



RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE PERFILES EXTRUIDOS UTILIZANDO TRIANGULACIÓN LÁSER.

Ing. JUAN CARLOS RAMÍREZ ROJAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERIA ELECTRÓNICA.
BUCARAMANGA
2011

RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE
PERFILES EXTRUIDOS UTILIZANDO TRIANGULACIÓN LÁSER.

AUTOR:

Ing. JUAN CARLOS RAMÍREZ ROJAS

Presentado ante el Consejo de Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones, como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería Electrónica.

DIRECTOR:

MPE. JAIME BARRERO PÉREZ

CODIRECTOR:

Dr. JAIME MENESES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA ELECTRONICA Y
TELECOMINUICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERIA ELECTRÓNICA.
BUCARAMANGA
2011

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis sinceros agradecimientos a:

- ❖ A mis padres y a mis hermanos, por apoyarme en este proceso de formación académica.
- ❖ Al Doctor Jaime Enrique Meneses Fonseca, por su gran paciencia, apoyo incondicional, y sobre todo por su orientación profesional.
- ❖ Al Magister Jaime Barrero Pérez, por su amistad, su valioso apoyo durante todo el proceso y también por motivarme y apoyarme a culminar esta Maestría.
- ❖ A todos mis compañeros y profesores del Grupo de Óptica y tratamiento de señales.
- ❖ A todas las personas que contribuyeron al logro de este objetivo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.	14
1 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR TRIANGULACIÓN LASER LINEAL.	15
1.1 Introducción.	15
1.2 Reconstrucción tridimensional.	15
1.3 Reconstrucción por triangulación laser.	18
1.4 Procedimiento de calibración experimental.	20
2 CALIBRACIÓN DE CÁMARAS.	24
2.1 Introducción.	24
2.2 Calibración de una cámara.	24
2.2.1 Modelo de cámaras con distorsiones geométricas.	27
2.2.1.1 Distorsión radial.	27
2.2.1.2 Distorsión descentral.	28
2.2.2 Notación matricial.	29
2.2.2.1 Transformación lineal directa (DLT).	31
2.2.2.2 Calculo de parámetros intrínsecos y extrínsecos.	32
3 IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.	35
3.1 Introducción.	35
3.2 Sistema óptico de triangulación laser implementado.	35
3.2.1 Sistema de proyección.	36
3.2.2 Sistema de observación.	37
3.2.3 Sistema de control, adquisición y procesamiento de imágenes.	38
3.4 Diseño del chasis.	39
3.5 Diseño de la electrónica.	39
3.4 Montaje de equipos.	40
3.5 Ensamble general y pruebas.	41

4	CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL DEL DISPOSITIVO DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL.	43
4.1	Introducción.	43
4.2	Calibración de las cámaras.	44
4.3.1.1	Optimización.	46
4.3.1.2	Parámetros Intrínsecos Cámara CCD 1, 2, 3 y 4.	47
4.3.1.3	Parámetros Extrínsecos de las Cámaras CCD 1, 2, 3 y 4.	48
4.4	Análisis del error en el cálculo de los parámetros de calibración.	49
4.4.1	Distancia entre VR y VE, y estimación error para la Cámara 1.	54
4.4.2	Distancia entre VR y VE y estimación error para la Cámara 2.	55
4.4.3	Distancia entre VR y VE y estimación error para la Cámara 3.	56
4.4.4	Distancia entre VR y VE y estimación error para la Cámara 4.	57
4.5	Unificación de sistemas coordenados.	58
5	RECONSTRUCCIÓN 3D.	62
5.1	Reconstrucción 3D de cada cámara.	62
5.2	Unificación de sistemas coordenados.	62
5.3	Análisis del error en la reconstrucción 3D.	65
5.3.1	Influencia del ruido en la imagen de la línea láser para calcular el valor de Z.	65
5.3.2	Influencia del error en el cálculo de los parámetros de calibración de cámara.	66
5.3.3	Influencia de la unificación del sistema coordenado.	66
5.4	Conclusión.	67
	CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.	69
	PUBLICACIONES REALIZADAS.	71
	BIBLIOGRAFÍA.	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Codificación de la coordenada Z.	16
Figura 2a y 2b.	Principio de codificación de la altura por medio de triangulación.	18
Figura 3.	Geometría de la triangulación láser usada.	19
Figura 4.	Sistema de coordenadas involucradas para el procedimiento de calibración.	20
Figura 5.	Proyección láser sobre el plano de referencia para Z = a) - 10mm b) 0 c) 10mm.	21
Figura 6.	Curva de calibración para la cámara 1.	22
Figura 7.	Imagen de la curva de calibración interpolada para la cámara 1.	22
Figura 8.	Grilla de calibración (Tamaño del cuadro 3x3 [mm]).	25
Figura 9.	Sistemas coordenados utilizados para calibrar las cámaras.	26
Figura 10.	Componentes de la distorsión geométrica.	28
Figura 11 a y b.	Esquema renderizado del Sistema óptico de triangulación láser implementado y principio de funcionamiento.	36
Figura 12.	Esquema renderizado de sistema de proyección de la línea láser.	37
Figura 13.	Cámara CCD AS-1368C.	37
Figura 14.	Tarjeta Matrox Meteor II.	38
Figura 15.	Fuente switching.	40
Figura 16.	Sistema óptico de triangulación láser construido.	40
Figura 17 a.	Proyecciones con los láseres desalineados.	Figura b.
	Proyecciones luego del procedimiento de alineación.	41
Figura 18.	Imágenes para calibración de la Cámara 1.	44
Figura 19.	Sistema coordenado de la cámara.	45
Figura 20.	Extracción de puntos de control de la imagen (a) Puntos de Control para imagen libre de distorsiones, (b) Puntos Retro proyectados.	46

Figura 21.	Error en píxeles en la retroproyección para la cámara 1.	47
Figura 22.	Transformación geométrica que relaciona píxeles distorsionados y no distorsionados.	49
Figura 23.	Relación de píxeles distorsionados a no distorsionados.	50
Figura 24.	Geometría para determinar las coordenadas de un punto en el espacio objeto.	51
Figura 25.	Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 1.	52
Figura 26.	Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 2.	52
Figura 27.	Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 3.	53
Figura 28.	Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 4.	53
Figura 29.	Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD1.	54
Figura 30.	Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD2.	55
Figura 31.	Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD3.	56
Figura 32.	Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD4.	57
Figura 33.	Esquema de montaje para calibración.	58
Figura 34.	Secuencia de imágenes desplazadas cada 5° para calcular el eje de rotación en la cámara 1.	60
Figura 35.	Extracción de los puntos vértices para el plano $\Theta=0$ de la cámara 1.	60
Figura 36 a y b.	Intersección de planos y cálculo del eje de rotación del sistema.	61
Figura 37.	Superposición de planos para la cámara 1.	61
Figura 38.	Imágenes tomadas por las 4 cámaras para un perfil metálico.	63
Figura 39.	Esquema de unificación de sistemas coordenados.	64
Figura 40 a y b.	Unificación de sistemas coordenados 2.	64

Figura 41.	Reconstrucción de la sección transversal de un perfil.	65
Figura 42.	Matrices de calibración laser.	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de los métodos ópticos comúnmente usados.	17
Tabla 2.	Especificaciones Cámara CCD AS-1368C.	38
Tabla 3.	Parámetros Intrínsecos cámaras 1, 2, 3 y 4.	47
Tabla 4.	VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD1.	54
Tabla 5.	VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD2.	55
Tabla 6.	VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD3.	56
Tabla 7.	VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD4.	57

RESUMEN

RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE PERFILES EXTRUIDOS UTILIZANDO TRIANGULACIÓN LÁSER.

AUTOR: JUAN CARLOS RAMÍREZ ROJAS

PALABRAS CLAVE: Triangulación, Reconstrucción, Discriminación de bordes, CCD, Lasér, óptica, calibración

En esta investigación se implementa un sistema prototipo óptico, que permite realizar una reconstrucción tridimensional de la sección transversal de un perfil extruido sin necesidad de estar en contacto con él, manteniendo excepcional precisión.

Debido al carácter dinámico del proceso de extrusión, la medida se realiza de manera no invasiva (sin tocar la superficie del cuerpo). Por lo tanto se determina la información topográfica de la superficie del perfil, utilizando un dispositivo óptico de reconstrucción tridimensional basado en triangulación láser y procesamiento de imágenes.

En el dispositivo de triangulación se proyecta un patrón láser que en este caso es una línea recta, la cual forma un ángulo conocido entre el objeto a iluminar y una cámara CCD que tomara la información de la intensidad luminosa del perfil en estudio.

En la investigación se realiza el montaje necesario para la triangulación valiéndose de cuatro diodos láser y cuatro espejos octogonales perfectamente pulidos que haciéndose girar a alta velocidad y al entrar en contacto con el haz puntual de luz láser esta se convierte en una línea recta, la cual hace contacto sobre la sección transversal del perfil a medir.

Cuatro cámaras CCD son colocadas a noventa grados una de otra, con un ángulo conocido con respecto al plano laser, las cuales previamente calibradas, toman la imagen del láser sobre la superficie vista en los cuatro ángulos, obteniendo una visión de 360°, y a través de un algoritmo implementado bajo el software Matlab se reconstruye adecuadamente la sección transversal del perfil objeto de estudio.

* FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERIA ELECTRÓNICA.
**DIRECTOR: Mpe. JAIME BARRERO PÉREZ
CODIRECTOR: Dr. JAIME MENESES

SUMMARY IN BRIEF

THREE DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF THE CROSS SECTION OF EXTRUDED PROFILES BY LASER TRIANGULATION

AUTHOR: JUAN CARLOS ROJAS RAMIREZ

KEYWORDS: Triangulation, Reconstruction, Border discrimination, CCD, laser, optics, calibration.

This research implements an optical prototype system, which allows three-dimensional reconstruction of cross section in an extruded profile without being in contact with them, maintaining exceptional accuracy.

Due to dynamic nature of extrusion process, the measurement is performed non-invasively (without touching the surface of body). Therefore determines the topographic surface profile optical device using a three-dimensional reconstruction based on laser triangulation and image processing.

In the triangulation device projects a laser pattern in this case is a straight line, which is a known angle between the object light and a CCD camera to take the information of the light intensity profile in the study.

In the research, assembles necessary for triangulation using four laser diodes and four octagonal mirrors becoming perfectly polished, high-speed spin in contact with the spot beam of laser light it becomes a straight line, which contacts over the cross section of the profile to be measured.

Four CCD cameras are placed at 90° to each other, with a known angle to the plane laser, which previously calibrated, take the image of the laser on the surface seen in the four corners, giving a 360° , and through an algorithm implemented under the Matlab software properly reconstructed profile cross section under study.

*FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
MASTER IN ELECTRONIC ENGIENIERING.
**DIRECTOR: Mpe. JAIME PEREZ BARRERO
CO-DIRECTOR: Dr. JAIME MENESES

INTRODUCCIÓN

Actualmente los procesos en los que emplean métodos ópticos de reconstrucción 3D están en aumento, debido a las ventajas que estos métodos ofrecen, como por ejemplo la no necesidad de entrar en contacto con el objeto a medir. Amplios sectores de la industria, la medicina, la rama judicial, entre otros, han adoptado sistemas confiables de reconstrucción tridimensional a sus procesos. Proyección de franjas, triangulación laser, visión estéreo, son solo algunos ejemplos de estos métodos.

En esta investigación se implementa un sistema prototipo óptico para resolver un problema de la industria; y es como medir la sección transversal de perfiles en una línea de producción sin necesidad de estar en contacto con ellos. El sistema se basa en el principio de medición por triangulación láser, y el procesamiento digital de imágenes. En un computador personal, se hace el procesamiento de imágenes, para reconstruir la sección transversal momentánea del perfil, de donde se pueden extraer dimensiones tales como ancho total o parcial, alto total o parcial, profundidad, ángulos de inclinación, y radios de curvatura.

Este documento describe los diferentes componentes que conforman este sistema de medición. En el capítulo 1 se presenta un resumen de las técnicas de reconstrucción por métodos ópticos más usadas, haciendo énfasis en la reconstrucción por triangulación laser. También se muestra en resumen del procedimiento de calibración experimental. En el capítulo 2 se describe un resumen de la teoría de calibración de cámaras y los modelos de cámaras con distorsiones geométricas. En el capítulo 3 se muestra el diseño del hardware para el equipo prototipo de medición, así como su construcción, incluyendo el ensamble de todos los elementos que lo componen. Iniciando con el chasis o marco, luego la disposición de los equipos laser y posteriormente las cámaras, que van conectadas a un computador, el cual procesará todas las imágenes adquiridas. En el capítulo 4 se implementa un procedimiento de calibración de cámaras y la unificación de sistemas coordenados, con el objetivo de reconstruir la sección transversal del objeto en estudio, que se presentan en el capítulo 5. Finalmente se presentan los resultados obtenidos con este sistema prototipo de medición, así como las conclusiones y posibles mejoras futuras.

1 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR TRIANGULACIÓN LÁSER LINEAL

1.1 INTRODUCCIÓN

En la última década los sistemas de reconstrucción tridimensional por vía óptica han adquirido una especial importancia en muchos campos de la ciencia y la tecnología, como en procesos productivos, medicina, criminalística, entre otros.

Por definición, reconstruir tridimensionalmente un objeto significa tomar información de su superficie, desde una o varias posiciones en el espacio, y plasmarla dentro de un modelo digital en un sistema coordenado, con el fin de extraer información de su topografía. Para lograr estos objetivos es necesario, primero implementar un sistema de adquisición de imágenes y luego calibrarlo de forma tal que se puedan convertir las unidades en píxeles que toma la cámara a una unidad de longitud, por ejemplo, pulgadas o metros y que se adapte a las características del proceso.

1.2 RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL

Si se desea reconstruir un objeto tridimensional es necesario formar una imagen de su superficie como se indica en la figura 1. La lente captura los rayos luminosos emitidos de los diferentes puntos de la superficie y los hace converger al plano imagen, siguiendo las leyes de la óptica geométrica, y formando una imagen bidimensional. Como resultado del proceso de proyección en la formación de la imagen se pierde información de la coordenada espacial del punto medida en la dirección del eje óptico. Como se observa en la figura 1, los puntos P_1 y P_2 se proyectan en la imagen sobre el punto P_i , perdiéndose la distancia Z , llamada altura del punto P_2 . Con el fin de recuperar la información perdida se suelen utilizar diferentes estrategias que permitan codificar la altura en otra variable que pueda ser tratada digitalmente.

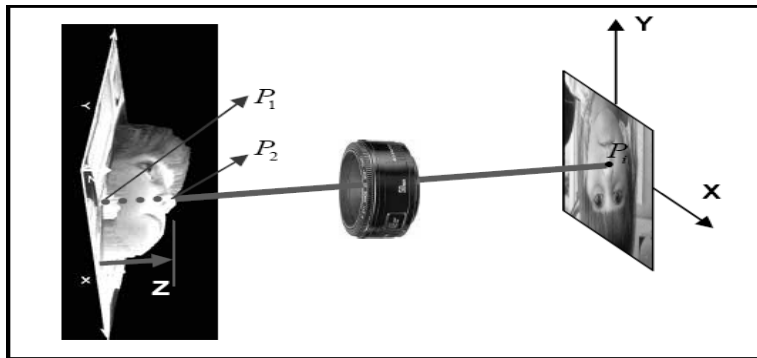


Figura 1. Codificación de la coordenada Z.

Existen múltiples estrategias para calcular la coordenada Z de un objeto, dentro de los cuales se encuentran los métodos que entran en contacto directo con el cuerpo en estudio, como cualquier tipo de galga de medida, y los que no entran en contacto, llamados métodos no invasivos, por ejemplo, los basados en ultrasonido y los procedimientos ópticos.

Los métodos ópticos de reconstrucción tridimensional se basan en una variable de naturaleza óptica para codificar Z. La variación del camino óptico de un haz luminoso, alteración de la fase del frente de onda, el corrimiento de la posición en el plano imagen de un punto láser, deformación del paso de un sistema de franjas, etc. Por lo general, se debe tener un sistema de iluminación y un sistema de adquisición de imágenes. La tabla 1 muestra algunos métodos ópticos utilizados en el diseño de dispositivos de medida tridimensional.

Clasificación	Método	Principio de Codificación	
Luz Estructurada	Láser	El patrón puede ser un punto, una línea, múltiples líneas o un patrón definido.	Se basa en triangulación, la altura para cada punto se codifica en el corrimiento del patrón con respecto a un nivel de referencia. Este corrimiento se debe a los cambios en la topografía del objeto.
	Binaria	Se utilizan patrones binarios bidimensionales que codifican la información en uno o en dos ejes.	
	Nivel de gris	Usa un patrón de iluminación en niveles de gris.	

