

**CORRELADOR HÍBRIDO DE TRANSFORMADA CONJUNTA EMPLEANDO UN
DSP**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
magíster en física

Por:

JOAQUÍN ALFONSO A. CORNEJO BAUTISTA

Director:

Dr. Yezid Torres Moreno

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES
Agosto de 2005

**CORRELADOR HÍBRIDO DE TRANSFORMADA CONJUNTA EMPLEANDO UN
DSP**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
magíster en física

Por:

JOAQUÍN ALFONSO A. CORNEJO BAUTISTA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES
Agosto de 2005

AGRADECIMIENTOS

Expreso sinceros agradecimientos a:

- Dr. YEZID TORRES MORENO, por la orientación brindada para el desarrollo de este trabajo.
- Al Dr. Jader Guerrero, a la Dra. María del Carmen Lasprilla, al Dr. Arturo Plata, al Dr. Jaime Meneses y a todos los integrantes del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales.
- A mi familia que de forma incondicional ha sido mi apoyo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. GENERALIDADES Y MARCO TEÓRICO.....	15
1.1 CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA (JTC).....	15
1.2 PROCESADORES DIGITALES DE SEÑALES (DSP)	19
1.2.1 CONJUNTO DE DESARROLLO PARA IMÁGENES.....	20
1.2.2 REPRESENTACIÓN NUMÉRICA	21
1.2.3 DETERMINACIÓN DE UN SEGMENTO DE MEMORIA.....	23
1.2.4 TRANSFERENCIA DE DATOS ENTRE MEMORIA EXTERNA Y MEMORIA INTERNA	24
1.2.5 COPIA DE DATOS 2D POR DMA.....	27
1.3 MÉTRICAS DE DESEMPEÑO	29
1.4 RESUMEN	31
2 CORRELADOR HÍBRIDO DE TRANSFORMADA CONJUNTA	32
2.1 CORRELADOR HÍBRIDO JTC.....	32
2.1.1 LCD CRL XGA4.....	33
2.1.2 DISPOSITIVO DSP	34
2.1.2.1 CÁLCULO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER DISCRETA 2D	35
2.2 PRUEBA DE SENSIBILIDAD	40
2.2.1 BRILLO Y CONTRASTE ÓPTIMO	40
2.2.2 UBICACIÓN DE LA ESCENA EN EL PLANO DE ENTRADA	43
2.2.3 FACTOR DE ESCALA DE LA ESCENA.....	45
2.2.4 ROTACIÓN EN EL PLANO DEL OBJETO BLANCO	49
2.2.5 PRESENCIA DE RUIDO EN LA ESCENA	51

2.2.6	CAPACIDAD DE DISCRIMINACIÓN.....	55
2.2.7	RESUMEN.....	56
3	CONCLUSIONES	58
3.1	CONCLUSIONES GENERALES.....	58
3.2	ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS.....	59
3.3	PROYECCIÓN ESPERADA.....	59
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Arquitectura óptica del JTC	16
Figura 2. Ejemplo de correlación óptica.	18
Figura 3. Kit de Desarrollo para Procesamiento de Imágenes/Video	20
Figura 4. Esquema punto flotante	22
Figura 5. Transferencia de datos con IDM	26
Figura 6. <i>fftshift</i> aplicado a la imagen de la izquierda.....	28
Figura 7. Región empleada para medir la PSR.....	29
Figura 8. Consideración de ruido	30
Figura 9. Arquitectura del correlador híbrido JTC.....	33
Figura 10. Pantalla de cristal líquido. (a) Panel LCD (b) interface PCB	33
Figura 11. Proceso realizado por el DSP	35
Figura 12. Procedimiento de cálculo de la transformada de Fourier 2D. (a) Señal de entrada. (b) FFT de las filas de (a). (c)Transpuesta de (b). (d) FFT a las filas de (c).....	37
Figura 13. Esquema de operaciones realizadas en el DSP	39
Figura 14. Métricas Vs. Brillo y contraste. (a) SNR (b) PSR (c) PCE (d) Combinación de métricas normalizadas.....	41
Figura 15. Comparación de desempeño. (a) Ajuste de brillo y contraste en valor no óptimo (b) Ajuste de brillo y contraste en valor óptimo.....	42
Figura 16. Diferentes ubicaciones de la escena en el plano de entrada del correlador	44

Figura 17. Correlaciones para las diferentes posiciones, objeto de 120x238 píxeles (a) Posición 1 (b) Posición 2 (c) Posición 3 (d) Posición 4 (e) Posición 5 (f) Posición 6 (g) Posición 7 (h) Posición 8 (i) Posición 9	45
Figura 18. Ejemplo del plano de entrada del correlador. (a) Imágenes binarias, escena 10% más grande. (b) Imágenes en escala de gris, escena 10% más pequeña.	46
Figura 19. Métricas de desempeño Vs. Factor de escala, para Imágenes binarias(a) Intensidad Máxima (b) PCE (c) SNR (d) PSR	47
Figura 20. Métricas de desempeño Vs. Factor de escala, para Imágenes en escala de gris(a) Intensidad Máxima (b) PCE (c) SNR (d) PSR (e) Ajuste de la intensidad máxima normalizada (f) Ajuste de la PCE normalizada	48
Figura 21. Ejemplo del plano de entrada con escena rotada 10°	49
Figura 22. Métricas vs. Angulo de rotación de la escena. (a) Intensidad Máxima (b) PCE (c) SNR (d) PSR (e) Intensidad Máxima Normalizada (f) PCE Normalizada	50
Figura 23. Planos de entrada con ruido aditivo blanco de media cero y varianza (a) 0.0 b) 0.1 (c) 0.2 (d) 0.3 (e) 0.4 (f) 0.5 (g) 0.6 (h) 0.7 (i) 0.8 (j) 0.9 (k) 1.0 (l) 0.1 (m) 1.0.....	52
Figura 24. Métricas vs. Varianza del ruido. (a) Intensidad máxima (b) PCE (c) SNR (d) PSR	53
Figura 25. Plano de correlación para diferentes varianzas del ruido Gaussiano del plano de entrada del correlador. (a) 0,0 (b) 0,1 (c) 0,2 (d) 0,3 (e) 0,4 (f) 0,5..	54
Figura 26. (a) Plano de entrada del correlador. (b) Objeto blanco. (c) y (d) Falsos objetos.....	55
Figura 27. Picos de correlación para el plano de entrada de la figura 27a.....	56

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Características de la tarjeta DSP TMS320C6711	21
Tabla 2: Cámara de vídeo Telecamera NK9127C (CCD)	21
Tabla 3: Tarjeta esclava de captura y visualización de vídeo	21
Tabla 4. Intensidad máxima para diferentes posiciones de los controles rotatorios	42
Tabla 5. Relación de posiciones en el plano de entrada del correlador	43

ABREVIATURAS

JTC: Correlador de Transformada Conjunta

DSP: Procesador Digital de Señales

LCD: Pantalla de Cristal Líquido

SLM: Modulador Espacial de Luz

PCB: Tarjeta de Circuito Impreso

JPS: Densidad Espectral Conjunta de Energía

IDK: Conjunto de Desarrollo para Imágenes

SNR: Relación Señal a Ruido

PSR: Relación Pico a Lóbulo lateral

PCE: Relación Pico a Energía de correlación

DC: Capacidad de Discriminación

MFLOPS : Millones de Operaciones en Punto flotante por Segundo

DMA: Acceso Directo a Memoria

DFT: Transformada de Fourier Discreta

FFT: Transformada Rápida de Fourier

TITULO: CORRELADOR HÍBRIDO DE TRANSFORMADA CONJUNTA EMPLEANDO UN DSP*

AUTOR: JOAQUÍN ALFONSO CORNEJO BAUTISTA**

PALABRAS CLAVES: Correlador JTC híbrido, Procesadores digitales de señales, Reconocimiento de formas.

RESUMEN

En este trabajo es implementado un correlador híbrido de transformada conjunta (JTC óptico/electrónico) útil en el reconocimiento de patrones cuando la escena está en movimiento. El correlador emplea la arquitectura estándar. La primera etapa de la correlación es llevada a cabo por vía óptica. Para obtener la densidad espectral conjunta de energía (JPS) de cada cuadro visualizado usamos una pantalla de cristal líquido (LCD) CRL XGA4 con 1024x768 píxeles de resolución en escala de gris. Éste despliega una secuencia de imágenes donde está incluida una escena móvil y la referencia, entonces, la JPS de cada cuadro es obtenida en tiempo real con un sensor cuadrático (cámara CCD) que está localizado en el plano focal posterior de la lente. Para la segunda etapa, nosotros usamos las herramientas del conjunto de desarrollo de imágenes/video (IDK) TMS3206711 DSP de Texas Instruments, con el objetivo de tomar ventaja de la aritmética de alta velocidad y de la versatilidad para tomar decisiones del procesador digital de señales (DSP). El IDK es una herramienta de hardware y software que permite capturar, procesar y visualizar imágenes en tiempo real. El DSP hace una transformada de Fourier de la imagen capturada por la CCD usando la rutina "cálculo eficiente de la DFT de una secuencia real de $2N$ puntos", de esta forma, obtenemos la correlación de la escena en movimiento a una rata superior a la de video.

* Trabajo de investigación.

** Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Dr. Yezid Torres Moreno.

TITLE: HYBRID JOINT TRANSFORM CORRELATOR USING A DSP*

AUTHOR: JOAQUÍN ALFONSO CORNEJO BAUTISTA**

KEY WORDS: Hybrid joint transform correlator, Digital Signal Processor, Pattern recognition

ABSTRACT

In this work is implemented a hybrid Joint Transform Correlator (JTC optical/electronic) helpful in the pattern recognition when the scene is in movement. We have been use the JTC standard architecture. The first step of the correlation process is carried out optically. To obtain the joint power spectrum (JPS) of each frame display we used a spatial light modulator; a LCD CRL XGA4 with 1024 x 768 pixels of resolution in grayscale. It display a sequence of images where is included a mobile and reference scenes, then, the JPS of each frame will be obtain in real time with the quadratic sensor (camera CCD) that is located in the back focal plane of the lens. For the second step, was use the tools of the Imaging Developer Kit TMS3206711 DSP (IDK) of Texas Instruments, in order to take advantage of the high speed arithmetic and the versatility to take decisions of the Digital Signal Proccessor (DSP). The IDK is a tool of hardware and software that allows capture, processing and display images in real time. The DSP makes a Fourier transform of the image captured by the CCD using an efficient calculus of 2N-point real sequence, in this way, we obtain the correlation of the scene in movement at rate greater than video frame.

* Investigation work.

** Faculty of Sciences, Physics School, Dr. Yezid Torres Moreno.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han investigado considerablemente las técnicas de reconocimiento óptico de patrones, razón por la cual se desarrollaron diferentes arquitecturas de correlación y diversos tipos de filtros, siempre con el objetivo de hacer un sistema más robusto, versátil y eficiente a la hora de la detección. Es importante resaltar que dicha evolución ha venido a la par con el desarrollo de diferentes dispositivos electrónicos, entre los cuales se deben resaltar las pantallas de cristal líquido (LCD) (como modulador espacial de luz) de alta resolución y tasa de visualización. Por otra parte, se han diseñado sistemas de reconocimiento completamente electrónicos, buscando suplir los inconvenientes que la óptica presenta.

En este trabajo de investigación se lleva a cabo una arquitectura híbrida estándar de correlación, específicamente, un correlador de transformada conjunta, de manera que se pueda complementar la óptica y la electrónica para obtener un sistema robusto. Se emplea un LCD de alta resolución (1024 x 768 píxeles) como modulador en el plano de entrada del correlador y un procesador digital de señales (DSP) TMS320C6711 de Texas Instruments® como principal dispositivo electrónico, en la segunda etapa del correlador.

En el capítulo 1 de este documento se abordan diferentes tópicos, en primer lugar se describe el correlador JTC con su respectivo formulismo matemático, seguido de una descripción del conjunto de desarrollo para imágenes/video basado en el dispositivo DSP TMS3206711 de TI. En ésta misma subsección se explica el modo de uso de algunas funciones útiles en el tratamiento de los datos en el

DSP y se plantean las métricas de desempeño que se usan en la prueba de sensibilidad realizada al correlador.

En el capítulo 2 se describe el correlador híbrido de transformada conjunta, enfatizando en la explicación del cálculo de la transformada de Fourier de la densidad espectral conjunta de energía en el DSP, de tal forma que el costo computacional del mismo sea mínimo. En las siguientes secciones de éste capítulo se muestran los resultados de las diferentes pruebas de sensibilidad aplicadas al correlador.

Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo de investigación, con el respectivo análisis del cumplimiento de los objetivos y las perspectivas del mismo.

1. GENERALIDADES Y MARCO TEÓRICO

En la primera sección de este capítulo se presenta la arquitectura del correlador de transformada conjunta con su respectiva formulación matemática. En la segunda sección se describen las características del procesador digital de señales, incluyendo una breve reseña de las funciones más importantes a tener en cuenta en el manejo de los datos con el procesador digital de señales y finalmente en la tercera parte se resumen las métricas de correlación a emplear.

1.1 CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA (JTC)

El correlador de transformada conjunta es una arquitectura experimental, ver figura 1, propuesta por Weaver y Goodman^[1] en 1966 como una técnica que permite realizar de manera óptica la correlación entre dos funciones. El JTC es utilizado en sistemas de visión, localización de trayectorias, sistemas dirigidos autónomamente, protección de cambios, sistemas de rastreo, reconocimiento de formas en tiempo real, dado que tiene ventajas respecto a la arquitectura VanderLugt^[2]:

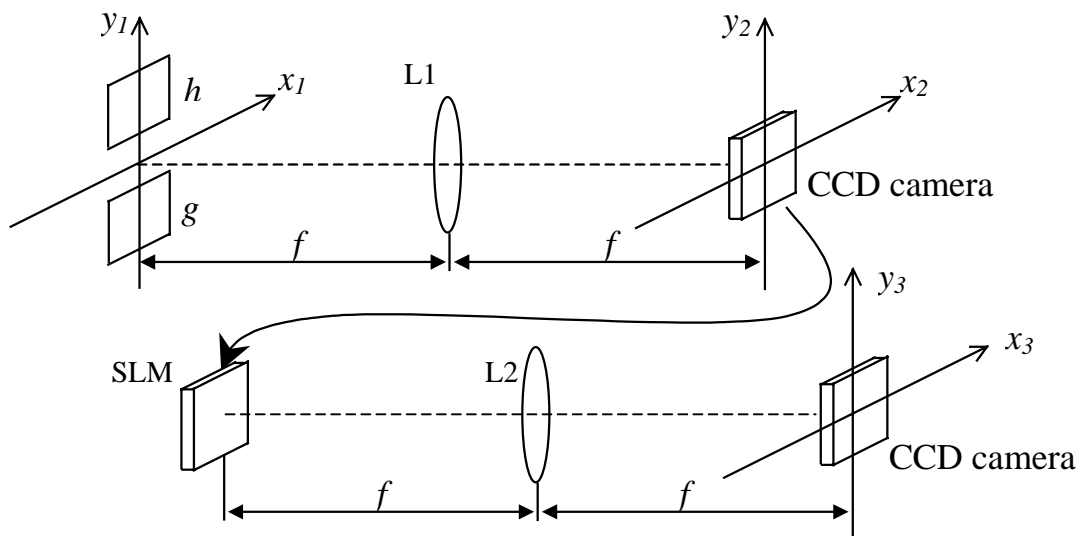
- No necesita la síntesis de un filtro complejo para modular la amplitud y la fase de la transformada de Fourier de la escena.
- Es menos sensible a las vibraciones y al desalineamiento de los elementos ópticos.

