



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Física

*Reconocimiento y encriptación óptica de imágenes empleando
información sólo de fase*

por *Cecilia La Mela*

Director de Tesis: Dr. Claudio C. Iemmi

Lugar de Trabajo: Laboratorio de Procesado de Imágenes, Departamento de Física,
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Trabajo de Tesis para optar por el título de
Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área de Ciencias Físicas

Octubre de 2006

Resumen

En esta Tesis se presentan métodos ópticos aplicados a procesos de reconocimiento y encriptación de imágenes, para ser implementados en un dispositivo robusto que opera a alta velocidad. Todas las técnicas han sido especialmente diseñadas para operar en una arquitectura de correlador por transformada conjunta donde la información a procesar es introducida en una pantalla de TV de cristal líquido de alta resolución y programable, operando como modulador puro de fase.

En primer lugar se introduce una técnica ideada para aumentar el poder de discriminación en un proceso de reconocimiento, basada en el método de filtrado puro de fase. Esta técnica es extendida a un proceso de reconocimiento invariante a distorsiones, ideado a partir de un método de filtrado compuesto puro de fase. En esta etapa, con el fin de obtener una arquitectura veloz y compacta, se empleó como medio de registro un cristal fotorrefractivo. Las no linealidades introducidas en el plano de entrada del sistema emulan los filtros complejos usados generalmente en correladores tipo Vander Lugt.

Se presenta además un método de encriptación óptica, basado en el empleo de distribuciones de fase aleatoria, donde tanto la imagen encriptada como la llave de desencriptación son obtenidas a partir de la técnica de interferometría por corrimiento de fase. En este proceso, se empleó como medio de registro una cámara CCD con el fin de obtener un sistema que permita transmitir la información digitalmente y a alta velocidad.

Palabras clave: *Óptica de Fourier, Procesado de señales, Reconocimiento de formas, Encriptación de imágenes, Correladores ópticos*

Optical image recognition and encryption by using phase only information

Abstract

In this Thesis we present optical methods for pattern recognition and encryption. These methods are developed to be implemented in a robust setup able to operate at high speed. The proposed techniques have been specially designed to operate in a joint transform correlator architecture where the information to be processed is introduced in a high resolution, programmable liquid crystal TV display working as pure phase modulator.

First, we introduce a technique designed to increase the discrimination capability of a recognition process, which has been based on the phase only filtering method. This technique has been extended to a distortion tolerant recognition process, based on a pure phase composed filtering method. In these experiences, we employed a photorefractive crystal in order to obtain a compact and high speed operating architecture. The non-linearities introduced in the input plane emulate the complex filters commonly used in Vander Lugt correlators.

We also present an optical encryption method, based on the use of random phase distributions, where the encrypted image as well as the decrypting key, are obtained by employing the phase shifting interferometry technique. In this process, a CCD camera is used to record the interferograms in order to obtain a system capable to transmit the information digitally and at high speed.

Keywords: *Fourier optics, Optical signal processing, Pattern recognition, Image encryption, Optical correlators*

Argadecimientos

Después de tantos años, este es un espacio donde para mí los agradecimientos sí o sí son algo personal, y por eso quiero decirles GRACIAS a todas esas personas que dejaron huellas en mi vida, porque me hicieron ser quien soy y hoy sin ellas no estaría acá.

Cate y Santi, dicen que los amigos son hermanos que se eligen. Yo sin embargo tuve la maravillosa suerte de tenerlos a ustedes como hermanos, que además de hermanos fueron amigos que me apoyaron sin condiciones... Gracias por mostrarme lo más hermoso de la vida!

Papi, mami, sí... cuando era chiquita ustedes estaban primero, ahora vienen después de mis hermanos. Nadie enseña a ser padre, no? Se aprende en el camino dicen... Bueno, GRACIAS porque entre los dos, y desde lugares muy distintos, se las ingeniaron para darme todo lo que necesito para ser feliz y darme los valores fundamentales de la vida... Estar en este momento sin todo ello hubiera sido imposible... Esto les pertenece!

Abues.... desde donde estén, y aunque se rían.... les quiero dar las gracias por ser mis duendes... por acompañarme y entenderme siempre incondicionalmente.

Amigos... aprendí que esa palabra es demasiado grande y ustedes realmente le hicieron honor! Gracias por enriquecerme tanto, por ayudarme, por oírme, por soportarme en los momentos más difíciles... fueron simplemente esenciales.

Claudio, casi no tengo palabras ... A vos te tocó hacerle honor a la palabra Director. Gracias por confiar en mí, por saber guiarme de manera impecable, por enseñarme tanto, por hacerme sentir más que tu doctorando, tu compañera de trabajo. Debe ser difícil elegir la medida justa entre guiar y dejar crecer... vos la encontraste. Gracias porque me diste y me enseñaste libertad... y eso como profesional es lo que me llevo como tesoro. Pero sobre todas las cosas, gracias por lo humano. Desde ese lugar me diste muchísimo...

Valores, paciencia, contención, alegría... No se puede pedir más, y por eso me siento afortunada... De todos modos no creo que pueda plasmar acá todo lo que quisiera, espero que más allá de estas palabras lo sepas y te lo haya podido transmitir.

Pero trabajar en el LPI no hubiera sido lo mismo sin ustedes:

Silvia, gracias por tu apoyo, por tu ayuda incondicional, desde lo humano y desde lo profesional me diste muchísimo!...

Javi y Diego... gracias por darle tanto color al labo! Risas, largas charlas de café, compañía... y sobre todo, gracias porque además de ser excelentes compañeros de trabajo, sé que puedo contar con ustedes como amigos, y ese es el mejor regalo que me dieron en estos años!

Mati y Guada... gracias por ponerle más alegría a este lugar!

Mirtita... gracias por tus legados!

Este espacio es finito, y sinceramente no alcanza para agradecer todo lo que me gustaría...Fueron muchos años, mucha vida en medio.... hay algunas personas más cuyas huellas contribuyeron a que yo hoy sea quien soy, son esas personas especiales, mágicas, regalos de la vida... GRACIAS!

Índice general

1. Introducción general	3
2. Fundamentos teóricos de los procesos de encriptación y reconocimiento de imágenes	9
2.1. Introducción	9
2.2. Sistemas lineales	10
2.2.1. Sistemas lineales invariantes: Función Transferencia	12
2.2.2. El fenómeno de propagación libre	16
2.3. Utilización de hologramas para el procesamiento de señales ópticas	20
2.3.1. Fundamentos de holografía	21
2.3.2. Procesado de una señal a partir de su información de fase	23
2.3.3. Holografía en el proceso de encriptación de una señal	24
2.3.4. Filtros holográficos aplicados al reconocimiento de imágenes	27
2.4. Arquitecturas básicas de procesadores ópticos coherentes	37
2.4.1. Procesador 4f	37
2.4.2. Correlador por transformada conjunta	39
3. Implementación del proceso de reconocimiento de formas en un JTC sólo de fase	44
3.1. Introducción	44
3.2. Diseño y operación del JTC fotorrefractivo con modulación pura de fase	47
3.2.1. Pantallas de cristal líquido como moduladores espaciales de luz	47

3.2.2. Cristal fotorrefractivo BSO empleado como medio de registro en el JTC	53
3.2.3. Arquitectura y operación del JTC fotorrefractivo	60
3.3. Técnica de filtrado puro de fase en un correlador por transformada conjunta fotorrefractivo	63
3.3.1. Descripción del método	64
3.3.2. Simulaciones numéricas	67
3.3.3. Resultados experimentales	71
3.4. Técnica de tolerancia ante distorsiones en un correlador por transfor- mada conjunta fotorrefractivo	73
3.4.1. Descripción del método	74
3.4.2. Resultados	76
4. Proceso de encriptación óptica en un JTC sólo de fase	81
4.1. Introducción	81
4.2. Encriptación usando interferometría por corrimiento de fase en un JTC	85
4.2.1. Descripción del método	85
4.2.2. Resultados	92
4.2.3. Análisis de la robustez de la técnica	94
5. Conclusiones	99
5.1. Perspectivas	101
A. Eficiencia del cristal BSO	102

Capítulo 1

Introducción general

El procesado óptico de la información involucra líneas de investigación de gran actualidad debido a sus aplicaciones en visión artificial [1], robótica [2], implementación de algoritmos [3], seguridad [4], control de calidad [5], etc. Estas operaciones son costosas en tiempo de cálculo, de ahí el interés por estudiar métodos y arquitecturas que aumenten la velocidad de procesado. Las técnicas ópticas y óptico digitales aportan el paralelismo inherente a la propagación de la luz, por lo que se están introduciendo en problemas específicos con el fin de aumentar la velocidad de procesado. Un número de avances significativos en las tecnologías que involucran componentes optoelectrónicos ha abierto nuevas oportunidades en procesado de imágenes, en reconocimiento de formas, en interconexiones ópticas y en almacenamiento de datos. Hoy el desarrollo de nuevos láseres, de materiales holográficos dinámicos y de moduladores espaciales de luz ha llegado a un nivel que está permitiendo utilizarlos en potentes sistemas optoelectrónicos.

Dentro del procesado óptico de señales, durante las últimas décadas ha habido un incremento constante de trabajos de investigación relacionados con sistemas de seguridad. En particular existen dos procesos fundamentales que consisten en el reconocimiento de determinada forma y en la encriptación de datos. Por ejemplo un sistema de seguridad puede autorizar o negar el acceso a determinada información o a determinado lugar a partir del reconocimiento de una fotografía o huella digital. Generalmente un sistema de seguridad también tendrá unidades de memoria para

guardar imágenes de referencia que serán utilizadas para verificar la autenticidad de una imagen de entrada. Este sistema puede también ser parte integrante de una red. La encriptación de la información es necesaria para evitar que los bancos de datos sean robados o la transmisión de los mismos sea interceptada y entonces una persona no autorizada pueda conocer información muy valiosa. Existen dos arquitecturas básicas para realizar estos procesos ópticamente a partir de las cuales han surgido un extenso número de variantes para optimizar el sistema. Una de dichas arquitecturas es la introducida originalmente por Vander Lugt [6]. Otra arquitectura utilizada es la correspondiente al correlador por transformada conjunta (JTC) ideado por Weaver y Goodman [7]. Este último presenta la ventaja de efectuar la operación de correlación sin necesidad de utilizar filtros, por lo que es muy estable.

Esta Tesis se ha basado en el estudio y desarrollo de correladores ópticos tipo JTC en los cuales la información de entrada es introducida mediante pantallas de TV de cristal líquido (LCTV) de alta resolución y programables. Como se verá esta característica posibilitará superar algunos de los inconvenientes que usualmente se presentan al implementar los procesos de reconocimiento de formas en tiempo real (velocidad de video) y la encriptación de señales. Dentro de la variedad de moduladores espaciales de luz usualmente requeridos para el procesado óptico de imágenes (espejos deformables, moduladores electro-ópticos, dispositivos magneto-ópticos, dispositivos acusto-ópticos, pozos cuánticos, etc.) las pantallas de TV de cristal líquido constituyen una excelente opción. Las mismas se hallan disponibles en varias resoluciones y operan a velocidad de video. Uno de los inconvenientes que presentan es que producen, en general, una modulación acoplada de fase y amplitud. Recientemente se ha presentado un nuevo modelo físico [8],[9] que no sólo predice su comportamiento en forma exacta sino que también permite obtener los estados de polarización de la luz que desacoplan la modulación de fase de la de amplitud. Así, es posible utilizar este tipo de moduladores como elementos sólo de fase o sólo de amplitud. Esta característica permite, por ejemplo, programar un desfase directamente píxel a píxel sin necesidad de recurrir a las técnicas que emplean los hologramas generados por computadora para codificar valores de fase en amplitud. Se tiene de esta forma un elemento óptico difractivo (DOE) programable. Los DOEs poseen, para ciertas apli-

caciones, numerosas ventajas con respecto a su contraparte convencional basada en las propiedades de refracción y reflexión de la luz. Ellos en general son más livianos, ocupan menos volumen y muchas veces proveen una respuesta imposible de alcanzar con elementos ópticos convencionales (por ejemplo pueden generarse sobre la misma LCTV una lente de Fresnel y filtros apodizadores o hiper-resolventes que varíen en forma adecuada la profundidad de enfoque [10], o un filtro holográfico en un procesador óptico puede efectuar la operación de correlación y actuar como lente al mismo tiempo, o es posible implementar el redireccionamiento de un haz a gran velocidad [11]). En las técnicas ópticas de reconocimiento y encriptación planteadas en este trabajo, estos dispositivos son de fundamental interés ya que son la clave en el desarrollo de procesos a implementarse en sistemas basados en una arquitectura JTC que opere a velocidad de video.

El proceso de reconocimiento de formas consiste básicamente en detectar la presencia de un objeto de interés dentro de una escena. Una de las técnicas ópticas más importantes para llevar a cabo esta operación se basa en generar la correlación entre la escena a analizar y una referencia. Como dijimos la arquitectura del JTC presenta la ventaja de ser muy robusta y además resulta particularmente apropiada para el procesamiento de la información en tiempo real. Esto puede lograrse, por ejemplo, mediante la utilización de pantallas de TV de cristal líquido para la introducción de la escena y la referencia, y cristales fotorrefractivos (BSO) para efectuar el registro del plano transformado. Ya describimos algunas de las ventajas que ofrecen las LCTV; en cuanto a los cristales fotorrefractivos, permiten realizar la síntesis de un holograma de volumen de fase en tiempos muy cortos. Este proceso se lleva a cabo debido a la excitación y migración de fotoportadores que son iluminados localmente. El campo espacio-carga fotoinducido modula el índice de refracción del cristal a través del efecto electro-óptico lineal. La modulación del índice puede durar años, como en el caso del LiNbO_3 (lo cual lo hace apropiado para crear memorias holográficas) o un tiempo muchísimo menor como en el caso del BSO. Este último material, debido a su alta sensibilidad y rápida respuesta, resulta muy apropiado para realizar holografía en tiempo real. El medio fotorrefractivo es bombeado por dos haces contrapropagantes. En estas condiciones cuando otro haz señal incide en el medio, se genera un cuarto haz

que se propaga en forma opuesta a este último y resulta invertido temporalmente, es decir conjugado [12]. Así puede registrar el plano de Fourier en este tipo de procesador óptico y realizar la operación de correlación instantáneamente al ser leído por un haz de reconstrucción [13]. El inconveniente que presenta el correlador por transformada conjunta es que su poder de discriminación es bajo y requiere generalmente de la introducción de no-linealidades en el plano de Fourier para mejorar este inconveniente. Algunas de ellas se basan en la binarización del registro de intensidades sobre este plano [14], con otras se trata de emular el comportamiento del filtro sólo de fase o del inverso [15]. En el caso de emplear una arquitectura que combine una pantalla de cristal líquido con un cristal fotorrefractivo, no es posible introducir no-linealidades en el plano transformado conjunto (aparte de las propias introducidas por el cristal fotorrefractivo), así resulta de interés estudiar la posibilidad de generar no-linealidades en el plano objeto con el fin de mejorar algunos parámetros de rendimiento. Esta motivación nos llevó a desarrollar un método para aumentar el poder de discriminación en un correlador por transformada conjunta fotorrefractivo. Otro punto de interés en lo que concierne al reconocimiento de formas es la síntesis de operaciones que permitan llevar a cabo el reconocimiento múltiple (varios objetos o un objeto visto desde diferentes perspectivas) mediante arquitecturas JTC. Es bien sabido que uno de los problemas básicos que surge en el proceso de reconocimiento es poder efectuar esta operación independientemente de las distorsiones originadas, por ejemplo, por cambios de escala, por variaciones de perspectivas o en general, cualquier deformación no modelizable. Distintos tipos de filtros basados en la teoría SDF (Synthetic Discriminant Function)[16] han demostrado ser una herramienta poderosa para resolver este problema, sin embargo la mayoría de ellos están diseñados para ser empleados en correladores tipo Vander Lugt. El JTC es muy sensible a distorsiones, es por esta razón que muchos investigadores han comenzado a estudiar la posibilidad de incorporar modificaciones a la imagen que actúa como referencia de manera de disminuir este inconveniente [17], [18]. El problema que subsiste es que las funciones que se requieren a la entrada en general son complejas y los métodos utilizados para poder sintetizarlas disminuyen el ancho de banda disponible en el sistema. En nuestra propuesta, dado que se plantea trabajar con moduladores sólo de fase para representar las señales de

entrada, este inconveniente no se halla presente. Apuntamos entonces al diseño de un JTC que reúna todas las ventajas de esta arquitectura (robustez, fácil alineado) junto a la posibilidad de trabajar en tiempo real y con insensibilidad a distorsiones.

Una variante de este dispositivo se propone para llevar a cabo el otro proceso de interés: la encriptación óptica de señales. Durante los últimos años se ha incrementado el interés en transmitir información en forma segura por lo que existe una creciente necesidad de mejorar las técnicas de encriptación de datos. Los problemas creados por usuarios no autorizados o el espionaje comercial en redes de comunicación ha creado una demanda de dispositivos más seguros y rápidos. Debido a su capacidad para manejar gran cantidad de información en forma simultánea, uno de los procesos que está siendo ampliamente investigado es el de encriptación óptica. La mayoría de las técnicas propuestas para encriptar datos por métodos ópticos se basan en el empleo de máscaras aleatorias de fase [19], [20]. Estos métodos requieren, en general, de un registro holográfico de los datos encriptados. Dado que interesa transmitir información segura por medios digitales de comunicación, se están desarrollando diferentes técnicas de encriptación basadas en holografía digital [21]. La mayoría de estos métodos involucran el proceso de interferometría por corrimiento de fase, el cual se lleva a cabo mediante sistemas basados en un interferómetro tipo Mach - Zehnder en el que los desfasajes controlados se introducen por medio de piezoeléctricos o láminas retardadoras que requieren de una muy precisa y estable alineación [22], [23]. El sistema que se propone en esta Tesis se halla basado en un JTC en el cual tanto la señal de entrada como los corrimientos controlados de fase se llevan a cabo mediante una LCTV trabajando en modo de fase. Este sistema resulta muy estable y robusto y no presenta los inconvenientes propios de un dispositivo interferométrico. Este método consiste en encriptar la escena de entrada como un holograma registrado con un haz de referencia representado por una distribución de fase aleatoria. La llave que permite descryptar la información es sintetizada del mismo modo. En ambos casos la posición del plano de registro resulta un parámetro de seguridad adicional.

Introduciremos en el Capítulo 2 los fundamentos teóricos del procesado óptico de imágenes. Comenzaremos analizando los conceptos básicos de sistemas lineales

invariantes . Luego discutiremos los fundamentos de la holografía para aplicaciones de reconocimiento y encriptación de imágenes. Finalmente describiremos las arquitecturas básicas del procesado óptico coherente empleadas para implementar dichos procesos.

En el Capítulo 3 presentaremos el diseño de un correlador por transformada conjunta para la implementación óptica del proceso de reconocimiento de formas. Describiremos los componentes optoelectrónicos empleados, que consisten en un cristal fotorrefractivo BSO, y una pantalla de cristal líquido programable. Describiremos entonces dos técnicas de reconocimiento que hemos ideado para ser implementadas en la LCTV operando como modulador puro de fase. Uno de los métodos ha sido diseñado para aumentar el poder de discriminación del proceso de reconocimiento [24]; el otro método ha sido ideado para implementar un proceso invariante a distorsiones del objeto a reconocer [25],[26]. Presentaremos los resultados experimentales obtenidos en ambos casos.

Finalmente, en el Capítulo 4 presentaremos el método de encriptación óptica que hemos diseñado especialmente para ser implementado en un correlador por transformada conjunta que opera con una LCTV como modulador puro de fase en el plano de entrada y una CCD en el plano de registro [27]. Mostraremos los resultados experimentales obtenidos y presentaremos algunos resultados numéricos preliminares analizando la robustez de la técnica.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos de los procesos de encriptación y reconocimiento de imágenes

2.1. Introducción

El creciente interés en el desarrollo de sistemas de seguridad ha dado lugar a diversos trabajos de investigación relacionados con dos de los procesos fundamentales involucrados: el reconocimiento de imágenes y la encriptación de datos. Estas operaciones suelen insumir bastante tiempo de cálculo y así surge el interés por estudiar métodos que aumenten la velocidad de procesado. Dado que las técnicas ópticas aportan la ventaja de permitir el procesado de información en paralelo, se están introduciendo en distintas aplicaciones con el fin de aumentar dicho parámetro.

A partir de 1930, el estudio de la óptica comenzó a tener puntos de contacto con las ciencias de la comunicación y la información. La razón fundamental radica en que tanto los sistemas de comunicación como los sistemas procesadores de imágenes son diseñados para almacenar, convertir y transmitir información. Lo que liga a ambas disciplinas es la similitud de la matemática que se emplea para describir los procesos involucrados en ellas, que consiste básicamente en el análisis de Fourier y la

teoría de sistemas [28]-[30]. Esta equivalencia se fundamenta en que existen ciertas propiedades que ambos sistemas comparten, como por ejemplo la de linealidad e invariancia. Comenzaremos entonces introduciendo, en la sección 2.2, los fundamentos teóricos involucrados en estos sistemas, donde estudiaremos cómo describir los efectos del dispositivo sobre el espectro de frecuencias espaciales de la señal a procesar.

En lo que concierne al procesado óptico de señales, y en particular, al procesado de imágenes, puede decirse que las diversas técnicas que se emplean actualmente tuvieron su origen cuando se comenzó a estudiar la posibilidad de manipular el espectro de Fourier de una imagen. En general, una señal luminosa se representa como una función compleja. En consecuencia, cuando se desea modificar la misma para obtener determinada respuesta, se deben utilizar sistemas que permitan alterar tanto su distribución de amplitud como la de fase. Como es sabido [31], el elemento más versátil para tal fin es un holograma. En la sección 2.3 describiremos los fundamentos de la holografía y analizaremos su aplicación a los dos procesos de interés: la encriptación y el reconocimiento de imágenes.

Las distintas técnicas desarrolladas en este trabajo están basadas en el empleo de procesadores ópticos coherentes, los cuales tuvieron un importante avance con la aparición del láser. Así, en la sección 2.4 introduciremos las arquitecturas más usuales de estos sistemas para aplicaciones del procesado de imágenes.

2.2. Sistemas lineales

Denominamos sistema al mapeo de un conjunto de funciones de entrada en un conjunto de funciones de salida. Un caso particular son los sistemas ópticos, donde las funciones de entrada están espacialmente distribuidas y, en general, son complejas y bidimensionales. Existen muchos fenómenos físicos originados por sistemas que poseen la propiedad de que, al ser excitados con determinado estímulo complejo, su respuesta equivale a la suma de las respuestas que provocaría individualmente cada componente de dicho estímulo. Esta propiedad se denomina *linealidad* y los sistemas

físicos que la poseen se denominan *sistemas lineales*. Por ejemplo, la linealidad de la ecuación de ondas que describe la propagación de la luz en la mayoría de los medios, conduce a considerar las operaciones ópticas sobre imágenes como mapeos lineales de la distribución de luz de un objeto en la distribución de luz de una imagen. Esta propiedad de linealidad simplifica inmensamente la descripción matemática de la mayoría de los fenómenos ópticos. A continuación analizaremos brevemente cómo actúan estos sistemas sobre una señal.

Supongamos que una señal de entrada $g_E(x_1, y_1)$ incide en un sistema óptico lineal que realiza una transformación $L\{\}$ sobre la misma. A la salida del sistema se obtiene entonces la señal de salida $g_S(x_2, y_2) = L\{g_E(x_1, y_1)\}$, según se esquematiza en la figura 2.1, donde (x_1, y_1) y (x_2, y_2) representan respectivamente las coordenadas en el plano de entrada P_1 y en el plano de salida P_2 del sistema. En particular, la

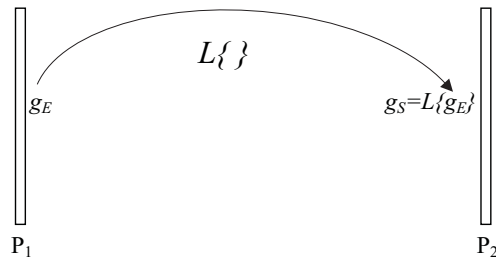


Figura 2.1: *Esquema de la operación de transformación de una señal.*

señal de entrada puede pensarse como una superposición de funciones delta de Dirac, convenientemente pesadas y desplazadas, pudiendo entonces realizarse la siguiente descomposición.

$$g_E(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{+\infty} g_E(\xi, \eta) \delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta) d\xi d\eta \quad (2.1)$$

por lo tanto, si la transformación que realiza el sistema es lineal, se puede escribir la función de salida como

$$g_s(x_2, y_2) = L\{g_E(x_1, y_1)\} = \iint_{-\infty}^{+\infty} g_E(\xi, \eta) L\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\} d\xi d\eta \quad (2.2)$$

La respuesta del sistema, en (x_2, y_2) , ante una señal de entrada representada por la función δ (impulso) ubicada en las coordenadas $x_1 = \xi$; $y_1 = \eta$ se simboliza como

$$h(x_2, y_2, \xi, \eta) \equiv L\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\} \quad (2.3)$$

Esta función se conoce como *respuesta al impulso* del sistema. Por lo tanto, podemos escribir 2.2 como

$$g_s(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} g_E(\xi, \eta) h(x_2, y_2, \xi, \eta) d\xi d\eta \quad (2.4)$$

Para conocer específicamente cuál es la señal de salida, en general debe conocerse la respuesta para impulsos ubicados en todos los puntos del campo objeto en el plano de entrada. En el caso de un sistema procesador de imágenes lineal, este resultado tiene la interesante interpretación física de que los efectos, sobre la señal de entrada, de los elementos ópticos del dispositivo (lentes, filtros, etc) pueden ser completamente descritos especificando las imágenes producidas por fuentes puntuales localizadas a lo largo del objeto. Veamos a continuación una propiedad particular que poseen algunos sistemas ópticos lineales, que es la de invariancia espacial.

2.2.1. Sistemas lineales invariantes: Función Transferencia

Un sistema procesador de imágenes se dice *invariante* o *isoplanático* si su respuesta al impulso $h(x_2, y_2, \xi, \eta)$ depende sólo de las distancias $(x_2 - \xi)$ y $(y_2 - \eta)$, pudiéndose escribir entonces

$$h(x_2, y_2) = h(x_2 - \xi, y_2 - \eta) \quad (2.5)$$

En la práctica, los sistemas empleados para el procesamiento de imágenes no suelen ser isoplanáticos, fundamentalmente a causa de las aberraciones que presentan, pero en general, y debido a que la formación de imágenes es un fenómeno local, es posible dividir el campo de la señal de entrada en regiones donde el sistema es aproximadamente invariante. Entonces, para un sistema isoplanático, la expresión 2.4 puede escribirse como

$$g_s(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} g_E(\xi, \eta) h(x_2 - \xi, y_2 - \eta) d\xi d\eta \quad (2.6)$$

Esta expresión indica que los sistemas ópticos lineales e invariantes generan la *convolución* bidimensional de la señal de entrada g_E , con la respuesta al impulso h del sistema. Esta operación suele representarse simbólicamente como

$$g_s = g_E \otimes h \quad (2.7)$$

Dependiendo del proceso que desee realizarse sobre la señal, el sistema y entonces la respuesta al impulso variarán, pero siempre podrá interpretarse el proceso de este modo, es decir, como la señal convolucionada con la respuesta al impulso del dispositivo empleado. Los sistemas lineales invariantes tienen asociada una estructura matemática que facilita bastante su tratamiento. Como hemos mencionado, suele ser útil describir los procesos efectuados sobre una señal en términos de su respuesta en frecuencias espaciales. Consideremos la expresión 2.7 que representa la señal de salida de un sistema lineal invariante y analicemos los efectos producidos en términos de las frecuencias espaciales de la señal, realizando una transformación de Fourier sobre dicha expresión. Si tenemos en cuenta el teorema de convolución [32], podemos escribir de manera muy simple los efectos del sistema sobre el espectro de Fourier de la señal de entrada, de la siguiente manera

$$G_S(f_x, f_y) = G_E(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) \quad (2.8)$$

donde G_E y G_S representan la transformada de Fourier de la señal de entrada g_E y de salida g_S respectivamente, H representa la transformada de Fourier de la respuesta al impulso, y (f_x, f_y) representan las frecuencias espaciales. La función H , denominada *función transferencia* del sistema, indica los efectos del mismo en el dominio de frecuencias de la señal de entrada. Reescribamos ahora la señal de entrada en su descomposición de Fourier, esto es

$$g_E(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{+\infty} G_E(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x_1 + f_y y_1)] df_x df_y. \quad (2.9)$$

A partir de esta expresión, se puede interpretar que la entrada está descompuesta en funciones elementales representadas por las exponenciales complejas de la representación de la integral de Fourier. Estas funciones elementales son ondas planas de frecuencias espaciales (f_x, f_y) y amplitud compleja $G_E(f_x, f_y) df_x df_y$. Si ahora escribimos la señal de salida en su descomposición de Fourier

$$g_S(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} G_S(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x_2 + f_y y_2)] df_x df_y, \quad (2.10)$$

y tenemos en cuenta la relación 2.8, la expresión 2.10 puede escribirse como

$$g_S(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} G_E(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x_2 + f_y y_2)] df_x df_y. \quad (2.11)$$

A partir de esta expresión, podemos ver que la señal de salida sigue siendo una superposición de ondas planas, donde la amplitud compleja $G_E(f_x, f_y) df_x df_y$ correspondiente a cada una de las componentes elementales ha sido modificada por los efectos del sistema, esto es, por la función transferencia $H(f_x, f_y)$.

