

Tesis de Posgrado

Síntesis de filtros compuestos para el reconocimiento de múltiples formas en simultáneo

Villarreal, Mirta

2003

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Villarreal, Mirta. (2003). Síntesis de filtros compuestos para el reconocimiento de múltiples formas en simultáneo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3541_Villarreal.pdf

Cita tipo Chicago:

Villarreal, Mirta. "Síntesis de filtros compuestos para el reconocimiento de múltiples formas en simultáneo". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2003. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3541_Villarreal.pdf

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Física

*Síntesis de filtros compuestos para el
reconocimiento de múltiples formas en simultáneo*

por Mirta Villarreal

Director de Tesis: Dr. Claudio Iemmi

**Lugar de Trabajo: Laboratorio de Procesado de Imágenes.
Departamento de Física.
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
Universidad de Buenos Aires.**

Trabajo de Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias Físicas

Marzo, 2003

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a las instituciones y gente que forman parte del proyecto Fomec quienes financiaron la beca que hizo posible mi doctorado.

A Claudio y a Silvia por recibirme en su grupo de trabajo, guiarme y acompañarme a lo largo de todos estos años.

A mis viejos por estar junto a mi en todo momento, apoyarme en todas las decisiones de mi vida y por darme todo lo que tengo.

A los chicos que vivieron el laboratorio conmigo. Ceci y Gaby que sufrieron conmigo la larga caracterización de las pantallas. Javi con quien luchamos cuerpo a cuerpo con la alineación del correlador y por llenar el espacio de música de lo más diversa. A Luz por su grata compañía a pesar de su insistencia en apagar la luz a cada rato! :) A todos juntos por haber compartido congresos maravillosos.

A Andrea y Alberto por su paciencia, por su amistad y por las computadoras que me dejaron usar y colgar en reiteradas ocasiones.

A Angela, Susana y Diana por todo lo que me dieron y por recibirme en todo momento.

A todos mis amigos por ser lo que son y estar ahí siempre.

Resumen

En el transcurso de esta tesis se han propuesto y desarrollado distintas técnicas para aumentar, por un lado, la capacidad de almacenamiento de filtros a usar en correladores ópticos y por otro, la cantidad de procesos de reconocimiento que pueden realizarse en simultáneo. Básicamente las técnicas propuestas pueden dividirse en aquellas orientadas para sintetizar filtros sobre material fotográfico, es decir materiales en donde la función a representar viene codificada como variaciones de amplitud; y aquellas desarrolladas para implementar los filtros sobre moduladores sólo de fase.

Se presentan dos métodos para generar filtros múltiples sobre película diapositiva color. En ambos el registro se lleva a cabo mediante el empleo de copiadoras digitales de alta resolución. El primero de ellos utiliza una apropiada combinación de colores del sistema RGB para almacenar diferentes partes de la información en canales independientes. El filtro así generado es utilizado en un correlador tipo Vander Lugt en el que se emplea una iluminación multiespectral. De esta manera es posible incrementar la cantidad de información a codificar en un filtro tradicional tantas veces como canales de color independientes se dispongan. El segundo método presentado se basó en la capacidad del material fotográfico para representar distintos niveles de gris. El método propuesto permite registrar directamente la función que representa la interferencia entre el haz objeto y la onda de referencia sin recurrir a los métodos binarios tradicionales para generar CGH, de este modo el filtro se comporta como un verdadero interferograma. Estos nuevos filtros poseen las mismas ventajas que tiene un holograma real por sobre el digital binario, como son la reconstrucción de tan sólo los órdenes 1, 0 y -1 y la posibilidad de manejar libremente la orientación y frecuencia de la onda portadora. Así, en los filtros compuestos por varios hologramas es posible seleccionar la posición de la respuesta al impulso brindada por cada uno de ellos sin distorsiones ni pérdidas de la información.

La segunda parte de la Tesis está orientada al diseño de filtros compuestos para ser utilizados en correladores en donde tanto la información de la escena de entrada como la correspondiente al filtro es representada en pantallas de TV de cristal líquido (LCD). Se estudian las configuraciones de polarización, para la luz incidente y emergente de las LCD, de modo que la utilizada para representar la escena module sólo la amplitud de la

onda incidente y la correspondiente al filtro sólo la fase. Dadas estas características los filtros diseñados contienen información sólo de fase y se obtienen al registrar directamente los valores de fase de los objetos a reconocer en lugar de una codificación en amplitud de los mismos. Los mismos presentan la ventaja de no reproducir en su respuesta al impulso la imagen conjugada; por consiguiente al implementarlo en un correlador no se forma la señal de convolución y libera esa zona del plano de salida para procesar más información. Este nuevo diseño nos permite aumentar no sólo la capacidad de almacenamiento de los filtros sino la cantidad de identificaciones simultáneas que pueden llevarse a cabo.

Palabras claves

Procesado óptico de la información.- Correladores multicanales.- Reconocimiento de formas

Abstract

In this Thesis we have proposed and developed several techniques to increase, on one hand, the storage capability of filters to be used in optical correlators, and on the other, the number of processes to be performed simultaneously. Basically, the proposed techniques can be separated in those orientated to synthesize filters onto photographic materials, i.e. materials in which the function to be represented have to be codified as amplitude variations; and those developed to be implemented on phase modulators.

We have presented two methods to generate composed filters onto color film slides. In both methods we used a high resolution film recorder machine to transfer the filter to the slides. The first one, employs an adequate combination of the RGB color system to storage different parts of the information in independent color channels. The generated filter is used in a Vander Lugt correlator with multi-spectral illumination. In this way, the amount of information usually codified by a traditional filter can be increased as many times as independent color channels are available. The second one is based on the capability of photographic films to represent different gray levels. The proposed method allows the direct implementation of the function obtained by the interference between an object beam and a reference wave without making use of the traditional binary techniques to generate CGHs, in this way the filter acts like a true interferogram. These new kind of filters offer the same advantages that a real hologram, i.e. only the 1, 0 and -1 orders are reconstructed and it is possible to control, in an arbitrary way, the direction of the reference wave. Moreover, as gray level filters are obtained, it is possible to add several holograms without distortions and misinformation.

The second part of this Thesis is orientated to the generation of composed filters to be used in optical correlators in which both, the input scene and the filter, are represented onto liquid crystal television displays (LCD's). We have studied configurations of light polarization states that allow to obtain pure amplitude modulation or phase pure modulation by using LCD's. In our case we chose to display the input scene as an amplitude function and the filter as a phase one. The proposed filters contain only phase information and no codification is needed to display them. The impulse response of these filters reconstruct only the real image; consequently the convolution signal is absent on the final plane and new places are now available to accommodate more

correlation channels. This new filter design technique allows us to increase not only the storage capability of filters but also the amount of information to be processed simultaneously.

Keywords

Optical information processing.- Multichannel correlators.- Pattern recognition

INDICE

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.1.1 <i>¿Tecnología óptica o digital?</i>	1
1.1.2 <i>Arquitecturas y filtros para reconocimiento óptico</i>	6
1.1.3 <i>Correladores multicanal</i>	8
1.1.4 <i>Implementación física de los filtros</i>	9
1.2 PROPÓSITO Y ESQUEMA	11
 CAPÍTULO 2	 15
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
2.1 SISTEMAS LINEALES: RESPUESTA AL IMPULSO Y FUNCIÓN TRANSFERENCIA....	16
2.2 CONVOLUCIÓN Y CORRELACIÓN ÓPTICA.....	19
2.2.1 <i>Configuraciones experimentales</i>	23
2.3 FILTRO DE VANDER LUGT Y SU APLICACIÓN AL PROBLEMA DE RECONOCIMIENTO ÓPTICO.....	28
2.3.1 <i>Sintetizado del filtro de Vander Lugt</i>	29
2.3.2 <i>Respuesta el filtro</i>	30
2.3.3 <i>Reconocimiento de formas</i>	32
2.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.....	35
2.4.1 <i>Relación señal-ruido (SNR)</i>	35
2.4.2 <i>Eficiencia Luminosa</i>	36
2.4.3 <i>Agudeza de pico</i>	37

2.4.4. Capacidad de Discriminación.....	38
2.5 REVISIÓN DE ALGUNOS FILTROS ORIENTADOS AL RECONOCIMIENTO DE FORMAS.....	38
2.5.1 Filtro sólo de fase: POF (<i>phase only filter</i>).....	38
2.5.2 Filtros compuestos de la familia SDF.....	40
CAPÍTULO 3	52
SÍNTESIS DE FILTROS COMPUESTOS SOBRE MATERIAL FOTOGRÁFICO	52
3.1 HOLOGRAFÍA DIGITAL.....	54
3.1.1 Método de codificación de Lee	54
3.2 MULTIPLEXADO EN COLOR.....	61
3.2.1 Análisis de la transmisión del film color.....	64
3.2.2 Filtro compuesto con información de un solo objeto por canal.....	70
3.2.3 Filtro compuesto con información de múltiples objetos por canal	76
3.3 SÍNTESIS DE HOLOGRAMAS COMPUESTOS EN NIVELES DE GRIS.....	80
3.3.1 Análisis comparativo entre los dos tipos de registro.....	82
3.3.2 Diseño de filtros múltiples en niveles de gris.....	84
3.3.3 Implementación de los filtros propuestos en un correlador.....	94
CAPÍTULO 4	101
SÍNTESIS DE FILTROS COMPUESTOS SOBRE PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO	101
4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO DE TV TIPO NEMÁTICO	103
4.1.1 Forma constitutiva del cristal líquido.....	103
4.1.2 Propiedades eléctricas y ópticas.....	104

4.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO.....	109
4.2.1	<i>Obtención y preparación de las pantallas.....</i>	110
4.2.2	<i>Obtención de los parámetros independientes del voltaje aplicado.....</i>	113
4.2.3	<i>Obtención de los parámetros $\beta(V)$ y $\delta(V)$ en función del voltaje.....</i>	117
4.2.4	<i>Modulaciones sólo de fase y sólo de amplitud.....</i>	119
4.3	IMPLEMENTACIÓN DE UN POF EN UN MODULADOR SÓLO DE FASE.....	127
4.4	FILTROS COMPUESTOS CON INFORMACIÓN SÓLO DE FASE.....	131
4.4.1	<i>Filtros con información de un solo objeto por canal.....</i>	131
4.4.2	<i>Filtros con información de varios objetos por canal.....</i>	146
CONCLUSIONES.....		152
REFERENCIAS.....		157

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

El procesamiento óptico de la información goza hoy en día de un creciente interés tanto en el área de la investigación básica como en sus aplicaciones en lo tecnológico. El motivo principal se encuentra en la naturaleza del método involucrado: el óptico, cuya particular característica es su capacidad de procesar una gran cantidad de información en forma totalmente paralela, siendo especialmente apropiado para realizar operaciones que involucren arreglos de muchos datos.

Una de las aplicaciones más atractivas del procesamiento óptico de la información es el reconocimiento de formas. Su finalidad es la de detectar la presencia de cierta forma u objeto contenido dentro de una escena compleja compuesta en la mayoría de los casos por otros objetos y probablemente enmascarada por ruido. La correlación óptica ha demostrado ser un método muy eficaz para implementar la comparación entre la

escena a analizar y el objeto blanco a detectar. La robótica, la teledetección, la visión artificial, el control de calidad, los sistemas de seguridad y la inteligencia artificial [Koc86] [Hor87] [Wid88] [Yu93] [Jav97] [Pu97] son varios de los campos de aplicación de esta técnica.

Históricamente los orígenes del procesamiento óptico se remontan a los primeros experimentos en donde el espectro de frecuencias de una imagen de entrada es intencionalmente modificado para obtener luego determinada información de ella o una versión modificada. El primero en realizar experimentos en óptica sobre este tema fue Abbe [Abb73] en 1873 y luego le siguió Porter [Por06] en 1906. Ellos iluminaron con luz coherente una red cuadrículada y colocaron en el plano donde se formaba su transformada de Fourier diversas máscaras para bloquear determinadas frecuencias espaciales. Estas máscaras o filtros, por ellos empleados, resultan ser los más elementales de todos ya que sólo modifican la amplitud de la onda entrante de manera de permitir su paso o bloquearlo totalmente. El primer filtro capaz de modificar la fase de la onda transmitida surgió con el microscopio de contraste de fase presentado en 1935 por el físico holandés Fritz Zernike [Zer35]. Él propuso una nueva técnica para poder relacionar cambios de fase con cambios de amplitud en forma lineal, sobre imágenes observadas con microscopios iluminados con luz coherente. Zernike se dio cuenta que la luz difractada por las muestras de bacterias se hallaba en cuadratura con el orden cero proveniente del fondo y por lo tanto no podía interferir y ser observada, pero si se ponían filtros que desfases en $\pi/2$ o $3\pi/2$ el orden cero se formaría interferencia y por lo tanto los cambios de fase introducidos por las bacterias producirían un cambio de intensidad de forma lineal. Estos filtros se podían realizar por ejemplo, evaporando en un pequeño sector central, una sustancia transparente con un espesor apropiado sobre un sustrato de vidrio. Por tal aporte, Zernike recibió el premio Nobel en 1953.

En general el filtrado espacial requiere de filtros complejos que modifiquen simultáneamente la fase y la amplitud de la imagen de entrada y no sólo una de ellas como en los ejemplos anteriores. La primera utilización de un filtro con tales características fue propuesta por Maréchal [Mar53] a comienzos de los años '50 quien lo empleó para la eliminación de efectos indeseados en fotografías (desenfoque, imágenes movidas, etc.).

La forma habitual de realizar los filtros complejos era bajo la superposición de máscaras que controlaban independientemente la fase y la amplitud de la función transferencia del filtro. El filtro de amplitud se lograba, en general, mediante películas fotográficas. La transmisión en fase se controlaba mediante filtros transparentes que presentaban adecuados cambios de espesor, pero resultaba bastante complicado combinar ambas máscaras incluso en filtros sencillos. Por otro lado no resultaba nada fácil crear filtros que representaran adecuadamente la fase de la función transmisión, debiéndose restringir éstas a funciones sencillas. Usualmente se empleaban métodos de evaporación, blanqueado o rayado de placas transparentes alcanzando no mucho más que dos niveles de fase.

Paralelamente, a principio de los años '50, comienza a iniciarse un intercambio entre la óptica y la teoría de las comunicaciones. Las similitudes halladas entre los problemas de óptica y los problemas de filtrado óptico, detección y estimación estudiados en la teoría de comunicaciones incentivaron este intercambio. Algunos de los iniciadores fueron Peter Elias y sus asociados D. S. Gray y D. Z. Robinson con la publicación de un trabajo en la que incluían el tratamiento de Fourier en la óptica [Eli52], y nuevamente Elias con una investigación realizada un año después [Eli53]. Sin embargo, la verdadera unión entre ambos puntos de vista fue provista por el físico E. L. O'Neill con la publicación de un trabajo sobre filtrado espacial en óptica en 1956 [Nei56].

Para entonces y mientras esto se hallaba en pleno desarrollo, Dennis Gabor [Gab48] en 1948 encontró que cuando se superponía un haz plano coherente con la luz difractada por un objeto, tanto la información de la fase como de la amplitud podía ser grabadas en un medio de registro fotográfico a pesar de ser éstos sólo sensibles a cambios de intensidad. Gabor demostró también que iluminando apropiadamente este registro de interferencia el objeto original podía ser reconstruido. A este registro lo llamó *holograma*.

A pesar de lo novedoso de su descubrimiento, éste no tuvo al comienzo mucha repercusión, debido en parte, a que su método reconstruía superpuesto al objeto original otro conjugado y además por la falta de fuentes con alta coherencia. Algunos años después la conjunción de dos aportes brindó un nuevo impulso a la holografía. Uno de ellos surgió en 1960 con la invención del láser que proveyó una fuente luminosa

altamente coherente. El otro provino de las modificaciones que dos investigadores de la Universidad de Michigan, E. N. Leith y J. Upatnieks [Lei62] hicieron sobre el holograma de Gabor. En la nueva propuesta el haz plano de referencia se hacía interferir con la onda difractada a un ángulo distinto de cero respecto a ésta, a diferencia del de Gabor en donde se utilizaba la misma luz transmitida por el objeto que no había sido difractada, como haz plano. De esta manera, las reconstrucciones del objeto original y la del conjugado quedaban separadas.

Una de las aplicaciones de este nuevo elemento óptico fue sugerida por Vander Lugt en 1964, otro investigador del Radar Laboratory de la Universidad de Michigan, quien propuso extender este método a la construcción de filtros complejos. El filtro de Vander Lugt [Van64] emplea las técnicas interferométricas en el plano de Fourier para registrar en un mismo medio fotográfico la fase y la amplitud de la función transmisión del filtro. Su particular diseño permitió implementar ópticamente la operación de correlación y constituyó el inicio de las investigaciones en el área de reconocimiento óptico. El correlador de Vander Lugt es una de las dos arquitecturas básicas que se utilizan en el presente para realizar el reconocimiento óptico de formas y es la que se empleó en esta tesis.

En la actualidad los avances en tecnología electrónica y digital han permitido optimizar el desempeño del correlador, ya sea a través de la incorporación de filtros generados en forma computacional o a través de elementos ópticos de superior calidad.

1.1.1 ¿Tecnología óptica o digital?

En cualquier campo de la investigación, un proceso evolutivo resulta más eficiente si se halla acompañado por un desarrollo en las demás áreas que lo complementen y a la vez lo confronten. Esto es lo que ha comenzado a suceder en los últimos tiempos entre la tecnología electrónica-digital y la óptica.

En el campo del procesamiento de datos, el auge que han tenido los procesos digitales en los últimos años ha abierto un camino alternativo para tratar con las distintas aplicaciones e incluso, en varios casos, ha llegado momentáneamente a reemplazar a los métodos ópticos. Nuevos y cada vez más eficientes algoritmos computacionales, junto con una gran cantidad de elementos electrónicos de alta calidad

y computadoras cada vez más rápidas y eficientes, han convertido a la tecnología digital en una fuerte competidora de la óptica. La automatización de procesos, el almacenamiento y transmisión de datos con procedimientos enteramente electrónicos y las redes neuronales son varios ejemplos por donde lo digital ha estado transitando.

No obstante, la tecnología óptica sigue teniendo ciertas ventajas por sobre la digital que difícilmente puedan ser superadas en algún futuro ya que subyacen en la naturaleza misma de ella. Si hacemos un cuadro comparativo entre ambos tipos de procesos encontramos varios puntos a favor de los ópticos. Por un lado la velocidad de propagación de la información entre ambos es notoriamente distinta si consideramos que la transmisión electrónica, a cargo de los electrones, es bastante menor que la óptica que precisamente viaja a la velocidad de la luz. Por otro lado, la luz trabaja naturalmente en forma paralela mientras que los electrones lo hacen en forma serial.

En síntesis, el paralelismo inherente que habilita a todo sistema óptico a realizar multiprocesos en forma simultánea y su capacidad de manejar una gran cantidad de información al mismo tiempo con baja energía y a la velocidad más alta posible, le sigue otorgando grandes ventajas por sobre los sistemas computacionales. Un ejemplo de ello en procesamiento de información lo encontramos en la transformada de Fourier, incluso el algoritmo FFT de transformada rápida (fast Fourier transform), uno de los más eficientes en la actualidad, no llega a igualar a la forma óptica de realizar esta operación. Sin embargo, la desventaja que se le adjudica a un proceso puramente óptico es su carácter analógico, lo cual imposibilita que el paquete de información, transportado por la onda luminosa pueda ser manejado punto a punto como es el caso de una matriz de datos digitales.

Podemos afirmar que la introducción de los avances alcanzados en tecnología digital contribuyeron a potenciar las características de los procesos ópticos mediante la incorporación de diverso material opto-electrónico y algoritmos muy eficientes de interfase para la realización de simulaciones numéricas y para el sintetizado de componentes ópticos imposibles de generar de otro modo.

Es por ello que las investigaciones e implementaciones en procesamiento de la información se dirigen hacia la creación de sistemas híbridos en donde se puedan combinar el alto paralelismo de la óptica con la precisión de la electrónica digital. Es en

esa dirección en que esta tesis se orientó con el objetivo de aportar nuevas y mejores soluciones al problema del reconocimiento de formas múltiples.

1.1.2 Arquitecturas y filtros para reconocimiento óptico

Existen dos arquitecturas básicas para realizar el proceso de reconocimiento a partir de las cuales ha surgido un extenso número de variantes con el fin de optimizar los sistemas. Una de dichas arquitecturas es la introducida originalmente por Vander Lugt mencionada en la primera sección. Otra arquitectura utilizada para el reconocimiento de formas es la correspondiente al correlador por transformada conjunta ideado por Weaver y Goodman [Wea66]. Cada una de ellas posee características particulares que hacen que una sea más adecuada que la otra según el tipo de proceso que desee llevarse a cabo.

En el correlador por transformada conjunta, a diferencia del de Vander Lugt, tanto la escena a analizar como la información del objeto a detectar se representan, uno al lado del otro, en el plano de entrada. La ventaja de este montaje es que no hace falta la precisa alineación que requiere el correlador de Vander Lugt debido a que no se emplean filtros, por otra parte resulta muy adecuado para implementar procesos a tiempo real. Como desventaja se tiene por un lado, una reducción en el ancho de banda disponible del material de registro, debido a que debe compartirlo con la información del objeto a detectar. Por otro lado, los datos del objeto a reconocer se colocan en el plano espacial y no en el de frecuencias por lo que no resulta nada sencillo incorporar variantes que mejoren la calidad de detección y aumente el número de canales de procesado.

El correlador de Vander Lugt en cambio, es particularmente apropiado para la implementación de filtros que optimicen distintos parámetros de rendimiento así como para el procesado multicanal, a costa de requerir una prolija alineación y ocupar más espacio físico. Desde la introducción del filtro de Vander Lugt también llamado filtro clásico adaptado, las sucesivas exigencias impuestas al proceso de detección junto con los avances tecnológicos alcanzados han impulsado al diseño de numerosos filtros con diferentes características. Por ejemplo, puede ser que el objetivo del diseño sea la determinación de un objeto particular sin importar su ángulo de rotación o tamaño o,

puede darse la situación opuesta, en la que se desea que estos cambios resulten críticos en el proceso de detección. Otro requerimiento que se le pide a un filtro es que su capacidad de detección no se vea disminuida ante la presencia de ruido en la escena y que tenga buen poder de discriminación, es decir, que pueda diferenciar claramente entre el objeto a detectar y objetos similares pero no buscados.

Existen filtros diseñados para cada exigencia, aunque es difícil lograr uno que sea óptimo en todas. El filtro clásico de Vander Lugt, por ejemplo, no es sensible ante la presencia de ruido y sí lo es ante cambios de tamaño u orientación del objeto, pero no posee buen poder de discriminación. El filtro POF (phase only filter) propuesto por Horner y Gianino [Hor84], en donde la amplitud de la transmisión del filtro es removida y sólo se retiene la información de fase, suele presentar muy buena capacidad de discriminación y mejora notablemente la eficiencia luminosa, pero es más sensible a la presencia de ruido que el de Vander Lugt aunque éstos sean muy similares.

La mayoría de los filtros surgidos posteriormente al clásico en general no pueden ser generados ópticamente por lo que se hace necesario recurrir a técnicas computacionales. El surgimiento de los hologramas generados por computadora (CGH) [Bro66] [Lee70] [Lee74] permitieron implementar filtros que no se podían realizar por medios ópticos convencionales por provenir, en general, de funciones matemáticas no correspondientes a objetos existentes. El primer CGH fue propuesto por Lohmann y Brown [Bro66] en 1966 y a partir de éste han surgido distintos algoritmos alternativos. El método básico que comparten todos ellos es la codificación de la amplitud y la fase de la función transferencia del filtro de modo que ambas puedan ser registradas en un medio de amplitud, asemejándose el holograma final a una especie de interferograma. Este importante avance en materia de implementación de filtros hizo que la holografía digital se establezca por completo en el campo del reconocimiento óptico.

La búsqueda de filtros capaces de reconocer distintas perspectivas o tamaños de un mismo objeto ha despertado el interés de numerosos investigadores. Así se han diseñado, por ejemplo, filtros compuestos por la superposición de filtros clásicos, cada uno adaptado a una versión distinta de un mismo objeto. Otra propuesta fue la de realizar transformaciones sobre la imagen de entrada al sistema para lograr correlaciones que sean invariantes ante cambios de escala y rotación [Cas76], estas se basaron en las transformaciones de Mellin y Fourier. Otra propuesta fue la de generar

filtros invariantes ante rotaciones del objeto [Hsu82] lo que requiere un desarrollo de la función a sintetizar en armónicos circulares. Otra línea de filtros múltiples se abrió con la introducción del filtro discriminante o SDF (synthetic discriminant function), desarrollado por Hester y Cassasent [Hes80], en donde se suman distintos objetos ponderados, de modo tal, de reconocer a algunos y discriminar a otros. A partir de su inserción varias han sido las modificaciones que ha tenido, surgiendo a partir de allí una familia de SDFs optimizados para mejorar distintos criterios de rendimiento [Bah88] [Vij92]. Por ejemplo, los filtros introducidos por Mahalanobis y Vijaya Kumar utilizan ciertos grados de libertad, presentes en el original SDF para exigir una minimización de la energía media de salida (MACE: minimum average correlation energy) [Mah87] o poca sensibilidad ante ruido en la entrada (MVSDF: minimum variance SDF) [Vij86] respectivamente.

1.1.3 Correladores multicanal

Si bien el paralelismo inherente a los sistemas ópticos permite el proceso de muchos datos en forma simultánea, es de interés potenciar aún más esta característica mediante el diseño de sistemas cada vez más rápidos y eficientes. Se puede decir que el logro de este objetivo requiere del estudio de dos tópicos, uno de ellos hace hincapié en la arquitectura del correlador, analizando los diversos montajes que pueden implementarse para procesos multicanal. El otro se centra en el diseño de filtros que permitan aumentar la densidad de información que pueda almacenarse en ellos.

Distintas arquitecturas han sido propuestas para realizar el procesado en paralelo, la mayoría de ellas, basadas en el correlador de Vander Lugt. Case [Cas79] empleó la codificación por longitud de onda para registrar distintos filtros adaptados a objetos diferentes sobre una misma película holográfica. Estos filtros usados en correladores incoherentes producen correlaciones con un código de color que permite identificar los objetos en forma simultánea. Yu et al [Yu88] presentaron una técnica para realizar correlaciones múltiples por medio de una red de difracción visualizada en un modulador espacial de luz (SLM) en donde la orientación de la red se hacía variar secuencialmente. Upatnieks et al. [Upa90] diseñaron un elemento óptico difractivo que les permitió obtener varias réplicas de las transformadas de Fourier de la imagen de entrada

separadas espacialmente. Sheng et al. [She92] y Mendlovic et al. [Men95] propusieron procesadores multicanal para la implementación de transformadas wavelet. Vargas et al. [Var98] presentaron un correlador multicanal basado en la estructura pixelada de un modulador espacial de luz. En este sistema cada orden difractado por la pantalla de cristal líquido, donde se representa la escena de entrada, se utiliza como un canal diferente de correlación colocando un filtro distinto en cada uno de ellos.

Independientemente del número de canales empleados, la cantidad de información que se procesa simultáneamente puede incrementarse con la utilización de filtros compuestos. Como veremos, la capacidad de almacenamiento de estos filtros depende no sólo del diseño de los mismos sino también del medio en el cual se implementan.

1.1.4 Implementación física de los filtros

Cualquiera sea el filtro a emplear se hace necesario recurrir a algún procedimiento para llevar tanto la fase como la amplitud de la función transferencia a un medio físico que pueda ser inserto en un correlador óptico. La técnica holográfica de Vander Lugt y las demás propuestas derivadas de ella son especialmente apropiadas cuando se usan medios sensibles a variaciones sólo de intensidad. Los primeros filtros de este tipo se registraban en materiales holográficos mediante procedimientos ópticos, recurriendo a técnicas de multi-exposición en caso de sintetizar hologramas compuestos. Las técnicas de blanqueado de películas por otra parte, han permitido convertir variaciones de amplitud en fase y así aumentar la eficiencia luminosa.

La introducción de los métodos digitales para la codificación de la fase y la amplitud de una función ha permitido, reemplazar las técnicas ópticas tradicionales de registro holográfico. Los primeros CGHs se dibujaban en gran tamaño y luego se generaba el filtro tomando una fotorreducción. Un salto de calidad importante se obtuvo con la aparición de las impresoras guiadas directamente por una computadora. Si bien los mismos también debían fotorreducirse, el proceso era mucho más sencillo y preciso. Posteriormente las impresoras para artes gráficas (linotronic) permitieron imprimir directamente el holograma en material fotográfico blanco y negro con alta resolución (3000 puntos por pulgada aproximadamente). Otros métodos como la litografía láser es empleado cuando se requiere de máscaras de alta precisión.

Independientemente de la resolución del medio empleado los métodos usuales de generación de CGH producen filtros binarios. Esta codificación binaria impone una limitación en la cantidad de información que puede almacenarse en el filtro ya que un aumento del número de objetos almacenados se traduce en un aumento en la cantidad de zonas negras con la consecuencia de un decrecimiento de la eficiencia óptica y el bloqueo de zonas no deseadas. Por otra parte las posiciones en las que pueden ser reconstruidos diferentes objetos codificados en el filtro se hallan también limitadas por este tipo de registro binario. Actualmente la existencia de materiales fotográficos color de alta resolución junto con impresoras especiales para llevar los archivos computacionales al film nos ha permitido introducir otras técnicas para la generación de filtros múltiples que superan las limitaciones del registro blanco y negro. Esto será expuesto en detalle en el capítulo 3.

Paralelamente al desarrollo de materiales gráficos de impresión, y sobre todo en los últimos años, se incorporaron a los procesos ópticos elementos electro-ópticos como por ejemplo ciertos tipos de cristales fotorrefractivos y las pantallas de cristal líquido (LCD). Estos son elementos ópticos difractivos capaces de representar imágenes y modular por consiguiente una onda luminosa transmitida. A diferencia de los medios fotográficos o litográficos de carácter estático, los moduladores espaciales de luz (SLM) electrónicos trabajan dinámicamente cambiando su respuesta conforme varíe ya sea un campo eléctrico aplicado en sus extremos (es el caso de los LCD [Coll97]) o la onda luminosa usada para grabar imágenes en el cristal (caso de los cristales fotorrefractivos [Cou00]). Mediante la representación de imágenes en estos medios, una onda luminosa que lo atraviese verá modificada tanto su fase como su amplitud [Bor88] [Liu89] [Gre92]. En general en los moduladores de cristal líquido, utilizados para displays o como pantallas de TV (LCTV), las moléculas del cristal se hallan dispuestas en una estructura helicoidal. Ello ocasiona que la modulación de ambas magnitudes se produzca en forma acoplada pero estudios hechos recientemente han revelado que es posible desacoplarlas consiguiendo una modulación sólo de fase o sólo de amplitud. Esto se logra eligiendo adecuadamente los estados de polarización de la luz incidente y emergente del modulador, dependiendo esta elección, de las características propias del cristal [Mar00] [Mar01]. Este hallazgo permite emplear estas pantallas tanto para representar imágenes sólo de amplitud o para obtener elementos sólo de fase como por

ejemplo lentes o determinado tipo de filtros. Dado que es posible controlar directamente píxel a píxel el valor de fase deseado no es necesaria una codificación de la misma. Esto último, como se verá en el capítulo 4, permitirá aumentar el número de canales de reconocimiento en simultáneo.

1.2 Propósito y esquema

El tema de investigación de esta Tesis Doctoral es el diseño y síntesis de filtros compuestos que permitan aumentar la cantidad de información a ser procesada simultáneamente en un correlador óptico. Básicamente se estudiaron dos alternativas: en una de ellas se desarrollaron métodos para incrementar la cantidad de información que puede almacenarse en materiales fotográficos; la otra estuvo orientada a la implementación de nuevos filtros compuestos en pantallas de cristal líquido de T.V de alta resolución.

Previamente a describir los logros de esta tesis es necesario introducir los fundamentos teóricos básicos que involucran los procesos de reconocimiento óptico y que se usarán en los capítulos 3 y 4. Así en el capítulo 2 se presentarán primero los conceptos básicos de la teoría de sistemas lineales, a la que se ajustan los procesos ópticos de formación de imágenes. Introduciremos luego los conceptos de correlación y convolución óptica y los montajes experimentales usados para obtenerlas. A continuación describiremos el filtro de Vander Lugt, dada su importancia como precursor en la implementación de las operaciones involucradas en el reconocimiento de formas. Se presentarán los distintos criterios de rendimiento que usualmente se utilizan para evaluar el desempeño de los filtros empleados en un correlador y que hemos aplicado a lo largo de este trabajo.

El capítulo 3 está destinado al estudio del diseño y construcción de filtros múltiples sobre material fotográfico. Si bien las pantallas de cristal líquido han comenzado a reemplazar a los materiales fotográficos de registro en los procesos ópticos de reconocimiento, éstos últimos siguen siendo más prácticos cuando se busca implementar filtros de carácter estático, es decir, cuando el registro se hace una sola vez

quedando fija la información almacenada. Esto resulta cómodo en procesos no dinámicos en donde el uso de materiales que trabajen a tiempo real como las LCTV sólo encarecerían innecesariamente el proceso. En la primera parte de este trabajo se buscó por lo tanto ampliar la capacidad de almacenamiento de filtros sobre material fotográfico, estudiando diseños que posibiliten reconocer distintos objetos en forma simultánea. La gran mayoría de hologramas digitales son generados como para ser representados en materiales fotográficos de respuesta binaria. Un CGH binario codifica la transmisión compleja mediante franjas o rectángulos negros sobre un fondo transparente. La suma de más de un filtro en la misma impresión genera, a su vez más zonas oscuras que se mezclan y superponen con las anteriores. Los efectos que esto trae aparejado son una disminución de la eficiencia luminosa, posibles pérdidas de información y limitaciones en la cantidad de objetos a codificar. Con el fin de superar estos inconvenientes proponemos dos técnicas alternativas.

La primera parte de este capítulo está destinada a describir los pasos seguidos para obtener un filtro compuesto a partir de la superposición de filtros binarizados mediante la técnica de Lee [Lee74], pero diseñados para ser impresos sobre material de registro color en lugar de blanco y negro. Este método se basa en la posibilidad que tiene una película color de triplicar en principio, la cantidad de información que puede almacenarse en cada filtro ya que cada color primario (rojo, verde y azul) puede operar en forma separada como el blanco y negro utilizado usualmente en películas binarias. Insertado en un correlador policromático, cada color actúa de este modo como un canal de reconocimiento distinto sin existir pérdida de información en la superposición, ni una disminución en la eficiencia luminosa. Se describe, en este capítulo el método propuesto de codificación y almacenamiento de hologramas. Asimismo se muestra un análisis espectroscópico de las películas color a emplear en el registro de los filtros. Se presenta la arquitectura multicanal del correlador empleado para el proceso de reconocimiento y los resultados alcanzados con el mismo. Dichos resultados fueron publicados en [Led99][Vil98].

La segunda técnica propuesta consiste en reemplazar el carácter binario de los filtros por uno que contemple distintos niveles de gris y emplear material fotográfico no binario para su registro. La función transferencia de estos filtros se codifica ya no usando los CGHs de salidas binarias sino discretizando la transmisión en 255 niveles de

gris. El filtro resultante es similar a un verdadero interferograma, cuyas principales características son por un lado, que permite variar en forma totalmente controlada la posición en la que se obtendrá la reproducción de cada objeto y por lo tanto su señal de correlación; por otro que permite sumar distintos filtros sin pérdida de información. En la segunda mitad del capítulo 3 se muestra el desarrollo que nos llevó a la generación de estos interferogramas digitales y la posterior síntesis de filtros compuestos en niveles de grises sobre película color. En este caso también se describe el montaje experimental utilizado y se presentan los resultados alcanzados. Cabe destacar que los filtros generados a partir de esta segunda técnica también resultan adecuados para su implementación sobre LCTVs, pudiendo en este caso cambiarse dinámicamente. Parte de los resultados alcanzados se encuentran publicados en las referencias [Iem99], [Iem00]

El capítulo 4 está destinado a mostrar los estudios que condujeron al diseño e implementación de filtros múltiples de fase sobre pantallas de cristal líquido.

Si bien en los últimos tiempos las pantallas de cristal líquido tipo TV han comenzado a incorporarse en correladores ópticos para representar la escena de entrada y los filtros en el plano transformado, los filtros que se han utilizado hasta el momento no difieren en su diseño de los registrados sobre material fotográfico. Es decir, son generados empleando los algoritmos que proveen una salida binaria, por lo que no se aprovechó la capacidad que poseen los moduladores de representar niveles de gris. Por otro lado las LCTVs se han usado en configuraciones estándar donde modulan no sólo la amplitud sino también la fase de la onda transmitida.

Nuestra propuesta es usar configuraciones desacopladas de fase y amplitud para representar filtros de fase con módulo unitario y escenas en niveles de gris en correladores ópticos tipo Vander Lugt. Los nuevos filtros propuestos no emplean los habituales métodos de codificación de la transmisión compleja en valores sólo de amplitud sino que aprovechan la configuración sólo de fase para implementar directamente la fase de la función transmisión como un auténtico Kinoform [Les69]. Este tipo de implementación no produce en la respuesta al impulso la imagen conjugada de los objetos almacenados y como consecuencia no se obtiene la convolución en el

plano de salida del correlador. Esta liberación de canales de procesado en el plano de salida permite aumentar el número de objetos a reconocer en forma simultánea.

En este capítulo se describe primero el método utilizado para caracterizar las pantallas de cristal líquido de TV tipo nemático que se emplearon en este trabajo. El conocimiento de estos parámetros constitutivos es fundamental para poder hallar las configuraciones de polarización necesarias para que el dispositivo module sólo la fase ó sólo la amplitud de la onda transmitida. Se describen, a continuación, los filtros propuestos para ser representados en estos moduladores de fase y se evalúa su comportamiento mediante simulación numérica y en forma experimental. Algunos de los resultados aquí presentados se hallan publicados en las referencias [Vil01], [Vil03]

Finalmente se expondrán las conclusiones, se discutirán los resultados de los trabajos realizados y se remarcarán los logros obtenidos en base a los objetivos propuestos. Para finalizar se comentarán los temas de investigación que quedan abiertos a partir de este trabajo.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Introducción

Son muchos los fenómenos físicos que comparten la característica de otorgar una respuesta a un conjunto de estímulos, que actúan simultáneamente, igual a la suma de las respuestas que producirían los estímulos actuando individualmente. Los sistemas que cumplen con esta propiedad se denominan lineales. En particular en el campo de la óptica, las operaciones de formación de imágenes y el procesado óptico de la información son fenómenos que pueden tratarse dentro de la teoría de sistemas lineales. El conocimiento de esta teoría es fundamental para el análisis de los mismos y por tal motivo comenzaremos este capítulo presentando algunas propiedades básicas de estos sistemas. Los conceptos de correlación y convolución óptica serán introducidos a continuación junto con los fundamentos del filtrado espacial. Presentaremos, luego, el

filtro de Vander Lugt, dada su importancia en el problema de reconocimiento de formas. Posteriormente describiremos los filtros que sirvieron de base para el desarrollo de los que fueron empleados a lo largo de esta tesis; asimismo se presentarán los criterios de rendimiento que se usaron para evaluarlos.

2.1 Sistemas lineales: respuesta al impulso y función transferencial

En el campo de la óptica y especialmente en lo referente a formación de imágenes, se define *sistema* a una transformación que a un conjunto de funciones de entrada lo lleva a otro conjunto de funciones de salida. En óptica estas funciones son de dos variables y tanto la entrada como la salida pueden ser reales o complejas. Simbólicamente podemos expresar una transformación general $\tau\{ \}$ que actuando sobre la entrada $g(x,y)$ entrega una salida $f(x,y)$

$$\tau\{g(x,y)\} \rightarrow f(x,y) \quad (2-1)$$

Este sistema puede definirse como lineal cuando la respuesta a una entrada compuesta por varias funciones puede expresarse como la suma de las respuestas individuales a cada función. Si una imagen de entrada $g_1(x,y)$ produce una salida $f_1(x,y)$ y otra imagen de entrada $g_2(x,y)$ produce la respuesta $f_2(x,y)$, un sistema lineal ante la entrada $g_1 + g_2$ entrega

$$T\{a g_1(x,y) + b g_2(x,y)\} \rightarrow a f_1(x,y) + b f_2(x,y) \quad (2-2)$$

donde a y b son constantes. El agregado de estas constantes en (2-2) expresa junto con la *propiedad aditiva* que define a todo sistema lineal, otra propiedad que da cuenta de la preservación del factor de escala, condición conocida como *homogeneidad*.

El principio de *superposición* también se cumple en todo sistema lineal el cual expresa que la presencia de una imagen de entrada no debe afectar la respuesta debida a las otras imágenes de entrada.

La *invarianza ante traslaciones* es otra característica de muchos sistemas lineales que ocurre generalmente sólo en regiones limitadas. Esta propiedad expresa que un corrimiento en la entrada se traslada a un similar corrimiento en la salida sin involucrar deformación alguna

$$T\{g(x-x', y-y')\} \rightarrow f(x-x', y-y') \quad (2-3)$$

En particular en óptica, un sistema lineal que cumple con esta propiedad recibe el nombre de *isoplanático*.

La *estabilidad* es otra propiedad compartida por los sistemas lineales e indica que una entrada de dominio limitado conduce a una salida también limitada.

La característica más importante que se desprende de la propiedad aditiva se encuentra al descomponer la entrada en impulsos elementales de este modo la respuesta del sistema será la suma de las respuestas a cada impulso individual. Una forma conveniente de descomponer la función de entrada en términos de una base elemental, es expresándola como una combinación lineal de funciones delta de Dirac $\delta(x, y)$ pesadas y desplazadas. De esta forma una función de entrada $g(x,y)$ se escribe como la integral

$$g(x, y) = \iint g(x', y') \delta(x-x', y-y') dx' dy' \quad (2-4)$$

Cabe aclarar que si bien la “función δ ” no es estrictamente una función ya que vale ∞ o no definido en $(0,0)$ y 0 en el resto del plano, se define como impulso base a la cantidad

$$\iint_{\Delta s} \delta(x, y) dx dy = 1 \quad (2-5)$$

correspondiente al área bajo la delta.

Dado que $g(x', y')$ es un punto, una transformación lineal que lleve $g(x, y)$ a la función $f(x, y)$ actuará directamente sobre los elementos base (2-5). Llamando $h(x, x'; y, y')$ a la transformación aplicada a $\delta(x - x', y - y')$ se tendrá que

$$f(x, y) = \iint g(x', y') h(x, x'; y, y') dx' dy' \quad (2-6)$$

Esta función h recibe el nombre de *respuesta al impulso* del sistema y representa al kernel de la integral de superposición. La misma opera propagando la información de entrada hasta llevarla al formato de salida.. La propiedad de invarianza ante translaciones que poseen los sistemas formadores de imágenes permite expresar h como $h(x - x', y - y')$ resultando la integral

$$f(x, y) = \iint g(x', y') h(x - x', y - y') dx' dy' \quad (2-7)$$

que matemáticamente corresponde a la *convolución* entre la entrada g y la respuesta al impulso del sistema. Por conveniencia, la integral también la expresaremos como $f = g \otimes h$ donde el símbolo $\otimes$ denota la convolución.

De acuerdo al teorema de la convolución la ecuación (2-7) puede expresarse en el espacio de Fourier como

$$F(u, v) = G(u, v) H(u, v) \quad (2-8)$$

donde $F(u, v)$ y $G(u, v)$ son las transformadas de las funciones g y f . La función $H(u, v)$ corresponde a la transformada de Fourier de la respuesta al impulso y recibe el nombre de *función transferencia*. Ella expresa el efecto que tendrá el sistema en el dominio de las frecuencias.

2.2 Convolución y correlación óptica

Como se describió en la sección anterior, la convolución es la operación matemática que relaciona una función que ingresa a un sistema lineal isoplanático con otra función de salida. Esta relación entre la entrada y la salida está dada a través de la respuesta al impulso del sistema, la cual será particular para cada uno.

En el caso de una onda que se propaga libremente desde un plano P_0 a otro P_1 el único medio que actúa sobre ella es el que se halla entre ambos planos, el cual actúa modificando la forma funcional de la onda. La teoría escalar de la difracción permite expresar la onda en P_1 a través de una convolución entre la entrada al sistema (onda en P_0) y la respuesta al impulso del medio

$$E(x_1, y_1) = \iint E(x_0, y_0) h(x_1 - x_0, y_1 - y_0) dx_0 dy_0 \quad (2-9)$$

donde en este caso la respuesta h está dada a través de la aproximación de Fresnel sobre el principio de difracción de Huygens-Fresnel [Goo68] y es de la forma

$$h(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \quad (2-10)$$

siendo z la distancia entre ambos planos, $k = 2\pi/\lambda$ y λ la longitud de la onda E en el medio.

El caso anterior es el más elemental de todos en donde el sistema es simplemente un medio homogéneo, pero si en el camino hay incluidos más elementos, la expresión anterior deberá dar cuenta de la respuesta del nuevo elemento. Un ejemplo muy particular y de suma importancia en óptica de Fourier es la inclusión de una lente convergente y su capacidad de proveer la transformada de Fourier de una imagen de entrada, en el plano conjugado de la fuente luminosa.