Una de las modificaciones planteadas al correlador de transformada conjunta clásico (o lineal) consiste en la transformación no lineal de la densidad espectral conjunta de energía^[3]. El correlador de transformada conjunta no lineal exhibe picos más agudos en el plano de salida disminuyendo la incertidumbre en la localización del blanco de interés.

En el plano de entrada del correlador se ubica la función de referencia $h(x_1, y_1 - Y/2)$ y la función escena $g(x_1, y_1 + Y/2)$, desplazadas cada una de ellas $Y/2$ del origen del sistema de coordenadas, luego la función de entrada es

$$u_1(x_1, y_1) = h(x_1, y_1 - Y/2) + g(x_1, y_1 + Y/2) \quad (1)$$

Figura 1. Arquitectura óptica del JTC



La densidad espectral conjunta de energía (JPS), la cual corresponde al módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de la función de entrada $u_1(x_1, y_1)$, puede obtenerse experimentalmente empleando un sensor cuadrático, por ejemplo una cámara CCD (charge-coupled device), ubicada en el plano focal posterior de la

lente L_1 . En el plano del sensor la amplitud compleja del campo electromagnético es proporcional a:

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{1}{\lambda f} H\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \exp\left(-j\pi y_2 \frac{Y}{\lambda f}\right) + \frac{1}{\lambda f} G\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \exp\left(j\pi y_2 \frac{Y}{\lambda f}\right) \quad (2)$$

siendo λ la longitud de onda de la onda plana que ilumina el sistema óptico y f la longitud focal de la lente L_1 . H y G representan la transformada de Fourier de las funciones h y g respectivamente, por lo tanto la JPS obtenida es:

$$I(x_2, y_2) = |u_2(x_2, y_2)|^2 = \frac{1}{(\lambda f)^2} \left[\left| H\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \right|^2 + \left| G\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \right|^2 + H\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) G^*\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \exp\left(-j2\pi y_2 \frac{Y}{\lambda f}\right) + H^*\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) G\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \exp\left(j2\pi y_2 \frac{Y}{\lambda f}\right) \right] \quad (3)$$

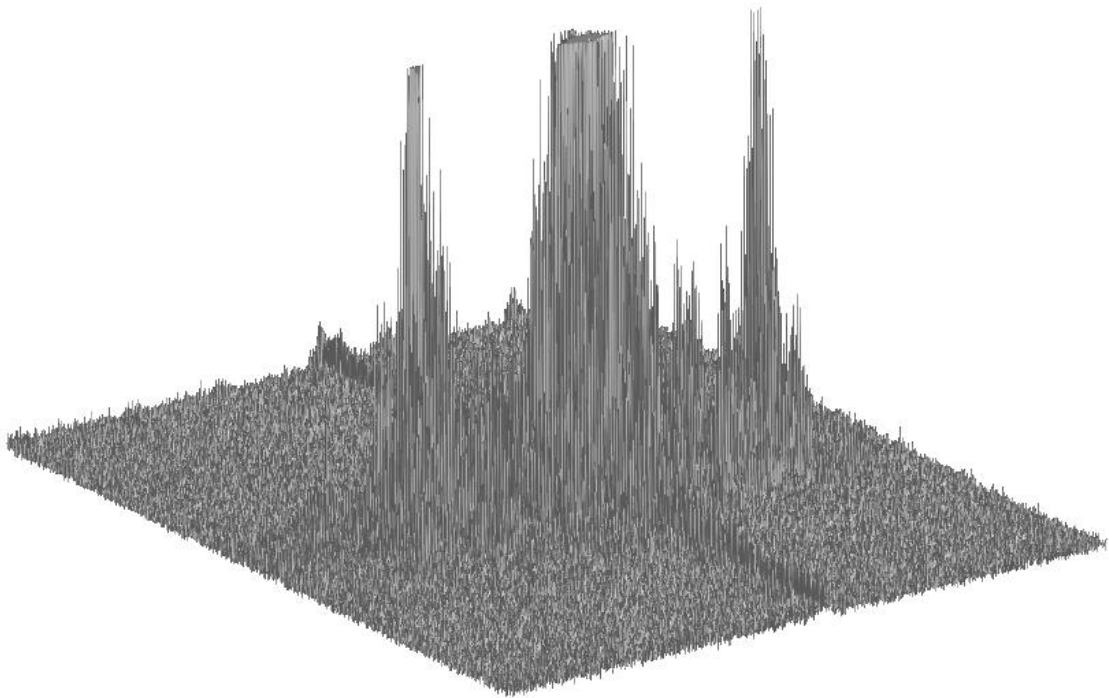
Para hallar la correlación entre las funciones h y g es necesario realizar la transformada de Fourier de la densidad espectral conjunta de energía. La distribución de amplitud en el plano de salida del correlador $u_3(x_3, y_3)$ es:

$$u_3(x_3, y_3) = \frac{1}{\lambda f} \left[h(x_3, y_3) * h^*(-x_3, -y_3) + g(x_3, y_3) * g^*(-x_3, -y_3) + h(x_3, y_3) * g^*(-x_3, -y_3) * \delta(x_3, y_3 - Y) + h^*(-x_3, -y_3) * g(x_3, y_3) * \delta(x_3, y_3 + Y) \right] \quad (4)$$

Los dos primeros términos de la anterior ecuación corresponden a las autocorrelaciones de las funciones h y g respectivamente, y los dos últimos términos son las correlaciones cruzadas de las funciones h y g , centradas en $(0, -Y)$ y $(0, Y)$ del plano de salida del correlador.

El JTC óptico convencional tiene dos inconvenientes, permite la existencia de la componente de orden cero de difracción (ó término dc ó fondo continuo), figura 2, y además requiere un modulador espacial de luz (SLM) de alta resolución para la visualización de la JPS y así obtener la correlación en el plano de salida.

Figura 2. Ejemplo de correlación óptica.



Para evitar que los picos de correlación se solapen con el fondo continuo se debe imponer sobre la separación entre la escena y la referencia la siguiente restricción:

$$Y > \max\{R_{y_1}, E_{y_1}\} + \frac{R_{y_1} + E_{y_1}}{2} \quad (5)$$

donde R_{y_1} y E_{y_1} es el ancho del soporte de la referencia y de la escena a lo largo del eje y_1 ^[4].

1.2 PROCESADORES DIGITALES DE SEÑALES (DSP)

Los procesadores digitales de señales son dispositivos electrónicos de propósito específico mediante los cuales se pueden poner en práctica la matemática, los algoritmos y las técnicas que se requieren en el procesamiento digital.

Es importante resaltar que el procesamiento digital de señales es una de las áreas de más desarrollo que la ciencia y la ingeniería han formado en los últimos años. Grandes cambios se han presentado en diferentes áreas: comunicaciones, imágenes médicas, radar, sonar, reconocimiento de formas, entre otras. Cada uno de estos campos ha desarrollado una intensa tecnología DSP, con algoritmos propios, herramientas matemáticas propias y técnicas especializadas ^[5].

Los microprocesadores de propósito general no están diseñados para satisfacer los cálculos numéricos que se requieren en el procesamiento digital de señales; a partir de los años ochenta, industrias electrónicas (Texas Instruments, Analog Devices y Motorola) desarrollaron los dispositivos tipo chip DSP que son capaces de ejecutar millones de operaciones por segundo en punto flotante. En el mercado se encuentra gran variedad de DSPs, diseñados en su mayoría para que ejecuten las operaciones básicas, por lo tanto, comparten ciertas características ^[6]:

- Aritmética de alta velocidad.
- Transferencia rápida de datos y en volumen.
- Múltiple acceso a memoria.

Los DSPs se clasifican según la forma en que realizan la representación numérica en:

- Procesadores de aritmética fija.
- Procesadores de aritmética en punto flotante.

Los primeros se caracterizan por su gran velocidad, encontrándose en la actualidad procesadores de hasta 4800 MIPS (millones de instrucciones por segundo); su principal desventaja radica en la falta de precisión numérica que es

importante en la realización de ciertas aplicaciones de procesamiento digital. Los DSPs en punto flotante presentan un excelente desempeño en cuanto a su precisión numérica y aunque no alcanzan las velocidades de los de punto fijo se pueden encontrar procesadores de hasta 2800 millones de operaciones en punto flotante por segundo (MFLOPS). El DSP utilizado para realizar este proyecto es de punto flotante a 32 bits, capaz de efectuar un máximo de 1000 MFLOPS.

1.2.1 CONJUNTO DE DESARROLLO PARA IMÁGENES (DSP TMS320C6000)

Es una plataforma para hacer desarrollos y demostraciones de aplicaciones de procesamiento de imágenes/video basado en una plataforma DSP TMS320C6000. El conjunto de desarrollo para imágenes (IDK) trae los elementos básicos de hardware y software necesarios para implementar nuevas aplicaciones, tablas 1,2 y 3 ^[7]. La figura 3 muestra los componentes del conjunto: una tarjeta DSP (TMS320C6711), una tarjeta de video, una cámara CCD y unas herramientas de software (Code Composer Studio IDE) de optimización que permite el desarrollo de aplicaciones en lenguaje C ^[8].

Figura 3. Conjunto de Desarrollo para Procesamiento de Imágenes/Video



Este sistema incorpora cualidades como una elevada capacidad de memoria, instrucciones orientadas a palabras de 32 bits, alta velocidad de procesamiento y una arquitectura paralela que le permite ejecutar hasta ocho instrucciones simultáneamente, serialmente o en combinación serial/paralela.

Tabla 1: Características de la tarjeta DSP TMS320C6711

Velocidad del reloj	150 MHz
Representación numérica	Punto flotante
Tiempo de instrucción	6.7 ns
Interfaz con memoria externa	32 bits
Timers	2(32 bits)
Bus de datos	32 - 64 bits
Tensión interna	1.8 V
Tensión de entrada/salida	3.3 V
Unidades independientes de cálculo	4 sumadores para punto flotante y punto fijo
	2 sumadores para punto fijo
	2 multiplicadores: punto flotante y punto fijo
Acceso directo a Memoria	16 canales independientes
Memoria de la tarjeta Externa Interna(Datos + Cache + Programa)	16MB 64KB +8 KB
Millones de operaciones en coma flotante por segundo	1000

Tabla 2: Cámara de vídeo Telecamera NK9127C (CCD)

Sistema de exploración NTSC o PAL
Imagen CCD 768(H), 494(V)
Voltaje Alimentación
12VDC, 185mA

Tabla 3: Tarjeta esclava de captura y visualización de vídeo

Entrada de Vídeo (NTSC o PAL)
Salida RGB para Monitor (565 VGA o SVGA)
Entrada de cámara compatible NTSC/PAL

1.2.2 REPRESENTACIÓN NUMÉRICA

El Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales dispone de un DSP que trabaja en punto flotante (números reales), el esquema de codificación para números en punto flotante es similar al de notación científica (donde una fracción decimal es

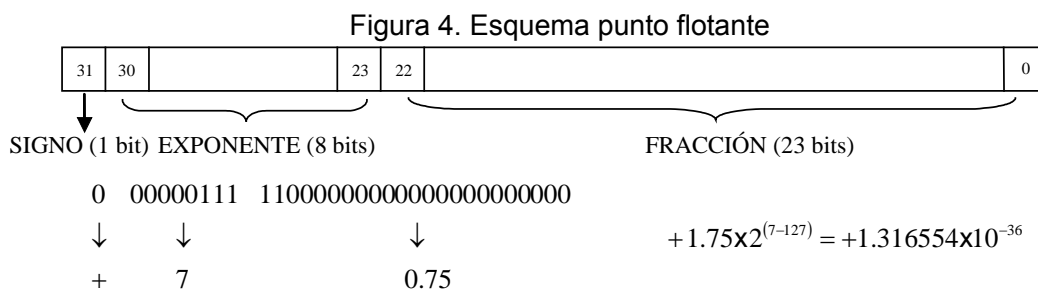
multiplicada por alguna potencia de diez) solo que todo es llevado a base dos. El formato más común es el estándar ANSI/IEEE 754-1985, donde se define el formato para 32bits (usado en el DSP) llamado de precisión sencilla. Los 32bits se dividen en tres grupos:

- Del bit 0 al bit 22 se representa la fracción (M, *mantissa*).
- Del bit 23 al bit 30 se representa el exponente (E).
- El bit 31 representa el signo (S).

Estos bits forman el número v en punto flotante:

$$v = (-1)^S * M * 2^{(E-127)} \quad (6)$$

El término $(-1)^S$ representa el bit del signo, es 0 para un número positivo y 1 para un número negativo. La variable E, es el número entre 0 y 255 representando el exponente de ocho bits. La fracción, M, es formada por 23 bits como una fracción binaria. Los números en punto flotante son normalizados, de tal forma que solo haya un número diferente de cero a la izquierda del punto binario, en la base dos el único número diferente de cero es el uno, entonces no se necesita almacenar este bit, ver figura 4.



La aplicación desarrollada incluye tratamiento de números complejos, estos se representan a través de dos números en punto flotante, uno para la parte real y otro para la parte imaginaria, resultando 8 bytes por número. Para evitar confusión

en el manejo de los números complejos, la parte real e imaginaria se almacena en dos regiones consecutivas de memoria:

Real	Imaginaria	Real	Imaginaria	Real	Imaginaria
------	------------	------	------------	-----	-----	------	------------

1.2.3 DETERMINACIÓN DE UN SEGMENTO DE MEMORIA

Es indispensable que el programador tenga dominio sobre los datos a procesar, para ello es necesario obtener segmentos de memoria externa ó de memoria interna sobre los cuales se tenga pleno control.