Matemáticamente, una autofunción es una función que retiene su forma funcional original, a menos de un factor constante complejo, luego de atravesar un sistema. En este sentido, el análisis realizado nos dice que un sistema lineal invariante tiene como autofunciones las funciones exponenciales complejas, a menos de un factor de peso que el sistema aplica a cada autofunción, que resulta ser el autovalor correspondiente a esa entrada.

Por lo tanto, el efecto del sistema sobre una señal de entrada, puede ser expresado en términos de una función transferencia actuando sobre el espectro de frecuencias espaciales de la señal. Es decir, tal como se ilustra en la figura 2.2, la función transferencia $H(f_x, f_y)$ asociada al sistema puede interpretarse como un filtro en el plano P' que actúa sobre el espectro de frecuencias de la señal de entrada al sistema.

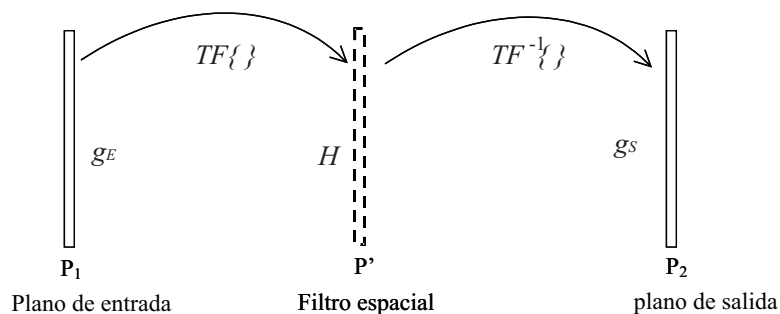


Figura 2.2: Efecto de la función transferencia sobre la señal de entrada.

El procesado óptico de señales está basado en los efectos que un sistema óptico puede producir sobre una señal luminosa. Para analizarlo, se debe tener en cuenta tanto los efectos que producen los distintos elementos que conforman el dispositivo así como el fenómeno de propagación libre de la luz presente entre ellos. Resulta entonces conveniente describir este fenómeno a partir del formalismo recientemente presentado.

2.2.2. El fenómeno de propagación libre

Consideremos en particular la propagación de un campo electromagnético en la dirección \hat{z} , desde el plano $z = 0$ hasta una distancia z no nula, tal como se esquematiza en la figura 2.3. La perturbación $U(x, y, 0)$ en el plano de entrada P_1 del sistema se considera que es mapeada, por el fenómeno de propagación libre, en una nueva distribución de campo $U(x, y, z)$ en el plano P' . La linealidad del fenómeno de propa-

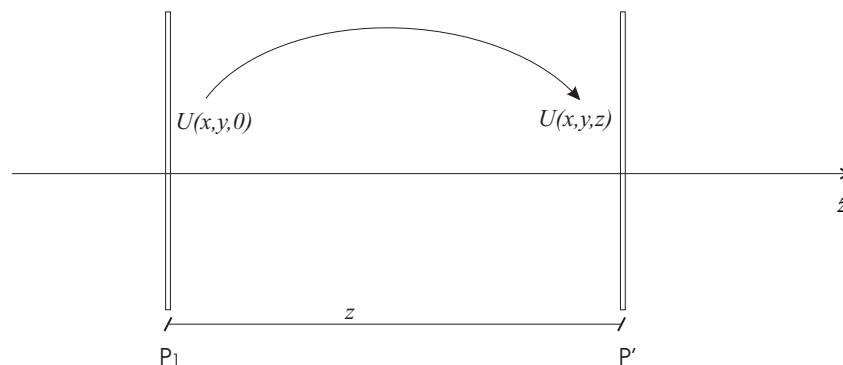


Figura 2.3: *Geometría de difracción.*

gación está directamente implicada en la linealidad de la ecuación de ondas, y no lo discutiremos aquí. La propiedad de invariancia espacial es demostrada sencillamente si encontramos una función transferencia que describa los efectos de la propagación libre sobre la señal de entrada. Si el mapeo tiene una función transferencia asociada, tal como hemos visto anteriormente, debe ser un proceso invariante espacialmente. Para encontrar la función transferencia del sistema, escribamos la señal $U(x, y, z)$ en términos de su representación de Fourier

$$U(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} A(f_x, f_y; z) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y, \quad (2.12)$$

donde $A(f_x, f_y; z)$ representa la transformada de Fourier de $U(x, y, z)$. El campo $U(x, y, z)$ debe satisfacer, en todos los puntos del espacio libres de fuentes, la ecuación de Helmholtz

$$\nabla^2 U + k^2 U = 0 \quad (2.13)$$

donde el haz luminoso tiene número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, y λ es su longitud de onda. Este requerimiento muestra que entonces debe cumplirse que

$$\frac{d^2}{dz^2} A(f_x, f_y; z) + 2\pi^2(\lambda^{-2} - f_x^2 - f_y^2) A(f_x, f_y; z) = 0. \quad (2.14)$$

Una solución elemental de esta ecuación puede escribirse como

$$A(f_x, f_y; z) = A(f_x, f_y; 0) \exp \left[i2\pi \sqrt{\lambda^{-2} - f_x^2 - f_y^2} z \right] \quad (2.15)$$

Esta solución, representada por ondas planas propagándose con vector de onda \vec{k} dado por $\vec{k} = 2\pi(f_x \hat{x} + f_y \hat{y} + \gamma \hat{z})$, con $\gamma = \sqrt{\lambda^{-2} - f_x^2 - f_y^2}$, indica que, mientras que

$$f_x^2 + f_y^2 < \lambda^{-2}, \quad (2.16)$$

el efecto de la propagación no es más que un cambio en las fases relativas de las distintas componentes espectrales de la señal de entrada. Dado que cada onda plana se propaga en distinta dirección, cada una viaja distancias distintas entre dos planos paralelos, introduciéndose entonces entre ellas retardos de fase relativos. Si en cambio, la relación 2.16 no se cumple, esto significa que para esas componentes espectrales la propagación dará lugar a una rápida atenuación en sus amplitudes.

Finalmente, podemos notar que el campo $U(x, y, z)$ puede escribirse en términos de su distribución espectral inicial $A(f_x, f_y; 0)$, teniendo en cuenta las expresiones 2.12 y 2.15, como

$$U(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} A(f_x, f_y; 0) \exp[i2\pi \sqrt{\lambda^{-2} - f_x^2 - f_y^2} z] \times \text{circ}(\lambda \sqrt{f_x^2 + f_y^2}) \times \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (2.17)$$

donde no se ha considerado la contribución de las componentes espectrales más allá de la frecuencia de corte determinada por las soluciones de ondas evanescentes, contribuyendo sólo las componentes que cumplen la relación 2.16. Esta es la razón fundamental por la cual los sistemas procesadores de imágenes convencionales, que son los que trataremos aquí, no pueden resolver estructuras periódicas cuyo período sea menor a la longitud de onda de la radiación empleada.

Queda entonces por último identificar la función transferencia de la propagación libre, esto es, los efectos que la propagación libre ha producido sobre las frecuencias espaciales del campo de entrada. Si especializamos la expresión 2.12 en $z = 0$, esto es,

$$U(x, y, 0) = \iint_{-\infty}^{+\infty} A(f_x, f_y; 0) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (2.18)$$

y comparamos esta expresión con 2.17, resulta sencillo identificar en 2.17 la función transferencia asociada a la propagación libre como

$$H(f_x, f_y) = \exp[i2\pi\sqrt{\lambda^{-2} - f_x^2 - f_y^2}z] \times \text{circ}(\lambda\sqrt{f_x^2 + f_y^2}) \quad (2.19)$$

Por lo tanto, el efecto de la propagación libre puede ser interpretado como el de un filtro espacial dispersivo con un ancho de banda finito. La transmisión del filtro es cero fuera de una región circular de radio λ^{-1} en el plano de frecuencias. Dentro del círculo el módulo de la función transferencia es 1 pero se introducen corrimientos de fase dependientes de la frecuencia.

Este resultado, que es sólo sujeto a la aproximación escalar del campo, puede compararse con la función transferencia que predice el análisis de Fresnel. Para ello, en primer lugar expresemos la integral que representa la propagación de Fresnel-Kirchoff

del campo $U(x, y, 0)$ desde $z = 0$ hasta el plano z

$$U(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{+\infty} U(\xi, \eta; 0) \exp \left\{ i \frac{k}{2z} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2] \right\} d\xi d\eta \quad (2.20)$$

Es fácil ver que esta expresión puede escribirse como

$$U(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U(\xi, \eta; 0) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad (2.21)$$

esto es, el campo U en z es la convolución del campo en $z = 0$ con la respuesta al impulso h que representa la propagación de Fresnel-Kirchoff y que está dada por

$$h(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \exp \left[i \frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right] \quad (2.22)$$

Por lo tanto, la función transferencia que predice el análisis de Fresnel se obtiene simplemente transformando Fourier la respuesta al impulso dada por 2.22

$$H(f_x, f_y) = TF \left\{ \frac{e^{ikz}}{j\lambda z} \exp \left[i \frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right] \right\} = e^{ikz} \exp \left[-i\pi\lambda z (f_x^2 + f_y^2) \right] \quad (2.23)$$

donde $TF\{\}$ representa el operador que transforma Fourier espacialmente. Notemos que esto no es más que el resultado general de la función transferencia dado por 2.19 con la aproximación

$$\sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \approx 1 - \frac{(\lambda f_x)^2}{2} - \frac{(\lambda f_y)^2}{2} \quad (2.24)$$

que es válida siempre que $|\lambda f_x| \ll 1$ y $|\lambda f_y| \ll 1$. Ésta es la restricción a ángulos pequeños. Si quisiéramos analizar este resultado en las condiciones particulares de difracción de Fraunhofer, bastaría con tomar distancias z lo suficientemente grandes como para que cumplan la condición

$$z \gg \frac{k(x_1^2 + y_1^2)_{max}}{2}. \tag{2.25}$$

Notemos en la expresión 2.23 que imponer condiciones para z es equivalente a imponer condiciones sobre las frecuencias espaciales. Por lo tanto, para una señal conteniendo frecuencias lo suficientemente altas puede considerarse la condición de Fraunhofer a una distancia z mucho más cercana al plano de entrada que la requerida para una señal con frecuencias espaciales más bajas. Es decir, las componentes espectrales de frecuencias más altas alcanzan la condición de Fraunhofer mucho más cerca del plano de entrada que aquéllas caracterizadas por bajas frecuencias. Este resultado será empleado más adelante, cuando desarrollemos una de las aplicaciones del procesado óptico como es la encriptación de imágenes, donde será necesario llevar a cabo operaciones sobre una señal en un plano donde se cumplen las condiciones de difracción de Fraunhofer.

La teoría de sistemas lineales desarrollada permite explicar las operaciones involucradas en varias aplicaciones del procesado óptico de imágenes. Estos procesos suelen requerir llevar a cabo modificaciones complejas sobre el campo de la señal que se desea procesar. A continuación analizaremos el empleo de procesos holográficos para llevar a cabo operaciones de reconocimiento y encriptación de imágenes.

2.3. Utilización de hologramas para el procesado de señales ópticas

Describiremos brevemente los fundamentos de un proceso holográfico, lo que nos permitirá, a continuación, introducir las aplicaciones de interés, esto es, los procesos de reconocimiento de formas y de encriptación de imágenes que hemos desarrollado en nuestro trabajo.

2.3.1. Fundamentos de holografía

En 1948, Dennis Gabor [31] propuso un proceso óptico, denominado holografía, mediante el cual es posible registrar la información de fase y amplitud de la onda luminosa difractada por un objeto, sobre un medio que sólo responda a la intensidad de la luz incidente. Cuando un objeto es iluminado coherentemente, emerge de él una onda con determinada distribución de amplitud y fase. Si esta onda está en presencia de una segunda onda de referencia coherente, la figura de intensidad resultante de la interferencia entre ambas guarda información de la relación de fase y de amplitud de la onda objeto y la onda de referencia. El registro de dicha figura sobre un medio sensible a la intensidad lumínica se denomina holograma. La holografía es una herramienta fundamental en distintas aplicaciones del procesado de imágenes ya que puede emplearse para modificar de manera compleja el campo óptico. El proceso consta de dos etapas, una primera donde se efectúa un registro holográfico, y una segunda donde se lleva a cabo el proceso de lectura del holograma.

Consideremos un sistema como el esquematizado en la figura 2.4, donde dos señales denominadas escena y referencia generan, sobre el plano P' , dos campos representados respectivamente por las señales $E(x', y')$ y $R(x', y')$, donde las coordenadas de P' son (x', y') . La distribución de intensidad que llega a dicho plano está dada por

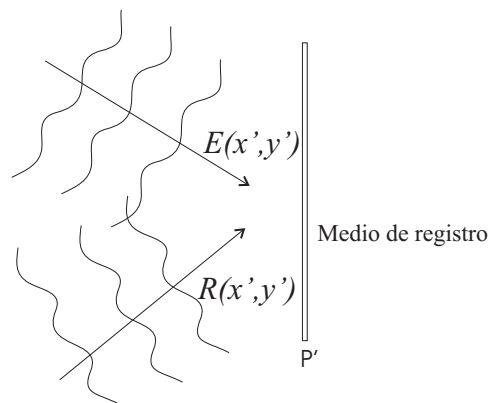


Figura 2.4: Registro holográfico.

$$I(x', y') = |E(x', y')|^2 + |R(x', y')|^2 + E(x', y')R^*(x', y') + E^*(x', y')R(x', y') \quad (2.26)$$

Para sintetizar el holograma, esta distribución de intensidad debe ser registrada en algún medio sensible a la luz. Consideremos la situación particular en que se emplea un medio de registro que tiene una respuesta lineal en intensidad, aunque en algunas aplicaciones suele requerirse un proceso de registro no lineal, como estudiaremos más adelante. En caso de efectuar un registro lineal en el plano P' , la función transmisión que representa al holograma resulta proporcional a la distribución de intensidad en él, esto es

$$t(x', y') \propto I(x', y') \quad (2.27)$$

El proceso posterior de lectura de un holograma, consiste en iluminarlo con un haz que, al difractarse, posea la distribución de amplitud y fase buscada. Si en el plano

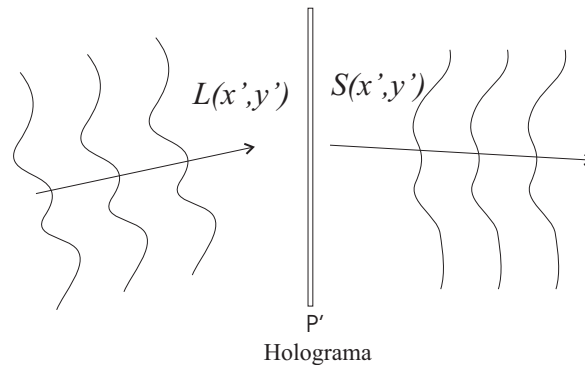


Figura 2.5: *Lectura de un holograma.*

P' se representa la distribución $t(x', y')$ que representa al holograma, tal como se esquematiza en la figura 2.5, e incide sobre dicho plano un haz de lectura representado por $L(x', y')$, entonces la señal que caracteriza al haz inmediatamente después de P' , está representada por

$$S(x', y') = t(x', y')L(x', y') \propto I(x', y')L(x', y') \quad (2.28)$$

$$S \propto |E|^2L + |R|^2L + ER^*L + E^*RL \propto S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (2.29)$$

Este tratamiento es totalmente general y para distintas aplicaciones se requerirá determinar específicamente, tanto el haz de referencia y el haz de lectura empleados para procesar la escena, así como los sistemas ópticos para implementar el proceso particular. Si bien un holograma guarda información tanto de la fase como de la amplitud de una señal, veremos más adelante que para ciertas aplicaciones se requiere emplear sólo la información de fase contenida en el mismo. A continuación describiremos en qué condiciones es útil procesar una señal compleja reteniendo sólo la información de fase.

2.3.2. Procesado de una señal a partir de su información de fase

Es conocido que, en el procesado de señales, la información de fase es mucho más importante que la información de amplitud, si se desea preservar la intelegibilidad visual de una imagen [33],[34]. En particular, la distribución de amplitud en el espectro de frecuencias espaciales de una imagen, es decir, en su transformada de Fourier, es tal que las frecuencias más altas tienen menos peso que las frecuencias más bajas. Quedarse sólo con la información de fase de la transformada de Fourier de la imagen significa normalizar su espectro de frecuencias, hecho que equivale a efectuar un proceso de amplificación de las altas frecuencias. Si tenemos en cuenta que las altas frecuencias representan los detalles más finos de una imagen, entonces el hecho de quedarse sólo con la información de fase significa realzar la información de los bordes o detalles de la misma. Por lo tanto, luego de efectuar una antitransformada de Fourier sobre el espectro normalizado, se reconstruyen principalmente los bordes de la señal

original, tal como se muestra en la figura 2.6. En ciertas situaciones esta información resulta útil, como veremos en las aplicaciones que desarrollaremos más adelante. Cabe

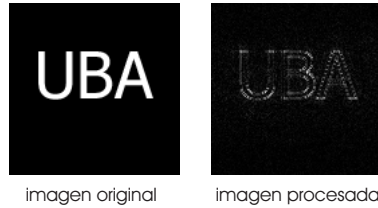


Figura 2.6: *Reconstrucción de una imagen empleando su espectro de frecuencias normalizado.*

destacar que un efecto similar se obtiene si se aplica esta operación en un plano donde, aunque no corresponda exactamente al plano transformado, se cumplen aproximadamente las condiciones de difracción de Fraunhofer. En ciertas aplicaciones tanto de reconocimiento de imágenes, donde intervienen operaciones basadas en comparar los espectros de Fourier de las señales, como en procesos de encriptación, donde es necesario reconstruir una imagen a partir de la fase de su espectro de frecuencias, este análisis resulta de interés.

2.3.3. Holografía en el proceso de encriptación de una señal

Muchas técnicas de encriptación óptica de imágenes están basadas en procesos holográficos [19],[20],[23]. En ellas, la encriptación de la señal suele efectuarse a partir del registro de un holograma empleando como referencia una señal caracterizada por una distribución de ruido. Para llevar a cabo la desencriptación, suele emplearse un proceso de lectura del holograma, donde el haz empleado es especialmente elegido de modo de poder reconstruir la señal encriptada.

Consideremos entonces un holograma registrado en el plano P' , a partir de las señales $E(x', y')$ y $R(x', y')$, tal como se describió en la sección 2.3.1. En particular, las mismas son obtenidas luego de una propagación libre de la escena $e(x_1, y_1)$ y de la referencia $r(x_1, y_1)$ ubicadas en el plano de entrada P_1 . La propagación libre se considera desde el plano de entrada hasta el plano P' ubicado a distancia z_0 , tal como

se esquematiza en la figura 2.7. Por lo tanto, las señales $E(x', y')$ y $R(x', y')$ en dicho

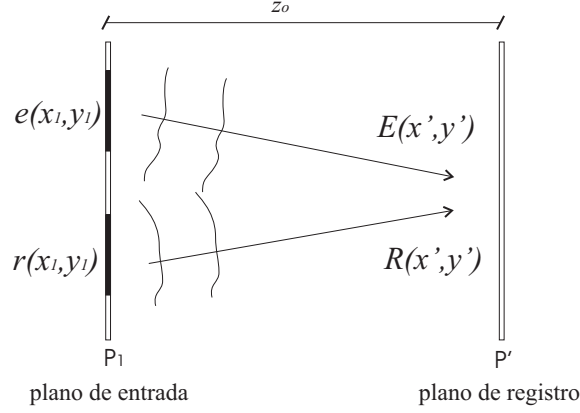


Figura 2.7: Registro holográfico de los haces difractados por la escena y la referencia.

plano resultan

$$E(x', y') = \frac{e^{ikz_0}}{i\lambda z_0} \iint_{-\infty}^{+\infty} e(x_1, y_1) \exp \left\{ i \frac{k}{2z_0} [(x' - x_1)^2 + (y' - y_1)^2] \right\} dx_1 dy_1, \quad (2.30)$$

y

$$R(x', y') = \frac{e^{ikz_0}}{i\lambda z_0} \iint_{-\infty}^{+\infty} r(x_1, y_1) \exp \left\{ i \frac{k}{2z_0} [(x' - x_1)^2 + (y' - y_1)^2] \right\} dx_1 dy_1, \quad (2.31)$$

donde hemos empleado el expresión dada por 2.20 que representa a la propagación libre desde el plano P_1 en $z = 0$ hasta el plano P' en $z = z_0$.

Consideremos ahora el proceso de lectura, esquematizado en la figura 2.8, en el caso particular en que el haz de lectura del holograma es una señal $l(x_1, y_1)$ tal que, al incidir sobre el plano P' , está representada por $L(x', y') = R^{-1}(x', y')$. Entonces la señal emergente del holograma resulta, según 2.29,

$$S \propto |E|^2 R^{-1} + |R|^2 R^{-1} + ER^* R^{-1} + E^* \quad (2.32)$$

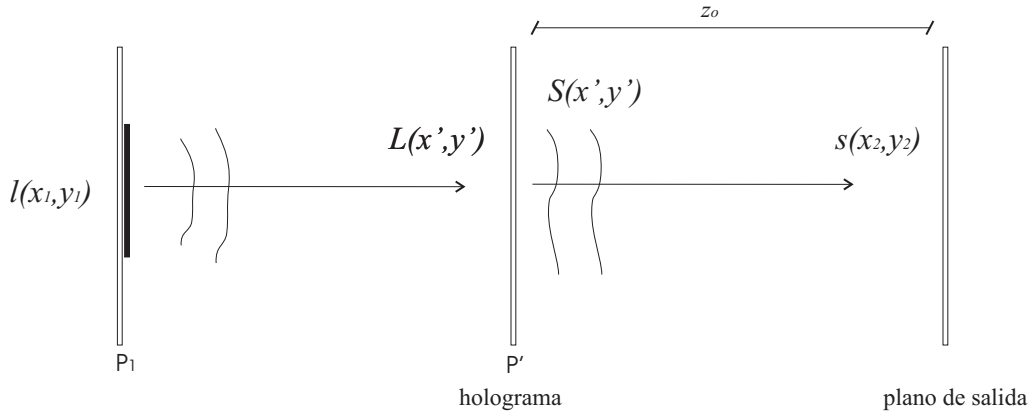


Figura 2.8: Geometría para la reconstrucción de la escena.

Nos interesa ahora observar esta señal luego de haberse propagado una distancia z_0 donde ubicaremos el plano de salida P_2 . Si bien para ello es necesario efectuar una propagación libre sobre los cuatro términos de 2.32, vamos a concentrarnos sólo en el cuarto término. En el Capítulo 4, cuando presentemos la técnica de encriptación que hemos desarrollado en este trabajo, quedará claro el interés de emplear dicho término. El mismo está representado por

$$S_4 \propto E^*(x', y') \tag{2.33}$$

es decir, es proporcional al campo difractado por la escena en el plano P' , conjugado. La contribución de S_4 en el plano de salida P_2 está dada por una señal que se obtiene al efectuar una propagación libre sobre $E^*(x', y')$ una distancia z_0 , esto es

$$s_4(x_2, y_2) \propto \frac{e^{ikz_0}}{i\lambda z_0} \iint_{-\infty}^{+\infty} E^*(x', y') \exp \left\{ i \frac{k}{2z_0} [(x_2 - x')^2 + (y_2 - y')^2] \right\} dx' dy', \tag{2.34}$$

donde $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ es la longitud de onda del campo empleado. Puede verse fácilmente que esta expresión se reduce a

$$\begin{aligned}
 s_4(x_2, y_2) &\propto \frac{1}{(\lambda z_o)^2} \exp \left\{ -i \frac{k}{2z_o} [x_2^2 + y_2^2] \right\} \iint_{-\infty}^{+\infty} e(x_1, y_1) \exp \left\{ i \frac{k}{2z_o} (x_1^2 + y_1^2) \right\} \times \\
 &\quad \times \delta(x_2 - x_1) \delta(y_2 - y_1) dx_1 dy_1 \\
 &\propto \frac{1}{(\lambda z_o)^2} e(x_2, y_2)
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

Es decir, que en el plano de salida P_2 , se obtiene una señal proporcional a la escena. Esta operación para reconstruir la señal de la escena puede también interpretarse en términos de efectuar una propagación inversa sobre el campo $E(x', y')$. Es importante comentar que, en caso de reconstruir la escena a partir de la información completa del campo $E(x', y')$ en el plano P' , no existen en principio condiciones acerca la distancia z_o a la cual se encuentra dicho plano respecto del plano de entrada, y de salida. Sin embargo, tal como hemos comentado en la sección 2.3.2, muchas veces es necesario desarrollar técnicas basadas en operar sobre la información sólo de fase de dicha distribución para reconstruir la señal. En ese caso, es fundamental que la distancia z_o involucrada en la propagación libre sea tal que se cumplan condiciones de difracción cercanas a Fraunhofer.

2.3.4. Filtros holográficos aplicados al reconocimiento de imágenes

Cuando el procesado óptico que desea hacerse sobre una señal implica modificar su espectro de frecuencias de manera compleja, en general es necesario realizar filtros que controlen simultáneamente la fase y amplitud del espectro de la señal [35]. En un proceso de reconocimiento de imágenes, se busca efectuar una operación capaz de comparar dos señales. Para ello, una opción es emplear la correlación, ya que provee información del grado de similitud entre dos señales. A continuación describiremos algunos filtros normalmente utilizados para llevar a cabo dicha operación

[6],[16],[34],[36],. Cabe destacar que muchos de ellos no tienen realización óptica sino que deben sintetizarse computacionalmente (CGH- Computer Generated Holograms: Hologramas Generados por Computadora) [37] y luego se transfieren a un sustrato físico.

Filtro adaptado de Vander Lugt

Los primeros filtros ideados para modificar el espectro de una señal de manera compleja fueron los de *VanderLugt* [6]. Cuando en particular son diseñados para aplicaciones en el campo del reconocimiento de imágenes se los denomina filtros *adaptados*. Se dice que un filtro lineal isoplanático es adaptado a una señal $r(x, y)$ si su respuesta al impulso está dada por

$$h(x, y) = r^*(-x, -y) \tag{2.36}$$

Si $e(x, y)$ es una señal de entrada a un sistema caracterizado por la respuesta al impulso descripta $h(x, y)$, entonces la señal de salida del sistema está dada por

$$\begin{aligned} s(x, y) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} e(\xi, \eta)h(x - \xi, y - \eta)d\xi d\eta \\ &= \iint_{-\infty}^{+\infty} e(\xi, \eta)r^*(\xi - x, \eta - y)d\xi d\eta \end{aligned} \tag{2.37}$$

expresión que se define como la *correlación cruzada* de e y r . Es decir que la convolución, operación que siempre hace un sistema formador de imágenes, puede expresarse en términos de una correlación, simbólicamente

$$s(x, y) = e(x, y) \otimes r^*(-x, -y) = e(x, y) * r(x, y). \tag{2.38}$$

donde $*$ representa la operación de correlación. La función transferencia asociada al sistema está dada por

$$H(f_x, f_y) = TF\{r^*(-x, -y)\} = R^*(f_x, f_y). \tag{2.39}$$

Un filtro representado por una distribución proporcional a H se denomina filtro de *Vander Lugt adaptado* a $r(x, y)$. Analicemos ópticamente sus efectos, tal como se ilustra en la figura 2.9.

