

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

**LA GRANULARIDAD OPTICA:
APLICACIONES A LA VISIÓN TRIDIMENSIONAL
Y AL PROCESAMIENTO DE IMAGENES**

TESIS

Para optar al título de Doctor en Física

Marcelo Ricardo Trivi

1 9 8 6

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

**LA GRANULARIDAD OPTICA:
APLICACIONES A LA VISION TRIDIMENSIONAL
Y AL PROCESAMIENTO DE IMAGENES**

TESIS

Para optar al título de Doctor en Física

Marcelo Ricardo Trivi

1 9 8 6

a mis "viejos",
a Carmen,
al changuito/a que viene

Deseo agradecer sinceramente a todos aquellos que han colaborado para que pudiera concretar este trabajo. Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, por la ayuda proporcionada a través de sus becas. Al Centro de Investigaciones Ópticas, a su director, Dr. M. Garavaglia, quien dirigió el mismo, y a todos sus miembros por el clima de amistad y compañerismo que permitió desarrollar gratamente mi tarea. A N. Bolognini, por su constante apoyo en mis primeros años de becario; a mis amigos R. Torroba y M. Villagrán por haberme acercado al CIOp y por las horas compartidas desde que comenzamos a estudiar juntos; a R. Arizaga y M. Michalski por la continua ayuda en la labor diaria, y al grupo de Óptica por las largas y esclarecedoras charlas en el Laboratorio de Óptica IV, sin las cuales este trabajo probablemente se hubiera escrito en la mitad del tiempo, pero que me enriquecieron muchísimo. A la Dra. A.B. Mocochoa y a la Prof. N.S. de Magret, mis primeras profesoras, a quienes recuerdo especialmente por el contagioso entusiasmo que siempre transmitieron a sus alumnos. A A.M. Martínez, J. Garavaglia y H. Gardella por su excelente disposición en los trabajos de dactilografía, dibujos y fotografía. A mis 'viejos' y a Carmen por el apoyo de todos los días, y a todos los que no nombré aquí pero que me acompañaron en la realización de este trabajo. He dejado el final para expresar mi mayor agradecimiento a H.J. Rabal y E.E. Sicre, quienes me guiaron, enseñaron y apoyaron permanentemente, y que sin su inestimable ayuda esta Tesis no hubiese sido concluida.

Eliminate that which is bothersome,
And your work shall be the better for it; but,
Find a use for that which offends thee,
And thou shalt be twice rewarded

Benjamin Franklin

Algunos de los aspectos originales de este trabajo fueron la base de las siguientes publicaciones:

- 0.1 "Color storage and gray level pseudocoloring using a speckle carrier". M. Trivi, N. Bolognini, E.E. Sicre, H.J. Rabal and M. Garavaglia. Applied Optics, 23, 341 (1984).
- 0.2 "Color image optical operations by a modulated speckle carrier". N. Rodríguez, R. Torroba, M. Trivi, H.J. Rabal and M. Garavaglia. Optics Communications, 54, 262 (1985).
- 0.3 "Multiple orientated speckle pattern: a study of the contrast". M. Trivi, E.E. Sicre, H.J. Rabal and M. Garavaglia. Applied Optics, 25, 1260 (1986).
- 0.4 "3-dimensional display through speckle stereograms". M. Trivi, H.J. Rabal, N. Bolognini, E.E. Sicre and M. Garavaglia. Applied Optics, 25, 3776 (1986).
- 0.5 "3-dimensional display through a speckle pattern recording: information content and storage requirements". M. Trivi, E.E. Sicre, H.J. Rabal and M. Garavaglia. Enviado para su publicación a Applied Optics.

INDICE

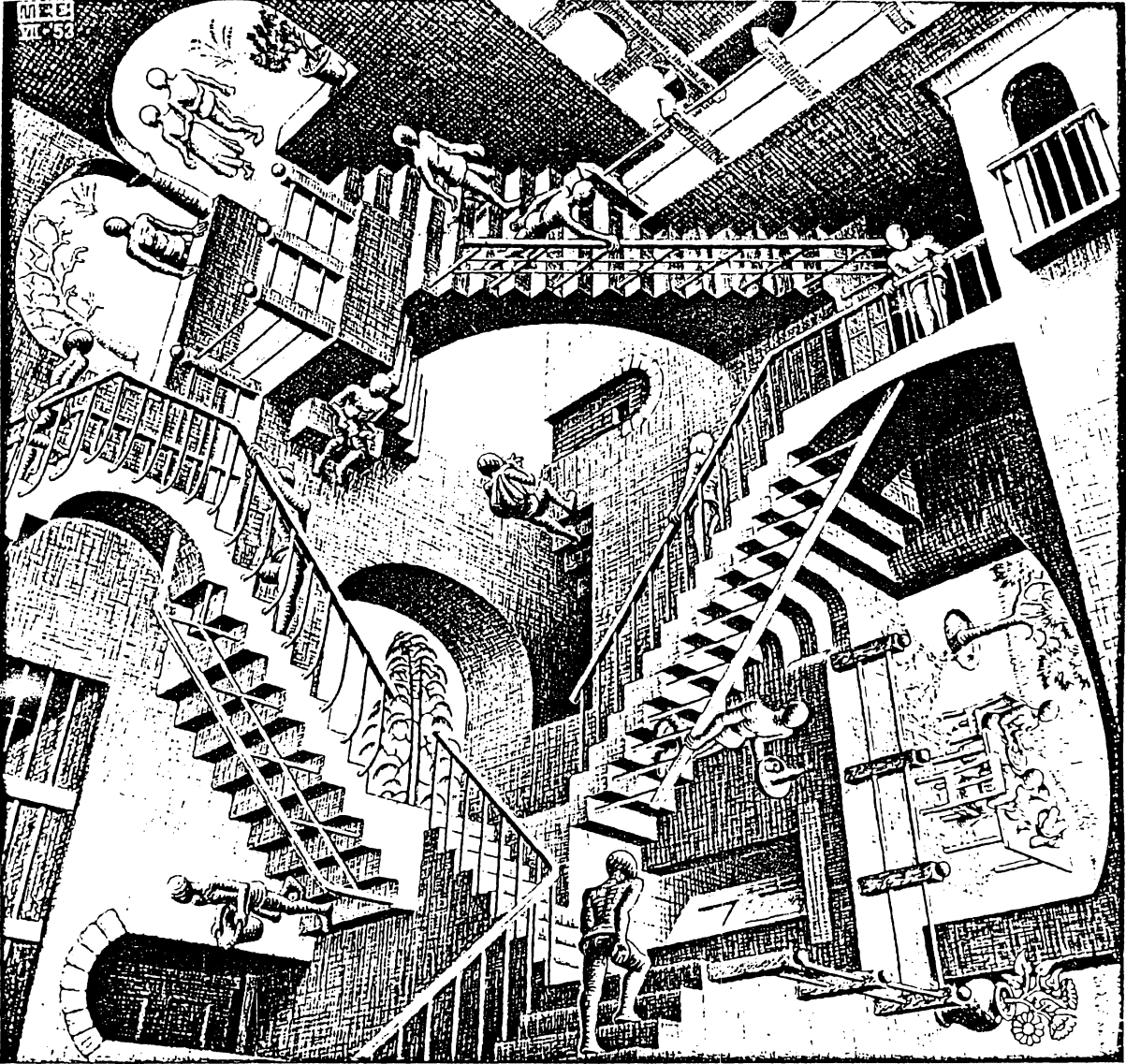
	<u>Página</u>
CAPITULO I: INTRODUCCION.....	1
I.1 Antecedentes generales del fenómeno "speckle".....	1
I.2 Propiedades físicas.....	9
I.3.1 Procesamiento de imágenes utilizando diagramas de speckle.....	14
I.3.2 Procesamiento de datos utilizando diagramas de speckle orientados.....	17
I.4 Objetivos del trabajo de Tesis.....	19
I.5 Referencias.....	24
 CAPITULO II: PROPIEDADES ESTADISTICAS DE LOS DIAGRAMAS DE SPECKLE.....	 27
II.1 Introducción.....	27
II.2 Estadística de primer orden de un diagrama de speckle polarizado.....	30
II.2.1 Estadística de la amplitud compleja.....	32
II.2.2 Estadística de intensidad y fase.....	34
II.3 Estadística de primer orden de una suma de diagramas de speckle.....	38
II.3.1 Suma de diagramas de speckle polarizados en una base de intensidad.....	40
II.3.2 Contraste de una suma de diagramas de speckle polarizados.....	46
II.3.3 Suma de diagramas de speckle parcialmente polarizados.....	47
II.3.4 Contraste de una suma de diagramas de speckle parcialmente polarizados.....	50
II.4 Propiedades estadísticas de segundo orden.....	54
II.4.1 Función de autocorrelación y densidad de potencia espectral: geometría del espacio libre.....	55
II.4.2 Función de autocorrelación y densidad de potencia espectral: imagen geométrica.....	59

II.4.3	Propiedades de difracción de una pupila consistente en dos sectores circulares opuestos.....	61
II.5	Referencias.....	65
CAPITULO III: APLICACIONES A LA VISION TRIDIMENSIONAL....		66
III.1	Introducción.....	66
III.2	Percepción de imágenes tridimensionales.....	68
III.3	Técnicas de display 3-D.....	75
III.4	Clasificación de displays 3-D.....	77
III.4.1	Multiplexing en color o polarización.....	77
III.4.2	Multiplexing en tiempo.....	77
III.4.3	Multiplexing en espacio o dirección.....	78
III.4.4	Reconstrucción del frente de onda: holografía...	80
III.5	Estereogramas utilizando speckle como portadora...	82
III.6	Display 3-D por medio de estereogramas con paralaje horizontal variable.....	87
III.6.1	Introducción.....	87
III.6.2	Dispositivo experimental.....	88
III.6.3	Análisis de los parámetros involucrados en el display 3-D.....	89
III.7	Método de una exposición única para display 3-D...	94
III.8	Método de una exposición para display 3-D con variación de perspectiva.....	96
III.9	Estereogramas sintéticos.....	100
III.10	Comparación del contenido de información y los requerimientos de almacenamiento entre un holo- grama y un estereograma speckle de múltiples exposiciones.....	102
III.11	Referencias.....	108

	<u>Página</u>
CAPITULO IV: APLICACIONES AL PROCESAMIENTO DE IMAGENES...	110
IV.1 Introducción.....	110
IV.2 Almacenamiento de color y pseudocoloreado de niveles de gris.....	113
IV.2.1 Introducción.....	113
IV.2.2 Dispositivo experimental.....	113
IV.2.3 Pseudocoloreado de niveles de gris.....	115
IV.2.4 Almacenamiento de color en película sensible solo a tonos de gris.....	117
IV.3 Speckle modulado por franjas de Young.....	119
IV.3.1 Introducción.....	119
IV.3.2 Franjas de Young producidas por una pupila rectangular.....	120
IV.4 Sustracción y diferenciación de imágenes.....	129
IV.4.1 Antecedentes.....	129
IV.4.2 Principio del método.....	130
IV.4.3 Dispositivo utilizado para realizar el atraso de fase en π	133
IV.4.4 Derivada óptica direccional.....	135
IV.5 Referencias.....	137
CAPITULO V: CONCLUSIONES GENERALES.....	139
APENDICE: Cálculo de funciones de autocorrelación.....	149

CAPITULO I

INTRODUCCION



I.1. ANTECEDENTES GENERALES DEL FENOMENO "SPECKLE"

El fenómeno de speckle suele estar asociado con el aspecto granular que presentan los objetos al ser iluminados por un láser. No obstante, la historia del speckle comienza mucho antes que la del láser, ya que se lo conoce desde hace más de dos siglos. Nombres como los de Newton y Lord Rayleigh (I.1) aparecen relacionados con él. Sin embargo, es con el desarrollo de una fuente luminosa coherente, el láser, que ha comenzado a estudiarse en forma rigurosa, se ha profundizado su análisis y se han encontrado numerosas y diversas aplicaciones en distintos campos de la Metrología Óptica, el Procesamiento de Imágenes y la Astronomía.

La granularidad óptica o "speckle" es un fenómeno que aparece cuando una superficie ópticamente rugosa, para longitudes de onda del orden de $\lambda = 10^{-7}$ m, se ilumina con un haz de luz altamente coherente. La onda luminosa resultante en un punto situado a una cierta distancia de la superficie consiste en la superposición de varios paquetes de onda coherentes surgidos cada uno de ellos de diferentes elementos del medio difusor. Estas ondas originadas en la superficie tienen una fase y una amplitud aleatoria en el punto de observación y la diferencia de camino óptico entre ellas difiere en varias longitudes de onda. La interferencia entre estas ondas esféricas difundidas, desfasadas, pero coherentes, da como resultado un diagrama granular que es conocido en Óptica con la denominación de speckle. Un registro de speckle se muestra en la Figura I.1.

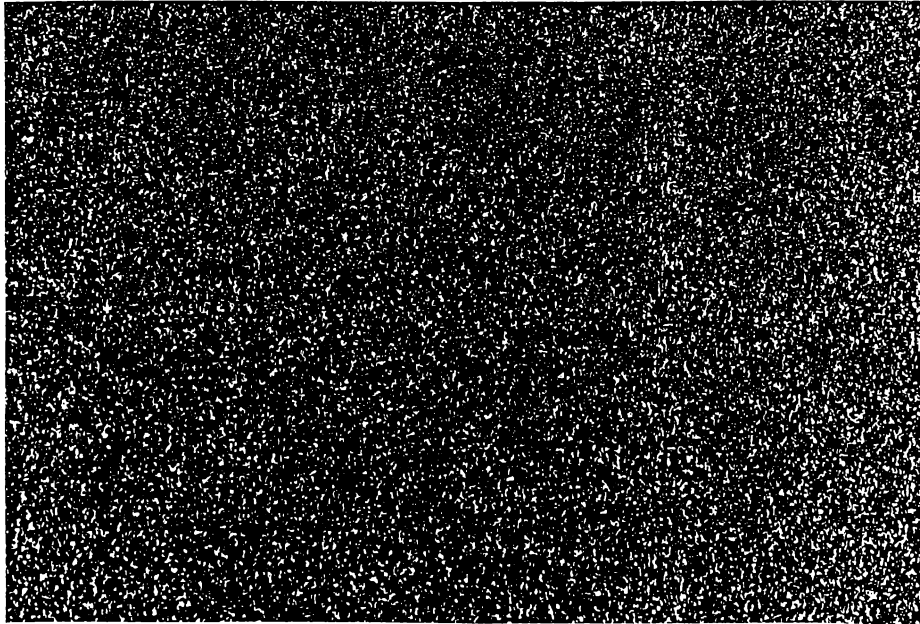


Figura I.1

En general, la naturaleza aleatoria de los diagramas de speckle hace que este fenómeno sea estudiado convenientemente utilizando un punto de vista estadístico.

Las propiedades estadísticas dependen de la coherencia del haz incidente y de las características de la superficie difusora. En el caso de luz perfectamente coherente, la dependencia con la superficie es despreciable si el medio introduce diferencias de camino óptico mayores que una longitud de onda.

Aquí se trabajará con luz coherente visible, pero fenómenos muy relacionados están presentes en otras regiones del espectro electromagnético y en partículas; ejemplos típicos son el scattering de rayos X por líquidos y el scattering de electrones por partículas de carbón amorfo.

En los primeros años del láser y debido al aspecto granular que presentan los objetos cuando son iluminados de esta forma, el speckle se constituyó en un severo inconveniente para la holografía (I.2-3), ya que degrada la calidad de la imagen.

Es por ello que varios investigadores desarrollaron métodos (I.4) para reducir el ruido de speckle en imágenes holográficas.

Paralelamente, a medida que se lograban avances para disminuir la presencia del speckle como factor de ruido en los sistemas ópticos, surgían las técnicas de fotografía e interferometría speckle como herramientas extremadamente útiles en otros campos de la Óptica.

Los métodos de reducción de datos en un specklegrama, o alternativamente mediciones fotoeléctricas directas de las características de speckle han sido desarrollados y aplicados

con éxito en la medición de desplazamientos, tensiones, vibraciones, deformaciones y rugosidades de superficies. También las técnicas de speckle han sido utilizadas satisfactoriamente para detección de mensajes, diferencias entre dos imágenes, almacenamiento de datos, etc.

El párrafo de Benjamin Franklin que encabeza el presente trabajo está referido a las características paradójicas de los diagramas de speckle, que por una parte generan ruido que perturba la información y por otro, ellos mismos contienen cierto tipo de información susceptible de ser explotada.

La granularidad óptica ha sido investigada por numerosos científicos desde las primeras observaciones realizadas por Newton (I.5) a fines del siglo XVII referidas al titilar de las estrellas, pero no de los planetas. El fenómeno se explica en función de la diferencia de coherencia espacial entre las dos fuentes.

En 1755 el Duque de Chaulnes (I.6) descubre accidentalmente cómo incrementar considerablemente la intensidad de los efectos de interferencia. Young (I.7) y Herschel (I.8) estudiaron la interferencia de la luz difusa a comienzos del siglo XIX.

En la segunda mitad del siglo XIX se demuestra que los fenómenos de interferencia en luz difundida, tales como anillos de Newton, y en anillos de difracción de Fraunhofer, son producidos cuando un haz de luz coherente es difractada por una placa de vidrio cubierta de partículas pequeñas. En 1877, Exner (I.9) observó un diagrama de speckle radial dentro del anillo central brillante de Fraunhofer. Posteriormente, en

1914, von Laue (I.10) publicó una fotografía del anillo central de Fraunhofer obtenido con una placa cubierta de polvo de licopodio que muestra claramente la estructura granular radial notada por Exner. Este atribuyó la naturaleza radial del diagrama de speckle al hecho de que la fuente de luz utilizada no era totalmente monocromática. Esta conclusión fue confirmada luego por de Haas (I.11).

Von Laue (I.12-13) ha dado una descripción completa de las propiedades estadísticas de los diagramas de speckle encontrados dentro del anillo central de Fraunhofer e inclusive obtuvo la función de densidad de probabilidad de segundo orden y la función de autocorrelación. Algunos de estos trabajos han sido revisados por Schiffner (I.14) y Hariharan (I.15). Los fenómenos estadísticos derivados por von Laue son enteramente análogos en el caso del speckle láser y en propagación de ondas de radio.

A principios de 1960, con el advenimiento del láser, los ópticos dispusieron por primera vez de una fuente luminosa coherente y de gran intensidad.

El fenómeno de granularidad óptica se hizo notorio al iluminar un objeto difusor con luz proveniente de un láser y fueron Ridgen y Gordon (I.16), en 1962, los primeros en relacionarlo con la coherencia de la fuente luminosa.

Después de los trabajos pioneros de Leith y Upatnieks (I.3) en holografía, los efectos del speckle comenzaron a utilizarse en el desarrollo de distintas técnicas y se han investigado los aspectos básicos del fenómeno y sus aplicaciones.

En los aportes básicos al estudio del speckle deben destacarse los trabajos de Goodman, Parry, Dainty y otros físicos (I.17) en el análisis de sus propiedades estadísticas para el caso coherente y parcialmente coherente.

Para luz coherente, si se considera que el medio no despolariza la luz, que introduce diferencias de fase mayores que 2π y que un gran número de centros difusores contribuyen a la intensidad en un punto de observación, es posible demostrar que la intensidad en un punto del diagrama de speckle obedece a una función de densidad de probabilidad exponencial negativa. Se utiliza aquí el teorema central del límite en una estadística Gaussiana. También se demuestra que el contraste es igual a uno y que la intensidad más probable es cero.

La estructura de los diagramas de speckle se puede definir en términos de la función de autocorrelación de la pupila que limita al sistema óptico involucrado. Dicho en otras palabras, el tamaño mínimo de un grano de speckle coherente es aproximadamente igual al disco de Airy que se produciría en ausencia del medio difusor, si se emplea una pupila circular.

En el caso que la luz utilizada sea policromática, los diagramas de speckle formados en el plano de Fraunhofer tienen una estructura radial que depende de la naturaleza del difusor y del ancho de banda de la luz. Las propiedades estadísticas dependen de la posición en el plano de observación y la función de autocorrelación debe calcularse en términos de los ángulos de difusión radiales y azimutales. La coherencia espacial parcial afecta básicamente a los diagramas de speckle, bajando

el contraste y causando un incremento en el tamaño de los granos.

Por otra parte, se han implementado varios métodos (I.4) para reducir el ruido de speckle en imágenes. Todos ellos implican introducir un cierto grado de reducción en la coherencia de la luz empleada.

Paralelamente, se ha generalizado el uso de diagramas de speckle en una amplia gama de aplicaciones. Debe mencionarse la experiencia fundamental de Burch y Tokarski (I.18) en base a un trabajo previo de Burch (I.19), como la que inicia un nuevo capítulo en la Metrología Óptica al utilizar franjas de interferencia producidas por dos difusores idénticos.

El uso metrológico de los diagramas de speckle tiene gran importancia en ingeniería para el estudio de desplazamientos de objetos, tensiones, vibraciones, rugosidad de superficies, etc. Los métodos (I.20) aplicados son conocidos como "interferometría speckle" y "fotografía speckle" y son utilizados como técnicas de ensayos no destructivos para probar componentes mecánicos. La ventaja de los métodos de speckle es que el tamaño del grano puede ser ajustado de acuerdo a la resolución de los detectores preservando la información sobre el desplazamiento a escala interferométrica. Algunas de estas técnicas pueden ser extendidas de modo que proporcionen información a tiempo real utilizando cámaras de video combinadas con un procesamiento analógico-digital de las imágenes obtenidas. A estos métodos se los denomina genéricamente ESPI (interferometría electrónica de diagramas de speckle).

En Astronomía existen otras aplicaciones interesantes. Si se toma una fotografía de corta exposición de una estrella doble cuya imagen no es resoluble, se tiene una estructura similar al speckle registrado en un laboratorio utilizando un láser, debido a la presencia de la turbulencia atmosférica que actúa como un difusor. En particular, el tamaño del grano de speckle es del mismo orden que el disco de Airy de la pupila del telescopio. Esto significa que la fotografía contiene información acerca del objeto por debajo del límite de difracción del telescopio, aproximadamente 0,02 segundos de arco para el telescopio del Monte Palomar de 5 metros de diámetro, mientras que para una fotografía convencional de larga exposición, el límite de difracción es 1 segundo de arco. La técnica (I.21) tiene similitud con los métodos de speckle usados en Metrología y se la conoce como "interferometría estelar speckle".

Los diagramas de speckle son utilizados en gran variedad de ensayos (I.22-24) de detectores ópticos tales como cámaras, emulsiones fotográficas y el ojo humano.

Finalmente, se debe remarcar la importancia de la aplicación del speckle al procesamiento de imágenes, área donde se ubica el aporte del presente trabajo de Tesis. Básicamente, se utilizan los diagramas de speckle modulados espacialmente como frecuencias portadoras aleatorias de la información óptica, donde la modulación está dada por la pupila del sistema óptico empleado para registrarlos. En la Sección I.3 se analiza con detalle este tipo de aplicaciones.

En Argentina, varios investigadores han trabajado en los

distintos aspectos del fenómeno speckle, destacándose los grupos dirigidos por los Doctores Gaggioli en el INTI, Simon en la Universidad de Buenos Aires, Kaufmann, en la Universidad de Rosario, Toni en CITEFA y Garavaglia en el CIOP.

La recopilación realizada hasta aquí es necesariamente incompleta, debido a la amplitud y variedad del tema que ha merecido la edición de varios libros (I.25-27), siendo reconocido como tópico independiente en todas las revistas especializadas en Optica.

1.2. PROPIEDADES FISICAS

Si se ilumina con un láser un objeto cualquiera, cuya superficie sea ópticamente rugosa, éste parecerá estar cubierto por una estructura granular muy fina. El fenómeno sucede para los objetos difusores tales como vidrios despulidos, superficies metálicas, hojas de papel, etc. Los puntos de la superficie iluminados por el láser son coherentes y envían ondas luminosas capaces de interferir en la retina de un observador.

Cada punto luminoso tiene por imagen en la retina la figura de difracción a campo lejano de la pupila del sistema óptico del ojo (I.25). Si el objeto es difusor, la imagen coherente es la superposición de las figuras de difracción de cada punto del mismo, lo cual produce diagramas de interferencia. Por lo tanto, en caso de tener una distribución aleatoria de fase en el objeto, la estructura particular de los diagramas de interferencia dan una imagen con el aspecto granular característico llamado "speckle".

El fenómeno es el mismo si se reemplaza al ojo por un sistema óptico formador de imágenes, por ejemplo, una cámara fotográfica. La película fotográfica muestra un diagrama de granos de speckle cuyo tamaño y forma dependen de la apertura del objetivo y de la geometría del sistema óptico. Si la apertura es grande, la estructura del speckle es más fina, ya que el diámetro de la figura de difracción decrece. A este diagrama granular, generado en el plano conjugado de la fuente luminosa, se lo denomina "speckle de Fraunhofer", por analogía con el

tratamiento clásico de la teoría de difracción.

En realidad, no es necesario formar una imagen para obtener un diagrama de speckle, ya que un difusor genera en su superficie ondas secundarias que interfieren entre sí, produciendo speckle en cualquier punto del espacio situado en el camino de dichas ondas. Por ello, una placa fotográfica situada a una distancia finita del objeto puede registrar la superposición coherente de las ondas secundarias. El diagrama de speckle que se genera a una distancia finita del objeto se conoce como "speckle de Fresnel".

En general, en este trabajo se utilizarán diagramas de speckle registrados en la imagen de un objeto difusor. Por ello se analiza aquí el caso de speckle de Fraunhofer.

Dado el sistema formador de imágenes con iluminación coherente de la Figura I.2 se considera que $t_i(x_i, y_i)$ es la imagen del objeto $t_1(x_1, y_1)$ cuando la distribución de amplitud de las ondas es, salvo factores geométricos, la misma que en el objeto.

Una transparencia $t_1(x_1, y_1)$ iluminada por una onda plana, se ubica a una distancia $z = d_0$ de la lente L de distancia focal f . La distribución de campo resultante, a cierta distancia $z = d_i$ detrás de la lente, se puede expresar como:

$$t_i(x_i, y_i) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x_1, y_1, x_i, y_i) t_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (1.1)$$

en virtud de la linealidad del fenómeno; $g(x_1, y_1, x_i, y_i)$ es la respuesta impulsiva del sistema.

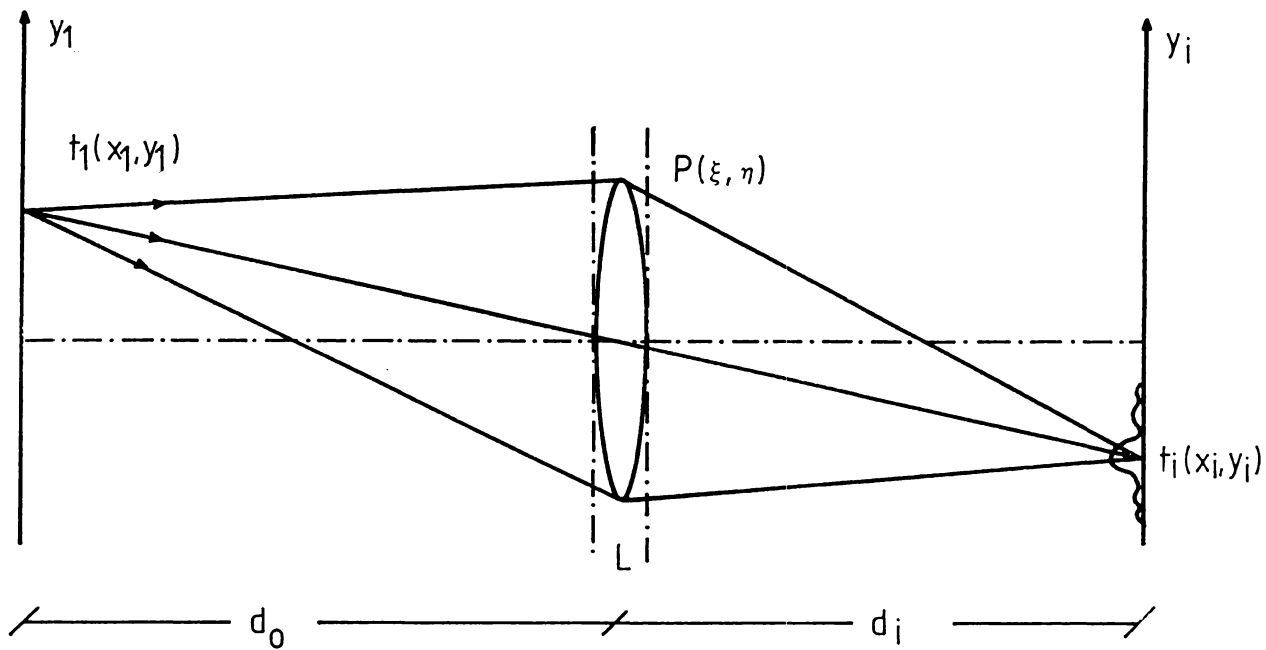


Figura I.2

Se puede demostrar (I.28) que, si se cumple la ley de las lentes $\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} - \frac{1}{f} = 0$, la respuesta impulsiva del sistema en el plano conjugado del objeto es:

$$g(x_1, y_1, x_i, y_i) = \frac{1}{\lambda^2 d_o d_i} \iint_{-\infty}^{\infty} P(\xi, \eta) \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda d_i} [(x_i + mx_1)\xi + (y_i + my_1)\eta]\right] d\xi d\eta \quad (1.2)$$

Donde se han despreciado términos de fase que no influyen en un registro de intensidad, m es la magnificación del sistema, dada por $m = -\frac{d_i}{d_o}$ y $P(\xi, \eta)$ es la pupila de salida del sistema óptico definida por:

$$P(\xi, \eta) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\xi| \leq \frac{D}{2}, \quad |\eta| \leq \frac{D}{2} \\ 0 & \text{si } |\xi| > \frac{D}{2}, \quad |\eta| > \frac{D}{2} \end{cases} \quad (1.3)$$

Siendo D el diámetro de la lente.

De la expresión (1.2) se observa que la respuesta impulsiva en el plano conjugado del objeto (aquél en el cual es válida la ley de las lentes) es la distribución de campo de la figura de difracción de Fraunhofer de la pupila de la lente. Esta distribución de amplitudes se encuentra centrada en el punto imagen de coordenadas:

$$x_i = -mx_1, \quad y_i = -my_1 \quad (1.4)$$

Se deduce que cada punto de un objeto tiene por imagen la figura de difracción a campo lejano de la pupila de la lente.

Si el objeto es un difusor aleatorio, la imagen coherente será la superposición de las figuras de difracción de cada

punto y dará un diagrama de interferencia granular.

Es posible hacer consideraciones sobre la estructura del diagrama de speckle. De la ecuación (1.2), el tamaño típico de cada grano está determinado por la pupila del sistema, siendo su dimensión característica inversamente proporcional al tamaño de la misma (I.29). Si la pupila es circular de diámetro D , los granos de speckle tendrán una figura del orden del disco de Airy, es decir, el radio aproximado vale:

$$r = 0,61 \lambda / \alpha, \text{ siendo } \alpha = \frac{D}{2d_i} \text{ la apertura numérica del sistema} \quad (1.5)$$

Para un objetivo de apertura numérica $\alpha = \frac{1}{4}$, $\lambda = 600 \text{ nm}$, la figura de difracción tiene un diámetro de 3 micrones.

En general, si se realiza un desplazamiento en la dirección normal al plano del difusor, la estructura granular se altera de modo que no es posible correlacionarla con la distribución que existía antes del movimiento.

La repartición tridimensional de energía en el punto imagen presenta un volumen muy localizado, dentro del cual el enfoque es correcto (I.30). Entonces la traslación Δz compatible con diagramas de speckle correlacionados está acotada por la dimensión lineal de tal volumen, esto es:

$$\Delta z \lesssim 4\lambda / \alpha^2 \quad (1.6)$$

En estas condiciones, el desplazamiento realizado producirá una homotecia, sin cambio apreciable de la estructura granular.

Si una onda plana ilumina el objeto difusor, una traslación arbitraria de éste en su propio plano no cambia las fases relativas de los distintos puntos y el diagrama de speckle en el plano imagen se traslada como un todo sin modificar su estructura.

De las expresiones (1.5) y (1.6) se infiere que en el caso de pupila circular el grano de speckle tiene una estructura volumétrica con una forma aproximada a la de un "cigarro" cuya dimensión longitudinal es $4\lambda/\alpha^2$ y su dimensión transversal está dada por la figura de difracción y vale $0,61\lambda/\alpha$. Por lo tanto, el diagrama de speckle tiene una mayor tolerancia en cuanto a correlación en el eje z que en el eje x.

El tamaño del grano, o su forma, pueden regularse ajustando los parámetros del sistema óptico, en particular eligiendo convenientemente la pupila de la lente. De esta manera, el speckle no debe ser visto meramente como un elemento de ruido, sino que con diferentes pupilas se puede manejar el espectro de frecuencias del registro de speckle, por lo tanto, se lo utiliza como portador de información y es empleado como herramienta poderosa y útil en diferentes aplicaciones. En capítulos siguientes se expondrá la justificación teórica de estos conceptos y se mostrarán varias aplicaciones.

I.3.1 PROCESAMIENTO DE IMAGENES UTILIZANDO DIAGRAMAS DE SPECKLE

La estructura aleatoria de los diagramas de speckle es debida a la interferencia coherente de las figuras de difracción generadas en el plano imagen por cada punto del objeto difusor, por lo tanto, sus propiedades fundamentales dependen de la pupila del sistema óptico de registro.

En particular, el tamaño de los granos de speckle individuales está dado por la figura de difracción de Fraunhofer de la lente. También el espectro de Fourier de un registro de speckle depende de la lente, ya que está modulado por la función de transferencia de ésta (I.31). Consecuentemente, el espectro está extendido sobre ciertas frecuencias espaciales. Este aspecto del fenómeno se describe detalladamente en el Capítulo II, sección II.4.2.

En los métodos de Procesamiento de Imágenes, la característica principal común a todos ellos es la modulación de la señal a ser procesada por un difusor aleatorio, el cual produce un diagrama de speckle que actúa como frecuencia portadora de la información.

El principio en que se basan es el siguiente: el difusor contiene frecuencias espaciales altas las cuales dan, en el plano focal de una lente, un campo extendido lejos del orden cero de difracción; en cambio, la señal a ser procesada tiene normalmente frecuencias espaciales bajas y su espectro está muy cercano al orden cero. La modulación del difusor permite llevar lejos del centro (orden cero de difracción) la informa-

ción referida a la señal facilitando de este modo las operaciones de filtrado espacial (I.32).

Varias de las técnicas de procesamiento de imágenes utilizan la modulación de speckle por franjas de Young.

Si se ilumina una superficie difusora con un haz de luz coherente y su imagen se obtiene con una lente cuya pupila es una doble apertura (I.33) cada una formará un diagrama de speckle donde el tamaño de cada grano será inversamente proporcional al tamaño de la apertura.

La acción conjunta de ambas rendijas producirá franjas de interferencia dentro de cada grano de speckle, donde se superponen las dos figuras de difracción.

Si se obtiene un registro de una señal modulada de esta manera con franjas de Young y luego se la ubica en un procesador óptico (I.32), las franjas actúan como frecuencia portadora. En el plano de Fourier aparecen dos órdenes difractados simétricamente respecto del orden cero; con un filtro espacial adecuado puede seleccionarse uno de ellos para el procesamiento de la señal.

Una aplicación importante de los diagramas de speckle modulados por franjas de Young es el almacenamiento de distintas imágenes en un mismo negativo fotográfico y la posterior decodificación por separado. Esta técnica se conoce como "multiplexing". El mismo efecto puede lograrse modulando los diagramas de speckle con distintas orientaciones de la pupila de la lente.

Este método ha sido utilizado, entre otras aplicaciones,

para almacenar imágenes de objetos o transparencias color en registro sensible sólo a grises (I.34-36). Las distintas componentes monocromáticas de un objeto son seleccionadas con filtros adecuados y codificadas secuencialmente con distintas orientaciones de los granos de speckle o con franjas de Young.

También es posible obtener modulación de speckle con franjas de Young si se registran en un mismo medio dos diagramas de speckle idénticos trasladados lateralmente. El registro da un sistema de franjas de interferencia en el plano de Fourier de una lente. La técnica ha sido empleada para detectar diferencias entre dos imágenes (I.37) y puede ser extendida a decodificación de mensajes (I.38).

Para la detección de traslaciones laterales o axiales (I.39-40) de un objeto difusor, éste se modula por un diagrama de speckle y es registrado dos veces en una placa fotográfica, la cual es desplazada lateralmente entre ambas exposiciones. Después de revelada, el contraste de las franjas de Young en el plano de Fourier de la placa caracteriza la correlación de los dos diagramas de speckle. Si éste no es el máximo, el objeto sufrió una traslación entre las exposiciones.

A los efectos de este trabajo, es de especial interés el tratamiento de las técnicas de speckle aplicadas al almacenamiento de múltiples imágenes en un único medio de registro. Se verá en la Sección siguiente un análisis del tema.

1.3.2. ALMACENAMIENTO DE DATOS UTILIZANDO DIAGRAMAS DE SPECKLE ORIENTADOS

La utilización de diagramas de speckle como frecuencia portadora es una técnica muy desarrollada para el almacenamiento de datos en una placa fotográfica. En general, se emplea la técnica de múltiples exposiciones (multiplexing).

Sea A una transparencia cuya imagen se obtiene sobre la placa fotográfica H a través de la lente L , como se muestra en la Figura I.3. La fuente luminosa es un vidrio despulido (difusor) G iluminado por un láser. La distribución de intensidad en el plano imagen H estará dada por A y D , siendo D el diagrama de speckle en la transparencia A debido a la presencia del difusor G .

En el método propuesto por Kopf (I.41), la pupila de apertura de la lente L es una ranura P y por lo tanto, la imagen de A sobre H está modulada por un diagrama de speckle orientado en la dirección perpendicular a la ranura, de acuerdo a la teoría de difracción. Después de revelada H , el espectro de la placa muestra luz difractada solamente para ángulos en dirección perpendicular a los speckles orientados. Los efectos de difracción hacen posible superponer sobre la placa H varias imágenes de distintas transparencias, cada una de ellas registradas secuencialmente con diferentes posiciones azimutales de la ranura de apertura y luego de revelar H , separarlas mediante técnicas de filtrado espacial (I.32).

Hay distintos tipos de aperturas útiles para modular dia-

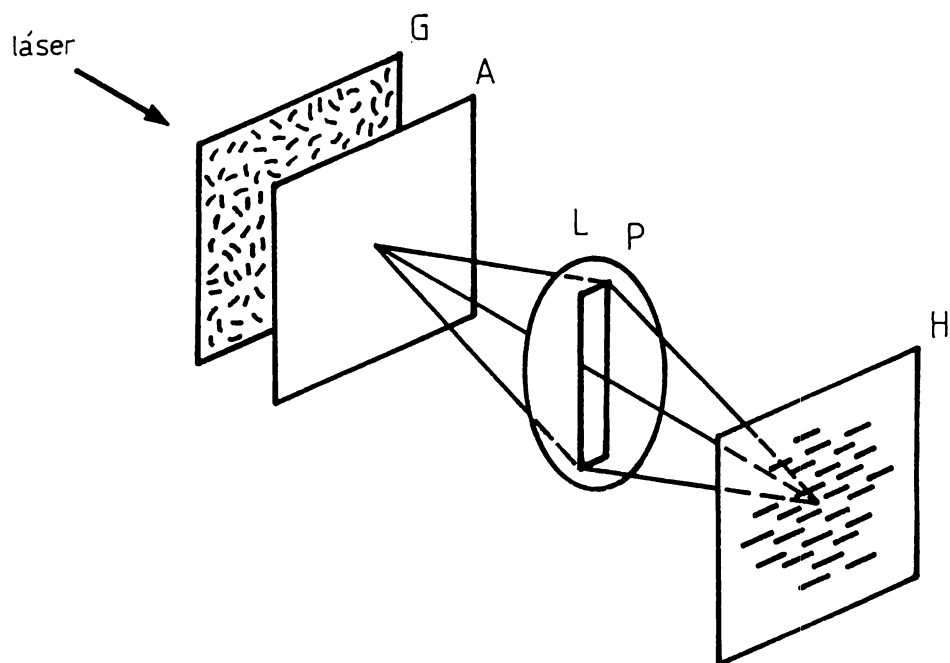


Figura I.3

gramas de speckle. Una pupila muy simple consiste en dos agujeros circulares ubicados junto a la lente. El sistema óptico de registro se muestra en la Figura I.4.

En este caso, el diagrama de speckle en H está modulado por franjas de Young con un espaciado entre ellas dado por: $e = \lambda d/l$, siendo d la distancia entre la lente L y el plano imagen H , y l es el espaciado entre los dos diafragmas de la pupila.

Es posible superponer varias fotografías en el mismo medio si se rota la doble apertura después de cada registro. La Figura I.5 muestra el espectro en el caso de superposición de cuatro fotografías. Se debe notar que debido al rango dinámico de la emulsión fotográfica, el número de imágenes que pueden ser superpuestas es de alrededor de veinte.

En los capítulos siguientes, se analizará en particular una pupila de apertura que consiste en dos sectores circulares opuestos por su vértice común. Esta proporciona selectividad angular y cierto grado de uniformidad a la figura de difracción del diagrama de speckle. Se aplicará en distintas técnicas de multiplexing para procesamiento de imágenes, principalmente orientadas a la visión tridimensional.

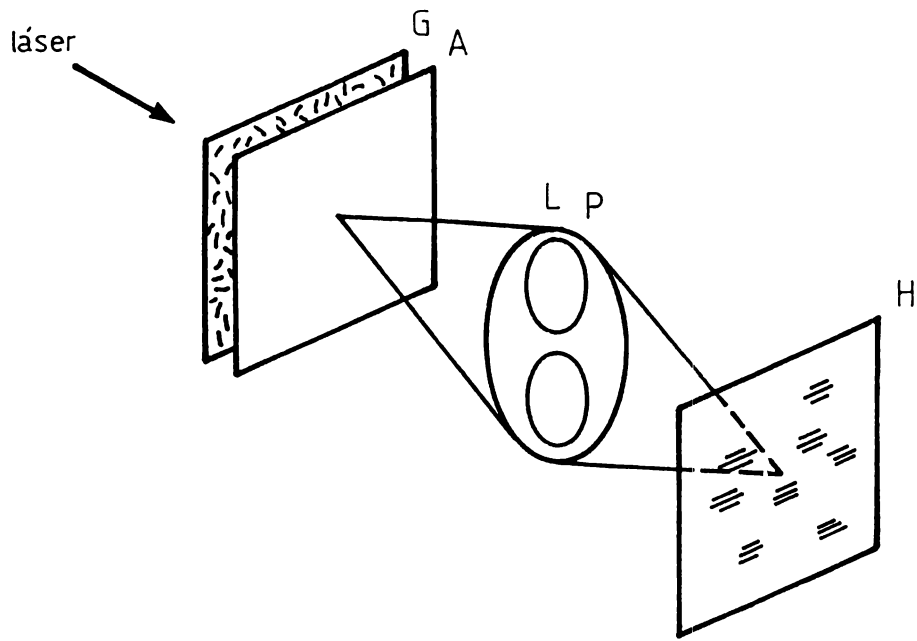


Figura I.4

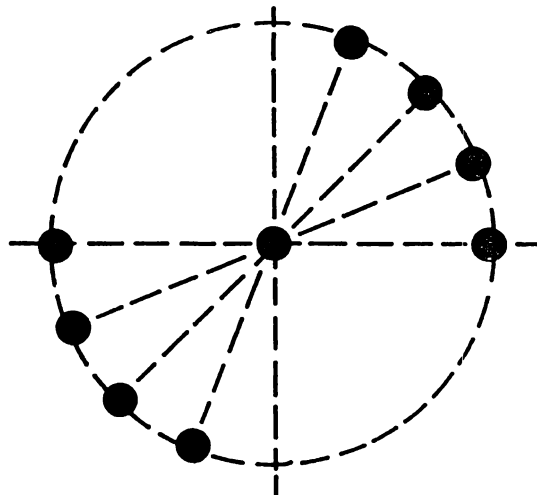


Figura I.5

I.4 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TESIS

El trabajo de Tesis se enmarca dentro de las aplicaciones de los diagramas de speckle al procesamiento de imágenes. El mismo está orientado a la obtención de un "display" (exhibición) de información a través de un registro de múltiples diagramas de speckles modulados.

La modulación está dada por la pupila del sistema óptico utilizado para registrar los diagramas, la cual codifica cada uno de ellos de manera tal que se comporten como frecuencias portadoras de la información óptica. En la mayoría de las técnicas que se propondrán se empleará una pupila que consiste en dos sectores circulares opuestos por su vértice común.

En el proceso de codificación de la información, se obtiene un diagrama de speckle en un medio de registro utilizando un sistema óptico cuya pupila es la descrita. Luego de revelada la placa, la figura de difracción del diagrama almacenado tiene ciertas propiedades de selectividad angular y uniformidad que hacen que la información contenida en él solo sea observada en un ángulo sólido restringido.

Si se registran en un único medio varios diagramas de speckle con una orientación diferente de la pupila para cada caso, luego es posible decodificar la información por separado. Dicha información puede ser, por ejemplo, las distintas perspectivas de una escena tridimensional, diferentes componentes cromáticos de una transparencia, etc.

Uno de los trabajos que se presentará utiliza dos ranuras

como pupila del sistema óptico, la cual modula con franjas de Young al diagrama de speckle. Este tipo de codificación se emplea en una técnica para obtener la derivada óptica de una transparencia.

A continuación se expone el contenido de los capítulos que constituyen el trabajo:

En el Capítulo II se analizan las propiedades estadísticas del speckle. Debido a que los diagramas presentan un aspecto totalmente irregular, desordenado, es por ello que las características del fenómeno son estudiadas convenientemente desde el punto de vista estadístico, lo que permite ajustar los parámetros importantes para lograr un display de información. Ellos son la eficiencia de difracción y la selectividad espacial del registro de speckle.

Se analiza la estadística de primer orden correspondiente a un registro con uno y varios diagramas de speckle polarizados y monocromáticos, generalizándose luego al caso de speckles parcialmente polarizados. Se hallan las funciones de densidad de probabilidad para la amplitud compleja, fase e intensidad y se obtiene una expresión para el contraste de speckle, magnitud que determina la eficiencia de difracción del registro.

Posteriormente se discute la estadística de segundo orden. Se estudia la función de autocorrelación que proporciona una medida del tamaño del grano de speckle y la función de densidad de potencia espectral que explicita la forma de la figura de difracción del registro a partir de la elección de la pupila del sistema óptico.

Finalmente, se propone una pupila formada por dos sectores

circulares opuestos y se calculan estas expresiones para investigar las propiedades de difracción del registro de speckle. Se concluye que el mismo resulta apto para obtener un display de información.

El Capítulo III está dedicado a las aplicaciones estereoscópicas de los diagramas de speckles modulados.

Primeramente se exponen los aspectos básicos de la fisiología de la visión estereoscópica y se presentan en forma comparativa las distintas técnicas ya conocidas en la literatura para la obtención de un display tridimensional.

Luego, se considera un método para el almacenamiento de dos puntos de vista de un objeto tridimensional mediante doble exposición en una única placa fotográfica, obteniendo en la reconstrucción visión estereoscópica. La técnica puede generalizarse con el registro secuencial de varias imágenes con el fin de lograr una visión tridimensional más "vívida". Este perfecciona al anterior, ya que además de la percepción de profundidad se pueden observar distintas perspectivas de la escena 3-D al moverse el observador.

