, entonces

$$\begin{aligned}\tau_p(s) &= \frac{1}{s} \\ q_d(s) &= 0 \\ q(s) &= q_d(s) - \frac{1}{(J_s+B)s}\tau_p(s)\end{aligned}\tag{12.28}$$

Por lo que:

$$q(s) = -\frac{1/s}{(J_s + B)s}\tag{12.29}$$

de esta forma:

$$q(t) = \frac{J}{B^2}e^{-\frac{B}{J}t} - \frac{t}{B} - \frac{J}{B^2}\tag{12.30}$$

En condiciones en que la dinámica sea totalmente conocida y no existan perturbaciones, el control de cadena abierta mediante la pre-alimentación mediante esta función consigue resultados adecuados, pero en la práctica no es viable, debido a que existe la necesidad de utilizar una función de transferencia con mas ceros que polos, esto no es usual y por ello no realizable.

Control Re-Alimentado Por Inversión Del Modelo

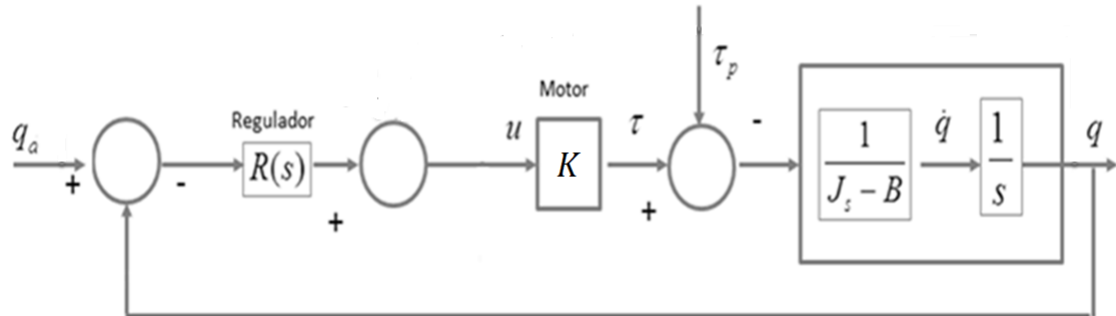
En este control se tiene que f_1 y f_2 son nulas y por tanto se obtiene

$$q(s) = \frac{1}{(J_s + B)s + MR(s)} (MR(s)q_d(s) - \tau_p(s))\tag{12.31}$$

El diagrama de bloques de este modelo de control se presenta en la figura 12.8

La función de transferencia de la articulación a controlar tiene un polo en $s=0$, por lo tanto no presentara por si mismo error en régimen permanente ante una entrada escalón en la referencia

Figura 12.8: Esquema control con realimentación.



Fuente: Autores del proyectos.

Si no existe τ_p y q_d toma el valor de un escalón unitario se tiene que:

$$q(s) = \frac{KR(s)}{(J_s + B)s + KR(s)} \cdot \frac{1}{s} \quad (12.32)$$

Considerando que el sistema es estable, $R(q)$ no nulo, y con el uso del teorema del valor final, se tiene que el valor de q crece lo suficiente que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta q(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sq(s) = 1 \quad (12.33)$$

lo que significa que después de un tiempo considerado, la articulación aumentara su posición en 1 unidad, tal como era necesario por la referencia, de tal manera que el error ante la entrada del escalón de q_d (error de posición) nulo.

Pero ahora si la referencia no cambia, y τ_p es un escalón unitario se tendrá que:

$$q(s) = -\frac{\tau_p}{(J_s + B)s + KR(s)} = \frac{-1/s}{Js^2 + Bs + KR(s)} \quad (12.34)$$

Este valor determinara del tipo de regulador que utilice. Si se considera un regulador proporcional

$$R(s) = K_p \quad (12.35)$$

Se tiene que:

$$\Delta q(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s q(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{-1/s}{Js^2 + Bs + K \cdot K_p} = -\frac{1}{K \cdot K_p} \quad (12.36)$$

Pero si $R(s)$ toma la forma de un regulador PI se tendrá que:

$$R(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (12.37)$$

$$\Delta q(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{-1/s}{Js^2 + Bs + K \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right)} = 0 \quad (12.38)$$

Lo que significa que una perturbación tipo escalón, hará que la articulación se mueva hasta un valor en un regulador proporcional o recuperara su posición inicial si $R(s)$ es proporcional integral.

En caso que q_d varíe a velocidad constante y en ausencia de perturbaciones, con el uso de un regulador proporcional ($R(s) = K_p$) la salida que seguirá a la referencia, moviéndose a la misma velocidad, pero con un cierto retardo de valor constante, siendo preciso usar un regulador de tipo PI para que la salida q siga perfectamente a la referencia q_d . La retroalimentación no consigue igualar la salida $q(t)$ con la referencia $q_d(t)$ en todo instante de tiempo, pero si logra que pasado determinado tiempo (régimen permanente), ambas coincidan con el uso de un regulador proporcional. Mientras el control por pre-alimentación era incapaz de actuar ante una perturbación, por lo que la articulación tendría un movimiento sin control, con el uso del control re-alimentado ante una perturbación en escalón, es capaz de parar el movimiento con el uso en un regulador proporcional e incluso de acabar compensando el efecto de esta con el uso de un regulador proporcional integral.

Control pre-alimentado + re-alimentado (ff)

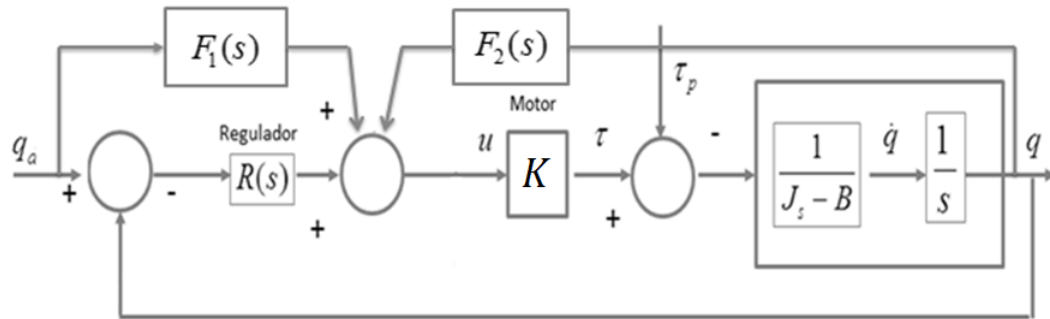
Combinando ambas formas de control de forma que ante las condiciones ideales, conociendo la dinámica y en ausencia de perturbaciones q y q_d sean iguales en todos

momento, mientras que en caso de no darse estas circunstancias, el sistema siga controlado, llegando a igualar el valor real de la referencia pasado cierto tiempo. Este tipo de control se denominara PID+FF, y se tendrá que:

$$q(s) = q_d(s) - \frac{1}{(Js + B)s + KR(s)} \tau_P \quad (12.39)$$

En la figura 12.9 se muestra, de nuevo, el esquema de control pre+re-alimentado, el cual, combina los beneficios de estos dos efectos y logra realizar un control mas estable y con mayor rango de trabajo, con el inconveniente de requerir un gran coste computacional.

Figura 12.9: Esquema control con re+ pre-alimentación.



Fuente:Autores del proyecto.

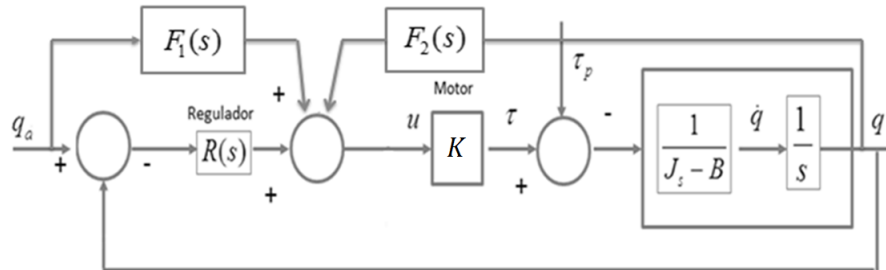
Control pre-alimentado + re-alimentado (ff) compensado por gravedad

Un efecto que puede aumentar el rendimiento del controlador es proporcionar un valor inicial de tension en base al valor necesario para vencer los efectos gravitatorios. Este efecto puede computarse en base a su modelo dinámico y es función de los valores articulares. La expresión correspondiente a la compensación por gravedad, denotada por $F_2(s)$ es

$$F_2 = \frac{C(q)}{K} \quad (12.40)$$

La implementación del efecto de compensación por gravedad, realiza un efecto de desacoplamiento y disminuye el error en estado estable. El esquema de control con realimentación y realimentación + compensación de gravedad se muestra en la figura 12.10

Figura 12.10: Esquema control con re+ pre-alimentación + Compensación por gravedad



Fuente:Autores del proyecto

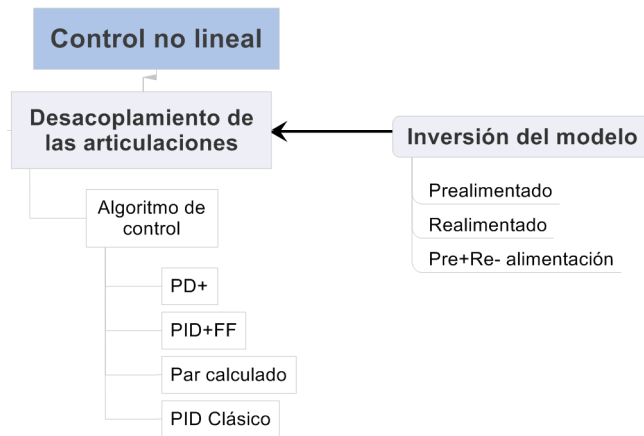
12.2. CONTROL NO LINEAL DE MANIPULADORES.

En capítulos anteriores se dedujo un modelo dinámico para manipuladores altamente no lineal, lo que torna al control un poco tedioso y complicado. Además, se abordó el dicho control como si se tratara de un sistema lineal para casos donde son válidas una serie de suposiciones razonables, y así poder usar técnicas de control lineal tradicional. Las condiciones para que estas simplificaciones tengan validez son muy pocas y se hace necesario abordar el problema de control no lineal. Existen una gran cantidad de técnicas eficientes que trabajan el problema de control no lineal, pero una gran mayoría de ellas se hacen económicamente inviables debido al gran costo computacional. Es por esto que en el presente texto se abordarán algunas de los métodos que se ajustan razonablemente a los manipuladores y son de alta implementación en la industria. Otro factor a destacar es la estabilidad del algoritmo de control implementado en la tarea, para lo cual se darán algunas nociones y métodos para determinarla.

12.2.1. Métodos de control no lineal para robots manipuladores

Existen varios métodos de control para robots manipuladores de los cuales se describirán los más usados en la industria y cuya complejidad va de acuerdo con la profundidad propuesta en el presente seminario. La figura 12.11 muestra un esquema de los métodos a tratar en el presente capítulo.

Figura 12.11: Métodos de control

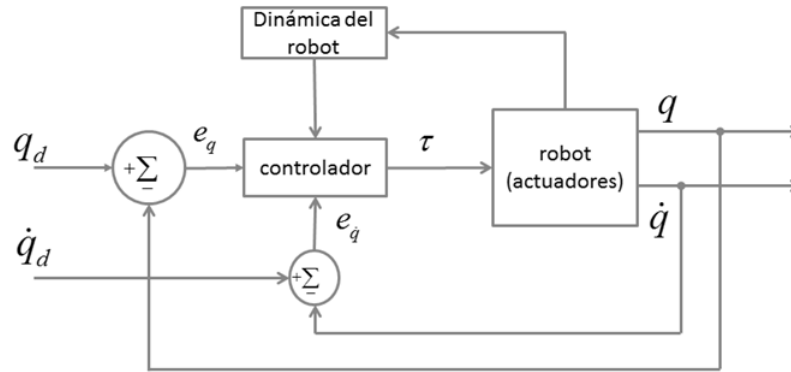


Fuente:Autores del proyecto

El objetivo del control es básicamente que la trayectoria y velocidad descrita por un manipulador (sus variables articulares y/o efector final) sea igual a la deseada. Esto implica conocer las fuerzas y los torques necesarios para que los actuadores generen dicha trayectoria deseada y la implementación de un sistema de control que permita regular y anular los errores. Como es bien sabido, los sistemas de control convencionales trabajan con base al error entre las variables a controlar reales y las deseadas. Para un manipulador la posición y la velocidad descritas por el manipulador (q, \dot{q}) serían cotejadas con las deseadas por el usuario (q_d, \dot{q}_d) , con las cuales se calcularían los torques y fuerzas que el actuador debe efectuar. El esquema general de control se muestra en el diagrama de bloques de la figura 12.13. Obsérvese que el sistema de control funciona en base al vector de errores de posición e_q , el vector de errores de velocidad \dot{e}_q y la dinámica

del robot con la cual se calcula el vector de torques aplicados τ de los actuadores.

Figura 12.12: diagrama de bloque del esquema general de control para un robot manipulador.



Fuente: REYES Fernando. Robótica: Control de robots manipuladores. Editorial alfaomega, México, 2011.

Generalmente es necesario para el controlador conocer el modelo dinámico del manipulador estudiado anteriormente considerando torques externos y efectos de fricción viscosa

$$\tau = D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) + F_v\dot{q} + \tau_e \quad (12.41)$$

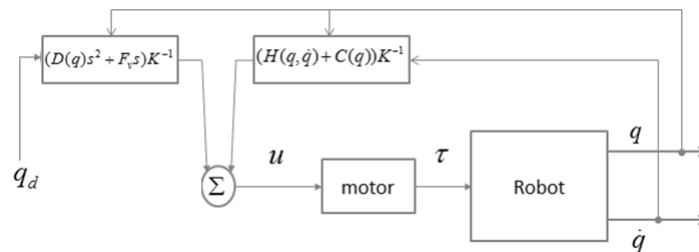
Sistemas de control clásico multiarticulador

Considerar que cada articulación no se ve afectada por efectos ajenos a los producidos por sus propias características dinámicas no siempre es posible y se hace necesario el estudio del manipulador como un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Dichos sistemas son complejos y requieren de la implementación de técnicas para poder usarse.

Desacoplamiento por inversión del modelo.

En la técnica de desacoplamiento por inversión del modelo, el modelo del sistema se cancela al ser pre alimentado con el modelo cinemático inverso desacoplando el sistema. Es claro que se tendrán que tener en cuenta la matriz de inercia $D(q)$, la matriz de efectos de coriolis y fuerzas centrífugas $(H(q, \dot{q}))$, la matriz de gravedad $C(q)$ y la matriz de rozamiento viscoso F_v . El esquema de desacoplamiento por inversión del modelo se muestra en la figura 12.13.

Figura 12.13: Desacoplamiento por inversión del modelo.



Fuente: Autores del proyecto

Se evidencia el cálculo de las matrices D, H y C para las situaciones instantáneas del robot, mediante lecturas tomadas por los sensores, con lo cual, junto a la trayectoria deseada del manipulador se obtiene la tensión de los motores.

$$\tau = [(D(q)s^2 + f_v s)K^{-1}q_d + (H(q, \dot{q}) + C(q))K^{-1}] K \quad (12.42)$$

haciendo uso de las relaciones 12.42 y la dinámica del robot (12.3) se obtiene

$$q = q_d - \frac{1}{(D(q)s + f_v)s} \tau_e \quad (12.43)$$

Lo cual muestra que en ausencia de perturbaciones externas, quedando el modelo desacoplado.

Control PID con pre-alimentación.

Al realizar el desacoplamiento dinámico del robot se puede hacer el control con cualquier método tradicional, pero en general, el control PID es más adecuado debido a que puede regular mejor los efectos producidos por fenómenos no modelados y la inexactitud de los parámetros D , H y C en comparación con los reales.

El regulador PID posee una estructura de la forma:

$$q = q_d - \frac{1}{(D(q)s + f_v)s} \tau_e \quad (12.44)$$

Al ser un manipulador $n \times n$ el regulador PID será una matriz diagonal de la misma dimensión, en donde cada elemento de la diagonal principal corresponde al regulador de su respectiva articulación, de tal manera que:

$$R(s) = \begin{bmatrix} k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} + k_{d1}s & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} + k_{d2}s & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_{pn} + \frac{k_{in}}{s} + k_{dn}s \end{bmatrix} \quad (12.45)$$

Al añadir un controlador PID al esquema de desacoplamiento cinemático por inversión del modelo se obtiene una expresión para el par necesario de los actuadores de la forma:

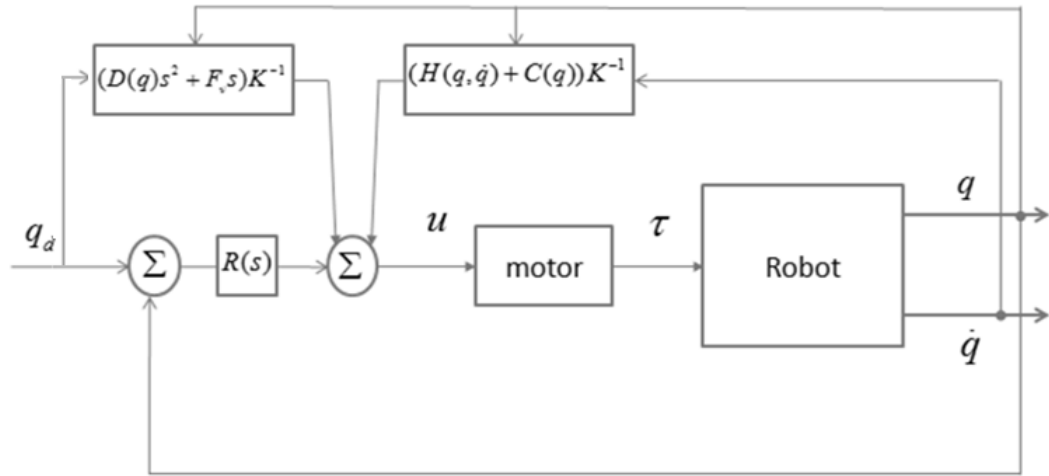
$$\tau = ((D(q)s^2 + f_v s)q_d + H(q, \dot{q}) + C(q)) + R(s)K(q_d - q) \quad (12.46)$$

El diagrama de bloques que describe el presente esquema de control se muestra en la figura 12.14

Si se igualan la expresión 12.97 con el torque descrito por el modelo dinámico y posteriormente se despeja el vector de variables articulares se obtiene:

$$q = q_d - [D(q)s^2 + f_v s + R(s) \cdot K]^{-1} \tau_e \quad (12.47)$$

Figura 12.14: Esquema control con re+ pre-alimentación.



Fuente: Autores del proyecto.

Donde se muestra que entre menor sea el par perturbador más exacta será la trayectoria descrita por el manipulador con respecto a la deseada.

En el diagrama de bloques de la figura 12.14 se muestra que el controlador PID tiene como entrada la diferencia entre la trayectoria deseada y la descrita por el manipulador (error denotado como e_q) y como salida la tensión que debe proporcionarse a los actuadores de tal manera que:

$$u = [(D(q)s^2 + f_v s) q_d + H(q, \dot{q}) + C(q)] K^{-1} + R(s) \cdot e_q \quad (12.48)$$

En donde k la matriz diagonal de constantes de par de los motores. La expresión 12.48 es la ley de control usada en este algoritmo de control y con la cual se aplica tensiones a los actuadores. La evaluación en tiempo real de esta expresión requiere de gran coste computacional y por tanto en muchas ocasiones no es viable económicamente, por lo cual se suelen hacer simplificaciones por ejemplo al ser las velocidades articulares muy bajas puede despreciarse el efecto de la matriz H y f_v .

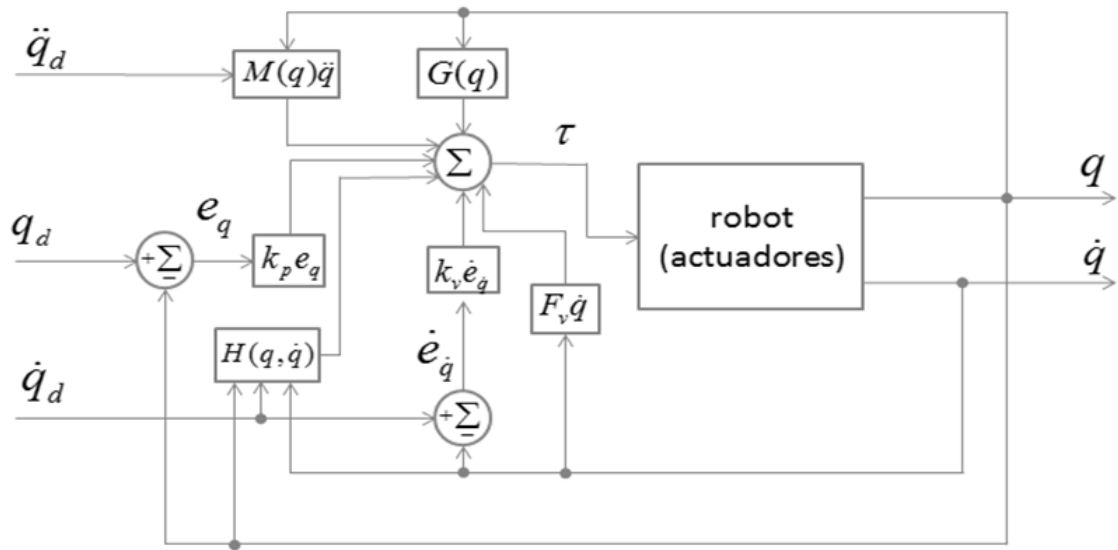
Control PD+.

El algoritmo de control PD+ con compensación de gravedad (τ_{PD+}) incluye un control proporcional de error de posición, un control proporcional de error de velocidad y la dinámica completa del robot manipulador en la cual se incluyen la trayectoria, la velocidad y la aceleración deseada.

El control PD+ se representa mediante la ecuación 12.49 y es mostrado como un diagrama de bloques en la figura 12.15

$$\tau_{PD+} = k_p e_q + k_v e_{\dot{q}} + D(q)\ddot{q}_d + H(q, \dot{q}) + C(q) + F_v \dot{q} + \tau_e \quad (12.49)$$

Figura 12.15: Diagrama de bloque del esquema de control PD+ para un manipulador



Fuente: Autores del proyecto.

La implementación del sistema de control PD+ requiere el conocimiento exacto del modelo dinámico del robot, lo cual significa que sus parámetros dinámicos se conocen. El esquema de control PD+ y la ecuación de lazo cerrado que involucra el modelo dinámico del manipulador se presenta mediante variables de estado en la ecuación 12.50

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_q \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_q \\ -M(q)^{-1} [k_p e_q + k_v \dot{e}_q + H(q, \dot{q}) \dot{e}_q + F_v \dot{e}_q - G(q)] \end{bmatrix} \quad (12.50)$$

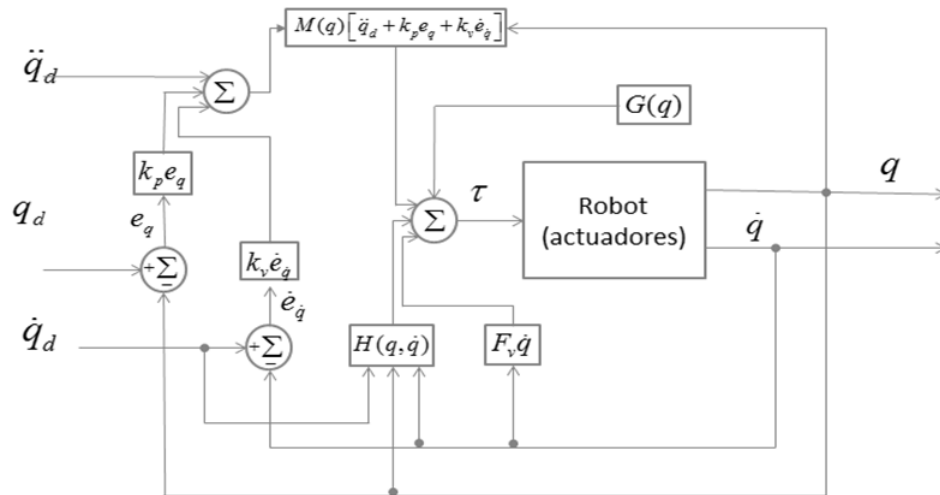
Control por calculado.

El algoritmo de control de trayectoria por par calculado emplea la dinámica de compensación en lazo cerrado de retroalimentación para linealizar y desacoplar la dinámica no lineal del robot manipulador, es decir este controlador se enfoca a encontrar ecuaciones cerradas lineales en términos de los errores de posición y velocidad. La relación empleada en el cálculo del vector de tensiones denotado por es:

$$\tau_{pc} = M(q) [\ddot{q}_d + k_p e_q + k_v \dot{e}_q] + H(q, \dot{q}) + G(q) + f_v \dot{q} \quad (12.51)$$

La figura 12.50 muestra la ecuación 12.51 en forma de diagrama de bloques.

Figura 12.16: Diagrama de bloque del esquema de control por par calculado



Fuente: Autores del proyecto

La ecuación cerrada se obtiene al sustituir la ecuación de en la ecuación del modelo

del robot y bajo la suposición que se cancela exactamente el modelo dinámico que interviene en el lazo de retroalimentación del algoritmo, entonces el par calculado realiza el desacoplamiento de las articulaciones del robot, dando como resultado un sistema lineal de la forma:

$$\ddot{e}_q + K_d \dot{e}_q + K_p e_q = 0 \quad (12.52)$$

Dicho sistema se puede representar en variables de estado como se muestra en la ecuación 12.53

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_q \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_q \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} \quad (12.53)$$

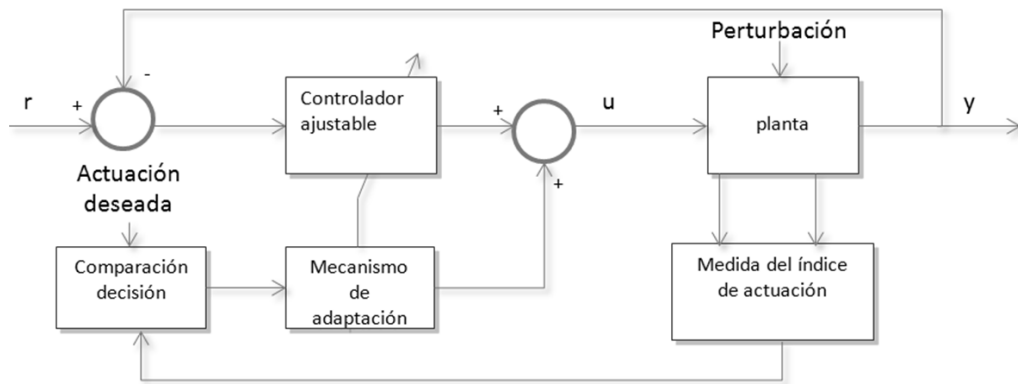
Donde es la matriz $n \times n$. La ecuación 12.53 es una ecuación diferencial, lineal y autónoma.

12.2.2. Control Adaptativo.

El control adaptativo surge como respuesta a la ineficiencia que presentan los modelos de control retro-alimentados en algunos casos, debido al desconocimiento en forma precisa el modelo dinámico que rige el sistema y al cambio de la carga de trabajo en forma significativa, como resultado se tiene una velocidad de repuesta y amortiguación del servo significativamente menor, lo que significa baja precisión del efector final tanto en velocidad como posición. Se entiende por un regulador adaptativo como aquel que puede modificar su comportamiento en respuesta diferentes situaciones del entorno. Se puede definir el control adaptativo como “un tipo especial de control no lineal en el que el estado del proceso puede ser separado en dos escalas de tiempo que evolucionan a diferentes velocidades”¹, siendo esta una de las definiciones más aceptadas.

¹FU K. S., Robótica: Control, detección, visión e inteligencia. McGraw/Hill.1988.

Figura 12.17: Diagrama de bloques del modelo de control adaptativo básico



Fuente:Autores del proyecto

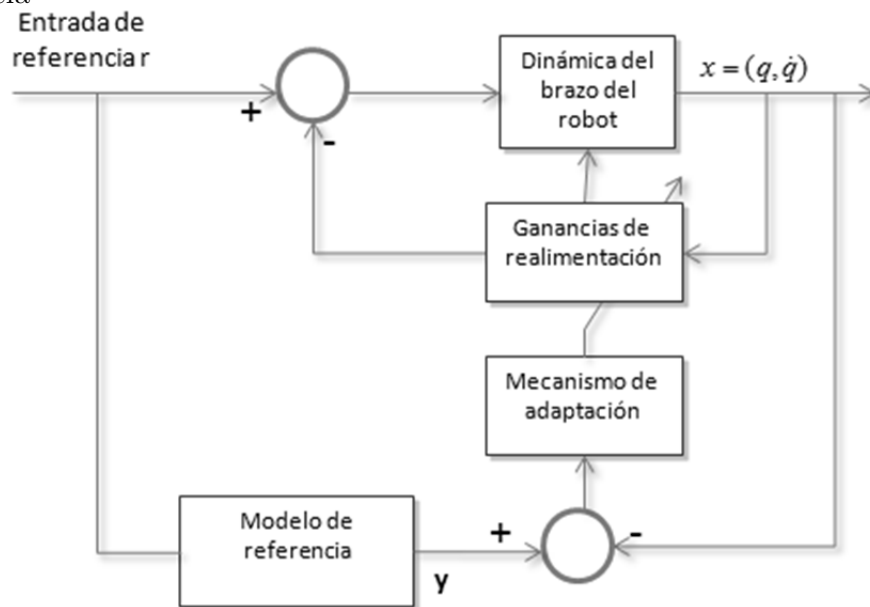
El esquema básico de este modelo de control puede representarse a través de un diagrama de bloques (figura 12.18). Este consta de dos bucles uno siendo el bucle convencional de retroalimentación, y un nuevo bucle donde se mide un índice de funcionamiento, que se compara con un índice deseado y mediante el error calculado se ajustan los parámetros del regulador mediante el uso de un mecanismo de adaptación que puede en algunos casos actuar sobre la señal de control directamente. Se puede implementar un tercer bucle dedicado a supervisar el comportamiento de los dos anteriores, con el fin de asegurar la estabilidad del sistema y su mejoramiento.

También existe control adaptativo en bucle abierto denominada “cambio por tabla”, donde los parámetros cambian respecto a una base de datos previamente calculada en algunos puntos de funcionamiento, y están en función de una variable auxiliar al sistema. En robótica los métodos de control adaptativo más comunes son: control adaptativo con un modelo de referencia, control adaptativo usando un modelo autorregresivo, control de perturbación adaptativa y control adaptativo con movimiento resuelto.

Control adaptativo con un modelo de referencia.

Conocido también por las siglas MRAC, es el modelo de control adaptativo más usado y relativamente más fácil de aplicar. Este tipo de control adaptativo se basa en encontrar un modelo de referencia adecuado y un mecanismo de adaptación que modifique las ganancias de realimentación para cada uno de los actuadores reales. En la figura 12.18 se puede observar el diagrama de bloques que esquematiza el proceso de retroalimentación y adaptación, donde el mecanismo de adaptación es excitado por el error entre el modelo tomado y las salidas reales del sistema.

Figura 12.18: Diagrama de bloques del modelo de control adaptativo con modelo de referencia



Fuente:Autores del proyecto

En el control adaptativo propuesto por Dubowsky y DesForges se selecciona una ecuación diferencial de segundo orden invariable durante el tiempo, esta debe estar disponible para cada grado de libertad, en el cual se busca graduar las ganancias del control de lazo cerrado haciendo la respuesta del sistema semejante al modelo de referencia establecido. Esta forma de control requiere cálculos moderados, necesitando po-

cos recursos computacionales para su implementación. Este algoritmo de control libera de modelos matemáticos complejos, sin tener que definir la dinámica del manipulador en forma precisa, ni el conocimiento completo de área de trabajo u objetos a manipular.

Tomando algunas consideraciones matemáticas se puede plantear el control adaptativo de un manipulador de tal forma que sea función de las respuestas tanto del sistema como del modelo referencia, las cuales se representarán por $x(t)$ y $y(t)$ respectivamente, definiéndose con las siguientes expresiones:

$$a_i \ddot{y}_i(t) + b_i \dot{y}_i + y_i(t) = r_i(t) \quad (12.54)$$

$$\alpha_i(t) \ddot{x}_i(t) + \beta_i(t) \dot{x}_i(t) + x_i(t) = r_i(t) \quad (12.55)$$

Donde la ecuación 12.54 expresa la respuesta del modelo dinámico de referencia para cada articulación. La ecuación 12.55 muestra la respuesta real de un manipulador que funciona con un control retroalimentado de posición y velocidad en las articulaciones, y donde los parámetros a_i y b_i para un sistema lineal de segundo orden se expresan en función de la frecuencia natural (ω_{ni}) y la razón de amortiguamiento (ζ_i), y los valores de α y β son los parámetros adaptables, es decir, aquellos que se modifican para adaptar el sistema al modelo de referencia. Las siguientes son las expresiones para los parámetros del modelo de referencia:

$$a_i = \frac{1}{\omega_{ni}^2} \quad (12.56)$$

$$b_i = \frac{2\zeta_i}{\omega_{ni}} \quad (12.57)$$

Con el error del sistema que se consigue comparando la salida real con la del modelo, es decir:

$$e_i = x_i(t) - y_i(t) \quad (12.58)$$

Con este error, mediante algún mecanismo de ajuste, se modifican las ganancias que se encuentran en el modelo real (α, β) . Uno de estos mecanismos es a través del gradiente de este error, representándolo de la siguiente manera:

$$J_i(e_i) = \frac{1}{2}(k_2^i \ddot{e}_i + k_1^i \dot{e}_i + k_0^i e_i)^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12.59)$$

Usando este método en el cálculo de los parámetros anteriormente nombrados se obtienen las siguientes expresiones:

$$\dot{\alpha}(t) = [k_2^i \ddot{e}_i(t) + k_1^i \dot{e}_i(t) + k_0^i e_i(t)] [k_2^i \ddot{u}_i(t) + k_1^i \dot{u}_i(t) + k_0^i u_i(t)] \quad (12.60)$$

$$\dot{\beta}(t) = [k_2^i \ddot{e}_i(t) + k_1^i \dot{e}_i(t) + k_0^i e_i(t)] [k_2^i \ddot{w}_i(t) + k_1^i \dot{w}_i(t) + k_0^i w_i(t)] \quad (12.61)$$

Donde los valores de las constantes, valores de peso, k_j^i se seleccionan de consideraciones de estabilidad para obtener un sistema estable, y los valores de $w_i(t)$ y $u_i(t)$ de las ecuaciones siguientes:

$$a_i \ddot{u}_i(t) + b_i \dot{u}_i(t) + u_i(t) = -\ddot{y}_i(t) \quad (12.62)$$

$$a_i \ddot{w}_i(t) + b_i \dot{w}_i(t) + w_i(t) = -\dot{y}_i(t) \quad (12.63)$$

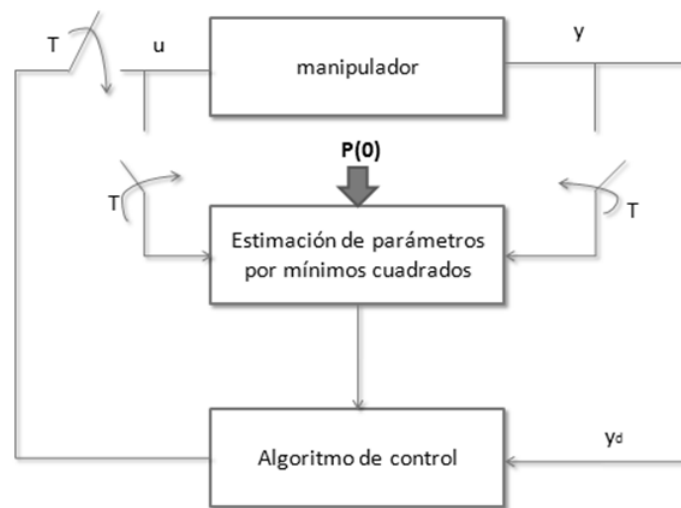
Como resultado se tiene un sistema de control que no requiere un modelo matemático complejo, pero que requiere un análisis de estabilidad además de su desempeño cuestionable con cargas severas

Control adaptativo utilizando un modelo autorregresivo

Representándose básicamente mediante el diagrama de bloques mostrado en la figura 12.64 , es una forma de control adaptativo autosintonizante, donde se usa un modelo

autorregresivo para ajustar los datos de entrada y salida del manipulador. Donde también se usa un esquema de identificación de mínimos cuadrados recursivos para encontrar los parámetros apropiados que se usaran para el control optimo del manipulador.

Figura 12.19: Diagrama de bloques del modelo de control adaptativo con modelo autorregresivo



Fuente: Autores del proyecto

Este modelo autorregresivo se puede expresar en la ecuación ?? donde se modulan los parámetros del algoritmo de control para hacer coincidir lo más estrictamente posible los pares entrada salida (u_i, y_i):

$$y_i(k) = \sum_{m=1}^n [a_i^m y_i(k-m) + b_i^m u_i(k-m)] + a_i^0 + e_i(k) \quad (12.64)$$

En esta ecuación ecuación ?? a_i^0 representa un término de fuerza constante, $e_i(k)$ es el error de modelización que se supone es un ruido gaussiano. Los parámetros a_i^m y b_i^m se calculan de tal forma que el error tienda a cero, un criterio para encontrarlos es el

siguiente:

$$E_N^i(\alpha_i) = \frac{1}{(N+1)} \sum_{k=0}^N e_i^2 \quad (12.65)$$

Donde N es el número de mediciones, y α_i representa el vector de parámetros i-ésimo:

$$\alpha_i = (a_i^0, a_i^1, \dots, a_i^n, b_i^0, b_i^1, \dots, b_i^n)^T \quad (12.66)$$

Si se representa los vectores de entrada-salida con una termino tal como $\psi_i(k-1)$ donde estarían contenidos de la siguiente manera:

$$\psi_i(k-1) = [1, y_i(k-1), \dots, y_i(k-n), u_i(k-1), \dots, u_i(k-n)]^T \quad (12.67)$$

De esta forma se pueden estimar los parámetros por esta expresión:

$$\widehat{\alpha}_i(N) = \widehat{\alpha}_i(N-1) + P_i(N)\psi_i(N-1) [y_i(N) - \widehat{\alpha}_i(N-1)\psi_i(N-1)] \quad (12.68)$$

Con:

$$P_i(N) = \frac{1}{\mu_i} \left[\frac{P_i(N-1)\psi_i(N-1)\psi_i^T(N-1)P_i(N-1)}{\mu_i + \psi_i^T(N-1)P_i(N-1)\psi_i(N-1)} \right] \quad (12.69)$$

Con esto se consigue un valor estimado de los parámetros, donde μ_i representa un factor de olvido que le proporciona un peso exponencial de los datos pasados, con los cuales se puede hacer una lenta variación de los parámetros. P_i es una matriz simétrica de $(2n+1) \times (2n+1)$

Usando esta notación la primera relación que describe el modelo autorregresivo queda expresada así:

$$y_i(k) = \widehat{\alpha}_i\psi_i(k-1) + e_i(k) \quad (12.70)$$

Buscando que se sigan los puntos de una trayectoria estipulada, se define una función de coste para la articulación i como:

$$J_i^k(u) = E \left\{ [y_i(k+2) - y_i^d(k+2)]^2 + \gamma_i u_i^2(k+1)\psi_i(k) \right\} \quad (12.71)$$

Aquí E es una función de expectación condicionada sobre $y_i(k)$ y γ_i es un factor de peso no negativo definido por el usuario. El control óptimo que minimiza el coste anterior está definido por la siguiente expresión:

$$u_i(k+1) = \frac{-\widehat{b}_i^1(k)}{\left[\widehat{b}_i^1(k)\right]^2 + \gamma_i} \left\{ \begin{array}{l} \widehat{a}_i^0(k) + \widehat{a}_i^1(k) \left[\widehat{a}_i^T(k)\psi_i(k)\right] + \\ \sum_{m=2}^n \widehat{a}_i^m(k)y_i(k+2-m) + \\ \sum_{m=2}^n \widehat{b}_i^m(k)u_i(k+2-m) - y_i^d(k+2) \end{array} \right\} \quad (12.72)$$

Donde los valores de $\widehat{a}_i^m, \widehat{b}_i^m$ y $\widehat{\alpha}_i$ se obtienen con las ecuaciones antes mostradas.

Se han tratado técnicas de control adaptativo en donde no se tuvieron en cuenta las fuerzas de acople en las articulaciones, presentándose en el control adaptativo con modelo de referencia una forma sencilla de control pero siendo difícil el encontrar un modelo de referencia apropiado y realizar un análisis de estabilidad. Siendo necesario preguntarse cuando recurrir a un control adaptativo en vez de uno fijo, teniendo algunas consideraciones que se tendrán que hacer antes de recurrir a este tipo de control. No sobra recordar que un sistema fijo de control está diseñado para controlar sistemas con parámetros constantes, o donde existen perturbaciones pequeñas que no hagan un gran cambio en estas constantes (que suelen ser aproximaciones). En el cuadro x se aprecia el comportamiento de controladores PD y adaptativos en diversas condiciones:

Dando de esta forma una mejor apreciación del comportamiento de estos dos tipos de controladores. Cuando se opte por un control adaptativo este debe contener los siguientes aspectos:

- Una ley de control con parámetros ajustables.
- Caracterización de la respuesta del sistema en bucle cerrado (modelo de referencia o las especificaciones para el diseño).
- Procedimiento de diseño
- Actualización de parámetros basado en las medidas

- Realización de la ley de control.

Estos pueden variar dependiendo del sistema de control, pero comprenden un gran número de factores comunes entre los diversos controles adaptativos.

12.2.3. Control Robótico por Redes Neuronales

Al igual que el anteriormente nombrado control adaptativo, el control con redes neuronales surge para hacer un control óptimo de un manipulador robótico cuando las cargas y/o perturbaciones sean lo suficientemente relevantes para emprender otro camino diferente a controladores fijos. Sabiendo el que la dinámica de un robot es altamente no lineal, haciendo compleja la resolución del problema, el controlador tiene que encargarse en gran medida de corregir las aproximaciones realizadas.

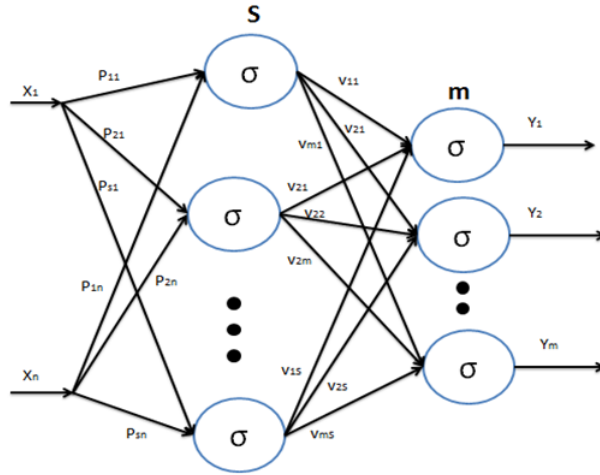
Redes neuronales

Para efectos de estudio solo se tocara el tema de redes neuronales con retropropagación (feedforward), esto indica que en la fase de entrenamiento de la red la salida se retroalimenta para comparar los resultados con la respuesta deseada, y a partir de este error modificar los ponderados entre cada capa de la red. En la figura 12.20 se puede apreciar una red neuronal de dos capas totalmente conectada (la salida de la primera capa está conectada con cada una de las neuronas de la segunda capa) en esta se puede apreciar como la señal de respuesta y_i es respuesta de las múltiples entradas x_i .