El “DSP/BIOS config” del Code Composer Studio® permite configurar el hardware del kit de desarrollo, en el DSP/BIOS se usa el controlador de secciones de memoria para generar las secciones de memoria que posteriormente serán segmentadas usando la función “DATA_SECTION”, cuya sintaxis en lenguaje C es:

```
#pragma DATA_SECTION (símbolo, “nombre de sección”);
```

El argumento *símbolo* corresponde al nombre que se le da al segmento de memoria en la sección de memoria enlazada a través de *nombre de sección*. Por ejemplo, con el controlador de secciones de memoria se genera una sección en memoria externa llamada SDRAM, la cual posteriormente será enlazada usando sólo una línea de código en el archivo link.cmd:

```
SECTIONS
{
.imagen    > SDRAM
}
```

Usando la función DATA_SECTION se crea el segmento ext_mem_FFT:

```
#pragma DATA_SECTION (ext_mem_FFT, “.imagen:ext_sect”);
```

Posteriormente se determina el tamaño del buffer y el tipo de datos que se almacenarán, la sintaxis en C es:

```
float símbolo[tamaño];
```

en el ejemplo:

```
float ext_mem_FFT[256*512];
```

1.2.4 TRANSFERENCIA DE DATOS ENTRE MEMORIA EXTERNA Y MEMORIA INTERNA ^[9]

El Code Composer Studio[®] incluye funciones para esquema de doble buffer que usan DMA y permiten mover eficientemente datos durante el procesamiento, la tarea principal de estas rutinas es ayudar al usuario con la actualización de punteros en el código, estas funciones están incluidas en el “Image Data Manager (IDM)”, algunas de las funciones IDM definidas son:

- **dstr_open**: define la entrada/salida de una cadena de datos de memoria interna a memoria externa o viceversa.
- **dstr_get**: carga (trae) datos desde la memoria externa a la memoria interna, trayendo una línea por vez o múltiplos de línea pero sin un offset entre ellas. Esta función sólo se puede usar para entrada de datos, el comportamiento no es garantizado cuando se emplea en la salida de datos.
- **dstr_get_2d**: carga (trae) datos desde la memoria externa a la memoria interna, trayendo una línea por vez o múltiplos de línea, con offset fijo entre las líneas. Esta función sólo se puede usar para entrada de datos, el comportamiento no es garantizado cuando se emplea en la salida de datos.
- **dstr_put**: carga (entrega) datos de memoria interna a memoria externa, cargando una línea por vez o múltiplos de línea sin offset entre ellas. Esta

función sólo se puede usar para la salida de datos, el comportamiento no es garantizado cuando se emplea en la entrada de datos.

- **dstr_put_2d**: carga (entrega) datos de memoria interna a memoria externa, cargando una línea por vez o múltiplos de línea con offset fijo entre las líneas. Esta función sólo se puede usar para la salida de datos, el comportamiento no es garantizado cuando se emplea en la entrada de datos.
- **dstr_close**: esta función cierra la cadena de datos abierta usando `dstr_open`. Esta función espera a que cualquier transferencia previa con DMA haya terminado y luego bloquea el flujo.

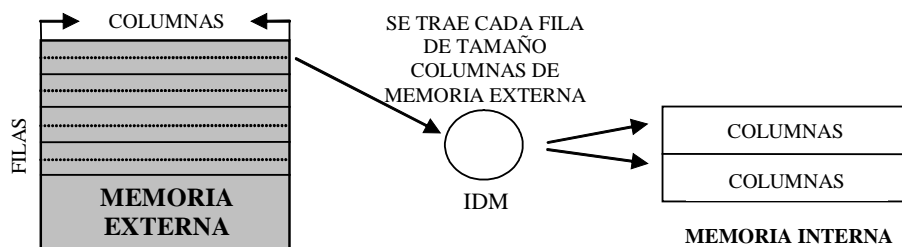
El prototipo de la función `dstr_open` :

```
int dstr_open
(
    dstr_t    *dstr,          /* estructura canal DMA */
    void      *x_data,       /* buffer de datos en externa */
    int       x_size,        /* tamaño del buffer de externa */
    void      *i_data,       /* buffer de datos en interna */
    unsigned short i_size,   /* tamaño del buffer de interna */
    unsigned short quantum,  /* número de bytes por línea a traer o a entregar */
    unsigned short multiple, /* número de líneas por buscar */
    unsigned short stride,   /* paso para incrementar en memoria externa */
    unsigned short w_size,   /* Tamaño de la ventana. 1 para doble buffer */
    dstr_dir_t dir           /* dirección: entrada ó salida */ )
```

Por ejemplo se tiene una matriz en memoria externa de tamaño filas x columnas, se desea cargar en memoria interna cada fila para procesarla (usando un esquema a doble buffer) entonces se debe inicializar un canal DMA usando la función `dstr_open`:

```
err_code = dstr_open (&i_dstr,
                    ext_ptr,
                    (filas+1)*columnas,
                    int_mem,
                    2*columnas,
                    columnas,
                    1,
                    columnas,
                    1,
                    (DSTR_INPUT) );
```

Figura 5. Transferencia de datos con IDM



- `&i_dstr`: puntero a la estructura `i_dstr`, que corresponde a la estructura DMA.
- `ext_ptr`: puntero a memoria externa.
- `(filas+1)*columnas`: tamaño del buffer en memoria externa. Se debe agregar una fila al tamaño del buffer por que la primera fila traída contiene el protocolo de la transferencia.
- `int_mem`: puntero a memoria interna.
- `2*columnas`: tamaño del buffer en memoria interna. Es el doble de columnas porque se está trabajando con doble buffer.
- `columnas`: número de bytes que se traen en una línea.
- `1`: numero de líneas traídas.
- `columnas`: número de bytes a incrementar en memoria interna.
- `1`: esquema de doble buffer.
- `(DSTR_INPUT)`: entrada de datos.

Teniendo el canal abierto se debe usar la función `dstr_get` para cargar los datos de la memoria externa a la memoria interna, el prototipo para esta función es:

```
void * dstr_get(dstr_t *dstr)
```

en el ejemplo, se debe de cargar cada fila de la imagen, entonces se usa un bucle y en cada paso del bucle se invoca la función `dstr_get`:

```
for ( i = 0; i < número_filas ; i++)  
{  
    in_data = (unsigned char *) dstr_get(&i_dstr);  
    :  
}
```

Para cargar los datos a memoria externa desde memoria interna (después de haber realizado el proceso) también se debe definir un canal DMA con la función `dstr_open` y posteriormente se usa la función `dstr_put` de la misma forma que la función `dstr_get`.

Finalmente se cierran los canales abiertos con `dstr_open` usando la función `dstr_close`, cuyo prototipo es:

```
void dstr_close(dstr_t *dstr)
```

Introduciéndola en el ejemplo:

```
dstr_close(&i_dstr);
```

La referencia 9 incluye algunos ejemplos que ilustran el uso de estas funciones.

1.2.5 COPIA DE DATOS 2D POR DMA

Para copiar datos por DMA se puede usar la función `DAT_copy2d`, esta función del Code Composer Studio® permite copiar datos con un esquema de dos

dimensiones (matricial), lo cual es útil en aplicaciones de imágenes. La estructura de la función es:

```
Uint32 DAT_copy2d(Uint32 tipo,  
                 void *src,  
                 void *dst,  
                 Uint16 lineLen,  
                 Uint16 lineCnt,  
                 Uint16 linePitch  
                 );
```

Los argumentos son:

- tipo: hace referencia al tipo de transferencia:
 - DAT_1D2D: transferencia 1D a 2D.
 - DAT_2D1D: transferencia 2D a 1D.
 - DAT_2D2D: transferencia 2D a 2D.
- src: puntero a los datos fuente.
- dst: puntero a la posición de destino.
- lineLen: número de bytes por línea a transferir.
- lineCnt: número de líneas.
- linePitch: número de bytes entre el inicio de una línea y el inicio de la siguiente línea.

Esta función se puede usar para realizar la transpuesta de una matriz y la operación *fftshift* (reordenamiento de los datos de un vector o matriz necesario en algunas operaciones), ver figura 6.

Figura 6. *fftshift* aplicado a la imagen de la izquierda



1.3 MÉTRICAS DE DESEMPEÑO

Para evaluar el desempeño de los sistemas de detección basados en correladores se han propuesto diferentes métricas ^[3,10-13] basadas en los datos que se tienen a la salida del sistema. Éstas medidas de desempeño estudian la agudeza del pico, la relación señal a ruido, la altura del pico de correlación, la invarianza a las distorsiones, entre otras características.

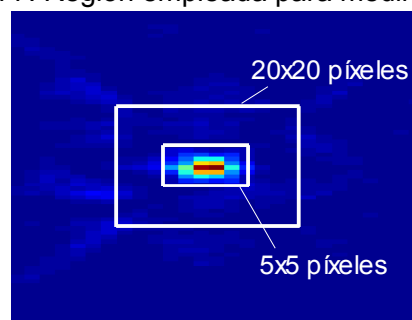
Las métricas que se tendrán en cuenta para la realización de la prueba de sensibilidad del correlador híbrido son: relación altura de pico-lóbulo lateral (PSR, del inglés peak-to-sidelobe ratio), relación altura de pico-energía de la correlación (PCE, del inglés peak to correlation energy), relación señal a ruido (SNR, del inglés signal to noise ratio) y la altura de pico. Además se evaluará la capacidad de discriminación del sistema operando en las condiciones óptimas.

La PSR y PCE se usan para cuantificar la agudeza del pico de correlación, la cual es un indicador de la incertidumbre en la localización en el plano de salida del objeto a ser reconocido. La PSR se define como:

$$PSR = \frac{I_p - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

Donde I_p representa la intensidad del pico de correlación del blanco deseado, μ representa el valor medio y σ la desviación estándar de una región de 20 x 20 píxeles alrededor del pico de correlación (pero excluyendo una pequeña región de 5 x 5 píxeles que contiene el pico de correlación), figura 7.

Figura 7. Región empleada para medir la PSR



Un valor alto de la relación PSR indica que el pico de correlación es agudo.

La PCE determina la relación de la intensidad del pico de correlación respecto a la energía del plano de correlación, así

$$PCE = \frac{I_p}{\sum_i^{N_1} \sum_j^{N_2} |c(x_i, y_i)|^2} \quad (8)$$

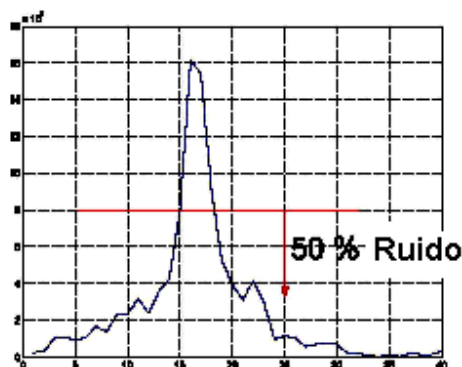
donde $c(x,y)$ es el resultado sobre el plano de correlación.

La SNR es definida como la relación entre la intensidad del pico de correlación y la desviación estándar del ruido, considerando ruido a los valores de intensidad inferiores al 50% de la altura del pico, figura 8.

$$SNR = \frac{I_p}{\sqrt{\frac{\sum_i^{N_1} \sum_j^{N_2} |n(x_i, y_i) - \overline{n(x_i, y_i)}|^2}{N_1' N_2'}}} \quad (9)$$

N_1 y N_2 son el número total de píxeles del área donde el pico de correlación es medido y N_1' y N_2' el número de píxeles donde hay ruido.

Figura 8. Consideración de ruido



Por otra parte, la capacidad de discriminación se define como:

$$DC = \left| 1 - \frac{CC}{AC} \right| \quad (10)$$

donde CC y AC son los valores de intensidad de la correlación cruzada y la autocorrelación, respectivamente. Cuando, se tienen varios objetos en la escena de entrada, la capacidad de discriminación es calculada usando el mayor valor de correlación cruzada.

Un valor alto de DC significa que el valor de correlación cruzada es bajo comparado con el de autocorrelación. Esto implica buena discriminación y buena robustez al ruido; por otra parte, un valor bajo de DC, significa que la correlación cruzada y la autocorrelación tienen un valor similar.

1.4 RESUMEN

En este capítulo se realizó una descripción teórica sobre: el correlador de transformada conjunta, el conjunto de desarrollo para imágenes/video DSP TMS3206711, el manejo y control de los datos en el DSP y de las métricas de correlación.

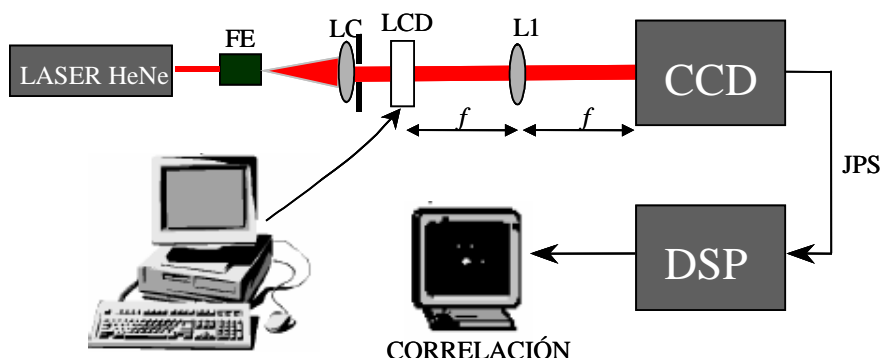
2 CORRELADOR HÍBRIDO DE TRANSFORMADA CONJUNTA

En este capítulo se describe en primer lugar el correlador híbrido JTC. En la segunda parte se reportan los resultados de la prueba de sensibilidad aplicada al correlador incluyendo como variables del sistema el brillo y el contraste de la escena de entrada (ajustables manualmente desde los controles de la pantalla de cristal líquido), El factor de escala y la ubicación del objeto blanco, la rotación en el plano y la presencia de ruido en la escena de entrada. Finalmente, se resumen los resultados.

2.1 CORRELADOR HÍBRIDO JTC

La figura 9 muestra la arquitectura del correlador. La fuente de iluminación es un láser de HeNe (longitud de onda 632.8 nm) con su respectivo filtrado espacial y sistema de colimación. El plano de entrada del correlador está sobre una pantalla de cristal líquido (LCD) CRL XGA4 de resolución espacial 1024x768 píxeles en escala de gris. La densidad espectral conjunta de energía (JPS) de cada cuadro visualizado sobre el LCD es calculada ópticamente, de ésta manera la primera etapa de la correlación descrita en la figura 1 es llevada a cabo por vía óptica. Para realizar la segunda etapa del proceso del correlador se emplea el conjunto de desarrollo para procesamiento de imágenes/video (cuyo elemento principal es el DSP TMS320C6711). El sistema DSP captura en tiempo real la JPS y procesa su transformada de Fourier para obtener la correlación de forma digital. La representación numérica de la correlación permite eliminar el pico espectral de orden cero o fondo continuo, de ésta manera se evitan los inconvenientes descritos en el numeral 1.1 ^[14].

Figura 9. Arquitectura del correlador híbrido JTC



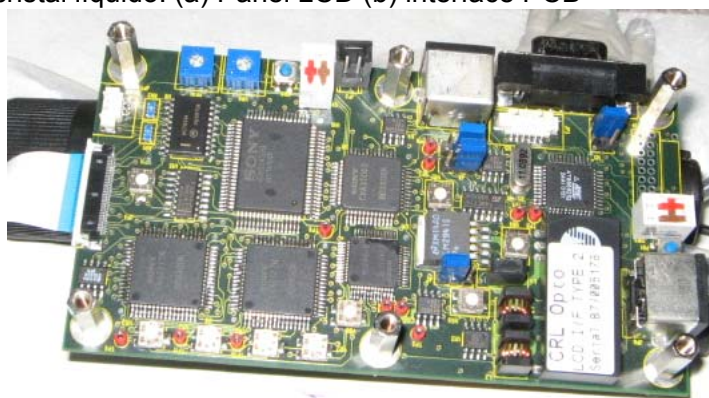
2.1.1 LCD CRL XGA4

El plano de entrada del correlador es visualizado sobre una pantalla de cristal líquido miniatura de resolución espacial 1024x768 píxeles y 18 mm de diagonal. El panel LCD es una matriz activa que usa material de cristal líquido “twisted nematic”. La pantalla es empleada con polarizadores externos brindando una relación de contraste superior que 100:1 con imágenes en escala de gris, además, posee una respuesta lo suficientemente rápida de tal forma que permite visualizar videos en moviendo evitando el difuminado (“smearing”).