Para ilustrar lo expuesto, consideremos el caso más sencillo de tener un objeto de transmisión $s(x, y)$ junto a una lente y un haz luminoso plano de amplitud 1 que los

atraviesa. Inmediatamente después de la lente la onda resultante estará dada por la transmisión del objeto multiplicada por la transmisión $t_L(x,y)$ de la lente

$$s^+(x,y) = s(x,y)t_L(x,y) \quad (2-11)$$

donde, si la lente tiene distancia focal f y suponemos una pupila de entrada unitaria

$$t_L(x,y) = \exp\left[-i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \quad (2-12)$$

Consideremos a la onda descrita por (2-11) como campo de entrada en la integral (2-9) y calculemos el campo a una distancia z cualquiera, empleando la respuesta al impulso de una propagación libre dada por (2-10). Para ello desarrollemos el cuadrado en dicha expresión y evaluémosla en $(x_z - x, y_z - y)$

$$h(x_z - x, y_z - y) \propto \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda z}(x_z x + y_z y)\right] \quad (2-13)$$

Es fácil ver que si se observa la onda de salida a una distancia z igual a la distancia focal f , la primera exponencial de (2-13) se cancela con (2-12) quedando la integral de propagación (2-9) igual a la transformada de Fourier del objeto s evaluada en las coordenadas de frecuencias $u = x_f / \lambda f$, $v = y_f / \lambda f$

$$S(u,v) = \frac{c}{\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} s(x,y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (2-14)$$

La constante c involucra factores de fase global que no afectan a la forma general, el factor $1/\lambda f$ es simplemente un factor de atenuación proveniente de la respuesta (2-10). Veremos en la próxima sección que el plano donde se forma la transformada de Fourier,

es en realidad el plano conjugado de la fuente luminosa, que en este ejemplo al estar ésta en el infinito coincide con el plano focal de la lente.

Analicemos ahora un sistema compuesto por dos lentes dispuestas en modo tal que, la primer lente provee la transformada de Fourier de la señal de entrada $s(x,y)$ en el plano conjugado de la fuente luminosa; y a continuación la segunda lente produce la transformada de la distribución de frecuencias, resultando la imagen final sobre el plano conjugado del plano objeto (aquel donde se ubicó $s(x,y)$). Tal sistema se conoce como procesador óptico. Si consideramos el caso ideal en el que las lentes son infinitamente grandes, sobre el plano transformado obtendríamos el espectro de frecuencias completo de $s(x,y)$. Si las lentes tienen tamaño finito se producirá un recorte de frecuencias; sin embargo cuando se realiza una operación de filtrado espacial la principal modificación de frecuencias es intencional y es originada por el filtro, el cual se ubica en el plano de frecuencias. Matemáticamente si $s(x,y)$ es la señal de entrada, $S(u,v)$ su transformada de Fourier y $H(u,v)$ representa la función transferencia del filtro, entonces inmediatamente después de atravesar dicho filtro se obtendrá una versión modificada del espectro de frecuencias del objeto dada por

$$S_F(u,v) = S(u,v)H(u,v) \quad (2-15)$$

Luego, mediante la acción de la segunda lente, obtendremos sobre el plano final la transformada de Fourier de la expresión (2-15)

$$s_F(x_F, y_F) = \iint S(u,v)H(u,v)\exp[-i2\pi(ux_F + vy_F)]dudv \quad (2-16)$$

que por el teorema de la convolución resulta ser justamente, la convolución entre la entrada s y la respuesta al impulso del filtro

$$s_F(x_F, y_F) = \iint s(\xi, \eta)h(x_F - \xi, y_F - \eta)d\xi d\eta \quad (2-17)$$

Un caso muy especial que se deriva de este último es cuando la respuesta al impulso del filtro es de la forma

$$h(x, y) = g^*(-x, -y) \quad (2-18)$$

con $g(x, y)$ una función cualquiera. Cuando un filtro de tal respuesta es introducido en el plano de frecuencias, la transformada de Fourier provista por la última lente viene dada por la expresión

$$c(x, y) = \iint s(\xi, \eta) g^*(\xi - x, \eta - y) d\xi d\eta \quad (2-19)$$

que corresponde matemáticamente a la correlación entre la imagen de entrada $s(x, y)$ y la función $g(x, y)$.

La correlación es una operación fundamental en problemas de identificación de formas ya que expresa el grado de similitud existentes entre las funciones s y g . Cuando ambas coinciden la integral anterior recibe el nombre de autocorrelación

$$c_a(x, y) = \iint s(x', y') s^*(x' - x, y' - y) dx' dy' \quad (2-20)$$

y su distribución corresponde a la de un pico muy agudo e intenso que se usa como señal de detección.

Al filtro cuya respuesta al impulso coincide con la inversa conjugada de la onda objeto $s(x, y)$ se lo define como el filtro adaptado a s . Este tema será explicado con más detenimiento más adelante en este capítulo.

2.2.1 Configuraciones experimentales

Existen diversos montajes experimentales para obtener la convolución y la correlación óptica en sistemas con iluminación coherente. Una de las arquitecturas más

usuales es la llamada $4f$, cuyo nombre se debe al hecho de que la entrada y la salida están separadas por cuatro veces la distancia focal de las lentes usadas en el montaje. Sin embargo en correlaciones para reconocimiento óptico, es más conveniente usar un montaje consistente en una variante del $4f$, denominado procesador convergente, el cual, a diferencia del primero, permite realizar ajustes en la escala de la transformada de Fourier de la imagen de entrada sin modificar las posiciones de las lentes transformadoras. Este paso, como veremos más adelante, es imprescindible para una efectiva detección basada en el correlador de Vander Lugt.

Presentaremos a continuación el procesador $4f$ y luego expondremos en detalle el convergente a fin de comparar las ventajas que éste tiene para operaciones de reconocimiento.

i. Procesador $4f$

En la Figura 2- 1 se esquematiza la configuración del procesador $4f$. Una fuente puntual, monocromática de longitud de onda λ , es colimada por la lente L y dirigida hacia la transparencia de transmisión $s(x_I, y_I)$ a la que denominaremos escena de entrada. La lente L_1 colocada a la distancia focal f del plano P_1 provee la transformada de Fourier de s en el plano P_3 distante nuevamente una distancia f . En este plano se ubica un filtro de transmisión H para manipular las frecuencias espaciales de la onda $S(x_3/\lambda f, y_3/\lambda f)$ correspondiente a la transformada de Fourier de la escena. Como señalamos anteriormente, inmediatamente después del filtro se tendrá una transmisión igual al producto SH . Luego mediante una segunda lente transformadora L_2 ubicada a una distancia f del filtro se obtiene la transformada de Fourier de SH en el plano P_5 a una distancia f de la lente

$$s_{sal}(x_5, y_5) = \iint_{\infty} S\left(\frac{x_3}{\lambda f}, \frac{y_3}{\lambda f}\right) H\left(\frac{x_3}{\lambda f}, \frac{y_3}{\lambda f}\right) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_3 x_5 + y_3 y_5)\right] = s \otimes h \quad (2-21)$$

Las coordenadas del plano P_5 se han invertido debido a que la aplicación de dos transformada de Fourier consecutivas produce una inversión de coordenadas, a

diferencia de una transformada seguida de una antitransformada. Este plano corresponde al lugar donde la lente L_2 formaría la imagen de la escena si no estuviese presente el filtro. Su incorporación modifica la onda proveniente de la escena de modo que en el plano imagen se obtiene la convolución entre ésta y la respuesta al impulso del filtro. La particularidad que hace que este montaje sea menos adaptable para usar en procesos de reconocimiento es que la transformada de Fourier de la escena posee una escala fija para una dada distancia focal y longitud de onda usada (las coordenadas en el plano de frecuencias quedan multiplicadas por el factor $1/\lambda f$). Como veremos a continuación, esto no sucede en el procesador convergente.

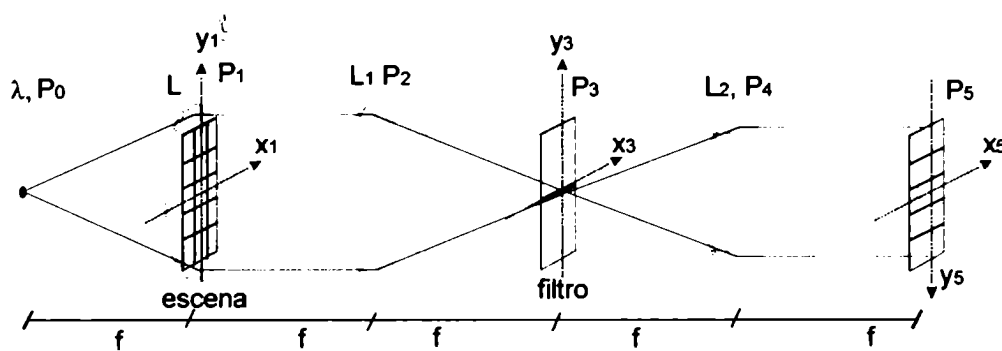


Figura 2- 1: Configuración 4f

ii) Procesador convergente

En la Figura 2- 2 se muestra un esquema del procesador convergente. Una fuente de luz puntual y monocromática de longitud de onda λ se sitúa en el plano P_0 a una distancia d_1 de una lente convergente L_1 . A una distancia d_2 de ésta y en el plano P_2 se ubica la escena de entrada cuya transformada de Fourier, provista por la lente L_1 , se obtiene en el plano P_3 conjugado de la fuente a una distancia d_3 de la escena. Un filtro es ubicado en este lugar modificando así las frecuencias espaciales de la escena. La distribución compleja resultante es nuevamente transformada por una segunda lente transformadora L_2 ubicada en el plano P_4 a una distancia d_4 del filtro dando la imagen final en el plano P_5 distante en d_5 de la lente. Igual que en la configuración 4f, este plano corresponde al lugar donde la lente L_2 formaría la imagen de la escena si no estuviese el filtro.

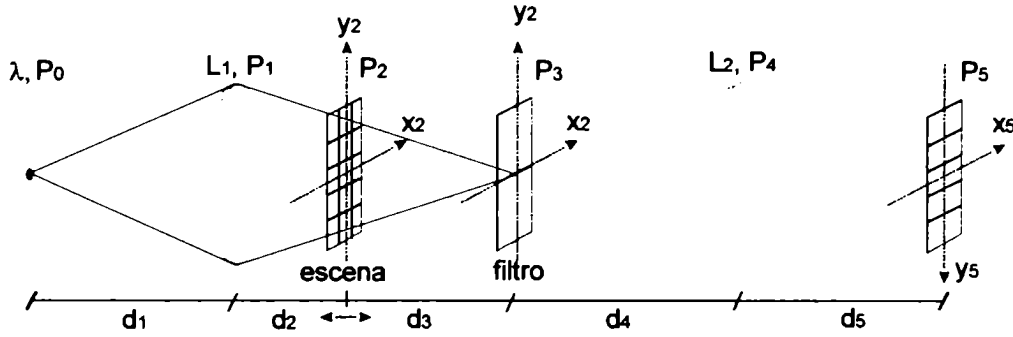


Figura 2- 2: Procesador convergente

2.2.1.1 Descripción matemática del procesador

Representemos con la función $\delta(x_0, y_0)$ a una fuente puntual de longitud de onda λ ubicada en (x_0, y_0) . Sobre la lente transformadora llegará una onda esférica de acuerdo a la fórmula de propagación de Fresnel introducida en (2-9) y (2-10)

$$\begin{aligned}
 E(P_1) &= \frac{\exp(ikd_1)}{i\lambda d_1} \iint_{-\infty}^{\infty} \delta(x_0, y_0) \exp\left[i \frac{k}{2d_1} ((x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2)\right] dx_0 dy_0 \\
 &= \frac{C_1}{d_1} \exp\left[i \frac{k}{2d_1} (x_1^2 + y_1^2)\right]
 \end{aligned} \tag{2-22}$$

con $C_1 = \exp(ikd_1) / i\lambda$. Inmediatamente después de la lente L_1 este campo toma la forma

$$E^+(P_1) = \frac{C_L}{d_1} \exp\left[i \frac{k}{2d_1} (x_1^2 + y_1^2)\right] \exp\left[-i \frac{k}{2f} (x_1^2 + y_1^2)\right] \tag{2-23}$$

donde C_L , que incluye a C_1 , engloba factores de fase y amplitud introducidos en la propagación y la transmisión, y f es la distancia focal de la lente. La propagación de la

onda E^+ hasta el plano P_2 estará dada nuevamente por la fórmula de Fresnel donde ahora el campo incidente corresponde a la expresión (2-24). Luego el resultado de este cálculo se toma como onda incidente para una nueva propagación de P_2 hasta el plano P_3 . La integral resultante es

$$E(P_3) = \frac{C}{d_1 d_2 d_3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[i \frac{k}{2} (x_1^2 + y_1^2) \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{f} \right) \right] \exp \left[i \frac{k}{2d_2} ((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2) \right] \\ \cdot \exp \left[i \frac{k}{2d_3} ((x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2) \right] s(x_2, y_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2$$

donde $s(x_2, y_2)$ es el campo justo después de la escena y C una constante. Haciendo un poco de álgebra y usando la equivalencia

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp[i(ax^2 - bx)] dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp \left(i \frac{\pi}{4} \right) \exp \left(-i \frac{b^2}{4a} \right) \quad (2-24)$$

se llega a la expresión

$$E(P_3) = \frac{C}{d_1 d_2 d_3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(x_2, y_2) \exp \left[i \frac{k}{2} (x_2^2 + y_2^2) \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2 + d_3} - \frac{1}{f} \right) \right] \\ \exp \left[i \frac{k}{2d_3} (x_2 x_3 + y_2 y_3) \right] dx_2 dy_2 \quad (2-25)$$

Si la fuente se halla en el plano conjugado al del filtro entonces d_1 , d_2 y d_3 verifican la ley de Gauss

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2 + d_3} = \frac{1}{f} \quad (2-26)$$

donde f es la distancia focal de la lente. Luego la expresión (2-25) resulta ser proporcional a la transformada de Fourier de $s(x_2, y_2)$

$$E(u, v) = E(P_3) = \frac{C}{d_1 d_2 d_3} \iint_{-\infty}^{\infty} s(x_2, y_2) \exp[-i2\pi(ux_2 + vy_2)] dx_2 dy_2 \quad (2-27)$$

situada en el plano P_3 y de frecuencias espaciales $u = \frac{x_3}{\lambda d_3}$; $v = \frac{y_3}{\lambda d_3}$

La dependencia de estas con la distancia entre la escena y el plano de Fourier (a diferencia del procesador $4f$ donde esta dependencia es con la distancia focal de la lente) permite modificar su escala simplemente desplazando la escena a lo largo de la línea que une el filtro y la lente sin cambiar la posición de esta última o la fuente. Otro factor contribuyente a la modificación de la escala es la longitud de onda. Ambos ítems serán considerados más adelante en el montaje y diseño de un correlador policromático.

En el plano P_3 se coloca un filtro de transmisión $H(u, v)$ de modo que inmediatamente después del mismo la distribución espacial es

$$T(u, v) = S(u, v) H(u, v) \quad (2-28)$$

Finalmente aplicando la fórmula de propagación de Fresnel dos veces más desde P_3 hasta la lente L_2 y de allí al plano P_5 se obtiene por procedimientos totalmente análogos a los desarrollados previamente la expresión de la onda en P_5

$$E(P_5) = \iint_{-\infty}^{\infty} T(u, v) \exp[-i2\pi(x_5 u + y_5 v)] du dv \quad (2-29)$$

reemplazando (2-28) en (2-29) y aplicando el teorema de la convolución se tiene que la imagen final esta dada por la convolución entre la escena y la respuesta al impulso del filtro

$$E(P_5) = \iint s(x, y) h(x_5 - x, y_5 - y) dx dy \quad (2-30)$$

2.3 Filtro de Vander Lugt y su aplicación al problema de reconocimiento óptico

Hasta la inserción de las técnicas interferométricas para la implementación física de los filtros, las funciones transferencias que podían ser llevadas a un medio físico estaban restringidas a ser muy sencillas. Las modulaciones de fase y de amplitud se hacían en forma independiente sobre máscaras separadas que luego debían superponerse adecuadamente para controlar ambas modulaciones en forma simultánea. Esta tarea resultaba muy complicada de lograr incluso para funciones muy simples. Recién en 1963 a partir de la extensión de las técnicas interferométricas al sintetizado de los filtros pudieron implementarse funciones más complicadas. De esta manera haciendo un registro holográfico la función compleja correspondiente a cualquier objeto existente podía ser registrada físicamente de forma muy sencilla.

2.3.1 Sintetizado del filtro de Vander Lugt

A. B. Vander Lugt propuso en 1963 una técnica interferométrica para registrar en un mismo medio la fase y la amplitud de la función transferencia del filtro. Este procedimiento, basado en las técnicas holográficas, permite registrar en un mismo medio fotográfico la interferencia producida por un haz plano con la transformada de Fourier de la respuesta impulsional deseada.

Sea $h(x,y)$ la respuesta al impulso del filtro que queremos generar. Un holograma de Fourier registra la interferencia de la transformada de Fourier de h con un haz plano coherente de referencia. El montaje es el esquematizado en la Figura 2- 3.

Un haz luminoso proveniente de una fuente monocromática incide sobre una transparencia cuya transmisión es la respuesta $h(x,y)$. Otro haz plano coherente con el primero es dirigido directamente al plano de Fourier formando un ángulo θ con la horizontal:

$$R(x_2, y_2) = r_o \exp(i2\pi \alpha y_2)$$

donde $\alpha = \sin \theta / \lambda$ es la frecuencia espacial del haz de referencia y r_0 su amplitud.

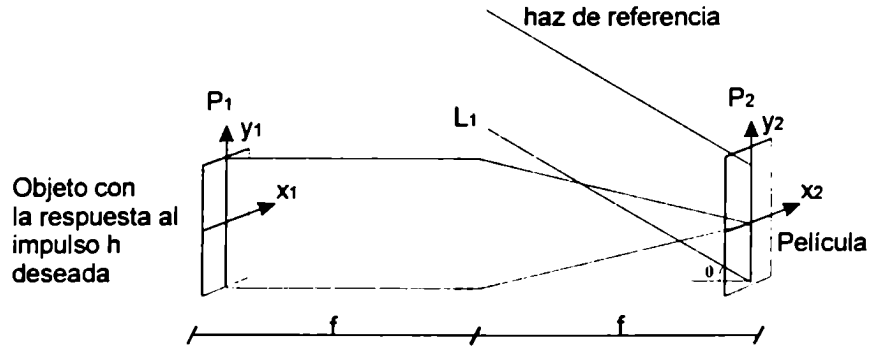


Figura 2-3: Montaje para el registro del filtro de Vander Lugt

La onda transmitida por la transparencia es luego transformada Fourier por la lente L_1 dando la distribución compleja $H(u,v)/\lambda f$ en el plano de focalización. En este sector la onda H se superpone con el haz de referencia produciendo interferencia. Una película fotográfica colocada en este lugar registrará la intensidad

$$I(x_2, y_2) = r_0^2 + \frac{1}{\lambda^2 f^2} H(u, v)^2 + \frac{r_0}{\lambda f} H(u, v) \exp(i2\pi\alpha y_2) + \frac{r_0}{\lambda f} H^*(u, v) \exp(-i2\pi\alpha y_2) \quad (2-31)$$

donde nuevamente $u = x_2 / \lambda f$ y $v = y_2 / \lambda f$. Como se puede ver el tercer término de (2-31) contiene la información tanto de la fase como de la amplitud del filtro H a pesar de ser I una distribución sólo de intensidad. Consecuentemente, si el registro fotográfico de esta intensidad en un film es lineal contendrá información tanto de la fase como de la amplitud del filtro buscado, a pesar de ser este un medio sólo sensible a variaciones de intensidades.

2.3.2 Respuesta del filtro

Este film es luego colocado en el plano P_3 de algún procesador como los descriptos previamente (ver Figura 2-1 o Figura 2-2). Si la onda de entrada que

representa la escena es $s(x, y)$, en el plano de Fourier se tendrá la distribución compleja $S(u, v)/\lambda f$. Luego el campo inmediatamente después del filtro será de la forma

$$E_3 = \frac{r_0^2 S}{\lambda f} + \frac{1}{\lambda^3 f^3} |H|^2 S + \frac{r_0}{\lambda^2 f^2} H S \exp(i 2\pi \alpha y_3) + \frac{r_0}{\lambda^2 f^2} H^* S \exp(-i 2\pi \alpha y_3) \quad (2-32)$$

donde por comodidad no se han escrito las dependencias de las ondas H y S con (u, v) . Luego, la lente L_2 proveerá la transformada de E_3 en el plano P_5 . Usando el teorema de la convolución podemos escribir la distribución resultante E_5 como

$$\begin{aligned} E_5 = & r_0^2 s(x_s, y_s) + \frac{1}{\lambda^2 f^2} [h(x_s, y_s) \otimes h^*(x_s, y_s) \otimes s(x_s, y_s)] \\ & + \frac{r_0}{\lambda f} [h(x_s, y_s) \otimes s(x_s, y_s) \otimes \delta(x_s, y_s + \alpha \lambda f)] \\ & + \frac{r_0}{\lambda f} [h^*(-x_s, -y_s) \otimes s(x_s, y_s) \otimes \delta(x_s, y_s - \alpha \lambda f)] \end{aligned} \quad (2-33)$$

Los primeros dos términos de la distribución de salida no son de utilidad en las operaciones de filtrado espacial y sólo contribuyen a formar una imagen borrosa de la escena en el centro del plano de salida. El tercer y cuarto término son los que tienen relevancia en estos procesos y corresponden, respectivamente, a la convolución y la correlación entre la escena y la respuesta al impulso. La convolución se halla centrada en la coordenada $(0, -\alpha \lambda f)$ y la correlación en $(0, \alpha \lambda f)$. El plano de salida se esquematiza en la Figura 2-4.

Una frecuencia espacial α suficientemente alta hará que la correlación y la convolución se desvíen adecuadamente del centro de coordenadas y puedan observarse en forma separada.

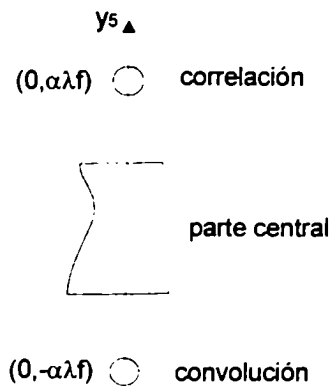


Figura 2- 4: esquema del plano de salida de un procesador convergente en el que se usó el filtro de Vander Lugt

2.3.3 Reconocimiento de formas

El filtro de Vander Lugt ha encontrado amplia aceptación y aplicación no sólo por la sencillez de su generación sino también por haber removido una de las grandes limitaciones que había sobre el tipo de funciones transferencias que podían ser sintetizadas. Una de las aplicaciones, sino la más importante para la que este filtro es especialmente apropiado es en el problema de reconocimiento de caracteres o formas en general.

La detección y localización de objetos en una escena es una de las aplicaciones más importantes del procesamiento de imágenes. En ella una escena de entrada es comparada con el objeto que queremos identificar, de modo tal, de obtener como resultado de esta comparación una señal característica que indique la presencia de este objeto. Como hemos mencionado, la función matemática que se encarga de comparar el grado de similitud entre dos funciones es la correlación y una forma óptica de obtenerla es a partir del procesador convergente o la configuración $4f$ junto con el filtro de Vander Lugt. Este dispositivo en conjunto recibe el nombre de correlador de Vander Lugt. Para analizar detenidamente cómo es el proceso de reconocimiento consideremos que $s(x,y)$ representa a la imagen de entrada en el procesador y que, por ahora, está compuesta de un solo objeto

$$s(x, y) = s_0(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (2-34)$$

Sea S su transformada de Fourier, si la función transferencia del filtro de Vander Lugt H fuese igual a S^* el tercer término de la ec. (2-32) se convierte en una onda plana ya que el filtro H cancela la curvatura de la onda S :

$$S^* S \exp(i2\alpha y_2) \frac{r_0}{\lambda^2 f^2} = |S|^2 \exp(i2\alpha y_2) \frac{r_0}{\lambda^2 f^2} \quad (2-35)$$

Luego, la segunda lente focalizará este haz plano en un punto luminoso centrado en $(0, -\alpha\lambda f)$ (ver Figura 2- 5). Este punto responde a la autocorrelación entre el filtro y la entrada, relación que se desprende del tercer término de la ec. (2-33) al reemplazar h por s^* .

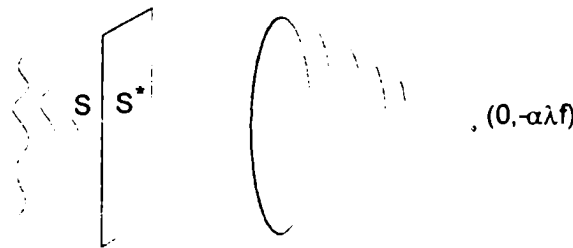


Figura 2- 5: Esquema de la situación de autocorrelación

Si en la entrada ahora tenemos una señal s' distinta de s , el filtro igual a S^* ya no será más efectivo en cancelar la curvatura del frente de onda que llega al plano de Fourier y por lo tanto no se obtendrá un punto brillante en el plano final. El tercer término de (2-33) dará lugar ahora a una correlación cruzada entre s y s' cuya intensidad dependerá de cuan similares sean las señales.

Es sencillo demostrar que la energía de la correlación cruzada es siempre menor que la de la autocorrelación de modo que la identificación final se produce midiendo la intensidad de los picos de correlación a la salida. Es decir, si s_k es el objeto a reconocer, e ingresa al sistema la onda s_k , el pico de autocorrelación que se obtendrá en el plano de salida será la distribución de intensidad

$$|c_k|^2 = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |s_k|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |s_k|^2 dx dy} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |s_k|^2 dx dy \quad (2-36)$$

donde la normalización da cuenta de las diferencias de energía que pueden tener los objetos de entrada. Si ahora otra onda s_n distinta ($n \neq k$) entra al sistema, la correlación cruzada dará la distribución de intensidad

$$|c_n|^2 = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s_k s_n dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |s_n|^2 dx dy} \quad (2-37)$$

Usando la desigualdad de Schwarz tenemos que

$$\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s_k s_n dx dy \right]^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |s_k|^2 dx dy \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |s_n|^2 dx dy \quad (2-38)$$

de donde se desprende que $|c_n|^2 \leq |c_k|^2$.

Cabe mencionar que si hubiéramos elegido un filtro H igual a S , sería el cuarto término de (2-32) el que nos dé la autocorrelación.

Una de las características principales del correlador es que no sólo detecta al objeto sino también su posición dentro de la escena. Esto es fácil de analizar sabiendo que un corrimiento del objeto respecto al origen en la escena sólo se traduce a una fase lineal en su transformada de Fourier y no a un cambio de curvatura en su espectro. Es decir, si el objeto de entrada $s(x-x_0, y-y_0)$ está desplazado del origen en (x_0, y_0) , su transformada de Fourier será

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}\{s(x-x_0, y-y_0)\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(x-x_0, y-y_0) \exp[-i2\pi(ux+vy)] dx dy \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(x, y) \exp[-i2\pi(u(x+x_0)+v(y+y_0))] dx dy \quad (2-39) \\
&= S(u, v) \exp[-i2\pi(ux_0 + vy_0)]
\end{aligned}$$

Esta fase lineal dará lugar, luego de la segunda transformada a un corrimiento en el pico de salida. Luego considerando el haz de referencia de frecuencia espacial α en la dirección y , la autocorrelación de la ec (2-33) se obtendrá en el punto $(x-x_0, y-y_0 + \alpha\lambda f)$.

El filtro de Vander Lugt [Van64] o *filtro adaptado* a la señal s (classical matched filter: CMF) fue históricamente el primero en aplicarse al problema de reconocimiento óptico, y dio origen a una nueva línea de investigación en el tema de procesado de señales.

Una de las ventajas de este filtro es que presenta una muy buena relación señal-ruido (SNR), es decir que responde muy bien ante la presencia de ruido blanco en la entrada. En contrapartida, posee bajo poder de discriminación entre objetos similares llegando a dar incluso picos de correlación cruzada casi de la misma altura que los de autocorrelación si los objetos son muy parecidos entre sí. Este filtro, además, es sensible a variaciones de tamaño u orientación de la señal a la que está adaptado.

Desde la introducción del filtro de Vander Lugt mucho esfuerzo se ha realizado para lograr nuevos diseños que mejoren el desempeño de los correladores ópticos en problemas de reconocimiento. En la sección siguiente presentaremos algunos parámetros de calidad que permiten evaluar cuantitativamente la respuesta de los mismos.

Posteriormente, en la sección 2.5, presentaremos algunos filtros alternativos, que sirvieron como base para los desarrollados y aplicados en esta Tesis.

2.4 Criterios de evaluación

Existen diversos criterios o parámetros de calidad que permiten evaluar el desempeño de los filtros en correladores orientados al reconocimiento de formas.

2.4.1 Relación señal-ruido (SNR)

La relación señal – ruido es un parámetro que evalúa el desempeño del filtro cuando la entrada se halla contaminada por la presencia de ruido blanco aditivo. Es deseable que la señal de salida sea la más alta y definida posible manteniendo pequeña su variabilidad con respecto al ruido, el cual fluctuará de una experiencia a otra. Esto se logra pidiendo que el coeficiente SNR sea máximo. En este trabajo, este parámetro se usará para evaluar la respuesta al impulso de los filtros que presentaremos y dentro de este contexto [Ber91] lo definimos como:

$$SNR = \frac{c^2 \int_{x \in F} f(x - x_f)^2}{\left[\int_{x \in F} g(x) - c \int_{x \in F} f(x - x_f) \right]^2}, \quad (2-40)$$

$$c = \frac{\int_{x \in F} g(x) \int_{x \in F} f(x - x_f)}{\int_{x \in F} f(x - x_f)^2}$$

donde $f(x)$ es la respuesta al impulso deseada (la que corresponde a un Pof adaptado a un solo objeto), F es la región donde es obtenida y $g(x)$ es la respuesta al impulso obtenida. Es una medida que evalúa las similitudes entre las respuesta al impulso deseada y obtenida en la región de interés F .

2.4.2 Eficiencia luminosa

Se define la eficiencia como la relación entre la energía en el plano de salida y la energía de entrada al sistema.

$$\eta = \eta_D \frac{\iint |s(x,y) * h^*(x,y)|^2 dx dy}{\iint |s(x,y)|^2 dx dy} \quad (2-41)$$

donde $s(x,y)$ es la función de entrada, $h(x,y)$ es la respuesta al impulso del filtro y η_D es la eficiencia de difracción. Este coeficiente fue introducido por Horner [Hor82] para evaluar qué porcentaje de luz enviada por la fuente luminosa es transmitida por el filtro al plano de salida o equivalentemente cuanta luz es absorbida por este. Un filtro compuesto sólo por la fase de la función transmisión tendrá por lo tanto una eficiencia teórica máxima al no haber modulación de amplitud que bloquee el paso de la luz. Esta claro que este coeficiente sólo puede tomar valores menores a uno o igual a uno en el caso ideal de máxima eficiencia. Esta situación si bien no es posible de ser reflejada en la experiencia es posible aproximarse a ese valor a través de nuevas propuestas de filtros y materiales de registro (de esto se hablará en el capítulo 4).

Usando el teorema de Parseval la eficiencia en el plano de Fourier puede escribirse como

$$\eta = \eta_D \frac{\iint |S(u,v)|^2 |H(u,v)|^2 du dv}{\iint |S(u,v)|^2 du dv} \quad (2-42)$$

donde S y H son las transformadas de Fourier de s y h respectivamente.

2.4.3 Agudeza del pico

Picos de correlación angostos y altos conducen a una mejor localización de los mismos disminuyendo la posibilidad de error en la determinación de la señal de autocorrelación. Existe un parámetro para medir la agudeza de los picos (o la energía del pico de correlación) PCE que compara el máximo de intensidad del plano de correlación $|c(0,0)|^2$ con la energía total de salida

$$PCE = \frac{|c(0,0)|^2}{\iint |c(x,y)|^2 dx dy} \quad (2-43)$$

donde el denominador corresponde a la energía en todo el plano de salida. Valores altos de PCE representan picos de correlación altos y agudos, por el contrario valores más bajos pueden indicar que los picos de salida son posiblemente bajos, anchos o que existen picos secundarios que aumentan el valor de la energía en relación al máximo de intensidad.

2.4.4 Capacidad de discriminación

Este parámetro mide la capacidad que posee el filtro para discernir entre distintos objetos y reconocer al objeto esperado sin dar falsas alarmas. Esto se hace comparando las alturas de los picos de autocorrelación con los de correlación cruzada. Una definición del mismo es la diferencia entre el valor del pico de correlación y el de correlación cruzada dividida por el de autocorrelación

$$DC = \frac{\max_x |c_A(x,y)|^2 - \max_y |c_C(x,y)|^2}{\max_y |c_A(x,y)|^2} \quad (2-44)$$

donde $c_A(x,y)$ indica el valor del pico de autocorrelación y $c_C(x,y)$ el de correlación cruzada.

Una buena capacidad de discriminación del filtro se revelará en valores del DC cercanos a uno, en cambio una mala determinación del blanco conducirá a valores pequeños e incluso negativos.

2.5 Revisión de algunos filtros orientados al reconocimiento de formas

Presentaremos a continuación los filtros que han servido como base para los desarrollados en esta Tesis. Uno de ellos es el filtro sólo de fase, los otros pertenecen a la familia de filtros SDF.

2.5.1 Filtro sólo de fase: POF (phase only filter)

Sea $s(x,y)$ el objeto a reconocer y sea $S(u,v)$ su transformada compleja

$$S(u,v) = S_0(u,v) \exp[i\phi(u,v)]$$

Se define filtro sólo de fase a aquel cuya transmisión es de la forma:

$$H_{\text{por}}(u,v) = \frac{S^*(u,v)}{S^*(u,v)} = \exp[-i\phi(u,v)] \quad (2-45)$$

la cual se obtiene directamente reemplazando la amplitud de la transformada de Fourier del objeto conjugado por la unidad. A diferencia del filtro clásico no puede obtenerse ópticamente siendo necesario el uso de técnicas computacionales para su sintetizado.

Este filtro fue propuesto por Horner y Gianino [Hor84] a partir de unos resultados arrojados por investigaciones previas sobre la importancia de la fase en el tratamiento de señales e imágenes, y de unos estudios hechos sobre la eficiencia luminosa de filtros en correladores ópticos. Para ese entonces, ya era un hecho reconocido a través de numerosas observaciones y estudios [Opp81], que muchas de las características más importantes de una imagen son preservadas en operaciones que involucren tan sólo la fase de su transformada de Fourier y no así cuando se tiene en cuenta sólo la amplitud. Diversos argumentos fueron presentados para justificar analíticamente estas observaciones [Ker70] [Tes73] llegando a la conclusión todas ellas que la fase contiene

la información de la posición de líneas, puntos, contornos y detalles en general, que prácticamente caracterizan una imagen. Por otro lado, dado que la amplitud de la transformada de Fourier de una imagen tiende a decaer hacia las frecuencias altas, el reemplazo de esta por la función unidad, conservando una modulación sólo de fase, contribuiría a enfatizar las altas frecuencias donde se encuentran presentes las líneas, bordes y detalles pequeños.

El mejoramiento de la eficiencia luminosa de filtros usados en correladores ópticos fue otro tema que motivó la propuesta de Horner y Gianino. Horner había encontrado en un estudio previo limitaciones en la eficiencia de filtros como el clásico o el filtro inverso propuesto en el mismo trabajo [Hor82], que no podían mejorarse por más perfecto que fuese el medio de registro empleado. A su vez un objeto de fase como un prisma o una lente no consumen energía cuando son interpuestos en un haz luminoso. La unión de estas ideas condujeron a estos investigadores a la propuesta de un filtro sólo de fase para emplear en problemas de reconocimiento óptico.

Cabe destacar que si bien este filtro contiene información sólo de fase, su transmisión en amplitud en general no es unitaria, ya que la fase debe codificarse de alguna manera si el filtro se implementa sobre un medio de amplitud como ser material fotográfico.

En general este filtro presenta un poder de discriminación mayor que el clásico, generando picos de correlación más altos y angostos [Gia84], aparte no aparecen lóbulos laterales en el plano de salida como en el caso del clásico [Hor84]. El precio que hay que pagar por estas mejoras, es una disminución en el SNR. Esto se desprende naturalmente de su diseño. El ruido está asociado en su gran mayoría a las frecuencias altas, al realzar estas se está favoreciendo de alguna manera la sensibilidad del filtro ante ruido de entrada, sucediendo exactamente lo contrario con el CMF. Finalmente, estas características hacen que este filtro sea más sensible aún que el CMF a pequeños cambios en la forma o tamaño del objeto de entrada. Esto último, dependiendo de la aplicación, puede ser o no una ventaja ya que por un lado y como se mencionó antes esto le da un alto poder de discriminación, pero por otro no permite detectar clases de objetos (ej: el mismo objeto en distintos ángulos o tamaños) sino tan sólo el objeto en la vista particular al que se adaptó el filtro.

2.5.2 Filtros compuestos de la familia SDF

Los filtros anteriormente mencionados son en mayor o menor medida sensibles ante pequeños cambios del objeto a detectar. Por ejemplo si en la escena de entrada este se hallase ligeramente rotado respecto al almacenado en el filtro o tuviese una pequeña variación de tamaño, ninguno de estos filtros podría reconocerlo conduciendo a errores de detección. Los primeros filtros compuestos que han surgido tuvieron la motivación de corregir esta situación componiéndose de la superposición de distintas perspectivas de un mismo objeto.

Por otro lado, el incremento de la capacidad de almacenamiento de datos en los filtros es otro de los temas de investigación que llevó a la generación de diseños de filtros compuestos. En procesos de reconocimiento óptico esto se vio fuertemente motivado por ser el correlador de Vander Lugt especialmente adecuado para realizar correlaciones múltiples.

Es así que diversos filtros compuestos han sido propuestos buscando aumentar la capacidad de almacenamiento de los mismos y al mismo tiempo optimizar algunos de los criterios de evaluación. Entre los distintos diseños introducidos los pertenecientes a la familia del filtro discriminante han sido los que más trascendieron y serán algunos de los filtros que se usarán a lo largo de esta tesis, motivo por el cual se expondrán más detalladamente a continuación.

i) SDF (synthetic discriminant function)

El algoritmo SDF es una herramienta matemática que permite diseñar filtros múltiples de respuestas controladas a partir de procesos iterativos. En operaciones de reconocimiento de muchos objetos (o del mismo objeto desde distintas perspectivas) una respuesta que suele ser de interés es que las correlaciones del filtro con cada uno de los distintos objetos de un mismo valor. Otro caso sería el de reconocer algunos y discriminar otros de esta manera se espera que las correlaciones con estos últimos den cero.

Para explicar los pasos de construcción del filtro vamos a seguir el caso de reconocer un conjunto determinado de objetos sin rechazar a ninguno en particular, será de esperar que un adecuado diseño del filtro conduzca a la discriminación de todo objeto que no pertenezca al grupo de interés.

Sean $s_1(x,y)$, $s_2(x,y)$, ..., $s_N(x,y)$ los N objetos a reconocer y sea $S_i(u,v)$ la transformada de Fourier del objeto i .

$$S_i(u,v) = \iint s_i(x,y) \exp[-j2\pi(ux + yv)] dx dy$$

El objetivo es diseñar un filtro de respuesta al impulso $h(x,y)$ tal que su correlación con las N imágenes dé un mismo valor para cada una.

$$\begin{aligned} c(x_c, y_c) &= \iint h^*(x,y) s_i(x + x_c, y + y_c) dx dy \\ &= \iint S_i(u,v) H^*(u,v) \exp[j2\pi(ux_c + vy_c)] du dv, \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

siendo $c(x_c, y_c)$ el valor de correlación constante impuesto, x_c y y_c las coordenadas en el plano de correlación y $H(u,v)$ la función transferencia del filtro. Esta condición es algo irrealizable en realidad, por ello se pide solamente que tengan los mismos valores sólo en el origen [Hes80]

$$c(0,0) = \iint h^*(x,y) s_i(x,y) dx dy = \iint S_i(u,v) H^*(u,v) du dv, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

A partir de aquí resultará más conveniente adoptar una notación vectorial-matricial para representar las distintas funciones y operaciones. Para ello escribamos cada imagen como un único vector columna de dimensión igual al número n de píxeles y una matriz s cuya columna i -ésima sea el vector imagen s_i . De esta forma la matriz s resulta de dimensión $N \times n$, con $n \gg N$. Con esta nueva notación la expresión anterior toma la forma:

$$\mathbf{h}^* \mathbf{s} = \mathbf{c}' \quad \text{ó} \quad \mathbf{s}^* \mathbf{h} = \mathbf{c}^* \quad (2-46)$$

donde el filtro h también es representado mediante un único vector columna de dimensión n y c es el vector conteniendo los valores deseados de correlación.

De aquí en más el problema se reduce a encontrar los valores de h que cumplan esa condición. Una solución a este problema surge de proponer un filtro que sea combinación lineal de las imágenes

$$h = \sum_{i=1}^N a_i s_i = sa \quad (2-47)$$

donde a_i es el coeficiente de la imagen i y a es el vector columna conteniendo a todos los coeficientes. Reemplazando la expresión (2-46) en (2-45) se tiene que:

$$s^+ s a = c^+ \quad (2-48)$$

Será posible despejar los valores de a si la matriz $s^+ s$ de $N \times N$ es invertible, esto se verifica si y sólo si los vectores imagen son linealmente independientes. Suponiendo este último hecho tendremos que

$$a = (s^+ s)^{-1} c^+ \quad (2-49)$$

luego, el filtro h será:

$$h = s (s^+ s)^{-1} c^+ \quad (2-50)$$

Esta ecuación representa un sistema de N ecuaciones con N incógnitas ($a_1, a_2, \dots, a_N$) que puede ser resuelto con cualquier algoritmo de cálculo.

Si bien este algoritmo parece sencillo presenta algunas deficiencias al utilizarlo en procesos de reconocimiento óptico:

- 1- No considera la existencia de posible ruido aleatorio en la entrada.
- 2- Están diseñados para controlar sólo un punto en el origen de la correlación. Si la imagen de entrada se halla corrida una cierta cantidad desconocida del origen, la correspondiente correlación también sufrirá el mismo desplazamiento y su valor cambiará una cantidad no calculada. Otro inconveniente derivado de controlar sólo el origen es que se pierde la capacidad que poseen los correladores de detectar también la posición del objeto en la entrada y no tan sólo su presencia.
- 3- La imposición de que el filtro sea combinación lineal de los objetos no es necesaria. Esta propuesta surgió originalmente cuando los filtros eran construidos por medios enteramente ópticos y técnicas de multiexposición. En la actualidad el uso de las computadoras hace que esta restricción no sea más necesaria. Eliminando la ec. (2-46) queda por resolver tan sólo la ec. (2-45) esto significa que tendremos un sistema de N ecuaciones con n^2 variables. Los $n^2 - N$ grados de libertad disponibles se pueden usar ahora para imponer nuevas condiciones, por ejemplo para mejorar algunos criterios de rendimiento como la relación señal-ruido (SNR), la agudeza del pico (PCE), etc. o restringir el filtro a algún dominio en particular como es el caso de hacer un filtro SDF sólo de fase.

Distintos estudios se han hecho para mejorar estos puntos, especialmente el último, dando lugar a un nuevo algoritmo llamado SDF generalizado. Una solución más general es obtenida aquí para el filtro h , dependiendo esta de la nueva restricción impuesta. Por ejemplo el MVSDF [Vij86] es el algoritmo que mejora la varianza ante ruido aditivo, el MACE [Mah87] es aquel que busca minimizar la energía media y eliminar picos laterales en otras partes del plano de salida. Otros convierten al filtro en sólo de fase o piden invarianza ante rotaciones.