Cualquier función suave (función continua con primera derivada también continua) se puede modelar como una red neuronal de retropropagación (RNR) de dos capas. El entrenamiento de una de estas redes, se lleva a cabo a partir de una "ley.º regla de aprendizaje que puede ser diferente dependiendo del tipo de red a manejar. En el caso de una RNR la regla más usada es la denominada "regla de widrow-hoff.º regla delta.

También, en la figura 12.20 se puede apreciar cómo se denota la salida de cada neurona y las conexiones allí mostradas, el símbolo de sigma (σ) representa que cada

Figura 12.20: Red neuronal de retropropagación de dos capas



Fuente: Autores del proyecto

neurona es una función sigmoide, X_i representan las entradas al sistema, P_{jk} indica la ponderación entre la entrada k y la neurona j de la primera capa, v_{il} representa la ponderación entre la neurona l de la primera capa y la neurona i de la segunda, la primera capa cuenta con S neuronas y la segunda con m , que es igual al número de salidas del sistema. La función sigmoide nombrada anteriormente se define de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 + e^{-\lambda t}} \quad (12.73)$$

En la cual t es la variable independiente y λ es una constante, adaptando esta ecuación a la nomenclatura usada se tendrá que:

$$S_l = \sigma \left(\sum_{j=0}^n P_{lj} x_j \right) \quad (12.74)$$

$$y_i = \sigma \left(\sum_{l=0}^S v_{il} S_l \right) \quad (12.75)$$

Por tanto se necesitan conocer las matrices P_{lj} y v_{il} , las cuales se pueden calcular

a partir de los "deltas" los cuales dependen de los errores de propagación. Estos son:

$$\begin{aligned} e_i &= Y_i - y_i \\ \delta_l^2 &= y_i(1 - y_i)e_i \\ \delta_i^1 &= s_l(1 - r_l) \sum_{i=1}^m v_{il}\delta_i^2 \end{aligned} \quad (12.76)$$

Por tanto, las matrices v_{il} y P_{lj} están dadas por:

$$\begin{aligned} v_{il} &= v_{il} + \eta S_l \delta_i^2 \\ i &= 1, 2, \dots, m; l = 0, 1, \dots, S \\ P_{lj} &= P_{lj} + \eta x_j \delta_j^1 \\ l &= 1, 2, \dots, L; j = 0, 1, \dots, n \end{aligned} \quad (12.77)$$

Escribiendo las ecuaciones de las salidas de las RN en forma matricial se obtiene:

$$\begin{aligned} S &= \sigma(P^T X) \\ y &= \sigma(V^T r) \end{aligned} \quad (12.78)$$

En la mayoría de las aplicaciones la segunda capa no tiene la función sigmoideal en tal caso queda:

$$y = V^T S = V^T \sigma(P^T X) \quad (12.79)$$

Entonces al aproximar una función por medio de una RNR quedaría:

$$f(x) = V^T \sigma(P^T X) + \varepsilon \quad (12.80)$$

Dinámica del robot para control con red neuronal

Usando la ecuación de la dinámica de un robot, vista en diversas ocasiones a lo largo del texto, se cambiará de forma para poder usarla en este método de control. La ecuación en su forma cotidiana está dada por:

$$\tau(t) = D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) \quad (12.81)$$

Se planteará de la forma:

$$\tau(t) = D(q) \frac{d^2q}{dt^2} + h_m(q, \dot{q}) \frac{dq}{dt} + C(q) \quad (12.82)$$

Si se incluyen los términos debidos a la fricción y perturbaciones, la expresión 12.82 queda:

$$\tau(t) = D(q) \frac{d^2q}{dt^2} + h_m(q, \dot{q}) \frac{dq}{dt} + C(q) + F(\dot{q}) + \tau_d \quad (12.83)$$

Si se agrupan los términos no lineales, la expresión anterior toma la forma:

$$N(q, \dot{q}) = h_m(q, \dot{q}) \frac{dq}{dt} + F(\dot{q}) + c(q) \quad (12.84)$$

y finalmente la expresión se reduce a:

$$\tau(t) = D(q) \frac{d^2q}{dt^2} + N(q, \dot{q}) + \tau_d \quad (12.85)$$

Este cambio de $H(q, \dot{q})$ a $h_m(q, \dot{q}) \frac{dq}{dt}$ es comunmente empleado y su demostración se lleva a cabo en la referencia [47].

Relaciones para el control de un manipulador por una red neuronal

Al optar por una RNR para el control de un manipulador, se está garantizando un sistema estable, y a diferencia del control adaptativo, no cuenta con la gran desventaja de requerir que los parámetros del sistema varíen linealmente. Encontrando primero un vector error, el cual se representa por la diferencia entre los valores de las variables articulares deseados, y los que salen del sistema, los cuales están en función del tiempo.

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (12.86)$$

Se usa por lo general en vez de este error simple un error filtrado el cual no solo

tiene en cuenta solo este error sino también la derivada de este.

$$r(t) = \frac{d}{dt}e + \Lambda e \quad (12.87)$$

$$\frac{d}{dt}r(t) = \frac{d^2}{dt^2}e + \Lambda \frac{d}{dt}e \quad (12.88)$$

Donde las dimensiones de r , e , y q es de $n \times 1$, y Λ es $n \times n$. de acuerdo a esta definición de error y a la ecuación que define la dinámica del manipulador, se muestra el cambio en la estructura de la ecuación:

$$f(x) = D \left(\frac{d^2}{dt^2}q_d + \Lambda \frac{de}{dt} \right) + h_m \left(\frac{d}{dt}q_d + \Lambda e \right) + F + c \quad (12.89)$$

A esta:

$$D \left(\frac{dr}{dt} \right) = -h_m r + f(x) + \tau_d - \tau \quad (12.90)$$

Donde una vez entrenada la red neuronal esta estará capacitada para dar una respuesta $f(x)$ adecuada. Para este cálculo la red necesitara la información de entrada que se representa con una x la cual contiene los elementos de error y su derivada, la trayectoria deseada y las derivadas de esta.

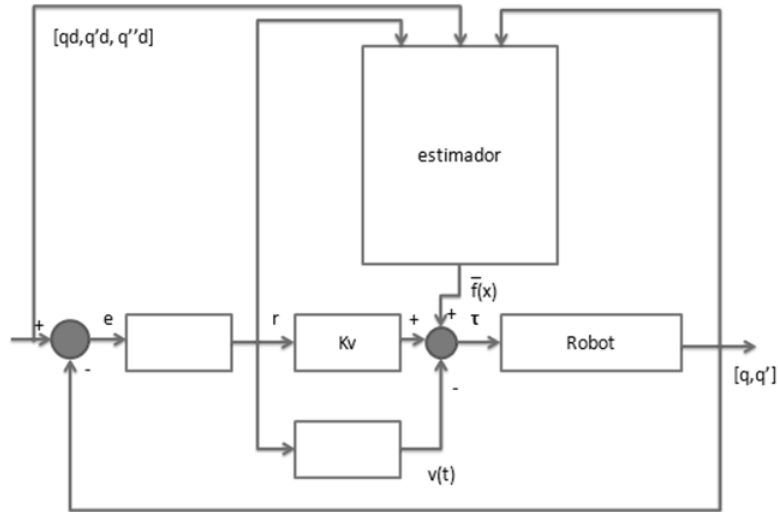
Donde una vez entrenada la red neuronal esta estará capacitada para dar una respuesta $f(x)$ adecuada. Para este cálculo la red necesitara la información de entrada que se representa con una x la cual contiene los elementos de error y su derivada, la trayectoria deseada y las derivadas de esta.

El diagrama de bloques de la figura 12.21 muestra el esquema de funcionamiento de una red neuronal en el control de un manipulador robótico:

En este diagrama se puede apreciar que la respuesta del “estimador” será una función $\widehat{f}(x)$ que como ya se ha mencionado es función de $x = [e^T \dot{e}^T q_d^T \dot{q}_d^T \ddot{q}_d^T]^T$. Con el diagrama se puede apreciar un momento aproximado que debe aplicarse al robot para lograr la salida deseada, este está regido por la siguiente ecuación:

$$\tau = \widehat{f} + K_v r - v(t) \quad (12.91)$$

Figura 12.21: Diagrama de bloques del sistema básico de control con RN



Fuente: Autores del proyecto

Donde $\hat{f}(x)$ representa un valor estimado de $f(x)$, el término $K_v r = K_v \left(\frac{d}{dt} e \right) + K_v \Lambda e$ representa un bucle de retroalimentación que lleva un término uno proporcional al error y otro proporcional a su derivada, es decir, un control PD, y el término es una señal auxiliar para hacer el sistema robusto en presencia de perturbaciones. Estas perturbaciones se puede demostrar que están dadas por la siguiente expresión la cual en anexos se podrá encontrar explicada en mayor medida:

$$w(t) = \tilde{V}^T \frac{d\hat{\sigma}}{dz} P^T X + V^T O^2 + \varepsilon + \tau_d \quad (12.92)$$

Donde ε, τ_d, O^2 representan el error de la red neuronal, el momento de perturbación y los términos de expansión superior de Taylor respectivamente. Esta expresión para el término de perturbación tiene un límite superior determinado, el cual se puede apreciar en los anexos.

Entrenamiento de una red neuronal

En esta parte se consideran la regla a seguir para determinar el tipo de entrenamiento que se le dará a la RNR. Estos se pueden clasificar en dos casos, el ideal y el no

ideal, los cuales serán expuestos a continuación.

Caso ideal

Los valores de ε, τ_d, O^2 son iguales a cero, lo cual simplifica en gran parte la ley a seguir en el entrenamiento, pudiéndose usar así la regla delta antes mencionada.

$$\frac{d\widehat{V}}{dt} = F\widehat{\sigma}r^T \quad (12.93)$$

$$\frac{d\widehat{P}}{dt} = Gx(\widehat{\sigma}^T\widehat{V}r)^T \quad (12.94)$$

Quedando definido el momento de control del robot como:

$$\tau = \widehat{V}^T \sigma(\widehat{P}^T x) + K_v r \quad (12.95)$$

12.3. ASPECTOS PRÁCTICOS.

La implementación práctica de controladores de movimiento para robots manipuladores está fuertemente ligada a las trayectorias, velocidades y aceleraciones deseadas, por lo cual es de vital importancia la correcta selección de la trayectoria. Estas deben ser continuas y sin cambios abruptos de principio a fin, además se deben mantener controladas las condiciones no deseadas como fricción seca de tal manera que el modelo dinámico predomine ante las perturbaciones y efectos no modelados con gran exactitud.

El cálculo de un modelo dinámico exacto es excesivamente complicado, puesto que por el simple hecho de manipular una carga este varía, además que el efecto de fricción seca aumenta en gran medida la dificultad del modelo. Esto genera que el control de un manipulador realizando un modelo inexacto regulado por un algoritmo visto anteriormente consuma grandes recursos computacionales. Para poder trabajar de una manera más adecuada un micro controlador puede ser usado por separado para cada

actuador, aunque la solución es no es muy económica. Una alternativa muy usada en robots industriales es el obviar el modelo dinámico y dejarle todo el trabajo de control al regulador usando un sistema sencillo de acción proporcional, integral y derivativa para cada articulación usando ganancias fijas de tal manera que:

$$\tau = k_p e_q + k_d \dot{e}_q + k_i \int e_q dt \quad (12.96)$$

Con este modelo de control no se desacoplan las articulaciones, haciendo que el movimiento de una articulación afecte a la otra, provocando errores que son corregidos por el regulador PID. Es imposible obtener ganancias fijas que generen movimientos críticamente amortiguados en todo el espacio articular, por tanto se usan ganancias promedios que permitan un buen desempeño en el rango de operación deseado.

Uno de los efectos fáciles de calcular y que no representan mayor coste computacional en el modelo del robot es el efecto gravitacional descrito por la matriz y se suele añadir como compensador de gravedad al modelo descrito por la ecuación 12.97, de tal manera que la ley de control de efecto proporcional, integral y derivativo con compensación de gravedad será de la forma:

$$\tau = k_p e_q + k_d \dot{e}_q + k_i \int e_q dt + C(q) \quad (12.97)$$

12.3.1. Índice de desempeño

Es común querer cuantificar el desempeño del control en sistemas como manipuladores industriales, puesto que así es posible determinar qué modelo de control se adapta mejor. En control de trayectoria, el índice de desempeño se mide usando la norma del error de posición y del error de velocidad así:

$$\ell(e_q, \dot{e}_q) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\|e_q(t)\|^2 + \|\dot{e}_q(t)\|^2] dt} \quad (12.98)$$

Donde T es el tiempo de simulación o experimentación. Un valor grande del índice de desempeño se interpreta como un bajo desempeño debido a que este aumenta con los errores, es decir entre más bajo sea el índice mejor desempeño presenta el sistema de control.

12.3.2. Ajustes de los parámetros PID.

Si el método a usar es el control clásico PID la ley de control establece 3 parámetros de proporcionalidad, de los cuales depende la respuesta y el funcionamiento del robot manipulador (k_p, k_i, k_d) . El regulador usado para este fin es de la forma

$$R(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (12.99)$$

Dicha expresión puede reescribirse al usar un poco de algebra básica quedando de la forma:

$$R(s) = \frac{K(s+a)(s+b)}{s} \quad (12.100)$$

La elección adecuada de los ceros a y b y de la ganancia k (equivalente a la selección de las constantes (k_p, k_i, k_v)) depende de la aplicación, aunque siempre se desea una respuesta rápida con un margen de oscilación bajo. Con estos criterios se selecciona una posición para el polo dominante del sistema y se ajustan los parámetros de la ganancia k y el polo b . El valor del parámetro se ajusta para disminuir la perturbación producida por el efecto integrador del regulador. En general los valores seleccionados se obtienen buscando una condición de movimiento críticamente amortiguada y la determinación de las constantes se realiza con un proceso de prueba y error hasta que los valores se ajusten a la respuesta deseada, para lo cual se toman valores iniciales de iteración de la siguiente manera:

Se tiene supone un regulador PD convencional, para lo cual el sistema se caracteriza

con la siguiente expresión:

$$p(s) = s^2 + \frac{B + k_d}{J}s + \frac{k_p}{J} \quad (12.101)$$

Cuyo coeficiente de amortiguamiento ζ y frecuencia natural ω_n son:

$$\zeta = \frac{B + k_d}{2\sqrt{k_p J}} \quad (12.102)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_p}{J}} \quad (12.103)$$

Para que el sistema sea críticamente amortiguado debe ser igual a uno por tanto

$$\frac{B + k_d}{2\sqrt{k_p J}} = 1 \quad (12.104)$$

Además, se desea que la frecuencia estructural del manipulador ω_r , que caracteriza su flexibilidad, no sea un valor cercano a las posibles respuestas a excitaciones y se recomienda que la frecuencia natural sea inferior a la mitad de ω_r , es decir

$$\omega_n < \frac{\omega_r}{2} \Rightarrow 2\sqrt{\frac{k_p}{J}} < \omega_r \quad (12.105)$$

Con estas expresiones, conociendo B , J y w_r se obtiene una aproximación para los parámetros k_p y k_v del regulador, posteriormente se corrigen estos valor a prueba y error. La constante k_i se ajusta para disminuir el error en estado estable en presencia de cambios bruscos, cabe aclarar que cualquier valor de logrará este efecto, pero si no se toma un valor adecuado cambiaría radicalmente los efectos producidos por las constantes proporcional y derivativa logrados con el análisis anterior.

12.3.3. Flexión y osciladores estructurales.

Como ya se menciona, los robots manipuladores se han modelado como cuerpos rígidos permitiendo una gran simplificación en el análisis de su dinámica y cinemática general pero la flexibilidad de los eslabones y las articulaciones presenta oscilaciones no

deseadas. Estas oscilaciones no son tomadas en cuenta por el esquema de control, en general este efecto no toma fuerza a medida que las dimensiones del robot aumentan y su estructura es más ligera.

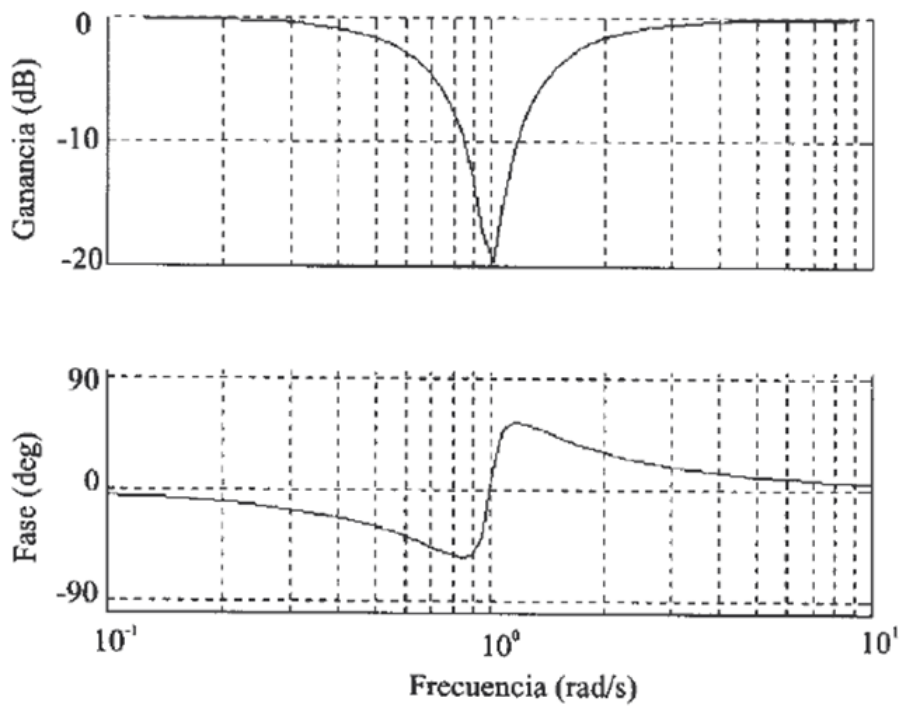
Una de las técnicas más sencillas y prácticas al momento de controlar estas oscilaciones, además de seleccionar los parámetros de control adecuados, es evitando que el actuador sea excitado a las frecuencias no deseadas poniendo un filtro a la salida del regulador que restrinja frecuencias de oscilación en un rango cercano a la de resonancia mecánica, dicho filtro denominado filtro de muesca (notch filter) origina una fuerte atenuación en el estrecho rango de frecuencias. Este filtro normalmente tiene la siguiente función de transferencia:

$$G_M(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + \omega_n s + \omega_n^2} \quad (12.106)$$

Es decir, se compone de dos polos complejos conjugados y dos ceros. La selección de ξ y ω_n se hace de tal modo que ω_n coincida con la frecuencia que se desea eliminar, es decir la frecuencia de resonancia estructural de la articulación considerada, mientras que ξ determina la atenuación introducida a esta frecuencia, que toma el valor de $-20 \log(2\xi)$, el diagrama de bode que representa este filtro se muestra en la figura 12.22

Existen una gran cantidad de métodos que estudian el fenómeno de la flexión y sus efectos producidos en la cinemática, dinámica y control de manipuladores aunque no se trataran en el presente seminario de investigación. Las referencias [tal] [tal] y [tal] servirán a los lectores interesados en este tema.

Figura 12.22: Diagrama de bode para un filtro de muesca



Fuente: Autores del proyecto

CAPÍTULO 13

CONTROL DE FUERZA EN MANIPULADORES ROBÓTICOS

En el capítulo anterior se habló del control de posición y las diversas formas de implantarlo en los manipuladores robóticos, pero hay ocasiones en las cuales un simple control de posición se vuelve inadecuado o insuficiente. Para ilustrar este punto se puede plantear una tarea de raspado de pintura de la superficie de un vidrio, siendo la herramienta de raspado altamente rígida el no controlar adecuadamente la posición del actuador final sobre la superficie del vidrio hará que la tarea no se lleve a cabo satisfactoriamente, rompiendo el vidrio o no ejerciendo la presión suficiente para quitar la pintura sobre él. Debido a este dilema en el control de posición aparece el control de fuerza, que para este caso específico se controlaría la presión que se ejerce sobre el vidrio para remover con éxito la pintura. Se propone el control híbrido posición/fuerza como una solución a este tipo de dilemas de control en manipuladores, del cual se hablará más adelante en este capítulo.

13.1. EL PASO DEL CONTROL DE MOVIMIENTO AL CONTROL DE INTERACCIÓN

La mayoría de robots industriales se desempeñan en tareas tales como soldadura punto a punto, pintura con pistola de aire y pick and place, aplicaciones sencillas (lo cual es relativo), pero con el control de fuerza la gama de aplicaciones de los robots crece e industrialmente ya se está aplicando el control de fuerza en forma sencilla para tareas como triturado y eliminación de rebabas y algunas tareas de ensamblaje.

Como se mencionó anteriormente para llevar a cabo satisfactoriamente algunas tareas, donde el efector final del robot manipula algún objeto o necesita realizar alguna tarea sobre una superficie, es preciso controlar la interacción entre el robot y su ambiente. Esta interacción conlleva la restricción de algunos movimientos, limitaciones aplicadas al manipulador y su efector final, conocidas como restricciones cinemáticas. En algunos casos las tareas de contacto están caracterizadas por una interacción dinámica entre el robot y su ambiente, la cual puede ser inercial (como empujando un bloque), disipativa (deslizarse sobre una superficie con fricción) o elástica (como empujando contra). En todos estos casos el control de movimiento es propenso a fallar.

Para llevar a cabo una tarea que represente interacción entre el manipulador y el medio ambiente, requiere planear precisamente la tarea. Esto requiere tener un modelo preciso tanto para el manipulador (cinemática y dinámica) como el ambiente (geometría y propiedades mecánicas). Un modelo del manipulador se puede conseguir con la suficiente precisión, pero una descripción detallada del ambiente es difícil de obtener.

En la práctica, los errores en la planeación de la tarea pueden generar mayores valores de momento y fuerza, causando una desviación de la trayectoria deseada. Por otra parte, el sistema de control reacciona a este error reduciendo esta desviación. Este último lleva a aumentar la fuerza de la junta hasta el tope máximo del actuador ó el rompimiento de las partes en contacto.

Entre mayor sea la rigidez del medio en el que se encuentra el robot y más preciso sea el

control de posición, es más fácil que se presente una situación como la mencionada anteriormente. Este inconveniente puede ser superado si se incorpora un comportamiento complementario en el momento en que el robot empieza a interactuar con su medio. Este comportamiento se puede lograr en forma pasiva o activa. La forma pasiva se logra implementando efectores finales, juntas o vínculos flexibles que hagan más amigable la interacción con el medio, especialmente con personal que se encuentre cerca de los robots industriales, entre los sistemas de pasivos de más usados está el RCC. Al no implementarse ningún sensor de fuerza o torque resulta ser un control muy simple y barato, pero brinda poca flexibilidad y al no tener sensores no se puede garantizar que existan en algún momento altas fuerzas de contacto. Cuando se trata de control activo de la interacción del robot con el medio obligatoriamente se tiene que llevar a cabo una medición de la fuerza o torque de contacto, el cual envía una señal de retroalimentación a un sistema de control el cual modifica o diseña una trayectoria para el efector final.

13.2. MEDICIÓN DE FUERZA

Por lo general en las tareas de fuerza controlada, seis componentes de fuerza son requeridas para proveer completa información de las fuerzas de contacto: tres componentes de fuerza traslacional y tres torques. A menudo un sensor de torque/fuerza es montado en la muñeca del robot, pero existe otras posibilidades, por ejemplo, sensores de fuerza pueden localizarse en las huellas dactilares de la mano robótica, además se puede estimar fuerzas y momentos externos a través de los sensores localizados en los ejes de las juntas del robot. Los rangos de medición oscilan entre los 5 y 500 N, y para torque entre 5 y 70 Nm. Con una resolución de aproximadamente 0.1 % de la fuerza máxima y 0.05 % en los sensores de torque, con su frecuencia de muestreo de 1kHz. Entre los sensores de fuerza y torque se pueden encontrar diversos tipos, entre los cuales se tienen celdas de par y de carga, conocidos también como transductores de fuerza.

Figura 13.1: Puente Wheatstone para el acondicionamiento de la señal



Fuente: Robótica, control de robots manipuladores. Reyes Fernando. 2010

Usualmente esta medición se lleva a cabo midiendo la tensión que se ejerce sobre un elemento extensible, o en una forma indirecta con desplazamientos. Un componente básico en los sensores de fuerza es el indicador de tensión, el cual es una espira de un alambre conductor que con la fuerza actuante sobre ella cambia su resistencia. Se elige el indicador de tensión de manera que la resistencia r_s varíe linealmente con el rango de tensión admisible.

en la figura 13.1 se muestra un esquema de puente wheatstone, usado comúnmente para convertir la pequeña señal de cambio de resistencia en una señal eléctrica útil.

La salida del puente es calibrada y compensada por elementos pasivos como cables dependientes de la temperatura y resistencias. Esta salida de voltaje está expresada de la siguiente forma:

$$v_o = \left(\frac{r_2}{r_1 + r_2} - \frac{r_s}{r_3 + r_s} \right) v_i \quad (13.1)$$

El signo de esta salida de voltaje indica la dirección de la fuerza, siendo positiva para una dirección y negativa para otra.

El mayor proveedor de sensores de fuerza/torque actualmente es **ATI Industrial Au-**

tomation. Miles de sus sensores son utilizados en varias aplicaciones entre las cuales se pueden nombrar:

- Verificación del ensamble de componentes mecánicos y eléctricos.
- Procesos como desbastado, pulido y esmerilado.
- Retroalimentación de fuerza para robots en ambientes nucleares.
- Investigación sobre rehabilitación física y prótesis.

Se nombrarán tres modelos diferentes de sensores de fuerza de la empresa ATI, existiendo también sensores ofrecidos por otras empresas tales como FANUC, Tekscan, FUTEK entre otras.

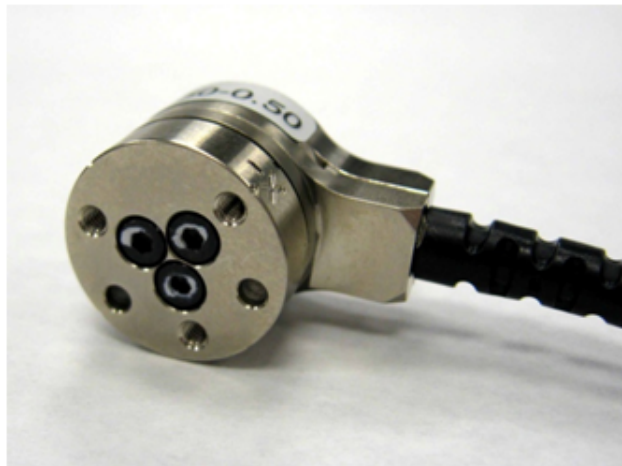
13.2.1. Transductor Nano17

Catalogado como uno de los sensores de seis ejes más pequeños del mundo, principalmente usado para investigación científica. Entre estas aplicaciones se puede nombrar la cirugía robótica, investigación sobre manos robóticas, investigación dental y la investigación sobre la fuerza en dedos robóticos. Sus dimensiones están alrededor de 17 milímetros de diámetro y 14.5 de alto con un peso aproximado de 9 gramos. En la figura 13.2 se aprecia una imagen del sensor y en el cuadro 13.1 se muestran las especificaciones del sensor:

13.2.2. Transductor Gamma

Sensor altamente usado en la industria y en la investigación científica, abarca áreas tales como: control de fuerza en tiempo real, ensamblado robótico, retroalimentación

Figura 13.2: Transductor ATI Nano17



Fuente :<http://www.ati-ia.com/products>

Cuadro 13.1: Características principales del sensor Nano 17

Rangos de sensado	Calibraciones		
	SI-12-0.12	SI-25-025	SI-50-0.5
ejes			
$F_x, F_y (\pm N)$	12	25	50
$F_z (\pm N)$	17	35	70
$t_x, t_y, t_z (\pm Nmm)$	120	250	500
Resolución			
$F_x, F_y, F_z (N)$	1/320	1/160	1/80
$t_x, t_y, t_z (Nmm)$	1/64	1/32	1/16

háptica, pruebas automotrices, pruebas de prótesis. Tiene un peso aproximado de 254 gramos, con dimensiones de 75.4mm de diámetro y 33.3mm de altura. se aprecia a continuación su imagen especificaciones en la figura 13.3 y en el cuadro 13.2.

13.2.3. Transductor Omega250

Usando en interacciones industriales, apropiado por su gran rango de fuerzas y pares. Usado en tareas como: pruebas de productos, retroalimentación de fuerza, telerobótica, "pick and place" de partes o componentes que requieran precisión.

Figura 13.3: Transductor ATI Gamma

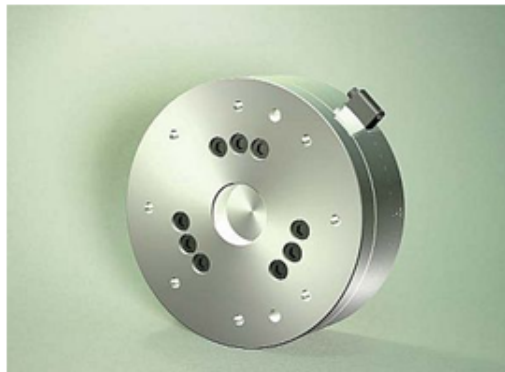


<http://www.ati-ia.com/products>

Cuadro 13.2: Características principales del sensor Gamma

Rangos de sensado	Calibraciones		
	SI-32-2.5	SI-65-5	SI-130-10
ejes			
$F_x, F_y (\pm N)$	32	65	130
$F_z (\pm N)$	100	200	400
$t_x, t_y, t_z (\pm Nm)$	2.5	5	10
Resolución			
$F_x, F_y (N)$	1/160	1/80	1/40
$F_z (N)$	1/80	1/40	1/20
$t_x, t_y, t_z (Nm)$	1/2000	10/13333	1/800

Figura 13.4: Transductor Omega250



Fuente: <http://www.ati-ia.com/es-MX/products>

Cuadro 13.3: Características principales del sensor Omega250

Rangos de sensado	Calibraciones		
	SI-4000-500	SI-8000-1000	SI-16000-2000
ejes			
$F_x, F_y (\pm N)$	4000	8000	16000
$F_z (\pm N)$	8000	16000	32000
$t_x, t_y, t_z (\pm Nm)$	500	1000	2000
Resolución			
$F_x, F_y (N)$	1	2	5
$F_z (N)$	2	4	10
$t_x, t_y, t_z (Nm)$	1/8	1/4	1/2

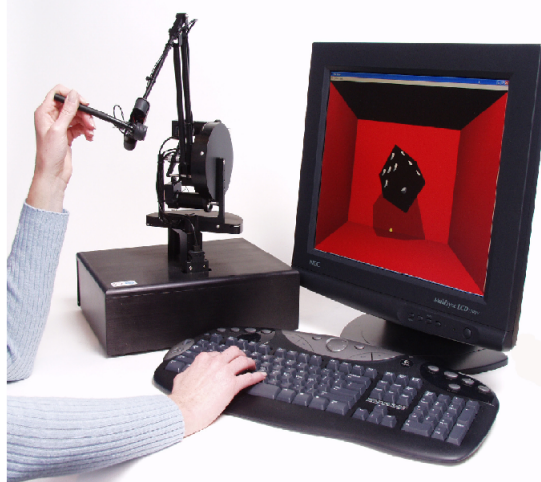
13.3. SISTEMAS HÁPTICOS

Cuando se habla de sistemas hápticos se hace referencia a la capacidad de percibir en el entorno señales no visuales ni auditivas. El tacto es el primer sentido háptico que se desarrolla en el ser humano, siendo la pérdida de este sentido una discapacidad muy seria, ya que no se podrían llevar a cabo tareas como caminar, sostener objetos o utilizar herramientas.

Esta forma de control utiliza dispositivos hápticos que perciben unas variables de entrada (posición, velocidad, aceleración, fuerza, etc.) se aplica esta entrada a un entorno virtual y finalmente se envían unas señales de salida para reproducir la señal de entrada en el manipulador. Al igual que estos dispositivos reproducen señales hápticas a manipuladores en entornos remotos, si el manipulador se encuentra con un entorno real este dispositivo recreará también esta información al operario, a través de los actuadores del dispositivo.

Entre la gran diversidad de dispositivos hápticos ofrecidos en el mercado, los más usados y comercializados en robótica son los de las empresas SensAble Technologies e Immersion Corporation. De estas empresas el producto que se destaca en investigación es el dispositivo Phantom Premium de la empresa SensAble, el cual es un manipulador de seis a siete grados de libertad. Debido a su alto costo se encuentra otro dispositivo Phantom de una gama más baja, el cual está siendo usado más que todo en el campo del entretenimiento.

Figura 13.5: Dispositivo háptico Phantom premium



Fuente: <http://www.sensable.com/haptic-phantom-premium.htm>

13.4. CONTROL DE FUERZA DIRECTO E INDIRECTO

Las estrategias de control de interacción activa se pueden clasificar en dos formas: control de fuerza indirecto y control de fuerza directo. La principal diferencia entre estas dos estrategias de control es la existencia de un bucle de retroalimentación de fuerza, donde el control directo permite controlar un valor de fuerza deseado gracias a la existencia de esta retroalimentación.

A la primera categoría pertenece el control de impedancia (o control de admitancia), donde la desviación de la posición del efector final de la posición deseada debido a la interacción con el entorno está relacionada con la fuerza de contacto a través de una impedancia/admitancia mecánica con parámetros ajustables. Un manipulador robótico bajo este esquema de control es descrito como una equivalencia de un sistema masa resorte amortiguado con parámetros ajustables. La relación es una impedancia si la si

el control del robot reacciona a la desviación generando una fuerza de contacto, mientras que corresponde a una admitancia si el control del robot reacciona a fuerzas de interacción mediante la imposición de una desviación del movimiento deseado.

Los esquemas de control de fuerza indirectos en principio no requieren de medición de fuerzas de contacto; como resultado el esquema de impedancia o admitancia son típicamente no lineales y acoplados. De todas formas si se tiene disponible un sensor de fuerza/torque, entonces la medición de fuerza puede ser usada en el sistema de control para lograr un comportamiento lineal y desacoplado.

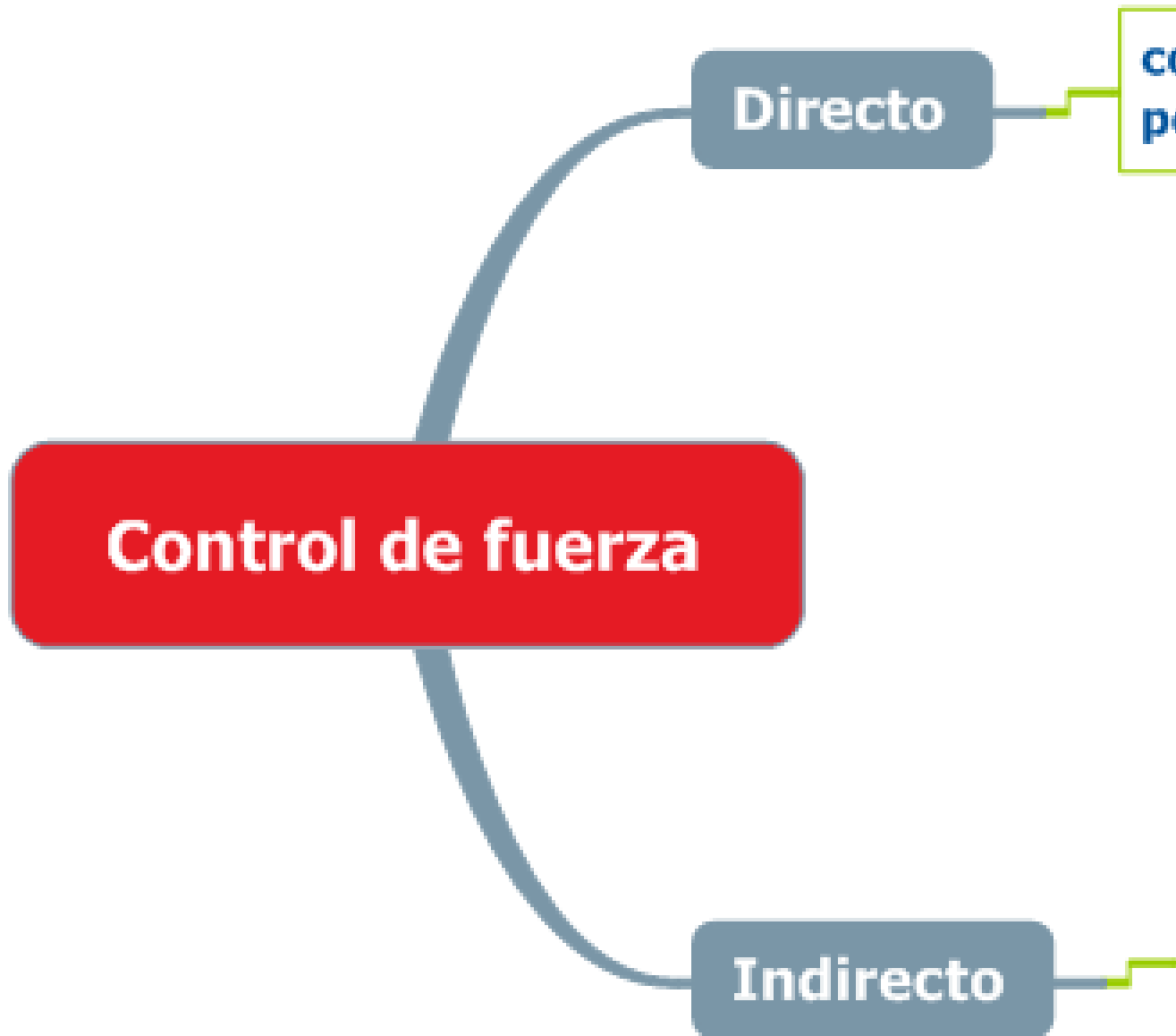
Diferentemente del control de fuerza indirecto, el control de fuerza directo requiere un modelo explícito de interacción en la tarea. De hecho, el usuario tiene que especificar el movimiento deseado y la fuerza de contacto deseada de una manera coherente respecto a las limitaciones impuestas por el medio ambiente. Una estrategia de control ampliamente adoptada que pertenece a esta categoría es el control híbrido posición/fuerza, el cual controla posición en las direcciones no limitadas y controla fuerza en las limitadas. El control híbrido posición/fuerza permite el control simultáneo del movimiento del efector final y la fuerza de contacto en dos subespacios independientes y simultáneos.

13.5. MODELAMIENTO DEL ENTORNO

Debido a la interacción del manipulador con el ambiente, un modelo del entorno debe ser implementado. El entorno puede comportarse de varias formas de las cuales se agruparan en dos tipos de entornos distintos, el entorno rígido y el entorno dócil.

- Entorno rígido: el cual provee muchas restricciones a la interacción, se habla de modelos matemáticos de impacto, fricción de coulomb entre otros. Al ser rígido

Figura 13.6: Diagrama sobre el control de fuerza



Fuente: Autores de proyecto

hay limitantes de movimiento además que los posibles choques o impactos entre el manipulador y el entorno conlleva a una falla o en la pieza manipulada o en algún elemento del robot.

- Entorno dócil: este entorno a diferencia del anterior presenta una deformación la cual implica un tratamiento matemático diferente. Por lo general se busca un planteamiento simple del contacto, usándose frecuentemente el tratamiento de un entorno elástico dócil desacoplado el cual está descrito por el siguiente modelo:

$$f_e = K_e(x - x_e) \quad (13.2)$$

De esta manera se puede modelar el entorno dócil como si fuera un sistema masa-resorte amortiguado, donde K_e representa el modulo de rigidez del entorno.

13.6. CONTROL DE FUERZA

Debido a las aplicaciones industriales de los robots, hay ciertas tareas en las cuales el control de posición no es suficiente, sea por la complejidad del entorno o de la tarea, como se mencionó anteriormente, lo cual lleva a implementar un control diferente como lo es el control de fuerza. Para esto se requiere la adopción de un control PD (proporcional y derivativo) de la fuerza. Aunque en la práctica puede que no se use la parte derivativa, esto nos lleva a controlar la velocidad para el adecuado amortiguamiento de ella, dando como resultado un control conjunto de fuerza/velocidad o en algunos casos fuerza/posición.

A partir del modelo dinámico se pueden generar diversos esquemas de control, uno de ellos es el control de fuerza, solo hay que agregar la medición de las fuerzas o pares generados en la ecuación, quedando de la siguiente forma:

$$\tau = D(q)J^{-1}(q) \left[a - \dot{J}(q)\dot{q} \right] + H(q) + C(q) + f_v(\dot{q}) + J^T(q)f_e \quad (13.3)$$

En esta ecuación \mathbf{a} representa la entrada de control que está sujeta a la fuerza deseada, si sustituimos la ley de control 13.2 se obtiene que:

$$\ddot{x} = a \quad (13.4)$$

Con esto se lleva el sistema a una forma de doble integrador.