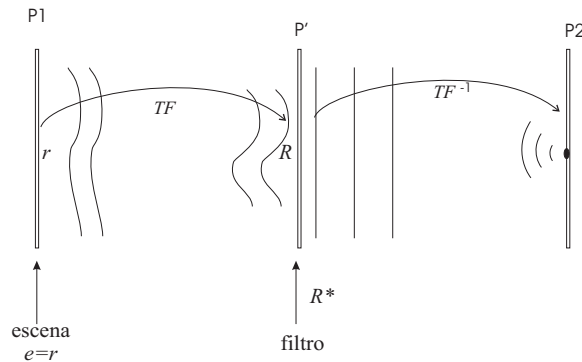


Figura 2.9: Interpretación óptica de la operación de un filtro adaptado .

Para ello, consideremos la situación particular de un proceso de reconocimiento donde $r(x, y)$ representa la señal que se desea reconocer (o referencia) a la cual fue adaptado el filtro, y $e(x, y)$ es la escena que se quiere analizar, es decir, dentro de la cual se quiere detectar la presencia de la referencia. Más específicamente, supongamos que la señal de entrada es exactamente la señal a la cual es adaptado el filtro, es decir $e(x, y) = r(x, y)$. Por lo tanto, los efectos del filtro sobre el espectro de frecuencias de la señal de entrada serán tales, que la señal emergente del filtro resultará proporcional a RR^* . Esta cantidad es real, lo que implica que el filtro cancela exactamente la curvatura del frente de onda incidente R . El campo transmitido es entonces una onda plana. Por lo tanto, la señal de salida, obtenida luego de antitransformar Fourier este campo, resulta ser un punto brillante correspondiente a la señal de *autocorrelación*

$$s = TF^{-1}\{RR^*\} = r * r. \tag{2.40}$$

Si por el contrario, la señal de entrada al sistema fuera distinta a aquella a la cual fue adaptado el filtro, éste en general no cancelará la curvatura del haz y la señal de salida ya no será un punto brillante. Así, la presencia de la referencia en la escena puede ser determinada a partir de medir la intensidad de luz en el plano de salida, en particular, en las coordenadas donde esté centrada la señal de entrada.

La distribución que representa al filtro de Vander Lugt es en general una señal compleja, por ello originariamente, para su síntesis se empleaba un sistema holográfico o interferométrico como el esquematizado en la figura 2.10

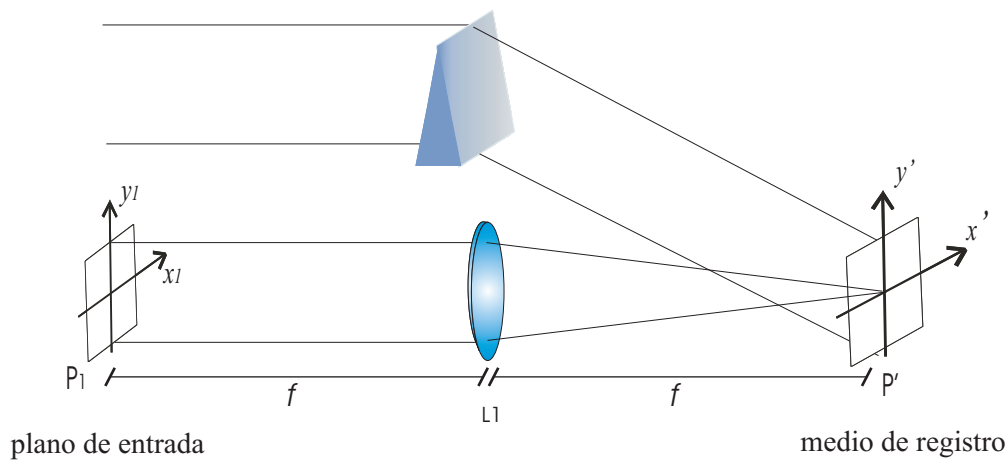


Figura 2.10: Síntesis óptica de un filtro de Vander Lugt.

Un haz plano ilumina el plano de entrada P_1 del sistema. El mismo está conformado por una transparencia donde se representa la respuesta al impulso del filtro a sintetizar, en este caso dada por 2.36, que constituye la señal de entrada. A distancia f del plano de entrada se ubica por un lado, una lente de distancia focal f destinada a proveer, en el plano P' , la transformada de Fourier de la señal de entrada; por otro lado, se ubica un prisma que desvía parte del haz plano, dando lugar a una señal uniforme representada por una fase lineal. La interferencia de ambas señales es registrada, constituyéndose así un holograma de Fourier mediante el cual queda representado el filtro de Vander Lugt. Recordando el análisis descrito en la sección 2.3.3, cuando se efectúa el proceso de registro de un holograma, la distribución que

representa la función transmisión del mismo está descrita por 2.26. En este caso, uno de los campos de la expresión está representado por la distribución H y otro, por un haz plano con una fase lineal, estando entonces la transmisión del filtro dada por

$$t(f_x, f_y) \propto |H(f_x, f_y)|^2 + 1 + H(f_x, f_y)e^{-i\phi(f_y)} + H^*(f_x, f_y)e^{i\phi(f_y)} \quad (2.41)$$

donde se ha considerado que el haz plano tiene amplitud unitaria y fase lineal $\phi(f_y)$. Si en particular el filtro ha sido adaptado a la señal $r(x_1, y_1)$ que se desea detectar, entonces cuando el mismo sea empleado en un sistema como el esquematizado en la figura 2.9, cuya señal de entrada esté dada por $r(x_1, y_1)$, la expresión que describe la distribución de luz emergente del filtro será

$$S \propto |R|^2 R + R + RR^* e^{-i\phi(f_y)} + RR e^{i\phi(f_y)} \propto S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (2.42)$$

donde se ha empleado 2.29 y 2.39. Notemos que el tercer término es el que representa los efectos de cancelación de curvatura, descritos anteriormente. Si la señal representada por 2.42 es transformada Fourier para obtener la señal de salida, el tercer término dará lugar a la autocorrelación, en particular centrada de acuerdo a donde se centre la función delta de Dirac resultante de transformar Fourier el factor de fase lineal. El mismo, tiene justamente el fin de separar la zona donde se hallan las correlaciones de interés, de las demás contribuciones en la salida del sistema.

Una situación más general a analizar sería aquella en la cual la escena estuviera representada por varios objetos. En ese caso, la señal de salida estaría representada por varias señales de correlación entre la referencia y los distintos objetos que componen la señal de entrada. Cada una dará, en el plano de salida del sistema, una contribución centrada espacialmente en la posición en que se encuentra cada objeto dentro de la escena [7]. En esta situación, resulta importante poder distinguirlas espacialmente con un buen poder de discriminación, parámetro de rendimiento que relaciona la intensidad de autocorrelación con la de la correlación cruzada. El filtro adaptado

de Vander Lugt, si bien es el más sencillo y el menos sensible al ruido, presenta las desventajas de que su poder de discriminación es bajo y los picos de correlación son anchos. La posibilidad de generar procesos que originen picos más agudos sería entonces de interés. Con el objetivo de desarrollar procesos de reconocimiento más eficientes, se ha introducido un filtro denominado POF (Phase Only Filter)[34], el cual será presentado a continuación.

Filtro sólo de fase (POF)

El diseño de este filtro se basa en la relevancia de la información de la fase de una señal, tal como hemos mencionado en la sección 2.3.2. Dado que el POF ha sido ideado para ser empleado en aplicaciones de reconocimiento de formas, el mismo está basado en el filtro de Vander Lugt adaptado a la señal a reconocer. Si $H(f_x, f_y)$ representa al filtro de Vander Lugt, y $h(x, y)$ su respuesta al impulso, entonces un POF se define como

$$POF\{h\} = \frac{TF\{h\}}{|TF\{h\}|} = \frac{H}{|H|} \quad (2.43)$$

Es decir, el filtro adaptado de Vander Lugt es normalizado de modo de retener sólo la información de fase del mismo. Tal como hemos comentado anteriormente, el efecto de esta operación es darle peso a los detalles de una señal a través de un realce de sus altas frecuencias. Por esta razón, el empleo de estos filtros en aplicaciones de reconocimiento ha permitido incrementar notablemente el poder de discriminación. Este filtro no puede realizarse ópticamente, sino que es necesario recurrir al empleo de los CGH. La posibilidad de desarrollar este tipo de hologramas ha llevado a diseñar filtros mucho más complejos para diversas aplicaciones de reconocimiento, entre ellas, para efectuar procesos de reconocimiento múltiple. Presentaremos a continuación uno de los filtros compuestos más empleados para tal fin.

Algoritmo SDF para reconocimiento múltiple

El método SDF (Synthetic Discriminant Functions) [38] fue ideado para aplicaciones donde se requiere efectuar un proceso de reconocimiento múltiple. En lugar de diseñar un filtro adaptado a cada objeto a detectar, este método permite diseñar sistemas donde un único filtro es empleado para tal operación. El mismo es construido de modo que sus propiedades de correlación son ajustadas previamente de acuerdo a un *training set*, esto es, un conjunto de imágenes cuyas correlaciones con la respuesta al impulso del filtro son fijadas previamente. Los miembros de este conjunto pueden ser tanto versiones distorsionadas de un mismo objeto, así como ejemplos de otros objetos cuya señal filtrada deseamos que valga cero. El algoritmo SDF permite encontrar un único filtro compuesto capaz de generar respuestas controladas a partir de procesos iterativos. Por ejemplo, generar una señal de correlación similar para los distintos objetos que se desea detectar, y una respuesta de muy baja eficiencia para aquéllos objetos que no forman parte de tal grupo.

Consideremos en particular la situación donde el *training set* está constituido por N versiones distorsionadas de un objeto que se desea reconocer. Sean $r_i(x, y)$, con $i=1,2,\dots,N$ las funciones que representan a esos N objetos y sea $h(x, y)$ la respuesta al impulso del filtro buscado, se pide entonces que

$$c(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} r_i(\xi, \eta) h^*(\xi - x_2, \eta - y_2) d\xi d\eta, i = 1 \dots N. \quad (2.44)$$

Esta condición impone que el valor de correlación $c(x_2, y_2)$ que se espera obtener para las distintas funciones r_i sea el mismo en todo el plano de salida. Un filtro con estas características es irrealizable, y entonces lo que suele imponerse es que el valor de la correlación en el origen coincida para las distintas funciones a reconocer, esto es, que

$$c(0, 0) = \iint_{-\infty}^{+\infty} r_i(\xi, \eta) h^*(\xi, \eta) d\xi d\eta, i = 1 \dots N. \quad (2.45)$$

Si encontramos una respuesta al impulso que satisfaga esta condición para las N

funciones, entonces habremos encontrado el filtro. La relación 2.45 define un conjunto de N ecuaciones a resolver. A partir de aquí consideraremos que el proceso se efectúa digitalmente y por lo tanto resultará más cómodo pasar a una representación vectorial para resolver el sistema y entonces encontrar la respuesta al impulso deseada. Cada función r_i será representada por un vector

$$\vec{r}_i = [r_i(1) \quad r_i(2) \quad \dots \quad r_i(n)] \tag{2.46}$$

cuya dimensión es igual al número n de píxeles que se emplearán al digitalizar la imagen. Definimos entonces la matriz del *training set*, \mathbf{t} , conformada por N filas, donde la fila i -ésima corresponderá al vector de la imagen r_i

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} r_1(1) & \dots & r_1(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_i(1) & \dots & r_i(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_N(1) & \dots & r_N(n) \end{bmatrix}. \tag{2.47}$$

Esta matriz tendrá dimensión $N \times n$ con $n \gg N$ dado que la dimensión de la imagen digitalizada suele ser mucho mayor que el número de funciones que conforman el *training set*. Definimos además el vector columna \vec{c} de dimensión N conteniendo los valores deseados de correlación

$$\vec{c} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix}. \tag{2.48}$$

Por último definimos el vector columna \vec{h} de dimensión n , representando la versión digitalizada de la respuesta al impulso que estamos buscando

$$\vec{h} = \begin{bmatrix} h(1) \\ h(2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h(n) \end{bmatrix}. \quad (2.49)$$

Con esta nueva representación, la expresión 2.45 toma la forma:

$$\vec{c} = \mathbf{t}\vec{h}^* \quad (2.50)$$

De aquí en más, el problema se reduce a encontrar \vec{h} . Veamos que este problema consiste en resolver un sistema de N ecuaciones con $2n$ incógnitas. Los $2n - N$ grados de libertad disponibles pueden entonces ser empleados por ejemplo para mejorar algunos criterios de rendimiento como ser la relación señal-ruido, la agudeza del pico, etc. o restringir el filtro a algún dominio en particular como es el caso de hacer un filtro SDF sólo de fase.

SDF sólo de fase Diversos filtros basados en la teoría de SDF [16],[38]-[41] han mostrado ser poderosas herramientas para lograr invariancia ante distorsiones en procesos de reconocimiento. En el campo del diseño de filtros, se ha puesto gran esfuerzo en considerar las restricciones que la tecnología disponible impone sobre los valores que pueden tomar los filtros. En particular, dado el excelente desempeño de los filtros POF, el método ha sido extendido a los filtros basados en la teoría SDF [42]. En esta propuesta, cada valor del filtro SDF es dividido por su módulo; sin embargo, el filtro sólo de fase que resulta de esta operación ha demostrado no tener buen desempeño [43]. Un intento para superar este inconveniente ha sido desarrollado por Montes-Usategui et al [16], quienes han diseñado un algoritmo iterativo para calcular filtros SDF con restricciones, basándose en un diseño denominado *SDF de mínima distancia*

euclídea (MED-SDF). El procedimiento es no divergente y computacionalmente implementable, el número de iteraciones es bajo y por lo tanto la carga computacional es moderada. La técnica que presentamos en este trabajo está basada en este filtro, cuyo algoritmo describiremos brevemente a continuación.

SDF de fase. Método de la mínima distancia euclídea - POMED-SDF .

La extensión del filtro POF al SDF impone sobre éste restricciones que hacen que la condición 2.50 deje de cumplirse. Surge entonces la idea de diseñar un filtro SDF, basado en el POF, pero el cual es forzado iterativamente a cumplir con la restricción del dominio de fase y además, con la condición 2.50. Cada vez que el filtro es forzado a cumplir con una de las condiciones, la otra ya no es satisfecha. En este método se busca un procedimiento iterativo convergente, de modo que el hallazgo de una solución quede asegurado. Además, se busca que el filtro se aparte lo menos posible de un filtro originalmente esperado, es decir, que las sucesivas iteraciones no lo modifiquen demasiado. Esto resulta posible si se impone la condición de minimizar la distancia euclídea entre la respuesta al impulso \vec{h} del filtro SDF buscado, y la respuesta al impulso esperada \vec{a} . La función a minimizar está dada por

$$E(\vec{h}) = \sum_{i=1}^n [\vec{h}(i) - \vec{a}(i)]^2 \tag{2.51}$$

y la condición que se impone en cada iteración es que esta distancia decrezca, es decir

$$\sum_{i=1}^n [\vec{h}_{k+1}(i) - \vec{a}_{k+1}(i)]^2 < \sum_{i=1}^n [\vec{h}_k(i) - \vec{a}_k(i)]^2 \tag{2.52}$$

donde k representa el número de iteración e i el pixel. El algoritmo termina cuando se cumple que $|E(\vec{h}_k) - E(\vec{h}_{k+1})| < \epsilon$, donde ϵ es un número pequeño determinado de antemano.

2.4. Arquitecturas básicas de procesadores ópticos coherentes

Introduciremos aquí dos arquitecturas que usualmente se emplean para implementar la operación de convolución entre dos señales, y que por lo tanto, son útiles cuando se requiere efectuar operaciones basadas en procesos de filtrado.

2.4.1. Procesador $4f$

El procesador $4f$ se caracteriza por poseer una arquitectura que permite llevar a cabo el procesado de una señal óptica actuando directamente sobre su espectro de Fourier a partir del empleo de un filtro. Un esquema de este dispositivo se muestra en la figura 2.11. Un haz coherente colimado incide sobre el plano P_1 donde se representa

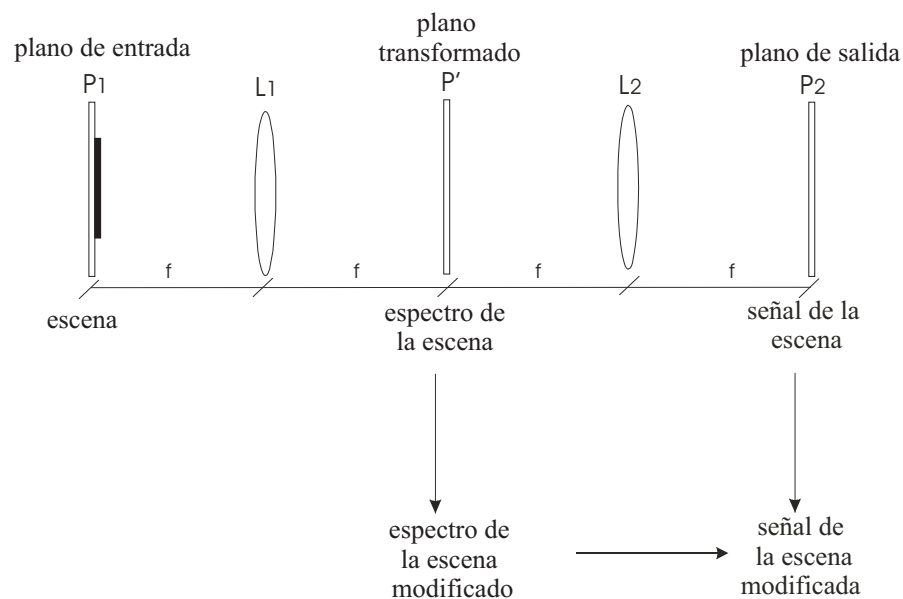


Figura 2.11: Esquema de un procesador $4f$.

la información de la señal a procesar. El haz difractado constituye la denominada señal de entrada $e(x_1, y_1)$ del sistema. A distancia focal f de dicho plano se coloca

la lente L_1 , la cual provee, sobre el plano focal posterior (o plano transformado) P' , la transformada de Fourier de la señal de entrada, $E(f_x, f_y)$, que representa su espectro de frecuencias espaciales. Si este espectro es modificado intencionalmente, por ejemplo, situando en el plano de Fourier un filtro $H(f_x, f_y)$, entonces la señal inmediatamente a la salida del plano transformado pasa a estar representada por

$$S(f_x, f_y) = E(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) \quad (2.53)$$

Si una segunda lente L_2 es ubicada a distancia focal f del plano transformado, entonces, en el plano focal posterior de la misma (plano de salida) P_2 , se obtiene el haz del objeto original, modificado. Es decir, la señal de salida del sistema está dada por

$$s = TF\{S\} = e \otimes h \quad (2.54)$$

donde se ha empleado la relación 2.53 y el teorema de convolución, y donde h representa la respuesta al impulso del filtro. En general, la respuesta al impulso está asociada a la función pupila del sistema, que en estos procesadores está originada por el filtro ya que es el elemento más limitante. Bajo esta consideración, la respuesta al impulso del filtro es la respuesta al impulso del sistema.

Notemos por último, que la operación de un procesador 4f puede pensarse en términos de un proceso holográfico tal como el que hemos descrito en la sección 2.3.1, donde en particular el haz de lectura que incide sobre el holograma está representado por la transformada de Fourier de la señal a procesar. La señal de salida es modificada entonces de acuerdo a la acción del filtro sobre el espectro de frecuencias de la misma. Una de las aplicaciones más usuales del procesador 4f consiste en operaciones de reconocimiento de formas. En ese caso, si se emplea un filtro adaptado de Vander Lugt tal como el que hemos descrito, el procesador 4f pasa a denominarse *correlador de Vander Lugt*, al cual nos referiremos en algunas ocasiones en el contexto de procesadores ópticos empleados para aplicaciones de reconocimiento.

Notemos que en este dispositivo, donde la iluminación del holograma que represen-

ta al filtro se efectúa con un haz complejo no uniforme, resulta de suma importancia la alineación del sistema de implementación. Sin embargo, existe otra arquitectura que permite convolucionar y correlacionar dos funciones evitando el empleo de filtros. Es el denominado *correlador por transformada conjunta* que presentaremos a continuación.

2.4.2. Correlador por transformada conjunta

El correlador por transformada conjunta, ideado por Weaver y Goodman, ha sido diseñado originalmente para llevar a cabo la operación de convolución entre dos funciones [7] y por ello resulta de interés para emplearlo en operaciones de filtrado. La ventaja fundamental que presenta este dispositivo respecto del 4f, se debe a que su operación está basada en un proceso de registro holográfico, y luego en un proceso de lectura empleando un haz plano, evitando así los inconvenientes de alineación. La diferencia fundamental entre ambos dispositivos, radica en que tanto la señal que se desea procesar, como la respuesta al impulso deseada, están presentes simultáneamente durante el proceso de registro, lo que posibilita emplear un haz de lectura plano a fin de obtener la señal de salida deseada. En la figura 2.12 se presenta un esquema del proceso de registro en este dispositivo. Un haz plano de longitud de onda λ ilumina el plano de entrada P_1 del correlador, donde se representan, separadas por una distancia $2c$ en el eje x , la escena $e(x_1, y_1)$ (señal a procesar) y la referencia $r(x_1, y_1)$ (que dará cuenta de los efectos de filtrado a efectuar sobre la escena). La señal de entrada está representada entonces por

$$a(x_1, y_1) = e(x_1 - c, y_1) + r(x_1 + c, y_1) \quad (2.55)$$

Una lente convergente $L1$ de distancia focal f es empleada para obtener, en el plano P' denominado *plano transformado conjunto JTP* (*Joint Transform Plane*) ubicado a distancia focal de la misma, la interferencia de las transformadas de Fourier de ambas señales, representada por

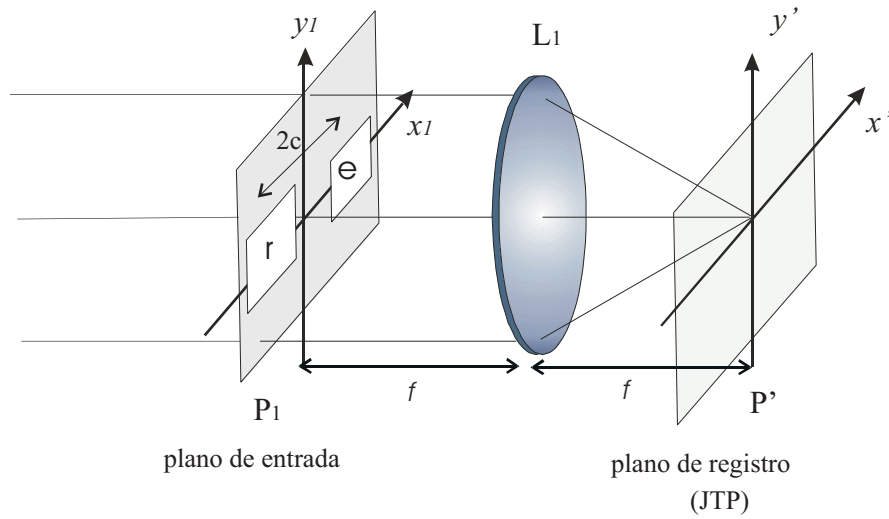


Figura 2.12: Correlador por transformada conjunta: proceso de registro.

$$A(f_x, f_y) = TF\{a(x_1, y_1)\} = E(f_x, f_y)\exp\{-i2\pi c f_x\} + R(f_x, f_y)\exp\{i2\pi c f_x\} \quad (2.56)$$

y la distribución de intensidad en el plano P' está dada por

$$I(f_x, f_y) = |TF\{a(x_1, y_1)\}|^2 = |E(f_x, f_y)|^2 + |R(f_x, f_y)|^2 + E(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y)\exp\{-i\frac{2\pi 2c}{\lambda f}y_2\} + E^*(f_x, f_y)R(f_x, f_y)\exp\{i\frac{2\pi 2c}{\lambda f}y_2\} \quad (2.57)$$

La distribución 2.57 debe ser registrada en algún medio sensible a la luz que debe situarse en el plano transformado conjunto del sistema. Dicho registro constituye lo que denominaremos *transformada conjunta* del correlador. Consideremos la situación particular en que se emplea un medio de registro que tiene una respuesta lineal en intensidad. En ese caso, la función transmisión que representa a la transformada conjunta resulta proporcional a la distribución de intensidad. El proceso de lectura de la transformada conjunta se esquematiza en la figura 2.13.

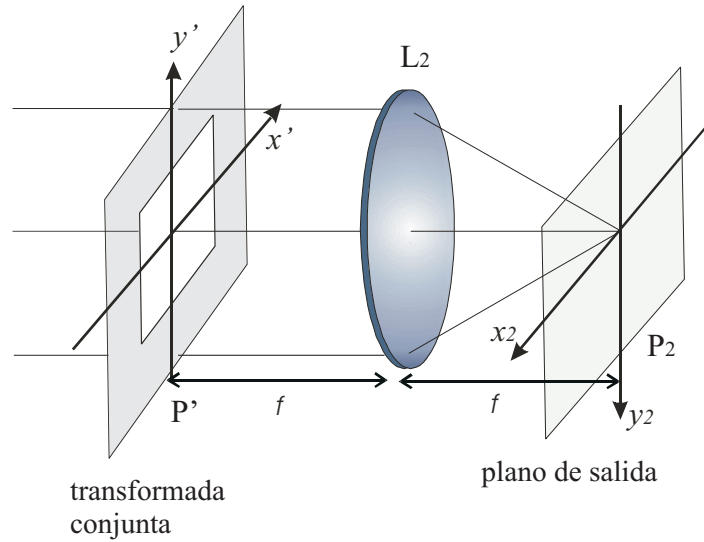


Figura 2.13: Correlador por transformada conjunta: proceso de lectura.

Un haz de lectura plano ilumina el plano P' donde se representa la función transmisión, proporcional a la distribución dada por 2.57. El campo emergente de dicho plano está representado por 2.29, especializando L por una constante que por comodidad elijiremos como la unidad. Una lente convergente L_2 , ubicada a distancia focal del plano P' , es empleada para obtener en el plano de salida P_2 , situado en el plano focal posterior, la antitransformada de Fourier de 2.57, esto es

$$s(x_2, y_2) \propto TF^{-1}\{I(f_x, f_y)\} \quad (2.58)$$

Notar en la figura, la inversión de ejes en el plano de salida, a los efectos de que la lente L_2 antitransforme la señal. Por lo tanto, teniendo en cuenta la expresión 2.57, 2.58 puede escribirse como

$$s(x_2, y_2) = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 \quad (2.59)$$

con

$$\begin{aligned}
s_1 &\propto e(x_2, y_2) * e(x_2, y_2) \\
s_2 &\propto r(x_2, y_2) * r(x_2, y_2) \\
s_3 &\propto \{e(x_2, y_2) * r(x_2, y_2)\} \otimes \delta(x_2 + 2c, y_2) \\
s_4 &\propto \{r(x_2, y_2) * e(x_2, y_2)\} \otimes \delta(x_2 - 2c, y_2)
\end{aligned}$$

Por lo tanto, la señal de salida está constituida en primer lugar, por los dos primeros términos que dan respectivamente la autocorrelación de la escena y la referencia, ambas distribuciones centradas en el origen y que no resultan de interés en este análisis. Luego, se tiene las correlaciones cruzadas de la escena y la referencia centradas en $(x_2, y_2) = (0, \pm 2c)$. Notemos en particular que, teniendo en cuenta la relación 2.38, podemos reescribir

$$\begin{aligned}
S_3 &\propto \{e(x_2, y_2) \otimes r^*(-x_2, -y_2)\} \otimes \delta(x_2 + 2c, y_2) \\
S_4 &\propto \{e(x_2, y_2) \otimes r^*(-x_2, -y_2)\} \otimes \delta(x_2 - 2c, y_2)
\end{aligned} \tag{2.60}$$

es decir, el tercer y cuarto término se pueden expresar en forma de una correlación entre la escena y la referencia (o en términos de la convolución entre la escena y la referencia, invertida y conjugada), centrada en $(x_2, y_2) = (0, \pm 2c)$. Por lo tanto, una vez definida la función transferencia asociada a un proceso particular, entonces sólo es necesario calcular la respuesta al impulso correspondiente e invertirla y conjugarla para emplearla como señal de referencia en el correlador. En particular, para aplicaciones de reconocimiento, donde se requiere una señal de salida dada por la correlación entre la escena y la referencia, basta con representar ambas señales en el plano de entrada del correlador. Notemos que en esa situación, las dos señales de correlación entre la escena y la referencia que se obtienen, son una la reflexión especular de la otra. Este correlador puede interpretarse de la siguiente manera. Si la escena y la referencia son iguales, entonces sus espectros se superpondrán en el plano transformado e interferirán dando lugar a franjas. En general, cuanto más similares sean sus espectros, la transformada conjunta estará más modulada por franjas. Luego al iluminar la distribución de intensidad generada, ésta se comportará como una red

de difracción dando lugar a órdenes (picos de correlación). Según la similitud entre los espectros, las señales difractadas corresponderán a puntos más o menos brillantes (autocorrelación o correlación cruzada) siendo su intensidad una medida de la similitud entre la escena y la referencia.