En esta tesis se usará primero uno de estos algoritmos generalizados diseñado a partir de una combinación del MACE y el MVSDF y que presentaremos en el ítem iv) de esta misma sección. Previo a ello dedicaremos los dos apartados siguientes a una breve descripción de cada uno. Otro filtro que usaremos es un SDF de fase introducido por Montes et. al [Mon93] que presentaremos en el ítem vi)

II) Minimización de la energía media de correlación (MACE)

Un requerimiento importante que debe satisfacer un filtro usado en sistemas de detección es que sea buen discriminante. Para un filtro conteniendo información de un solo objeto es fácil identificar la autocorrelación cuando este objeto se halla presente en la escena de entrada. Pero cuando el filtro está compuesto por más de un objeto la imagen de entrada conducirá a obtener siempre correlaciones cruzadas con el filtro dando lugar a picos poco agudos y picos laterales distribuidos por el plano de salida. El algoritmo MACE procura remediar esta situación imponiendo que la energía media en el plano de correlación sea mínima.

$$E_{med} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \iint c_i(x_c, y_c)^2 dx_c dy_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \iint S_i(u, v)^2 H(u, v)^2 dudv \quad (2-51)$$

Retomando la notación matricial la expresión anterior puede escribirse como

$$\mathbf{E}_{med} = \mathbf{h}^* \mathbf{D} \mathbf{h} \quad (2-52)$$

donde $\mathbf{D}$ es una matriz diagonal de $n \times n$ cuyo elemento diagonal k corresponde al promedio cuadrado de todos los objetos sobre el píxel k , es decir

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D', \quad D' = \begin{pmatrix} s_i(1)^2 & 0 & 0 \\ 0 & s_i(k)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_i(n)^2 \end{pmatrix} \quad (2-53)$$

Luego, el filtro $\mathbf{h}$ se encuentra minimizando la expresión (2-51) sujeta a la restricción impuesta en la ecuación (2-45). La solución a este problema se halla mediante los multiplicadores de Lagrange definiendo una nueva energía

$$\mathbf{E}' = \mathbf{h}^* \mathbf{D} \mathbf{h} - 2\lambda_1 (\mathbf{s}_1^* \mathbf{h} - \mathbf{c}^*) - \dots - 2\lambda_N (\mathbf{s}_N^* \mathbf{h} - \mathbf{c}^*) \quad (2-54)$$

donde $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ son los parámetros necesarios para la minimización. Pidiendo que el gradiente de $\mathbf{E}'$ respecto a $\mathbf{h}$ sea 0 se obtiene

$$\mathbf{D} \mathbf{h} = \lambda_1 \mathbf{s}_1^* - \dots - \lambda_N \mathbf{s}_N^* \quad (2-55)$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{D}^{-1} \left[\sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{s}_i^* \right]$$

donde la última expresión se puede despejar dado que la matriz $\mathbf{D}$ es invertible. Los valores de λ_i se obtienen a partir de la condición (2-45). Escribiendo los parámetros λ en forma matricial $\mathbf{L} = [\lambda_1 \dots \lambda_N]^T$ resulta

$$\mathbf{h} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{s} \mathbf{L} \quad (2-56)$$

Reemplazando en la ec. (2-45) y despejando $\mathbf{L}$ queda

$$\mathbf{s} + \mathbf{D}^{-1} \mathbf{s} \mathbf{L} = \mathbf{c}^*$$

$$\mathbf{L} = (\mathbf{s} + \mathbf{D}^{-1} \mathbf{s})^{-1} \mathbf{c}^*$$

Finalmente reemplazando en (2-55) se obtiene el filtro

$$\mathbf{h}_{\text{MACE}} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{s} (\mathbf{s} + \mathbf{D}^{-1} \mathbf{s})^{-1} \mathbf{c}^* \quad (2-57)$$

iii) SDF de Mínima Varianza (MVSDF)

Vamos a suponer ahora que la escena de entrada es una de las imágenes s_i pero contaminada con un ruido aditivo r . La correspondiente correlación entre esta escena y el filtro dará algo del tipo

$$cc = \mathbf{h}^+ (s_i + r) = c + \mathbf{h}^+ r \quad (2-58)$$

donde la última igualdad se deduce de (2-45). Se observa entonces que el nuevo valor de correlación está dada por el anterior más un término aleatorio. El objetivo del algoritmo MVSDF es diseñar un filtro $\mathbf{h}$ que satisfaga (2-45) y que minimice la varianza de la correlación causada por la presencia de ruido aditivo. Escribamos la varianza como:

$$\sigma^2 = E\left\{\left|\mathbf{h}^+ r\right|^2\right\} = E\left\{\mathbf{h}^+ r r^+ \mathbf{h}\right\} = \mathbf{h}^+ \Sigma \mathbf{h} \quad (2-59)$$

donde se asumió que el vector ruido r tiene valor medio igual a cero y una matriz de covarianza Σ . Se pide que σ^2 sea mínima bajo la restricción impuesta por la ec. (2-45). El problema a resolver es totalmente análogo al algoritmo MACE siendo la solución similar a la expresión (2-56)

$$\mathbf{h}_{\text{MVSDf}} = \Sigma^{-1} \mathbf{s} (\mathbf{s}^+ \Sigma^{-1} \mathbf{s})^{-1} \mathbf{c} \quad (2-60)$$

El problema encontrado en este filtro es que no siempre se conoce la matriz de covarianza Σ y el cálculo de su inversa es muy complicado. Este último problema se simplifica trabajando en el dominio de frecuencias. Dado que estamos evaluando la correlación en el origen las ecuaciones de correlación, energía y varianza pueden ser escritas de manera similar pero cambiando la respuesta al impulso $\mathbf{h}$ por la función transferencia $\mathbf{H}$ y los elementos de la matriz $\mathbf{s}$ por las transformadas de Fourier S_i de los

objetos. Por ello en los próximos algoritmos que desarrollaremos vamos a tomar las matrices y vectores en la representación de Fourier.

iv) Composición de algoritmos

En caso de utilizar un filtro SDF para procesos de reconocimiento los dos puntos mostrados anteriormente, buena relación señal – ruido y picos agudos, son igualmente importantes para su buen desempeño. Hemos visto que el algoritmo MACE permite generar filtros que minimicen la energía y por ende agudicen el pico de correlación pero no tiene en cuenta el ruido. Por otro lado el MVSDF sí tiene en cuenta el ruido en la señal de entrada pero no cuida la energía media. Como acabamos de mencionar sería importante para filtros de reconocimiento que ambas situaciones estén contempladas.

Para ilustrar con un diseño de esta categoría vamos a suponer el caso especial de ruido blanco cuya matriz de covarianza está dada por la identidad I_d y la varianza por la expresión

$$\sigma^2 = \mathbf{h}^* \mathbf{h} = \mathbf{H}^* \mathbf{H} = \sigma_o^2$$

Buscaremos un filtro que cumpla la condición (2-45) manteniendo al mismo tiempo la varianza en un valor constante σ_o^2 y minimizando la energía media. Según lo dicho pediremos que la expresión

$$EV = \mathbf{E}_{med} + \alpha \sigma_o^2 = \mathbf{H}^* \mathbf{H} \mathbf{D} + \alpha \mathbf{H}^* \mathbf{H} = \mathbf{H}^* (\mathbf{D} + \alpha \mathbf{I}_d) \mathbf{H} \quad (2-61)$$

sea mínima, donde α es un parámetro impuesto por el diseñador para regular el grado de importancia que se le dará a la tolerancia al ruido o la agudeza del pico y $\mathbf{D}$ esta formada por los elementos de la matriz $\mathbf{S}$ que contiene ahora como columnas las transformadas de Fourier de los objetos. Para altos valores de α será optimizado el desempeño del filtro ante ruido, en el caso opuesto será la energía mínima la que

domine la situación. Un valor intermedio de compromiso resultará en un filtro que tenga presente ambas situaciones.

Resolviendo de manera análoga a los algoritmos descriptos se obtiene el filtro

$$H_{comp} = (D + \alpha I_d)^{-1} S [S^* (D + \alpha I_d)^{-1} S]^{-1} c^* \quad (2-62)$$

Es fácil ver que para $\alpha \rightarrow 0$, H se aproxima a H_{MACE} y para $\alpha \rightarrow \infty$ el filtro tiende al MVSDF.

v) SDF de fase

En procesos de reconocimiento se ha demostrado que el poder de discriminación aumenta considerablemente cuando los filtros no se hallan modulados por las variaciones de la amplitud, tal es el caso del filtro POF. Para filtros compuestos, se espera que suceda lo mismo, es decir que diseñando un algoritmo SDF que sea sólo de fase el poder de discriminación debería mejorar enormemente.

Diferentes métodos fueron propuestos con este espíritu, de hecho los mismos Horner y Gianino [Hor85] han extendido el filtro POF al SDF. En esta propuesta cada valor del filtro SDF es dividido por su módulo resultando un filtro sólo de fase, pero Casasent y Rozzi [Cas86] demostraron que este filtro no tiene un buen desempeño. Otro diseño es el llamado algoritmo de sucesiones forzadas (successive - forcing algorithm) propuesto por Bahri y Vijaya Kumar [Bah89] donde se restringe al filtro a tener la forma deseada verificando al mismo tiempo la ec. (2-45) en una forma iterativa. Cada vez que forzamos al filtro a cumplir con una de las condiciones, la otra ya no será satisfecha. Mediante sucesivas iteraciones lo hacemos cumplir con ambas restricciones hasta alcanzar algún resultado aceptable.

Básicamente lo descripto en el párrafo anterior es lo siguiente. Se construye un primer filtro según algunos de los procedimientos anteriores. Se transforma Fourier el filtro y se divide cada valor por su módulo para obtener un filtro de fase. Con este nuevo filtro H' la restricción (2-45) ya no se cumplirá dando valores de correlación c'_i distintos para cada imagen. Este algoritmo propone cambiar estos valores c'_i por los c pre-

establecidos ajustando para esto los coeficientes a_i que multiplican a las imágenes. Con este nuevo vector a el proceso es iniciado nuevamente hasta que los cambios producidos tanto en a como en c' sean mínimos. El gran problema de este algoritmo es que vuelve tomar como filtro inicial una combinación lineal de los objetos y no se puede asegurar su convergencia.

vi) SDF de fase. Método de la distancia Euclídea

El algoritmo MED-SDF presentado por Montes et al [Mon93] introduce un método muy similar al algoritmo de sucesiones forzadas descrito previamente. En forma iterativa el filtro es forzado, por un lado, a cumplir con la restricción del valor establecido de correlación y por otro, confinarlo a un dominio determinado. En este algoritmo se busca un procedimiento iterativo que sea convergente y por ende el hallazgo de una solución quede asegurado. Por otro lado también se busca que la respuesta al impulso del filtro SDF generado no se aparte demasiado de una esperada, es decir que los cambios sufridos en las sucesivas iteraciones no lo modifiquen sustancialmente.

Ambos ítems resultan factibles tomando ahora como función a minimizar la distancia del filtro SDF a otro filtro conteniendo la respuesta esperada. Sea h el filtro SDF y a el filtro conocido se espera que

$$E(h) = \sum_{i=1}^n h^i - a^i \quad (2-63)$$

sea mínima. Esta medida de similitud se realiza en forma iterativa pidiendo que en cada paso la distancia entre ambos filtros sea una cantidad decreciente

$$\sum_{i=1}^n h_{k+1}^i - a_{k+1}^i \quad < \quad \sum_{i=1}^n h_k^i - a_k^i \quad (2-64)$$

donde k indica el número de iteración e i el píxel. Esta condición es equivalente a restringir los sucesivos valores que el filtro h tomará, a un círculo de radio unidad, de esta manera la convergencia quedará asegurada y la solución se hallará en el punto de unión de ambos filtros.

En forma numérica la condición (2-62) o equivalentemente la (2-63) se sigue en forma gradual modificando en un paso solamente el filtro h y en el otro tan sólo el filtro a .

$$\sum_{i=1}^n h_{k+1}^i - a_{k+1}^i{}^2 \leq \sum_{i=1}^n h_{k+1}^i - a_k^i{}^2 \leq \sum_{i=1}^n h_k^i - a_k^i{}^2 \quad (2-65)$$

Más específicamente, el algoritmo trabaja según los siguientes pasos

1. Se toma inicialmente un filtro SDF h_0 obtenido con alguno de los procedimientos descritos en las secciones anteriores y un filtro a_0 que puede ser el mismo SDF pero sin la fase o una combinación lineal de las imágenes normalizada o cualquier otro dominio [Mon93].
2. Se calcula la distancia $E(h_0)$ (ec. 2-62) y se la minimiza bajo la condición (2-45) siguiendo los mismos pasos descritos para el filtro MACE. De aquí un nuevo filtro h_1 es obtenido, cumpliéndose la parte derecha de la inecuación (2-63).
3. Se halla el nuevo a_1 que más se aproxime a h_1 pidiendo solamente que $E(h_1)$ sea mínima. En este caso los términos de la suma son independientes por lo que pedir que cada uno de ellos sea mínimo es suficiente. De esta manera la obtención del nuevo a_1 se reduce a una simple proyección de h_1 al dominio especificado por a quedando la parte izquierda de la inecuación (2-64) satisfecha.
4. Se verifica si $|E(h_0) - E(h_1)| < \varepsilon$ (con ε un número pequeño determinado de antemano). Si la desigualdad se verifica el algoritmo termina, si no se vuelve al punto 2 para hallar los nuevos h_k, a_k .

Los filtros mencionados en este capítulo son algunas de las propuestas que han tenido lugar en los últimos años. Cada una de ellas, con sus logros y defectos, ha

trascendido en el área de reconocimiento. No obstante, la continua exigencia puesta sobre la calidad y eficiencia del proceso de detección impulsa al desarrollo de nuevos y mejorados diseños que permitan, por un lado, incrementar la cantidad de información que pueda procesarse simultáneamente y por otro, corregir aquellos puntos en donde los métodos usados hasta el momento poseen desventajas. En los próximos capítulos describiremos los aportes originales de esta Tesis. Allí propondremos nuevas técnicas de sintetizado e implementación de filtros que presentan mejoras en los dos ítems señalados.

Capítulo 3

Síntesis de filtros compuestos sobre material fotográfico

Introducción

Un proceso de reconocimiento óptico requiere, por su carácter experimental, que la función transferencia del filtro sea representada en algún medio material apto para ser inserto en el correlador. Existen diversos materiales donde esto puede llevarse a cabo, dependiendo la elección del tipo de filtro a implementar o del carácter del experimento. En procesos en donde el filtro no requiere ser cambiado dinámicamente, los materiales de registro permanente, como es el caso de la película fotográfica, resultan ser los más adecuados y económicos. Estos medios, en general, son sólo sensibles a variaciones de intensidades por lo que la fase de la función transferencia debe ser codificada como valores de amplitud. Las técnicas ópticas holográficas fueron las precursoras en llevar

interferométricos. Posteriormente, la introducción de los hologramas generados por computadora (CGH) permitió codificar digitalmente funciones transferencia creadas a partir de algoritmos computacionales y ya no de objetos de existencia real. Esto ofreció avances prácticos significativos tanto en la calidad de la señal de correlación como en los tipos de filtros que podían implementarse. Sin embargo la falta de precisión en el control de los niveles de exposición adecuada hizo que los métodos que proponían una codificación binaria en blanco y negro fuesen los que permitían alcanzar mejores resultados. Estos métodos, aunque son los más difundidos, imponen severas limitaciones a la hora de generar hologramas compuestos, debido principalmente a la superposición de zonas opacas y a la dificultad para seleccionar arbitrariamente la orientación de la onda portadora. En la actualidad, la existencia de dispositivos copiadores de fotografías digitales de alta resolución nos ha permitido proponer nuevos métodos para la síntesis de filtros compuestos que superan estas limitaciones.

Como primera parte de este capítulo presentaremos una técnica de multiplexado basada en la síntesis de CGHs en películas color. Esta técnica deriva del método binario de Lee, que describiremos brevemente, pero utiliza colores complementarios en el diseño del filtro lo cual permite incrementar la cantidad de información tantas veces como canales de color independientes se utilicen. En nuestro caso ejemplificaremos el método empleando dos canales, el rojo y el azul, para construir un filtro que duplique la cantidad de información que permite almacenar un filtro binario simple. Con este filtro se implementa un proceso de reconocimiento múltiple en un correlador tipo Vander Lugt con iluminación policromática.

En una segunda parte, utilizando el mismo tipo de material fotográfico y dispositivo de copiado, se propone una nueva técnica que posibilita la síntesis de filtros en niveles de gris y cuyo comportamiento es similar al de un verdadero interferograma óptico. Este filtro aúna las ventajas de las técnicas digitales con las ópticas ya que permite la suma de numerosos filtros con la posibilidad de seleccionar arbitrariamente la posición de la respuestas al impulso individuales.

3.1 Holografía digital

Diversas técnicas de digitalización surgieron con el tiempo siendo la primera de ellas la propuesta por Lohmann y Brown [Bro66] en 1966. Estas técnicas codifican los valores de fase y amplitud de la función transferencia del filtro en valores sólo de intensidad, de forma tal que, puedan representarse en algún medio físico sólo sensible a ésta, como es el caso del material fotográfico o de artes gráficas en general. Por ejemplo, el método de Lohmann se basa en dividir el filtro mediante una grilla, luego dentro de cada una de las celdas una abertura rectangular, binaria, codifica mediante su posición y su tamaño, la fase y la amplitud de la función respectivamente. El método de Burckhard [Bur70], en cambio, se basa en una representación aditiva de la amplitud compleja que se descompone como suma de tres vectores de fases $-2\pi/3$, 0 y $2\pi/3$, luego cada uno de ellos se representa a través de un rectángulo de posición fija y altura variable dentro de la misma celda de la grilla. Otra técnica de codificación diferente fue propuesta por Lee [Lee74] la cual binariza directamente las franjas de interferencia utilizando un criterio de corte conveniente. En esta última técnica se basa el primero de los métodos propuestos por lo que se expondrá a continuación

3.1.1 Método de codificación de Lee

Lee propuso en 1974 calcular directamente la posición y forma de las franjas de interferencia formadas por una onda objeto y un haz de referencia digitales. Lograba así una transferencia para el CGH más aproximada a la de un holograma real que las obtenidas por las técnicas tipo Lohmann. A continuación vamos a analizar cómo las posiciones y dimensiones de las franjas quedan determinadas a través de los cálculos de binarización.

Sea $A(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]$ la transformada de Fourier de la onda objeto a la cual se adaptará el filtro y $R \exp(-i2\pi x\alpha)$ la onda plana de referencia. Usando esta vez las coordenadas (x, y) para referirnos al plano de Fourier, el término de interferencia será

$$h(x, y) \propto 2RA(x, y) \cos[2\pi x\alpha + \varphi(x, y)]$$

cuyos máximos se encontrarán en los x que cumplen

$$2\pi x\alpha + \varphi(x, y) = 2\pi n$$

Dado que la transmisión del CGH sólo puede tomar dos valores posibles se hace necesario establecer un criterio de corte. Si denominamos $f_1(x, y)$ a la binarización de la función coseno una forma para esta puede ser asumiendo que

$$f_1(x, y) = \begin{cases} 1 & \cos(2\pi x\alpha + \varphi(x, y)) \geq \cos(\pi q) \\ 0 & \text{otro} \end{cases}$$

de esta forma los valores de x en donde esta función vale 1 están dados por

$$2\pi x\alpha + \varphi(x, y) = 2\pi n \mp \pi q \quad (3-1)$$

donde el signo negativo corresponde al extremo a (inicio de la franja) y el positivo corresponde al extremo b (final de la franja). En la Figura 3- 1 (a) se representa la función sin binarizar y en (b) binarizada.

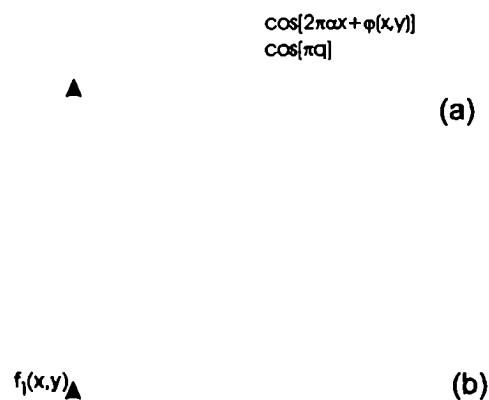


Figura 3- 1: a) Función interferencia; b) binarización.

Suponiendo que la fase φ sea constante la función $f_I(x,y)$ resulta periódica y podrá escribirse a través de una serie de Fourier:

$$f_I(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\frac{\text{sen} \pi m q}{\pi m} \right] \exp[i(2\pi x \alpha + \varphi)] \quad (3-2)$$

Esta expresión corresponde a la serie de Fourier de una onda rectangular de período $T \equiv 1/\alpha$ y máximos de ancho qT .

Es posible generalizar la ecuación anterior a valores de fase que no son constantes, $\varphi = \varphi(x,y)$ haciendo una extensión de la misma de la forma:

$$f_I(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\frac{\text{sen} \pi m q}{\pi m} \right] \exp\{i[2\pi x \alpha + \varphi(x,y)]\} \quad (3-3)$$

La validez de esta expresión se justifica haciendo la siguiente consideración: si φ es constante dentro de un intervalo Δx , entonces dentro de ese intervalo $f_I(x,y)$ corresponderá a la expresión (3-2) del tren de ondas rectangulares de ancho qT , fase φ y período T . El siguiente valor que tome la fase, sea φ_i se mantendrá constante por un intervalo Δx_i . De esta manera se puede decir que la expresión (3-3) está formada por una serie de trenes de ondas rectangulares donde cada tren i tendrá máximos de ancho $q_i T$, fase φ_i , período T y extensión Δx_i . Es decir que si la función es como la de la Figura 3-2 (a). y se la toma periódica en T , la primer franja de amplitud 1 cuyo ancho es q_1 y la fase φ_1 pertenece al tren de la Figura 3-2 (b), la segunda de ancho q_2 y fase φ_2 corresponde al tren de la Figura 3-2 (c). y así sucesivamente. Las posiciones inicial y final de cada una están dadas por los x que se obtiene de la ecuación (3-1). La información de fase queda determinada entonces por la posición de las franjas a través de la esta ecuación.

Se ha visto que la máxima eficiencia de difracción en los órdenes $+1$ y -1 se encuentra [Lee79] para el valor $q = 1/2$.

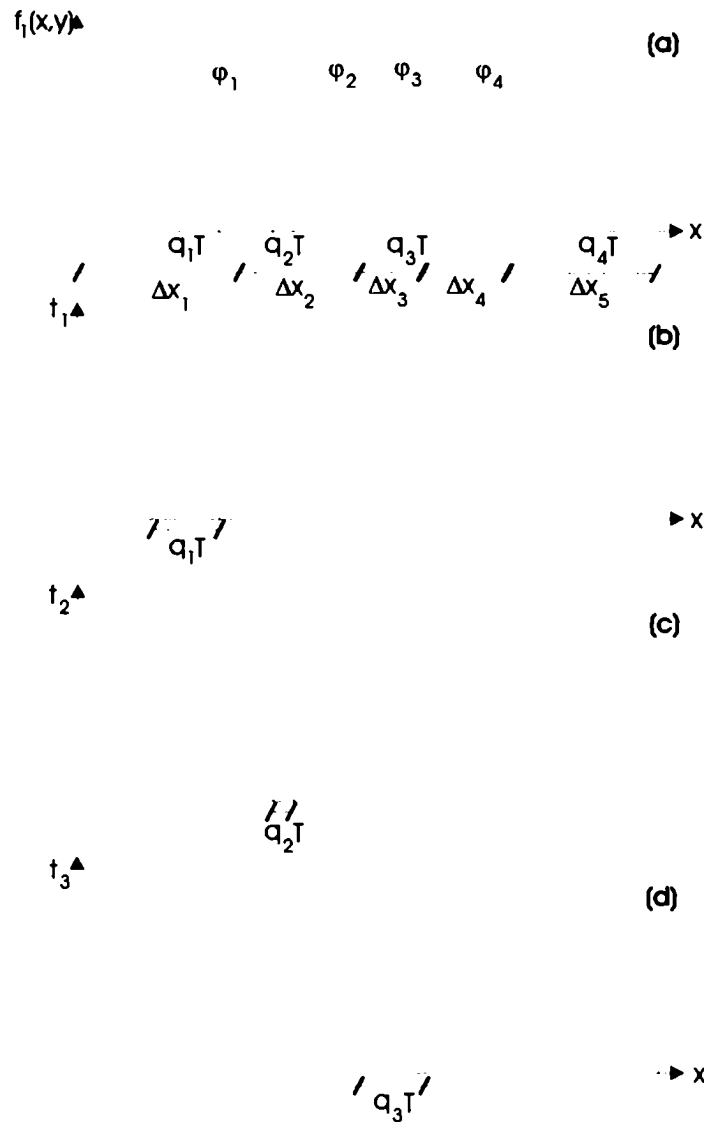


Figura 3- 2: Representación de $f_1(x,y)$ en serie de trenes de ondas rectangulares

Para codificar la amplitud se aprovecha la bidimensionalidad del holograma almacenando la información de esta en el eje y , es decir, a través de la altura de las franjas. Esta altura D (que va a depender de x) se obtiene resolviendo la ecuación:

$$\cos \frac{2\pi D}{\Delta} = \cos \pi A(x, D) \quad \text{o} \quad D = n\Delta \pm \Delta \frac{A(x, D)}{2} \quad (3-4)$$

donde Δ representa un intervalo en el eje y . Tomándolo suficientemente pequeño tal que la amplitud varíe poco dentro de cada Δ , se puede escribir la ecuación (3-4) de la forma:

$$D_n(x) = n\Delta \pm \Delta \frac{A(x, n\Delta)}{2} \quad (3-5)$$

y si A va tomando sucesivos valores constantes dentro de los mismos intervalos Δx_i en los que varía la fase, una ecuación similar a la ec.(3-3) dará la binarización en el eje y

$$f_2(x, y) = A(x, y) + \sum_{\substack{p=-\infty \\ p \neq 0}}^{\infty} \left[\frac{\sin \pi p A(x, y)}{\pi p} \right] \exp(i 2 \pi p y / \Delta)$$

Combinando las binarizaciones en fase y amplitud la transmisión del holograma será:

$$H(x, y) = f_1(x, y) f_2(x, y) \quad (3-6)$$

Similarmente a un holograma óptico, el término con $m = 1$ y $p = 0$ correspondiente al orden $(1, 0)$ de difracción reproduce la onda objeto

$$H(x, y) \propto A(x, y) \exp\{i[2\pi x \alpha + \phi(x, y)]\}$$

y el término con $m = -1$ y $p = 0$ dan en el orden $(-1, 0)$ el objeto conjugado

$$H(x, y) \propto A(x, y) \exp\{-i[2\pi x \alpha + \phi(x, y)]\}$$

3.1.1.1 Método numérico

El algoritmo se reduce a encontrar las posiciones inicial y final de cada franja oscura a partir de la ec. (3-1). Por conveniencia para cálculos posteriores vamos a

escribir esta ecuación de la forma

$$x\alpha + \frac{\varphi(x)}{2\pi} \pm \frac{q}{2} = n \quad (3-7)$$

donde para simplificar se ha suprimido la dependencia en y (esto no modifica los resultados ya que en la práctica se trabaja con una línea por vez).

La resolución de esta ecuación es, en realidad algo más complicada de lo que aparenta debido a las pérdidas en la continuidad de la fase que se producen al aplicar la transformada rápida de Fourier a los datos que representan la onda objeto. Luego de dicha operación los valores que toma la fase del espectro quedan comprendidos dentro del rango $(0, 2\pi)$ perdiéndose aquellos fuera del mismo. Por ello la fase real debe ser recuperada de ese valor residual. En la Figura 3- 3 se gráfica la función real y la resultante de aplicar la transformada discreta.

Esta recuperación se consigue si los valores en que se muestreó la fase no difieren en más de π lo cual es equivalente a pedir que se cumpla la condición de Shannon. Por ejemplo, la función $\exp(i2\pi x\alpha)$ tiene una fase de $2\pi x\alpha$, al pedir que $\Delta\varphi \leq \pi$ se obtiene que el intervalo de muestreo Δx debe cumplir con la relación $\Delta x \leq 1/(2\alpha)$ que es justamente la condición de Shannon. La técnica para recuperar la fase real, consiste entonces en comparar dos valores de fase contiguos en el muestreo. Si estas difieren en más de π , múltiplos de 2π son agregados o substraídos al valor de la derecha hasta que la diferencia sea menor que π .

$\varphi/2\pi$
▲

► x

Figura 3- 3: Función continua y función residual.

Una vez recuperada la fase se resuelve la ecuación (3-7) para cada uno de los intervalos de fase constante. El procedimiento consiste en igualar esta ecuación a un nuevo valor de fase

$$\Psi_k \equiv \frac{\varphi_k}{2\pi} + x\alpha \pm \frac{q_k}{2}$$

y pedir que sea igual a un valor entero: $\psi_k = n$.

$$\psi_k = \varphi/2\pi + x\alpha + q_k/2 \quad (a)$$

$$\begin{array}{c} x \\ \Delta x \cdot p \\ \Delta x \cdot 2\Delta x \quad \Delta x \cdot (p-1) \cdot x \quad \Delta x \cdot (p+1) \\ x \quad x \quad x \\ x \end{array} \quad (b)$$

$$x_n = \Delta x(p - |\epsilon_n|)$$

Figura 3- 4: Interpolación. a) ψ_B ; b) porción donde se interpola.

De esta manera se comparan los distintos valores de fase con n , si ψ_p es el primero que excede n , la franja comenzará o finalizará (dependiendo de que se haya usado el signo - o + de la ecuación) en un $x \equiv x_n$ entre $(p-1)\Delta x$ y $p\Delta x$, donde Δx es el intervalo de muestreo. Los valores de x_n se obtienen mediante una interpolación cuadrática a partir de conocer los valores de ψ_p , ψ_{p+1} y ψ_{p-1} . Pidiendo que la ecuación sea igual a n se obtendrá el x_n buscado:

$$n = \delta_0 + \delta_1 \varepsilon + \delta_2 \varepsilon^2$$

con $\delta_0 = \psi_p$; $\delta_1 = (\psi_{p+1} - \psi_{p-1}) / 2$; $\delta_2 = (\psi_{p+1} - \psi_{p-1} + 2\psi_p) / 2$

La solución ε_n que satisfaga $-1 < \varepsilon_n < 0$ está relacionada con x_n de la siguiente manera: $x_n = (p + \varepsilon_n) \Delta x$. Las Figura 3- 4 (a) y (b) muestran una representación de ψ_k y la porción ampliada del intervalo tomado para la interpolación.

De esta forma, según se use, en la ecuación, el signo - o + se obtendrán las posiciones inicial y final de las distintas franjas. La altura de cada una quedará determinada por la ec. (3-5).

3.2 Multiplexado en color

Los métodos para generar hologramas digitales binarios dan como resultado una función transferencia compuesta por rectángulos negros sobre un fondo transparente. Esta forma se debe ya sea por la codificación mediante rectángulos en sí o por la binarización del interferograma (ver Figura 3- 5). Un filtro compuesto, adaptado a varios objetos dará lugar a un número mayor de rectángulos negros que eventualmente se superpondrán limitando el paso de la luz y obstruyendo la información correspondiente a cada filtro individual.

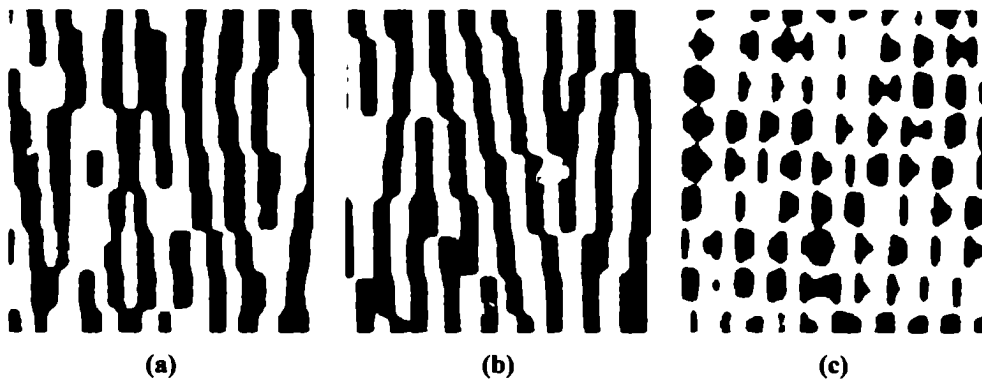


Figura 3- 5: Porción ampliada de CGH codificado por el método de (a) Lee; (b) Lohmann; (c) Burckhardt. (Imagen tomada del filtro impreso)

Veamos como, dentro de las técnicas de codificación binaria, es posible aumentar la cantidad de información que puede almacenarse y reconstruirse satisfactoriamente. Para ello analicemos que sucede cuando iluminamos el filtro con luz monocromática, por ejemplo con un laser de He-Ne ($\lambda = 633 \text{ nm}$). En un filtro binario tradicional blanco y negro, claramente, los sectores transparentes permiten el paso de la luz y los negros la bloquean. Por otro lado para esta longitud de onda reemplazar los sectores transparentes por rojos sería totalmente equivalente y la luz transmitida no se vería afectada. Igualmente si las zonas negras son reemplazadas por un color que bloquee al rojo, por ejemplo verde o azul, el resultado permanecería invariante. En la Figura 3- 6 (a), (b) y (c) se muestra una porción de CGH en la que se ha realizado el reemplazo descrito, los tres serían totalmente equivalentes para iluminación con luz roja.

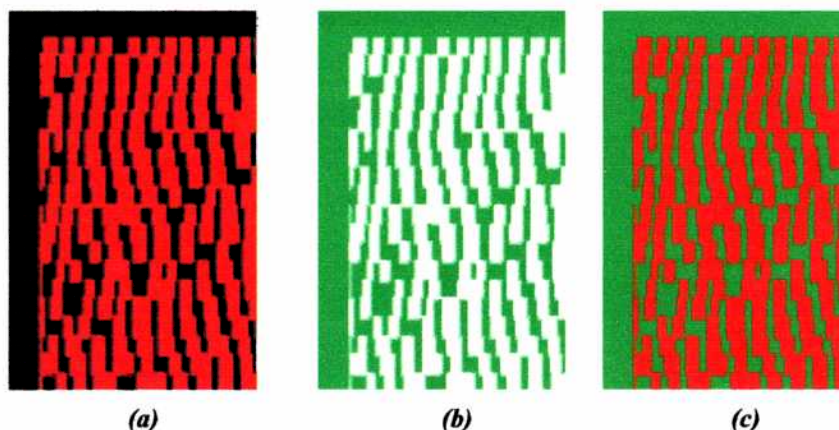


Figura 3- 6: porción de CGH binario convertido a: (a) rojo y negro; (b) transparente y verde; (c) rojo y verde. Para iluminación con luz roja monocromática todos son equivalentes a un CGH blanco y negro

Similarmente ocurriría si se utilizase luz de cualquier otra longitud de onda, las zonas transparentes podrían reemplazarse por el color de la luz usada y las negras por algún color que bloquee dicha longitud de onda.

Siguiendo esta lógica podría generarse un holograma en rojo y negro para ser iluminado con luz roja y otro holograma en verde y negro adaptado a un objeto distinto para ser iluminado con luz verde. La superposición de ambos generaría un filtro formado por zonas negras, rojas, verdes y amarillas. En la Figura 3- 7 (a) se muestra una

simulación del proceso aditivo. Esta suma se realiza píxel a píxel por lo que aquellas coordenadas en donde ambos filtros sean negros darán como resultado píxeles negros, la suma del rojo con el negro da como resultado rojo y la suma del verde con el negro da verde. Esto último que puede resultar poco intuitivo se ve claramente si tenemos en cuenta que el negro está identificado por el vector $[0,0,0]$ en el sistema RGB, por lo que agregarle cualquier otro color, como por ejemplo el rojo $[(255,0,0)]$ en RGB) da como resultado rojo $[(0,0,0) + [255,0,0] = [255,0,0]]$. Por último, la suma del rojo con el verde para el sistema RGB resulta amarillo.

Las zonas amarillas provienen de los sectores que son transparentes para ambos filtros por lo que dejan pasar ambas longitudes de onda. Las zonas rojas resultan de las zonas transparentes para el filtro rojo y negras para el verde por lo que dejarían pasar la luz roja y bloquearían la verde. El caso inverso resulta para las zonas verdes. Finalmente los sectores negros bloquean ambas longitudes de onda como lo harían los filtros por separado. En el cuadro de la Figura 3- 7 (b) se indican las longitudes de onda transmitidas o bloqueadas por el píxel de la fila correspondiente en la parte (a).

(a)

Trasmitida	Bloqueada
—	roja, verde
roja	verde
verde	roja
roja, verde	—

(b)

Figura 3- 7: (a) proceso aditivo de colores en cada píxel; (b) cuadro indicando cual longitud de onda es transmitida por el color suma y cual bloqueada

A diferencia de un holograma constituido sólo por la superposición de rectángulos negros y transparentes, un holograma compuesto, generado con este procedimiento, eliminaría el problema del bloqueo de zonas que ocurre con el método convencional. Este procedimiento permite aumentar la cantidad de información que puede

almacenarse en el filtro mediante la creación de canales de color. El número de canales utilizables depende del espectro luminoso de la fuente empleada y de la curva de transmisión del material de registro. Es decir, para la correcta separación de canales el material fotográfico empleado debe bloquear adecuadamente las longitudes de onda complementarias al color registrado y dejar pasar con mínima atenuación a las del mismo color. Es por tal motivo que se hace necesario un estudio de la transmisión de distintos niveles de RGB registrados en la película en función de la longitud de onda incidente.

3.2.1 Análisis de la transmisión del film color

Para estudiar la respuesta de la película diapositiva color se imprimieron diferentes imágenes consistentes en un fondo constante, cada uno con una combinación RGB distinta y se analizó su transmisión en función de la longitud de onda de la luz incidente.

El equipo utilizado para transferir las imágenes generadas en la PC a una película diapositiva color fue una grabadora de film marca AGFA modelo Alto. La película utilizada fue una Kodak EPP de 35 mm con una relación 3:2 y las imágenes transferidas de un tamaño 4096 x 2732 píxeles. La transmisión de cada una de las diapositivas en función de la longitud de onda fue obtenida por medio de un espectrofotómetro de doble haz Shimadzu UE160 facilitado por el departamento de Química Inorgánica de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.

En la Figura 3- 8 (a), (b) y (c) se muestra la respuesta de la película cuando se imprimen sobre ella los tres colores fundamentales en su máximo nivel de saturación: rojo = (255,0,0), verde = (0,255,0) y azul = (0,0,255), respectivamente.

De acuerdo a esta respuesta espectral y teniendo en cuenta las fuentes de luz con las que contábamos en el laboratorio: un láser de He-Ne de longitud de onda ($\lambda = 628,3$ nm) y un láser de Argón cuya línea predominante es ($\lambda = 514$ nm), se decidió que la combinación rojo (R255 = 255,0,0), verde (G255 = 0,255,0), amarillo (R255 + G255) era una elección adecuada. Para realizar esta elección se tuvieron en cuenta tres aspectos: R255 @ $\lambda = 628,3$ nm posee aproximadamente la misma transmisión que G255 @ $\lambda = 514$ nm, la respuesta de R255 @ $\lambda = 514$ nm y G255 @ $\lambda = 628,3$ nm es

prácticamente nula y la combinación R255 + G255 transmite adecuadamente las dos longitudes de onda (Figura 3- 8 (d)).

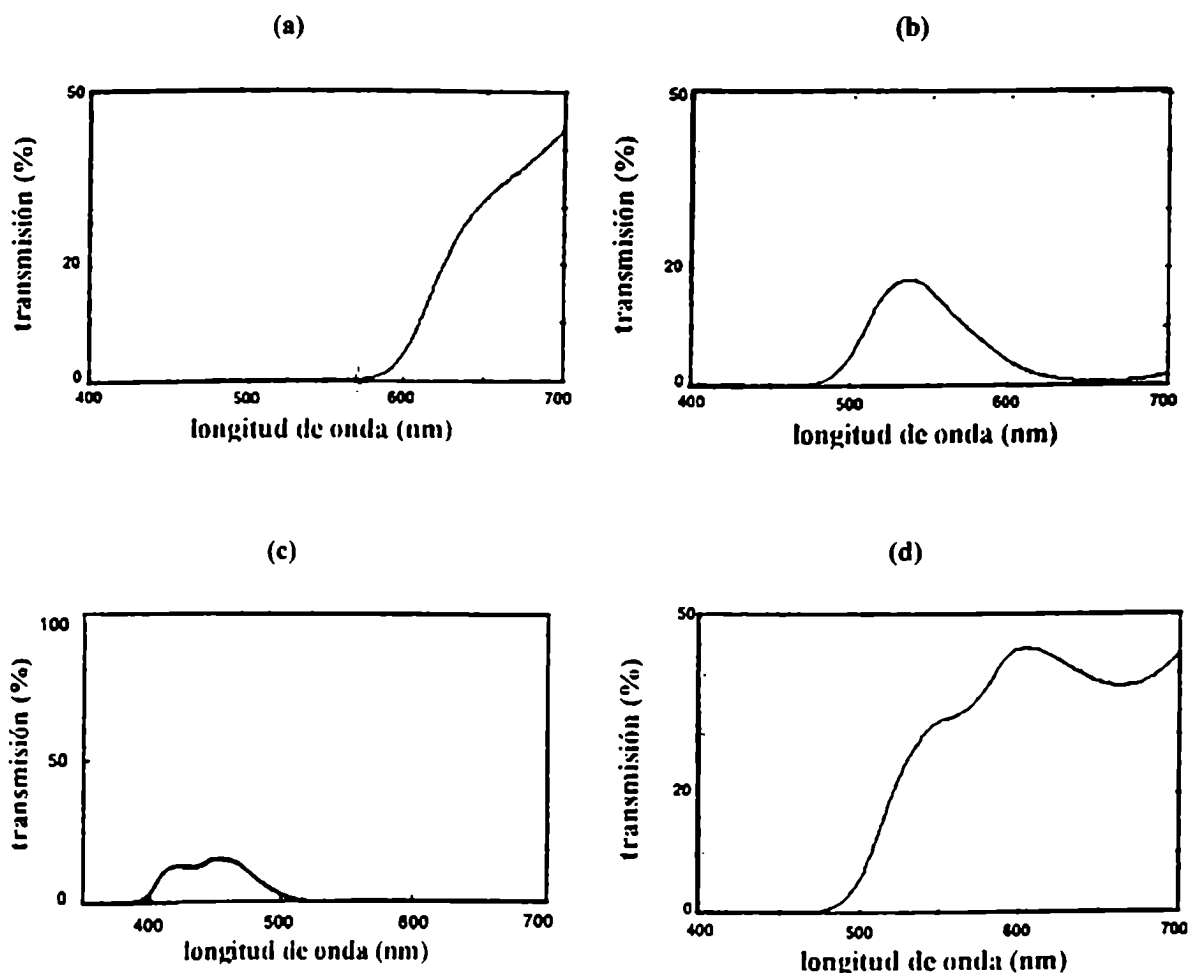


Figura 3- 8: Transmisión de la película color vs. la longitud de onda medido con un espectrofotómetro para los niveles: (a) R255; (b) G255; (c) B=255; (d) R255 + G255

En una primera etapa se quiso analizar el caso más sencillo, es decir aquel en el cual un holograma binario simple es sintetizado sobre película color y en el cual el blanco y negro original es reemplazado por colores convenientes, tal como se explicó anteriormente. Se decidió utilizar como fuente de iluminación un láser de He-Ne y en consecuencia los valores blanco y negro se reemplazaron por el rojo y el verde respectivamente. Paralelamente, otro holograma de similares características, pero en blanco y negro, fue también impreso y analizado a modo comparativo.

Los pasos seguidos para este estudio fueron:

- a. Generación de dos CGHs binarios, sólo de fase (POF) y conversión a formato RGB de uno de ellos
- b. Registro de los hologramas en color y en blanco y negro
- c. Análisis comparativo de las respuestas al impulso y evaluación final

a. Generación y conversión:

Se generaron dos filtros, adaptados a la imagen de la flor de la Figura 3- 9, por el método de Lee descrito a comienzos de este capítulo. La imagen es de 128 x 128 píxeles y los filtros generados poseen una resolución de 9 x 9 puntos por celda siendo su tamaño físico de 9,6 mm de lado. Para obtener filtros sólo de fase, el valor de la amplitud de la transformada de Fourier del objeto fue removida y reemplazada por el valor unidad antes de realizar la codificación.

Uno de los CGHs fue transformado a formato RGB por medio de un programa de gráfica que almacenó las zonas negras en el canal verde nivel (0,255,0) y las zonas blancas en el canal rojo nivel (255,0,0).

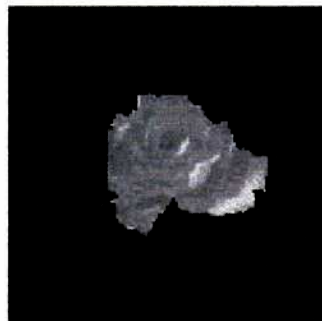


Figura 3- 9: imagen de 128 x 128 píxeles utilizada para generar el holograma

b. Registro

El filtro color fue embebido en un cuadro negro de 24 x 36 mm (tamaño de la diapositiva) e impreso en una resolución de 4096 x 2732 píxeles. La película y la impresora de diapositivas empleadas fueron las mismas que las usadas para analizar las

curvas de transmisión. La versión en blanco y negro se registró en una película litográfica con una máquina Linotronic. Este equipo es una impresora láser comercial de alta resolución (3200 puntos por pulgada) que sólo imprime en formato binario. Se empleó esta impresora en lugar de la grabadora de film color ya que los filtros por ella impresos habían sido evaluados en trabajos anteriores [Vil97] de modo que esto nos sirvió también para evaluar el funcionamiento de la impresora color.

c. Comparación de los resultados

La reconstrucción experimental de ambos hologramas fue obtenida experimentalmente utilizando un láser de He-Ne y capturada por una cámara CCD SONY SSC M350. En las Figura 3- 10 (a) y (b) se pueden ver las respuestas al impulso de los filtros blanco y negro y color respectivamente.



Figura 3- 10: respuesta al impulso de los filtros (a) blanco y negro; (b) rojo y verde

De la imagen de la reconstrucción se desprende que el holograma color ha almacenado y reproducido la información. Sin embargo existe una notoria diferencia en el orden cero de las dos imágenes siendo más intenso el obtenido a partir del filtro color. Este fenómeno evidencia que una mayor porción de la luz no ha sido difractada. Una causa posible puede atribuirse a que si bien la transmisión del G255 es muy baja para la longitud de onda roja, no es nula. De este modo, las zonas verdes estarían actuando a modo de gris y no como negro, incrementando así la amplitud de luz que se dirige al orden cero. Un análisis al microscopio reveló además que el holograma color presentaba

una línea amarilla originada por la superposición de los dos colores en los límites de los rectángulos. Una porción ampliada de ambos filtros se muestra en la Figura 3- 11. El efecto de esta línea amarilla para la longitud de onda de la iluminación usada es el de un agrandamiento de las zonas rojas lo que altera el proceso de codificación.

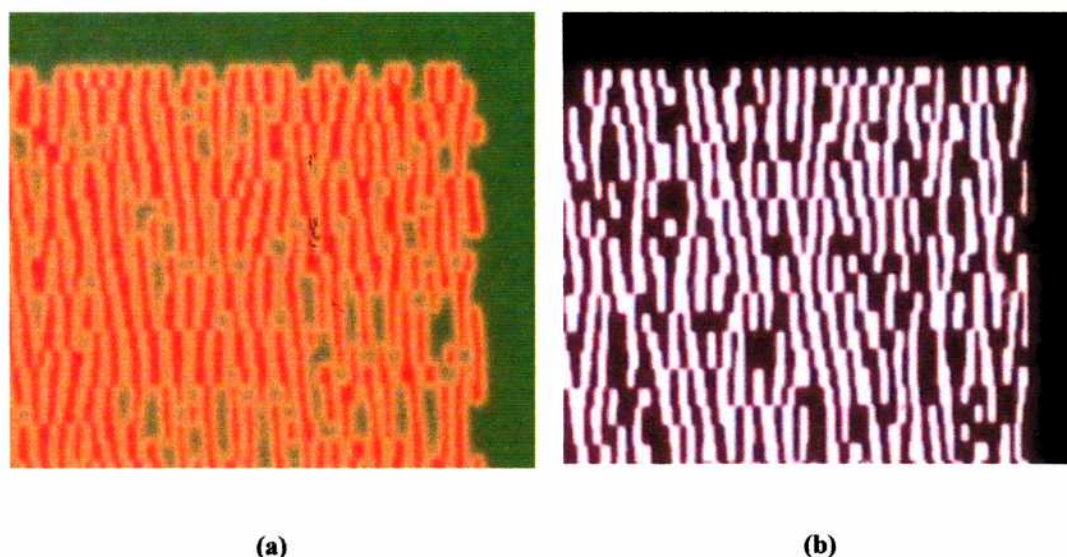


Figura 3- 11: porción aumentada de los filtros (a) color; (b) blanco y negro

Dado que estos colores no constituían una buena combinación para generar un filtro compuesto, al menos con este nivel de resolución de impresión y con esta respuesta espectral, se decidió analizar las transmisiones de las diapositivas registradas con los tonos R255 y B255. Comparando ambas curvas (Figura 3- 8) vemos que estas se hallan lo suficientemente separadas como para que no haya ninguna componente cruzada de longitud de onda en la transmisión de cada color por lo que optamos probar el filtro compuesto en estos canales. Existe de todos modos una marcada diferencia entre las intensidades transmitidas por cada color, el nivel R255 deja pasar mucha más intensidad que el B255. Esto se solucionó empleando otro nivel de rojo más bajo cuya transmisión fuese de una intensidad comparable a la del azul. Analizamos las transmisiones del nivel de rojo R128 y R192 y sus combinaciones con el azul B255 y encontramos que el nivel R192 se ajustaba mejor. En la Figura 3- 12 se muestran las

curvas de transmisión obtenidas para los niveles (a) R=192, (b) B=255 y (c) la suma de ambos.