13.6.1. Control de fuerza con lazo interno de posición

Si se considera un controlador PD y usando la ley de control anteriormente mencionada, se puede llegar a un controlador de fuerza con lazo interno de posición dado por la siguiente expresión:

$$a = D_d^{-1} [K_p(x_f - x) - K_v\dot{x}] \quad (13.5)$$

Donde D_d representa la matriz de inercia deseada, K_p y K_v la ganancia proporcional y derivativa respectivamente, y x_f representa una variable función del error de fuerza, siendo producto de un controlador proporcional integral, que se expresa con la siguiente ecuación:

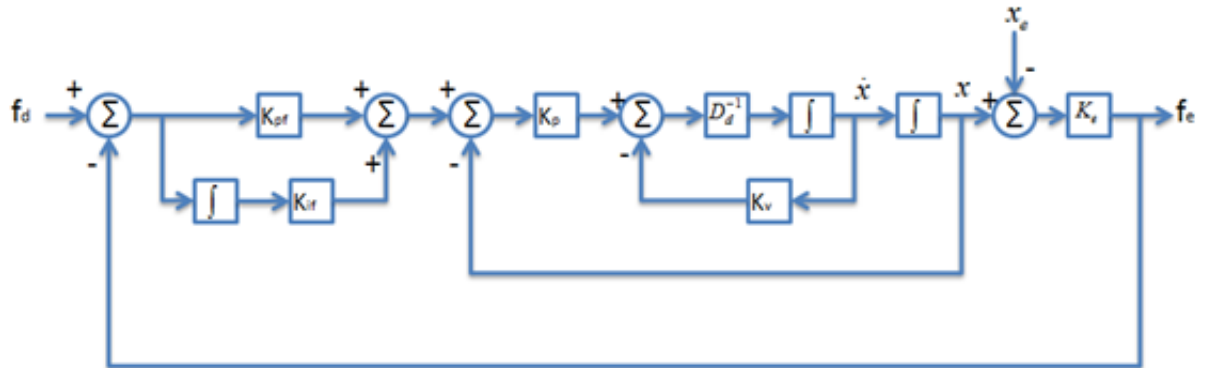
$$x_f = K_{pf}(f_d - f_e) + K_{if} \int_0^t (f_d - f_e) dt \quad (13.6)$$

Donde K_{pf} y K_{if} representan las ganancias proporcional e integral del control de fuerza. Si se reemplaza el valor de a en la expresión mostrada, la nueva ecuación de la dinámica del sistema estará expresada de la siguiente manera:

$$D_d\ddot{x} + K_v\dot{x} + K_px = K_px_f \quad (13.7)$$

De esta forma queda completamente definido el lazo de control, que se puede expresar mediante el diagrama de bloques mostrado en la figura 13.7:

Figura 13.7: Diagrama de bloques control de fuerza con lazo interno de posición



Fuente: Robótica, control de robots manipuladores. Reyes Fernando. 2010

13.6.2. Control de fuerza con lazo interno de velocidad

En este tipo de control se elimina el lazo de control por posición, dejándolo abierto. Por tanto la ley de control queda representada por la siguiente ecuación:

$$a = D_d^{-1} [K_p x_f - K_v \dot{x}] \quad (13.8)$$

Donde x_f solo será regida por una acción proporcional del error de fuerza:

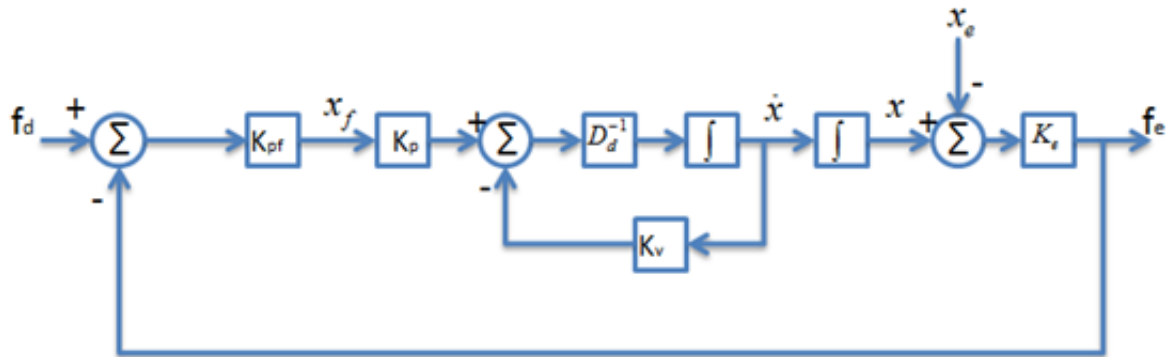
$$x_f = K_{pf} (f_d - f_e) \quad (13.9)$$

Lo cual queda representado por el diagrama de bloques de la figura 13.8:

13.7. CONTROL HÍBRIDO POSICIÓN/FUERZA

El control de fuerza no se usa solo muy a menudo en la práctica para robots manipuladores, sino que se complementa con el control de posición para un amplio dominio de operaciones diversas. Un robot manipulador industrial puede partir de una posición

Figura 13.8: Diagrama de bloques control de fuerza con lazo interno de velocidad



Fuente: Robótica, control de robots manipuladores. Reyes Fernando. 2010

inicial en la cual no encuentra restricción alguna para los sensores de fuerza y no puede realizar el feed-back en el lazo de control cerrado, por lo tanto debe recurrir al control de posición, visto en capítulos anteriores, para poder llegar al punto deseado y realizar la tarea programada. Estas funciones se pueden realizar alternando un sistema de control de posición con uno de fuerza dependiendo de si la se trata de un avance o la ejecución de una tarea.

Otros casos requieren de un control que permita la regulación del movimiento y de la fuerza ejercida a los elementos, por ejemplo al considerar el caso en el cual un manipulador debe realizar una trayectoria sobre una superficie frágil como el vidrio, debe poder realizar un movimiento controlado en las direcciones tangentes al material y controlar la fuerza normal ejercida para evitar que dicha superficie falle y se fracture.

El controlador híbrido de posición/fuerza debe resolver tres problemas:

- El control de la posición de un manipulador sobre las direcciones que exista una restricción natural de fuerza.
- El control de la fuerza sobre las direcciones que exista una restricción natural de

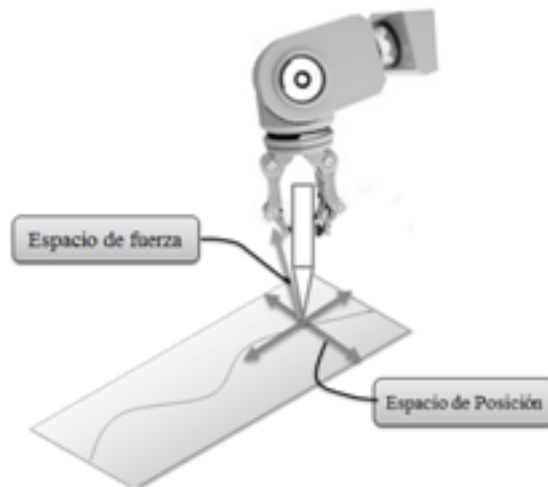
posición.

- 3. Un esquema para implementar la mezcla arbitraria de esos modos sobre los grados de libertad ortogonales de una trama arbitraria.

El control híbrido de fuerza posición es una técnica de control que especifica fuerzas deseadas o permisibles en aquellas direcciones donde hay restricciones del entorno y posición en las otras direcciones y por tanto el espacio de la tarea se subdivide en espacio de posición y espacio de fuerza como se muestra en la figura 13.9. El control híbrido a nivel articular es fácil de implementar pero en raras ocasiones corresponde a la naturaleza de la tarea.

Una solución al problema del control híbrido posición/fuerza está basada en una des-

Figura 13.9: Subdivisión del espacio de la tarea en el control híbrido posición/ fuerza



Fuente: Autores del proyecto

cripción de la dinámica del robot vista desde el efector final, es decir, en el espacio operacional o de tarea.

Debido a que el controlador de posición debe regular algunos grados de libertad y el control de fuerza debe regular el resto, esta estrategia es adecuada para operaciones predecibles y sencillas. La estructura de un controlador híbrido es de la forma:

$$\tau = J^T(q) [K_f S(f_d - f_e) + K_p(I - S)(x_d - x) - K_v \dot{x}] + G(q) \quad (13.10)$$

Donde S es una matriz diagonal $n \times n$ formada por 1's y 0's y sirve para determinar las direcciones controladas por fuerzas y cuales por posición. Los valores de 1 son asignados a las direcciones controladas por fuerza y los asignados con 0 corresponden a las direcciones controladas por posición. I es la matriz identidad, K_f y K_p representan las ganancias proporcionales de fuerza y posición respectivamente y K_v la ganancia derivativa relacionada ala velocidad del efector final del manipulador.

13.8. CONTROL DE IMPEDANCIA

Consiste en regular la interacción usando la relación de impedancia entre la fuerza aplicada y los errores de posicionamiento. Usualmente el objeto del control consiste en que el efector final responda a fuerzas aplicadas externamente, de acuerdo a una dinámica bien definida. En general la relación dinámica deseada entre la posición del efector final x , la trayectoria deseada x_d y el vector de fuerzas de contacto f_e está dada por la expresión:

$$f_e = K_d(x_d - x) + B_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + D(\ddot{x}_d - \ddot{x}) \quad (13.11)$$

Siendo K_d la matriz de rigidez, B_d la matriz de amortiguamiento y D la matriz de inercia. Estos parámetros caracterizan la impedancia Z_d de la expresión anterior la cual, dada en el dominio de frecuencia, está definida como:

$$Z_d = K_d + B_d s + D_d s^2 \quad (13.12)$$

Es decir:

$$f_e = Z_d(x_d - x) \quad (13.13)$$

La idea principal de este enfoque consiste en generar un sistema de lazo cerrado de tipo masa-resorte-amortiguador buscando que el efector final responda a la interacción dinámica con el entorno de acuerdo a la selección adecuada de los parámetros K_d, B_d y D_s . Dichos parámetros pueden seleccionarse de acuerdo con:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_d + k_e}{D_d}} \quad (13.14)$$

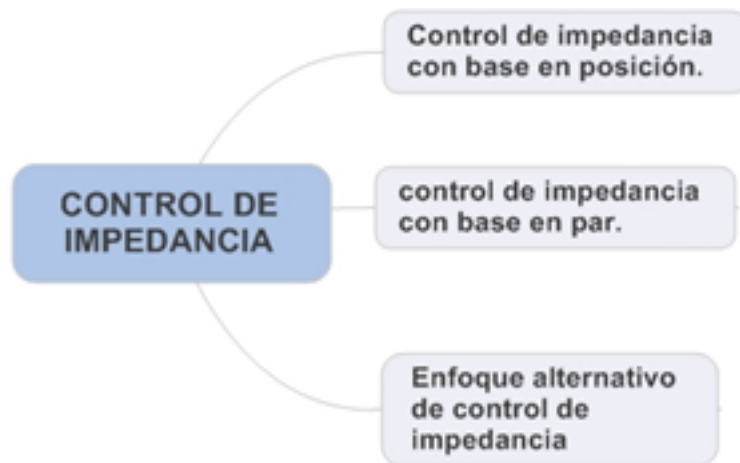
$$\zeta = \frac{B_d}{2\sqrt{D_d(K_d + K_e)}} \quad (13.15)$$

Donde la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ determinan el comportamiento dinámico durante la fase transitoria entre el movimiento libre y la interacción. La rigidez del entorno se selecciona de acuerdo con el tamaño y la capacidad de par del robot.

El control de impedancia se ha desarrollado en varios enfoques diferentes, teniendo como referencia el modo de trabajo. En la figura 13.10 se aprecian los diferentes enfoques que se emplean.

Entre estos enfoques se destacan tres en la industria: El control de impedancia con base

Figura 13.10: Enfoques del control de impedancia



Fuente: Autores del proyecto

en par, control de impedancia con base en posición y finalmente un enfoque alternativo de control de impedancia basado en errores de posición y el gradiente de una función artificial de energía potencial.

13.8.1. Control de impedancia con base en par

En el enfoque de control de impedancia con base en par, la ecuación del comportamiento deseado (ecuación 13.11) puede ser restringida a la especificación de la aceleración del efector final:

$$\ddot{x} = \ddot{x}_d + D_d^{-1} [K_d(x_d - x) + B_d(\dot{x}_d - \dot{x}) - f_e] \quad (13.16)$$

La ley de control se obtiene al sustituir la expresión 13.16 en la expresión 13.3 dando como resultado el vector de pares aplicados:

$$\tau = D(q)J^{-1}(q) \left\{ \ddot{x}_d + D_d^{-1} [K_d(x_d - x) + B_d(\dot{x}_d - \dot{x}) - f_e] - \dot{J}(q)\dot{q} \right\} + H + C(q) + J^T(q)f_e \quad (13.17)$$

13.8.2. Control de impedancia con base en posición

En este tipo de control, las fuerzas y los pares son censados por medio de un transductor ubicado en el efector final y los comandos de posición se emplean en el lazo interno del controlador. En particular se crea un vector de ajuste de posición x_a mediante el filtrado de las fuerzas de interacción medidas para satisfacer:

$$f_e = K_d x_a + B_d \dot{x}_a + D_d \ddot{x}_a \quad (13.18)$$

A través de:

$$x_a(s) = (K_d + B_d s + D_d s^2)^{-1} f_e(s) \quad (13.19)$$

Al ser K_d, B_d y D diagonales, esto se reduce a un filtro pasa bajas de cada componente de la fuerza f_e para generar cada componente de x_a . El ajuste x_a se resta a la trayectoria deseada para generar:

$$x_c = x_d - x_a \quad (13.20)$$

Al no existir contacto con el entorno, es decir $f_e = 0$ entonces $x_c = x_d$. Si al controlar el manipulador se logra el correcto posicionamiento, es decir $x = x_c$ entonces:

$$x_a = x_d - x \quad (13.21)$$

Y por ende las expresiones 13.18 y 13.19 satisfacen las expresiones generales del control de impedancia 13.11 y 13.12

Este enfoque permite un control de posición preciso dentro del lazo de control de impedancia, lo cual lo hace muy popular en manipuladores industriales, debido a que están diseñados como dispositivos de posicionamiento preciso (al menos repetitivo).

Sin embargo, es incapaz de actuar en impedancias pequeñas, es decir rigidez y amor-

Figura 13.11: Lazos de control en La técnica de control de impedancia con base en posición



Fuente: Autores del proyecto

tiguamientos pequeños. Esto es altamente deseable cuando se requiere de un control articular rígido, es decir, un control de posición con más seguridad o correcto posicionamiento en algunas direcciones cartesianas. Por tanto puede usarse una ley de control

de posición cartesiano PD con compensación de gravedad, tomando como posición de referencia deseada a x_c .

13.8.3. Enfoque alternativo al control de impedancia

Este enfoque corresponde a una generalización del control de movimiento en el espacio de tarea cartesiano, eligiendo una trayectoria deseada x_d , este trata de mantener la siguiente relación dinámica:

$$x_d - x = (K_s + B_s s + D_s s^2)^{-1} f_e \quad (13.22)$$

Siendo $s = \frac{d}{dt}$ denota el operador diferencial y K_s, B_s y D_s son matrices diagonales $n \times n$, obteniendo que $(K_s + B_s s + D_s s^2)^{-1}$ es un filtro estable lineal multivariable de segundo orden.

Si se define el error de impedancia como:

$$\tilde{\xi} = \tilde{x} - (K_s + B_s s + D_s s^2)^{-1} f_e \quad (13.23)$$

Donde $\tilde{x} = x_d - x$. Se tiene como objetivo de este enfoque, encontrar un valor de τ de tal manera que:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\xi}(t) &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\tilde{\xi}}(t) &= 0 \end{aligned} \quad (13.24)$$

Al no haber interacción con el entorno ($f_e = 0$) el objetivo de control equivale al del control de movimiento en espacio cartesiano. Por tanto, el control de impedancia puede verse como un control de movimiento permitiendo la tolerancia de errores en el seguimiento de la trayectoria en presencia de fuerzas de interacción.

Al realizar la diferenciación de la expresión 13.23 obtenemos los vectores:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\xi}} &= \dot{x}_d - \dot{x} - s(K_s + B_s s + D_s s^2)^{-1} f_e \\ \ddot{\tilde{\xi}} &= \ddot{x}_d - \ddot{x} - s^2(K_s + B_s s + D_s s^2)^{-1} f_e \end{aligned} \quad (13.25)$$

Que representan la velocidad y aceleración del error de impedancia.

Para solucionar el problema de control de impedancia se propone:

$$a = \ddot{x}_d - s^2(K_s + B_s s + D_s s^2)^{-1} f_e + D_d^{-1} [\nabla u(K_p, \tilde{\xi}) + k_v \tilde{\xi}] \quad (13.26)$$

Donde K_p y K_v son las matrices diagonales y positivas de ganancias proporcionales y derivativas respectivamente. Al considerar las dos expresiones anteriores, se obtiene la siguiente ecuación de lazo cerrado, combinando el esquema de control y el modelo del robot se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{\xi} \\ \dot{\tilde{\xi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\xi}} \\ -D_d^{-1} [\nabla u(K_p, \tilde{\xi}) + K_v \dot{\tilde{\xi}}] \end{bmatrix} \quad (13.27)$$

El término $\nabla u(K_p, \tilde{\xi})$, es el gradiente de una función artificial de energía potencial que representa la acción proporcional del controlador, mientras el término derivativo $K_v \dot{\tilde{\xi}}$ se incluye para tener un movimiento amortiguado.

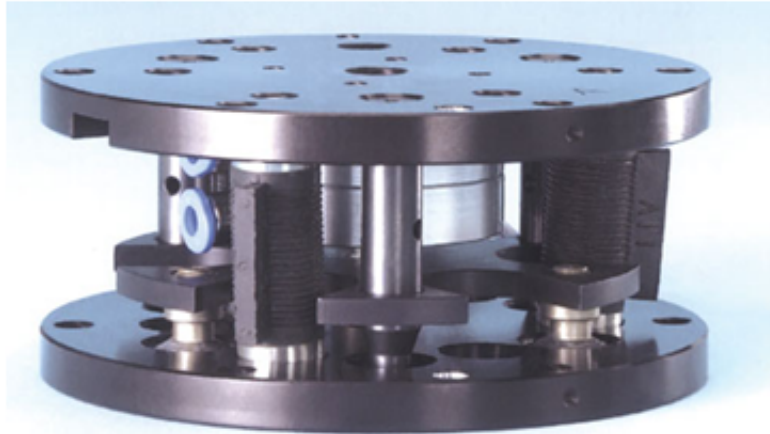
13.9. ESQUEMAS DE CONTROL DE ROBOT INDUSTRIALES EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad el control híbrido de posición/fuerza no se encuentra implementado, sin embargo el control de fuerza se lleva a cabo indirectamente y directamente. Una de las formas más usadas de control de fuerza indirectamente es con efectores finales flexibles que aseguran llevar a cabo la tarea realizada sin inconvenientes con un control de posición adecuado, este tipo de control se usa más que todo en tareas donde el contacto tiene que ser mínimo y hay un rango de valores de fuerza admitida. En el control de fuerza directo ya tenemos en cuenta una retroalimentación de la fuerza ejercida, gracias a los sensores, aunque en la industria solo se ha adaptado un control sencillo de esta forma.

En el primer caso de control de manera indirecta ya se había mencionado el dispositivo

RCC de la empresa Draper Labs, el cual se muestra en la figura 13.12:

Figura 13.12: RCC (remote center of compliance)



Fuente: <http://www.productionmachining.com/products/correct-alignment-errors>

Este dispositivo es básicamente un resorte de 6 grados de libertad que se implementa en la muñeca del manipulador logrando una adaptabilidad, logrando llevar a cabo tareas sin la posibilidad que el efector quede atascado, también se puede ajustar la rigidez de los resortes para lograr un mayor rango de adaptabilidad.

Industrialmente también se llevan a cabo tareas sin la necesidad de un control de fuerza detallado, por ejemplo en el triturado podemos tener un control de fuerza indirecto reajustando las ganancias del control de posición de acuerdo a un modelado del efector final como un resorte de seis grados de libertad.

13.10. APLICACIONES

Entre las múltiples aplicaciones que puede tener el control de interacción, el control de impedancia representa una estrategia relevante de control, especialmente en la inter-

acción robot-humano (con grandes resultados en las tareas de fisioterapia asistida por robots). Otra gran área de trabajo es la operación remota o teleoperación en robots, especialmente entre la comunidad científica, debido a las grandes posibilidades que hay en este campo en casi todos los sectores de la sociedad, que hasta ahora solo se ha limitado a la teleoperación de exploradores en Marte, cirugías asistidas por robot, en zonas de guerra.

En la teleoperación se cuenta con dos manipuladores robóticos, uno esclavo y otro maestro, por lo general se busca reproducir la posición y velocidad del manipulador maestro en el manipulador esclavo (comúnmente llamada configuración unilateral), pero también se suele sensar la fuerza en el manipulador esclavo para reproducirlo en el manipulador maestro, esta retroalimentación de fuerza mejora el desempeño en tareas complejas (siendo esta una configuración bilateral). Lo que se desea es un manipulador esclavo que pueda seguir a uno maestro en posición, velocidad y fuerza.

CAPÍTULO 14

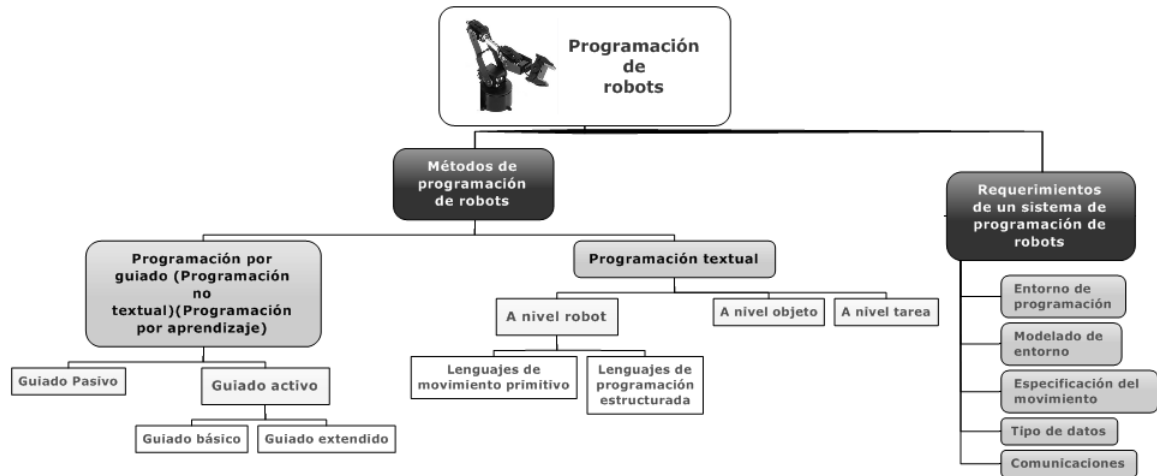
PROGRAMACIÓN DE ROBOTS INDUSTRIALES

En tiempos de globalización, la industria se enfrenta a la constante necesidad de innovar, aumentar el ciclo de vida y diversificar sus productos, todo esto bajo la presión de sostener un talento humano que implica grandes costos. Los robots industriales representan la mejor solución para estas problemáticas por su alta productividad y flexibilidad. Sin embargo la programación de todo el sistema de un robot industrial, es una aplicación específica y compleja, que requiere de tiempo y por lo tanto de un alto costo.

La programación de un robot consiste en el desarrollo del proceso de movimientos a determinados puntos y la manipulación de su entorno que durante una tarea específica el robot llevara a cabo, esto con ayuda de del control cinemático y dinámico, que son los que proporcionan las señales de mando. En esta capitulo se analizan las características de un sistema de programación de robots y su diferencia con la programación de otros

equipos, como por ejemplo de los equipos informáticos. En la figura 14.1 se indica la estructura general de la programación de robots.

Figura 14.1: Estructura general de la programación de robots



Fuente: Autores del proyecto

14.1. MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN DE ROBOTOS

Actualmente no existe normalización en los procedimientos de programación de robots, pero se estudian los sistemas de programación en los modelos principales. Es decir el robot actúa como un digitalizador de posiciones en un espacio con tantas dimensiones como articulaciones tiene, por las que se desea que pase en la fase de ejecución. Según esto se clasificara figura 14.2 en dos tipos de programación: guiado o mediante un procedimiento textual.

Figura 14.2: Métodos de programación



Fuente: Autores del proyecto

14.1.1. Programación por guiado

Se basa en hacer que el robot realice la tarea al mismo tiempo que se registran las configuraciones adoptadas para después realizar una repetición automática de estas. El dispositivo más utilizado en la programación por guiado de los robots manipuladores industriales es el Joystick (figura 14.3) y la botonera de programación (figura 14.4). Se clasifican en guiado pasivo y guiado activo.

Figura 14.3: Sistema de Joystick



Fuente: Using Fuzzy Compliance Control. Fusaomi Nagata, Keigo Watanabe and Kazuo Kiguch. 2001

Figura 14.4: Botonera de programación de robot industrial



Fuente: REVISTA DIGITAL UNIVERSITARIA. Implementacion de robot SCORBOT ER-VPLUS. 2007

Guiado pasivo directo

Es un guiado hecho por el programador debido a que los actuadores del robot se encuentran desconectados, por lo tanto la contribución de energía para mover el robot la da el programador, este puede tomar el efector final del robot hasta el punto deseado, buscando las trayectorias más adecuadas, donde los sensores de posición envían la señal a la unidad de control que reconoce y registra las posiciones de las articulaciones en cada punto de la trayectoria. Esta programación se ve en robots como el de la figura 14.5.

Guiado Pasivo por maniquí

En este guiado es necesario utilizar un doble del robot, que permanecerá por fuera de línea, este doble contara con la misma configuración que el robot real pero será más liviano y de fácil movimiento. Para programarlo es necesario de forma manual hacer el recorrido con el doble, mientras la unidad de control registra los valores del sensor de posición, para de esta forma el robot real repita estos movimientos.

Figura 14.5: Robot Gaiotto. Ejemplo de robot con programación de guiado pasivo directo



Fuente: Catalogo SACMI

Guiado activo

En este guiado se utiliza el propio sistema de accionamiento del robot, pero controlado a través de un panel de control que permitirá los movimientos del robot.

- **Guiado activo básico:** El robot es dirigido de forma consecutiva por cada punto de su trayectoria durante la fase de ejecución automática del programa, de forma que la unidad de control pueda interpolar los datos entre estos puntos para definir otras trayectorias.
- **Guiado activo extendido:** En este guiado además de posición se admite datos de velocidad, tipo de trayectoria, control de lujo del programa, etc. Este guiado aumenta la potencia del sistema de programación. Con este sistema es posible la realización de movimientos precavidos en lo que la condición de fin del movimiento es una señal que indica el contacto con un objeto.

Ventajas

- De fácil instrucción
- Espacio de memoria relativamente pequeño para almacenar información

Desventajas

- Tener que sacar el robot e la línea de producción, interrumpiendo por lo tanto el proceso.
- Inexistencia de una documentación del programa.
- Dificultad de modificar el programa

14.1.2. Programación textual

En este se usa un lenguaje de programación específico, donde una serie de órdenes son editadas y después efectuadas. Se clasifica en tres niveles: robot, objeto y tarea. En la actualidad la programación textual solo utiliza el nivel robot. La mayoría de los lenguajes de programación de robot tienen una sintaxis similar a lenguajes como el BASIC o el Pascal.

Lenguajes de programación a nivel robot

Lenguajes de programación a nivel robot, conocido también como lenguajes de programación textual explícita, estos a su vez se subdividen en:

- **Lenguajes de movimientos primitivo:** Tienen un nivel de potencia próxima al de programación guiado avanzado, de la que se distingue por tener características como: bifurcaciones simples, subprogramas sin transferencia de parámetros, capacidad sensorial limitada y paralelismo elemental. Entre estos se encuentran los lenguajes:

- EMILY
- RCL
- RPL
- SIGLA
- MAL

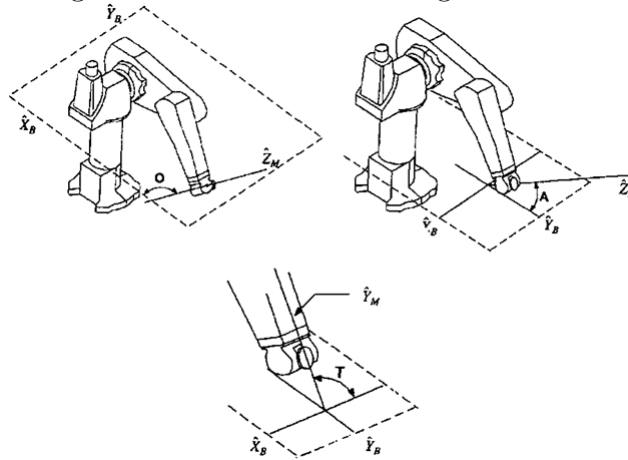
- MAL
 - AL
- **Lenguajes de programación estructurada:** Fueron desarrollados sobre una base de definición, forma que les proporciona características tales como primitivas estructuradas, uso extensivo de transformación de coordenadas, definición de estructuras complejas de datos, definición por el usuario de subprogramas con parámetros y proceso paralelo estructurado y sincronizado. En esta clasificación se encuentran los lenguajes:
- AML
 - LM
 - VAL II
 - V+
 - RAPID
 - AIVORAD

El desarrollo de programas a nivel robot hace necesaria la consideración de sistemas de referencia y cada lenguaje utiliza una notación especial, por ejemplo el lenguaje VAL II que es utilizado por el robot PUMA se emplean los ángulos O(orientación) que es el formado por el eje \hat{X}_B con la proyección del eje \hat{Z}_M sobre el plano $\hat{X}_B - \hat{Y}_B$; A (Altitud) ángulo formado entre el eje \hat{Z}_M y un plano paralelo al $\hat{X}_B - \hat{Y}_B$ y T(Herramienta) el que se forma por el eje \hat{Y}_M de la herramienta con un plano paralelo al $\hat{X}_B - \hat{Y}_B$. Se enseñan estos ángulos en la figura 14.6

Lenguaje de programación a nivel objeto

Las instrucciones hacen referencia al modo en que deben quedar los objetos manipulados por el robot. En este nivel se encuentran lenguajes como:

Figura 14.6: Definición de ángulos O-A-T.



Fuente: Robótica manipuladores y robots móviles. Ollero Anibal Baturone. 2001

- LAMA
- AUTOPASS
- RAPT

La solución usual que se toma en un lenguaje a nivel robot es la de extender un lenguaje de alto nivel ya existente para que cumpla las especificaciones de la programación del robot. Para una cierta aplicación, existe una única aplicación y no hay líneas definidas para su realización concreta.

Lenguaje de programación a nivel tarea

Las instrucciones harán referencia a la tarea u objetivo final que debe conseguir el manipulador. La manera natural de describir una tarea de una línea de producción se hace en términos de los objetos a manejar y no en términos de movimientos del robot. Los lenguajes de programación hacen uso de esta idea y así simplifican la tarea de programación.

Un sistema de programación a nivel tarea permite describir la tarea en un lenguaje de alto nivel, que especifica las características de la tarea; luego un planificado de la labor consulta una base de datos para obtener información, es decir el modelo del entorno, y transformara las especificaciones de la tarea en un programa a nivel de robot. En base a esto la planificación de la tarea tiene tres pasos: modelado del mundo y el entorno, especificación de la tarea y síntesis de programa.

La programación a nivel tarea, como la generación automática del programa, son motivos de investigación, ya que surge variedad de problemas.

14.2. REQUERIMIENTOS DE UN SISTEMA DE ROBOTS.

Como ya se mencionó no existe una normalización para la programación pero a través de la literatura en robótica se han establecido una serie de elementos característicos en cada sistema de programación.

14.2.1. Entorno de programación.

Para maximizar la producción es indispensable un entorno de desarrollo adecuado a las necesidades de trabajo del robot. La mayoría de los sistemas de programación son de ejecución paso a paso, por esto se hace necesario una buena capacidad de depuración y la existencia de una buena monitorización continua del desarrollo del programa. La tendencia es usar sistemas operativos de fácil adquisición como son Windows o Linux. Las interfaces gráficas en la programación de robots están regidas por la norma UNE

EN ISO 15187-2003.

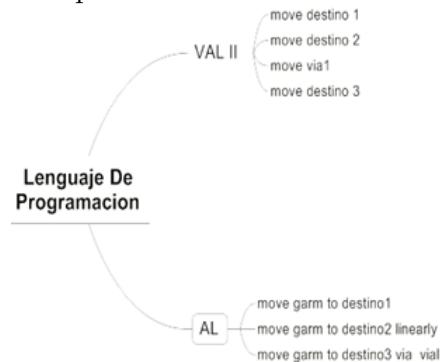
14.2.2. Modelado de entorno.

La extensión en la que se modelan los objetos en el entorno es una de las decisiones básicas al diseñar un sistema de programación de robots. Con frecuencia se utiliza un sistema de referencia para cada objeto de tal forma que la posición y orientación de este, se encuentre ligado a un sistema base (sistema del mundo) que definirán la posición física de los objetos. Un modelo relaciona y enseña las posibles uniones físicas entre los objetos, estas pueden ser independientes, de dependencia rígida o no. El elemento más común de los lenguajes de programación de robots es la existencia de “tipos geométricos”, estos son los que representaran los conjuntos de ángulos de articulación, posiciones cartesianas, orientaciones y cualquier sistema de referencia fijo a los eslabones del robot. Dado un entorno de programación de robots que soporta estos tipos geométricos, el robot y su entorno (maquinas, piezas y dispositivos fijos) pueden modelarse si se le definen variables con nombre asociadas con cada objeto.

14.2.3. Especificación del movimiento.

Una función básica de un lenguaje de programación de robots es permitir la descripción de los movimientos que se espera que se realice. Para mostrar la sintaxis que usan diferentes lenguajes de programación se tomara como ejemplo el siguiente movimiento del manipulador: **(1)** moverse a la posición “destino **1**”. **(2)** moverse en línea recta hasta la posición “destino **2**”. **(3)** moverse sin detenerse a través de “via **1z** detenerse completamente en “destino **3**” para distintos lenguajes de programación la sintaxis es similar para instrucciones de movimiento, así como es muestra en la figura 14.7.

Figura 14.7: Sintaxis basica para movimientos en un lenguaje de programacion.



Fuente: Autores del proyecto

14.2.4. Tipos de datos.

Un sistema de programación de robots cuenta con los tipos de datos convencionales (enteros, reales, booleanos etc.) con otros destinados a definir las interacciones con el entorno. Los diferentes sistemas de programación emplean las siguientes representaciones (Tabla 14.1).

14.2.5. Comunicaciones.

Es una necesidad integrar todos los sistemas del robot con otros elementos que participen en la producción, la comunicación entre estos permite:

- La adaptación de los movimientos del robot a situaciones cambiantes.
- La actualización del programa del robot cuando se incluya nuevas ordenes de producción.
- Monitorización del estado de la célula.
- Control de la producción
- Control de movimiento del robot

Cuadro 14.1: Tipo de datos en lenguajes de programación

	Emplea
VAL II (Stäubli)	$(q_1 \dots q_6)(p_x, p_y, p_z, \phi, \theta, \psi)$
AML(IBM)	$(p_x, p_y, p_z, \phi, \theta, \psi)$
ARLA(ABB)	$(p_x, p_y, p_z, \cos_{\theta/2}, h_x \text{ sen}_{\theta/2}, h_y \text{ sen}_{\theta/2}, h_z \text{ sen}_{\theta/2})$
RAPID(ABB)	$(p_x, p_y, p_z, \cos_{\theta/2}, h_x \text{ sen}_{\theta/2}, h_y \text{ sen}_{\theta/2}, h_z \text{ sen}_{\theta/2})$
V+(Adept)	$(p_x, p_y, p_z, \phi, \theta, \psi)$
AL(Stanford)	$(q_1 \dots q_6)$ y matrices de transformación homogénea

Fuente: Autores del proyecto

Cualquier método de programación debe tener la posibilidad de determinar los movimientos del robot, especificar su trayectoria con su respectiva velocidad, indicar la precisión con que alcanzara su punto final, indicando la posibilidad de movimiento o las condiciones que limiten los sensores.

Para controlar con precisión el extremo del robot es necesario variar su velocidad, esto hace que incremente el tiempo del ciclo, es usual en un entorno con obstáculos, se puede guiar al robot con el uso de puntos de paso, estos puntos se especifican como puntos que se alcanzan con baja precisión, el control del robot recibe la información de la posición que origina el programa, no admitiendo nuevos datos de la posición hasta que el extremo del robot no alcance la posición indicada, así si el sistema considera una precisión baja el extremo del robot buscara la siguiente configuración sin necesidad

de disminuir su velocidad. Si se considera una precisión nula se ejecutara la siguiente instrucción del programa , sin dar tiempo al que robot se encamine hacia el punto de paso, de esta forma se gana continuidad y velocidad a costa de perder precisión.

Si el robot pasa por puntos circulares, se pueden usar sistemas como el RAPID(ABB-94)que permiten especificar que tipo de interpolación se usarían durante la trayectoria cuando se pase por estos puntos.

El uso de sensores al momento de definir los movimientos del robot se puede hacer de dos formas:

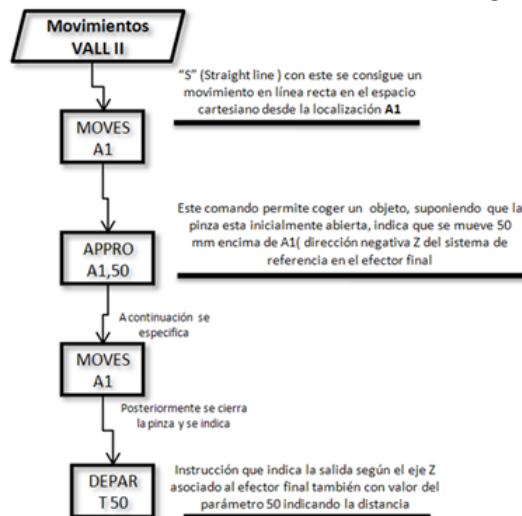
- Movimiento monitorizado (guarded motions): Interrupción del movimiento del robot por verificarse algún tipo de condición externa programada. Ejemplo: El robot recoge una pieza los datos en el plano XY son conocidos, pero la altura no, el sensor de presencia ubicado en la pinza del robot permitirá programar un movimiento vertical del robot has una altura minima , pero este movimiento será interrumpido cuando el sensor detecte la pieza y de esta forma seguir con las siguientes instrucciones del programa. En la practica estos movimientos se implementan mediante el uso de interrupciones.
- Movimientos acomodaticios(compilant motions): Consiste en usar sensores cuando hay modificación del movimiento en cuanto a la trayectoria, localización o velocidad según la información captada por el entorno. En la practica se realizan estos movimientos mediante el uso de funciones específicas de la aplicación o con instrucciones genérica que modifican la trayectoria de acuerdo al valor proporcionado por el sensor.
- Monitorización del estado de la célula.
- Control del flujo de ejecución del programa.

Es fundamental un lenguaje de programación que admita al programador especificar de alguna manera un flujo de ejecución de operaciones, para esto se usan las estructuras habituales de bucles (for, repeat, while, etc.)

14.3. ESPECIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS EN ROBOTS MANIPULADORES

En los lenguajes de programación se suele utilizar el tipo MOVE. Cuando se escribe: **MOVE A1**: Se especifica un movimiento del efector final desde la localización (posición y orientación) actual a la previamente definida mediante la etiqueta A1. En la figura 14.8 se presenta un ejemplo de sentencia de movimientos en VAL II referidos a puntos definidos en forma absoluta en el espacio de trabajo.

Figura 14.8: Sintaxis de movimientos en el Lenguaje VALL II.



Fuente: Autores del proyecto

APPRO Y DEPART se realizan con interpolación articular. Si se desea un movi-

miento en línea recta en el espacio cartesiano se utilizaría los comandos **APPROS Y DEPARTS**.

Otras instrucciones serían (tabla 14.2):

Cuadro 14.2: Otros comandos en VALL II.

COMANDO	CARACTERISTICA
• DRIVE 2, -60.5,70	Indicaría mover la articulación 2 un ángulo de giro de -60.5 grados a una velocidad del 70% de la especificada en el motor
• SPEED <i>valor</i> unidad [ALWAYS]	Donde <i>valor</i> es una constante, una variable real, o una expresión aritmética. La <i>unidad</i> puede ser MMPS (milímetros por segundo) o IPS (pulgadas por segundo). Ejemplo SPEED 20: Velocidad del 20% de la normal
• COARSE[ALWAYS]	Se utiliza para realizar movimientos rápidos con menor precisión. Su ejecución permite que los bucles de control en las articulaciones se permitan un mayor error en régimen permanente. Para restaurar el movimiento preciso que en el que se emplea normalmente es necesario usar la instrucción FINE
• OPEN Y CLOSE	Abren y cierran durante la ejecución del próximo movimiento. Y si se usa OPENI y CLOSEI abren y cierran inmediatamente. Si existe un sensor de fuerza el comando CLOSE 4.0 LB se utiliza para aplicar una fuerza de 3 libras sobre el objeto agarrado
• GRASP 40 eti	Comprueba que la distancia es la especificada y, en caso contrario transfiere el control a la instrucción con etiqueta eti en el programa

Fuente: Autores del proyecto

14.4. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN.

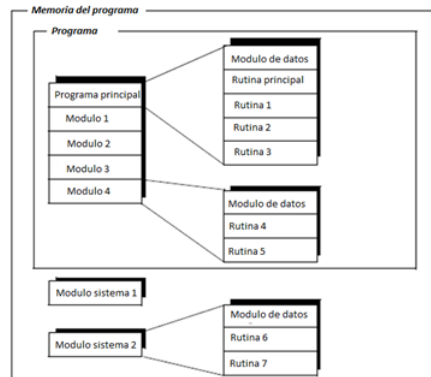
La programación de robot es muy diferente a la programación tradicional. Las consideraciones para tener en cuenta en cualquier lenguaje de programación son: Los objetos que manipula un robot, son objetos tridimensionales y con diferentes propiedades físicas; la descripción y las representaciones CAD de estos objetos son imprecisas y la

información que suministran los sensores deben ser controladas. En esta sección se estudian las características principales de los lenguajes RAPID y V+ son dos tipos de lenguajes básicos y bastantes conocidos en la industria de la robótica industrial.

14.4.1. Lenguaje de programación RAPID.

Desarrollado por la empresa ABB, es un lenguaje de programación textual de alto nivel que permite la utilización de funciones y procedimientos, la posibilidad de usar rutinas parametrizables, posibilidad de declarar rutinas y datos como locales o globales. En la figura 14.9 se presenta la estructura básica de este lenguaje de programación.

Figura 14.9: Estructura de un programa RAPID.



Fuente: Fundamentos de robótica. Antonio Barrientos. 2007.

Características

- Los programas en RAPID se denominan tareas, estas incluyen varios módulos, y estos a su vez submódulos. Existen tres tipos diferentes de subprogramas posibles:
 - *Procedimiento*: Rutina que no devuelve ningún valor y se utiliza como una instrucción.
 - *Función*: Rutina que devuelve un dato de tipo específico y que se utiliza como una expresión.

- *Rutina TRAP*: Son rutinas que se asocian a interrupciones y se ejecutan cuando estas se activan. No pueden llamarse nunca de forma explícita.
- Los datos a manejar pueden ser de dos tipos:
 - *Tipo de datos atómico* :No se define en función de otro tipo y no se puede dividir en diferentes componentes.
 - *Tipo de datos registro*: Está compuesto por una serie ordenada de componentes con sus respectivos nombres. Los componentes pueden ser a su vez de tipo atómico o de tipo registro.
 - *Rutina TRAP*: Son rutinas que se asocian a interrupciones y se ejecutan cuando estas se activan. No pueden llamarse nunca de forma explícita.
 - Los datos pueden definirse como globales o locales, tanto en módulos como subrutinas, y definidos como:
 - *Constantes*:(CONS) representan datos de un valor fijo a los que no se pueden reasignar un nuevo valor.
 - *Variables*: (VAR) son datos a los que les puede asignar un nuevo valor durante la ejecución del programa.
 - *Persistentes*:(PERS) se trata de la variable en las que cada vez que se cambia su valor durante la ejecución del programa, también se cambia el valor de su inicialización.

Existe ya una estructura predefinida de datos con diferentes para la utilización del usuario, en la tabla 14.3 se presentan algunos ejemplos:

El control de movimientos del robot cuenta con unos parámetros generales de movimiento que se explican a través de la figura 14.10 son:

Cuadro 14.3: Estructura de datos.

ESTRUCTURAS	DESCRIPCION	CAMPOS
<i>Confdata</i>	Estructura para especificar la configuración del robot	cf1: cuadrante del eje 1 cf4: cuadrante del eje 4 cf6: cuadrante del eje 6
<i>Loadata</i>	Describe la carga colocada en la muñeca de robot	mass: peso de la carga (kg) cog: centro de gravedad de la carga aom: orientación de los ejes de inercia en el centro de gravedad expresada como cuaternios ix,y,z: momentos de inercia de la carga alrededor del eje x, eje y, eje z (kgm ²)
<i>Tooldata</i>	Estructura para especificar las características de una herramienta	robhold: Defiene si el robot tiene la herramienta o no tframe: sistema de coordenadas de la herramienta tload: dato tipo loaddata
<i>Robtarget</i>	Se utiliza para definir la localización del robot y de los ejes externos	trans: desplazamiento en x, y, z del sistema de coordenadas rot: rotación del sistema de coordenadas como cuaternios robconf: configuración del robot (cf1,cf4,cf6 y cfx) estax: posición de los ejes externos
<i>Motsetdata</i>	Se utiliza para la definición de algunos parámetros de movimiento que afectan las instrucciones de posicionamiento del programa	vel.oride: velocidad como porcentaje de la programa vel.max: velocidad máxima (mm/s) sing.wrist: desviación de la orientación de la herramienta para evitar singularidad de la muñeca sing.arm: desviación de la orientación de la herramienta para evitar singularidad en el brazo
<i>JoinTarget</i>	Especifica una posición deseada para los ejes (articulaciones) del robot. Se utiliza cuando se quiere gobernar el robot directamente a través de sus articulaciones y no especificando posiciones y orientaciones	
<i>Orient</i>	Permite especificar una orientación o una rotación expresadas ambas como cuaternios	
<i>Pos</i>	Permite expresar una posición mediante sus coordenadas cartesianas X,Y,Z	

Fuente: Autores del proyecto

Instrucciones de movimientos

- **MoveL**: Desplazamiento del extremo del robot hasta el punto indicado, siguiendo una línea recta.
- **MoveC**: Desplazamiento del extremo del robot hasta el punto indicado siguiendo un círculo.
- **MoveJ**: Desplazamiento del extremo del robot hasta el punto indicado rápi-

Figura 14.10: Parámetros Lenguaje RAPID.