Hemos presentado en las secciones anteriores diversos filtros ideados para mejorar la eficiencia de un proceso de reconocimiento. Los mismos fueron diseñados para ser implementados en un procesador $4f$. Para implementar los efectos de estos filtros en un correlador por transformada conjunta, en general será necesario efectuar algún proceso sobre la señal de referencia, de modo de emular dichos efectos en el plano transformado de un $4f$, como describiremos en el siguiente Capítulo. Muchas veces, no son suficientes los efectos que permite provocar la señal de referencia sobre la escena, y resulta necesario hacer algún proceso extra, como podría ser realizar el registro holográfico en un medio no lineal, o aplicar alguna operación no lineal al holograma una vez registrado, tal como veremos más adelante. Las aplicaciones de este procesador pueden ser varias, y de eso dependerá en general tanto la señal que se emplee en la referencia, como el proceso que se requerirá llevar a cabo sobre el plano transformado conjunto.

En particular, una variante de este dispositivo será empleada en la implementación de la técnica de encriptación óptica que describiremos en el Capítulo 4. Esta variación consiste básicamente en remover las lentes transformadoras L_1 y L_2 , y en cambio emplear una distancia entre los planos correspondientes donde se cumpla aproximadamente la condición de difracción de Fraunhofer. En particular, la información de la escena será encriptada, en el plano de registro, mediante el empleo de una señal de referencia dada por un haz difuso.

En los siguientes Capítulos estudiaremos algunas técnicas ópticas, basadas en las desarrolladas en este Capítulo, relacionadas con aplicaciones de reconocimiento de formas y de encriptación de señales, que hemos diseñado especialmente para operar en una arquitectura basada en un correlador por transformada conjunta donde las señales son representadas como distribuciones de fase.

Capítulo 3

Implementación del proceso de reconocimiento de formas en un JTC sólo de fase

3.1. Introducción

El proceso de reconocimiento de formas tiene por objetivo detectar la presencia de un objeto de interés dentro de una escena determinada, tal como hemos comentado en el Capítulo anterior. Una de las técnicas para llevar a cabo este proceso se basa en efectuar la correlación entre la escena que se desea analizar y el objeto a reconocer (o referencia), ya que la señal resultante de esta operación provee una medida de la similitud entre ambas. La implementación óptica de esta operación surge a partir de la posibilidad de diseñar sistemas capaces de generar la correlación entre dos señales. Hemos presentado en el Capítulo anterior dos arquitecturas que permiten su realización óptica y estudiamos en líneas generales la teoría que describe el proceso de correlación óptica pero sin especificar cuáles eran los medios empleados en los procesadores tanto para representar objetos, como para realizar registros de distribuciones de luz. Sin embargo, en el momento de implementar el correlador de Vander Lugt o el correlador por transformada conjunta, es crucial la elección adecuada de los

componentes ópticos que se utilizarán.

Las aplicaciones del proceso de reconocimiento de formas en diferentes ámbitos han originado exigencias en cuanto al funcionamiento y arquitectura de los correladores. Por un lado, surge la necesidad de reducir los tiempos que dura la operación; por otro, se ha comenzado a valorar que estos sistemas sean cada vez de dimensiones más reducidas. Sin embargo, una de las características fundamentales está relacionada con la robustez de los sistemas en cuanto a su alineación.

Hemos mencionado que el JTC resulta ser mucho más robusto que el correlador de Vander Lugt, el cual requiere alinear con gran precisión el filtro actuando sobre el espectro de Fourier de la señal a procesar. Sin embargo, las ventajas de alineación del JTC son reales si es posible representar la referencia y la escena en el mismo plano. De otro modo, la alineación de los planos de ambas representaciones constituye también un inconveniente en estos correladores. Originariamente, para representar el plano de entrada, así como el filtro en un Vander Lugt o el plano transformado conjunto en un JTC, se realizaba un registro en placas fotográficas; por lo tanto, este tipo de procesado tenía un tiempo inherente que era por lo menos el que insumía la obtención de un negativo de fotografía. El empleo de pantallas de T.V. de cristal líquido en los correladores ópticos fue clave debido a su capacidad para trabajar en tiempo real, esto es, para mostrar una imagen a velocidad de video. En el Vander Lugt, actualmente suelen emplearse las pantallas de cristal líquido tanto para representar la escena, como el filtro [44]. Asimismo, en los correladores por transformada conjunta, se suelen emplear pantallas de cristal líquido tanto para mostrar el plano de entrada, como para representar el plano transformado conjunto [45]-[48]. De esta manera, en ambos correladores es posible implementar el procesado en tiempos muy cortos (del orden del tiempo de video).

En cuanto a la posibilidad de diseñar correladores compactos, es importante destacar que la arquitectura de un correlador de Vander Lugt no permite modificaciones lo suficientemente importantes como para reducir notablemente su tamaño, al menos no sin incluir sistemas ópticos auxiliares que en general introducen aberraciones. No ocurre lo mismo con la arquitectura de un JTC, donde es posible implementar distintas alternativas con el fin de reducir sus dimensiones considerablemente[49].

En los procesos de reconocimiento que hemos desarrollado en este trabajo, hemos empleado la alternativa de combinar, en la arquitectura de un JTC, una pantalla de cristal líquido para representar el plano de entrada, y un cristal fotorrefractivo como medio de registro holográfico dinámico para registrar el plano transformado conjunto. Este dispositivo, que será descrito en la sección 3.2, permite implementar el proceso de correlación óptica en un sistema compacto, estable y con tiempos de procesado muy bajos.

Si bien la elección del dispositivo de implementación es esencial para llevar a cabo el proceso con éxito, prioritariamente debe estudiarse la eficiencia de la técnica a emplear de acuerdo a la aplicación para la cual fue ideada. En particular, el proceso de reconocimiento de formas en un correlador por transformada conjunta suele presentar inconvenientes como ser su bajo poder de discriminación [50] y su alta sensibilidad ante distorsiones del objeto a reconocer. En tal sentido, varias técnicas han sido diseñadas con el fin de mejorar dichos parámetros de rendimiento. Las distintas técnicas que han sido desarrolladas en general requieren, por un lado, representar el plano de entrada empleando distribuciones complejas, lo que resulta en una disminución del ancho de banda disponible; por otro lado, estas técnicas muchas veces están basadas en efectuar operaciones en el plano transformado conjunto, lo que aumenta el tiempo de procesado y además no resulta posible si se emplean medios de registro holográficos tal como un cristal fotorrefractivo.

En este trabajo nos hemos propuesto diseñar métodos que permitan aumentar el poder de discriminación del sistema, y lograr la invariancia del proceso de reconocimiento ante distorsiones del objeto a detectar. Estos métodos, que serán introducidos en las secciones 3.3 y 3.4, fueron especialmente diseñados para ser implementados en un JTC donde la escena y la referencia son representadas en un único medio, en particular, en una pantalla de cristal líquido actuando como modulador puro de fase, y donde se emplea un cristal fotorrefractivo BSO como medio de registro holográfico dinámico del plano transformado conjunto. Así, logramos generar procesos de reconocimiento muy eficientes, en sistemas estables, compactos, y capaces de operar a velocidades muy altas.

3.2. Diseño y operación del JTC fotorrefractivo con modulación pura de fase

Los componentes optoelectrónicos permiten combinar la capacidad de procesado en paralelo inherente a los sistemas ópticos con la flexibilidad de los métodos digitales. LCTVs de alta resolución y materiales holográficos dinámicos son elementos muy atractivos para llevar a cabo el procesado de imágenes en tiempo real. En la rama del reconocimiento de formas, se han reportado diversos trabajos implementando correladores empleando LCTVs ya que estos componentes son especialmente apropiados para enviar una imagen desde una CCD a un procesador óptico coherente. Por otro lado, los materiales fotorrefractivos, como el cristal $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO), han sido empleados en correladores por transformada conjunta para llevar a cabo procesos de reconocimiento de formas vía mezcla de cuatro ondas [13]. La combinación de estos elementos da lugar a correladores compactos y de alta velocidad de procesado para tareas de reconocimiento industrial y aplicaciones en robótica [49]. Otros correladores fotorrefractivos basados en el uso de cristales $BaTiO_3$ y mezcla de dos ondas ofrecen excelentes resultados pero la velocidad de procesado es más baja.

En esta sección analizaremos los distintos componentes ópticos y optoelectrónicos que constituyen el correlador que hemos implementado, así como su operación en el proceso de reconocimiento de formas.

3.2.1. Pantallas de cristal líquido como moduladores espaciales de luz

Actualmente, el desarrollo de diversas técnicas para llevar a cabo el proceso de reconocimiento de formas en tiempo real ha hecho que las pantallas de cristal líquido sean componentes fundamentales en las arquitecturas de correladores ópticos. Paralelamente a la ventaja que estas pantallas poseen para trabajar en tiempo real, se agrega la posibilidad que las mismas presentan para modular tanto la fase como la amplitud de la luz. En general, las LCTVs proveen una modulación acoplada de fase y amplitud; sin embargo, es posible encontrar estados de polarización adecuados, tanto

para la luz de entrada como la de salida, que permiten obtener modulación sólo de fase o sólo de amplitud [9]. El dispositivo óptico que posibilita generar dichos estados, junto con la pantalla de cristal líquido, conforman el denominado modulador espacial de luz (spatial light modulator - SLM).

El cristal líquido es un estado de la materia con estructura menos ordenada que la de un sólido y más ordenada que la de un líquido, característica que permite que sus moléculas sean fácilmente orientables. Las mismas poseen una forma alargada, lo que da lugar a que el material sea birrefringente. Una LCTV es una pantalla conformada por una estructura pixelada donde cada pixel consiste en una celda de cristal líquido. En estas celdas el cristal se encuentra encerrado entre dos paredes de vidrio cuyas caras en contacto con el cristal se hallan recubiertas con una película delgada de polímero. Las largas cadenas moleculares del mismo son alineadas pasando un terciopelo sobre la superficie. Así, éstas proveen, a su vez, la orientación de las moléculas de cristal más cercanas [51]. Si entre ambas paredes, las orientaciones de las cadenas forman un ángulo α (o ángulo de twist), las moléculas de cristal rotan formando un helicoide, tal como se esquematiza en la figura 3.1. Al pasar a través de esta celda, la luz rota

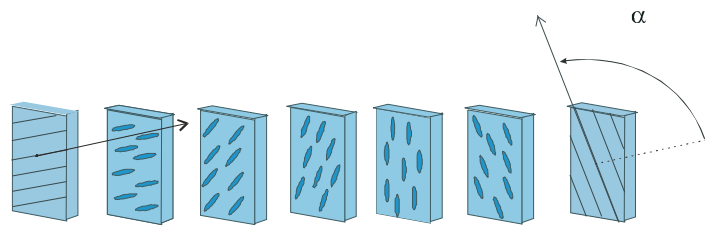


Figura 3.1: *Rotación helicoidal de las moléculas de cristal líquido encerrado entre láminas de polímero.*

su polarización en α , en el sentido del helicoide formado por las moléculas.

Además de la orientación mecánica, el momento dipolar que tienen las moléculas permite también orientarlas eléctricamente. Para ello, cada celda posee sobre ambas caras un depósito de material conductor transparente que constituye los electrodos entre los cuales es posible aplicar tensión eléctrica. Por lo tanto, si se aplica tensión sobre las celdas, se suma a la orientación helicoidal de las moléculas, la orientación

de las mismas con el campo aplicado, generando cambios en la polarización de la luz incidente. Esta característica es la que permite emplear a las celdas de cristal líquido para modular una onda luminosa. En general, las LCTVs son empleadas comercialmente en displays de calculadoras, proyectores, T.V. de bolsillo, etc. Debido a que en estas aplicaciones sólo interesa generar diferentes niveles de intensidad, el ángulo de twist suele ser del orden de los 90° y así, simplemente disponiendo a las celdas entre dos polarizadores lineales (P1 y P2), y aplicando distintos niveles de tensión, es posible lograr distintas intensidades de luz, tal como se esquematiza en la figura 3.2.

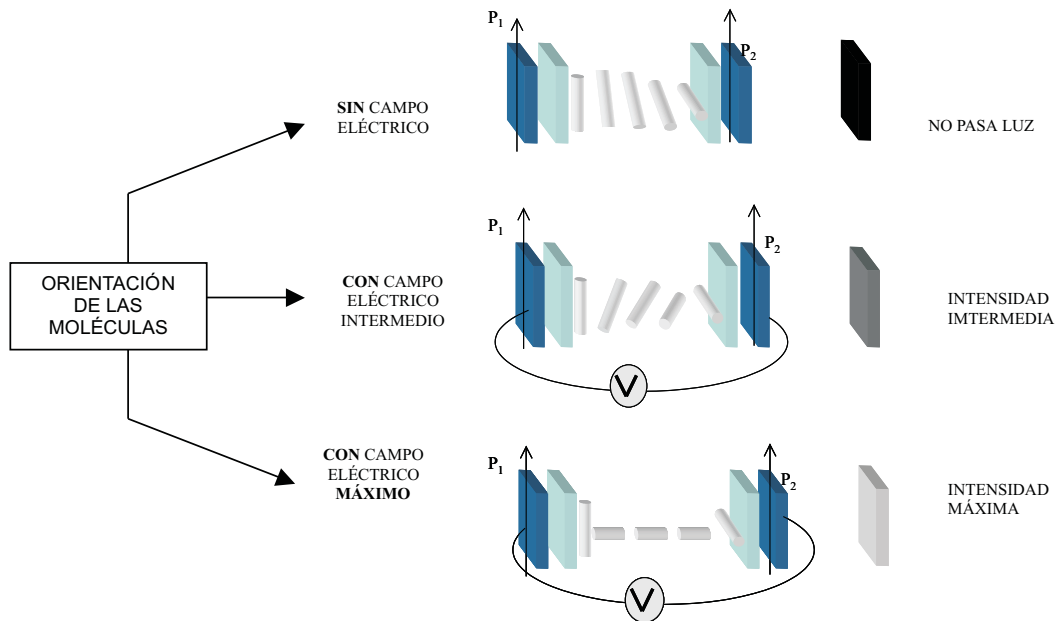


Figura 3.2: Configuración habitual empleada para modular intensidad.

En realidad, la combinación de la rotación helicoidal de las moléculas, con su orientación en la dirección del campo aplicado, genera una birrefringencia que origina en la luz incidente una modulación acoplada de fase y amplitud. Por lo tanto la disposición mostrada en la figura 3.2, si bien puede generar distintos niveles de intensidad, no permite modular separadamente la fase y la amplitud de la onda incidente.

Sin embargo, por medio de un dispositivo más complejo que incluye polarizadores y láminas desfasadoras, es posible obtener estados de polarización tanto de la luz incidente, como de la emergente, que permiten que la LCTV module sólo la fase o sólo la amplitud de la onda. Para ello, en primer lugar se deben caracterizar los distintos parámetros (estáticos y dinámicos) de la pantalla. A partir de este estudio, es posible determinar la birrefringencia de la celda en función del voltaje aplicado, que es enviado a cada celda desde una computadora personal a través de una tarjeta gráfica de video. Se utiliza entonces un programa que asocia a cada nivel de tensión, un nivel de gris determinado. De esta manera, puede programarse un nivel de gris distinto para cada una de las celdas, y esto se traducirá en distintos voltajes, y entonces, distintas birrefringencias en cada pixel. Si bien no se conoce el valor de tensión correspondiente a cada nivel de gris, lo importante es conocer la relación entre los niveles de gris aplicados y la birrefringencia que introducen. Para que el SLM module sólo la fase o sólo la amplitud de la onda incidente, es necesario buscar los estados de polarización adecuados de la luz incidente y emergente de la LCTV. Estos estados en general son elípticos y por lo tanto, suelen lograrse combinando láminas desfasadoras (WP_1, WP_2) y polarizadores (P_1, P_2) a la entrada y a la salida de la LCTV, tal como se esquematiza en la figura 3.3.

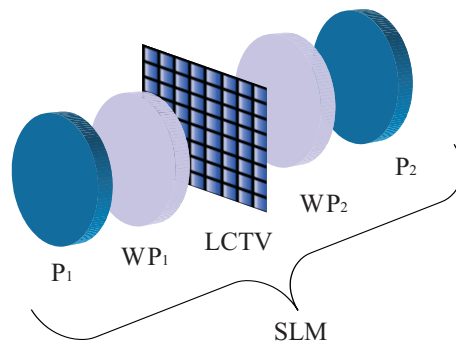


Figura 3.3: Configuración general del modulador espacial de luz que permite obtener modulaciones desacopladas de fase o amplitud.

Se realiza entonces una simulación numérica que, dados los parámetros que caracterizan al modulador, la longitud de onda a emplear y el correspondiente defasaje de

las dos láminas retardadoras, encuentra la configuración de ángulos de las láminas y de los polarizadores que generan modulación sólo de fase o sólo de amplitud.

La pantalla de cristal líquido que hemos empleado en este trabajo es una Sony LCTV modelo LCX012BL de resolución VGA (640 x 480 pixeles) cuyos pixeles cuadrados miden $34\mu m$ de lado y están separados por una distancia de $42\mu m$. En la figura 3.4 se encuentra una fotografía de la pantalla y un esquema de su estructura.

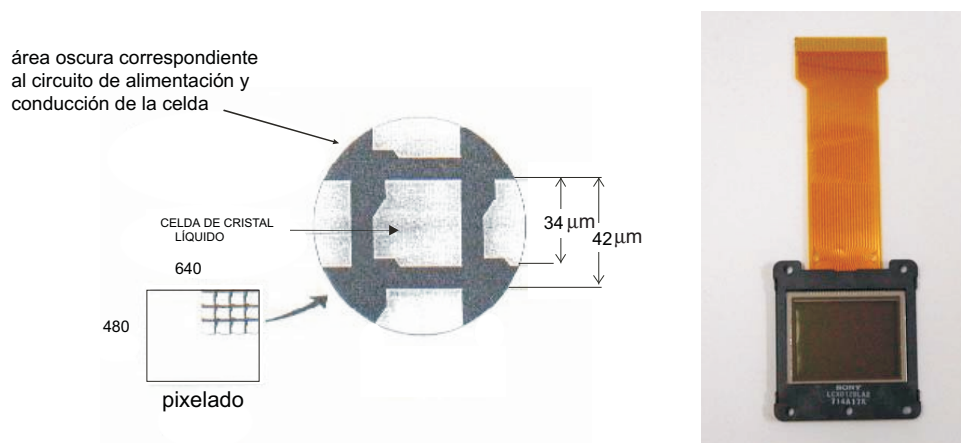


Figura 3.4: *Esquema de la estructura pixelada y fotografía de la LCTV.*

Los resultados experimentales alcanzados a partir de las configuraciones de láminas y polarizadores obtenidas en la simulación numérica, se resumen en la figura 3.5. Las modulaciones presentadas corresponden a emplear la línea $\lambda = 457nm$ de un láser de Argón. Notemos en la figura 3.5 (a) que, mientras que la amplitud se mantiene constante con un nivel de transmisión de aproximadamente el 55 %, la variación de fase va desde 0° hasta cerca de los 320° y por lo tanto esta configuración resulta apropiada para que el SLM module sólo la fase de la luz incidente. Cabe destacar que para las otras líneas del láser de Argón la modulación de fase es menor ya que las longitudes de onda son mayores. Por ejemplo para la línea $\lambda = 488nm$ empleada en las experiencias de reconocimiento, la modulación es de aproximadamente 300° . Por otro lado, en la figura 3.5(b), la transmisión de amplitud varía aproxima-

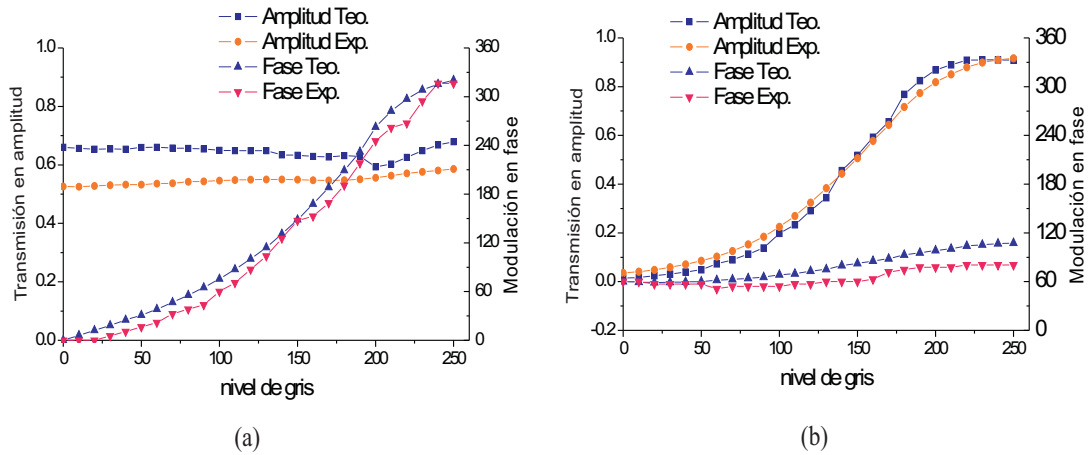


Figura 3.5: Modulación (a) pura de fase y (b) pura de amplitud de la LCTV.

damente entre 0.5 % y 90 %, mientras que la fase se mantiene constante, permitiendo entonces obtener modulación pura de amplitud. Es importante destacar que cada celda modulará la fase y amplitud, según el voltaje local aplicado, y entonces, cuando se aplique una distribución de tensión eléctrica sobre la estructura pixelada de celdas que conforman la LCTV, ésta se comportará como un modulador espacial de luz programable pixel a pixel. La curva presentada en la figura 3.5(a) muestra el defasaje que introduce el SLM sobre la luz, según el nivel de gris aplicado. Para poder representar, por ejemplo, una determinada distribución correspondiente a un objeto de fase, se necesita conocer la relación inversa. Es decir, dada la distribución espacial de fase que se desea representar en el modulador, es necesario saber qué nivel de gris enviar a cada pixel de la LCTV, de modo que introduzca el defasaje adecuado. Esta relación puede obtenerse simplemente invirtiendo la curva de defasaje de la figura 3.5 (a) y encontrando luego una forma funcional, mediante un ajuste, que la describa. Para representar objetos sólo de amplitud, debe hacerse el mismo proceso. En la figura 3.6 se encuentran las curvas que dan el nivel de gris en función del defasaje, así como el nivel de gris en función de la transmisión en amplitud, junto con un polinomio de ajuste.

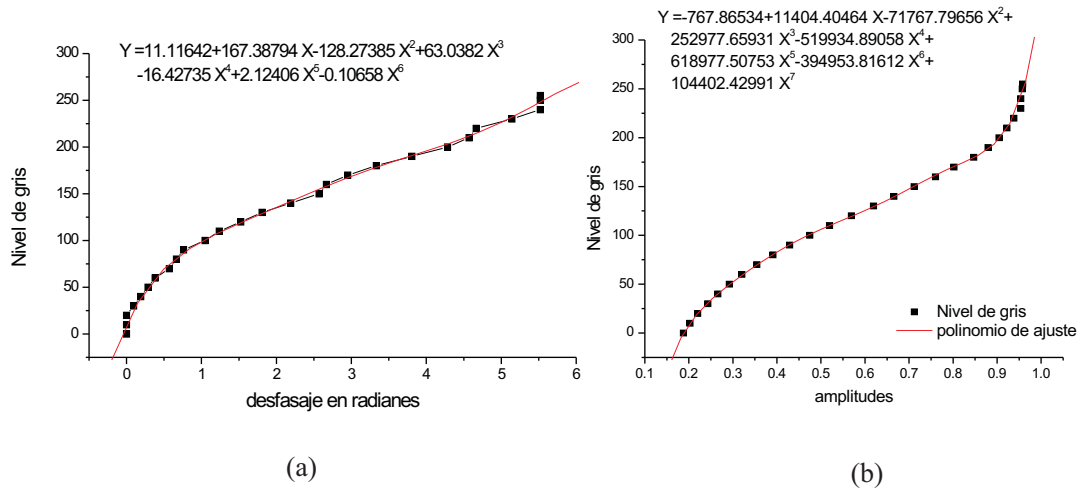


Figura 3.6: *Polinomios de ajuste.*

Con estos resultados es posible representar, sobre la pantalla de cristal líquido, las distribuciones correspondientes a los objetos que conforman el plano de entrada en cada una de las técnicas que hemos implementado en el correlador. En la siguiente sección describiremos brevemente el proceso que permite emplear el otro componente óptico del correlador, que es el cristal BSO, para llevar a cabo el registro holográfico dinámico del plano transformado conjunto.

3.2.2. Cristal fotorrefractivo BSO empleado como medio de registro en el JTC

Según hemos visto, en el proceso de correlación óptica en un JTC es necesario llevar a cabo un proceso de registro de la distribución de intensidad correspondiente a la interferencia de dos señales. Los cristales fotorrefractivos son candidatos atractivos para llevar a cabo procesos de registro en tiempo real. Empleados en un JTC, convierten la distribución de intensidad que representa al plano transformado conjunto en una red holográfica de fase, de volumen. Describiremos a continuación muy brevemente el proceso de holografía de volumen, así como las características que hacen

posible emplear para tal fin un cristal fotorrefractivo.

Holografía de volumen

El fenómeno de interferencia, en general, no ocurre sólo en un plano sino que posee una cierta extensión. Es decir, cuando se coloca una pantalla con el objeto de visualizar franjas de interferencia, si ésta es desplazada hacia delante o hacia atrás, en general las franjas no desaparecen. En realidad, lo que se obtiene es un volumen de interferencia, o dicho de otro modo, se obtienen franjas en tres dimensiones. En particular, dependerá del espesor del medio de registro, si el holograma sintetizado debe considerarse plano, o de volumen [52]. Es decir, si el espaciado promedio entre franjas es menor o del orden del espesor del medio de registro, el holograma es considerado de volumen. Si en cambio, dicho espaciado es mayor que el espesor del medio de registro, se considera que el holograma es plano. La distribución de intensidad originada por la interferencia de dos haces planos resulta tener perfil sinusoidal. Si en particular consideramos que el medio de registro responde linealmente a la distribución de intensidad incidente, podemos decir que se obtiene una red holográfica sinusoidal. En general un holograma emplea haces de registro que no son planos, dando lugar a una distribución arbitraria de franjas tridimensionales.