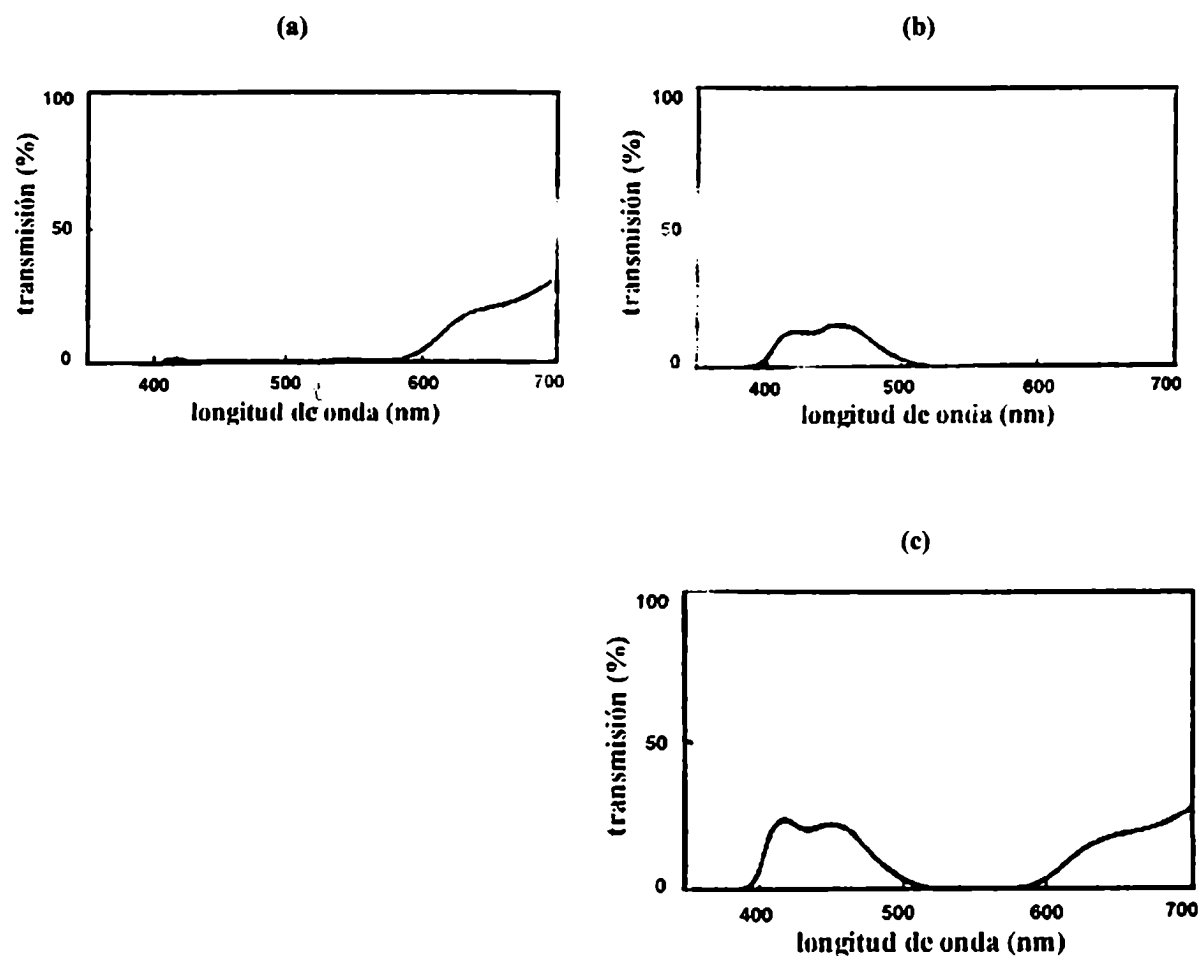


Figura 3- 12: transmisión en función de la longitud de onda para los niveles: (a) R=192; (b) B=255; (c) R=192 + B=255

Esta combinación era apta para utilizar el láser de He-Ne y la línea azul ($\lambda = 457$ nm) del láser de Ar. Se decidió probar esta combinación directamente aplicándola a la síntesis de filtros compuestos.

3.2.2 Filtro compuesto con información de un solo objeto por canal

El método de codificación por fase fue realizado primero con un filtro compuesto por la superposición de hologramas POI adaptados cada uno a un objeto distinto. Uno de ellos se registró en el canal azul y el otro en el canal rojo para ser usados con la línea azul del láser de argón y el láser de He-Ne respectivamente. La principal motivación en el síntesis de este filtro sencillo fue evaluar la posible existencia de información cruzada en la combinación de colores.

i) Síntesis y composición

Se generaron dos filtros POF utilizando el método de codificación de Lee. El primero de ellos se diseñó para ser iluminado con luz roja por lo que las zonas transparentes fueron reemplazadas por el color rojo nivel $R=192$ mientras que las negras no se modificaron. El segundo de ellos fue diseñado para iluminación azul de modo que las zonas transparentes se cambiaron al canal azul $B=255$ dejando las negras inalteradas. El filtro rojo se adaptó para reconocer la cabeza del dinosaurio *diplodocus* de la Figura 3- 13 (a) y el azul para reconocer la cabeza de *tiranosaurio* de la Figura 3- 13 (b). Ambas figuras son de 128×128 píxeles y cada filtro se diseñó de 9×9 puntos por píxel de resolución. Con el objeto de obtener filtros sólo de fase la amplitud de las transformadas de cada objeto fue normalizada.

El objetivo era generar un filtro compuesto por la superposición de ambos hologramas en un mismo film color. Este filtro sería luego utilizado en un correlador de Vander Lugt policromático (láser de He-Ne y láser de Argón). Así debió considerarse en la composición del filtro, la dependencia del tamaño de la figura de difracción con la longitud de onda. Esto es, se debió adaptar el tamaño relativo de los hologramas para que las figuras de difracción provenientes de los dos objetos, posiblemente presentes en la escena de entrada, coincidiesen con el tamaño del objeto que se usó en la generación de los CGHs. Esta coincidencia es esencial ya que como mencionamos en el Capítulo 2 estos filtros son altamente sensibles a pequeños cambios de escala.

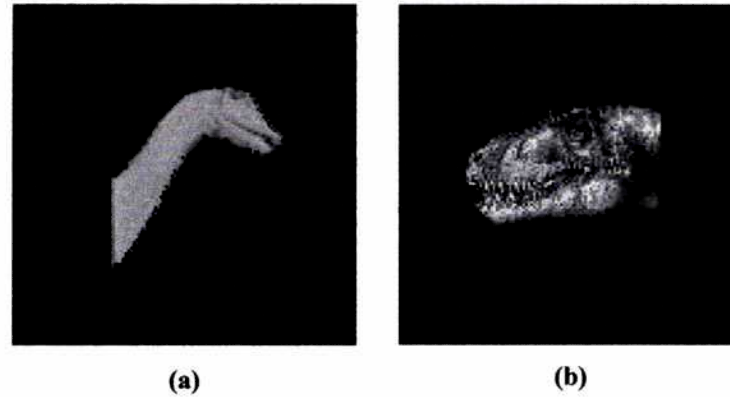


Figura 3- 13: objetos a reconocer en las longitudes de onda: (a) roja; (b) azul

Si se ajusta el correlador para el tamaño del filtro obtenido directamente con el algoritmo de Lee en la longitud de onda del rojo, el filtro azul deberá ser multiplicado por un factor de escala antes de ser sumado al filtro rojo. Este factor de escala se obtiene de forma muy sencilla sabiendo que, para incidencia normal, la posición de los órdenes de difracción producidos por una abertura a , observados a una distancia s , guardan la relación

$$a \frac{y_m}{s} \approx m\lambda \quad (3-8)$$

donde y_m es la distancia sobre la pantalla de observación del orden m , medida desde el centro. Fijadas la abertura a y la distancia s , una longitud de onda λ_1 formará el orden m en y_{1m} y otra longitud de onda λ_2 lo formará en y_{2m} . Expresando la ec.(3-8) en términos de y_{1m} y λ_1 y dividiéndola por la misma ec. en términos de y_{2m} y λ_2 se obtiene el factor de escala buscado

$$y_{2m} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} y_{1m} \quad (3-9)$$

En nuestro caso, el filtro rojo se conservó del tamaño resultante de la codificación de Lee, 9.6 mm de lado, y se ajustó la escala del filtro azul mediante la fórmula (3-9) dando una cantidad igual a 6,9 mm para su tamaño.

La imagen final RGB se compuso sumando los canales rojo y azul mediante un programa comercial de gráfica. En la Figura 3- 14 se muestra una porción ampliada del filtro resultante. Se puede ver el filtro azul más pequeño superpuesto con el rojo. El color magenta resulta de la suma del rojo con el azul.

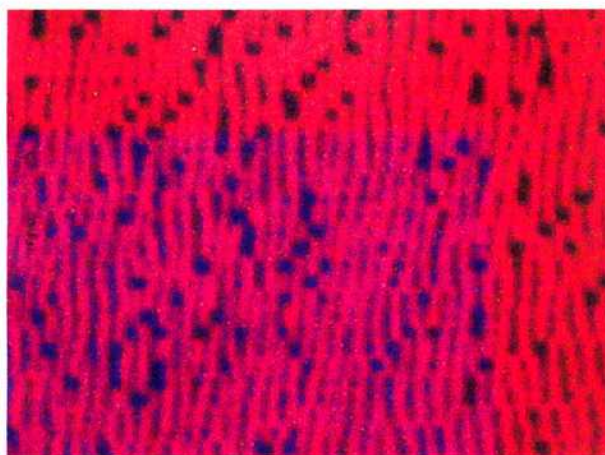


Figura 3- 14: porción ampliada del filtro compuesto POF en nivel B=255 y R=192

ii) Respuesta al impulso

La respuesta al impulso del filtro compuesto se obtuvo utilizando secuencialmente la longitud de onda del láser del He-Ne y luego la línea azul del láser de Argón. Cada una fue comparada con el resultado obtenido por simulación numérica para filtros blanco y negro conteniendo la información de cada objeto.

En la Figura 3- 15 (a) y (c) se muestran las respuestas al impulso, obtenidas por simulación numérica y en las Figura 3- 15 (b) y (d) las experimentales cuando el filtro es iluminado con el láser rojo y con el láser azul respectivamente.

En las figuras se pueden ver las reconstrucciones del objeto y su conjugado en los órdenes 1 y -1 , respectivamente, junto con el orden cero, el cual fue obstruido para bajar su intensidad. Puede observarse que los distintos canales de color reconstruyen la imagen almacenada correspondiente y no presentan información cruzada. Adicionalmente los resultados experimentales concuerdan ampliamente con los

obtenidos mediante las simulaciones numéricas, por lo que podemos concluir, que esta combinación de colores es adecuada para las longitudes de onda de 632,8 nm y 457 nm.

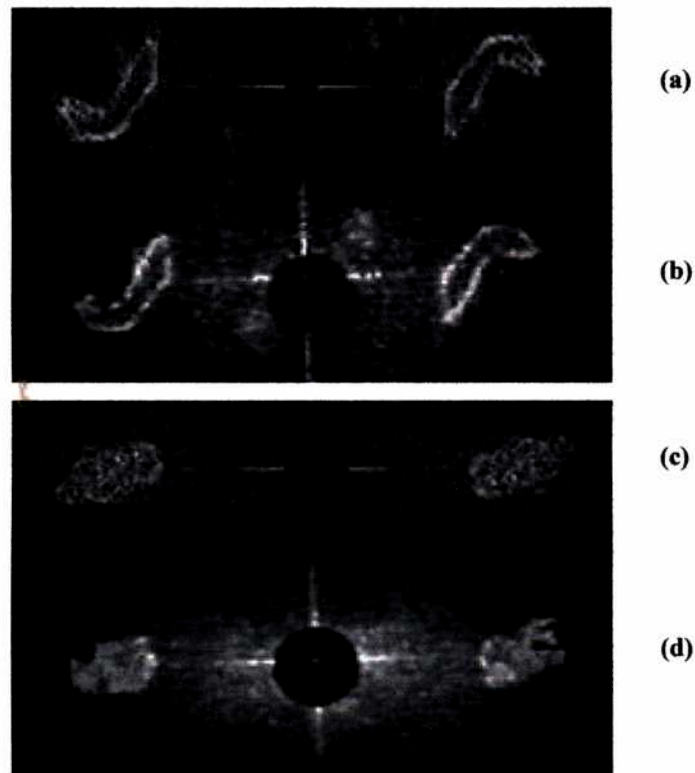


Figura 3- 15: respuestas al impulso del filtro para los casos: (a) simulación del filtro del canal rojo; (b) experimental con iluminación roja; (c) simulación del filtro del canal azul; (d) experimental con iluminación azul

iii) Correlación

El filtro fue finalmente evaluado en un proceso de reconocimiento óptico para lo cual se montó un correlador convergente. Este montaje es especialmente adecuado para esta operación ya que permite ajustar la escala de la transformada de Fourier de la escena a partir de variar su distancia relativa al filtro, ajuste absolutamente esencial para realizar el proceso de detección empleando un correlador tipo Vander Lugt. La Figura 3- 16 muestra un esquema del montaje experimental usado. El haz láser es filtrado espacialmente y expandido antes de dirigirlo a la lente L_1 . La escena es dispuesta en el

plano P_1 detrás de la lente L_1 de modo que su desplazamiento respecto a ésta nos permite ajustar su tamaño al del filtro. Esta lente provee la transformada de Fourier de la escena en el plano P_2 , conjugado al de la fuente, donde se coloca el filtro H . Una segunda transformada se obtiene mediante la lente L_2 lo que permite obtener la correlación en el plano final P_3 donde es colocada una cámara CCD SONY SSC M350 blanco y negro.

Las correlaciones fueron obtenidas secuencialmente, primero con una longitud de onda y luego con otra, pero también se pueden realizar simultáneamente y registrar la salida con una cámara color. El hecho de que cada pico se forma del color correspondiente al canal que esta reconociendo es un método efectivo para discernir canales y por lo tanto objetos.

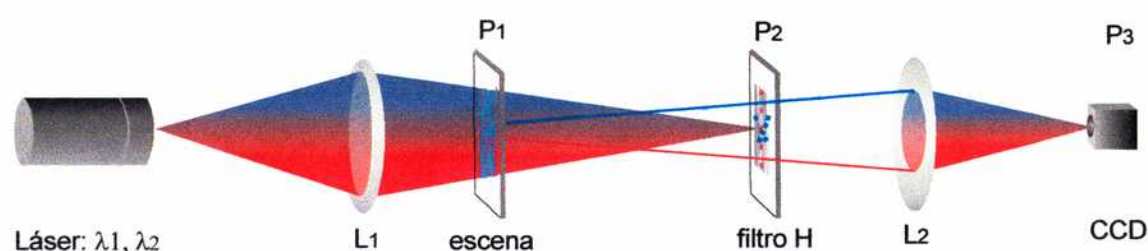


Figura 3- 16: esquema del correlador empleado para los filtros color

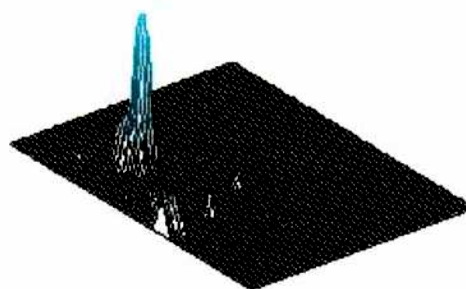
La escena usada para ambas longitudes de onda es la representada en la Figura 3-17, donde el dinosaurio de la parte superior se reconoce en el canal rojo mientras que el de la parte inferior se reconoce en el canal azul. La escena, de 128 x 128 píxeles, se imprimió en película litográfica por medio de una impresora Linotronic en un tamaño de 9,6 mm. Si bien la escena esta compuesta por niveles de gris, el equipo linotronic genera estos tonos mediante variaciones de densidad de puntos negros.



Figura 3- 17: Escena usada con el filtro POF-color



(a)



(b)

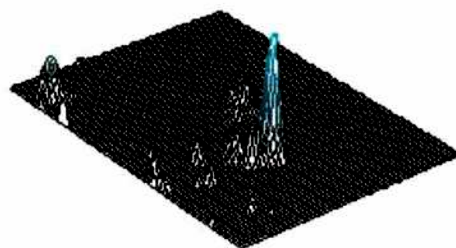


Figura 3- 18: imagen del plano de salida y la representación 3D de la correlación con iluminación: (a) roja; (b) azul

En la Figura 3- 18 se muestran los resultados obtenidos para las correlaciones con la longitud de onda del rojo (a) y del azul (b). En las imágenes tomadas con la CCD se pueden observar la correlación a la derecha, la convolución a la izquierda y en el centro la escena convolucionada con el orden cero del filtro tal cual se introdujo en el capítulo 2 cuando presentamos el correlador de Vander Lugt. El punto señalado con la flecha en cada imagen corresponde al pico de autocorrelación y el gráfico 3D, a la derecha de cada una, corresponde a una representación tridimensional de la zona de correlación. Vemos así que en cada canal se reconoció al objeto correcto y no se obtuvo detección cruzada.

3.2.3 Filtro compuesto con información de múltiples objetos por canal

i) Síntesis y composición

Un filtro más complejo fue generado por la superposición de dos hologramas compuestos, adaptado cada uno de ellos a 4 objetos distintos. Se emplearon dos algoritmos alternativos para generar cada filtro múltiple:

- El algoritmo MACE-SDF descrito en el Capítulo 2 se empleó en primera instancia para generar cada uno de los CGHs compuestos que conformarían un primer filtro rojo-azul.
- Un segundo filtro color fue diseñado a partir de la superposición de dos hologramas adaptados a los mismos objetos pero creados con el algoritmo MED-SDF, descrito en el mismo capítulo, con el propósito de obtener una mayor eficiencia luminosa en la salida.

Para ambos el holograma compuesto, a usarse en el canal rojo, se generó componiendo las cuatro cabezas de dinosaurio de la Figura 3- 19 y el destinado al canal azul se formó por la combinación de los cuatro cuerpos. Cada CGH fue creado con una resolución de 9 x 9 puntos por píxel y un tamaño de 9,6 x 9,6 mm. Todos los

hologramas fueron codificados usando la misma fase lineal horizontal para los distintos objetos. La codificación final fue hecha con el método de Lee.

El procedimiento llevado a cabo para la superposición y obtención del filtro final es idéntico al seguido para el filtro mono-objeto: conversión de cada CGH en el canal de color correspondiente; ajuste de tamaños; superposición final.

En la Figura 3- 20 (a) y (b) se muestran los filtros finales obtenidos a partir del algoritmo MACE-SDF y MED-SDF respectivamente.

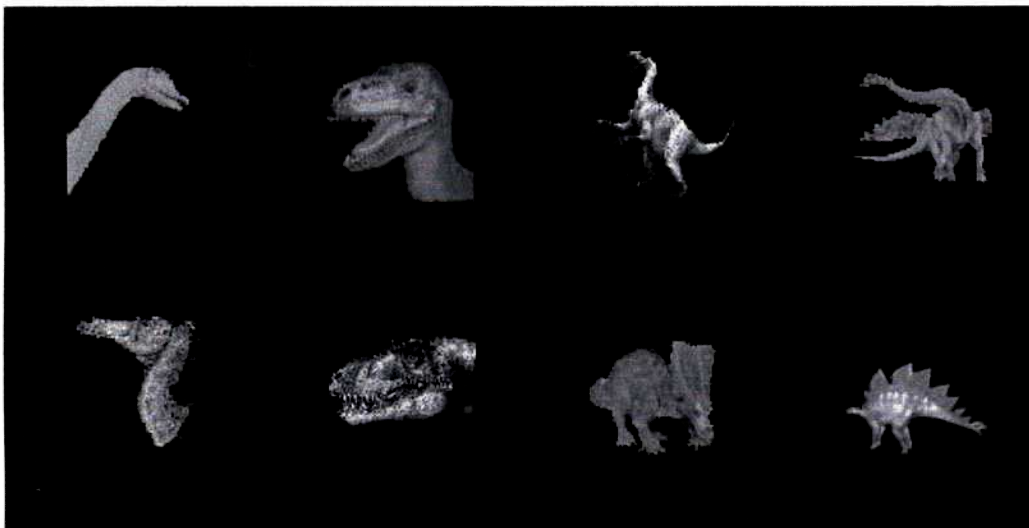


Figura 3- 19: conjunto de objetos codificados en los filtros MACE-SDF y MED-SDF color. Las cuatro cabezas se almacenaron en el canal rojo y los cuatro cuerpos en el canal azul

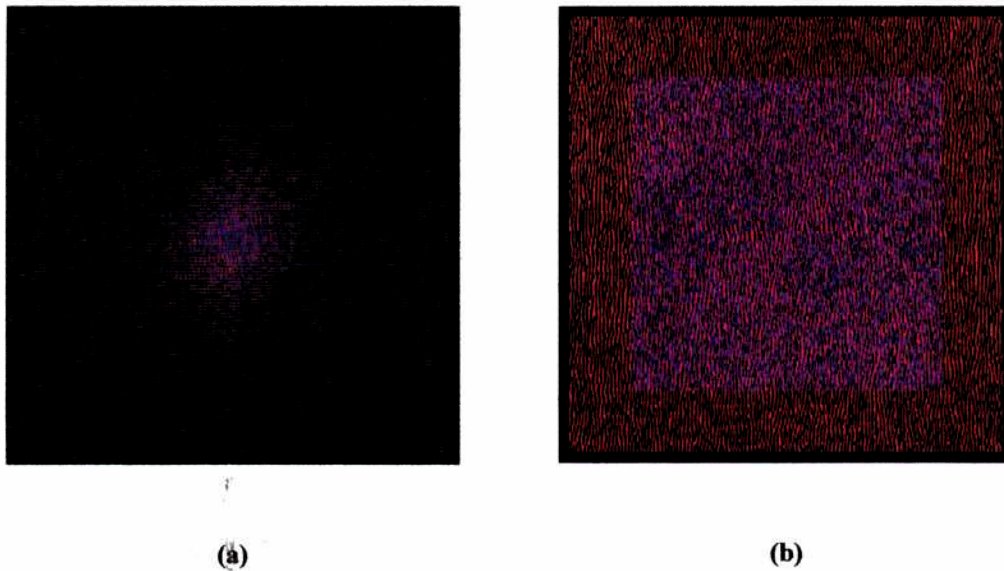


Figura 3- 20: filtro color generado a partir del algoritmo: (a) MACE-SDF; (b) MED-SDF

Claramente se puede ver que la transmisión del filtro MED-SDF es superior a la del convencional MACE-SDF, lo que demuestra una vez más la ventaja de un diseño que realce las frecuencias altas. Por tal motivo tan sólo el filtro final proveniente de la composición de CGHs MED-SDF fue transferido a material fotográfico.

ii) Correlación

El filtro fue incorporado al mismo correlador usado con el filtro simple. La escena de entrada, en esta ocasión, estaba formada por la cabeza y el cuerpo mostrados en imagen de la Figura 3- 21. Ambas figuras forman parte del conjunto de objetos a ser reconocidos.

El proceso de reconocimiento, al igual que en el caso anterior, se efectuó primero empleando el láser de He-Ne y posteriormente el láser de Argón. Ambos resultados fueron recogidos con una cámara CCD blanco y negro. En las Figura 3- 22 (a) y (b) se pueden ver las imágenes obtenidas en el plano final para cada longitud de onda y al lado de cada una de ellas un gráfico tridimensional de la zona de correlación. Como se puede apreciar en cada canal se identificó la figura correcta. En el correspondiente al rojo la cabeza de dinosaurio fue detectada, mientras que el cuerpo fue rechazado. Similarmente, en el canal azul fue reconocido el cuerpo y no la cabeza. Concluimos de

esta manera que el método fue efectivo también con filtros más complejos adaptados a más de un objeto.

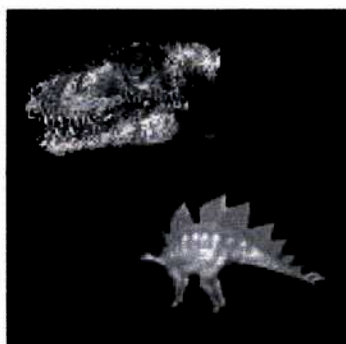
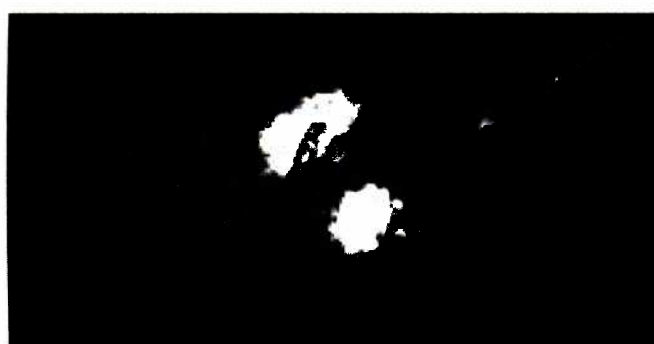
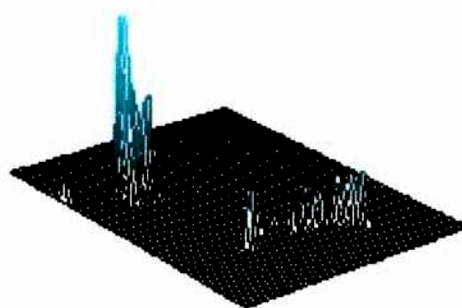


Figura 3- 21: escena usada para correlacionar con el filtro múltiple



(a)



(b)

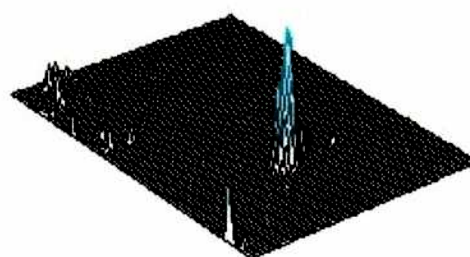


Figura 3- 22: : imagen del plano de salida y la representación 3D de la correlación con iluminación: (a) roja; (b) azul

3.3 Síntesis de hologramas compuestos en niveles de gris

Las técnicas presentadas hasta el momento para la generación de CGHs se basaron en métodos de codificación binarios. Incluso nuestra propuesta de multiplexado en color partió también de un método binario, a pesar de permitir una superposición final de hologramas en donde se evitaba la obstrucción de la información típica de este tipo de codificación. La falta de dispositivos capaces de controlar con precisión el nivel de intensidad a grabar en un material fotográfico fue la razón principal que llevó al diseño de CGHs binarios.

Si bien los hologramas generados por computadora permitieron llevar a cabo diseños de filtros que no podían ser logrados por técnicas ópticas y mejorar sensiblemente la calidad de los procesos de reconocimiento, la codificación binaria presenta algunas desventajas frente a los interferogramas ópticos.

Como hemos descrito anteriormente, la función transmisión de uno de estos filtros binarios, independientemente del método usado para su síntesis, se haya compuesta por un arreglo de rectángulos negros y transparentes. Este hecho hace que el filtro actúe a modo de red binaria, en consecuencia, su respuesta al impulso está constituida por numerosos órdenes difractados en los que se repite el objeto codificado y su imagen conjugada con una separación proporcional a la fase lineal, introducida por la “onda” digital de referencia. Esta multiplicidad de órdenes hace que, por un lado, se pierda energía y, por el otro, que puedan aparecer superposiciones de imágenes no deseadas. Otra desventaja que presenta este tipo de filtros es la imposibilidad de elegir la orientación y frecuencia espacial de la portadora. La orientación debería controlarse girando los rectángulos en forma adecuada pero el proceso genera errores de codificación. Asimismo, la frecuencia espacial no puede elegirse de forma arbitraria ya que da lugar a superposición de rectángulos. Por último, y tal como se ha discutido previamente, la suma de múltiples hologramas provoca una pérdida de la información ya que el proceso no es lineal.

Si en lugar de binarizar la función transferencia se calcula la interferencia entre la onda objeto y la onda de referencia y luego se digitalizan los valores en niveles de gris, el holograma obtenido es muy similar a un verdadero interferograma, incorporando las ventajas que éste tiene por sobre el digital. Una de las características de un holograma

óptico, en el cual el perfil de las franjas de interferencia es de forma sinusoidal, es que sólo reproduce al objeto y su conjugado en los órdenes 1 y -1 con lo que la multiplicidad de órdenes del holograma binario es eliminada. Además al ser la figura de interferencia en niveles de gris, la superposición de hologramas no hace perder información. Por último la orientación y frecuencia espacial de la portadora puede elegirse arbitrariamente ya que no son necesarios los rectángulos para efectuar la codificación de la fase y la amplitud

De acuerdo a lo dicho en el párrafo anterior nuestra propuesta es generar filtros compuestos conformados por la superposición de varios CGH's. Cada holograma es calculado digitalmente como la interferencia entre una onda objeto y una onda de referencia, luego los valores obtenidos para este interferograma son directamente cuantizados en niveles de gris, al igual que una imagen, y son transferidos a una diapositiva por medio de una grabadora de alta resolución. Sea $H_j(u, v)$ la transmitancia compleja del filtro j -ésimo a ser codificado:

$$H_j(u, v) = A_j(u, v) \exp[i\Phi_j(u, v)]$$

Es posible obtener un holograma fuera de eje con transmisión $t_j(u, v)$ sumando una onda plana inclinada y registrando el interferograma

$$t_j(u, v) = 1 + A_j(u, v) \cos[\Phi_j(u, v) + \Phi_{L_j}(u, v)] \quad (3-10)$$

donde $\Phi_{L_j}(u, v)$ es la fase lineal de la onda plana de referencia y donde hemos asumido que la amplitud A_j está normalizada a la unidad ($A_j \leq 1$). El holograma en niveles de gris se obtiene imprimiendo esta transmisión sobre el material de registro. El método de Lee para generar CGHs binariza este interferograma, perdiendo así rango dinámico, lo que limita la calidad y versatilidad del filtro.

3.3.1 Análisis comparativo entre los dos tipos de registro

A fin de verificar las ventajas del filtro sintetizado en niveles de gris y descritas en los párrafos anteriores comparamos, mediante simulación numérica, las respuestas al impulso de filtros simples generados mediante la técnica propuesta y por el método binario. En ambos casos se partió de una imagen de 64 x 64 píxeles del dinosaurio representado en la Figura 3- 13 (a). Se sintetizaron en total 4 filtros, dos binarios y dos en niveles de gris.

Los filtros binarios fueron generados mediante el método de Lee con dos fases lineales diferentes. Una de ellas con un valor adecuado como para separar los órdenes sin producir aliasing y la otra, igual al doble de ésta. El holograma resultante estuvo codificado por celdas de 8 x 8 puntos, en consecuencia su tamaño final fue de 512 x 512 píxeles. La amplitud de la transformada de Fourier del objeto fue reemplazada por el valor unidad para generar un filtro POF. En la Figura 3- 23 (a) y (b) se muestran porciones ampliadas correspondientes a iguales zona de ambos filtros. Puede observarse que un aumento de la frecuencia espacial de la portadora produce una superposición de rectángulos que conduce a la generación de imágenes espurias en los órdenes difractados.

Los otros dos filtros fueron contruidos a partir de cuantizar directamente la función transferencia (3-10) en 256 niveles de gris. Para ello se utilizó el mismo objeto que en los filtros binarios pero embebido en una matriz de 512 x 512 píxeles a fin de obtener el mismo tamaño final para los dos tipos de filtros. Para generar los filtros en niveles de gris se tomaron fases lineales de igual valor a las utilizadas para sintetizar los hologramas binarios. En este caso también la amplitud fue normalizada a uno para obtener filtros sólo de fase. Las Figura 3- 23. (c) y (d) muestran porciones ampliadas de cada uno de ellos, correspondientes a los mismos sectores tomados para los casos binarios.

Se puede ver perfectamente que el filtro sintetizado en niveles de gris registra correctamente la duplicación de la frecuencia espacial. Su similitud a un verdadero interferograma hace que las franjas queden perfectamente definidas ahí donde el método binario presenta limitaciones insalvables.

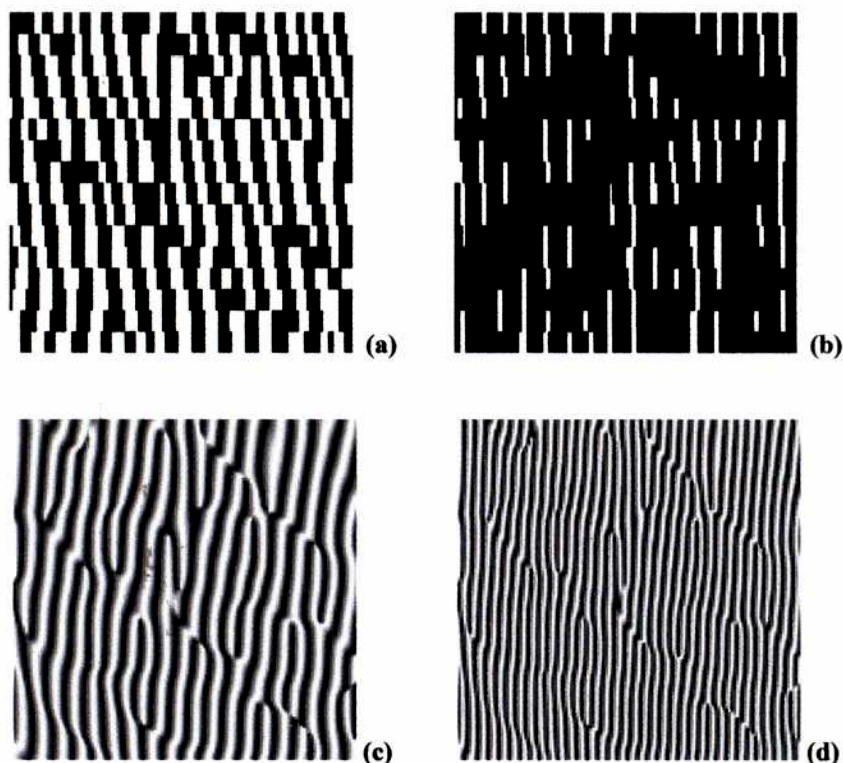


Figura 3- 23: Porción aumentada de los hologramas: (a) computado mediante el método binario de Lee y codificando una fase lineal justa para separar los órdenes; (b) similar a (a) pero duplicando el valor de la fase lineal; (c) generado mediante una cuantización de la función interferencia en niveles de gris y codificando la misma fase lineal que en (a); (d) similar a (c) pero con igual fase lineal que en (b)

La Figura 3- 24 muestra las respuestas al impulso de los cuatro filtros, obtenidas por simulación numérica. El primer filtro binario, al cual se le introdujo una fase lineal que permitiera separar justo los órdenes de difracción, reproduce al objeto y su imagen conjugada en forma correcta, pero como era de esperar, replicados numerosas veces en ambas direcciones (Figura 3- 24 (a)). El filtro equivalente, pero en niveles de gris, reproduce en cambio las imágenes buscadas sólo en los órdenes 1 y -1 y con menor nivel de ruido (Figura 3- 24 (c)). La Figura 3- 24 (b) y (d) muestra los resultados obtenidos para el filtro binario y el filtro en niveles de gris cuando la frecuencia de la portadora es duplicada. Claramente se puede ver la aparición de imágenes espurias originadas por la superposición de los rectángulos utilizados en la codificación binaria. El filtro sintetizado en niveles de gris reproduce perfectamente al objeto y en la posición correcta.

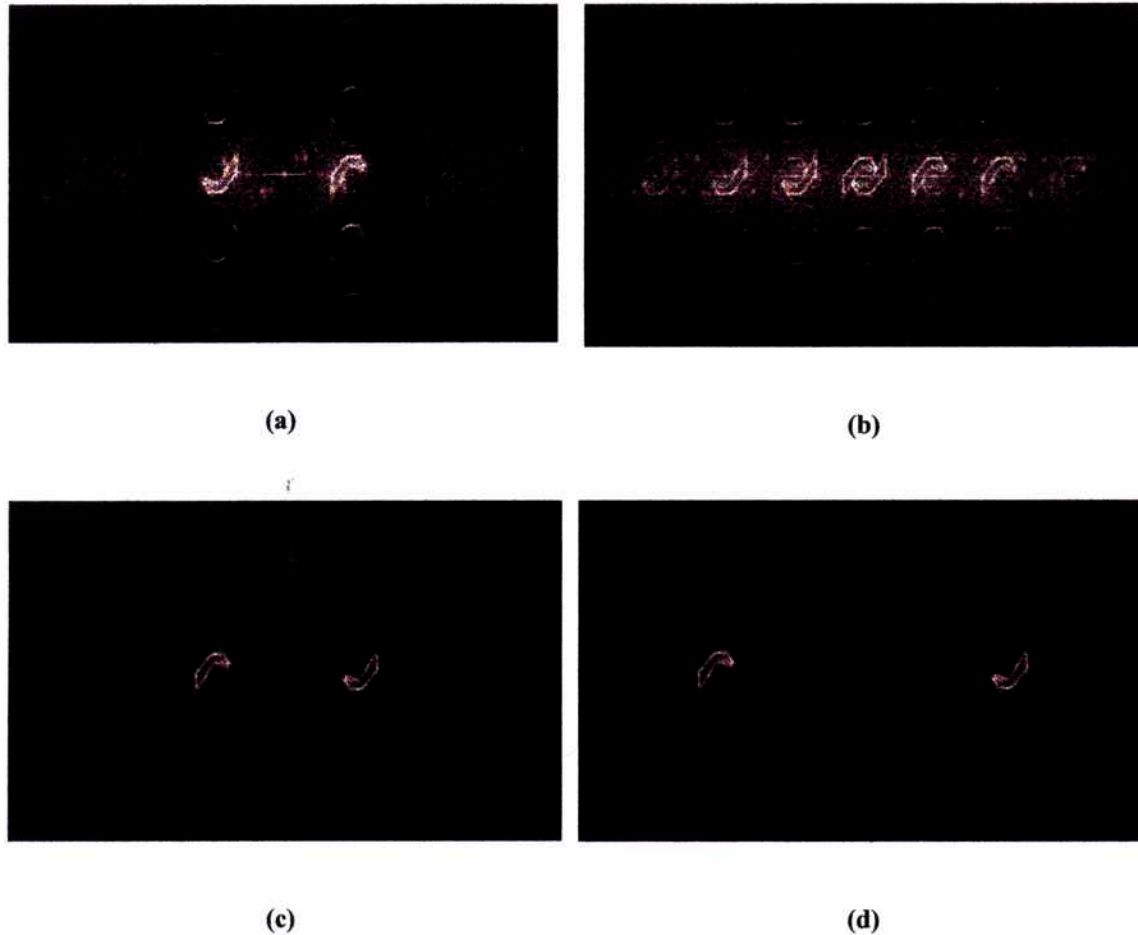


Figura 3- 24: (a), (b), (c) y (d) Respuestas al impulso obtenidas en forma simulada para los filtros de las Figuras 3-18 (a), (b), (c) y (d) respectivamente

El método de codificación en niveles de gris ha demostrado que permite controlar la posición de los objetos en la reconstrucción a partir de la elección arbitraria de la fase lineal. A su vez sólo reproduce a los órdenes 1 y -1 como consecuencia de su similitud con un verdadero holograma.

3.3.2 Diseño de filtros múltiples en niveles de gris

El método propuesto no solo posibilita seleccionar la frecuencia y orientación de la “onda de referencia” en un holograma digital sino que, al ser los registros en niveles

de gris, permite sumar varios interferogramas para obtener un holograma multiplexado. Así en el mismo filtro pueden codificarse diversos objetos, con fases de referencia distintas, de modo tal que sus reconstrucciones se hallen perfectamente separadas. Luego, si se incorpora este filtro compuesto a un correlador tipo Vander Lugt, puede realizarse el reconocimiento de cada uno de los objetos en sectores diferentes del plano de salida. Queda así convertido el sistema óptico en un procesador multicanal. A continuación describiremos la síntesis, mediante esta técnica, de algunos filtros compuestos.

i) Suma de filtros PQF combinando fases de referencia lineales y cuadráticas

En una primera etapa se generó un filtro compuesto, adaptado para reconocer las cuatro cabezas de dinosaurio de la Figura 3- 25 (b). Su composición se realizó mediante una suma directa de los hologramas individuales de cada uno de los objetos. Sea

$$A_k(u, v) \exp[i\phi_k(u, v) + i\phi_{Lk}] \quad (3-11)$$

la transformada de Fourier del objeto k al cual se le agregó una fase lineal particular $\phi_{Lk} = \alpha_k u + \beta_k v$. La función transferencia del filtro se compone de la suma de las cuatro transformadas correspondientes a cada objeto con la amplitud normalizada a uno para obtener el filtro sólo de fase

$$H(u, v) = \sum_{k=1}^4 \exp[i\phi_k(u, v) + i\phi_{Lk}] \quad (3-12)$$

Luego, el interferograma final se obtiene tomando la parte real de esta función y sumándole una constante de modo de llevarla a un rango positivo que pueda registrarse sobre el material fotográfico.

$$I(u, v) = 4 + \sum_{k=1}^4 \cos[\phi_k(u, v) + \phi_{Lk}] \quad (3-13)$$

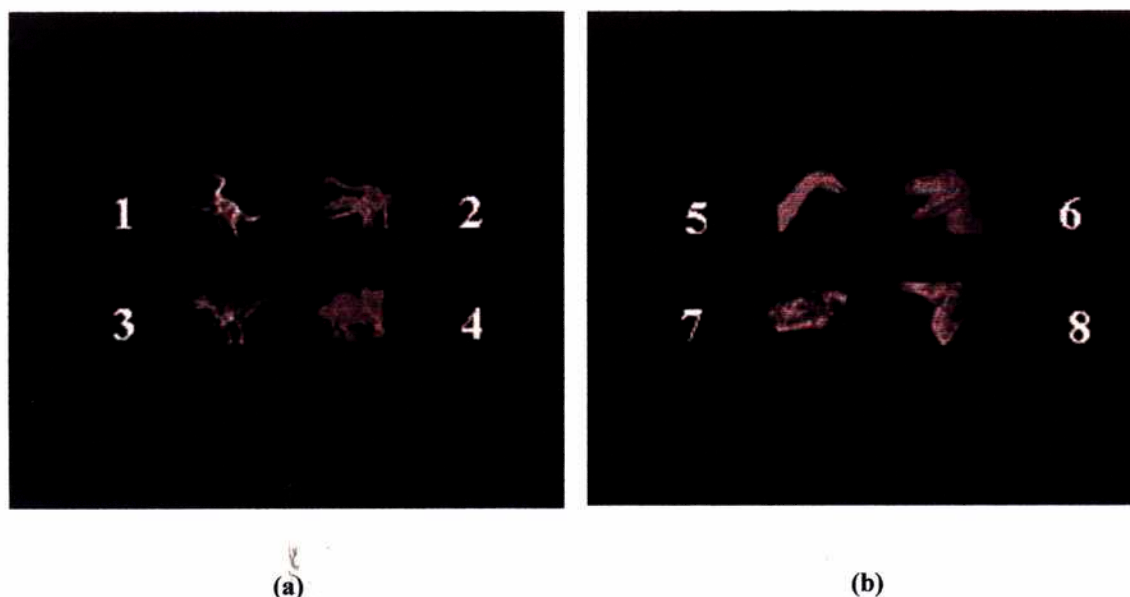


Figura 3- 25: conjunto de objetos usados para los filtros en niveles de grises. (a) y (b) son las escenas que se usaron posteriormente en el correlador

Analizando las distintas respuestas al impulso obtenidas en la Figura 3- 24, ya sea por el método binario o el de niveles de gris, vemos que además de la reconstrucción del objeto se obtiene la versión rotada de la misma. Estas reconstrucciones de los objetos conjugados corresponden al orden -1 de la transformada de Fourier de los filtros e inevitablemente surgen por el método interferométrico necesario para codificar la fase en un medio de amplitud, como lo es un material fotográfico. Las imágenes conjugadas dan lugar en el plano final a la convolución y no a la correlación óptica por ende los sectores por ellas ocupados no podrán ser usados para aumentar los canales en los que se efectúa el reconocimiento.

La posibilidad, que encontramos al sintetizar CGH's en niveles de gris, de utilizar fases de referencia arbitrarias no se restringe sólo a la libre elección de la orientación de una fase lineal sino a incorporar cualquier tipo de fase. En particular, si escogemos una fase cuadrática similar a la que agregaría una lente convergente al paso de la luz, lograríamos cambiar el plano de focalización de las reconstrucciones.