	Cromática	El patrón de iluminación está asociado a una matriz de color.	
Métodos de medida de fase	Proyección de franjas	La altura del objeto se codifica en la deformación local del paso y orientación de las franjas proyectadas que están contenidas en un término de fase, que se debe recuperar.	
	Moiré	La altura del cuerpo se codifica en curvas de nivel, obtenidas por efecto Moiré debido a la proyección de sistemas de franjas de paso similar.	
	Interferometría	Consiste en variar el camino óptico y obtener información de fase de las franjas de interferencia. Puede ser a interferencia normal, oblicua o Interferometría a luz blanca.	
Tiempo de vuelo	Para calcular la distancia absoluta de un punto del objeto se envía un pulso de luz (usualmente láser) y se mide el retardo de tiempo del haz reflejado.		
Microscopía confocal	El cuerpo se ubica en un sistema de desplazamiento axial y la altura se determina identificando la posición donde se encuentra el máximo de intensidad del sistema confocal.		
Visión estéreo	A partir de dos imágenes tomadas a diferentes ángulos, se busca la correspondencia entre puntos equivalentes y se halla la profundidad, esto es semejante al sistema binocular humano.		

Tabla 1. Clasificación de los métodos ópticos comúnmente usados. Tomada de [3]

Dentro de los métodos mencionados anteriormente, los más utilizados en la industria son los métodos de proyección de franjas y triangulación láser, debido a la facilidad para implementarlos, no requiere de elementos sofisticados, el campo de observación y resolución se adopta a las condiciones industriales y no requiere de contacto directo con el objeto.

Para el desarrollo del dispositivo de medida de la sección transversal del perfil se utilizó el método de triangulación laser.

1.3 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR TRIANGULACIÓN LÁSER

La técnica de reconstrucción por triangulación láser consiste en proyectar un punto o una línea láser sobre la superficie del objeto en estudio y medir su deformación. La Figura 2 muestra el principio básico de reconstrucción tridimensional por triangulación láser. En este caso la línea láser incide sobre la superficie del objeto formando un ángulo con el eje óptico de la cámara, que coincide con el eje Z del sistema coordenado de reconstrucción. Los ejes X,Y coinciden con el plano de focalización de la cámara. Como se observa en la Figura 2 la línea al propagarse en el espacio genera un plano láser que intercepta la superficie del objeto, observándose desde la cámara una línea deformada. La Figura 2a muestra un bloque de altura Z ubicado sobre el plano objeto o plano de focalización de la cámara (llamado plano de referencia), que al ser interceptado por el plano láser forma una línea discontinua que presenta un corrimiento ΔX sobre el plano imagen de la cámara. De esta manera Z se codifica en el corrimiento lateral ΔX , que puede ser determinado por tratamiento digital de la imagen adquirida. El corrimiento ΔX depende de Z, pero también depende de manera directa del ángulo de proyección y del factor de ampliación geométrica de la cámara. La Figura 2b muestra la deformación de la línea láser adquirida de la superficie de un objeto con forma variada. Cada punto de la línea posee un corrimiento ΔX que es función de Z para el punto de coordenadas (X,Y,Z) de la superficie. Las coordenadas (X,Y) del punto son deformadas por las coordenadas (X,Y) del plano imagen de la cámara y Z es calculado por tratamiento digital de la imagen y los parámetros del montaje experimental. Con el fin de extraer información de toda la superficie es necesario desplazar un plano láser paralelo al eje X a valores conocidos. Con este procedimiento se recupera información tridimensional de los puntos de la superficie mostrados por la CCD y que interceptan al plano láser. Experimentalmente se puede utilizar un punto láser en vez de una línea, pero se debe barrer la línea en X y Y con el fin de recuperar la información topográfica del cuerpo.

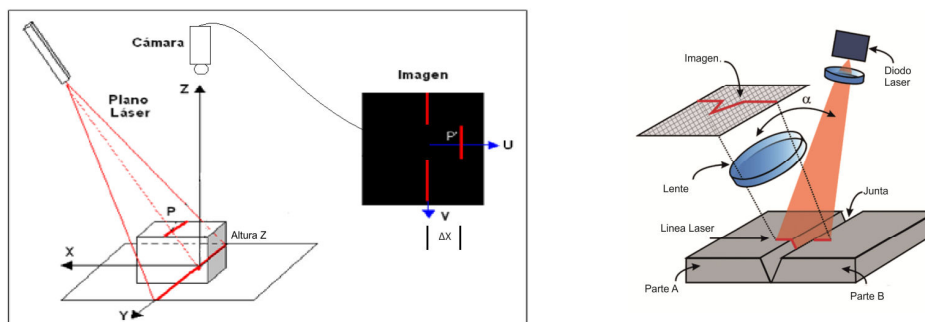


Figura 2a y 2b. Principio de codificación de la altura por medio de triangulación láser ^[10].

La Figura 3 muestra de manera general el esquema del montaje y los parámetros de la geometría del sistema de triangulación láser lineal. El plano láser se proyecta formando un ángulo θ con el eje Z. El sistema de observación forma un ángulo β con el eje Z y captura la imagen de la línea deformada. Al ubicar el objeto, el haz es interceptado en P formándose su imagen en P'.

Usando la Ley de Gauss para las lentes delgadas, se puede mostrar que la coordenada Z del punto P está relacionada con la coordenada U de su imagen P' según la expresión:

$$Z(U) = \frac{U \cos \beta}{M \cos(\theta + \beta) \left[\tan(\beta + \theta) + \frac{U}{f} \right]}, \quad (1)$$

Donde el factor de ampliación geométrica $M \cong f/d_o$, siendo f la focal efectiva del objetivo de la cámara y d_o la distancia desde O hasta el centro del sistema óptico del objetivo. Inicialmente U es medida en pixeles y convertida a milímetros sobre el plano imagen usando los parámetros del sensor de la cámara (Distancia entre pixeles).

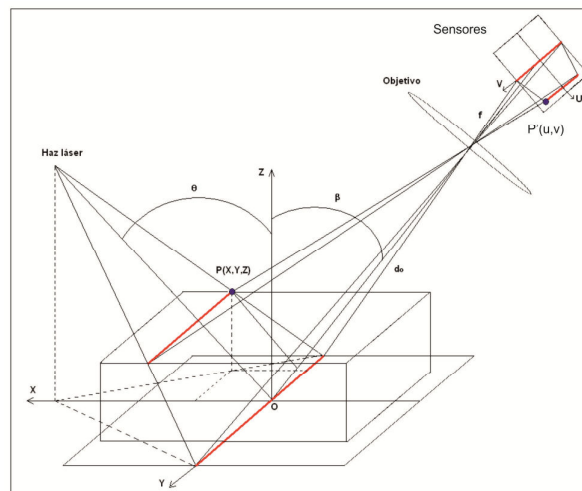


Figura 3. Geometría de la triangulación láser usada ^[4].

Para el caso cuando el eje óptico del sistema de observación es perpendicular al plano de referencia ($\beta = 0$), la expresión (1) queda:

$$Z(U) = U / M[\tan(\theta) + (u/f)]. \quad (2)$$

Para el mismo caso cuando $\theta = 0$, se obtiene la expresión que permite encontrar la coordenada Y del mismo punto P en el mundo real:

$$Y(U,V) = (d_0/f)V - UV\cos(\theta) / M[\tan(\theta) + (U/f)]. \quad (3)$$

Utilizando la ecuación 1 se obtiene la altura del cuerpo para los puntos digitalizados de su superficie, en función de las coordenadas (U,V) y los parámetros del sistema (θ , β , f , M). El procedimiento de reconstrucción se basa en la determinación de las coordenadas (U,V) en pixeles de los puntos sobre la imagen de la línea láser deformada. De igual forma se debe conocer previamente los valores teóricos de los parámetros del sistema. El error que se introduce en la determinación de la altura es determinado principalmente por la precisión al medir estos parámetros. Por lo tanto, es necesario buscar otra estrategia para mejorar la precisión del método sin necesidad de medir los parámetros del sistema. En la sección siguiente se mostrará en detalle el procedimiento de calibración experimental. Como se mencionaba anteriormente, para obtener la reconstrucción tridimensional completa de la superficie del cuerpo es necesario realizar un desplazamiento de la línea láser sobre la superficie del objeto en la dirección del eje X. Si se realizan desplazamientos a intervalos ΔX , las respectivas coordenadas X de todos los puntos sobre la n-ésima línea sería:

$$X = n\Delta X. \quad (4)$$

1.4 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION EXPERIMENTAL

El procedimiento mencionado anteriormente se realiza cuando son conocidos con precisión los parámetros del montaje, tales como distancias y ángulos entre los elementos. Si éstos no son conocidos o difíciles de medir con precisión, se debe efectuar un procedimiento de calibración experimental, el cual consiste en desplazar el plano de referencia en dirección del eje Z en un intervalo alrededor del origen (Punto 0 al punto M), obteniéndose el rango de medida del dispositivo.

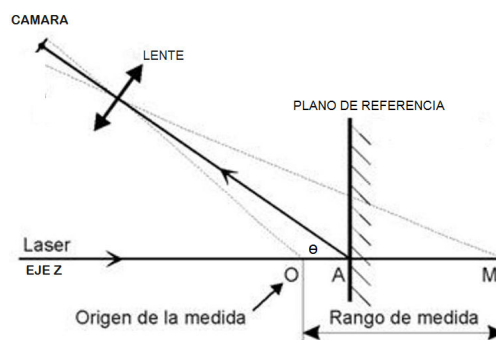


Figura 4. Sistema de coordenadas involucradas para el procedimiento de calibración.

La figura 4 muestra el procedimiento empleado para realizar la calibración donde el eje Z es perpendicular al plano de referencia y el eje óptico de la cámara forma un ángulo θ . La figura 5 muestra varias imágenes que evidencian el desplazamiento del plano entre el punto de origen 0 y el punto M. Este procedimiento se realiza con el principal objetivo de encontrar la relación experimental entre píxeles (u,v) y milímetros Z correspondientes a la altura del objeto.

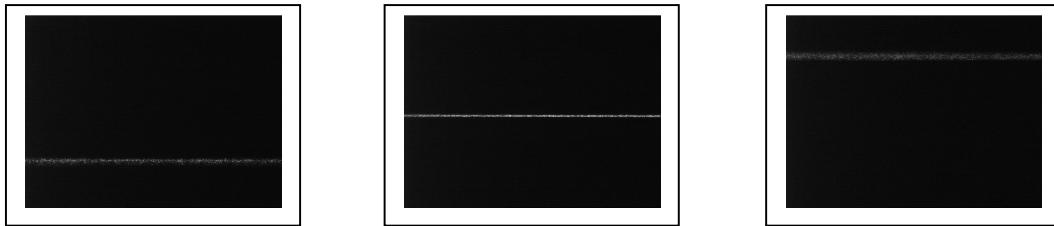


Figura 5. Proyección láser sobre el plano de referencia para Z = a) -10mm b) 0 c) 10mm

Como se observa en la figura 5, existe un ruido conocido como “*speckle*”, el cual se debe filtrar antes de extraer las coordenadas centrales de la línea láser que corresponden a la altura del objeto. Este ruido se puede eliminar usando un procedimiento de convolucion con una ventana de 5x5 píxeles, en el cual la intensidad de un pixel corresponde al promedio de la intensidad de sus 24 vecinos (Filtrado pasa-bajo).

Luego de realizar un proceso de filtrado de la imagen, se hace una binarización comparando la imagen con un umbral definido por:

$$U = 0.8 \times (I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}) + I_{\text{mín}}, \quad (5)$$

Donde $I_{\text{máx}}$, $I_{\text{mín}}$ corresponden a los umbrales de intensidad máximo y mínimo para cada fila. En la figura 6 se puede observar una gráfica con las líneas de altura obtenidas experimentalmente desde $Z = -10\text{mm}$ hasta $Z = 10\text{mm}$ con un desplazamiento de 1 mm entre cada línea que corresponden a la curva de calibración. Para el sistema de proyección y observación del dispositivo implementado e indicado en el cap. 3

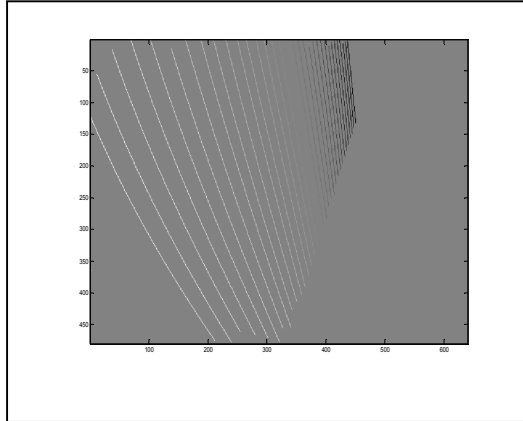


Figura 6. Curva de calibración para la cámara 1.

La Figura 7 muestra la curva de calibración interpolada al evaluar el polinomio anterior en el rango de valores (U,V) adquiridos. De esta manera, a un punto de la imagen que tiene coordenadas (U,V) en píxeles le corresponde una altura Z en mm. Esta figura es llamada curva de calibración, y de manera implícita depende de los parámetros del sistema. El procedimiento de reconstrucción tridimensional consiste en calcular las coordenadas de los puntos centrales de la línea deformada por la topografía del cuerpo y calcular sus correspondientes alturas usando la curva de calibración.

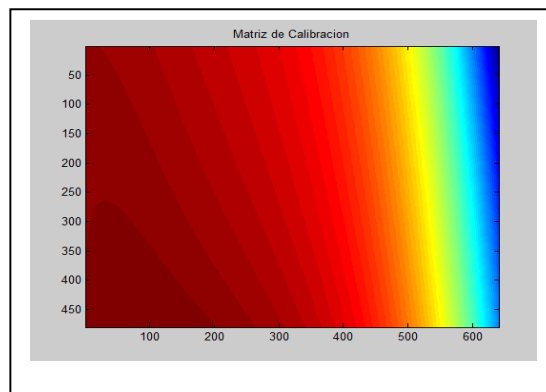


Figura 7. Imagen de la curva de calibración interpolada para la cámara 1.

La precisión del procedimiento de reconstrucción la define la aproximación utilizada para ajustar la curva experimental de calibración. Polinomios de orden superior pueden utilizarse, si existe la influencia de efectos no lineales en los

sistemas de desplazamiento o fuertes aberraciones de los sistemas formadores de imágenes.

Una vez calculada la altura para cada punto de la línea láser, se obtiene un corte de la sección transversal del objeto con la altura en milímetros y las coordenadas transversales en píxeles. Es necesario realizar un procedimiento de calibración para convertir las coordenadas sobre el plano de referencia de píxeles a las coordenadas transversales reales de la topografía del cuerpo. Este procedimiento de calibración de coordenadas espaciales se realiza usando las ecuaciones de la óptica geométrica o usando algoritmos tradicionales de calibración de cámaras, por ejemplo, el algoritmo de calibración de cámaras incorporado en el Toolbox de Matlab, que es el implementado en esta investigación.

2 CALIBRACIÓN DE CÁMARAS

2.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se presentó el método de triangulación láser para codificar la altura de los puntos sobre la superficie del cuerpo a partir de la deformación de la línea láser proyectada. El procesamiento digital de imágenes permite recuperar las coordenadas en píxeles de los puntos centrales de la línea láser adquirida. Un procedimiento preliminar de calibración permite experimentalmente asociar una altura Z a cada píxel (u,v) sobre el plano imagen de la cámara, de esta manera a cada píxel central de la línea láser que corresponde a los puntos de la superficie del cuerpo que han interceptado el plano láser se la asigna su altura correspondiente. Al final de esta primera etapa de reconstrucción tridimensional se obtiene información Z en mm para cada punto (u,v) en píxeles de la superficie del cuerpo en el plano imagen. Con el fin de finalizar la reconstrucción tridimensional es necesario convertir las coordenadas (u,v) en píxeles a las coordenadas (x,y) en mm sobre el espacio del objeto. Básicamente consiste en trasladar el punto P_i (en píxeles) al punto P_1 de la Figura 1. Tradicionalmente esto se realiza usando el factor de ampliación geométrica M definido por $d_o/d_i \approx d_o/f$. Este es posible si se asume que el sistema formador de imágenes está libre de aberraciones. La Figura 8 muestra la imagen de un patrón rectangular plano o grilla de calibración, se aprecia la fuerte influencia de aberraciones geométricas. Por tanto es necesario realizar un procedimiento de calibración de cámara o sistemas formadores de imágenes, que permite convertir píxeles en mm, corrigiendo las aberraciones geométricas.

Al realizar el procedimiento de calibración se obtienen dos tipos de parámetros, los intrínsecos y los extrínsecos, los primeros permiten definir las propiedades de la cámara: focal, factores de conversión píxel/mm, centro de sistema de observación y modelar las aberraciones contenidas en la cámara. Los parámetros extrínsecos definen la posición y orientación de la cámara con respecto al espacio objeto.

2.2 CALIBRACIÓN DE UNA CÁMARA

El proceso de calibración de cámaras consiste típicamente en determinar las características internas y externas de una cámara: parámetros intrínsecos (coordenadas del punto principal, distancia focal, etc.), y los parámetros extrínsecos (rotación y translación), que representan la localización y orientación de la cámara relativa al sistema de coordenadas del objeto. Los parámetros se

calculan normalmente usando patrones de calibración como el que se muestra en la figura 8, el cual consiste en una grilla de calibración (Cuadrícula en blanco y negro) con dimensión de cuadros conocidos.