Se expone más adelante una técnica para lograr estereogramas en un solo paso mediante un registro simultáneo de diagramas de speckle. Se discuten dos soluciones alternativas al problema.

También se presenta un método para obtener estereogramas de objetos muy sencillos, utilizando diagramas de speckle generados por computadora.

Finalmente, se realiza un estudio comparativo entre las

técnicas holográficas y los estereogramas utilizando modulación de speckle, desde el punto de vista del contenido de información y los requerimientos de almacenamiento y transmisión de ambos displays.

En el Capítulo IV se consideran técnicas que utilizan diagramas de speckle modulados para otro tipo de procesamiento de imágenes.

Se presenta un método para el pseudocoloreado de niveles de gris y otro para el almacenamiento de color en película blanco y negro. Ambos casos están basados en las propiedades de selectividad angular y cierto grado de uniformidad de la figura de difracción formada por dos sectores circulares opuestos.

En primer lugar se utiliza luz coherente para obtener un diagrama de speckle orientado patrón, que luego actuará como master en las etapas subsiguientes. Luego el proceso de codificación y reconstrucción se realiza mediante copias por contacto, donde la posición angular del master da las orientaciones de los diagramas de speckle en la placa que será procesada.

Por último, se expone una técnica para obtener la derivada óptica de una transparencia. En este caso, se utiliza una pupila formada por dos ranuras y por lo tanto, el diagrama de speckle registrado estará modulado por franjas de Young. El proceso de derivación se realiza mediante una doble exposición en el mismo medio de registro y se utiliza un arreglo de tres polarizadores para trasladar en medio período al sistema

de franjas entre ambas exposiciones.

En el Capítulo V se puntualizan las conclusiones generales y particulares que surgen de los temas desarrollados y se analizan futuras aplicaciones.

Las líneas de trabajo que se exponen contienen un desarrollo experimental y teórico que fue realizado en el Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp) a partir de 1982, al obtener una beca del CONICET. Dicha tarea fue dirigida por el Dr. M. Garavaglia y con la guía y el estímulo permanente de los Doctores H.J. Rabal, E.E. Sicre y N. Bolognini.

REFERENCIAS

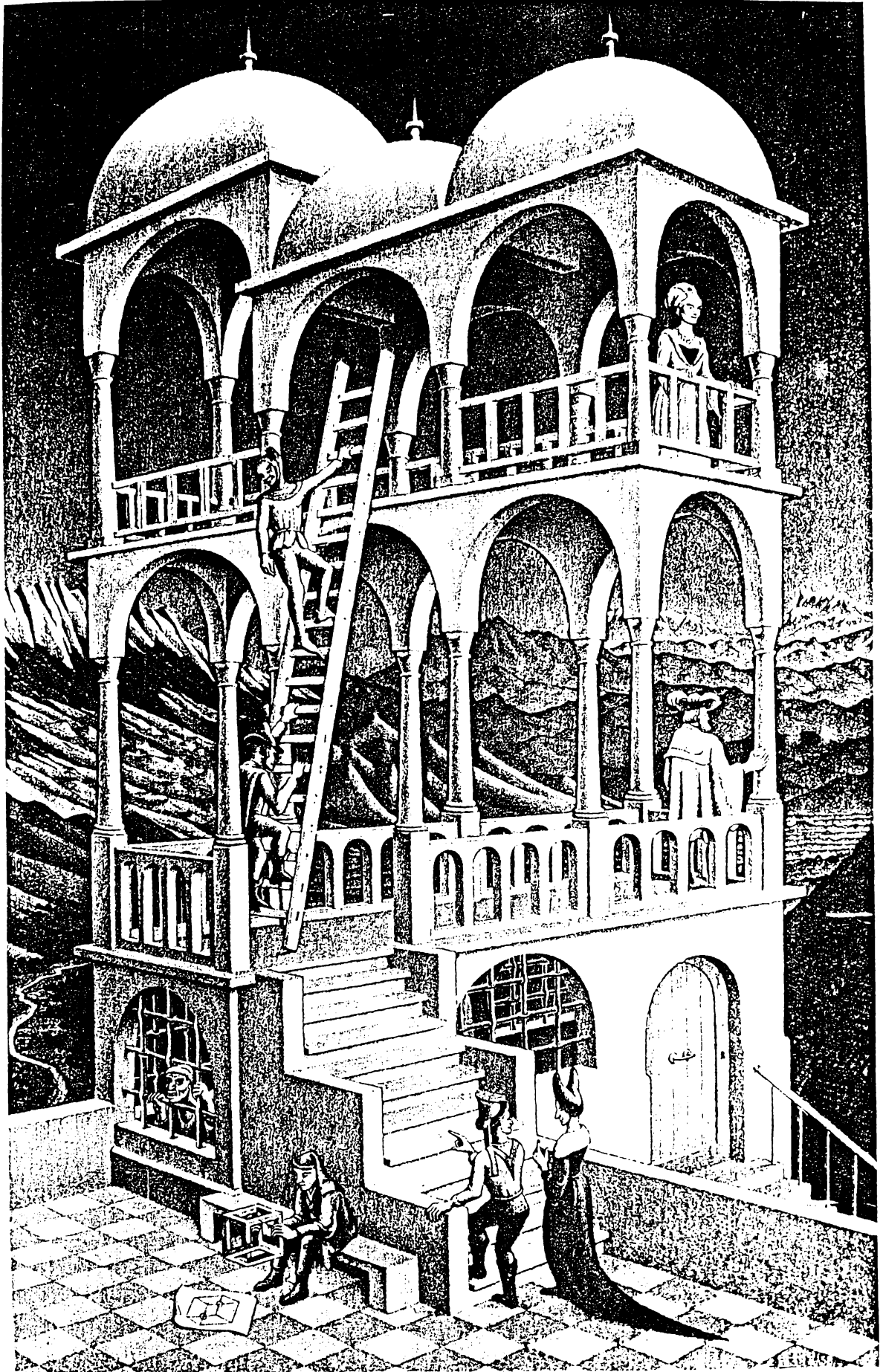
- I.1 J.C. Dainty (Ed). "Laser speckle and related phenomena". Springer Verlag, Berlin-New York (1975).
- I.2 D. Gabor. "A new microscope principle". Nature, 161, 777 (1948).
- I.3 E.N. Leith, J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Am., 52, 1123 (1962).
- I.4 Ver por ejemplo: T.S. McKechnie. "Speckle reduction". En "Laser speckle and related phenomena". J.C. Dainty (Ed). Springer Verlag, Berlin-New York (1975) Cap. 4.
- I.5 I. Newton. Opticks (Reimpreso por Dover Press, New York, 1952). Libro I. Parte I. Prop. VIII, Prob. II (1730).
- I.6 D. Chaulnes. Memoires de l'Acad.Royale des Sciences (París) 136 (1755).
- I.7 T. Young.Phil. Trans. 41 (1802).
- I.8 W. Herschel. Encyclopedia metropolitana. Part. 2, vol. 2 (Baldwing and Crodoch, Londres 1830); p. 473.
- I.9 K. Exner. Wiedemanns. Ann. Physik, 9, 239 (1880).
- I.10 M. von Laue. Sitzungsber. Akad. Wiss. (Berlin) 44, 1144 (1914).
- I.11 W.J.de Haas. Koninklighe. Acad. van Wetenshager (Amsterdam) 20, 1278 (1918).
- I.12 M. von Laue. Mitt. Physik. Ges. (Zurich) 18, 90 (1916).
- I.13 M. von Laue. Verhandl. Deutsch. Phys. Ges. 19, 19 (1917).
- I.14 G. Schiffner. Proc. IEEE 53, 1245 (1965).
- I.15 P. Hariharan. Opt. Acta 19, 791 (1972).
- I.16 J.D. Ridgen and E.I. Gordon. Proc. IRE 50, 2367 (1962).

- I.17 J.C. Dainty (Ed). "Laser speckle and related phenomena". Springer Verlag, Berlin-New York (1975); Cap. 2 y 3.
- I.18 J.M. Burch and J.M.J. Tokarski. *Optica Acta* 15, 101 (1968).
- I.19 J.M. Burch, *Nature (Londres)* 171, 889 (1953).
- I.20 Ver por ejemplo: R.K. Erf (Ed). "Speckle Metrology". Academic Press, New York (1978).
- I.21 A. Labeyrie. *Astron. Astrophys.* 6, 85 (1970).
- I.22 L.H. Tanner. *Appl. Opt.* 13, 2026 (1974).
- I.23 P. Hariharan. *Appl. Opt.* 9, 1482 (1970).
- I.24 H.A. Knoll. *Am. J. Optom.* 43, 415 (1966).
- I.25 M. Francon. "La granularité laser (speckle) et ses applications en optique". Masson, Paris (1978).
- I.26 J.C. Dainty. "Laser speckle and related phenomena". Springer Verlag, Berlin (1975).
- I.27 R.K. Erf (Ed). "Speckle Metrology". Academic Press, New York (1978).
- I.28 J.W. Goodman. "Introduction to Fourier optics". McGraw Hill, New York (1968) Cap. 5, p. 90.
- I.29 P.S. Consideine. *J. Opt. Soc. Am.* 56, 1001 (1966).
- I.30 M. Born and E. Wolf. "Principles of optics". Pergamon Press (1975) p. 423.
- I.31 L.I. Goldfisher. *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 247 (1965).
- I.32 J.W. Goodman. "Introduction to Fourier optics". McGraw Hill, New York (1968) Cap. 7.
- I.33 D.E. Duffy. *Appl. Optics*, 11, 1778 (1972).
- I.34 H.J. Rabal, E.E. Sicre, N. Bolognini, R. Arizaga and M.

- Garavaglia. *Appl. Optics*, 22, 881 (1983).
- I.35 N. Bolognini, H.J. Rabal, E.E. Sicre and M. Garavaglia. *Opt. Comm.*, 34, 337 (1980).
- I.36 G.R. Gerhart and P.H. Ruterbusch. *Opt. Letters*, 7, 559 (1982).
- I.37 S. Debrus, M. Françon, P. Koulev. *Nouv. Rev. d'Optique*, 5, 153 (1974).
- I.38 M. Françon. En "Laser speckle and related phenomena". Springer Verlag, Berlin-New York, (1975)p. 185.
- I.39 M. Françon, P. Koulev and M. May. *Opt. Comm.* 12, 63 (1974).
- I.40 M. Françon, P. Koulev and M. May. *Opt. Comm.* 13, 138 (1975).
- I.41 U. Köpf. *Proc. IEEE. Zurich* (1974) Catalog n° 74; p. 862-3C.

CAPITULO II

PROPIEDADES ESTADISTICAS DE LOS DIAGRAMAS DE SPECKLE



II.1 INTRODUCCION

El fenómeno de speckle está presente, en general, cuando un objeto es iluminado por un haz de luz coherente proveniente de un láser. El aspecto granular que adquieren los objetos al ser iluminados de esta forma, se debe a que las superficies de la mayoría de los materiales son extremadamente rugosas para la escala de las longitudes de onda ópticas ($\lambda \sim 5 \times 10^{-7}$ m). Por lo tanto, ocurre un fenómeno de interferencia en el frente de onda difundido, con un "patrón" completamente caótico, desordenado, sin que esta estructura tenga ninguna relación con las características macroscópicas del objeto iluminado. Es por ello que las propiedades de este diagrama irregular se describen adecuadamente con métodos estadísticos y teoría de probabilidades.

Las propiedades estadísticas de los diagramas de speckle dependen de la coherencia del haz luminoso incidente y de la estructura detallada de la superficie difusora. Sin embargo, aquí se tratará con luz completamente coherente y se considera además, que la dependencia de dichas propiedades con la superficie aleatoria pueden despreciarse si ella introduce diferencias de camino óptico mayores que una longitud de onda (II.1).

En este capítulo se estudiarán las propiedades estadísticas de ciertos diagramas de speckle. Es de suma importancia este análisis, ya que permite explicitar las características del frente de onda difractado por un registro de N diagramas de speckle y a partir de ellas obtener un "display" adecuado de

información, lo cual constituye el objetivo del presente trabajo de tesis.

Diversos métodos se desarrollarán para lograr operaciones de procesamiento de imágenes, tales como "display" tridimensional, almacenamiento de color en película blanco y negro, pseudo-coloreado de niveles de gris, etc. La característica común a todos ellos es que, en la etapa de observación, la imagen procesada es vista a través de la luz difractada por los diagramas de speckle que actúan como canales independientes portadores de información.

Debido a que cada diagrama de speckle presente almacena una parte de la información global necesaria para obtener la operación buscada, se los modula espacialmente de forma tal de introducir una adecuada selectividad en la figura de difracción originada por cada uno de ellos. Por lo tanto, la selectividad angular y la eficiencia de difracción del campo de luz emergente del registro, son los parámetros importantes para optimizar el "display". Estos parámetros pueden ser obtenidos a partir del estudio de las propiedades estadísticas de primero y segundo orden de un diagrama de speckle y de una suma de diagramas de speckle.

Del análisis de la estadística de primer orden se encuentra una función de densidad de probabilidad para la amplitud compleja, la fase y la intensidad del frente de onda difundido. También posibilita la obtención de una expresión para el contraste de los diagramas de speckle, la que a su vez permite analizar la eficiencia de difracción del registro.

La estadística de segundo orden proporciona una estimación del tamaño del grano individual de speckle, definido en términos de la función de autocorrelación de la pupila del sistema óptico empleado para registrar el diagrama de speckle. La transformada de Fourier de la función de autocorrelación se denomina "función de densidad de potencia espectral" y permite determinar la forma de la figura de difracción del registro y por lo tanto, la orientación espacial de los lóbulos de difracción a partir de una elección conveniente de la pupila del sistema.

En primer término se resumen los principales resultados conocidos de la estadística de primer orden de uno y varios diagramas de speckle polarizados y monocromáticos. Luego se generaliza para diagramas de speckle parcialmente polarizados y se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y el contraste en ambos casos. Posteriormente se estudian las propiedades estadísticas de segundo orden de un registro de speckle definiéndose la función de autocorrelación y la función de densidad de potencia espectral.

Finalmente, se calculan estas expresiones para el caso particular de un diagrama de speckle obtenido con una pupila formada por dos sectores circulares opuestos. Se analizan los resultados y se concluye que las propiedades de difracción del registro son las adecuadas para optimizar los requerimientos del "display".

II.2 ESTADISTICA DE PRIMER ORDEN DE UN DIAGRAMA DE SPECKLE POLARIZADO

Se estudia primeramente las propiedades estadísticas de primer orden para un diagrama de speckle. Se supone que las ondas emergentes de la superficie difusora son perfectamente monocromáticas y coherentes y que el diagrama de speckle está polarizado.

Sea $u(x,y,z;t)$ la representación analítica de una componente del campo eléctrico \vec{E} con polarización lineal en el punto de observación $P(x,y,z)$ para el instante de tiempo t .

Para una onda monocromática, la señal analítica es:

$$u(x,y,z;t) = A(x,y,z) \exp(i2\pi\nu t). \quad (2.1)$$

Donde ν es la frecuencia óptica y $A(x,y,z)$ representa el fasor de amplitud del campo, el cual es una función compleja de la coordenada espacial:

$$A(x,y,z) = |A(x,y,z)| \exp[i\theta(x,y,z)] \quad (2.2)$$

La intensidad de la onda se define como:

$$I(x,y,z) = A(x,y,z) A^*(x,y,z) = |A(x,y,z)|^2 \quad (2.3)$$

La amplitud del campo eléctrico en un dado punto de observación $P(x,y,z)$ consiste en una multitud de contribuciones desfasadas que provienen de diferentes regiones de la superficie rugosa. Así, el fasor de amplitud total $A(x,y,z)$ está repre-

sentado por la suma de las contribuciones de varios fasores elementales:

$$A(x,y,z) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} a_k(x,y,z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \exp(i\phi_k) \quad (2.4)$$

Se desean estudiar las funciones de densidad de probabilidad del campo complejo $A(x,y,z)$, de la intensidad $I(x,y,z)$ y de la fase $\theta(x,y,z)$ del diagrama de speckle en el punto $P(x,y,z)$.

II.2.1 ESTADISTICA DE LA AMPLITUD COMPLEJA

Se supone que los fasores elementales poseen las siguientes propiedades:

1. La amplitud $\frac{a_k}{\sqrt{N}}$ y la fase ϕ_k del k-ésimo fasor elemental son estadísticamente independientes del elemento 1 para $k \neq 1$.

2. Las fases ϕ_k están uniformemente distribuidas en el intervalo $-\pi \leq \phi_k \leq \pi$.

Con estas dos suposiciones se investigan las propiedades estadísticas del campo complejo resultante.

Sea

$$A^{(r)} = \text{Re}[A(x,y,z)] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \cos \phi_k \quad (2.5)$$

$$A^{(i)} = \text{Im}[A(x,y,z)] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \text{sen} \phi_k$$

Se puede demostrar fácilmente a partir de la definición (2.5), y con las suposiciones 1 y 2, que la parte real y la parte imaginaria de $A(x,y,z)$ cumplen con las siguientes propiedades:

- Los valores promedio de $A^{(r)}$ y $A^{(i)}$ calculados en un conjunto estadístico de la superficie rugosa, son cero:

$$\langle A^{(r)} \rangle = \langle A^{(i)} \rangle = 0 \quad (2.6)$$

- Las correspondientes varianzas son iguales:

$$\sigma^{(r)2} = \sigma^{(i)2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\langle \left| \frac{a_k}{2} \right|^2 \right\rangle \quad (2.7)$$

- Las partes real e imaginaria están descorrelacionadas:

$$\langle A^{(r)} A^{(i)} \rangle = 0 \quad (2.8)$$

En la mayoría de los casos prácticos el número de fasores elementales N es extremadamente grande, siendo por lo tanto $A^{(r)}$ y $A^{(i)}$ una suma de un número muy grande de variables aleatorias independientes. De acuerdo al teorema central del límite (II.2), cuando $N \rightarrow \infty$, $A^{(r)}$ y $A^{(i)}$ son asintóticamente variables gaussianas.

Utilizando esta propiedad y los resultados de las ecuaciones (2.6) y (2.7), la función de densidad de probabilidad conjunta de $A^{(r)}$ y $A^{(i)}$ es asintóticamente:

$$P_{r,i}(A^{(r)}, A^{(i)}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left\{ - \frac{[A^{(r)}]^2 + [A^{(i)}]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (2.9)$$

$$\text{Donde } \sigma^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\langle \left| \frac{a_k}{2} \right|^2 \right\rangle \quad (2.10)$$

Esta función se conoce como función de densidad gaussiana circular, ya que los contornos de densidad de probabilidad constante son círculos en el plano complejo. El fasor de amplitud $A(x, y, z)$ será referido como una variable aleatoria compleja gaussiana circular.

Si las fases ϕ_k no están uniformemente distribuidas se deben hacer algunas modificaciones a la teoría, pero en la mayoría de los casos prácticos se pueden utilizar con gran precisión los resultados aquí deducidos.

II.2.2 ESTADISTICA DE INTENSIDAD Y FASE

En la mayoría de los experimentos en la región óptica del espectro electromagnético, la magnitud que se puede medir en forma directa es la intensidad. A partir de la estadística derivada para la amplitud compleja $A(x,y,z)$ se pueden hallar las correspondientes propiedades estadísticas de la intensidad $I(x,y,z)$ y la fase $\theta(x,y,z)$ para un diagrama de speckle polarizado.

Estas últimas están relacionadas con $A^{(r)}$ y $A^{(i)}$ por las expresiones

$$A^{(r)} = \sqrt{I} \cos \theta \quad A^{(i)} = \sqrt{I} \operatorname{sen} \theta \quad (2.11)$$

O en forma equivalente:

$$I = [A^{(r)}]^2 + [A^{(i)}]^2 \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{A^{(i)}}{A^{(r)}} \quad (2.12)$$

Para hallar la función de densidad de probabilidad conjunta de $I(x,y,z)$ y $\theta(x,y,z)$, expresada en términos de la función de densidad de probabilidad de $A^{(r)}$ y $A^{(i)}$, se utiliza la siguiente propiedad (II.3):

$$P_{I,\theta} = P_{r,i}(A^{(r)}, A^{(i)}) |J| \quad (2.13)$$

Donde $|J|$ es el jacobiano de la transformación:

$$|J| = \begin{vmatrix} \partial \Lambda^{(r)} / \partial I & \partial \Lambda^{(r)} / \partial \theta \\ \partial \Lambda^{(i)} / \partial I & \partial \Lambda^{(i)} / \partial \theta \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \quad (2.14)$$

Sustituyendo (2.9) en (2.13) se encuentra:

$$P_{I,\theta}(I,\theta) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right) & I \geq 0 \\ & -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.15)$$

La función de densidad de probabilidad, para la intensidad solamente, es:

$$P_I(I) = \int_{-\pi}^{\pi} P_{I,\theta}(I,\theta) d\theta = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right) & I \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.16)$$

Se concluye que la intensidad en un punto $P(x,y,z)$ para un diagrama de speckle polarizado obedece una estadística exponencial negativa. En el punto estudiado, el valor de $I(x,y,z)$ más probable es cero y tiende asintóticamente a cero la probabilidad de que en ese punto se obtenga un valor de $I(x,y,z)$ muy grande. La Figura II.1.a muestra un gráfico de esta función de densidad de probabilidad normalizada.

Como la intensidad es la cantidad de interés, se estudian sus propiedades estadísticas con más detalle.

Se puede demostrar que el n -ésimo momento $\langle I^n \rangle$ de I es:

$$\langle I^n \rangle = n! (2\sigma^2)^n = n! \langle I \rangle^n \quad (2.17)$$

Para:

$$n = 1, \langle I \rangle = 2\sigma^2 \quad (2.18)$$

$$n = 2, \langle I^2 \rangle = 2\langle I \rangle^2$$

Y por lo tanto la varianza es:

$$\sigma^2 = \langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2 = \langle I \rangle^2 \quad (2.19)$$

Se observa que la desviación estándar σ_I es igual a la intensidad media $\langle I \rangle$ para un diagrama de speckle polarizado.

A partir de la intensidad se puede medir el contraste. Este proporciona una medida adecuada de las fluctuaciones de brillo en el diagrama de speckle y por ende de la eficiencia de difracción que se puede obtener del mismo.

El contraste se define estadísticamente como:

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} \quad (2.20)$$

entonces, utilizando (2.19) resulta:

$$C = \frac{\langle I \rangle}{\langle I \rangle} = 1 \quad (2.21)$$

Para el caso de diagramas de speckle polarizados, el contraste es siempre uno. Por lo tanto, la eficiencia de difracción será máxima. Se verá en la Sección II.3.2 que en el caso de una suma de varios diagramas de speckle, el contraste disminuye y en consecuencia la eficiencia de difracción será más baja.

Análogamente al cálculo efectuado en la ecuación (2.17) para la intensidad, se puede obtener la función de densidad de probabilidad para la fase solamente:

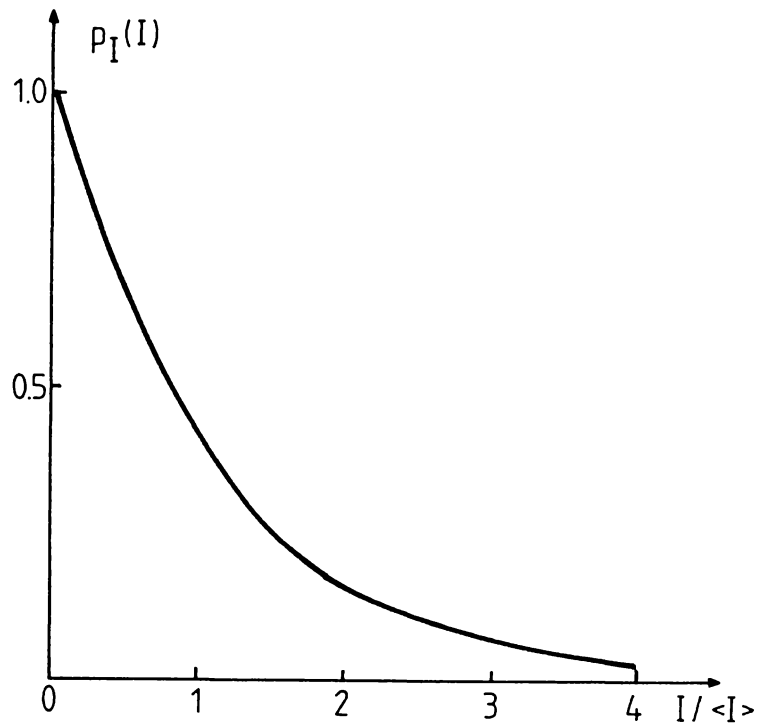
$$P_{\theta}(\theta) = \int_0^{\infty} P_{I,\theta}(I,\theta) dI = \begin{cases} 1/2\pi & -\pi \leq \theta < \pi \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.22)$$

La fase obedece a una estadística uniforme. El gráfico de esta función se muestra en la Figura II.1.b.

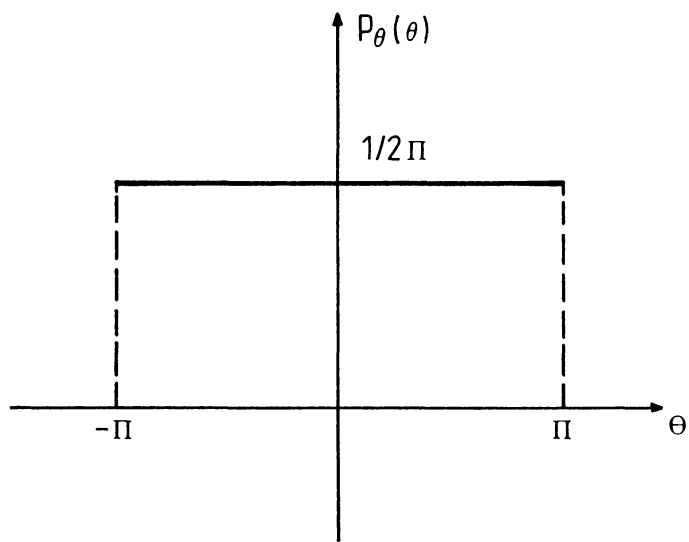
Se debe notar también que:

$$P_{I,\theta}(I,\theta) = P_I(I) P_{\theta}(\theta) \quad (2.23)$$

La intensidad y la fase son estadísticamente independientes para un diagrama de speckle polarizado.



(a)



(b)

Figura II.1

II.3 ESTADISTICA DE PRIMER ORDEN DE UNA SUMA DE DIAGRAMAS DE SPECKLE

En muchos casos experimentales y en particular los que se tratarán en este trabajo, la intensidad medida en un punto del espacio se debe a la suma de dos o más diagramas de speckle. Es por ello que aquí se extenderá el análisis de la sección anterior para considerar las propiedades estadísticas de primer orden de la suma de N diagramas de speckle. Estos pueden ser registrados en forma secuencial o simultánea.

Por forma secuencial se entiende el almacenamiento sucesivo de los distintos diagramas en un único medio de registro. Por lo tanto, la suma de dichos diagramas deberá ser realizada sobre la base de suma de intensidades.

Cuando el registro múltiple se realiza simultáneamente se deben codificar los diagramas para que la información no se destruya. Una posible manera consiste en utilizar diagramas de speckle polarizados, donde las distintas direcciones de polarización lineal codifican los diferentes diagramas y evitan la interferencia entre los mismos. Otra alternativa es emplear varias longitudes de onda, una para cada diagrama. Las propiedades estadísticas de un registro simultáneo pueden ser analizadas en una base de amplitud o en una base de intensidad, según sean las características del registro. Como se estudiará en la Sección II.4, al considerar la estadística de segundo orden, la realización de la suma de diagramas de speckle sobre una base de intensidad permite preservar la modulación espacial

de cada uno de los diagramas, lo cual es importante en la etapa de decodificación.

En esta sección se resumen los resultados conocidos de la estadística de primer orden para un registro de diagramas de speckle polarizados en una base de intensidad (II.4).

Luego, el análisis se generaliza para considerar diagramas de speckle parcialmente polarizados. La estadística se hace en una base de intensidad y se obtiene la función de densidad de probabilidad. Por último, se calcula y analiza el contraste del diagrama resultante en función de los distintos parámetros involucrados en el registro.

II.3.1 SUMA DE DIAGRAMAS DE SPECKLE POLARIZADOS EN UNA BASE DE INTENSIDAD

Se considera en esta sección la suma de múltiples diagramas de speckle hecha en una base de intensidad. Se sigue la aproximación de Goodman (II.5).

Sea I la intensidad total debida a una suma de N diagramas de speckle:

$$I = \sum_{k=1}^N I_k \quad , \quad (2.24)$$

$$\text{Donde } I = |A|^2 \text{ e } I_k = |A_k|^2$$

Las correlaciones entre las N componentes de intensidad se pueden expresar en términos de coeficientes de correlación reales:

$$c_{kj} = \frac{\langle I_k I_j \rangle - \langle I_k \rangle \langle I_j \rangle}{[\langle (I_k - \langle I_k \rangle)^2 \rangle \langle (I_j - \langle I_j \rangle)^2 \rangle]^{1/2}} \quad (2.25)$$

Estos coeficientes surgen de la correlación de los campos que dan lugar a estas intensidades. Los coeficientes para los campos A_k, A_j son

$$\mu_{k,j} = \frac{\langle A_k A_j^* \rangle}{[\langle |A_k|^2 \rangle \langle |A_j|^2 \rangle]^{1/2}} \quad (2.26)$$

Si los campos obedecen una estadística circular compleja gaussiana, se cumple (II.6):

$$c_{k,j} = |\mu_{k,j}|^2 \quad \mu_{k,j} = \sqrt{c_{k,j}} \exp(i\Psi_{k,j}) \quad (2.27)$$

Donde $\Psi_{k,j}$ es un factor de fase.

Se supone que todos los coeficientes de correlación $\mu_{k,j}$ son conocidos, ya sea a través del análisis o experimentalmente.

Se define $[A]$ matriz columna de N elementos, $A_1 \dots A_N$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_N \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Las correlaciones entre los N campos están expresados en forma más compacta por medio de la matriz de coherencia hermitiana.

$$[J] = \langle [A][A^+] \rangle = \begin{bmatrix} \langle I_1 \rangle & \sqrt{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle} \mu_{12} & \dots & \sqrt{\langle I_1 \rangle \langle I_N \rangle} \mu_{1N} \\ \sqrt{\langle I_2 \rangle \langle I_1 \rangle} \mu_{12}^* & \langle I_2 \rangle & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{\langle I_N \rangle \langle I_1 \rangle} \mu_{1N}^* & \dots & \dots & \langle I_N \rangle \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Donde $+$ indica la operación hermitiana transpuesta.

Es posible diagonalizar la matriz $[J]$.

Una transformación lineal, representada por $[L]$, matriz de $N \times N$, aplicada sobre $[A]$ da una nueva matriz $[A']$.

$$[A'] = [L] [A] \quad (2.30)$$

La matriz de coherencia $[J']$ después de esta transformación es:

$$[\mathcal{J}'] = [\mathcal{L}] [\mathcal{J}] [\mathcal{L}^+] \quad (2.31)$$

De la teoría de matrices (II.7) se cumple que para toda matriz hermitiana $[\mathcal{J}]$ existe una matriz unitaria de transformación $[\mathcal{L}_0]$ que diagonaliza $[\mathcal{J}]$:

$$[\mathcal{J}'] = [\mathcal{L}_0][\mathcal{J}][\mathcal{L}_0^+] = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ \vdots & & & \\ 0 & & \dots & \lambda_N \end{vmatrix} \quad (2.32)$$

Donde $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_N$ son los autovalores de $[\mathcal{J}]$ que son reales y no negativos.

Asimismo, como $[\mathcal{L}_0]$ es unitaria ($[\mathcal{L}_0^+][\mathcal{L}_0] = [I]$) la suma de las intensidades de los N campos no cambia por la transformación:

$$[A'^+] [A'] = [A^+] [\mathcal{L}_0^+] [\mathcal{L}_0] [A] = [A^+] [A] \quad (2.33)$$

En resumen, aplicando la transformación $[\mathcal{L}_0]$ a la matriz de campo $[A]$, se crean nuevas componentes de campo $A'_1 \dots A'_N$ no correlacionadas entre sí y que pueden ser sumadas en una base de intensidad para producir la misma intensidad total presente antes de la transformación.

$$I = \sum_{k=1}^N |A'_k|^2 = \sum_{k=1}^N |A_k|^2 \quad (2.34)$$

Si se satisface que $\langle A'_k A'_j \rangle = 0, \forall_{k,j}$, lo cual se cumple en todos los casos prácticos, los campos A'_k son variables aleatorias circulares complejas gaussianas de promedio cero, por lo tanto, las intensidades $I'_k = |A'_k|^2$ son estadísticamente independientes y cada una obedece a una distribución exponencial negativa con valor medio λ_k .

$$\langle I'_k \rangle = \lambda_k \quad (2.35)$$

$$P_{I'_k}(I'_k) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda_k} \exp\left(-\frac{I'_k}{\lambda_k}\right) & I'_k \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.36)$$

Se debe encontrar la función de densidad de probabilidad de la intensidad total I , $P_I(I)$. Para ello se calcula la función característica de I , que debe ser igual al producto de las funciones características $M_{I'_k}(iv)$ de las variables independientes I'_k .

$$M_I(iv) = \prod_{I'_k=1}^N M_{I'_k}(iv) \quad (2.37)$$

La función característica $M_{I'_k}(iv)$ de un diagrama de speckle polarizado es:

$$M_{I'_k}(iv) = \langle \exp(ivI'_k) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ivI'_k) P_{I'_k}(I'_k) dI'_k \quad (2.38)$$

Utilizando la ecuación (2.16) la expresión para $M_{I,k}(iv)$ es:

$$M_{I,k}(iv) = \frac{1}{1 - iv \langle I'_k \rangle} = \frac{1}{1 - iv \lambda_k} \quad (2.39)$$

Reemplazando en (2.37) se obtiene:

$$M_I(iv) = \prod_{k=1}^N \frac{1}{1 - iv \lambda_k} = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ivI) P_I(I) dI \quad (2.40)$$

Finalmente, a partir de la ecuación (2.40) se halla la función de densidad de probabilidad de la intensidad total $P_I(I)$. La forma específica de la función depende de si los autovalores λ_k son todos distintos o si existe degeneración:

a. Si existen N autovalores diferentes de cero, todos distintos entre sí, se tiene:

$$P_I(I) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N \frac{\lambda_k^{N-2}}{\prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^N (\lambda_k - \lambda_p)} \exp\left(-\frac{I}{\lambda_k}\right) & I \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.41)$$

Esta expresión corresponde a una suma de exponenciales decrecientes.

b. Si existen N autovalores distintos de cero, todos ellos iguales a λ_0 , el resultado es

$$P_I(I) = \begin{cases} \frac{I^{N-1}}{(N-1)! \lambda_0^N} \exp\left(-\frac{I}{\lambda_0}\right) & I \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.42)$$

Casos más generales con diferentes autovalores degenerados pueden ser obtenidos con técnicas estándares y la función de densidad de probabilidad será una suma de términos simples.

La Figura II.2 muestra las funciones de densidad de probabilidad de la intensidad para una suma de dos diagramas de speckle en los casos particulares en que los coeficientes de correlación sean $C_{12} = 0$ ($\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$), $C_{12} = 0,6$ ($\lambda_1 = 0,887$, $\lambda_2 = 0,113$) y $C_{12} = 1$ ($\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$) con la suposición que las intensidades medias $\langle I_1 \rangle$, $\langle I_2 \rangle$ son iguales. Para $C_{12} = 1$ el gráfico coincide obviamente con el de la Figura II.1.a. ya que representa un único diagrama de speckle polarizado y la intensidad obedece a una estadística exponencial negativa.

Se debe notar que cuando los diagramas de speckle originales $I_1 \dots I_N$ están descorrelacionados, la matriz de coherencia $[J]$ es siempre diagonal y no se requiere ninguna transformación. En este caso los resultados previos pueden ser utilizados con la sustitución simple $\lambda_k = \langle I_k \rangle$, $k = 1 \dots N$.

II.3.2 CONTRASTE DE UNA SUMA DE DIAGRAMAS DE SPECKLE

La expresión para el contraste de una suma de diagramas de speckle polarizados ha sido deducida por Goodman (II.4). Aquí se presenta un resumen de los resultados alcanzados:

Se puede demostrar que para la suma de dos diagramas de speckle, el n-ésimo momento de la intensidad resultante es:

$$\langle I^n \rangle = n! \frac{\lambda_1^{n+1} - \lambda_2^{n+1}}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (2.43)$$

Si la intensidad media total está normalizada a 1 ($\langle I \rangle = \lambda_1 + \lambda_2 = 1$), el contraste asociado con el diagrama de speckle resultante es:

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} = (2\lambda_1^2 + 2\lambda_1 + 1)^{1/2} \quad (2.44)$$

La Figura II.3 muestra el contraste de una suma de dos diagramas de speckle con $\langle I \rangle = 1$. Se observa que C toma un valor mínimo $\frac{1}{\sqrt{2}}$ cuando $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$ y tiene el valor máximo $C = 1$ cuando $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$ y $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$, que representan a un único diagrama de speckle.

En general, para una suma de N diagramas de speckle, el contraste asociado tiene un valor mínimo de $\frac{1}{\sqrt{N}}$ cuando $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_N = \frac{1}{N}$. Se concluye que el contraste de una suma de diagramas de speckle disminuye en la medida que aumenta la cantidad N de diagramas de speckle almacenados.

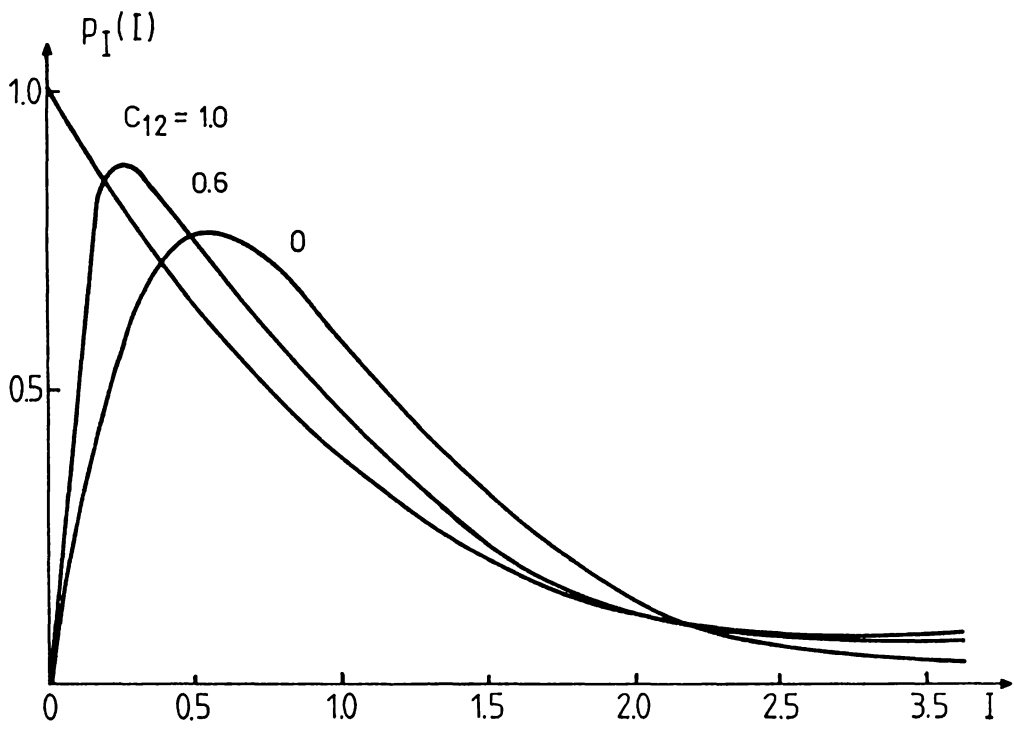


Figura II.2

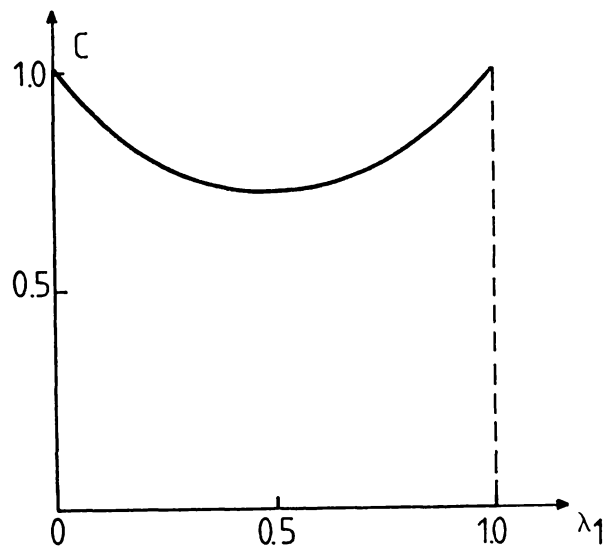


Figura II.3

II.3.3 SUMA DE DIAGRAMAS DE SPECKLE PARCIALMENTE POLARIZADOS

En uno de los métodos experimentales que se proponen en el capítulo siguiente se registran simultáneamente varios diagramas de speckle polarizados, cada uno de ellos con distintas direcciones de polarización. El diagrama de speckle resultante puede ser considerado como la suma de dos diagramas de speckle con componentes de campo linealmente polarizadas en direcciones perpendiculares.

En un sistema de coordenadas ortogonales (x,y) , el campo $A(x,y)$ se puede escribir:

$$A(x,y) = A_x(x,y)i_x + A_y(x,y)i_y \quad (2.45)$$

Donde i_x , i_y son los versores en las direcciones x,y .

La intensidad total observada para el diagrama de speckle es:

$$\begin{aligned} I(x,y) &= A(x,y) \cdot A^*(x,y) = |A_x(x,y)|^2 + |A_y(x,y)|^2 \\ &= I_x(x,y) + I_y(x,y) \end{aligned} \quad (2.46)$$

Por lo tanto, la intensidad total observada es la suma de dos componentes de intensidad, cada una contribuye con una componente de polarización diferente que en general están correlacionadas y los resultados de la sección II.3.1 deben ser aplicados aquí para hallar las propiedades estadísticas de la intensidad total.

Siguiendo la aproximación de Wolf (II.8) se define la matriz de coherencia:

$$[\mathcal{J}] = \begin{bmatrix} \langle |A_x|^2 \rangle & \langle A_x A_y^* \rangle \\ \langle A_x^* A_y \rangle & \langle |A_y|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Esta matriz puede ser diagonalizada. En este caso, la matriz de transformación $[\mathcal{L}_0]$ es la matriz de Jones (II.9).

La nueva matriz de coherencia es:

$$[\mathcal{J}'] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Donde los autovalores λ_1 y λ_2 están dados por:

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \text{tr}([\mathcal{J}]) \pm \sqrt{1 - \frac{4 \det([\mathcal{J}])}{[\text{tr}([\mathcal{J}])]^2}} \quad (2.49)$$

Donde los signos \pm valen para λ_1 y λ_2 respectivamente; $\text{tr}([\mathcal{J}])$ significa traza de $[\mathcal{J}]$ (notar que como $[\mathcal{L}_0]$ es unitaria, $\text{tr}[\mathcal{J}] = \text{tr}[\mathcal{J}'] = \lambda_1 + \lambda_2 = \langle I \rangle$) $\det[\mathcal{J}]$ significa determinante de $[\mathcal{J}]$.

Este análisis demuestra que el diagrama de speckle formado por ondas parcialmente polarizadas puede ser considerado como la suma de dos diagramas de speckle descorrelacionados e independientes (debido al carácter gaussiano de los campos); uno tiene una intensidad promedio λ_1 y el otro λ_2 .

Se puede definir el grado de polarización \mathcal{P} del diagrama de speckle como

$$\mathcal{P} = \left| \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right| \quad (2.50)$$

Utilizando (2.49), \mathcal{P} queda expresado:

$$\mathcal{P} = \left| 1 - \frac{4 \det([\mathcal{J}])}{[\text{tr}([\mathcal{J}])]^2} \right|^{1/2} \quad (2.51)$$

En términos de \mathcal{P} se puede escribir:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \langle I \rangle (1 + \mathcal{P}) \quad (2.52)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \langle I \rangle (1 - \mathcal{P})$$

Utilizando las ecuaciones (2.41), (2.42) y (2.52), la función de densidad de probabilidad para la intensidad total toma la forma (para $I \geq 0$):

$$P_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{\langle I \rangle \mathcal{P}} \exp\left[-\frac{2I}{\langle I \rangle (1+\mathcal{P})}\right] - \frac{1}{\langle I \rangle \mathcal{P}} \exp\left[-\frac{2I}{\langle I \rangle (1-\mathcal{P})}\right] , & \mathcal{P} \neq 0 \\ \frac{4I}{\langle I \rangle^2} \exp\left[-\frac{2I}{\langle I \rangle}\right] , & \mathcal{P} = 0 \end{cases} \quad (2.53)$$

Las curvas de la Figura II.2 derivadas para la suma de dos diagramas de speckle correlacionados, pueden también ser interpretados como resultados de diagramas de speckle parcialmente polarizados. Las curvas representan un gráfico de las ecuaciones (2.53) para $\mathcal{P} = 0$ ($C_{12} = 0$), $\mathcal{P} = 0,774$ ($C_{12} = 0,6$) y $\mathcal{P} = 1$ ($C_{12} = 1$) con la relación general $\mathcal{P} = \sqrt{C_{12}}$ entre \mathcal{P} y C_{12} .

II.3.4 CONTRASTE DE UNA SUMA DE DIAGRAMAS DE SPECKLE PARCIALMENTE POLARIZADOS (0.3)

Con el fin de obtener un display de información se utilizan múltiples diagramas de speckle almacenados en un único medio de registro, donde cada diagrama individual contiene parte de la información total necesaria. En el caso de un display tridimensional, cada diagrama de speckle almacena una cierta perspectiva de la escena. En el capítulo siguiente (Sección III.8) se propone un método para obtener información 3-D basado en un registro simultáneo de N diagramas de speckle. A los efectos de modular a los mismos, se emplea un sistema óptico cuya pupila consta de N aperturas diferentes, cada una provista de un polarizador lineal cuyo eje es paralelo a la dirección principal de la apertura. Los N diagramas de speckle están descorrelacionados.

Se estudia el contraste de un registro de este tipo para una suma de N diagramas de speckle no correlacionados. Este análisis es más general, porque si bien se lo propone para un método para lograr un "display" 3-D, también se lo utiliza en otras aplicaciones tales como almacenamiento de componentes cromáticas de una imagen color en película blanco y negro.

Desde el punto de vista estadístico, el diagrama de speckle resultante puede ser considerado como la suma en una base de intensidad de dos diagramas de speckle parcialmente correlacionados que tienen estados polarizados lineales cruzados. Cada diagrama de speckle se origina por la suma de las

amplitudes transmitidas por cada una de las N aperturas, proyectadas en un sistema de ejes perpendiculares como se ve en la Figura II.4.

La amplitud resultante del diagrama de speckle en el plano imagen será:

$$A_T = A_x i_x + A_y i_y \quad (2.54)$$

Donde:

$$\begin{aligned} A_x &= \sum_{k=1}^N a_{kx} = a_1 \cos \theta + \dots + a_N \cos N\theta \\ A_y &= \sum_{k=1}^N a_{ky} = a_1 \sin \theta + \dots + a_N \sin N\theta \end{aligned} \quad (2.55)$$

i_x, i_y son los versores en las direcciones x, y respectivamente.