Cuando un haz de luz, denominado haz de reconstrucción o de lectura, incide sobre un holograma de volumen, se produce el fenómeno de difracción por una red tridimensional. Los órdenes difractados por esta red tienen una eficiencia que depende crucialmente de la orientación del haz de lectura y de la longitud de onda, a diferencia de lo que ocurre con un holograma plano. Las condiciones para las cuales se obtiene el máximo de eficiencia en el orden 1, como aquéllas para las cuales se obtiene el máximo en el orden -1, se denominan condiciones de Bragg y dependen de la orientación y longitud de onda del haz incidente. Las condiciones de Bragg para ambos órdenes son excluyentes y por lo tanto se obtendrá uno u otro orden con máxima eficiencia. Vimos en el Capítulo 2 que la señal de salida de un correlador por transformada conjunta da lugar a dos distribuciones que dan la correlación entre la escena y la referencia. Éstas corresponden a los primeros órdenes difractados por el holograma que representa a la

transformada conjunta, y por eso alcanza con pedir máxima eficiencia de difracción para uno de dichos órdenes. Se imponen por lo tanto ciertos límites en cuanto a la longitud de onda con la cual se debe iluminar el holograma, y la dirección con la cual debe incidir dicho haz, para seguir teniendo alguno de los dos órdenes difractados. Si bien no presentaremos aquí este análisis, puede verse que la tolerancia en estos parámetros disminuye a medida que aumenta el espesor del medio de registro de la red de difracción.

Registro holográfico en un cristal fotorrefractivo BSO

Entre las distintas opciones para registrar la distribución de intensidad del plano transformado conjunto en un JTC, podemos mencionar las placas fotográficas, cámaras de video, o materiales fotorrefractivos. En el primer caso, para obtener el holograma, es necesario un proceso de revelado. Si en cambio el registro se hace con una cámara, para que luego la transformada conjunta pueda ser iluminada por el haz de lectura, la señal deberá ser digitalizada y enviada a una pantalla de cristal líquido. Si, por el contrario, se emplea un material fotorrefractivo, el registro y la lectura del holograma pueden realizarse simultáneamente. Este tipo de materiales permite efectuar una conjugación de fase en forma dinámica y el proceso óptico no lineal involucrado se denomina mezcla de cuatro ondas [12],[53]. En este fenómeno se hallan presentes, en forma simultánea, cuatro haces luminosos. Tres son incidentes; dos de ellos de escritura y un tercero, de lectura. El proceso y balance energético entre ellos es muy complejo, pero puede pensarse que el haz de lectura genera un cuarto haz al difractarse en el holograma generado por los dos haces de escritura. Si todos los haces incidentes tienen la misma longitud de onda, el proceso se denomina mezcla de cuatro ondas degenerado (Degenerate four wave mixing-DFWM), mientras que en otro caso, el proceso se denomina no-degenerado (non-DFWM). Una de las diferencias entre DFWM y non-DFWM en cristales fotorrefractivos es la eficiencia de difracción. En el caso DFWM, debido a que el haz de lectura tiene la misma longitud de onda que los de escritura, el holograma es parcialmente borrado, provocando una reducción en la eficiencia de difracción. Por el contrario, en el caso de non-DFWM, el haz de

lectura puede ser elegido de modo que el cristal no sea sensible a esa longitud de onda. Así, en general, la eficiencia de difracción en non-DFWM es más alta que en DFWM [54].

Los cristales fotorrefractivos se caracterizan por sufrir una variación local en el índice de refracción ante la iluminación con una longitud de onda adecuada. Dependiendo de las condiciones experimentales (potencia y longitud de onda de los haces de registro y del haz de lectura), y características del correlador a implementar, se deberá elegir convenientemente el cristal fotorrefractivo a utilizar. El efecto fotorrefractivo ha sido observado en una variedad de materiales electro-ópticos ($BaTiO_3$, $KNbO_3$, $LiNbO_3$, $GaAs$, $Bi_{12}SiO_{20}$, $Bi_{12}GeO_{20}$, etc.). Dado que el cristal se empleará para procesado óptico de imágenes, y en particular, para llevar a cabo el proceso de registro y lectura de una red holográfica, hay ciertos aspectos que deben considerarse. En el proceso de registro, la fotosensibilidad para las longitudes de onda de los haces de escritura a utilizar es una característica fundamental que debe pedirse al cristal a emplear. En particular, suelen elegirse los cristales electro-ópticos debido su sensibilidad en el rango visible. Sin embargo es importante destacar que en algunos materiales, la variación del índice de refracción que da lugar a la formación de la red es demasiado débil y entonces es necesario incrementarla con la aplicación de un campo eléctrico externo. En el proceso de lectura, es sumamente importante que el haz difractado por la red tenga la mayor eficiencia posible. Este parámetro depende tanto del cristal, como de las condiciones de escritura y lectura del holograma, y por lo tanto es necesario evaluar el nivel de eficiencia que puede alcanzarse dadas las condiciones experimentales. Mencionemos por último que, si el cristal va a ser empleado en holografía dinámica, es preciso que tanto el registro como el borrado de información se realicen en tiempos cortos, de manera de no aumentar el tiempo de procesado de las señales.

Características y propiedades del cristal BSO. Entre los cristales fotorrefractivos electro-ópticos disponibles, se ha elegido el $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO). Veamos a continuación algunas de sus características y propiedades más relevantes [55],[56]. Estos cristales son altamente sensibles en el rango verde-azul del espectro (rango en el cual

suelen usarse los haces de escritura), y poco sensibles en el rango del rojo (color que se emplea entonces para la lectura, evitando el borrado de la información registrada). Con respecto a la eficiencia de difracción, si el registro se lleva a cabo con haces de escritura de intensidades del orden de los $10mW/cm^2$ en el rango verde-azul, formando entre sí un ángulo de 5° , se obtiene una eficiencia de 0.1% - 1%. Sin embargo, para lograr estas especificaciones, es necesario aplicar un campo eléctrico externo del orden de los 3-5kV/cm. Entre las propiedades físicas más relevantes del BSO, se puede destacar que es un material que cristaliza en el sistema cúbico (con simetría 23 y doble estructura de $Bi_{12}SiO_{20}$ por celda unidad); posee además un color amarillo ámbar, que corresponde a una absorción fuerte para radiaciones verde y azul y baja para el rojo. En cuanto a sus propiedades ópticas, podemos mencionar que el BSO, debido a la alta simetría de su red cristalina, es isótropo, con índice de refracción que varía desde $n = 2,86$ para el violeta ($\lambda = 400nm$) a $n = 2,51$ para el rojo ($\lambda = 700nm$). Sin embargo, la presencia de un campo eléctrico provoca una anisotropía que induce en el material, por *EfectoPockels*, una birrefringencia lineal proporcional a la intensidad de campo. Como ya mencionamos, el efecto fotorrefractivo presente en cristales como el BSO, es el que permite emplear estos materiales para registrar una distribución de luz.

Efecto fotorrefractivo. Se denomina de esta manera a la variación que sufren algunos materiales en el índice de refracción, cuando se los ilumina con una distribución de luz no uniforme [55]-[57]. Estos materiales deben presentar las siguientes características: ser *electro-ópticos*, es decir, debe modificarse su índice de refracción ante la presencia de un campo eléctrico; ser *fotoconductores*, esto es, ser aislantes o semiaislantes en la oscuridad, y conductores bajo la acción de una energía luminosa que permita generar portadores libres; por último, poseer *trampas de cargas*, esto es, centros parcialmente ocupados con cargas eléctricas que pueden fotoexcitarse. Esto permite disponer de niveles donores y aceptores de electrones y huecos dando lugar a la migración de cargas cuando éstas son fotoexcitadas.

Dijimos anteriormente que este tipo de cristal será empleado para registrar la señal que llega al plano transformado conjunto del JTC. Así, sobre el cristal se re-

gistrará la intensidad resultante de la interferencia entre dos haces luminosos, esto es, una distribución de franjas brillantes y oscuras, lo que provocará una migración de las cargas fotoexcitadas y, por lo tanto, una redistribución de cargas libres. Por efecto electro-óptico, esta distribución dará lugar a una modificación local del índice de refracción del material, generando entonces una red de fase en el cristal.

Generación de la distribución de campo. Si el cristal presenta adecuados donores de cargas, al excitarlo con un haz luminoso con adecuada intensidad y longitud de onda, se generan fotocorrientes. Las cargas pueden provenir de impurezas o defectos en la red cristalina. Como en la oscuridad el material es poco conductor, las cargas se encuentran quietas. Pero al iluminar el cristal, las regiones fotoexcitadas liberan electrones que se difunden o se desplazan bajo la acción del campo eléctrico local y que luego son atrapados por centros aceptores presentes en las regiones oscuras. La migración de cargas fotoexcitadas puede deberse, en un material como el BSO, a dos mecanismos: difusión o arrastre. En el mecanismo de difusión, como la distribución luminosa excita a los centros donores, se crea una densidad de fotoelectrones no uniforme, y entonces los electrones difunden para intentar equiparar la densidad espacial de electrones con la de los sitios donores ionizados. De esta manera, se crea una distribución de cargas modulada por la distribución de luz, generando entonces un campo eléctrico que modifica localmente el índice de refracción. En el mecanismo de arrastre, los electrones fotoexcitados son arrastrados por un campo eléctrico externo, hasta ser atrapados por los sitios oscuros. Es importante destacar que, en cristales como el BSO, el mecanismo de difusión es suficiente para generar la distribución de carga si la frecuencia espacial de franjas luminosas es muy alta, situación en la cual se presenta el inconveniente de que la eficiencia de difracción disminuye notablemente. Por el contrario, con una frecuencia espacial baja, la eficiencia aumenta, pero ya no es suficiente el mecanismo de difusión para que se produzca la migración de cargas, siendo necesario entonces inducir este proceso mediante la aplicación de un campo eléctrico externo. Es por esta razón que se aplicará un campo externo al cristal BSO utilizado en este trabajo.

Efecto electro-óptico. En ciertos materiales, la permitividad, y entonces el índice de refracción, pueden modificarse ante la presencia de un campo eléctrico. Este efecto, presente en materiales fotorrefractivos, se denomina electro-óptico y es el que permite emplear el cristal BSO para registrar una distribución de intensidad. En cristales como éste, isótropos, la presencia de un campo eléctrico provoca anisotropías e induce, por efecto Pockels, una birrefringencia que es proporcional a la intensidad del campo incidente. Si bien la descripción del efecto electro-óptico es bastante compleja, una posibilidad consiste en considerar las correcciones inducidas en el tensor de índices del material ante la presencia de un campo eléctrico.

Cuando el cristal es utilizado en el correlador, es iluminado por una distribución de luz no uniforme. Se genera entonces, según hemos mencionado, una distribución de campo interno cuya acción, combinada con la del campo externo aplicado, da lugar, por efecto electro-óptico, a una birrefringencia inducida distinta en cada sector del cristal. Por lo tanto, la distribución de luz incidente se traduce en variaciones de índice de refracción originando una red de fase. En la aplicación de este trabajo, es el haz de lectura difractado por el holograma registrado en el cristal, el que contiene la señal de correlación. Por lo tanto, es sumamente importante que esta señal sea lo más eficiente posible, es decir, que el haz de lectura pierda la menor cantidad de energía posible al leer el holograma. En el apéndice A mostramos el estudio experimental que realizamos para analizar la eficiencia de difracción en cada configuración posible de campo externo aplicado.

El plano transformado conjunto está formado a partir de la superposición de los espectros de Fourier de la escena y la referencia. Lo que se obtiene entonces en una distribución de franjas de interferencia en los sectores de superposición de dichos espectros, es decir, una red. En el Capítulo 2 hemos mostrado cómo es posible obtener, a partir de la luz difractada por la transformada conjunta, una señal proporcional a la correlación entre la escena y la referencia. Dicho análisis lo realizamos considerando que el plano transformado conjunto (JTP) se registra en un medio lineal y se representa en amplitud. En el caso de emplear el BSO como medio de registro, la distribución del JTP pasa a ser una distribución de fase y entonces lo que se obtiene es una red de fase. El haz difractado por esta red contiene, en el primer orden, la misma

información que en la situación analizada anteriormente, es decir, es proporcional a la señal de correlación buscada.

Veamos a continuación cómo operan los componentes optoelectrónicos que hemos descrito, en la arquitectura de un correlador por transformada conjunta.

3.2.3. Arquitectura y operación del JTC fotorrefractivo

La arquitectura del correlador fotorrefractivo empleado en nuestras experiencias se esquematiza en la figura 3.7. Como ya hemos mencionado, para representar el plano de entrada del correlador utilizamos una pantalla de cristal líquido cuyas características fueron descritas en la sección 3.2.1.

El plano de entrada es representado en la LCTV, ubicada entre láminas desfasadoras (WP1, WP2) y polarizadores (P1, P2), configurados convenientemente en modo sólo de fase o sólo de amplitud. Para obtener la señal de entrada, se ilumina este dispositivo empleando la línea azul ($\lambda = 488nm$, $\sim 45mW$) de un láser de Argón sintonizable. De la potencia del haz emergente del láser, sólo un 10 % llega al cristal luego de atravesar la LCTV y la configuración de láminas desfasadoras y polarizadores que representan al SLM. Dados los requerimientos de intensidad de escritura del cristal BSO, resulta necesario buscar un compromiso entre la modulación de fase que provee la línea del láser empleada, y su intensidad. Es por esta razón que para los procesos implementados en el JTC fotorrefractivo no hemos empleado la línea $457nm$, sino la $488nm$. La lente L_1 ($300mm$ de distancia focal) provee la transformada de Fourier de los campos provenientes de la escena y de la referencia, sobre el plano donde se ubica el cristal fotorrefractivo BSO ($10mm \times 10mm \times 3mm$) que, como ya mencionamos, fue empleado como medio de registro holográfico dinámico. Para tal fin, pintamos sobre las caras laterales del cristal dos electrodos de plata, entre los cuales aplicamos un campo eléctrico externo de $5kV/cm$. Para montar el cristal se diseñó un soporte de acrílico poniendo especial cuidado en el aislamiento eléctrico que debía poseer para evitar descargas producidas por el alto voltaje aplicado. El soporte fue colocado luego sobre un posicionador de giro que permitió encontrar el ángulo de Bragg apropiado

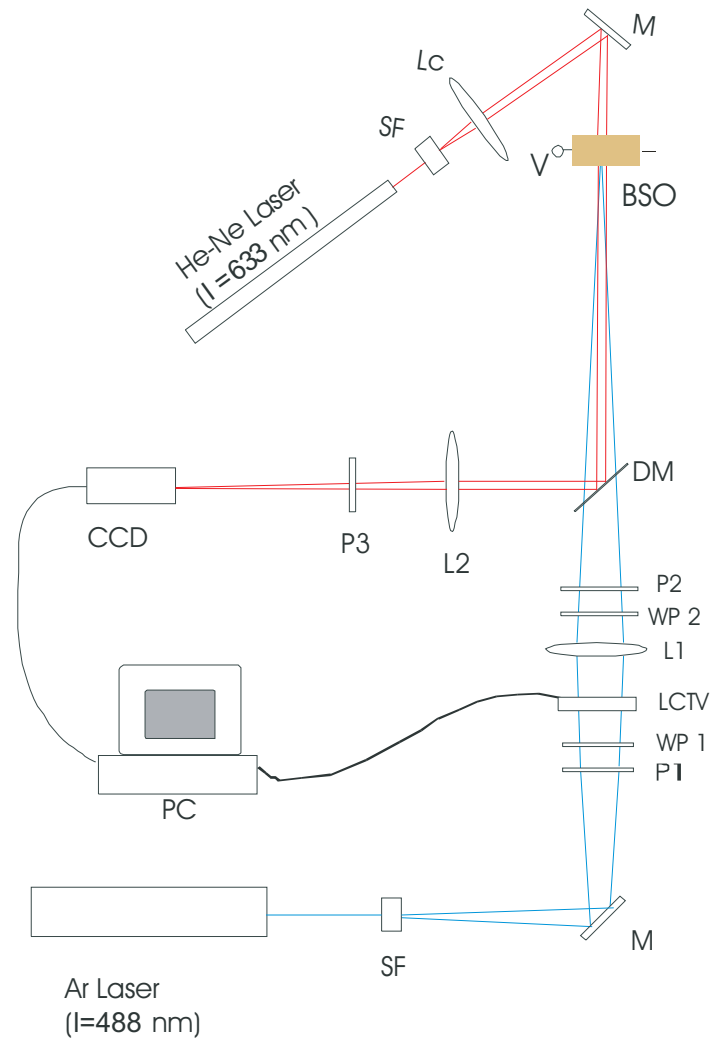


Figura 3.7: Esquema del dispositivo experimental del correlador por transformada conjunta fotorrefractivo.

para el haz de lectura. En la figura 3.8 se puede observar una fotografía dicho montaje. A partir de la interferencia de los haces provenientes de la escena y la referencia que constituyen el plano de entrada del correlador, sobre el BSO se obtiene un holograma de fase que constituye el plano transformado conjunto. Es importante destacar que los haces de escritura fueron orientados de manera que la frecuencia espacial de

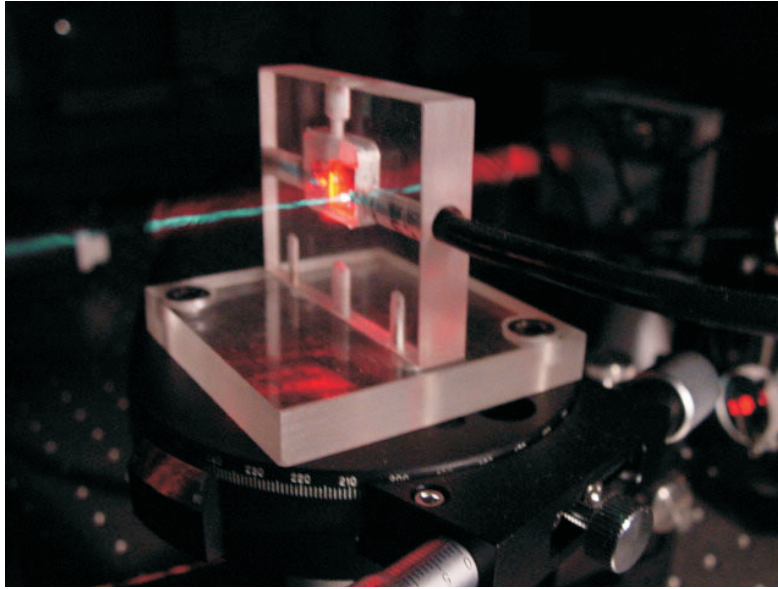


Figura 3.8: *Dispositivo empleado para montar el cristal fotorrefractivo.*

la red promedio generada brindara la mayor eficiencia posible (del orden de las 60 franjas por milímetro). El holograma es iluminado, bajo las condiciones de Bragg, por el haz proveniente de un láser de He-Ne ($\lambda = 633nm, \sim 30mW$). El haz difractado es desviado por un espejo dichroico DM con alta reflexión en el rojo. Una segunda lente L_2 (300mm de distancia focal) es empleada para antitransformar dicha señal, y el haz resultante es captado por una CCD. Vimos en el Capítulo 2 que la señal de salida de un JTC en general está compuesta por cuatro distribuciones de luz, dos de ellas, que no son de interés, corresponden al orden cero que se ubica en el eje óptico del sistema; las otras dos, desplazadas en direcciones opuestas, son los primeros órdenes difractados y corresponden a la correlación de la escena con la referencia. En realidad, al imponer las condiciones de Bragg para lograr máxima eficiencia, en la señal de salida se obtiene el orden cero y sólo uno de los primeros órdenes. La cámara es ubicada entonces de modo de abarcar sólo el primer orden presente. Es importante además comentar que, cuando el haz de lectura incide sobre el BSO, si bien parte de la luz es difractada, originando la señal de correlación, la luz directamente transmitida (orden

cero) genera el mayor aporte de ruido que suele presentarse en la señal de salida. Puede mostrarse que, si el haz de lectura incidente sobre el cristal está polarizado linealmente, el haz directamente transmitido está polarizado quasi-linealmente en la misma dirección, mientras que el haz difractado tiene una polarización elíptica tal que el eje mayor es normal a la dirección en que está polarizado el ruido [58]. Por lo tanto, si se coloca el polarizador P3 con su eje de transmisión perpendicular a la dirección de polarización del haz de lectura, es posible mejorar la relación señal-ruido.

El dispositivo descrito ha sido empleado para implementar las técnicas de reconocimiento de imágenes que describiremos en las próximas secciones.

3.3. Técnica de filtrado puro de fase en un correlador por transformada conjunta fotorrefractivo

Es conocido que el correlador por transformada conjunta donde la distribución de intensidad del plano transformado conjunto es registrada linealmente, no ofrece un alto poder de discriminación [50]. Para superar tal inconveniente, se han desarrollado diversos trabajos donde se muestra que la introducción de no linealidades resulta ser una solución bastante efectiva cuando se trata de aumentar el poder de discriminación del correlador. Por ejemplo, Javidi [50],[59] ha investigado los efectos de la introducción de distintas funciones umbral en el plano transformado conjunto. Inbar et al [15] propusieron maneras de emular el filtro sólo de fase o el filtro inverso en correladores por transformada conjunta. Ledesma et al [45] propusieron una arquitectura de JTC con una sola pantalla de TV de cristal líquido operando en modo de fase y, empleando diferentes métodos como binarización de fase y correlación pura de fase, lograron mejorar sustancialmente el poder de discriminación del sistema. Sin embargo, muchos de los trabajos presentados desarrollan métodos donde es necesario

llevar a cabo ciertas operaciones digitales que lamentablemente aumentan el tiempo de procesado. Además, es importante destacar que las técnicas propuestas generalmente requieren la introducción de no linealidades en el plano transformado conjunto y por lo tanto no son aptas para ser aplicadas en un correlador fotorrefractivo como el que hemos implementado en este trabajo, ya que no es posible realizar operaciones digitales sobre el cristal en el cual se registra el plano transformado conjunto. A continuación describimos la técnica que hemos propuesto [24] para aumentar el poder de discriminación, que permite sortear esta limitación introduciendo no linealidades en el plano de entrada del JTC fotorrefractivo. El método consiste en representar, en una pantalla de cristal líquido trabajando en modo de fase, tanto la escena codificada en fase, como la referencia adecuadamente preprocesada. Cabe destacar que si bien esta técnica fue desarrollada para ser aplicada en nuestro correlador fotorrefractivo, la misma puede ser utilizada en JTCs que empleen un registro lineal del plano transformado conjunto; el único requerimiento es poseer una pantalla de cristal líquido operando en modo de fase a la entrada del sistema.

3.3.1. Descripción del método

La técnica propuesta, como hemos anticipado, está basada en la introducción de no linealidades en el plano de entrada del correlador. En el momento de idear las operaciones a realizar sobre dicho plano, es importante tener en cuenta que, en la mayor parte de las aplicaciones que requieren tiempo real de procesado, un correlador debe estar preparado para reconocer una señal predeterminada, a medida que se presentan dinámicamente distintas escenas. Por ejemplo, en sistemas de seguridad se prepara al correlador para detectar una huella digital predeterminada; entonces, cuando una cámara registra una escena arbitraria, el sistema debe detectar instantáneamente si la huella presentada coincide o no con aquélla a reconocer, y así con distintas escenas. Por lo tanto, si bien no hay limitaciones en el tiempo empleado para efectuar las operaciones sobre la referencia, ya que se llevan a cabo una única vez, aquéllas realizadas sobre cada escena deben poder realizarse en tiempo real. Contemplando esta condición, el método ideado propone, por un lado, codificar en fase la escena, y

por otro, preprocesar la referencia de manera de obtener sólo la información de fase de su espectro de frecuencias, tal como se describe a continuación.

Codificación en fase de la escena. Se ha demostrado en diversos trabajos que codificar en fase imágenes originariamente representadas en niveles de gris, mejora el rendimiento de los correladores ópticos. Esta técnica ha sido implementada en correladores de Vander Lugt [60],[61] y en correladores por transformada conjunta [48],[62]. Si la escena está representada por una distribución de amplitud dada por $e(x, y)$, entonces la codificación en fase que realizamos puede expresarse como

$$pe(x, y) = \exp\{iT\{e(x, y)\}\} \quad (3.1)$$

donde

$$T\{e(x, y)\} = 2k\pi \frac{e(x, y) - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (3.2)$$

siendo e_{\max} y e_{\min} los valores máximo y mínimo que toma $e(x, y)$ respectivamente, y k , una constante. Por lo tanto, ahora la escena pasa a estar representada por la distribución $pe(x, y)$. Para introducir la escena en el correlador, ésta suele captarse con una CCD conectada a una computadora personal. El programa empleado para captar la imagen puede prepararse para realizar la normalización $T\{e(x, y)\}$ a medida que la escena es filmada. Así, con una Look-up table (LUT), se va representando la distribución $pe(x, y)$ a velocidad de video sobre una pantalla de cristal líquido operando en modo de fase.

Preprocesado de la referencia. Las operaciones que describiremos a continuación se basan en el conocido hecho de que la información de fase de una señal es mucho más relevante que su información de amplitud [33], tal como hemos comentado en la sección 2.3.2. En particular, esta característica ha sido ampliamente explotada en el desarrollo de técnicas que aumenten el poder de discriminación de un correlador.

Los primeros métodos fueron originalmente ideados en base al empleo de filtros en un correlador de Vander Lugt. En particular, uno de los más relevantes para aumentar el poder de discriminación del proceso ha sido el *POF*. Dado que en un JTC no es posible utilizar filtros en el plano de Fourier, queremos encontrar alguna operación cuyos efectos sean similares a los producidos al emplear un *POF*, pero que pueda implementarse sobre el plano de entrada.

Supongamos que el objeto a detectar está representado por una distribución de amplitud dada por $r(x, y)$. En primera instancia, esta función es codificada en fase según 3.1, y entonces la referencia queda ahora representada por la distribución de fase $pr(x, y)$. El paso siguiente consiste en retener sólo la información de fase del espectro de Fourier de la referencia, es decir, se debe normalizar su distribución de frecuencias. Se realiza entonces la operación *POF*, definida por 2.43, sobre $pr(x, y)$

$$POF\{pr\} = \frac{TF\{pr\}}{|TF\{pr\}|} = \frac{Pr(f_x, f_y)}{|Pr(f_x, f_y)|} \quad (3.3)$$

donde Pr representa la transformada de Fourier de pr . Esta operación, originalmente desarrollada para actuar como filtro en el plano de Fourier, debe representarse adecuadamente en el plano de entrada de un JTC, es decir, debe buscarse una operación sobre el plano de entrada, cuyo efecto sea el de proveer, en el plano transformado, la distribución de frecuencias de $pr(x, y)$ normalizada. Por lo tanto, debe calcularse la transformada inversa de 3.3, esto es

$$pr'(x, y) = TF^{-1}\{POF\{pr(x, y)\}\} = TF^{-1}\left\{\frac{Pr(x, y)}{|Pr(x, y)|}\right\} \quad (3.4)$$

Sin embargo, esta función, que es la que se desearía representar en el plano de entrada, ya no es más una distribución sólo de fase, con módulo unitario, y para representarla en un medio como una pantalla de cristal líquido, se necesitaría efectuar algún tipo de codificación. En general, esta codificación requiere de la utilización de más de un pixel para cada valor mostrado, incrementando los requerimientos de resolución para su representación. En este punto, nosotros proponemos una solución alternativa. Como

hemos mencionado anteriormente, ha sido documentada en distintas oportunidades la preponderancia de la información de la fase de una señal, sobre la de su amplitud; por lo tanto, elegimos quedarnos sólo con la información de fase de $pr'(x, y)$. El siguiente paso consiste entonces en quedarnos con la fase de la expresión 3.4, normalizándola, para obtener finalmente la función que representará a la referencia. Esto es,

$$pr'_N = \frac{pr'(x, y)}{|pr'(x, y)|} = \frac{TF^{-1}\{POF\{pr(x, y)\}\}}{|TF^{-1}\{POF\{pr(x, y)\}\}|} \quad (3.5)$$

Una vez preprocesada la referencia, que ahora es un objeto sólo de fase, estamos en condiciones de representar la función que la caracteriza sobre la LCTV operando en modo sólo de fase.

Para demostrar las ventajas del método, a continuación compararemos, mediante simulación numérica, los resultados obtenidos con un correlador por transformada conjunta convencional (esto es, donde no se realiza ningún preprocesado sobre el plano de entrada), con aquéllos obtenidos empleando nuestro método.