Fuente: Autores del proyecto

damente , sin garantizar cual es la trayectoria seguida(no hay coordinación de velocidad entre los distintos ejes del robot).

Ejemplo de estas instrucciones en la figura 14.11.

Figura 14.11: Instrucciones con los parámetros del lenguaje RAPID.



Fuente: Autores del proyecto

Instrucciones para la utilización de entradas y salidas

Se analizan dos operaciones, el comprobar el valor de las entradas o fijar el valor de una salida. La instrucción principal que comprueba el valor de una entrada es:

WaitDI: Esta instrucción hace que el robot espere hasta que la señal alcance el valor deseado. Ejemplo: `WaitDI in3, 1`(El robot esperara hasta que la señal digital in3 tome el valor uno).

Las instrucciones fundamentales en RAPID para el valor de las salidas son:

- **Set:** Fija el valor de una salida digital a 1. Ejemplo `Set out 1` (Fija el valor de la señal digital out1 a uno).
- **Reset:** Fija el valor de una salida digital a 0. Ejemplo `Reset out 3`(Fija el valor de la señal digital out3 a cero).
- **SetDO:** Fija una salida digital a un valor simbólico (activado o desactivado). Ejemplo `SetDO pinza, off` (Fija el valor de la señal digital pinza a off. Abre la pinza del robot).
- **SetAO:** Fija el valor de una salida analógica.

14.4.2. Lenguaje de programación V+

Este lenguaje desarrollado por Adept Technology en 1989, se utiliza en los robots Adept y en otros de la firma Staübli, este lenguaje proporciona una mayor interacción entre el hombre y el robot. Una de sus características mas importantes consiste en la posibilidad de ejecutar diferentes programas al mismo tiempo, además tiene la capacidad de que el sistema responda a eventos(señales externas o errores) cuando estos ocurren esto a través de la instrucción `CALL` , otras de sus sus ventajas son:

- Claridad: Se puede realizar una buena documentación, permite un diseño ordenado y lógico del programa.
- Fiabilidad

- Adaptabilidad
- Transportabilidad: Los programas se pueden desarrollar en una computadora y luego introducidos en el controlador. V+ cuenta con el protocolo KERMIT y el programa de aplicación XMODEM que permiten la transferencia de programas entre el controlador Adept y otro computador a través de una línea serie.

Este programa consiste en una serie de líneas que indicaran las instrucciones: El formato general de cada línea es:

Numero_linea etiqueta instrucción ; comentario

Los números de cada línea cambian, para identificar una línea se le puede colocar una etiqueta que es un numero entre 0 y 65535, numero que se coloca al principio de la línea.

La primera línea de un programa V+ es la instrucción PROGRAM seguida del nombre del programa, este nombre es obligatorio y la lista de parámetros opcional. El final del programa se indica con una línea que contiene la instrucción .END.

El V+ cuenta con las siguientes posibilidades:

- Programas de aplicación accesibles al operador mediante mouse, ventanas y gráficos en color.
- Modificación de la trayectoria en tiempo real.
- Acceso a comunicación con el BUS VME.
- Cálculos booleanos, funciones matemáticas, funciones geométricas, etc.
- Funciones gráficas para crear ventanas, iconos, gestión de eventos.
- Construcción estructurada.

- Movimientos continuos.
- 7 tareas paralelas (con posible extensión a 28 tareas).
- Acceso a 256 entradas, 256 salidas digitales externas, a 28 entradas , 16 salidas analógicas, 4 (ó 5) puertos de comunicación serie.
- Gestión de ejes suplementarios y de encoders externos.
- Matrices de hasta 3 dimensiones.
- Variables numéricas de 32 bits, coma flotante, simple y doble precisión.
- Manipulación de cadenas de caracteres. Herramientas de detección de errores.

Clasificación de variables

Globales: Todos los programas que se encuentran en memoria tienen acceso a ella.

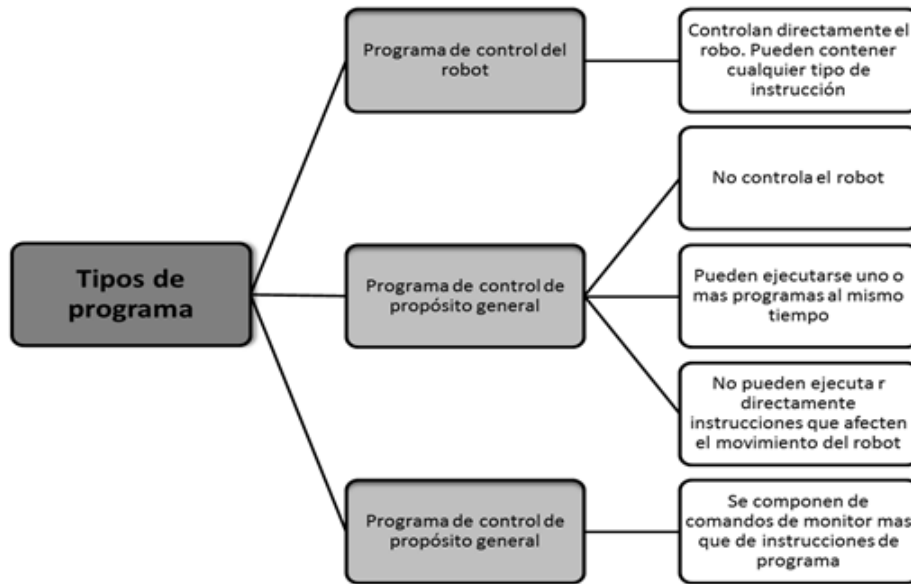
Locales: Una variable se puede hacer local utilizando la instrucción LOCAL, una variable local se crea la primera vez que se utiliza la instrucción LOCAL

Automaticas: Las variables automáticas se crean dentro de un programa con la instrucción AUTO. Se pueden acceder a ellas desde el programa en que han sido creadas, cada vez que se entra al programa se crea una copia separada de cada variable automática y el valor de dicha copia se pierde cuando se sale del programa.

Tipos de programas

Dependiendo del tipo de instrucciones que se utilicen existen tres tipos diferentes de programas a realizar (figura 14.12):

Figura 14.12: Tipos de programa en el sistema V+.



Fuente: Autores del proyecto

14.5. PROBLEMAS PECULIARES PARA LOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN EN ROBOTS

Comparación entre el modelo del entorno y la realidad externa

Una característica central de la programación de robots es el modelo del entorno que se mantiene internamente en la computadora, es difícil que asegurar que el modelo concuerde totalmente con la realidad física que se trata de modelar. La correspondencia entre el modelo interno y el externo deben establecerse para el estado inicial del programa y debe mantenerse durante su ejecución. Existirá siempre una incertidumbre sobre definir con exactitud la posición de el objeto que el robot manipulara, para refinar la precisión , se hacen uso de sensores o utilizando estrategias de fuerzas apropiadas para lograr un movimiento restringido.

Sensibilidad al contexto

Un problema que suele surgir debido a la dependencia entre la configuración del manipulador y la velocidad que este maneja que el código que maneja el program es confiable al probarse aislado, pero falla cuando se coloca dentro del contexto de un programa mas grande. Los programas de manipuladores pueden ser altamente sensibles a las condiciones iniciales, en trayectorias de movimientos la posición inicial podría también influenciar la velocidad con la que se moverá el brazo durante cierta parte critica del movimiento, debido a esto es probable que un segmento de programa escrito para realizar una operación en cierta ubicación necesite volver a indicarle las posiciones (ajustarse) para hacer que funcione en una ubicación distinta, esos intentos de reubicar los movimientos del manipulador dentro del volumen de trabajo ponen a prueba la precisión de los comoportamientos cinemáticos del manipulador y de los servos.

Recuperación de errores

Otra dificultad se presenta cuando los objetos no están ubicados exactamente donde deberían, la programación implica tener en cuenta esto y hacer las operaciones de ensamblaje lo mas robustas que se posible, de igual forma se presentaran errores, y es una tarea de los manipuladores recuperase de estos errores.

El primer problema que surge para recuperarse de un error, es identificarlo, para que un robot detecte un error debe contener cierto tipo de prueba explícita, esta prueba puede consistir en comprobar la posición del manipulador para ver que se encuentre en el rango apropiado, como por ejemplo que el manipulador cuente con una cámara que le permita tomar un foto, y atraves de esta reconozca la presencia o ausencia de un objeto.

14.6. SISTEMAS DE PROGRAMACION FUERA DE LINEA (OLP)

Es un lenguaje de programación que usa medios gráficos computacionales, con la ventaja de no tener que tener acceso al robot para programar. Un sistema OLP sirve como una base importante para la investigación y el desarrollo de sistemas de planeación a nivel de tarea.

14.6.1. Características básicas de los sistemas OLP

Interfaz de usuario

Un sistema OLP contiene por naturaleza un RPL (Lenguaje de programación del robot) como un subconjunto de su interfaz de usuario, un componente principal de esta interfaz es una vista de gráficos computacionales del robot que se está programando y su entorno. Se usa un dispositivo señalador, con la cual el usuario puede indicar varias ubicaciones u objetos en la pantalla de gráficos, esta interfaz controla la forma con la que el usuario interactuar con la pantalla, e inclusive le da la opción de señalar los elementos desde un menú para de esa forma ordenar funciones. La disponibilidad de modelos 3-D de el entorno de trabajo en el sistema OLP permite enseñar a un robot un punto de trabajo que tenga seis grados de libertad, esto con la interacción en la pantalla de gráficos.

Modelado en 3-D

En los sistemas OLP se usa descripciones gráficas del robot simulado y de su célula de trabajo. Para esto se hace necesario que el robot y otros dispositivos fijos, piezas y herramientas en el entorno de trabajo se modelen como objetos tridimensionales, para

aligerar el desarrollo del programa, se utilizan modelos CAD , por esto un sistema OLP contiene un subsistema de modelado CAD .

Los sistemas OLP por lo común requieren de varias representaciones de formas espaciales, con esto se logra la detección automática de colisiones entre los objetos en un sistema simulado, el sistema OLP logra advertir de forma automática al usuario indicándole donde ocurre la colisión.

Emulación cinemática

Con relación a la cinemática inversa, el sistema OLP puede interactuar con el controlador del robot en dos formas, en la primera el sistema OLP puede sustituir la cinemática inversa del controlador de robot y siempre comunicar las posiciones de este en espacio de articulación del mecanismo, la segunda opción consiste en comunicar las ubicaciones cartesianas al controlador de robot y dejar que el controlador utilice la cinemática inversa suministrada por el fabricante para resolver la configuración del robot. Esto significa que las funciones de cinemática directa e inversa utilizadas por el simulador deben reflejar las funciones nominales utilizadas en el controlador de robot suministrado por el fabricante del robot.

Emulación de planeación de rutas

Un sistema OLP debe emular con precisión la ruta tomada por el manipulador para moverse a través del espacio, el problema principal es que el sistema OLP necesita simular los algoritmos en el controlador de robot empleado y dichos algoritmos de planeación y ejecución de rutas varían considerablemente de un fabricante de robots a otro. Esta simulación de la ruta que se toma es importante para evitar colisiones del robot con su entorno.

Emulación dinámica

El sistema OLP logra un buen trabajo para emular el algoritmo de planeación de trayectorias del controlador, y si el robot sigue las trayectorias deseadas con errores insignificantes cuando no está en condiciones de alta velocidad o bajo una carga pesada, pero cuando esto sucede es necesario simular estos errores de rastreo, y esto se hace modelando el comportamiento dinámico del manipulador y de los objetos que este emplea con el algoritmo de control utilizado en el controlador del manipulador.

Simulación de múltiples procesos

La simulación del manipulador con otros dispositivos móviles y demás actividades que involucren el paralelismo.

Simulación de sensores

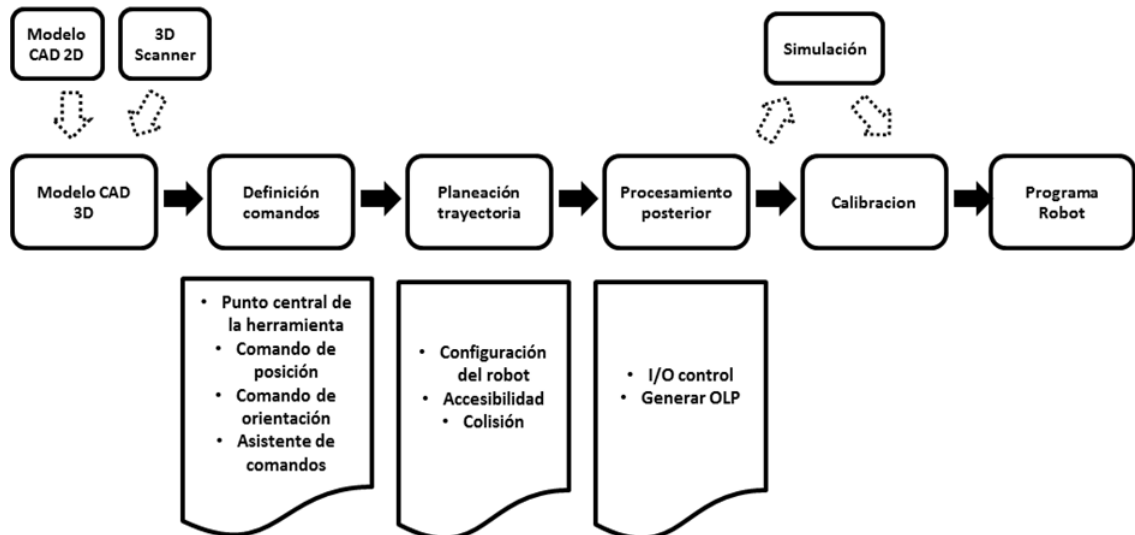
El sistema OLP simula sensores y procesos con el fin de verificar la viabilidad de los movimientos del robot, logrando verificar la sincronización del programa del robot.

Traducción del lenguaje al sistema de destino

La aspiración de un sistema OLP es ser universal en el equipo que puede manejar, debe traducir desde y hacia distintos lenguajes, además del beneficio de evitar tener que aprender y aprender con varios lenguajes de automatización. En conclusión el problema general de traducir un programa de aplicación de un poderoso lenguaje universal a un simple lenguaje diseñado para ejecutarse en un procesador económico se vuelve un asunto importante en los sistemas OLP. Para la programación OLP, es necesario un

método que no solo caracterice al robot en 3D, sino que también planifique la trayectoria del movimiento del robot, y que a su vez optimice secuencialmente este proceso. Los pasos claves de la programación OLP se muestran en la (figura 14.13):

Figura 14.13: Diagrama Pasos Programación OLP.



Fuente: SciVerse ScienceDirect :Recent progression programming methods for industrial robots. Joseph Polden, Nathan Larkin, Stephen Van Duin, John Norrish.

CAPÍTULO 15

TÓPICOS ESPECIALES

Los robots son sistemas compuestos de sensores que reciben datos de entrada y que pueden estar conectados a la computadora. Esta, al recibir la información de entrada, ordena al robot que efectúe una determinada acción. Puede ser que los propios robots dispongan de microprocesadores que reciben el input de los sensores y que estos microprocesadores ordenen al robot la ejecución de las acciones para las cuales está concebido. En este último caso, el propio robot es a su vez una computadora.

Hoy en día, los avances tecnológicos y científicos no han permitido todavía construir un robot realmente inteligente, aunque existen esperanzas de que esto sea posible.

Ahora, una de las finalidades de la construcción de robots es su intervención en los procesos de fabricación. Estos robots, que no tienen forma humana en absoluto, son los encargados de realizar trabajos repetitivos en las cadenas de proceso de fabricación, como por ejemplo: pintar al spray, moldear a inyección, soldar carrocerías de automóvil, trasladar materiales, entre otros. En una fábrica sin robots, los trabajos antes mencionados los realizan técnicos especialistas en cadenas de producción. Con los robots, el técnico puede librarse de la rutina y el riesgo que sus labores, con lo que la empresa

gana en rapidez, calidad y precisión. En este capítulo se darán a conocer las nuevas temáticas que se están investigando para poder, de algún modo, llegar a obtener algún día robots con la mayoría de cualidades q un humano pueda tener o incluso mejorarlas.

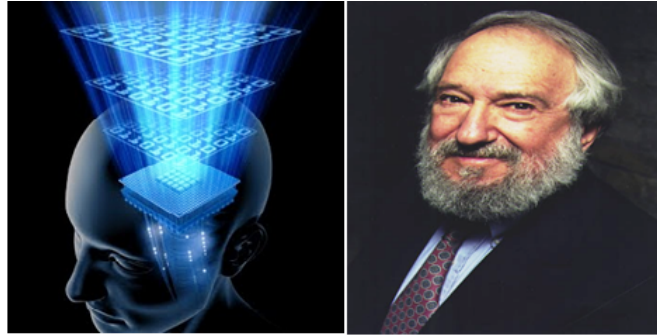
15.1. INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial es la ciencia que pretende la instauración de programas para máquinas que simulen el comportamiento humano. La investigación en el campo de la “IA” se caracteriza por la producción de máquinas para la automatización de tareas que requieran un comportamiento inteligente.

La IA no es desarrollar robots que imiten las acciones de los seres vivos sino que se trata de desarrollar aplicaciones que faciliten las tareas del ser humano.

Algunos ejemplos se encuentran en el área de control de sistemas, planificación automática, la habilidad de responder a diagnósticos y a consultas de los consumidores, reconocimiento de escritura, reconocimiento del habla y reconocimiento de patrones. De este manera, se ha convertido en una disciplina científica, orientada en proveer soluciones a problemas de la vida diaria. Los sistemas de IA actualmente son parte de la rutina en campos como economía, medicina, ingeniería y la milicia, y se ha usado en gran variedad de aplicaciones de software, juegos de estrategia como ajedrez de computador y otros videojuegos. El matemático sudafricano, Seymour Papert, es considerado pionero en esta ciencia.

Figura 15.1: La inteligencia artificial y su pionero Seymour Papert



Fuente: www.ait.net

15.1.1. Reseña histórica de la inteligencia artificial:

La Inteligencia Artificial ha tenido que hacer frente a una serie de problemas; en la tabla 15.1 se muestran algunos de esos logros históricos que ayudaron a solucionar estas interferencias:

- Los computadores no pueden manejar verdaderos significados.(No hay razonamiento intuitivo)
- Los computadores no tienen autoconciencia (emociones, sociabilidad, entre otros.)
- Un computador sólo puede hacer aquello para lo que está programado.
- Las máquinas no pueden pensar realmente.

Cuadro 15.1: Logros Históricos De La Inteligencia Artificial.

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
1843	Ada Augusta Byron, patrocinadora de Charles Babbage planteó el asunto de si la máquina de Babbage podía "pensar". Los primeros problemas que se trató de resolver fueron puzzles, juegos de ajedrez, traducción de textos a otro idioma.
1945	Norbert Wiener y John Von Neumann establecieron los principios de la cibernética en relación con la realización de decisiones complejas y control de funciones en máquinas.
1955	Con la ahora famosa conferencia de Dartmouth, organizada por John McCarthy y en la cual se utilizó el nombre de inteligencia artificial para este nuevo campo, se separó la Inteligencia Artificial de la ciencia del computador, como tal. Se estableció como conclusión fundamental la posibilidad de simular inteligencia humana en una máquina
1957	Newell y Simon continúan su trabajo con el desarrollo del General Problemas Solver (GPS).
1957	McCarthy desarrolló el lenguaje LISP.
1958 y 1960	Se desarrolla un programa orientado a la lectura de oraciones en inglés y la extracción de conclusiones a partir de su interpretación, al cual su autor, Robert K. Lindsay, denomina "Sad Sam".
Continua en la página siguiente	

Cuadro 15.1 – Continuación de la página anterior

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
1958 y 1960	Herbert Gelernter, de IBM, quien desarrolla un "Demostrador Automático de Teoremas de la Geometría", Alex Bernstein desarrolla un programa para el juego de ajedrez que se considera el antecedente para "Deep Blue".
1960	Frank Rosenblatt desarrolla, en la Universidad de Cornell, un modelo de la mente humana a través de una red neuronal y produce un primer resultado al cual llama perceptrón.
1961	Se desarrolla SAINT (Symbolic Automatic INTEgrator) por James Slagle el cual se orienta a la demostración simbólica en el área del álgebra.
1964	Bertrand Raphael construye el sistema SIR (Semantic Information Retrieval) el cual era capaz de comprender oraciones en inglés.
1965 y 1970	Comenzaron a aparecer los programas expertos, que predicen la probabilidad de una solución bajo un set de condiciones, entre esos proyectos estuvo: DENDRAL, que asistía a químicos en estructuras químicas complejas euclidianas; MACSYMA, producto que asistía a ingenieros y científicos en la solución de ecuaciones matemáticas complejas, entre otros.
1975	Comienza la era de los lenguajes expertos (shells) como EMYCIN, EXPERT, OPSS, etc. para luego tratar de que éstos sean más amigables y funcionales.
Continua en la página siguiente	

Cuadro 15.1 – Continuación de la página anterior

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
1970 y 1980	Creció el uso de sistemas expertos, muchas veces diseñados para aplicaciones médicas y para problemas realmente muy complejos como MYCIN, que asistió a médicos en el diagnóstico y tratamiento de infecciones en la sangre. Otros son: R1/XCON, PIP, ABEL, CASNET, PUFF, INTERNIST/CADUCEUS, etc. Algunos permanecen hasta hoy.

15.1.2. Caracterización de la inteligencia artificial

La característica fundamental que diferencian a los métodos de IA de los métodos numéricos es el uso de símbolos no matemáticos, aunque no es suficiente para diferenciarlos completamente. Otros tipos de programas como los compiladores y sistemas de bases de datos, también procesan símbolos y no se considera que usen técnicas de IA.

- El programa especifica cómo encontrar la secuencia de pasos necesarios para resolver un problema dado. En comparación con los programas que no son de IA, que siguen un algoritmo definido, que especifica, cómo encontrar las variables de salida para cualquier variable dada de entrada (programa de procedimiento).
- El razonamiento fundado en el conocimiento, implica que estos programas incorporan factores y relaciones del mundo real y del ámbito del conocimiento en que ellos operan. Al contrario de los programas para propósito específico, como los de contabilidad y cálculos científicos; los programas de IA pueden distinguir entre el programa de razonamiento o motor de inferencia y base de conocimientos dándole

la capacidad de explicar incompatibilidades entre ellas.

- Aplicabilidad a datos y problemas mal estructurados, sin las técnicas de IA los programas no pueden trabajar con este tipo de problemas. Un ejemplo es la resolución de conflictos en tareas orientadas a metas como en planificación, o el diagnóstico de tareas en un sistema del mundo real: con poca información, con una solución cercana y no necesariamente exacta.
- La IA incluye varios campos de desarrollo tales como: la robótica, usada principalmente en el campo industrial; comprensión de lenguajes y traducción; visión en máquinas que distinguen formas y que se usan en líneas de ensamblaje; reconocimiento de palabras y aprendizaje de máquinas; sistemas computacionales expertos.
- **La inteligencia artificial y sus teorías:**
 - Construir réplicas de la compleja red neuronal del cerebro humano (bottom-up).
 - Intentar imitar el comportamiento del cerebro humano con un computador (top-down).
- **Sus metodologías:**
 - *La lógica difusa:* permite tomar decisiones bajo condiciones de certeza.
 - *Redes neuronales:* esta tecnología es poderosa en ciertas tareas como la clasificación y el reconocimiento de patrones. Está basada en el concepto de "aprender" por agregación de un gran número de muy simples elementos.

15.1.3. La investigación en inteligencia artificial

La investigación en inteligencia artificial se concentran principalmente en los sistemas expertos, la resolución de problemas, el control automático, las bases de datos

inteligentes y la ingeniería del software (diseños de entornos de programación inteligente).

Otras investigaciones están trabajando en el reto del reconocimiento de patrones donde se espera un rápido progreso en este campo que abarca la comprensión y la síntesis del habla, el proceso de imágenes y la visión artificial; Finalmente, la investigación fundamental es sobre la representación del conocimiento, la conceptualización cognoscitiva y la comprensión del lenguaje natural.

Figura 15.2: Algunos ejemplos de robots aplicando inteligencia artificial. a) monty robot humanoide ayudante de cocina de la empresa lynxmotion; b) robot barman barrobot ; c) Aibo, el perro , juega y muerde.



Fuente: www.anybots.com www.edant.clarin.com; www.roboticaeducativa.com.

Figura 15.3: Prótesis de brazo completo y corazón artificial desarrollado por el profesor Emilio Sacristán en la UAM



Fuente: Joel Jiménez Cruz. cibernética, inteligencia artificial y robótica. 2010

Otro ejemplo de investigación es el sistema de visión artificial Robot Visión PRO, es capaz de ejecutar de manera totalmente automática las labores de identificación de objetos y de control de calidad de los mismos.

- El sistema Robot Visión PRO es un paquete de software de visión que permite la adquisición de imágenes, pre procesamiento y segmentación. Además realiza procesamiento de datos de alto nivel que brinda filtrado de imágenes, elaboración de clúster y patrones, e identificación de objetos.

15.1.4. Áreas de investigación:

- La representación del conocimiento, que busca en el descubrimiento de métodos expresivos y eficientes, describir información sobre aspectos del mundo real.
- Los métodos de aprendizaje automático, que extienden las técnicas estadísticas con el fin de posibilitar la identificación de un amplio rango de tendencias generales a partir de un conjunto de datos de entrenamiento.
- El campo de la planificación, que enfrenta el desarrollo de algoritmos que construyen y ejecutan automáticamente secuencias de comandos primitivos con el fin de alcanzar ciertas metas de alto nivel.
- Los trabajos en el área de razonamiento posible, que hacen uso de principios estadísticos para desarrollar codificaciones de información incierta.
- El estudio de las arquitecturas de agentes, que busca la integración de otras áreas de la IA con el objeto de crear agentes inteligentes, entidades robustas capaces de comportamiento autónomo y en tiempo real.
- La coordinación y colaboración multiagentes, que ha permitido el desarrollo de técnicas para la representación de las capacidades de otros agentes y la especificación del conocimiento necesario para la colaboración entre ellos.

- El desarrollo de ontologías, que persigue la creación de catálogos de conocimiento explícito, formal y multipropósito, que puedan ser utilizados por sistemas inteligentes.
- Los campos de procesamiento de voz y lenguaje, que buscan la creación de sistemas que se comunican con la gente en su lenguaje.
- La síntesis y comprensión de imágenes, que conduce a la producción de algoritmos para el análisis de fotografías, diagramas y videos, así como también de técnicas para el despliegue visual de información cuantitativa y estructurada.

15.1.5. Áreas de aplicación de la IA

Pero también hay áreas de aplicación. En efecto, estos procesos de la AI se aplican en los sistemas reales en una gran variedad de ramas y problemas:

- *Gestión y control*: análisis inteligente, fijación de objetivos.
- *Fabricación*: diseño, planificación, programación, monitorización, control, gestión de proyectos, robótica simplificada y visión computarizada.
- *Educación*: adiestramiento práctico, exámenes y diagnóstico.
- *Ingeniería*: diseño, control y análisis.
- *Equipamiento*: diseño, diagnóstico, adiestramiento, mantenimiento, configuración, monitorización y ventas.
- *Cartografía*: interpretación de fotografías, diseño, resolución de problemas cartográficos.
- *Profesiones*: abogacía, medicina, contabilidad, geología, química.
- *Software*: enseñanza, especificación, diseño, verificación, mantenimiento.

- *Sistemas de armamento*: guerra electrónica, identificación de objetivos, control adaptativo, proceso de imágenes, proceso de señales.
- Proceso de datos: educación, interface en lenguaje natural, acceso inteligente a datos y gestores de bases de datos, análisis inteligente de datos.
- Finanzas: planificación, análisis, consultoría.

15.1.6. Aplicaciones comerciales de la inteligencia artificial

- *Configuración*: selección de distribución de los componentes de un sistema de computación.
- *Diagnosis*: hardware informático, redes de ordenadores, equipos mecánicos, problemas médicos, averías telefónicas, instrumentación electrónica, circuitos electrónicos, averías automovilísticas.
- *Interpretación y análisis*: datos geológicos para prospección petrolífera, compuestos químicos, análisis de señales, problemas matemáticos complejos, evaluación de amenazas militares, análisis de circuitos electrónicos, datos biológicos (coronarios, cerebrales y respiratorios), información de radar, sonar e infrarrojos.
- *Monitorización*: equipos, monitorización de procesos, fabricación y gestión de procesos científicos, amenazas militares, funciones vitales de pacientes hospitalizados, datos financieros en tiras de papel perforado por tele-impresora, informes industriales y gubernamentales.
- *Planificación*: gestión de activo y pasivo, gestión de cartera, análisis de créditos y préstamos, contratos, programación de trabajos de taller, gestión de proyectos, planificación de experimentos, producción de tarjetas de circuito impreso.
- *Interfaces inteligentes*: hardware (fiscal) de instrumentación, programas de computadora, bases de datos múltiples, paneles de control.

- *Sistemas de lenguaje natural*: interfaces con bases de datos en lenguaje natural, gestión de impuestos (ayudas para contabilidad), consultoría en temas legales, planificación de fincas, consultoría de sistemas bancarios.
- *Sistemas de diseño*: integración de microcircuitos en muy alta escala, síntesis de circuitos electrónicos, plantas químicas, edificios, puentes y presas, sistemas de transporte.
- *Sistemas de visión computarizada*: selección de piezas y componentes, ensamblado, control de calidad.
- *Desarrollo de software*: programación automática.

15.2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las Redes Neuronales buscan la solución de problemas complejos, no como una secuencia de pasos, sino como la evolución de unos sistemas de computación inspirados en el cerebro humano, y dotados por tanto de cierta “inteligencia”, los cuales no son sino la combinación de elementos simples de proceso (neuronas) interconectados, que operando de forma paralela en varios estilos, consiguen resolver problemas relacionados con el reconocimiento de formas o patrones, predicción, codificación, control y optimización entre otras aplicaciones.

15.2.1. Reseña histórica:

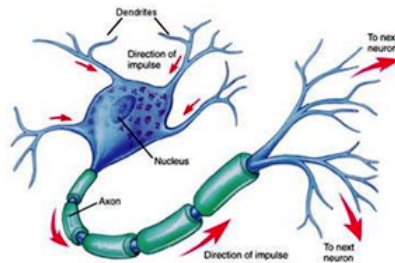
Las primeras explicaciones teóricas sobre el cerebro y el pensamiento fueron dadas por algunos filósofos griegos, como Platón y Aristóteles, quienes fueron apoyados después por Descartes y filósofos empiristas.

Alan Turing, en 1936, fue el primero en estudiar el cerebro como una forma de ver el mundo de la computación, pero quienes primero concibieron algunos fundamentos de la

computación neuronal fueron Warren McCulloch y Walter Pitts, después otras teorías iniciales fueron expuestas por Donald Hebb. Pero solo hasta 1957 Frank Rosenblatt comenzó el desarrollo del Perceptrón, la red neuronal más antigua de la que me encargué posteriormente. Más adelante apareció el modelo ADALINE, desarrollado por Bernard Widrow y Marcial Hoff. Stephen Grossberg realizó *Avalancha* en 1967, hasta 1982 el crecimiento se frenó pero surgieron luego investigaciones sobre redes como la de Marvin Minsky y Seymour Papert, después James Anderson desarrolló el Asociador Lineal, en Japón Kunihiko Fukushima y Teuvo Kohonen que se centraron en redes neuronales para el reconocimiento de patrones; en USA John Hopfield también realizó importantes investigaciones.

Desde 1985 comenzaron a consolidarse los congresos más importantes como Neuro-

Figura 15.4: Neurona biológica y sus partes.



Fuente: [www. blog.pucp.edu.pe](http://www.blog.pucp.edu.pe)

nal Networks for Computing, la Neural Information Processing Systems, entre algunas otras. Actualmente, son numerosos los trabajos que se realizan y publican. Revistas como Neural Networks, Transactions on Neural Networks, entre otros, son las encargadas de la publicación de los últimos avances.(tabla 15.2)

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos, la Sociedad Europea de Redes Neuronales son algunos de los ejemplos del resurgir de la investigación sobre redes neuronales.

Cuadro 15.2: Logros históricos de la investigación en redes neuronales artificiales.

FECHAS	ACONTECIMIENTOS
1936	Alan Turing, fue el primero en estudiar el cerebro como una forma de ver el mundo de la computación, pero quienes primero concibieron algunos fundamentos de la computación neuronal fueron Warren McCulloch y Walter Pitts, después otras teorías iniciales fueron expuestas por Donald Hebb.
1957	Frank Rosenblatt comenzó el desarrollo del Perceptrón, la red neuronal más antigua de la que me encargaré posteriormente.
1957	Modelo ADALINE, desarrollado por Bernard Widrow y Marcial Hoff.
1967	Stephen Grossberg realizó Avalancha
1982	el crecimiento se frenó pero surgieron luego investigaciones sobre redes como la de Marvin Minsky y Seymour Papert, después James Anderson desarrollo el Asociador Lineal, en Japón Kunihiko Fukushima y Teuvo Kohonen que se centraron en redes neuronales para el reconocimiento de patrones; en USA John Hopfield también realizó importantes investigaciones.
1985	Comenzaron a consolidarse los congresos más importantes como Neuronal Networks for Computing, la Neural Information Processing Systems, entre algunas otras.

Fuente: Autores de proyecto

15.2.2. La forma biológica:

La teoría y modelado de redes neuronales está inspirada en la estructura y funcionamiento de los sistemas nerviosos, donde la neurona es el elemento fundamental.

En general, una neurona consta de un cuerpo celular más o menos esférico, de 5 a 10 micras de diámetro, del que salen una rama principal, el axón, y varias ramas más cortas, llamadas dendritas (figura 15.4).

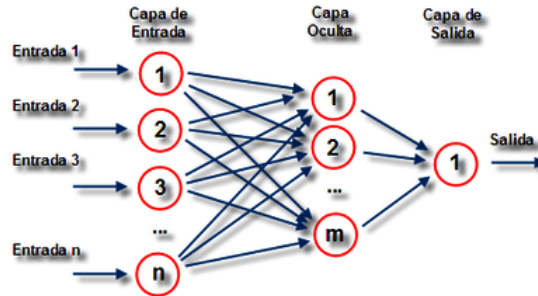
Una de las características de las neuronas es su capacidad de comunicarse. En términos generales las dendritas y el cuerpo celular reciben señales de entrada; el cuerpo celular las combina e integra y emite señales de salida. El axón transmite dichas señales a los terminales axónicos, que distribuyen información o un nuevo conjunto de neuronas, se calcula que en el cerebro humano existen del orden de 10^{15} conexiones.

Las señales que se utilizan son de dos tipos: eléctrica y química. La señal generada por la neurona y transportada a lo largo del axón es un impulso eléctrico, mientras que la señal que se transmite entre los terminales axónicos de una neurona y las dendritas de la otra es de origen químico.

Para establecer una similitud directa entre la actividad sináptica y la analogía con las redes neuronales artificiales podemos considerar: Las señales que llegan a la sinapsis son las entradas a la neurona; estas son ponderadas (atenuadas o simplificadas) a través de un parámetro, denominado peso asociado a la sinapsis correspondiente. Estas señales de entrada pueden excitar a la neurona (sinapsis con peso positivo) o inhibirla (peso negativo). El efecto es la suma de las entradas ponderadas. Si la suma es igual o mayor que el umbral de la neurona, entonces la neurona se activa (da salida). Esta es una situación de todo o nada; cada neurona se activa o no se activa. La facilidad de transmisión de señales se altera mediante la actividad del sistema nervioso. Las sinapsis son susceptibles a la fatiga, deficiencia de oxígeno y la presencia de anestésicos, entre otros. Esta habilidad de ajustar señales es un mecanismo de aprendizaje.

15.2.3. Partes de una red neuronal artificial:

Figura 15.5: Red neuronal artificial y sus diferentes partes



Fuente: Autores de proyecto

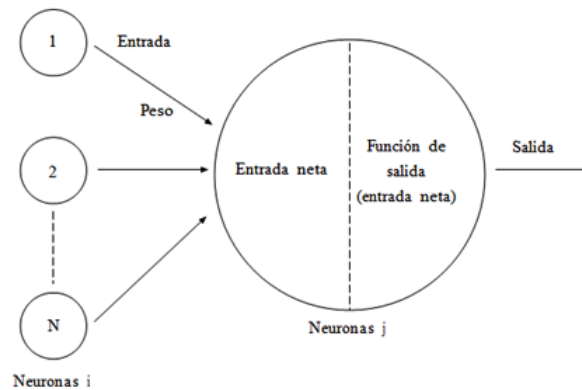
Las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos que intentan reproducir el comportamiento del cerebro. De tal modelo, realiza una simplificación, averiguando cuáles son los elementos relevantes del sistema, bien porque la cantidad de información de que se dispone es excesiva o bien porque es redundante. Una elección adecuada de sus características, más una estructura conveniente, es el procedimiento convencional utilizado para construir redes capaces de realizar determinada tarea.

- Se conoce como *capa* o nivel a un conjunto de neuronas cuyas entradas provienen de la misma fuente y cuyas salidas se dirigen al mismo destino
- *Unidad de proceso*: La neurona Artificial. Existen tres tipos de unidades en cualquier sistema: entradas, salidas y ocultas. Las unidades de entrada reciben señales desde el entorno; las de salida envían la señal fuera de la red, y las unidades ocultas son aquellas cuyas entradas y salidas se encuentran dentro del sistema.
- *Estado de Activación*: Los estados del sistema en un tiempo t se representan por un vector $A(t)$. Los valores de activación pueden ser continuos o discretos, limitados o ilimitados. Si son discretos, suelen tomar un conjunto discreto de valores binarios, así un estado activo se indicaría con un 1 y un estado pasivo se representaría por

un cero. En otros modelos se considera un conjunto de estados de activación, en cuyo valor entre $[0, 1]$, o en el intervalo $[-1, 1]$, siendo una función sigmoïdal.

- *Función de Salida o de Transferencia:* Asociada con cada unidad hay una función de salida, que transforma el estado actual de activación en una señal de salida.

Figura 15.6: Funcionamiento general de una red neuronal artificial



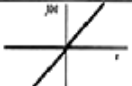
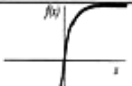
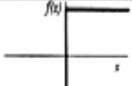

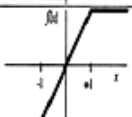
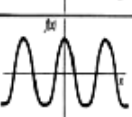
Fuente: Autores de proyecto

Existen cuatro funciones de transferencia típicas que determinan distintos tipos de neuronas (figura 15.7):

- Función Escalón
- Función Lineal y Mixta
- Sigmoïdal
- Función Gaussiana

1. **Conexiones entre neuronas:** Las conexiones que unen a las neuronas que forman una RNA tienen asociado un peso, que es el que hace que la red adquiera conocimiento. Se considera que el efecto de cada señal es aditivo, de tal forma que la entrada neta que recibe una neurona es la suma del producto de cada señal

Figura 15.7: Funciones de transferencia típicas

	Función	Rango	Gráfica		Función	Rango	Gráfica
Identidad	$y = x$	$[-\infty, +\infty]$		Sigmoidea	$y = \frac{1}{1+e^{-x}}$ $y = \text{tanh}(x)$	$[0, +1]$ $[-1, +1]$	
Escalón	$y = \text{sign}(x)$ $y = H(x)$	$\{-1, +1\}$ $\{0, +1\}$		Gaussiana	$y = Ae^{-bx^2}$	$[0, +1]$	
Lineal a tramos	$y = \begin{cases} -1, & \text{si } x < -1 \\ x, & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ +1, & \text{si } x > 1 \end{cases}$	$[-1, +1]$		Sinusoidal	$y = A \text{sen}(\omega x + \varphi)$	$[-1, +1]$	

Fuente: Andrés Nacelle. Redes neuronales artificiales. 2009

individual por el valor de la sinapsis que conecta ambas neuronas y es lo que se conoce como red de propagación. Se utiliza una matriz W con todos los pesos, Si W_{ji} es positivo indica que la relación entre las neuronas es excitadora, es decir, siempre que la neurona i esté activada, la neurona j recibirá una señal que tenderá a activarla. Si W_{ji} es negativo, la sinapsis será inhibitoria. En este caso si i está activada, enviará una señal que desactivará a j . Finalmente si W_{ji} es 0 se supone que no hay conexión entre ambas.

2. **Función o Regla de Activación:** Se requiere una regla que combine las entradas con el estado actual de la neurona para producir un nuevo estado de activación. Esta función F produce un nuevo estado de activación en una neurona a partir del estado que existía y la combinación de las entradas con los pesos de las conexiones. Esa F es denominada función de activación, y las salidas que se obtienen en una neurona para las diferentes formas de F serán:

- Función de Activación Escalón
- Función de Activación Identidad
- Función de Activación Lineal -Mixta

- Función de Activación Sigmoidal

3. **Regla de Aprendizaje:** El aprendizaje puede ser comprendido como la modificación de comportamiento inducido por la interacción con el entorno y como resultado de experiencias conduce al establecimiento de nuevos modelos de respuesta a estímulos externos. En el cerebro humano el conocimiento se encuentra en la sinapsis. En el caso de las RNA el conocimiento se encuentra en los pesos de las conexiones entre neuronas. Todo proceso de aprendizaje implica cierto número de cambios en estas conexiones. En realidad, puede decirse que se aprende modificando los valores de los pesos de la red.

15.2.4. Características de una red neuronal artificial:

Existen cuatro aspectos que caracterizan una red neuronal: su topología, el mecanismo de aprendizaje, tipo de asociación realizada entre la información de entrada y salida, y la forma de representación de estas informaciones.

1. **Redes Monocapa:** Se establecen conexiones laterales, cruzadas o auto-recurrentes entre las neuronas que pertenecen a la única capa que constituye la red. Se utilizan en tareas relacionadas con lo que se conoce como auto-asociación; por ejemplo, para generar informaciones de entrada que se presentan a la red incompleta o distorsionada.
2. **Redes Multicapa:** Son aquellas que disponen de conjuntos de neuronas agrupadas en varios niveles o capas. Una forma de distinguir la capa a la que pertenece la neurona, consiste en fijarse en el origen de las señales que recibe a la entrada y el destino de la señal de salida. Según el tipo de conexión, como se vio previamente, se distinguen las redes feedforward, y las redes feedforward/feedback.
3. **Topología de las Redes Neuronales:** La arquitectura de las redes neuronales consiste en la organización y disposición de las neuronas formando capas más o

menos alejadas de la entrada y salida de la red. En este sentido, los parámetros fundamentales de la red son: el número de capas, el número de neuronas por capa, el grado de conectividad y el tipo de conexiones entre neuronas.