Se supone que las componentes (a_{kx}, a_{ky}) para todo $k = 1 \dots N$, están totalmente correlacionadas, ya que son las componentes (x, y) del vector \vec{A}_k del diagrama de speckle correspondiente a cada una de las N pupilas; en cambio $[a_{1x}, a_{2x}, \dots, a_{Nx}]$ y $[a_{1y}, a_{2y}, \dots, a_{Ny}]$ están totalmente descorrelacionadas, ya que corresponden a pupilas diferentes.

Los coeficientes de correlación están expresados por:

$$\mu_{xy} = \langle A_x A_y^* \rangle = \left\langle \sum_{k,j=1}^N a_k a_j^* \sin(k\theta) \cos(j\theta) \right\rangle \quad (2.56)$$

Considerando que las componentes de campo correspondientes a diferentes aperturas están descorrelacionadas, $\langle a_k a_j^* \rangle = I_k \delta_{kj}$ se obtiene:

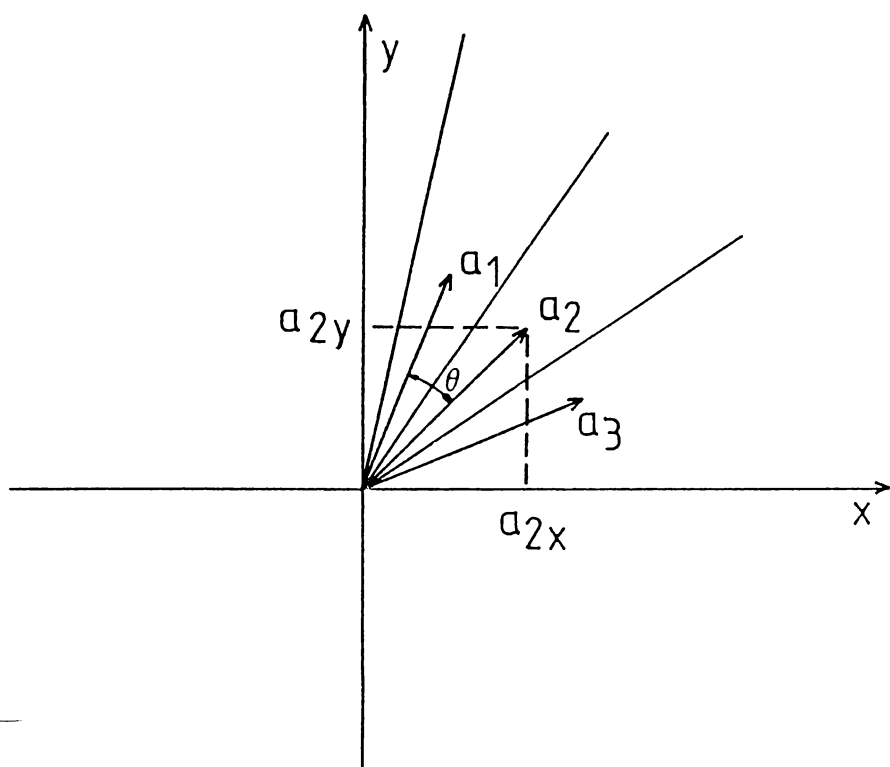


Figura II.4

$$\mu_{xy} = \sum_{k=1}^N \langle I_k \rangle \sin(k\theta) \cos(k\theta) \quad (2.57)$$

La matriz de coherencia hermitiana es, en este caso (ver 2.47):

$$[\mathcal{J}] = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \langle |a_k|^2 \rangle \sin^2 k\theta & \sum_{k=1}^N \langle |a_k|^2 \rangle \sin k\theta \cos k\theta \\ \sum_{k=1}^N \langle |a_k|^2 \rangle \sin k\theta \cos k\theta & \sum_{k=1}^N \langle |a_k|^2 \rangle \cos^2 k\theta \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Esta matriz puede ser diagonalizada:

$$[\mathcal{J}'] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Donde los coeficientes λ_1 , λ_2 están dados por la expresión (2.49)

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= \frac{1}{2} \text{tr}[\mathcal{J}] \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \det[\mathcal{J}]}{(\text{tr}[\mathcal{J}])^2}} \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\sum_{k=1}^N \langle I_k \rangle \pm \sqrt{\sum_{k,j=1}^N \langle I_k \rangle \langle I_j \rangle [\cos[2(k-j)\theta] - 2\sin[(k+j)\theta] \sin[(k-j)\theta]]} \right] \end{aligned} \quad (2.60)$$

Así, el contraste del diagrama de speckle total registrado, definido como $C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}$ puede ser expresado en función de los autovalores hallados en (2.60). Utilizando la ecuación (2.44):

$$C = \sqrt{2\lambda_1^2 - 2\lambda_1 + 1}$$

Donde aquí se asume que la intensidad media es unitaria, $\langle I \rangle = \lambda_1 + \lambda_2 = 1$.

A los efectos de ilustrar la forma en que cambia el contraste para distintos valores de N y θ , la Figura II.5 muestra la variación del contraste para diferentes valores de N , con el ángulo θ como parámetro.

El mayor contraste ocurre para valores de θ pequeños. Como se verá en la próxima Sección para ese caso la estadística de segundo orden determina una modulación espacial muy pobre para cada diagrama de speckle individual. Por lo tanto, el valor de θ debe seleccionarse de acuerdo al compromiso entre un buen grado de selectividad espacial para la luz difractada por el diagrama de speckle y una alta eficiencia de difracción determinada por el contraste de speckle.

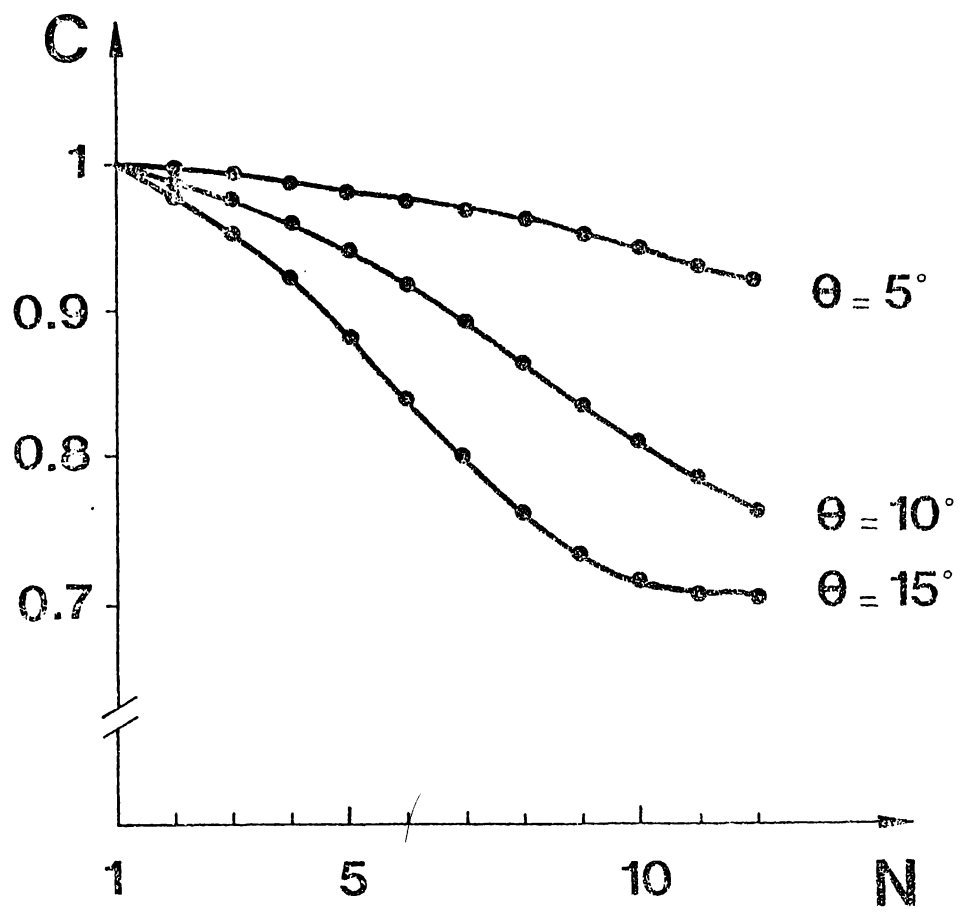


Figura II.5

II.4 PROPIEDADES ESTADISTICAS DE SEGUNDO ORDEN

En las secciones anteriores se han discutido las propiedades estadísticas de primer orden de los diagramas de speckle. Tales consideraciones son suficientes para describir las fluctuaciones de intensidad. En esta Sección se estudia la estadística de segundo orden; a partir de ella se pueden encontrar las funciones de autocorrelación y densidad de potencia espectral que son las herramientas necesarias para describir las propiedades de difracción el registro de speckle.

Primeramente se define la función de autocorrelación y la función de densidad de potencia espectral para una geometría del espacio libre y para un sistema formador de imágenes. Luego se calculan estas expresiones para el caso particular de una pupila que consiste en dos sectores circulares opuestos por el vértice, cuyas propiedades de difracción resultan adecuadas para lograr el display de información.

II.4.1 FUNCION DE AUTOCORRELACION Y DENSIDAD DE POTENCIA ESPECTRAL: GEOMETRIA DEL ESPACIO LIBRE

Se considera la propagación libre en el espacio, cuya geometría se muestra en la Figura II.6. Luz monocromática incide sobre una superficie rugosa y se observa la luz difundida a una cierta distancia sin ninguna intervención de elementos ópticos.

Sea $P(\xi, \eta)$ una función compleja que representa una componente lineal de polarización del campo eléctrico en un plano inmediatamente adyacente a la superficie rugosa. La segunda componente de polarización puede ser tratada, en primera aproximación, en forma independiente y de manera análoga, pero por simplicidad se considera una sola componente.

El diagrama de speckle a estudiar está representado por el campo complejo $A(x, y)$ observado en un plano paralelo a (ξ, η) situado a una distancia z del difusor.

Se desea encontrar la función de autocorrelación de la distribución de intensidad $I(x, y) = |A(x, y)|^2$ en el plano (x, y) , la cual está definida por:

$$R_I(x_1, y_1, x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1) I(x_2, y_2) \rangle \quad (2.61)$$

Donde el promedio se calcula para un cierto conjunto estadístico de la superficie rugosa.

El interés en esta función de autocorrelación radica en el hecho que el valor del ancho promedio de $R_I(x_1, y_1, x_2, y_2)$

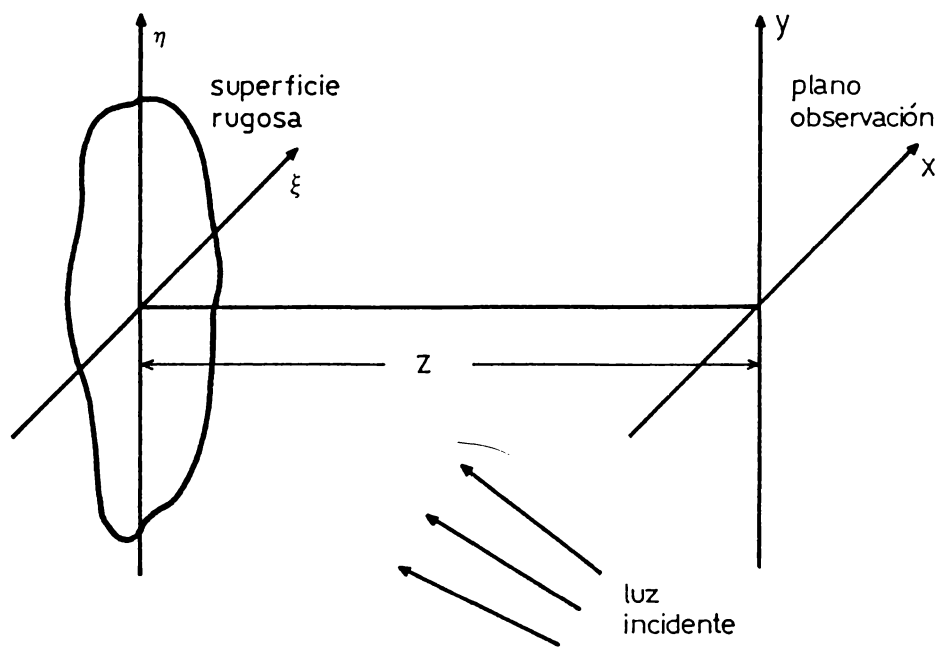


Figura II.6

proporciona una medida aproximada del tamaño medio y forma del grano de speckle.

El cálculo de $R_I(x_1, y_1, x_2, y_2)$ fue realizado por Goodman (II.10), utilizando la propiedad que la superficie es rugosa comparada con la longitud de onda incidente y por lo tanto, el campo $A(x, y)$ es una variable aleatoria circular compleja gaussiana en cada punto (x, y) .

La expresión para la función de autocorrelación de la intensidad de speckle es:

$$R_I(x_1, y_1, x_2, y_2) = \tag{2.62}$$

$$= \langle I \rangle^2 \left[1 + \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |P(\xi, \eta)|^2 \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda z} (\xi \Delta x + \eta \Delta y) \right] d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |P(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta} \right]^2$$

La función depende sólo de las diferencias de coordenadas en el plano (x, y) , $(\Delta x = x_1 - x_2, \Delta y = y_1 - y_2)$ y está dada por la transformada de Fourier normalizada de la distribución de intensidades $|P(\xi, \eta)|^2$ sobre la superficie rugosa difusora.

Del cálculo del "ancho" promedio de $R_I(\Delta x, \Delta y)$ se obtiene una medida del tamaño del grano de speckle. Por ejemplo, para una superficie rugosa circular de diámetro D iluminada uniformemente por luz monocromática de longitud de onda λ , la función de autocorrelación en un plano de observación situado a una distancia z de la superficie, tiene un ancho promedio dado por:

$$\delta x \sim \frac{\lambda z}{D} \tag{2.63}$$

Un valor similar se encontrará en la sección siguiente para el ancho promedio de la función de autocorrelación en el caso de una imagen geométrica. Dicha expresión coincide con la hallada en la ecuación (1.5) para el tamaño típico de un grano de speckle en esas mismas condiciones.

A partir de la función de autocorrelación, se puede definir la función de densidad de potencia espectral de la distribución de speckle $I(x,y)$. Esta fue calculada primeramente por Goldfischer (II.11) y es una cantidad de considerable interés, ya que proporciona la distribución de luz difractada por el diagrama de speckle.

La densidad de potencia espectral $G_I(u,v)$ de $I(x,y)$ se puede expresar, de acuerdo al teorema de Wiener-Khintchine (II.12), como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación $R_I(\Delta x, \Delta y)$.

Aplicando la transformada de Fourier a (2.62) se obtiene:

$$G_I(u,v) = \mathcal{F}\{R_I(\Delta x, \Delta y)\} =$$

$$= \langle I \rangle^2 \left[\delta(u,v) + \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} |P(\xi,\eta)|^2 |P(\xi-\lambda zu, \eta-\lambda zv)|^2 d\xi d\eta}{\left[\iint_{-\infty}^{\infty} |P(\xi,\eta)|^2 d\xi d\eta \right]^2} \right] \quad (2.64)$$

Donde u, v son las frecuencias espaciales correspondientes a (x,y) definidas por $u = x/\lambda z$, $v = y/\lambda z$.

La densidad de potencia espectral de un diagrama de speckle consiste en una función δ de Dirac a frecuencia cero

($u = v = 0$), más una componente extendida sobre las frecuencias, que tiene la forma de la función de autocorrelación normalizada de la distribución de intensidad $|P(\xi, \eta)|^2$ sobre la superficie difusora. La mitad de la potencia está contenida en la frecuencia cero y la otra mitad en la componente extendida. Por lo tanto, la fórmula (2.64) es una expresión de la distribución de luz difractada y explicita la forma de los lóbulos de difracción del registro de speckle.

II.4.2 FUNCION DE AUTOCORRELACION Y DENSIDAD DE POTENCIA ESPECTRAL: IMAGEN GEOMETRICA

En las distintas técnicas de procesamiento de imágenes a desarrollarse, el registro de los diagramas de speckle no se obtiene en una geometría del espacio libre, sino que se utiliza un sistema formador de imágenes, como se muestra en la Figura II.7. Por lo tanto, se deben hacer algunas modificaciones a los resultados hallados en la Sección anterior.

En la geometría de la Figura II.7 el objeto difunde (o transmite) uniformemente la luz incidente y se supone que la región iluminada es extensa comparada con la celda de resolución asociada con la lente L usada. De esta forma, la iluminación en el objeto es uniforme y el tamaño de los speckles en la pupila de apertura de la lente es extremadamente pequeño comparado con el diámetro de la misma.

En buena aproximación, se puede tratar al plano de la pupila de la lente como una superficie rugosa uniformemente iluminada y calcular la función de autocorrelación y la densidad de potencia espectral que resulte en el plano imagen.

Ya que solo hay propagación libre entre el plano de la pupila y el plano imagen, los resultados de la sección previa pueden aplicarse directamente dando una nueva interpretación a la función pupila $P(\xi, \eta)$. De acuerdo a la expresión (2.62), la función de autocorrelación de la intensidad del diagrama de speckle, $R_I(\Delta x, \Delta y)$, consiste en un término constante más el módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de la intensi-

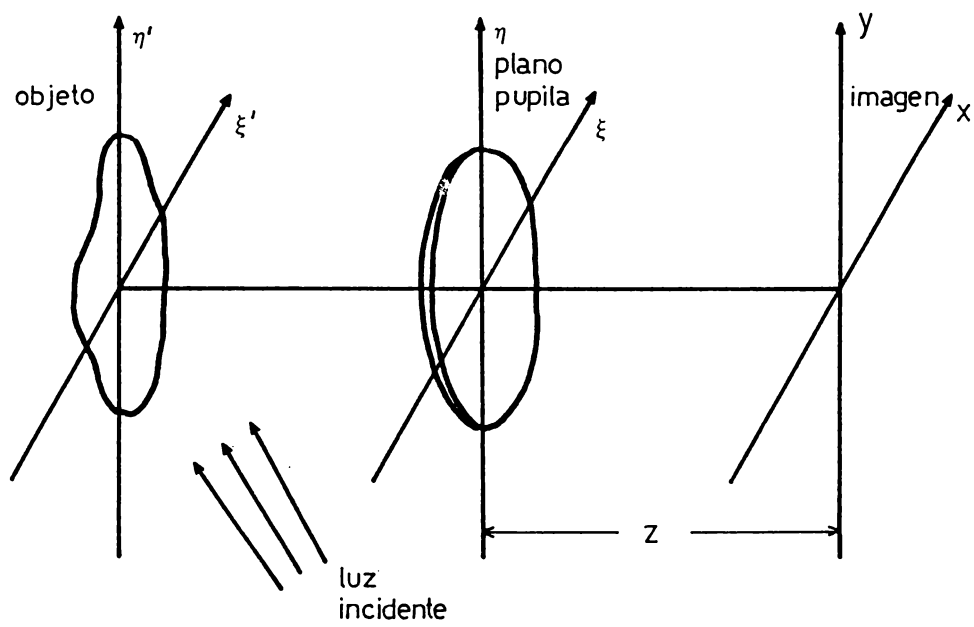


Figura II.7

dad transmitida, $|P(\xi, \eta)|^2$, por la pupila de la lente. Hay que notar que la función de autocorrelación es independiente de las aberraciones asociadas al sistema óptico, ya que ellas afectan solamente la fase de $P(\xi, \eta)$.

Similarmente, de acuerdo a (2.64), la densidad de potencia espectral del diagrama de speckle en el plano imagen es una función δ , a frecuencia espacial cero, más una componente extendida que toma la forma de la función de autocorrelación de la intensidad transmitida $|P(\xi, \eta)|^2$ por la pupila de la lente.

Para el caso usual de una lente cuya pupila es un círculo de diámetro D , la función de autocorrelación del speckle en el plano imagen es:

$$R_I(r) = \langle I \rangle^2 \left[1 + \left| \frac{2 J_1(\pi D r / \lambda z)}{(\pi D r / \lambda z)} \right|^2 \right] \quad (2.65)$$

Donde $r = [(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]^{1/2}$ y J_1 es la función de Bessel de orden uno.

Si se grafica la función $R_I(r)$ y se calcula el "ancho" promedio, se obtiene la expresión (2.63) y por lo tanto, el tamaño del grano de speckle.

A partir de las consideraciones anteriores, se deduce que las propiedades de difracción de un diagrama de speckle registrado con la geometría de la Figura II.7 están expresados por la ecuación (2.64) y pueden ser controladas eligiendo convenientemente la pupila del sistema óptico. Es posible dar forma a la pupila $P(\xi, \eta)$ de manera tal que la figura de difracción del registro de speckle cumpla ciertos requerimientos para obtener distintos tipos de procesamiento de imágenes.

II.4.3 PROPIEDADES DE DIFRACCION DE UNA PUPILA QUE CONSISTE EN DOS SECTORES CIRCULARES OPUESTOS

Se ha demostrado en la Sección anterior que el contenido espectral del campo difractado por un diagrama de speckle está dado por la función de densidad de potencia espectral $G_I(u,v)$ y que ésta depende de la función pupila del sistema óptico empleado para registrar el speckle. En particular, se estudia aquí la función $G_I(u,v)$ correspondiente a una pupila que consiste de dos sectores circulares opuestos por el vértice común, tal como se muestra en la Figura II.8. La utilización de la misma en el sistema óptico proporciona selectividad angular y a la vez cierto grado de uniformidad a la figura de difracción del diagrama de speckle. Estas propiedades particulares se emplean en distintos métodos para el procesamiento de la información óptica que permite obtener el display buscado, tales como a) almacenamiento en una única placa fotográfica de dos perspectivas de un objeto tridimensional obteniendo en la reconstrucción visión estereoscópica; b) almacenamiento de múltiples imágenes en una única placa fotográfica (multiplexing) para lograr un estereograma continuo; c) pseudocoloreado de niveles de gris; d) almacenamiento de color en película blanco y negro.

El diagrama de speckle registrado con la pupila de la Figura II.8 contiene un rango restringido de componentes espectrales y por lo tanto, la información almacenada en él puede ser observada solamente dentro de un determinado ángulo sólido.

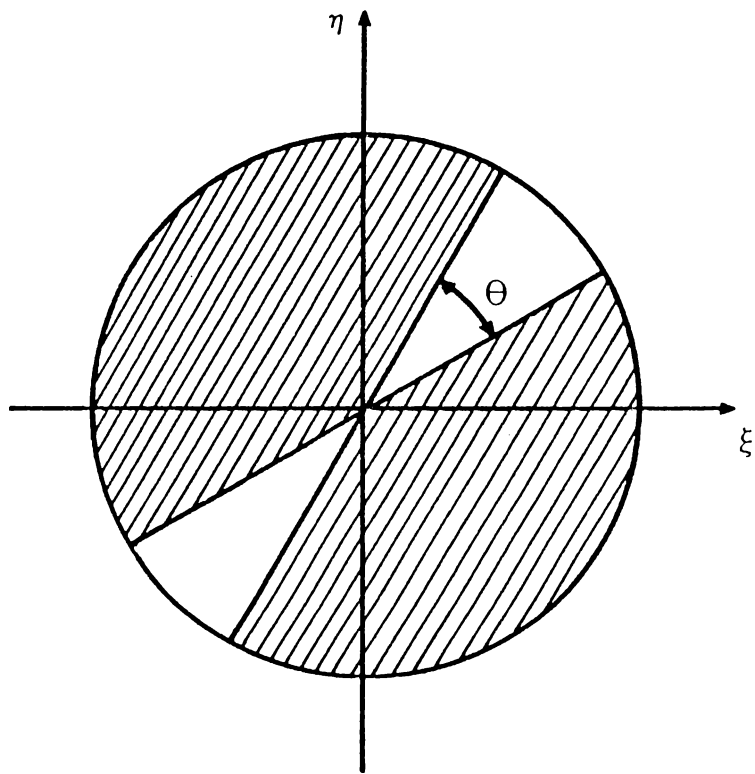


Figura II.8

Si se rota la pupila del sistema y se registra en el mismo medio un segundo diagrama de speckle, la información correspondiente será observada en un ángulo sólido diferente. Esta directividad angular permite seleccionar la información requerida y es de interés, además, que dentro de ese ángulo restringido la distribución luminosa sea uniforme. Por ello es preciso optimizar estas dos propiedades mediante un estudio pormenorizado de $G_I(u,v)$ en función del parámetro geométrico θ que caracteriza a la pupila del sistema.

La función de densidad de potencia espectral de un diagrama de speckle está dada por la expresión (2.64), pero puede ser escrita también de la siguiente manera:

$$G_I(u,v) = a \delta(u,v) + b \iint_{-\infty}^{\infty} |P(\xi - \lambda z_i u, \eta - \lambda z_i v)|^2 |P(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta \quad (2.66)$$

Donde z_i es la distancia imagen, a y b son constantes reales.

Si el análisis se restringe solamente a pupilas binarias, la ecuación (2.66) se puede expresar como:

$$G_I(u,v) = a \delta(u,v) + b P(\lambda z_i u, \lambda z_i v) \textcircled{*} P(\lambda z_i u, \lambda z_i v) \quad (2.67)$$

Donde el símbolo $\textcircled{*}$ denota la operación de autocorrelación, es decir

$$P(u,v) \textcircled{*} P(u,v) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(\xi, \eta) P(\xi - u, \eta - v) d\xi d\eta \quad (2.68)$$

Por lo tanto, el estudio de la función $G_I(u,v)$, aparte del término de orden cero ($a\delta(u,v)$), se limita al cálculo de la función de autocorrelación de la pupila del sistema.

La directividad espacial requiere un máximo secundario en la banda de frecuencias espaciales, mientras que la uniformidad requiere una forma suavizada de la función de autocorrelación dentro de esa banda.

Si u es el eje paralelo al bisector de ambos sectores circulares de la pupila, es de interés calcular la función dada por la ecuación (2.68) para $v = 0$.

En el Apéndice I se presenta un cálculo detallado de esta función de autocorrelación para los distintos valores, que entre 0° y 180° puede tomar el ángulo θ .

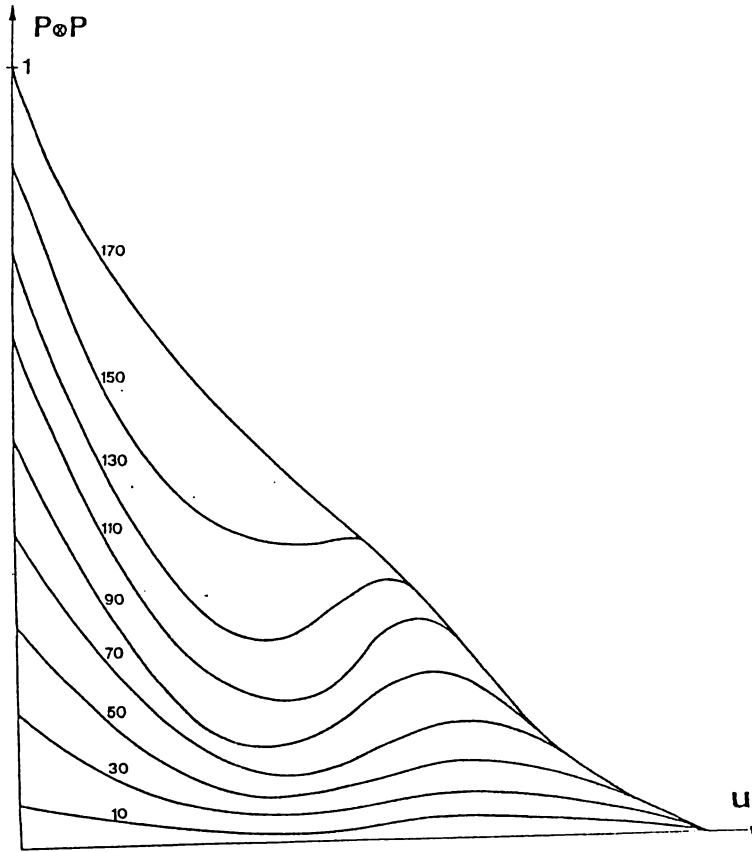
Los gráficos correspondientes se muestran en la Figura II.9.a y el análisis de los mismos permite elegir el ángulo θ más conveniente para optimizar las propiedades de difracción. Se observa que hay un compromiso entre la alta directividad espacial (altura del máximo secundario) y un buen grado de uniformidad (forma del máximo secundario). Para un ángulo θ entre 30° y 40° se logra una buena solución para los requerimientos opuestos de directividad y uniformidad.

También se ha calculado el producto de autocorrelación para el eje v , ortogonal a u , para cada valor de θ . Se ha tomado el origen en los máximos secundarios correspondientes a la expresión (2.68). El gráfico se muestra en la Figura II.9.b y se observa que la función de autocorrelación decrece en forma continua para el eje v y por lo tanto no presenta

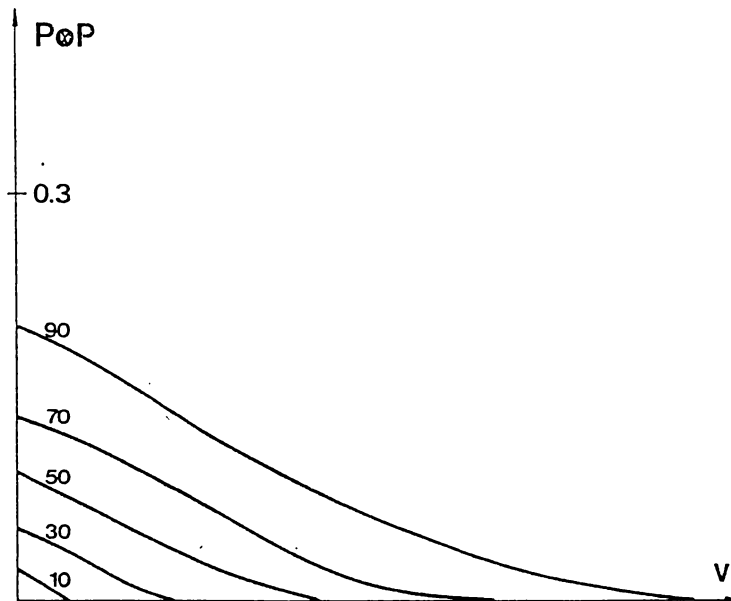
selectividad para ninguna frecuencia. Finalmente, la Figura II.9.c grafica la función de autocorrelación conjunta para ambos ejes simultáneamente, que corresponde a la expresión (2.68).

Se puede concluir, a partir de los gráficos II.9 que la distribución luminosa difractada por un diagrama de speckle almacenado con la pupila propuesta contiene efectivamente un rango restringido de frecuencias espaciales (selectividad angular) en un eje paralelo al bisector de ambos sectores circulares y dentro de ese rango se puede obtener una cierta uniformidad eligiendo adecuadamente el valor del ángulo θ de la pupila. La Figura II.10 muestra la transformada de Fourier del diagrama de speckle (densidad de potencia espectral) donde se observan las características de selectividad y uniformidad de los lóbulos de difracción.

En los capítulos siguientes se verá cómo se utilizan las mismas en distintas aplicaciones a la visión tridimensional y al procesamiento de imágenes.



(a)



(b)

Figura II.9

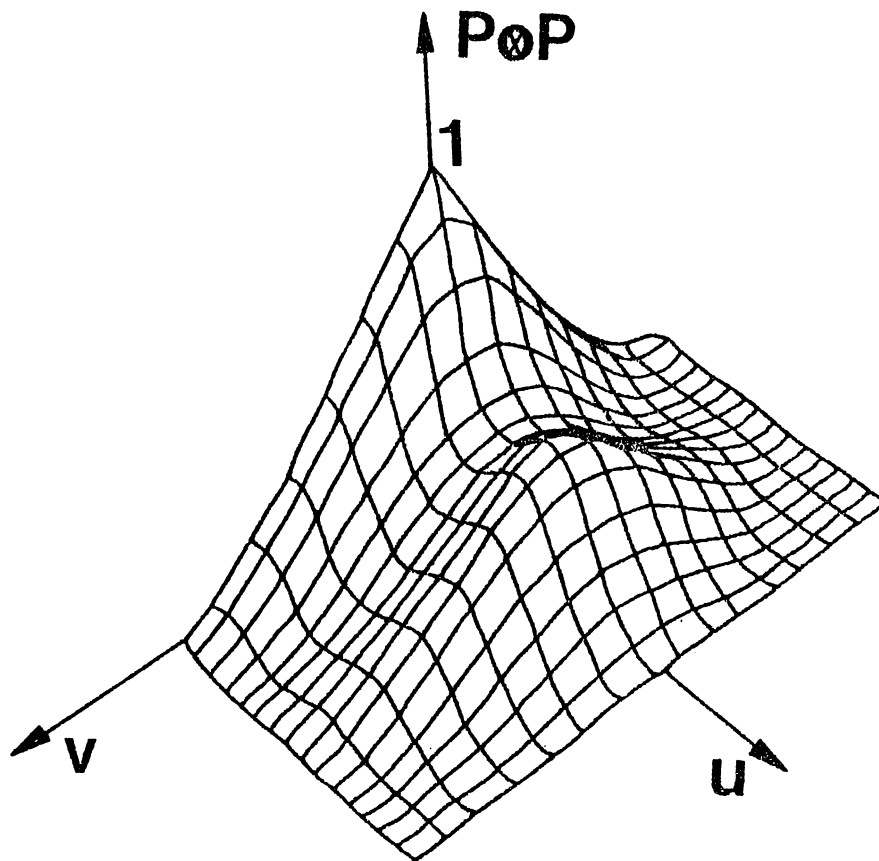


Figura II.9.c

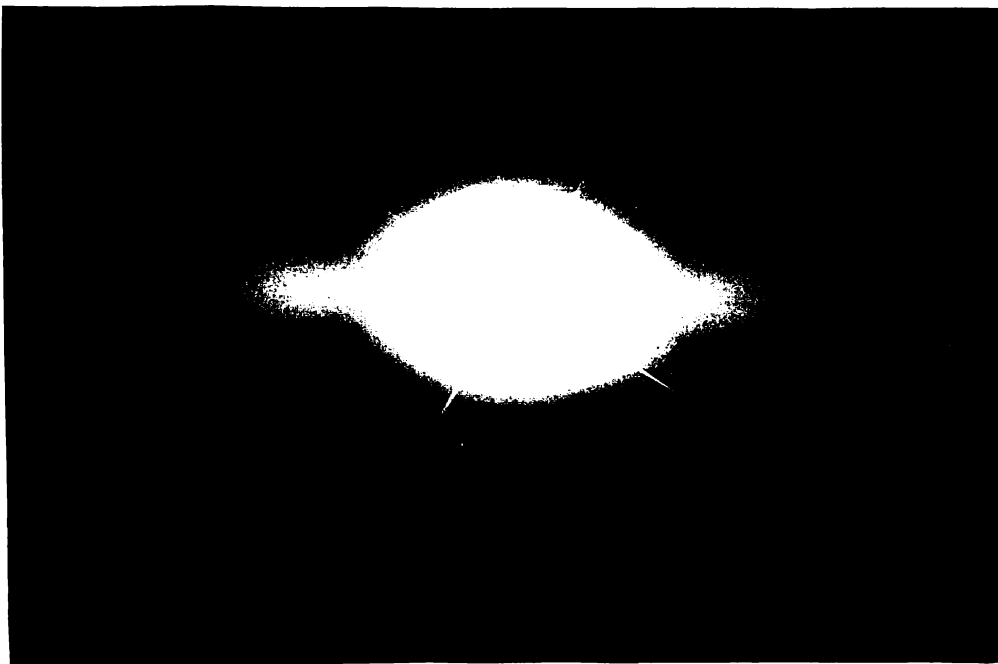


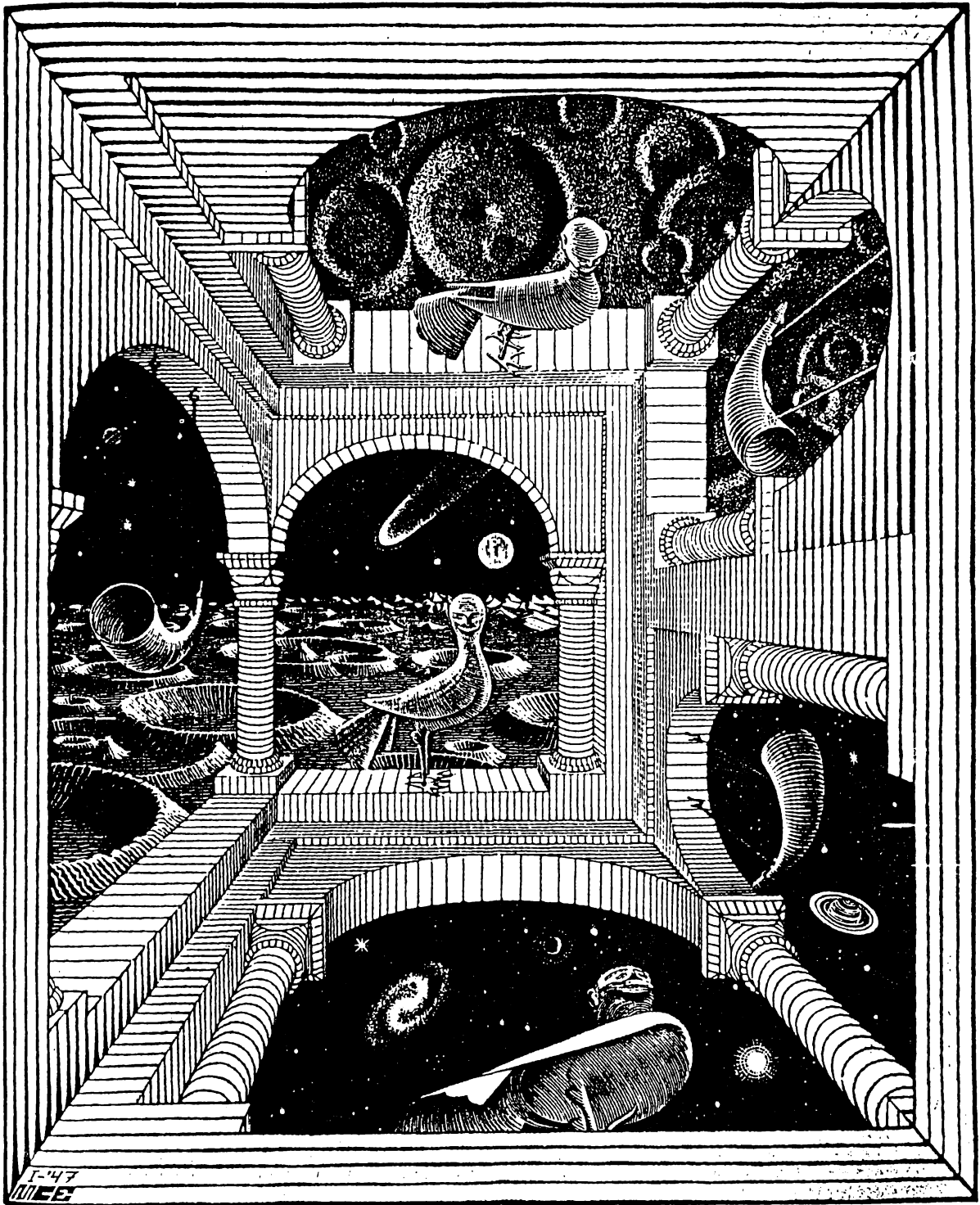
Figura II.10

REFERENCIAS

- II.1 J.C. Dainty (Ed). "Laser speckle and related phenomena". Springer-Verlag, Berlin, (1975) Introducción.
- II.2 D. Middleton. "Introduction to statistical communications theory". McGraw Hill, New York, (1960) p. 362.
- II.3 W.B. Davenport y W.L. Root. "Random signals and noise". McGraw Hill, New York, (1958) p.32.
- II.4 J.W. Goodman. En "Laser speckle and related phenomena". J.C. Dainty (Ed). Springer Verlag, Berlin, 1975 Cap. 2, p. 25.
- II.5 J.W. Goodman. Optics Communications 13, 244 (1975).
- II.6 I.S. Reed. IRE Trans. Information Theory. IT-8, 194 (1962)
- II.7 D.C. Murdoch. "Linear algebra for undergraduates". John Wiley and Sons, New York, (1957).
- II.8 E. Wolf. Nuovo Cimento, 13, 1165 (1959).
- II.9 R.C. Jones. J. Opt. Soc. Am., 31, 488 (1941).
- II.10 J.W. Goodman. En "Laser speckle and related phenomena". J.C. Dainty (Ed). Springer Verlag, Berlin, (1975) Cap. 2, p. 35.
- II.11 L.I. Goldfisher. J. Opt. Soc. Am., 55, 247 (1965).
- II.12 D. Middleton. "Introduction to statistical communications theory". McGraw Hill, New York, (1960) p. 141.

CAPITULO III

APLICACIONES A LA VISION TRIDIMENSIONAL



III.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presentan aplicaciones del speckle al fenómeno de la visión tridimensional, a fin de almacenar objetos 3-D en medios bidimensionales.

Desde la antigüedad han sido considerables los esfuerzos realizados para la obtención de este tipo de displays.

La primera y más trabajosa solución al problema 3-D ha sido la escultura, cuya historia se remonta a milenios. Posteriormente, el paso siguiente fue dado con el descubrimiento de las leyes de la perspectiva y su empleo por parte de los pintores del Renacimiento.

Recién en el siglo XIX se obtiene la primera imagen cuasi 3-D con la invención del estereoscopio por parte de Wheatstone. Ya en el siglo XX se han desarrollado varios métodos para producir verdaderas imágenes 3-D; los más importantes son debidos a Lippmann (III.1) y Gabor (III.2) quienes inventaron la fotografía integral y la holografía respectivamente.

Los displays 3-D tienen muchas aplicaciones útiles, entre las que merecen destacarse el control de tráfico aéreo, cirugía y terapia, tomografía, diseño de computadoras, televisión tridimensional, etc.

Aquí se detallan primeramente algunas de las características importantes de la fisiología del sistema visual y se analiza en forma comparativa los distintos displays 3-D de tipo holográficos y no holográficos ya conocidos en la literatura. Luego se proponen varios métodos utilizando diagramas de speckle

orientados que permiten almacenar en un medio de registro bidimensional, diversas perspectivas de una escena y reconstruir posteriormente las características tridimensionales de la misma. Finalmente se presenta un estudio comparado del contenido de información y los requerimientos de almacenamiento entre un holograma y un estereograma speckle de múltiples exposiciones.

III.2 PERCEPCION DE IMAGENES 3-D (III.3-4)

El ser humano vive y desarrolla sus actividades en un mundo tridimensional. Sin embargo, es sorprendente que el sentido principal con que cuenta para percibirlo sea el de la vista, cuyo sistema de detección (las retinas de los ojos) es de naturaleza bidimensional.

La percepción tridimensional del mundo externo implica la detección y fijación de los objetos, su ubicación relativa y la observación de profundidad. Para ello, el sistema visual posee variados y complejos mecanismos que incluyen los aspectos objetivos de la formación de imágenes en la retina mediante el sistema óptico de los ojos y los aspectos subjetivos a través de procesos psicofísicos más profundos que involucran al cerebro y la memoria.

Algunos de los mecanismos subjetivos más evidentes están relacionados con la experiencia adquirida. Por ejemplo, se conoce el tamaño y forma de muchos objetos cotidianos, por lo tanto, si se los observa más pequeños de lo que son, se atribuye la diferencia a la distancia a la cual están ubicados. Se sabe también que si un objeto oculta a otro, o parte de él, es porque está más cerca. Las sombras proyectadas son otro indicio de profundidad relativa, así como el hecho que objetos lejanos muestran bordes brumosos y colores poco saturados.

Mecanismos objetivos importantes de percepción 3-D son las llamadas "pistas monoculares" obtenidas a partir de las

imágenes registradas en la retina de un solo ojo, entre ellas se debe mencionar la acomodación del cristalino para permitir un enfoque correcto del objeto; las variaciones de perspectiva que se producen cuando el ojo sufre un movimiento voluntario o involuntario; la variación de posición de los objetos que se desplazan, etc.

Sin embargo, para la mayoría de las personas, la visión binocular es el principal mecanismo que determina que el mundo sea percibido tridimensional y que puedan apreciarse correctamente diferencias de profundidad entre dos objetos o entre distintos puntos de un mismo objeto. Inclusive, si se cumplen las condiciones de visión binocular, un objeto puede percibirse en tres dimensiones aún si no se satisfacen algunos o todos los requerimientos de percepción monocular antes mencionados.

La visión binocular está fundada en el hecho que el sistema visual está compuesto por dos ojos separados entre sí una distancia aproximada de 65 mm; por lo tanto, cuando se observa un objeto, convergen los ejes ópticos de ambos ojos en un punto del mismo llamado punto de fijación. En esas condiciones, la retina de cada ojo registra una perspectiva diferente del objeto y las dos imágenes bidimensionales distintas suscitan en el cerebro una impresión espacial de la escena. En la Figura III.1 se puede observar que el sistema visual dispone de dos perspectivas levemente rotadas del mismo objeto y esta información es suficiente para determinar la profundidad de los puntos respecto del punto de fijación mediante un procedimiento similar al que en agrimensura se conoce como triangula-

ción, o que en geometría equivale a calcular la altura de un triángulo conociendo uno de sus lados (la distancia interocular) y los ángulos adyacentes a dicho lado.

El hecho que se pierde la sensación de espacio y distancia cuando se observa con un solo ojo puede ilustrarse con claridad con un ejemplo simple: se quiere poner en contacto la punta de un lápiz sostenido por la mano izquierda con otro sostenido por la mano derecha. Si ambos ojos están abiertos, se lo puede conseguir sin ninguna dificultad, en cambio, al cerrar un ojo desaparece el sentido de profundidad de modo que el error de estimación en la distancia puede a menudo exceder el centímetro.

Cuando al objeto se lo observa desde una distancia muy grande, los ejes ópticos son casi paralelos y ambas proyecciones sobre la retina son idénticas de forma que desaparecen las diferencias entre las imágenes; por consiguiente, aunque se lo mire con dos ojos, la escena es plana. Por el mismo motivo, la luna se ve como un disco chato y no como una esfera.

La distancia a la cual se observa un objeto desempeña un papel importante para la percepción de profundidad; cuanto mayor es la convergencia de los ejes ópticos (menor distancia) se puede comprender mejor la "espacialidad" de un objeto.

Utilizando la Figura III.2 es posible estudiar con más detalle la fisiología de la visión binocular.