Sea $\phi_q(u,v)$ la fase cuadrática sumada al holograma

$$\phi_q(u, v) = \frac{\pi}{\lambda f} (u^2 + v^2) \quad (3-14)$$

donde f es la distancia focal de la lente a codificar y λ la longitud de onda utilizada. La adición de una fase de este tipo en la función transferencia de un filtro, compuesto por la suma de N hologramas, dará una transmisión para el interferograma dado por la expresión

$$t(u, v) = N + \sum_{k=1}^N \cos[\phi_k(u, v) + \phi_{Lk} + \phi_q(u, v)] \quad (3-15)$$

El agregado de esta fase cuadrática hará que cada orden (1, 0 y -1) se enfoque en planos distintos durante la reconstrucción, debido a que la fase cuadrática que resulta asociada a cada uno es distinta. La mínima distancia focal que puede ser codificada depende de la resolución espacial Δx del medio de registro y del número n de píxeles del holograma:

$$\lambda f \geq 2n \Delta x^2 \quad (3-16)$$

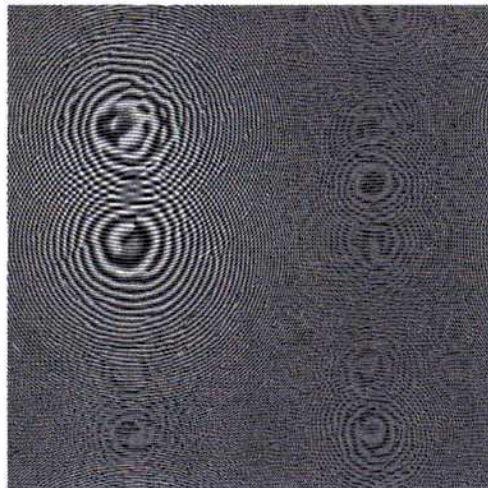
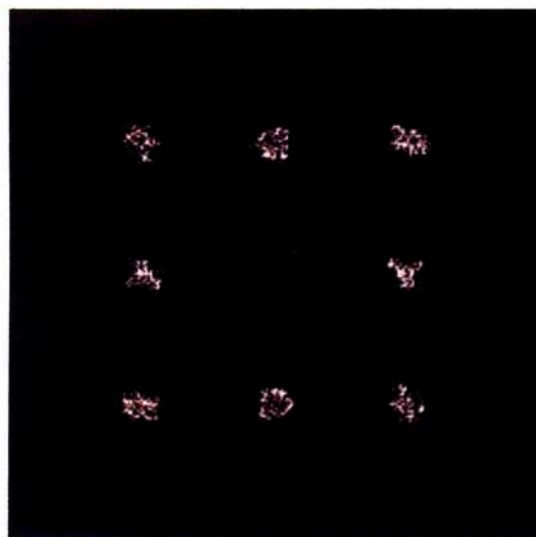


Figura 3- 26: holograma con una fase cuadrática combinada con fases lineales

En la

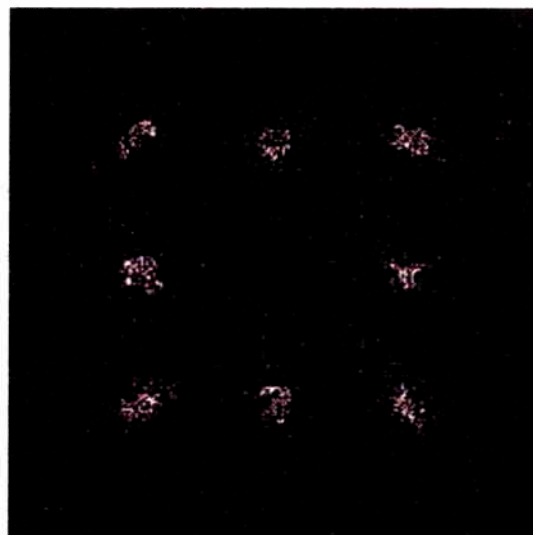
Figura 3- 26 se muestra la forma que toma un holograma al que se le codificó una fase cuadrática adicionalmente a las fases lineales. En particular se eligió uno que almacena 2 objetos.



(a)



(b)



(c)

Figura 3- 27: Respuestas al impulso numéricas de los filtros codificando: (a) cuatro objetos con distintas fases lineales; (b) igual que en (a) pero agregando una fase cuadrática; (c) ocho objetos con fases lineales y cuadráticas

Las respuestas al impulso obtenidas en forma numérica para, un filtro sólo con fases lineales y otro, con la combinación de fases lineales y una fase cuadrática pueden observarse en la Figura 3- 27 (a) y (b) respectivamente. Ambos filtros se crearon sumando los hologramas individuales correspondientes a cada uno de los cuatro cuerpos de dinosaurio de la Figura 3- 25 (a). En el caso del filtro con fase cuadrática se puede apreciar en su respuesta al impulso que la zona donde estaban los objetos conjugados esta ahora desenfocada y presenta algo de ruido. No obstante, esta zona puede ser empleada para codificar más objetos tal como se muestra en la Figura 3- 27 (c). En este caso se almacenaron los 8 objetos de la Figura 3- 25: los cuatro cuerpos con la misma fase lineal y cuadrática que en el caso anterior, y las cuatro cabezas en los lugares ocupados por los cuerpos conjugados desenfocados.

Para evaluar el comportamiento de estos filtros, en función del número de objetos almacenados, sometimos los resultados obtenidos a los criterios de evaluación descriptos en el capítulo 2.

Evaluación mediante los criterios de rendimiento

Analizamos distintos criterios de rendimiento tanto en la respuesta al impulso de los filtros como en los resultados de la correlación simulada numéricamente. En la respuesta al impulso se analizaron, la eficiencia luminosa (η) y la relación señal ruido (SNR) y en la correlación, el valor del pico de autocorrelación, la agudeza de pico (PCE) y la capacidad de discriminación (DC). Los análisis se hicieron sobre los dos tipos de filtro, aquellos sin fase cuadrática en los que se almacenaron hasta un total de 4 objetos y sobre los filtros con fase cuadrática que codificaron hasta un total de 8 objetos.

La Figura 3-27 (a) y (b) muestra los resultados obtenidos al aplicar estos criterios sobre las respuestas al impulso de los dos filtros mencionados en función del número de objetos codificados. La eficiencia graficada con línea continua en la Figura 3-27 (a) corresponde al filtro sin fase cuadrática mientras que la perteneciente al filtro con fase cuadrática se muestra con línea de trazos. En el primer caso vemos que la curva decae al crecer N como consecuencia de la energía que se llevan las imágenes conjugadas y que

no están contempladas en la integral del cálculo de la eficiencia. Para el caso del filtro con fase cuadrática, cuando $N > 4$ la curva asciende debido a que el orden -1 correspondiente a un objeto cae en la misma región que el $+1$ del otro. Si bien la imagen conjugada está desenfocada colabora incrementando la energía dirigida a la zona de cálculo.

El cálculo del SNR mostrado en la Figura 3-27 (b) se hizo solamente para el filtro codificado con fase cuadrática. En línea de puntos se grafica el resultado del cálculo realizado sobre la intensidad de la respuesta al impulso y en línea de puntos y trazos el cálculo sobre la función compleja $h(x,y)$ del filtro. El SNR decrece con N debido a la aparición de más ruido, originado en la aparición de las imágenes desenfocadas tal como puede observarse en la Figura 3- 27.

La correlación numérica fue calculada para ambos filtros y fue evaluada empleando diversos criterios. En la Figura 3-27 (c) se representa el valor del pico de autocorrelación para el filtro sin fase cuadrática con símbolos y con fase cuadrática en línea llena. Ambas curvas decaen con el número de objetos debido a que la misma energía de entrada debe distribuirse en un número mayor de picos. La Figura 3-27 (d) representa la agudeza del pico de autocorrelación. En este cálculo se consideró el valor del pico dividido la energía en un área que lo rodee y no en todo el plano de salida. Se puede ver que su valor se mantiene prácticamente constante para $1 \leq N \leq 4$ y en otro valor constante menor para $5 \leq N \leq 8$. La gran diferencia entre ellos se debe a que la aparición de la imagen desenfocada sobre los órdenes 1 de los primeros cuatro contribuye con ruido en el área de integración. Finalmente en la Figura 3-27 (e) se grafican la capacidad de discriminación de ambos filtros. Se puede ver que este parámetro permanece prácticamente inalterado al agregar objetos, por otra parte este resultado implica que si bien la codificación de la fase cuadrática baja la relación señal ruido esto no tiene influencia en el plano de correlación.

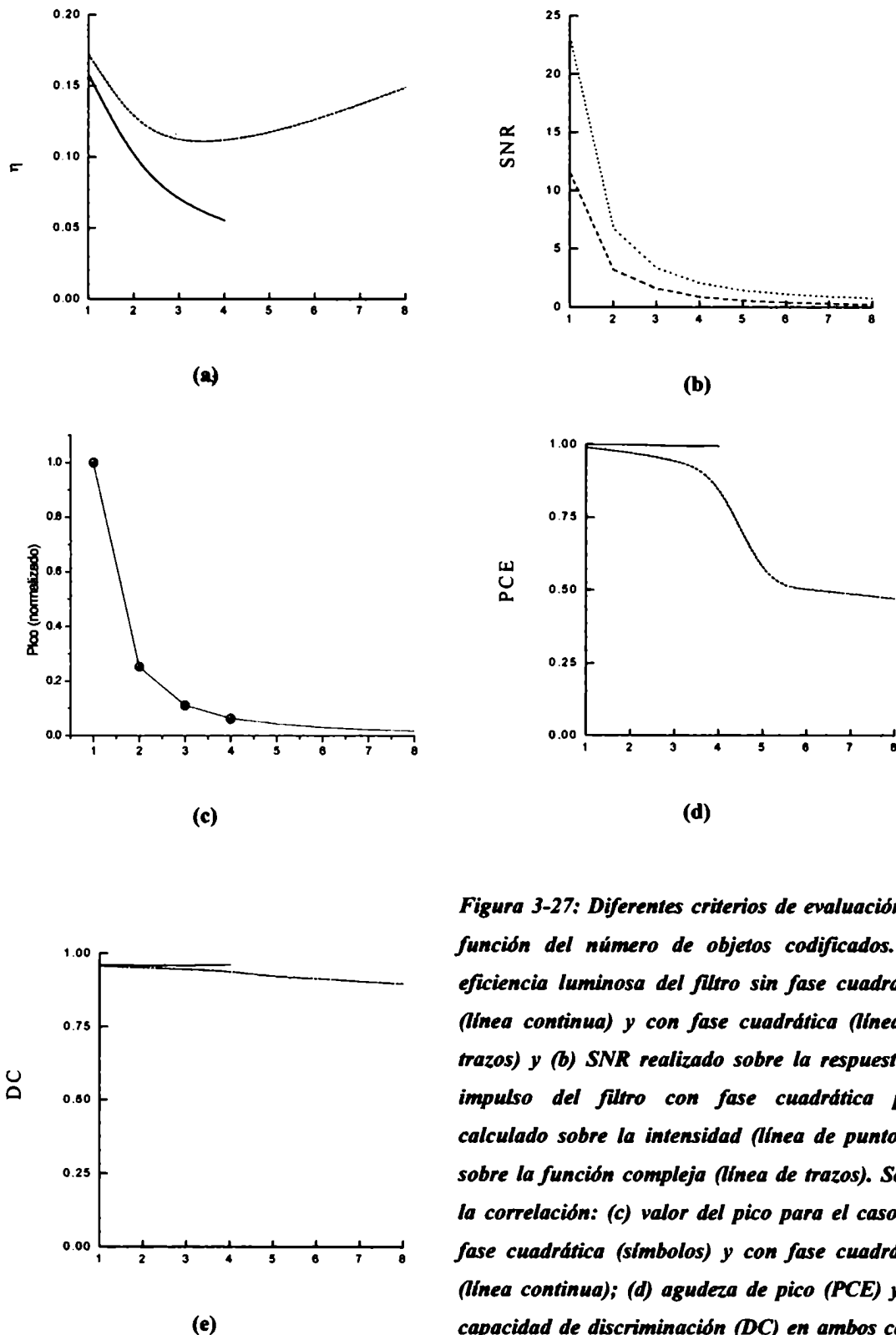


Figura 3-27: Diferentes criterios de evaluación en función del número de objetos codificados. (a) eficiencia luminosa del filtro sin fase cuadrática (línea continua) y con fase cuadrática (línea de trazos) y (b) SNR realizado sobre la respuesta al impulso del filtro con fase cuadrática pero calculado sobre la intensidad (línea de puntos) y sobre la función compleja (línea de trazos). Sobre la correlación: (c) valor del pico para el caso sin fase cuadrática (símbolos) y con fase cuadrática (línea continua); (d) agudeza de pico (PCE) y (e) capacidad de discriminación (DC) en ambos casos se representa en línea continua el caso sin fase cuadrática y en línea de trazos con fase cuadrática.

ii) Síntesis de un filtro MED-SDF más bit de control para la clasificación de objetos

Un filtro más complejo, constituido por la superposición de cuatro filtros del tipo SDF, fue generado esta vez para clasificar ocho objetos codificados mediante un código binario. El filtro permitió además la incorporación de un bit de control de paridad para minimizar las falsas alarmas

En los procedimientos habituales de reconocimiento cada canal de información disponible está asociado a un objeto o clase de objetos a reconocer, de modo que si hay N canales se podrían reconocer N clases en forma simultánea. Alternativamente, si a cada canal se le asigna un bit de información se tendrán N bits y 2^N números diferentes a obtener con la combinación de esos N bits. Así es posible implementar un código binario asignando por ejemplo el valor 1 si el objeto es reconocido en ese canal y 0 si no lo es. Utilizando esta idea en la construcción de un filtro, podríamos codificar 2^N clases con tan sólo N canales, usando como método de identificación la obtención en el plano de correlación de cada uno de estos números (un dígito en cada canal), en donde cada número estaría unívocamente asociado a un único objeto. Debe tenerse en cuenta, sin embargo que, si por ejemplo usamos cuatro canales, el 0000 estaría dentro de los números que identificarían una clase con lo cual no obtener ninguna señal sería equivalente a reconocer una clase. Claramente este caso no puede ser considerado por lo que habría que eliminar esta posibilidad. Esto reduciría en uno el número de objetos o clases a clasificar, teniendo de este modo N bits pero $2^N - 1$ clases identificables.

Naturalmente, al igual que en los sistemas computacionales, pueden darse falsas alarmas en la obtención de los bits, hecho que llevaría a una incorrecta identificación del objeto. Por tal motivo, a nivel computacional, se han ideado códigos para detectar errores e incluso, en el caso de los más sofisticados, corregirlos. El más sencillo de todos ellos es el código de control de paridad. Este consiste en agregar un bit más a la secuencia de modo que este tome los valores 0 ó 1 para que la suma de todos los bits sea par. Este procedimiento le otorga mayor confiabilidad a la identificación y permite saber si ha habido un error en la detección.

En el caso del correlador, agregar un bit más equivale a agregar un canal más, si esto no es posible, habrá que destinar uno de los N canales para el bit de control. El

número de bits disponibles para reconocimientos se habrá reducido en 1 quedando $N-1$ canales y 2^{N-1} objetos a identificar. Considerando que eliminamos el 0000 quedará un total de $2^{N-1} - 1$ clases posibles a numerar.

En nuestro caso disponemos de 4 canales, si destinamos uno de ellos para el bit de control, tendremos $4-1=3$ canales disponibles. Esto da un total de $2^3 = 8$ objetos para identificar. Si quitamos el cero este número se reduciría a 7, para evitar esto modificamos el bit de paridad de este caso único para que la suma dé impar.

Los ocho dinosaurios de la Figura 3- 25 (a) y (b) conforman los diferentes objetos que hemos codificado y son identificables por el número que poseen al lado. El filtro final deberá llevar la información de todos ellos mediante el código binario más el bit de control.

Objeto	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	1	0	1
4	0	1	1	0
5	1	0	0	1
6	1	0	1	0
7	1	1	0	0
8	1	1	1	1

Tabla 3-1: Código binario usado para el sintetizado del filtro compuesto

El procedimiento que hemos empleado para ello es diseñar un filtro compuesto por cuatro hologramas. Cada holograma es un filtro SDF que contiene la información de los 8 objetos, ya sea para reconocerlos o rechazarlos. La fase lineal es la misma para todos los objetos del mismo holograma pero distinta de un holograma a otro. Cada uno de los hologramas, mediante la orientación de la fase lineal, envía la información a determinado canal. En la Tabla 3-1 las columnas C₁, C₂, C₃ y C₄ identifican a los cuatro canales mientras que cada fila corresponde a un objeto particular y muestra el código binario asignado. Los filtros SDF deben ser tales que en el canal 1 se reconozcan a los

objetos 5, 6, 7 y 8; en el canal 2 a los objetos 3, 4, 7 y 8; en el canal 3 a los objetos 2, 4, 6 y 8 y por último el canal 4 es el que da el bit de control reconociendo los objetos 1, 2, 3, 5 y 8.

Cada uno de los cuatro hologramas, uno para cada canal, se sintetiza mediante el algoritmo MED-SDF. Luego el filtro final se obtiene sumando estos hologramas individuales

3.3.3 Implementación de los filtros propuestos en un correlador

i) Resolución y transmisión de la película en niveles de gris

Como primer paso, antes de proceder a sintetizar los filtros compuestos mediante nuestro método, analizamos los límites de resolución espacial y en niveles de transmisión que poseía la impresora de diapositivas color y la película que usaríamos para registrar los filtros. De acuerdo a los resultados sabríamos si la resolución y transmisión de la película eran adecuadas y suficientes para cuantificar en los 256 niveles distintos o solo podía diferenciar un número menor. La máquina empleada, Agfa modelo Alto, y las películas Kodak EPP de 35 x 24 mm son las mismas utilizadas para generar los filtros color.

Límites de resolución espacial

Generamos una grilla de 4 x 4 celdas registrando un nivel de gris distinto en cada una. Los niveles de gris seleccionados estuvieron comprendidos dentro del intervalo 0-255 variando de a 16 valores. Esto es, se registraron los niveles {0, 16, 32, 48, ..., 240, 255}. Se diseñaron 4 de estas grillas de distintos anchos: 4mm, 1mm, 0.5mm y 0.1mm y se observaron por un microscopio.

Encontramos que estas quedaban bien resueltas sólo si la resolución usada coincidía con alguna de las posibles resoluciones nominales con las que trabajaba la grabadora de films. De no usar estas resoluciones el programa administrador de la máquina llevaba automáticamente la muestra a uno de sus valores de tabla interpolando

con un algoritmo que generaba puntos de valor promedio en los bordes. Esto hacía que la grilla de menor tamaño no pudiera resolverse.

Las resoluciones nominales de la máquina grabadora para películas de 35 mm (35 x 24 mm) se muestran en la Tabla 3-2:

Número de píxeles en 24 x 35 mm:							
❶	2048 x 1366	❷	4096 x 2732	❸	8192 x 5464	❹	16382 x 10928

Tabla 3-2: resoluciones aceptadas por la impresora de diapositivas color

La resolución ❷ nos pareció adecuada para registrar los filtros y es la que optamos para diseñar nuestros hologramas.

Niveles de transmisión

Para evaluar la resolución en niveles de gris se imprimieron 256 muestras, cada una con un nivel diferente y con la resolución ❶. Estas se iluminaron con una fuente extensa de luz blanca y se registró la intensidad transmitida por medio de un fotómetro marca MPLI de respuesta lineal. Para cada nivel de gris se tomaron 600 datos que luego se promediaron. En la Figura 3- 28 se muestra un gráfico de los promedios sobre los datos medidos normalizados al valor máximo registrado para el nivel 255 y un ajuste realizado mediante cuadrados mínimos.

Concluimos que tanto la resolución espacial de 4096 x 2732 píxeles como la transmisión de la película son apropiadas para cuantificar las funciones transferencias del filtro en todos los niveles de gris disponibles.

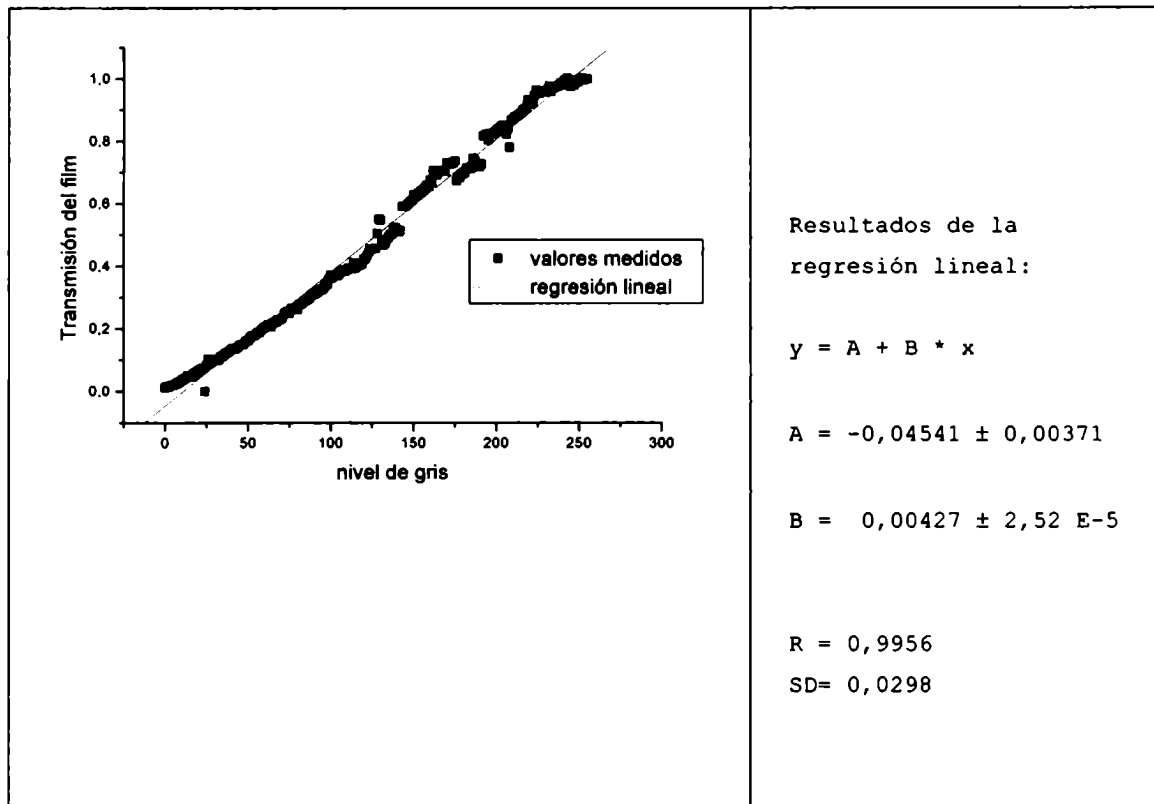


Figura 3- 28: gráfico de la transmisión de la película en función del nivel de gris registrado en ella

ii) Respuesta al impulso

Como hemos demostrado una de las ventajas presentadas por el método de codificación en tonos de gris es la posibilidad de superponer hologramas con distintas fases de referencia que desplacen la reconstrucción de cada objeto registrado en el filtro a un sector distinto del plano de salida, sin solaparse. El primer experimento, por tanto fue verificar que la respuesta al impulso de un filtro creado con este método no contenga imágenes superpuestas.

El filtro más sencillo de los diseñados para verificar este punto fue el generado a partir de la suma de los cuatro POFs en el cual se codificaron cuatro objetos con cuatro fases lineales distintas. Así, la transmisión dada por (3-13) fue discretizada en 256 niveles de gris e impresa en un tamaño de 9.6 x 9.6 mm y, como señalamos anteriormente, en una resolución de 4096 x 2732 (correspondiente a la identificada por

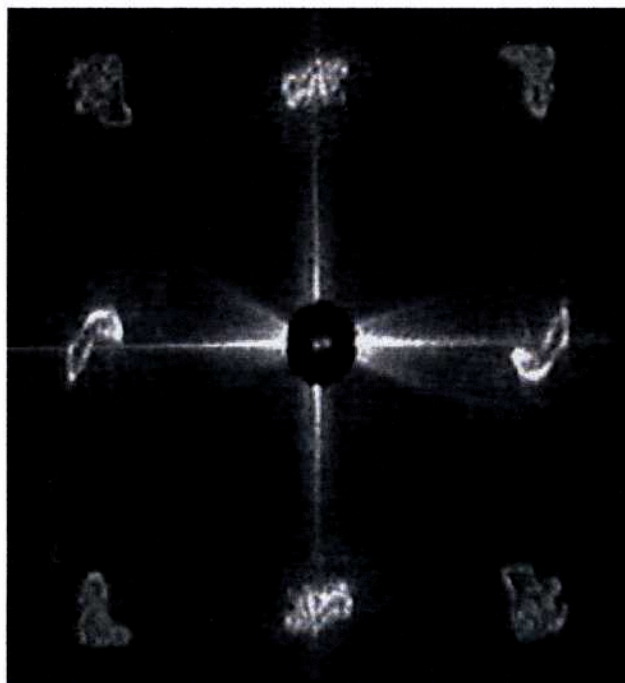


Figura 3- 29: respuesta al impulso del filtro compuesto por la suma de POF's

Esta imagen fue recogida por una cámara CCD blanco y negro ubicada en el plano de focalización de una lente convergente. En la imagen puede observarse claramente la reconstrucción de cada cabeza de dinosaurio en el canal correspondiente a la fase lineal dada a cada una. No se registra la presencia de efectos de información cruzada.

iii) Correlación óptica

La siguiente experiencia llevada a acabo fue la implementación óptica de una correlación múltiple. El correlador empleado es el esquematizado en la Figura 3- 16 pero usando iluminación monocromática proveniente de un láser de He-Ne.

El conjunto de cuatro cabezas de dinosaurio de la Figura 3- 25 (b) corresponde a la escena usada para probar el filtro compuesto por la suma de POFs. La escena se llevó a un tamaño de 128 x 128 píxeles y se imprimió en esta ocasión en el film color usando niveles de gris. La Figura 3- 30 muestra la imagen de salida capturada por la cámara CCD correspondiente a la zona de correlaciones. Con línea de trazos se delimitaron los

niveles de gris. La Figura 3- 30 muestra la imagen de salida capturada por la cámara CCD correspondiente a la zona de correlaciones. Con línea de trazos se delimitaron los distintos sectores de correlación correspondientes a los cuatro canales de reconocimiento establecidos por las fases lineales sumadas a los filtros. Se puede ver que cada cabeza fue correctamente identificada en cada canal sin la presencia de señales cruzadas. Podemos concluir que el sistema ha operado correctamente demostrando tener un excelente poder de discriminación y alto SNR.

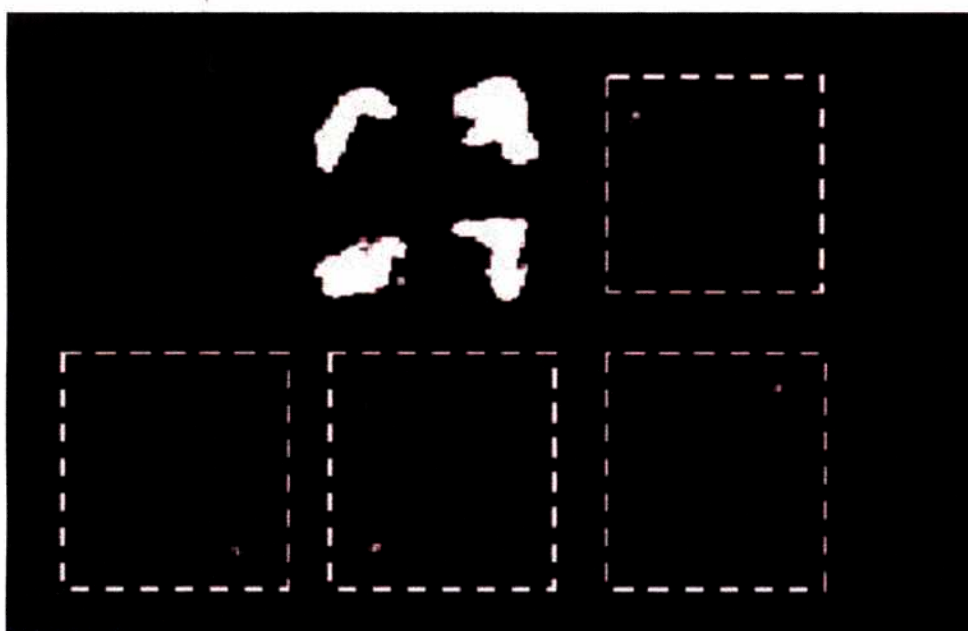
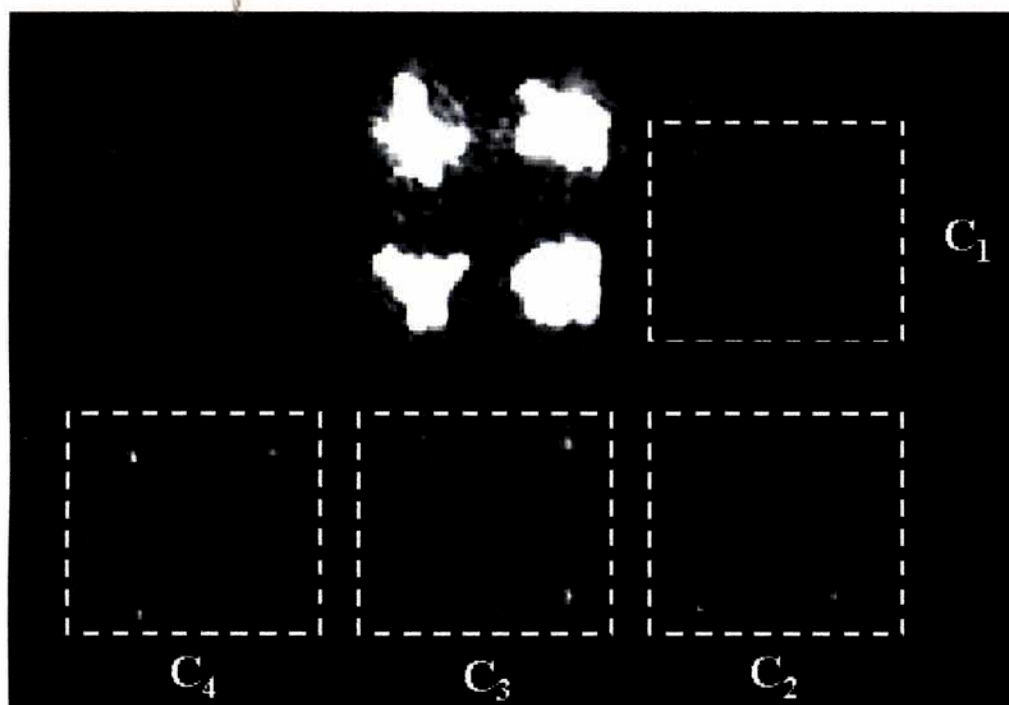


Figura 3- 30: Señales de correlación obtenidas con el filtro compuesto por la suma de Pofs y la escena de entrada de la Figura 3-25 (b). Con línea de trazos se delimitaron los distintos canales de reconocimiento

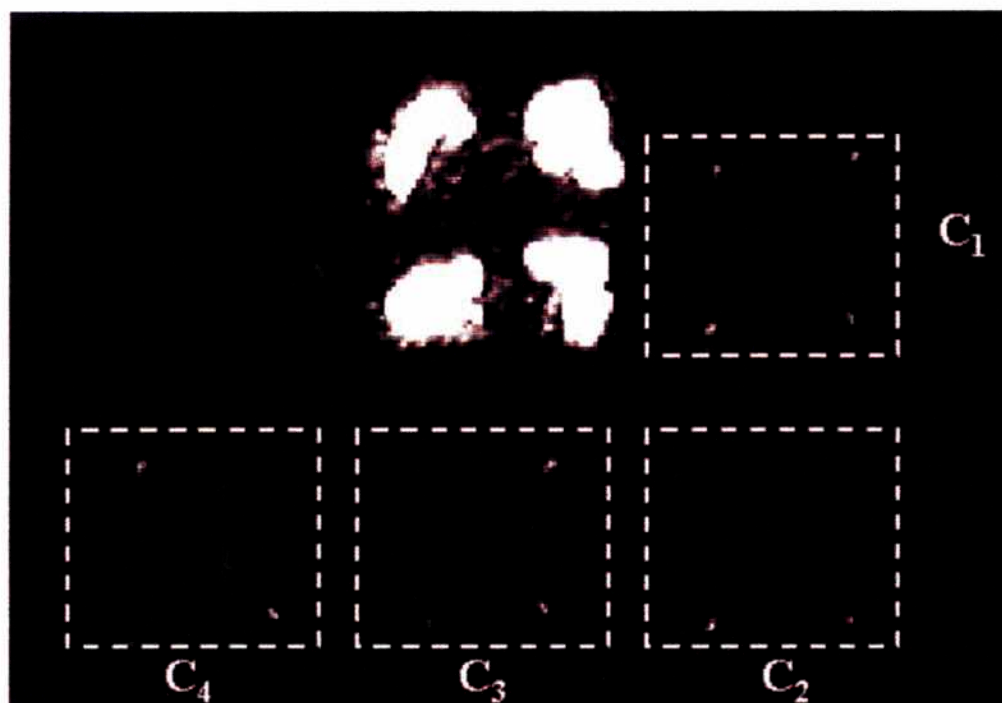
El segundo filtro testeado fue el sintetizado para clasificar ocho objetos mediante un código binario, tal como se explicó en el punto anterior. El mismo fue evaluado correlacionándolo secuencialmente con dos escenas de entrada: una formada por los cuatro cuerpos de la Figura 3- 25 y otra formada por las cuatro cabezas.

La Figura 3- 31 (a) y (b) muestra la imágenes capturadas por la CCD en el plano de salida del correlador cuando se usaron como entrada las escenas de los cuerpos y de las cabezas respectivamente. Cada canal fue delimitado con una línea de trazos e

obtenidas con los filtros anteriores que estaban diseñados para reconocer un solo objeto por canal. La forma de leer e interpretar esta salida es mediante la secuencia de números binarios con la que fue codificado el filtro (Tabla 3-1). Por ejemplo, el objeto 3 junto con su ubicación, se identificará cuando aparezcan picos ubicados en la misma posición en los canales C_2 y C_4 , esto se comprueba experimentalmente en la Figura 3- 31 (a). El objeto 8, en cambio, se identifica cuando aparecen picos de correlación en la misma posición para todos los canales, lo que también se comprueba experimentalmente en la Figura 3- 31 (b).



(a)



(b)

Figura 3- 31: Imágenes del plano de salida del correlador usando el filtro adaptado a 8 objetos y la escena formada por: (a) cuerpos de dinosaurio; (b) cabezas de dinosaurio

Comparando los demás picos con el cuadro de códigos de la Tabla 3-1 vemos que todos los objetos son perfectamente identificables sin la presencia de errores ni picos de correlación cruzada.

Capítulo 4

Síntesis de filtros compuestos sobre pantallas de cristal líquido

Introducción

La incorporación de pantallas de cristal líquido (LCD) de TV en los sistemas de procesamiento óptico ha ido incrementándose en los últimos tiempos. Algunas de las razones son: su capacidad para representar imágenes, llevar a cabo procesos en tiempo real (velocidad de video) y actuar como moduladores espaciales de luz. Estos dispositivos son utilizados en procesadores ópticos para representar ya sea la función de transferencia de los filtros como así también la escena de entrada. Por otro lado, su estructura molecular con propiedades birrefringentes permite que estos cristales, a diferencia de los materiales gráficos de impresión, sean capaces de modular simultáneamente tanto la fase como la amplitud de la onda transmitida. No obstante, los filtros implementados en estos moduladores fueron, hasta el momento, similares a los

registrados sobre los medios sólo de amplitud, es decir aquellos de características binarias, no aprovechándose ni la capacidad de representar niveles de gris ni la de modular la fase.

La primera parte de este capítulo estará destinada a exponer los pasos seguidos para obtener las configuraciones necesarias que desacoplen la modulación de la fase y la de la amplitud de diversas pantallas de cristal líquido. Esto requiere de un estudio de los parámetros característicos de la pantalla a emplear a fin de encontrar los estados adecuados de polarización de la luz, incidente y emergente del sistema. La configuración de fase se usará posteriormente para representar el filtro y la de amplitud para la escena.

La posibilidad de configurar estas pantallas de modo que modulen sólo la fase permite emplearlas para representar directamente elementos puros de fase, como es el caso de lentes o de determinado tipo de filtros. A diferencia de un medio de registro de amplitud, donde se hace necesaria la codificación de la fase mediante alguna técnica interferométrica que la transforme a valores de amplitud, un dispositivo que permite representar fases no requerirá de tal codificación. Así, la fase de la función transferencia de un filtro puede ser representada directamente sin la necesidad de recurrir a la interferencia de esta con un haz de referencia o al empleo de algún método convencional para generar CGHs.

En la segunda parte de este capítulo mostraremos que la implementación directa de la fase de la función transferencia aumenta el número de canales disponibles para realizar el reconocimiento de diversos objetos en simultáneo en un correlador de Vander Lugt. Como veremos, los nuevos canales de detección en paralelo surgen de eliminar la convolución entre la respuesta al impulso del filtro y la escena de entrada, proveniente ésta de la imagen conjugada que producen los métodos de codificación. Se mostrarán los resultados de utilizar este procedimiento para representar filtros de fase en sistemas de reconocimiento múltiple. Para este análisis se sintetizaron dos tipos distintos de filtros compuestos, generados a partir de 2 procedimientos diferentes. Presentaremos los resultados teóricos y experimentales, obtenidos al implementar estos filtros en un correlador.

4.1 Descripción de las pantallas de cristal líquido de TV tipo nemático

Las pantallas de cristal líquido de TV son dispositivos electro-ópticos compuestos por una lámina de cristal líquido dispuesta entre dos vidrios en donde se depositaron electrodos transparentes que definen un arreglo de píxeles. Electrónicamente cada uno de estos píxeles puede ser modulado de modo tal de representar en la pantalla imágenes enviadas por una PC. Estos dispositivos proveen, en general, modulaciones de amplitud y fase de manera acoplada, pero es posible encontrar configuraciones particulares para que actúen de manera independiente. Para ello es necesario conocer ciertas características constitutivas y funcionales de estos materiales por lo que describiremos brevemente aquellas que necesitaremos en este trabajo.

4.1.1 Forma constitutiva del cristal líquido

El cristal líquido es un material compuesto por una distribución de moléculas que pueden ser orientadas libremente en algunas direcciones determinadas y no en otras compartiendo de esta manera propiedades tanto de los líquidos como de los sólidos. Estructuralmente, las moléculas tienen forma elipsoidal presentando simetría circular en todos los planos transversales que corten al eje mayor. Se disponen juntas unas a las otras en diferentes geometrías de configuración definiendo distintos tipos de cristales. Las moléculas adyacentes no se hayan rígidamente ligadas y pueden desplazarse o rotar entre sí bajo la aplicación de fuerzas eléctricas o mecánicas, siendo esta libre movilidad una característica propia de los líquidos. Sin embargo, no sucede lo mismo en toda la simetría traslacional del cristal presentando ciertas restricciones en la organización geométrica de grupos de moléculas lo que introduce propiedades asociadas a los sólidos.

Existen tres clases distintas de cristales líquidos de interés en el campo de la óptica: los nemáticos, los esméticos y los colestéricos, diferenciados por la forma organizativa de las moléculas y sus restricciones. En este trabajo emplearemos el primer tipo, los nemáticos y por ello nos abocaremos a describir sólo esta clase. En ellos, las

moléculas se distribuyen con sus ejes mayores en forma paralela sin presentar ninguna organización particular en la dirección transversal. Sin embargo, es posible imponerle condiciones de contorno en la alineación longitudinal disponiendo el cristal entre dos láminas de vidrio pulidos formando un rayado uniforme en alguna dirección fija. Este rayado establece una dirección privilegiada para la alineación de las moléculas que se hallan más cercanas al vidrio, las que se disponen con sus ejes alargados en la dirección dada por el rayado. Si las láminas de vidrio se hallan pulidas con distinta orientación, la tendencia de las moléculas de los cristales nemáticos de mantenerse alineadas unas respecto a las otras les hace describir una especie de torsión de una lámina a la otra creando lo que se llama un cristal líquido rotado (*twisted liquid crystal*). Las moléculas de este modo, van rotando según un eje perpendicular a su eje mayor a medida que van de una lámina a la otra, presentando una estructura helicoidal. En la Figura 4- 1 se esquematiza una línea de moléculas entre dos láminas.

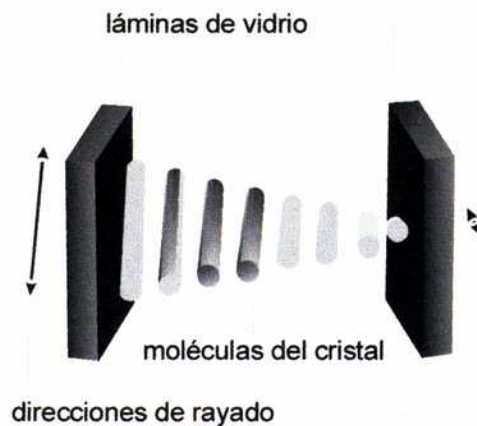


Figura 4- 1: Arreglo molecular en un cristal líquido nemático sin campo externo aplicado

La dirección dada por el rayado de la primer lámina se denomina eje director ψ_D y el ángulo formado entre éste y el rayado de la segunda lámina, es decir el ángulo de giro de las moléculas, se lo llama ángulo de twist (α).

4.1.2 Propiedades eléctricas y ópticas

La estructura alargada de las moléculas causa que los cristales líquidos sean fuertemente anisótropos exhibiendo birrefringencia, o sea dos índices de refracción distintos según la dirección tomada por un haz de luz incidente en el material. El mayor índice de refracción o índice extraordinario n_e se asocia al eje mayor de las moléculas, mientras que la dirección perpendicular determina el índice ordinario n_o . A su vez, la torsión que describen las moléculas entre las caras de entrada y de salida del cristal provoca una rotación en la polarización de la luz incidente.

Matemáticamente, su transmisión se deriva de considerar que el cristal está compuesto por una sucesión de láminas birrefringentes, uniaxiales, rotadas entre sí unas respecto a las otras. Siguiendo el formalismo de matrices de Jones [Jon41] [[Jon56] para la propagación de luz polarizada, la expresión para la transmisión se podrá obtener a partir del producto de las matrices de cada lámina. Esta expresión fue derivada por Yariv y Yeh [Yar84] y luego extendida por Lu y Saleh [Lu90] y por Soutar y Lu [Sou94] quedando de la forma:

$$M_{LC}(\alpha, \beta) = \exp(-i\beta)R(-\alpha)M(\alpha, \beta) \quad (4-1)$$

donde la matriz general de rotación R de 2×2 se define como

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4-2)$$

y la matriz M está dada por

$$M(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} X - iY & Z \\ Z & X + iY \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

con $X = \cos \gamma$, $Y = \left(\frac{\beta}{\gamma}\right) \sin \gamma$, $Z = \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \sin \gamma$, $\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$, α el ángulo de twist, $\beta = \frac{\pi d}{\lambda}(n_e - n_o)$ la birrefringencia y d el espesor de la lámina.

La principal característica de estos cristales es que las moléculas poseen la habilidad de cambiar su orientación con la aplicación de un campo eléctrico externo. Estos campos suelen aplicarse entre las láminas de vidrio a las cuales se las recubre con un fino arreglo de electrodos transparentes que definen una matriz de píxeles.

La aplicación de estos campos a través de las caras induce un dipolo eléctrico en los extremos longitudinales de cada molécula produciéndoles un torque en la dirección del campo. En cristales nemáticos, donde las moléculas no tienen restricciones de movilidad, campos lo suficientemente fuertes causarán en las moléculas que no son adyacentes a las láminas de vidrio una rotación que tenderá a alinearlas en la dirección de aplicación. A medida que la intensidad de este campo aumente, la estructura helicoidal se irá destruyendo progresivamente y las moléculas se irán orientando cada vez más en la dirección del mismo. Cuando éste sea lo suficientemente intenso todas las moléculas excepto las adyacentes a los vidrios tendrán su eje mayor orientados según este campo. En la Figura 4- 2 se muestra un esquema de la posición relativa que van tomando las moléculas con un campo aplicado de intensidad media (a) y máxima (b).

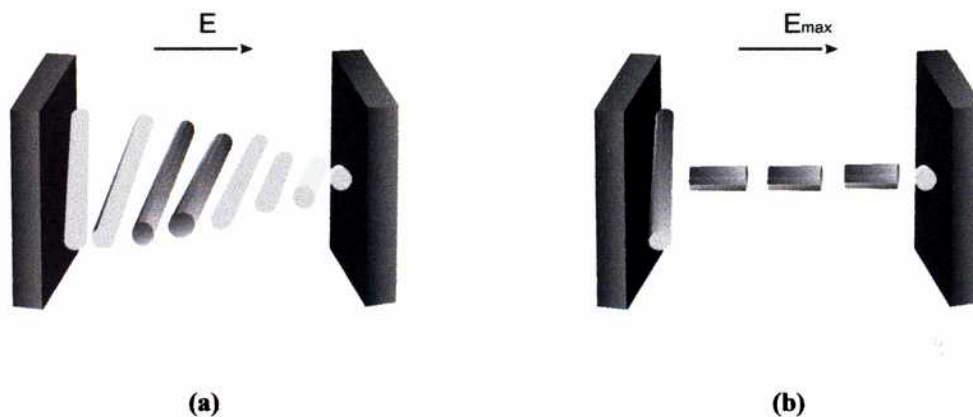


Figura 4- 2: Arreglo molecular del cristal nemático con la aplicación de un campo eléctrico de: (a) mediana intensidad; (b) máxima intensidad

Luz polarizada incidiendo en la dirección del eje director verá índices de refracción cada vez menores a medida que el voltaje aplicado aumente, mientras que polarizaciones en la dirección del eje ordinario del cristal no se verán afectadas. De esta manera la birrefringencia se convierte en una función variable con el voltaje $\beta(V) = \pi d \Delta n(V) / \lambda$ (con $\Delta n = n_e - n_o$), siendo máxima sin campo aplicado y mínima con el valor de saturación. Consecuentemente, la matriz de transmisión podría derivarse de (4-1) pero reemplazando β por $\beta(V)$.