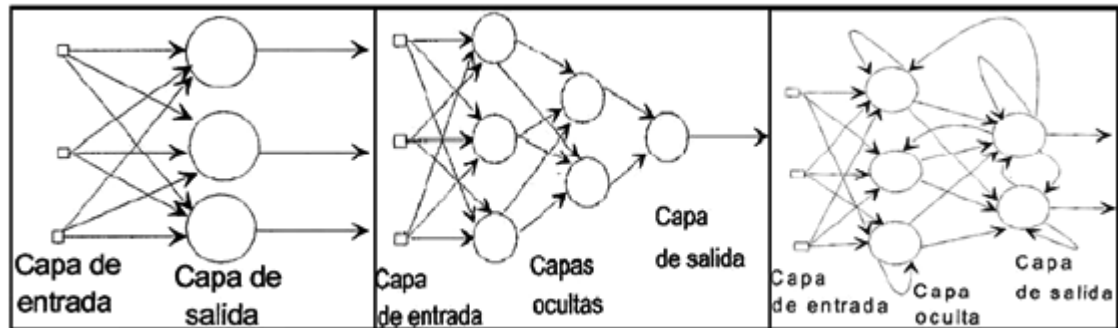
4. **Mecanismo de Aprendizaje:** El aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen durante el proceso de aprendizaje se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas, la creación de una nueva conexión implica que el peso de la misma pasa a tener un valor distinto de cero, una conexión se destruye cuando su peso pasa a ser cero. Se puede afirmar que el proceso de aprendizaje ha finalizado (la red ha aprendido) cuando los valores de los pesos permanecen estables ($dw_{ij} / dt = 0$).

Un criterio para diferenciar las reglas de aprendizaje se basa en considerar si la red puede aprender durante su funcionamiento habitual, o si el aprendizaje supone la desconexión de la red.

Otro criterio suele considerar dos tipos de reglas de aprendizaje: las de aprendizaje supervisado y las correspondientes a un aprendizaje no supervisado, estas reglas dan pie a una de las clasificaciones que se realizan de las RNA: Redes neuronales con aprendizaje supervisado y redes neuronales con aprendizaje no supervisado. La diferencia fundamental entre ambos tipos estriba en la existencia o no de un agente externo (supervisor) que controle el aprendizaje de la red.

5. **Redes con Aprendizaje Supervisado:** El proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo (supervisor, maestro) que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. El supervisor comprueba la salida de la red y en el caso de que ésta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida se aproxime a la deseada. Se consideran tres

Figura 15.8: Algunos tipos de redes; monocapa, multicapa, recurrente



Fuente: Andrés Nacelle. Redes neuronales artificiales. 2009

formas de llevar a cabo este tipo de aprendizaje:

- *Aprendizaje por corrección de error:* Consiste en ajustar los pesos en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos en la salida de la red; es decir, en función del error.
- *Aprendizaje por refuerzo:* Se basa en la idea de no indicar durante el entrenamiento exactamente la salida que se desea que proporcione la red ante una determinada entrada. La función del supervisor se reduce a indicar mediante una señal de refuerzo si la salida obtenida en la red se ajusta a la deseada (éxito= +1 o fracaso= -1), y en función de ello se ajustan los pesos basándose en un mecanismo de probabilidades.
- *Aprendizaje estocástico:* Este tipo de aprendizaje consiste básicamente en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de las conexiones de la red y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de distribuciones de probabilidad.

6. **Redes con Aprendizaje No Supervisado:** Estas redes no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre neuronas. La red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada es o

no correcta, así que existen varias posibilidades en cuanto a la interpretación de la salida de estas redes. En algunos casos, la salida representa el grado de familiaridad o similitud entre la información que se le está presentando en la entrada y las informaciones que se le han mostrado en el pasado. En otro caso podría realizar una codificación de los datos de entrada, generando a la salida una versión codificada de la entrada, con menos bits, pero manteniendo la información relevante de los datos, o algunas redes con aprendizaje no supervisado lo que realizan es un mapeo de características, obteniéndose en las neuronas de salida una disposición geométrica que representa un mapa topográfico de las características de los datos de entrada, de tal forma que si se presentan a la red informaciones similares, siempre sean afectadas neuronas de salidas próximas entre sí, en la misma zona del mapa.

En general en este tipo de aprendizaje se suelen considerar dos tipos:

- *Aprendizaje Hebbiano*: Consiste básicamente en el ajuste de los pesos de las conexiones de acuerdo con la correlación, así si las dos unidades son activas (positivas), se produce un reforzamiento de la conexión. Por el contrario cuando una es activa y la otra pasiva (negativa), se produce un debilitamiento de la conexión.
- *Aprendizaje competitivo y cooperativo*: Las neuronas compiten (y cooperan) unas con otras con el fin de llevar a cabo una tarea dada. Con este tipo de aprendizaje se pretende que cuando se presenta a la red cierta información de entrada, solo una de las neuronas de salida se active (alcance su valor de respuesta máximo). Por tanto las neuronas compiten por activarse, quedando finalmente una, o una por grupo, como neurona vencedora.

7. Tipo de Asociación entre las Informaciones de Entrada y Salida.

Las RNA son sistemas que almacenan cierta información aprendida; está infor-

mación se registra de forma distribuida en los pesos asociados a las conexiones entre neuronas de entrada y salida. Existen dos formas primarias de realizar esa asociación de entrada/salida.

- *Hetero-asociación:* que se refiere al caso en el que la red aprende parejas de datos $[(A_1, B_1), (A_2, B_2) \& \dots (A_n, B_n)]$, de tal forma que cuando se presente cierta información de entrada A_i , deberá responder generándola correspondiente salida B_i .
- *Auto-asociación:* donde la red aprende ciertas informaciones A_1, A_2, \dots, A_n , de tal forma que cuando se le presenta una información de entrada realizará una auto correlación, respondiendo con uno de los datos almacenados, el más parecido al de la entrada.

8. Representación de la información de entrada y salida:

Las redes neuronales pueden también clasificarse en función de la forma en que se representan las informaciones de entrada y las respuestas o datos de salida. Así un gran número de redes, tanto los datos de entrada como de salida son de naturaleza analógica, cuando esto ocurre, las funciones de activación de las neuronas serán también continuas, del tipo lineal o sigmoideal. Otras redes sólo admiten valores discretos o binarios a su entrada, generando también unas respuestas en la salida de tipo binario. En este caso, las funciones de activación de las neuronas son de tipo escalón. Existe también un tipo de redes híbridas en las que las informaciones de entrada pueden ser valores continuos, aunque las salidas de la red son discretas.

15.2.5. Implementación de las redes neuronales

La realización de RNA puede llevarse a cabo por medio de uno o varios circuitos integrados específicos, para así poder obtener una estructura que se comporte lo más similar posible a como lo haría una red neuronal. Otra tecnología que podría ser apropiada en la implementación de las redes neuronales es la tecnología electro-óptica, con

la ventaja de utilizar la luz como medio de transporte de la información, permitiendo la transmisión, masiva de datos.

- **Realización de Redes Neuronales:**

Consiste en simular la red sobre un ordenador convencional mediante un software específico. Es un procedimiento rápido, económico, e instituíble, pero su mayor desventaja radica en el hecho de que se intentan simular redes con un alto grado de paralelismo sobre máquinas que ejecuten secuencialmente las operaciones. Valores intrínsecos de las redes neuronales no pueden obtenerse de esta forma.

Otro método es la realización de redes neuronales a través de arquitecturas orientadas a la ejecución de procesos con un alto de paralelismo, tales como redes de transportes, arquitecturas sistólicas, entre otras. Este método es una optimización del anterior, ya que el acelera el proceso, permitiendo una respuesta en tiempo real, pero el comportamiento real de la red sigue siendo simulado por una estructura ajena a la estructura intrínseca de una red neuronal.

Una tercera aproximación radicalmente distinta es la realización de redes neuronales mediante su implementación por uno o varios circuitos integrados específicos. Son los llamados chips neuronales. Las neuronas y las conexiones se emulan con dispositivos específicos, de forma que la estructura del circuito integrado refleja la arquitectura de la red. Se consigue de esta forma realizaciones que funcionan a alta velocidad, pero a costa de una pérdida notable de velocidad.

- **Herramientas software de desarrollo:**

La comercialización de productos software es la forma más extendida para simular redes neuronales, debido a las ventajas citadas anteriormente. La diferencia entre los distintos productos software radica en aspectos tales como el tipo y el número de arquitecturas de red que soporta, velocidad de procesamiento, interfaz gráfica, exportación de código C para el desarrollo automático de aplicaciones, entre otras.

- **Neuro-computadores de propósito especial y de propósito general:** Básicamente es un conjunto de procesadores conectados con cierta regularidad que operan concurrentemente. Los de propósito general deben ser capaces de emular un gran número de modelos de red neuronal.
- **Implementación microelectrónica (VLSI)** Es la implementación sobre un circuito de conexiones fijas. La presentación del panorama que actualmente existe en el ámbito de la implementación VLSI de redes neuronales resulta complicada por la gran cantidad de aportaciones existentes, tanto en soluciones analógicas como digitales y con la alternativa de matriz de neuronas o de sinapsis.

15.2.6. Ventajas de las redes neuronales

Las RNA presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Por ejemplo, son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a nuevos casos, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando en múltiples áreas. Estas ventajas incluyen:

1. **En el proceso de aprendizaje:** los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan unos resultados específicos. Una RNA no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de los pesos de los enlaces mediante el aprendizaje. También existen redes que continúan aprendiendo a lo largo de su vida, después de completado el periodo inicial de entrenamiento.
2. **Aprendizaje Adaptativo:** Es una de las características más atractivas de las redes neuronales, es la capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o una experiencia inicial.

3. **Auto-organización:** Las redes neuronales usan su capacidad de aprendizaje adaptativo para organizar la información que reciben durante el aprendizaje y/o la operación. Una RNA puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje. Esta auto-organización provoca la facultad de las redes neuronales de responder apropiadamente cuando se les presentan datos o situaciones a los que no habían sido expuestas anteriormente.
4. **Tolerancia a Fallos:** Comparados con los sistemas computacionales tradicionales, los cuales pierden su funcionalidad en cuanto sufren un pequeño error de memoria, en las redes neuronales, si se produce un fallo en un pequeño número de neuronas, aunque el comportamiento del sistema se ve influenciado, sin embargo no sufre una caída repentina.
5. **Operación en Tiempo Real:** Los computadores neuronales pueden ser realizados en paralelo, y se diseñan y fabrican máquinas con hardware especial para obtener esta capacidad.
6. **Fácil inserción dentro de la tecnología existente:** Debido a que una red puede ser rápidamente entrenada, comprobada, verificada y trasladada a una implementación hardware de bajo costo, es fácil insertar RNA para aplicaciones específicas dentro de sistemas existentes (chips, por ejemplo). De esta manera, las redes neuronales se pueden utilizar para mejorar sistemas de forma incremental, y cada paso puede ser evaluado antes de acometer un desarrollo más amplio.

15.2.7. Aplicaciones de las redes neuronales

Las redes neuronales son una tecnología computacional emergente que puede utilizarse en un gran número y variedad de aplicaciones, tanto como comerciales como militares.

■ **Biología:**

- Aprender más acerca del cerebro y otros sistemas.
- Obtención de modelos de la retina.

■ **Empresa:**

- Reconocimiento de caracteres escritos.
- Identificación de candidatos para posiciones específicas
- Optimización de plazas y horarios en líneas de vuelo.
- Explotación de bases de datos.
- Evaluación de probabilidad de formaciones geológicas y petrolíferas.
- Síntesis de voz desde texto.

■ **Medio Ambiente**

- Analizar tendencias y patrones.
- Previsión del tiempo.

■ **Finanzas**

- Previsión de la evolución de los precios.
- Valoración del riesgo de los créditos.
- Identificación de falsificaciones.
- Interpretación de firmas

■ **Manufacturación**

- Robots automatizados y sistemas de control (visión artificial y sensores de presión, temperatura, gas, etc.)

- Control de producción en líneas de proceso.
- Inspección de calidad
- Filtrado de señales.

■ **Medicina**

- Analizadores del habla para la ayuda de audición de sordos profundos.
- Diagnóstico y tratamiento a partir de síntomas y/o de datos analíticos (encefalograma, etc.).
- Monitorización en cirugía.
- Predicción de reacciones adversas a los medicamentos.
- Lectoras de Rayos X.
- Entendimiento de causa de ataques epilépticos.

■ **Militares**

- Clasificación de las señales de radar.
- Creación de armas inteligentes.
- Optimización del uso de recursos escasos.

15.3. NANO-ROBOTICA

La nano-robótica es la fabricación de máquinas, o robots, de dimensiones nanométricas. De una forma más específica, la nano-robótica se refiere a la todavía hipotética ingeniería nanotecnológica del diseño y construcción de robots. Otra definición, usada algunas veces, es la de una máquina capaz de operar de forma precisa con objetos de escala nano-métrica.

15.3.1. Algunas invenciones nano-robóticas

Investigadores del Instituto de Tecnología de California (Caltech) y las Universidades de Columbia y Arizona han conseguido construir y programar dos “robots moleculares”(entre cuyos componentes se ha insertado ADN) capaces de realizar tareas complejas a una escala microscópica. Los robots, igual que sus parientes de mayor tamaño, pueden moverse, pararse, girar y realizar con precisión los trabajos para los que están programados.

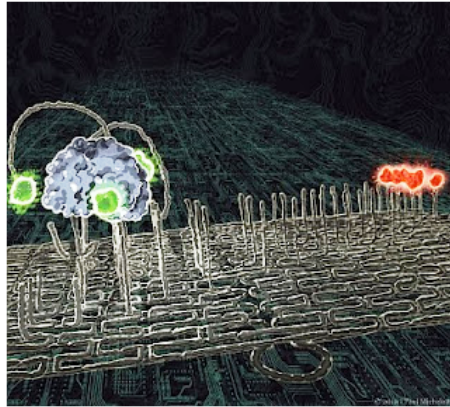
El primero de los dos robots es una especie de “araña molecular” que, según la programación que incorpore, será capaz incluso de tomar sus propias decisiones y reaccionar de acuerdo con el ambiente en el que se encuentre. Sus tres patas son enzimas de ADN que son capaces, por ejemplo, de dividir una secuencia genética determinada o de ensamblar todo tipo de moléculas construyendo (o rompiendo) sus enlaces moleculares.(figura 15.9)

El segundo robot es una especie de cadena de montaje de apenas unos nanómetros de tamaño (un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro). Tiene cuatro patas y tres manos, es capaz de desplazarse rápidamente por un sustrato de ADN y, a partir de las nano-partículas que se le suministran, está diseñado para ensamblar cualquier clase de material imaginable, incluso nuevos materiales diseñados en laboratorio.(figura 15.10)

Hasta ahora, sólo había sido posible construir nano-robots capaces de realizar tareas muy sencillas, como la de desplazarse. A partir de ahora, se podrá además dotar a estas micro-máquinas de una programación concreta para desempeñar labores específicas, e incluso dotarlas de la capacidad de decidir por sí mismas entre un gran número de acciones. Los nano-robots podrán, por ejemplo, repararse o reconstruirse a sí mismos, o decidir si la célula que tienen enfrente es cancerosa y debe por tanto ser destruida.

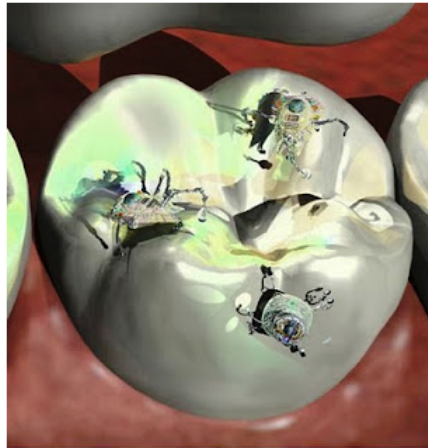
Estos micro-robots a escala molecular podrán llevar al terreno del microscópico todas las ventajas de la robótica moderna. Con el añadido de que serán capaces de trabajar indistintamente con o sobre materiales orgánicos o inorgánicos, o lo que es igual, podrán

Figura 15.9: Nano-robot “araña molecular”



Fuente: www.elfuturoyaeshistoria.blogspot.com

Figura 15.10: nano-robot para ensamblajes de material



Fuente: www.elfuturoyaeshistoria.blogspot.com

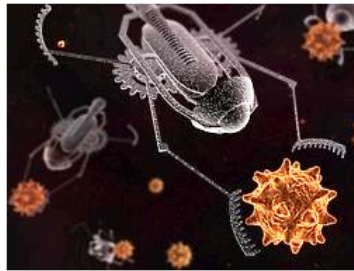
construir o reparar tanto componentes eléctricos como tejidos vivos.

Las aplicaciones para esta clase de máquinas de ADN son infinitas y abarcan una gran multitud de campos. Todo depende de la programación que incorporen. Una legión de nano-robots inyectada en el cuerpo de un astronauta podría, por ejemplo, mantenerlo sano y en forma durante un largo viaje espacial. Otro "mini-ejército" mecánico podría combatir, desde dentro, un tumor, a base de perseguir y destruir todas las células cancerosas que encuentre en el organismo (figura 15.11). Otros podrán, en un futuro próximo,

poner a punto materiales más resistentes o específicamente diseñados para resistir en cualquier tipo de entorno o condiciones. Y otros se encargarán de construir piezas electrónicas de una precisión y eficacia imposible de conseguir por medio de las técnicas actuales de fabricación.

Los robots del futuro serán casi invisibles y estarán hechos del mismo material que

Figura 15.11: futuro nano-robot destructor de moléculas cancerígenas



Fuente: www.elfuturoyaeshistoria.blogspot.com

llevan dentro todos los seres vivos. Así lo creen investigadores de EEUU, Europa y Asia que llevan años usando fragmentos de ADN para construir circuitos, programar instrucciones y ensamblar robots millones de veces más pequeños que la cabeza de un alfiler. Sus objetivos no pueden ser más ambiciosos. Quieren crear factorías de medicamentos diminutas, androides capaces de reconocer células enfermas y aniquilarlas o construir una nueva generación de chips orgánicos que multiplicarían la potencia de los ordenadores y reducirían su tamaño.

se ha construido una araña de unos 15 nanómetros (cada nanómetro es una millonésima de milímetro) capaz de andar y girar respondiendo a las órdenes de sus creadores(figura 15.12). El otro grupo ha creado una especie de factoría de nano-máquinas capaces de fabricar hasta ocho compuestos químicos diferentes. El complejo ocupa una extensión de 10.000 nanómetros cuadrados. Ambos ingenios usan las cuatro letras del ADN para programar a sus autómatas.

A principios de la década de 1980, Seeman fue el primero en usar pequeños fragmentos de ADN para construir una red que atrapase ciertas moléculas y facilitase su obser-

Figura 15.12: Araña de 15 nano-metros



Fuente: www.elfuturoyaeshistoria.blogspot.com

vación en el microscopio. Había creado la nanotecnología de ADN, un campo que ha experimentado una rapidísima expansión desde entonces.

Milan Stojanovic, el creador de las arañas de ADN. El último ingenio de este investigador de la Universidad de Columbia acaba de pulverizar el récord de distancia logrado por un nano-robot. Si hace unos años Seeman dio la campanada con un robot capaz de dar hasta dos pasos, la araña de Stojanovic ha logrado dar 50, cubriendo una distancia de cien nanómetros. Pero lo que es más importante es que su araña fue justo donde su creador le había dicho que fuera.

El otro gran potencial es crear una nueva generación de ordenadores. Mientras los chips actuales están muy cerca de su límite de miniaturización, el ADN podría reducir drásticamente el tamaño de los circuitos del futuro.

Desde India a California, muchos otros equipos trabajan en la misma dirección. El campo es tan nuevo que nadie tiene muy claro hasta dónde puede llegar. Pero todos los expertos coinciden en que el potencial es inmenso.

El fundamento es sencillo. En lugar de usar un lenguaje binario de unos y ceros, los investigadores usan la guanina, citosina, timina y adenina que componen los cuatro ladrillos básicos de los genes. Eso lo convierte en un potente lenguaje con el que crear androides que sepan qué hacer en cada momento o circuitos capaces de reorganizarse y funcionar como una especie de google orgánico.

La mayoría de expertos en este campo es reticente a ponerle fecha a ese futuro de robots y circuitos orgánicos. Según Stojanovic, los primeros robots más elementales podrían

llegar en una década.

Los expertos que trabajan con nano-estructuras de ADN quieren crear una nueva generación de chips. Su receta es un 50 % de silicio, el compuesto usado normalmente, y un 50 % de ADN. Se les puede dar cualquier forma deseada y su funcionamiento químico podría emular el de un circuito. El problema es que, por ahora, los investigadores no han logrado fijar el ADN en silicio.

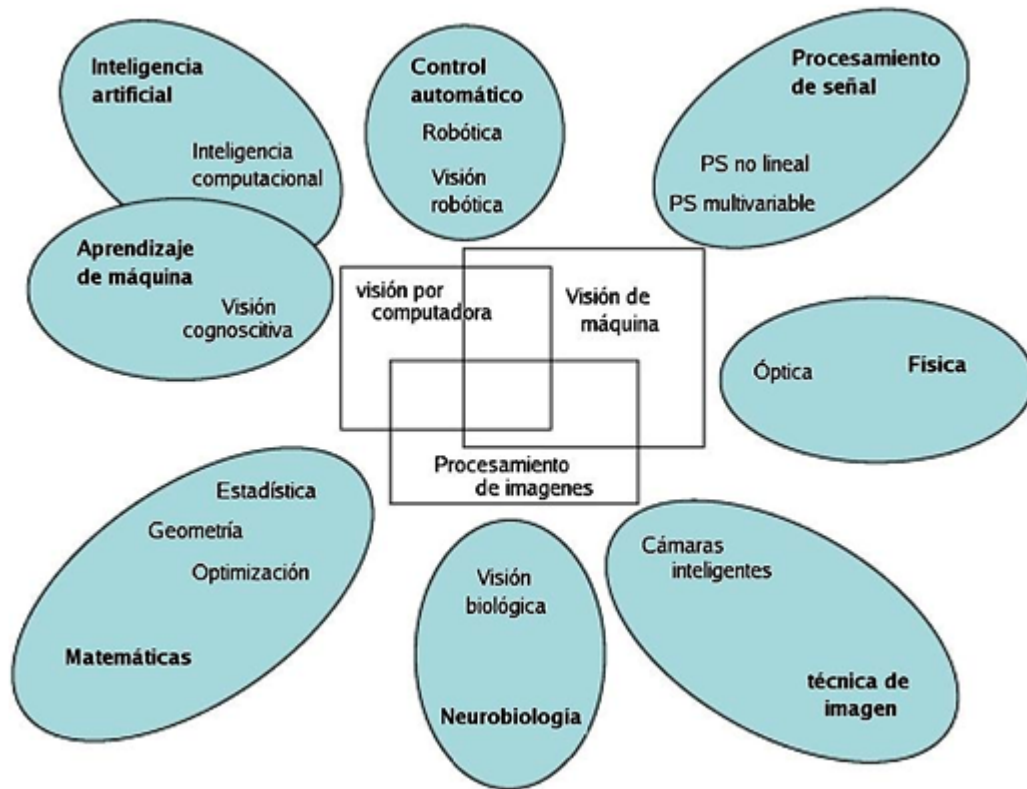
15.4. ROBÓTICA Y VISIÓN ARTIFICIAL

La visión industrial o Visión Artificial aplicada a la industria abarca la informática, la óptica, la ingeniería mecánica y la automatización industrial. A diferencia de la Visión Artificial académica, que se centra principalmente en máquinas basadas en el procesamiento de imágenes, las aplicaciones de Visión Artificial industrial integran sistemas de captura de imágenes digitales, dispositivos de entrada/salida y redes de ordenador para el control de equipos destinados a la fabricación, tales como brazos robóticos. Los sistemas de Visión Artificial se destinan a realizar inspecciones visuales que requieren alta velocidad, gran aumento, funcionamiento las 24 horas del día o la repetitividad de las medidas.

Esta se aplica en diferentes áreas tales como:

- Industrias de la Alimentación
- Industria de Automoción
- Electrónica
- Industria Farmacéutica
- Packaging

Figura 15.13: Esquema entre la visión artificial y otras áreas afines



Fuente: www.softtron.net

15.4.1. Aplicaciones de la visión artificial

Las aplicaciones de Visión Artificial se dividen en tres grandes categorías:

- Control de procesos
- Control de calidad
- Aplicaciones no industriales (por ejemplo, control del tráfico)

Las inspecciones realizadas por los seres humanos, a menudo no pueden cumplir con los requisitos de la industria moderna respecto a la velocidad de producción, calidad de producto y costes de producción. Los humanos se cansan, cometen errores y los criterios que se aplican durante las inspecciones son inevitablemente subjetivos. En algunos

casos, no es humanamente posible llevar a cabo las tareas de inspección debido a las condiciones ambientales. Las cámaras y los sistemas que componen un sistema de Visión Artificial, por el contrario, llevan a cabo las mediciones con una precisión constante y a un ritmo que es establecido por el propio proceso de producción. Estas ventajas han llevado a una creciente aceptación de la visión por industrias de todo el mundo.

Aplicaciones de esta tecnología en instalaciones alrededor del mundo incluyen:

- La inspección de la calidad óptica de las pantallas de los televisores y los ordenadores
- La inspección de la calidad de la pintura durante la fabricación de automóviles
- La inspección de los billetes de banco durante la impresión
- Comprobación de circuitos electrónicos
- Comprobación de que los envases farmacéuticos estén completos
- Inspección para asegurarse de que las botellas estén llenas
- Comprobación de defectos en azulejos en la industria de la cerámica

La Visión Artificial se refiere a la interpretación automática de imágenes de escenas reales con el fin de controlar o vigilar máquinas o procesos industriales. Las imágenes pueden ser de luz visible, rayos X o infrarroja, y puede incluso derivarse de información ultrasónica.

15.4.2. Componentes de un sistema de visión artificial

Un moderno sistema de visión industrial consta de:

- **Un sistema de iluminación.**

Una buena iluminación es especialmente importante para la toma de imágenes de los productos en una línea rápida de producción, aunque algunas aplicaciones pueden utilizar la luz ambiente.

- **La lente de la cámara.**

La correcta selección de lentes es importante para alcanzar una solución óptima.

- **Una o más cámaras para adquirir las imágenes.** Las cámaras pueden ser analógicas, pero el precio de las cámaras digitales está disminuyendo, de modo que éstas se están usando más a menudo.

- **Un dispositivo de interfaz para transferir las imágenes al ordenador.**

- **Un procesador de imagen, ordenador o cámara inteligente.**

Una opción es utilizar cámaras inteligentes que integran el procesamiento de imágenes dentro de la propia cámara, evitando la necesidad de transferir imágenes a un ordenador externo. La velocidad de proceso de estas cámaras es inferior a la de un ordenador y existen aplicaciones en las que éstas no son adecuadas.

- **Una interfaz para notificar el resultado del análisis a un operador.**

Se puede notificar de este resultado mediante una señal electrónica que opera un mecanismo de rechazo.

La imagen de entrada -una matriz bidimensional de niveles energéticos (por ejemplo, luz)- se divide en elementos de imagen, conocidos como píxeles. Estos forman filas y columnas que abarcan toda la zona de la imagen y representan los niveles de gris en una imagen monocromática o la codificación de color en una imagen en color. Un píxel no puede ser subdividido en regiones de menor nivel de gris o color. Este proceso es un tipo de digitalización espacial. Para cada píxel, la información del nivel de energía

también debe ser digitalizada, es decir, los niveles analógicos (variable continua) producidos por la cámara deben ser representados por un número finito de pasos. En muchas aplicaciones es suficiente digitalizar una imagen monocroma con 8 bits por píxel, lo que equivale a 256 pasos, para representar el nivel de gris de cada píxel. En aplicaciones más exigentes puede ser necesario digitalizar a 14 bits (o 16384 niveles). Las imágenes en color son más complejas y pueden ser representados en diferentes formatos. Las imágenes en color normalmente contienen tres veces más información que una imagen monocromática.

Algunos sistemas de visión no utilizan una cámara matricial, en su lugar se usa una cámara lineal que produce una sola línea o fila de píxeles. La imagen bidimensional se genera a medida que el objeto pasa bajo la cámara lineal, aprovechando su movimiento, normalmente generado por una cinta transportadora. Uniendo las distintas filas de píxeles obtenidas a diferentes intervalos de paso, se obtiene una imagen bidimensional

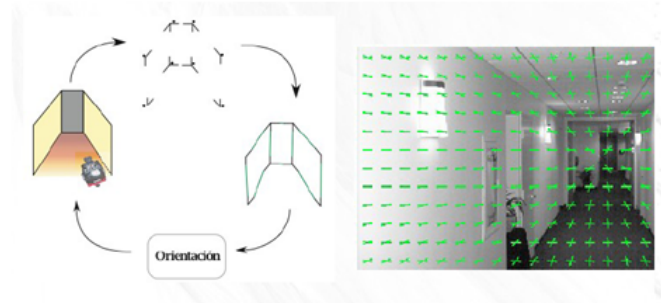
15.4.3. Función de la visión por computadora

Los pasos básicos son la segmentación y el análisis, que son esencialmente algoritmos de software y funciones que se ejecutan en el procesador.

- **Segmentación**

Se trata de decidir qué partes de la imagen necesitan interpretación o análisis y cuáles no. A menudo es posible y necesario refinar la segmentación. Por ejemplo, si la aplicación debe encontrar arañazos o grietas en un vidrio, la primera fase de segmentación suele encontrar elementos que son las propias grietas o arañazos además de suciedad y polvo. A menudo se perfecciona este resultado para eliminar de la imagen la suciedad y el polvo de los elementos a analizar.

Figura 15.14: Segmentación de un espacio para la orientación adecuada de un robot



Fuente: Miguel Cazorla. Robótica y visión artificial. Grupo de visión robotica. universidad de alicante. 2010

■ Análisis

Una vez que la imagen ha sido satisfactoriamente segmentada, el procesador puede hacer una serie de pruebas y mediciones en los elementos de interés que aparecen en la escena. Existen multitud de algoritmos que nos ayudan a obtener los resultados deseados. Entre ellos, cabe destacar sus funcionalidades:

- Detección de formas.
- Análisis geométrico.
- Comparación con patrones.
- Medición de objetos.
- Detección de objetos difusos.

Estos algoritmos, usados estratégicamente, nos permiten decidir si una pieza se ha fabricado correctamente o no, guiar un robot hacia un objeto concreto o reajustar la maquinaria de producción automáticamente.

15.4.4. Aplicaciones de la visión por computadora

Con el incremento de potencia de los microprocesadores, las aplicaciones que pueden resolverse con éxito utilizando sistemas de visión están creciendo rápidamente. Una aplicación puede exigir una o más funciones de procesamiento de imágenes que, cuando se combinan, crean una solución. La gama de detección es muy amplia e incluye:

- **Forma o apariencia. Control de la conformidad:**

Los sistemas actuales, por lo general, comienzan con una operación de medición bidimensional para establecer el desplazamiento necesario para que el objeto se encuentre en una posición ideal. Posteriormente, se llevan a cabo las operaciones de comparación con un objeto patrón o la caracterización geométrica de su forma. De esta manera, se puede decidir si el objeto analizado cumple o no con los requisitos preestablecidos.

- **Detección de defectos. Elementos discretos:**

La detección de defectos puede ser considerada como un caso especial de control de la conformidad, en el que los objetos no ofrecen formas específicas caracterizables. Como ejemplos, citaremos la inspección de baldosas cerámicas en la etapa previa al esmaltado para detectar defectos en la superficie como rugosidades, o el uso de infrarrojos para la inspección de defectos de botellas de vidrio.

- **Detección de defectos. Tejidos o laminados:**

La característica de muchos sistemas de este tipo es que se debe examinar grandes áreas a gran velocidad, en busca de defectos relativamente pequeños. El material producido en bobinas incluye la chapa de acero, papel, películas fotográficas, vidrio, hoja de plástico y los textiles. Algunos de estos sistemas utilizan el escaneado láser en lugar de cámaras lineales para formar la imagen.

- **Control por colores:**

La inspección por color se utiliza ampliamente en la industria farmacéutica para confirmar que la tableta o píldora de color se ha colocado en el embalaje correcto.

- **Medidas unidimensionales o bidimensionales:**

Las mediciones bidimensionales se pueden realizar mediante la superposición de calibres ópticos sobre la imagen del producto. La medición por este método es muy rápida porque no hay movimiento mecánico, y el posicionamiento exacto del objeto a medir no es crítico (el sistema puede determinar el desplazamiento X e Y del objeto y el grado de rotación).

Algunos sistemas ofrecen interpolación sub-píxel que, en condiciones adecuadas, hace que el sistema sea capaz de medir y, en particular, detectar cambios o diferencias en la medición, de milésimas en lugar de las centésimas que ofrecen otros métodos de metrología. El número de píxeles de la imagen se puede aumentar mediante el uso de cámaras de muy alta resolución y obtener así mediciones aún más precisas.

- **Luz estructurada y otras técnicas de triangulación:**

Si una banda fina de luz se dirige a una superficie tridimensional y se observa con una cámara en un ángulo diferente al del dispositivo de iluminación, la forma aparente de la banda puede ser usada para inferir la forma de la superficie expuesta a lo largo de la longitud de la banda. Mediante la exploración de la banda a través de la superficie, se puede generar un mapa tridimensional del objeto observado. A menudo es conveniente usar un láser como fuente de luz, dado que puede ser fácilmente refractado para formar un plano de luz.

- **Técnicas tridimensionales:**

También se puede obtener información tridimensional mediante el uso de visión estereoscópica automatizada.

- **Reconocimiento de caracteres:**

El reconocimiento de caracteres se puede basar en técnicas de correlación simple

(comparación), sin conocimientos especializados de la forma en que los caracteres individuales se forman, o se pueden usar algoritmos más avanzados de inteligencia artificial.

Los sistemas de visión también pueden ser usados para leer códigos de barras con un mayor grado de confianza que un escáner láser. Incluso si una gran parte del código de barras está oculto por suciedad, un sistema de visión, por lo general, puede leerlo, mientras que un lector de códigos de barras convencional no.

Además de códigos de barras, los sistemas de visión también se usan para leer códigos matriciales de dos dimensiones, donde los códigos pueden contener mucha más información que un código de barras unidimensional.

- **Reconocimiento de piezas o componentes del producto:**

El reconocimiento de piezas o componentes puede ser usado para identificar qué partes deben ser sometidas a cada proceso. Por ejemplo, un sistema de visión puede discernir entre las diferentes piezas de un elemento e instruir a un robot para el correcto montaje del elemento.

- **Guiado predeterminado:**

El guiado predeterminado se caracteriza por una situación en la que una cámara acimutal toma una instantánea de la escena y el sistema de visión dirige un robot para que recoja o deje un objeto en una posición concreta. A continuación, el robot obra a ciegas. Una aplicación típica incluye tareas de paletización de objetos pesados, tales como bloques de motor y cigüeñales, pero también puede incluir trabajos mucho más ligeros, tales como el embalaje de chocolates.

- **Guiado continuo:**

El guiado continuo implica una cámara montada sobre el brazo o la mano del robot y el camino del robot está continuamente corregido por el sistema de visión. Una aplicación común es el guiado de la soldadura por arco, pero la técnica puede utilizarse también para controlar el camino en la aplicación de selladoras o

pegamentos por robots.

15.4.5. Una Invencción en Visión Artificial

El primer robot con visión artificial para recoger la fresa automáticamente se ha presentado en Huelva (España). La empresa onubense Agrobot ha probado hoy ante posibles clientes su cosechadora, producto del trabajo de un grupo de ingenieros desde hace casi un año.

Figura 15.15: Demostración de un robot con 40 brazos y visión artificial para recoger fresas en el centro tecnológico Adesva, en Lepe (Huelva).



Fuente: www.elpais.com

Figura 15.16: Así ve el robot cosechador de fresas las frutas, distinguiendo las maduras.



Fuente: www.elpais.com

15.5. SISTEMAS DE TELE-OPERACIÓN ROBÓTICA.

Los robots tele-operados son aquellos controlados por un usuario a distancia desde una estación remota. Dada su gran utilidad, se han empleado en diversos campos. Este tipo de manejo supone una ventaja desde el punto de vista de la protección y seguridad del usuario, ya que en caso de realizar trabajos en ambientes inseguros, inestables con sustancias potencialmente peligrosas, como químicos o explosivos, no se arriesga su integridad física.

En el desarrollo de robots tele-operados se involucra la electrónica, las comunicaciones, el control, la inteligencia artificial (IA) y la visión por computador.

El uso de IA se puede apreciar en las decisiones que debe tomar el robot por ejemplo: evitar obstáculos al ir de un sitio a otro, eligiendo el camino más corto o cuando se le enseña a reaccionar frente a ciertos estímulos y responder acertadamente a estímulos nuevos como en el caso de las redes neuronales. La visión por computador es utilizada cuando las tareas del robot involucran el procesamiento de imágenes provenientes de cámaras de video que pueden estar ubicada en el mismo. Tanto la IA como la visión por computador pueden simplificar significativamente el trabajo del operador.

15.5.1. Estructura de un sistema tele-operado:

Un sistema tele-operado se compone principalmente de una estación de tele-operación, un sistema de comunicación y esclavo, el esclavo puede ser un manipulador o un robot móvil equipado con un manipulador ubicado en un entorno remoto como el robot Andros Wolverine de la empresa Remotec que se ilustra en la figura 15.17. La estación de tele-operación permite controlar al esclavo a distancia por medio del sistema de comunicación, el cual permite transmitir las señales de control hacia el esclavo y, a su vez, recibir señales de información sobre el estado de éste en la estación de tele-operación a

través de un canal de comunicación que puede ser una red de computadores, un enlace de radio frecuencia o microondas.

Una estación de tele-operación puede estar compuesta por un computador y, en este Figura 15.17: Componentes de un sistema tele-operado (a) Estación de tele-operación, (b) Robot (esclavo)



Fuente: Robotic Mobile Manipulation. Experiments at the U.S. Army Maneuver Support Center. SANDIA NATIONAL LABORATORIES. 2002.

caso, se utilizan los dispositivos de entrada y de salida para interactuar a distancia. Los dispositivos de entrada pueden ser el teclado y una palanca de control y los de salida, pueden ser un monitor y los parlantes.

El software que se encuentra en el computador tiene una interfaz gráfica de usuario que permite interactuar con el robot a distancia.

El esclavo es el dispositivo controlado a distancia, puede ser un móvil, un robot o un brazo mecánico.

Una interfaz para tele-operación de robots maneja bastante información en tiempo real, es decir información que es necesario procesar bajo ciertas restricciones de tiempo para tomar alguna acción. Para obtener esta información los robots móviles están provistos de una gran cantidad de sensores los cuales se encargan de detectar magnitudes físicas, estos pueden ser de proximidad, posición, inclinación y posiblemente de cámaras de video, por tal razón en la construcción del software se debe tener en cuenta la optimi-

zación del tiempo en cada tarea.

Además la interfaz hombre máquina debe estar diseñada de tal manera que la información sea presentada adecuadamente de tal manera que se facilite tanto la ubicación espacial como el acceso del usuario a la información esencial para así evitar cuellos de botella.

El esclavo se encuentra en un entorno remoto y se controla a distancia desde una estación de tele-operación. La persona que lo controla obtiene información del ambiente en el que se encuentra el robot, esta información es obtenida mediante sensores, permitiendo al usuario interactuar con el medio ambiente a distancia dando la sensación de estar físicamente en otro lugar (tele-presencia).

15.5.2. Funcionamiento de un robot tele-operado

El robot (esclavo) está controlado por medio de un programa interno con el objeto de realizar tareas propias y tener mayor autonomía. Este programa está ubicado en la memoria de un sistema de procesamiento de datos sea éste un computador, un DSP (procesador digital de señales), un micro-procesador o un micro-controlador. Los micro-controladores son pequeños computadores provistos de diversas prestaciones, existe una gran gama lo cual permite adaptarlos en diferentes aplicaciones, donde su utilización da lugar a estructuras altamente funcionales.

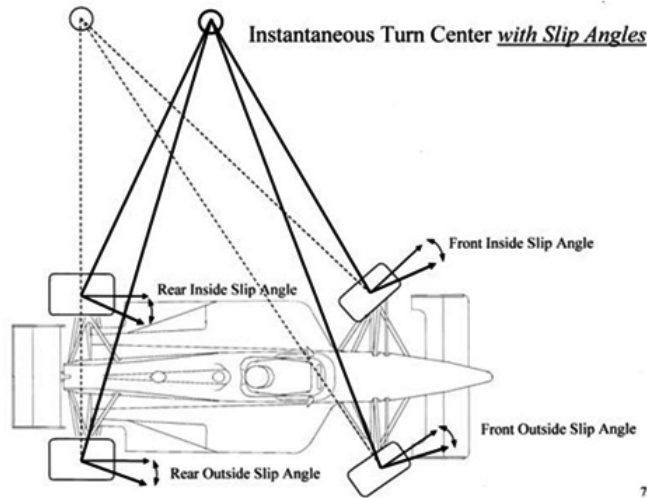
▪ Tipos de locomoción

Los robots móviles pueden desplazarse por medio de diversos sistemas de locomoción tales como ruedas, orugas, patas o una mezcla de los anteriores bajo diferentes configuraciones como:

- *Ackerman*: Similar al sistema de dirección de cualquier automóvil de cuatro ruedas. Normalmente los vehículos robóticos desarrollados con esta configu-

ración resultan de la modificación o adaptación de vehículos convencionales.(figura 15.18)

Figura 15.18: Muestra de un sistema ackerman

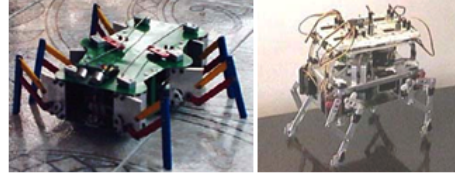


Fuente: www.smithees-racetech.com.au

- *Triciclo clásico:* Está compuesto de tres ruedas, la delantera sirve para proveer tracción y dirección, el eje trasero tiene acopladas dos ruedas paralelas que se mueven libremente. Tiene problemas de estabilidad en terrenos difíciles debido a que tiene pocos puntos de apoyo
- *Pistas de deslizamiento:* Son vehículos tipo oruga en los que tanto la tracción como el direccionamiento se consigue mediante bandas de tracción o pistas de deslizamiento este tiene desventajas como una reducción de velocidad en comparación al uso de ruedas y un gasto mayor de energía ya que en la rotación existe mucho rozamiento entre el suelo y las pistas de deslizamiento una solución a este problema es buscar que el polígono de sustentación sea lo más pequeño posible procurando no perder estabilidad. Un ejemplo de este tipo de configuración es el robot RMTO o el Detek.
- *Locomoción mediante patas:* Tienen la ventaja de permitir locomoción en terrenos difíciles evitar obstáculos y omni-direccionalidad, pero su desventaja

es requerir un consumo de energía mayor que con ruedas. Además que el problema de planificación y control es mas complejo que un robot de ruedas u orugas. En la figura 15.19 se muestra un robot hexápodo, y un cuadrúpedo. También existen otros tipos de configuraciones como por ejemplo el uso

Figura 15.19: Robots con sistemas de locomoción por patas -Hexápodo. - Cuadrúpedo.