En el mecanismo de observación, ambos ojos convergen en un punto de fijación representado por K. Su imagen, K', se localiza sobre cada una de las foveas cuya superficie, de aproximadamente 1,5 mm de diámetro, es la zona de la retina que pre-

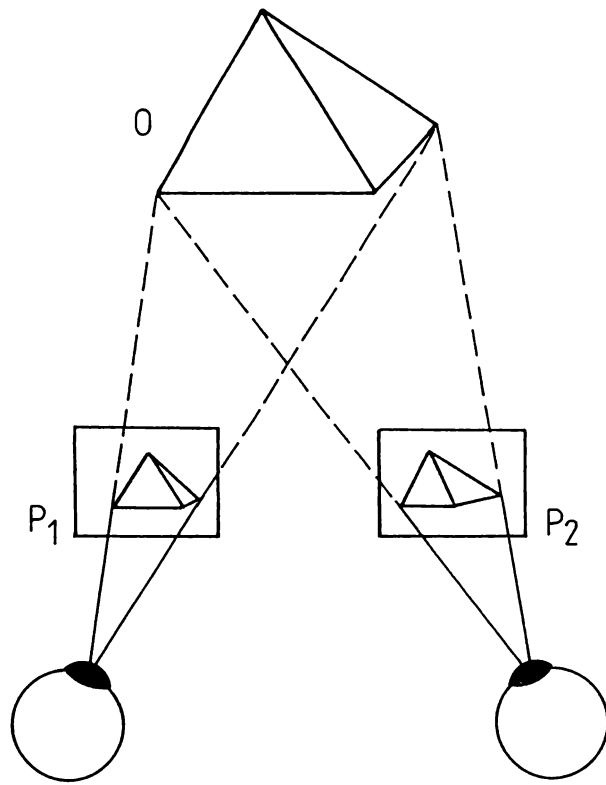


Figura III.1

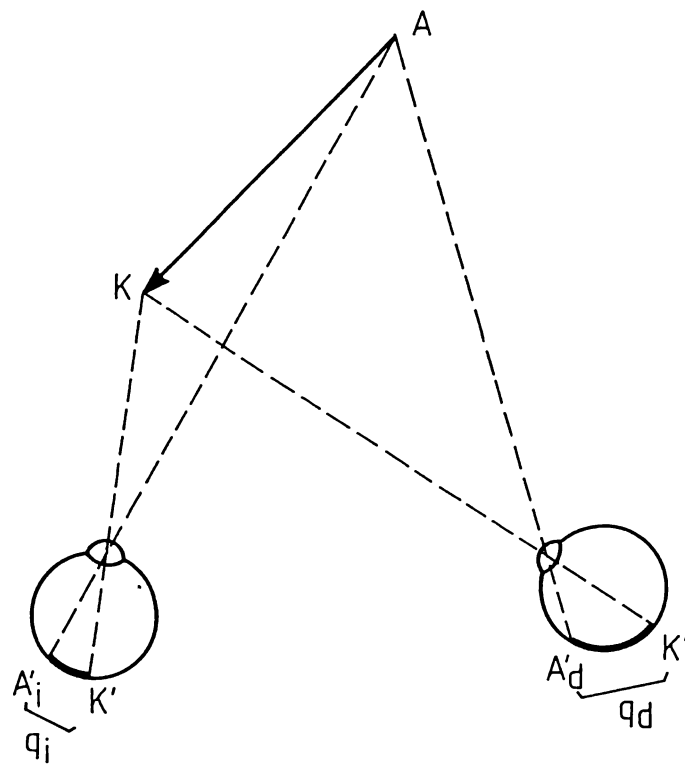


Figura III.2

senta la máxima sensibilidad para la resolución de detalles y colores.

Según muestra la figura, los puntos restantes del objeto forman imagen a la izquierda o a la derecha de la fovea, en particular el punto A tiene como imagen a A'_d en el ojo derecho y a A'_i en el izquierdo.

De acuerdo a la ubicación relativa de K y A en el objeto habrá una cierta separación angular en sus respectivas imágenes sobre la retina. Dicha distancia entre A_d y K' y A_i y K' se mide en segundos o minutos de arco y se designa como disparidad transversal q_d para el ojo derecho y q_i para el izquierdo respectivamente. Pero, a los efectos de la visión binocular, la magnitud que tiene verdadera importancia es la disparidad o paralaje binocular, q_{eff} , definida como la suma de los valores individuales q_i y q_d .

De la figura se obtiene que:

$$q_{eff} = -q_i + q_d \quad (3.1)$$

Donde se ha considerado que las disparidades transversales "nasales" tienen signo positivo y las dirigidas hacia las sienas signo negativo.

La importancia del valor de q_{eff} radica en el siguiente hecho: dado el punto de fijación, aquellos otros puntos del espacio cuya imagen son los puntos correspondientes de la retina con disparidad cero pueden ser fundidos en una imagen única, mientras que los restantes aparecerán dobles. El lugar geomé-

trico de los puntos del espacio que cumplen esta condición es una superficie curva llamada horóptero y en principio, los objetos situados en ella serán percibidos en una imagen única, los que estén fuera se verán dobles (diplopia).

Sin embargo, la fisiología del sistema visual permite fundir puntos que tengan disparidad pequeña distinta de cero, debido a que las celdas receptoras dentro de un arco pequeño en la retina de un ojo corresponden a celdas equivalentes en el otro. Esta correspondencia entre zonas de las retinas no es un aspecto puramente geométrico y puede ser alterado en distintas circunstancias si cambia el objeto o las características de observación (adaptación, iluminación, contraste, etc.) (III.5). Las áreas de puntos correspondientes miden alrededor de 6 minutos de arco en el centro de la fóvea y se incrementan a 30 minutos de arco en la periferia.

Aquellos puntos del espacio cuyas imágenes están en zonas correspondientes de las retinas, forman la denominada zona de Panum, la cual aumenta su extensión con la distancia desde los ojos.

Por lo tanto, elegido el punto de fijación, aquellos otros puntos representados en la Figura III.3 situados en el horóptero o en la zona de Panum pueden fundirse en una imagen única, siendo la disparidad entre las imágenes de ambas retinas el estímulo necesario y suficiente para la experiencia estereoscópica de detectar diferencias de profundidad entre dos objetos ubicados en la zona de Panum. Los objetos que estén fuera de este lugar geométrico no pueden fundirse y aparecen dobles.

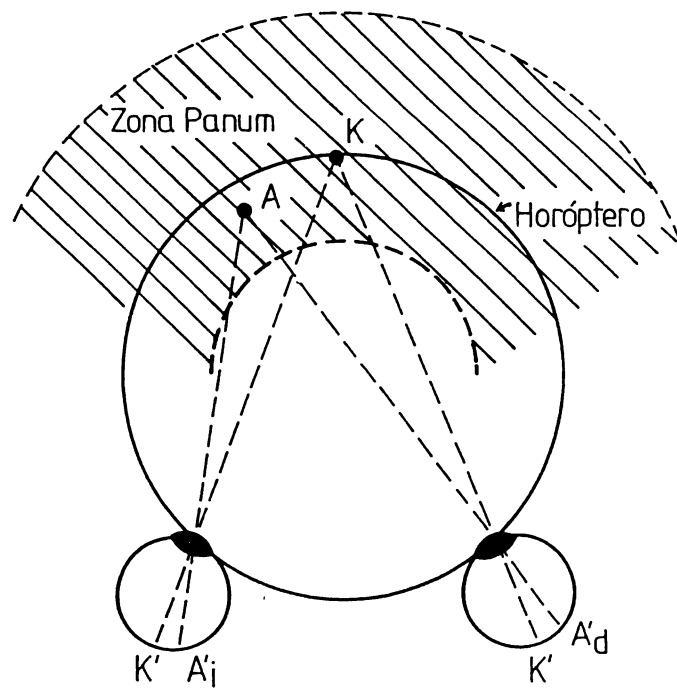


Figura III.3

Estos conceptos se demuestran fácilmente considerando dos objetos situados por ejemplo a 30 cm y a 2 m de los ojos; si se fija la vista en el más cercano, el otro aparecerá doble y viceversa.

Una magnitud de interés es el límite en la concepción de profundidad provista por la visión binocular.

El espesor reconocible de un objeto está sujeto a ciertos valores mínimos, los cuales crecen rápidamente con el aumento de la distancia desde los ojos.

Para apreciar la profundidad de un cuerpo binocularmente, la disparidad no puede superar ciertas cantidades. Por ejemplo, para una distancia de observación de 25 cm la diferencia de profundidades distinguibles es del orden de 0,3 mm; para una distancia de 20 m, la precisión es sólo 50 cm. Las profundidades menores ya no son reconocibles o muy inseguras.

Por el contrario, para una distancia de 25 cm, un objeto no deberá tener un espesor mayor de 4,7 cm para no ser visto doble. Esta función crece rápidamente con la distancia, de forma que para 1,5 m, aún los objetos con una profundidad de 23,5 cm pueden fundirse en una imagen única.

Todas las cantidades mencionadas no son absolutas y únicas, sino valores fisiológicos promedio que varían de una persona a otra.

Se debe tener en cuenta que uno de los mecanismos subjetivos más importantes para lograr percepción tridimensional es la familiaridad con el objeto observado.

Existen ejemplos en los que no se cumplen ninguna de las

condiciones enumeradas, incluida la visión estereoscópica y aún así se alcanza a percibir 3-D porque la familiaridad con la escena domina sobre las otras características de la visión. De todos modos, la fisiología de la visión 3-D no es totalmente conocida y continúa siendo un tema de investigación abierto.

Es importante notar que a pesar de todos los mecanismos con que cuenta el sistema visual, no es posible en todas las circunstancias deducir la verdadera estructura tridimensional de un objeto. Esto se debe básicamente a que los datos registrados en las retinas son bidimensionales y por lo tanto, la información que dispone el cerebro es incompleta. Algunas de las ilusiones ópticas sirven para ilustrar esta carencia del sistema visual, por ejemplo, los dibujos de Escher que se muestran en esta tesis.

En realidad, las imágenes tridimensionales contienen menor información que el objeto tridimensional, ya que la transformación que hace que un objeto 3-D sea "mapeado" en un medio de registro 2-D (retina, placa fotográfica) no es única ni es reversible. Por ejemplo, si se obtiene un holograma de una onda plana, es imposible determinar si esta proviene de una fuente luminosa ubicada en el infinito o si esta se ubica en el foco de una lente.

III.3 TECNICAS DE DISPLAY 3-D

La visión binocular es el indicio más importante para percibir la sensación estereoscópica de tridimensionalidad. Es por ello que desde el siglo XIX, varios dispositivos han sido inventados para almacenar la información de un objeto 3-D en un medio de registro 2-D en las condiciones de visión binocular.

Uno de los más conocidos es el "estereoscopio" inventado por Wheatstone, que consiste en un sistema de espejos y lentes que permite que cada ojo observe una sola de las dos fotografías, formándose así un "par estereoscópico". Estas fotografías se obtienen mediante dos cámaras que registran una escena tridimensional desde dos ángulos diferentes, simulando la visión binocular, de la misma manera como si en la Figura II.1 se reemplazaran los ojos por cámaras fotográficas.

En general, las técnicas empleadas tienen una característica común y es que la información se encuentra almacenada en el registro en forma de "multiplexing". El término multiplexing proviene de la ingeniería de las comunicaciones y se emplea por ejemplo en telefonía, donde varios mensajes son transmitidos al mismo tiempo por un único cable. Los diferentes mensajes pueden ser enviados si cada uno es identificado con una frecuencia portadora específica que permite decodificarlos al final de la línea.

Desde el punto de vista óptico, la idea es similar. En este caso se almacenan varias imágenes en la misma área de

un film de registro, donde la imagen correspondiente al ojo derecho está codificada con una frecuencia portadora verde y la correspondiente al ojo izquierdo por una frecuencia portadora roja. Un par de anteojos con filtros verde y rojo actúa como sistema demodulador, reconstruyendo el display tridimensional.

El display 3-D será mejor cuanto mayor sea el grado de multiplexing que tenga; en el caso de las cartas postales estereoscópicas que utilizan lentillas cilíndricas en el material de registro, tienen típicamente cinco pares estereoscópicos diferentes del objeto. Por supuesto, si el grado de multiplexing se incrementa, hay que pagar un precio en términos de la capacidad de almacenamiento, la resolución del material de registro debe ser alta y se vuelven más dificultosos los problemas prácticos de ajuste.

Las técnicas de display 3-D pueden ser de naturaleza diferente y es conveniente hacer una clasificación comparativa.

III.4 CLASIFICACION DE DISPLAYS 3-D

III.4.1 Multiplexing en color o polarización

A este tipo de multiplexing corresponde el ejemplo mencionado anteriormente, donde dos colores diferentes o dos estados de polarización lineal perpendiculares actúan como "frecuencia portadora" y pueden ser usados para presentar o transmitir imágenes binoculares en una película o en un televisor estereoscópico. Esta técnica es sencilla y económica comparada con otros displays 3-D. Sin embargo, tiene algunas limitaciones importantes: la información registrada es únicamente en profundidad, perdiéndose otras características de la visión tridimensional; por ejemplo, si el observador se mueve, la imagen no cambia de la misma manera que los objetos 3-D (defecto plástico). Además, una de cada seis personas no perciben efecto estereoscópico debido a que uno de sus ojos es dominante y por lo tanto siempre prevalece una imagen sobre la otra.

III.4.2 Multiplexing en tiempo

La idea común a este tipo de técnicas es la utilización de la persistencia de las imágenes en la retina, alrededor de 1/25 seg, para reproducir secuencialmente dentro de esa constante de tiempo, diferentes "capas" bidimensionales de un objeto 3-D situadas a distintas profundidades.

Se emplea un haz luminoso para direccionar cada elemento

de volumen del objeto dentro de un cierto display de volumen. Varios investigadores han propuesto técnicas de esta clase, utilizando espejos móviles (III.6), espejos varifocales (III.7), pantallas dispersoras móviles (III.8).

La principal desventaja inherente a todos estos métodos es que las imágenes 3-D son transparentes, no es posible obtener imágenes opacas. Por otra parte, la adquisición de datos presenta un problema técnico; con el objeto de evitar "flickering" (saltos entre imágenes sucesivas), la imagen completa debe ser dada alrededor de 30 veces por segundo. Si esta imagen está constituida por 10^5 - 10^6 elementos de volumen que emiten luz, entonces se debe transmitir 10^6 - 10^7 elementos de imagen por segundo y si bien es posible disponer de transductores electroópticos y deflectores de luz apropiados, la tecnología para emplearlos es complicada.

III.4.3 Multiplexing en espacio o dirección

Las técnicas aquí consideradas poseen una idea común que es la de componer una imagen 3-D a partir de planos del objeto situados a distintas profundidades, o bien distintas perspectivas del mismo, similarmente a los conceptos empleados para multiplexing en tiempo, pero en este caso el display trabaja en forma simultánea, no secuencialmente como en el caso anterior.

Un dispositivo muy simple emplea varios "divisores de haz" para combinar las intensidades de las imágenes en planos

situados a distinta profundidad (III.9).

Los métodos más importantes son los conocidos como "display de imágenes múltiples"; éstos combinan varias imágenes de la escena 3-D tomadas desde diferentes ángulos de observación, las múltiples imágenes son registradas con una cámara fotográfica que puede moverse para tomar distintas perspectivas. Ejemplo de esta técnica es la fotografía integral de Lippmann (III.1), la cual es el primer paso de la "holocoder imaging" (III.10). También pueden utilizarse varias cámaras; es el caso de los displays de tipo proyección (III.11). Otra técnica utiliza láminas lenticulares (III.11), particularmente para cartas postales 3-D.

En este contexto, se presenta un problema muy interesante; la fotografía integral, la lámina lenticular y los displays de proyección forman imágenes reales con una inversión de profundidad (imágenes pseudoscópicas). Es necesario, por lo tanto, un transductor que pase de imágenes pseudoscópicas a ortoscópicas. Esta operación puede ser realizada en principio mediante conjugación de fase, pero este método no es muy útil en la práctica. Usualmente se emplean pantallas autocolimadas (retroreflectivas) (III.12), fotografías integrales secundarias e imagen gemela de un holograma (III.13). También se utilizan pantallas de proyección unidireccional (III.14) aunque en este caso no se conserva el paralaje vertical.

En las secciones siguientes se propondrán métodos de multiplexing en espacio basados en las propiedades de difracción de diagramas de speckle modulados.

III.4.4 Reconstrucción del frente de onda: holografía

Desde que fue inventada por D. Gabor (III.2) en 1948, la holografía se ha convertido en el método más usual y exitoso de todos los empleados para displays tridimensionales. Esta técnica consiste en un registro simultáneo de las ondas luminosas provenientes del objeto y una onda de referencia coherente, lo cual produce sobre la placa diagramas de interferencia. De esta forma, el holograma contiene información de amplitud y fase del frente de onda del objeto, que puede ser reconstruido a través de un proceso de difracción sobre la placa holográfica.

En los últimos años, luego de la invención del holograma con haz de referencia fuera de eje debido a Leith y Upatniek en 1962 (III.15) se han desarrollado distintos tipos de hologramas (III.13): planares, de volumen, holocoder y con contenido de información reducida (sin paralaje vertical) tales como los estereogramas holográficos. También se han realizado muchos esfuerzos para sintetizar frentes de onda por computadora (III.16) y estereogramas holográficos generados por computadora (III.17-18).

A pesar que el holograma reconstruye un frente de onda como si proviniera del objeto, no hay una correspondencia única entre ambos, por lo tanto, un dado frente de onda puede estar asociado a distintos objetos. Un observador puede reconocer una imagen 3-D a través del holograma, pero un conocimiento a priori del procesamiento de imágenes en el cerebro suplementa la información adicional para producir visión 3-D.

Normalmente, la cantidad de información almacenada en un holograma es muy grande, sin embargo, teniendo en cuenta

las diversas características distintivas del sistema visual humano (tamaño finito de la pupila del ojo, aberraciones, etc.) se necesita mucha menos para originar percepción 3-D. En síntesis, la información debe estar relacionada con las características de la visión 3-D que se quiera observar. Por ejemplo, si se requiere solamente percepción de profundidad, las técnicas estereoscópicas proveen un display 3-D adecuado.

Si se quiere percibir una imagen 3-D más real, donde además de profundidad se observe variación de perspectiva, se requiere un alto grado de multiplexing. De este modo, la distribución luminosa que emerge de un dado registro de multiplexing puede ser considerado como una versión "muestreada" del frente de onda que sería necesario almacenar en un holograma con el objeto de obtener una imagen 3-D completa.

Si la "razón de muestreo" está más allá de la discriminación del sistema visual, la cantidad de información almacenada en el multiplexing, a pesar de ser menor que la contenida en el holograma, es aún suficiente para originar una imagen 3-D "vívida".

III.5 ESTEREOGRAMAS UTILIZANDO SPECKLE COMO PORTADORA

En la Sección III.2 se han descrito los mecanismos que contribuyen a la percepción tridimensional y a la localización de los objetos. El más importante es el paralaje horizontal introducido por la visión binocular y en general se utiliza esta propiedad para desarrollar dispositivos que reproduzcan la sensación de tres dimensiones en medios de registro bidimensionales.

Estos registros se llaman genéricamente estereogramas y difieren entre sí en el sistema óptico empleado para producir la directividad adecuada de manera que el ojo derecho pueda observar una imagen y el ojo izquierdo la otra imagen de un par estereoscópico.

En esta Sección se propone un método simple para obtener estereogramas donde la directividad es proporcionada por la difracción de luz blanca en un registro de speckles modulados.

El diagrama de speckle es producido usando luz coherente (laser) y un sistema óptico cuya pupila consiste en dos sectores circulares opuestos por su vértice común. Un esquema del sistema óptico se muestra en la Figura III.4. Luego, el registro de speckle contiene un cierto rango restrictivo de componentes espectrales, de forma tal que si este diagrama es iluminado con una fuente de luz blanca, solo puede ser observado en un ángulo sólido restringido, produciendo la requerida directividad.

Si dos imágenes correspondientes a puntos de vista distin-

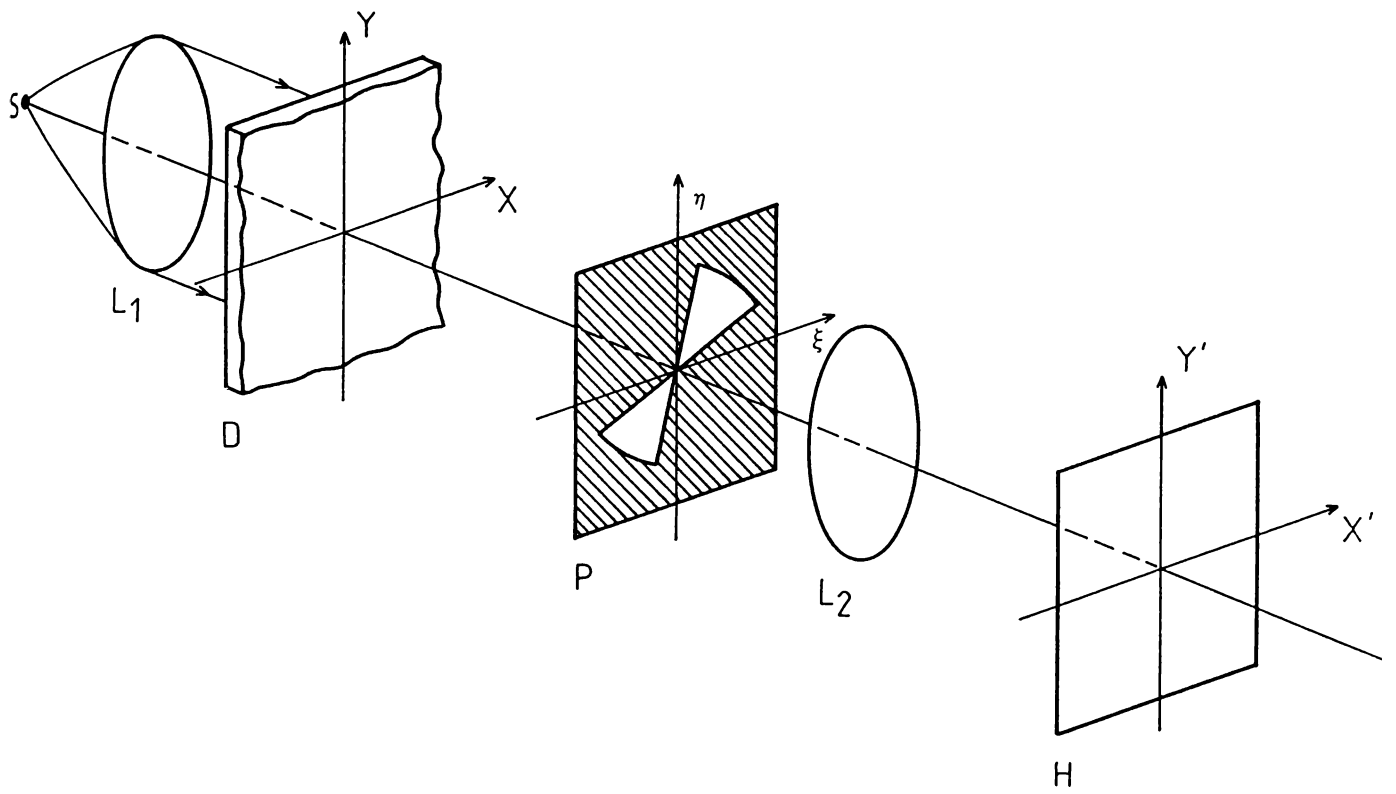


Figura III.4

tos de una escena o de un objeto tridimensional simple son registrados en un único medio con orientaciones diferentes de la pupila, la placa contiene dos diagramas de speckle cada uno con una imagen del objeto que puede ser observada en forma independiente por cada ojo en el proceso de reconstrucción.

El ángulo de rotación de la pupila debe ser tal que reproduzca las condiciones de estereoscopia, es decir, que a una cierta distancia, cada ojo observe la imagen que corresponde a la escena 3-D a esa distancia.

El almacenamiento de diversas imágenes, codificadas a través de diagramas de speckle orientados y la subsiguiente reconstrucción independiente fue sugerida originariamente por Kopf (III.19), quien empleó una ranura como pupila del sistema óptico coherente. De esta manera se obtiene una alta directividad espacial en el proceso de reconstrucción y se evitan imágenes espúreas.

Sin embargo, para los propósitos del display 3-D no es deseable tan alta directividad espacial, ya que esto significa que cada imagen almacenada puede ser observada solamente en una región muy restringida, limitando el uso del multiplexing como sistema estereoscópico.

Por ello se necesita una pupila más eficiente, ya que el diagrama de speckle modulado espacialmente debe preservar un cierto grado de directividad espacial para la luz difractada, pero además la distribución de luz debe tener un mejor grado de uniformidad. Un compromiso entre ambas condiciones opuestas permiten observar cada imagen registrada en forma

independiente y en un ángulo sólido mayor.

En la Sección II.4.3 se analizaron las propiedades de difracción de la pupila formada por dos sectores circulares opuestos y se comprobó que cumple perfectamente estos requerimientos.

Del análisis de los gráficos II.9 surge que la directividad requiere un máximo secundario en la banda de frecuencias espaciales, mientras que la uniformidad implica una forma suavizada de la función de autocorrelación dentro de esa banda.

Para incrementar la uniformidad de la banda desplazada de frecuencias, es más conveniente iluminar el registro con una fuente extendida incoherente. Así, cada punto de la fuente da lugar a distribuciones de luz semejantes, pero desplazadas que se suman en intensidad, resultando un diagrama luminoso que permite observar por difracción la imagen registrada desde una región espacial más amplia, o por otro lado, observar desde una misma región una imagen grande.

Método experimental

Uno de los distintos métodos empleados para registrar estereogramas se muestra en la Figura III.5.

Una fuente laser de HeNe expandido ilumina un objeto 3-D. y se realizan dos registros de la misma escena sobre el mismo medio fotosensitivo, en este caso película AGFA 10E75. La cámara fotográfica C es desplazada una distancia $\Delta \sim 7$ cm entre ambas exposiciones y la pupila es rotada un ángulo $\alpha = 60^\circ$. De esta

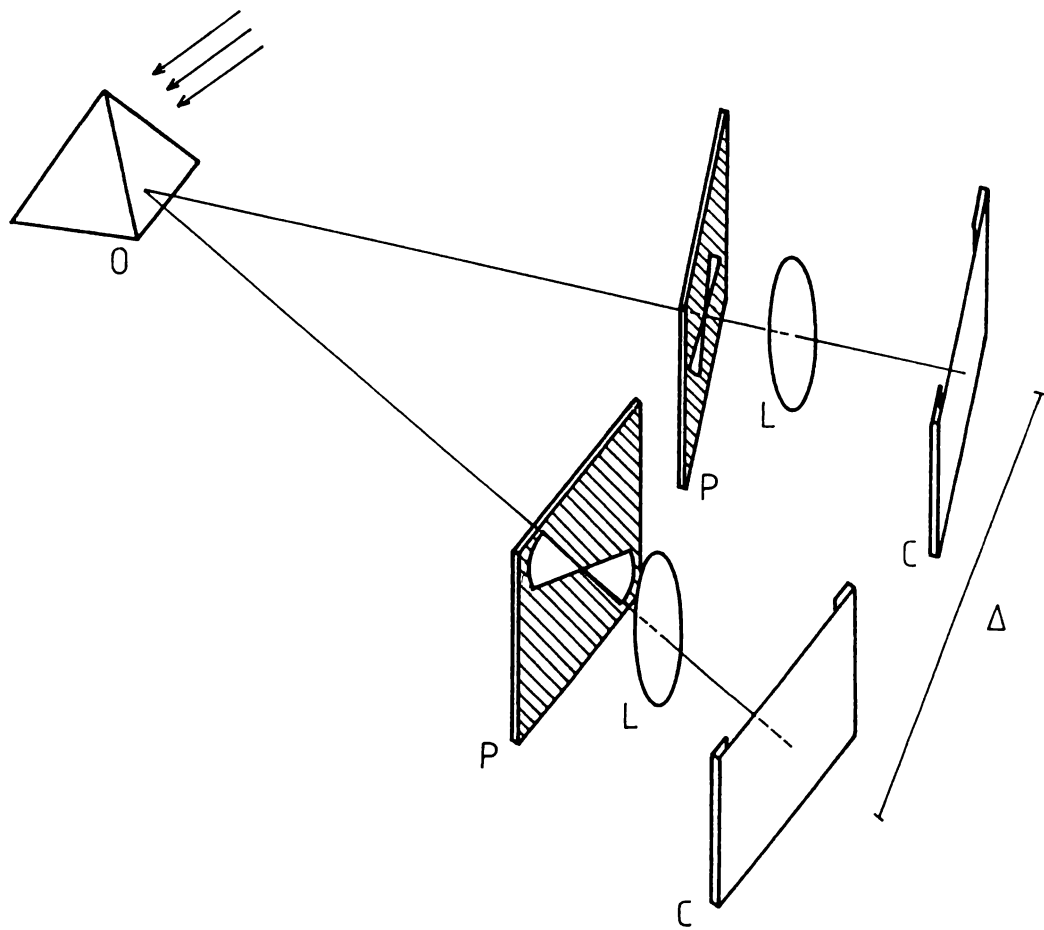


Figura III.5

manera, el estereograma puede ser observado desde una distancia aproximada de 30 cm.

Después de revelada, la eficiencia de difracción de la placa es bastante baja, pero puede ser mejorada sensiblemente sometiendo a la misma a un proceso de blanqueado.

El efecto estereoscópico puede ser realizado o disminuído variando Δ , y la imagen 3-D puede ser localizada por delante o por detrás de la placa eligiendo un punto de la escena y éste puesto en coincidencia con su homólogo en la siguiente exposición. El punto seleccionado aparece en el plano del estereograma y todos los demás aparecen delante o detrás del plano de acuerdo a su posición relativa en el objeto. Además, cada estereograma da lugar a una imagen ortoscópica y una pseudoscópica, dependiendo de qué lado del orden cero sea observado.

El método es fácil de implementar, no es caro y permite almacenar varios puntos de vista del objeto, dependiendo del rango dinámico del material fotosensitivo empleado. Asimismo, no es necesaria ninguna estabilidad mecánica especial durante las exposiciones y la observación puede ser hecha sin ningún dispositivo óptico.

Por otra parte, es posible emplear la geometría de Fresnel si se tienen dos transparencias que constituyan un par estereoscópico. En este caso, el speckle está producido por la propagación libre desde un difusor limitado por una apertura $P(\xi, \eta)$ hasta el plano (x', y') como se observa en la Figura III.6.

De esta manera, un registro de intensidad del diagrama

de speckle en (x',y') tiene un contenido espectral dado por la ecuación (2.68).

El registro se obtiene, en doble exposición, mediante copias por contacto de las transparencias sobre la película con orientación diferente de la pupila en cada exposición.

Una ventaja de este método es que se pueden obtener fácilmente aperturas numéricas altas, sin embargo, es necesario un cuidadoso posicionamiento de las transparencias.

El tamaño de la imagen en el estereograma depende de la máxima frecuencia espacial que pueda resolver el medio de registro. Si estas frecuencias no son muy altas (en esta experiencia, alrededor de 500 ciclos/mm), los estereogramas pueden ser copiados fácilmente por contacto utilizando luz laser o también con una ampliadora fotográfica común.

Por lo tanto, es posible obtener transparencias moduladas espacialmente mediante copias por contacto con un master que contiene un diagrama de speckles orientados. El master se obtiene utilizando luz laser en un sistema óptico similar al de la Figura III.4 y luego los estereogramas pueden ser registrados con el equipamiento usual de un laboratorio fotográfico.

En la Figura III.7 se muestran dos imágenes correspondientes a un par estereoscópico, que fueron reconstruidas a partir de un estereograma obtenido con la geometría de la Figura III.5.

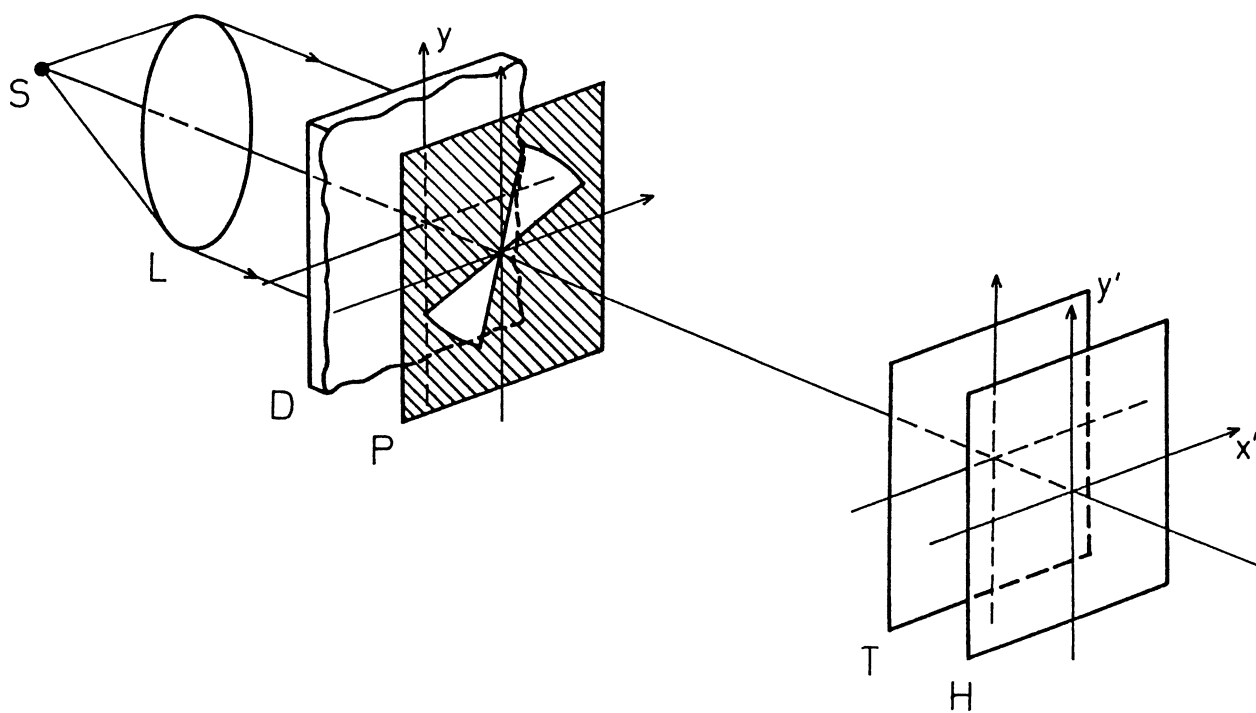


Figura III.6



Figura III.7

III.6 DISPLAY 3-D POR MEDIO DE ESTEREOGRAMAS CON PARALAJE HORIZONTAL VARIABLE (0.4)

III.6.1 Introducción

En general, los display 3-D involucran un cierto grado de multiplexing. En el caso del par estereoscópico simple, se puede decir que tiene asociado un "grado dos de multiplexing" pero si se quiere percibir una imagen tridimensional más "vívida", donde además de profundidad se detecte una variación continua de perspectiva, se requiere un grado de multiplexing mayor.

En la Sección anterior se propone un método para la obtención de estereogramas donde se utiliza un diagrama de speckle con el objeto de lograr directividad y uniformidad espacial en el proceso de reconstrucción. De esta manera se tiene una imagen 3-D con percepción de profundidad.

Sin embargo, es posible generalizar el método para percibir una imagen 3-D con variación de perspectiva y para ello es necesario almacenar una gran cantidad de información en el multiplexing.

Con este propósito, se describe aquí una técnica basada en una mejor modulación espacial de los diagramas de speckle. Se analizan las propiedades de un registro de multiplexing de "grado N", siendo N un número suficientemente grande para evitar efectos de "saltos" entre imágenes, pero no tanto como para originar superposiciones espúreas entre haces difractados asociados a perspectivas sucesivas del objeto. Por supuesto,

la capacidad de almacenamiento del medio fotosensitivo empleado para el registro también establece un límite superior en el número máximo N de perspectivas diferentes del objeto que pueden ser seleccionadas.

III.6.2 Dispositivo experimental

El dispositivo experimental para obtener el multiplexing se muestra en la Figura III.8.

Un objeto tridimensional es iluminado por un haz coherente y se registran secuencialmente varias perspectivas del mismo en la misma placa fotográfica, mediante un traslado del sistema óptico o una rotación del objeto. En cada caso, la exposición se realiza con una orientación angular diferente de la pupila.

Con el objeto de codificar las imágenes en forma adecuada para reproducir las condiciones de estereoscopia, la rotación de la pupila debe estar sincronizada con el movimiento de la escena. Para ello se utiliza un motor paso a paso para registrar N imágenes sucesivas correspondientes a una variación cuasi-continua de perspectiva.

El sincronismo entre la orientación de la pupila y los puntos de vista del objeto debe ser dado de manera que en el proceso de reconstrucción se cumplan las siguientes características de difracción:

- . Para una cierta localización fija, el observador ve solo un par de imágenes estereoscópicas.

- . El movimiento lateral continuo del observador le

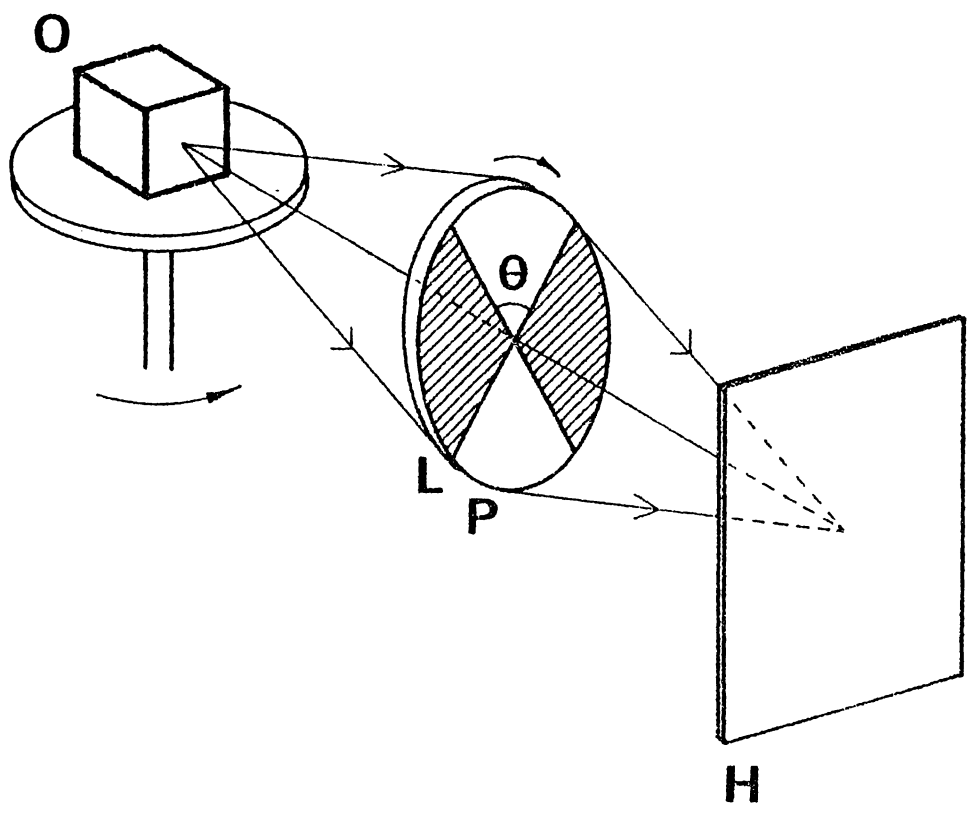


Figura III.8

permite intersecar diferentes lóbulos de difracción (Figura III.9.b) y percibir diferentes pares de imágenes estereoscópicas correspondientes a sucesivas perspectivas de la escena original.

Por ello, el efecto resultante puede ser descrito como la percepción de una imagen con información de profundidad y con una variación cuasi-continua de perspectiva. Por supuesto, hay diversos parámetros geométricos involucrados, que deben ser adecuadamente seleccionados y que son discutidos en el parágrafo siguiente.

III.6.3 Análisis de los parámetros involucrados en el display

3-D

Se considera inicialmente la incidencia de la forma de la pupila sobre la distribución de luz difractada por el registro de speckle.

Este aspecto ha sido examinado exhaustivamente en el Capítulo II y se concluyó que el ángulo θ más conveniente para caracterizar a los sectores circulares es de 30° a 40° . Con ello se logra un buen compromiso entre la directividad y uniformidad de la figura de difracción del registro de speckle.

En las figuras III.9.a y III.9.b se grafican los distintos ángulos en estudio.

El primer parámetro que se analiza es la separación angular entre la ubicación del observador, para que observe un único par estereoscópico simple por difracción, y el orden cero de

difracción donde se superpone la información de todas las imágenes registradas.

El ángulo se denota con γ y su valor puede ser determinado con la frecuencia espacial u_0 que se encuentra almacenada en el registro H y que corresponde al máximo secundario de difracción de la Figura II.9.a.

Sea d el diámetro de la pupila y z_i la distancia imagen con la que fue obtenido el registro. La expresión para u_0 es:

$$u_0 = d/\lambda z_i \quad (3.2)$$

Considerando que los valores utilizados en este caso fueron $\lambda = 632 \text{ nm}$ y la apertura numérica $(d/z_i) \sim \frac{1}{3}$, el valor aproximado para u_0 es 500 líneas/mm.

En el proceso de reconstrucción se supone que el plano de observación está situado a una distancia D del registro y que el observador se ubica en el máximo del lóbulo de difracción, a una distancia x del orden cero.

La frecuencia u_0 vale en este caso:

$$u_0 = x/\lambda D \quad (3.3)$$

Por consideraciones geométricas sencillas se tiene:

$$\text{tg } \gamma = x/D \quad (3.4)$$

Por lo tanto, de las ecuaciones (3.3) y (3.4)

$$\operatorname{tg} \gamma = u_0 \lambda \quad (3.5)$$

Con los valores de u_0 y λ dados anteriormente, el valor aproximado de γ es 20° .

Se debe notar que a partir de las expresiones (3.5) y (3.2) se obtiene:

$$\operatorname{tg} \gamma = u_0 \lambda = d/z_i \quad (3.6)$$

Es decir, que el valor de γ puede ser seleccionado eligiendo convenientemente la apertura numérica del sistema óptico de registro.

Otro parámetro importante que debe ser tenido en cuenta es el ancho angular del máximo secundario a lo largo del eje v , el cual se denota con β . Esta depende del valor del ángulo θ del sector circular, como puede verse en el gráfico II.9.b.

Si se quiere que cada imagen registrada pueda ser observada como un todo desde una adecuada ubicación, β debe cumplir la condición:

$$\beta \approx 1/D \quad (3.7)$$

Siendo l el tamaño lateral máximo de la imagen. Esta relación puede ser satisfecha eligiendo un valor apropiado de θ , el cual es típicamente 30° .

También se requiere que no haya superposición entre los haces difractados que corresponden a imágenes sucesivas. Si δ es la separación angular entre dos haces adyacentes, entonces se debe imponer que:

$$\delta \sim \beta \quad (3.8)$$

Esto es fácil de cumplimentar rotando la pupila un ángulo α igual a β entre exposiciones sucesivas.

Como condición final para optimizar el display 3-D se requiere:

$$\Psi = n\beta \quad (3.9)$$

Donde Ψ es la separación angular entre los ojos. Teniendo en cuenta que éstos están separados una distancia aproximada de 6,5 cm el valor de Ψ se fija para una cierta distancia de observación, habitualmente $D = 30$ cm.

Así, para una dada localización del observador, el número n representa el número de perspectivas distintas del objeto que pueden ser almacenadas entre las dos imágenes observadas simultáneamente. Además, la variación de perspectiva debe ser cumplimentada de tal manera que el par de imágenes observadas cumplan las condiciones de visión estereoscópica para esa distancia. En general, el valor de n varía entre cinco y diez (diez a veinte exposiciones).

Teniendo en cuenta todos los parámetros angulares en el

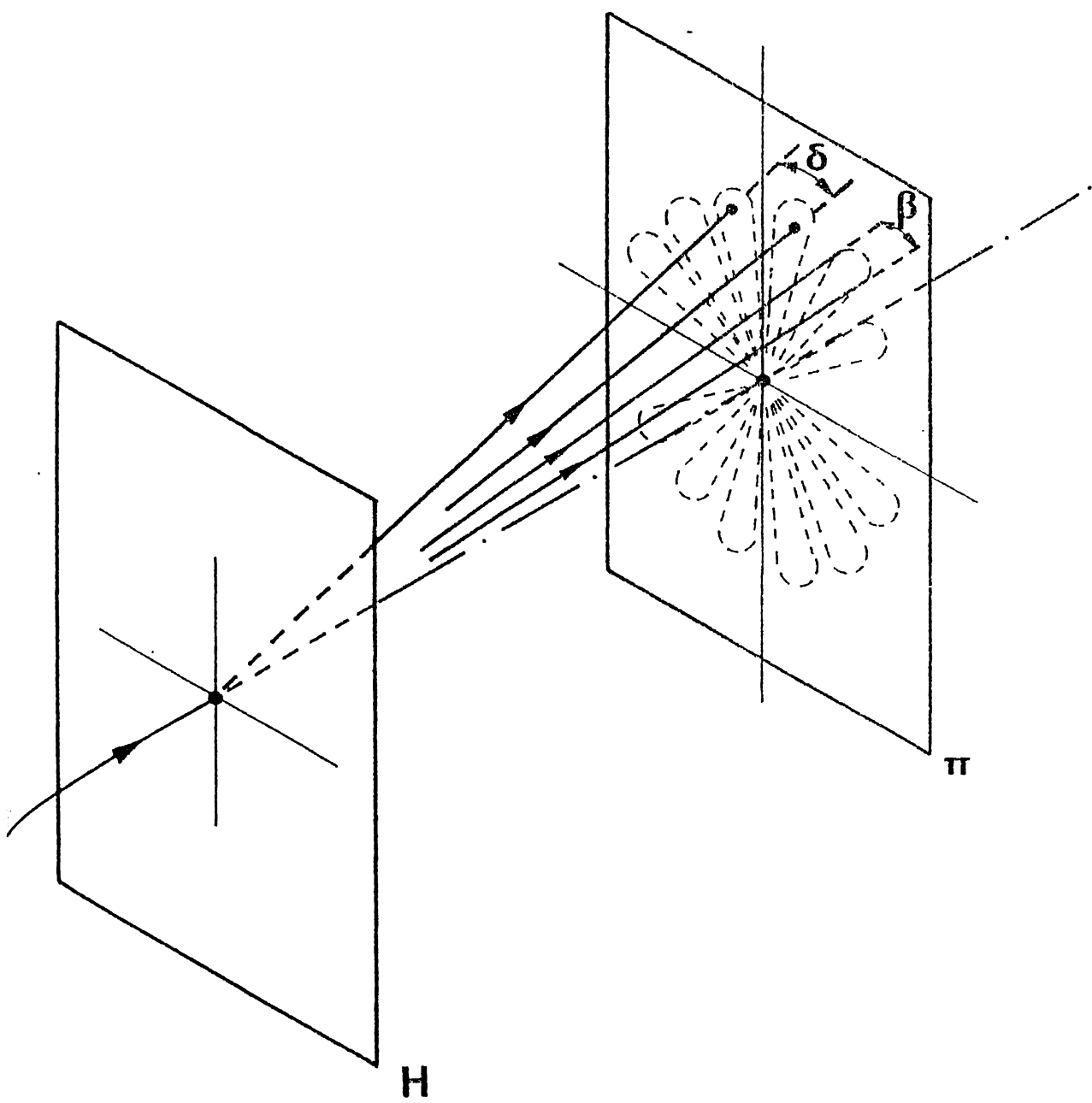


Figura III.9.a

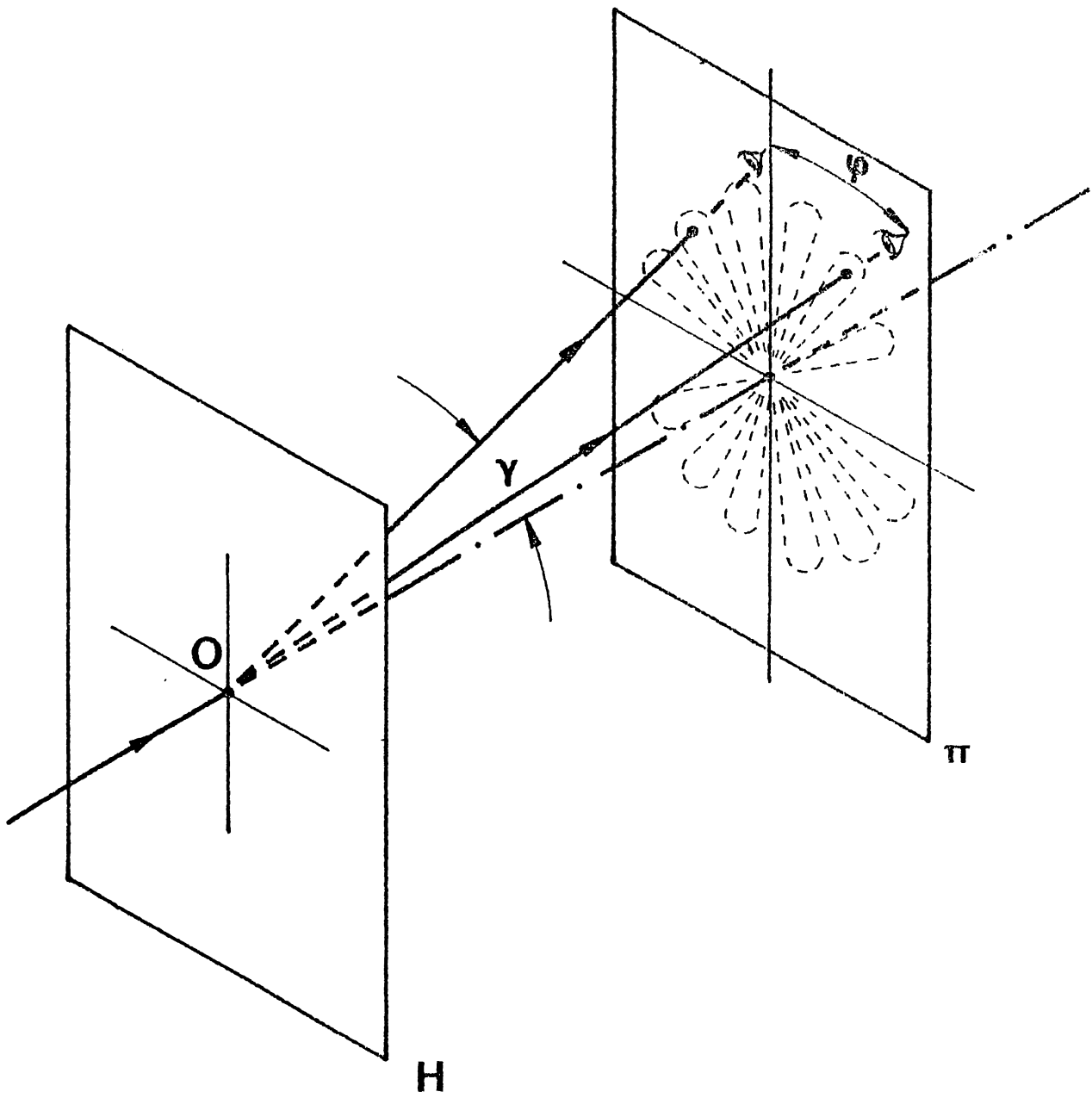


Figura III.9.b

proceso de codificación, luego un observador puede ver diferentes pares de imágenes estereoscópicas en el registro y de esta forma se obtiene percepción de profundidad y una cuasi continua variación de perspectiva de la escena.