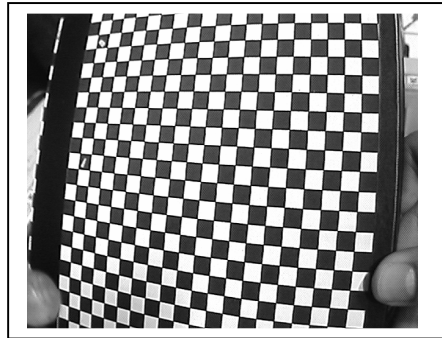


Figura 8. Grilla de calibración (Tamaño del cuadro 3x3 [mm]).

La Figura 9 muestra el modelo de proyección puntual y los sistemas coordenados utilizados para modelar los sistemas formadores de imágenes. En este modelo la información del objeto se proyecta en el plano imagen por una línea a través de un centro de proyección O_c , denominado centro óptico. El plano imagen se encuentra situado a una distancia llamada distancia focal f del centro óptico. El eje óptico es la línea perpendicular al plano imagen y pasa por el centro óptico.

Para ubicar objetos en el mundo real, se define un sistema de referencia fijo, que es llamado sistema de referencia del objeto, (X_w, Y_w, Z_w) . El espacio imagen está definido por el sistema coordenado (X_c, Y_c, Z_c) . El eje Z_c corresponde al eje óptico de la cámara, luego el plano definido por los ejes (X_c, Y_c) es paralelo al plano imagen o plano que contiene los sensores de la cámara CCD. De manera tradicional la esquina superior izquierda del plano imagen define el origen del sistema coordenado (u, v) que permite ubicar el punto en el plano imagen en píxeles. Con sólo conocer la distancia en píxeles entre puntos en una imagen, no es posible determinar la distancia tridimensional correspondiente a los mismos puntos en el mundo real. Por lo tanto, es necesario establecer las ecuaciones que relacionen el sistema de referencia del objeto con el sistema de referencia de la cámara, para establecer la relación entre las coordenadas de los puntos en el espacio 3D y las coordenadas de los puntos de la imagen 2D. Esta relación, no se puede establecer directamente, haciéndose necesario establecer un sistema de referencia intermedio, llamado sistema de referencia de la imagen. El sistema coordenado (U, V) define las filas y columnas en píxeles en el plano imagen y son paralelos a los ejes X_c y Y_c respectivamente. El plano imagen se encuentra a una distancia focal f del origen O_c . Este plano es perpendicular al eje Z_c e intercepta

el punto principal de coordenadas (u_0, v_0) en píxeles del plano imagen. El sistema de referencia en milímetros sobre el plano imagen es (X_u, Y_u) paralelos a los ejes X_c, Y_c y centrados en (u_0, v_0) , como se indica en la Figura 9.

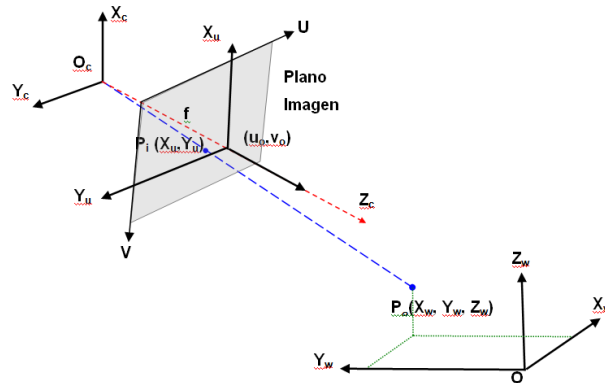


Figura 9. Sistemas coordenados utilizados para calibrar las cámaras.

Usando la perspectiva puntual, (Modelo Pinhole), un punto $P_o (X_w, Y_w, Z_w)$ en el espacio objeto, es proyectado al punto P_i de coordenadas (X_u, Y_u) . Las coordenadas del punto P_o en el sistema de referencia de la cámara son (X_c, Y_c, Z_c) . A partir de la proyección lineal se tiene:

$$X_u = \frac{f}{Z_c} X_c \quad ; \quad Y_u = \frac{f}{Z_c} Y_c \quad (6)$$

Las coordenadas (U, V) en píxeles se calculan utilizando los factores de conversión K_x y K_y en píxel/mm y las coordenadas del punto principal (U_0, V_0) en píxeles, así:

$$U = K_u X_u + U_0 \quad ; \quad V = K_v Y_u + V_0 \quad (7)$$

De igual manera, las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) de un punto P_o en la superficie del objeto y con coordenadas $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ en el sistema coordenado de la cámara están relacionados de acuerdo de acuerdo a la ecuación:

$$\vec{P}_C = R * \vec{P}_o + \vec{T} \quad (8)$$

Donde R es la matriz de Rotación entre sistemas de referencia y T es el vector de Translación.

2.2.1 MODELO DE CÁMARAS CON DISTORSIONES GEOMÉTRICAS

Si los componentes ópticos de la cámara fueran perfectos, la transformación entre la imagen bidimensional y el objeto tridimensional en el espacio sería perfectamente lineal y fácil de resolver. Pero las lentes producen distorsiones que no son lineales y que afectan la precisión de la transformación. Estas distorsiones se refieren a las posiciones de los puntos que forman la imagen alejados de la posición ideal según el modelo de proyección puntual. Como un resultado de algunos tipos de imperfecciones existentes en las lentes, la expresión (6) no permanece constante y debe ser remplazada por expresiones que tomen en cuenta explícitamente los errores en la posición introducida por estos. La cantidad de error δ_i en la posición (X_u, Y_v) a lo largo de cada coordenada usualmente depende de la posición del punto:

$$X_u' = X_u + \delta_x \quad ; \quad Y_v' = Y_v + \delta_y \quad (9)$$

Las coordenadas (X_u', Y_v') son las correspondientes coordenadas con distorsión, que se necesitan corregir para obtener valores reales del objeto. La figura 10 muestra la influencia de las distorsiones geométricas. La diferencia de la posición real y la ideal se descompone en las componentes rectangulares (δ_u, δ_v) y las componentes radiales y tangenciales (δ_r, δ_t) . Las distorsiones más comunes encontradas experimentalmente son la distorsión radial que genera los tradicionales defectos en cojín y barrilete y la distorsión descentral. Otros tipos de distorsiones se han propuesto en literatura [6]. En este trabajo se utilizan las primeras aproximaciones del modelo de la distorsión radial y descentral presentes en el sistema, como se observa en la Figura 10.

2.2.1.1 DISTORSIÓN RADIAL

La distorsión radial causa un desplazamiento hacia adentro o hacia fuera a lo largo del radio. Este tipo de distorsión es causado principalmente por defectos en el radio de curvatura de las lentes. La cantidad de distorsión radial de una lente perfectamente centrada a lo largo de cada coordenada cartesiana de la imagen puede ser representada por:

$$\begin{aligned} \delta_x^r &= k_1 X_u (X_u^2 + Y_v^2) + k_2 X_u (X_u^2 + Y_v^2)^2 + O[(X_u, Y_v)^7] \\ \delta_y^r &= k_1 Y_v (X_u^2 + Y_v^2) + k_2 Y_v (X_u^2 + Y_v^2)^2 + O[(X_u, Y_v)^7] \end{aligned} \quad (10)$$

Donde k_1 , k_2 son constantes que determinan la cantidad y dirección de la distorsión.

2.2.1.2 DISTORSIÓN DESCENTRAL

Es provocada por la falta de colinealidad de los centros ópticos y produce desplazamientos radiales y tangenciales. La componente tangencial puede ser modelada por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\delta_x^d &= P_2(3X_u^2 + Y_v^2) + 2P_1X_uY_v + O[(X_u, Y_v)^4] \\ \delta_y^d &= 2P_2X_uY_v + P_1(X_u^2 + 3Y_v^2) + O[(X_u, Y_v)^4]\end{aligned}\quad (11)$$

Donde P_1 y P_2 son constantes que determinan la cantidad y dirección de la distorsión, así como el eje de máxima distorsión tangencial [6].

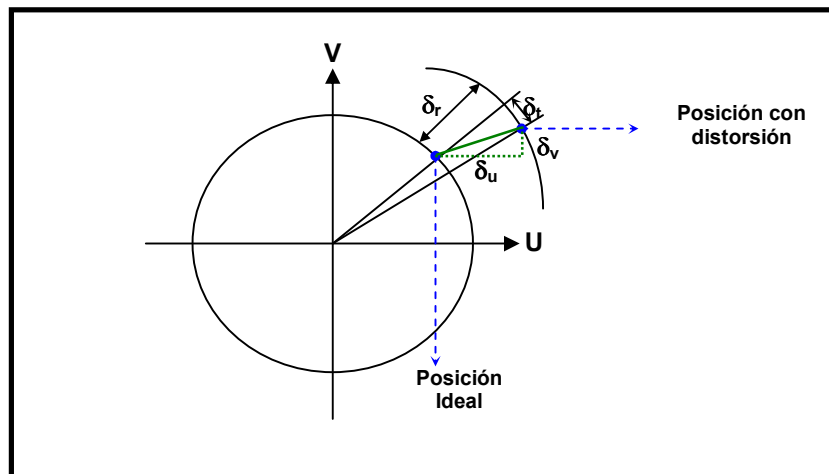


Figura 10. Componentes de la distorsión geométrica [13].

2.2.2 NOTACIÓN MATRICIAL

Según lo anterior, un modelo de cámara más apropiado para aproximar la calibración puede ser derivado combinando el Modelo Pinhole con la modelación de las distorsiones radial y descentral de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_u(X_u + \delta_x^r + \delta_x^d) \\ K_v(Y_v + \delta_y^r + \delta_y^d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

El modelo matemático de proyección definido por la ecuación 8 y 12 puede ser representado de manera más eficiente usando la notación matricial. El objetivo consiste en definir una estructura matricial matemática que asocie un punto P_0 del espacio objeto 3D con su punto (u, v) en píxeles sobre el plan imagen en función de los parámetros intrínsecos de la cámara $(f, X_u, K_y, a_o, v_o, k_1, k_2, p_1, p_2)$ y los parámetros extrínsecos (R, T) . De esta manera si se conocen teóricamente las posiciones 3D de los puntos P_0 y se calculan por tratamiento digital de imágenes sus correspondientes posiciones (u,v) , se puede utilizar un procedimiento de optimización no lineal para calcular los parámetros Intrínsecos y Extrínsecos de la cámara.

Desde un punto de vista geométrico, la imagen obtenida con las cámaras es el resultado de una transformación geométrica. Esta transformación permite pasar de una representación tridimensional de la escena a una representación bidimensional de la misma. Para pasar de coordenadas definidas en el sistema coordenado del objeto a coordenadas de la imagen expresadas en píxeles, son necesarios tres pasos:

Paso 1. Transformación tridimensional: Los puntos tridimensionales expresados en el sistema coordenado del objeto experimentan un cambio al pasar al sistema coordenado de la cámara. Este cambio de sistema coordenado comprende 9 parámetros: 6 para las rotaciones (r) y 3 para las translaciones (t) . Estos parámetros son la posición y la orientación de la cámara, y son llamados parámetros extrínsecos. La ecuación (8) puede ser escrita de manera matricial como:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Paso 2. Proyección 3D-2D: Después del cambio de sistema coordenado, los puntos tridimensionales expresados en el sistema coordenado de la cámara son proyectados sobre el plano de la imagen, según la ecuación (6). Esta ecuación puede escribirse matricialmente usando coordenadas homogéneas como:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

Paso 3. Cambio de coordenadas: Para pasar a coordenadas expresadas en píxeles, las coordenadas se someten a una transformación análoga del plano, definida en la ecuación (7), para un sistema libre de aberraciones o la ecuación (12) para un sistema con aberraciones. Esta transformación está compuesta de 4 parámetros llamados parámetros intrínsecos. La ecuación de conversión (7) puede escribirse usando notación matricial como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u \\ Y_v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Y la ecuación de conversión (12) puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u + \delta_x \\ Y_v + \delta_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Agrupando ecuaciones para el sistema libre de aberraciones, se tiene:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Donde,

$$M = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (18)$$

En las ecuaciones anteriores $f_u = f * K_u$ y $f_v = f * K_v$, proporcionan la distancia focal en unidades de píxeles a lo largo de los ejes u y v respectivamente, y (u_0, v_0) es el punto principal de la imagen. La matriz M es conocida como matriz de proyección. Para el caso de aberraciones:

$$M = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 + \delta_u \\ 0 & k_v & v_0 + \delta_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde,

$$\delta_u = k_u \delta_x \text{ y } \delta_v = k_v \delta_y$$

2.2.2.1 TRANSFORMACIÓN LINEAL DIRECTA (DLT)

La matriz de proyección M establece la relación matricial entre las coordenadas del objeto, medidas en unidades del sistema métrico y las coordenadas de la cámara, medidas en píxeles. Esta matriz puede escribirse como:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{m}_1 & m_{14} \\ \bar{m}_2 & m_{24} \\ \bar{m}_3 & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Donde \bar{m}_j es un vector fila obtenido de las tres primeras columnas. Así, $\bar{m}_j = [m_{j1} \ m_{j2} \ m_{j3}]$ con $j = 1, 2, 3$. Los valores de cada elemento de m_{ij} se pueden obtener de la definición de M. Utilizando la ecuación (17) donde M se ha definido para el sistema libre de aberración, se puede escribir las coordenadas de la imagen de un punto de la escena de la siguiente forma:

$$u = \frac{m_{11}X_w + m_{12}Y_w + m_{13}Z_w + m_{14}}{m_{31}X_w + m_{32}Y_w + m_{33}Z_w + m_{34}} \quad (21)$$

$$v = \frac{m_{21}X_w + m_{22}Y_w + m_{23}Z_w + m_{24}}{m_{31}X_w + m_{32}Y_w + m_{33}Z_w + m_{34}} \quad (22)$$

Con el fin de calcular los coeficientes de la matriz M, es necesario escribir un sistema de ecuaciones a partir de los puntos del objeto y su proyección en la imagen. Cada punto (X_w, Y_w, Z_w) se proyecta en (u_i, v_i) generándose dos ecuaciones. Estas ecuaciones son lineales con respecto a los coeficientes de la matriz. De esta forma, se necesitan al menos 6 puntos para determinar los 12

coeficientes de la matriz M que nos interesa. Es decir, las ecuaciones (21) y (22) pueden ser rescritas como una combinación lineal de los parámetros m_{ij} :

$$X_w m_{11} + Y_w m_{12} + Z_w m_{13} + m_{14} - u_i X_w m_{31} - u_i Y_w m_{32} - u_i Z_w m_{33} = u_i m_{34} \quad (23)$$

$$X_w m_{21} + Y_w m_{22} + Z_w m_{23} + m_{24} - v_i X_w m_{31} - v_i Y_w m_{32} - v_i Z_w m_{33} = v_i m_{34} \quad (24)$$

Al ubicar una cuadrícula en el espacio objeto donde se conocen las coordenadas (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) de varios puntos ($i=1\dots n$) y al definir sobre la cuadrícula las coordenadas en píxeles (u_i, v_i) correspondientes, se obtiene un sistema lineal de ecuaciones de la forma (23) y (24). Si se utilizan N puntos se obtienen 2N ecuaciones. Resolviendo el sistema lineal de ecuaciones se obtienen las componentes m_{ij} de la matriz de proyección para el sistema libre de aberración. Este procedimiento de transformación final es llamado transformación lineal directa (DLT). Generalmente los puntos usados para calcular (u_i, v_i) corresponden a las esquinas de los cuadrados de la grilla patrón usada para la calibración de la cámara, ver Figura 8.

2.2.2.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

A partir de los 12 elementos calculados de la matriz M, se pueden obtener los parámetros extrínsecos e intrínsecos de calibración. La matriz de rotación R se define como:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{r}_1 \\ \vec{r}_2 \\ \vec{r}_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Sabiendo que $\vec{r}_i * \vec{r}_j^T = \delta_{ij}$ y a partir de la definición de M se obtiene:

- Coordenadas del punto principal:

$$\begin{aligned} u_o &= \bar{m}_1 \cdot \bar{m}_3^T \\ v_o &= \bar{m}_2 \cdot \bar{m}_3^T \end{aligned} \quad (26)$$

- Distancias focales en x , y:

$$\begin{aligned} f_u^2 &= \bar{m}_1 \cdot \bar{m}_1^T - [\bar{m}_1 \cdot \bar{m}_3^T]^2 \\ f_v^2 &= \bar{m}_2 \cdot \bar{m}_2^T - [\bar{m}_2 \cdot \bar{m}_3^T]^2 \end{aligned} \quad (27)$$

- Matriz de rotación:

$$\begin{aligned}\bar{r}_1 &= \frac{\bar{m}_1 - u_0 \bar{r}_3}{f_u} \\ \bar{r}_2 &= \frac{\bar{m}_2 - v_0 \bar{r}_3}{f_v} \\ \bar{r}_3 &= \bar{m}_3\end{aligned}\quad (28)$$

- Vector de translación:

$$\begin{aligned}t_x &= \frac{m_{14} - u_0 t_z}{f_u} \\ t_y &= \frac{m_{14} - v_0 t_z}{f_v} \\ t_z &= m_{34}\end{aligned}\quad (29)$$

El anterior procedimiento permite calcular los parámetros de calibración de cada cámara asumiendo que la distorsión es cero. En situaciones experimentales el sistema formador de imagen posee aberraciones debido a los términos exponenciales superiores o iguales a 2 en la ecuación (9). El sistema de ecuaciones que relacionan (U_i', V_i') y (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) para cada punto no es lineal y el proceso de solución para calcular los valores de m_{ij} se convierte en un proceso de optimización no lineal. La función error utilizada para estimar los parámetros de calibración se define en la ecuación (30), donde N es el número de puntos de observación, (U_i, V_i) son las coordenadas teóricas en píxeles del modelo matemático de proyección con valores de parámetros obtenidos en una etapa intermedia y (U_i', V_i') son las coordenadas experimentales obtenidas del tratamiento digital sobre la cuadrícula.

$$F = \sum_{i=1}^N (U_i' - U_i)^2 + (V_i' - V_i)^2 \quad (30)$$

Usando algoritmos de optimización es posible resolver el sistema de ecuaciones no lineales. El método de optimización de Levenberg-Marquardt proporciona una rápida convergencia. Sin embargo, sin unos valores iniciales apropiados de los parámetros, la optimización puede caer en un mínimo local y causar que la calibración falle. Este problema se puede resolver usando como valores iniciales los parámetros obtenidos de la DLT para la optimización.