3.3.2. Simulaciones numéricas

Si bien hemos desarrollado e implementado la técnica presentada anteriormente en un correlador por transformada conjunta fotorrefractiva, la misma, como hemos dicho, puede ser aplicada a JTC's que empleen cualquier medio de registro, siempre que en el plano de entrada se opere con una pantalla de cristal líquido en modo sólo de fase. Para realizar las simulaciones, es necesario proponer un modelo para el registro del plano transformado conjunto; hemos considerado entonces un medio que provee un registro lineal de dicho plano, tal como el JTC descrito en el Capítulo 2. Para mostrar las mejoras que pueden lograrse en el poder de discriminación empleando la técnica que hemos presentado, compararemos las señales de correlación obtenidas al simular un JTC en el cual el plano de entrada contiene las no linealidades propuestas por nuestro método, con las señales de correlación obtenidas al simular un JTC convencional (esto es, donde la escena y la referencia están representados directamente por las distribuciones de amplitud que las caracterizan, sin realizar ninguna operación sobre

ellas). Las escenas utilizadas en esta simulación se muestran en la figura 3.9. La diferencia entre ambas es que el objeto a reconocer, mostrado en la figura 3.10, ha sufrido una disminución de un 50% en su brillo en la escena 3.9(b), con respecto a la escena 3.9(a).

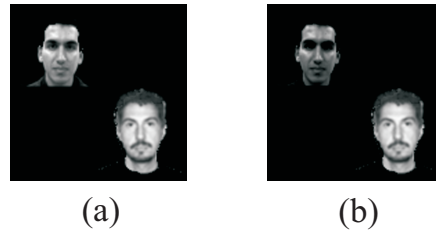


Figura 3.9: Escenas empleadas. En la escena (b) el objeto a reconocer ha sufrido una disminución de un 50% en su brillo con respecto a la escena (a).



Figura 3.10: Objeto que se desea reconocer.

Las figuras 3.11 (a) y (b) presentadas a continuación muestran las señales de correlación obtenidas en el caso del JTC convencional, empleando las escenas 3.9 (a) y (b) respectivamente, junto con los correspondientes gráficos tridimensionales. Como puede observarse, la referencia no ha sido reconocida correctamente en ningún caso. Un parámetro de rendimiento que permite cuantificar estos resultados es el poder de discriminación (DC), definido como

$$DC = \frac{I_{AC} - I_{CC}}{I_{AC}} \quad (3.6)$$

donde I_{AC} e I_{CC} representan la intensidad de la señal de autocorrelación y de co-

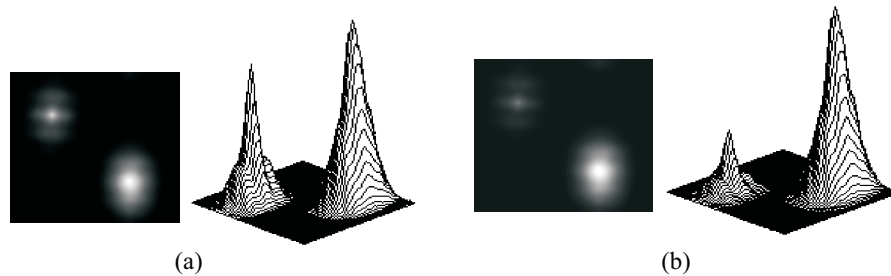


Figura 3.11: Resultados obtenidos al simular numéricamente el proceso en un JTC convencional (a) empleando la escena 3.9(a), (b) empleando la escena 3.9(b).

relación cruzada respectivamente, correspondientes a las señales obtenidas con cada uno de los objetos presentes en la escena. Los valores que se obtienen son -0.32 y -2.07 empleando las escenas 3.9 (a) y (b) respectivamente. Los valores negativos indican que la señal de correlación cruzada es más alta que la de autocorrelación, y entonces causa falsa alarma. Lo que está ocurriendo en este caso es que el objeto que difiere de la referencia es más energético que el otro, y por lo tanto, genera una señal luminosa más intensa. Veamos ahora los resultados obtenidos aplicando nuestro método, presentados en las figuras 3.12(a) y (b), correspondientes a emplear las escenas 3.9 (a) y (b) respectivamente. Es notable que en este caso, donde se introducen las no linealidades propuestas, el reconocimiento se lleva a cabo con éxito empleando tanto la escena 3.9(a) como la (b). Si calculamos ahora el poder de discriminación, se obtienen valores de 0.79 y 0.67 respectivamente. Estos resultados muestran que la técnica propuesta, además de incrementar el poder de discriminación, es relativamente invariante a la intensidad del objeto a reconocer. Es interesante también destacar que en este último caso los picos obtenidos son mucho más angostos que los correspondientes a un JTC convencional. Esta característica, típica de procesos de correlación donde se usa sólo la información de fase, permite distinguir mejor la señal de detección entre las demás señales que componen el plano de salida en situaciones donde los objetos que componen la escena se encuentran bastante próximos.

Además de la posibilidad de aumentar el poder de discriminación, vemos que este

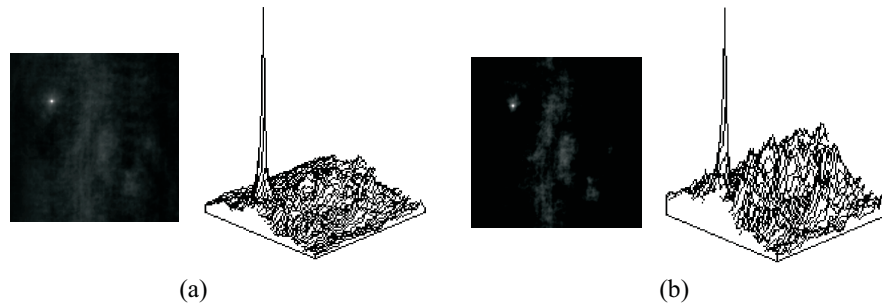


Figura 3.12: Resultados obtenidos al simular numéricamente el proceso en un JTC en el que se utiliza la técnica propuesta (a) empleando la escena 3.9(a), (b) empleando la escena 3.9(b).

método tiene la ventaja de ser invariante a intensidad. En la figura 3.13 mostramos los valores del poder de discriminación en función de la variación de brillo que presenta el objeto a reconocer, respecto del nivel de brillo original.

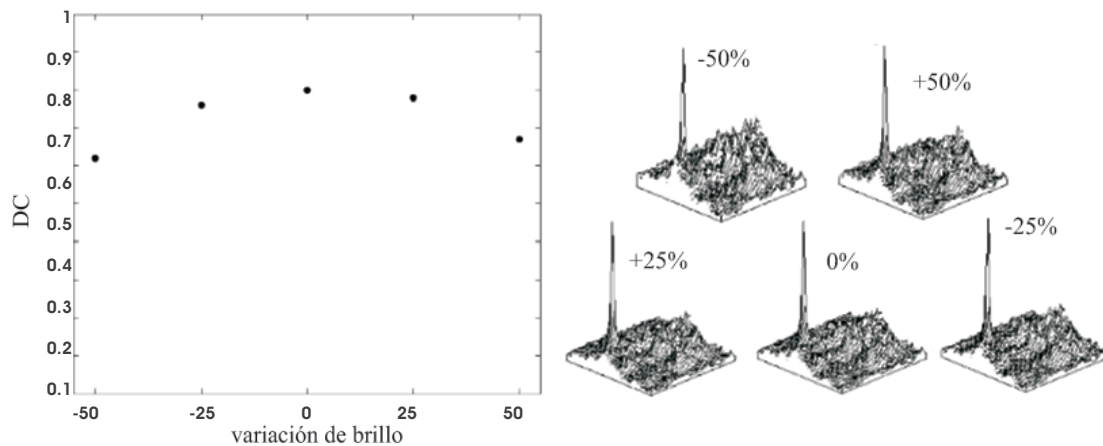


Figura 3.13: Valores del poder de dicriminación obtenidos al simular numéricamente el proceso en un JTC aplicando la técnica propuesta, en función de las variaciones de brillo que presenta el objeto a reconocer, respecto del nivel de brillo original. Se muestran las correspondientes señales de correlación obtenidas.

Se presentan además las señales de correlación correspondientes. Puede verse que para variaciones de hasta el 50 % el poder de discriminación permanece prácticamente invariante.

Si bien en la simulación hemos propuesto un medio de registro lineal, el cristal BSO que hemos utilizado en nuestras experiencias presenta no linealidades que, en principio, podrían originar resultados que difieran con los simulados. Sin embargo, veremos en la siguiente sección que esta diferencia da lugar a resultados aún mejores que los obtenidos en las simulaciones.

3.3.3. Resultados experimentales

Hemos empleado aquí, como escena y como referencia, los mismos objetos utilizados para llevar a cabo las simulaciones numéricas, representados en las figuras 3.9 y 3.10 respectivamente. En esta sección presentaremos y compararemos los resultados experimentales resultantes de implementar el JTC fotorrefractivo operando de manera convencional, con los obtenidos cuando se emplea la técnica de *filtrado puro de fase* propuesta. En el primer caso, se configuró la LCTV operando como modulador sólo de amplitud, y las distribuciones de la escena y la referencia fueron directamente representadas en la LCTV como distribuciones de transmisión de amplitud. En el segundo caso, la distribución de la escena fue codificada en fase, y la de la referencia fue procesada según la técnica propuesta; los objetos resultantes, ambos representados por distribuciones de fase, fueron mostrados en la LCTV operando como modulador sólo de fase.

Las señales de correlación obtenidas con el JTC fotorrefractivo convencional se muestran en las figuras 3.14(a) y (b), para las escenas 3.9(a) y (b) respectivamente. Estos resultados indican que, cuando el correlador opera como un JTC fotorrefractivo convencional, la referencia es reconocida sólo al emplear la escena 3.9(a). Si comparamos estos resultados con los correspondientes a las simulaciones del JTC convencional, podemos ver que la utilización de un medio de registro no lineal, como lo es un cristal fotorrefractivo como el BSO, mejora el rendimiento del correlador, con respecto a otro donde se emplean medios de registro lineales. Sin embargo, esta

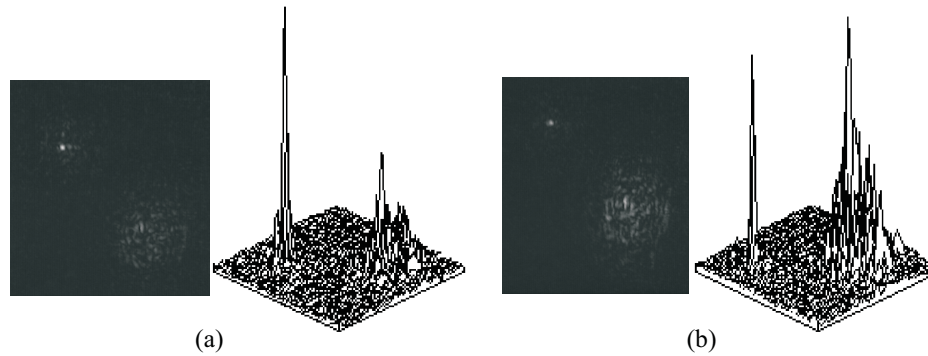


Figura 3.14: Resultados obtenidos al implementar experimentalmente el JTC convencional (a) empleando la escena 3.9(a), (b) empleando la escena 3.9(b).

ventaja que presenta el cristal no es suficiente para lograr resultados exitosos en el caso donde se emplea la escena 3.9(b), donde la energía de los objetos es tan distinta que sigue causando falsa alarma. Veamos ahora los resultados obtenidos aplicando nuestro método en el JTC fotorrefractivo. Las señales de correlación, y el correspondiente gráfico tridimensional, se muestran en las figuras 3.15(a) y (b), empleando las escenas 3.9(a) y (b) respectivamente.

A diferencia del caso anterior, aquí puede verse que la referencia es reconocida en las dos escenas presentadas. Es importante destacar entonces que el JTC con información sólo de fase es capaz de reconocer un objeto dentro de la escena, aún cuando la distribución energética no es favorable. Esta propiedad es muy valiosa cuando se desea implementar el reconocimiento de formas fuera del ámbito de un laboratorio, donde no siempre es posible controlar el nivel de brillo con el cual se presenta la escena. Otro inconveniente que suele presentarse en ciertas aplicaciones del proceso de reconocimiento de formas consiste en distorsiones que puede presentar, en la escena, el objeto que se desea reconocer. A continuación presentaremos una técnica que hemos diseñado para ser implementada en un JTC fotorrefractivo, que permite superar esta clase de inconvenientes.

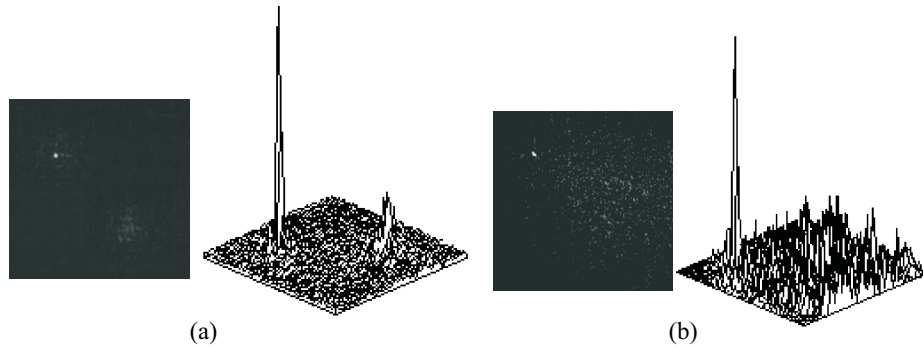


Figura 3.15: Resultados obtenidos al implementar experimentalmente la técnica propuesta (a) empleando la escena 3.9(a), (b) empleando la escena 3.9(b).

3.4. Técnica de tolerancia ante distorsiones en un correlador por transformada conjunta fotorrefractivo

En la mayoría de los procesos de reconocimiento de formas, un problema usual que se debe resolver consiste en reconocer un objeto independientemente de las distorsiones originadas, por ejemplo, por cambios de escala o por variaciones en las perspectivas de visión. En las implementaciones de técnicas de reconocimiento en correladores ópticos, los procesos suelen ser muy sensibles a distorsiones y la operación de detección difícilmente resulta exitosa, o al menos no con un grado de correlación aceptable en la señal generada. Por esta razón, diversas técnicas han sido desarrolladas para implementar procesos tolerantes a distorsiones del objeto a reconocer. Una de las alternativas que se propuso fue el desarrollo de filtros compuestos destinados a operar

en correladores de Vander Lugt. En general estos filtros fueron diseñados buscando tanto aumentar la capacidad de almacenamiento de los sistemas como así mejorar algunos parámetros de rendimiento del proceso de correlación. En particular, fueron los filtros discriminantes, cuyo diseño está basado en el algoritmo SDF presentado en el Capítulo 2, los que más trascendieron.

Hemos comentado que la arquitectura de un correlador de Vander Lugt es bastante sensible a alineación, comparada con la del correlador por transformada conjunta. Sin embargo, el JTC es altamente sensible a distorsiones (en el sentido de variaciones de escala, rotación o perspectiva). Para lograr procesos invariantes ante distorsiones en un JTC, se han incorporado las ideas de filtros en el diseño de la señal de referencia de esta arquitectura. Los distintos métodos [17],[18],[63],[64] desarrollados en general involucran una reducción en el ancho de banda espacial disponible. Una vez más, tomando provecho de las conocidas ventajas de los filtros sólo de fase en cuanto a eficiencia luminosa y buen compromiso entre tolerancia al ruido y agudeza de los picos de correlación, hemos dirigido nuestro interés a los filtros MED-SDF sólo de fase (POMED-SDF) que hemos introducido en el Capítulo 2.

En este trabajo hemos propuesto implementar un proceso de reconocimiento invariante a distorsiones combinando las ventajas ya mencionadas de un correlador por transformada conjunta fotorrefractivo, con el excelente rendimiento del filtro POMED-SDF, dando lugar a un JTC fotorrefractivo con invariancia a distorsiones [25]. Nuevamente, si bien hemos diseñado esta técnica para ser implementada en un correlador que opera con un cristal fotorrefractivo en el plano transformado, la misma puede ser implementada en un correlador donde el registro del plano transformado conjunto se realiza de manera lineal.

3.4.1. Descripción del método

La técnica propuesta, al igual que la anteriormente presentada, está basada en la introducción de no linealidades en el plano de entrada del correlador. Aquí nuevamente, si bien no hay limitaciones en el tiempo empleado para efectuar las operaciones sobre la referencia, ya que se llevan a cabo una única vez, aquéllas realizadas sobre

cada escena deben poder realizarse en tiempo real. La escena es entonces codificada en fase según 3.1 mientras que la referencia es preprocesada en base al filtro POMED-SDF, tal como se detalla a continuación.

El POMED-SDF, como hemos mencionado anteriormente, es un filtro restringido a un dominio de fase, dando lugar a un filtro sólo de fase. Este filtro fue originalmente desarrollado para actuar en el plano de Fourier de un correlador de Vander Lugt. En el caso de emplear una arquitectura JTC, la información correspondiente al filtro debe ser representada apropiadamente en el plano de entrada, como la referencia del sistema. Tal como se hizo en la técnica presentada en la sección anterior, debe efectuarse la transformada inversa sobre la distribución que representa al filtro. La transformada de Fourier inversa de un filtro POMED-SDF ya no es una función sólo de fase con módulo unitario, por lo tanto es necesario efectuar algún tipo de codificación para poder representarlo [65]. Basándonos nuevamente en el hecho de que la información de fase es considerablemente más importante que la información de amplitud, hemos empleado como referencia la información sólo de fase de la transformada de Fourier del filtro POMED-SDF.

El proceso consiste entonces en primer lugar en definir el *training set* del filtro, formado por un conjunto o subconjunto de imágenes, representativo del tipo de distorsiones que queremos tolerar en el proceso de reconocimiento. Luego, se calcula computacionalmente el filtro POMED-SDF, que representaremos por $H(f_x, f_y)$. La referencia entonces está dada por

$$r(x, y) = \frac{TF^{-1}\{H(f_x, f_y)\}}{|TF^{-1}\{H(f_x, f_y)\}|} \quad (3.7)$$

Ésta es una distribución de fase con módulo unitario, y constituye la señal referencia del proceso de reconocimiento. Esta distribución, junto con la escena codificada en fase, cuya distribución está dada por 3.1, conforman el plano de entrada del JTC.

3.4.2. Resultados

Presentaremos aquí los resultados obtenidos al implementar experimentalmente la técnica diseñada en el JTC fotorrefractivo, y los compararemos con los resultados provistos al simular numéricamente la técnica en un JTC donde el medio de registro se considera lineal. Es importante remarcar que en los filtros compuestos basados en el algoritmo SDF, a medida que el número de imágenes empleadas aumenta, lo mismo ocurre con el ruido presente en el proceso. Por lo tanto, este número debe surgir a partir de un compromiso entre lograr buena tolerancia a distorsiones (eligiendo un número suficientemente representativo) y el ruido no deseado originado por la superposición de numerosas imágenes. Hemos apuntado entonces a generar un proceso que sea tolerante a rotaciones fuera del plano de un objeto, en un rango completo de 25° , donde el *training set* que hemos elegido para generar el filtro se compone sólo de seis imágenes, tomando una cada 4° del rango de 25° . Las mismas, correspondientes un soporte de objetivo de microscopio, se presentan en la figura 3.16.

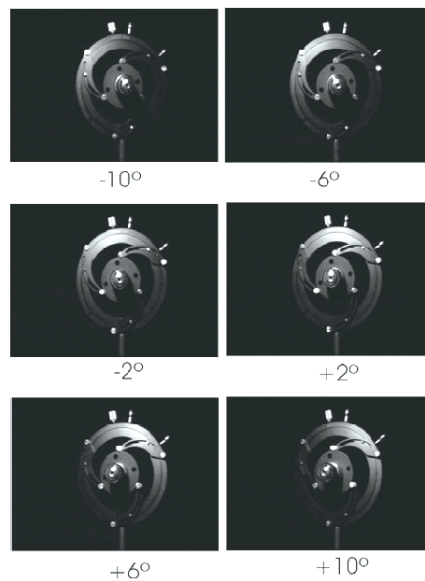


Figura 3.16: *Set de imágenes representativo de las distorsiones que se desea tolerar en el proceso de reconocimiento.*

A partir de este *training set* particular, nuestro objetivo es generar un proceso que sea tolerante a cualquier orientación contenida en el rango de 25° , sin importar si fue empleada para sintetizar el filtro y además, que sea capaz de rechazar a objetos cuyas distorsiones no pertenecen a la clase que se desea detectar.

La escena y la referencia empleadas tanto en la simulación numérica (donde se consideró un registro lineal del JTP) como en la implementación experimental, están representadas por las distribuciones de fase dadas por 3.1 y 3.7 respectivamente. En el segundo caso, se empleó una LCTV operando en modo puro de fase para representarlas. Hemos probado el método para 25 escenas de entrada distintas correspondientes a rotaciones fuera del plano desde -12° a 12° tomadas cada 1° . En la figura 3.17 mostramos la intensidad de correlación como función de la orientación del objeto empleado en la escena, tanto cuando el proceso fue simulado numéricamente así como en la implementación experimental. Los valores de intensidad fueron normalizados al máximo valor obtenido. Vemos que si bien la técnica ha sido desarrollada para ser implementada en un JTC fotorrefractivo, excelentes resultados se obtienen simulando un medio de registro lineal.

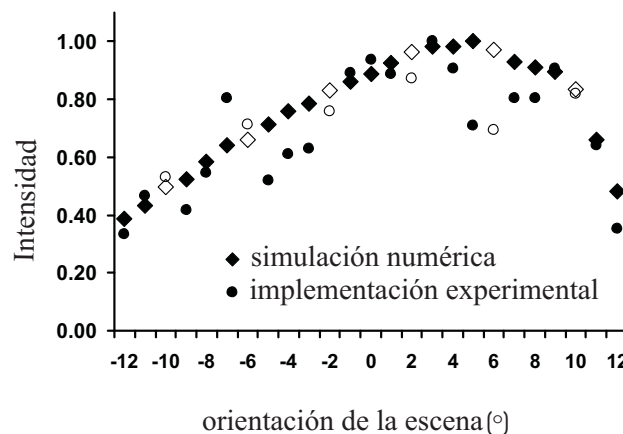


Figura 3.17: Intensidad de correlación obtenida al implementar el método experimentalmente (símbolos circulares) y por simulación numérica (símbolos romboidales). En ambos casos los puntos sin relleno indican que la escena formaba parte del *training set*.

Adicionalmente, como el método empleado para generar la referencia involucra filtros compuestos, un punto interesante para probar su robustez es comparar el desempeño de esta técnica con el de un proceso donde no se emplee un filtro compuesto. Con este fin, hemos realizado 25 simulaciones numéricas en cada una de las cuales se ha aplicado la técnica de fase propuesta en la sección 3.3.1 para cada una de las 25 orientaciones del objeto. Los resultados se presentan en la figura 3.18, junto con los obtenidos al simular nuestro método. Puede verse que, al emplear la referencia

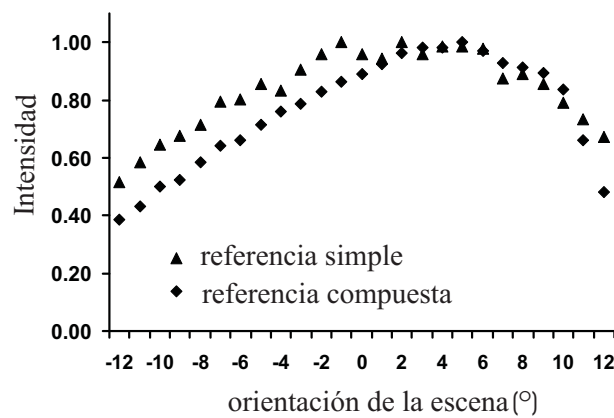


Figura 3.18: *Intensidad de correlación obtenida por simulación numérica empleando una referencia simple para cada imagen (símbolos triangulares) y empleando la referencia compuesta (símbolos romboidales).*

compuesta generada a partir del filtro POMED-SDF, los resultados obtenidos son muy similares a aquéllos donde se ha empleado una referencia simple. A partir de esta comparación, podemos concluir que el desempeño del proceso no es afectado por el uso del filtro compuesto POMED-SDF. Puede verse que cada una de las distorsiones consideradas es detectada eficientemente en el proceso. Las fluctuaciones en los valores de intensidad para las diferentes escenas pueden atribuirse a cada escena en particular y no al método propuesto, ya que estas variaciones están presentes aún cuando se emplea una referencia simple. Este comportamiento es causado por las diferencias en la cantidad de energía difractada por cada escena. En la figura 3.19 presentamos los resultados obtenidos al implementar el método para las escenas representadas en la

columna *A*. Los gráficos 3D correspondientes a las señales de correlación obtenidas por simulación numérica se encuentran en la columna *B*. Las señales de correlación experimentales obtenidas cuando el proceso es implementado en el JTC fotorrefractivo y sus correspondientes gráficos 3D se encuentran respectivamente en las columnas *C* y *D*.

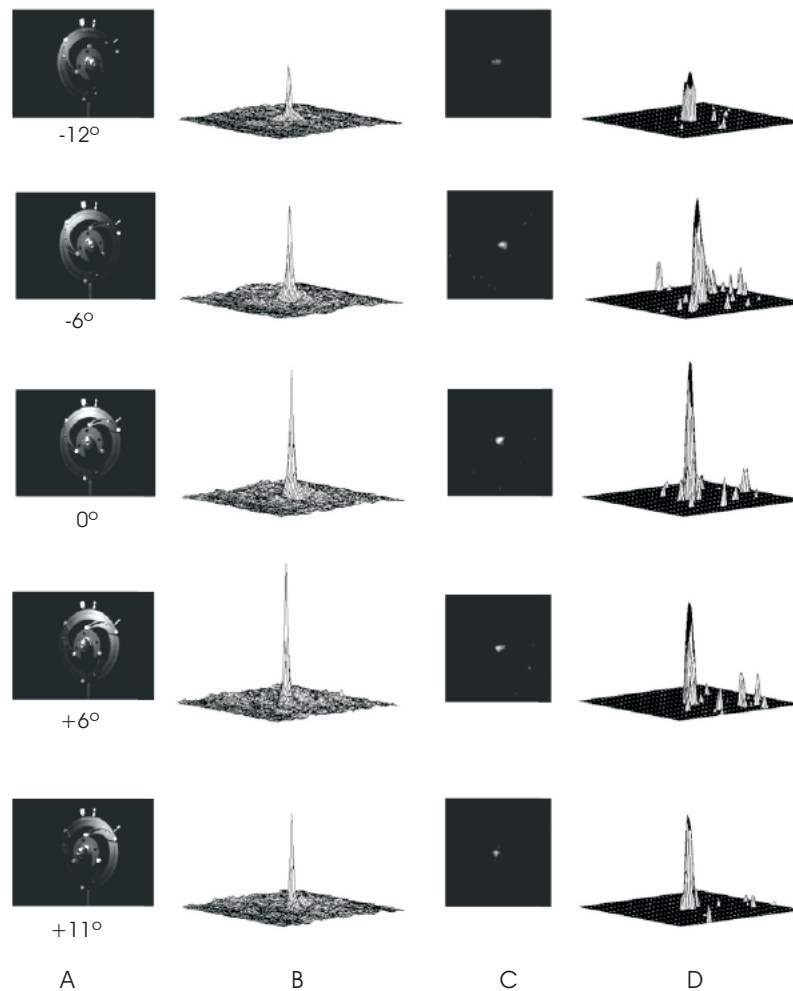


Figura 3.19: Resultados obtenidos al implementar el método propuesto para las escenas que se muestran en la columna *A*. En *B* se representan los resultados obtenidos por simulación numérica. En *C* y *D* se presentan los resultados experimentales.