Los valores de los parámetros angulares pueden ser modificados de forma de realzar o disminuir el efecto estereoscópico lo cual puede ser de utilidad en algunos casos prácticos (III.20).

En la Figura III.10 se muestran cuatro imágenes reconstruídas que corresponden a distintas perspectivas de una escena 3-D. Aquí se puede apreciar el desplazamiento del peón respecto del rey, pero debido a las características tridimensionales del display, esto no es sino una aproximación de la verdadera imagen observada en el estereograma real. El ruido de fondo que se observa es debido a que la apertura numérica de la cámara con que fue tomada la reconstrucción da un tamaño grande de los granos de speckle; cuando se observa directamente con el ojo este efecto está notoriamente disminuído.

En los métodos que se propondrán a continuación se obtienen resultados similares a los aquí presentados.

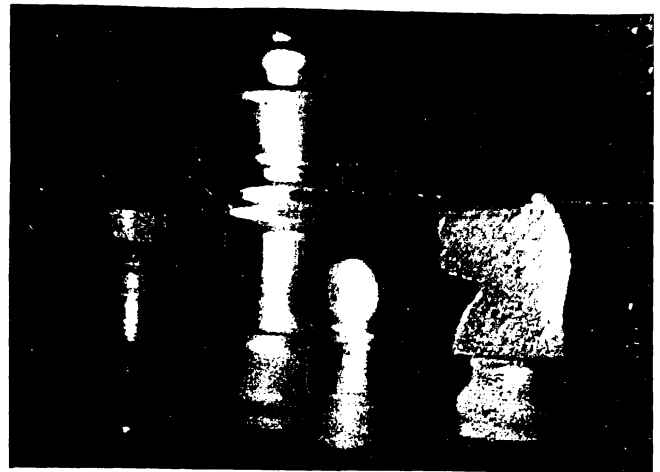
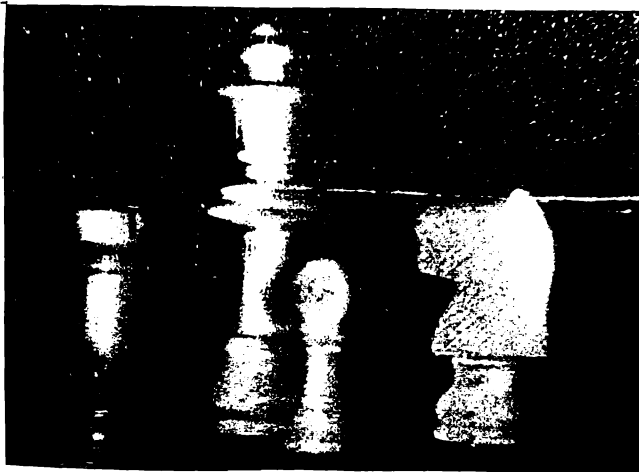
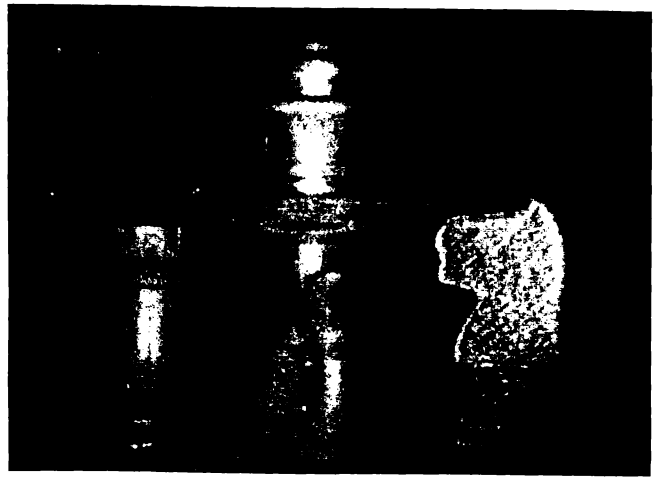
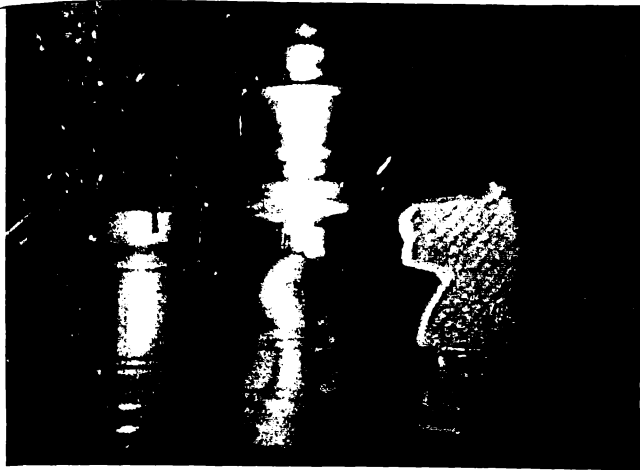


Figura III.10

III.7 METODO DE UNA EXPOSICION UNICA PARA DISPLAY 3-D (0.4)

En las técnicas estereoscópicas descritas hasta ahora, el proceso de codificación del multiplexing se realiza a través de registros de dos o más exposiciones en una misma placa fotosensitiva. Se presenta aquí un método de una única exposición para el caso en que se requiera solamente percepción de profundidad en la escena 3-D.

El esquema del sistema óptico empleado se muestra en la Figura III.11. Como en este caso se necesita solamente un par de imágenes estereoscópicas (multiplexing de grado dos), en el proceso de codificación deben estar presentes dos perspectivas diferentes del objeto en forma simultánea.

Estas imágenes son obtenidas insertando dos espejos planos M_1 y M_2 entre el objeto y la lente formadora de imágenes. El ángulo α formado por los espejos debe ser elegido de manera que ambas perspectivas del objeto correspondan a un par estereoscópico. Además, junto a cada espejo se coloca una lámina de polarizador de forma que ambos puntos de vista tengan estados de polarización lineal perpendiculares.

La pupila de la lente consiste en un doble par de sectores circulares, cada uno provisto con láminas polarizadoras con direcciones lineales cruzadas de manera de evitar interferencia luminosa desde dobles sectores circulares diferentes y además permite seleccionar separadamente las imágenes dadas por los espejos.

Con este dispositivo, la imagen de cada perspectiva del

objeto está formada solamente por un doble sector circular obteniendo un registro simultáneo de dos diagramas de speckle, cada uno con su correspondiente imagen.

Así, se mantiene la modulación espacial del speckle preservando la selectividad angular de la luz difractada en el proceso de decodificación.

Sin embargo, como la apertura de la lente está iluminada por luz reflejada en ambos espejos, la contribución principal está dada por la luz proveniente de la región donde se unen los mismos; por lo tanto, hay una restricción en la región de apertura de la lente. En este caso, aparece una pupila efectiva en el sistema que reduce la modulación espacial del diagrama de speckle.

Debido a esta limitación, el método puede ser utilizado con objetos de extensión angular pequeña para producir el display 3-D. No obstante, se puede mencionar una propiedad interesante de la técnica; al no tener movimiento ninguna de las piezas del dispositivo, se podrían estudiar desplazamientos o deformaciones del objeto desde dos puntos de vista simultáneamente, lo que permitiría deducir la componente de la deformación en la dirección del eje óptico, lo que no es accesible por medio de los métodos habituales de speckle (III.21).

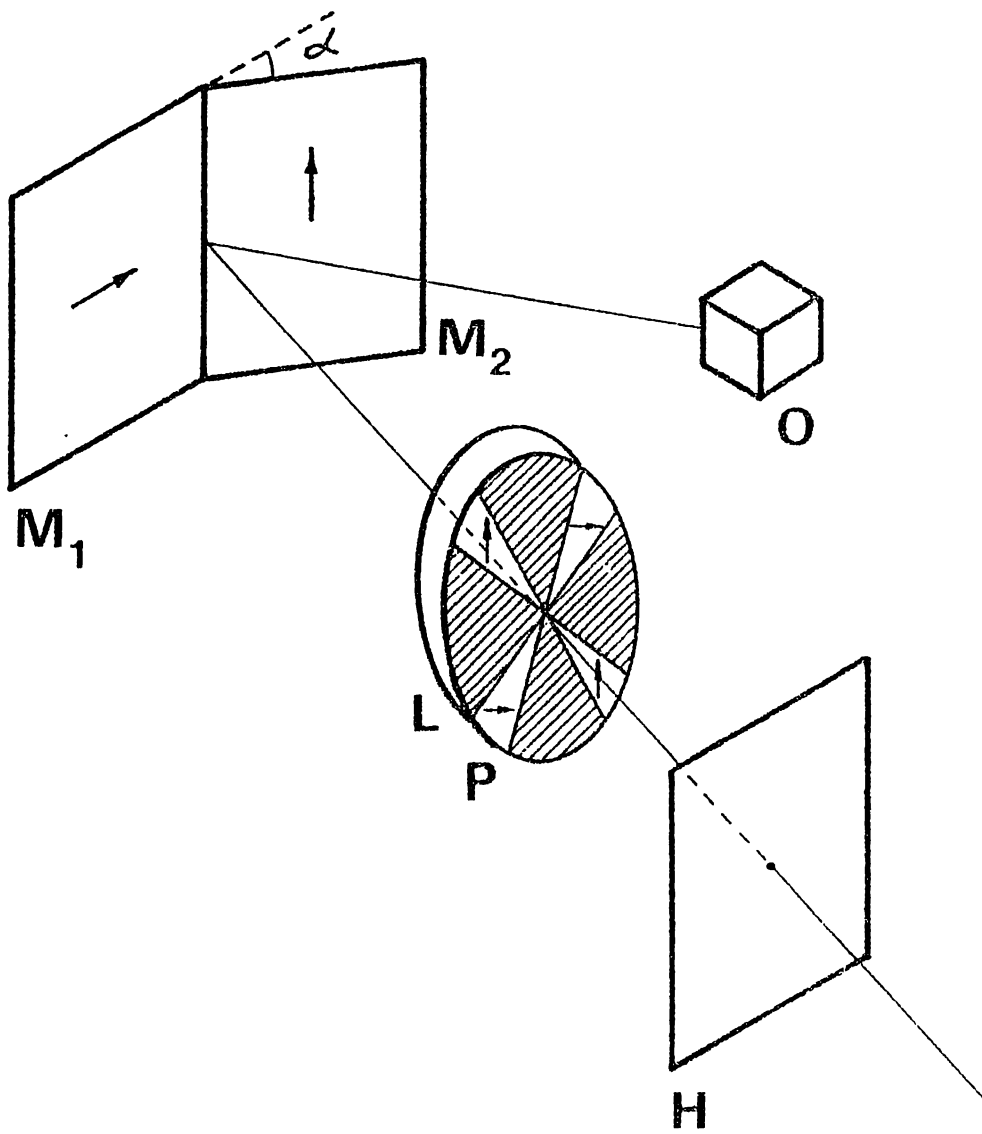


Figura III.11

III.8 METODO DE UNA EXPOSICION UNICA PARA DISPLAY 3-D CON VARIACION DE PERSPECTIVA

En esta sección se discute un método de una sola exposición para lograr un display 3-D con percepción de profundidad y variación continua de perspectiva.

El esquema del sistema óptico es similar al de la Figura III.4, pero ahora la apertura numérica de la lente L debe ser lo suficientemente grande como para poder tomar distintas perspectivas de una escena tridimensional.

Para comprender mejor este requerimiento, se muestra en la Figura III.12 la formación de imagen de un objeto 3-D.

Cuando la lente L forma la imagen del objeto, existe solo un plano del mismo que está perfectamente enfocado y una distribución de planos a su alrededor progresivamente desenfocados en forma simétrica.

Se supone que el sistema óptico forma la imagen de un punto A del objeto, perfectamente enfocado en A', mientras que otro punto B situado en otro plano formará imagen en B' y por lo tanto, en el plano de A' producirá una mancha de diámetro D proporcional al desenfoque Δz .

Se observa que si en el sistema óptico se introduce una pupila P_1 que únicamente permite pasar el pincel de rayos provenientes de B denotado con P_1 , se formará una imagen desenfocada Y_1 . A su vez si se introduce otra pupila P_2 que permita pasar el pincel de rayos P_2 se formará la imagen desenfocada Y_2 .

En el caso en que la distancia entre P_1 y P_2 sea la misma

que la separación interocular, es válido suponer que las imágenes Y_1 e Y_2 forman un par estereoscópico. Por lo tanto, la ubicación de las pupilas proporciona un punto de vista del objeto en que el plano de foco correcto desempeña el rol del horóptero.

Si la apertura numérica es suficientemente grande, se puede pensar que si se pasean por toda la lente las dos pupilas, respetando la distancia interocular, se obtienen los distintos puntos de vista, observándose las perspectivas del objeto 3-D en una imagen vívida de la escena.

En cambio, si la apertura numérica del sistema óptico es pequeña, prácticamente no hay diferencia de perspectiva y en consecuencia no se obtiene una buena reconstrucción de la escena.

Para los propósitos del método que aquí se presenta, un valor adecuado para la apertura numérica es aproximadamente uno.

En referencia al sistema óptico de la Figura III.4, la forma de la pupila de apertura debe ser la misma que la utilizada en los métodos precedentes, con el objeto de preservar las propiedades de difracción en el proceso de decodificación. Además debe permitir que el registro de varias perspectivas se realice en forma simultánea en una única exposición.

En este caso, la idea es dejar inmóvil el objeto y que las diferentes perspectivas del mismo estén dadas por distintas orientaciones de dobles sectores circulares y su posición relativa respecto a la lente. Por lo tanto, es necesario sintetizar una pupila que permita realizar este tipo de procesamiento.

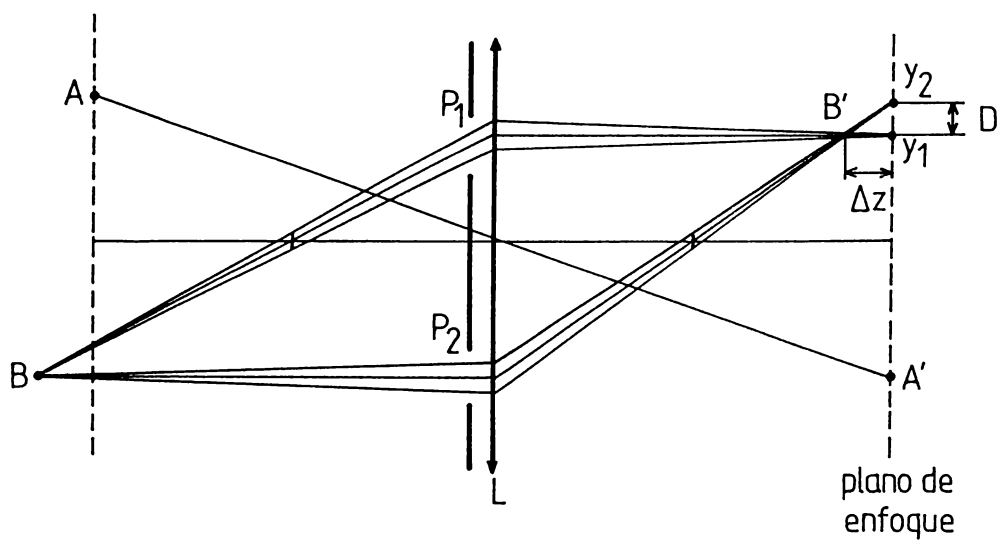


Figura III.12

Un problema que debe ser solucionado es el de registrar los diagramas de speckle evitando "cross-talking" (información cruzada) entre ellos, lo cual afecta su modulación angular. Para ello se debe impedir que interfiera luz proveniente de diferentes sectores orientados de la pupila para conservar la selectividad espacial.

Una forma de obtener esta modulación es utilizar distintas orientaciones de polarización lineal para la luz transmitida que proviene desde varios sectores circulares, los cuales sintetizan la pupila total. Hay distintas maneras de implementar este tipo de pupila:

Una posible solución, si bien un tanto complicada, se esquematiza en la Figura III.13. Consiste en construir una máscara con porciones de polarizador que tengan forma de sector circular y cuyos estados de polarización lineal están a lo largo de la dirección radial de cada sector. El número de porciones estará asociado con la cantidad de perspectivas diferentes que presentará el display 3-D.

Otra solución alternativa es utilizar una pupila de material birrefringente, de modo tal que si la luz que se utiliza es polarizada, dicha pupila rote el estado de polarización de distinta forma en las zonas correspondientes a cada punto de vista y de manera aproximada en sectores circulares opuestos.

Como pupila que cumple adecuadamente las condiciones de birrefringencia requerida se utiliza una lente de Fresnel, en la cual en el proceso de fabricación se han introducido en

el material tensiones residuales con simetría radial. En general estas lentes tienen una gran apertura numérica, pero no son de buena calidad óptica, ya que no se las emplea habitualmente para formar imágenes, sino para enviar luz a gran distancia y su aplicación más conocida es en reflectores y faros de navegación. Por lo tanto, la calidad de las imágenes que se obtienen no es buena y puede emplearse en el caso en que no se requiera una resolución muy alta en la imagen tridimensional.

Además de su gran apertura numérica, la ventaja del empleo de lentes de Fresnel como pupila del sistema óptico es que la variación de puntos de vista puede ser hecha de manera continua eliminando de esta manera el salto entre imágenes consecutivas. Por otra parte, se presenta el problema de que a cada punto de la placa de registro llega información de muchos puntos del objeto. Como ya se ha demostrado en el Capítulo II, Sección II.3.4, una superposición de muchos speckles de distintos estados de polarización da como resultado un contraste muy bajo en el registro resultante y en consecuencia, baja la eficiencia de difracción.

Una posibilidad de disminuir este efecto es registrar objetos "diluidos", es decir, objetos que consisten en pocos puntos aislados sobre fondo oscuro.

Por lo tanto, cuando se intenta registrar en una sola exposición una variación continua de puntos de vista, surgen limitaciones en cuanto a la naturaleza del objeto o a la eficiencia de difracción del registro.

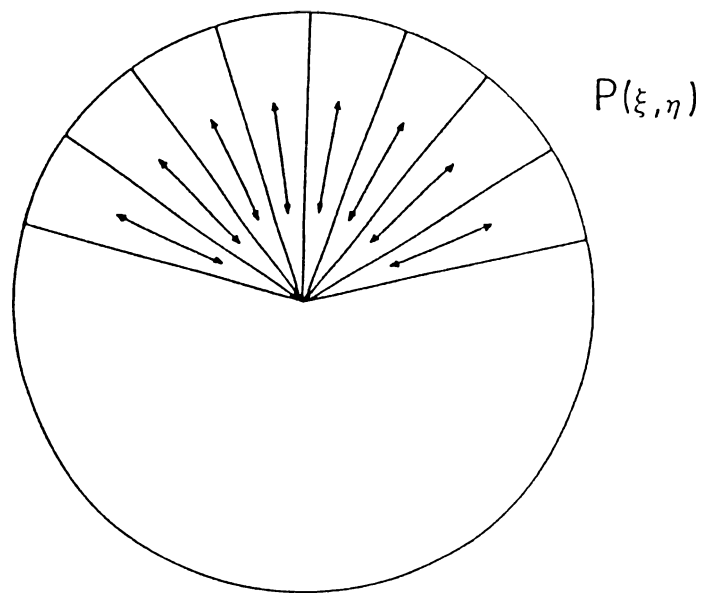


Figura III.13

III.9 ESTEREOGRAMAS SINTETICOS

En esta sección se propone un método para la obtención de estereogramas de objetos sencillos, conformados por unos pocos puntos. En este caso, en lugar de obtener diagramas de speckle mediante un procesador de imágenes analógico como en los casos anteriores, éste se genera artificialmente, de modo de reproducir las condiciones de estereoscopia, utilizando el "plotter" de una computadora.

Para fijar ideas, se discute primeramente el caso de un diagrama de speckle que permite la observación estereoscópica de un punto situado a una cierta distancia de la placa de registro. Luego, el método puede generalizarse para varios puntos situados a distintas profundidades.

El método es muy simple y consiste en generar trazos en el plotter de una computadora, cada uno con una determinada inclinación, como se observa en la Figura III.14. En una etapa posterior, se reduce fotográficamente el dibujo original hasta obtener un registro de unos dos o tres centímetros aproximadamente, lo cual representa una reducción en un factor 10 para el caso de la figura mostrada. Pero, para las condiciones que se propone la experiencia, el plotter debe tener alrededor de 1 metro, de forma tal que el factor de reducción sea de 100 aproximadamente. Si el trazo original se realiza con la pluma de un plotter de 0,3 milímetros, al reducir, el tamaño del mismo en la película fotográfica será de 3 micrones.

Estas son las dimensiones aproximadas de los granos de speckle empleados en los métodos anteriores para obtener estereogramas.

Por lo tanto, se tiene un registro con un diagrama de speckle artificial, que al ser iluminado con una fuente luminosa puntual, difractará con propiedades de uniformidad y selectividad similares a las presentadas por los diagramas de speckle de los métodos anteriores. Esto es debido a que la orientación diferente de cada trazo (grano de speckle) se la diseña de modo que cada uno difracte en ángulos distintos y pueda ser observado selectivamente por uno u otro ojo permitiendo ver la imagen estereoscópica de un punto. Si se modifican los ángulos y las separaciones entre trazos sucesivos se puede variar la ubicación del punto percibiéndolo a mayor o menor profundidad.

En un mismo display se pueden dibujar varios grupos de trazos como se muestra en la Figura, cada uno da lugar a la imagen estereoscópica de un punto. Por lo tanto, la superposición de ellos permite la observación de los puntos a diferentes profundidades pudiendo de esta manera conformarse imágenes tridimensionales de objetos sencillos, por ejemplo, algunos objetos geométricos como cubos, pirámides, etc.

En general, aún no se ha podido lograr experimentalmente trazos suficientemente finos y en consecuencia el ángulo de difracción es pequeño observándose los puntos a una cierta profundidad, pero cerca del orden cero.

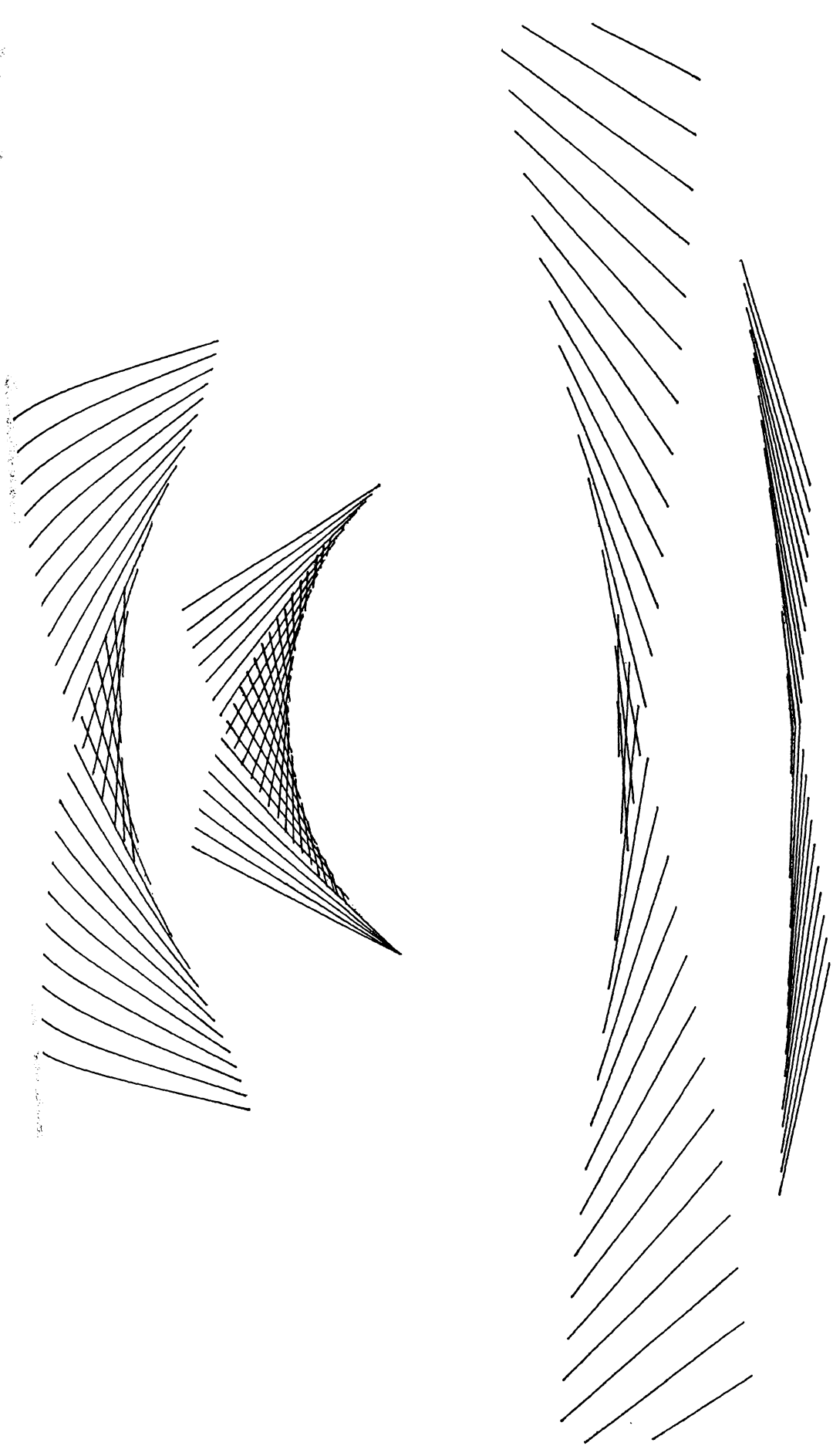


Figura III.14

III.10 COMPARACION DEL CONTENIDO DE INFORMACION Y LOS REQUERIMIENTOS DE ALMACENAMIENTO ENTRE UN HOLOGRAMA Y UN ESTEREOGRAMA SECKLE DE MULTIPLES EXPOSICIONES (0.5)

La cantidad de información requerida para almacenar una imagen tridimensional es normalmente muy grande. Esto es natural debido a que la misma es igual a la suma de la información contenida en un gran número de imágenes planas del objeto observadas desde diferentes direcciones. Sin embargo, como cada imagen planar difiere levemente de la imagen adyacente, el display 3-D es en la mayoría de los casos altamente redundante.

Por lo tanto, cuando se diseñan métodos para la obtención de displays tridimensionales se debe tener en cuenta esta redundancia y las severas limitaciones de la visión humana. Es conveniente una reducción del contenido de información (CI) para propósitos de almacenamiento y transmisión compatible con la resolución del ojo y las características de la visión estereoscópica.

Un método efectivo de reducción es descartar la información proporcionada por el paralaje vertical debido a la disposición horizontal de los ojos.

En esta sección se compara el CI del método de speckle con múltiples exposiciones con los métodos holográficos. En un sentido general, se puede considerar que los dispositivos no holográficos son un muestreo del frente de onda que emerge de un holograma de la misma escena y en consecuencia el CI será menor; sin embargo, se demostrará que en este caso es

suficiente para satisfacer los requerimientos visuales.

Para efectuar la comparación entre los dos tipos de display se considera un objeto 3-D confinado en un volumen definido por Δx_o , Δy_o y Δz_o .

Primeramente se analiza el CI almacenado en un holograma de Fresnel del objeto.

El display dado por el holograma está caracterizado por el campo visual Ψ y la zona de visión Ω , las cuales se muestran en la Figura III.15 y están definidos por:

$$\begin{aligned}\Psi_x &= \text{tg}^{-1} (\Delta x_o / z_o) & \Psi_y &= \text{tg}^{-1} (\Delta y_o / z_o) \\ \Omega_x &= \text{tg}^{-1} (a / z_o) & \Omega_y &= \text{tg}^{-1} (b / z_o)\end{aligned}\tag{3.10}$$

Donde z_o es la distancia media entre el objeto y el holograma, a y b son las dimensiones lineales de la placa holográfica.

Los conceptos de campo visual y zona de visión son de esencial importancia en los displays 3-D. El término "campo visual" significa el tamaño Δx_o (o Δy_o) del espacio objeto, o el ángulo Ψ_x (o Ψ_y) subtendido por Δx_o , relativo al punto de vista del objeto observado desde el holograma. El término "zona visual" significa el tamaño a (o b) del rango movable de puntos de vista, o el ángulo Ω_x (o Ω_y) subtendido por a relativo al objeto o a la imagen.

En estas condiciones, se puede demostrar (III.11) a partir del teorema de muestreo de Whittaker-Shannon (III.22) en dos

dimensiones, que el CI almacenado en un holograma está dado aproximadamente por el número de puntos muestra, el cual se expresa por:

$$P = 4 \Omega_x \Omega_y \Psi_x \Psi_y (z_o/\lambda)^2 \quad (3.11)$$

Los valores típicos para un holograma estándar son: $\Omega_x, \Omega_y \sim 0,5$, $\Psi_x, \Psi_y \sim 0,25$; $z_o \approx 300$ mm y $\lambda = 632,8$ nm, obteniendo un valor de $P \approx 1 \times 10^{10}$.

Se estudia a continuación el límite de resolución que puede observarse a partir del holograma.

La Figura III.16 muestra el proceso de reconstrucción de un holograma. Solamente la luz difractada por una porción de la placa de ancho X puede ser percibida por el ojo humano para reconocer un punto de la imagen. Por ello, el límite de resolución para la imagen virtual reconstruida es:

$$\delta \approx 2 \lambda z_o/X = 2 \lambda(z_o + D)/A \quad (3.12)$$

Donde D es la distancia entre el holograma y el observador y A denota el diámetro de la pupila del ojo. Esta fórmula proporciona el límite de resolución del ojo y está determinada por el diámetro de la pupila. Para valores de $D \approx z_o \approx 300$ mm, se tiene un valor típico para $\delta \sim 300$ μm . Es por este motivo que en la reconstrucción de la imagen 3-D de un holograma no se requiere un tamaño grande de la placa para aumentar la resolución, sino para obtener una zona de visión suficiente para percibir distintas perspectivas de una escena. En otras palabras, el tamaño del holograma es usualmente mucho mayor que el necesario para la resolución.

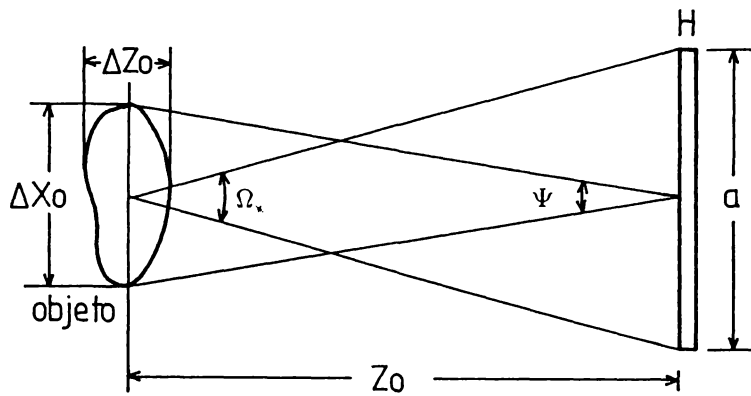


Figura III.15

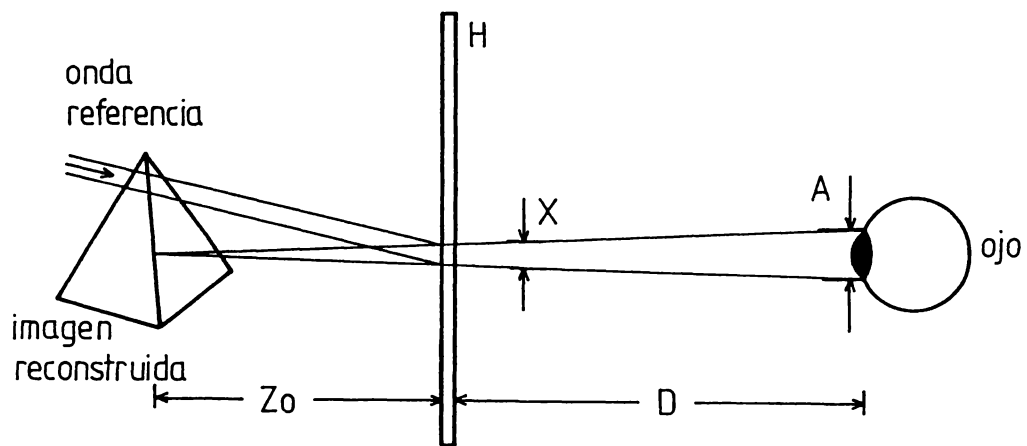


Figura III.16

Para comparar el CI del holograma dado por la ecuación (3.11) con el CI correspondiente a un estereograma speckle de múltiples exposiciones, se referirá el estudio a un mismo display 3-D, es decir, la imagen observada deberá tener idénticos valores de campo visual y zona de visión dados por la ecuación (3.10).

Debido a la forma de la pupila del sistema óptico utilizada para obtener el registro de speckle, la distribución luminosa difractada por cada diagrama de speckle individual muestra una extensión angular dada por β_x, β_y .

En la Sección III.6.3 se mostró que si se desea que cada imagen registrada pueda ser vista como un todo desde una ubicación apropiada del observador, se deben cumplir las siguientes restricciones para β_x, β_y .

$$\beta_x = x_o/D = \psi_x \qquad \beta_y = y_o/D = \psi_y \qquad (3.13)$$

Siendo x_o, y_o los tamaños laterales máximos de una cierta imagen.

Como se almacenan N perspectivas diferentes de una escena 3-D y se requiere que no haya superposición entre haces difractados correspondientes a imágenes sucesivas, se debe cumplir para la zona de visión:

$$\Omega_x = N \beta_x \qquad \Omega_y = \beta_y \qquad (3.14)$$

Donde se ha descartado de esta manera el paralaje vertical.

Por otra parte, si denotamos con d_x , d_y las dimensiones principales de la pupila que se muestran en la Figura III.17, el tamaño aproximado de los granos de speckle almacenados será:

$$\delta_x \approx \lambda z_i / d_x \qquad \delta_y \approx \lambda z_i / d_y \qquad (3.15)$$

Donde z_i es la distancia imagen en el proceso de registro.

En consecuencia, se obtiene que las dimensiones angulares de los haces difractados por el registro de speckle tienen la siguiente expresión:

$$\beta_x = \lambda / \delta_x = d_x / z_i \qquad \beta_y = \lambda / \delta_y = d_y / z_i \qquad (3.16)$$

Finalmente, el CI del estereograma speckle puede ser calculado en forma equivalente a través del número de puntos muestra P_s dados por el teorema de Whittaker-Shannon bidimensional:

$$P_s = (2w_x x_o) (2w_y y_o) \qquad (3.17)$$

Donde w_x, w_y denotan las máximas frecuencias espaciales almacenadas en el diagrama speckle.

En este caso:

$$P_s = (2x_o d_x / \lambda z_i) (2y_o d_y / \lambda z_i) \qquad (3.18)$$

Utilizando las expresiones (3.13) a (3.16), P_s puede escribirse como:

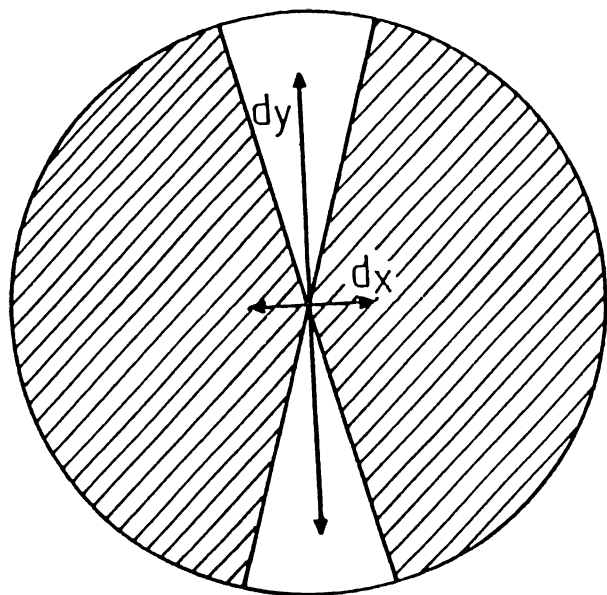


Figura III.17

$$P_s = 4 \Omega_x \Omega_y \Psi_x \Psi_y (D^2/\lambda^2 N) \quad (3.19)$$

Donde el valor de N está restringido por la condición $N \leq \pi D/x$, para que el display pueda ser observado desde un ángulo máximo de 180° .

En los casos prácticos, el número máximo de imágenes registradas es $N \sim 20$.

Para los casos usuales se obtiene un valor de $P_s \sim 1 \times 10^8$.

En este método el límite de resolución de la imagen está fijado por el tamaño promedio de los granos de speckle, que normalmente son del orden de $10 \mu\text{m}$. Por lo tanto, dicho valor está muy por debajo del límite de resolución del observador, expresado por la ecuación (3.12).

Así, en condiciones normales, se obtiene un valor de $P_s, 10^2$ veces menor que el número de puntos muestra almacenados en un holograma. Sin embargo, aún existe la redundancia asociada con la visión estereoscópica (III.23), lo que permite reducir aún más, en un factor 10 aproximadamente, el CI de los estereogramas speckle sin perder resolución en el display.

Este hecho es particularmente útil si se emplean diagramas de speckle generados por computadora para originar displays 3-D. En consecuencia, este método debe considerarse promisorio en lo concerniente a técnicas de transmisión de imágenes 3-D, en las cuales podría emplearse algunos de los procedimientos de reducción de información.

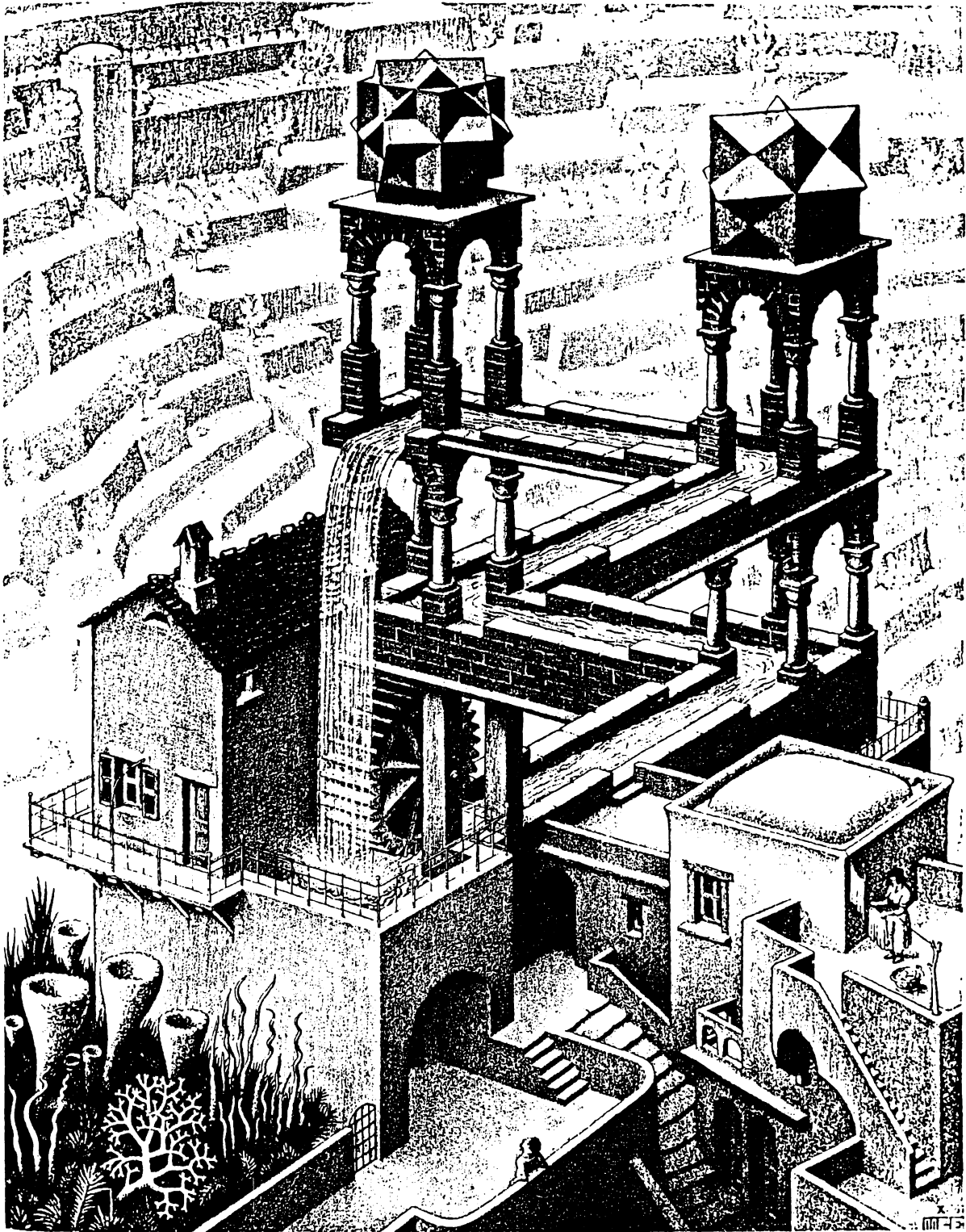
REFERENCIAS

- III.1 M.G. Lippmann. J. Phys. Vol. 7, 4^a serie, 821 (1908)
- III.2 D. Gabor. Nature, 161, 779 (1948)
- III.3 Ver por ejemplo: B. Julesz. "Foundations of cyclopean perception". U. Chicago Press, Chicago (1971).
- III.4 G. Tomys. "Untersuchungen zur Stereoskopie und Stereoprojektion". Report Universidad de Regensburg. Alemania (1980).
- III.5 H.J. Rabal and R. Rohler. ICO Meeting. Sapporo, Japón (1984).
- III.6 W. Simon. Comp. Graph. and Im. Proc. 4, 396 (1975)
- III.7 A.C. Traub. Appl. Opt. 6, 1085 (1967)
J. Hamasaki, Y. Nagata, H. Higuchi, M. Okada. Appl. Opt. 16, 1675 (1977).
- III.8 H.J. Garritsen, B. Horwitz. Appl. Opt. 10, 862 (1971)
- III.9 S. Tamura, K. Tanaka. Appl. Opt. 21, 3659 (1982)
- III.10 R.V. Pole, Appl. Phys. Lett. 10, 20 (1967)
- III.11 T. Okoshi. Proc. IEEE 68, 548 (1980)
- III.12 C.B. Burckhardt, R.J. Collier, E.T. Doherty. Appl. Opt. 7, 627 (1968)
- III.13 Ver por ejemplo R.J. Collier, C.B. Burckhardt, L.H. Lin. "Optical holography". Academic Press (New York-London) (1971).
- III.14 T. Okoshi. Progress in optics. Ed. por E. Wolf. North Holland, Amsterdam, 15: 139 (1977).
- III.15 E.N. Leith and J. Upatnieks. J. Opt. Soc. Am. 52: 1123,

- (1962).
- III.16 Ver por ejemplo: Wai Hon Lee. Progress in optics. Ed. por E.Wolf. North Holland, Amsterdam, Cap. III (1978).
- III.17 T. Yatagai. Appl. Opt. 15, 2722 (1976)
- III.18 M.C. King, A.M. Noll, D.H. Berry. Appl. Opt. 9, 471 (1970)
- III.19 U. Kopf. "International Optical Computing Conference". Zurich, IEEE, New York. Catalog nº 74; p. 862-3c (1974).
- III.20 H.J. Rabal, M. Trivi, E.E. Sicre and M. Garavaglia. Appl. Opt. 25, 1259 (1986).
- III.21 J.M. Burch and J.M.J. Tokarski. Optica Acta, 15, 101 (1968).
- III.22 Ver por ejemplo: J.W. Goodman. "Introduction to Fourier Optics". McGraw Hill, San Francisco (1968); p. 21
- III.23 L.P. Yaroslavski. Proc. of "Image Science 85". Helsinki, Finlandia. Vol. 1, p. 82, junio 1985.