Para el cálculo de los parámetros Intrínsecos y Extrínsecos usando el procedimiento de optimización no lineal se empleó el Toolbox de Matlab “Camera Calibration” de libre acceso en internet. (12)

3 IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del presente trabajo consiste en determinar el perfil transversal de un cable recuperando información 3D. Empleando el método de triangulación láser se proyecta un plano láser perpendicular al eje del perfil. Aunque no se requiere de un mecanismo que desplace el plano láser si se presentan inconvenientes para recuperar el perfil completo a 360^a usando el esquema tradicional de un plano láser y una cámara CCD. Con el fin de obtener información total a 360° del perfil, se emplearon 4 módulos independientes de proyección láser – cámara ubicados alrededor del eje del perfil a 90° cada uno. De esta manera cada cámara ve una sección transversal independiente del perfil. Al unir todas las secciones reconstruidas en un único sistema coordinado, se obtiene el perfil completo.

El hardware del sistema de medición es diseñado por medio de un software CAD en tres dimensiones, con el objetivo de ubicar los elementos en un espacio reducido y a la vez brindar la confianza necesaria que al mover el equipo este no va a perder su calibración. A partir de la idea inicial de construir un equipo compacto, con cuatro cámaras para que el sistema pueda adquirir imágenes cada 90°, surge la principal necesidad de generar una línea láser para cada cámara en un espacio reducido. Se decide generar entonces las líneas láser a partir de la proyección de un punto sobre un espejo octogonal montado en un motor que gira a gran velocidad. Se usan cámaras compactas de vigilancia con un alto nivel de aberraciones, que se pretenden eliminar por del procedimiento de calibración de cámaras.

3.2 SISTEMA ÓPTICO DE TRIANGULACIÓN LÁSER IMPLEMENTADO

El sistema óptico para la reconstrucción 3-D implementado en este trabajo, figura (11), está formado por un sistema de proyección, el cual se utiliza para generar cuatro planos láser ubicadas a 90 grados uno del otro y perpendiculares con el eje axial del cable, con el propósito de cubrir la sección transversal de la superficie del objeto a una altura específica; y un sistema de adquisición del cual hacen parte cuatro cámaras CCD, separados 90° alrededor del eje axial del perfil formando un ángulo con el plano láser, ver figura 11b.

Las señales de salida análogas de las cámaras CCD son digitalizadas por una tarjeta Matrox Meteor II, obteniéndose cuatro imágenes digitales por cada adquisición. Las imágenes son procesadas, usando algoritmos diseñados en

ambiente Matlab. A continuación se especifican los detalles de cada uno de los módulos que posee el dispositivo implementado.

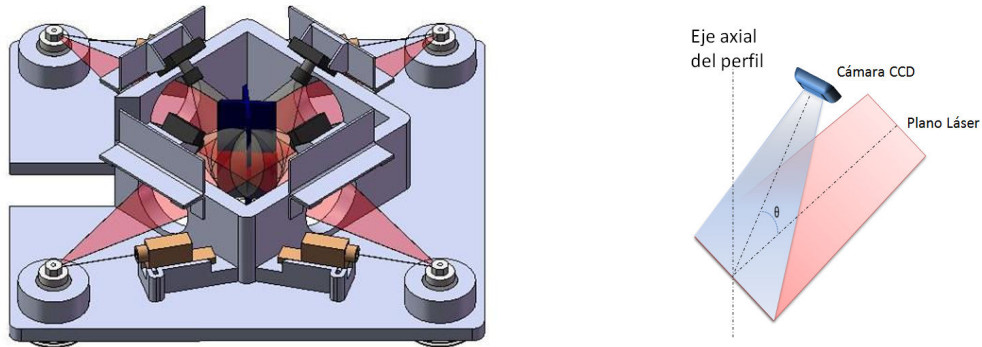


Figura 11 a y b. Esquema renderizado del Sistema óptico de triangulación láser implementado y principio de funcionamiento.

3.2.1 SISTEMA DE PROYECCIÓN

El sistema de proyección está formado por 4 láseres de He-Ne alimentados a 5Vdc, con una longitud de onda $\lambda = 632.8nm$, 4 motores de paso, 4 espejos octogonales que van instalados en el eje de cada uno de los motores y 4 lentes, como se puede observar en la figura 12.

Un punto láser es proyectado directamente al centro del espejo octogonal, el cual puede girar a una velocidad de 3600 rpm, y lo desvía el punto láser perpendicularmente hacia el perfil del objeto, a una frecuencia superior a la frecuencia de adquisición de la cámara. Una lente biconvexa de focal 30mm toma el rayo láser y lo envía paralelo hacia el objeto. De esta manera un láser, un espejo octogonal y una lente biconvexa generan un plano láser paralelo que incide perpendicular al eje axial del perfil, como se observa en la vista superior del montaje mostrado en la Fig. 12. Alineando los 4 planos láser se obtiene de la intersección un único plano láser de forma cuadrada, lado 20mm y perpendicular al eje axial del objeto.

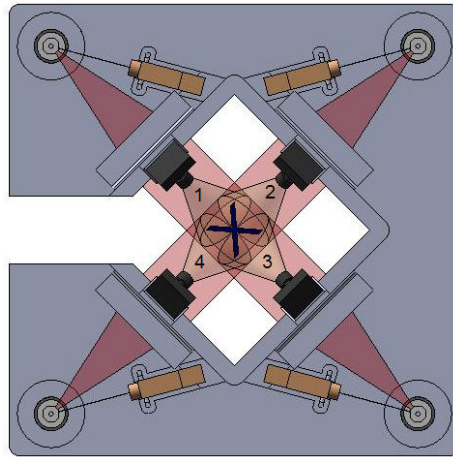


Figura 12. Esquema renderizado de sistema de proyección de la línea láser.

3.2.2 SISTEMA DE OBSERVACIÓN

Para el sistema de observación se utilizaron 4 cámaras CCD de vigilancia del tamaño efectivo de 640x480 pixel, alimentadas a 5Vdc que se pueden observar en la figura (13), con un objetivo de focal 3,6 mm. Las características de la CCD se indican en la Tabla (2).

En particular este tipo de cámaras se encuentran disponibles en el mercado local a un bajo costo, aunque poseen un nivel alto de aberraciones.

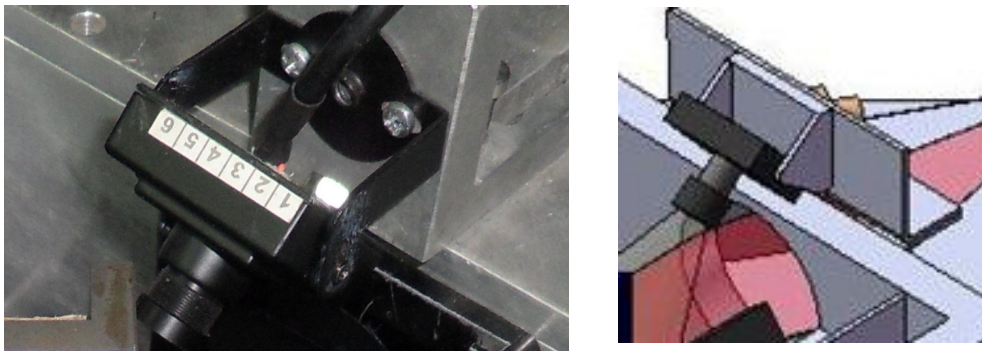


Figura 13. Cámara CCD AS-1368C

Característica	XC-ES30
Imagen	1/3 IT CCD
Tamaño (píxel)	768(H) * 494(V)
Frecuencia Horizontal (Hz)	15.734.000
Frecuencia Vertical (Hz)	59.94
Tamaño de Celda (mm ²)	6.35 *7.4
Campo de observación en X (mm)	1.2
Campo de observación en Y (mm)	2.8

Tabla 2. Especificaciones Cámara CCD AS-1368C.

3.2.3 SISTEMA DE CONTROL, ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Se utilizó una tarjeta de adquisición Matrox-Meteor II como la que se observa en la figura 14. Posee 12 canales de entrada monocromáticos para digitalizar las imágenes enviadas por las cámaras CCD, con bus de conexión PCI.

El computador usado para la adquisición es un IBM con las siguientes características:

IBM ThinkCentre, con procesador Intel Pentium 4, de 256Mb de memoria RAM.

El software de procesamiento de imágenes elegido para este proyecto es Matlab versión 8.



Figura 14. Tarjeta Matrox Meteor II

3.4 DISEÑO DEL CHASIS

Lo más importante antes de construir la estructura que alojará todos los elementos es, primero, adquirir estos elementos y probarlos en el laboratorio para comprobar su correcto funcionamiento. Después de tener certeza que los elementos funcionan correctamente, se procede a realizar un diseño del chasis en computador por medio de un software CAD en 3D (En este caso Solid Works), ubicando todos los componentes del equipo como se observa en el render de la Figura 13.

Se decide por lo tanto realizar el chasis del equipo de medida en aluminio laminado, debido a que éste es un material resistente y liviano.

Con el diseño completo del equipo en Solid Works se procede a hacer el mecanizado de las piezas de aluminio (Se realizó en un centro de mecanizado LeadWell) y luego su posterior ensamble, que se puede observar en la figura 13.

3.5 DISEÑO DE LA ELECTRÓNICA

Los motores adquiridos para generar la línea láser son motores de pasos, los cuales se eligieron por tener un tamaño compacto y además lo más importante por tener su rotor montado sobre rodamientos y no sobre bujes, lo cual permite que el alabeo en el eje del motor sea muy bajo y casi imperceptible, condición muy importante para obtener un plano láser estable.

Debido a que los motores adquiridos son de pasos, hay que construir un sistema electrónico que los pueda manejar a una velocidad constante superior a 1000 rpm. Frecuencias inferiores producen en la cámara imágenes del punto láser y no se obtiene la línea láser.

Se decide entonces adquirir una tarjeta para controlar motores de paso cuya velocidad se regula cambiando la frecuencia de un tren de pulsos a la entrada de la tarjeta. Y diseñar un circuito sencillo que convierte un voltaje de referencia en un tren de pulsos con frecuencia variable.

Se adquiere también una fuente switching de 5 Vdc (figura 15) para alimentar los 4 láseres y la tarjeta controladora de los motores.

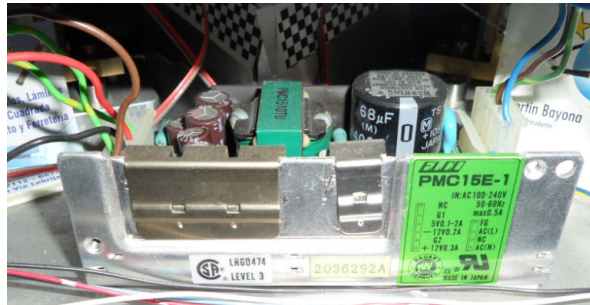


Figura 15. Fuente switching 5Vdc.

3.4 MONTAJE DE EQUIPOS

Teniendo todos los elementos que son:

- 1- Chasis de aluminio laminado.
- 2- 4 Motores de pasos 3600 rpm
- 3- 4 Láseres 5mw.
- 4- 4 Lentes.
- 5- 4 Cámaras de vigilancia 640*480.
- 6- Tarjeta electrónica para controlar motores de pasos.
- 7- Fuente de alimentación de 5vdc.
- 8- Tarjeta digitalizadora Matrox monocromática.
- 9- Computador.
- 10- Software de procesamiento (Matlab).

Luego de construido y ensamblado el chasis en aluminio laminado se procede a realizar el montaje de los equipos, como se muestra en la figura 16.

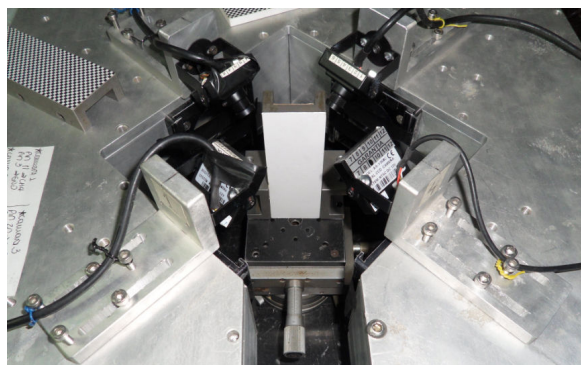


Figura 16. Sistema óptico de triangulación láser construido.

3.5 ENSAMBLE GENERAL Y PRUEBAS

Luego que todos los elementos fueron ensamblados correctamente, se inicia una serie de pruebas para determinar que el equipo funcione correctamente. Se inicia verificando el buen funcionamiento de los láseres, luego los motores de pasos, posteriormente las cámaras y la tarjeta de adquisición de imágenes. A continuación se hace un resumen de los elementos a tener en cuenta al momento de realizar las pruebas:

LÁSER:

Se debe tener en cuenta que los cuatro proyectores láser funcionen correctamente al energizarlos, que visualmente generen la misma intensidad luminosa. Posteriormente, se debe asegurar que el haz de luz apunte directamente al centro del espejo octogonal instalado en el eje del motor de pasos. Esto se logra regulando el tornillo nivelador ubicado en la parte posterior del proyector láser, el cual modifica la altura y moviendo el motor sobre las guías ubicadas en la base del mismo, las cuales regulan el desplazamiento horizontal de cada uno de los motores.

MOTORES DE PASOS Y LINEAS LÁSER:

Se verifica que cada uno de los motores se puedan controlar por medio de la tarjeta electrónica. Esta debe regular en conjunto la velocidad de cada uno de los motores para, posteriormente, generar la línea láser por medio de los espejos ubicados sobre cada uno de éstos.

Luego que se verifica el correcto funcionamiento de cada uno de los motores y su correspondiente control electrónico, se procede a ajustar la alineación de cada una de las proyecciones láser, esto se logra ubicando un objeto (Perfil), justo en el centro del área de medición y haciendo un ajuste de nuevo en los tornillos niveladores de cada uno de los láseres, con el fin de superponer las cuatro proyecciones de línea láser sobre un mismo plano horizontal. Esta superposición se debe realizar para evitar que al momento de realizar la toma de imágenes, la cámara capture dos proyecciones diferentes de línea láser como se puede observar en la figura 17.

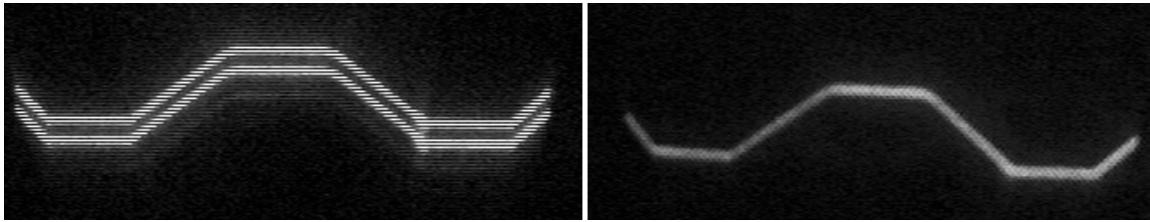


Figura 17 a) Proyecciones con los láseres desalineados. **Figura b)** Proyecciones luego del procedimiento de alineación.

CÁMARAS Y TARJETA DE ADQUISICION:

Luego de ajustar la alineación de las proyecciones láser se procede a instalar la tapa superior del equipo sobre las que van instaladas las cuatro cámaras CCD, las cuales van conectadas a la tarjeta de adquisición de imágenes. Por medio de un programa en Matlab (*capuna.m*) se verifica que cada una de las cámaras capture imágenes correctamente. Posteriormente, se instala un plano de referencia en el centro del plano de proyección láser y se hace un ajuste a las guías del soporte de la cámara con el objetivo que ésta se centre en el campo de observación.