Puede verse que, en ambos casos, la imagen es detectada claramente tanto para las distorsiones pertenecientes al *training set* con el cual fue sintetizado el filtro (-6° y $+6^\circ$), como para las orientaciones intermedias (-12° , 0° y $+11^\circ$). Tal como hemos dicho anteriormente, estamos interesados además en que el proceso sea capaz de rechazar objetos no representados por el *training set*. Como ejemplo, hemos considerado la escena representada en la figura 3.20(a), que consiste en una imagen del soporte, pero sin el objetivo de microscopio. Cabe destacar que éste es el único cambio introducido ya que la orientación del soporte sí pertenece al conjunto de los almacenados en el *training set*. En las figuras 3.20(b) y (c) se muestran los resultados obtenidos

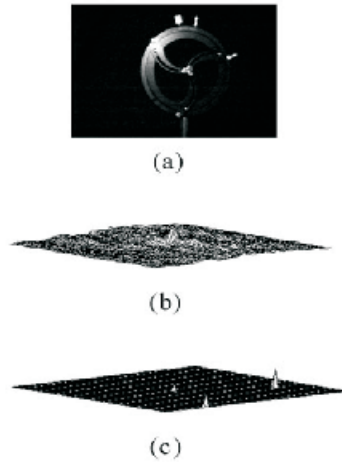


Figura 3.20: (a) escena no representada por el *training set*. (b)y (c) resultados de la señal de correlación obtenida por simulación numérica y experimentalmente, cuando se emplea dicha escena como entrada.

respectivamente a partir de la simulación y de la implementación experimental. Es interesante notar que, aunque el proceso tolera pequeñas distorsiones de los objetos correspondientes al *training set* empleado para sintetizar el filtro, el poder de discriminación se mantiene alto ya que un objeto similar, pero no representado por ese conjunto, es eficientemente rechazado.

Capítulo 4

Proceso de encriptación óptica en un JTC sólo de fase

4.1. Introducción

El proceso de encriptación tiene como objetivo fundamental proteger determinada información, generalmente muy valiosa y de dominio privado, cuando la misma es por alguna razón interceptada por personal no autorizado. Cuando se diseña un sistema de encriptación, deben tenerse en cuenta ciertas características que resultan sumamente relevantes en esta aplicación del procesado de información. En primer lugar, el método debe ser, en términos de seguridad, lo más robusto posible. En general, se debe diseñar por un lado, una técnica basada en el empleo de algún tipo de llave para encriptar la información, y por otro lado, debe diseñarse la técnica de desencriptación apropiada. En segundo lugar, dado que el proceso está basado en la transmisión de información, otro parámetro de relevancia es la velocidad con la cual la misma puede ser procesada. Aquí interviene tanto el diseño de la técnica así como el sistema de implementación empleado. Este requerimiento dio lugar, en los últimos años, al desarrollo de diversas técnicas ópticas para transmitir información de manera segura, dada su capacidad de procesar información bidimensional en paralelo y a alta velocidad.

Diferentes técnicas ópticas de encriptación de imágenes han sido propuestas, usual-

mente involucrando el empleo de máscaras de fase aleatoria [19],[23],[66]. La información encriptada, por lo tanto, en general está representada por una distribución compleja cuyo registro requiere efectuarse por procesos holográficos.

Una de las técnicas más seguras, y por lo tanto en la que se basan la mayoría de los métodos de encriptación, es la introducida por Javidi et al, denominada *dobles encriptación de fase* [19]. La misma, ideada originalmente para ser implementada en un procesador $4f$, está basada en encriptar una imagen empleando máscaras de fase aleatoria tanto en el plano de entrada como en el plano de Fourier. Esta técnica, que convierte la señal de entrada en una distribución de ruido blanco estacionario, puede describirse brevemente de la siguiente manera. En primer lugar, la imagen que se desea encriptar es representada en amplitud en el plano de entrada del sistema. Una máscara de fase aleatoria es introducida en el mismo plano. Sea $f(x, y)$ la distribución de amplitud que representa la imagen a encriptar, y sea $n(x, y)$ una distribución de ruido blanco en el rango $[0, 1]$, la señal de entrada del procesador está dada por

$$e(x, y) = f(x, y)\exp\{i2\pi n(x, y)\}. \quad (4.1)$$

En el plano transformado del procesador, se emplea una distribución de fase aleatoria $H(f_x, f_y)$ que representa la función transferencia del sistema, dada por

$$H(f_x, f_y) = \exp\{i2\pi b(f_x, f_y)\} \quad (4.2)$$

donde $b(x, y)$ es una distribución de ruido blanco en el rango $[0, 1]$ estadísticamente independiente de $n(x, y)$. A la salida del procesador $4f$, tal como hemos visto en el Capítulo 2, se obtiene la convolución de $e(x, y)$, con la respuesta al impulso $h(x, y)$ del sistema (dada por la antitransformada de Fourier de H), esto es

$$\Psi(x, y) = e(x, y) \otimes h(x, y). \quad (4.3)$$

La distribución $\Psi(x, y)$ representa la señal encriptada. El proceso de desencriptación

puede llevarse a cabo de la siguiente manera. La distribución compleja Ψ es transformada Fourier,

$$TF\{\Psi\} = E(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y). \quad (4.4)$$

Dado que $H(f_x, f_y)$ es una distribución de fase, si ésta expresión es multiplicada por $H^*(f_x, f_y)$ y luego antitransformada Fourier, se obtiene la distribución $e(x, y)$ dada por 4.1. Tomando módulo, se obtiene la imagen original $f(x, y)$. En este proceso, la llave de encriptación está representada por la distribución $b(x, y)$, ya que no es necesario conocer $n(x, y)$ para desencriptar la imagen. La utilidad de esta última consiste en distribuir la información de la imagen por todo el plano de Fourier en el proceso de encriptación.

Cuando se desea implementar ópticamente esta técnica en un procesador $4f$, se debe contar por un lado, con máscaras de fase representando las distribuciones de ruido empleadas tanto en el plano de entrada como en el plano de Fourier, además de algún medio de amplitud en la entrada para representar la imagen a encriptar. Por otro lado, dado que el proceso de desencriptación requiere conocer la señal compleja $\Psi(x, y)$ encriptada, suelen emplearse métodos holográficos para coleccionar dicha información. Si bien se han ideado técnicas basadas en sistemas que emplean medios de registro de alta densidad, logrando excelente calidad en el proceso de reconstrucción [67], el creciente interés en la transmisión de información segura vía canales de comunicación digitales ha hecho que se desarrollaran nuevas técnicas [4],[21]-[23],[66]-[68], basadas en holografía digital [20]. Estas técnicas, donde una cámara CCD es empleada para llevar a cabo dicho registro, presentan el inconveniente de una disminución en las capacidades de resolución, comparadas con las técnicas basadas en la holografía tradicional. Es sabido que una técnica de medición de un frente de ondas complejo que emplea más eficientemente los recursos de ancho de banda espacial de una CCD, comparado a la holografía digital, es la interferometría por corrimiento de fase digital [69]. La mayoría de los métodos de encriptación que involucran esta técnica, han sido desarrollados para operar en sistemas basados en interferómetros

tipo Mach-Zehnder. Los mismos, en general requieren del empleo de algún sistema extra para introducir los corrimientos de fase correspondientes [21]-[23] además de máscaras de fase representando la llave de encriptación, y por lo tanto suelen requerir una delicada alineación del dispositivo. Todo esto, en lo que concierne a cómo obtener la información de la señal encriptada $\Psi(x, y)$. Una vez obtenida dicha distribución, la misma debe ser representada para completar el proceso de desencriptación. La técnica de doble encriptación de fase propone implementar este proceso nuevamente en un sistema basado en la arquitectura 4f, donde la señal de entrada está dada por Ψ , y donde la llave de desencriptación, dada por H^* , es representada en el plano transformado. El primer inconveniente que se presenta en este método radica en la necesidad de representar información compleja. Una opción es codificar distribuciones de fase en medios de amplitud, a partir de hologramas generados por computadora [37], lo que en general reduce el ancho de banda espacial disponible. Además, resulta poco eficiente si se requiere implementar el proceso a alta velocidad, y más aún si interesa actualizar a gran velocidad tanto la información a encriptar como la llave de encriptación. En segundo lugar, los requerimientos de alineación de un proceso como éste son extremadamente rigurosos.

Nuevas técnicas han sido presentadas proponiendo emplear una arquitectura tipo JTC para implementar el proceso de doble encriptación de fase [67]. Las mismas se basan en emplear como escena, la distribución dada por 4.1, y como referencia una distribución de fase aleatoria $r(x, y)$ estadísticamente independiente de $n(x, y)$. En estos sistemas, la imagen encriptada se obtiene al efectuar el registro del plano transformado conjunto del sistema. En esta técnica, persiste el inconveniente de requerir el empleo de medios de representación de distribuciones complejas, en este caso, en el plano de entrada. En cuanto al proceso de desencriptación, se han propuesto técnicas ópticas que emplean arquitecturas 4f [67], con los inconvenientes de alineación asociados. A continuación presentaremos un método que hemos diseñado para implementar el proceso de doble encriptación de fase en un sistema donde estos inconvenientes son superados [27]. En particular, el método fue diseñado con el fin de conjugar las variables de mayor interés en los procesos de encriptación: seguridad en la técnica, y velocidad tanto en el proceso como en la operación del sistema de implementación, y

además, robustez en el dispositivo a emplear.

4.2. Encriptación usando interferometría por corrimiento de fase en un JTC

Nuestro objetivo ha sido diseñar un método de encriptación que adopte los beneficios de seguridad que brinda la técnica de doble encriptación de fase, y que pueda ser implementada a alta velocidad en un sistema robusto. Proponemos en particular una técnica óptica de encriptación en donde tanto la señal encriptada como la llave son obtenidos, a partir de registros holográficos digitales, usando la técnica de interferometría por corrimiento de fase. El proceso se realiza en una arquitectura tipo JTC en el cual se utiliza una pantalla de cristal líquido trabajando en modo puro de fase tanto para representar el plano de entrada como para introducir los corrimientos de fase requeridos. Una cámara CCD es empleada como medio de registro. La desencriptación puede efectuarse tanto digital como ópticamente. Esta técnica permite que el proceso completo de encriptación y desencriptación pueda llevarse a cabo a alta velocidad y la información pueda ser transmitida via canales de comunicación digitales.

4.2.1. Descripción del método

Proceso de encriptación

El proceso de encriptación óptica puede esquematizarse según se muestra en la figura 4.1. La escena con información de la imagen a encriptar, y la referencia que representa la llave de encriptación, componen el plano de entrada del sistema. El mismo, representado en una LCTV operando en modo puro de fase, es iluminado con el haz colimado de la línea $457nm$ ($\sim 10mW$) de un láser de Argón dado que ésta es la línea con la que se alcanza la mayor modulación de fase. La LCTV, junto con las láminas retardadoras WPs y los polarizadores Ps , componen el modulador espacial de fase, tal como se describió en el Capítulo 3. La señal de entrada que emerge de

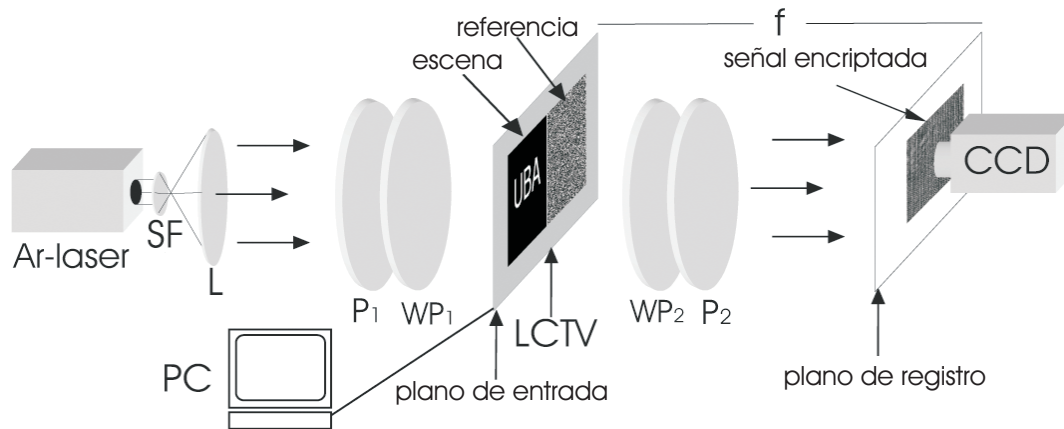


Figura 4.1: Esquema del dispositivo experimental del sistema de encriptación.

la LCTV se propaga hasta el plano de registro, ubicado en este caso a una distancia $f = 700\text{mm}$. La distribución de intensidad a dicho plano constituye la señal encriptada, la cual es registrada y digitalizada empleando una CCD y un frame grabber.

El método de encriptación que hemos propuesto está basado en la técnica de doble encriptación de fase. Hemos mencionado que la implementación de esta técnica en un JTC requiere representar distribuciones complejas en el plano de entrada. El método que hemos desarrollado ha sido ideado para emplear una LCTV operando en modo puro de fase para representar el plano de entrada. En particular, la técnica permite emular una distribución binaria de amplitud programando convenientemente una lente convergente en la LCTV, como mostraremos a continuación. Como señal de referencia, hemos empleado una distribución aleatoria de fase que genera, en el plano de registro, un campo complejo caracterizado también por una distribución de fase aleatoria. El proceso puede ser descrito de la siguiente manera.

Sea $f(x, y)$ una función binaria en el rango $[0, 1]$ que representa a la imagen a encriptar. Si $n(x, y)$ es una distribución de ruido blanco también en el rango $[0, 1]$, y $l(x, y)$ es una distribución cuadrática que describe la fase correspondiente a una lente convergente de distancia focal f para una longitud de onda λ , elegimos representar

la escena por la siguiente distribución

$$e(x, y) = \exp\{i2\pi f(x, y)n(x, y)\}\exp\{l(x - a, y - b)[1 - f(x, y)]\} \quad (4.5)$$

donde las coordenadas en el plano de entrada están representadas por (x, y) . Analicemos en detalle esta expresión. Puede verse que cada vez que $f(x, y)$ toma el valor 1, $e(x, y)$ se convierte en una distribución de fase aleatoria representada por $n(x, y)$ y cada vez que $f(x, y)$ toma el valor cero, $e(x, y)$ está caracterizada por la distribución de una lente convergente con el eje óptico centrado en $x = a$, $y = b$. Cuando $e(x, y)$ es representada en el plano de entrada del sistema y es iluminada por una onda plana uniforme de longitud de onda λ , la luz que pasa por las regiones donde $f(x, y)$ toma el valor cero, luego de propagarse una distancia f , es enfocada en una región pequeña, centrada en las coordenadas $x' = a$, $y' = b$ del plano de registro. Si elegimos a y b convenientemente, podemos concentrar la luz fuera de la región de interés en el plano de registro, y entonces podemos considerar que a dicha región no llega luz proveniente de las regiones donde $f(x, y)$ toma el valor cero. En la figura 4.2 mostramos un esquema de la imagen a encriptar y de la distribución que hemos empleado para representar la escena.



Figura 4.2: Imagen a encriptar y distribución de fase de la escena empleada para representarla. Los niveles de gris corresponden a valores de fase en el rango $[0, 2\pi]$.

En particular, se ha elegido emplear cuartos de una lente convenientemente distribuidos de manera que la luz destinada a enfocarse en el eje óptico, quede repartida en las cuatro esquinas del plano de registro. De esta manera logramos que la luz no deseada, se aleje lo más posible del sector en el cual se centrará la luz proveniente de

las zonas donde $f(x, y)$ vale uno, ya que es esta última la región de interés. Por lo tanto, representando en la LCTV la distribución de fase dada por 4.5, es posible emular una distribución compleja donde la amplitud está dada por $f(x, y)$, y la fase por $2\pi n(x, y)$. Bajo esta aproximación, podemos entonces representar matemáticamente 4.5 como 4.1, es decir

$$e(x, y) = f(x, y) \exp\{i2\pi n(x, y)\}. \quad (4.6)$$

Es importante mencionar que, dado que la LCTV puede representar distribuciones de fase en el rango $[0, 2\pi]$, para programar la lente convergente hemos aplicado la operación módulo 2π sobre la distribución $l(x, y)$. Como señal de referencia hemos empleado una distribución de fase aleatoria dada por

$$r(x, y) = \exp\{i2\pi\varphi_r(x, y)\}. \quad (4.7)$$

donde $\varphi_r(x, y)$ es una distribución de ruido blanco en el rango $[0, 1]$ y es estadísticamente independiente de $n(x, y)$.

Representamos la escena $e(x, y)$ y la referencia $r(x, y)$ dadas respectivamente por 4.6 y 4.7, lado a lado en el plano de entrada tal como se muestra en la figura 4.1, centradas en $(c, 0)$ y $(-c, 0)$ respectivamente. Se ilumina uniformemente el plano de entrada. Las señales difractadas por las distribuciones de la escena y la referencia se propagan una distancia f hasta el plano de registro, donde la figura de interferencia, registrada con una CCD, constituye la imagen encriptada. La distribución de intensidad que la representa está dada por

$$I_o(x', y') = |E(x', y') + R(x', y')|^2, \quad (4.8)$$

donde

$$E(x', y') = |E(x', y')| \exp\{i\varphi_E(x', y')\}$$

y

$$R(x', y') = |R(x', y')| \exp\{i\varphi_R(x', y')\}$$

representan, respectivamente, los campos difractados por la escena $e(x, y)$ y la referencia $r(x, y)$, en el plano de registro.

Proceso de desencriptación

El proceso de encriptación está basado en el hecho de que la información sólo de fase del campo $E(x', y')$ difractado por la escena, es decir, la distribución $\varphi_E(x', y')$, alcanza para reconstruir la imagen encriptada, tal como hemos descrito en la sección 2.3.2. En particular, vimos que las condiciones bajo las cuales esta información permite reconstruir los detalles de la escena se cumplen cuando el campo difractado por la misma se encuentra en condiciones cercanas a Fraunhofer, dadas por 2.25. Notemos ahora que la escena que hemos empleado para llevar a cabo el proceso de encriptación está representada por una distribución de ruido de fase en todas las regiones en que la amplitud de la función a encriptar vale 1, es decir, que la imagen a encriptar podría pensarse como rellena por ruido de fase, y por lo tanto, por una distribución con altas frecuencias espaciales. Dado que hemos empleado granos de ruido del tamaño de un pixel (40 micrones de lado), el campo difractado por la escena, que llega al plano de registro, ubicado a 700mm, puede considerarse que cumple satisfactoriamente las condiciones de Fraunhofer. En este caso, dado que la imagen está rellena con ruido, no son los bordes los que representan las altas frecuencias, sino toda la imagen a encriptar. Por lo tanto, si logramos extraer la información de la fase de $E(x', y')$, es decir $\varphi_E(x', y')$, y propagamos libremente la distribución $\exp\{-i\varphi_E(x', y')\}$ una distancia f , será posible encontrar una señal cuya distribución de amplitud represente aproximadamente la información contenida en $f(x, y)$.

Extracción de fase La extracción de la información de fase del campo difractado por la escena es efectuada empleando la técnica de interferometría por corrimiento de fase de tres pasos. En primer lugar, se realiza un proceso por el cual es posible extraer la diferencia de fase entre $E(x', y')$ y $R(x', y')$. Para implementar la técnica de corrimiento de fase de tres pasos, se efectúan corrimientos de fase, sobre la señal de referencia, de 0 , $2/3\pi$ y $4/3\pi$. Los mismos son directamente programados sobre la LCTV dado que la misma opera en modo de fase. Se registran entonces en el plano de salida las tres distribuciones de intensidad correspondientes, las cuales están dadas por

$$I_j(x', y') = |E(x', y')|^2 + |R(x', y')|^2 + 2|E(x', y')||R(x', y')| \times \cos \left[\varphi_R(x', y') - \varphi_E(x', y') + j\pi - 4\pi c \frac{x'}{\lambda f} \right] \quad (4.9)$$

donde j toma los valores $j = 0, 2/3$ y $4/3$. A partir de esta expresión puede deducirse fácilmente que

$$\varphi_R(x', y') - \varphi_E(x', y') - 4\pi c \frac{x'}{\lambda f} = \arctan \left\{ \frac{[I_{4/3} - I_{2/3}]\sqrt{3}}{2I_0 - I_{4/3} - I_{2/3}} \right\}. \quad (4.10)$$

Esta expresión representa la fase de $E(x', y')$ encriptada por la fase de $R(x', y')$. Para recuperar la información de fase de $E(x', y')$, es necesario conocer la información de fase del campo de encriptación $R(x', y')$. Para recuperar esta información, hemos empleado un segundo proceso de extracción de fase de tres pasos, pero esta vez empleando una distribución constante en lugar de la escena, mientras que la referencia sigue siendo representada por la llave de encriptación. Ambas distribuciones son representadas lado a lado en el plano de entrada. Si el haz difractado por la escena constante, en el plano de registro, está representada por $C(x', y') = \exp\{i\varphi_C\}$, donde φ_C es una constante, entonces la nueva intensidad en dicho plano puede deducirse, a partir de 4.9, reemplazando $E(x', y')$ por $C(x', y')$, como

$$I'_j(x', y') = 1 + |R(x', y')|^2 + 2|R(x', y')| \cos \left[\varphi_R(x', y') - \varphi_C + j\pi - 4\pi c \frac{x'}{\lambda f} \right] \quad (4.11)$$

donde nuevamente j toma los valores $j = 0, 2/3$ y $4/3$. Podemos calcular entonces

$$\varphi_R(x', y') - \varphi_C - 4\pi c \frac{x'}{\lambda f} = \arctan \left\{ \frac{[I'_{4/3} - I'_{2/3}] \sqrt{3}}{2I'_0 - I'_{4/3} - I'_{2/3}} \right\}. \quad (4.12)$$

Entonces, restando 4.10 a 4.12, se puede recuperar $\varphi_E(x', y')$ sumado a un término constante que puede ser ignorado.

Las seis distribuciones de intensidad pueden ser enviadas a velocidad de video empleando canales digitales de comunicación. Una vez que éstas son transmitidas, junto con la información de la longitud de onda empleada así como el parámetro f identificando la distancia entre el plano de entrada y el plano de registro, el receptor de la información puede completar el proceso de desencriptación exitosamente tanto digital como ópticamente, como se describe a continuación.

Para recuperar digitalmente la información de la imagen $f(x, y)$ encriptada, se propaga libremente $\tilde{E} = \exp\{-i\varphi_E(x', y')\}$ una distancia f [21]. Para recuperar ópticamente la información de la imagen $f(x, y)$, \tilde{E} es representada en la LCTV operando en modo puro de fase en el plano de entrada, tal como se muestra en la figura 4.3.

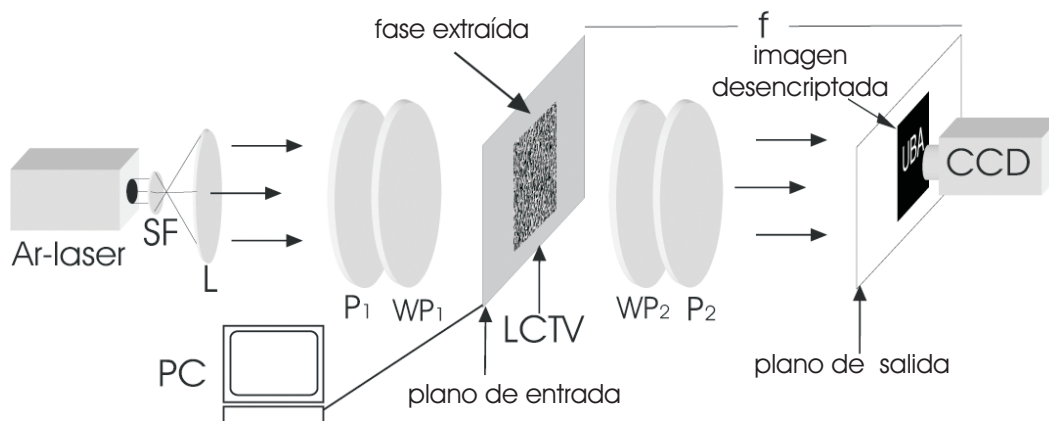


Figura 4.3: Esquema del dispositivo experimental del sistema de desencriptación .

La LCTV es iluminada uniformemente, empleando la misma longitud de onda del proceso de encriptación, para obtener, en el plano de salida ubicado a distancia f , la imagen desencriptada.

Puede notarse que la arquitectura empleada en el proceso completo no es exactamente la de un JTC, en el sentido que no se emplean transformaciones de Fourier entre el plano de entrada y el plano de registro holográfico, así como tampoco entre éste y el plano de salida tal como lo requiere dicha arquitectura. Justamente, esta distancia constituye un parámetro adicional de seguridad.

4.2.2. Resultados

Las imágenes empleadas para el proceso están representadas en la figura 4.4, donde los detalles más finos tienen resolución de dos píxeles, mientras que el ruido empleado para representar la referencia es de un pixel. En la figura 4.5 se presentan los resultados obtenidos cuando el proceso es realizado completamente por simulación numérica para la imagen 4.4 (a). Los resultados obtenidos cuando el proceso de encriptación es implementado experimentalmente pero el proceso de desencriptación es realizado digitalmente, se presentan en la figura 4.6. Los resultados obtenidos cuando tanto el proceso de encriptación como el de desencriptación son implementados experimentalmente se presentan en la figura 4.7.

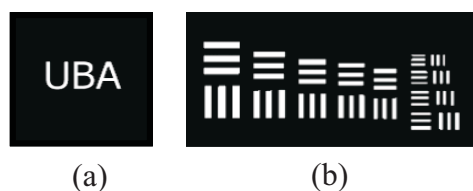


Figura 4.4: *Imágenes a encriptar.*

Puede verse que la técnica diseñada puede ser implementada con éxito, logrando resolver hasta aproximadamente 4 píxeles en la implementación experimental. La relevancia del método radica en su capacidad para implementar el proceso completo de encriptación y desencriptación de información binaria, a alta velocidad, en un



Figura 4.5: *Imagen desencriptada. Resultado obtenido al emplear la imagen 4.4(a) cuando el proceso completo es simulado numéricamente.*

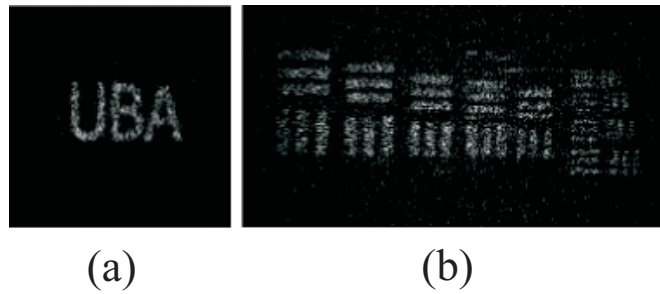


Figura 4.6: *Imágenes desencriptadas. Resultados obtenidos cuando el proceso de encriptación es realizado experimentalmente y la desencriptación es efectuada digitalmente.*

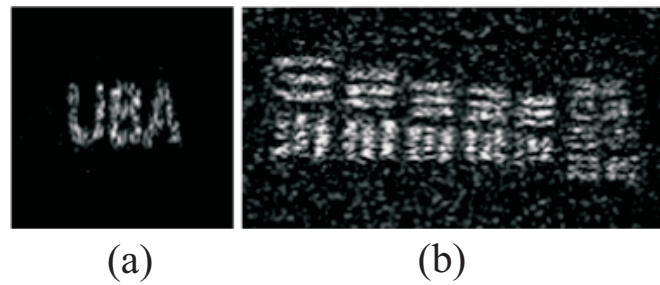


Figura 4.7: *Imágenes desencriptadas. Resultados obtenidos cuando el proceso de encriptación y el de desencriptación son implementados experimentalmente.*

sistema optoelectrónico robusto, y sencillo. La seguridad del proceso, basada fundamentalmente en la técnica de doble encriptación de fase, e incrementada por los

parámetros f y λ , puede ser aumentada si consideramos que la llave de encriptación puede ser actualizada a alta velocidad. Es fundamental destacar que hemos conjugado, en una única LCTV operando como modulador puro de fase, la acción de máscaras de fase aleatoria, piezoeléctricos, lentes y máscaras de amplitud usualmente requeridos en la mayoría de los dispositivos de encriptación óptica. Este trabajo ha motivado al desarrollo de nuevas investigaciones donde se ha comenzado a estudiar la robustez de la técnica en cuanto a posibles ataques mediante el empleo de llaves erróneas para desencriptar la información. A continuación presentemos los resultados preliminares obtenidos.