CAPITULO IV

APLICACIONES AL PROCESAMIENTO DE IMAGENES



IV.1 INTRODUCCION

El capítulo está dedicado al desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento de imágenes aplicadas a otras operaciones distintas de las consideradas hasta aquí. En este caso se utilizan las propiedades de los diagramas de speckle modulados para codificar la información de modo de obtener pseudocoloreado de niveles de gris, almacenamiento de color en película blanco y negro, sustracción y derivación de imágenes.

Este tipo de operaciones ha tenido un impulso interesante en los últimos años debido a la importancia que ha adquirido el procesamiento de imágenes en diversas aplicaciones. Las técnicas tienden a mejorar la calidad de las imágenes contenidas en el display, permitiendo una visualización rápida y efectiva de la información que se requiere en cada caso.

Muchas de las imágenes obtenidas en varias aplicaciones científicas y tecnológicas son almacenadas en films blanco y negro, por ejemplo, es el caso de las radiografías industriales y médicas. Sin embargo, el ojo humano puede percibir mucho mejor variaciones en color que en niveles de gris, un observador promedio puede distinguir tres o cuatro componentes cromáticas por cada tono de gris. Es por ello que una imagen codificada en color provee una mejor discriminación visual y por lo tanto, las técnicas de pseudocoloreado permiten detectar algunas diferencias pequeñas que serían imperceptibles en un display blanco y negro.

Los métodos computarizados de pseudocoloreado han sido

usados ampliamente en aplicaciones donde las imágenes pueden ser digitalizadas previamente. Sin embargo, ello implica una pérdida de resolución.

Las técnicas de procesamiento óptico como las que se presentarán aquí, son más ventajosas para aplicaciones donde las imágenes son fotografías analógicas como el caso de las placas radiográficas o fotografías aéreas.

Análogamente, es de interés el almacenamiento de color en medios sensibles solo a tonos de gris, en donde es importante la conveniencia económica de este procesamiento, ya que la película común blanco y negro es notoriamente más barata que los films en colores. Además, la película en color se degrada más rápidamente, por lo tanto, si se desea conservar una información es conveniente que el medio sea un film blanco y negro.

Otra aplicación del procesamiento óptico es la sustracción de imágenes donde es importante detectar las diferencias entre imágenes de manera de conservar solamente la información que interesa. Existen numerosas aplicaciones en desarrollo urbano, sensores remotos, meteorología, planificación de carreteras, etc. También en comunicaciones; debido a la estrechez de los anchos de banda, no es necesario transmitir la imagen entera en cada ciclo, sino solamente las diferencias entre imágenes sucesivas. En medicina, el restado permite comparar dos imágenes y detectar posibles lesiones, o si un tumor ha variado su tamaño.

La derivación de imágenes permite resaltar los bordes,

lo cual puede en muchos casos mejorar considerablemente la calidad de las imágenes borrosas degradadas por turbidez atmosférica o por exposiciones "movidas" o desenfocadas.

Aquí se presentarán métodos para pseudocoloreado de niveles de gris y almacenamiento de color en película blanco y negro utilizando diagramas de speckle modulados por la pupila que consiste en dos sectores circulares opuestos. Luego se utilizan las propiedades de los diagramas de speckle modulados por franjas de Young para desarrollar una técnica de sustracción y derivación de imágenes. La pupila del sistema en este caso es una doble apertura rectangular.

IV.2 ALMACENAMIENTO DE COLOR Y PSEUDOCOLOREADO DE NIVELES DE GRIS (0.1)

IV.2.1 Introducción

En los capítulos anteriores se han estudiado las propiedades de difracción de los diagramas de speckle registrados con sistemas ópticos cuya pupila está compuesta por dos sectores circulares opuestos. Las mismas se han utilizado en el desarrollo de técnicas para la obtención de displays tridimensionales.

En esta sección se proponen aplicaciones de este tipo de modulación del diagrama de speckle a otras operaciones de procesamiento de imágenes, por ejemplo, almacenamiento de color en película blanco y negro y pseudocoloreado de niveles de gris.

En los últimos años se han implementado numerosos métodos (IV.1-5) óptico-analógicos, para realizar estas operaciones, muchos de ellos involucran etapas de filtrado espacial que introducen severas limitaciones en la resolución. Aquí se presentan técnicas en las que estos inconvenientes son evitados debido a la modulación impuesta por la pupila del sistema.

IV.2.2 Dispositivo experimental

La primera etapa de codificación es común para ambas técnicas. En ella se utiliza un sistema óptico coherente para obtener un registro de un diagrama de speckle orientado que

luego será empleado como master en las etapas posteriores.

El esquema del dispositivo experimental se muestra en la Figura IV.1. Un difusor D es iluminado por un haz colimado de luz laser; la lente L cuya pupila es de la forma ya descripta es utilizada para formar imagen del difusor sobre la placa M. De este modo, en M queda registrado un diagrama de speckles modulados por la forma particular de la pupila.

Es importante notar que éste es el único paso que requiere un sistema con luz coherente, ya que luego de obtener la placa-master M, todo el procesamiento se realiza con luz parcialmente coherente y con el equipamiento usual de un laboratorio fotográfico.

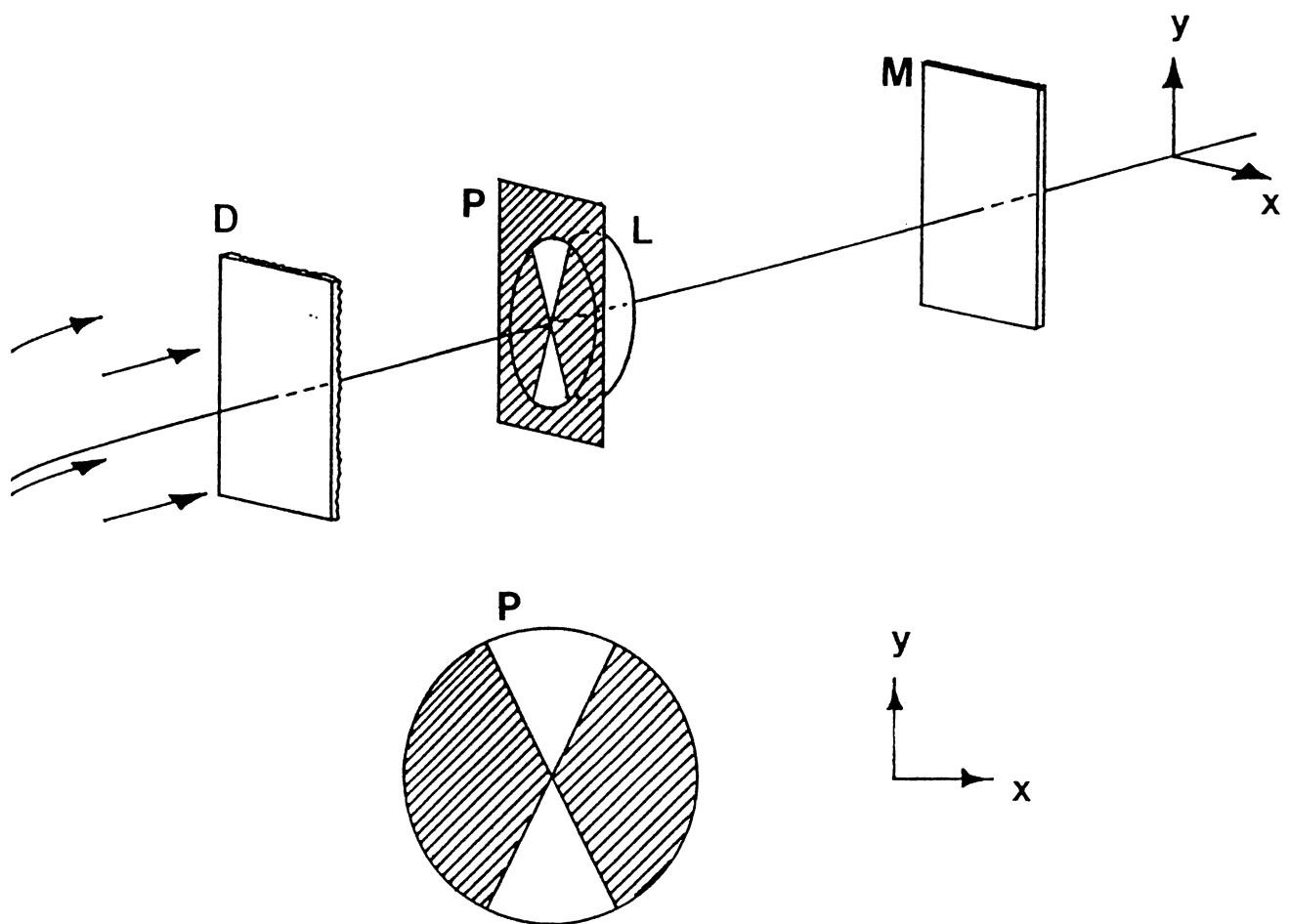


Figura IV.1

IV.2.3 PSEUDOCOLOREADO DE NIVELES DE GRIS

Para la operación de pseudocoloreado de niveles de gris, la codificación en frecuencias espaciales se realiza utilizando las propiedades de directividad y uniformidad de la figura de difracción de la placa-master M.

Se emplea un sencillo dispositivo óptico mostrado en la Figura IV.2. La fuente de iluminación es una ampliadora fotográfica E, T es la transparencia que se desea pseudocolorear, M es el master con el registro de speckle y H es una placa fotográfica.

De esta forma, sobre la placa H se realiza una copia por contacto obteniéndose un negativo de T modulado por el diagrama de speckles orientados debido al master M.

Luego de revelada, se ilumina la placa H con dos fuentes (S_1 y S_2) parcialmente coherentes provista cada una de ellas por un filtro con colores diferentes, por ejemplo, rojo (F_{λ_1}) y verde (F_{λ_2}) como se muestra en la Figura IV.3.

Los difusores D_1 y D_2 se colocan con el objeto de obtener fuentes luminosas más extendidas y para lograr que la intensidad luminosa sobre H sea uniforme.

El frente de onda que se propaga a lo largo del eje óptico del sistema se transmite en forma directa a través de H y da lugar a una imagen de la transparencia original T con contraste inverso.

El otro frente de onda forma un ángulo θ con el eje óptico, de forma que las ondas difractadas por el diagrama de speckle

que modula a H también se propaguen a lo largo del eje óptico obteniéndose una imagen de T con contraste directo.

Finalmente, se observa una superposición de dos imágenes en colores diferentes, una en contraste inverso respecto de la otra. Así se obtiene una imagen pseudocoloreada de la transparencia original T.

En la Figura IV.4 se muestra una transparencia antes y después del procesamiento.

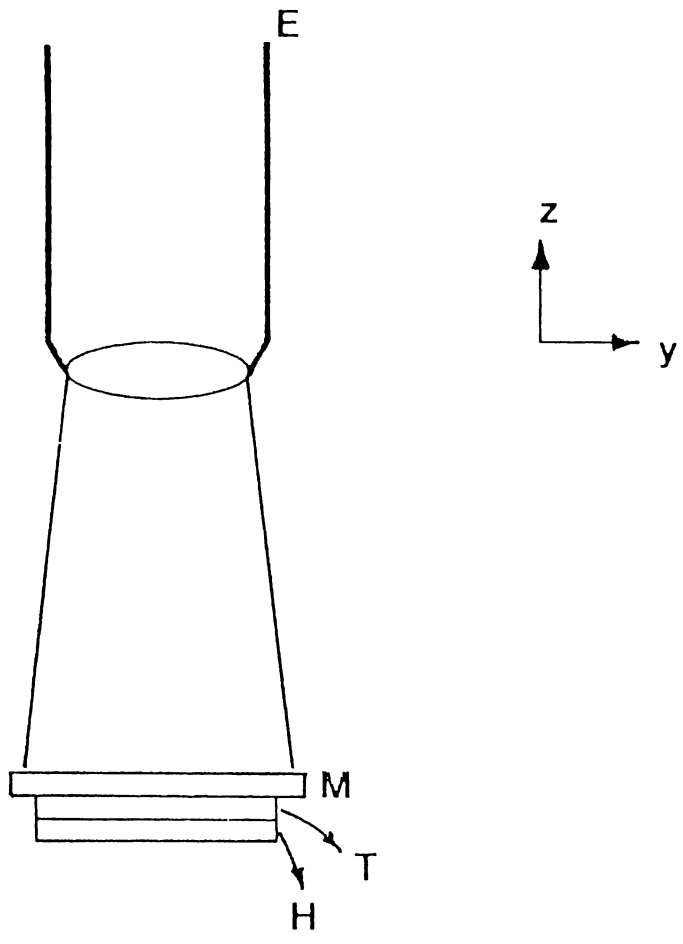


Figura IV.2

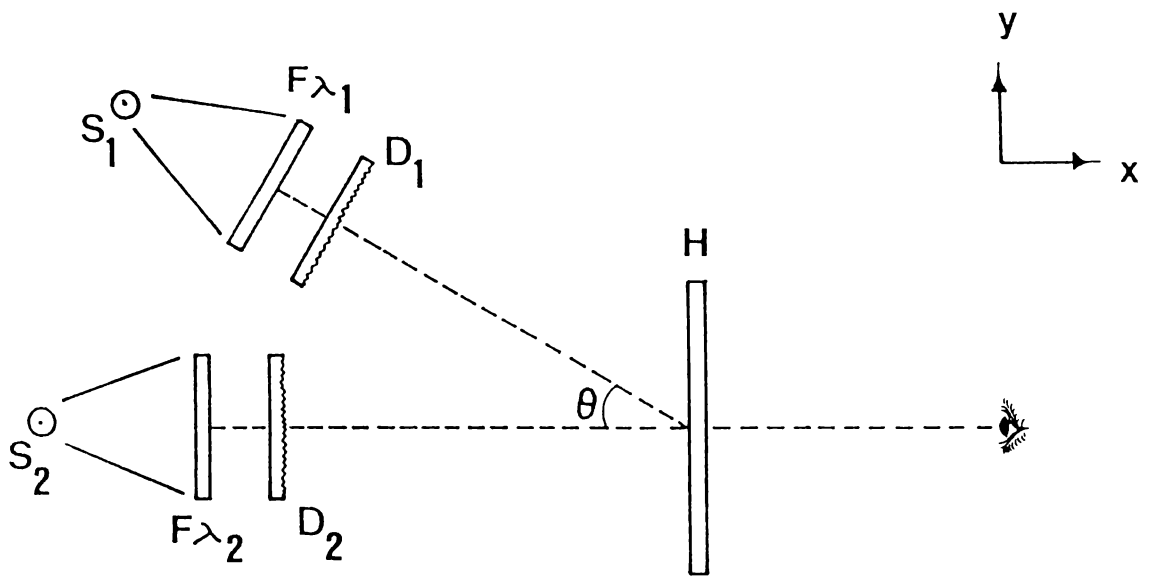


Figura IV.3

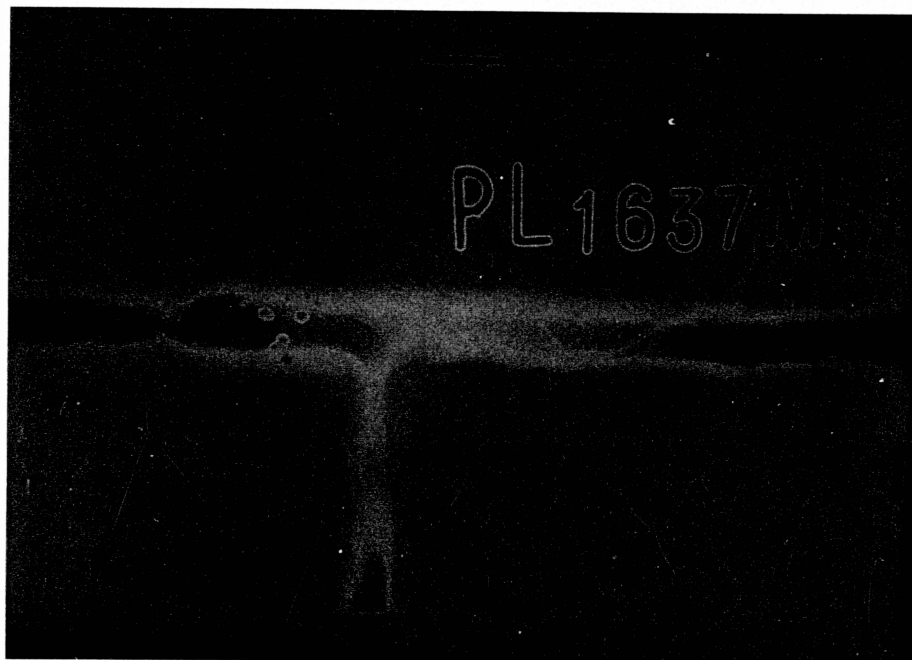
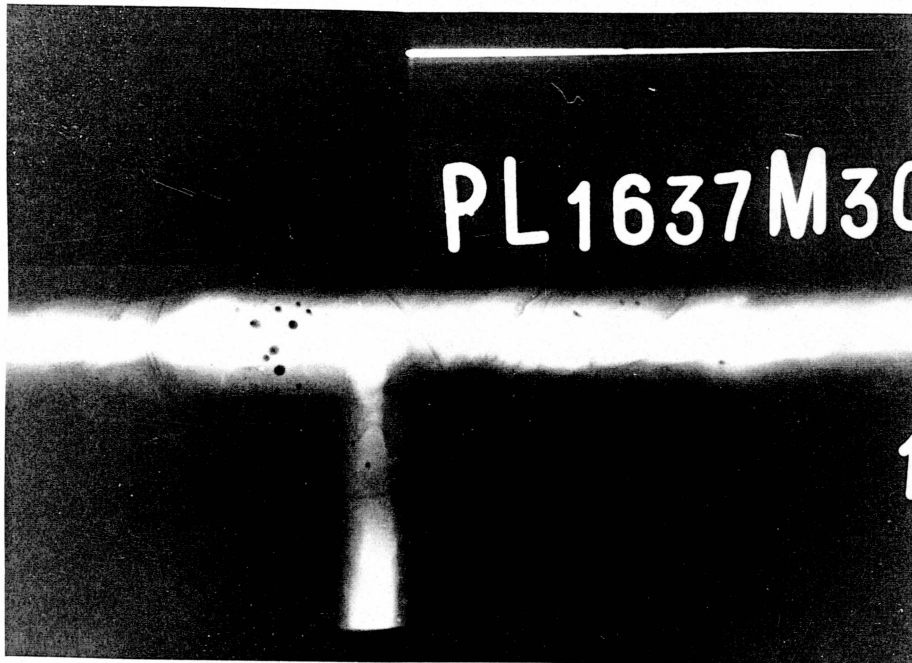


Figura IV.4

IV.2.4 ALMACENAMIENTO DE COLOR EN PELICULA SENSIBLE SOLO A TONOS DE GRIS

El esquema experimental del sistema óptico utilizado para almacenar componentes cromáticas en película comercial blanco y negro se observa en la Figura IV.5.

En este caso se utiliza una ampliadora fotográfica para formar la imagen de la transparencia objeto O sobre la placa H; el master M con el diagrama de speckles orientados se coloca en contacto con la placa H.

Se realizan tres exposiciones sobre la misma H, cada una de ellas a través de distintos filtros de colores F_{λ_1} , F_{λ_2} y F_{λ_3} y con una orientación diferente del master en cada caso, representada en la figura por los versores $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$ respectivamente.

Este tipo de modulación recibe el nombre de "modulación theta" (IV.6) y es utilizada en varios métodos de procesamiento de imágenes.

Una vez procesada la placa H en la zona lineal de la curva característica, se obtiene una imagen de O en blanco y negro, pero los diagramas de speckle modulados han codificado los colores (frecuencias temporales) en frecuencias espaciales.

Para reobtener la imagen en color, se coloca la placa H modulada en "theta" en el procesador de luz blanca de la Figura IV.6.

La lente L_2 genera en su plano focal posterior el espectro de frecuencias del objeto H, éste es filtrado espacialmente

mediante un conjunto de filtros con los mismos colores $F_{\lambda 1}$, $F_{\lambda 2}$, $F_{\lambda 3}$, dispuestos en forma de dobles sectores circulares alternados como se observa en la figura. La lente L_3 transforma nuevamente la información recuperándose la imagen coloreada del objeto.

La Figura IV.7 muestra resultados obtenidos. El objeto utilizado fue construido con láminas de celuloide de color rojo, amarillo, verde y azul y los filtros empleados fueron verde, azul y rojo.

La eficiencia en la reconstrucción es baja debido básicamente a la distinta transmitancia de los filtros y poca potencia en la fuente extensa de luz blanca empleada.

En la Figura IV.8 (a y b) se muestra la transformada de Fourier óptica del master M y la transformada de Fourier óptica de una copia por contacto. Se puede observar que el procedimiento de copia por contacto no afecta sustancialmente las propiedades de difracción de las imágenes codificadas mediante el registro de speckle.

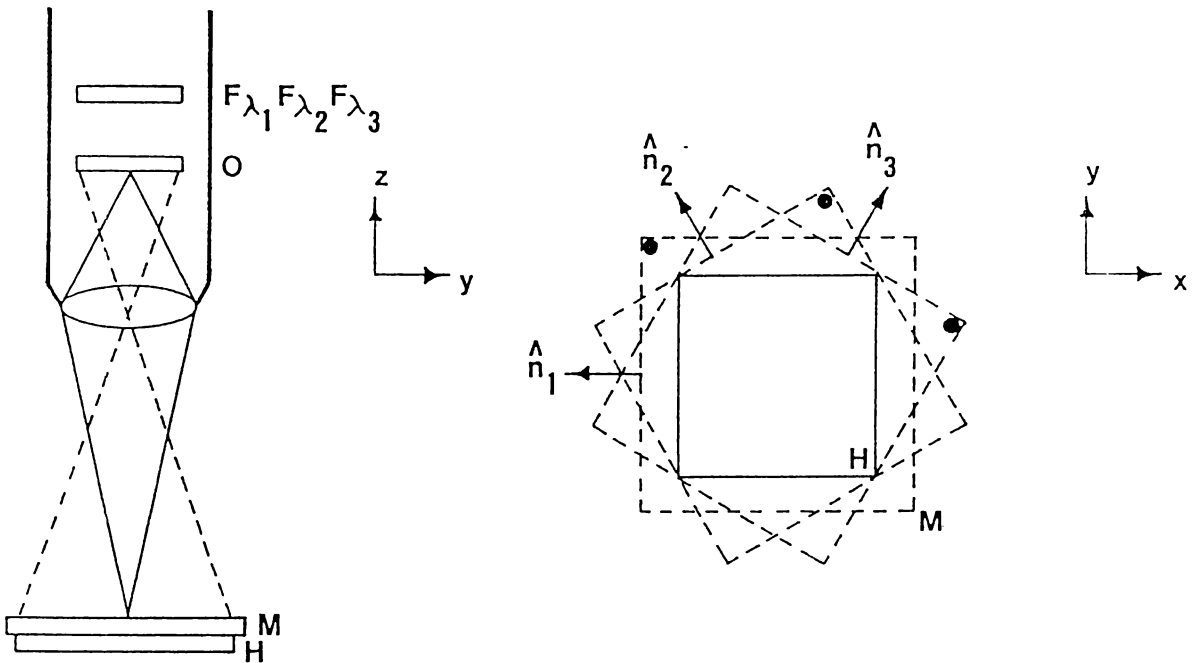
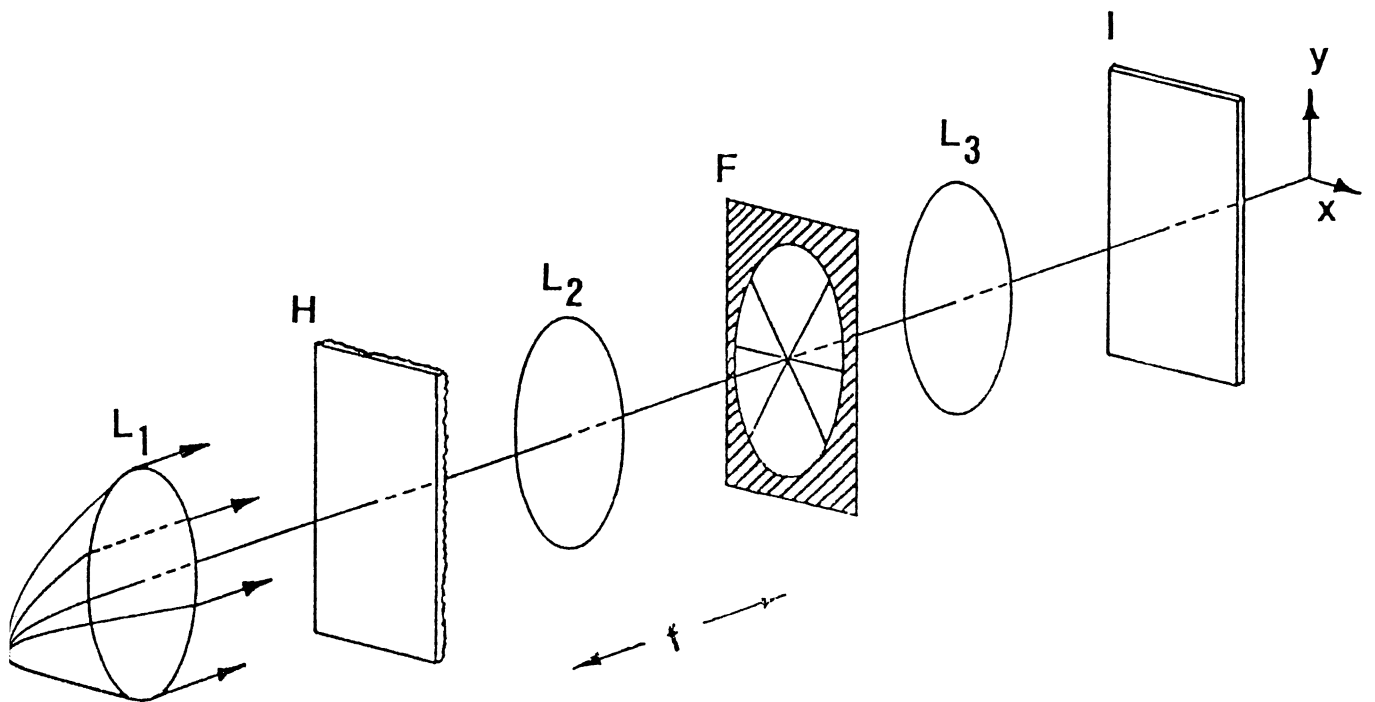


Figura IV.5



f →

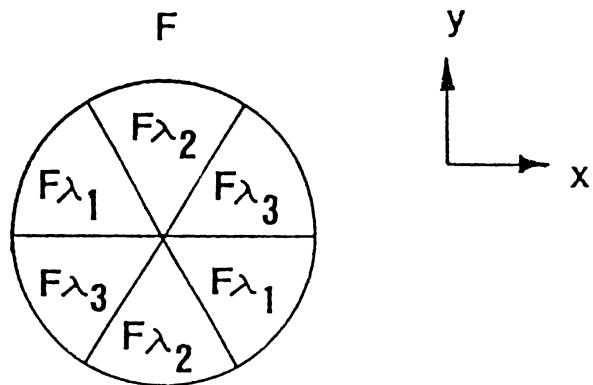


Figura IV.6

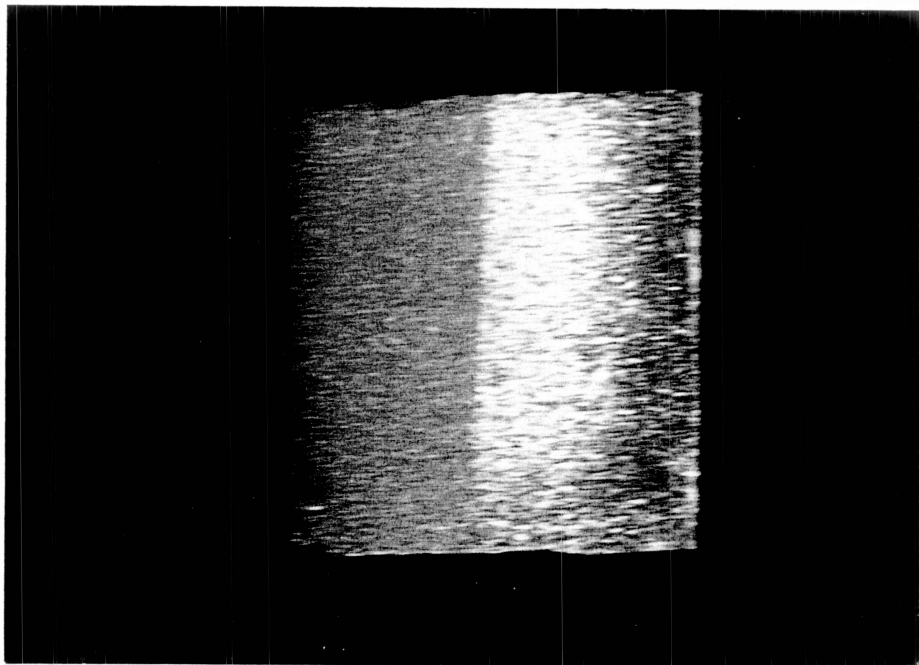
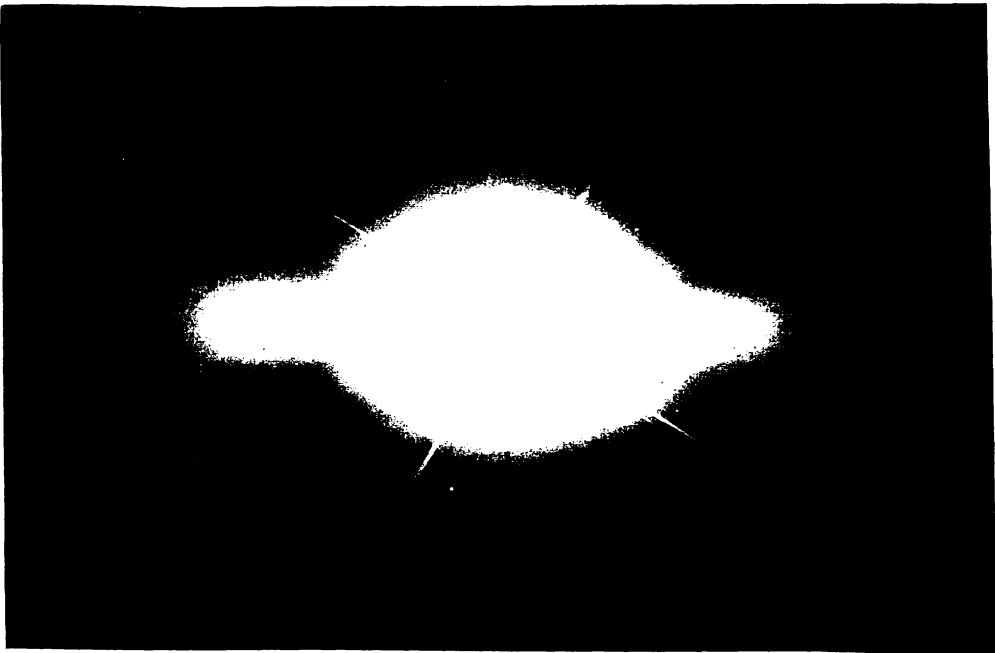
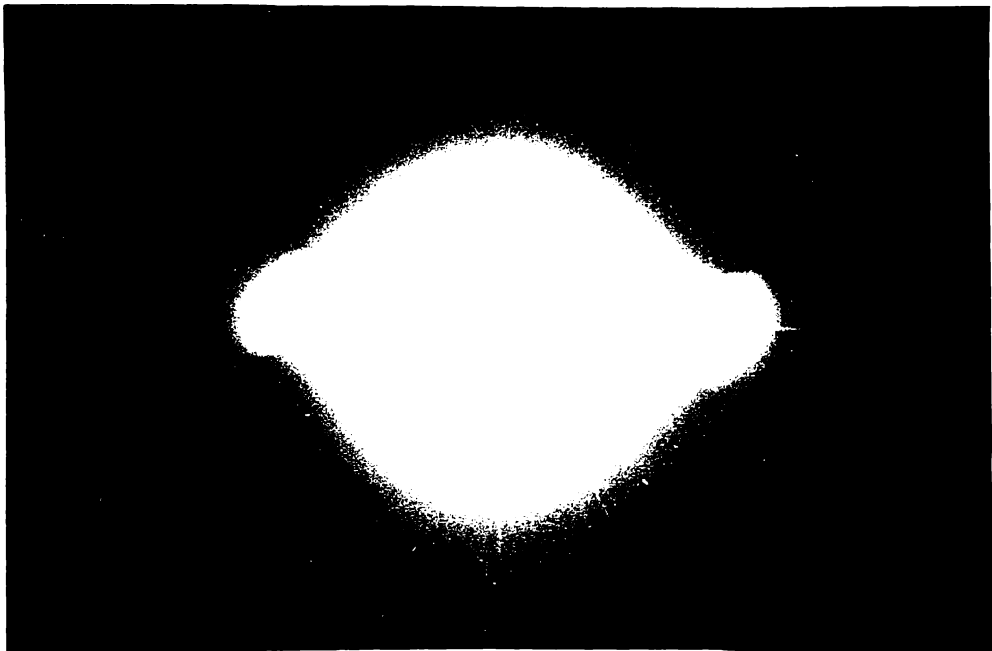


Figura IV.7



(a)



(b)

Figura IV.8

IV.3 SPECKLE MODULADO POR FRANJAS DE YOUNG

VI.3.1 Introducción

En el Capítulo I se demostró que la forma de los granos de speckle depende de la función de la pupila del sistema óptico utilizada en la obtención del registro.

Si se ilumina una superficie difusora con un haz de luz coherente y su imagen se obtiene con una lente cuya pupila es una doble apertura (IV.7), cada apertura formará un diagrama de speckle donde el tamaño de los granos es inversamente proporcional al tamaño de la pupila.

La acción conjunta de ambas rendijas producirá franjas de interferencia dentro de cada grano de speckle donde se superponen las dos figuras de difracción.

Si un registro fotográfico de la imagen modulada por franjas de Young se ubica en un procesador óptico, las franjas actúan como frecuencia portadora y en el plano de Fourier aparecen dos órdenes difractados simétricamente respecto del orden cero.

Mediante un filtro espacial ubicado en ese plano se puede seleccionar uno de los dos órdenes para su procesamiento.

Se estudia a continuación las propiedades de los diagramas de speckle modulados por franjas de Young y su aplicación en un método de procesamiento de imágenes para obtener la derivada óptica de una transparencia.

IV.3.2 FRANJAS DE YOUNG PRODUCIDAS POR UNA PUPILA RECTANGULAR

El dispositivo de la Figura IV.9 es una configuración típica para la obtención de diagramas de speckle modulados por franjas de Young.

La lente L de distancia focal f está en contacto con la pupila $P(\xi, \eta)$ formada por dos aberturas rectangulares, de longitud e_1 y ancho e_0 , separadas una distancia e en dirección paralela al eje η .

Para hallar la distribución luminosa en el plano de registro H, se retoma el análisis de la Sección (I.2).

La respuesta impulsiva del sistema en el plano conjugado del objeto está dada por la expresión (1.2):

$$\begin{aligned}
 g(x_1, y_1, x_i, y_i) &= \\
 &= \frac{1}{\lambda^2 d_o d_i} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi, \eta) \exp \left[(-i \frac{2\pi}{\lambda d_i}) [(x_i + mx_1)\xi + (y_i + my_1)\eta] \right] d\xi d\eta
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Con el cambio de variables:

$$x = \xi / \lambda d_i \qquad y = \eta / \lambda d_i
 \tag{4.2}$$

La ecuación (4.1) toma la forma:

$$\begin{aligned}
 g(x_1, y_1, x_i, y_i) &= \\
 &= m \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda d_i x, \lambda d_i y) \exp \left[-i 2\pi [(x_i + mx_1)x + (y_i + my_1)y] \right] dx dy
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

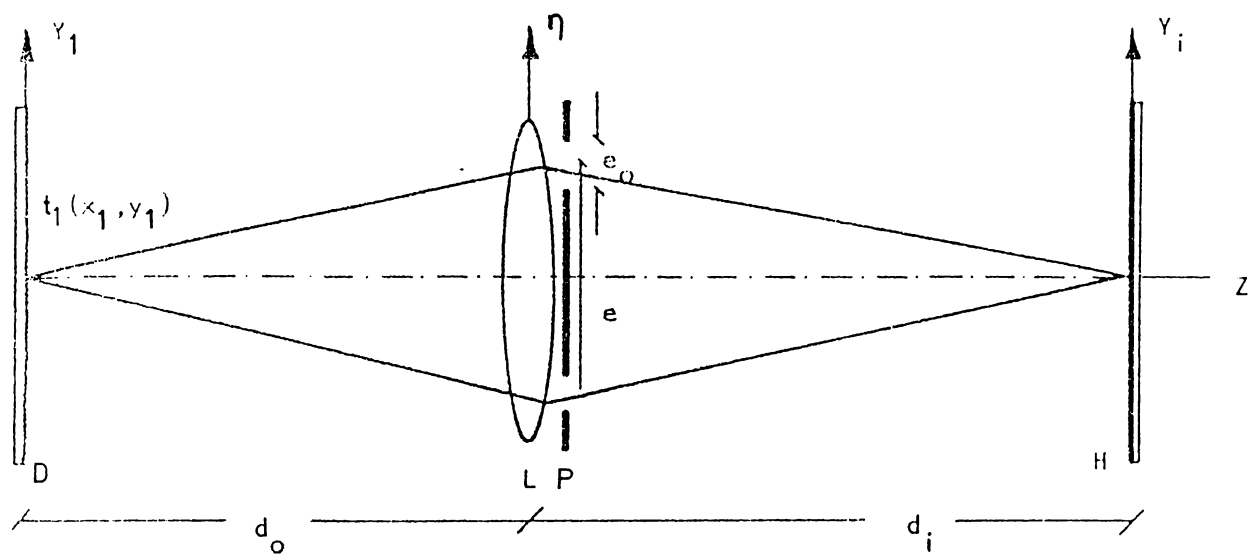


Figura IV.9

Si se toma $\lambda \rightarrow 0$, lo que equivale a despreciar los efectos de difracción, se obtiene una respuesta impulsiva:

$$g_g(x_1, y_1, x_i, y_i) = (1/m) \delta\left(\frac{x_i}{m} + x_1, \frac{y_i}{m} + y_1\right) \quad (4.4)$$

Que es la imagen geométrica puntual.

La distribución de campo en el plano imagen será (ver ecuación (1.1)):

$$t_i(x_i, y_i) = t_{ig}(x_i, y_i) = (1/m) t_1(-x_i/m, -y_i/m) \quad (4.5)$$

Y se obtiene la imagen geométrica del objeto.

Para incluir los efectos de difracción se considera nuevamente (4.3). Definiendo $x'_1 = -mx_1$, $y'_1 = -my_1$; (4.3) puede expresarse como:

$$g'(x_i - x'_1, y_i - y'_1) = (1/m) g(x_i - x'_1, y_i - y'_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(\lambda d_i x, \lambda d_i y) \exp[-i 2\pi[(x_i - x'_1)x + (y_i - y'_1)y]] dx dy \quad (4.6)$$

De donde se puede ver que la imagen obtenida en $z = d_i$ toma la forma de un producto de convolución (*).

$$t_i(x_i, y_i) = g'(x_i, y_i) * t_{ig}(x_i, y_i) \quad (4.7)$$

Esta expresión implica que la imagen será una versión "suavizada" del objeto, salvo en el caso en que la respuesta

impulsiva sea una delta de Dirac, en el cual se reobtiene la imagen geométrica.

Utilizando el análisis de Fourier usual en óptica, si se representa la transformada de Fourier de $t_i(x_i, y_i)$, $g'(x_i, y_i)$ y $t_{ig}(x_i, y_i)$ por $T_i(f_x, f_y)$, $G'(f_x, f_y)$ y $T_{ig}(f_x, f_y)$ y transformando la expresión (4.7) se obtiene:

$$T_i(f_x, f_y) = G'(f_x, f_y) \cdot T_{ig}(f_x, f_y) \quad (4.8)$$

Donde se ha utilizado el teorema de convolución.

La función $G'(f_x, f_y)$ se denomina función de transferencia coherente del sistema y describe la acción del mismo en el campo de las frecuencias espaciales.

Observando (4.6), $G'(f_x, f_y)$ resulta:

$$G'(f_x, f_y) = P(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y) \quad (4.9)$$

Si se ilumina con una onda plana coherente al objeto difusor D situado a una distancia $d_o = 2f$, y se realiza un registro a la misma distancia de la lente, de modo que la magnificación del sistema sea $m = -1$, la imagen dada por la ecuación (4.7) en el registro será:

$$|t_i(x_i, y_i)|^2 = |g(x_i, y_i) * t_1(x_i, y_i)|^2 \quad (4.10)$$

Para el caso particular que la pupila del sistema sea una doble apertura rectangular, la función de transferencia coherente es:

$$\begin{aligned}
G(f_x, f_y) &= \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i}{e_0}\right) \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) * \delta\left(\lambda f_x d_i - \frac{e}{2}, \lambda f_y d_i\right) + \\
&\quad + \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i}{e_0}\right) \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) * \delta\left(\lambda f_x d_i + \frac{e}{2}, \lambda f_y d_i\right) = \\
&= \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i}{e_0}\right) \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) * [\delta\left(\lambda f_x d_i - \frac{e}{2}, \lambda f_y d_i\right) + \delta\left(\lambda f_x d_i + \frac{e}{2}, \lambda f_y d_i\right)]
\end{aligned}
\tag{4.11}$$

Donde la función rect describe la apertura rectangular de ancho e_0 y altura e_1 .

Por lo tanto, la respuesta impulsiva del sistema será, según (4.6), la transformada de Fourier de la función de transferencia; en este caso resulta:

$$g_i(x_i, y_i) = \text{sinc}\left(\frac{e_0 x_i}{\lambda d_i}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{e_1 y_i}{\lambda d_i}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi e x_i}{\lambda d_i}\right) \tag{4.12}$$

El término de modulación cosenoidal proviene de la interferencia entre ambas rendijas desplazadas, mientras que los senos cardinales (sinc) toman en cuenta la figura de difracción de una apertura rectangular.

La placa de registro H ubicada en el plano imagen recibirá una intensidad descrita por (4.10). Una vez procesada en condiciones de linealidad se obtiene una transparencia de transmitancia:

$$h_e(x_i, y_i) = |g(x_i, y_i) * t_1(x_i, y_i)|^2 \tag{4.13}$$

Donde $t_1(x_i, y_i)$ representa la distribución de amplitudes debida al objeto difusor.

La transparencia h_e obtenida se analiza en el procesador coherente que se esquematiza en la Figura IV.10.

La lente L_1 genera en su plano focal posterior el espectro de frecuencias del objeto; éste es filtrado espacialmente y transformado nuevamente por L_2 recuperándose la imagen del objeto difusor.

Se puede demostrar, a partir de la teoría escalar de difracción, que la distribución de amplitud en el plano focal de la lente delgada L_1 es:

$$\begin{aligned}
 F_1(f_x, f_y) &= \mathcal{F}\left\{h_e(x_i, y_i)\right\} = \mathcal{F}\left\{|g(x_i, y_i) * t_1(x_i, y_i)|^2\right\} = \\
 &= \mathcal{F}\left\{g(x_i, y_i) * t_1(x_i, y_i)\right\} \circledast \mathcal{F}\left\{g(x_i, y_i) * t_1(x_i, y_i)\right\}
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

Donde el símbolo \circledast denota la operación de correlación y $f_x = \frac{x}{\lambda f}$, $f_y = \frac{y}{\lambda f}$.

Llamando $T(f_x, f_y)$ a la transformada de Fourier de $t_1(x_i, y_i)$ la ecuación (4.14) resulta:

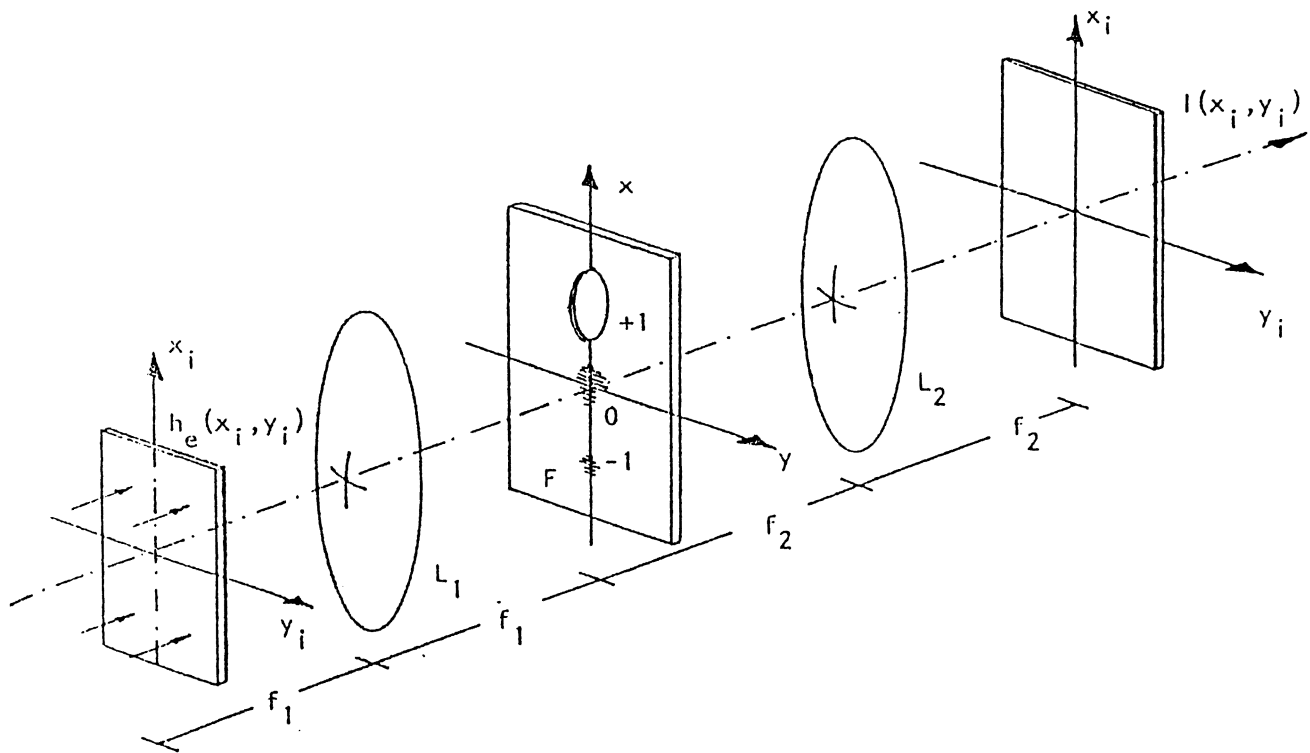


Figura IV.10

$$F_i(f_x, f_y) = \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i - \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) + \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i + \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) \right] \cdot T(f_x, f_y) \right\} \\ \otimes \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i - \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) + \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i + \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) \right] \cdot T(f_x, f_y) \right\} \quad (4.15)$$

Desarrollando se tiene:

$$F_1(f_x, f_y) = \\ = \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i - \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) \cdot T(f_x, f_y) \otimes \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i - \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) \cdot T(f_x, f_y) + \\ + \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i + \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) \cdot T(f_x, f_y) \otimes \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i + \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) \cdot T(f_x, f_y) + \\ + \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i + \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) \cdot T(f_x, f_y) \otimes \text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i - \frac{e}{2}}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1}\right) \cdot T(f_x, f_y) \quad (4.16)$$

Los dos primeros términos son productos de autocorrelación y su contribución principal de difracción es para el orden cero. El tercer término, de correlación cruzada, contribuye en la distribución de amplitud con un máximo central superpuesto a los anteriores y dos máximos laterales centrados en $x = \pm e/4$, $y = 0$.