4 CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL DEL DISPOSITIVO DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL

4.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se mostró el diseño e implementación del dispositivo de medida del perfil de un cable a partir del método de triangulación láser. Básicamente, se genera un plano láser perpendicular al eje axial del perfil desde 4 posiciones angulares, cubriendo 360° de proyección. Al ubicar el objeto de estudio, la intercepción de su superficie con el plano láser genera una línea láser cerrada y deformada por la topografía, que es adquirida por 4 cámaras CCD ubicadas alrededor del eje axial y formando un ángulo con el plano láser. En este capítulo se mostrará los resultados obtenidos en el proceso de calibración y evaluación experimental del dispositivo. Como se mostró en los capítulos anteriores hay 2 tipos diferentes de calibración:

Calibración láser: Básicamente el dispositivo de medida consiste de 4 módulos independientes de triangulación láser, cada uno formado por una cámara CCD y un conjunto láser - espejo - lente biconvexa que proyecta una sección del plano láser final. En esta calibración se debe obtener una relación experimental que asocie altura en mm y desplazamiento de la línea láser. Para cada pixel, como se demostró en el capítulo 1, al final del procedimiento se obtiene una matriz de 640×480 pixeles que posee para cada pixel la altura correspondiente. De esta manera cuando se ubique un objeto, para cada cámara se calculan las coordenadas en pixeles de la línea láser deformada por el cuerpo que ve cada una y se determinan sus alturas correspondientes. La figura 17 muestra las 4 matrices experimentales de calibración obtenidas al desplazar el plano de referencia en un rango de ± 10 mm a intervalos de 1mm. La figura 12 muestra el orden secuencial de los módulos de proyección-observación empleados en la figura 17.

Calibración de cámaras CCD: Para cada cámara CCD se deben obtener los parámetros intrínsecos (K_a , K_v , U_o , V_o , K_1 , K_2 , P_1 , P_2) y parámetros extrínsecos (R y T). Estos parámetros permiten convertir pixeles en el plano imagen a coordenadas (X_w , Y_w , Z_w) en el espacio objeto y se calculan usando un patrón bidimensional formado por cuadros blancos y negros de dimensiones conocidas.

4.2 CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS UTILIZADAS

En el sistema de reconstrucción se utilizaron cuatro cámaras convencionales con objetivos de focal 3.6 mm CCD de 640X480 píxeles.

Las cámaras utilizadas presentan una fuerte distorsión geométrica radial, como se observa en la Figura 8. Para realizar la calibración de las cámaras y extraer los parámetros intrínsecos y extrínsecos, se utilizó el procedimiento descrito en el capítulo 2, propuesto por Janne Heikkila y Olli Silven^[8]. “Camera Calibration Toolbox” es un software de calibración de cámaras digitales desarrollado en MATLAB[®] y de libre acceso en Internet, que permite calibrar sistemas de adquisición de imágenes. (12)

El software posee las rutinas necesarias para desarrollar el procedimiento de optimización no lineal minimizando la función de error definida en la ecuación (70) por el método de Levenberg-Marquardt y tomando como parámetros iniciado los obtenidos del método de transformación lineal directa (DLT).

El procedimiento de calibración se realiza a través de una interfaz gráfica amigable al usuario que permite secuencialmente obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos.

A continuación se ilustran los pasos importantes desarrollados por la interfaz para calcular los parámetros. Como objeto de calibración, se utilizó una cuadrícula blanco y negro, mostrada en la Figura 8, de tamaño de cuadro 3mm.

El proceso de calibración tiene las siguientes etapas:

1. **Adquisición de imágenes:** En esta etapa del proceso se adquirieron 15 imágenes de la cuadrícula por cada cámara, en diferentes perspectivas de la escena y utilizadas para establecer los puntos de control para la calibración de las cámaras (Figura 18).

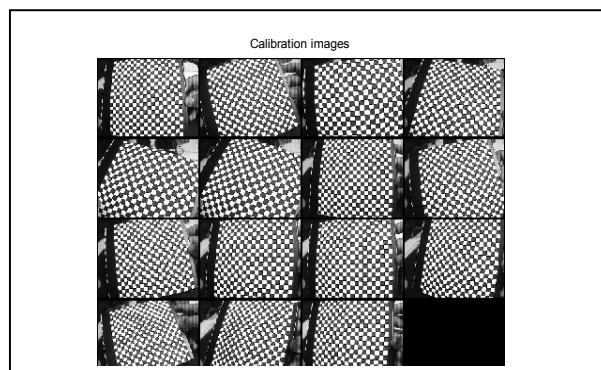


Figura 18. Imágenes para calibración de la Cámara 1.

2. Extracción de los puntos de control: Un punto de control corresponde a un vértice de un cuadro negro. Es necesario definir una región rectangular de varios cuadros y el origen del sistema coordenado. El primer punto seleccionado para definir la región de puntos de control es asociado con el punto origen de la imagen de referencia (P_0) de la cuadrícula, ver figura 19. Los otros tres puntos de la cuadrícula (P_1 , P_2 , P_3) pueden seleccionarse aleatoriamente. Una vez realizada esta operación, se establece el sistema coordenado que define la dirección de los ejes X, Y y Z, como lo muestra la Figura 19. Para extraer los puntos de control se hace necesario conocer la cantidad de cuadros al interior de la región seleccionada tanto en la dirección X como en Y, y conocer el tamaño del cuadro en milímetros. De esta manera, se pueden calcular las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) en mm contando el número de cuadros y asociarlos a los puntos (u_i, v_i) calculados digitalmente. Las coordenadas (u_i, v_i) en píxeles son calculadas realizando un procesamiento digital, basado en el gradiente de la imagen. Nótese que los puntos de control poseen $Z_w=0$ y las coordenadas (X_w, Y_w) en mm se obtiene con el número de cuadros y el tamaño de cada uno.

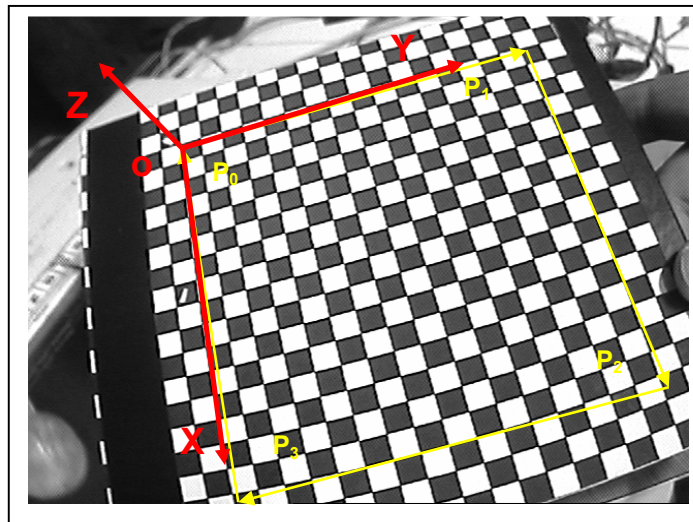


Figura 19. Sistema coordenado de la cámara.

4.3 OPTIMIZACION

Antes de realizar el proceso de optimización no lineal se deben determinar los mejores valores iniciales de los parámetros.

La figura 20 (a) muestra los puntos de control en forma de cruz como deberían verse en una imagen libre de distorsiones. Debido a las distorsiones encontradas en las imágenes, las esquinas preestablecidas libre de aberraciones no son cercanas a las esquinas de la imagen real. Esto podría generar inconvenientes en el proceso de optimización al elegir valores iniciales no adecuados de los parámetros. El software permite introducir un valor inicial a la distorsión radial para aproximar de mejor manera los valores iniciales. De esta manera el usuario introduce un valor inicial de K_1 , k_2 y el software evalúa la ecuación (10) y muestra las nuevas coordenadas, si estas se acercan a las posiciones reales de los puntos de la cuadrícula el usuario continúa, sino puede variar el valor de las constantes.

Una vez extraídas las esquinas de cada una de las imágenes, se obtienen los datos para iniciar el proceso de optimización. El algoritmo de optimización usa los valores establecidos por la transformación lineal directa y el valor de coeficiente de distorsión radial que acerca los puntos de control a las esquinas en la imagen real, definido anteriormente. Internamente, el procedimiento de optimización utiliza la función de error definida en la ecuación (30) para determinar el valor de los parámetros de calibración que minimiza el error. El algoritmo de optimización converge hasta minimizar el error cuadrático.

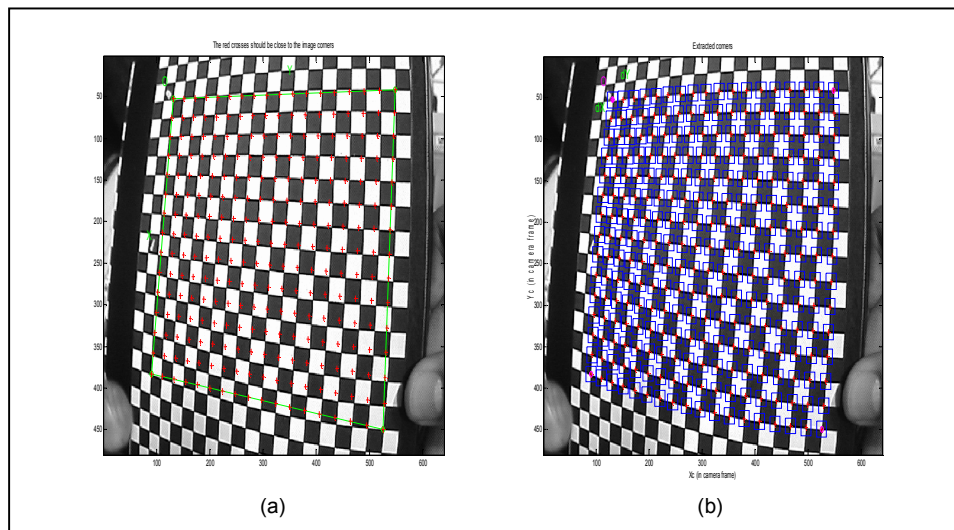


Figura 20. Extracción de puntos de control de la imagen (a) Puntos de Control para imagen libre de distorsiones, (b) Puntos Retro proyectados.

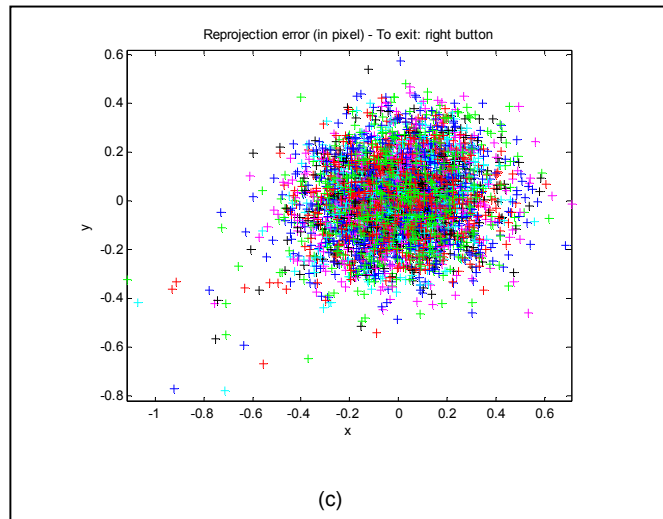


Figura 21. Error en píxeles en la retroproyección para la cámara 1

Como resultado de estos procesos de optimización se obtuvieron los siguientes parámetros:

4.3.1 PARÁMETROS INTRÍNSECOS CÁMARA CCD 1, 2, 3 y 4

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos del proceso de calibración para las cámaras utilizadas.

Parámetro	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4
Dist focal f_u (píxel)	[689.34 ; 690.21]	[719.16 ; 721.65]	[692.05 ; 694.92]	[688.40 ; 693.24]
$U_o ; V_o$ (píxel)	[352.96 ; 168.67]	[340.98 ; 166.15]	[322.45 ; 328.78]	[386.42 ; 224.14]
$k_1 ; k_2$ (píxel)	[-0.4060 ; 0.2029]	[-0.3916 ; 0.2122]	[-0.3793 ; 0.1471]	[-0.3916 ; 0.1955]
$p_1 ; p_2$ (píxel)	[0.0035 ; 0.0021]	[-0.0019 ; -0.0019]	[-0.0010 ; -0.0010]	[-0.0019 ; -0.0011]

Tabla 3. Parámetros Intrínsecos cámaras 1, 2, 3 y 4

Donde f_u es la distancia focal del objetivo de cada cámara, (U_o, V_o) coordenadas del punto principal de cada cámara, (k_1, k_2) componentes de la distorsión radial y (p_1, p_2) componentes de la distorsión tangencial.

4.3.2 PARÁMETROS EXTRÍNSECOS DE LAS CÁMARAS CCD 1, 2, 3 y 4

Los parámetros extrínsecos son calculados con respecto al sistema coordenado $O(X_w, Y_w, Z_w)$ y definidos por:

Cámara CCD 1:

$$R = \begin{bmatrix} 0.180127 & 0.924412 & -0.336179 \\ 0.783570 & 0.071753 & 0.617147 \\ 0.594620 & -0.374585 & -0.711417 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -88.845978 \\ -33.738219 \\ 175.445779 \end{bmatrix}$$

Cámara CCD 2:

$$R = \begin{bmatrix} -0.126847 & 0.810817 & 0.571389 \\ 0.906336 & -0.139334 & 0.398924 \\ 0.403068 & 0.568473 & -0.717199 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -53.011792 \\ -23.940423 \\ 101.291141 \end{bmatrix}$$

Cámara CCD 3:

$$R = \begin{bmatrix} 0.026172 & 0.928971 & -0.369225 \\ 0.999608 & -0.020638 & 0.018928 \\ 0.009964 & -0.369576 & -0.929147 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -93.457726 \\ -22.029004 \\ 169.572131 \end{bmatrix}$$

Cámara CCD 4:

$$R = \begin{bmatrix} 0.017288 & 0.926652 & 0.375523 \\ 0.999610 & -0.024265 & 0.013858 \\ 0.021953 & 0.375137 & -0.926710 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -53.025228 \\ -31.772990 \\ 121.922006 \end{bmatrix}$$

Donde R es la matriz de rotación y T es el vector de translación del sistema coordenado $O_c(X_c, Y_c, Z_c)$ de cada cámara, con respecto al sistema coordenado $O(X_w, Y_w, Z_w)$ del plano de referencia. T se expresa en mm.

Una vez calculados los parámetros intrínsecos y extrínsecos y conociendo las coordenadas

(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) , se realiza un proceso de retroproyección con el fin de calcular las coordenadas (U_i, V_i) teóricas. Comparando estos valores con los valores experimentales (U_i', V_i') , se calcula el error cometido en la aproximación empleada para calcular los parámetros. La Figura 21 muestra el error de retroproyección correspondiente a la cámara CCD 1, para todos los puntos de control empleados. Se obtiene un valor medio de 0.185 píxeles en X y 0.185 píxeles en Y .

Es decir, como se conocen con precisión las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) en mm y empleando los 20 parámetros calculados, se determinan las posiciones teóricas (U_i, V_i) empleando el modelo de proyección puntual. Por procesamiento de imágenes se tiene las posiciones experimentales (U_i, V_i) que al evaluar la diferencia de posiciones se obtiene el error en el cálculo introducido por los

parámetros, los valores obtenidos para el error indican que se comete un error porcentual de $(0.2/640)$ en X y de $(0.2/480)$ en Y para determinar la posición de un punto (X_w, Y_w, Z_w) proyectado en el plano imagen.

4.4 ANÁLISIS DE ERROR EN EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Aunque el anterior error verifica la precisión en el cálculo de los parámetros, se desea medir la influencia de esta precisión al medir distancias en milímetros en el espacio objeto, utilizando los puntos de control de la cuadrícula ubicada en $Z=0$. Es decir, las coordenadas en mm de los puntos de control ubicados en $Z=0$ se conocen teóricamente y se calculan sus correspondientes coordenadas en píxeles (U', V') con distorsión. Se pretende hacer el proceso inverso de proyección para obtener las coordenadas en mm a partir de (U', V') usando los parámetros de calibración. La diferencia entre estas coordenadas define el error que se comete al ubicar un punto en el plano a $Z=0$.

El primer paso a seguir para la estimación de las coordenadas (x, y) , en milímetros en el espacio objeto, para un $Z=0$, usando el patrón de calibración, es obtener sus coordenadas distorsionadas (U', V') .

En el modelo de proyección puntual utilizado, el punto sobre la imagen en píxeles pasa por el centro óptico y llega hasta el punto sobre el objeto. Es decir, la línea recta que une estos puntos se puede calcular siempre que se obtengan las coordenadas en píxeles del punto sin aberraciones. Estas coordenadas corregidas (U, V) se obtienen al restarle a (U', V') las distorsiones geométricas como se muestra en la Figura 22.

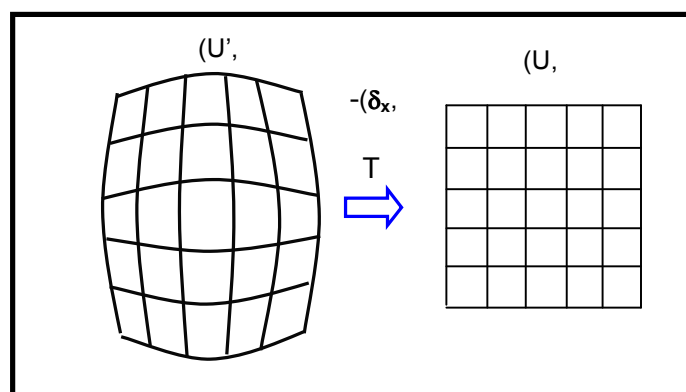


Figura 22. Transformación geométrica que relaciona píxeles distorsionados y no distorsionados ^[10].