Figura 10. Pantalla de cristal líquido. (a) Panel LCD (b) interface PCB



(a)



(b)

El panel LCD, figura 10a, está conectado permanentemente a una interfaz, figura 10b (circuito impreso PCB, del inglés Printed Circuit Board) a través de un cable flexible. La interfaz permite controlar el LCD adaptado directamente a la salida de video de un computador personal ajustando la resolución (1024x768 píxeles) y la frecuencia de video a la rata de 60 Hz. La conexión entre la interfaz y el computador es a través de un cable de monitor estándar. En la parte superior izquierda de la figura 10b se observan dos controles rotatorios (en color azul), éstos permiten ajustar el contraste y el brillo de la imagen desplegada sobre el LCD. La información detallada de la pantalla se encuentra en la referencia 15.

2.1.2 DISPOSITIVO DSP

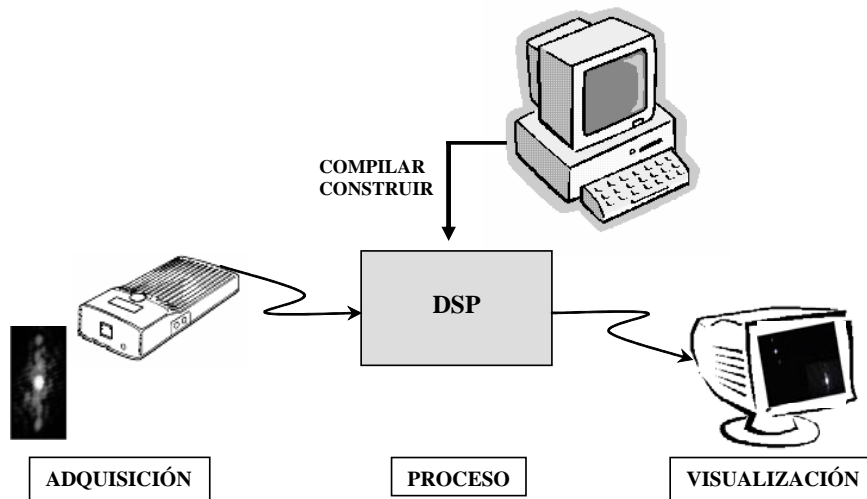
Las características del conjunto de desarrollo fueron previamente descritas en el capítulo 1, aquí se explicarán las operaciones realizadas en el DSP para calcular la correlación. La figura 11 muestra las etapas de la correlación ejecutadas en el DSP:

1. Adquisición de la JPS a través de la cámara con el sensor desnudo.
2. Procesamiento de la JPS en el DSP.
3. Visualización de los resultados en un monitor.

Las etapas de captura y visualización de resultados son controladas desde el DSP, el tiempo empleado en el procesamiento de los datos (cálculo de la transformada de Fourier) es el que determina la velocidad del sistema. La operación fundamental realizada en el DSP es una transformada de Fourier bidimensional a una señal real (JPS). El objetivo principal en dicho cálculo es tener en cuenta en la programación de las tareas que se realizarán en el DSP las simetrías de la transformada de Fourier de una señal real para optimizar el tiempo de cálculo de la correlación, además, se emplea el procedimiento conocido como

“cálculo eficiente de la transformada de Fourier discreta de una secuencia de 2N-puntos reales”^[16,17]

Figura 11. Proceso realizado por el DSP



2.1.2.1 CÁLCULO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER DISCRETA 2D

La transformada de Fourier discreta (DFT) 2D se escribe:

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{m=0}^{N-1} f(n,m) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{un}{M} + \frac{vm}{N} \right) \right] \quad (11)$$

y separando variables:

$$F(u,v) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \left[\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \left(f(n,m) \exp \left(-j2\pi \left(\frac{un}{M} \right) \right) \right) \right] \exp \left(-j2\pi \left(\frac{vm}{N} \right) \right) \quad (12)$$

La ecuación 12 corresponde a una DFT unidimensional aplicada a cada fila de la matriz a transformar y posteriormente una DFT unidimensional aplicada a cada columna del resultado inmediatamente anterior.

Por otra parte, como la señal a transformar es real se cumple que la transformada tiene simetría conjugada, que se expresa así:

$$X(k) \xleftrightarrow[N]{DFT} x(n) \in R \Rightarrow X(N-k) = X^*(k) \quad (13)$$

Entonces, sólo es necesario calcular $X(k)$ para $k = 0, 1, 2, \dots, N/2$.

Teniendo en cuenta las ecuaciones 11 y 12 se realiza una descripción didáctica del procedimiento realizado para calcular la DFT 2D, figura 12, allí las letras minúsculas simbolizan números reales y las letras mayúsculas números complejos. Se supone que la matriz C_a está debidamente dispuesta para calcular la DFT a cada fila (empleando el algoritmo FFT base 2), de la transformación resulta la matriz C_b , las letras en negrita resaltan las componentes de cada fila que poseen la simetría conjugada, es decir, que se escriben en función de otros elementos de la fila (ecuación 13), por lo tanto, en la aplicación los elementos repetidos no se transfieren a la memoria externa del DSP, ésta última matriz es transpuesta y cada fila es transformada para obtener la transformada de Fourier discreta 2D de la matriz C_a . La simetría que resulta en la matriz C_d se escribe:

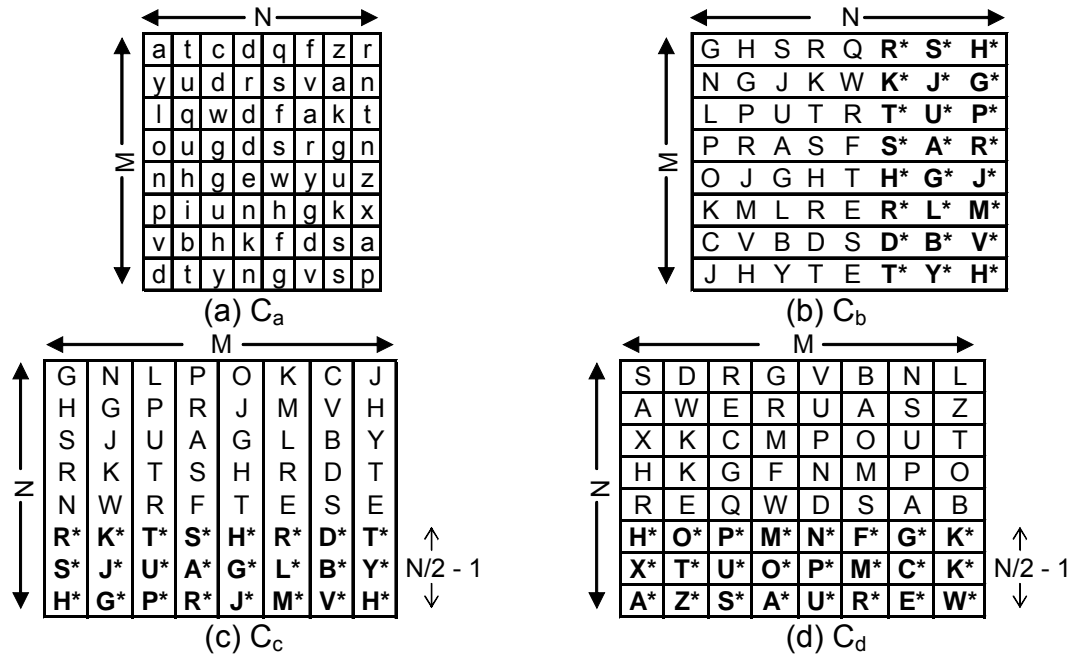
$$\begin{aligned} C_d(N/2 + j, k) &= C_d^*(j, M - k) \\ C_d(N/2 + j, 0) &= C_d^*(j, 0) \end{aligned} \quad \text{para} \begin{cases} k = 1, 2, 3, \dots, M - 1 \\ j = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} - 1 \end{cases} \quad (14)$$

De la anterior ecuación se deduce que con éste procedimiento solo es necesario calcular $N/2+1$ transformadas unidimensionales de Fourier de longitud M .

Cabe notar que posterior a éste resultado se deben realizar otras operaciones para efectos de visualización.

La FFT de cada fila de la matriz C_a se hace con el método "cálculo eficiente de la transformada de Fourier discreta de una secuencia de $2N$ -puntos reales"^[16,17], el método consiste en emplear en el cálculo de la FFT de una señal real el algoritmo FFT base 2 para señales complejas (optimizado en lenguaje ensamblador).

Figura 12. Procedimiento de cálculo de la transformada de Fourier 2D. (a) Señal de entrada. (b) FFT de las filas de (a). (c) Transpuesta de (b). (d) FFT a las filas de (c)



Llámesese $x(n)$ a una señal discreta unidimensional real de $2N$ muestras (equivale a una fila de la matriz C_a) y $c(n)$ a una señal discreta unidimensional compleja de N muestras. La señal $c(n)$ se forma con las componentes pares e impares de $x(n)$, entonces:

$$\begin{aligned}
 c_1(n) &= x(2n) \\
 c_2(n) &= x(2n+1) \quad , \text{ para } 0 \leq n \leq N-1 \\
 c(n) &= c_1(n) + jc_2(n)
 \end{aligned} \tag{15}$$

Se demuestra fácilmente que la transformada de Fourier discreta de $x(n)$ se puede escribir en función de la transformada de Fourier discreta de $c(n)$. Si $X(k)$ y $C(k)$ son la transformada de Fourier de $x(n)$ y $c(n)$ respectivamente, se tiene que:

$$\begin{aligned}
X_R(k) &= C_R(k)A_1(k) - C_I(k)A_2(k) + C_R(N-k)B_1(k) + C_I(N-k)B_2(k) \\
X_I(k) &= C_R(k)A_2(k) + C_I(k)A_1(k) + C_R(N-k)B_2(k) - C_I(N-k)B_1(k) \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (16) \\
X_R(N) &= X_R(0) - X_I(0) \\
X_I(N) &= 0
\end{aligned}$$

donde los subíndices R e I representan la parte real y la parte imaginaria respectivamente y

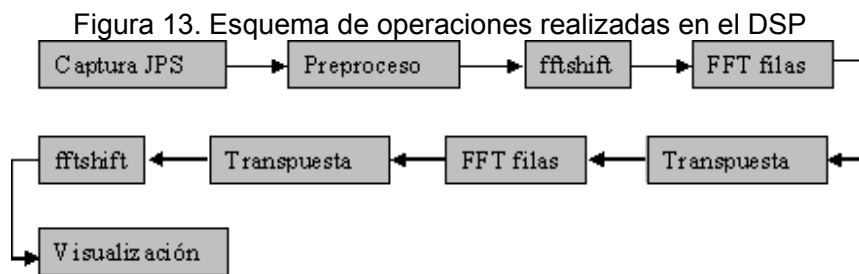
$$\begin{aligned}
A_1(k) &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi k}{N}\right) \\
A_2(k) &= -\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi k}{N}\right) \\
B_1(k) &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi k}{N}\right) \\
B_2(k) &= \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi k}{N}\right)
\end{aligned} \quad (17)$$

Las $N-1$ componentes restantes se determinan según la simetría conjugada:

$$X(2N-k) = X^*(k) \quad \text{para } 1 \leq k \leq N-1 \quad (18)$$

Se decidió calcular la FFT a través del procedimiento anteriormente descrito pues se ha reportado que dicha técnica mejora la rapidez del cómputo cuando la RAM del DSP no está completamente ocupada, condición que se presenta en este caso.

El proceso detallado realizado en el DSP se describe en el siguiente diagrama:



Las etapas de *fftshift* – FFT filas – Transpuesta – FFT filas – Transpuesta – *fftshift* corresponden al cálculo de la DFT bidimensional.

Para la visualización, la magnitud al cuadrado de la matriz de correlación es escalada al rango de 0 a 255 y posteriormente binarizada, de tal forma que permanezcan sólo los picos de correlación. Dicho umbral puede ser seleccionado en tiempo real, a partir del valor máximo de la correlación, pero por efectos de tiempo de cálculo se deja constante.

El tiempo requerido para el proceso esquematizado en la figura 13 es de 31,746 ms ó 31,5 cuadros por segundo, tiempo que determina la velocidad de procesamiento del correlador, dado que la primera etapa es llevada a cabo ópticamente, éste resultado prueba que el cálculo de la DFT 2D a través de la estrategia descrita anteriormente permite duplicar la rapidez del correlador. En la referencia 14 (el trabajo citado corresponde a un resultado parcial de ésta investigación presentado en el marco del 8th. Internacional Symposium on Laser Metrology, en Febrero de 2005, Mérida, México) se reporta que la rapidez del correlador es de 15 cuadros por segundo, en dicho trabajo no se emplearon las optimizaciones para calcular la transformada de Fourier 2D.

Por otra parte Neema y *et. al.*^[18] reportan que su correlador 100% digital procesa 30 cuadros en un segundo, pero en imágenes de 128x128 píxeles (que corresponde a la mitad de la resolución del correlador implementado en éste trabajo) además, el prototipo desarrollado por ellos emplea de 10 a 14 DSPs.

La referencia 16 corresponde a un correlador tipo VanderLugt completamente digital que emplea un DSP con las mismas características, allí se reporta que el

correlador ejecuta aproximadamente 12 correlaciones por segundo a igual resolución que la nuestra, 256x256 píxeles.

Estas comparaciones permiten destacar la ventaja, en cuanto a tiempo de cálculo, ofrecida por el correlador híbrido anteriormente descrito.

2.2 PRUEBA DE SENSIBILIDAD

Se tienen en cuenta diferentes parámetros del correlador para elaborar la prueba de sensibilidad, el brillo y el contraste del plano de entrada del correlador son esenciales en el desempeño del mismo. Aunque el correlador se base en un filtrado no tolerante a distorsiones (conocido como filtro adaptado) es conveniente medir el efecto sobre la correlación de un posible factor de escala que modifica el tamaño del objeto blanco (escena), de una rotación en el plano de la escena y de la presencia de ruido en la escena de entrada. Además se determina el límite en la posición del objeto blanco de tal forma que se evite que los picos de correlación se salgan del plano de correlación, éste último efecto es causado por la transformación de Fourier digital realizada en el DSP.