Si se coloca un filtro espacial que solo permite el paso de luz proveniente de uno de estos máximos laterales, la amplitud en el plano focal posterior de la lente L_2 será:

$$I(x_i, y_i) = \\ = \mathcal{F} \left\{ \text{rect}\left(\frac{2x_i}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{2y_i}{e_1}\right) \cdot T(f_x, f_y) \otimes \text{rect}\left(\frac{2x_i}{e_o}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{2y_i}{e_1}\right) \cdot T(f_x, f_y) \right\} \quad (4.17)$$

Evaluada en $f_x = \frac{x_i}{\lambda f}$, $f_y = \frac{y_i}{\lambda f}$

Donde se ha tomado en (4.16) $d_i = 2f$ y centrado el sistema en el máximo correspondiente.

Finalmente, para $I(x_i, y_i)$ se obtiene la expresión:

$$I(x_i, y_i) = \left| \text{sinc}\left(\frac{e_0 x_i}{2\lambda f}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{e_1 y_i}{2\lambda f}\right) * t_1(x_i, y_i) \right|^2 \quad (4.18)$$

Donde se utilizó la siguiente propiedad de las transformadas de Fourier.

$$\mathcal{F} \left\{ \mathcal{F} [g(x, y)] \otimes \mathcal{F} [g(x, y)] \right\} = |g(x, y)|^2$$

En el plano imagen se obtiene, de acuerdo a (4.18), el producto de convolución del objeto difusor con la figura de difracción de la abertura utilizada en el registro fotográfico.

Para que la imagen resultante sea semejante al objeto difusor $t_1(x_i, y_i)$, el término $\text{sinc}\left(\frac{e_0 x_i}{2\lambda f}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{e_1 y_i}{2\lambda f}\right)$ en (4.18) deberá poder aproximarse por una delta de Dirac.

Para $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, $e_0 = 4 \text{ mm}$, $e_1 = 30 \text{ mm}$, $f = 500 \text{ mm}$, las dimensiones de la figura de difracción serán de 20 micrones en el eje y , y 100 micrones en el eje x .

Con esta aproximación, la ecuación (4.18) queda:

$$I(x_i, y_i) \approx |t_1(x_i, y_i)|^2 \quad (4.19)$$

Recuperándose así, a través del orden filtrado, la imagen del objeto difusor.

Nótese que fue la modulación en los granos de speckle, mediante franjas de Young originadas en la pupila compuesta, lo que permitió "desplazar" en el plano de frecuencias al contenido espectral del objeto.

La expresión (4.18) puede interpretarse también como la superposición coherente de dos diagramas de speckle iguales, que interfieren por la diferencia de camino óptico introducida por las dos aberturas.

La Figura IV.11 muestra un diagrama de speckle modulado por franjas de Young.

Del análisis precedente se obtiene que el tamaño de los granos de speckle, debido a la difracción, será del orden del lóbulo central de difracción dado por el primer producto en (4.12):

$$\epsilon_x \approx \frac{2\lambda d_i}{e_0} \quad \epsilon_y \approx \frac{2\lambda d_i}{e_1} \quad (4.20)$$

Serán las magnitudes del grano según ambos ejes.

El espaciado de las franjas estará dado por el argumento del coseno en (4.12) y será:

$$\Delta \approx \frac{\lambda d_i}{e} \quad (4.21)$$

Desde el punto de vista de las posibles aplicaciones de este tipo de modulación de speckle, es importante notar que toda la descripción realizada es totalmente válida si el objeto difusor es reemplazado por una transparencia iluminada a su vez a través de un difusor. Este dispositivo puede utilizarse

para obtener la sustracción fotográfica entre dos escenas no necesariamente planas (IV.8) y se pueden almacenar colores en material fotosensible blanco y negro (IV.9).

En la sección siguiente se utilizarán las propiedades del speckle modulado por franjas de Young en un método para obtener la derivada óptica de una transparencia.

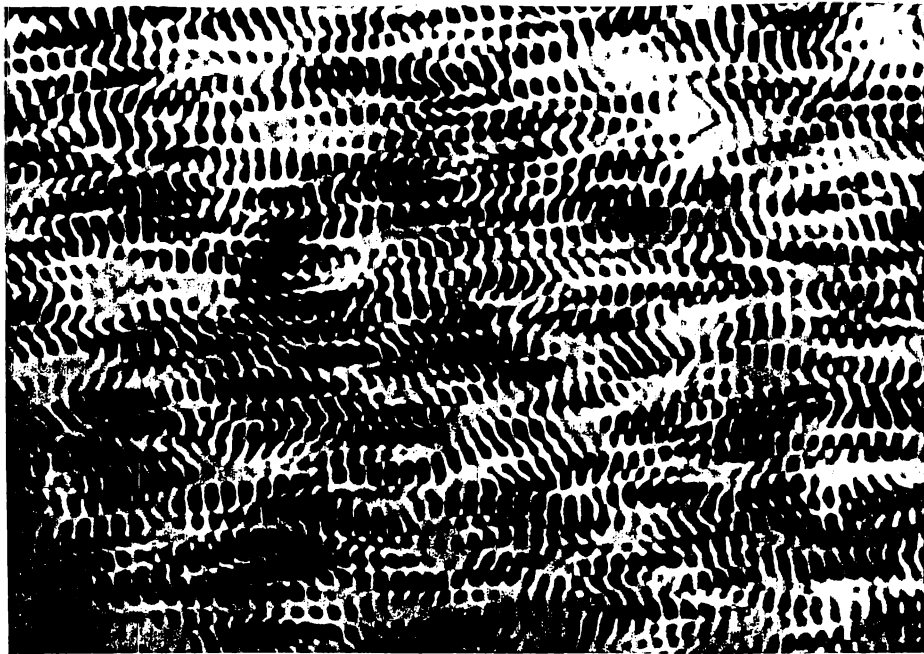


Figura IV.11

IV.4 SUSTRACCION Y DIFERENCIACION DE IMAGENES (0.2)

IV.4.1 Antecedentes

Existen varios métodos (IV.10-12) de sustracción de imágenes para detectar diferencias entre fotografías y escenas.

Entre las aplicaciones de esta operación se encuentra el estudio de recursos geológicos, meteorología, reconocimiento de signos, control de calidad, etc.

Estas operaciones son realizadas en forma relativamente rápida y fácil por métodos digitales, pero los métodos ópticos analógicos resultan más baratos y eventualmente tienen una mejor resolución.

Varias de estas técnicas, aunque no todas (IV.13) están basadas en una modulación de speckle mediante dos sistemas de franjas de Young complementarios entre ambas transparencias a procesar, los cuales actúan como frecuencias espaciales portadoras de la información. Los métodos difieren en general en la forma empleada para producir el cambio de fase en π entre los dos sistemas de franjas.

Los dispositivos comúnmente utilizados emplean polarizadores, prismas de Wollaston, movimientos mecánicos y algunas técnicas permiten operaciones con componentes de color (IV.9-IV.14).

Aquí se propone un método utilizando un conjunto de polarizadores para producir el cambio de fase en los sistemas de franjas que modulan el speckle.

En este caso, el desfase es independiente de la longitud de onda empleada, lo que permite el procesamiento incoherente con componentes cromáticas. Además, el dispositivo tolera pequeñas desalineaciones del sistema óptico y en tal caso, solo resulta afectado el contraste final de las franjas, pero se cumple precisamente el cambio de fase en π .

IV.4.2 Principio del método

Sean T_1 y T_2 las escenas o transparencias a procesar. Se utiliza un sistema óptico similar al descrito en la Figura IV.9, donde cada transparencia es iluminada a través de un difusor, para formar imagen sobre H. En la primera exposición se toma la transparencia T_1 y sobre la placa H se registra un diagrama de speckle modulado por franjas de Young de intensidad.

$$I_1(x_i, y_i) = k_1 |g(x_i, y_i) * t_1(x_i, y_i)|^2 \quad (4.22)$$

Donde k_1 es una constante, $t_1(x_i, y_i)$ es la transmitancia en amplitud de T_1 y $g(x_i, y_i)$ es la respuesta impulsiva del sistema dada por la ecuación (4.12).

En la segunda exposición, se registra sobre la misma placa H la imagen de T_2 retrasando en π la fase entre la luz que procede de una y otra apertura que forman la pupila de la lente.

De este modo queda:

$$I_2(x_i, y_i) = k_1 |g'(x_i, y_i) * t_2(x_i, y_i)|^2 \quad (4.23)$$

Siendo $t_2(x_i, y_i)$ la transmitancia en amplitud de T_2 y

$$\begin{aligned} g'(x_i, y_i) &= \left[\text{rect}\left(\frac{\lambda f_x d_i}{e_0} x_i\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\lambda f_y d_i}{e_1} y_i\right) \right] * \left[\delta\left(\lambda f_x d_i + \frac{e}{2}, \lambda f_y d_i\right) + \right. \\ &\quad \left. + \delta\left(\lambda f_x d_i - \frac{e}{2}, \lambda f_y d_i\right) \cdot \exp(i\pi) \right] = \\ &= \text{sinc}\left(\frac{e_0 x_i}{\lambda d_i}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{e_1 y_i}{\lambda d_i}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi e x_i}{\lambda d_i}\right) \end{aligned} \quad (4.24)$$

De donde la intensidad total almacenada será:

$$I(x_i, y_i) = k_1 |g(x_i, y_i) * t_1(x_i, y_i)|^2 + k_1 |g'(x_i, y_i) * t_2(x_i, y_i)|^2 \quad (4.25)$$

Procesando la placa en condiciones de linealidad, se tiene una transmitancia:

$$t(x, y) \propto |g(x, y) * t_1(x, y)|^2 + |g'(x, y) * t_2(x, y)|^2 \quad (4.26)$$

Se coloca esta placa en el procesador de la figura IV.10 y se repiten los pasos que condujeron de (4.13) a (4.19). En este caso aparecen seis productos de correlación, de los cuales las cuatro autocorrelaciones solo aportan al orden cero que será filtrado en el plano focal posterior a L_1 . Finalmente, la expresión para la amplitud en el plano focal posterior a L_2 es:

$$U(x_i, y_i) = C(|t_1(x_i, y_i)|^2 - |t_2(x_i, y_i)|^2) = C(I_1(x_i, y_i) - I_2(x_i, y_i)) \quad (4.27)$$

Donde el signo menos proviene de la transformada de g' .

De este modo, en el plano de Fourier de la lente L_2 se obtiene una distribución de amplitud proporcional a la resta de intensidades de T_1 y T_2 .

Una explicación más simple del mecanismo utilizado puede darse en términos de un único grano de speckle:

En la primera exposición, cada grano registrará una intensidad dada por:

$$I_1 = C \left[1 + \cos\left(\frac{\pi x_i e}{\lambda d_i}\right) \right] \quad (4.28)$$

Mientras que en la segunda, debido al desfase introducido entre ambas rendijas será:

$$I_2 = C \left[1 + \cos\left[\left(\frac{\pi x_i e}{\lambda d_i}\right) + \pi\right] \right] \quad (4.29)$$

La placa expuesta tendrá entonces granos de intensidad I_1 que sólo fueron expuestos en la transparencia T_1 , granos de intensidad I_2 que solo pertenecen a T_2 y granos que estuvieron presentes en ambas, cuya intensidad será:

$$I = I_1 + I_2 = cte$$

Así los granos de este último tipo no poseen modulación, y en la etapa de reconstrucción sólo contribuyen al orden cero. En cambio, los granos que tienen modulación contribuyen a los órdenes ± 1 donde se obtiene la diferencia de imágenes.

IV.4.3 Dispositivo utilizado para realizar el atraso de fase en π

La base de la operación de restado está en lograr el atraso de fase en π en ambas exposiciones.

El sistema óptico utilizado se muestra en la Figura IV.12 y consiste en una modificación del analizado en la Figura IV.9.

Una fuente coherente provista de un rotador del plano de polarización ilumina las transparencias a procesar a través de un difusor que genera el diagrama de speckle. Un arreglo de tres polarizadores se coloca junto a la doble apertura rectangular que constituye la pupila del sistema.

Dos de los polarizadores con sus direcciones de polarización lineal mutuamente perpendiculares cubren cada una de las dos aperturas, mientras que un tercer polarizador con la dirección de polarización a 45° respecto de los anteriores, cubre ambas aberturas.

Para describir el funcionamiento del sistema de polarizadores se considera la Figura IV.13.

En la primera exposición, la transparencia T_1 es iluminada con un haz incidente cuya dirección de polarización es A . En la pupila de la lente el campo eléctrico se descompone según las direcciones P_1 y P_2 correspondientes a los polarizadores que cubren las aberturas, dando lugar a las componentes A_1 y A_2 . El tercer polarizador orientado según P_3 , da una nueva proyección obteniéndose como resultado las componentes A'_1 y A'_2 que resultan en fase.

A la derecha del gráfico se esquematiza el sistema de franjas que modula los granos de speckle registrados.

En la segunda exposición, la dirección de polarización del haz incidente es rotada 90° e ilumina a la transparencia T_2 , en la pupila se descompone según B_1 y B_2 . Finalmente el tercer polarizador da origen a las proyecciones B'_1 y B'_2 entre las cuales se ha producido la diferencia de fase deseada. El diagrama de franjas correspondiente será complementario del anterior.

Entre las ventajas del método se encuentran su precisión para producir el desfasaje y la independencia de la longitud de onda utilizada, por lo tanto, se puede utilizar una fuente parcialmente coherente de luz blanca y el principio de funcionamiento del método es el mismo.

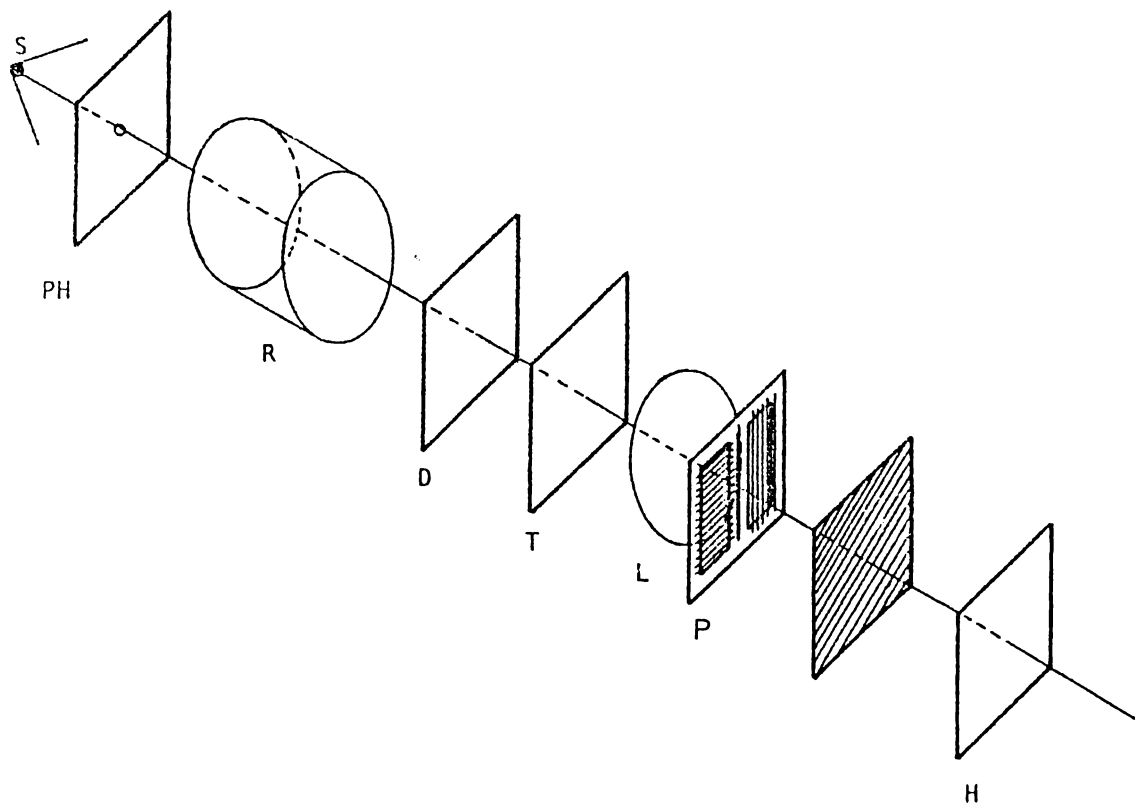


Figura IV.12

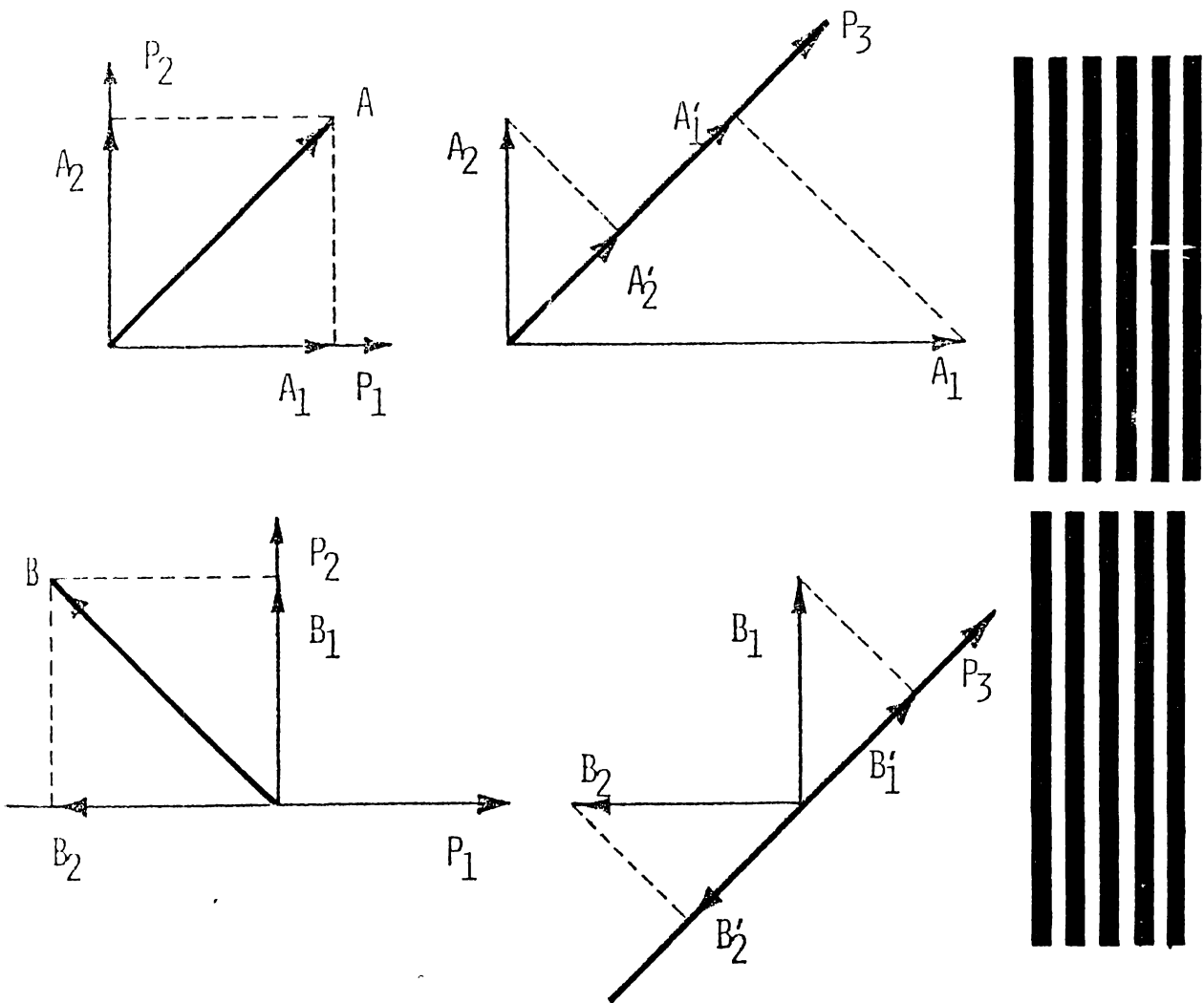


Figura IV. 13

IV.4.4 Derivada óptica direccional

Si en lugar de utilizar en la segunda exposición una transferencia T_2 distinta, se desplaza en una dirección el mismo objeto de la primera, se obtiene una derivada óptica de la imagen de T_1 correspondiente.

Desplazando entre ambas exposiciones la transparencia T_1 una cantidad Δx_i , en la ecuación (4.27) se obtiene:

$$I_i(x_i, y_i) = C[I_1(x_i + \Delta x_i, y_i) - I_1(x_i, y_i)] \quad (4.30)$$

Y para Δx_i suficientemente pequeña se puede escribir:

$$I_d(x_i, y_i) \propto \partial I_1(x_i, y_i) / \partial x_i \quad (4.31)$$

Esta operación permite registrar los cambios de un objeto en una dirección determinada, eliminando las partes constantes del mismo.

En los trabajos experimentales se han utilizado luz laser y luz blanca parcialmente coherente, en este caso la lente L debe estar corregida para aberraciones cromáticas.

La Figura IV.14 muestra resultados experimentales, antes y después del procesamiento.

Se ha empleado un laser de HeNe y película blanco y negro comercial. La calidad de los resultados está limitada por varias razones, entre ellas, la atenuación de puntos idénticos en las imágenes restadas está limitada por los coeficientes

de extinción de los polarizadores (IV.15) y su homogeneidad.

Por otra parte, la técnica es simple de operar, barata y es tolerante a pequeñas desalineaciones.

Si la transparencia es en color, la sustracción o diferenciación se realiza para cada componente monocromática y la imagen final, reconstruida con luz blanca parcialmente coherente, muestra la superposición de todas las componentes monocromáticas, siendo el medio de registro película común blanco y negro, de manera similar al método de la referencia (IV.16).



Figura IV.14

REFERENCIAS

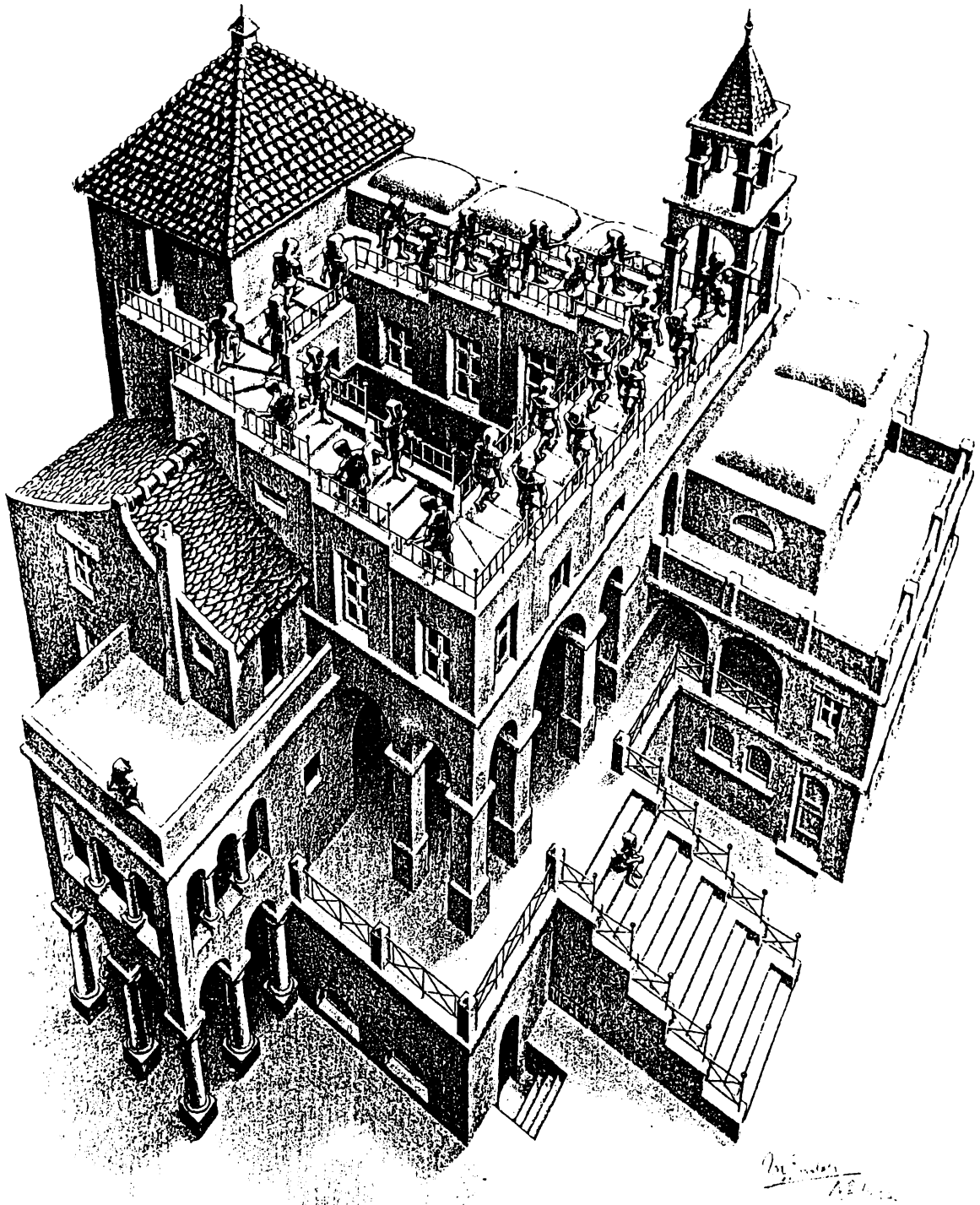
- IV.1 F.T.S. Yu, A. Tai and H. Chen. *J. Opt.* 9, 269 (1978)
- IV.2 T.H. Chao, S.L. Zhuang and F.T.S. Yu. *Opt. Lett.*, 5, 230 (1980).
- IV.3 S. Guel Sandoval, J. Santamaría and J.H. Altamirano. *Optics in four dimensions* (Ensenada, México, Ago. 1980). M. A. Machado and L. M. Narducci Ed., pág. 425.
- IV.4 H.J. Rabal, E.E. Sicre, N. Bolognini and M. Garavaglia. *Opt. Commun.* 39, 226 (1981).
- IV.5 F.T.S. Yu and P.H. Ruterbusch. *Appl. Opt.* 21, 2300 (1982).
- IV.6 J.D. Armitage and A.W. Lohmann. *Appl. Opt.* 4, 339 (1965).
- IV.7 D.E. Duffy. *Appl. Optics* 11, 1778 (1972)
- IV.8 H.J. Rabal. N. Bolognini, E.E. Sicre and M. Garavaglia. *Opt. Comm.* 34, 7 (1980)
- IV.9 E.E.Sicre, N. Bolognini, H.J. Rabal and M. Garavaglia. *Appl. Opt.* 19, 3262 (1980)
- IV.10 D. Gabor, G. W. Stroke, R. Restrict, A. Funkhouser, D. Brumm, *Phys. Lett.* 18, 116 (1965).
- IV.11 J.F. Ebersole. *Opt. Eng.* 14, 436 (1975)
- IV.12 K.S. Pennington, P.M. Well, G.L. Shelton. *Opt. Commun.* 2, 113 (1970).
- IV.13 S. Debrus y R. Kinany. *J. Optics* 10, 119 (1979).
- IV.14 J. Santamaría, A. Plaza y J. Bescos. *Opt. Commun.* 45, 244 (1983)
- IV.15 Filtres polarisateurs polaroid. Societé d'Application et de Réalisation Electronique, 3 Rue Babie, 92190 Meudon

(Hauts-de Seine) Francia.

IV.16 J. Montilla y R. Hernández. *Optica Acta* 29, 843 (1982).

CAPITULO V

CONCLUSIONES GENERALES



Architectural drawing
A. S. 1880

La granularidad óptica (speckle) fue objeto de la atención de los físicos a partir de la invención del láser y sus primeras aplicaciones holográficas. Sin embargo, dicha atención estaba destinada a lograr su eliminación, dado que el speckle significaba ruido de alta frecuencia espacial en las imágenes reconstruidas.

El punto de inflexión hacia las aplicaciones del fenómeno speckle se produjo al tenerse en cuenta que la luz que produce cada grano individual es coherente y puede, por lo tanto, participar en procesos de interferencia óptica.

Paralelamente se comprobó que la modulación de una señal mediante un difusor (portadora aleatoria de alta frecuencia), permite trasladar el espectro original de la señal fuera del orden cero de difracción, facilitando las operaciones de filtrado espacial.

Estas dos observaciones dieron origen a dos ramas de aplicación del speckle: la metrología, por medio de la interferometría, y el procesamiento óptico de imágenes a través de la modulación espacial del speckle. Es dentro de esta última donde se debe ubicar el aporte del presente trabajo, que consiste en un estudio orientado a la obtención de un display eficiente de información mediante el registro de múltiples diagramas de speckle modulados.

Cuando una lente forma imagen de un objeto difusor iluminado por un láser, el diagrama de speckle imagen generado puede

considerarse como debido a la interferencia de ondas coherentes originadas en el plano de la pupila de la lente. Por lo tanto, el diagrama de speckle imagen será la superposición de franjas de Young, donde las frecuencias espaciales y orientaciones corresponderán a todas las posibles dobles aperturas que se encuentren comprendidas dentro del dominio asociado a la pupila del sistema óptico. Por supuesto que al ser las intensidades de todos los sistemas de franjas del mismo orden de magnitud, no es posible almacenar la información contenida en el frente de onda incidente sobre la lente como ocurre en el caso de la holografía. El registro de intensidad en el plano imagen exhibirá, por lo tanto, solo las variaciones espaciales de la intensidad del objeto, modulado por la granularidad del speckle.

Sin embargo, es posible modular el frente de onda objeto incidente para procesar la información que contiene. Para ello será necesario que cada punto del dominio de apertura de la lente pueda dar lugar a un sistema de franjas de Young, de visibilidad apreciable frente a los sistemas de franjas originadas por la interferencia de los distintos puntos del objeto entre sí. Esto se consigue introduciendo como pupila de la lente una máscara con una doble apertura, cuya forma y dimensiones pueden ajustarse de acuerdo al procesamiento que se desea realizar.

La explicación de este hecho puede efectuarse partiendo del caso de una lente sin diafragmar y luego considerar la presencia de la máscara. Inicialmente, la apertura completa

se puede pensar como una doble abertura al dividirse con una línea imaginaria por la mitad. Las distancias entre los puntos de cada una de las dos mitades incluyen todos los valores entre cero (puntos próximos a la línea central) y el diámetro de la abertura; por lo tanto, las franjas de interferencia se entremezclan como ya se mencionó anteriormente. Una vez introducida la máscara, a medida que las dimensiones de la doble abertura disminuyen, las distancias entre los puntos de cada una de ellas van quedando limitadas dentro de un rango comprendido por las separaciones máximas y mínimas de la pupila. Esto produce un angostamiento de la banda de frecuencias espaciales del objeto y un corrimiento que centra el espectro en la frecuencia espacial correspondiente a la separación media entre las dos aberturas. Las franjas de Young comienzan a ser visibles como modulación de los granos de speckle e imponen una codificación a cada uno de los puntos de la imagen. Cuando se ilumina la placa de registro ya revelada, cada grano de speckle difractará luz sólo en las frecuencias espaciales dadas por la separación entre las aberturas. Este hecho es precisamente el responsable de cierta similitud entre estos registros y los hologramas imagen.

La geometría de la doble abertura utilizada determina la forma y dimensiones de los granos de speckle y la modulación del registro, permitiendo seleccionar distribuciones de intensidad en el plano de frecuencias, de acuerdo a las necesidades del procesamiento a realizar. Estas posibilidades constituyen una de las principales ventajas del uso de diagramas de speckle

modulados. Todas las operaciones de procesamiento de imágenes y aún las aplicaciones metrológicas que utilizan diagramas de speckle se simplifican considerablemente al emplear la doble apertura, fundamentalmente porque si el corrimiento del espectro en el plano de frecuencias espaciales es grande (máxima separación de la doble apertura) se facilitan las operaciones de filtrado espacial que en general limitan la calidad de la imagen final obtenida.

Así, la utilización de dobles aperturas rectangulares o circulares introducen dentro de cada grano de speckle una modulación debida a la interferencia de luz proveniente de ambas rendijas y permiten obtener en el plano de Fourier de una lente un espectro que consiste en un máximo central y dos órdenes difractados simétricamente. En el caso de geometría rectangular se obtiene una gran selectividad en los órdenes difractados, los granos de speckle son largos y angostos, con lo cual la resolución del registro puede hacerse máxima en una dirección determinada. Si se trabaja con aperturas circulares, la resolución será la misma en todas direcciones, ya que los granos son también circulares y el sistema puede hacerse menos sensible a descorrelación por vibraciones; en este caso se logra una mayor concentración de los órdenes difractados en el plano de Fourier, lo que permite el filtrado directo ubicando una lente en uno de los dos órdenes.

En la mayoría de las técnicas que se han propuesto en el presente trabajo se ha utilizado una doble apertura que

consiste en dos sectores circulares opuestos por su vértice común.

A partir del análisis estadístico del fenómeno speckle, en el Capítulo II se han estudiado exhaustivamente las propiedades de difracción de los diagramas de speckle obtenidos con esta pupila. Se pudo concluir que la distribución luminosa difractada por el registro contiene un rango restringido de frecuencias espaciales (selectividad angular) en un eje paralelo al bisector de ambos sectores circulares, y dentro de ese rango se puede obtener una cierta uniformidad eligiendo adecuadamente el valor del ángulo θ que caracteriza los sectores circulares. Estas propiedades permiten almacenar información en el registro y que ésta solo pueda ser observada en un ángulo sólido determinado. Si el proceso se repite con varios diagramas de speckle (multiplexing) rotando la pupila en cada caso, luego es posible decodificar la información por separado; por lo tanto, los diagramas de speckle se comportan como frecuencias portadoras de la información óptica. De esta manera se consigue un display de información y esta técnica se ha empleado en esta Tesis en el desarrollo de varios métodos para lograr distintas operaciones de procesamiento de imágenes.

Entre los diferentes displays de información presentados que utilizan esta modulación, se encuentra el almacenamiento de múltiples perspectivas de una escena tridimensional en un único medio de registro bidimensional (placa fotográfica), obteniendo en la reconstrucción visión 3-D. Se han implementado técnicas para la observación estereoscópica con percepción

de profundidad únicamente y luego se las ha perfeccionado para obtener displays más "vivididos" que permiten percibir además una variación cuasi continua de perspectivas de la escena al moverse el observador. Las mismas se han realizado mediante registros secuenciales de varias imágenes moduladas y también se lograron estereogramas en un solo paso mediante un registro simultáneo de diagramas de speckle. Las técnicas son fáciles de implementar y permiten almacenar varios puntos de vista del objeto, dependiendo del rango dinámico del material fotosensible empleado. Asimismo, a diferencia de lo que sucede en holografía, no es necesaria una estabilidad mecánica rigurosa durante las exposiciones y la observación puede hacerse con luz blanca, sin ningún dispositivo óptico. Entre las limitaciones de los métodos de registro simultáneos se debe mencionar que son útiles solo para objetos de extensión angular pequeña o para registrar objetos "diluidos", constituidos por pocos puntos con fondo oscuro. No obstante, uno de los métodos podría tener una interesante aplicación metrológica, al permitir deducir la componente de una deformación en la dirección del eje óptico, lo que no es accesible en las técnicas habituales de speckle.

También se ha presentado un método para obtener estereogramas de objetos sencillos utilizando diagramas de speckle generados por computadora.

De las distintas áreas que conforman la Óptica de Fourier, la holografía y el speckle se pueden considerar históricamente como las más importantes. Una gran variedad de métodos ha

sido desarrollada empleando ambas técnicas para procesamiento de imágenes y aplicaciones metrológicas, por ejemplo, en el estudio de deformaciones y vibraciones. Es interesante destacar que uno de los aportes más significativos de este trabajo es el de demostrar que los diagramas de speckle modulados también son útiles para el almacenamiento de imágenes tridimensionales. En tal sentido se ha realizado un análisis comparativo entre las técnicas holográficas y los estereogramas speckle, desde el punto de vista del contenido de información y los requerimientos de almacenamiento y transmisión de ambos displays. Se ha comprobado que ambos son altamente redundantes ya que tienen un límite de resolución muy por debajo del límite de resolución del ojo humano. Sin embargo, el contenido de información de los estereogramas speckle es del orden de 10^2 veces menor que los displays holográficos. Este hecho es particularmente útil si se emplean diagramas de speckle generados por computadora para originar displays 3-D y en consecuencia este método debe considerarse promisorio en lo concerniente a técnicas de transmisión de imágenes 3-D, en las cuales pueda emplearse alguno de los procedimientos de reducción de información.

El análisis realizado hasta aquí no es completo, sino que por el contrario, surgen distintas posibilidades que amplían el panorama que se pretendió dar a esta Tesis. Uno de los aspectos a estudiar en el futuro es la "razón de muestreo", es decir, el umbral mínimo para detectar diferencias entre imágenes contiguas. También se podrían generalizar estas técni-

cas para generar displays tridimensionales sucesivos, dispuestos en una geometría circular, de manera de permitir la observación de la escena 3-D en 360°; y sería factible el almacenamiento estereoscópico de la evolución temporal de una escena. Por otra parte, resulta conveniente continuar con el estudio y desarrollo de los estereogramas sintéticos para lograr un display generado por computadora.

En el Capítulo IV se ha utilizado los diagramas de speckle modulados para otras operaciones de procesamiento de imágenes que han permitido desarrollar una serie de métodos tendientes a facilitar a un observador la percepción de determinados datos, que de otra manera le serían difíciles de discernir.

Una operación interesante que se ha realizado ópticamente es el pseudocoloreado de una transparencia blanco y negro. En general, el ojo humano es mucho más sensible a distinguir diferencias cromáticas que los cambios de niveles de gris, de modo que si éstos se codifican por medio de colores se pueden detectar con mayor facilidad las distintas partes de una imagen correspondientes a un valor dado de densidad fotográfica. Se debe resaltar que en este caso no se tiene una ganancia en la resolución de la imagen dado que la operación de pseudocoloreación sólo transforma grises en colores.

La operación de almacenamiento de color en película blanco y negro tiene la ventaja de que las imágenes almacenadas en película blanco y negro se mantienen sin alteraciones por períodos de tiempo bastante mayores que las imágenes registradas en película color.

Los métodos de pseudocoloreado de niveles de gris y almacenamiento de color en película blanco y negro presentados aquí, están basados en la codificación de los diagramas de speckle modulados mediante una placa patrón, siendo éste el único paso que requiere la utilización de luz coherente; luego todo el procesamiento se realiza con luz parcialmente coherente con el equipamiento usual de un laboratorio fotográfico.

Los métodos de restado y derivación óptica de imágenes posibilitan a un observador detectar diferencias entre imágenes que difieren muy poco entre sí y consiguen resaltar detalles que de otra manera podrían pasar inadvertidos para el ojo humano. Además, la operación de derivación permite mejorar las imágenes borrosas o exposiciones "movidas". Por otra parte, para propósitos de transmisión de señales ópticas es mucho más conveniente enviar sólo las diferencias entre imágenes sucesivas que la información completa en cada ciclo.

En este trabajo se ha desarrollado un método en que las operaciones de restado y derivación se obtienen empleando un arreglo de tres polarizadores para producir un cambio de fase en π entre dos sistemas de franjas de Young que modulan al speckle. En este caso el desfasaje es independiente de la longitud de onda empleada, lo que permite el procesamiento parcialmente coherente con componentes cromáticas. Además, el dispositivo tolera pequeñas desalineaciones del sistema óptico y en tal circunstancia sólo resulta afectado el contraste de las franjas, pero se cumple precisamente el cambio de fase en π .

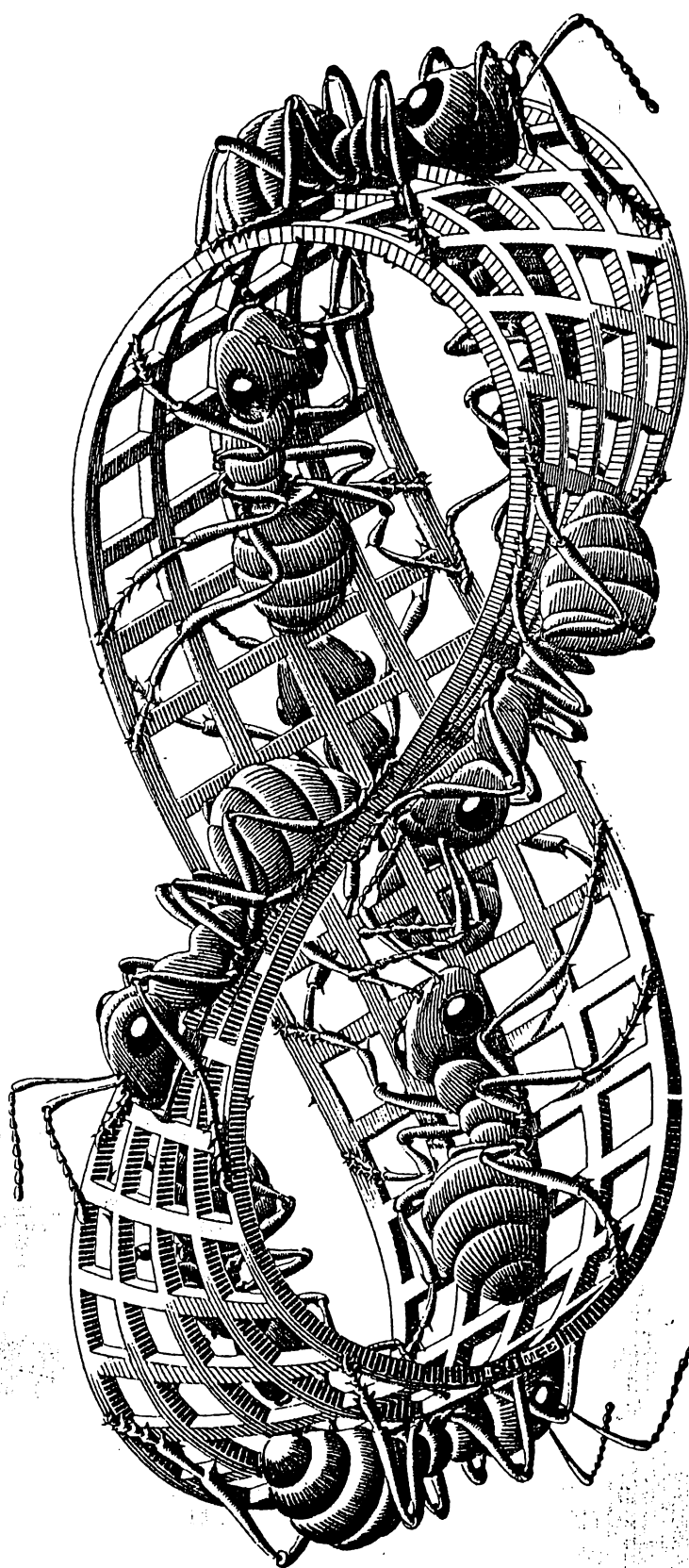
En las técnicas que se han descripto se han utilizado diagramas de speckles modulados por pupilas que consisten en dobles sectores circulares y dobles rendijas rectangulares. Estas últimas presentan una gran selectividad espacial en los órdenes difractados y poseen una mejor resolución en la dirección de las rendijas. En consecuencia, su empleo es aconsejable en los casos que los objetos a procesar tengan un contenido espectral esencialmente unidimensional. Los diagramas de speckle obtenidos con dobles sectores circulares tienen menor selectividad en la difracción, pero poseen una resolución más uniforme en dos direcciones. Por lo tanto, es conveniente su uso cuando se desea una resolución más pareja en el caso de objetos con frecuencias espaciales uniformemente distribuídas.

Finalmente, cabe destacar que la sencillez de los métodos descriptos y los bajos requerimientos de estabilidad mecánica, así como la versatilidad de poder realizar diferentes operaciones de procesamiento de imágenes utilizando un registro patrón, constituyen las principales ventajas de trabajar con diagramas de speckle modulados, siendo su necesidad básica el empleo de fuentes de gran coherencia (láseres).

El análisis de los temas expuestos en esta Tesis, especialmente en cuanto a las aplicaciones a la visión tridimensional no está finalizado, sino que constituye la base para la continuidad de su estudio; del mismo modo, los resultados obtenidos estimulan a proseguir en la búsqueda de nuevas aplicaciones y en la mejora de las aquí expuestas.

APENDICE

CALCULO DE FUNCIONES DE AUTOCORRELACION



CALCULO DE FUNCIONES DE AUTOCORRELACION

Se presentan aquí los cálculos correspondientes a la función de autocorrelación correspondientes a una pupila que consiste en dos sectores circulares opuestos, cuyas propiedades han sido discutidas en la Sección II.4.3.

La función de autocorrelación está definida por:

$$g(u,v) = P(u,v) \otimes P(u,v) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(\xi-u, \eta-v) P(\xi,\eta) d\xi d\eta \quad (\text{A.1})$$

Esta función tiene una interpretación geométrica, ya que representa el área de superposición entre la superficie de una pupila fija y la superficie de otra pupila que se desplaza sobre ella.