Se ha encontrado, sin embargo, que la inclinación de las moléculas con el voltaje no es una función lineal con el espesor d de la pantalla, observándose que aquellas que se hallan próximas a las láminas de vidrio presentan ciertas restricciones de movilidad. El método lineal de reemplazar directamente en toda la matriz M , β por $\beta(V)$ falla a la hora de encontrar polarizaciones precisas para la luz transmitida y hay que recurrir a nuevas consideraciones. Coy et al [Coy96] propusieron una forma en donde el espesor del cristal es dividido en 3 partes consecutivas: dos láminas de birrefringencia δ y ancho d_L pegadas a los vidrios cuyas moléculas no se mueven con el campo aplicado y otra región central de ancho $d_C = d - 2d_L$ cuya respuesta ante el campo externo es uniforme. En estudios posteriores se extendió este razonamiento encontrando que ajusta mejor un modelo en donde ambos espesores son variables con el voltaje por lo que las respectivas birrefringencias resultan a su vez ser funciones lineales con la distancia [Mar00]. En el caso de δ el espesor es cero cuando no hay campo aplicado y β tomará el máximo valor. Con campos distintos de cero la birrefringencia del cristal estará expresada por una suma de las tres componentes y será $\beta_{tot}(V) = \delta(V) + \beta(V) + \delta(V)$. De este modo la matriz de transmisión se podrá escribir de la forma

$$M'_{LC}(\alpha, \beta, \delta) = \exp[-i(\beta + 2\delta)] R(-\alpha) \begin{pmatrix} X' - iY' & Z \\ -Z & X' + iY' \end{pmatrix} \quad (4-4)$$

donde ahora los coeficientes son

$$\begin{aligned} X' &= X \cos 2\delta - Y \sin 2\delta \\ Y' &= X \sin 2\delta + Y \cos 2\delta \end{aligned}$$

Habitualmente los LCD se usan dispuestos entre dos polarizadores de modo que las expresiones anteriores para las matrices de Jones del cristal permitirán calcular la transmisión de la luz a través del conjunto formado por un primer polarizador, el LCD y el segundo polarizador. Sean φ_1 y φ_2 los ángulos del primer y segundo polarizador respecto al eje director y E_{in} una onda incidente que por simplicidad la supondremos polarizada en la misma dirección que el eje director y coincidente con la dirección de coordenadas x . La expresión del campo a la salida de este sistema estará dado por:

$$E_{out} = P_0 R(\varphi_2) M_{LC}(\alpha, \beta, \delta) R(-\varphi_1) E_{in} \quad (4-5)$$

donde $E_{in} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, la matriz de rotación $R(-\varphi_1)$ rota el plano de polarización un ángulo φ_1 según la matriz de rotación general (4-2), la matriz de transmisión del cristal está dada por (4-4), la segunda matriz de rotación $R(\varphi_2)$ rota la polarización a la dirección del segundo polarizador y $P_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ es la matriz que describe el efecto de este cuando su eje de transmisión se halla en la dirección x' de las coordenadas de salida (x' , y'). Finalmente multiplicando todas las matrices, el campo a la salida tendrá coordenada x' de la forma

$$E_{out} = e^{-i(\beta + 2\delta)} \begin{pmatrix} X' \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \alpha) + Z \sin(\varphi_1 - \varphi_2 + \alpha) - iY' \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \alpha) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4-6)$$

Luego, la intensidad transmitida se obtendrá como $T = |\bar{E}_{out}|^2$. A partir de aquí resulta más fácil generalizar al caso de tener el eje director a un ángulo ψ_D distinto de

cero respecto al eje x , simplemente reemplazando los ángulos de los ejes de los polarizadores por las expresiones

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \xi_1 - \psi_D \\ \varphi_2 &= \xi_2 - \psi_D\end{aligned}$$

De esta manera la intensidad transmitida queda de la forma

$$T = [X' \cos(\xi_1 - \xi_2 + \alpha) + Z \sin(\xi_1 - \xi_2 + \alpha)]^2 + [Y' \cos(\xi_1 + \xi_2 + 2\psi_D - \alpha)]^2 \quad (4-7)$$

La posibilidad de modificar la birrefringencia en forma controlada hace que estos cristales sean muy útiles para distintas aplicaciones ópticas, en particular, como moduladores espaciales de luz. El hecho de poder controlar mediante una computadora cada electrodo en forma independiente permite modular la onda transmitida píxel a píxel a través de la variación de la birrefringencia logrando de este modo modulaciones controladas tanto de la amplitud como de la fase.

Para controlar estas modulaciones es necesario por lo tanto conocer los parámetros ψ_D , α , β con y sin voltaje junto con $\delta(V)$ y calcular con ellos la transmisión del cristal para cada voltaje enviado y la modulación que le introducirá a una determinada polarización incidente.

4.2 Caracterización de las pantallas de cristal líquido

Nuestro objetivo era emplear LCTV's para representar tanto los filtros (con modulación sólo de fase) como las escenas (modulando sólo la amplitud) por lo que estudiamos las características de diversas pantallas de cristal líquido para elegir entre ellas las más apropiadas para nuestros fines. Los pasos requeridos para poder utilizarlas en un procesador óptico se resumen en lo siguiente:

- Obtención y preparación de las pantallas para ser montadas en el correlador
- Determinación de los parámetros del modulador que no dependen del voltaje aplicado
- Determinación de la birrefringencia en función del voltaje aplicado
- Obtención de las configuraciones de modulación sólo de fase y sólo de amplitud

4.2.1 Obtención y preparación de las pantallas

Las pantallas de cristal líquido de TV con alta resolución pueden obtenerse a partir de video proyectores comerciales. Estas permiten representar imágenes de buena calidad enviándolas directamente desde una computadora personal a través de la electrónica del proyector. Las desventajas que eventualmente traen es por un lado, que la electrónica del equipo tiene sistemas de seguridad que impiden el funcionamiento del mismo en condiciones distintas de las provistas por la fábrica y por otro que no hay datos de ninguno de los parámetros constitutivos de las pantallas que lo componen. Dentro de los video proyectores comerciales están los que operan con una sola pantalla, en la que cada píxel está subdividido en tres para poder representar los colores primarios rojo, verde y azul (RGB); y aquellos que utilizan tres pantallas de video y componen la imagen final mediante una combinación de espejos dicróicos. Estos últimos son los que brindan mayor resolución.

En nuestro caso empleamos las pantallas extraídas de un video proyector Proxima Desktop modelo DP5100. Este es un equipo que permite proyectar imágenes color en formato VGA enviadas por una computadora personal conectada al equipo. Consta de tres partes principales: la electrónica que controla la señal de video que se envía a cada una de las pantallas, una fuente de luz blanca de 250 W y un sistema óptico que permite combinar la imagen final. Las pantallas son marca Sony LCX012BL con matriz activa TFT (Thin Film Transistor) compatibles con la plataforma VGA (640 x 480 píxeles) de las computadoras personales. El tamaño de las mismas es de (2 x 2,5) cm y el espesor del orden de 10 μm . Los píxeles son de (34 x 34) μm y sus centros se hallan separados

41 μm . Cada una de estas pantallas es capaz de representar 8 bits correspondientes a un total de $2^8 = 256$ niveles de grises a velocidad de video (típicamente de 30-50 ms). El voltaje aplicado a cada píxel es una magnitud relacionada en forma decreciente con el nivel de gris enviado, es decir, que los mayores desfases los tendremos para niveles más próximos a 255 (blanco) correspondiente a voltajes casi nulos. En la Figura 4- 3 se muestra una imagen ampliada de una de las pantallas extraídas del proyector con su cable de conexión original.

El funcionamiento del sistema es básicamente el siguiente: tres espejos dicróicos dividen el haz de luz blanca en tres haces, uno rojo, otro verde y otro azul que inciden cada uno en una pantalla distinta. La electrónica, a su vez se encarga de descomponer los tres colores componentes de la señal RGB proveniente de la computadora y enviarlos a cada una de las pantallas. Los haces transmitidos por las LCD son recogidos y combinados mediante un prisma para formar la imagen color y proyectarla. El equipo permite controlar la imagen final mediante varios comandos: brillo, contraste, posiciones horizontal y vertical y sincronismo. En el caso de emplear las pantallas como moduladores es preciso controlar los dos primeros.



Figura 4- 3: imagen de una de las pantallas con su cable de conexión original

Para poder emplear las pantallas extraídas del video proyector en el procesador óptico fue necesario realizar una serie de modificaciones en el sistema electrónico. En

primera medida, los cables de conexión entre la electrónica y las pantallas son de unos pocos centímetros de longitud, por lo que debieron ser reemplazados por otros más largos. Dado que no es habitual trabajar con este tipo de conexiones en longitudes de metros fue necesario diseñar un nuevo sistema de cables que permitiese llevar la señal desde el video proyector hasta las pantallas. Hemos encontrado sin embargo, que estos no pueden ser demasiado largos sin que se produzcan pérdidas de la información; longitudes mayores a 2 metros han causado fallos entre la señal enviada y la recibida por las LCD, por lo que optamos por conservar cables de 1m y mantener el proyector cercano al correlador. Otros de los puntos que debió resolverse fue la remoción de la fuente de iluminación del sistema. Como ya dijimos, la misma se trata de una lámpara halógena de 250 W, que genera, además de luz innecesaria, una gran cantidad de calor que perturba al sistema si se utiliza durante largo tiempo. Este proceso no fue trivial dado que el video proyector posee un sistema de seguridad que impide el funcionamiento del equipo sin la lámpara. Finalmente, siguiendo los planos de los circuitos fue posible emular el consumo generado por la lámpara mediante una combinación de resistencias adecuadas.

Dado que el objetivo era controlar el correlador desde una PC, el video proyector debía poder operarse como si fuese un segundo monitor, por lo que fue necesario agregar a la placa madre de la computadora una segunda tarjeta de video. Una vez establecida esta configuración no debe modificarse ya que el eventual reemplazo de una tarjeta por otra puede variar el voltaje entregado y por lo tanto cambiar la respuesta del sistema.

Por último, debieron removerse los polarizadores que traen las pantallas adheridos a sus caras.

A continuación presentaremos los resultados obtenidos para dos de las tres pantallas extraídas del video proyector. Las mismas corresponden a los canales azul y verde y son identificadas como Blue y Green respectivamente. La pantalla Red extraída del canal rojo fue también medida pero lamentablemente comenzó a fallar al final de la experiencia. Todas las pantallas fueron montadas en un marco adaptado para ser dispuesto en un banco óptico y por ende al correlador.

4.2.2 Obtención de los parámetros independientes del voltaje aplicado

Los valores de los parámetros independientes del voltaje, α , ψ_D y β_{max} los obtuvimos siguiendo una serie de experimentos propuestos por Soutar y Lu [Sou94] y ampliados luego por Davis et al [Dav99a].

El procedimiento consiste en obtener las intensidades transmitidas por el conjunto polarizador-LCD-polarizador iluminado con luz monocromática. Los polarizadores lineales se posicionan de modo que sus ejes de transmisión sean paralelos entre sí para una serie de mediciones y perpendiculares para otra. En cada disposición las mediciones se toman en función del ángulo que forman los ejes respecto a las coordenadas del laboratorio.

Las expresiones teóricas para estas configuraciones se obtienen de (4-7) reemplazando para los casos paralelo $\xi_1 = \xi_2$ y perpendicular $\xi_1 = \xi_2 + \pi/2$. Como no hay ningún campo aplicado (o equivalentemente el modulador se halla apagado) la birrefringencia δ es nula y $\beta = \beta_{max}$ quedando la expresión final para las intensidades de la forma

$$\begin{aligned} T_{//} &= N \left\{ \left[\cos \gamma \cos \alpha + \frac{\alpha}{\gamma} \sin \gamma \sin \alpha \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \cos(2\xi_1 - \alpha - 2\psi_D) \right]^2 \right\} \\ T_{\perp} &= N \left\{ \left[-\cos \gamma \sin \alpha + \frac{\alpha}{\gamma} \sin \gamma \cos \alpha \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \sin(2\xi_1 - \alpha - 2\psi_D) \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (4-8)$$

donde N es un factor que da cuenta de las pérdidas debida a las reflexiones en las interfases y a la absorción en los polarizadores. Igualando estas expresiones a las intensidades medidas queda un sistema cuyas incógnitas son: α , ψ_D , N y β_{max} , (birrefringencia que se obtiene cuando el modulador se halla apagado). Las ecuaciones (4-8) no son por lo tanto suficientes para determinar con precisión los valores buscados encontrándose familias de soluciones igualmente posibles. Davis et al [Dav99a] propusieron resolver esta indeterminación haciendo las mismas mediciones para cuatro longitudes de onda distintas. De esta manera se reducen los grados de libertad del

sistema quedando las incógnitas α y ψ_D independientes de la longitud de onda y N y β_{max} las cuales sí dependen de la frecuencia incidente.

En la Figura 4- 4 se esquematiza el montaje experimental y los ángulos involucrados junto con la convención de signos empleada en todos los experimentos de este capítulo. Los polarizadores P_1 y P_2 se fueron rotando entre 0° y 180° y se tomaron mediciones cada 10° para los casos $P_1 \parallel P_2$ y $P_1 \perp P_2$. Esto se repitió para cuatro longitudes de onda: 632.8 nm proveniente de un láser de He-Ne y 514 nm, 488 nm y 457 nm emitidas por un láser de Ar^+ sintonizable. En todos los casos el haz de luz se empleó sin expandir y la incidencia se realizó sobre el mismo punto de la pantalla para eliminar posibles inhomogeneidades. Debido a que ambos emisores láser eran polarizados incorporamos a la entrada una lámina de media onda para regular la cantidad de luz ingresada al sistema, luego los valores medidos fueron normalizados para la transmisión sin el polarizador P_2 . La intensidad fue tomada con un fotómetro marca Melles Griot

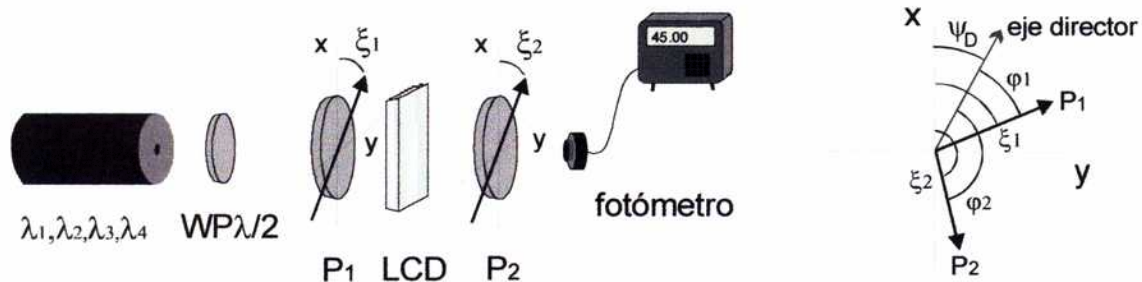


Figura 4- 4: esquema del dispositivo usado para determinar los parámetros de las distintas pantallas apagadas y convención de signos empleada

Mediante la rutina de ajuste Solver dentro del programa Microsoft Excel se determinaron las incógnitas como aquellas que mejor ajustaban los valores teóricos con los experimentales bajo la restricción de que las birrefringencias tomen valores decrecientes con la longitud de onda (es decir que $\beta_{max}(633) < \beta_{max}(514) < \beta_{max}(488) < \beta_{max}(457)$). En la Figura 4- 5 se muestran las curvas obtenidas para la pantalla Green

con las cuatro longitudes de onda. Con símbolos llenos se grafican los datos experimentales correspondientes a los polarizadores cruzados y con símbolos vacíos al caso paralelo. Las líneas corresponden al ajuste teórico. Las curvas obtenidas para la otra pantalla son de características similares por lo que no vale la pena exponerlas.

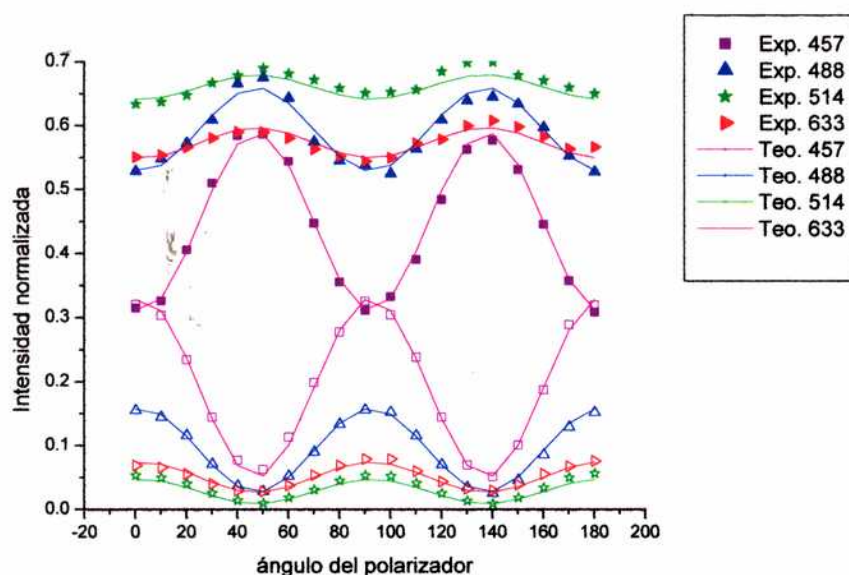


Figura 4- 5: intensidades experimentales transmitidas por la pantalla Green con los polarizadores cruzados (símbolos llenos) y paralelos (vacíos) para las cuatro longitudes de onda. Las líneas corresponden a los ajustes teóricos.

Las ec. (4-8) sin embargo son invariantes ante el signo de α y además no pueden diferenciar entre los ejes ordinario y extraordinario siendo el resultado el mismo si se rota ψ_D en $\pi/2$ radianes. Por tal motivo hace falta realizar un par de experimentos más a fin de determinar los valores correctos.

En el caso del signo de α seguimos el método propuesto en [Sou94] en el cual se realizan mediciones en una configuración sensible a este signo. Una de ellas por ejemplo, es la de disponer el LCD entre los mismos polarizadores P_1 y P_2 pero dejando en esta ocasión el segundo fijo a 0° respecto a la vertical y variar el primero entre 0° y 180° . La expresión de la transmisión con esta configuración es de la forma

$$T = N \left\{ \left[\cos \gamma \cos(\xi_1 + \alpha) + \frac{\alpha}{\gamma} \sin \gamma \sin(\xi_1 + \alpha) \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \cos(\xi_1 - \alpha - 2\psi_D) \right]^2 \right\} \quad (4-9)$$

Se grafican los valores experimentales transmitidos (en este caso una sola longitud de onda es suficiente dado que α es independiente de λ) y se comparan con la transmisión teórica (4-9) escritas una vez en función de $+\alpha$ y otra de $-\alpha$. Aquella curva en la cual coincida la obtenida experimentalmente revelará el signo correcto del twist. En la Figura 4- 6 se muestran las tres curvas: teórica para $+\alpha$, teórica con $-\alpha$. y experimental. Los gráficos corresponden a la longitud de onda de 514 nm y la pantalla Blue en esta ocasión.

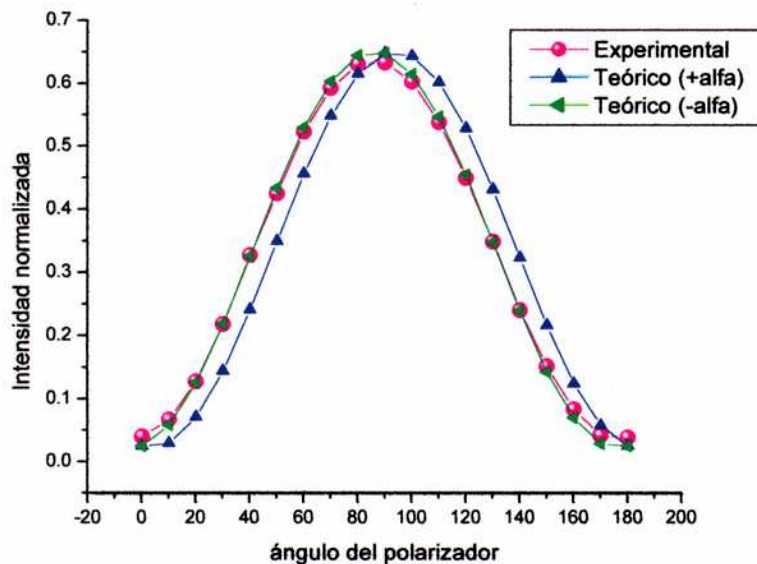


Figura 4- 6: Determinación del signo de α para $\lambda=514$ nm y la pantalla Blue

El valor correcto de ψ_D lo obtuvimos siguiendo la técnica propuesta por Davis et al [Dav99b]. Ellos encontraron que, cuando se incide sobre la pantalla con luz linealmente polarizada en la dirección del eje extraordinario, la distribución de luz obtenida en los órdenes difractados por la estructura pixelada del modulador cambia con el voltaje aplicado, mientras que aquella obtenida cuando la luz incidente está polarizada en la dirección del eje ordinario permanece invariable ante cambios del

voltaje. El desplazamiento relativo de intensidad de los ordenes de difracción es causada por un gradiente en el campo eléctrico a través de cada píxel. Esta variación a su vez provoca un gradiente en el ángulo de inclinación θ de las moléculas del cristal. El índice ordinario de refracción no se ve modificado por este cambio por lo que la luz incidente en esta dirección no se ve afectada por el gradiente. Por el contrario, el índice extraordinario sí sufre esta modificación afectando en el mismo modo la fase de la onda incidente en esta dirección. Este gradiente en el camino óptico dentro de cada píxel se puede ver como una red con blaze que varía acorde al voltaje aplicado.

En la tabla siguiente se muestran los parámetros obtenidos para las pantallas Green y Blue.

	α °	ψ_D °	$\beta_{m\acute{a}x}$ (457)	$\beta_{m\acute{a}x}$ (488)	$\beta_{m\acute{a}x}$ (514)	$\beta_{m\acute{a}x}$ (633)
Green	-91	48	207.2	188.2	173.1	132.2
Blue	-91.82	48.32	196.17	178.53	168.25	125.75

Tabla 4-1: Parámetros característicos de las LCD Green y Blue sin voltaje aplicado

4.2.3 Obtención de los parámetros $\beta(V)$ y $\delta(V)$ en función del voltaje

Como mencionamos anteriormente cuando un campo eléctrico es aplicado la birrefringencia del cristal cambia como función del voltaje V . Su variación no es lineal en todo el espesor de la pantalla y se modeliza su comportamiento considerándolo compuesto por dos láminas retardadoras de birrefringencia $\delta(V)$ y espesor $d_L(V)$ en los extremos y el cristal en el centro de birrefringencia $\beta(V)$ y espesor $d-2d_L$. Estos parámetros a su vez también son dependientes de la longitud de onda usada.

Las mediciones de $\beta(V)$ y $\delta(V)$ las realizamos siguiendo las técnicas propuestas en [Mar00] que explicaremos brevemente a continuación. El LCD es dispuesto, igual que antes, entre dos polarizadores lineales pero en esta ocasión con sus ejes en posiciones fijas. Se toman los valores de la intensidad transmitida variando, esta vez, el nivel de gris enviado al modulador. Esto se realiza para tres configuraciones de polarizadores

diferentes y para las cuatro longitudes de onda empleadas antes. Los ejes de los polarizadores fueron colocados en las siguientes configuraciones:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1) $P_1 = \psi_D$ | $P_2 = \psi_D + \alpha$ |
| 2) $P_1 = \psi_D + 22,5^\circ$ | $P_2 = \psi_D + \alpha + 22,5^\circ$ |
| 3) $P_1 = \psi_D$ | $P_2 = \psi_D + \alpha + 45^\circ$ |

y se normalizaron las intensidades medidas con la resultante de rotar el segundo polarizador en 90° . En todas las configuraciones y sus complementarias se tomaron las transmisiones cambiando el nivel de gris enviado entre 0 y 255 variando de a 10 tonos.

La primera configuración resulta ser independiente de δ y se usa para sacar una primera aproximación de los valores de $\beta(V)$. El segundo caso, por el contrario es muy sensible a los efectos de borde y permite obtener información sobre δ . Finalmente la tercera configuración permite obtener resultados más precisos donde las dos anteriores son menos sensibles.

Las expresiones teóricas correspondientes a cada configuración se obtienen a partir de (4-7) considerando el eje cartesiano x en la dirección de ψ_D , de modo que los ángulos de los polarizadores a escribir en la fórmula estarán referidos al eje director. Dado que para distintas longitudes de onda se cumple la igualdad entre los cocientes $\beta(V, \lambda) / \beta(V, 633\text{nm}) = \beta_{\max}(\lambda) / \beta_{\max}(633\text{nm})$ el método empleado propone escalar los valores de birrefringencia por el cociente $\beta_{\max}(\lambda) / \beta_{\max}(633\text{nm})$. Estas relaciones entre las birrefringencias y las distintas longitudes de onda posibilitan mejorar la precisión de las mediciones realizándolas para las cuatro longitudes anteriores sin introducir por ello nuevas incógnitas. Finalmente los valores de $\beta(V)$ y $\alpha(V)$ son obtenidos minimizando la distancia entre los valores teóricos y los experimentales

En la Figura 4- 7 se muestran las curvas obtenidas para las birrefringencias $\beta(V)$ y $\alpha(V)$ con las pantallas Blue y Green, para la longitud de onda 457nm que será la que emplearemos en este trabajo.

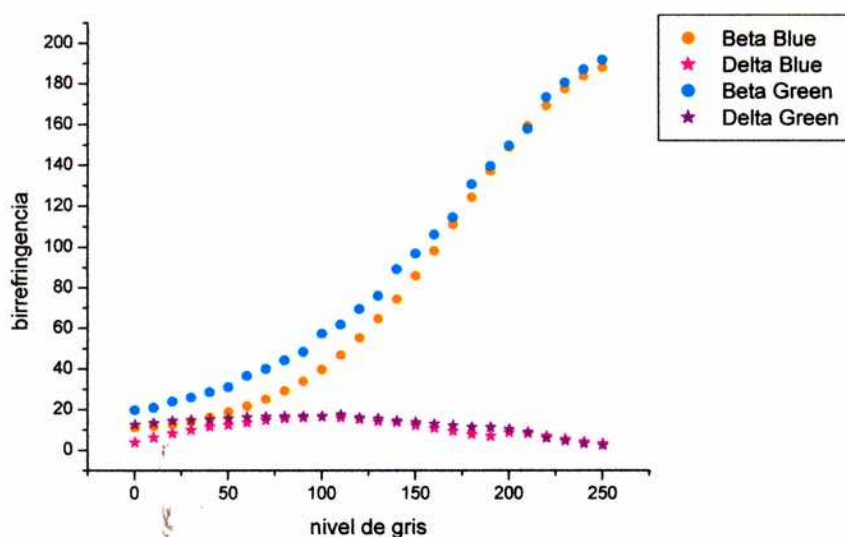


Figura 4- 7: Birrefringencias $\beta(V)$ y $\delta(V)$ para $\lambda=457\text{nm}$ obtenidas para los LCD Blue y Green

4.2.4 Modulaciones sólo de fase y sólo de amplitud

Los experimentos anteriores nos permiten conocer de antemano qué modulación de fase y amplitud tendríamos para un dado nivel de gris representado en la pantalla cuando es iluminada con alguna de las longitudes de onda empleadas en la caracterización. Inversamente podremos hallar qué nivel de gris se le debe enviar a cada píxel para lograr una determinada modulación deseada.

Habitualmente las modulaciones de fase y amplitud se encuentran acopladas y no es posible lograr modulaciones independientes usando solamente polarizadores lineales en la entrada y la salida del cristal. En los primeros trabajos donde se buscó el desacoplamiento de las modulaciones mediante configuraciones simples de dos polarizadores [Kon88] [Lu90] se vio que sólo resultaban efectivos para voltajes bajos y láminas suficientemente delgadas de modo que el twist fuese menor que la birrefringencia. Posteriores trabajos a cargo de Pezzantini y Chipman [Pez93] demostraron que es posible hacer que los LCD modulen sólo la fase si se emplean estados de polarización que resulten autovectores de la matriz que representa la transmisión del modulador (ec. 4-4). Puede verse que estos autovectores corresponden

a estados de luz con polarización elíptica pero además que dependen de parámetros como $\beta(V)$ y $\alpha(V)$ que varían con el voltaje aplicado. Davis et al [Dav98] desarrollaron esta teoría y propusieron autovectores promedio como los adecuados para modular sólo la fase. Sin embargo ninguna de estas propuestas consiguió lograr una verdadera modulación en fase con un rango dinámico cercano a 2π radianes, ni tampoco se alcanzaron modulaciones sólo de amplitud, hasta los trabajos de Marquez et al [Mar01]. En este método se colocan, a la entrada y a la salida de la pantalla, un polarizador lineal y una lámina retardadora con el fin de obtener estados de polarización elíptica, en forma similar al modelo de autovectores, pero se permite variar libremente el ángulo formado por los distintos ejes respecto al eje director. A su vez el retardo introducido por las láminas también puede variarse aunque esto se encuentra limitado por las láminas disponibles en un laboratorio. Teniendo en cuenta todos estos grados de libertad se busca, mediante simulación numérica, las configuraciones que provean las modulaciones deseadas, ya sean de fase o de amplitud.

i) Modulación sólo de fase

Una óptima modulación sólo de fase requiere que la variación en la amplitud transmitida sea mínima dentro de todo el intervalo de niveles de gris (0-255) y que el rango de variación de fase sea máxima, de ser posible de 0 a 2π . Otras condiciones que optimizan la modulación son que el valor medio de la amplitud alcanzada sea alto y que la variación de la fase con el voltaje aplicado sea aproximadamente lineal.

La transmisión para cada nivel de gris, considerando una configuración compuesta de un polarizador lineal y una lámina retardadora delante de la pantalla y otro juego de lámina y polarizador a la salida de la misma, se obtiene a partir del producto de las matrices de Jones de cada elemento

$$T = P_0 R(\alpha + \varphi_2) R(-\alpha - \eta_2) W_0(2\phi_2) R(\alpha + \eta_2) \\ M_{LC}(\alpha, \beta, \delta) R(-\eta_1) W_0(2\phi_1) R(\eta_1) \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \end{pmatrix} \quad (4-10)$$

donde ϕ_1 y ϕ_2 son los ángulos de los polarizadores P_1 y P_2 y η_1 y η_2 los ángulos de los ejes lentos de las láminas de entrada WP1 y de salida WP2, todos medidos respecto a los ejes directores de entrada y salida al cristal. La matriz W representa las láminas retardadoras expresada en sus ejes propios

$$W(2\phi) = \begin{pmatrix} \exp(-i\phi) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi) \end{pmatrix} \quad (4-11)$$

siendo ϕ igual al desfase producido por la lámina.

El criterio empleado para optimizar la modulación sólo de fase es minimizar la diferencia entre las intensidades transmitidas, máxima y mínima $T_{\max} - T_{\min}$, para todo el rango de voltajes. De este modo, uno se asegura de obtener una modulación donde la amplitud permanece constante. Este cálculo se realiza para la longitud de onda más baja (457 nm) a fin de obtener el máximo desfase posible. Se emplean las birrefringencias $\beta(V)$ y $\alpha(V)$ obtenidas a partir de las mediciones efectuadas anteriormente para cada pantalla en la longitud de onda de 457 nm y se ingresan al programa de ajuste los retardos correspondientes a dos de las láminas disponibles. Mediante una subrutina hecha en el programa Microsoft Excel se evalúa la diferencia $T_{\max} - T_{\min}$ ajustando, en forma iterativa, los ángulos formados por los ejes de las láminas y los polarizadores respecto a los ejes directores de entrada y de salida del LCD, a partir de un valor inicial ingresado. El programa se detiene cuando la diferencia es menor a un valor preestablecido. De todas las configuraciones que se obtienen como resultado se elige la que más modulación en fase tiene y más alto nivel medio de amplitud.

El proceso descrito se aplicó para buscar modulación sólo de fase a partir de las dos pantallas de cristal líquido disponibles. Las configuraciones obtenidas mediante estas simulaciones numéricas posteriormente fueron corroboradas experimentalmente. La verificación de la modulación en amplitud se hace en forma muy sencilla midiendo con un fotómetro los valores transmitidos por el dispositivo completo, dispuesto según los ángulos obtenidos en la simulación, en función del nivel de gris. La medición de la modulación en fase es algo más complicada y se requiere de un método interferométrico para medir los desfases. Para ello se monta el dispositivo esquematizado de la Figura

4- 8. El haz láser sin expandir se hace incidir primero en una red de difracción (en nuestro caso empleamos una de 80 l/mm). Se bloquea el orden 0 y se dirigen los órdenes 1 y -1 a dos mitades distintas de la pantalla. Mediante la computadora se le envía a una de las mitades del modulador un nivel de gris uniforme de valor 255 y a la otra mitad se la varía entre 0 y 255. Los haces transmitidos por el último polarizador son recolectados por una lente convergente L que los hace interferir en el plano imagen de la red. Esta figura de interferencia es amplificada mediante un microscopio de banco y proyectada sobre una CCD. A medida que el nivel de gris enviado a la mitad variable va disminuyendo de 255 a 0, las franjas sufren un desplazamiento que se relaciona con el desfase a través de la expresión

$$\psi(\text{gris}) = 2\pi X(\text{gris}) / \Delta \quad (4-12)$$

donde Δ es el período de las franjas, $X(\text{gris})$ el desplazamiento y $\psi(\text{gris})$ el desfase para el nivel de gris especificado respecto al nivel 255.

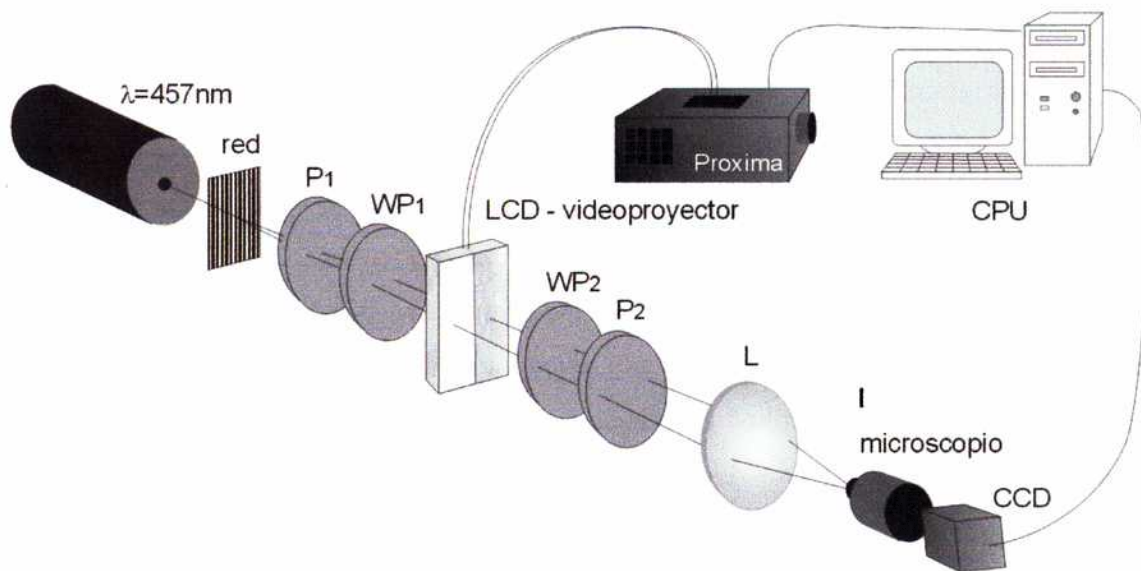


Figura 4- 8: dispositivo para medir los desfases producidos por las pantallas

Para obtener el desfase a partir de las imágenes de las franjas capturadas por la CCD se analizó el desplazamiento sufrido por una misma franja a lo largo de todas las imágenes de interferencia. Para ello, se recortó de las imágenes de 640 x 480 píxeles tomadas por la cámara, una ventana de 512 x 64 píxeles. Se tomó la imagen correspondiente a la interferencia obtenida cuando el nivel de gris era igual en ambas zonas de la pantalla (255-255) como referencia de desfase cero y se convolucionaron las demás tomas de interferencia con la de referencia. Esto proporcionaba una imagen limpia y sin ruido. Tomando una de las franjas de la imagen de referencia como origen se midió el desplazamiento (posición x) que la misma sufría de una imagen de interferencia a otra. Luego, a partir de estos valores y el período de las franjas, se obtuvieron los desfases para cada nivel de gris a partir de la ec. (4-12). En la Figura 4-9 se muestra una imagen compuesta por cada una de estas ventanas ordenadas desde la 255-255 (arriba) hasta la 255-0 (abajo) correspondiente a la pantalla Blue. Se trazó sobre ella una línea roja vertical para que se aprecie mejor la cantidad desplazada por las franjas.

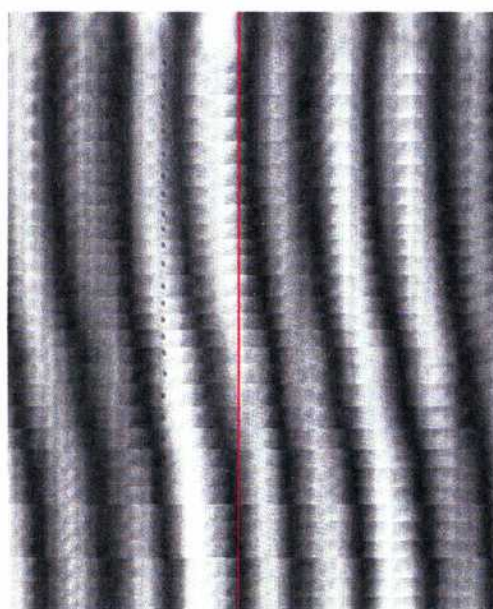


Figura 4- 9: Franjas de interferencia para el LCD Blue

Las curvas teóricas y experimentales obtenidas para las pantalla Blue y Green se grafican en la Figura 4- 10 (a) y (b) respectivamente. Los desfases máximos

alcanzados por cada una se indican junto a cada gráfico. Como puede observarse la pantalla Blue ha demostrado ser la que mayor modulación alcanza y con una respuesta bastante lineal. Por tal motivo elegimos esta pantalla para representar los filtros de fase en el correlador.

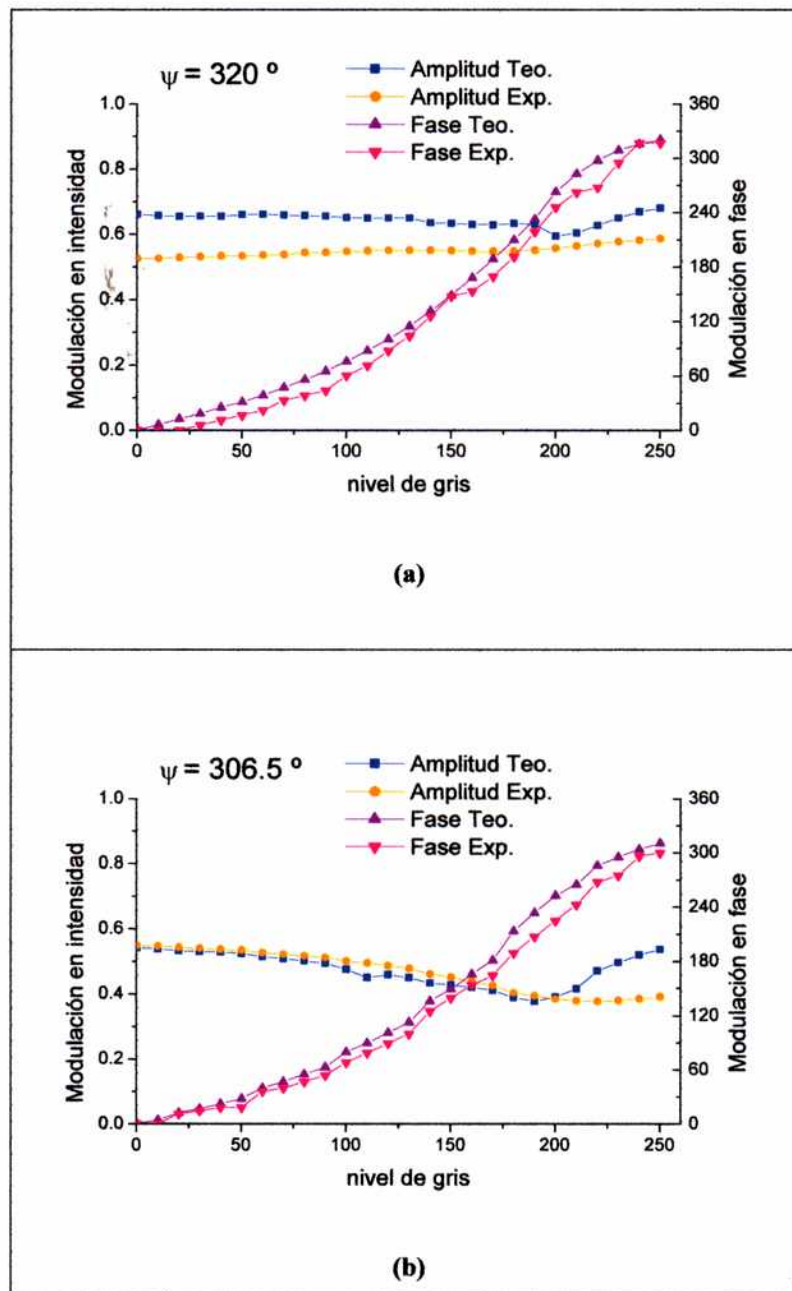


Figura 4- 10: Curvas obtenidas en la configuración sólo de fase para las pantallas: (a) Blue; (b) Green

Las curvas obtenidas para la variación de la fase en función del nivel de gris permiten conocer la respuesta en fase del dispositivo para cada valor de gris enviado, pero la situación se presenta en general a la inversa. Esto es, se desea representar en el modulador un elemento óptico de fase a través de una función matemática que le otorga valores en el rango $0-2\pi$. Para esto es necesario expresar estos valores de fase en niveles de gris adecuados como para que el modulador responda con la fase esperada. Este ajuste se obtiene a partir de una inversión de la curva de fase en función del nivel de gris, obtenida experimentalmente, luego el polinomio que ajuste a esta curva se debe emplear como tabla de corrección (LUT). En la Figura 4- 11 se muestra la curva obtenida para la pantalla Blue.

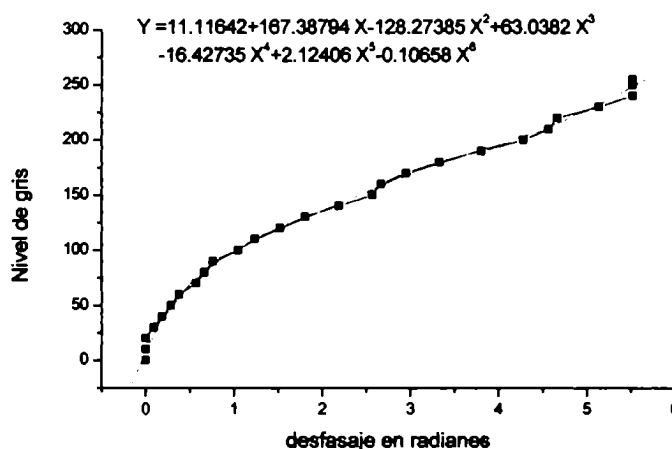


Figura 4- 11: Nivel de gris en función de la fase de la pantalla Blue

ii) Modulación sólo de amplitud

Los pasos seguidos para obtener la modulación de amplitud son similares a los anteriores pero pidiendo como requisitos que la fase permanezca invariable para todo el rango de niveles de gris mientras que la amplitud normalizada varíe entre 0 y 1 en forma aproximadamente lineal. Además se pide que la transmisión para el valor cero sea lo mas baja posible para mejorar el contraste. Teniendo en cuenta estos requisitos se busca, siguiendo el proceso análogo al descrito anteriormente, la configuración de láminas

desfasadoras, ángulos de los ejes de las láminas y polarizadores, que mejor cumpla con las condiciones impuestas.

Estas configuraciones fueron estudiadas para las dos pantallas pero, en base a los resultados obtenidos para la modulación en fase optamos por usar Blue como modulador sólo de fase en el correlador y apuntamos a encontrar una buena modulación de amplitud para Green. En la Figura 4- 12 se muestran los resultados de la configuración de modulación en amplitud hallada para Green.

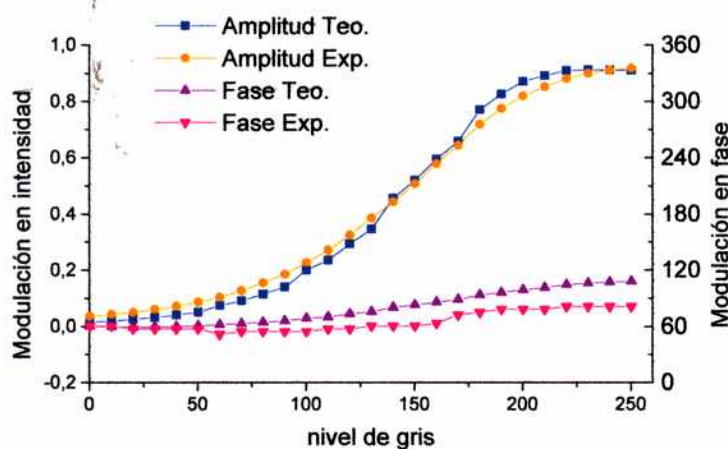


Figura 4- 12: Curvas teóricas y experimentales obtenidas para la modulación sólo de amplitud de la pantalla Green

Puede observarse una respuesta en fase casi plana y un amplio rango dinámico con buen contraste para la modulación de amplitud.