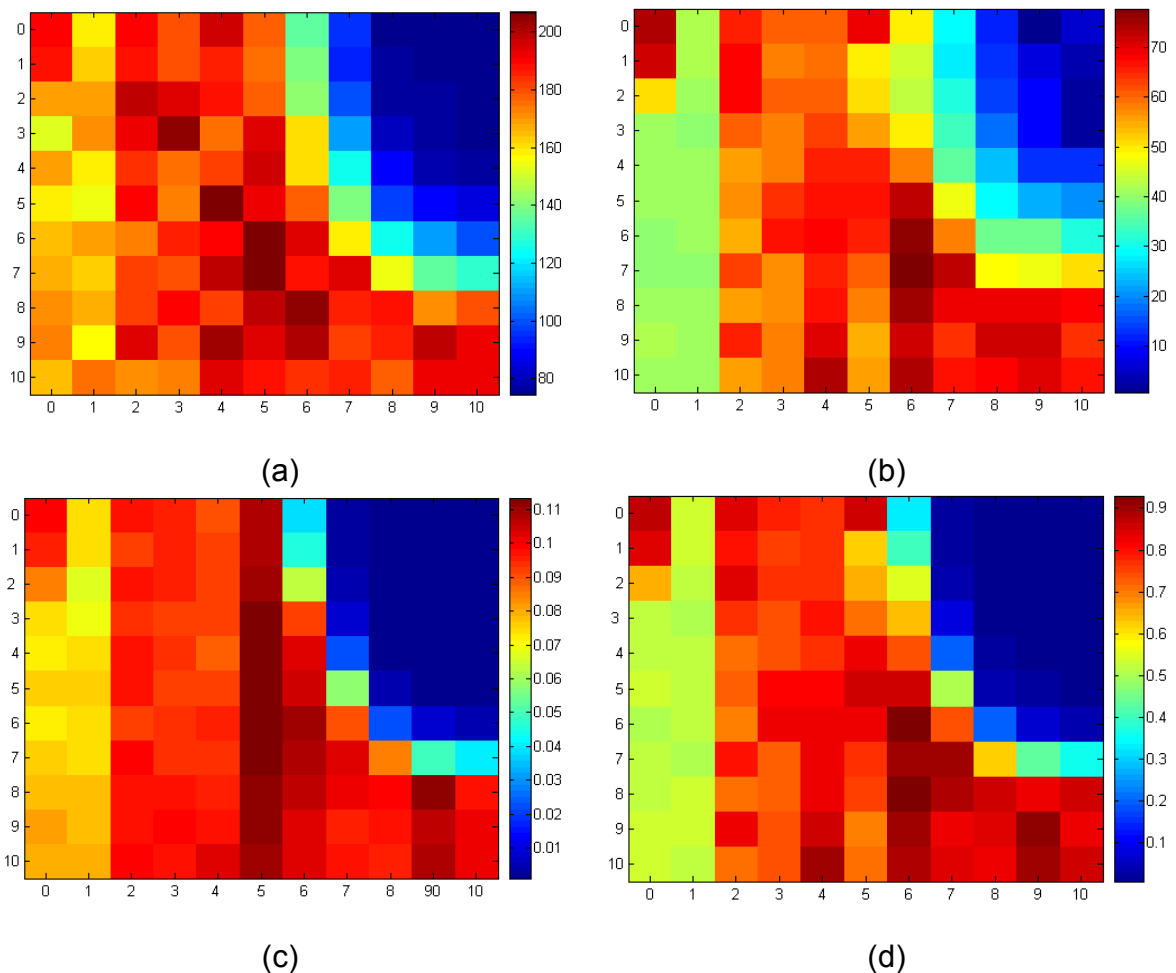
2.2.1 BRILLO Y CONTRASTE ÓPTIMO ^[19]

El objetivo es determinar la posición de los controles del brillo y del contraste de la pantalla de cristal líquido (figura 10b) que maximiza la eficiencia de la correlación, para cumplir éste propósito se calcula la correlación para 121 posiciones diferentes de los controles rotatorios y se encuentran las métricas SNR, PSR y PCE, Figura 14. Cada control tiene 11 marcas, cada medida se repitió 10 veces para establecer un promedio estadístico. Se usó un plano de entrada binario.

De la figura 14a, se puede establecer que el rango de mejor eficiencia está entre las posiciones 4 y 6 en el brillo, y entre 5 y 8 para el contraste. El valor máximo de SNR es 208.0181 para la combinación [5,7]. De 14b, se establece que el valor de mejor eficiencia es para brillo 6, y el contraste en el rango de 5 a 8. El valor

máximo de PSR es 78.4022 para la combinación [6,7] y de la 14c, se puede establecer que la mejor eficiencia es para brillo 5, y para el contraste el rango es ahora más grande, se extiende desde 2 hasta 10 (valores mayores de 0.11). El valor máximo de PCE es 0.1142 para la combinación [5,7]. De estos resultados se determina que el brillo debe ser ajustado a un valor entre 5 y 6, mientras que el contraste se puede ajustar al nivel de 7.

Figura 14. Métricas Vs. Brillo y contraste. (a) SNR (b) PSR (c) PCE (d) Combinación de métricas normalizadas



Por otra parte, se normaliza al valor máximo cada métrica y se realiza una comparación entre ellas creando una matriz con los valores de menor magnitud, de ésta manera se puede establecer el ajuste óptimo del brillo y del contraste

teniendo en cuenta los peores resultados de las tres pruebas, figura 14d. De allí se observa que los resultados de mejor desempeño corresponden a la posición de brillo 6 y de contraste entre 6 y 8 predominando la métrica PSR.

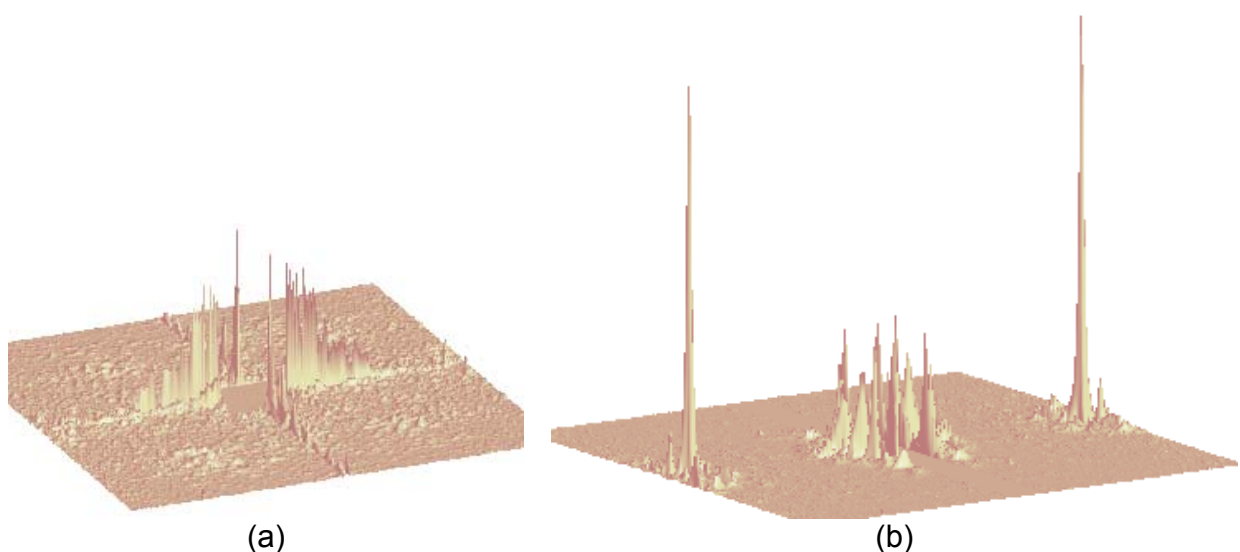
Como no es fácil concluir a partir de los resultados anteriores cual combinación es la que preferiblemente debe usarse, se realiza un estudio de la intensidad máxima para las parejas [5,7], [5-6,7], [6,6], [6,7] y [6,8], ver tabla 4.

Tabla 4. Intensidad máxima para diferentes posiciones de los controles rotatorios

Controles	Intensidad Máxima normalizada
[5,7]	0.956
[5-6,7]	0.982
[6,6]	0.964
[6,7]	1
[6,8]	0.955

Basados en los resultados de la tabla 4 se determina que el brillo y el contraste deben ser posicionados en [6,7] respectivamente para obtener mejor desempeño en la correlación, vale resaltar que prácticamente el desempeño del correlador en ésta región de trabajo de los controles rotatorios es la misma, según ésta métrica no hay variación superior al 4.5%.

Figura 15. Comparación de desempeño. (a) Ajuste de brillo y contraste en valor no óptimo
(b) Ajuste de brillo y contraste en valor óptimo



A manera de ejemplo, la figura 15a y 15b reflejan el efecto de los controles brillo y contraste; en el primer caso se tiene un resultado de correlación solamente con ruido, mientras que en el segundo caso se observan perfectamente los picos de correlación.

Cabe notar que de ésta evaluación se escribió el trabajo “Hybrid joint transform correlator with DSP device - Contrast and brightness Influence” presentado en el marco del IX Encuentro Nacional de Óptica, éste trabajo recibió la mención de 2do. Mejor trabajo de postgrado en la modalidad de presentación oral.

2.2.2 UBICACIÓN DE LA ESCENA EN EL PLANO DE ENTRADA

Además de tener en cuenta la restricción impuesta sobre la separación entre la referencia y la escena en el plano de entrada del correlador, descrita en el numeral 1.1, es necesario realizar un estudio experimental sobre el posicionamiento de la escena en dicho plano; éste estudio se hace necesario al tener en cuenta que se debe imponer un límite en la separación referencia-escena de tal forma que se evite que los picos de correlación se salgan del área del plano de salida. Éste fenómeno ocurre porque en la segunda etapa de la arquitectura híbrida interviene un proceso discreto de transformación de Fourier.

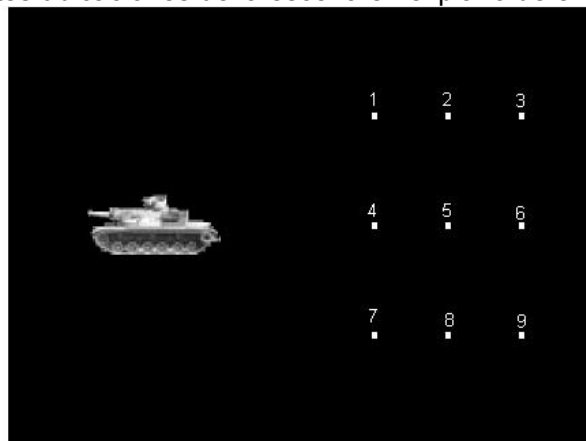
Para realizar la prueba se escogen nueve posibles ubicaciones del objeto blanco (la referencia permanece centrada en la fila 384 columna 256 del plano de entrada). Las posiciones de la escena están simétricamente distribuidas en el plano de entrada del correlador, como se muestra en la figura 16. Cada posición se relaciona en la siguiente tabla:

Tabla 5. Relación de posiciones en el plano de entrada del correlador

Posición	Píxeles (FxC)	Posición	Píxeles (FxC)	Posición	Píxeles (FxC)
1	[192,640]	4	[384,640]	7	[576,640]
2	[192,768]	5	[384,768]	8	[576,768]
3	[192,896]	6	[384,896]	9	[576,896]

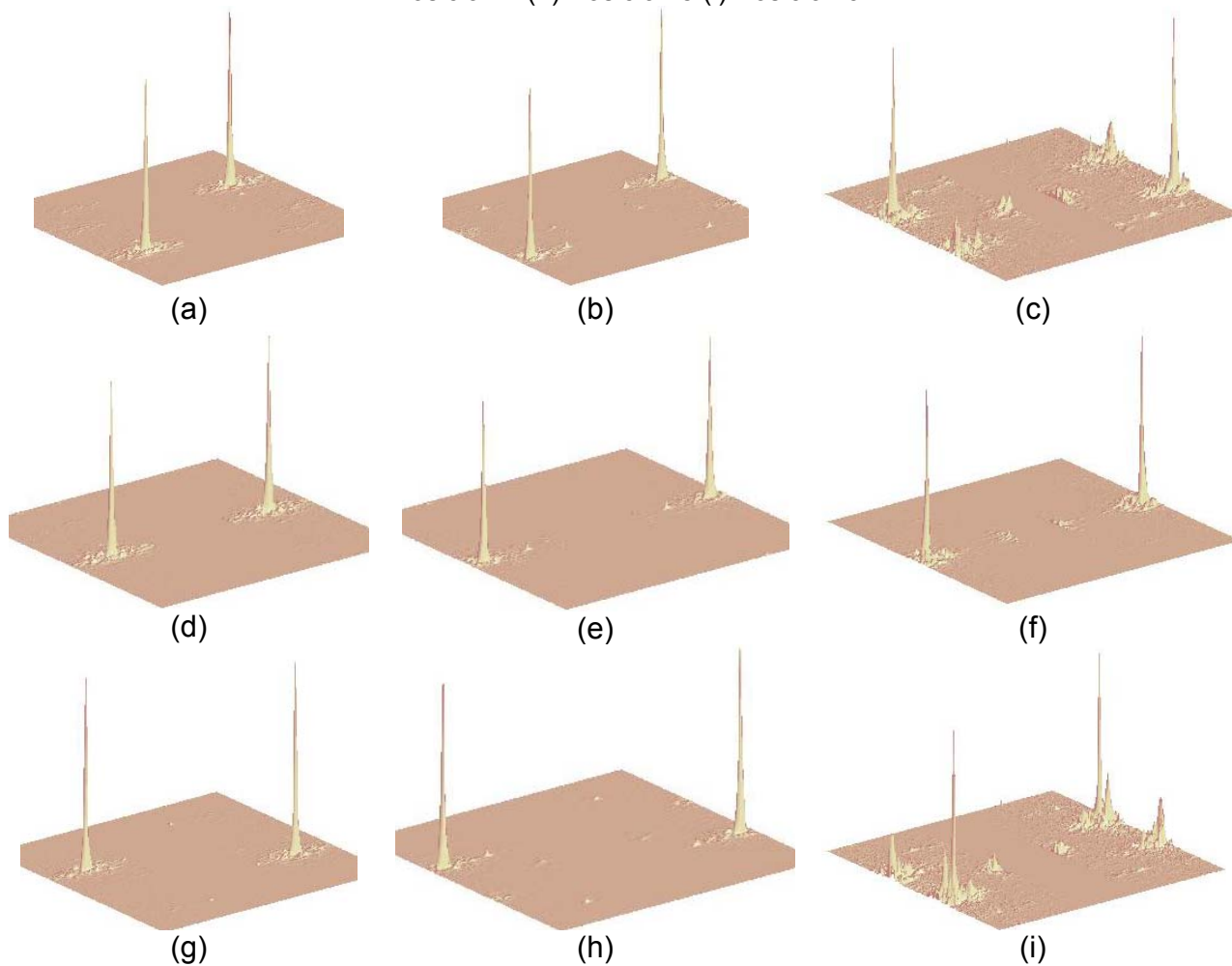
Ésta prueba fue aplicada para tres objetos de diferentes dimensiones, 208x224 píxeles (imágenes binarias), 120x238 píxeles y 88x192 píxeles (imágenes en escala de gris), los resultados tienen igual comportamiento para los tres casos, pues teóricamente el factor que influye es la separación entre centro y centro de los objetos presentes en el plano de entrada, y para los tres casos ésta distancia es la misma. De los resultados de la correlación se obtuvo que para las ubicaciones 3, 6 (aunque la figura 17f no lo ilustre) y 9 el pico de correlación se salen del límite, lo cual indica que la escena no puede estar centrada a partir de la columna 896 píxeles. La figura 17 muestra los resultados de la correlación para uno de los casos.