Las distorsiones geométricas definidas por las ecuaciones (10) y (11) generan un inconveniente al usarlas. δ_x y δ_y y sus correspondientes en píxeles δ_u y δ_v fueron definidos en función de las coordenadas (X_u, Y_v) de los puntos libres de distorsión, pero sobre la imagen se tiene acceso únicamente a la coordenada (u', v') con aberraciones. Por lo tanto, no es posible calcular δ_x y δ_y , se necesita relacionar δ_x y δ_y con (X_u', Y_v') a través de cuatro coeficientes k_1', k_2' y P_1', P_2' , de manera similar a como se relaciona en (X_u, Y_v) en las ecuaciones (10) y (11).

$$\begin{aligned}\delta_x^r &= k_1' X_u' (X_u'^2 + Y_v'^2) + k_2' X_u' (X_u'^2 + Y_v'^2)^2 + O[(X_u', Y_v')^7] \\ \delta_y^r &= k_1' Y_v' (X_u'^2 + Y_v'^2) + k_2' Y_v' (X_u'^2 + Y_v'^2)^2 + O[(X_u', Y_v')^7]\end{aligned}\quad (31)$$

$$\begin{aligned}\delta_x^d &= P_2' (3X_u'^2 + Y_v'^2) + 2P_1' X_u' Y_v' + O[(X_u', Y_v')^4] \\ \delta_y^d &= 2P_2' X_u' Y_v' + P_1' (X_u'^2 + 3Y_v'^2) + O[(X_u', Y_v')^4]\end{aligned}\quad (32)$$

El cálculo de estos coeficientes conduce a un sistema lineal de ecuaciones y se ilustra en la Figura 23. Se define una matriz de puntos (X_u, Y_v) teóricos equidistantes, a partir de k_1, k_2 y P_1, P_2 y de las ecuaciones (9) y (10) se calculan los (X_u', Y_v') correspondientes. Usando las ecuaciones (31) y (32) se obtiene una relación lineal entre los coeficientes k_1', k_2' y P_1', P_2' puesto que los otros términos se conocen. Al resolver el sistema de ecuaciones se obtienen k_1', k_2' y P_1', P_2' . De esta manera, se calcula δ_x y δ_y en función de (X_u', Y_v') .

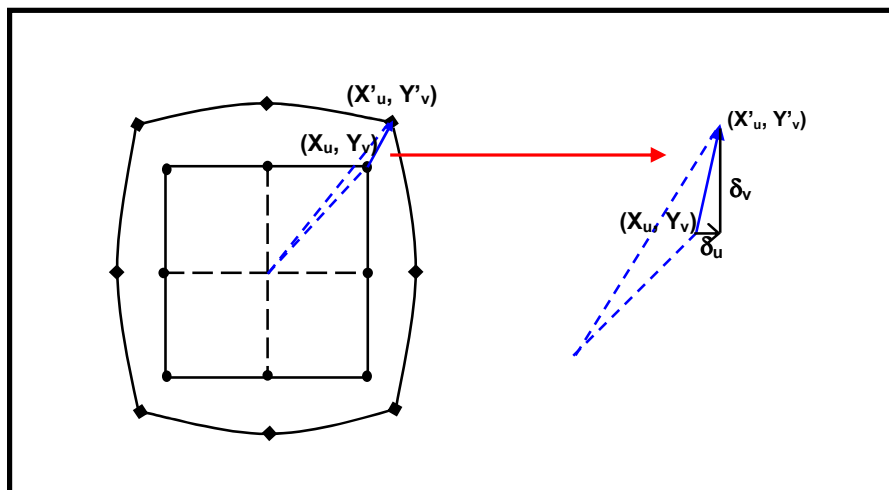


Figura 23. Relación de píxeles distorsionados a no distorsionados ^[10].

A partir de las coordenadas en píxeles, se encuentran sus correspondientes coordenadas en milímetros (X_u, Y_v), usando los parámetros intrínsecos obtenidos. Con estos puntos y con la coordenada $O_c(0,0,0)$, se calcula la ecuación de la recta O_cP en el sistema coordenado de la cámara. Figura 24.

Las coordenadas de P se obtienen de la intersección de la línea $\overline{O_cP}$ con el plano ubicado en $Z_w=0$. La ecuación del plano se calcula con la normal, que es el eje Z_w , y un punto del plano que podría ser el origen O del sistema coordenado del objeto. Usando los parámetros extrínsecos, se calculan las coordenadas de P($X_w, Y_w, Z_w=0$) en el sistema coordenado del objeto.

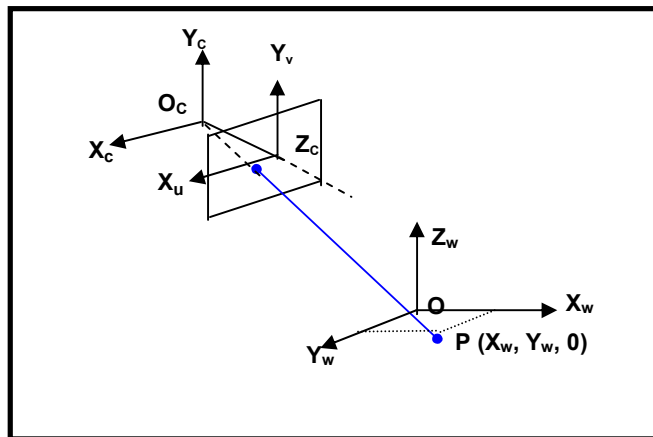


Figura 24. Geometría para determinar las coordenadas de un punto en el espacio objeto ^[13].

Las figuras 25 a la 28 muestran las imágenes obtenidas por cada cámara, en donde se determinó la posición (X_w, Y_w) de algunos puntos sobre el patrón de calibración para cada cámara individualmente, ubicada a $Z_w=0$.

Las tablas 1, 2, 3 y 4 muestran los valores reales (VR) y los valores estimados (VE) de las coordenadas (X_w, Y_w) para cada uno de los puntos elegidos. El error se determina como la distancia entre los puntos reales y los puntos estimados, así.

$$D = \sqrt{(XT - XE)^2 + (YT - YE)^2} \quad (33)$$

La distancia media se calcula para verificar la influencia de los valores obtenidos en el cálculo de los parámetros del sistema mediante la ecuación (34).

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{n} \quad (34)$$

Donde n es el número de datos.

El error porcentual se calcula de la siguiente manera:

$$\%E = \frac{\bar{D}}{C} * 100 \quad (35)$$

Donde C es la mínima distorsión del campo de trabajo de la imagen equivalente a 48 mm.

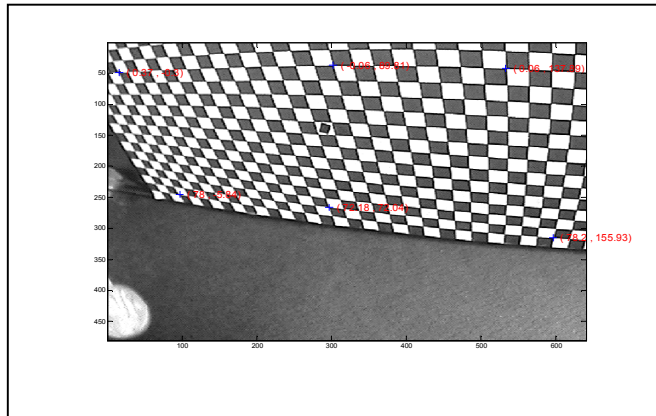


Figura 25. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 1.

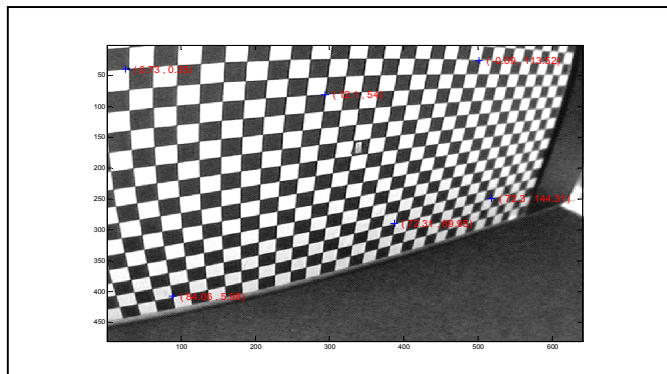


Figura 26. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 2.

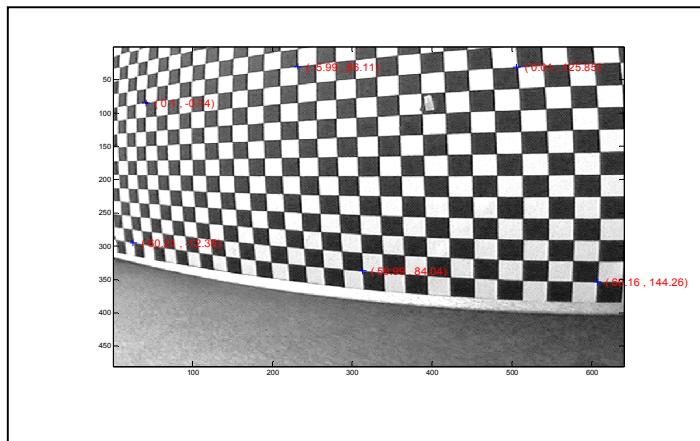


Figura 27. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 3.

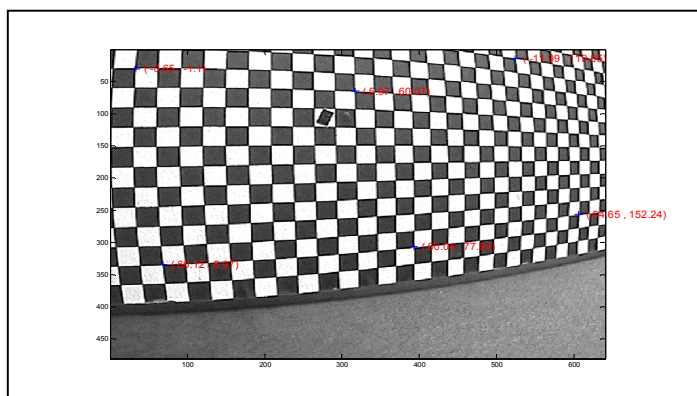


Figura 28. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 4.

4.4.1 DISTANCIA ENTRE VR Y VE, Y ESTIMACIÓN ERROR PARA LA CÁMARA 1

Coordenada X (mm)		Coordenada Y (mm)		Distancia (mm)
VR (mm)	VE (mm)	VR(mm)	VE(mm)	
0	0.37	0	-0.30	0.48
78	78.00	-6	-5.84	0.16
0	-0.06	90	89.81	0.20
72	72.18	72	72.04	0.18
0	0.06	138	137.89	0.13
78	78.20	156	155.93	0.21
\bar{D}				0.23
%E				0.14

Tabla 4. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la Cámara CCD 1

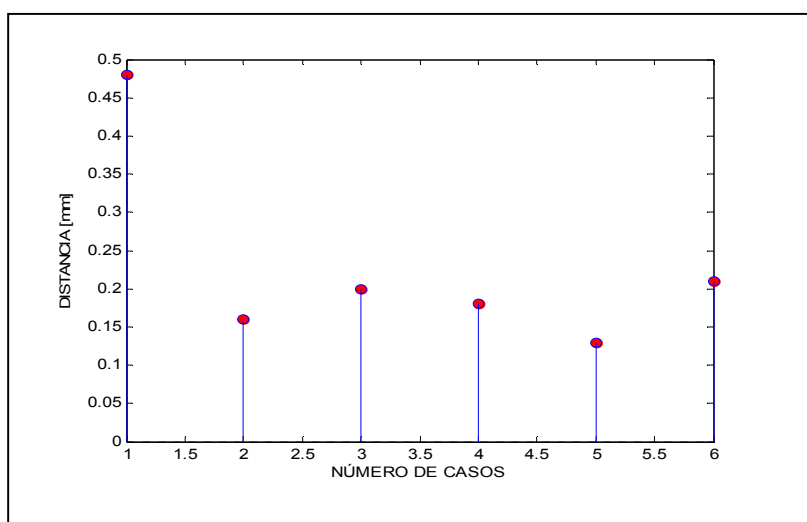


Figura 29. Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD1

4.4.2 DISTANCIA ENTRE VR Y VE Y ESTIMACIÓN ERROR PARA LA CÁMARA 2

Coordenada X (mm)		Coordenada Y (mm)		Distancia (mm)
VR (mm)	VE (mm)	VR(mm)	VE(mm)	
0	0.73	0	0.35	0.81
84	84.06	6	5.98	0.06
12	12.10	54	54.00	0.10
72	72.31	90	89.95	0.31
0	-0.09	114	113.52	0.49
72	72.3	144	144.31	0.43
\bar{D}				0.37
%E				0.23

Tabla 5. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD2

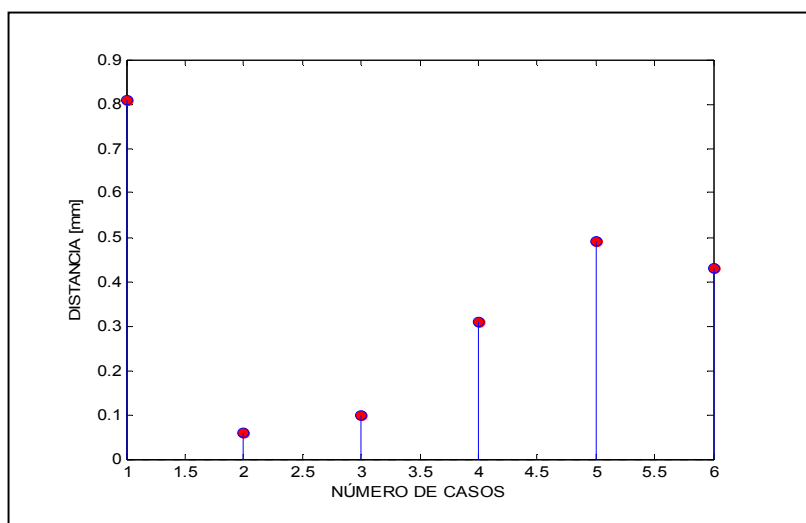


Figura 30. Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD2

4.4.3 DISTANCIA ENTRE VR Y VE Y ESTIMACIÓN ERROR PARA LA CÁMARA 3

Coordenada X (mm)		Coordenada Y (mm)		Distancia (mm)
VR (mm)	VE (mm)	VR(mm)	VE(mm)	
0	0.10	0	-0.14	0.17
60	60.21	-12	-12.35	0.41
-6	-5.99	66	66.11	0.11
60	59.99	84	84.04	0.04
0	0.01	126	125.85	0.15
60	60.16	144	144.26	0.31
\bar{D}				0.20
%E				0.12

Tabla 6. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD3

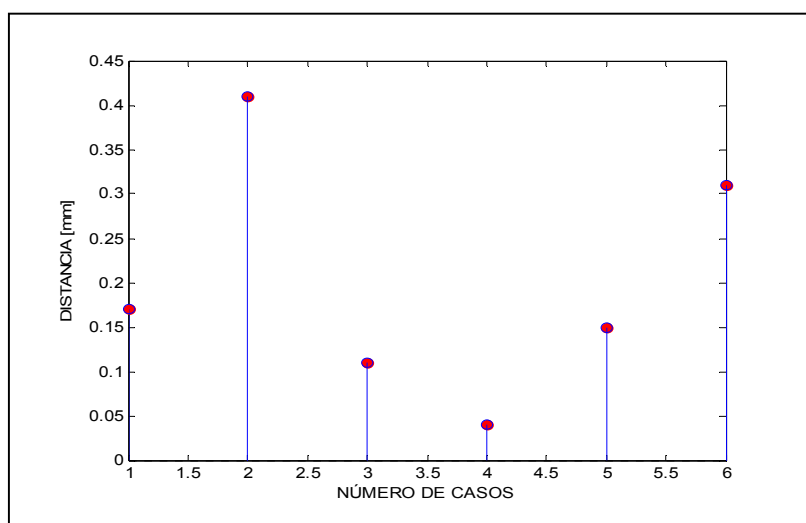


Figura 31 Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD3

4.4.4 DISTANCIA ENTRE VR Y VE Y ESTIMACIÓN ERROR PARA LA CÁMARA 4

Coordenada X (mm)		Coordenada Y (mm)		Distancia (mm)
VR (mm)	VE (mm)	VR(mm)	VE(mm)	
0	-0.51	0	-1.20	1.30
60	59.79	12	11.98	0.21
6	6.04	54	53.86	0.15
48	47.90	66	66.15	0.18
-12	-11.34	126	125.56	0.79
60	59.74	138	138.10	0.28
\bar{D}				0.49
%E				0.30

Tabla 7. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD4

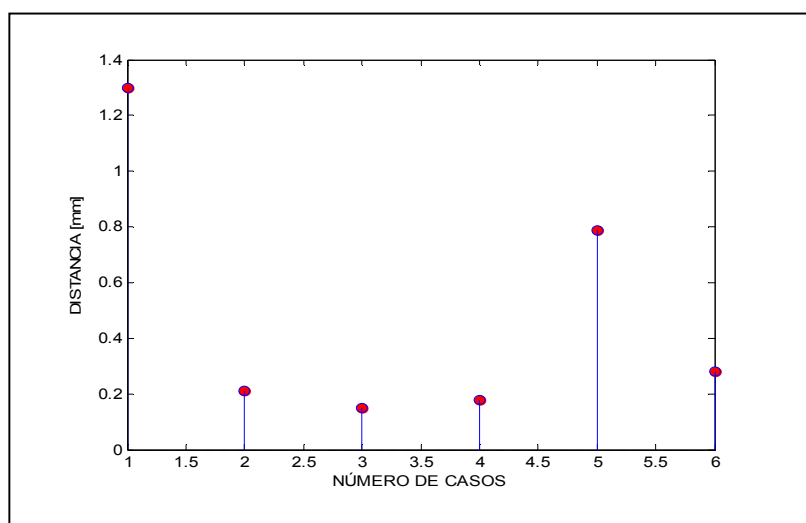


Figura 32. Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD4

Para la cámara 1, el sistema reporta un error de 0.23 mm encontrándose un porcentaje de error de 0.14% al ubicar un punto sobre el plano de referencia en $Z_w=0$ para un campo de observación de 20 mm. Para la cámara 2, el sistema reporta un error de 0.37 mm con un porcentaje de error de 0.23%. Para la cámara 3, el sistema reportan un error de 0.20 mm, con un porcentaje de error de 0.12%.