Igual que en el caso anterior, esta curva otorga los valores de intensidad transmitidos por la pantalla para cada nivel de gris representado en ella. Por lo que es necesario, dada una función de amplitud a enviar al modulador, obtener la tabla de conversión amplitud-nivel de gris adecuado. Dado que la curva obtenida experimentalmente relaciona intensidades con valores de grises y no amplitudes como se busca, la curva no es la inversa de la mostrada en la Figura 4- 12, como ocurría en el caso de las fases, sino la inversa de la raíz cuadrada de los valores del eje y en función del nivel de gris. Realizando este cálculo la curva obtenida es la representada en la Figura 4- 13.

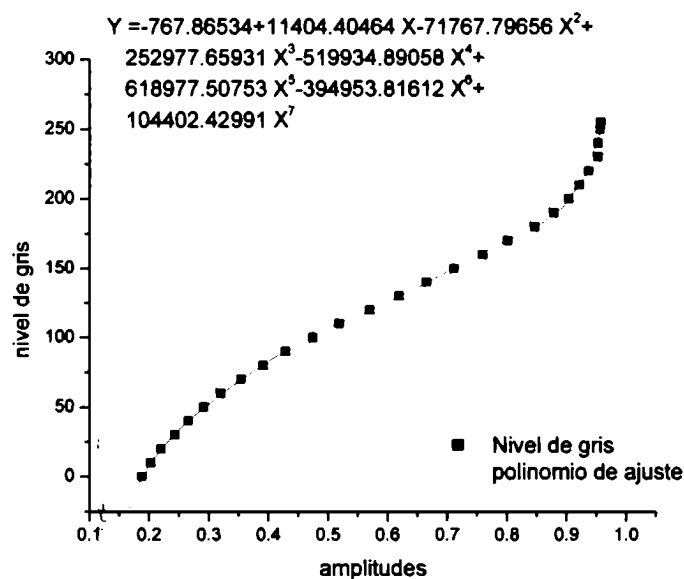


Figura 4- 13: Nivel de gris en función de la amplitud para la pantalla Green

En la Tabla 4-2 se presentan los ángulos de los polarizadores y de las láminas respecto a las coordenadas de laboratorio, y los desfases introducidos por las láminas WP1 y WP2 para la configuración de fase de la pantalla Blue y de amplitud de la pantalla Green.

	P_1°	WP_1°	P_2°	WP_2°	$\phi(WP_1)$	$\phi(WP_1)$
Blue fase	280	237	154.5	233.5	124.2032	265.9039
Green ampl.	133	56	42	147	266.0631	94.2043

Tabla 4-2: valores de los ángulos de los polarizadores y las láminas retardadoras en coordenadas de laboratorio para la configuración de fase de Blue y de amplitud de Green

4.3 Implementación de un POF en un modulador sólo de fase

Hemos visto que un filtro sólo de fase (POF) es aquel que se obtiene quitando la modulación de amplitud de la transformada de Fourier del objeto $o(x,y)$ a reconocer.

$$O(u, v) = O(u, v) \exp[i\varphi(u, v)] \rightarrow \exp[i\varphi(u, v)] \quad (4-13)$$

Un filtro de tal característica ha demostrado ser mucho más eficiente que el tipo clásico adaptado donde la función amplitud es conservada. Sin embargo, cuando se requiere almacenar la información de fase en un medio de amplitud es necesaria una codificación de la misma mediante algún proceso interferométrico óptico o digital. Es decir registraremos una función del tipo

$$T(u, v) = 1 + \cos[\varphi(u, v) - \phi_L(u, v)] \quad (4-14)$$

donde ϕ_L es la fase de la onda de referencia. Si en cambio contamos con un medio en donde los valores de fase pueden controlarse punto a punto basta con representar en él la distribución $\varphi(u, v)$.

Para ejemplificar este hecho generamos filtros sólo de fase adaptados a la imagen representada en la Figura 4- 14 (a) mediante las dos técnicas y analizamos su respuesta al impulso. La Figura 4- 14 (b) muestra la respuesta que se obtendría con un filtro creado a partir de la codificación de la fase en un medio de amplitud. La Figura 4- 14 (c) corresponde a la respuesta al impulso de un filtro en el que se representó directamente la fase de la transformada del objeto. Si deseamos desplazar la reconstrucción basta con agregar una fase lineal adicional tal como se puede ver en la Figura 4- 14 (d).

Comparando las respuestas al impulso vemos que las obtenidas a partir de los filtros formados directamente por la fase no poseen la reconstrucción del objeto conjugado como en el caso de la técnica interferométrica, ni tampoco el orden cero. Esto representa una gran ventaja ya que:

- toda la luz difractada va a parar a la reconstrucción del objeto y no se pierde más de la mitad en la formación del objeto conjugado y el orden cero.
- la posición de la reconstrucción del objeto puede seleccionarse en todo el plano.

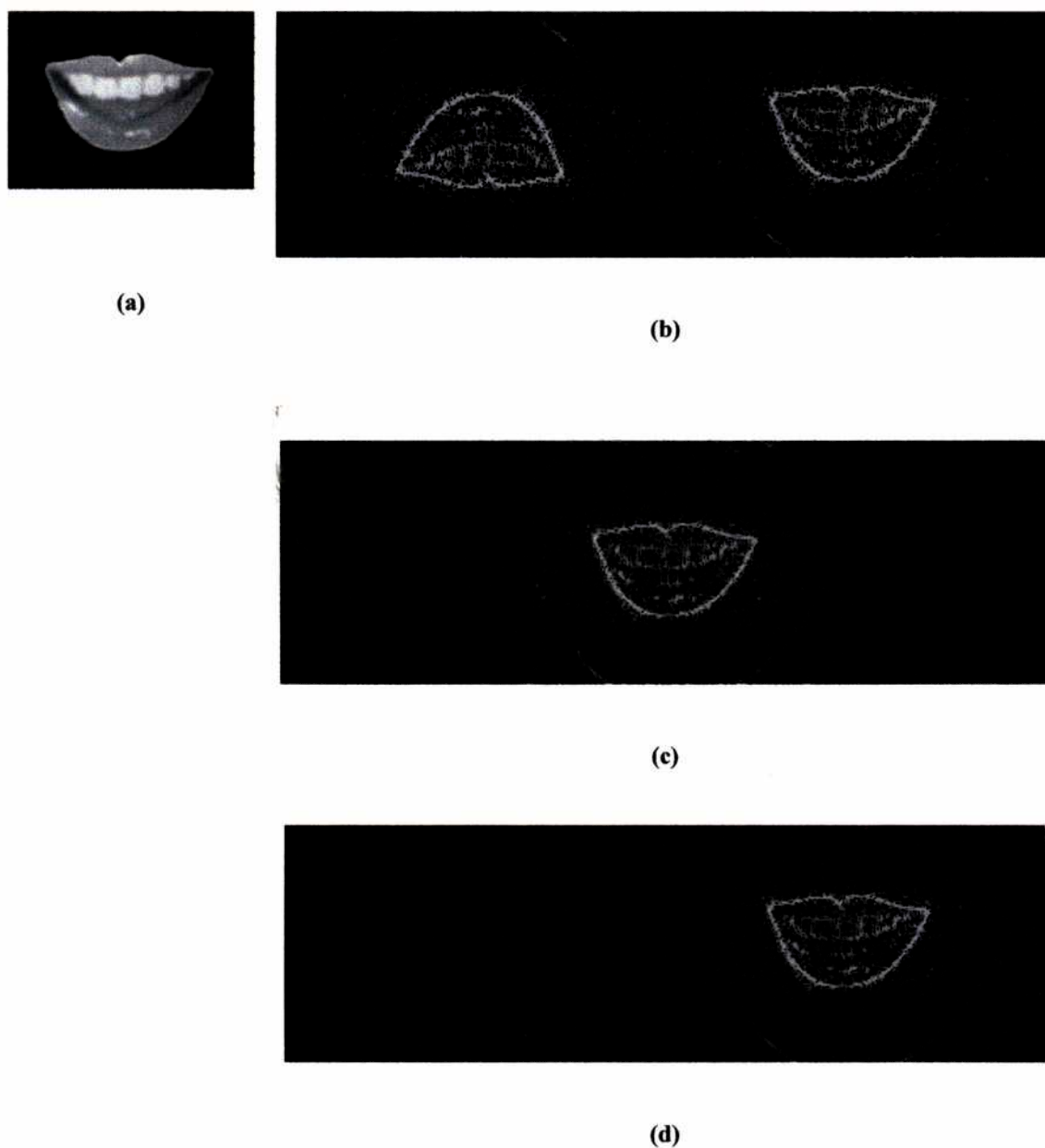


Figura 4- 14: (a) objeto a codificar. Respuesta al impulso numérica del:
(b) filtro de fase interferométrico; (c) filtro de fase sin fase lineal; (d)
filtro de fase con fase lineal

De hecho, si ninguna fase lineal es sumada a la fase de la transformada la reconstrucción del objeto se obtendrá perfectamente en el mismo centro de la imagen de salida. Llevado a la práctica este filtro, sin fase lineal sumada, produciría el mismo

resultado siempre y cuando el modulador de fase alcance a representar hasta 2π . En nuestro caso y con las láminas retardadoras que disponíamos, ninguna de las pantallas alcanzó ese valor ideal por lo que la diferencia restante se traduce en la aparición de un débil orden cero. En la Figura 4- 15 (a) y (b) se muestran las respuestas al impulso obtenidas cuando se representan filtros POF en una pantalla trabajando en configuración sólo fase. Si bien el orden cero no es nulo es notoria la ausencia de la imagen conjugada.



(a)



(b)

Figura 4- 15: Respuestas al impulso experimentales empleando el modulador en configuración de fase: (a) sin fase lineal; (b) con fase lineal

Un filtro de este tipo, cuando es utilizado en un correlador, no produce la convolución sino tan sólo la correlación quedando liberada por tanto la mitad del plano de salida. Este espacio disponible permite la incorporación de nuevos canales de reconocimiento aumentando así la cantidad de información que puede procesarse en forma simultánea.

4.4 Filtros compuestos con información sólo de fase

Hemos visto que una pantalla de cristal líquido, trabajando en una configuración que permita modular solamente la fase de un frente de ondas, resulta un medio especialmente adecuado para representar filtros que contengan sólo la información de la fase de una señal. En principio en un dispositivo de este tipo puede almacenarse la información correspondiente a diversos objetos, siempre y cuando la función que represente esta combinación sea de módulo unitario (si así no fuera debe codificarse la información de amplitud en fase [Dav99c]). En el capítulo 3 hemos presentado filtros compuestos que permitían realizar el reconocimiento simultáneo de varios objetos, sin embargo ellos requerían de la codificación de la fase en amplitud por lo que presentaban la correlación junto con la convolución en el plano final. Vimos que, en el caso de filtros generados en niveles de gris, un método para evitar esto era añadir una fase cuadrática de forma tal que la señal de convolución y la de correlación se focalizaran en distintos planos, quedando así más canales de información disponibles. Ahora al poder representar directamente los valores de fase en el filtro esta codificación ya no es necesaria. Veamos que modificaciones deben introducirse en el proceso de diseño de filtros compuestos para que puedan representarse en un modulador sólo de fase.

4.4.1 Filtros con información de un solo objeto por canal

Proponemos un diseño de filtro de fase cuya respuesta al impulso se componga de las respuestas al impulso de diversos POF adaptados cada uno a un objeto diferente. Los filtros se diseñarán de modo tal de obtener las reconstrucciones individuales desplazadas espacialmente de manera que las correlaciones de cada objeto con una escena de entrada resulten en sectores diferentes del plano de salida sin superponerse.

Una forma directa de obtener una composición de esta característica es a través de la suma de las transformadas de Fourier de los objetos y generar, a partir de ello, un filtro sólo de fase. Presentaremos dos formas posibles de hacerlo:

Filtro A: El filtro es sintetizado sumando las transformadas de Fourier de los distintos objetos a reconocer. Luego se elimina la modulación de amplitud de la suma final. Matemáticamente esta operación puede expresarse como:

$$T_A(u, v) = \frac{\sum_i A_i(u, v) \exp[j\phi_i(u, v) + j(\alpha_i u + \beta_i v)]}{\left| \sum_i A_i(u, v) \exp[j\phi_i(u, v) + j(\alpha_i u + \beta_i v)] \right|} \quad (4-15)$$

Con $A_i(u, v) \exp[j\phi_i(u, v)]$ la transformada de Fourier del objeto i y $(\alpha_i u + \beta_i v)$ la fase lineal incorporada de modo tal que permita controlar, ya sea la ubicación de la respuesta al impulso o la zona del plano de correlación donde se detectará ese objeto.

Filtro B: El filtro es sintetizado sumando los filtros POFs individuales. Es decir, se genera el filtro POF de cada objeto y luego se suman para formar el filtro final. Si bien cada filtro POF tiene módulo unitario la suma de ellos debe ser normalizada a fin de obtener un filtro sólo de fase.

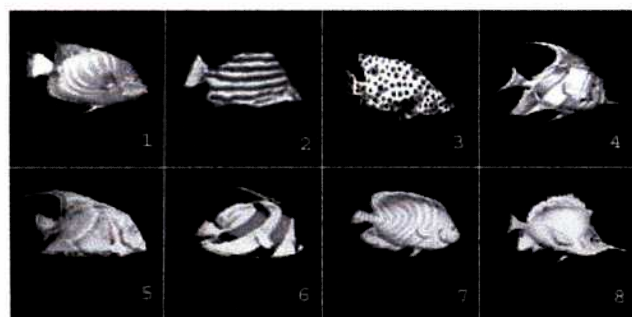
$$T_B(u, v) = \frac{\sum_i \exp[j\phi_i(u, v) + j(\alpha_i u + \beta_i v)]}{\left| \sum_i \exp[j\phi_i(u, v) + j(\alpha_i u + \beta_i v)] \right|} \quad (4-16)$$

con $(\alpha_i u + \beta_i v)$ las mismas fases lineales que en el caso A.

En la síntesis de los filtros sumar una fase lineal a la transformada del objeto es equivalente a desplazar el objeto, sin transformar, la cantidad correspondiente en el plano de coordenadas. Igualmente sucede en la generación del filtro adaptado, es equivalente conjugar la transformada que invertir el objeto real. Por tal motivo el filtro A puede ser generado a partir de la transformada de Fourier de una sola imagen compuesta por los ocho objetos posicionados en sus lugares correspondientes sin

necesidad de realizar la suma de las transformadas individuales. Luego esta transformada es normalizada a fin de retener sólo la fase.

Los ocho objetos de la Figura 4- 16 (a) conforman el conjunto empleado en la construcción de estos filtros. Los peces son de un tamaño aproximado de 64×64 píxeles y cada uno de ellos fue embebido dentro de una matriz de ceros de 512×512 píxeles, directamente en la posición donde se espera su reconstrucción. Para su distribución se dividió el plano de 512×512 píxeles en una grilla de 9 zonas y se destinó cada tercio de la periferia para ubicar cada uno de los objetos. La Figura 4- 16 (b) muestra un esquema de las posiciones destinadas para los distintos peces.



(a)

8	7	6
5		4
3	2	1

(b)

Figura 4- 16: (a) conjunto de objetos; (b) distribución en el plano

En forma numérica obtuvimos las respuestas al impulso de ambos filtros, las cuales se presentan en la Figura 4- 17. En los dos casos las respuestas de cada objeto poseen el realzamiento de bordes característico de filtros sólo de fase, tal como se esperaba. Podría decirse, en principio, que los dos procesos empleados son equivalentes. La ventaja de sumar directamente los objetos y normalizar la transformada de la suma, como se hace en el caso A, sería más que nada constructiva ya que, como se mencionó antes, de esta forma el filtro puede ser generado acomodando los objetos a reconocer directamente en las posiciones donde se desea obtener la correlación y luego se transforma Fourier el conjunto. No obstante el posterior cálculo de diversos parámetros de rendimiento reveló algunas diferencias.

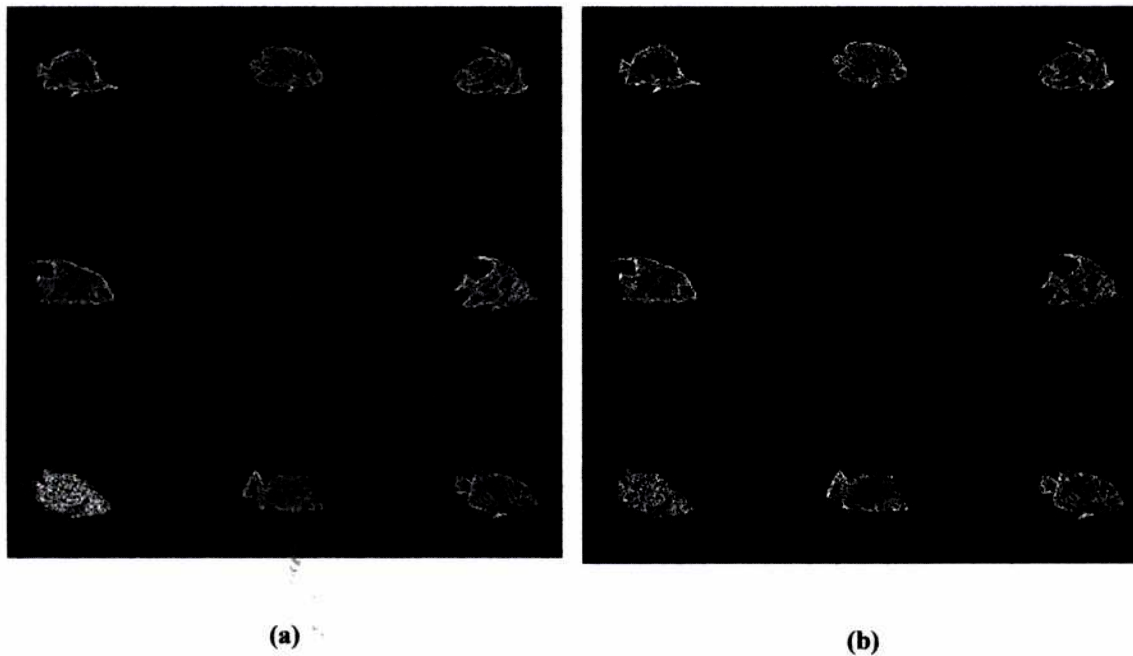


Figura 4- 17: respuesta al impulso numérica del filtro (a) A; (b) B

Los distintos objetos se reconstruyen en sectores distintos del plano de salida, esto lleva a que en el plano de correlación se formen 8 regiones separadas y sin superponerse, que se interpretan como los ocho canales independientes de salida. Cada uno de estos canales quedará asociado a un único objeto y una señal de autocorrelación dentro de algún canal específico indicará la presencia en la escena de entrada del objeto correspondiente al mismo. Por ejemplo, si la escena de entrada estuviese compuesta por un solo objeto centrado, supongamos el número 1, se obtendrá en el canal número 1 un pico de autocorrelación centrado en el correspondiente canal. Los picos de correlación cruzada que aparecerán centrados en los demás canales serán bastante débiles. Otro ejemplo es suponer que la escena de entrada estuviese compuesta por dos objetos número 1, entonces en el plano de correlación se obtendrán dos picos de autocorrelación desplazados dentro del canal una cantidad similar al corrimiento que cada uno trae dentro de la escena. De esta forma analizando la existencia de picos de autocorrelación dentro de cada canal se podrá saber la presencia o no del objeto correspondiente. Al mismo tiempo el desplazamiento que los picos pudiesen traer respecto al centro del

canal indicará qué lugar ocupan, y el número de picos dirá cuantos de ellos hay presentes en la escena.

De todo este razonamiento se desprende que el tamaño de los objetos que componen tanto la escena como los filtros, se halla fuertemente limitada por el espacio destinado para cada canal. Es fácil advertir que las escenas a correlacionar con estos filtros no podrán tener una extensión que supere la tercera parte del tamaño del fondo de 512×512 , lo que las reduciría a un área de aproximadamente 170×170 píxeles. Esto también corresponde al tamaño máximo que puede tener el objeto mismo a registrar en el filtro, debiendo en este caso la escena componerse de tan sólo un objeto. Si así fuera el filtro, su uso sería específicamente para detectar por sí o por no la presencia del objeto. Esta reducción en el ancho de banda disponible es el precio que hay que pagar por el aumento del número de objetos distribuidos en forma separada en el plano de salida.

4.4.1.1 Evaluación de los filtros según diversos criterios de rendimiento

Evaluamos el desempeño de los dos filtros según los criterios de rendimiento presentados en el capítulo 2. Los estudios fueron realizados sobre la respuesta al impulso y la correlación obtenidas ambas en forma numérica.

i) Respuesta al impulso

Las respuestas al impulso numéricas de los filtros A y B se obtienen directamente transformando Fourier las transmisiones T_A y T_B (Figura 4- 17 (a) y (b) respectivamente). Como puede verse no se registra ninguna imagen correspondiente a los objetos conjugados ni tampoco superposición de las reconstrucciones, obteniéndose cada una en el lugar asignado.

La respuesta al impulso fue analizada mediante dos criterios de rendimiento: la eficiencia luminosa y la relación señal-ruido, ambas definidas según las ecuaciones (2-41) y (2-40) respectivamente. En el caso de la eficiencia el cociente se realizó entre la energía de reconstrucción de un pez determinado (el número 6) y la energía total difractada. En la Figura 4- 18 (a) se grafica la eficiencia en función del número de

objetos sumados en el filtro; la línea sólida corresponde al filtro A y la línea de trazos al filtro B. Caben destacar los altos valores de eficiencia obtenidos en el proceso de reconstrucción, siendo de 1 en el caso de un solo objeto. Este resultado se condice con el hecho de que ahora toda la energía transmitida se dirige a la reconstrucción del objeto registrado sin haber pérdidas en la formación de imágenes conjugadas ni demás órdenes de difracción espurios como sucede en la codificación en amplitud.

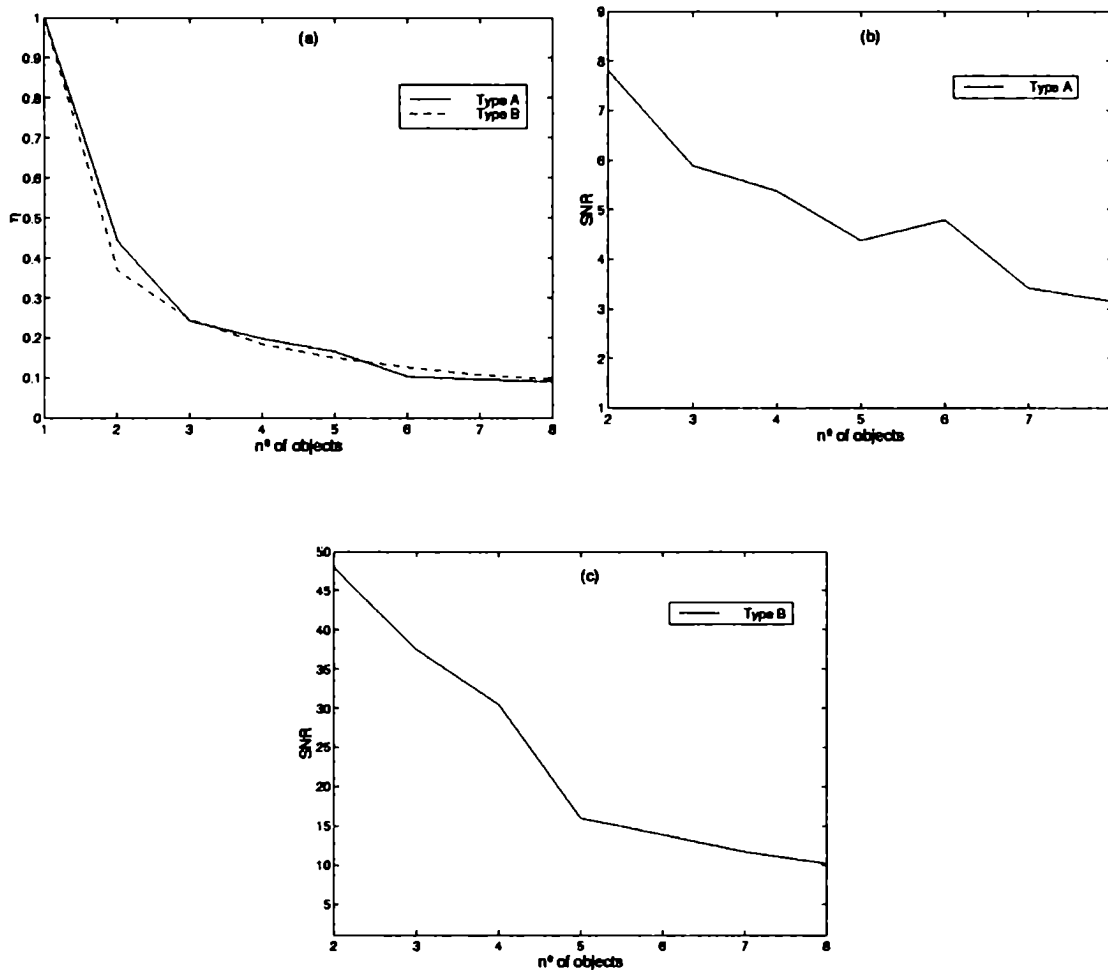


Figura 4- 18: Criterios de rendimiento de la respuesta al impulso numérica en función del número de objetos: (a) eficiencia; (b) SNR para el filtro Tipo A; (c) SNR para el filtro Tipo B

En la Figura 4- 18 (b) y (c) se muestran los resultados de calcular la SNR para los filtros tipo A y B respectivamente en función del número de objetos multiplexados. Los cálculos se hicieron nuevamente sobre el pez 6. Comparando ambos resultados se puede

de este resultado puede atribuirse a la diferencia en los procedimientos de sintetizado. El tipo B está formado por la suma de filtros POF individuales, es decir que cada sumando ya posee la respuesta al impulso esperada, luego, debido a que la suma deja de ser de fase esta debe ser blanqueada nuevamente. El tipo A por el contrario, se forma con la adición de filtros individuales que poseen variaciones de amplitud. Cada uno es directamente la transformada de Fourier del objeto sin ningún paso de blanqueado intermedio como en el caso B, realizándose el proceso de normalización de la amplitud una sola vez sobre el filtro final. Este método parecería introducir más ruido que el caso previo donde la gradual cuantificación de la amplitud produciría menos error en la respuesta al impulso. Este punto queda pendiente para mas investigaciones.

ii) Correlaciones

La respuesta de estos filtros en el plano de reconocimiento fue evaluada numéricamente a través de una correlación entre cada uno de ellos con la escena de la Figura 4- 19. Los resultados para el caso de ambos filtros se pueden apreciar en la Figura 4- 20 (a) y (b) respectivamente. Los números junto a cada punto de autocorrelación señalan que objeto de la Figura 4- 16 (a) esta siendo reconocido. Como puede apreciarse, cada objeto fue perfectamente identificado en su correspondiente canal. A su vez, ambos filtros muestran poseer un buen poder de discriminación y los picos de autocorrelación son de una intensidad mucho mayor que los de correlación cruzada. Tampoco se halla presente en este resultado la convolución.

Sobre los resultados numéricos se evaluaron, en función del número de objetos, el valor del pico de autocorrelación, la agudeza del pico (PCE) y la capacidad de discriminación (DC) todos sobre el objeto 6 reconocido en el canal 6. Para el cálculo del DC se empleó la autocorrelación del objeto 6 en el canal 6 y como correlación cruzada el pez 8 también en el canal 6. Los resultados se muestran en la Figura 4- 21: en (a) se grafica el valor del pico, en (b) el PCE y finalmente el DC en (c). En todos los casos los resultados correspondientes al filtro A se muestran en línea sólida y los del filtro B en línea punteada. Es natural que el valor del pico decrezca cuando el número de objetos almacenados aumenta debido a que la misma energía de entrada debe separarse en diferentes canales. Las variaciones del PCE no son significativas y los valores del DC se

mantienen prácticamente constantes para los dos filtros indicando que poseen una buena capacidad de discriminación. De los gráficos se puede concluir que ambos filtros producen señales de correlación de características similares.

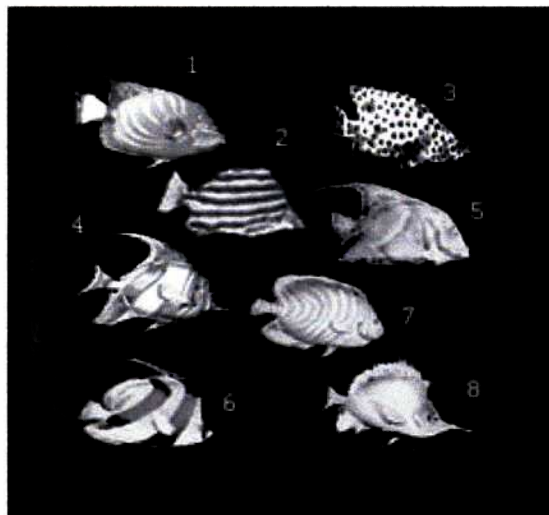
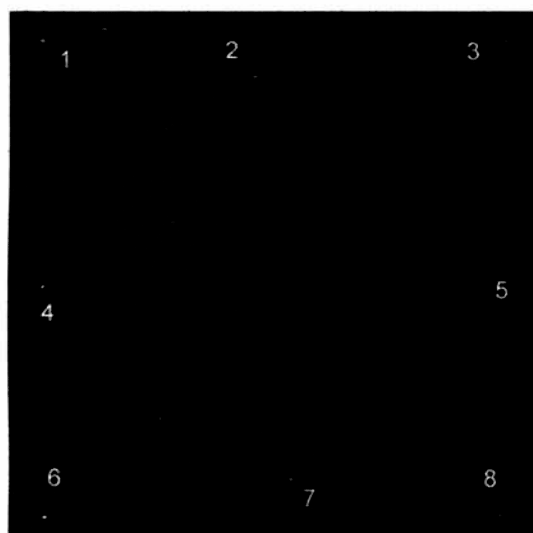


Figura 4- 19: Escena



(a)



(b)

Figura 4- 20: Correlaciones numéricas con los filtros (a) A; (b) B

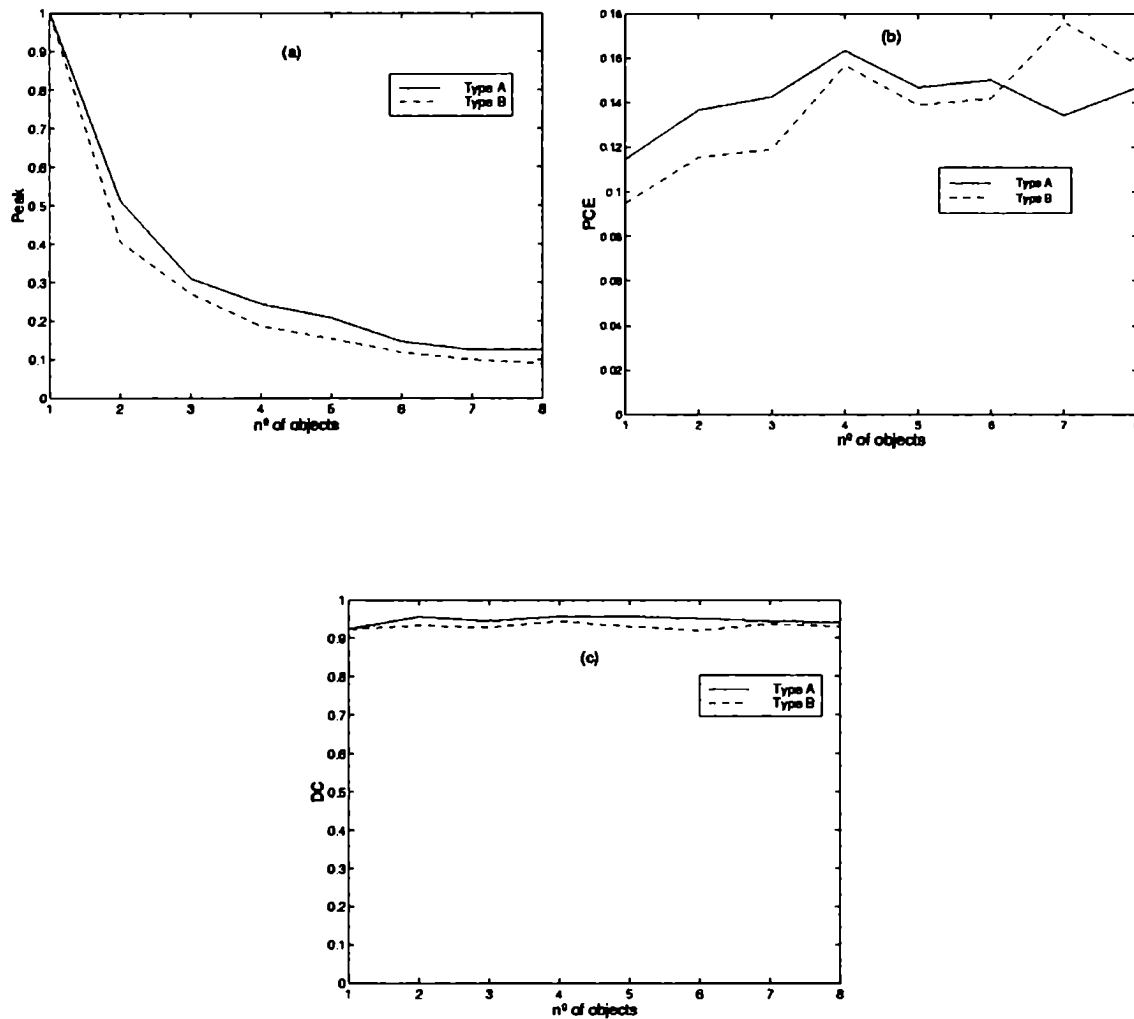


Figura 4- 21: Criterios de rendimiento para la correlación numérica: (a) valor del pico de correlación; (b) PCE; (c) DC

4.4.1.2 Resultados experimentales

Los filtros A y B fueron evaluados en forma experimental empleando para su representación la pantalla de cristal líquido Blue configurada en modo sólo de fase. En primer término se analizaron las respuestas al impulso y posteriormente se incorporó a un correlador de Vander Lugt para evaluar los filtros en procesos de reconocimiento óptico.

numéricos podemos ver un punto brillante en el centro de la imagen. Como explicamos anteriormente esto se debe a que la modulación en fase alcanzada por la pantalla no llega a ser de 2π .

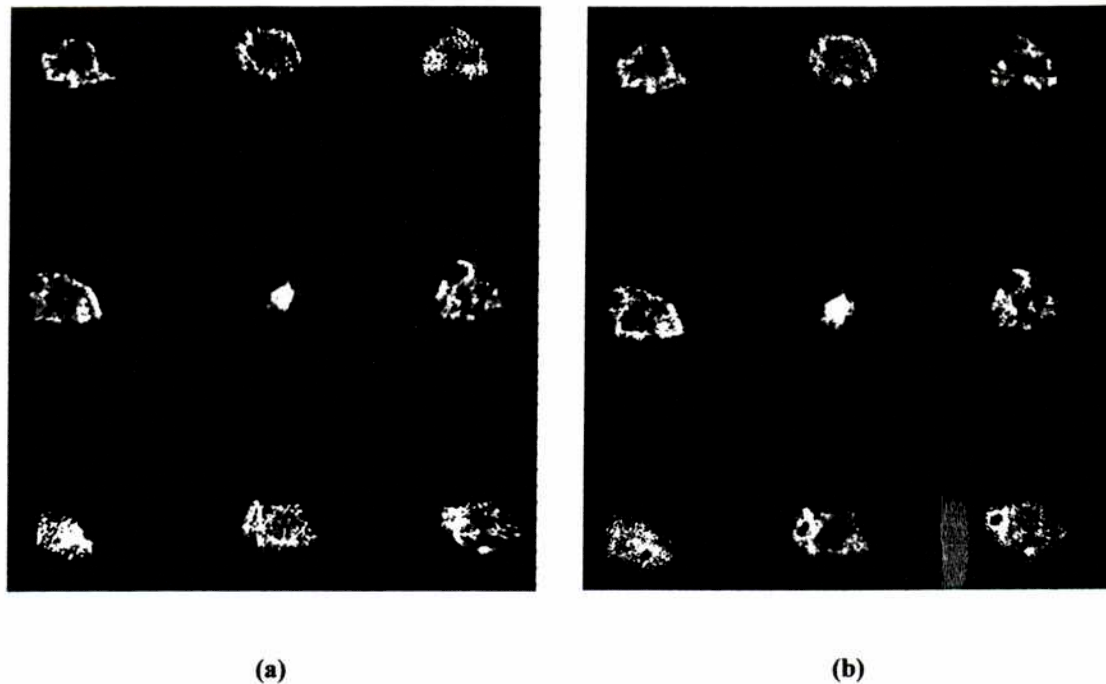


Figura 4- 23: Respuestas al impulso experimental de los filtros: (a) A; (b) B

ii) Correlaciones

Estos filtros fueron evaluados experimentalmente en un correlador tipo Vander Lugt con arquitectura convergente. Un esquema del mismo se muestra en la Figura 4-24.

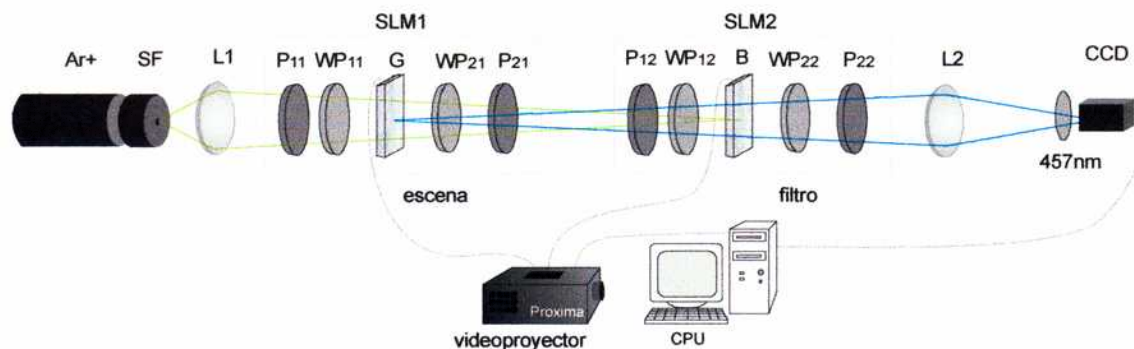


Figura 4- 24: esquema del correlador

La luz proveniente de un láser de Ar^+ incide, antes de ser expandida, sobre el polarizador P_{11} y la lámina retardadora WP_{11} que generan el estado de polarización elíptica adecuado para que el primer modulador SLM1 opere en modo sólo de amplitud. Luego el haz es expandido por el filtro espacial SF y focalizado mediante la lente L_1 de forma tal que proporcione la transformada de Fourier de la escena de entrada sobre la segunda pantalla de cristal líquido (LCD Blue). Como lente L_1 se empleó un objetivo de fotografía para minimizar las aberraciones. Inmediatamente después se ubicó un diafragma para reducir el diámetro del haz expandido y luego la pantalla Green en la cual se representará la escena de entrada. Por último la lámina desfasadora WQ_{21} y el polarizador P_{21} completan el modulador espacial de luz SLM1. Este conjunto se puede observar en la primera fotografía de la Figura 4- 25. Para implementar el filtro se utilizó el modulador SLM2 operando en modo sólo de fase. Este modulador se halla conformado por la pantalla LCD Blue, ubicada en el plano transformado de LCD Green, el polarizador P_{12} y la lámina WQ_{12} que proveen el estado de polarización adecuado para la luz incidente y la lámina WQ_{22} junto con el polarizador P_{22} que generan la polarización adecuada a la salida del modulador. Por último la lente L_2 permite obtener el plano de correlación sobre la CCD previo paso por un filtro interferencial. Este conjunto se muestra en la segunda fotografía de la Figura 4- 25.

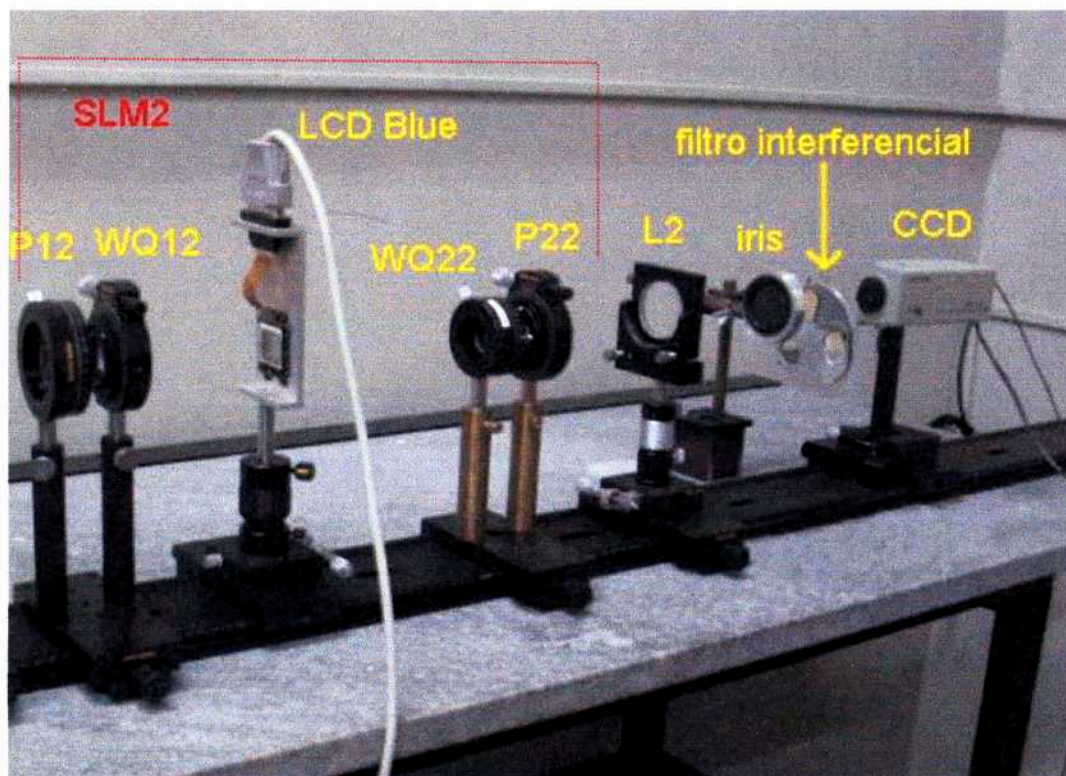
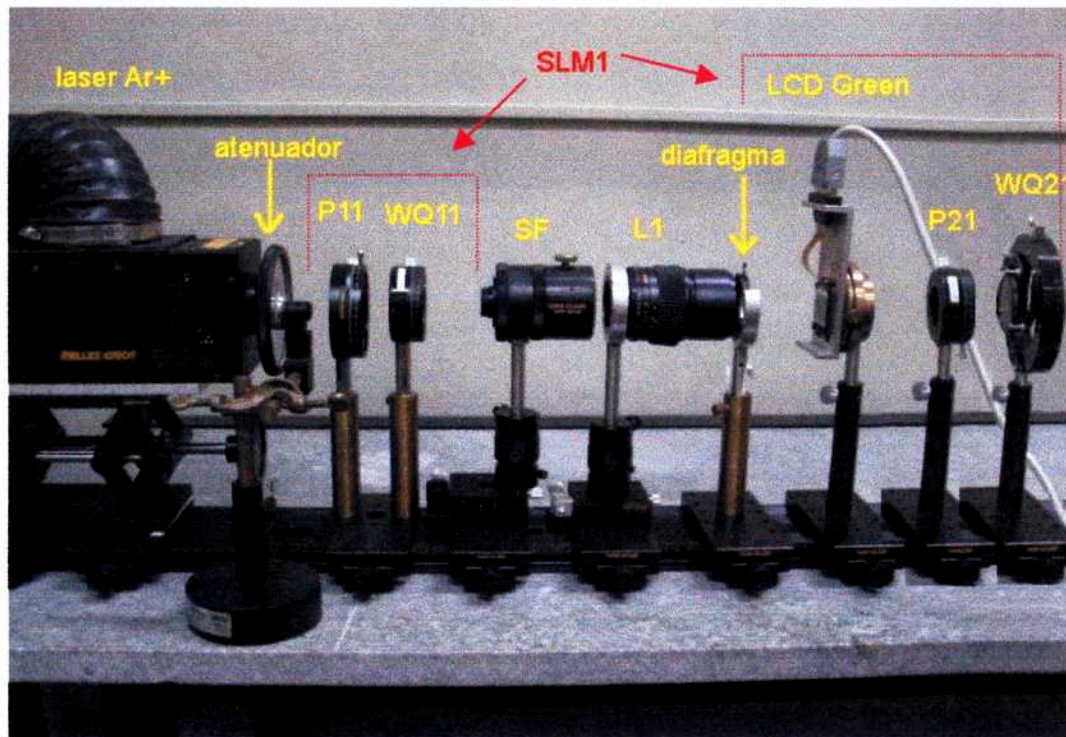


Figura 4- 25: fotografía del correlador

Al igual que en el caso del correlador montado para usar con películas fotográficas este debe ser alineado para que coincidan las orientaciones y tamaños de la transformada de Fourier de la escena con la de los objetos registrados en el filtro. La posibilidad de trabajar ahora a tiempo real ha permitido cambiar el método de alineación que se empleaba con los filtros y escenas en materiales fotográficos por otro de carácter dinámico. El nuevo método que empleamos ha sido propuesto por Nicolás et. al. y se halla descrito en [Nic02]. El mismo permite ir ajustando los distintos grados de libertad mediante técnicas de filtrado espacial. Los parámetros a controlar son:

La ubicación exacta de la pantalla Blue (plano del filtro) en el plano en el que la lente L_1 enfoca el pinhole que actúa como fuente puntual.

- ii. El centrado del filtro en el eje óptico del sistema. Para cumplimentar este punto es necesario poder desplazar LCD Blue en forma precisa tanto vertical como horizontalmente.
- iii. El alineado del azimut de la escena respecto a la posición del filtro. Esto requiere el montaje del LCD Green sobre un posicionador de giro.
- iv. El ajuste de las escalas de la transformada de la escena con el filtro. Para esto es necesario poder desplazar LCD Green a lo largo del eje óptico.