Figura 16. Diferentes ubicaciones de la escena en el plano de entrada del correlador



Con el objetivo de aprovechar al máximo la región disponible destinada a la escena de entrada y debido a que la separación en este caso no viola los límites del plano de salida de la correlación, se establece que la escena debe ser posicionada en el centro de la sección derecha del plano de entrada, es decir, centrada en el punto 5 (figura 16, píxeles [384,768]).

Figura 17. Correlaciones para las diferentes posiciones, objeto de 120x238 píxeles (a) Posición 1 (b) Posición 2 (c) Posición 3 (d) Posición 4 (e) Posición 5 (f) Posición 6 (g) Posición 7 (h) Posición 8 (i) Posición 9



2.2.3 FACTOR DE ESCALA DE LA ESCENA

Se desea observar la influencia que tiene sobre el resultado de la correlación el factor de escala que puede estar modificando el objeto blanco o escena. Para esto se varía el factor de escala de la escena entre 0.9 y 1.1 en intervalos de 0.01 (equivale a disminuir en 10% y aumentar en la misma cantidad el tamaño de escena). La figura 18, muestra un ejemplo del plano de entrada del correlador binario y en escala de gris.

Los resultados de la evaluación están graficados en la figura 19 y 20. En general, los resultados de las métricas tienen igual comportamiento, de esta forma se puede afirmar que la altura del pico de correlación y el ancho del mismo cambian simultáneamente a medida que el factor de escala disminuye o aumenta.

Por otra parte, aunque para la entrada en escala de gris la variación de las métricas respecto del factor de escala no es monótono como lo es en el caso binario, se observa que el efecto sobre la correlación es el mismo, es decir, los objetos se decorrelacionan ocasionando que la intensidad máxima de la correlación disminuya y que el pico se haga más ancho.

Las curvas rojas de la figura 21e y 21f corresponden a un ajuste polinomial. De allí se puede determinar que cuando la escena es 5% más grande (o pequeña) la altura del pico de correlación se ve atenuada en un 20% y cuando se llega al extremo de la prueba, 10% más grande, la intensidad del pico de correlación se disminuye al 50%; además, la degradación de la agudeza del pico de correlación (medido a partir de la métrica de peor resultado, PCE) es aproximadamente de 15% para una escena 5% más grande y de 50% para la escena 10% más grande.

Figura 18. Ejemplo del plano de entrada del correlador. (a) Imágenes binarias, escena 10% más grande. (b) Imágenes en escala de gris, escena 10% más pequeña.

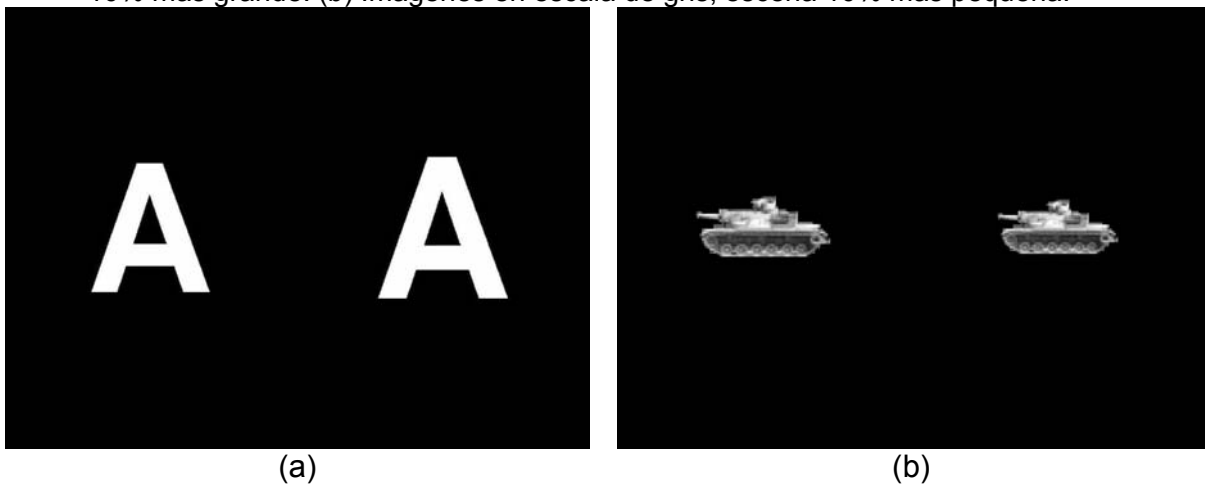
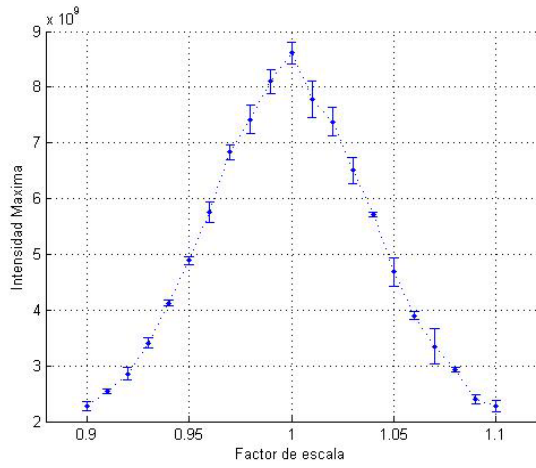
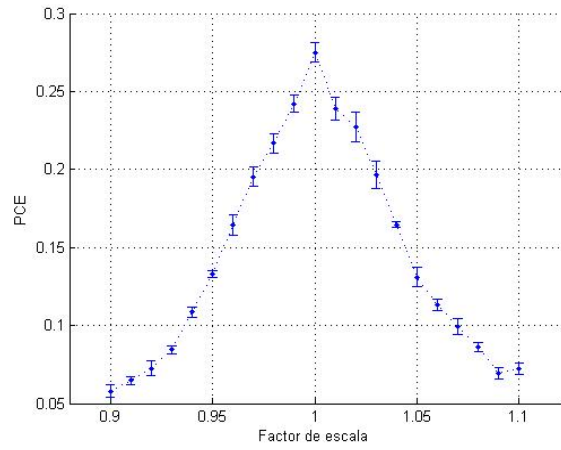


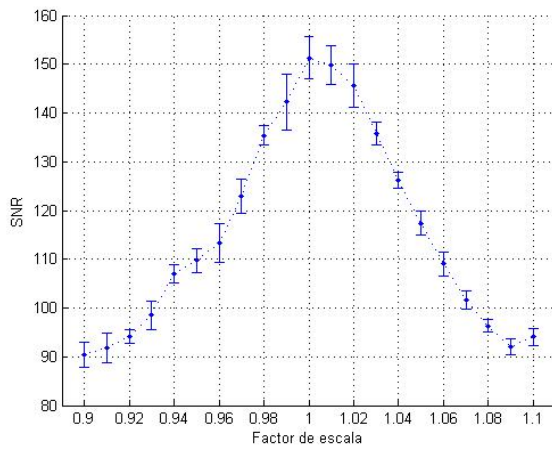
Figura 19. Métricas de desempeño Vs. Factor de escala, para Imágenes binarias(a) Intensidad Máxima (b) PCE (c) SNR (d) PSR



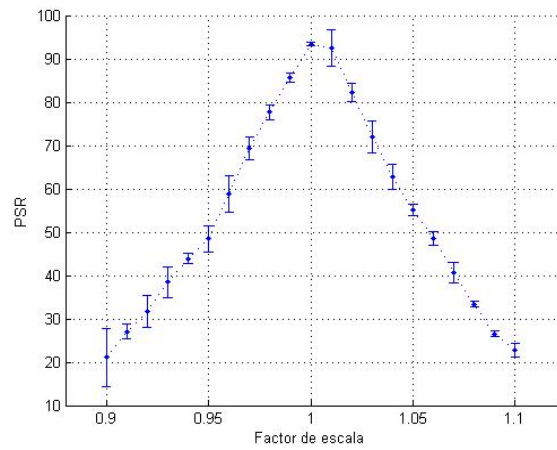
(a)



(b)

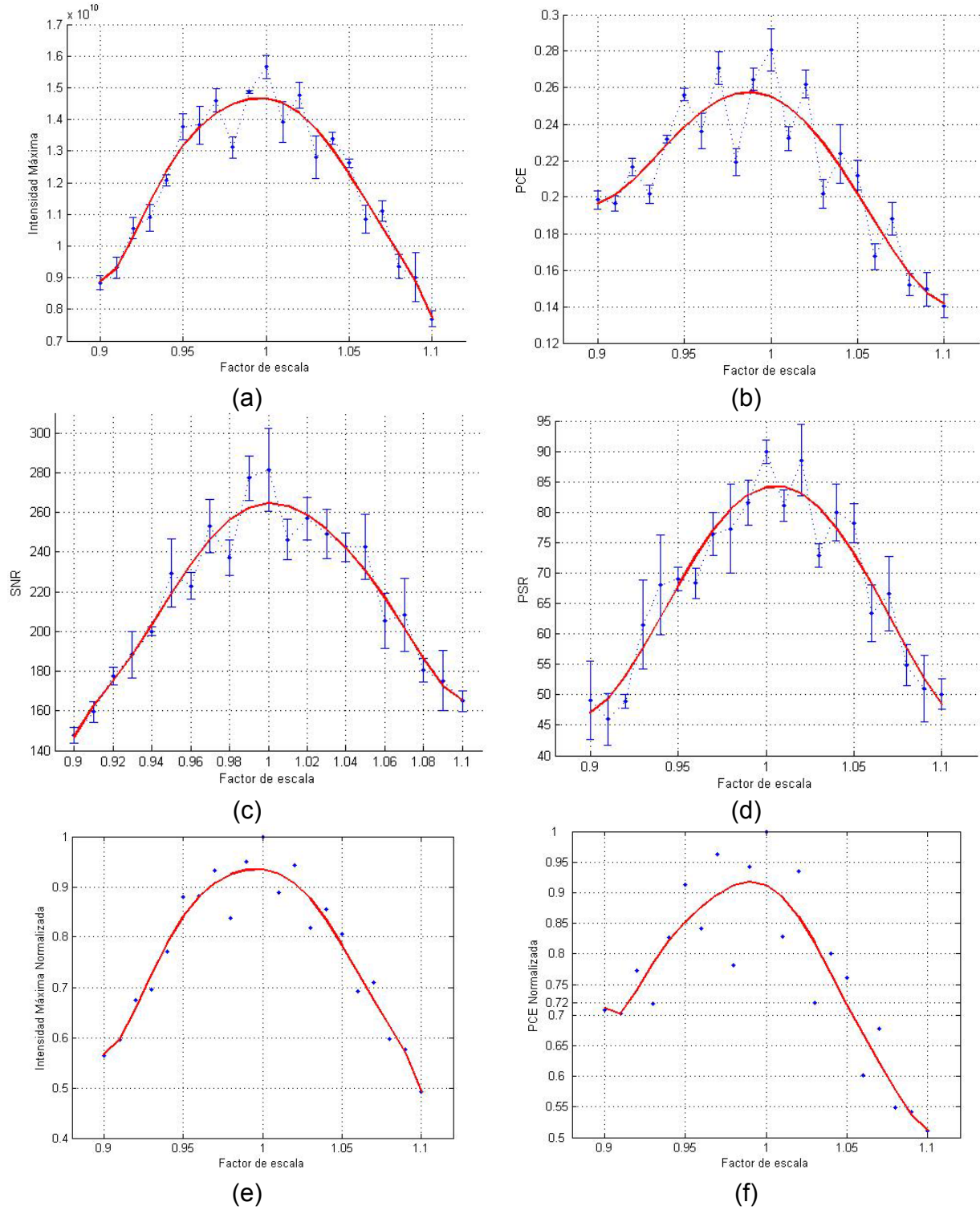


(c)



(d)

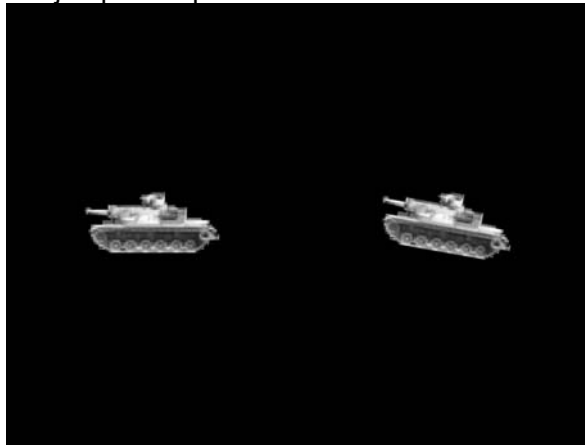
Figura 20. Métricas de desempeño Vs. Factor de escala, para Imágenes en escala de gris(a) Intensidad Máxima (b) PCE (c) SNR (d) PSR (e) Ajuste de la intensidad máxima normalizada (f) Ajuste de la PCE normalizada



2.2.4 ROTACIÓN EN EL PLANO DEL OBJETO BLANCO

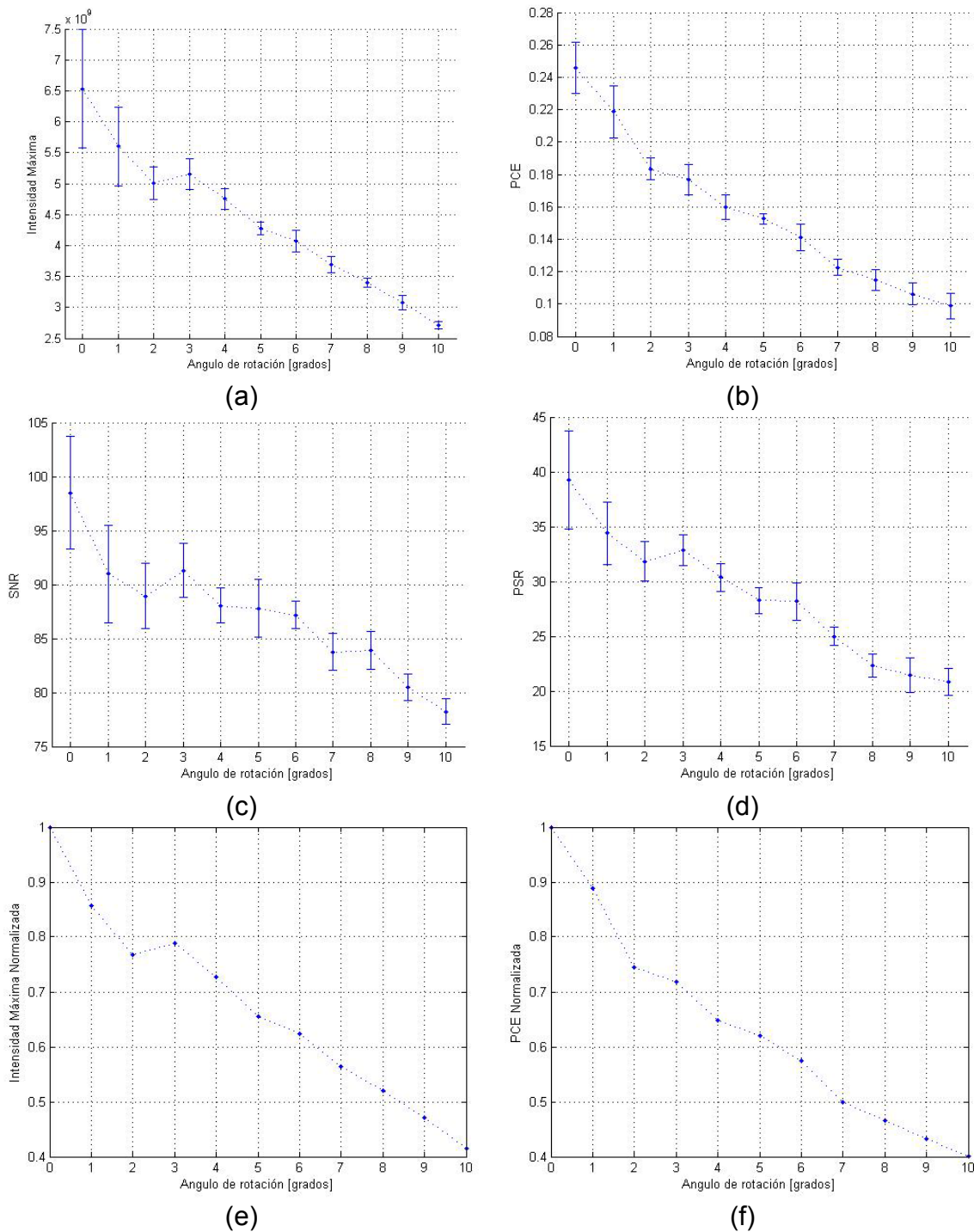
Para estudiar la influencia de la rotación de la escena en el plano de entrada del correlador se usa una imagen en escala de gris de 120x238 píxeles la cual se rota entre 0° y 10° (en el sentido de las agujas del reloj) a paso de 1°. La figura 21 es un ejemplo del plano de entrada.