Fuente: Pérez A. Diseño y construcción de un robot móvil hexápodo. Universidad de los Andes. 2003; Reyes C. Diseño y construcción de un prototipo de robot caminador cuadrúpedo. Universidad Nacional. 2003.

ruedas omnidireccionales o la mezcla de patas con ruedas como el caso del Sojourner Rover (figura 15.21). Estas configuraciones tienen la intención de explorar diferentes clases de terrenos y proveer mayor funcionalidad. La elección de una configuración específica depende de características del proyecto a realizar tales como el tipo de terreno, la velocidad y el nivel de obstáculos que se encuentren.

■ **Sensores para robots móviles :**

Los robots deben estar provistos de diversos tipos de sensores los cuales cumplen tareas como la detección de proximidad de obstáculos y medición de posición, velocidad, aceleración e inclinación. Para la detección de obstáculos se usan principalmente foto celdas, fotodiodos, sensores de ultrasonido, sensores infrarrojos y cámaras.

Cuando se requiere la medición de posición y velocidad son usados los encoders (codificadores) los cuales están compuestos de un par fotodiodo y foto-celda que

permiten registrar posición y velocidad de partes móviles a los cuales se le acopla un disco.

La realimentación de fuerzas es una técnica útil para el control de manipuladores y robots móviles, ya que la información proveniente de los sensores puede ser convertida en fuerzas aplicadas en los dispositivos de manipulación de la interfaz de tele-operación es decir el usuario puede sentir las colisiones que se presenten en el manejo del robot .

Para esto existen sensores de fuerza y presión de tipo piezo-eléctrico, resistores de fuerza- sensado o medidores de fuerza.

- **Visión:**

Dentro de los sensores que pueden colocarse en un robot móvil se encuentran las cámaras de video, las cuales además de permitir el control a distancia (visión remota) también sirven como fuente de información para la toma de decisiones automáticas, esto se realiza por medio de procesamiento de imágenes. Las operaciones principales que realiza un sistema de procesamiento de imágenes para proveer mecanismos de visión a un robot móvil son: el promediado, la segmentación de bordes, el análisis de regiones y la detección de formas.

En sistemas más sofisticados se hace uso sistemas de visión estereoscópica ubicados en el robot y cascos de realidad virtual para el operador, en los cuales graficas por computador se combinan con las imágenes provenientes de las cámaras el resultado es visualizada en un monitor o en el casco, lo cual se conoce como realidad aumentada.

Dentro del sistema de procesamiento de datos pueden existir algoritmos que permitan simplificar el trabajo del operador, estos pueden ser algoritmos de planeación de trayectorias con el objeto de que el robot realice tareas simples como ir de una posición a otra evitando obstáculos, utilizando la información de los sensores, y la de posición que puede ser obtenida mediante el uso de brújulas electrónicas,

triangulación con sensores infrarrojos o un GPS.

Existen métodos para hacer la evasión de obstáculos en tiempo real como por ejemplo el campo de fuerza virtual y el histograma de vector de campo, otra ventaja del uso de la IA es dotar al robot de mayor autonomía, ya que es posible que el usuario no tenga el tiempo suficiente, para evitar los obstáculos que se presenten en el camino ya sea a causa de demora en las comunicaciones o por el hecho de estar realizando otras al tiempo.

15.5.3. Clasificación de sistemas tele-operados

La robótica ha avanzado con rapidez y se han desarrollado diversos tipos de robots móviles. Algunos de ellos han sido robots tele-operados y otros robots dados de cierto grado de autonomía. Los robots tele-operados pueden clasificarse de la siguiente forma:

- **Vehículos terrestres no tripulados:**

Los vehículos terrestres no tripulados se emplean principalmente en operaciones militares de reconocimiento de terreno e incursión en zonas peligrosas. El desarrollo de estos proyectos comúnmente es financiado por el departamento de defensa de los países desarrollados.

Un ejemplo, es el vehículo teleoperado USMC (US Marine Corp) desarrollado por la compañía Spawar Systems Center (SSC) de San Diego como parte del programa Ground Air TeleRobotic Systems (GATERS) bajo la dirección de la Unmanned Ground Vehicle Joint Program Office (UGV/JPO) ver figura 15.20. Compuesto principalmente de tres módulos: movilidad, vigilancia y armas y provisto de cámaras de video y micrófonos para lograr tele-presencia.

- **Robots tele-operados de escala pequeña**

Figura 15.20: Vehículo tele-operad USMC



Fuente: Fernández J. A. Manipulador virtual tele-operado. Instituto Militar de Ingeniería. Río de Janeiro. 2002.

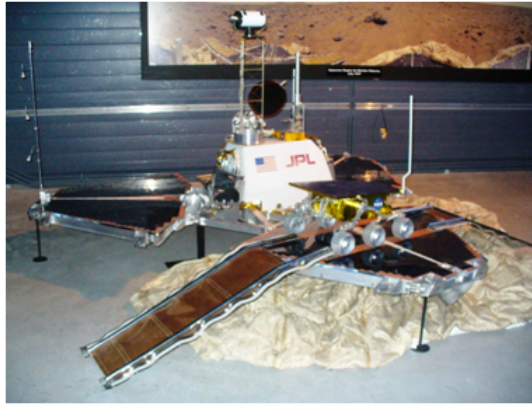
Este tipo de robot constituye un resultado de investigaciones realizadas en universidades y centros de investigación y desarrollo. Los robots tele-operados de pequeña escala se desarrollan con propósitos científicos, es el caso de los robots enviados en misiones espaciales, como el Sojourner Rover ver figura 15.21.

El Sojourner Rover es un pequeño vehículo robotizado de seis ruedas, construido por el Jet Propulsion Laboratory de la NASA, diseñado para ser enviado a Marte dentro del Pathfinder, con capacidad de transmitir imágenes y realizar experimentos en el suelo de Marte. El sistema de alimentación del Rover está compuesto de un arreglo de paneles solares, baterías y una electrónica de potencia para su adecuado manejo y distribución, cuenta con la capacidad de moverse en terrenos difíciles y rocosos, ya que posee seis ruedas dotadas de 3 grados de libertad que le permiten adaptarse a terrenos difíciles.

15.5.4. Aplicaciones

Los robots tele-operados pueden encontrarse en la industria nuclear (mantenimiento de reactores), química (manejo a distancia de sustancias peligrosas o tóxicas), militar

Figura 15.21: Robot Sojourner Rover



Fuente: www.rst.gsfc.nasa.gov

(detección, manipulación y desmantelamiento de cargas explosivas), desminado humanitario, espacial (exploraciones realizadas en la luna y en marte, también en transbordadores espaciales), minera (excavaciones, manejo de cargas explosivas en minas y túneles), en el sector de seguridad, mantenimiento y rescate (inspección de sistemas de alcantarillado y tuberías, reconocimiento de zonas de desastres), telecirugía , entre muchas otras áreas.

Una aplicación son los robots para la utilización en desactivación de explosivos:

Estos robots son empleados por la policía o las empresas de seguridad en situaciones

Figura 15.22: El ANDROS F6A



Fuente: www.militaryfactory.com

en las que se desconfía de paquetes y en la inspección de vehículos sospechosos.

El Wolverine (figura 15.17) es un modelo fabricado por Sandia National Laboratories en colaboración con la empresa Remotec, al que se le introdujo un software especializado desarrollado por Sandia llamado SMART (Sandia Modular Architecture for Robotics and Tele-operation). El programa automatiza muchos de los movimientos del robot, dejando al operador el control del comportamiento”de la máquina

Figura 15.23: Robot tele-operado para manejo de líneas de alta tensión



Fuente: www.kalipedia.com

15.5.5. Algunos robots desarrollados en Colombia

En nuestro país existen varios grupos de investigación dedicados al desarrollo de robots móviles, manipuladores industriales y sistemas inteligentes dentro de los cuales se pueden encontrar los siguientes robots tele-operados, puede que no sean los únicos que se han desarrollado en el país, pero son los más reconocidos:

- **RMTO I**

En la Universidad Nacional se tiene cuenta del desarrollo del robot móvil teleoperado I (RMTO I), mostrado en la figura ??

Este robot es controlado a distancia desde una estación de tele-operación mediante un enlace de radio frecuencia, la imagen proveniente de una cámara ubicada en el robot es transmitida de manera inalámbrica a la estación de tele-operación. En la estación de tele-operación se encuentra un software desarrollado en lenguaje

Figura 15.24: Robot móvil teleoperado (RMTO I)



Fuente: Cerón A. Desarrollo de un Robot Móvil tele-operado. 2005.

C++ que permite observar la visión del robot y enviar comandos al robot. La interfaz gráfica del software desarrollada para el manejo del robot está compuesta de dos ventanas, una para el despliegue del video proveniente de la cámara del robot y la otra para seleccionar los comandos de control. Una característica importante de este software es permitir el manejo del móvil usando una palanca de juegos (joystick o gamepad), el ratón o el teclado, en la figura 15.25 se puede observar la interfaz gráfica de usuario del mismo:

Figura 15.25: Software para la tel-operación del RMTO I



Fuente: Cerón A. Desarrollo de un Robot Móvil tele-operado. 2005.

- **DETEK, URSULA y R.E.T.O.**

DETEK es un robot de exploración de ambientes exteriores para la detección de

objetos metálicos. Este robot fue desarrollado en la Universidad Javeriana, está provisto de pistas de deslizamiento y un detector de metales, se ubica por medio de triangulación con sensores infrarrojos.

El URSULA también desarrollado en la Universidad Javeriana, utiliza un sistema de locomoción compuesto de 6 ruedas, un detector de metales, esta provisto de una interfaz de teleoperación que permite observar la información proveniente de los sensores, excepto el de la cámara de video.

Estos robots han sido desarrollados para atacar el problema del desminado humanitario pero tienen la desventaja de no ser aplicables en terrenos como el colombiano ya que la ubicación de minas puede ser inaccesible para el robot y existen muchos tipos de terrenos en los cuales un robot de estas características no puede navegar.

Es posible mejorar navegación en algunos terrenos no estructurados, mediante el uso de un sistema de locomoción compuesto por ruedas y patas como el que puede observarse en el robot móvil para navegación autónoma en terrenos poco estructurados (R.E.T.O.) desarrollado en la Universidad Militar "Nueva Granada", este robot está compuesto de ruedas provistas de tracción independiente y articulaciones que permiten modificar la altura de las ruedas para evadir algunos tipos de obstáculos.

Otra alternativa es el uso de robots ápodos (también conocidos como snake robots, robots hiper-redundantes o robots fuertemente articulados) en los cuales el sistema de locomoción imita el movimiento de una serpiente. Estos se componen de múltiples articulaciones, esta alternativa se encuentra en desarrollo.

15.6. LA BIO-ROBOTICA.

La bio-robótica es la ciencia dedicadas al desarrollo de medios que presentan características de sistemas biológicos o que pueden interactuar con los mismos gracias a una interfaz adecuada. Cubre aspectos tan diversos como el desarrollo de prótesis humanas o el desarrollo de serpientes robotizadas que imitan el comportamiento de una serpiente real.

Existen otros expertos en bio-robótica que han desarrollado estudios y proyectos vinculados con esta área de creciente interés, algunas líneas de investigación intentan combinar el empleo de células madre con los dispositivos robotizados tradicionales. Con este tipo de sistemas se podrían desarrollar prótesis para humanos con un nulo nivel de rechazo.

15.6.1. Algunas invenciones bio-robóticas:

- **Proyecto Sena y fondo emprender, robot (DRC):**

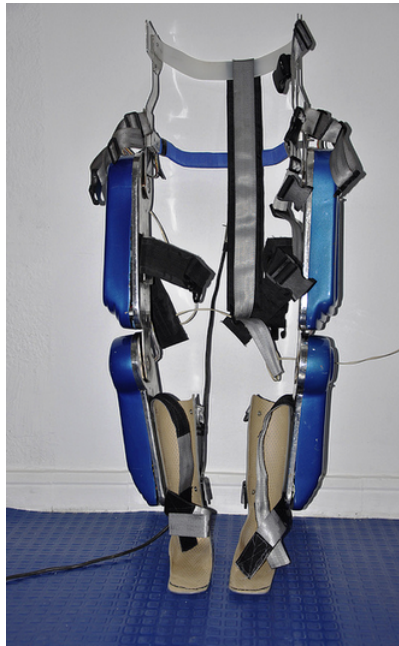
BIROBOTICA APLICADA S.A.S es una alianza que nació hace un año con la participación de Luzcely Nieto Acosta Administradora de Empresas el Doctor Crisanto torrado fisioterapeuta. Olger Navarro Jaramillo, ingeniero electrónico y Gerardo Caballero Ingeniero mecánico; con el fin de desarrollar equipos médicos que ayudaran a la recuperación de pacientes con problemas de columna vertebral, especialmente aquellos con discapacidad parapléjica.

Bajo este marco de expectativas se inicio el desarrollo de un Dispositivo Robótico Para Caminar (DRC), es un dispositivo robótico nuevo, creado para mejorar las habilidades de marchar en pacientes parapléjicos en su proceso de rehabilitación.

- **LSTAT / Serpiente Robot**

El LSTAT (Soporte Vital para el Trauma y Transporte) sistema incorpora muchas

Figura 15.26: Dispositivo Robótico Para Caminar (DRC)



Fuente: [www. biorobotica-aplicada.com](http://www.biorobotica-aplicada.com)

de las funciones de una unidad de cuidados intensivos, pero se encuentra totalmente dentro de una camilla. Alberga un desfibrilador, un suministro de oxígeno, un ventilador, y diversas formas de monitorización fisiológica. Fue construido y desarrollado por Integrated Medical Systems, Inc., y está actualmente en uso, tanto en Irak y Afganistán.(figura 15.27)

■ Robots cirujanos

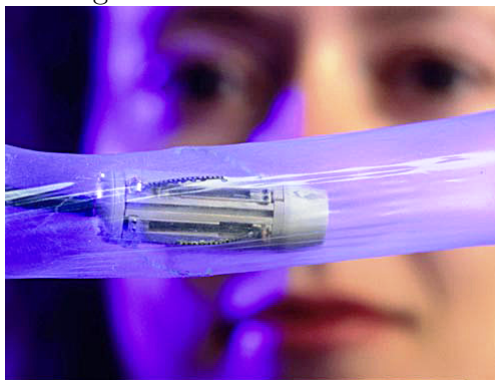
- Robot-cámara provisto de "patas" que le permiten desplazarse por el tracto digestivo.
- Robot para toma de muestras de sangre. Desarrollado por Brian Davies y Alex Zivanovic.
- Da Vinci: Una máquina con cuatro brazos largos y asombrosamente ágiles, manejados por un médico a través de controles ubicados en un módulo den-

Figura 15.27: LSTAT / Serpiente Robot



Fuente: www.biorobotics.org

Figura 15.28: Robot-cámara

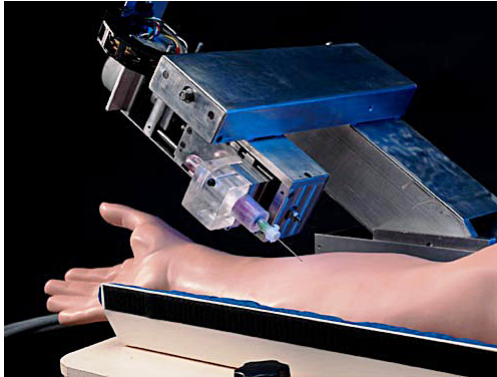


Fuente: www.planetasapiens.com

tro de la misma sala de cirugía- que proyecta las imágenes del organismo en tercera dimensión y hace que la intervención sea más rápida y el tiempo de recuperación del paciente mucho más corto.

En el mundo sólo existen 2.000 robots Da Vinci y en Latinoamérica hay únicamente cinco: en Brasil, Chile, México, Argentina y Venezuela. Su costo es extremadamente alto, por eso es un gran logro que una clínica colombiana haya podido adquirirlo. Por el momento, sólo cuatro cirujanos de la Marly están capacitados para realizar intervenciones con la asistencia de esta máquina, que recibe su nombre en honor a Leonardo da Vinci, quien en 1495

Figura 15.29: Robot para toma de muestras



Fuente: www.planetasapiens.com

diseñó los primeros planos de un robot humanoide.(figura 15.30)

Figura 15.30: Robot cirujano Da Vinci



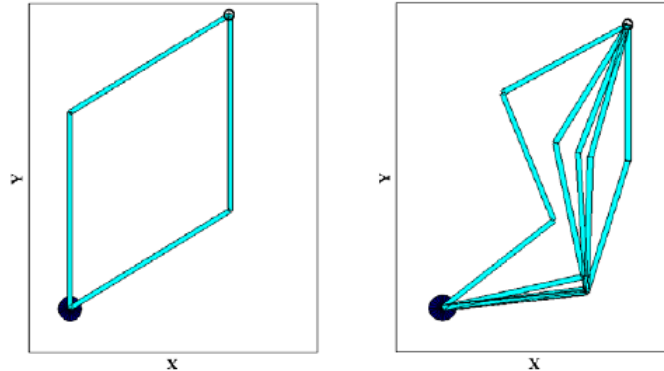
Fuente: www.elespectador.com

15.7. ROBOTS REDUNDANTES

Son aquellos utilizados para trabajar en lugares de difícil acceso es necesario añadir grados de libertad a la estructura. Por ello se utilizan manipuladores redundantes con mas de seis grados de libertad. Este tipo de robots presentan complejos problemas de control.

El problema fundamental en robots redundantes es encontrar la mejor solución a la cinemática inversa, que permita no sólo el cumplimiento de la tarea encomendada, sino también la realización de una tarea adicional.

Figura 15.31: Movimientos posibles que podría realizar un manipulador redundante.



Fuente: M.C. Angel Israel Soto Marrufo. Modelado y Control de un Robot Manipulador Planar Redundante de Transmisión Directa. 2009

15.7.1. Algunas invenciones de robots redundantes:

- **Los robots androides:** imitan tanto la apariencia humana, como algunos aspectos de su conducta de manera autónoma. La construcción de un robot que imite convincentemente aunque sea una parte ínfima de la libertad de gestos y movimiento humanos, es una tarea de una enorme complejidad técnica. De hecho, todavía están destinados al estudio y a la mejora.
- **Los robots tipo serpientes:** Como su nombre indica, estos robots tienen múltiples accionada articulaciones así Multiple grados de libertad. Esto les da una capacidad superior a la flexión, el alcance y enfoque de un gran volumen en su espacio de trabajo con el número de Infinte de configuraciones. Esta redundancia

Figura 15.32: Robot androide fabricado por Honda.



Fuente: www.ciencialultima.blogspot.com

en las configuraciones les da el nombre técnico: hiper robots redundantes. idealmente, el dibujo de la serpiente futuro constará de tres etapas grado de libertad - balance, cabeceo, y la extensión. Souryu o dragón azul, es un robot a control remoto diseñado por Tokyo Institute of profesor Shigeo Hirose de la tecnología. La Souryu de serpiente se arrastra usando seis pistas, dos en cada lado de sus tres partes del cuerpo. está equipado con una cámara y el micrófono para buscar víctimas y puede doblarse en las articulaciones o la vuelta de lado para maniobrar a través de los escombros.

- **Los robots tipo araña:** C-Bot Robot, una araña robot capaz de trepar por muros y ventanas sin utilizar ningún tipo de adherente artificial, en cualquier dirección y sin importar la inclinación... ¡¡podría trepar incluso por el techo. La tecnología usada para crear elC-Bot Robot está inspirada, como suele ocurrir, en la naturaleza... concretamente en las patas de las lagartijas y algunos pequeños reptiles. Estos animales, aunque a primera vista no lo parezca, tienen en la base de sus patas una serie de filamentos diminutos casi invisibles similares a pelos... y ésto es lo que les permite caminar en vertical en superficies donde no pueden

Figura 15.33: Robot tipo serpiente.



Fuente: www.codeperu.com

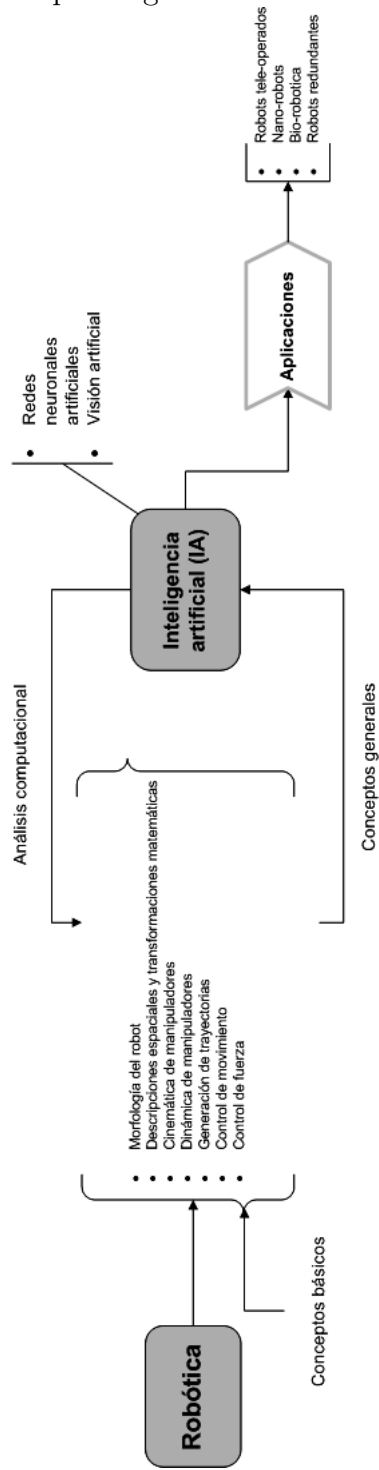
agarrarse, como por ejemplo el cristal. C-Bot dispone en sus patas de unas terminaciones similares que le permiten trepar por casi cualquier superficie y con cualquier inclinación. Además su simetría le da la habilidad de poder caminar en una dirección y después en otra sin necesidad de girar constantemente.

Figura 15.34: Robot tipo araña.



Fuente: www.inventos.teoriza.net

Figura 15.35: Esquema general de la robótica moderna



Fuente: Autores de proyecto

CONCLUSIONES

Como resultado del seminario de investigación en robótica industrial se concluye lo siguiente:

Con respecto a la formación de los integrantes

- El seminario de investigación como modalidad de proyecto de grado proporciona a los integrantes una experiencia de aprendizaje en grupo basada en la investigación, análisis, discusión y posterior retroalimentación durante el ejercicio, desarrollando actitudes personales y técnicas.
- Permitted fortalecer habilidades para el trabajo en equipo, manteniendo una relación de interés y compromiso con el conocimiento, sin jerarquías, en un clima de participación activa, basado en el respeto y el apoyo mutuo.
- Se fomentó el aprendizaje como una experiencia grupal, en la que los cada uno de los integrantes aportó sus conocimientos, adquiridos a través de su trabajo investigativo, reduciendo el tiempo de aprendizaje para los demás miembros del grupo.
- Se logró estructurar los diferentes tópicos estudiados, lo cual se refleja en el orden, calidad y comprensión del material síntesis (presentación de Power Point y documentos).
- El proceso de aprendizaje mejora notablemente cuando se aplican los conocimientos adquiridos en un campo real o simulado.

Con respecto a aspectos técnicos:

- El análisis socioeconómico de la industria de los robots, presenta un panorama de gran desarrollo en cuanto a la producción en masa y en cuanto a los países que acogen estos sistemas. También se muestra a futuro como esta ciencia abarcará gran parte de la industria puesto que su costo- utilidad hace que sean más rentable, tengan calidad de producción y ahorro en mano de obra.

- Del estudio de las diferentes organizaciones mundiales y locales se concluyó que no existe una entidad organizada (Organización, asociación sociedad, etc.) colombiana que propenda por el desarrollo de la robótica y estimule su implementación en la industria nacional.
- El estudio de la morfología del robot permitió conocer sus elementos y su correspondencia con el espacio de trabajo, concediendo los conocimientos necesarios para entablar la definición de la cinemática del manipulador.
- El conocimiento previo de las herramientas matemáticas de descripción y transformación espacial es de vital importancia para el estudio de la cinemática, la dinámica y el control de los manipuladores industriales.
- Con el estudio de la cinemática se logro definir el movimiento del robot respondiendo dos interrogantes que definen el movimiento de un robot: ¿Si se conocen las relaciones de rotación y traslación de las articulaciones del brazo, cual será la posición y orientación del efector final? (cinemática directa), y teniendo en cuenta cual es la posición que se desea del efector final ¿Cuál será la cinemática de las articulaciones?.
- El control lineal o monoarticular es aplicable cuando los efectos de los demás eslabones son despreciables. Esto sucede cuando los torques generados por el motor predominan sobre los efectos de inercia, coriolis, gravedad y demás. (Factor de reducción de velocidad alto.)
- El costo computacional de los efectos de pre alimentación, re alimentación y compensación por gravedad, en el control lineal, es aceptable, debido a que el modelo de una articulación es sencillo y las operaciones implicadas son reducidas, mientras que los modelos de control multiarticular o no lineal son levemente usados debido a su alto costo computacional, en comparación a las técnicas clásicas de control.

- El uso de la pre-alimentación en los esquemas de control general es reducido y generalmente se limita a la realización de la acción compensadora de efectos gravitatorios.
- Los procesos industriales son controlados y se desarrollan en un rango de trabajo bien definido, por lo cual el control clásico es el más aplicado, además que sus costos son más reducidos en comparación con las técnicas de control alternativas. Las técnicas de control alternativas como el uso de redes neuronales y control adaptativo tienden a ser más implementadas debido a su flexibilidad y buen desempeño.
- El control híbrido de posición/fuerza es una buena alternativa en el desarrollo de sistemas de interacción robot-máquina, pero actualmente es aplicable a tareas sencillas debido a grandes limitaciones propias de los algoritmos de control y que se buscan superar en actuales investigaciones. Por otra parte el control de impedancia es altamente aplicable debido a su buen rendimiento y una relativamente fácil implementación.
- Los métodos generales de generación de trayectorias se basan en polinomios de diferentes grados para ajustarse mejor a condiciones deseadas con bajo costo computacional.
- Con la investigación de los sistemas de programación de robot, se logró apreciar que las más empleadas en la industria son las técnicas de programación guiada y la programación textual, técnicas que deben contar con características de transportabilidad, adaptabilidad, y con la capacidad de interactuar con los otros sistemas que acompañan al robot.
- La tendencia de los sistemas robotizados es la autonomía de los procesos, por lo cual se incursiona en campos inteligencia artificial, visión artificial, teleoperación, entre otros. Este tipo de avances permite la expansión de los campos de aplicación

de esta tecnología.

RECOMENDACIONES

- Debido a la necesidad de profundizar en las nuevas tecnologías con el fin de propender el desarrollo de la industria colombiana se sugiere incluir en el pensum de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, la asignatura teórico-práctica: Introducción a la Robótica.
- Basándose en la experiencia del seminario de robótica industrial, se recomienda a los futuros proyectos que se desarrollen bajo esta modalidad contar con una aplicación práctica sobre la temática de investigación.
- Se recomienda darle continuidad al estudio del brazo robótico AL5B, implementándole un control de lazo cerrado que permita la aplicación de los modelos de control analizados durante el seminario.
- Se recomienda la implementación de un séptimo grado de libertad al robot didáctico AL5B mediante una plataforma móvil que permita la expansión de su volumen de trabajo y simule una celda de trabajo con opción de desplazamiento.
- Se recomienda complementar el seminario de robótica industrial, con nuevos proyectos de investigación que profundicen en temas como:
 - Robótica autónoma.
 - Inteligencia Artificial.
 - Visión Artificial.
 - Programación OLP
 - Control robusto
- Debido a la poca accesibilidad a información referente a la normativa de la robótica industrial, y siendo un seminario cuyo objetivo principal buscaba la formación en conceptos básicos en esta área, no se presentó dicha temática. Se recomienda a

futuros proyectos relacionados con la robótica indagar y recopilar descripciones y funciones de las normas establecidas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANGELES Jorge. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms*. Springer, New York, 2da edition, 2003.
- [2] ASADA Harihico and SLOTINE J.E. *Robot Analysis and Control*. John Wiley and Sons, Nueva York, 1986.
- [3] BARRIENTOS Antonio. *Fundamentos de Robotica*. McGRAW.HILL, Madrid, España, segunda edition.
- [4] BASOGAIN O. Xabier. Definición de una red neuronal para clasificación por medio de un programa evolutivo. *Publicaciones de la Escuela de Ingenieros*, 1998.
- [5] BERGREN Charles M. *Anatomy of a Robot*. McGraw Hill, Estados Unidos, 2 edition, 2003.
- [6] CAPARROSO Ivan O. Diseño del robot industrial umng-i. *Red de Revistas Científicas de America Latina y el Caribe. Universidad Autónoma del Estado de Mexico*, (010), 2001.

- [7] CÁRDENAS Edwin Francis, Luis Miguel MENDEZ, and ESMERAL Jorge Sofrony. A history of robots: From science fiction to surgical robotics. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 32(2):5–17, 2011.
- [8] CAVALCANTI Adriano, SHIRINZADEH Bijan, ZHANG Mingjun, and KRETLY Luiz C. Nanorobot hardware architecture for medical defense. *Sensors*, 8, 2008.
- [9] CERÓN C. Alexander. Sistemas roboticos teleoperados. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (15):62–72, 2007.
- [10] CHOSET H., LYNCH K., HUTCHINSON S., KANTOR G., BUR-GARD W., KAVRAKI L., and THRUN S. *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation*. Cambridge, Massachuset, Estados Unidos, primera edition, 2005.
- [11] CORKE I. Peter. *Robotics Toolbox for Matlab*. Corke, I, Peter, Melbourne, Florida, 2008.
- [12] CRAIG J. John. *Robótica*. Pearson, USA, tercera edition, 2006.
- [13] CRUZ Joel Jimenez. Cibernetica, inteligencia artificial y robotica. *Casadeltiempo*, 4(13):52–56, 2008.
- [14] CUPICH RODRIGUEZ Miguel. Actuadores piezoeléctricos. *Ingenierias*, III(6).
- [15] GARCIA L. Hilario. *Programacion de Robots Industriales: Control Remoto del Robot ASEA IRB2000*. Servicios de Publicaciones, Oviedo, España., 1996.
- [16] GOLDMAN A. Path planning problems and solutions. 1(2):105–108, 1994.
- [17] GUZMÁN R. A., CID M. J., MENDÉZ M. F., REYES C. and J., PORRAS S. F., and VILLEGAS R. G. Interfaz del brazo robot puma 200 con la pc. Master's thesis, Grupo de Robótica de la Facultad de Ciencias de la Electrónica BUA ., Puebla, Mexico.

- [18] HOCKSTEIN N.G., GOURIN C. G., FAUST R. A., and TERRIS D. J. A history of robots: From science fiction to surgical robotics. *Robotic Surgery*, 1(2):113–118, 2007.
- [19] JAMBRINA Leonardo Fernandez. Curvas de bezier. *Universidad Politecnica de Madrid*, 2008.
- [20] KUMAR SAHA Subir. *Introduccion a la Robotica*. Mc Graw Hill, Noida,India., 2008.
- [21] LEWIS Frank L., DAWSON Darren M., and ABDALLAH Chaouki T. *Control adaptativo y Robusto*. Universidad de Manchaester, Instituto de Ciencia y Tecnología, Manchester, Reino Unido, 2 edition, 2006.
- [22] LUH J.Y.S., FISHER William, and RICHARD Paul. Joint torque control by a direct feedback for industrial robots. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 28(2):153–161, 1983.
- [23] MARTÍNEZ L. Alma E. and GODDARD C. John. Definición de una red neuronal para clasificación por medio de un programa evolutivo. *Revista Mexicana de Ingenieria Biomedica*, 22(1):4–11, 2001.
- [24] MERY Domingo. Vision artificial. *Universidad de Santiago de Chile*, 2002.
- [25] MILLER Thomas, HEWES Robert, GLANZ Filson, and KRAFT I. Gordon. Real-time dynamic control of an industrial manipulator using a neural-network-based learning controller. *IEEE*, 19(4):483–518, 2001.
- [26] MORAN Michael E. Evolution of robotic arms. *Robotic Surgery*, 1(2):103–111, 2007.
- [27] NACELLE Andres. Redes neuronales artificiales. *nucleo de ingeniria biomedica*, 2009.

- [28] NIKU S. *Introduction to Robotics, Analysis, Systems, Applications*. Prentice Hall, USA, 2 edition, 2001.
- [29] NOPE Sandra, LOAIZA Humberto, and CAICEDO Eduardo. Programacion de un robot bajo el paradigma del aprendizaje por demostración. *Revista Facultad Ingenieria, Universidad Antioquia*, (58):142–153, Marzo 2010.
- [30] NORLOF Mikael. An adaptive iterative learning control algorithm with experiments on an industrial robot. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS A N D AUTOMATION*, 18(2):245–251, 1983.
- [31] OGATA Katsuhiko. *Ingeniería de control moderno*. Prentice Hall, Madrid, España, 4 edition, 2003.
- [32] Oklahoma State University. Nanorobotics: Design, assembly, and role in medicine. *Nanotechnology: From Synthesis to Self-assembly*, 2006.
- [33] OLLERO A. *Robótica manipuladores y robots móviles*. Alfaomega, Mexico, primera edition, 2001.
- [34] PAN Zengxi, POLDEN Joseph, LARKIN Nathan, DUIN Stephen Van, and NORRISH John. Robotics and computer-integrated manufacturing. recent progress on programming methods for industrial robots. *Elsevier*, Agosto 2011.
- [35] PIRES J. Norberto. *Industrial Robots Programming*. Springer, University of Coimbra-Portugal, tercera edition.
- [36] REYES Fernando. *Robótica: Control de Manipuladores industriales*. Alfaomega, México, 2011.
- [37] RODRIGUEZ R. Francisco and LOPEZ J. Manuel J. *Control adaptativo y Robusto*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 1996.

- [38] SANCHEZ. Roberto Theron. *Calculo Paralelo del Espacio de las Configuraciones para Robots Redundantes*. RTS, Salamanca,España, primera edition, 2002.
- [39] SICILIANO Bruno and KHATIB Oussama. *Handbook of Robotics*. Springer, Berlin, 2008.
- [40] SINGH M.D. and JOSHI J.G. *MECHATRONICS*. Eastern Economy Edition, Nueva Delhi, India, 2006.
- [41] TORRES Fernando, POMARES Jorge, GIL Pablo, T. PUENTE Santiago, and ARACIL Rafael. *Robots y Sistemas Sensoriales*. Pearson, Madrid-España, primera edition, 2002.
- [42] UMMAT A., DUBEY A., SHARMA G., and MAVROIDIS C. Nanorobotics. *Department of Mechanical and Industrial Engineering*, 2000.
- [43] VELAZCO S. Enrique. *Educatronica, Innovacion en el Aprendizaje de las Ciencias la Tecnología*. Ediciones Diaz de Santos, UNAM, Mexico, 2007.
- [44] VIÑUELA Pedro Isasi and GALVÁN L. Inés M. *Redes de Neuronas Artificiales. Un enfoque Práctico*. Pearson Prentice Hall, primera edition, 2003.
- [45] VIVAS A. Oscar A. Predictive control of a scara robot. *Revista Chilena de Ingenieria*, 14(2), 2006.

ANEXO A

TALLER DE APLICACIÓN DE DESCRIPCIÓN Y TRANSFORMACIONES ESPACIALES EN MATLAB

Toolbox de robótica

Se usaran Las funciones de la TOOLBOX de robótica específicas en la descripción y transformaciones espaciales. A continuación se presentan las herramientas disponibles en esta TOOLBOX para el cálculo y manejo de problemas relacionados con la especificación de descripción espacial y transformación de coordenadas.

- `rotx(a)`: Representa la matriz de rotación en torno al eje OX.
- `roty(a)`: Representa la matriz de rotación en torno al eje OY.
- `rotz(a)`: Representa la matriz de rotación en torno al eje OZ.
- La entrada a esta función es un valor escalar que representa la magnitud de la rotación en radianes y su salida es una matriz 3x3.
- `trotx(a)`: Es la matriz transformación homogénea que representa un giro en torno al eje OX.
- `troty(a)`: Es la matriz transformación homogénea que representa un giro en torno al eje OY.
- `trotz(a)`: Es la matriz transformación homogénea que representa un giro en torno al eje OZ.
- La entrada a esta función es un valor escalar que representa la magnitud de la rotación en radianes y su salida es una matriz 3x3.
- `trasl(P)`: Matriz de transformación homogénea que representa una traslación del marco de referencia un vector P. La entrada a esta función P es un vector compuesto por las coordenadas a desplazar en los ejes y su estructura es de la forma $[px \ py \ pz]$. La salida es una matriz de transformación homogénea (4x4) cuya rotación es nula.
- `Quaternion(k,A)`: Representación de un cuaternio cuyo eje de rotación es el vector unitario K y su rotación está cuantificada por el escalar A(En radianes).

Al definir un cuaternio Q se puede realizar la transformación a su matriz de transformación homogénea análoga con $(Q.t)$

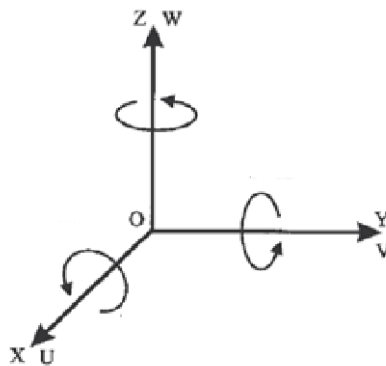
Rotaciones consecutivas de un sistema de referencia

Un cuerpo rígido que está ubicado en el origen de un sistema de referencia $\{S_0=OXYZ\}$, es sometido a una serie de rotaciones como se muestra a continuación. Las componentes del sistema de referencia solidario al cuerpo rígido $\{s_1=OUVW\}$. Si inicialmente coincidían con $\{S_0\}$.

- (45) en torno al eje OX
- (30) en torno al eje OY
- (60) en torno al eje OZ

El desarrollo de múltiples rotaciones se realiza de manera analítica y mediante la toolbox de robótica para realizar la comparación y validación de resultados.

Como primer paso se definen las magnitudes de las rotaciones



Posteriormente se definen las rotaciones con respecto a cada uno de los ejes como se vio en el capítulo 8.

```

%% Rotación con respecto al eje OX
Rx=[1 0 0; 0 cos(alpha) -sin(alpha);
    0 sin(alpha) cos(alpha)];
%% Rotación con respecto al eje OY
Ry=[cos(phi) 0 sin(phi);
    0 1 0 ;
    -sin(phi) 0 cos(phi)];
%% Rotación con respecto al eje OZ
Rz=[cos(theta) -sin(theta) 0;
    sin(theta) cos(theta) 0;
    0 0 1];

```

Finalmente se realiza la rotación conjunta multiplicando las rotaciones aisladas.

```

%% Rotación conjunta sobre los ejes OX-OY-OZ
T=Rz*Ry*Rx

```

T =

```

    0.4330    -0.4356    0.7891
    0.7500     0.6597   -0.0474
   -0.5000     0.6124     0.6124

```

La validación del resultado se mediante el uso de la Toobox ROBOT para MATLAB usando su función rot, con lo que se tiene:

```

%% verificación de la solución mediante la toolbox de robotica
Tr=rotz(theta)*roty(phi)*rotx(alpha)

```

Tr =

```

    0.4330    -0.4356    0.7891
    0.7500     0.6597   -0.0474
   -0.5000     0.6124     0.6124

```

1. El sistema de referencia OXYZ se rota mediante un giro de 60 grados en torno al vector [0,0,1] (Eje Z) y se traslada a una posición descrita por el vector [3.5,-7]. Posteriormente se realiza una segunda rotación de 90 grados en torno al vector [0,1,2], convirtiéndose en un sistema de referencia móvil.

Determinar los valores que describen la posición y orientación del nuevo sistema de referencia (OUVW) con respecto al marco fijo OXYZ.

Determinar las coordenadas, en el sistema OXYZ, de un punto P cuyas coordenadas OUVW son

[1,-2,7]

Solución

T1= rotación de 60 grados en torno al vector [0,0,1]

T2= Traslación del sistema definida por el vector [3,5,-7]

T3= rotación de 90 grados en torno al vector [0,2,1]

La solución de este problema se realiza mediante el uso de la toolbox robot para Matlab

La primera transformación (T1) se realiza mediante la función `trotz` con una entrada de 60 grados

```
%% Taller de aplicación en matlab: Descripciones
%% Transformaciones
%% Transformación T1
T1=Trotz(pi/3);
```

La segunda transformación se hace mediante la función de translación `transl([vector])`

```
%% Transformacion T2
T2=transl([3,5,-7]);
```

La última transformación es una rotación sobre un vector diferente a un eje coordenado, por lo cual se hace necesario el uso de otra herramienta matemática como es el par de rotación o los cuaternios, siendo los últimos los usados en este ejemplo.

```

%% Transformación T3
K=[0,2,1]; %vector en torno al cual se rota
k=K/norm(K); % Eje de rotacion (vector unitario)
Q=quaternion(k,pi/2); % Cuaternionio que representa rotación
    % de pi/2 en torno al eje k
T3=Q.t; %matriz de transformacion homogenea equivalente
    % al cuaternionio Q.

```

La representación conjunta de las diferentes transformaciones se hace mediante la multiplicación consecutiva de las diferentes transformaciones individuales.

```

%% Transformacion conjunta
T=T1*T2*T3

```

```

T =
    -0.3873    -0.9164     0.1008    -2.8301
     0.2236     0.0127     0.9746     5.0981
    -0.8944     0.4000     0.2000    -7.0000
         0         0         0         1.0000

```

La segunda parte del ejercicio se realiza al multiplicar las coordenadas del vector en el sistema de referencia OXYZ con la matriz de transformación homogénea que representa los cambios de un sistema a otro.

```

%% Representación de un vector en el sistema de referencia movil
Puvw=[1,-2,7,1]'; % Vector columna de posición cuyo ultimo
    % término representa un factor de escala
Pxyz=T*Puvw

```

```

Pxyz =
    -0.6789
     12.1185
    -7.2944
     1.0000

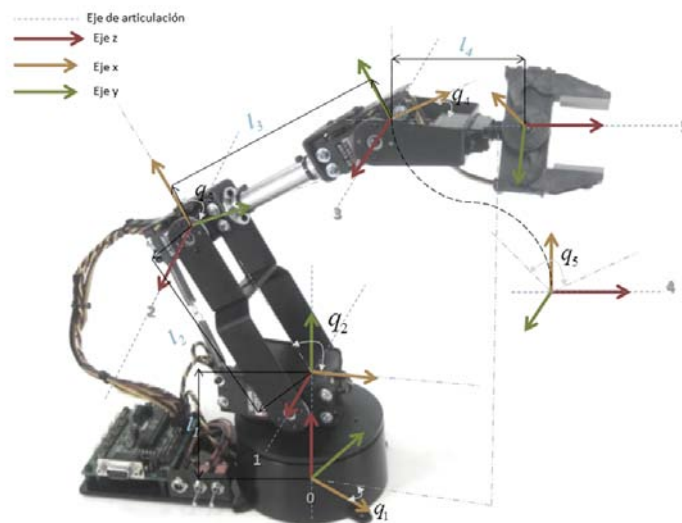
```

TALLER DE APLICACIÓN EN MATLAB EN CINEMÁTICA DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

CINEMÁTICA DEL MANIPULADOR ROBÓTICO

En el taller de este capítulo se busca encontrar la cinemática directa e inversa del robot de estudio AL5B, que será próximamente usado para la generación de trayectorias. Para este taller se necesitan los conocimientos básicos para de cinemática. Se desarrollarán las ecuaciones obtenidas en el capítulo, para encontrar las coordenadas articulares con solo las coordenadas del efector final y algunos valores de orientación.