Para cada uno de estos tests fue diseñada una imagen de entrada que en conjunto con el filtro apropiado posibilita un rápido ajuste del correlador con precisión de un píxel. Las diferentes imágenes empleadas y las explicaciones teóricas se detallan en el trabajo [Nic02].

Una vez alineado el correlador se procedió a implementar experimentalmente los filtros anteriormente descritos.

Tanto la escena como el filtro se generaron en un tamaño de 512 x 512 píxeles. En la Figura 4- 26 se muestran las correlaciones experimentales obtenidas con ambos tipos de filtros para los 8 objetos. Los números indicados junto a los picos de correlación señalan cual objeto está siendo reconocido en cada canal. Se puede ver que estos filtros no presentan efecto de cross-talking por lo que resultan muy buenos discriminantes.

Igual que en el caso de la respuesta al impulso, el orden cero central en las imágenes se deben a no haber alcanzado con el SLM2 una modulación en fase de 2π .

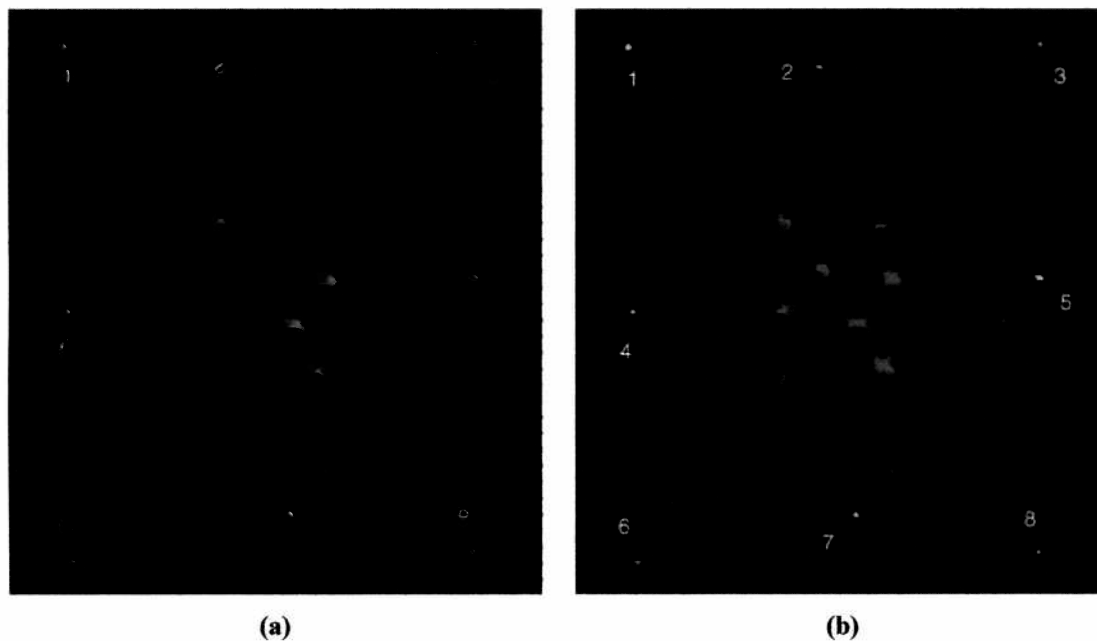


Figura 4- 26: Correlaciones experimentales con los filtros: (a) A; (b) B

En la Figura 4- 27 se grafica la capacidad de dicriminación DC obtenida a partir de las imágenes recogidas experimentalmente sobre el filtro tipo A. Comparando con la curva simulada (Figura 4- 21-c) se puede ver que esta es ligeramente menor, aunque sigue siendo muy alta. Con el filtro tipo B se obtienen resultados similares.

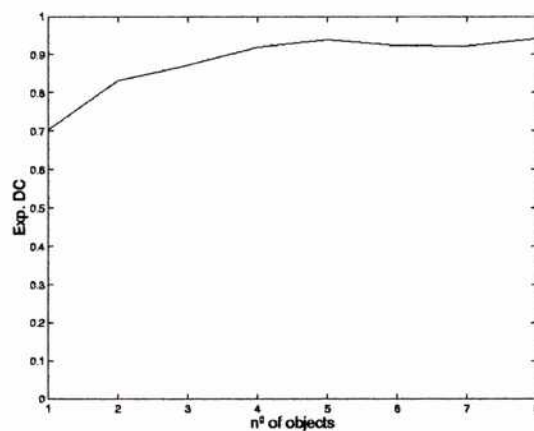


Figura 4- 27: DC experimental sobre el filtro tipo A

4.4.2 Filtros con información de varios objetos por canal

Con el filtro presentado anteriormente cada canal de correlación quedaba unívocamente asociado a un determinado tipo de objeto. Por ejemplo, el canal 1 se empleó para reconocer pez de la Figura 4- 27 a) en su parte superior y tamaño. Con el mismo criterio en los filtros iniciales el canal 2 los los canales para identificar el objeto único en la imagen excepto el incluía el código único que se había asignado a un objeto en caso de no existencia de éste).

En la sección anterior nos ocupamos de cómo se construye un filtro sintetizado de un solo objeto sólo de fase. Este es el filtro que se utiliza de forma tal que cada canal está asignado a un tipo de objeto en una clase determinada. En cada canal se registró el objeto que se registró en las distintas perspectivas. Así todos los objetos que pertenecen a la misma clase deben sintetizarse con la misma onda portadora de manera que su reconstrucción se produzca en el mismo canal. En nuestro caso optamos por generar un filtro adaptado al mismo conjunto de 8 peces de la sección anterior pero agregando en cada canal dos perspectivas más de cada pez. De esta forma el filtro final quedó compuesto por un total de 24 objetos distribuidos en 8 clases. El cuadro de la Figura 4- 28 muestra el conjunto de objetos que se registró en cada canal. Respetamos la misma numeración y fases lineales usadas en el filtro de 8 peces.

El algoritmo empleado para la generación del filtro fue en este caso el MED-SDF presentado en el capítulo 2. Decidimos recurrir a este procedimiento en lugar de la suma de filtros POF para asegurarnos de tener picos de autocorrelación de valores similares y disminuir de este modo, las posibles falsas alarmas debidas a autocorrelaciones bajas combinadas con correlaciones cruzadas altas.

La Figura 4- 29 (a) muestra la respuesta al impulso de este filtro. La imagen no es tan clara de apreciar como los filtros de un objeto por canal debida a la superposición de imágenes en un mismo lugar y aparte por estar formada solo por contornos, lo cual es típico de los filtros sólo de fase. La reconstrucción del pez 1 y del pez 2 son, en todo caso, en donde resulta más fácil de discernir la presencia de las versiones rotadas. Dado que no es sencillo en esta imagen apreciar la existencia o no de información cruzada,

mostramos en la Figura 4- 29 (b) la parte real del filtro donde se pueden ver más claramente las reconstrucciones individuales. Analizando esta última imagen, vemos que efectivamente no hay información cruzada y cada pez se reconstruye donde se esperaba.

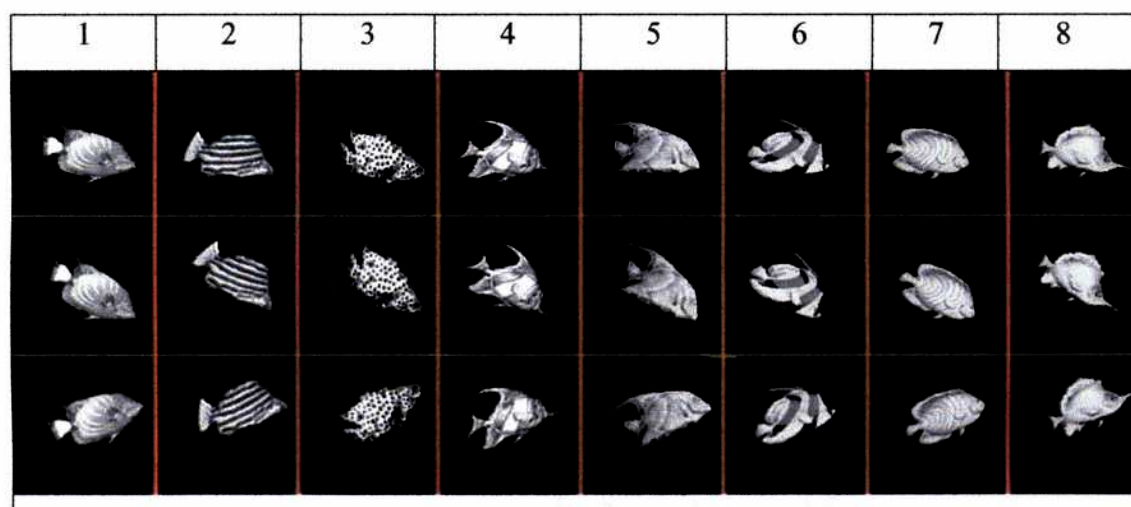


Figura 4- 28: objetos codificados en el filtro agrupados por canal

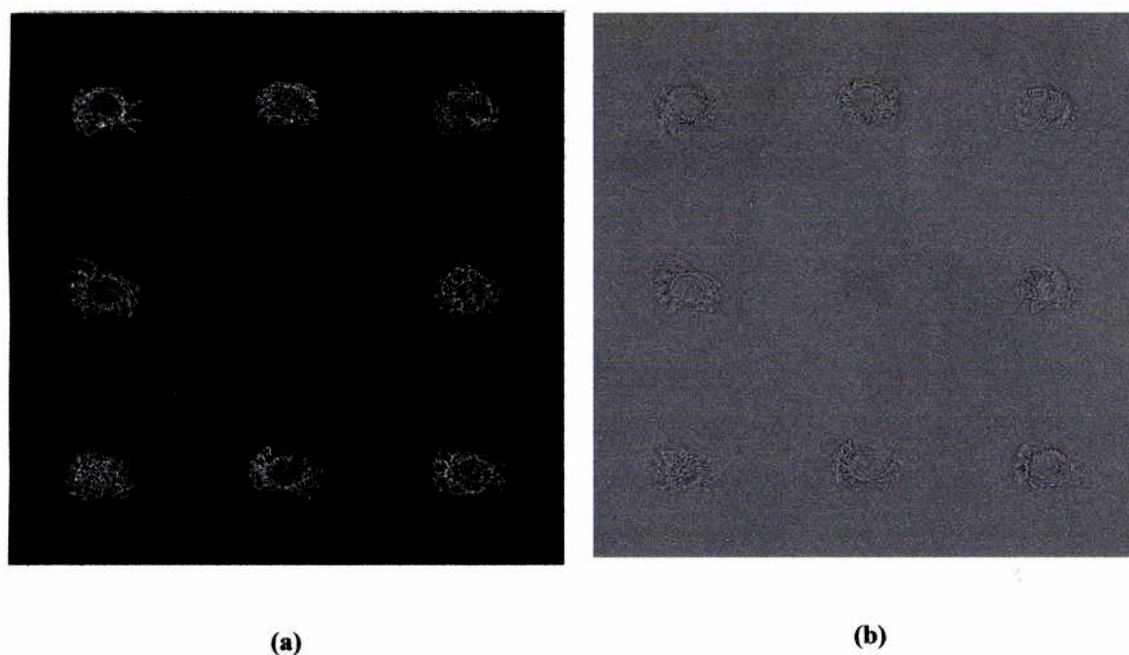


Figura 4- 29: (a) respuesta al impulso numérica; (b) parte real del filtro

4.4.2.1 Resultados experimentales

i) Respuesta al impulso

La fase del filtro de módulo unitario, obtenida directamente mediante el algoritmo MED-SDF fue enviada al modulador. La configuración montada para obtener la respuesta al impulso es idéntica a la empleada para los ocho peces (Figura 4- 22) y la imagen capturada por el CCD en el plano de reconstrucción es la mostrada en la Figura 4- 30.

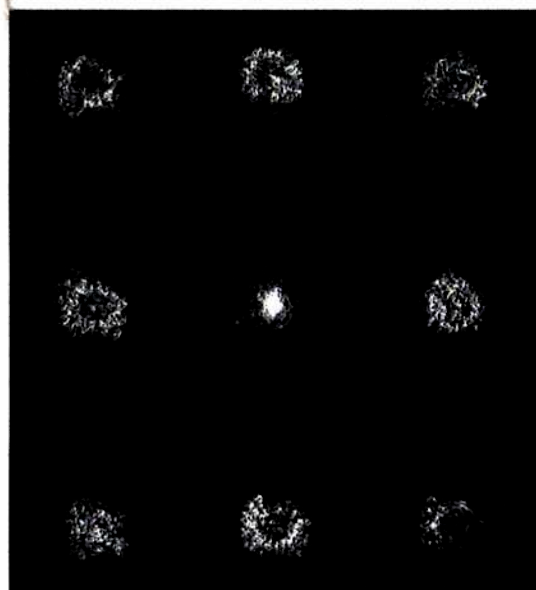


Figura 4- 30: Respuesta al impulso experimental del filtro de 24 objetos

En este caso, al igual que en la simulación numérica, también es difícil discernir cada objeto individual y concluir algo sobre esta imagen. Sólo podemos agregar que aquí también los sectores de los peces número 1 y 2 son donde más fácilmente se puede apreciar la existencia de las tres perspectivas. Los demás peces pueden determinarse mejor comparando esta respuesta con la respuesta experimental de los 8 peces (Figura 4- 23) y analizando la forma de cada uno. En estos casos, en donde varios objetos aparecen superpuestos, la respuesta al impulso, en general, no permite determinar cuan correctamente ha sido almacenada la información. Sin embargo un estudio de las

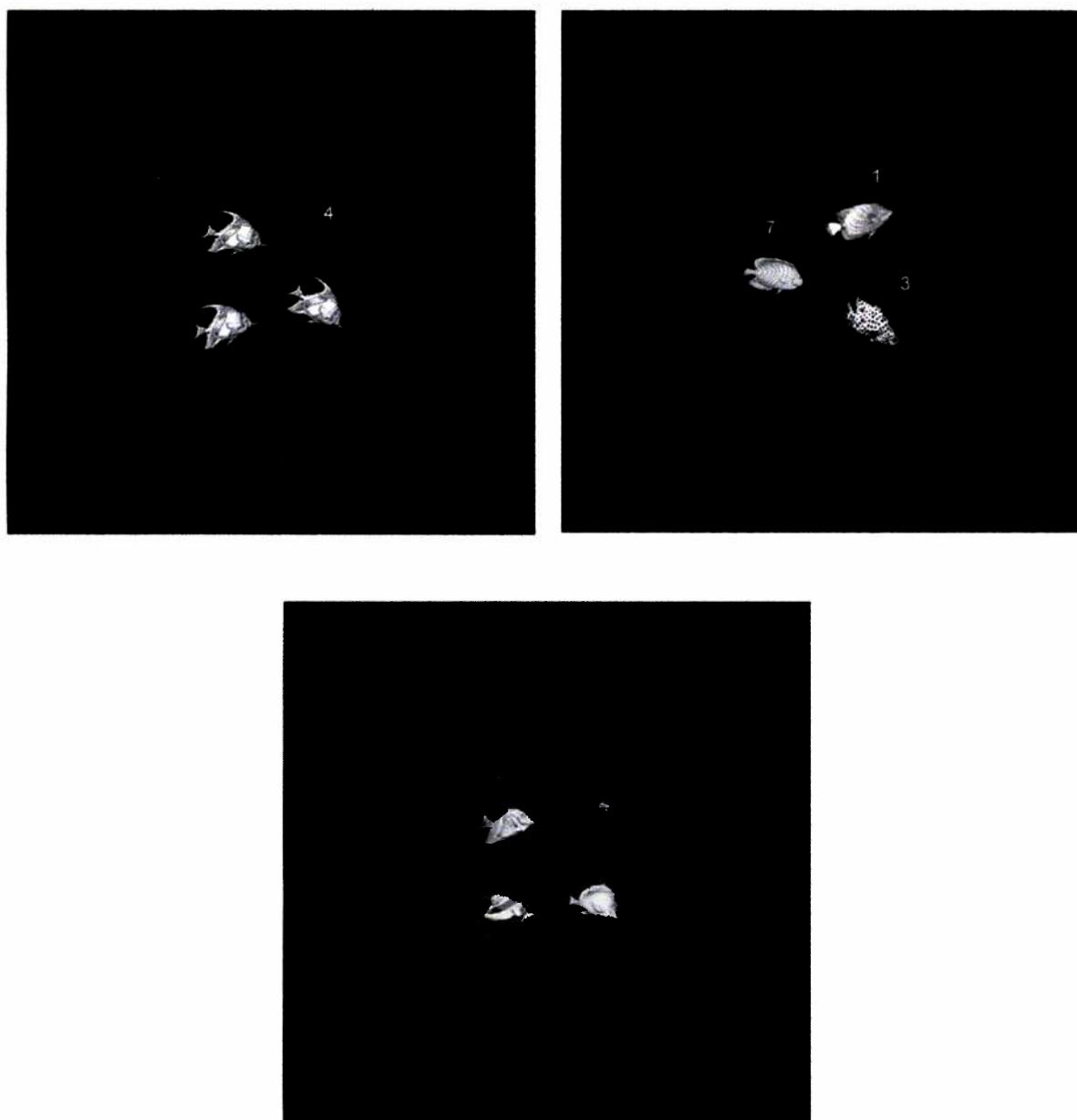


Figura 4- 31: escenas usadas con el filtro de 24 peces

correlaciones nos indicará si el diseño de estos filtros resulta apropiado para efectuar procesos de reconocimiento múltiple.

ii) Correlación

Este filtro fue probado en el correlador de la Figura 4- 24. Nuevamente la pantalla Blue fue usada para representar el filtro y el modulador Green se empleó para implementar las distintas escenas. El filtro fue evaluado con tres escenas distintas que involucran entre las tres las ocho clases. En la Figura 4- 31 se muestran estas tres escenas. La primera de ellas está formada por las tres versiones del pez 4. La segunda tiene al pez 1 rotado hacia arriba, el pez 7 horizontal y al pez 3 rotado hacia abajo (en la imagen mostrada se anotaron los números correspondientes de cada pez). Finalmente la última escena está compuesta por el pez 5 rotado hacia arriba, el pez 2 rotado hacia abajo, el pez 6 horizontal y el pez 8 horizontal.

Cada una de ellas fue correlacionada con el filtro en forma secuencial. En la Figura 4- 32 se muestran las tres correlaciones capturadas por la CCD. La parte (b) de la misma corresponde a la correlación con la escena que solo contiene peces de una misma clase, la número 4. Comparando con la tabla de asignación de canales de la Figura 4- 32 (a) vemos que los 3 peces fueron perfectamente reconocidos en su canal correspondiente. Si bien no se detectan prácticamente picos de correlación cruzada se puede apreciar en la figura un pico en el canal 2, sin embargo este posee una intensidad mucho menor como para ser detectado por el sistema como una autocorrelación. La Figura 4- 32 (c) muestra la correlación con la segunda escena. Analizando los picos obtenidos con la tabla de asignación vemos que cada clase fue identificada correctamente en cada canal y no se detectan picos de correlación cruzada. Finalmente la Figura 4- 32 (d) muestra la correlación con la última escena obteniendo similares resultados.

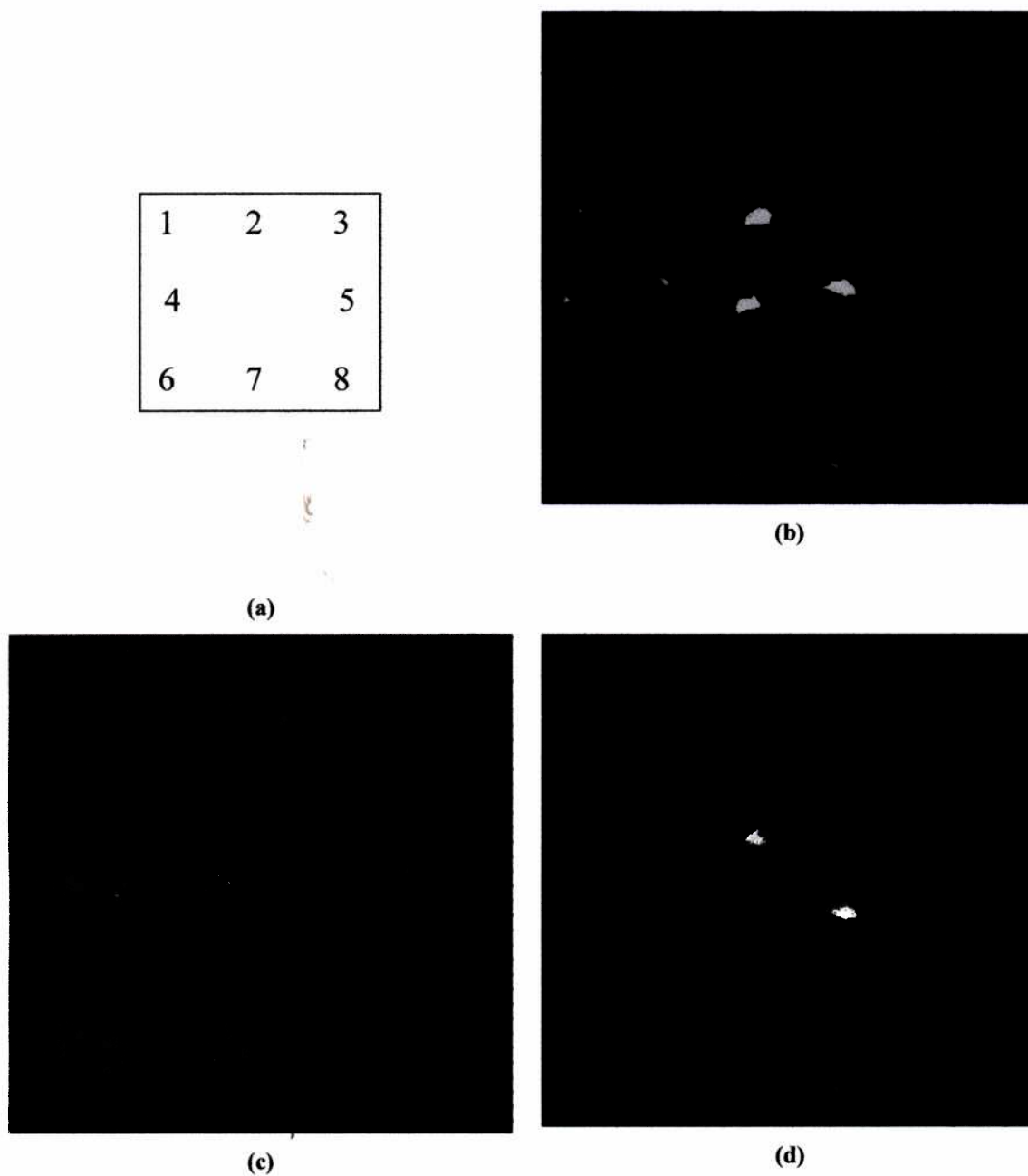


Figura 4- 32: (a) plano de canales; (b), (c) y (d) correlaciones con distintas escenas

Podemos concluir que el método es efectivo para almacenar también más de un objeto con la misma portadora sin perder calidad en el desempeño. El filtro ha demostrado poseer alta capacidad de discriminación.

Conclusiones

En el transcurso de esta tesis se han propuesto y desarrollado distintas técnicas para aumentar, por un lado, la capacidad de almacenamiento de filtros a usar en correladores ópticos y por otro, la cantidad de procesos de reconocimiento que pueden realizarse en simultáneo. Básicamente las técnicas propuestas pueden dividirse en aquellas orientadas para sintetizar filtros sobre material fotográfico, es decir materiales en donde la función a representar viene codificada como variaciones de amplitud; y aquellas desarrolladas para implementar los filtros sobre moduladores sólo de fase.

Se presentaron dos métodos para generar filtros múltiples sobre película diapositiva color. En ambos el registro se lleva a cabo mediante el empleo de copiadoras digitales de alta resolución.

El primero de ellos utiliza una apropiada combinación de colores del sistema RGB para almacenar diferentes partes de la información en canales independientes. El filtro así generado es utilizado en un correlador tipo Vander Lugt en el que se emplea una iluminación multiespectral. De esta manera es posible incrementar la cantidad de información a codificar en un filtro tradicional tantas veces como canales de color independientes se dispongan. Para llevar a cabo la implementación de este método se analizó, en primer lugar, la combinación de colores adecuada para ser representada en la película. Dado que la fuente de iluminación con la que se contaba era un láser de He-Ne y uno de Ar^+ se buscaron las combinaciones en donde las longitudes de onda estuviesen más separadas, es decir, rojo-verde y rojo-azul. El análisis espectral para los colores rojo y verde arrojó como resultado que la película registrada en verde deja pasar una pequeña componente del rojo. Otro análisis reveló que la película no resuelve bien la zona de contacto entre ambos colores, generando una línea amarilla en los límites de cada color. Esto contribuye a un agrandamiento de las zonas rojas y por consiguiente a una pérdida de resolución. La combinación rojo-azul dio excelentes resultados. Se diseñó, en primer lugar un filtro que almacenó un objeto en el canal rojo y otro distinto

en el azul para ser iluminados con las longitudes de onda de 633nm y 457nm. Cada uno de ellos correspondió a un filtro POF y en la superposición se tuvieron en cuenta las diferencias de tamaño de la difracción con la longitud de onda, a fin de usarlo en el mismo montaje experimental. Tanto las respuestas al impulso como las correlaciones dieron como se esperaba. Cada canal color reconstruyó la información almacenada correspondiente sin obtenerse imágenes cruzadas. Estas respuestas al impulso resultaron idénticas a las obtenidas en forma numérica sobre cada filtro por separado hechos en blanco y negro. Las correlaciones también dieron muy buenos resultados. En ningún caso se obtuvieron picos de correlación cruzada y en ambos casos los picos de autocorrelación resultaron altos y angostos. El segundo filtro generado con la combinación rojo-azul también demostró ser muy eficiente. El empleo del algoritmo MED-SDF nos permitió construir un filtro compuesto de cuatro objetos en cada canal color. Luego la superposición generó un filtro final adaptado a ocho objetos distintos. La evaluación de este filtro, en un correlador tipo Vander Lugt, dio también los picos de autocorrelación esperados y ninguno de correlación cruzada. Cabe destacar que este filtro compuesto fue generado mediante los métodos tradicionales para sintetizar CGH por lo que, si bien su capacidad de almacenamiento se ve incrementada por la utilización del color, la dirección de la onda portadora no puede elegirse libremente siendo la fase lineal sumada a cada uno de ellos la misma. Resulta así que este diseño sólo permite diferenciar entre las dos clases, compuestas en este caso de cuatro elementos cada una, y no discrimina entre cada uno de los cuatro elementos de la misma clase. Nuestra experiencia con dos canales ha resultado satisfactoria e indica que este método de multiplexado en color es una alternativa eficiente para generar filtros compuestos.

Con el objeto de superar los límites inherentes a la codificación binaria de hologramas el segundo método presentado se basó en la capacidad del material fotográfico para representar distintos niveles de gris. El método propuesto permite registrar directamente la función que representa la interferencia entre el haz objeto y la onda de referencia sin recurrir a los métodos binarios tradicionales para generar CGH, de este modo el filtro se comporta como un verdadero interferograma. Estos nuevos filtros poseen las mismas ventajas que tiene un holograma real por sobre el digital binario, como son la reconstrucción de tan sólo los órdenes 1, 0 y -1 y la posibilidad de

manejar libremente la orientación y frecuencia de la onda portadora. Así, en los filtros compuestos por varios hologramas es posible seleccionar la posición de la respuesta al impulso brindada por cada uno de ellos sin distorsiones ni pérdidas de la información.

Con esta técnica se diseñó un primer filtro, formado por la suma de cuatro interferogramas sólo de fase, adaptados cada uno a un objeto distinto. Pudimos comprobar, analizando la respuesta al impulso, que efectivamente la reconstrucción de cada objeto almacenado se formaba en los lugares establecidos por la elección de las fases lineales sin haber reconstrucciones cruzadas. La naturaleza digital del método constructivo nos permitió también sumar a cada objeto una fase cuadrática, aparte de la lineal. Esto posibilita enfocar el orden -1 en un plano distinto que el 1, así al realizar la detección en el plano donde se forma la imagen del objeto, su imagen conjugada queda desenfocada y deja libre una zona en la cual puede acomodarse la imagen de un nuevo objeto. Se evaluaron en forma numérica diversos criterios de rendimiento del filtro, tanto en su respuesta al impulso como en el plano de correlación y en función del número de objetos almacenados. En la respuesta al impulso se analizaron, la eficiencia luminosa (η) y la relación señal ruido (SNR) y en la correlación, el valor del pico de autocorrelación, la agudeza de pico (PCE) y la capacidad de discriminación (DC). Los aspectos importantes que surgen de este análisis es que el SNR decrece a medida que aumenta el número de objetos almacenados, debido a la aparición del ruido originado por las imágenes desenfocadas; sin embargo el poder de discriminación permanece prácticamente inalterado al agregar objetos, lo que implica que si bien la codificación de la fase cuadrática baja la relación señal ruido esto no tiene influencia en el plano de correlación. Resulta así este método de síntesis muy útil para efectuar numerosas correlaciones en forma simultánea.

En una experiencia posterior esta capacidad para procesar información en paralelo fue potenciada mediante la implementación de un código binario más un bit de control de paridad, de modo de aumentar de N a $2^{N-1}-1$ los canales disponibles para reconocimiento en simultáneo. Se sintetizó, para ello, un filtro formado por la superposición de cuatro hologramas, generados mediante el algoritmo MED-SDF. Se correlacionó el filtro con dos escenas distintas que incluían entre ellas los ocho objetos codificados y en cada una se obtuvieron los picos de autocorrelación esperados según la

tabla de asignación dada por el código binario. En este caso tampoco se obtuvieron picos de correlación cruzados ni falsas alarmas.

Se construyó un correlador híbrido con la capacidad de representar tanto la escena como el filtro en pantallas de TV de cristal líquido. Se eligió para este correlador que la escena de entrada fuese representada en niveles de gris y el filtro en niveles de fase, de modo de tener buena eficiencia luminosa y alto poder de discriminación. Se propuso una nueva técnica para sintetizar filtros múltiples, con información sólo de fase, que pudiesen ser representados en pantallas de cristal líquido con las características mencionadas. Los filtros así generados no reproducen en su respuesta al impulso la imagen conjugada de los objetos almacenados; por consiguiente al implementarlo en un correlador no se origina la señal de convolución y por ende esa zona del plano de salida queda libre para procesar mas información. Mostramos que un filtro con tal respuesta se obtiene al registrar directamente los valores de fase de los objetos a reconocer en lugar de una codificación en amplitud de los mismos. Este nuevo diseño nos permitió aumentar no sólo la capacidad de almacenamiento de los filtros sino la cantidad de identificaciones simultáneas que pueden llevarse a cabo.

Se generaron dos tipos distintos de filtros de fase adaptados a un total de ocho objetos. Uno de estos filtros se compuso directamente de la suma de los filtros clásicos adaptados a un solo objeto cada uno y el otro de la suma de los filtros POF individuales. En ambos casos sólo la fase del filtro resultante fue enviada al modulador.

Las respuestas al impulso obtenidas tanto en forma experimental como numérica reproducen correctamente los ocho objetos registrados sin formarse las imágenes conjugadas. Ambos tipos de filtros dieron respuestas muy similares pero los cálculos del SNR revelaron que el filtro formado por las suma de filtros POF da valores mas altos para este parámetro. Las correlaciones, sin embargo, no reflejan esta diferencia dando muy buenos resultados en ambos casos.

El último filtro propuesto utilizó esta técnica para almacenar 3 objetos por cada canal dando lugar a un filtro total adaptado a 24 objetos diferentes. Este filtro permitió incorporar mas de un objeto por clase o canal y así aumentar la capacidad de detección del sistema. En este caso se generó el filtro mediante el algoritmo MED-SDF a fin de lograr picos de autocorrelación de valores similares y así evitar errores en la detección.

Probamos este filtro en el correlador con distintas escenas y en todos los casos el filtro demostró tener muy buena capacidad de discriminación.

Los puntos remarcables de esta Tesis son:

- La síntesis de filtros compuestos en donde la capacidad de almacenamiento de los mismos es incrementada mediante un multiplexado en color.
- Se generan hologramas digitales mediante una nueva técnica que permite sintetizarlos como verdaderos interferogramas, lo que posibilita la libre elección de la fase de la onda portadora. Este hecho incrementa no solo la capacidad para almacenar información sino el número de canales de procesamiento simultáneo
- Se propone la síntesis e implementación de filtros múltiples sobre moduladores sólo de fase. Esto permite eliminar la señal de convolución, presente en el plano de salida de los correladores ópticos, y libera espacio para ser ocupado por nuevos canales de procesamiento.

En todos los casos el objetivo de aumentar la cantidad de información a ser procesada simultáneamente fue alcanzado.

Referencias

- [Abb73]- E. Abbe. Beitrage zur Theorie des Mikroskops un der Mikroskopischen wahrnehmung. Archiv. Microkopische Anat, 9, 413-468 (1873)
- [Bah88]- Z. Bahri, V. Kumar, "Generalized synthetic discriminant functions," JOSA, 5, 562 (1988)
- [Bah89]- Z. Bahri and B. V. K. Vijaya Kumar, " Algorithms for designing phase-only synthetic discriminant functions," Proc. of SPIE 1151, 138 (1989)
- [Bar89]- T. Barnes, T. Eiju, K. Matsuda and N.Ooyama, "Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television", Appl. Opt. 28, 4845-4852 (1989)
- [Ber91]- M.Bernhardt, F.Wyrowski, O.Bryngdahl, "Iterative techniques to integrate different optical functions in a diffractive phase element," Appl. Opt. 30, 4629-4635 (1991).
- [Bor88]- G. D. Boreman and E. R. Raudenbush, "Modulation depth characteristics of a liquid crystal television spatial light modulator," Appl. Opt. 27, 2940-2943 (1988)
- [Bro66]- B. R. Brown and A. W. Lohmann, "Complex Spatial Filtering with Binary Mask," Appl. Opt. 5, 967 (1966).
- [Cas76]- D. Casasent, D. Psaltis, "Position, rotation, and scale invariant optical correlation," A.O. 15, 1795-1799, (1976)
- [Cas79]- S. Case, "Pattern recognition with wavelength-multiplexed filters," Appl. Opt., 18, 1890 (1979)

- [Cas86]- D. Casasent and W. Rozzi, "Computer generated and phase-only filter synthetic discriminant function filters," *Appl. Opt.* 25, 3767 (1986)
- [Coll97]- P. J. Collongs and J. S. Patel (Eds), "Handbook of Liquid Crystal Research," Oxford University Press (1977)
- [Cou00]- H. Coufal, D. Psaltis and G. Sincerbox (Eds), "Holographic Data Storage," Springer (2000)
- [Coy96]- J. A. Coy, M. Zaldarriaga, D. F. Grosz and O. E. Martinez, "Characterization of liquid crystal television as a programmable spatial light modulator", *Opt. Eng.* 35, 15-19 (1996)
- [Dav98]- J. A. Davis, I. Moreno, P. Tsai, "Polarization eigenstates for twisted-nematic liquid-crystal displays," *Appl. Opt.* 37, 937-945 (1998)
- [Dav99a]- J. A. Davis, D. B. Allison, K. G. D’Nelly, M. L. Wilson and I. Moreno, "Ambiguities in measuring the physical parameters for twisted-nematic liquid crystal spatial light modulator", *Opt. Eng.* 38, 705-709 (1999)
- [Dav99b]- J. A. Davis, P. Tsai, K. G. D’Nelly and I. Moreno, "Simple technique for determining the extraordinary axis direction of a twisted-nematic liquid crystal spatial light modulator", *Opt. Eng.* 38, 929-932 (1999)
- [Dav99c]- J. A. Davis, D. M. Cotrell, J. Campos, M. J. Yzuel, I. Moreno "Encoding amplitude information onto phase-only filters" *Appl. Opt.* 38, 5004-5013 (1999)
- [Dou95]- R. Dou and M. K. Giles, "Closed-loop adaptive optics system with a liquid-crystal television as phase retardation," *Opt. Lett.* 20, 1583-1585 (1995)

- [Eli52]- P. Elias, D. S. Grey, and D. Z. Robinson "Fourier treatment of optical processes," J.O.S.A. 42,127 (1952)
- [Eli53]- P. Elias, " Optics and communication theory," J.O.S.A 43, 229 (1953)
- [Ers89]- O. K. Ersoy and M. Zeng, "Nonlinear matched filtering," J. Opt. Soc. Am. A, 6, 636 (1989)
- [Gab48]- D. Gabor. A new microscope principle. Nature, 161, 777 (1948)
- [Gia84]- P.D. Gianino and J. L. Horner, "Additional properties of the phase only filtering," Opt. Eng., 23, 812 (1984)
- [Goo68]- J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", Ed. 1988
- [Gre92]- D. Gregory, J. Kirsch and E. Tam, "Full complex modulation using liquid-crystal televisions", Appl. Opt 31, 2, 163-165 (1992).
- [Hes80]- C. F. Hester and D. Casasent, "Multivariant technique for multiclass pattern recognition." Appl. Opt. 19, 158 (1980)
- [Hor82]- Joseph L. Horner "Light utilization in optical correlators," Appl. Opt., 21, 4511 (1982)
- [Hor84]- J. L. Horner and P.D. Gianino, "Phase-only matched filtering," Appl. Opt. 23, 812 (1984)
- [Hor85]- 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)

- [Hor87]- J. Horner, "Ed. Optical Signal Processing," Academic Press, San Diego (1987)
- [Hsu82]- Y.Hsu, H. Arsenault, "Optical pattern recognition using circular harmonic expansion," Appl.Opt. 21, 4016 (1982)
- [Iem99]- C. Iemmi, S. Ledesma, J. Campos, M. Villarreal, "Optical classification employing composed gray level CGH filters". Pro SPIE 3749, 209, 1999
- [Iem00]- C. Iemmi, S. Ledesma, J. Campos, M. Villarreal, "Gray-level computer-generated hologram filters for multiple-object correlation", Appl. Opt. 39, 1233 (2000)
- [Jav97]- Javidi, "Securing information with optical technologies," Phys. Today, March, 27 (1997)
- [Jon41]- R.C. Jones, "A new calculus for the treatment of optical systems I. Description and discussion of the calculus," J. Opt. Soc. Am. 31, 488-493 (1941)
- [Jon56]- R.C. Jones, "A new calculus for the treatment of optical systems VIII. Electromagnetic theory," J. Opt. Soc. Am. 46, 126-131 (1956)
- [Ker70]- D. Kermisch, "Image reconstruction from phase information only," J. Opt. Soc. Amer., 60, 15-17 (1970)
- [Koc86]- C. Koch, J.Marroquin, A.Yuile. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 83, 4263 (1986).
- [Kon88]- N. Konforti, E. Marom and S.T. Wu, "Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators", Opt. Lett. 13, 251-253 (1988)

- [Led98]- S. Ledesma, C. Iemmi, J. Campos and M. J. Yzuel, "Joint transform correlator architecture with a single LCTV operating in phase-mostly mode". Opt. Commun. 151, 101-109 (1998)
- [Led99]- S. Ledesma, C. Iemmi, M. Villarreal, J. Campos, "Multichannel correlation by color multiplexing", Opt. Commun. 166, 173, (1999)
- [Lee70]- W. Lee, "Sampled Fourier transform hologram generated by computer," Appl. Opt. 9, 639-643 (1970)
- [Lee74]- W. H. Lee, "Binary synthetic holograms," Appl. Opt. 13, 1677 (1974)
- [Lee79]- W. H. Lee, "Binary computer-generated holograms," Appl. Opt. 18, 3661 (1979)
- [Lei62]- E. Leith, J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction and communication theory," JOSA, 52, 1123 (1962)
- [Les69]- L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan, Jr., "The kinoform: a new wavefront reconstruction device," IBM J. Res. And Dev. 13, 150-155 (1969)
- [Liu89]- H. K. Liu and T. H. Chao, "Liquid crystal television spatial light modulators," Appl. Opt. 28, 4772-4780 (1967)
- [Lu90]- K. Lu and B. E. A. Saleh, "Theory and design of liquid crystal TV as an optical spatial light modulator," Opt. Eng, 29, 240-246 (1990)
- [Mah87]- A. Mahalanobis, B. V. K. Vijaya Kumar, and D. Casasent, "Minimum average correlation energy filters," Appl. Opt. 26, 3633 (1987)

- [Mar53]- A. Maréchal, P. Croce, "A filter of spatial frecuencies for the improvement of the contrast of optical images," *Compt. Rend.*, 237, 607 (1953)
- [Mar00]- A. Márquez, J. Campos, M. J. Yzuel, I. Moreno, J. Davis, C. Iemmi, A. Moreno, A. Robert, "Characterization of edge effects in twisted nematic liquid crystal display," *Opt. Eng.* 39, 3301-3307 (2000)
- [Mar01]- A. Marquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. Davis, J. Campos, M. Yzuel. "Quantitative predictions of the modulation behavior of twisted nematic liquid crystal displays based on a simple physical model," *Opt. Eng.* 40, 2558-2564 (2001)
- [Men95]- D. Mendlovic, I. Ouzieli, I. Kiryuschev, E. Marom, "Two dimensional wavelet transform achieved by computer-generated multireference matched filter and Damman grating," *Appl. Opt.* 34, 8213-8219 (1995).
- [Mon93]- M. Montes Usategui, "Multichannel optical correlators: analysis, evaluation, and development of procedures for pattern recognition," *Dpto de Física Aplicada y Electrónica, Universidad Autónoma de Barcelona, España.* (1993)
- [Mor98]- I. Moreno, J. A. Davis, K. G. D'Nelly, D. B. Allison, "Transmission and phase meauserment for polarization eigenvectors in twisted-nematic liquid crystal spatial light modulators," *Opt. Eng.* 37, 1-5 (1998)
- [Neil63]- E. L. O'Neill, "Spatial filtering in optics," *IRE Trans. Inform. Theory*, IT-2, 56-65 (1956)
- [Nic02]- J. Nicolás, J. Campos, C. Iemmi, I. Moreno, and M. J. Yzuel, "Convergent optical correlator alignment based on frequency filtering," *Appl. Opt.* 41, 1505-1514 (2002)

- [Opp81]- A. V. Oppenheim, "The importance of Phase in Signals," Proceedings of the IEE, 69, 529-541 (1981)
- [Pau93]- G. Pauls-Hus, Y Sheng, "Optical phase-dominant correlator using liquid crystal television," Opt. Eng. 32,9, 2165 (1993)
- [Pez93]- J.L. Pezzanitti and R. A. Chipman, "Phase-only modulation o twisted nematic liquid-crystal TV by use of the eigenpolarization states", Opt. Lett. 18, 1567-1569 (1993)
- [Por06]- A. B. Porter, "On the difracction theory of microsope vision," Phil. Mag. (6), 11, 154 (1906)
- [Pu97]- A. Pu, R. Denkewalter, D. Psaltis, "Real time vehicle navigation using holographic memory," Opt. Eng., 36, 2737 (1997)
- [She92]- Y.Sheng, T.Lu, D.Roberge, H.Caulfield, "Optical N^4 implementation of a two dimensional wavelet transform," Opt. Eng. 31, 1859-1864 (1992).
- [Sou94]- C. Soutar and K. Lu, "Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell", Opt Eng, 33, 2704-2712 (1994)
- [Tes73]- A. G. Tescher, "The role of phase in adaptive image coding," Tech. USCIPI Rep. 510, Image Processing Institute, Univ. Southern California, Los Angeles (Dec. 1973)
- [Upa90]- J.Upatnieks, O.Abshier, C.Christensen, J.Stensby, Appl. Opt. 29, 1589-1590 (1990)
- [Van64]- A. B. Vander Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering," IEE Trans. Inf. Theory, IT-10, 139 (1964)

- [Var98]- A.Vargas, J.Campos, M.Yzuel, C.Iemmi, S.Ledesma, "One-step multichannel pattern recognition based on the pixelated structure of a spatial light modulator," Appl. Opt., 37, 2063-2066 (1998)
- [Vij86]- B. V. K. Vijaya Kumar, "Minimum variance synthetic discriminant function," J. Opt. Soc. Am. A 3, 1579 (1986)
- [Vij90]- B. V. K. Vijaya Kumar and L. Hassebrook, "Performance measures for correlations filters," Appl. Opt., 29, 2997 (1990)
- [Vij92]- B. V. K. Vijaya Kumar, "Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators," Appl. Opt. 31, 4773 (1992)
- [Vil98]- M. Villarreal, S. Ledesma, C. Lemmi, , "Synthesis of composed filters by using color photographic films", SPIE Proceedings III RIAO-OPTILAS ' 98
- [Vil01]- M. Villarreal, C. Iemmi, J. Campos, "Phase filter multiplexing for pattern recognition process," Pro Spie 4419, 616, Tandil, Argentina 3-7 septiembre (2001)
- [Vil03]- M. Villarreal, C. Iemmi, J. Campos, "Parallel classification of multiple objects using a phase-only multichannel optical correlator," aceptado en Opt. Eng. Enero 2003.
- [Wea66]- C. J. Weaver , J. W. Goodman, "A technique for optical convolving two functions," Appl. Opt. 5, 1248-1249 1966)
- [Wid88]- B.Widrow, R.Winter, R.Baxter. IEEE Trans. Acoust. Speech Sig. Process 36, 1109 (1988)

- [Yar84]- A. Yariv and P. Yeh, "Optical Waves in Crystals", cap. 5, 121-154, John Wiley & Sons (1984)
- [Yu88]- F.T.S.Yu, Q.Zhou, C.Zhang, "Multiple channel optical correlator via rotating grating on LCTV," Appl. Opt. 27, 3770-3772, (1988).
- [Yu93]- F. t. S. Yu, "Optical neural networks: architecture, design and models," Progress in Opt. Vol XXXIII, E. Wolf Ed., Elsevier Science Publishers (1993)
- [Zer35]- F. Zernike. Das Phasenkontrastverfahren bei der Mikroskopischen beobachtung. Z. Tech. Phys., 16, 454 (1935)