Figura 21. Ejemplo del plano de entrada con escena rotada 10°



El comportamiento de las cuatro métricas de desempeño es el mismo, los objetos se decorrelacionan en función del ángulo de rotación y el efecto sobre la correlación es considerable, a tan sólo un grado de rotación el pico cae aproximadamente el 15% (figura 22e) y se hace un 10% menos agudo, según la métrica PCE (figura 22f). Para la rotación máxima usada el resultado se degrada el 60% en las dos situaciones.

Figura 22. Métricas vs. Angulo de rotación de la escena. (a) Intensidad Máxima (b) PCE (c) SNR (d) PSR (e) Intensidad Máxima Normalizada (f) PCE Normalizada



2.2.5 PRESENCIA DE RUIDO EN LA ESCENA

Para efectuar la prueba se incluye ruido Gausiano blanco de media cero con varianza entre 0 y 1 a paso 0,1 en la escena de entrada, figura 23. La prueba se realiza con objetos en escala de gris de tamaño 120x238 píxeles. Al observar las imágenes con ruido al detalle se aprecia que la degradación del objeto es considerable, ver figura 23(l) y 23(m).

La figura 24 muestra el resultado de las métricas, se observa que la eficiencia del resultado de la correlación cae drásticamente apenas con ruido de varianza 0,1. De los resultados se determina que para el ruido de varianza 0,1 la intensidad del pico de correlación cae el 90%, mientras el que el pico se hace aproximadamente 75% más grueso, medido a partir del peor resultado, i.e., de la métrica PSR.

Por otra parte se tiene que el pico de correlación se confunde con el ruido del plano de salida cuando la varianza del ruido supera el valor de 0,4, ver figura 25.

A partir de estos resultados se corrobora la sensibilidad al ruido del correlador JTC, tal como se menciona en las referencias 12, 20 y 21, en el primer documento se propone el uso de filtros compuestos, similares a las funciones discriminantes sintéticas con el objetivo de aliviar los efectos de factores como el ruido; mientras en el segundo se realiza un estudio comparativo entre el correlador tipo VanderLugt y el JTC donde se prueba que para el JTC la intensidad de correlación es dependiente de la presencia de ruido en el plano de entrada, en éste artículo se reportan curvas de desempeño con respecto a la presencia de ruido pero no se puede hacer una comparación debido que se desconocen las características del ruido, solo se sabe que es ruido aditivo. En la referencia 21 se hace un experimento similar al de nuestro caso, y el comportamiento de la intensidad del pico de correlación con el ruido es el mismo, incluso el valor porcentual en que cae el pico de correlación es aproximadamente del 93%. Con estas comparaciones se verifica que los resultados obtenidos están de acuerdo con otros trabajos previamente realizados.

Figura 23. Planos de entrada con ruido aditivo blanco de media cero y varianza (a) 0,0 (b) 0,1 (c) 0,2 (d) 0,3 (e) 0,4 (f) 0,5 (g) 0,6 (h) 0,7 (i) 0,8 (j) 0,9 (k) 1,0 (l) 0,1 (m) 1,0

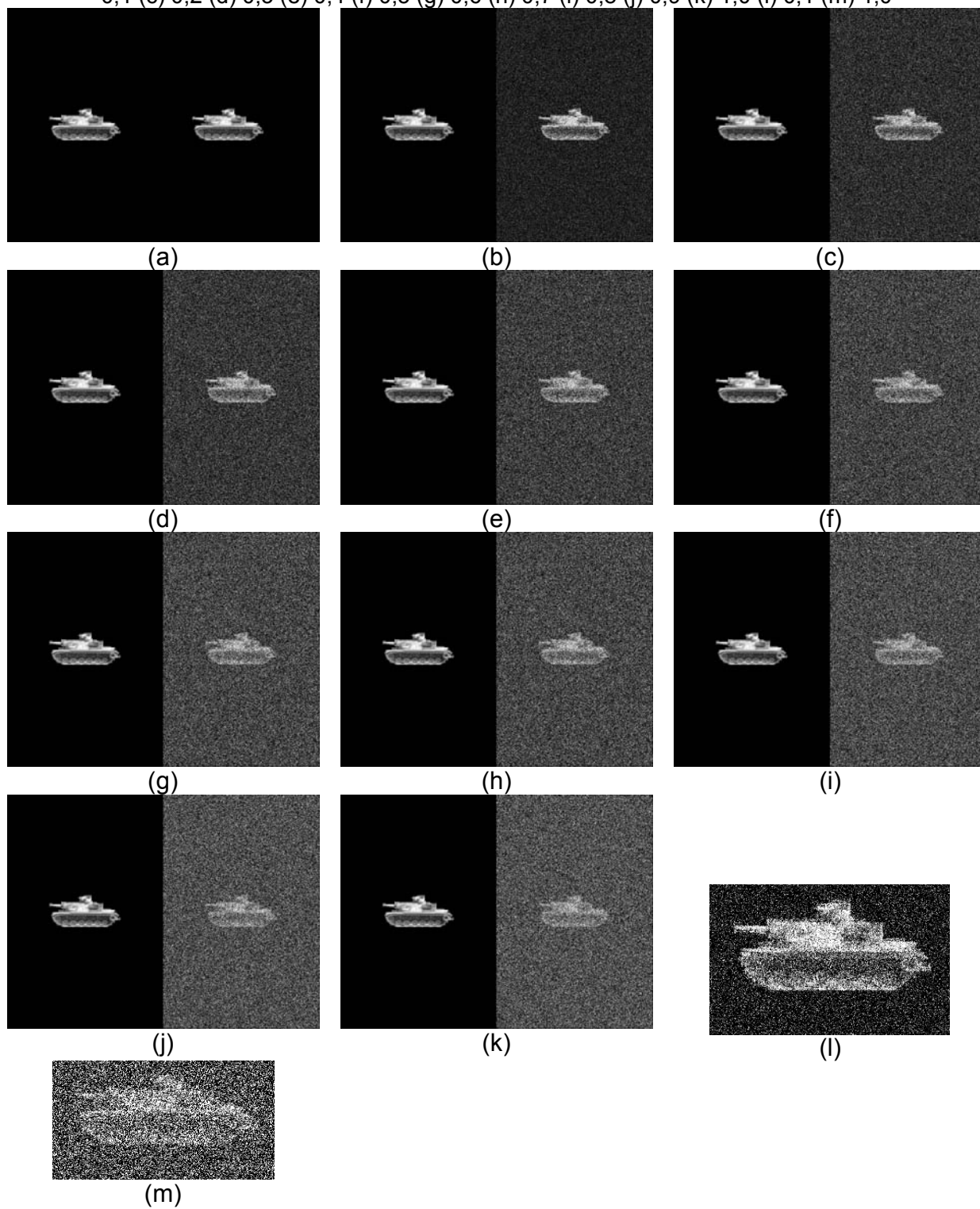


Figura 24. Métricas vs. Varianza del ruido. (a) Intensidad máxima (b) PCE (c) SNR (d) PSR

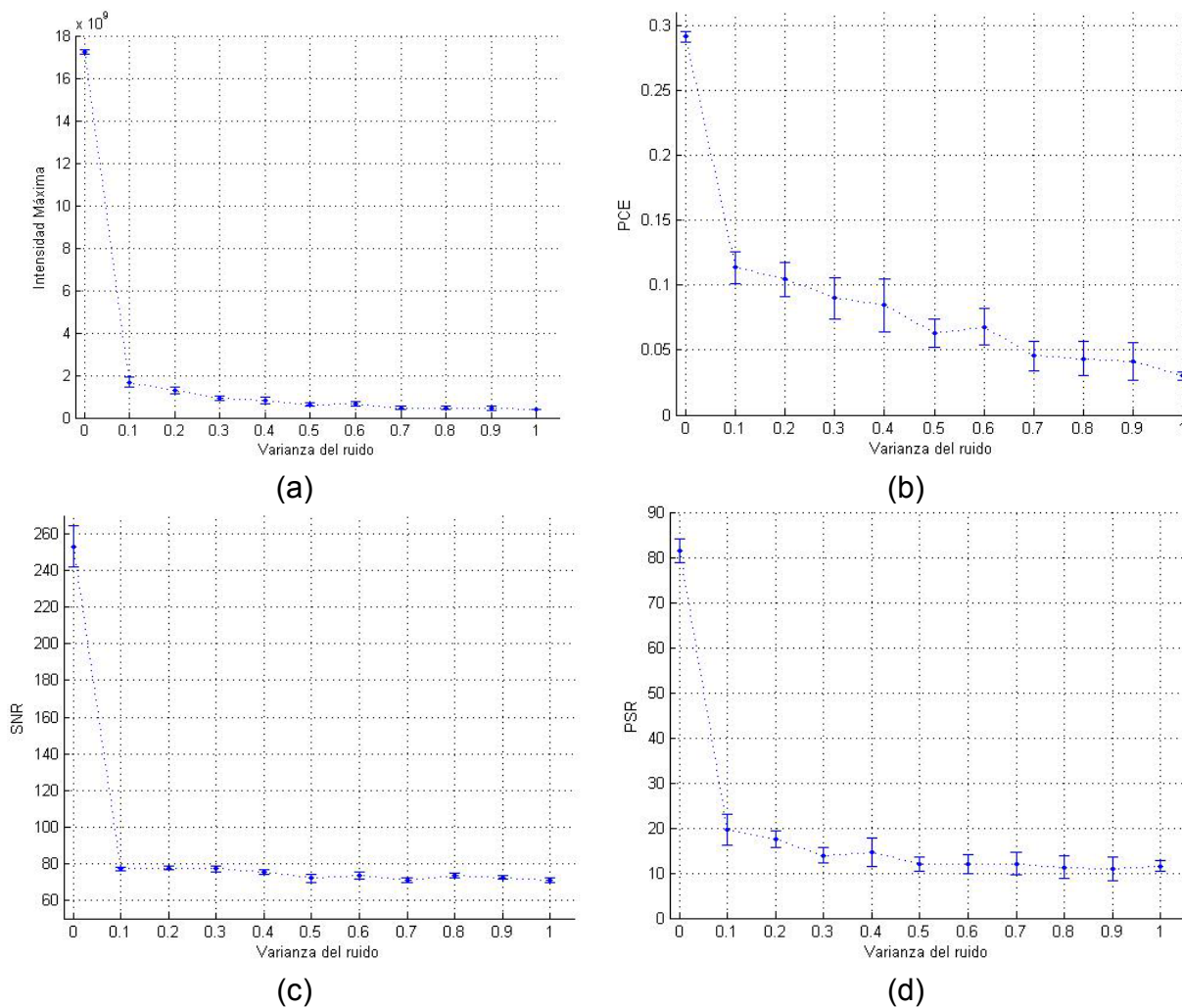
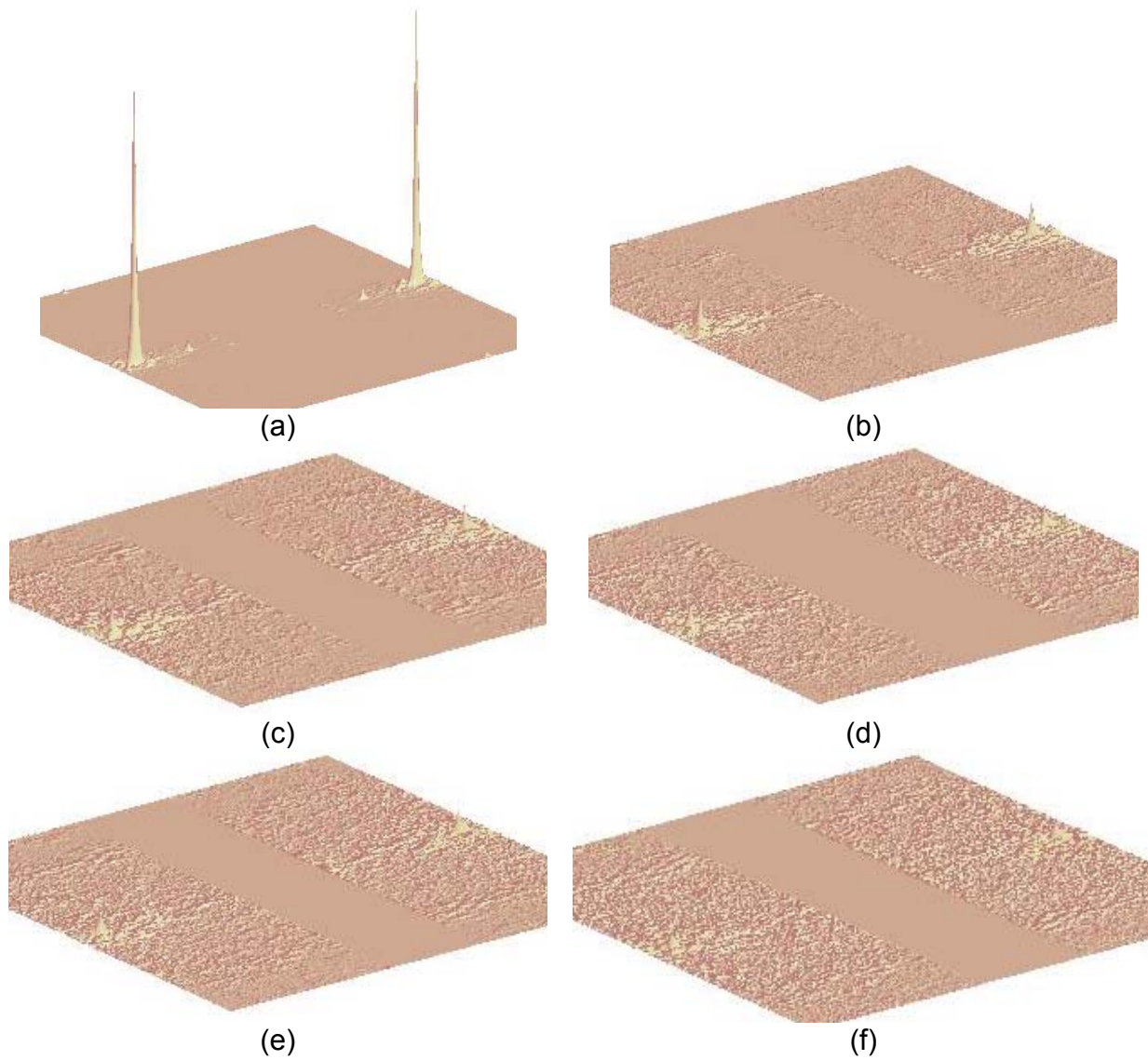