Para la cámara, 4 el error del sistema es de 0.49 mm con un porcentaje de error de 0.30%.

Es decir, si se desea medir una distancia en el plano ubicado a $Z_w=0$ se comete error máximo de 500 micras.

Este error se puede reducir usando más coeficientes en la modelización de la distorsión radial y tangencial, principalmente.

4.5 UNIFICACIÓN DE SISTEMAS COORDENADOS

Aunque en el dispositivo de reconstrucción tridimensional las cámaras están ubicadas aproximadamente a 90° una de la otra con respecto al centro, al momento de realizar el procedimiento de calibración para las cámaras, cada una de ellas se calibra con su propio sistema coordenado y adquiere una porción de la imagen reconstruida del perfil en estudio, como se puede observar en la figura 33.

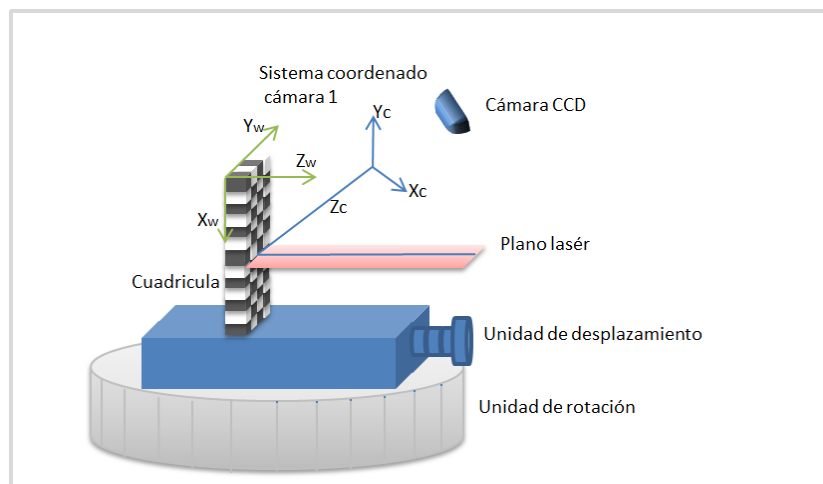


Figura 33. Esquema de montaje para calibración.

El sistema coordenado objeto (X_w, Y_w, Z_w) se calcula de manera independiente para cada cámara. En el procedimiento de calibración de la cámara se deben usar imágenes de la cuadrícula en posición relativa diferente dentro del campo de observación, como se muestra en la Figura 18. Sin embargo, cuando se desean calcular los parámetros extrínsecos, el procedimiento requiere de una imagen de la cuadrícula que fija (X_w, Y_w) paralelos a las columnas y filas de cuadros y Z_w perpendicular al plano de la cuadrícula, ver figura 33.

Aunque esta imagen se adquiere ubicando la cuadrícula en cualquier posición en el espacio abierto, se ubica de tal manera que el eje Z_w coincida con el eje Z empleado en el procedimiento de calibración láser (Ver capítulo 1) y el plano de la cuadrícula sea perpendicular al plano láser.

Las Figuras 25 a la 28 muestran las imágenes de la cuadrícula empleada para calcular los parámetros extrínsecos de cada cámara y que fijan los sistemas coordenados objeto, correspondientes de cada cámara y de cada sistema de reconstrucción tridimensional independiente.

Con el fin de garantizar un ángulo de 90° entre cada sistema coordenado, se ubicó la cuadrícula sobre una unidad de desplazamiento de $10 \mu\text{m}$ de resolución perpendicular al plano de la cuadrícula y éste sobre una unidad de rotación de un $1'$ de resolución. De esta manera, ubicando la cuadrícula de frente a la primera cámara se adquirirá la imagen para calcular los parámetros extrínsecos ubicando el tornillo de la unidad de desplazamiento en una posición de referencia que fija el 0 y luego se desplazaba el tornillo de -10 mm a $+10 \text{ mm}$ para adquirir las imágenes usadas en la calibración láser. El procedimiento se repetía ubicando el tornillo en el 0 de referencia y rotando consecutivamente 90° para adquirir las imágenes de las otras cámaras.

En las Figuras 25 a 28 se observa que un cuadro de la cuadrícula está marcado con un punto negro dentro de uno blanco, el cual sirve de referencia para escoger siempre la misma posición relativa del origen del sistema coordenado objeto de cada cámara.

Aunque la precisión en la rotación garantizaba los 90° entre los sistemas coordenados objetos, no se podía garantizar que el eje de rotación de la unidad de rotación coincidiera exactamente con el plano de la cuadrícula. Con el fin de calcular las transformaciones de rotación y traslación entre sistemas coordenados, es importante calcular el eje de rotación empleando el sistema coordenado objeto de una cámara. Este sistema coordenado objeto servirá como sistema coordenado global. Se emplea el sistema coordenado objeto de la cámara 1.

Empleando la precisión de la unidad de rotación se adquieren imágenes de la cuadrícula en posición angulada de -60° a 60° con intervalos de 5° , ver figura 34. A cada una de ellas se calcularon los puntos de control (u,v) en píxeles.



Figura 34. Secuencia de imágenes desplazadas cada 5° para calcular el eje de rotación en la cámara 1.

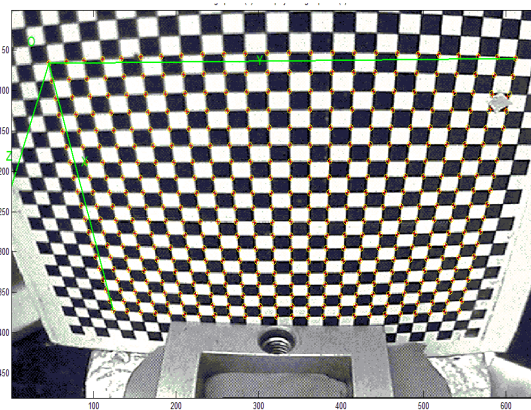


Figura 35. Extracción de los puntos vértices para el plano $\Theta=0$ de la cámara 1.

Empleando los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara se realizaron las proyecciones al espacio objeto de los puntos de control, obteniéndose las imágenes de la cuadrícula en el espacio objeto, para cada posición angular. En la figura 36 se muestran los planos de la cuadrícula y los puntos de control calculados para cada posición angular, ubicados en el sistema coordenado objeto, de igual forma también se muestra la posición del sistema coordenado de la cámara (X_c , Y_c , Z_c). Teóricamente el mismo punto de control ubicado en cada plano define en el espacio un círculo, cuyo centro debe pasar por el eje de rotación. Para cada punto de control se ajusta el círculo en término de mínimos cuadrados y se calcula el centro. Por planos se encuentran 170 coordenadas espaciales de centros. Con estos centros se ajustan por mínimos cuadrados una línea recta que define el eje de rotación. La Figura 36 muestra los círculos interpolados y sus correspondientes centros y la posición de la línea interpolada

con respecto al plano de la cuadrícula en posición angular 0° . La Fig. 37 muestra 9 planos alrededor de la posición $\Theta=0^\circ$ (planos) y el eje de rotación interpolado en el sistema de la cámara 1.

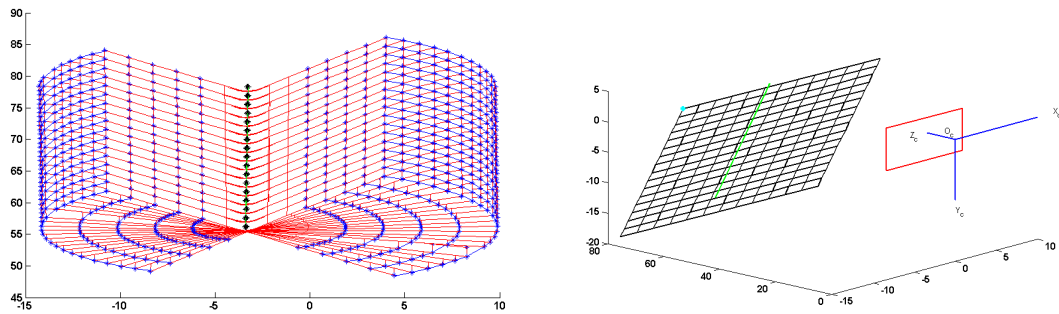


Figura 36 a y b) Intersección de planos y cálculo del eje de rotación del sistema.

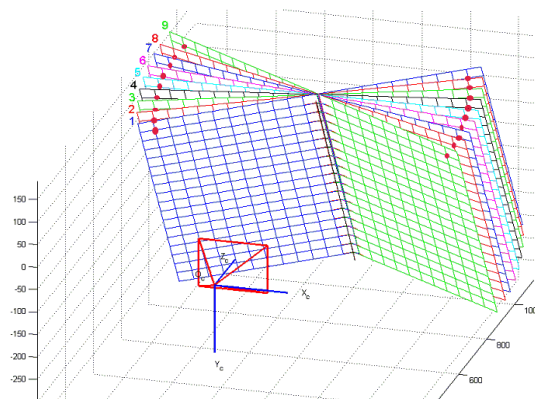


Figura 37. Superposición de planos para la cámara 1.

5 RECONSTRUCCIÓN 3D

5.1 RECONSTRUCCION 3D DE CADA CAMARA.

Al ubicar un objeto en el plano láser, cada cámara adquiere una sección de la línea laser obtenida de la interacción del plano láser con la superficie del cuerpo. La Figura 38 muestra las cuatro imágenes para un objeto de prueba. Para cada imagen se calculan las coordenadas centrales en pixeles de la línea láser deformada, empleando un procedimiento de binarización definido en la ecuación (5) Para las posiciones centrales y empleando la matriz de calibración láser se calculan los valores de Z para cada pixel de la línea láser. De esta manera se obtiene una matriz en pixeles con valores reales de Z en mm para los puntos de la línea láser. Con el fin de convertir pixeles (u, v) en milímetros (X_w, Y_w) . Se realiza un procedimiento de proyección similar al mostrado en la figura 24. Para cada punto de la línea láser se determina la ecuación de la recta $\overline{O_c P}$ empleando los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. Como a cada punto se conoce Z_w , la intercepción de la línea con el plano $Z=Z_w$ define las coordenadas del punto sobre el objeto. De esta manera se obtiene un perfil 3D del objeto en las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) independiente de cada cámara.

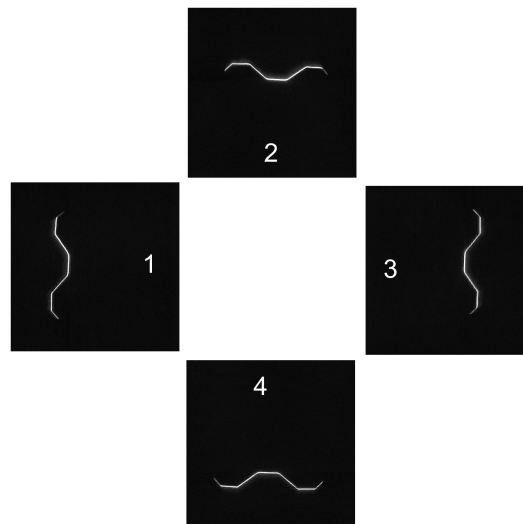


Figura 38. Imágenes tomadas por las 4 cámaras para un perfil metálico.

5.2 UNIFICACION DE SISTEMAS COORDENADOS.

Habiendo calculado el eje de rotación con respecto al sistema coordenado de la cámara 1 y sabiendo que entre sistemas coordenados hay 90° de rotación se procede a calcular las matrices de rotación y vectores de translación entre los sistemas coordenados objeto de las cámaras (2y1), (3y1) y (4y1).

La distancia más corta entre el origen del sistema coordenado de la cámara 1 O_1 y el eje de rotación define el punto P_i ; la distancia O_1P_i se calcula y corresponde al radio de rotación R . El vector \hat{u} define la dirección del eje de rotación. El vector \hat{u}_a corresponde al vector unitario en dirección O_1P_i y $\hat{u}_b = \hat{u}_x \hat{u}_a$. Para cualquier rotación alrededor de \hat{u} , en un valor Θ , el origen O_1 se desplazará espacialmente a O_2 definiendo el vector translación \vec{r}_o como:

$$\vec{r}_o = \vec{R}_i + R \cos(\theta) \hat{u}_a + R \sin(\theta) \hat{u}_b$$

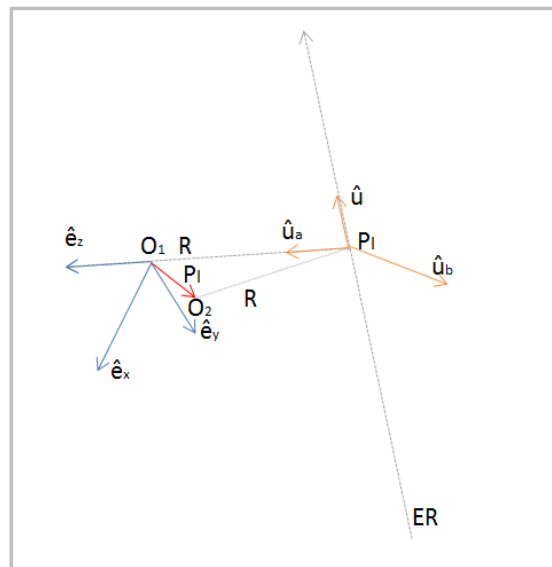


Figura 39 Esquema de unificación de sistemas coordenados.

Siendo \vec{R}_i el vector de posición de $O_{ia}P_2$. La influencia de la rotación se tiene en cuenta calculando los nuevos vectores unitarios \hat{e}'_x , \hat{e}'_y , \hat{e}'_z , al realizarse una rotación en un ángulo θ alrededor del eje \hat{u} . Para calcular este vector se traslada al eje de rotación al origen del Sistema Coordenado O_1 y se estudia la rotación alrededor de \hat{u} . La Figura 40 muestra la influencia de la rotación sobre el vector unitario \hat{e}_y . La distancia más corta entre el extremo del vector \hat{e}_y y el eje de

rotación define el vector \vec{P}_{by} , el radio R_y se define como $\|\hat{e}_y - \vec{P}_{by}\|$. En la dirección de $\hat{e}_y - \vec{P}_{by}$ se calcula el vector unitario \hat{e}_{ay} . La rotación en un ángulo θ alrededor de \hat{u} traslada el extremo del vector \hat{e}_y marcado como ① a la posición \hat{e}'_y marcada como ②, ver Figura 40b. De esta manera el nuevo vector unitario \hat{e}'_y estará dado por:

$$\hat{e}'_y = \vec{P}_{by} + R_y \cos(\theta) \hat{e}_{ay} + R_y \text{sen}(\theta) \hat{e}_{by}$$

Haciendo el procedimiento similar se calcula \hat{e}'_x y \hat{e}'_z obteniéndose:

$$\hat{e}'_x = \vec{P}_{bx} + R_x \cos(\theta) \hat{e}_{ax} + R_x \text{sen}(\theta) \hat{e}_{bx}$$

$$\hat{e}'_z = \vec{P}_{bz} + R_z \cos(\theta) \hat{e}_{az} + R_z \text{sen}(\theta) \hat{e}_{bz}$$

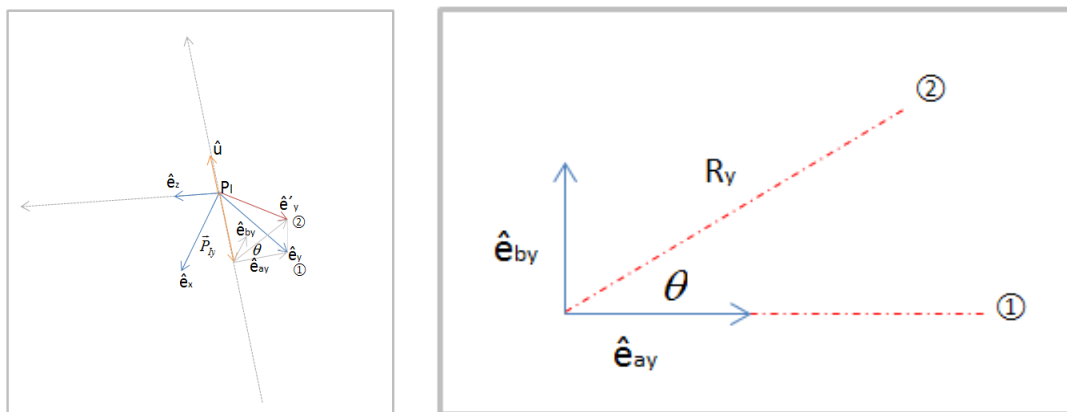


Figura 40 a) y b) Unificación de sistemas coordenados 2.