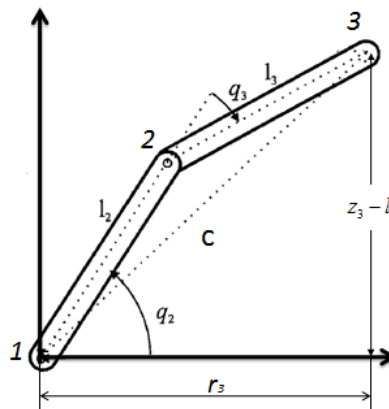
Cinemática Inversa Robot AL5B



Se tratará la cinemática geométrica de la cual se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$q_1 = \tan^{-1}(P_y / P_x); r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}; r_3 = r - l_4 \cos(q_{234}); z_3 = r - l_4 \sin(q_{234})$$

$$C = \sqrt{r_3^2 + (z_3 - l_1)^2}; \cos(q_3) = \frac{c^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$



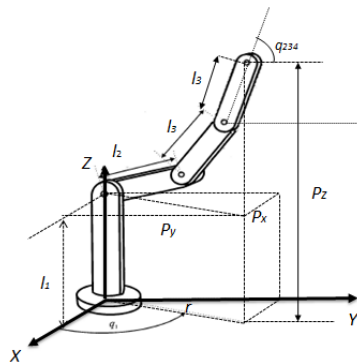
Por limitaciones físicas el robot solo puede tener configuración de codo arriba, como se muestra en la figura

De aquí se obtiene:

$$q_2 = \beta + \alpha$$

Con

$$\beta = \cos^{-1}(r_3 / c); \alpha = \cos^{-1}\left(\frac{c^2 + l_2^2 - l_3^2}{2cl_2}\right); q_4 = q_{234} - (q_2 + q_3)$$



Y donde q_5 es igual a la rotación deseada en el efector final, por tanto no se calcula.

El código escrito en matlab es el siguiente:

```

%% VALORES GEOMETRICOS DEL MANIPULADOR Y PUNTO INICIAL (POSICIÓN,
%% ORIENTACIÓN)

l0=0.07; l1=0.10; l2=0.125; l3=0.11; Y4(1)=0; X4(1)=0.20; Z4(1)=0.07;
Z4(1)=0.07;

%% VALORES DEL PUNTO FINAL (POSICIÓN, ORIENTACIÓN) E INFORMACIÓN
i=1; teta234=0; n=192; deltateta=pi/32; Z4f=0.17; deltaz=(Z4f-Z4(1))/192; tetat=0; r=0.04;
while i<=n+1
    r4=(X4(i)^2+Y4(i)^2)^0.5;
    z3=Z4(i)-l3*sin(teta234);
    r3=r4-l3*cos(teta234);
    c=(r3^2+(z3-l0)^2)^0.5;
    Beta=atan((z3-l0)/r3);
    cosalfa=(l2^2-c^2-l1^2)/(-2*l1*c);
    cosgama=(c^2-l1^2-l2^2)/(-2*l1*l2);
    alfa=real(acos(cosalfa)); gama=real(acos(cosgama));

    %% calculo de las coordenadas articulares
    q1(i)=pi/2+atan(Y4(i)/X4(i));
    qs1(i)=q1(i)-pi/2;
    q2(i)=Beta+alfa;
    qs2(i)=q2(i);
    q3(i)=pi-gama;
    qs3(i)=-q3(i);
    q4(i)=teta234-q2(i)+q3(i)+pi/2;
    qs4(i)=teta234-qs2(i)+q3(i);
    i=i+1;
    tetat=tetat+deltateta;

```

En la última parte del código se aprecia el cálculo de coordenadas articulares, en las cuales también se encuentran las coordenadas de tal forma se convierta el ángulo obtenido a el ángulo que se debe enviar al servomotor.

Cinemática Directa Robot AL5B

Del esquema del robot AL5B obtenemos el valor de **C** que es la distancia de la base al efector final en el plano **XY** que se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$C = l_1 \cos(q_2) + l_2 \cos(q_2 + q_3) + l_3 \cos(q_2 + q_3 + q_4)$$

$$x_4 = C * \cos(\pi - q_1)$$

$$y_4 = C * \sin(\pi - q_1)$$

$$z_4 = l_0 + l_1 \sin(q_2) + l_2 \sin(q_2 + q_3) + l_3 \sin(q_2 + q_3 + q_4)$$

El código desarrollado para la dinámica directa es el siguiente:

```
% cinematica directa
for i=1:n
    c=l1*cos(qq2(i))+l2*cos(qq2(i)-qq3(i))+l3*cos(qq2(i)-qq3(i)+qq4(i)-pi/2);
    X4(i)=c*cos(pi-qq1(i));
    Y4(i)=c*sin(pi-qq1(i));
    Z4(i)=l0+l1*sin(qq2(i))+l2*sin(qq2(i)-qq3(i))+l3*sin(qq2(i)-qq3(i)+qq4(i)-pi/2);
end
```

Donde n representa una cantidad de números en una trayectoria

De esta forma al desarrollar un programa donde la entrada sea las coordenadas y orientación del punto final o los valores de las coordenadas articulares obtendremos la respuesta al modelo cinemático.

TALLER DE APLICACIÓN EN MATLAB EN DINÁMICA DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

DINÁMICA DEL MANIPULADOR ROBÓTICO

Se encontrará el modelo dinámico para dos robots diferentes, un robot polar de dos grados de libertad y un robot tipo brazo articulado de cuatro grados de libertad, este modelo será planteado según los métodos nombrados en el capítulo. En el robot polar se usará el método computacional de Lagrange para llegar al modelo dinámico, se usó esta opción porque modelo computacional es extenso, por tanto solo es viable en robots de bajos grados de libertad, para el robot de cuatro grados se usara el modelo recurvo computacional de Newton-Euler, por su "fácil" implementación en robots de altos grados de libertad.

Se llevara a cabo una comparación entre los pares que se calculan por los modelos mostrados en el capítulo y los calculados a partir de la toolbox de MATLAB

TOOLBOX DE ROBÓTICA PARA MATLAB

Para la dinámica del manipulador robótico existen algunas funciones dentro de la toolbox creada por Peter I. Corke que permitirán conocer los valores de los diferentes pares y fuerzas que realiza el actuador sobre los eslabones que conforman el robot.

- Función **link**: construye un objeto link (eslabón), en el cual contenemos los parámetros cinemáticos y dinámicos, junto con parámetros del actuador y la transmisión. Requiere los parámetros Denavit-Hartenberg.

- Función **robot**: con esta función, se puede construir el robot mediante la unión de links descritos anteriormente.
- Función **rne**: computa la dinámica inversa a través de la formulación recursiva de Newton-Euler. Necesita de los parámetros del robot (previamente guardados en un object en MATLAB mediante la función robot), y las variables articulares (y sus derivadas).

Construcción de los robots en MATLAB

- **Robot polar de dos GDL**

Creando un archivo .m donde se definieron los link (eslabones) del manipulador con sus parámetros DH:

```

%% definición de los links con los parametros Denavit-Hartenberg para cada
%% eslabon en la forma ([alfa, a, teta, d, configuración],convención)
L{1}=link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
L{2}=link([0 0 0 0 1], 'standard');
%% masa de cada eslabón
L{1}.m=20;L{2}.m=10;
%% distancia de cada eslabón a su centro de masa desde su propis sistema de
%% referencia
L{1}.r=[0 0 10];L{2}.r=[0 0 0];
%% inercias de cada eslabón dadas en la forma (Ixx Iyy Izz Ixy Iyz Ixz) de
%% cada elemento
L{1}.I=[0 0 2000 0 0 0];L{2}.I=[0 0 0 0 0 0];
%% inercia del motor (actuador) de cada elemento
L{1}.Jm=0;L{2}.Jm=0;
%% coeficiente de reducción de cada motor
L{1}.G=1;L{2}.G=1;
%% coeficiente de rozamiento viscoso
L{1}.B=0;L{2}.B=0;
%% rozamiento de Coulomb en cada elemento (en las direcciones + - del movimiento)
L{1}.Tc=[0 0];L{2}.Tc=[0 0];
%% definicion del robot
Polar_Robot=robot(L,'polar RD','UIS','Robot Polar 2GDL');
Polar_Robot.name='Polar RD';
Polar_Robot.manuf='UIS';

```

- **Robot AL5B de cuatro grados de libertad**

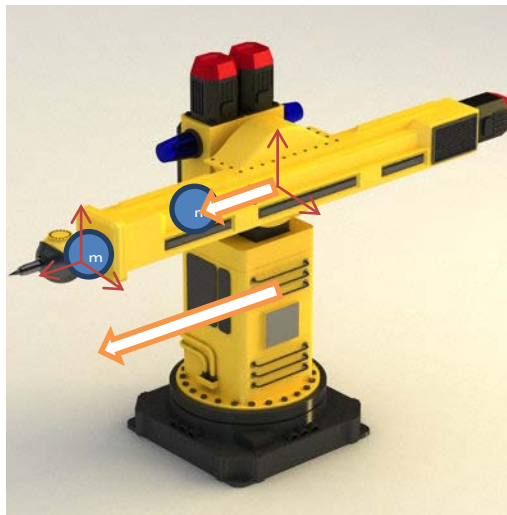
```

%vamos a definir el manipulador robótico AL5B (solo con sus primeros 4 GDL)
clear L
%parametros DH
L{1}=link([pi/2 0 0 0.07 0], 'standart');
L{2}=link([0 0.1 0 0 0], 'standart');
L{3}=link([0 0.125 0 0 0], 'standart');
L{4}=link([0 0.11 0 0 0], 'standart');

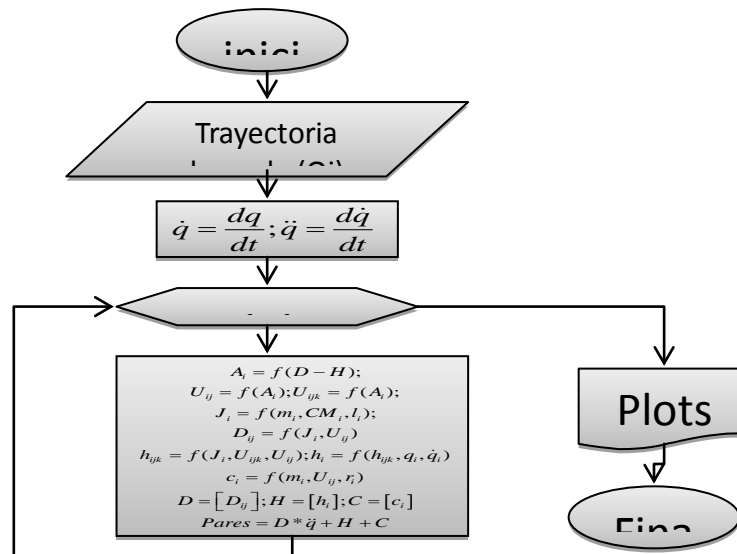
%masas de los eslabones
L{1}.m=0.11;L{2}.m=0.11;L{3}.m=0.0552;L{4}.m=0.045;
%coordenadas de los centros de masa de cada eslabón
L{1}.r=[0 0 0];L{2}.r=[-0.10 0 0];L{3}.r=[-0.125 0 0];L{4}.r=[-0.11 0 0];
%tensores de inercia
L{1}.I=[0 0 0 0 0 0];L{2}.I=[0 0 0 0 0 0];L{3}.I=[0 0 0 0 0 0];L{4}.I=[0 0 0 0 0 0];
%inercia motores
L{1}.Jm=0;L{2}.Jm=0;L{3}.Jm=0;L{4}.Jm=0;
%coeficiente de reducción
L{1}.G=1;L{2}.G=1;L{3}.G=1;L{4}.G=1;
%rozamiento viscoso
L{1}.B=0;L{2}.B=0;L{3}.B=0;L{4}.B=0;
%rozamiento coulomb
L{1}.Tc=[0 0];L{2}.Tc=[0 0];L{3}.Tc=[0 0];L{4}.Tc=[0 0];
%definición del robot
AL5B=robot(L, 'AL5B', 'UIS', 'robot AL5B con 4 GDL');
AL5B.name='AL5B';
AL5B.manuf='UIS';
drivebot(AL5B)

```

ROBOT POLAR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD



Para conseguir el modelo dinámico según el algoritmo computacional de Lagrange, seguiremos los pasos estipulados en el capítulo, la estructura del programa realizado se puede resumir según en el siguiente diagrama de flujo:



Donde, partiendo de la trayectoria deseada y parámetros dimensionales del robot (parámetros Denavit-Hartenberg, masa, posición de los centros de masa respecto a su sistema de referencia y número de particiones) se consigue unas graficas comparativas entre el modelo dinámico obtenido y el modelo que generado por la función **rne**.

Para este ejercicio se utilizara una trayectoria deseada dada por la siguiente expresión:

```

%% definición de la trayectoria
sq1='sin(t)*t+pi/2';
sq2='sin(5*t)+t+1';
  
```

Se evalúan sus derivadas (velocidad y aceleración) y se ingresan los valores estructurales del robot, y se evalúan sus variables matrices de transformación:

```

%% calculo de velocidades y aceleraciones angulares
sqd1=diff(sq1,'t');sqdd1=diff(sqd1,'t');
sqd2=diff(sq2,'t');sqdd2=diff(sqd2,'t');


---


%% parametros del robot
L1=10; m1=20; m2=10; g=9.8; G=[g 0 0 0];
r11=[0 0 L1 1]'; r22=[0 0 0 1]';


---


%% matrices de transformación homogenea
Qr=zeros(4);Qr(1,2)=-1;Qr(2,1)=1;
Qd=zeros(4);Qd(3,4)=1;

```

Se inicia un bucle de tiempo en el que se calcularán las diferentes matrices y vectores $U_{ij}, U_{ijk}, h_{ijk}, c_i$ con juntamente con las matrices de tensores de inercia J_i para calcular los parámetros D, H, C y encontrar los pares y fuerzas actuantes con la expresión vista en el capítulo:

$$\tau = D\ddot{q} + H + C$$

```

%% bucle de tiempo
for tk=1:1:50;
    t=(tk-1)/10;
    %% evaluación de posición, velocidad y aceleración y guardar
    q1=eval(sq1);q(tk,1)=q1;qd1=eval(sqd1);qd(tk,1)=qd1;qdd1=eval(sqdd1);qdd(tk,1)=qdd1;
    q2=eval(sq2);q(tk,2)=q2;qd2=eval(sqd2);qd(tk,2)=qd2;qdd2=eval(sqdd2);qdd(tk,2)=qdd2;

    %% Almacenamiento de variables articulares
    XY(tk,1)=q(tk,2)*cos(q(tk,1));XY(tk,2)=q(tk,2)*sin(q(tk,1));

    %% cálculo de matrices de transformación homogenea
    A00=eye(4);
    A11=eye(4);
    A01=[cos(q1) 0 -sin(q1) 0;sin(q1) 0 cos(q1) 0;0 -1 0 0;0 0 0 1];
    A12=[1 0 0 0;0 1 0 0;0 0 1 q2;0 0 0 1];
    A02=A01*A12;

```

```

%% matrices Uij
U11=A00*Qr*A01;
U12=zeros(4);
U21=A00*Qr*A02;
U22=A01*Qd*A12;

```

```

%% matrices Uijk
U111=A00*Qr*A00*Qr*A01;
U112=zeros(4);
U121=zeros(4);
U122=zeros(4);
U211=A00*Qr*A00*Qr*A02;
U212=A00*Qr*A01*Qd*A12;
U221=A00*Qr*A01*Qd*A12;
U222=A01*Qd*A11*Qd*A12;

```

```

%% matrices de inercia
J1=[0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 m1*L1^2 m1*L1;0 0 m1*L1 m1];
J2=[0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 0 m2];

```

```

%% cálculo de valores Dij
D11=trace(U11*J1*U11')+trace(U21*J2*U21');
D12=trace(U22*J2*U21');
D21=D12;
D22=trace(U22*J2*U22');

```

```

%% cálculo de valores de hijk
h111=trace(U111*J1*U11') + trace(U211*J2*U21');
h112=trace(U212*J2*U21');
h121=trace(U221*J2*U21');
h122=trace(U222*J2*U21');
h211=trace(U211*J2*U22');
h212=trace(U212*J2*U22');
h221=trace(U221*J2*U22');
h222=trace(U222*J2*U22');

```

```

%% calculo de matriz H (matriz de coriolis y fuerzas centrifugas)

```

```

h1=h111*qd1*qd1+h112*qd1*qd2+h121*qd2*qd1+h122*qd2*qd2;
h2=h211*qd1*qd1+h212*qd1*qd2+h221*qd2*qd1+h222*qd2*qd2;

```

```

H=[h1 h2]';

```

```

%% cálculo de matriz C (matriz de efectos gravitatorios)

```

```

c1=-m1*G*U11*r11-m2*G*U21*r22;
c2=-m1*G*U12*r11-m2*G*U22*r22;

```

```

C=[c1 c2]';

```

```

%% cálculo de matriz D (matriz de efectos por inercia)

```

```

D=[D11 D12;D21 D22];

```

```

%% Cálculo de los pares y fuerzas en los actuadores

```

```

PARES(:,tk)=D*[qdd1 qdd2]'+H+C;

```

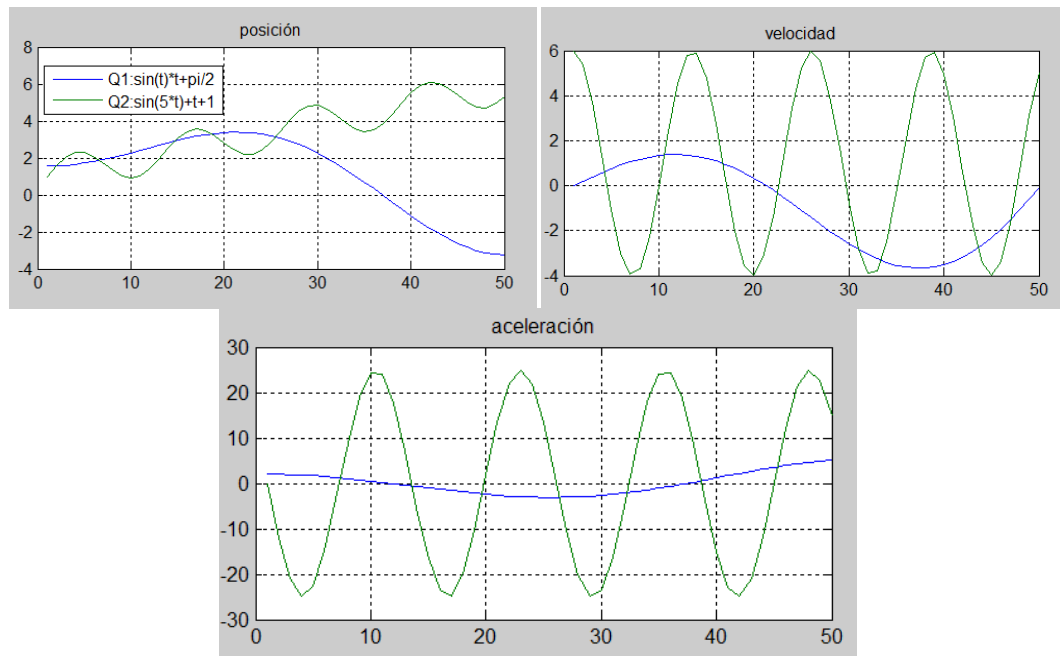
Y por último se hace la validación de los resultados usando la toolbox de MATLAB

```

%% calculo de los Pares con la toolbox de matlab
Tau=rne(Polar_Robot,q,qd,qdd,grav);
TauG=GRAVLOAD(Polar_Robot,q,grav);
TauC=CORIOLIS(Polar_Robot,q,qd);
TauI=ITORQUE(Polar_Robot,q,qdd);

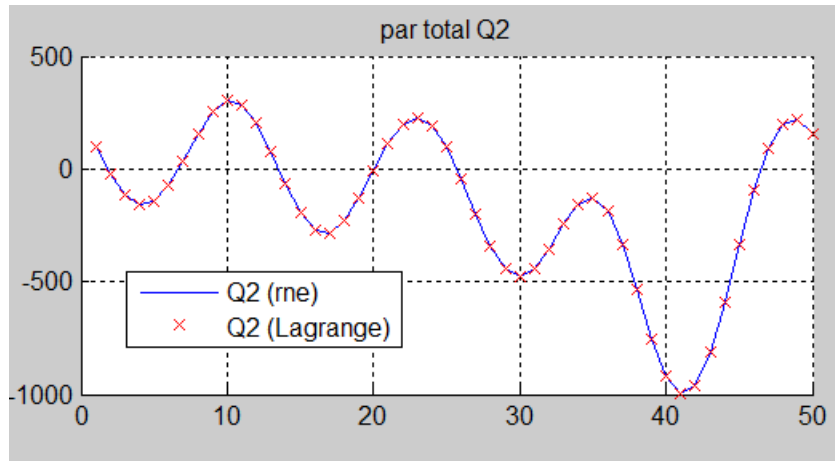
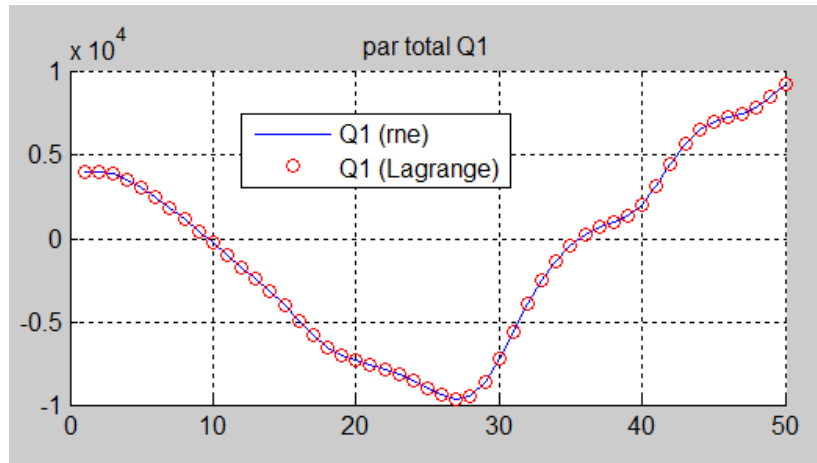
```

Los resultados se muestran en forma gráfica

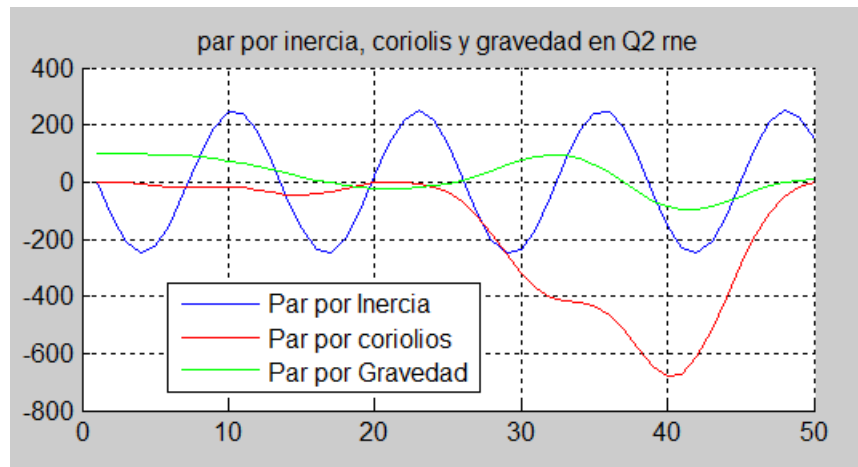
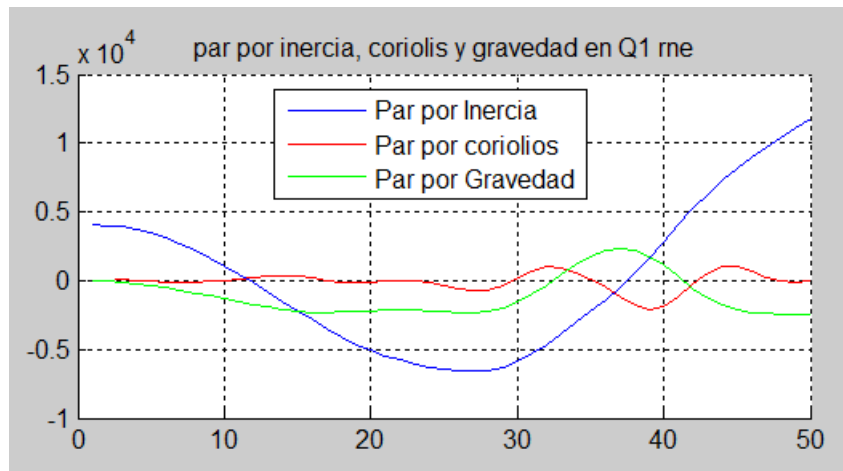


En estas graficas se aprecian las posiciones velocidades y aceleraciones de los dos grados de libertad, donde en el eje X tenemos tiempo y en el eje ordenado Y las respectivas unidades en las que están expresadas las variables articulares, radianes para Q1, (θ) con su velocidad y aceleración en rad/seg y rad/seg² respectivamente, y metros para Q2 (d2), con su velocidad y aceleración en m/seg y m/seg².

En las figuras xx xx xx se puede apreciar la comparación entre los pares y fuerzas calculados con el modelo computacional Lagrangiano y el método usado por la toolbox de robótica de MATLAB:



Adicionalmente podemos graficar los pares y fuerzas producidos por la inercia, coriolis y por fuerzas gravitacionales en obteniendo las figuras xx xx xx, donde se indica los valores de cada una de ellas por separado:



Conclusiones:

En robots de pocos grados de libertad (menores o iguales a tres), conseguir el modelo dinámico mediante el método computacional de Lagrange, no resulta tan complejo ni demorado, y en cambio se consigue un modelo bien definido con el cual realizar esquemas de control mejor estructurados. Los códigos para las graficas de salida se muestran a continuación:

```
%% salida de resultados
```

```
%% posición, velocidad y aceleración
```

```
figure(1)
subplot(2,2,1),plot(q),title('posición'),grid
legend(strcat('Q1:',sq1),strcat('Q2:',sq2),0)
%legend boxoff
subplot(2,2,3),plot(qd),title('velocidad'),grid
%legend(strcat('Qd1:',sqd1),strcat('Qd2:',sqd2),0)
legend boxoff
subplot(2,2,4),plot(qdd),title('aceleración'),grid
%legend(strcat('Qdd1:',sqdd1),strcat('Qdd2:',sqdd2),0)
subplot(2,2,2),plot(XY(:,1),XY(:,2)),title('XY'),grid
figure(2)
```

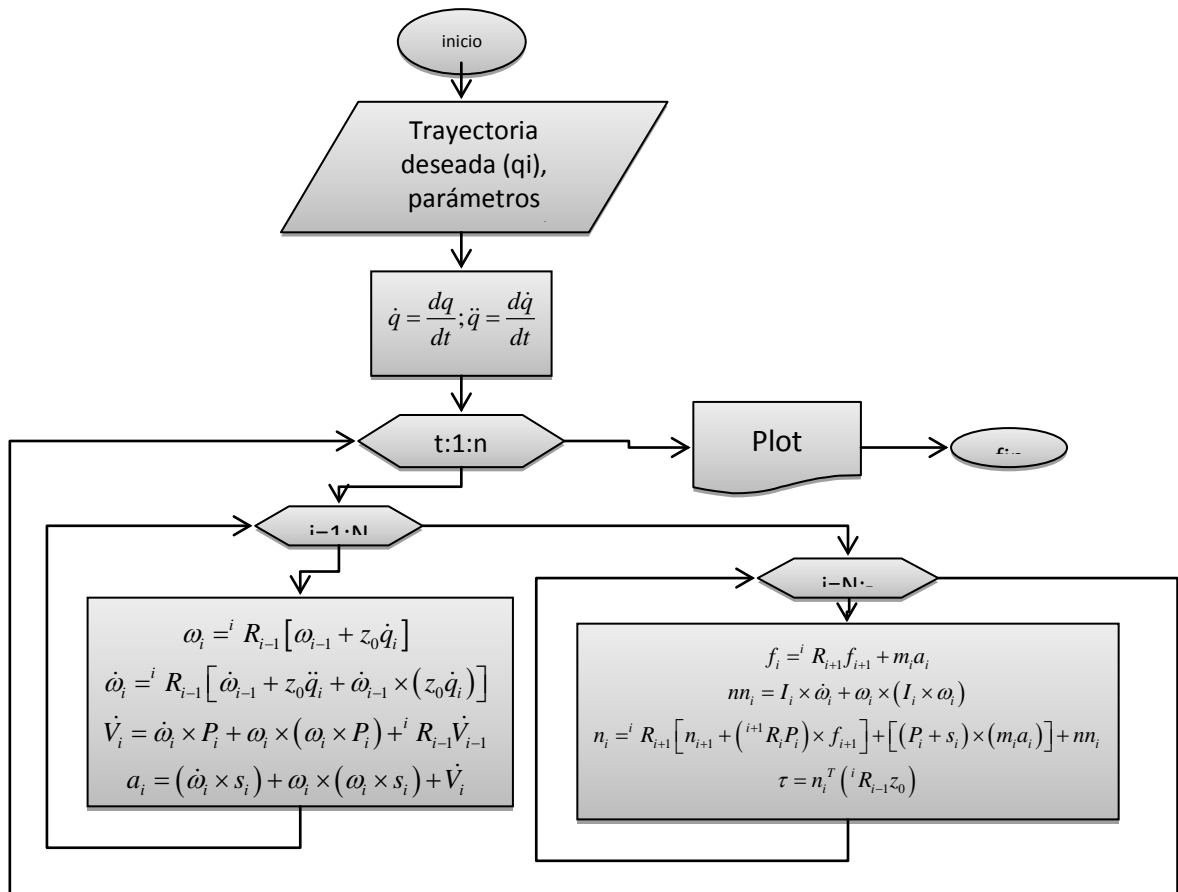
```
%% Pares de salida por Lagrange y por función rne de matlab
```

```
subplot(2,2,1),hold
plot(Tau(:,1)),plot(PARES(1,:), 'ro'),title('par total Q1'),grid
legend(strcat('Q1 (rne)'),strcat('Q1 (Lagrange)'), 'location', 'SouthOutside')
subplot(2,2,2),hold
plot(TauI(:,1)),plot(TauC(:,1), 'r'),plot(TauG(:,1), 'g'),title('par por inercia, coriolis y gravedad en Q1 rne'),grid
legend(strcat('Par por Inercia'),strcat('Par por coriolis'),strcat('Par por Gravedad'))
subplot(2,2,3),hold
plot(Tau(:,2)),plot(PARES2(2,:), 'rx'),title('par total Q2'),grid
legend(strcat('Q2 (rne)'),strcat('Q2 (Lagrange)'), 'location', 'SouthOutside')
subplot(2,2,4),hold
plot(TauI(:,2)),plot(TauC(:,2), 'r'),plot(TauG(:,2), 'g'),title('par por inercia, coriolis y gravedad en Q2 rne'),grid
legend(strcat('Par por Inercia'),strcat('Par por coriolis'),strcat('Par por Gravedad'))
```

Robot AL5B de cuatro grados de libertad

Debido a que este brazo posee 6 grados de libertad, para el cálculo del modelo dinámico despresaremos los dos últimos (la rotación en la muñeca y el cierre del gripper), este modelo dinámico es fundamental para futuras aplicaciones de control dirigidas a este robot. Se procederá a conseguir el modelo dinámico recurriendo al modelo computacional recursivo de Newton-Euler, siguiendo los pasos mostrados durante el capítulo. Los resultados se compararán con los obtenidos con la herramienta **rne** de MATLAB. Los resultados se mostrarán como graficas de comparación.

Un diagrama de flujo (figura xx) presenta el procedimiento seguido para encontrar el modelo dinámico.



Al igual que en el ejercicio anterior, se especifica la trayectoria deseada, los parámetros que definen al robot, las condiciones de fuerza en el extremo del robot y un número de particiones en el tiempo:

```

%% Robot AL5B
%% particiones
n=100;
%% trayectoria
sq1='sin(t)+pi/2';
sq2='sin(2*t)+pi/2';
sq3='sin(3*t)+pi/2';
sq4='sin(4*t)+pi/2';
%% parametros dimensionales
l0=0.07;
l1=0.1;l2=0.125;l3=0.11;
m1=0.11;m2=0.11;m3=0.0552;m4=0.045;
g=9.81;
%% definicion fuerzas en el extremo
sf5='[0 0 0]';
sn5='[0 0 0]';

```

Se calculan las velocidades y aceleraciones articulares además de los parámetros iniciales del sistema de referencia del sistema:

```

%% obtención simbólica de la velocidad y aceleración
sqd1=diff(sq1,'t');sqdd1=diff(sqd1,'t');%articulación uno
sqd2=diff(sq2,'t');sqdd2=diff(sqd2,'t');%articulación dos
sqd3=diff(sq3,'t');sqdd3=diff(sqd3,'t');%articulación tres
sqd4=diff(sq4,'t');sqdd4=diff(sqd4,'t');%articulación cuatro

%% parametros iniciales
w0=[0 0 0]';
dw0=[0 0 0]';
v0=[0 0 0]';
dv0=-[0 0 -g]';
z0=[0 0 1]';

%% matriz de rotación de entre {s4} y TCP
R45=eye(3);

```

Se inicializa el bucle de tiempo y se evalúa la trayectoria. Se guardan las coordenadas articulares con cada tiempo para realizar las graficas al final de programa

```

%% bucle de paso de tiempo
for tk=1:1:n;
    t=(tk-1)/10;
    %% evaluación numerica de posición, velocidad y aceleración
    q1=eval(sq1);    qd1=eval(sqd1);    qdd1=eval(sqdd1);
    q2=eval(sq2);    qd2=eval(sqd2);    qdd2=eval(sqdd2);
    q3=eval(sq3);    qd3=eval(sqd3);    qdd3=eval(sqdd3);
    q4=eval(sq4);    qd4=eval(sqd4);    qdd4=eval(sqdd4);

    g(tk,1)=q1;qd(tk,1)=qd1;qdd(tk,1)=qdd1;
    g(tk,2)=q2;qd(tk,2)=qd2;qdd(tk,2)=qdd2;
    g(tk,3)=q3;qd(tk,3)=qd3;qdd(tk,3)=qdd3;
    g(tk,4)=q4;qd(tk,4)=qd4;qdd(tk,4)=qdd4;

    %% evaluación numerica de las fuerzas y pares en tcp
    n5=eval(sn5)';
    f5=eval(sf5)';
    n_5(tk,:)=n5';
    f_5(tk,:)=f5';

```

Se evalúa los vectores P, S y matrices de rotación de un sistema de referencia a otro:

```

%% paso 1-2 evaluación de los vectores p,s y de la matriz de inercias

p1=[0 10 0]';p2=[11 0 0]';p3=[12 0 0]';p4=[13 0 0]';
s1=[0 0 0]';s2=[-11 0 0]';s3=[-12 0 0]';s4=[-13 0 0]';
I1=zeros(3);I2=zeros(3);I3=zeros(3);I4=zeros(3);

%% paso 3 obtención de las matrices de rotación R01 R12 R23 R34
R01=[cos(q1) 0 sin(q1);sin(q1) 0 -cos(q1);0 1 0];
R12=[cos(q2) -sin(q2) 0;sin(q2) cos(q2) 0;0 0 1];
R23=[cos(q3) -sin(q3) 0;sin(q3) cos(q3) 0;0 0 1];
R34=[cos(q4) -sin(q4) 0;sin(q4) cos(q4) 0;0 0 1];

%% paso 4 evaluación de las velocidades angulares Si

w1=R01'*(w0+z0*qd1);w2=R12'*(w1+z0*qd2);w3=R23'*(w2+z0*qd3);w4=R34'*(w3+z0*qd4);

```

Se prosigue a encontrar las aceleraciones angulares y lineales

```

%% paso 5 evaluación de las aceleraciones angulares dwi

dw1=R01'*(dw0 + z0*qdd1+cross(w0,z0*qd1));
dw2=R12'*(dw1 + z0*qdd2+cross(w1,z0*qd2));
dw3=R23'*(dw2 + z0*qdd3+cross(w2,z0*qd3));
dw4=R34'*(dw3 + z0*qdd4+cross(w3,z0*qd4));

%% paso 6 evaluación de las aceleraciones lineales de dvi

dv1=cross(dw1,p1)+cross(w1,cross(w1,p1))+R01'*dv0;
dv2=cross(dw2,p2)+cross(w2,cross(w2,p2))+R12'*dv1;
dv3=cross(dw3,p3)+cross(w3,cross(w3,p3))+R23'*dv2;
dv4=cross(dw4,p4)+cross(w4,cross(w4,p4))+R34'*dv3;

%% paso 7 evaluación de la aceleración lineal de los cdg ai

a1=cross(dw1,s1)+cross(w1,cross(w1,s1))+dv1;
a2=cross(dw2,s2)+cross(w2,cross(w2,s2))+dv2;
a3=cross(dw3,s3)+cross(w3,cross(w3,s3))+dv3;
a4=cross(dw4,s4)+cross(w4,cross(w4,s4))+dv4;

```

Y se finaliza encontrando los pares generados en las articulaciones y guardarlos en una matriz llamada PARES

```

%% paso 8 evaluación de las fuerzas sobre los eslabones

f4=R45*f5+m4*a4;
f3=R34*f4+m3*a3;
f2=R23*f3+m2*a2;
f1=R12*f2+m1*a1;

%% paso 9 evaluación de los pares sobre los eslabones

n4=R45*(n5+cross((R45'*p4),f5))+cross((p4+s4),m4*a4)+I4*dw4+cross(w4,(I4*w4));
n3=R34*(n4+cross((R34'*p3),f4))+cross((p3+s3),m3*a3)+I3*dw3+cross(w3,(I3*w3));
n2=R23*(n3+cross((R23'*p2),f3))+cross((p2+s2),m2*a2)+I2*dw2+cross(w2,(I2*w2));
n1=R12*(n2+cross((R12'*p1),f2))+cross((p1+s1),m1*a1)+I1*dw1+cross(w1,(I1*w1));

%% paso 10 evaluación de los pares
P1=n1'*R01'*z0;P2=n2'*R12'*z0;P3=n3'*R23'*z0;P4=n4'*R34'*z0;
PARES(tk,1)=P1;PARES(tk,2)=P2;PARES(tk,3)=P3;PARES(tk,4)=P4;
%% fin algoritmo

end

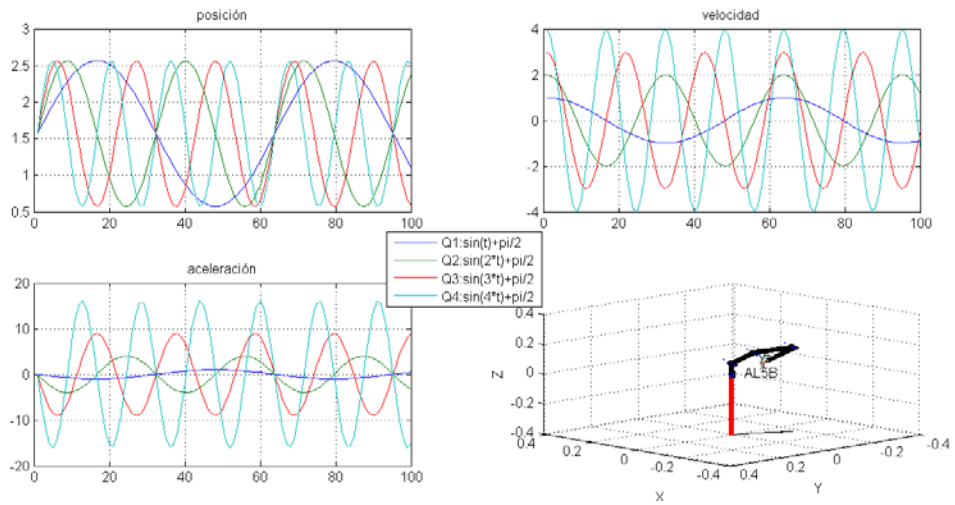
```

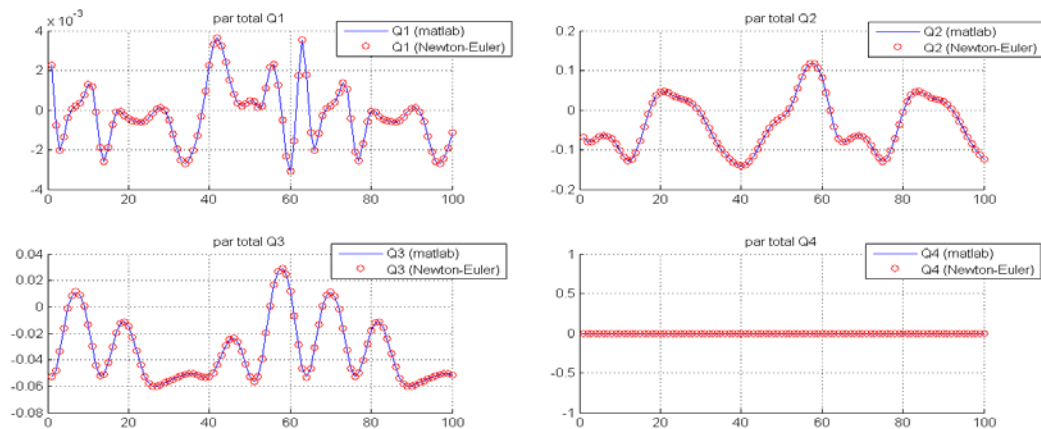
```

%% verificación con toolbox
%AL5B;
grav=[0, 0, 9.8];
PAREST=rne(AL5B,q,qd,qdd,grav,[f_5,n_5]);

```

Se compara el valor de torques encontrados por el método Newton Euler con el desarrollado usando la toolbox de MATLAB.





Con estos resultados se ve como se llega al mismo valor de torque en ambos modelos.

Obtención del modelo dinámico del robot AL5B por el método computacional de Lagrange

Siguiendo los pasos descritos en el capítulo, se procederá a calcular el modelo dinámico de este robot de 4 grados de libertad (simplificado para el cálculo). Este método provee algunas ventajas y desventajas, entre las ventajas se encuentra la capacidad de denotar fácilmente las matrices de inercias, pares por gravedad y pares por coriolis y fuerzas centrífugas, pero su nivel de resolución del orden de n^4 hace que para robots de altos grados de libertad requiera un coste computacional mayor.