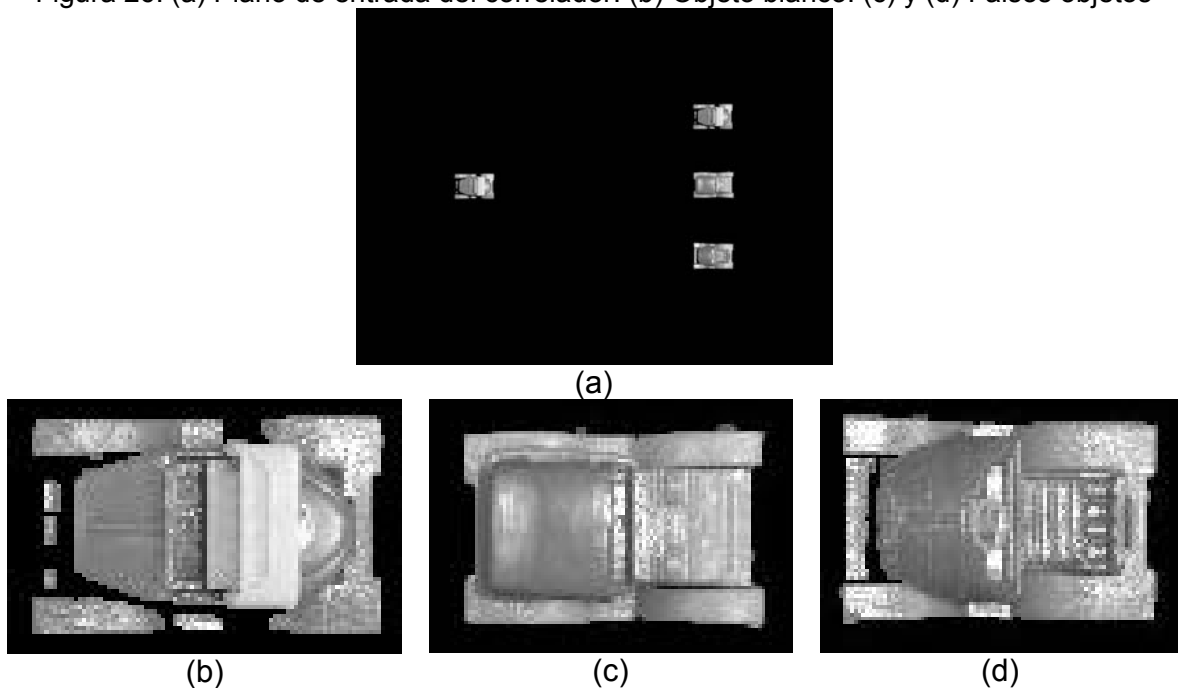
Figura 25. Plano de correlación para diferentes varianzas del ruido Gaussiano del plano de entrada del correlador. (a) 0,0 (b) 0,1 (c) 0,2 (d) 0,3 (e) 0,4 (f) 0,5



2.2.6 CAPACIDAD DE DISCRIMINACIÓN

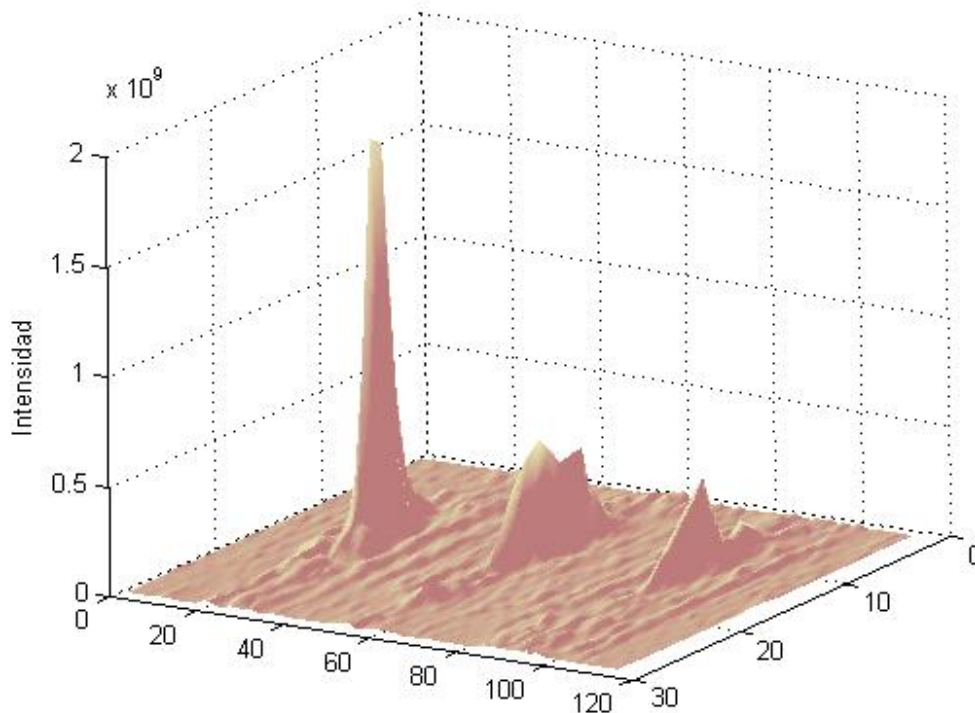
La figura 26a muestra el plano de entrada del correlador empleado para efectuar este análisis. En la figura 26b, a 26d se muestran los objetos con mayor detalle. Como se observa de ésta figura, se seleccionaron tres vehículos con características muy semejantes, forma, tamaño, contenido de gris, con el objetivo de evaluar la capacidad de discriminación del correlador.

Figura 26. (a) Plano de entrada del correlador. (b) Objeto blanco. (c) y (d) Falsos objetos



Empleando la métrica de la ecuación 10 se determina que la capacidad de discriminación es $DC = 0.694 \pm 0.022$, es decir, del 69%. Éste resultado es bueno teniendo en cuenta la similitud que hay entre los objetos. En la figura 27 se muestra un ejemplo de los picos de correlación obtenidos, allí se puede apreciar la diferencia en la altura y en la agudeza de los picos de correlación.

Figura 27. Picos de correlación para el plano de entrada de la figura 27a.



2.2.7 RESUMEN

En este capítulo se describió el correlador híbrido JTC, se detalló en la forma de programar la transformada de Fourier discreta 2D empleando un algoritmo de transformada de Fourier rápida base 2 y la simetría conjugada de la transformada de Fourier de una señal real, de tal forma que obtuviera la mejor prestación en cuanto a tiempo de cálculo se refiere. La rapidez de procesamiento del correlador está determinada por la velocidad de procesamiento del DSP, en este caso se logra un desempeño de 31 cuadros por segundo.

Por otra parte, se presentaron los resultados referentes a la prueba de sensibilidad aplicada al correlador en la que se determinó la posición óptima de los controles de brillo y contraste del DSP ([6,7] respectivamente); se observó que la intensidad

del pico de correlación cae el 50% y se hace menos agudo en la misma cantidad cuando la escena de entrada es el 10% más grande.

La sensibilidad del correlador a la rotación de la escena y a la presencia de ruido fue determinada, siendo el ruido un factor que degrada considerablemente el resultado de la correlación.

Se obtuvo 69% en la capacidad de discriminación medida a partir de tres vehículos con alto grado de similitud.

3 CONCLUSIONES

3.1 CONCLUSIONES GENERALES

- Se implementó un correlador híbrido de transformada conjunta para procesar imágenes en nivel de gris, logrando superar la tasa de video en la rapidez de procesamiento del correlador (31 correlaciones por segundo) y dejando apreciar las ventajas de la arquitectura híbrida.
- Se emplearon las simetrías y las estrategias de cálculo de la transformada de Fourier discreta de señales reales, optimizando el proceso digital llevado a cabo en el DSP mediante un algoritmo de transformada de Fourier rápido.
- Se determinó el desempeño del correlador a través de cuatro métricas respecto de diferentes variables del sistema, determinando así las condiciones de funcionamiento óptimo del correlador.
- Con dos resultados parciales del trabajo de investigación se realizaron dos ponencias, una internacional y otra nacional.

3.2 ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS

Objetivo	Resultado	Logro
Implementar el correlador según el montaje mostrado en la figura 9.	Se implementó el correlador con las características (dispositivos) que se formularon.	100%
Desarrollar y optimizar la rutina de transformada de Fourier rápida (bidimensional) para números reales en el DSP.	Se realizó la programación y optimización del cálculo de la DFT 2D para números reales, consiguiendo excelentes resultados en cuanto al tiempo de cálculo.	100%
Realizar una prueba de sensibilidad con la cual se pueda evaluar la influencia en la correlación de los siguientes parámetros físicos:		
Brillo y contraste (ajustables manualmente) de la pantalla de cristal líquido.	Se hizo el respectivo estudio de éste factor, determinando la zona óptima de trabajo del dispositivo.	100%
Ubicación en el plano de entrada y factor de escala (tamaño) del objeto blanco.	Se estableció a partir de que píxel el resultado de correlación se sale de los límites permitidos en el plano de salida, además, se cuantificó la influencia de la variación en tamaño de la escena de entrada.	100%
Rotación en el plano del objeto blanco y presencia de ruido en la escena de entrada.	Se determinó la influencia de la rotación y del ruido en la escena de entrada, comparando los resultados obtenidos con otros casos reportados.	100%

3.3 PROYECCIÓN ESPERADA

Al tener un sistema de correlación híbrido caracterizado se abre la posibilidad de pensar en diversas aplicaciones de reconocimiento de patrones, sistemas de seguridad entre muchas otras, obviamente tratando previamente de mejorar

algunos aspectos, como lo son la invarianza a la rotación y la tolerancia al ruido, factores inherentes dentro de las aplicaciones reales. Como se puede ver de las referencias bibliográficas, soluciones a estos problemas ya han sido propuestas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Weaver C. and Goodman J., "Technique for optically convolving two functions", Appl. Opt., pp. 1248-1249, (1966).
- [2] VanderLugt A., "Signal detection by complex filtering", IEEE trans. Info. Theory, pp. 139-145 (1964).
- [3] Javidi B., Horner J, "Nonlinear joint transform correlators", in Real-Time Optical Information Processing, chapter 4, pp. 115-183, Academic Press, (1994).
- [4] Goodman J., "Introduction to Fourier Optics", (McGraw-Hill, New York, 1996).
- [5] Arguello, H. y Gualdrón, O., "Correlación 2D en tiempo real, Implementación mediante DSP", VII Simposio de Tratamiento de Señales Imágenes y Visión Artificial, p. 55-60. (2002) .
- [6] SMITH, "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing" [on line]. California: 1997. Technical Publishing.
- [7] TEXAS INSTRUMENTS. Imaging Developer's Kit [on line]. Available from Internet: <URL: <http://dspvillage.ti.com/docs/catalog/dspdetails/dspplatformdetails.jhtml?navigationID=59&familyID=132>>.
- [8] TEXAS INSTRUMENTS, Code Composer Studio, Getting Started Guide, Dallas: Soyink, 208 p. (2001).
- [9] TEXAS INSTRUMENTS, TMS320C6000 Imaging Developer's Kit, Programmer's Guide. Literature Number: SPRU495A. Dallas: Soyink, 2001, 100 p.
- [10] Vijaya B. and Hassebrook L., "Performance measures for correlation filters", Appl. Opt., pp. 2997-3006, (1990).
- [11] Horner J., "Metrics for assessing pattern-recognition performance", Appl. Opt., pp. 165-166, (1992).

- [12] Alam M. et al. "Metrics for evaluating the performance of joint transform correlator based target recognition and tracking algorithms", Department of electrical and Computer engineering, University of South Alabama, Internal Report, (2004).
- [13] Savvides M., Kumar V., and Khosla P., "Face Verification using Correlation Filters", Proc. Of the Third IEEE Automatic Identification Advanced Technologies, 56-61, Tarrytown, NY, (2002).
- [14] Cornejo J. and Torres Y., "Hybrid JTC using DSP technology", Proc. of SPIE Vol. 5776, pp. 340-346, (2005).
- [15] CRL OPTO XGA4 Miniature LCD User Guide, United Kingdom, (2002).
- [16] Arguello H., "Correlación en tiempo real, implementación mediante DSP", Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander, (2003).
- [17] Matusiak R., "Implementing Fast Fourier Transform Algorithms of Real-Valued Sequences with the TMS320 DSP family", Texas Instruments, (1997).
- [18] Nema S., *et al*, "Real Time Reconfigurable Image Recognition System", IEEE Instrumentation and Measurement, Technology Conference, Budapest, May 21-23, (2001).
- [19] Cornejo J. and Torres Y. "Hybrid joint transform correlator with DSP device-Contrast and brightness Influence", IX Encuentro Nacional de Óptica, Junio de 2005.
- [20] Francis T., Song Q., Cheng Y. and Gregory D., "Comparison of detection efficiencies for VanderLugt and joint transform correlators", Appl. Opt., pp. 225-232, (1990).
- [21] Feng L., Masahide I., and Toyohiko Y. "Adaptive binary joint transform correlator for image recognition", Appl. Opt., pp. 7416-7421, (2002).
- [22] Cornejo J., Lizarazo Z., Sotaquirá M. y Gualdrón O., "Métricas de desempeño para diferentes filtros en arquitecturas de correlación digital", Rev. Colombiana de Fis., Vol. 35, pp. 400-402, (2003).

- [23] Cavadini M., *et al*, "Multiprocessor system for high resolution image correlation in real time", IEEE trans. On very large scale Int. systems. Theory, pp. 439-449 (2001).
- [24] Toyoda H., *et al*, "Frame-rate displacement measurement utilizing an ultra-high-speed shutter camera and an optical correlator", IEEE trans. On Instrumentation and Measurement, pp. 755-758, (1995).
- [25] Klima M., *et al*, "Model of 2D optical correlator for fingerprint identification", IEEE AES Systems Magazine, pp. 3-9, (1997).
- [26] Hardin W., "DSP array upgrades optical correlation", Image Processing Europe, Nov/Dic., (2001).