Para un punto $p'(x', y', z')$ ubicado en el sistema coordenado O_2 definido por los vectores unitarios $\hat{e}'_x, \hat{e}'_y, \hat{e}'_z$ puede ser transformado el sistema coordenado O_1 definido por los vectores unitarios $\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$ según:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_0 + x' \hat{e}'_x + y' \hat{e}'_y + z' \hat{e}'_z$$

Variando θ a valores $0^0, 90^0, 180^0, 270^0$ y usando como valores (x', y', z') las coordenadas de las reconstrucciones 3D obtenidas de cada cámara con los valores θ correspondientes, se obtiene el perfil completo en el sistema coordenado objeto de la cámara 1.

La Figura 41 muestra el perfil obtenido dadas las imágenes mostradas en la Figura 38.

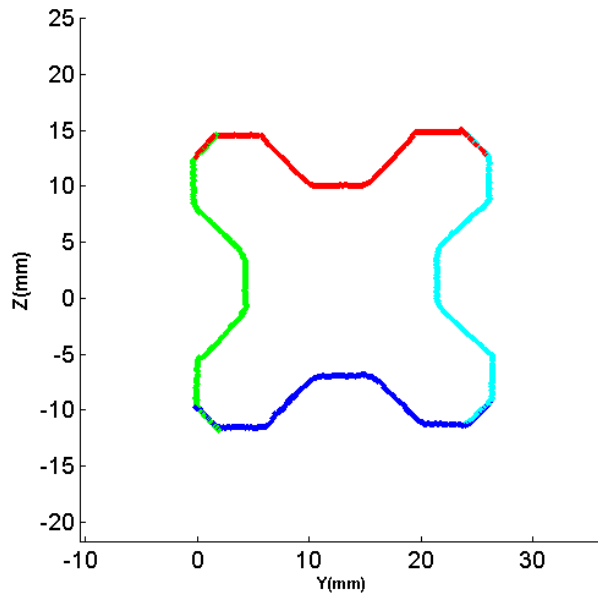


Figura 41. Reconstrucción de la sección transversal de un perfil.

5.3 ANALISIS DEL ERROR EN LA RECONSTRUCCION 3D.

De acuerdo al procedimiento completo de reconstrucción tridimensional mostrado anteriormente, se puede identificar diferentes fuentes de error.

5.3.1 INFLUENCIA DEL RUIDO EN LA IMAGEN DE LA LINEA LÁSER PARA CALCULAR EL VALOR DE Z.

La influencia del ruido introduce errores en la determinación del centro de la línea láser en píxeles. Con el fin de reducir la influencia de este ruido en la deformación de la matriz de calibración se realizó un ajuste polinomial en términos de mínimos cuadrados. Los datos experimentales corresponden a las posiciones (x_i, y_i) calculados usando el procedimiento de binarización descrito en el Capítulo 1 y mostrados en la Fig 6, la función interpolada corresponde a:

$$Z = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f$$

Donde (x, y) están en píxeles y (a, b, c, d, e, f) son los coeficientes a determinar. Una vez calculados los coeficientes se evalúa (x, y) para las diferentes posiciones en píxeles del rango de la imagen, obteniéndose la matriz de calibración laser usada en el procedimiento de reconstrucción tridimensional. El error en Z se determina ubicando el plano de referencia a un Z_i conocido con el tornillo micrométrico de $10\mu\text{m}$ de precisión y calculando la diferencia con el Z_R calculado a partir de la imagen y la matriz de calibración. Usando las posiciones $Z_T=0, +5\text{mm}, -5\text{mm}, +10\text{mm}$ y -10mm se encuentra un error promedio máximo de 0.083mm , con una desviación estándar de 0.012mm .

5.3.2. INFLUENCIA DEL ERROR EN EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE CÁMARAS.

El anterior error no tiene en cuenta el error que se comete al calcular los cuadrados

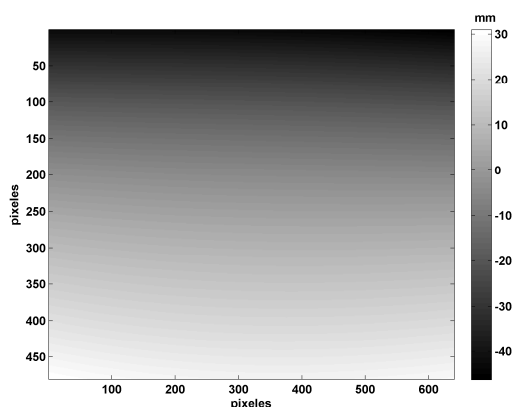
(x_w, y_w) conociendo Z . Este error estaría influenciado fuertemente para la presencia de aberraciones geométricas residuales después de hacer el proceso de calibración de la cámara. Como se analizó en el Capítulo 4 el máximo error que se comete en determinar las coordenadas (x_w, y_w) para un Z conocido corresponde a un círculo de $490\mu\text{m}$, para un cuerpo transversal de 48mm Y 78mm . Este error se encuentra en la región ubicada en los bordes de la imagen donde la influencia de la distorsión radial es muy fuerte. Aunque se debe reportar el valor máximo como error, en la región central que posee distorsión baja el error no supera las 100 micras. En esta región es donde se ubica el cuerpo.

5.3.3 INFLUENCIA DE LA UNIFICACION DEL SISTEMA COORDENADO.

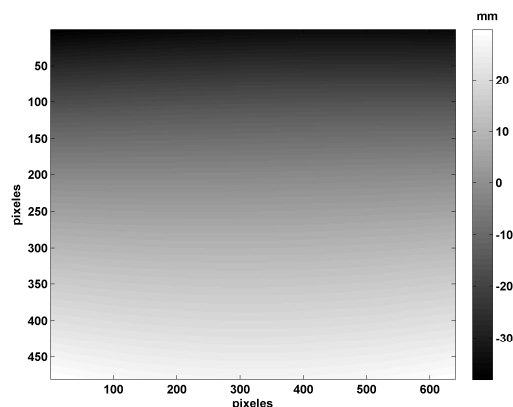
Este error está determinado principalmente por el empalme de las diferentes secciones del perfil tridimensional y causado principalmente por la precisión al definir el eje de rotación. Este error se puede establecer midiendo la diferencia de altura en la región con coordenadas comunes de dos secciones consecutivas: Regiones 1,2,3 y 4 de la Figura 41. Realizando un análisis estadístico para diferentes objetos de perfil conocido se encuentra la diferencia de distancia promedio en la región de superposición corresponde a un valor máximo de 0.382mm .

5.4 CONCLUSIÓN.

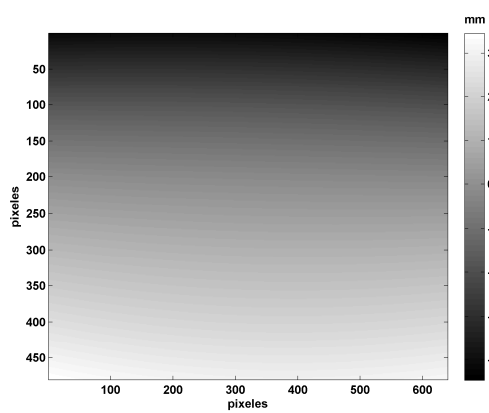
Según los resultados obtenidos anteriormente se encuentra que el máximo error que se obtiene corresponde a la influencia en el cálculo de los parámetros de calibración de las cámaras. Este error corresponde a un valor máximo de 0.49 mm. La principal fase de error está determinada por la presencia de distorsiones radiales residuales no corregidas por el procedimiento de optimización. Este error se puede reducir usando más coeficientes que evalúen de mejor manera las aberraciones geométricas o usando cámaras CCD con lentes sin aberraciones. La siguiente fuente de error en el cálculo de las coordenadas 3D del perfil es la precisión en el cálculo del eje de rotación, usado en la transformación de sistemas coordenados en el proceso de unificación de sistemas coordenados. Este error está determinado por la presencia de un empalme no exacto en las regiones comunes a 2 reconstrucciones consecutivas. Principalmente este error está influenciado por el error en el cálculo del eje de rotación, que a su vez depende de las coordenadas 3D de los puntos de control, que finalmente depende de la presencia de errores en el cálculo de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada cámara. Este error se puede reducir de 2 maneras: la primera es eliminando aberraciones residuales geométricas, y la segunda forma es usando algoritmos de registro de imágenes tridimensionales. En este último caso se diseña un algoritmo que minimice la distancia 3D entre 2 secciones comunes haciendo un ajuste al procedimiento de transformación en los sistemas coordenados. El error obtenido en el cálculo de las matrices de calibración láser, que se observan en la figura 42, aunque es pequeño, se puede reducir mejorando el algoritmo de búsqueda de las coordenadas centrales de la línea láser deformada. Es posible ajustar una curva gaussiana al perfil aprovechando que el láser es gaussiano y encontrar el centro gaussiano.



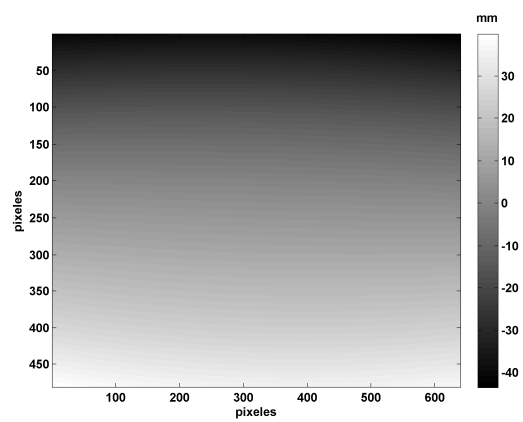
a). Cámara 1.



a). Cámara 2.



a). Cámara 3.



a). Cámara 4.

Figura 42. Matrices de calibración laser.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

- 1- Se diseñó y construyó un dispositivo prototipo de reconstrucción tridimensional implementado la técnica de triangulación láser y procesamiento digital de imágenes. En el dispositivo se usaron 4 cámaras y cuatro generadores de línea láser, desplazados entre sí 90 grados, para reconstruir la sección transversal de un perfil.
- 2- Durante el proceso de reconstrucción tridimensional se realizó la calibración por separado para cada uno de los 4 sistemas formadores de imágenes con el fin de corregir las aberraciones generadas por las cámaras, y también convertir pixeles sobre la imagen captada por la cámara CCD a unidades de longitud captadas en el plano objeto. Adicionalmente se emplea el procedimiento de calibración experimental para obtener una curva de calibración que permita convertir las deformaciones obtenidas en la línea láser, en parte de la sección transversal del objeto.
- 3- El dispositivo de medición 3-D que por medio de triangulación láser generó paquetes de cuatro imágenes digitales codificadas, desplazadas 90° una de la otra, de la sección transversal de perfiles dentro de un área de medida de 25x25 mm.
- 4- Se elaboró un algoritmo que permite reconstruir el contorno de la sección transversal del perfil, a partir de las imágenes generadas por cada una de las cámaras CCD ubicadas en el dispositivo de triangulación láser.
- 5- De la correcta determinación del eje de rotación y de las matrices de rotación y traslación de cada cámara depende el adecuado empalme de las imágenes que muestran la sección transversal del perfil.
- 6- Se realizó un análisis sobre la imagen del contorno de la sección transversal reconstruida por medio del cual se obtuvo los valores numéricos de las dimensiones físicas del perfil.
- 7- Se evaluó experimentalmente las características metrológicas del sistema de reconstrucción tridimensional, y se obtuvo los errores máximos que este puede generar.

- 8- Se recomienda el uso de cámaras CCD de mayor resolución y menos aberraciones con el fin de obtener reconstrucciones 3-D de la sección transversal de perfiles más precisas, debido a que las cámaras usadas para el dispositivo experimental son de uso en equipos de vigilancia, con un nivel alto de aberraciones: radial y descentral, y también con una baja resolución (640x480 Pixeles)
- 9- Se debe manejar un sistema de iluminación controlado para obtener un mayor contraste de la línea laser.

PUBLICACIONES REALIZADAS

1 PONENCIA

“RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE PERFILES EXTRUIDOS UTILIZANDO TRIANGULACIÓN LÁSER”

XIII Simposio de tratamiento de señales, Imágenes y Visión Artificial.

10-12 Septiembre 2008

Universidad Santo Tomas. Bucaramanga - Colombia

2 PONENCIA

“EXPLORACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE PERFILES EXTRUIDOS UTILIZANDO TRIANGULACIÓN LÁSER”

RIAO-OPTILAS 2010. VII Ibero-American Conference on Optics.

20-24 Septiembre 2010

Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima - Perú.

3 PONENCIA

“TRIANGULACIÓN LÁSER PARA LA EXTRACCIÓN DE INFORMACION 3D A 360 GRADOS DE OBSERVACIÓN: UNIFICACION DE SISTEMAS COORDENADOS”

RIAO-OPTILAS 2010. VII Ibero-American Conference on Optics.

20-24 Septiembre 2010

Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima - Perú.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARACENA DIEGO, CAMPOS PEDRO, TOSÍ CLÉSIO. Comparación de técnicas de calibración de cámaras digitales. Rev. Fac. Ing. – Univ. Tarapacá. 13(1). 2005.
- [2] BARBA JIMÉNEZ LEINER, VARGAS QUINTERO LORENA. *Sistema óptico de reconstrucción tridimensional usando shades3d. Grupo de Óptica e Informática-Universidad Popular del Cesar.*
- [3] CONTRERAS P, CARLOS RICARDO. “Dispositivo Óptico De Medida 3-D Con Simetría Cilíndrica: Aplicaciones En Balística”. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2006.
- [4] COSTA MANUEL F, “Surface inspection by an optical triangulation method”, Optical engineering, 1996.
- [5] GRILLI S., FERRARO P., DE NICOLA S., FINIZIO A., PIERATTINI G., MEUCCI., “Whole optical wave fields reconstruction bay digital holography”. Optics Express, Vol 9 No. 6, September 2001.
- [6] GONZALES RAFAEL, WOODS RICHARD, EDDINS STEVEN. *Digital image processing, Using MATLAB. Pearson. Prentice Hall 2004.*
- [7] HARTLEY RICHARD, ZISSERMAN ANDREW, “Multiple view geometry in computer vision”. Cambridge University Press, Second edition, 2003.
- [8] HEIKKILÄ J AND SILVÉN O. “A Tour-step camera calibration procedure with implicit image correction”. Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, FIN-90570 Oulu, Finland.
- [9] MORGAN B., WAITS C.M., KRIZMANI C.J. Y GHODSSI R. “Development of a deep silicon phase fresnel lens using gray-scale lithography and deep reactive ion etching. Journal of microelectromechanical systems”, Vol 13, N° 1, february 2004.
- [10] MUÑOZ POTOSI, ANDREA FERNANDA. “Diseño e implementación de un dispositivo de exploración tridimensional del pie humano.”. Tesis de grado. Universidad del Cauca. 2009.

[11] PEREZ ZAYRA, ROMERO LENNY. “Sistema óptico de reconstrucción 3D para la detección de ampollas en recubrimientos”. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2004.

[12] PINGFAN WU, FEIHONG YU, ZHENGMIN LI, ZHONGJUN YAN, AND YANGYUAN SHUN. *Analysis technique for the measurement of a three-dimensional object shape*. © 1993 Optical Society of America.

[13] ROMERO LENNY ALEXANDRA. “Sistema de reconstrucción tridimensional para el análisis dinámico de un cuerpo: Estudio cuantitativo del vulcanismo del lodo”. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2006.

[14] WENG, J., COHEN, P. AND HERNIOU. “Camera calibration with distorsion models and accuracy evaluation”. IEEE Transations on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-14(10). 965-980.1992.

[15] WENJING CHEN, MANHAI LI, XIANYU SU. *Error analysis about CCD sampling in Fourier transform profilometry*. Received 21 August 2007; received in revised form 5 January 2008; accepted 11 February 2008.

[16] YOSHIHIKO NOMURA, Michihiro Sagara, Hiroshi Naruse and Atsushi Ide. Simple Calibration Algorithm for High-Distortion-Lens Camera. 14(11): 1095-1099. 1992.

[17] ZHIFENG ZHANG, QIBO FENG, ZHAN GAO. *A new laser displacement sensor based on triangulation for gauge real-time measurement*. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China.