A continuación se presenta el código desarrollado junto con las graficas respuestas que comparan el modelo obtenido con la toolbox de *MATLABRobot*:

```

%% valorer estructurales del robot AL5B
q1=0; q2=5; q3=7; q4=1; dq1=2; dq2=1; dq3=1; dq4=2;
l0=0.07; l1=0.10; l2=0.125; l3=0.11;
m1=0.11; m2=0.11; m3=0.0552; m4=0.045; g=9.8;
%% destaca de los centros de masa de cada eslabón respecto a su
%% sistema de coordenadas
r1=[0,0,0,1]'; r2=[-l1,0,0,1]'; r3=[-l2,0,0,1]'; r4=[-l3,0,0,1]';
g=[0,0,-g,0];
%% matrices de transformación homogenea
A01=[cos(q1) 0 sin(q1) 0; sin(q1) 0 -cos(q1) 0; 0 1 0 l0; 0 0 0 1];
A12=MDH(q2,0,l1,0); A23=MDH(q3,0,l2,0); A34=MDH(q4,0,l3,0); A02=A01*A12;
A03=A02*A23; A04=A03*A34; A13=A12*A23; A14=A13*A34; A24=A23*A34;
Q=[0 -1 0 0; 1 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];
%% matrices Uij
u11=Q*A01; u21=Q*A02; u31=Q*A03; u41=Q*A04; u22=A01*Q*A12; u32=A01*Q*A13; u42=A01*Q*A14;
u33=A02*Q*A23; u43=A02*Q*A24; u44=A03*Q*A34; u12=0; u13=0; u14=0; u23=0; u24=0; u34=0;
%% matrices Uijk
u111=Q*Q*A01; u211=Q*Q*A02; u311=Q*Q*A03; u411=Q*Q*A04; u212=Q*A01*Q*A12; u312=Q*A01*Q*A13;
u313=Q*A02*Q*A23; u412=Q*A01*Q*A14; u413=Q*A02*Q*A24; u414=Q*A03*Q*A34; u423=A01*Q*A12*Q*A24;
u424=A01*Q*A13*Q*A34; u434=A02*Q*A23*Q*A34; u323=A01*Q*A12*Q*A23;
u221=Q*A01*Q*A12; u322=Q*A01*Q*A13; u331=Q*A02*Q*A23; u431=Q*A02*Q*A24; u441=Q*A03*Q*A34;
u421=Q*A01*Q*A14; u322=A01*Q*Q*A13; u222=A01*Q*Q*A12; u422=A01*Q*Q*A14; u332=A01*Q*A12*Q*A23;
u432=A01*Q*A12*Q*A24; u442=A01*Q*A13*Q*A34; u333=A02*Q*Q*A23; u433=A02*Q*Q*A24;
u443=A02*Q*A23*Q*A34; u444=A03*Q*Q*A34;
u12=0; u113=0; u114=0; u121=0; u122=0; u123=0; u124=0; u131=0; u132=0; u133=0; u134=0; u141=0;
u142=0; u143=0; u144=0; u213=0; u214=0; u223=0; u224=0; u231=0; u232=0; u233=0; u234=0; u241=0;
u242=0; u243=0; u244=0; u314=0; u324=0; u334=0; u341=0; u342=0; u343=0; u344=0;

```

```

%% matrices J
J1=[0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 m1]; J2=[m2*l1^2 0 0 -m2*l1; 0 0 0 0; 0 0 0 0; -m2*l1 0 0 m2];
J3=[m3*l2^2 0 0 -m3*l2; 0 0 0 0; 0 0 0 0; -m3*l2 0 0 m3]; J4=[m4*l3^2 0 0 -m4*l3; 0 0 0 0; 0 0 0 0; -m4*l3 0 0 m4];

```

```

%% matrices hikm
h111=0;
h112=trace(u212*J2*u21')+trace(u312*J3*u31')+trace(u412*J4*u41');
h113=trace(u313*J3*u31')+trace(u413*J4*u41'); h114=trace(u414*J4*u41'); h121=h112;
h122=trace(u222*J2*u21')+trace(u322*J3*u31')+trace(u422*J4*u41');
h123=trace(u323*J3*u31')+trace(u423*J4*u41'); h124=trace(u424*J4*u41'); h131=h113; h132=h123;
h133=trace(u333*J3*u31')+trace(u433*J4*u41'); h134=trace(u434*J4*u41'); h141=h114; h142=h124; h143=h134;
h144=trace(u444*J4*u41'); h211=trace(u211*J2*u22')+trace(u311*J3*u32')+trace(u411*J4*u42');
h212=trace(u212*J2*u22')+trace(u312*J3*u32')+trace(u412*J4*u42');
h213=trace(u313*J3*u32')+trace(u413*J4*u42'); h214=trace(u414*J4*u42'); h221=h212; h222=0;
h223=trace(u323*J3*u32')+trace(u423*J4*u42'); h224=trace(u424*J4*u42'); h231=h213; h232=h223;
h233=trace(u333*J3*u32')+trace(u433*J4*u42'); h234=trace(u434*J4*u42');
h241=h214; h242=h224; h243=h234; h244=trace(u444*J4*u42');
h311=trace(u311*J3*u33')+trace(u411*J4*u43'); h312=trace(u312*J3*u33')+trace(u412*J4*u43');
h313=trace(u313*J3*u33')+trace(u413*J4*u43'); h314=trace(u414*J4*u43');
h321=h312; h322=trace(u322*J3*u33')+trace(u422*J4*u43'); h323=trace(u323*J3*u33')+trace(u423*J4*u43');
h324=trace(u424*J4*u43'); h331=h313; h332=h323; h333=0; h334=trace(u434*J4*u43');
h341=h314; h342=h324; h343=h334; h344=trace(u444*J4*u43'); h411=trace(u411*J4*u44'); h412=trace(u412*J4*u44');
h413=trace(u413*J4*u44'); h414=trace(u414*J4*u44'); h421=h412; h422=trace(u422*J4*u44'); h423=trace(u423*J4*u44');
h424=trace(u424*J4*u44'); h431=h413; h432=h423; h433=trace(u433*J4*u44'); h434=trace(u434*J4*u44'); h441=h414;
h442=h424; h443=h434; h444=0;

```

```

%% Valores hi
h1=h111*dq1*dq1+h112*dq1*dq2+h113*dq1*dq3+h114*dq1*dq4+h121*dq2*dq1+h122*dq2*dq2+h123*dq2*dq3+h124*dq2*dq4...
+h131*dq3*dq1+h132*dq3*dq2+h133*dq3*dq3+h134*dq3*dq4+h141*dq4*dq1+h142*dq4*dq2+h143*dq4*dq3+h144*dq4*dq4;
h2=h211*dq1*dq1+h212*dq1*dq2+h213*dq1*dq3+h214*dq1*dq4+h221*dq2*dq1+h222*dq2*dq2+h223*dq2*dq3+h224*dq2*dq4...
+h231*dq3*dq1+h232*dq3*dq2+h233*dq3*dq3+h234*dq3*dq4+h241*dq4*dq1+h242*dq4*dq2+h243*dq4*dq3+h244*dq4*dq4;
h3=h311*dq1*dq1+h312*dq1*dq2+h313*dq1*dq3+h314*dq1*dq4+h321*dq2*dq1+h322*dq2*dq2+h323*dq2*dq3+h324*dq2*dq4...
+h331*dq3*dq1+h332*dq3*dq2+h333*dq3*dq3+h334*dq3*dq4+h341*dq4*dq1+h342*dq4*dq2+h343*dq4*dq3+h344*dq4*dq4;
h4=h411*dq1*dq1+h412*dq1*dq2+h413*dq1*dq3+h414*dq1*dq4+h421*dq2*dq1+h422*dq2*dq2+h423*dq2*dq3+h424*dq2*dq4...
+h431*dq3*dq1+h432*dq3*dq2+h433*dq3*dq3+h434*dq3*dq4+h441*dq4*dq1+h442*dq4*dq2+h443*dq4*dq3+h444*dq4*dq4;

%% Valores dij
d11=trace(u11*J1*u11')+trace(u21*J2*u21')+trace(u31*J3*u31')+trace(u41*J4*u41');
d12=trace(u22*J2*u21')+trace(u32*J3*u31')+trace(u42*J4*u41');
d13=trace(u33*J3*u31')+trace(u43*J4*u41');
d14=trace(u44*J4*u41');d21=trace(u21*J2*u22')+trace(u31*J3*u32')+trace(u41*J4*u42');
d22=trace(u22*J2*u22')+trace(u32*J3*u32')+trace(u42*J4*u42');
d23=trace(u33*J3*u32')+trace(u43*J4*u42');
d24=trace(u44*J4*u42');d31=trace(u31*J3*u33')+trace(u41*J4*u43');
d32=trace(u32*J3*u33')+trace(u42*J4*u43');
d33=trace(u33*J3*u33')+trace(u43*J4*u43');
d34=trace(u44*J4*u43');d41=trace(u41*J4*u44');d42=trace(u42*J4*u44');d43=trace(u43*J4*u44');
d44=trace(u44*J4*u44');

%% Valores ci
c1=(-m1*g*u11*r1)+(-m2*g*u21*r2)+(-m3*g*u31*r3)+(-m4*g*u41*r4);
c2=(-m1*g*u12*r1)+(-m2*g*u22*r2)+(-m3*g*u32*r3)+(-m4*g*u42*r4);
c3=(-m1*g*u13*r1)+(-m2*g*u23*r2)+(-m3*g*u33*r3)+(-m4*g*u43*r4);
c4=(-m1*g*u14*r1)+(-m2*g*u24*r2)+(-m3*g*u34*r3)+(-m4*g*u44*r4);

```

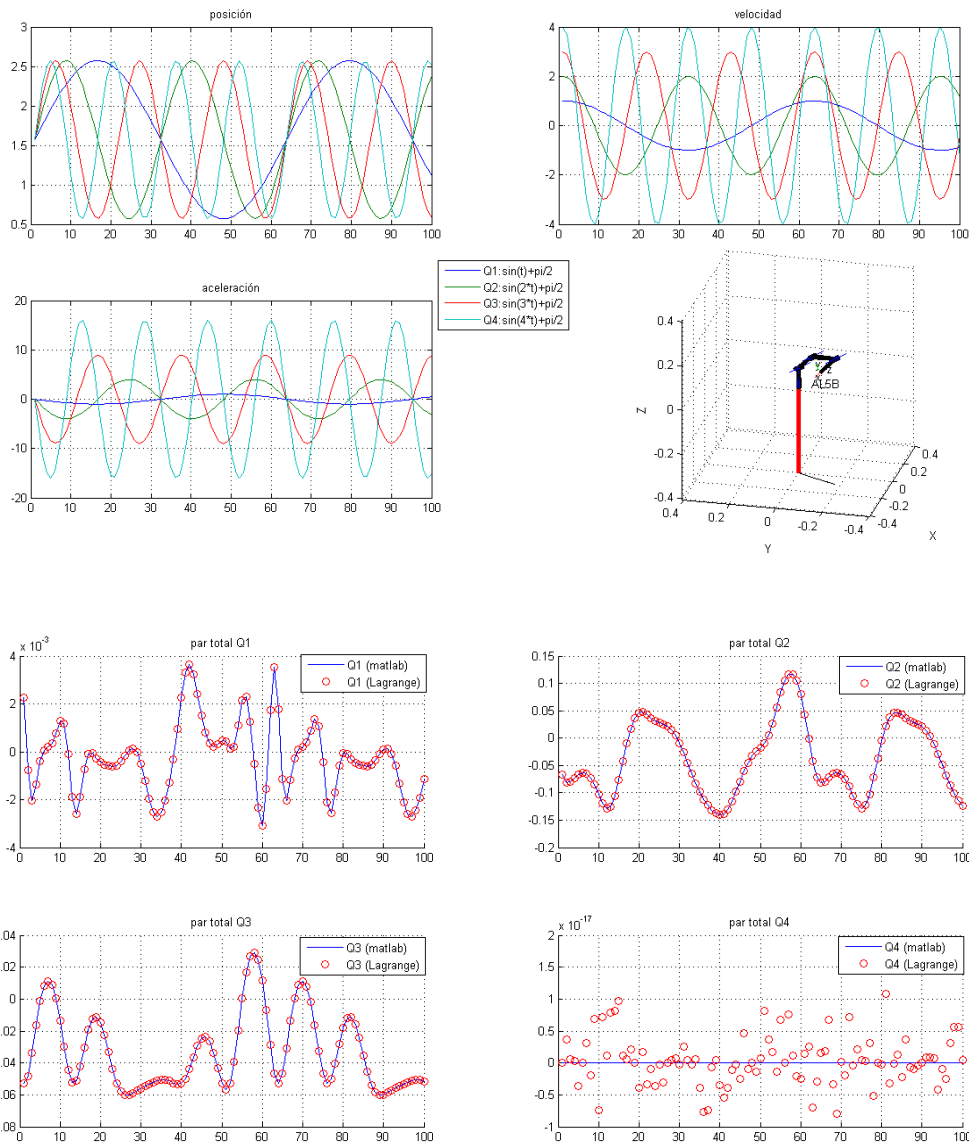
Por último se muestra el comando para encontrar el valor del torque en cada actuador en las articulaciones.

```

%% MATRICES D H C y Par en las articulaciones
D=[d11 d12 d13 d14;d21 d22 d23 d24;d31 d32 d33 d34;d41 d42 d43 d44];
H=[h1 h2 h3 h4]';
C=[c1 c2 c3 c4]';
Tao=D*[qdd1 qdd2 qdd3 qdd4]'+H+C;
Tao(tk,:)=Tao';

```

Obteniéndose las siguientes graficas comparativas con los pares calculados por la toolbox de robótica de MATLAB



Se alcanza a apreciar el comportamiento idéntico que presenta este modelo con el calculado por el método de Newton Euler.

TALLER DE APLICACIÓN EN GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS

GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS

En este taller se apreciara como encontrar la trayectoria que debe seguir el efector final de un manipulador a través de dos formas explicadas en el capítulo

correspondiente, una de ellas es el spline cúbico y la otra es a través de las curvas de Bézier. A continuación se muestra como fue el desarrollo de este taller y de las herramientas usadas para hacerlo. Además se encuentran los algoritmos seguidos para lograr algunas trayectorias ya especificadas, como lo son que el efector final se mueva de tal forma que genere una espiral, o que se mueva en línea recta entre dos puntos.

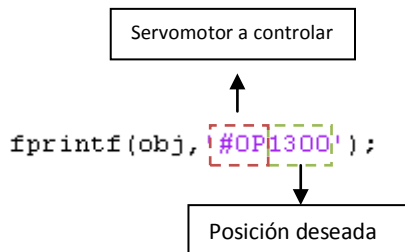
En este taller además de encontrar mediante interpolaciones polinomiales los puntos intermedios para generar una trayectoria, también se usará la cinemática inversa, con el fin de encontrar las coordenadas articulares, que posteriormente serán transmitidas a través matlab a la tarjeta de control SSC-32 del robot didáctico comprado con este fin.

Envió de información a la tarjeta de control SSC-32 Lynxmotion

Uno de los primeros problemas que surgieron al intentar controlar el robot con el software matemático matlab, investigando en los foros de Lynxmotion se encontró el siguiente código, con el cual se crea un **Object** que contendrá la información de posición al servomotor respectivo

```
clc
clear all
close all
%% creación del Object
%%
obj = serial('COM6');
set(obj, 'Terminator', 'CR')
set(obj, 'BaudRate',115200,'DataBits',8,'Parity','none','StopBits',1)
obj.FlowControl = 'none';
fopen(obj);
```

La información debe ser enviada de la forma que se muestra a continuación, donde se especifica el servomotor a controlar y la posición a la cual se quiere llevar el servo.

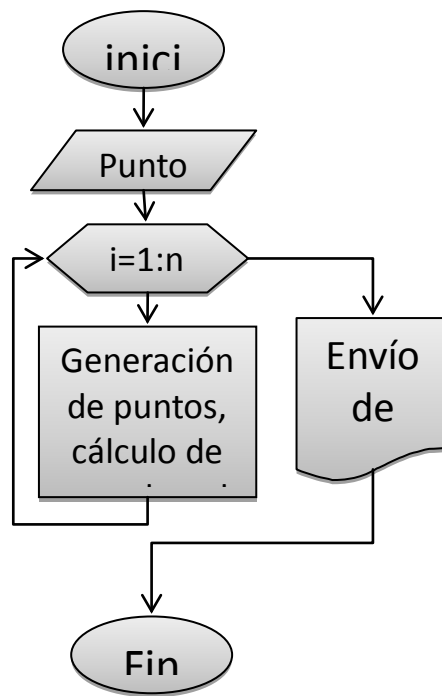


De esta manera se puede enviar al orden a la tarjeta para que el motor se ubique de la forma que se desea. La caracterización de los motores se hizo individualmente de tal forma que se lograra el mejor rendimiento a la hora de posicionarlo en el punto deseado.

Se crearon tablas que se almacenan en archivos *.mat* los cuales al interpolar con un ángulo en específico se encuentra un valor que varía entre un valor de 500 y 2500, para cada motor.

Diagrama de flujo básico para este taller

Durante este taller se trataran dos casos que dependen de la forma de los datos de entrada. El primero es la generación de puntos intermedios de tal forma que se genere una trayectoria amortiguada entre dos puntos en específico (de los cuales se conoce su orientación y posición), el segundo es el seguimiento de una trayectoria deseada y bien definida. Para esta primera parte se usarán el spline cúbico y las curvas de Bézier, como se mencionó anteriormente.



Spline Cúbico

Definido por la ecuación mostrada en el capítulo, $q(t) = a + b(t-t^i) + c(t-t^i)^2 + d(t-t^i)^3$, el código usado para encontrar esta trayectoria se divide en varias partes, en la primera de ellas se encuentran las coordenadas articulares del robot con la cinemática inversa calculada anteriormente.

```

%% valores estructurales
l0=7;l1=10;l2=12.5;l3=9;
%% valores punto inicial, punto final (posición-orientación)
X4(1)=-12;Y4(1)=20;Z4(1)=7;teta234(1)=0;giro(1)=0;
X4(2)=20;Y4(2)=8;Z4(2)=20;teta234(2)=0;giro(2)=pi;n=100;
%% cinemática inversa
]for i=1:2
    r4=(X4(i)^2+Y4(i)^2)^0.5;
    z3=Z4(i)-l3*sin(teta234(i));
    r3=r4-l3*cos(teta234(i));
    c=(r3^2+(z3-l0)^2)^0.5;
    Beta=atan((z3-l0)/r3);
    cosalfa=(l2^2-c^2-l1^2)/(-2*l1*c);
    cosgama=(c^2-l1^2-l2^2)/(-2*l1*l2);
    alfa=real(acos(cosalfa));
    gama=real(acos(cosgama));%coordenadas articulares
    q1(i)=pi/2+atan(X4(i)/Y4(i));
    q2(i)=Beta+alfa;
    q3(i)=pi-gama;
    q4(i)=teta234(i)-q2(i)+q3(i)+pi/2;
    q5(i)=giro(i);
-end

```

Después de este paso, se continúa hallando los coeficientes necesarios para el polinomio cúbico, junto con el almacenamiento de los valores que resultan de estas ecuaciones.

```

%% coeficientes ecuación spline cúbica
q1a0=q1(1);
q1a2=(3/(n-1)^2)*(q1(2)-q1(1));
q1a3=-(2/(n-1)^3)*(q1(2)-q1(1));
q2a0=q2(1);
q2a2=(3/(n-1)^2)*(q2(2)-q2(1));
q2a3=-(2/(n-1)^3)*(q2(2)-q2(1));
q3a0=q3(1);
q3a2=(3/(n-1)^2)*(q3(2)-q3(1));
q3a3=-(2/(n-1)^3)*(q3(2)-q3(1));
q4a0=q4(1);
q4a2=(3/(n-1)^2)*(q4(2)-q4(1));
q4a3=-(2/(n-1)^3)*(q4(2)-q4(1));
q5a0=q5(1);
q5a2=(3/(n-1)^2)*(q5(2)-q5(1));
q5a3=-(2/(n-1)^3)*(q5(2)-q5(1));
%% calculo de q(i) mediante polinomio cubico
]for i=1:n
    qq1(i)=q1a0+q1a2*(i-1)^2+q1a3*(i-1)^3;
    qq2(i)=q2a0+q2a2*(i-1)^2+q2a3*(i-1)^3;
    qq3(i)=q3a0+q3a2*(i-1)^2+q3a3*(i-1)^3;
    qq4(i)=q4a0+q4a2*(i-1)^2+q4a3*(i-1)^3;
    qq5(i)=q5a0+q5a2*(i-1)^2+q5a3*(i-1)^3;
-end

```

Por ultimo tenemos el código necesario para enviar la información pertinente a la tarjeta de control, junto con los códigos de las gráficas que muestran estos resultados.

```

%% información servomotores, y carga de tablas características
servocero='#0P';servouno='#1P';servodos='#2P';servotres='#3P';
servocuatro='#4P';servocinco='#5P';
load servocerot
load servocuatrot
load servounot
load servodost
load servotrest

%% posición inicial
b=interp1(servocerot(:,1),servocerot(:,2),qq1(1),'nearest');
bs=num2str(b);
comand1=strcat(servocero,bs);
b=interp1(servounot(:,1),servounot(:,2),qq2(1),'nearest');
bs=num2str(b);
comand2=strcat(servouno,bs);
b=interp1(servodost(:,1),servodost(:,2),qq3(1),'nearest');
bs=num2str(b);
comand3=strcat(servodos,bs);
b=interp1(servotrest(:,1),servotrest(:,2),qq4(1),'nearest');
bs=num2str(b);
comand4=strcat(servotres,bs);
b=interp1(servocuatrot(:,1),servocuatrot(:,2),qq5(1),'nearest');
bs=num2str(b);
comand5=strcat(servocuatro,bs);
fprintf(obj,comand1); fprintf(obj,comand2); fprintf(obj,comand3);
fprintf(obj,comand4); fprintf(obj,comand5);
pause(2)

%% envío de datos a la tarjeta SSC-32
for i=1:n
    b=interp1(servocerot(:,1),servocerot(:,2),qq1(i),'nearest');
    bs=num2str(b);
    comand1=strcat(servocero,bs);
    b=interp1(servounot(:,1),servounot(:,2),qq2(i),'nearest');
    bs=num2str(b);
    comand2=strcat(servouno,bs);
    b=interp1(servodost(:,1),servodost(:,2),qq3(i),'nearest');
    bs=num2str(b);
    comand3=strcat(servodos,bs);
    b=interp1(servotrest(:,1),servotrest(:,2),qq4(i),'nearest');
    bs=num2str(b);
    comand4=strcat(servotres,bs);
    b=interp1(servocuatrot(:,1),servocuatrot(:,2),qq5(i),'nearest');
    bs=num2str(b);
    comand5=strcat(servocuatro,bs);
    fprintf(obj,comand1); fprintf(obj,comand2); fprintf(obj,comand3);
    fprintf(obj,comand4); fprintf(obj,comand5);
    pause(0)
end

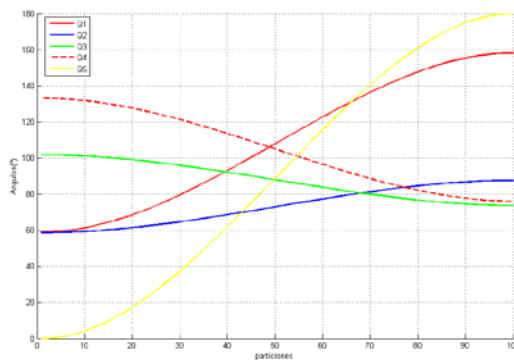
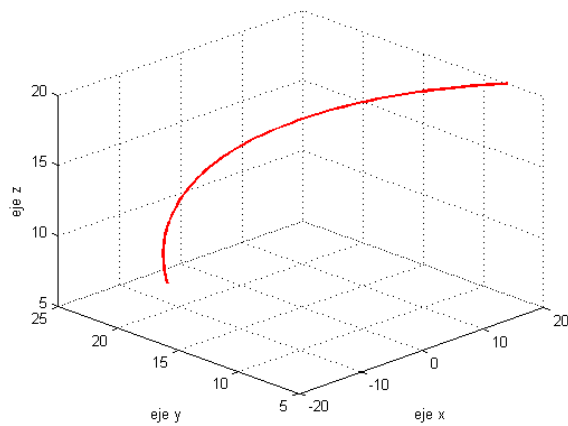
```

```

%% graficas de salida
%% trayectoria seguida por el efector final
N=1:n;
plot3(Z4,Y4,Z4,'r','LineWidth',2)
xlabel('eje x')
ylabel('eje y')
zlabel('eje z')
grid on
%% graficas de valores articulares
figure
plot(N,qq1,'r','LineWidth',2)
hold on
plot(N,qq2,'b','LineWidth',2)
hold on
plot(N,qq3,'g','LineWidth',2)
hold on
plot(N,qq4,'--r','LineWidth',2)
hold on
plot(N,qq5,'y','LineWidth',2)
xlabel('particiones')
ylabel('Ángulos(°)')
grid on

```

Y las gráficas obtenidas son las siguientes:



Donde la primera muestra la trayectoria seguida en el espacio y la segunda el cambio de ángulos en las articulaciones con respecto al número de particiones.

Curvas de Bézier

Al igual que con el método anterior, se sigue un diagrama de flujo idéntico al anterior, la forma como se consiguen los puntos es distinta y se necesita encontrar las coordenadas articulares usando la cinemática inversa.

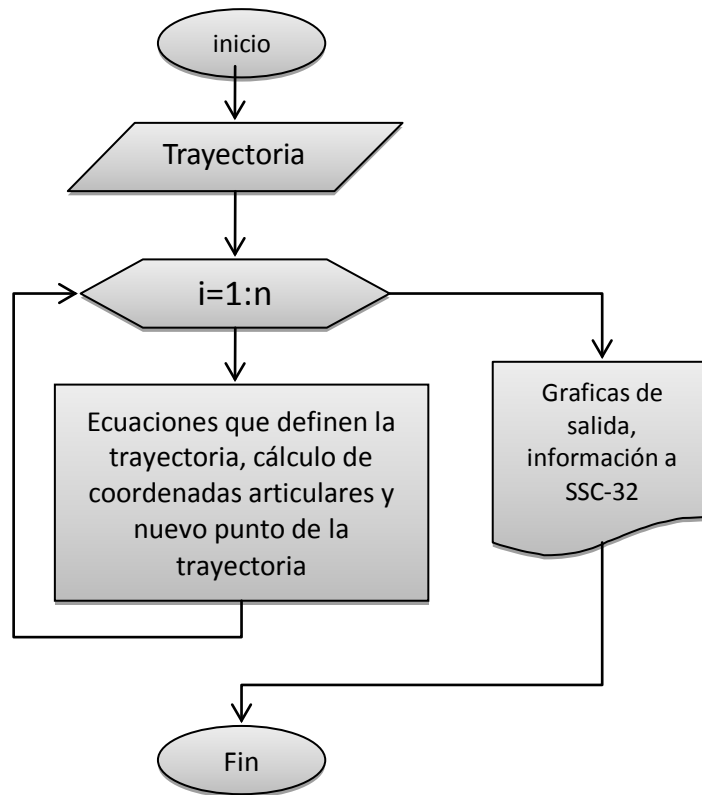
```
% ORIENTACIÓN)
robotAL5B
l0=0.07; l1=0.10; l2=0.125; l3=0.11; Y4(1)=0; X4(1)=0.20; Z4(1)=0.07;
Z4(1)=0.07;
%introducción de los puntos inicial, final, puntos intermedios
P0=[-0.02,0.10,0.07,-pi/4]; P3=[0.20,0,0.12,0]; P1=[-0.02,0.10,0.07,-pi/4];
P2=[0.20,0,0.12,0]; j=1;
for i=0:0.01:1
    X4(j)=P0(1)*(1-i)^3+3*P1(1)*i*(1-i)^2+3*P2(1)*i^2*(1-i)+P3(1)*i^3;
    Y4(j)=P0(2)*(1-i)^3+3*P1(2)*i*(1-i)^2+3*P2(2)*i^2*(1-i)+P3(2)*i^3;
    Z4(j)=P0(3)*(1-i)^3+3*P1(3)*i*(1-i)^2+3*P2(3)*i^2*(1-i)+P3(3)*i^3;
    teta234(j)=P0(4)*(1-i)^3+3*P1(4)*i*(1-i)^2+3*P2(4)*i^2*(1-i)+P3(4)*i^3;
    j=j+1;
end
for i=1:101
    r4=(X4(i)^2+Y4(i)^2)^0.5;
    z3=Z4(i)-l3*sin(teta234(i));
    r3=r4-l3*cos(teta234(i));
    c=(r3^2+(z3-l0)^2)^0.5;
    Beta=atan((z3-l0)/r3);
    cosalfa=(l2^2-c^2-l1^2)/(-2*l1*c);
    cosgama=(c^2-l1^2-l2^2)/(-2*l1*l2);
    alfa=real(acos(cosalfa)); gama=real(acos(cosgama));
    %calculo de las coordenadas articulares
    q1(i)=pi/2+atan(Y4(i)/X4(i));
    qs1(i)=q1(i)-pi/2;
    q2(i)=Beta+alfa;
    qs2(i)=q2(i);
    q3(i)=pi-gama;
    qs3(i)=-q3(i);
    q4(i)=teta234(i)-q2(i)+q3(i)+pi/2;
    qs4(i)=teta234(i)-qs2(i)+q3(i);
end
```

Curvas de Bézier

Cinemática inversa

Seguimiento de una trayectoria estipulada por el usuario

En esta modalidad se desarrollaron 3 funciones, la primera de ellas es que el efector final siga la secuencia de puntos para que este realice una espiral en el espacio, como segundo programa está la posibilidad de moverse de un punto inicial a otro final a través de una línea recta, y por último se encuentra la función conocida como “pick and place”, en la cual se darán dos puntos (donde se recoge y donde se coloca) y el brazo robótico seguirá una secuencia de movimientos armoniosa y eficiente para llegar a este punto. Un diagrama de flujo de estas funciones puede ser:



Espiral

En este programa como variables de entrada se tiene el punto inicial de la espiral y el radio de la misma.

```

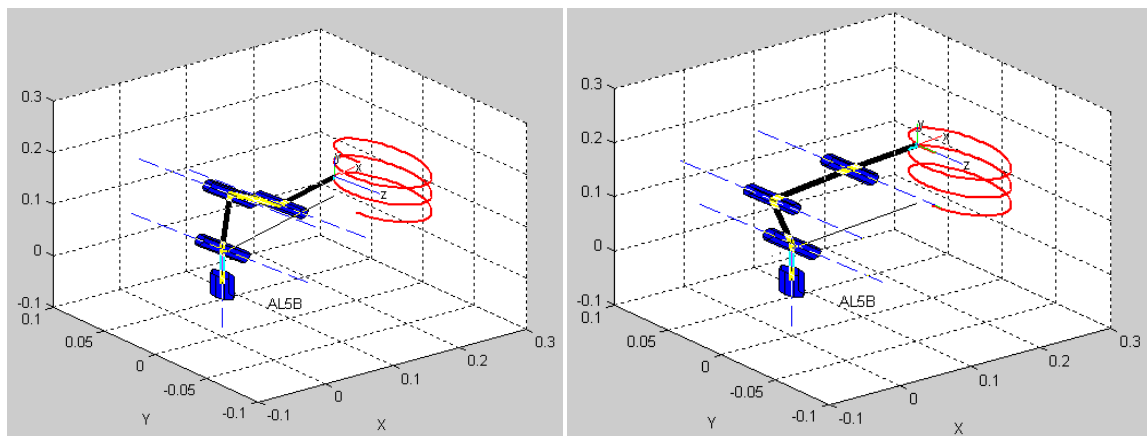
%% VALORES DEL PUNTO FINAL (POSICIÓN, ORIENTACIÓN) E INFORMACIÓN
i=1;teta234=0;n=192;deltateta=pi/32;Z4f=0.17;deltaz=(Z4f-Z4(1))/192;tetat=0;r=0.04;
while i<=n+1
    r4=(X4(i)^2+Y4(i)^2)^0.5;
    z3=Z4(i)-13*sin(teta234);
    r3=r4-13*cos(teta234);
    c=(r3^2+(z3-10)^2)^0.5;
    Beta=atan((z3-10)/r3);
    cosalfa=(12^2-c^2-11^2)/(-2*11*c);
    cosgama=(c^2-11^2-12^2)/(-2*11*12);
    alfa=real(acos(cosalfa));gama=real(acos(cosgama));

    %% calculo de las coordenadas articulares
    q1(i)=pi/2+atan(Y4(i)/X4(i));
    qs1(i)=q1(i)-pi/2;
    q2(i)=Beta+alfa;
    qs2(i)=q2(i);
    q3(i)=pi-gama;
    qs3(i)=-q3(i);
    q4(i)=teta234-q2(i)+q3(i)+pi/2;
    qs4(i)=teta234-qs2(i)+q3(i);
    i=i+1;
    tetat=tetat+deltateta;

    %% nuevo punto en la trayectoria
    Y4i=-r*sin(tetat);
    Y4(i)=Y4i;
    X4(i)=X4(1)+r*(1-cos(tetat));
    Z4(i)=Z4(i-1)+deltaz;
end

```

Al igual que los programas anteriores se usa la cinemática inversa para calcular los valores de las coordenadas articulares, también se calcula un nuevo punto en la trayectoria y se vuelve a empezar. Como resultado se arroja una animación del robot AL5B construido con la toolbox siguiendo la trayectoria de la espiral.



Línea recta entre dos puntos

Con las ecuaciones paramétricas de la recta, se logran encontrar n puntos que unan los puntos de inicio y fin de la trayectoria. El código desarrollado no es muy diferente de los códigos mostrados anteriormente.

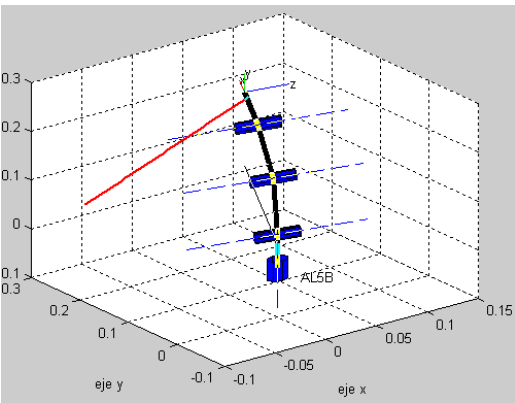
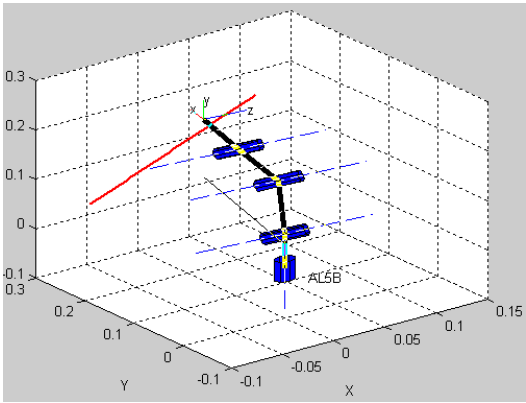
```

%valores punto inicial, punto final (posición-orientación)
X4(1)=0.20;Y4(1)=0.14;Z4(1)=0.07;teta234(1)=0;giroi=0;
Xf=0.23;Yf=-0.12;Zf=0.20;teta243f=0;
n=100;
%parametros de la recta
a=(Xf-X4(1))/n;
b=(Yf-Y4(1))/n;
c1=(Zf-Z4(1))/n;
for i=1:n+1
    %cinemática inversa
    r4=(X4(i)^2+Y4(i)^2)^0.5;
    z3=Z4(i)-l3*sin(teta234(i));
    r3=r4-l3*cos(teta234(i));
    c=(r3^2+(z3-l0)^2)^0.5;
    Beta=atan((z3-l0)/r3);
    cosalfa=(l2^2-c^2-l1^2)/(-2*l1*c);
    cosgama=(c^2-l1^2-l2^2)/(-2*l1*l2);
    alfa=real(acos(cosalfa));
    gama=real(acos(cosgama));
    q1(i)=pi/2+atan(Y4(i)/X4(i));qs1(i)=q1(i)-pi/2;
    q2(i)=Beta+alfa;qs2(i)=q2(i);
    q3(i)=pi-gama;qs3(i)=-q3(i);
    q4(i)=teta234(i)-q2(i)+q3(i)+pi/2;qs4(i)=teta234(i)-qs2(i)+q3(i);
    %ecuación de la recta y cambio de orientación
    X4(i+1)=X4(1)+a*i;Y4(i+1)=Y4(1)+b*i;Z4(i+1)=Z4(1)+c1*i;
    teta234(i+1)=teta234(1)+((teta243f-teta234(1))/100)*i;
end

```

Ecuaciones paramétricas

Nuevo punto en la recta



Pick and Place

Esta función consiste más que todo en encontrar una secuencia de movimiento a la hora de desarrollar la tarea de recoger y ubicar. Primero debemos definir los puntos que serán home (punto de partida), pick (punto donde se recoge el objeto a ubicar), y place (punto objetivo).

```

%% pick and place
%% home
global obj
%% xhome=0;yhome=12.5*cos(pi/4)+1;zhome=7+12.5*sin(pi/4);teta234home=0;girohome=0;
xhome=0;yhome=14;zhome=11;teta234home=-pi/6;girohome=0;

%% punto pick
xpick=12;ypick=0;zpick=1;giropick=0;
%% punto place
xplace=-6;yplace=12;zplace=1;giroplace=0;
r1=(xpick^2+ypick^2)^0.5;
r2=(xplace^2+yplace^2)^0.5;
if r1<20
    aprox1x=xpick;aprox1y=ypick;aprox1z=7;aprox1teta=-pi/2;aprox1giro=giropick;
    tetapick=-pi/2;
else
    aprox1y=ypick-5;aprox1x=aprox1y*xpick/ypick;aprox1z=10;aprox1teta=-pi/6;aprox1giro=giropick;
    tetapick=-pi/6;
end

```

Después se procede a llevar a cabo una serie de movimientos para que se lleve a cabo la tarea con éxito. Se creó una función, llamada cúbico, la cual dándole dos puntos me genera una trayectoria de Spline cúbico, gracias a esta función se puede dividir la tarea en una serie de subtareas entre las cuales se encuentra llegar a dos puntos los cuales se llaman aproximación 1 y aproximación 2. Por tanto la tarea consistirá en:

1. Salir de home y llegar al punto de aproximación 1
2. Salir del punto de aproximación uno y llegar al punto de pick
3. Cerrar gripper
4. Salir al punto de aproximación 2
5. Salir del punto de aproximación 2 y llegar al punto de place
6. Abrir gripper
7. Volver a aproximación 2
8. Volver a home

A continuación se muestra el código para esta tarea:

```

%% home to approximation 1
[cul,cu2,cu3,cuteta,cugiro]=cubico(xhome,yhome,zhome,teta234home,girohome,aprox1x,aprox1y,aprox1z,a
aprox1 = [cul,cu2,cu3,cuteta,cugiro];
pause(0.5)
%% approximation 1 to pick
[cul,cu2,cu3,cuteta,cugiro]=cubico(aprox1(1),aprox1(2),aprox1(3),aprox1(4),aprox1(5),xpick,ypick,zp
pick = [cul,cu2,cu3,cuteta,cugiro];
tetaplace=tetapick;
pause(1)
%% close gripper
fprintf(obj,'#5P2200');
pause(1)
if r2<20
    aprox2x=xplace;aprox2y=yplace;aprox2z=7;aprox2teta=-pi/2;aprox2giro=giroplace;
else
    aprox2y=yplace-5;aprox2x=aprox2y*xplace/yplace;aprox2z=10;aprox2teta=-pi/6;aprox2giro=giropick;
end
%% pick to approximation 2
[cul,cu2,cu3,cuteta,cugiro]=cubico(pick(1),pick(2),pick(3),pick(4),pick(5),aprox2x,aprox2y,aprox2z,
%% approximation 2 to place
pause(0.5)
aprox2=[cul,cu2,cu3,cuteta,cugiro];
[cul,cu2,cu3,cuteta,cugiro]=cubico(aprox2(1),aprox2(2),aprox2(3),aprox2(4),aprox2(5),xplace,yplace,
place=[cul,cu2,cu3,cuteta,cugiro];
pause(1)
%% open gripper
fprintf(obj,'#5P500');

.
.
.
%% place to approximation 2
cubico(place(1),place(2),place(3),place(4),place(5),aprox2(1),aprox2(2),aprox2(3),aprox2(4),aprox2(5));
%% aprox2=cubico(place(1),place(2),place(3),place(4),place(5),aprox2(1),aprox2(2),aprox2(3),aprox2(4),aprox2(5));
%% approximation 2 to home
pause(0.5)
asdfasd=1;
cubico(aprox2(1),aprox2(2),aprox2(3),aprox2(4),aprox2(5),xhome,yhome,zhome,teta234home,girohome);

```

Gracias a todas las funciones y tareas programadas en este taller, se pudo llevar a cabo la implementación de los recursos adquiridos como lo son el robot didáctico AL5B y su tarjeta de control. Para futuras aplicaciones se desarrollará una interfaz gráfica que permita al usuario escoger entre los diferentes programas además de la implementación de nuevas funciones.

ANEXO B

DESCRIPCIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO AL5B DE LYNXMOTION

El brazo robótico AL5B proporciona un movimiento rápido, preciso y repetible. Las características del robot: rotación de la base, hombro, codo, movimiento de la muñeca, pinza funcional (efector final), y la opción de girar la muñeca. El brazo robótico AL5B es un sistema con un diseño de larga duración. Todo lo necesario para montar y operar el robot está incluido en el kit, con diferentes opciones de software de control.

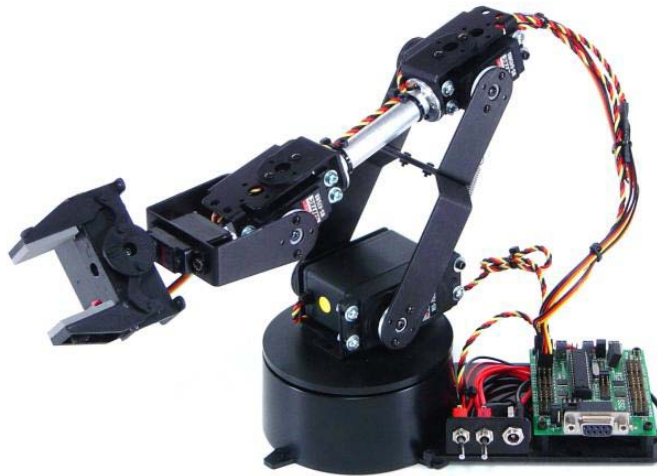
Elementos mecánicos

El kit del brazo robótico AL5B consta de los siguientes componentes

- Soportes negros de aluminio
- Tubos de aluminio
- Base a base de polímero.
- Piezas de unión cortadas a laser con alta precisión
- Servomotores Hitec
 - 1 x HS-422 (a HS-425BB o HS-322HD puede ser sustituido) servostandard
 - 2 x HS-475HB / HS-485HB standard-size servo
 - 1 x HS-645MG standard-size servo
 - 1 x HS-755HB large-scale servo
- Paquete electrónico:
 - SSC-32 controladora de servos ([SSC-32](#))
 - DB9 Cable Serial Data ([DB9-02](#))
 - Paquete regulador ([WP-04](#))

El manual de ensamblaje se encuentra disponible en el sitio web oficial de la empresa: <http://www.lynxmotion.com/driver.aspx?Topic=assem01>

Robot AL5B con rotación en la muñeca



Fuente: <http://www.lynxmotion.com/images/product/large/al5b01.jpg>

Tarjeta controladora de servos SSC-32

Tarjeta controladora SSC-32



Fuente: <http://www.lynxmotion.com/images/product/large/ssc32.jpg>

Salvo el modo MiniSSC-II, todos los comandos SSC-32 deben terminar en un carácter de retorno de carro (ASCII 13). Se pueden ejecutar varios comandos del mismo tipo de forma simultánea en un Grupo de comandos. Todos los comandos incluidos en un grupo de comandos se ejecutarán después de recibir el retorno de carro. Los comandos de tipos diferentes no pueden combinarse dentro del mismo

grupo de comandos. Además, los argumentos numéricos para todos los comandos SSC-32 deben ser cadenas ASCII de los números decimales, por ejemplo, "1234". Algunos comandos admiten números negativos, por ejemplo, "-5678". Se proporcionarán ejemplos de programación más adelante. El formato de ASCII no es sensible al uso de mayúsculas/minúsculas. Use cuantos bytes sean necesarios. Se ignorarán los espacios, tabuladores y saltos de líneas.