4.2.3. Análisis de la robustez de la técnica

La situación óptima de seguridad en un proceso de encriptación está dada cuando la dimensión del espacio generado por llaves capaces de desencriptar la señal, tenga la menor dimensión posible. Si se encuentra un conjunto de llaves incorrectas pero que permiten efectuar exitosamente la desencriptación, habrán aumentado las posibilidades de que un espía logre desencriptar la información. Hemos estudiado entonces la resistencia del método al empleo de llaves que difieren de la llave correcta. Para probar la robustez de la técnica ante posibles ataques, hemos realizado un estudio, basado en simulaciones numéricas, donde hemos considerado que conociendo la información de la fase $\varphi_E(x', y')$ encriptada con $\varphi_R(x', y')$, es decir, conociendo la distribución dada por 4.10, se emplean *llaves* que difieren de $\varphi_R(x', y')$, con las cuales se intenta recuperar $\varphi_E(x', y')$. Las variantes de puntos de partida para efectuar una búsqueda son muchísimas. En este estudio hemos considerado sólo algunas.

Desplazamiento de la llave original

Hemos estudiado en este caso la resistencia de la técnica ante desplazamientos de la llave. Para ello, hemos empleado llaves generadas efectuando desplazamientos cíclicos de la llave correcta en distinta cantidad de pixeles. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 4.8. Puede verse que sólo es posible desencriptar la imagen en el caso en que la llave es desplazada 1 pixel.

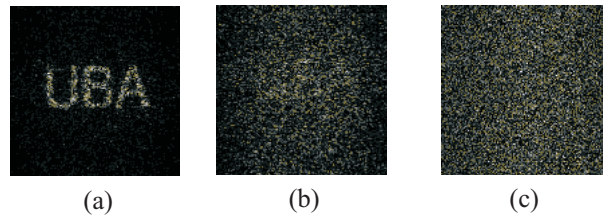


Figura 4.8: *Simulación numérica del proceso cuando la llave es desplazada (a) 1 pixel, (b) 2 pixeles y (c) 3 pixeles.*

Este estudio origina un nuevo parámetro de seguridad, que puede estar dado enviando la información de la llave, pero desplazada respecto de su posición original. Así, el parámetro indicando dónde debe centrarse la llave debe ser también informado para completar el proceso de descryptación. Otro punto de interés consiste en analizar qué ocurre cuando el proceso de búsqueda de la llave se realiza en un subespacio de menor dimensión que el generado por la llave original. Por ejemplo, si la búsqueda es efectuada a partir de una llave binaria.

LLlave binaria de mínima distancia euclídea

En primer lugar hemos realizado un análisis reduciendo al máximo la variable que representa los distintos niveles de fase que puede tomar cada pixel que constituye la llave. Para ello, hemos considerado una llave binaria que toma valores de fase $[0, \pi]$, donde el valor de cada pixel de la llave original fue reemplazado por 0 ó π según la mínima distancia euclídea. Es decir, se tomó una llave binaria de mínima distancia euclídea a la llave original. El resultado obtenido empleando esta llave se muestra en la figura 4.9.

Dado que la reconstrucción es realmente buena, resulta interesante estudiar variaciones de esta llave binaria. Una posibilidad consiste en estudiar la introducción de errores.



Figura 4.9: *Simulación numérica del proceso cuando se emplea una llave binaria de mínima distancia euclídea a la llave original.*

Introducción de errores en la llave binaria

La introducción de errores en la llave binaria consiste básicamente en sumar a la misma, otra imagen de igual dimensión pero donde un porcentaje determinado de píxeles, distribuidos aleatoriamente, valen π , y el resto valen cero. Así, los píxeles de la llave que sufren un aumento en π pasan a valer π si valían cero, y 2π , ó 0, si valían π , mientras que los que no son afectados por el ruido mantienen su valor. En la figura 4.10 mostramos los resultados obtenidos introduciendo distintos porcentajes de error en la llave.

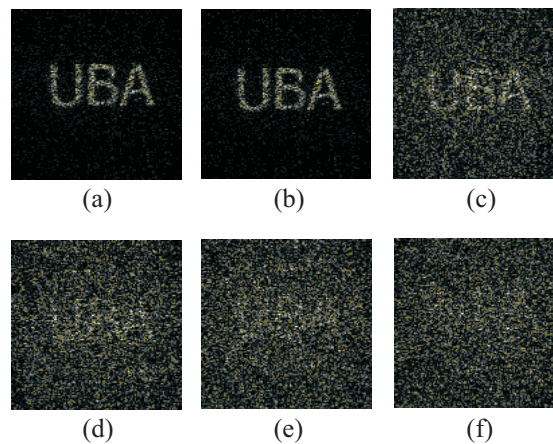


Figura 4.10: *Simulación numérica del proceso cuando se emplea una llave binaria de mínima distancia euclídea a la llave original, introduciendo errores del (a)20%, (b)30%, (c) 35% , (d)36%, (e)37% y (f)40%.*

Este resultado aumenta el conjunto de llaves de descryptación. Otra posibilidad, en lugar de considerar errores, consiste en emplear llaves binarias de mínima distancia euclídea pero de dimensiones menores que el tamaño original de la llave.

Reducción del tamaño de la llave binaria

En este caso hemos considerado distintos sectores de la llave binaria, tal como se muestra en la figura 4.11. Se han empleado llaves de la dimensión de la imagen original (la cual tiene una dimensión de 256 x 256 píxeles), pero reteniendo sólo algunas zonas (de 64 x 64 píxeles) de la llave, y poniendo ceros en el resto de los píxeles. Algunos resultados se muestran en la figura 4.12.

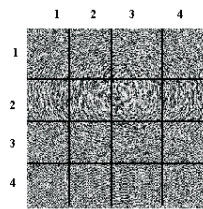


Figura 4.11: *Esquema de los distintos sectores empleados de la llave binaria.*

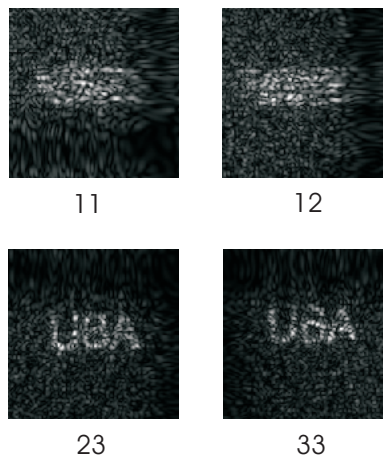


Figura 4.12: *Simulación numérica empleando distintos sectores de la llave binaria.*

Los distintos resultados obtenidos dan una idea de la robustez de la técnica. En particular, la dimensión del espacio de búsqueda de la llave, si bien se ha reducido notablemente respecto del original, aún toma un tamaño importante. Este estudio requiere aún más análisis e incorporación de otros métodos de ataque.

Capítulo 5

Conclusiones

En esta Tesis presentamos métodos óptico-digitales para llevar a cabo los procesos de reconocimiento y encriptación de imágenes en una arquitectura robusta y capaz de operar a alta velocidad. Dicha arquitectura se basa en un correlador por transformada conjunta en el cual, para introducir las señales de entrada, se utiliza un elemento óptico difractivo programable. Los dos procesos implementados son constituyentes esenciales en un sistema de seguridad. Por un lado hemos propuesto técnicas que, en un proceso de reconocimiento, usualmente empleado en situaciones de acceso restringido o de búsqueda, permiten realizar la operación de correlación de forma relativamente invariante a la luminosidad y distorsiones del objeto a reconocer manteniendo, sin embargo, un alto poder de discriminación. El otro proceso de interés en el que hemos trabajado, está relacionado con la protección de la información una vez que la misma fue interceptada por personal no autorizado. En tal sentido, hemos desarrollado un método de encriptación de imágenes que permite almacenar y transmitir información en forma segura.

El dispositivo de implementación de los procesos de reconocimiento está basado en el empleo de una LCTV operando en modo puro de fase para representar el plano de entrada, y un cristal fotorrefractivo BSO para registrar el plano transformado conjunto. Se empleó la línea $488nm$ de un láser de Ar para efectuar el proceso de registro y un laser HeNe para el proceso de lectura.

Uno de los métodos diseñado ha sido destinado a implementar un proceso con

alto poder de discriminación que resulta relativamente invariante a la iluminación del objeto a reconocer. El mismo emplea la escena a procesar codificada en fase, y la referencia procesada de modo de introducir no-linealidades que emulan el filtrado puro de fase que brinda un POF. Los resultados que hemos obtenido muestran que la implementación de la técnica aumenta las capacidades de discriminación del JTC fotorrefractivo convencional, es decir, donde la referencia es representada sin la introducción de no linealidades. Hemos mostrado que, aún cuando el objeto a detectar se presenta en la escena con una luminosidad distinta a la que presenta en la referencia, el proceso de reconocimiento se efectúa exitosamente.

El otro método ha sido diseñado introduciendo no-linealidades en la referencia del sistema de modo de emular un proceso de filtrado múltiple basado en el filtro MED-SDF sólo de fase. En particular hemos considerado distorsiones originadas por rotaciones de un objeto fuera del plano. Los resultados obtenidos muestran que el proceso detecta eficientemente objetos con orientaciones intermedias no incluidas en el *training set* empleado para diseñar la referencia, y rechaza eficientemente un objeto de apariencia similar pero cuya distorsión no corresponde a una representada por el *training set*. Hemos mostrado que el desempeño de este proceso basado en el uso una referencia compuesta, es similar al desempeño de un proceso donde cada distorsión es procesada a partir de una referencia simple adaptada a ella.

La arquitectura propuesta, en conjunto con las técnicas de filtrado presentadas, permiten obtener un correlador de tamaño reducido, que opere a tiempo de video y con excelentes características de detección.

En cuanto al método de encriptación que hemos diseñado, el dispositivo de implementación empleado está basado en una arquitectura similar a la utilizada en el proceso de reconocimiento. La misma utiliza una LCTV operando en modo puro de fase para representar el plano de entrada, y una cámara CCD para efectuar el proceso de registro. En este caso, tanto para el proceso de encriptación como para el de desencriptación, se empleó la línea $457nm$ de un láser de Argón. En particular, la técnica ha sido diseñada de modo de aprovechar la capacidad de la LCTV para representar DOEs. Así, hemos conjugado en una única LCTV, la representación de la imagen binaria a encriptar, la distribución de fase aleatoria de la llave de encriptación y los

corrimientos de fase requeridos para implementar la técnica de extracción de fase. La longitud de onda empleada, así como la posición de la CCD constituyen parámetros de seguridad adicionales. El método, basado en la técnica de doble encriptación de fase, consiste en obtener tanto la imagen encriptada como la llave de desencriptación a partir de hologramas ópticos registrados digitalmente, empleando la técnica de interferometría por corrimiento de fase de tres pasos. La escena es representada a partir de una distribución de fase que permite emular información de amplitud binaria. La llave de encriptación está dada por la distribución de fase aleatoria que representa a la referencia. La posibilidad de actualizar esta llave a alta velocidad adiciona otro parámetro de seguridad. Los resultados obtenidos muestran que la resolución espacial que se puede alcanzar en el proceso de reconstrucción de la imagen está limitada por el tamaño del ruido utilizado para encriptar la imagen. En particular, el ruido empleado ha sido de un pixel y la resolución en la reconstrucción es del orden de los tres o cuatro pixeles.

Se han presentado además algunos resultados numéricos preliminares relacionados con un estudio de la robustez de la técnica. De los mismos se puede concluir que un parámetro adicional de seguridad está dado por la sensibilidad de la ubicación de la llave en la etapa de desencriptación. Se vio además, que el espacio de búsqueda de la llave se ve disminuído si se basa en el empleo de llaves binarias. Los resultados obtenidos alientan a continuar en el desarrollo de estas investigaciones.

5.1. Perspectivas

-Implementación de una técnica de reconocimiento, basada en un proceso dinámico, destinada a aumentar la eficiencia del JTC fotorrefractivo.

-Profundizar el análisis de la robustez de la técnica de encriptación desarrollada y de acuerdo a ello diseñar nuevos métodos.

- Diseñar un método que permita adaptar la técnica de encriptación presentada a imágenes no binarias. Algunas alternativas están en etapa de estudio.

Apéndice A

Eficiencia del cristal BSO

En el correlador por transformada conjunta que hemos implementado, empleamos un cristal BSO como medio de registro holográfico. Hemos visto que en el proceso de correlación básicamente se registra el plano transformado conjunto, el cual luego es iluminado por el haz de lectura para dar lugar a la señal de salida del sistema. Dado que la misma posee la información de reconocimiento que se desea obtener, es sumamente importante que ésta sea lo más eficiente posible, es decir, que el haz de lectura pierda la menor cantidad de energía posible al leer el holograma. Existe un corte particular del cristal que es el ideal para ser empleado en procesos de registro holográfico (es el $(\bar{1}10)$ en el sistema de coordenadas del cristal). El cristal BSO que hemos empleado posee un corte tal que una de sus caras es normal a la dirección (111) y por lo tanto resulta de interés estudiar las configuraciones posibles de aplicación de campo externo de modo de obtener la mayor eficiencia disponible. En el proceso de registro y lectura de un holograma, se define la eficiencia como la razón entre la potencia del haz de lectura difractado, y la potencia del haz de lectura que incide sobre el holograma registrado en el medio, todo por unidad de área. Para medir la eficiencia resultante en un proceso en el cual se registra un holograma sobre el cristal BSO utilizado, empleamos el mismo dispositivo en la cual se llevaría a cabo el proceso de correlación, y utilizando la misma configuración, sólo que empleando dos haces de escritura planos, ya que la eficiencia depende, entre otras cosas, de la frecuencia espacial de la red promedio que se genera al registrar el plano transformado

conjunto, y la misma está determinada por la dirección y longitud de onda de los haces de escritura. Comentamos que, para lograr valores de eficiencia convenientes, era necesario aplicar sobre el cristal BSO un campo eléctrico externo. Por lo tanto, para cada una de las dos direcciones posibles de aplicación, hemos medido las curvas de eficiencia en función de la potencia de los haces de escritura. Además, realizamos mediciones para tres valores distintos de voltaje aplicado entre los electrodos del cristal. En la figura A.1 se muestran los resultados obtenidos.

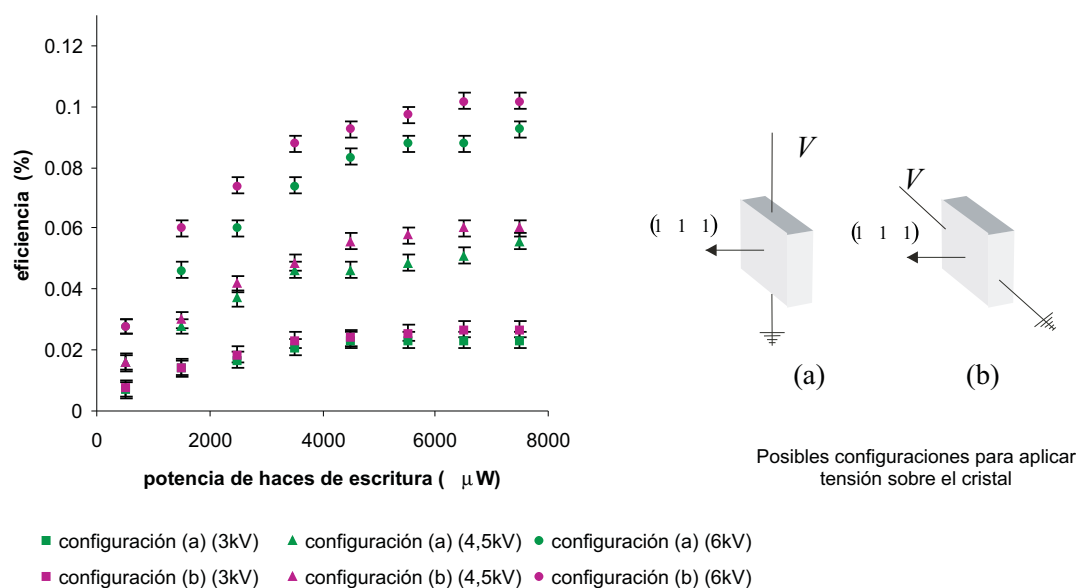


Figura A.1: *Curvas de eficiencia. Para cada configuración de aplicación de campo, se presentan las curvas resultantes de aplicar tres valores distintos de tensión entre los electrodos del cristal.*

Si bien hay una pequeña variación entre dos curvas correspondientes a la misma tensión aplicada, debido a que la diferencia es del orden del 5%, podemos considerar que la eficiencia es equivalente en las dos direcciones de campo externo, para un determinado valor de tensión. Es importante aclarar que, para llevar a cabo las mediciones en las dos configuraciones de campo, fue necesario despintar los contactos del cristal,

y volver a pintarlos, y por lo tanto, en el lapso de tiempo transcurrido entre ambas mediciones, posiblemente la alineación del dispositivo haya sufrido alguna variación. En particular, dado que la eficiencia es altamente sensible a las condiciones de lectura, una leve variación en la dirección del haz de lectura puede ser causa de las diferencias entre las curvas.

Bibliografía

- [1] D. Palanker, A. Vankov, P. Huie and S. Baccus, *Design of a high-resolution optoelectronic retinal prosthesis*, Journal of Neural Engineering, 2: S105 (2005).
- [2] M. Vincze, M. Ayromlou, C. Beltran , A. Gasteratos , S. Hoffgaard, O. Madsen, W. Ponweiser and M. Zillich, *A system to navigate a robot into a ship structure*, Machine Vision and Applications 14, 15 (2003)
- [3] G. Puentes, C. La Mela, S. Ledesma, C. Iemmi, J.P. Paz and M. Saraceno, *Optical implementation of quantum algorithms using programmable liquid crystal displays*, Phys. Rev. A 69, 042319 (2004)
- [4] B. Javidi and T. Nomura, *Information Security Using Digital Holography*, Opt. Lett. 25, 28 (2000).
- [5] H. Abril, M. Millán and Y. Torres, *Evaluating Fabric Pilling with Light-Projected Image Analysis*, Opt. Eng. 39, 1477 (2000)
- [6] A.B. Vander Lugt, *Signal Detection by Complex Spatial Filtering*, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-10, 139 (1964)
- [7] C. S. Weaver and J. W. Goodman, *A technique for optically convolving two functions*, Appl. Opt. 5, 1248 (1966).
- [8] A. Márquez, J. Campos, M.J. Yzuel, I. Moreno, J.A. Davis, C. Iemmi, A. Moreno and A. Robert, *Characterization of edge effects in twisted nematic liquid crystal displays*, Opt. Eng. 39, 3301 (2000)

-
- [9] A. Márquez, C. Iemmi, C. Moreno, J. Davis, J. Campos and M. Yzuel, *Quantitative prediction of the modulation behavior of twisted nematic liquid crystal displays*, Opt. Eng. 40, 2558 (2001)
- [10] A.Márquez, C.Iemmi, J.C.Escalera, J.Campos, S.Ledesma, J.A.Davis and M.J. Yzuel, *Amplitude apodizers encoded onto Fresnel lenses implemented on a phase-only spatial light modulator*, Appl. Opt. 40, 2316 (2001)
- [11] M.G. Capeluto, C. La Mela, C. Iemmi and M. C. Marconi, *Scanning mechanism based on a programmable liquid crystal display*, Opt. Comm. 232, 107 (2004)
- [12] P. Yeh, *Photorefractive phase conjugators*, Proc. IEEE 80, 436 (1992)
- [13] J. With and A. Yariv, *Real time image processing via four wave mixing in a photorefractive medium* Appl. Phys. Lett. 37, 5 (1980)
- [14] B. Javidi, *Nonlinear joint power spectrum based optical correlation*, Appl. Opt. 28, 2358 (1989) .
- [15] H. Inbar and E. Marom *Matched phase only or inverse filtering with joint transform correlators*, Opt. Lett. 18, 1657 (1993)
- [16] Montes-Usategui M., Campos J. and Juvells I., *Computation of arbitrarily constrained synthetic discriminant functions*, Appl. Opt. 34 3904 (1995)
- [17] Javidi B. and Painchaud D., *Distortion-invariant pattern recognition with Fourier-plane nonlinear filters*, App- Opt. 35, 318 (1996)
- [18] Piestun R., Rosen J. and Shamir J., *Generation of continuous complex-valued functions of a joint transform correlator*, Appl. Opt. 33, 4398 (1994)
- [19] P. Refregier and B. Javidi, *Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding*, Opt. Lett. 20, 767 (1995)
- [20] T. Nomura, S. Mikan, Y. Morimoto, and B. Javidi, *Secure Optical Data Storage with Random Phase Key Codes by use of a Configuration of a Joint Transform Correlator*, Appl. Opt. 42, 1508 (2003).

-
- [21] U. Schnars, *Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms*, J. Opt. Soc. Am. A 11, 2011 (1994)
- [22] S. Lai and M.A. Neifeld, *Digital waveform reconstruction and its application to image encryption*, Opt. Comm. 178, 283 (2000)
- [23] E. Tajahuerce, O. Matoba, S. Verrall and B. Javidi, *Optoelectronic information encryption with phase-shifting interferometry*, Appl. Opt. 39, 2313 (2000)
- [24] C. Iemmi and C. La Mela, *Phase- only photorefractive joint transform correlator*, Opt. Comm. 209, 255 (2002)
- [25] C. La Mela and C. Iemmi. *Distortion-tolerant Photorefractive joint transform correlator*, J. Opt. A 6, 894 (2004)
- [26] C. La Mela and C. Iemmi, *Joint-transform correlator tolerant to distortions of the objects to detect*, in 5th Iberoamerican Meeting on Optics and 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications, A. Marcano O. and J. Paz Eds, Proc. SPIE 5622, 1304 (2004)
- [27] C. La Mela and C. Iemmi, *Optical encryption using phase-shifting interferometry in a joint transform correlator*, Opt. Lett. 31, 2562 (2006)
- [28] J.W Goodman, *Introduction to Fourier Optics* McGraw-Hill, New York , second edition (1996)
- [29] P. Elias, D. S. Gray and D. Z. Robinson *Fourier treatment of optical processes* J. Opt. Soc. Am. 42,127 (1952)
- [30] P. Elias, *Optics and communication theory*, J. Opt. Soc. Am. 43, 229 (1953)
- [31] D. Gabor, *A new microscope principle* Nature 161, 777 (1948)
- [32] A. Papoulis, *The Fourier integral and its applications*, McGraw-Hill Book Company, New York, (1962)

-
- [33] A.V. Oppenheim and J.S.Lim, *The importance of phase in signals*, Procc.IEEE 69,529 (1981)
- [34] J.L. Horner and P.D. Gianino, *Phase only matched filter*, App. Opt. 23, 812 (1984)
- [35] E. L. O'Neill, *Spatial filtering in optics*, IRE. Trans. Inform. Theory, IT- 2, 56 (1956)
- [36] D. Casasent, *Unified synthetic discriminant function computational formulation*, Appl. Opt. 23, 1620 (1984)
- [37] O. Bryngdahl and F. Wyroski, *Digital holography - Computer generated holograms*, E. Wolf Ed. Progress in optics 28, Elsevier Sience Publishers (1990)
- [38] C. F. Hester and D. Casasent, *Multivariant technique for multiclass pattern recognition*, Appl. Opt. 19, 1758 (1980)
- [39] BVK Vijaya Kumar, *Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators*, Appl. Opt. 31, pp. 4773 (1992).
- [40] A. Mahalanobis, BVK Vijaya Kumar and D. Casasent, *Minimum average correlation energy filters*, Appl. Opt. 26, 3633 (1987)
- [41] BVK Vijaya Kumar, *Minimum-variance synthetic discriminant functions*, J. Opt. Soc. Am. A 3 1579 (1986)
- [42] J. L. Horner and P. D. Gianino, *Applying the phase-only filter concept to the synthetic discriminant function correlation filter*, Appl. Opt. 24, 851 (1985)
- [43] D. Casasent and W. Rozzi, *Computer-generated and phase-only synthetic discriminant function filters*, App. Opt. 25, 3767 (1986)
- [44] H.K. Liu, J.A. Davis and R. A. Lilly, *Optical data processing of a liquid crystal television spatial light modulator*, Opt. Lett. 10, 635 (1985)

-
- [45] S. Ledesma, C. Iemmi, J. Campos and M.J. Yzuel, *Joint transform architecture with a single LCTV operating in phase-mostly mode*, Opt. Comm. 151, 101 (1998)
- [46] F.T.S. Yu, S. Jutamulia, T.W. Lin and D.A. Gregory, *Adaptative real time pattern recognition using a liquid crystal TV based joint transform correlator*, App. Opt. 26, 1370 (1987)
- [47] F.T.S. Yu and X.J. Lu, *A real time programmable joint transform correlator*, Opt. Comm. 52, 10 (1984)
- [48] F.T.J. Johnson, T.H. Barnes, T.G. Haskell and K. Matsuda, *Analysis of a joint transform correlator using a phase-only spatial light modulator*, Opt. Eng.30, 1947 (1991)
- [49] H. Rajbenbach, S. Bann, Ph. Réfrégier, P. Joffre, J. Huignard, H. Buchkremer, A. Jensen, E. Rasmussen, K. Brenner and G. Lohman, *Compact photorefractive correlator for robotic applications*, Appl. Opt. 31, 5666 (1992)
- [50] B. Javidi, *Nonlinear joint power spectrum based optical correlation*, Appl. Opt. 28, 1027 (1989)
- [51] J. Van Haaren, *Wiping out dirty displays*, Nature 411, 29 (2001)
- [52] H.M. Smith, *Principles of holography*, Wiley-Interscience, New York (1969)
- [53] D.M. Pepper, J. AuYeng, D. Fekete, A. Yariv, *Spatial convolution and correlation of optical fields via degenerate four-wave mixing*, Opt. Lett. 3, 7 (1978)
- [54] D.T.H. Liu and L. Cheng, *Real time Vander Lugt optical correlator that uses photorefractive GaAs*, App. Opt. 31, 5675 (1992)
- [55] P. Günter, *Holography, coherent light amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials*, North-Holland publishing company, Amsterdam (1982)
- [56] Handbook of optics, second edition, Mc. Graw-Hill. Inc. (1995)

-
- [57] A. Yariv and P. Yeh, *Optical waves in crystals*, John Wiley & Sons, New York (1984)
- [58] J.P. Herriau, J.P. Huignard and P. Auborg, *Some polarization properties of volume holograms in Bi12SiO20 crystals and applications*, *App. Opt.* 17, 1851 (1978)
- [59] B. Javidi, J. Wang and Q. Tang, *Nonlinear joint transform correlators*, *Appl. Opt.* 27, 523 (1994)
- [60] R. Kallman and D. Goldstein, *Phase encoding input images for optical pattern recognition*, *Opt. Eng.* 33, 1806 (1994)
- [61] K. Styczynski, J. Campos, M.J. Yzuel and K. Chalasinska-Macukow, *New arrangement for limited intensity invariance pattern recognition with high diffraction efficiency*, *Opt. Comm.* 118, 193 (1995)
- [62] G. Lu, Z. Zhang and F.T.S. Yu, *Phase encoded input joint transform correlator with improve pattern discriminability*, *Opt. Lett.* 20, 1307 (1995)
- [63] Mendlovic D, Marom E and Konforti N, *Complex reference- invariant joint-transform correlator* *Opt. Lett.* 15 1224 (1990)
- [64] J. Rosen, U. Mahlab and J. Shamir, *Complex reference discriminant functions implemented iteratively on joint transform correlator*, *Appl. Opt.* 30, 5111 (1991).
- [65] N. J. Cook, A. Carnicer, S. Vallmitjana, I. Juvells, C. M. Cartwright and W. A. Gillespie, *Implementation of a photorefractive binary joint transform correlator*, *J. Opt. Soc. Am. B* 15, 1977 (1998)
- [66] O. Matoba and B. Javidi, *Optical retrieval of encrypted digital holograms for secure real-time display*, *Opt. Lett.* 27, 321 (2002)
- [67] T. Nomoura and B. Javidi, *Optical encryption system with a binary key code*, *Appl. Opt.* 39, 4783 (2000)

-
- [68] T. Nomoura and B. Javidi, *Optical encryption using a joint transform correlator architecture*, Opt. Eng. 39, 2031 (2000)
- [69] J. H. Burning, D. H. Herriott, J. E. Gallagher, D.P. Rosenfeld, A.D. White and D.J. Barangaccio, *Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses*, Appl. Opt. 13, 2693 (1974)