En el caso analizado en el Capítulo II es de interés calcular la expresión (A.1) para $v = 0$ debido a que se supuso el eje u paralelo al bisector de ambos sectores circulares de la pupila:

$$g(u) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(\xi - u, \eta) P(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (\text{A.2})$$

Sea a el radio de la pupila y θ el ángulo que caracteriza a los sectores circulares que puede tomar valores entre 0° y 180° . Las áreas de superposición que quedan determinadas son diferentes en varios casos que a continuación se detallan:

CASO A: $0 < \theta < \pi/2$

Las Figuras A.1.2.3 ilustran las áreas de superposición para distintas condiciones, las expresiones para la función $g(u)$ son las siguientes:

$$g(u) = \begin{cases} -4u\eta_0 + 2\eta_0\sqrt{a^2 - \eta_0^2} + 2a^2 \arcsen\left(\frac{\eta_0}{a}\right) - \frac{2\eta_0^2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)} + \frac{u^2}{2} \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) & \text{A.1 para } 0 < u < a \\ -4u\eta_2 + 2\eta_2\sqrt{a^2 - \eta_2^2} + 2a^2 \arcsen\left(\frac{\eta_2}{a}\right) + 2u\eta_1 - \frac{2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)}(\eta_1^2 - \eta_2^2) & \text{A.2 para } a < u < 2a \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -u\sqrt{a^2 - u^2/4} + 2a^2 \arcsen\left(\sqrt{1 - u^2/4a^2}\right) & \text{A.3 para } 2a \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) < u < 2a \end{cases}$$

siendo:

$$\eta_0 = \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}(\alpha - u \cos\left(\frac{\theta}{2}\right))\right)$$

$$\alpha = \sqrt{a^2 - u^2 \operatorname{sen}^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$\eta_1 = \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \frac{u}{2}$$

$$\eta_2 = \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot (u \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \alpha)$$

CASO B: $\pi/2 < \theta < 2\pi/3$

La Figura B muestra el área de superposición; las expresiones para $g(u)$ son las siguientes:

$$g(u) = \left\{ \begin{array}{l} -4u\eta_0 + 2\eta_0\sqrt{a^2 - \eta_0^2} + 2a^2 \arcsen\left(\frac{\eta_0}{a}\right) - \frac{2\eta_0^2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)} + \frac{u^2}{2} \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \qquad \qquad \qquad \text{B.1 para } 0 < u < a \\ \\ -4u\eta_2 + 2\eta_2\sqrt{a^2 - \eta_2^2} + 2a^2 \arcsen\left(\frac{\eta_2}{a}\right) + 2u\eta_1 - \frac{2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)} (\eta_1^2 - \eta_2^2) \\ \qquad \qquad \qquad \text{B.2 para } a < u < 2a \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \\ -4u\eta_2 + 2\eta_2\sqrt{a^2 - \eta_2^2} + 2a^2 \arcsen\left(\frac{\eta_2}{a}\right) + 2u\eta_4 - \frac{2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)} (\eta_4^2 - \eta_2^2) - 2u(\eta_3 - \eta_4) \\ + 2\eta_3\sqrt{a^2 - \eta_3^2} + 2a^2 \arcsen\left(\frac{\eta_3}{a}\right) - 2\eta_4\sqrt{a^2 - \eta_4^2} - 2a^2 \arcsen\left(\frac{\eta_4}{a}\right) \\ \qquad \qquad \qquad \text{B.3 para } 2a \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) < u < \frac{a}{\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \\ \\ -u\sqrt{a^2 - u^2/4} + 2a^2 \arcsen\left(\sqrt{1 - u^2/4a^2}\right) \\ \qquad \qquad \qquad \text{B.4 para } \frac{a}{\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} < u < 2a \end{array} \right.$$

siendo:

$$\eta_3 = \sqrt{a^2 - u^2/4}$$

$$\eta_4 = \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot (u \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + a)$$

CASO C: $2\pi/3 < \theta < \pi$

La Figura C muestra el área de superposición; las expresiones para $g(u)$ son las siguientes:

Por otra parte, se ha calculado el producto de autocorrelación para el eje v , ortogonal a u , en función del parámetro θ . En este caso se ha tomado el origen por $u = u_0$ correspondientes a los máximos secundarios de la función $g(u)$:

$$g(v) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(u_0, \eta - v) P(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (4.3)$$

El área de superposición para $g(v)$ está representado en la Figura E y las expresiones para $g(v)$ son las siguientes:

$$g(v) = \begin{cases} u_0 \left(-\eta_2 + \frac{v}{4} + \frac{\eta_1}{2} \right) + \frac{1}{2} \eta_2 \sqrt{a^2 - \eta_2^2} + \frac{a^2}{2} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{\eta_2}{\sqrt{a^2 - \eta_2^2}} \right) - \frac{v}{4} \sqrt{a^2 - v^2/4} - \\ - \frac{a^2}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{v}{\sqrt{4a^2 - v^2}} \right) + \frac{1}{2 \operatorname{tg}(\frac{\theta}{2})} (\eta_2^2 - \eta_1^2) & \text{para } 0 < v/2 < \eta_2 \\ \frac{u_0}{2} (\eta_1 - v/2) - \frac{1}{2 \operatorname{tg}(\frac{\theta}{2})} (\eta_1^2 - \frac{v^2}{4}) & \text{para } \eta_2 < v/2 < \eta_1 \end{cases}$$

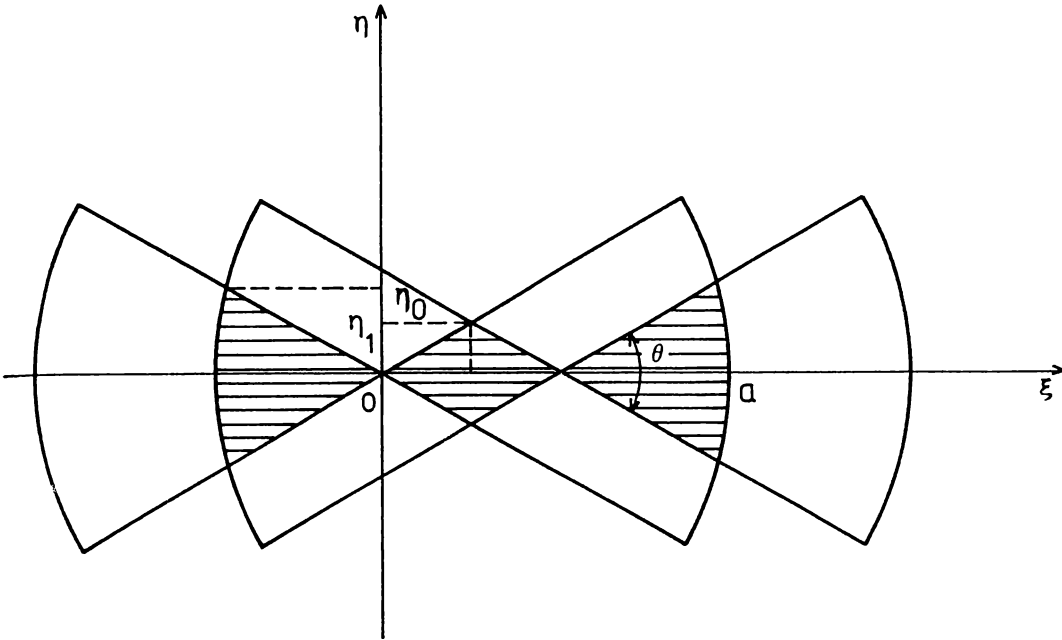
siendo:

$$\eta_1 = (u_0/2) \cdot \operatorname{tg}(\theta/2) \quad \eta_2 = \operatorname{sen}(\frac{\theta}{2}) \cdot (u_0 \cos(\frac{\theta}{2}) - \sqrt{a^2 - u_0^2 \operatorname{sen}^2(\frac{\theta}{2})})$$

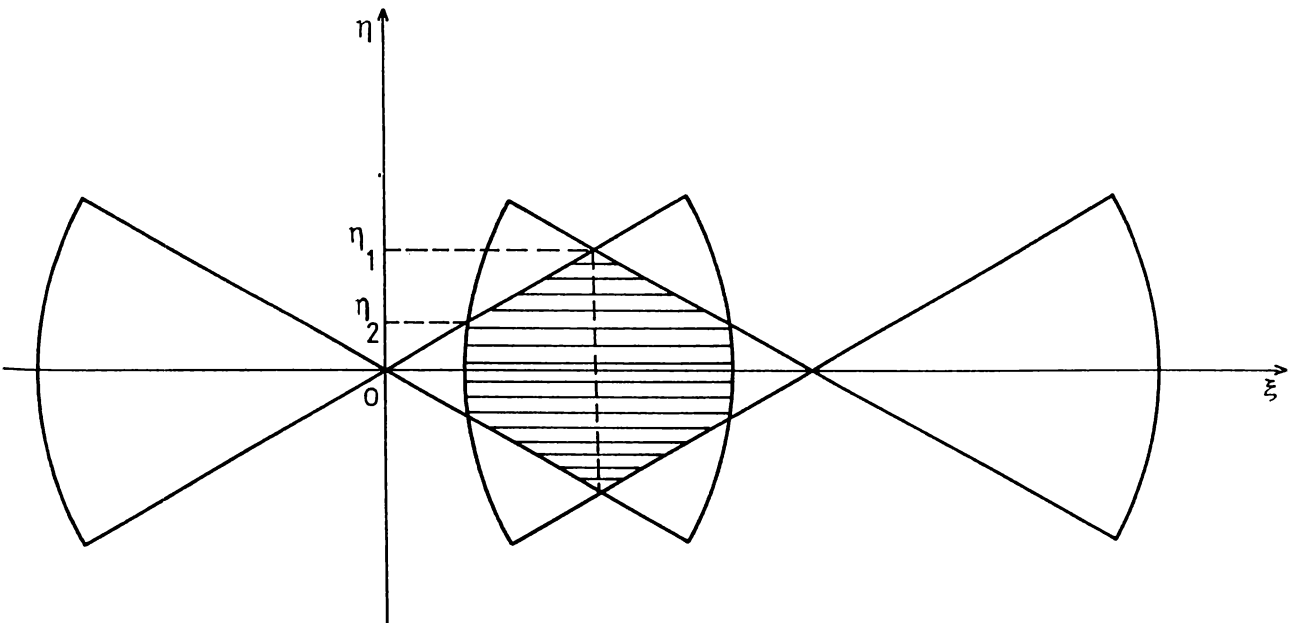
Los gráficos de la función $g(v)$ corresponden a la Figura II.9.b.

A: $0 < \theta < \pi/2$

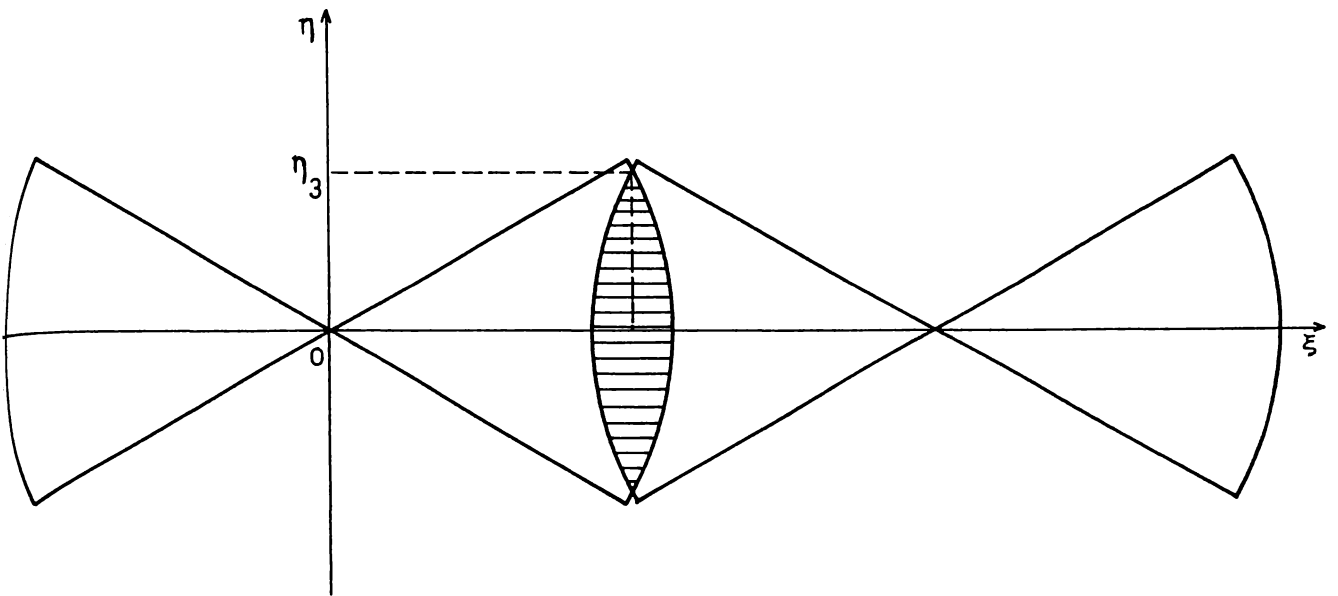
A.1 $0 < u < a$



A.2 $a < u < 2a \cos(\theta/2)$



A.3 $2a \cos(\theta/2) < u < 2a$

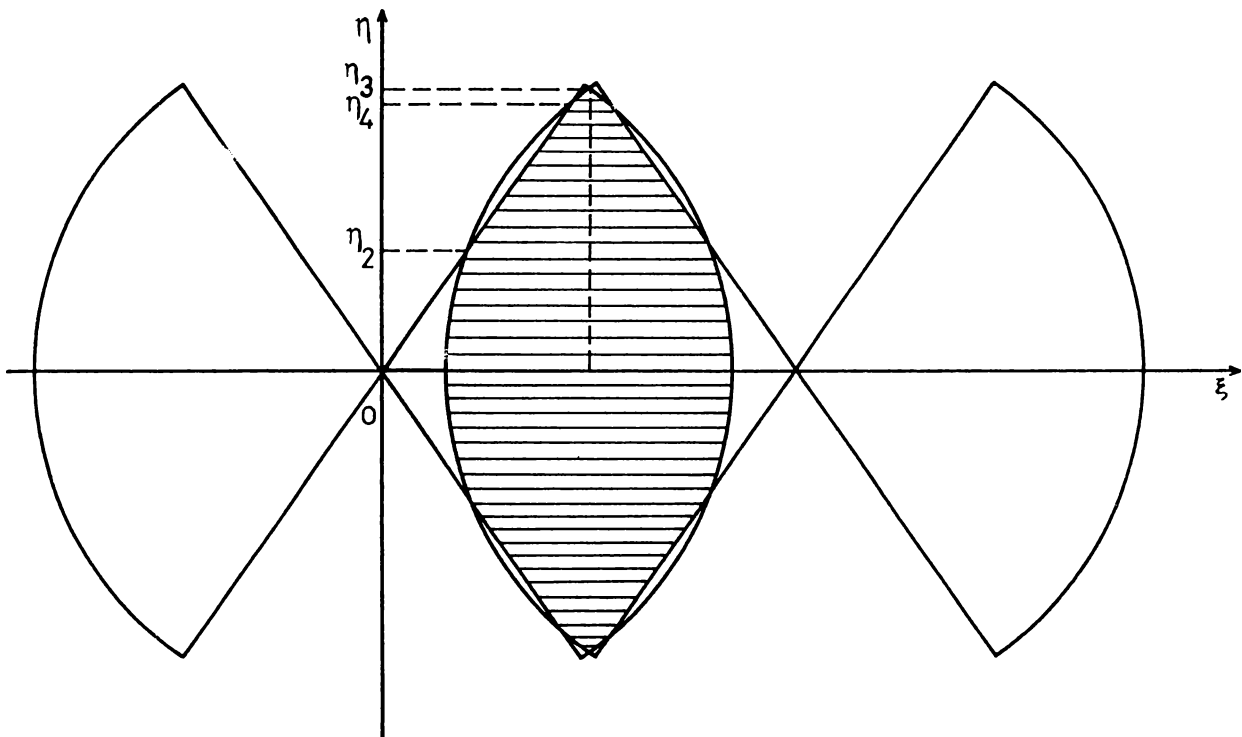


$$B: \pi/2 < \theta < 2\pi/3$$

B.1 Similar a A.1 $0 < u < a$

B.2 Similar a A.2 $a < u < 2a \cos(\theta/2)$

B.3 $2a \cos(\theta/2) < u < a/\sin(\theta/2)$

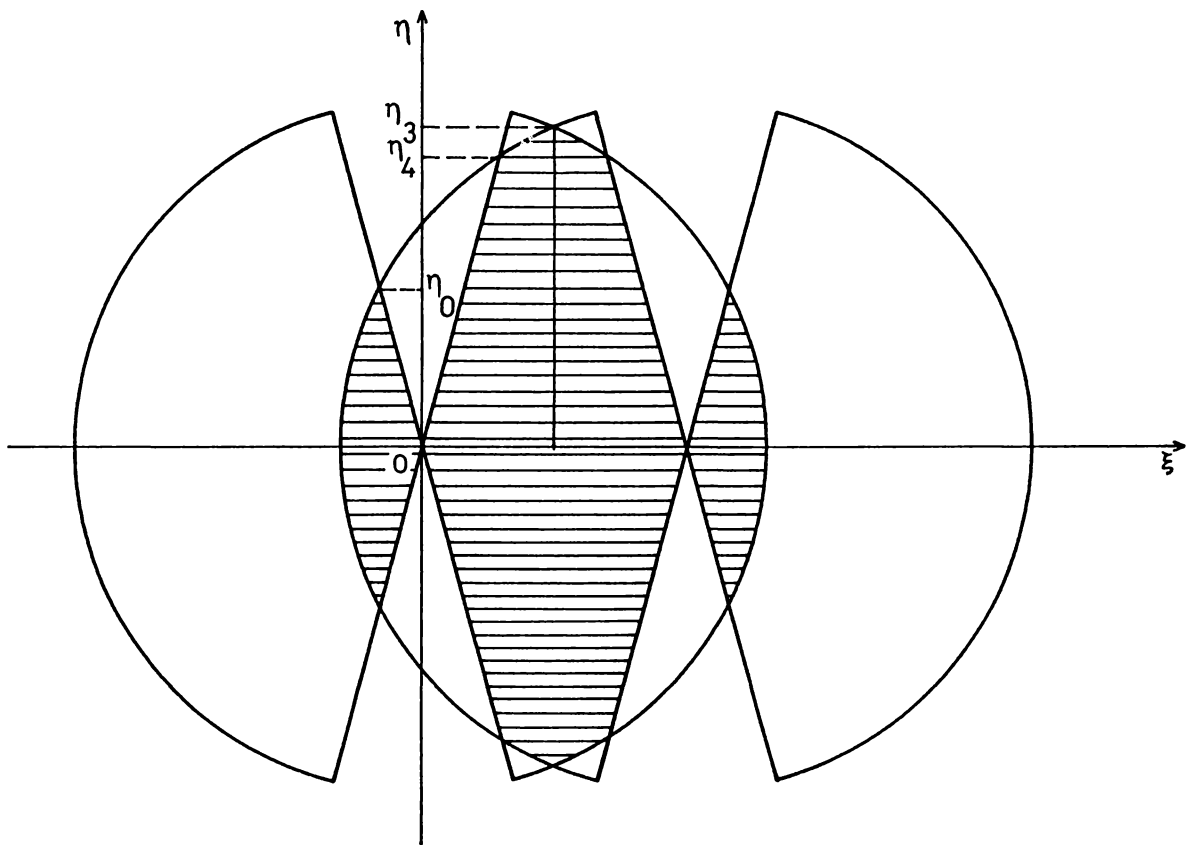


B.4 Similar a A.3 $a/\sin(\theta/2) < u < 2a$

$$C: 2\pi/3 < \theta < \pi$$

$$C.1 \text{ Similar a A.1} \quad 0 < u < 2a \cos(\theta/2)$$

$$C.2 \quad 2a \cos(\theta/2) < u < a$$



$$C.3 \text{ Similar a B.3} \quad a < u < a/\sin(\theta/2)$$

$$C.4 \text{ Similar a A.3} \quad a/\sin(\theta/2) < u < 2a$$

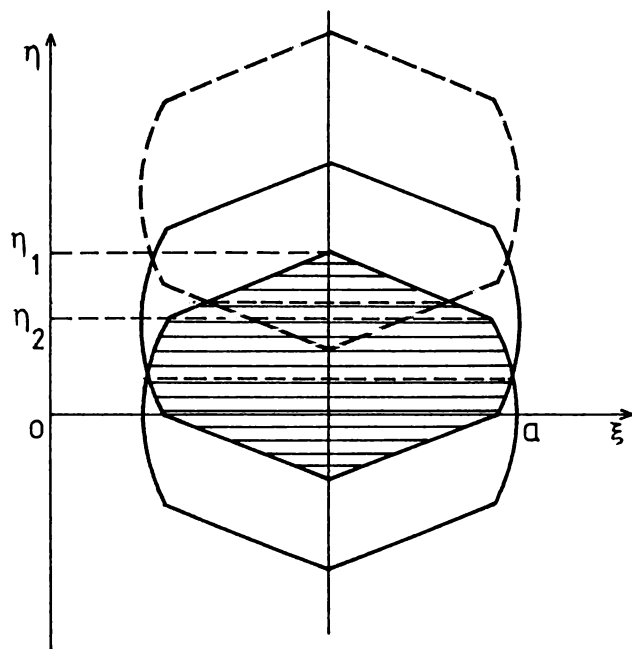


Figura E

Color storage and gray level pseudocoloring using a speckle carrier

M. Trivi, N. Bolognini, E. E. Sicre, H. J. Rabal, and M. Garavaglia

An optical method for gray level pseudocoloring and color storage in black and white film is presented. It is based on the angular selectivity and diffraction uniformity properties of a double-fan shaped pupil. An oriented speckle pattern master is obtained by using coherent illumination. By means of this master, the coding is performed in the conventional-contact-printing way, and its angular position gives the orientation of the speckle pattern in the plate to be recorded. The coding and reconstruction steps are carried out with white light.

In a recent paper we described the diffraction properties of a speckle register obtained with a double-fan-shaped limiting aperture.¹ We have also used the diffraction angular selectivity so obtained for storing several points of view from a 3-D object in a single photographic plate. In this paper we propose an application of this spatial-frequency encoding procedure to other types of image processing operation, namely, color storage in black and white film, and gray level pseudocoloring. In the last few years, several analogical optical methods for obtaining these image operations have been proposed.²⁻⁶ Most of them involve spatial filtering steps, which in most cases introduce severe resolution limitations. In our case, this is mitigated due to the special shape of the aperture employed.

A coherent imaging system where the limiting aperture has a double-fan shape (i.e., two circular sectors opposed by a common apex) is first employed as is shown in Fig. 1. In this way, a master register of the orientated speckle pattern is recorded on the photographic plate M .

Let us now consider the intensity distribution of the spectral contents of M . By denoting the amplitude transmittance of M as $t(x,y)$, its Fourier transform $\tilde{t}(u,v)$ is

$$\tilde{t}(u,v) = k_1 \delta(u,v) + k_2 \langle \Delta(u,v) \rangle [P(u,v) * P(u,v)], \quad (1)$$

where k_1 and k_2 are constants,

$\langle \Delta(u,v) \rangle = \langle \tilde{D}(u',v') \tilde{D}(u' + u, v' + v) \rangle$ indicates a local mean value of a random amplitude distribution,

\tilde{D} represents the Fourier transform of the speckle intensity distribution $D(x,y)$,

$P(x,y)$ describes the pupil function of the coherent optical system, and $*$ denotes an autocorrelation operation.

A graph of this autocorrelation function corresponding to the pupil employed is shown in Fig. 2. As can be seen, outside the zero order the light distribution is sufficiently uniform over the spatial frequency range.

For gray level pseudocoloring, spatial frequency encoding is achieved in a subsequent step using the optical setup shown in Fig. 3, where H is a photographic plate, T is the transparency to be pseudocolored, M is the master register, and E is a common photographic enlarger employed as an illuminating source. In this way, a contact recording is obtained on plate H , which is a negative of T , and it is modulated by the oriented speckle pattern. After being developed, plate H is illuminated by two partially coherent source, each one provided with a different color filter, as illustrated in Fig. 4. Diffusers D_1 and D_2 are placed in order to obtain more extended sources and to make the light intensity on plate H uniform, so it may be seen at a glance. One wave front propagates along the optical axis and gives rise to the contrast-reversed image of the original transparency T by direct transmission through H . The other wave front forms an angle Θ with the optical axis so that the waves diffracted by the oriented speckle pattern, which modulates H , also propagate along the optical axis and give rise to the direct contrast image of T . A superposition of two different color images is obtained in which one of them is a contrast reversal of the other. Thus a pseudocolored image of the original transparency T is obtained.

The authors are with Centro de Investigaciones Opticas, CONICET-UNLP-CIC, Casilla de Correo 124, 1900 La Plata, Argentina.

Received 31 May 1983.

0003-6935/84/020341-03\$02.00/0.

© 1984 Optical Society of America.

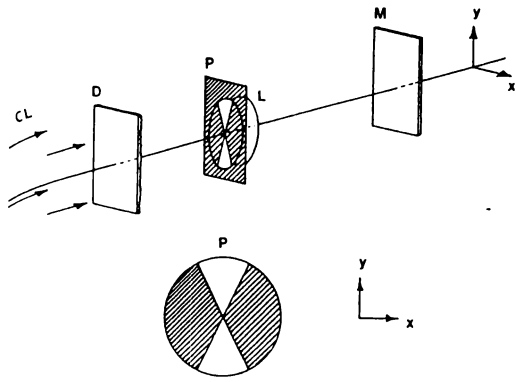


Fig. 1. Scheme of the experimental setup for obtaining the master. CL indicates collimated light from a coherent source. A lens L provided with a double-fan pupil P images a diffuser D on plate M.

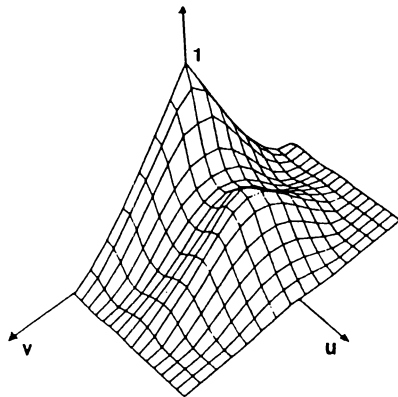


Fig. 2. Graph of the normalized autocorrelation function of the double-fan pupil employed. The u axis is parallel to the bisector of both circular sectors of the pupil.

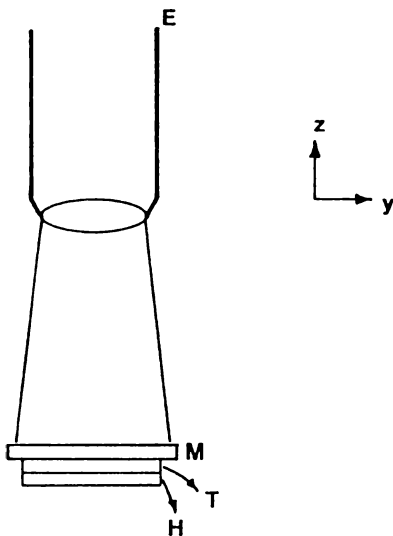


Fig. 3. Scheme of the optical setup used for spatial frequency enlargement of gray level pseudocoloring. Enlarger E illuminates a plate H through the master M and transparency T.

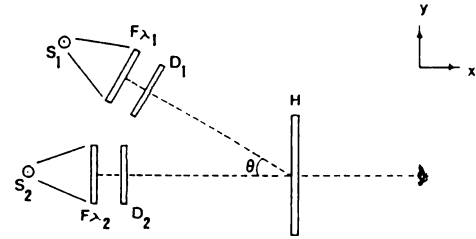


Fig. 4. Experimental setup for pseudocoloring reconstruction. S_1 and S_2 are two white light sources with color filters F_{λ_1} , F_{λ_2} , and diffusers D_1 and D_2 , respectively.

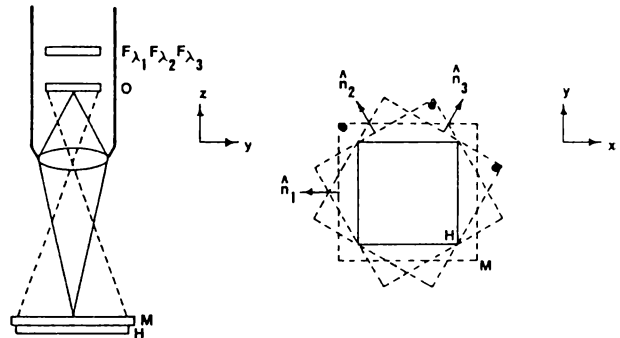


Fig. 5. Setup for color image storing.

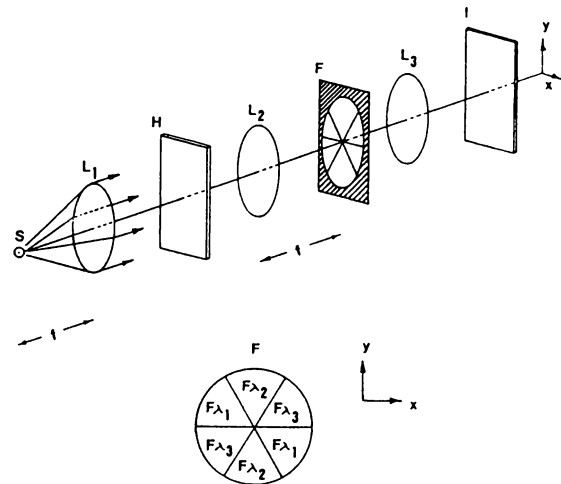


Fig. 6. Scheme of the experimental setup for color image reconstruction. Lens L_1 collimates the light from white light source S . L_2 is the transforming lens. F_{λ_1} , F_{λ_2} , and F_{λ_3} are color filters. H is the black and white sensitive plate with the stored color image. L_3 is the imaging lens.

The experimental device for storing a color image in a black and white sensitive plate is schematized in Fig. 5. In this case, the color transparency O is imaged onto the plate H , with the master of the oriented speckle pattern M placed in contact with H . Three exposures are recorded in the same plate, each one through a different color filter, F_{λ_1} , F_{λ_2} , and F_{λ_3} , and with a different orientation \hat{n}_1 , \hat{n}_2 , and \hat{n}_3 of the master, respectively. In this way, a theta-modulated recording is obtained. For reobtaining the color image, the white light processing described in Fig. 6 can be used. The stored

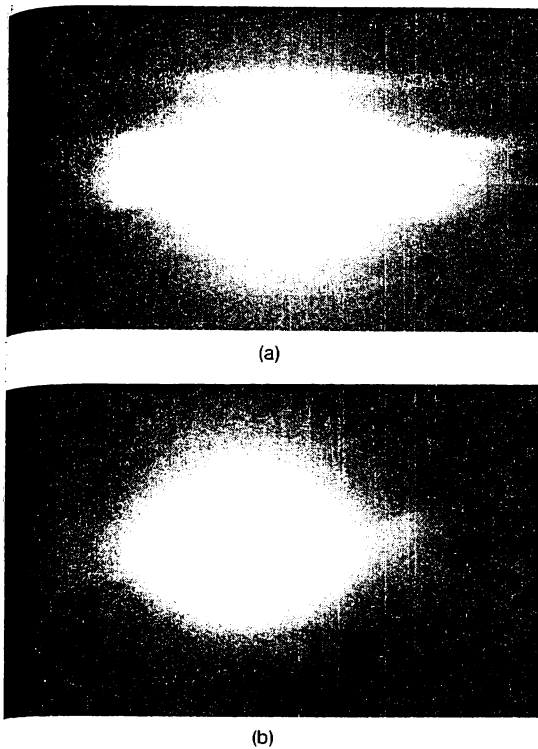


Fig. 7. (a) Fourier transform of the master register; (b) Fourier transform of a contact printing copy.

Image registered on the theta-modulated plate H is spatially filtered through a similar set of color filters

arranged as alternated double-fans, as shown in Fig. 6.

To summarize: we have proposed a technique for gray level pseudocoloring and color storage on black and white film that makes use of the diffraction properties of an oriented speckle pattern on a master register. In this way, a coherent source is required only once, and any black and white transparency can be spatially modulated by contact printing using any common photographic enlarger. The optical Fourier transform of the master register and the optical Fourier transform of a contact print from the master are shown in Figs. 7(a) and (b), respectively. It can be noticed that the contact printing procedure does not substantially affect the diffraction properties of the spatially encoded images.

The authors wish to thank the Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología (SUBCYT), Argentina, for providing financial support for this work.

References

1. H. J. Rabal, E. E. Sicre, N. Bolognini, R. Arizaga, and M. Garavaglia, *Appl. Opt.* **22**, 881 (1983).
2. F. T. S. Yu, A. Tai, and H. Chen, *J. Opt.* **9**, 269 (1978).
3. T. H. Chao, S. L. Zhuang, and F. T. S. Yu, *Opt. Lett.* **5**, 230 (1980).
4. S. Guel Sandoval, J. Santamaría, and J. H. Altamirano, *Optics in Four Dimensions* (Ensenada, Mexico, Aug. 1980).
5. H. J. Rabal, E. E. Sicre, N. Bolognini, and M. Garavaglia, *Opt. Commun.* **39**, 225 (1981).
6. F. T. S. Yu and P. H. Ruterbusch, *Appl. Opt.* **21**, 2300 (1982).

COLOR IMAGE OPTICAL OPERATIONS BY A MODULATED SPECKLE CARRIER

N. RODRÍGUEZ, R. TORROBA, M. TRIVI, H.J. RABAL and M. GARAVAGLIA

Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp), Casilla de Correo 124, 1900 La Plata, Argentina

Received 3 December 1984; revised manuscript received 15 February 1985

A simple method for optical operations with color images is proposed. It is based on the contrast modulation of a spatial carrier frequency. This is achieved by registering the images to be processed on π -shifted fringe systems. The shift is produced by an array of polarizers, and it is wavelength independent. This feature permits the application of the method to color pictures.

1. Introduction

The subject of image subtraction has deserved considerable efforts from several researchers in recent years. Several techniques for performing optical subtraction or differentiation have been developed [1,2].

Though these operations are fast and easily performed by digital computers, the optical approach is sometimes cheaper, and eventually results in a better resolution.

Most of these techniques but not all of them [3], are based on the contrast modulation of a spatial carrier frequency produced by registering both images on π -shifted systems of fringes, and they mainly differ in the way employed for producing the π -shift.

Polarizers, Wollaston prisms, phase plates, and mechanical movements, are some of the devices commonly utilized. Some methods permit operations with the color components of an image [4,5].

In this paper we propose a method using Young fringes modulated speckle (YFMS) [6], and an array of polarizers to produce the π -shift which acts much in the same way as in a recently proposed method [7], but makes use of a special feature of this array, namely that the π -shift is wavelength independent.

Besides, the π -shift always occurs, even if the array is slightly misaligned. In such a case, the effect of the misalignment only affects the final contrast of the fringes, but the π -shift is accurately accomplished.

When the method is applied to monochrome transparencies, subtraction is performed as in the method

of ref. [8], that is, object points common to both transparencies cancel the carrier frequency of their speckles and the differences are depicted as a contrast modulation of the YFMS of uncommon points.

Spatial filtering of diffracted orders leads to an image of the differences.

If the transparencies are in color, subtraction is performed on each monochromatic component, and the final image, reconstructed in partially coherent white light, shows the superposition of all these monochromatic components.

In this way, several operations can be performed on a color transparency, viz subtraction or differentiation on one monochromatic component or simultaneously on all them, contrast enhancement or reversal in one or more components, and so on. Those components not affected by the operations are transmitted unaltered to the final image [9].

2. Description of the method

The YFMS pattern is obtained by using a double slit aperture as the pupil of the optical, coherent or partially coherent, image forming system.

The subtraction process is based on a double exposure of the two images to be subtracted, on the same recording medium. Both images are modulated by complementary YFMS.

When the operation is a differentiation one, the two images correspond to the same transparency, but

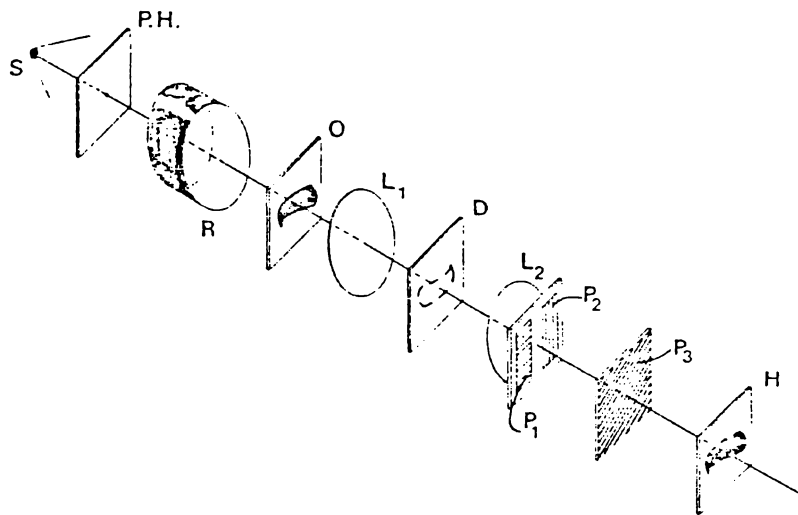


Fig. 1. Experimental recording set-up: S light source; PH pinhole; R polarization rotator; O object transparency; L_1 conjugates object transparency and diffuser plane D; L_2 conjugates diffuser plane and register plane H; P_1 , P_2 and P_3 polarizers.

one of them is slightly shifted in the appropriate direction.

To maintain the same YFMS pattern, the object transparency is imaged onto a diffuser, and this one is then imaged on the recording medium by a lens with the double slit pupil.

All optical elements in the set-up, but the polarizers, are assumed to be isotropic. The illuminating light source must be linearly polarized.

An array of three polarizers covers the double slit pupil in the following way.

Each pupil slit is covered by a polarizer, with their transmission axes perpendicular to each other. A third polarizer covers both of them, with its transmission axis forming an angle of 45° with the axes of the other ones.

As far as the dichroism of the polarizers can be assumed wavelength independent, the fringe pattern π -shift is also wavelength independent. This only being true to a certain degree depending on the polarizers [10].

Both laser and partially coherent white light have been utilized in the experiments. The recording set-up is shown in fig. 1. The object transparency O is imaged by L_1 onto a diffuser D that generates the speckle pattern, R is a polarization rotator or a polarizer. The lens

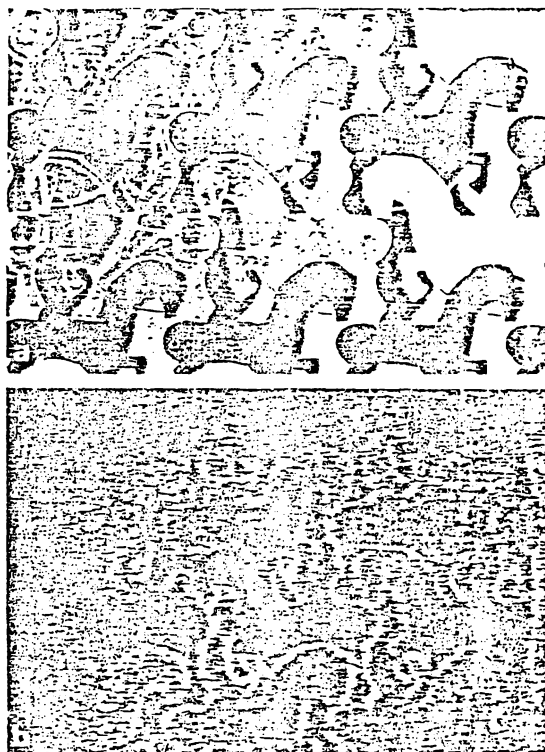


Fig. 2. Experimental result of image differentiation. (a) before and (b) after processing.

L_2 , with the double slit aperture and the array of polarizers, conjugates the diffuser plane and the register plate H.

If a polychromatic source is used, both L_1 and L_2 must be corrected for chromatic aberration. Reconstruction is performed by spatial filtering of the YFMS diffracted orders. The final image can be observed through a slit filter or re-imaged onto a screen.

If only one color image is registered on H, without any alteration, there exists one position of the slit filter that renders a color image similar to the object. If some operation has been performed, a subset of YFMS will show a lower contrast, the carrier frequency on these speckles will be totally or partially cancelled, and such speckles will not contribute or will partially contribute to the diffracted light in the plus- and minus-one orders.

Fig. 2 shows the experimental result of a differentiation over an image.

Laser light, and commercially available black-and-white film were utilized in this case.

The quality of the results is limited because of several reasons: The attenuation of identical points in subtracted images is limited by the extinction coefficient of the polarizers, and by its homogeneity.

On the other hand, the system is simple to operate, cheap, performs on a wide angle of view, and is toler-

ant to small misalignment. Index matching of the polarizers could diminish effects due to the lack of uniformity of the thickness of the polarizers support, and high resolution film could help to improve resolution.

Main drawbacks of the method are limited resolution in one direction and, up to present, the difficulty of being implemented at real time.

References

- [1] D. Gabor, G.W. Stroke, R. Restrick, A. Funkhouser and D. Brumm, *Phys. Lett.* 18 (1965) 116.
- [2] J.F. Ebersole, *Optics* 11 (1975) 436.
- [3] S. Debrus and B. Nkomo, *Optics* 10 (1979) 119.
- [4] E.E. Sicre, N. Bolognini, H.J. Rabal and M. Garavaglia, *Appl. Optics* 19 (1980) 3262.
- [5] J. Santamaría, A. Plaza and J. Bescós, *Optics Comm.* 45 (1983) 244.
- [6] D.E. Duffy, *Appl. Optics* 11 (1972) 1778.
- [7] A. Ghosh and A.K. Chakraborty, *Optica Acta* 30 (1983) 425.
- [8] H.J. Rabal, N. Bolognini, E.E. Sicre and M. Garavaglia, *Optics Comm.* 24 (1980) 7.
- [9] J. Montilla and R. Hernández, *Optica Acta* 229 (1982) 845.
- [10] Filtrés polariseurs polaroid, Société d'Application et de Réalisation Electronique, 3 Rue Babie, 92190 Meudon (Hauts-de-Seine) France.

Letters to the Editors should be addressed to the Editor, APPLIED OPTICS, 7 Norman Road, Newton Highlands, Massachusetts 02161. If authors will state in their covering communications whether they expect their institutions to pay the publication charge, publication time should be shortened (for those who do).

Depth enhancement in holographic imaging

Rabal, M. Trivi, E. E. Sicre, and M. Garavaglia
 Centro de Investigaciones Opticas, Casilla de Correo 124,
 3000 La Plata, Argentina.
 Received 20 September 1985.
 DOI: 6935/86/081259-02\$02.00/0.
 © 1986 Optical Society of America.

Holography using a coherent off-axis reference beam is always a standard technique for reproducing 3-D images. The reference beam is used in the reconstruction step, the image viewed through the hologram accurately replicates all the features of the object, i.e., depth, perspective, etc. But there are some cases where certain types of distortion in the images observed can be useful, for example, rather than objects where depth variations would not be detected as the image depth of field is enhanced. Stereoscopy is another technique for obtaining 3-D images. In this case, slightly different perspectives from a single object are independently seen by each eye. If both images correspond to left and right-eye perspectives, the disparity condition is satisfied, and a 3-D perception is produced. The associated depth of field is the same as that of the original object. However, by varying the perspectives of the image pair, different disparity conditions can be achieved so that the 3-D images perceived have an enhanced (or alternatively a diminished) depth of field. Our purpose is to combine the natural 3-D vision provided by holography, involving depth and subject perspective, with the rather artificial stereoscopic vision, where depth is mainly controlled by the disparity condition. This approach is performed by illuminating the hologram [located in a plane with coordinates (x, y)] with two reconstruction waves, one Σ_2 being the same as the reference and linearly polarized, the other Σ_1 being slightly rotated around the vertical y axis and having a linear polarization state perpendicular to the former one (see Fig. 1). An observer aided with two crossed polarizers (one for each eye) sees two different images, each one originating from one of the two reconstruction beams. If the disparity between homologous points of both images is smaller than a physiological area known as Panum's area,¹ both images can be fused by the observer, and an enhanced 3-D image can be perceived. To simplify the analysis, we consider the hologram of a point object with coordinates (x_0, y_0, z_0) , which was recorded by using a reference plane wave forming an angle θ with the z axis. In the amplitude transmittance of the hologram, the relevant term which gives rise to the virtual image is

$$t(x, y) = C \exp\left(\frac{2\pi i}{\lambda} x \sin\theta\right) \times \exp\left\{-\frac{\pi i}{\lambda z_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\}, \quad (1)$$

where C is a constant. Therefore, we get two amplitude distributions in the reconstruction step:

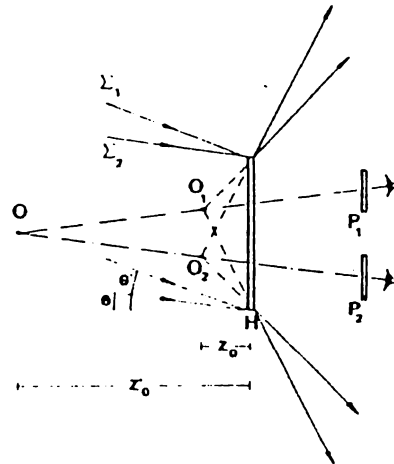


Fig. 1. Scheme of the observation step. O_1 and O_2 are homologous points, and O is the corresponding perceived point.

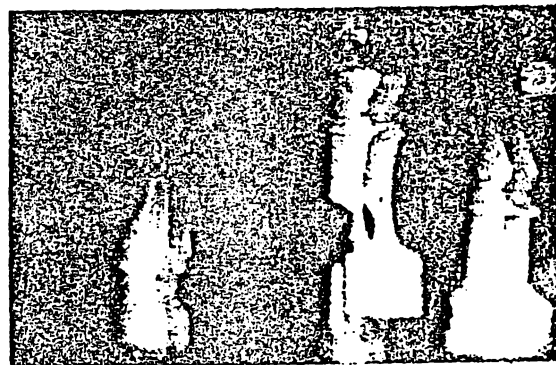


Fig. 2. Photographs of the two reconstructed images from a hologram of four chess pieces taken without polarizers. The angle between both reconstruction beams was $\Delta\theta = 8^\circ$.

$$U_1(x, y; z = 0) = t(x, y) \exp\left(-\frac{2\pi i}{\lambda} x \sin\theta\right) \hat{e}_1, \quad (2a)$$

$$U_2(x, y; z = 0) = t(x, y) \exp\left(-\frac{2\pi i}{\lambda} x \sin\theta'\right) \hat{e}_2, \quad (2b)$$

where θ and $\theta' = \theta + \Delta\theta$ are the angles formed by the two reconstruction beams with the z axis, and \hat{e}_1 and \hat{e}_2 denote crossed linear polarization states. From Eqs. (1) and (2), it is apparent that the two virtual images of the point object, which are independently seen by each eye, are formed at the locations

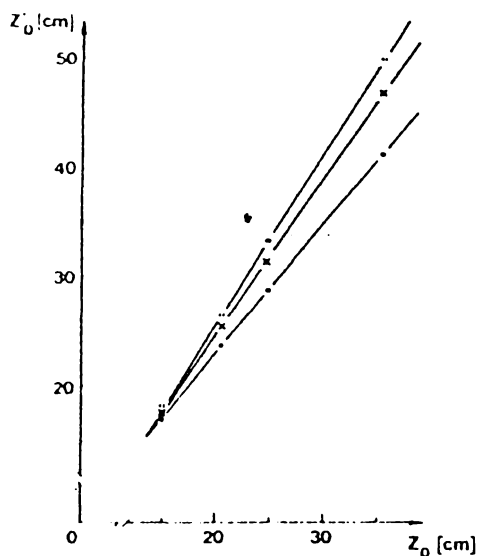


Fig. 3. Graphs illustrating the linear relationship between the enhanced depth z_0' and the actual depth z_0 for the four virtual images reconstructed from the hologram of Fig. 1. The corresponding values of $\Delta\theta$ are \bullet $\Delta\theta = 5.4^\circ$, \times $\Delta\theta = 8^\circ$, \circ $\Delta\theta = 11.4^\circ$.

$$O_1: (x_0, y_0, z_0), \quad (3)$$

$$O_2: (x_0 - z_0 \Delta\theta \cos\theta, y_0, z_0),$$

where a small value of $\Delta\theta$ has been assumed. Therefore, we get a simple geometrical condition for a physical disparity between the images that is independent of the point where the observer fixes his glance, that is,

$$\Delta x = z_0 \Delta\theta \cos\theta. \quad (4)$$

This disparity adds to the natural disparity between homologous points, which is determined by fixation in normal stereoscopic vision. As can be seen in Eq. (4), there is a linear relationship between Δx and z_0 . This has been verified in a series of measurements. Figure 2 shows the reconstructed images as seen without the polarizers, and Fig. 3 shows the corresponding graphs for the enhanced depth z_0' as a function of the actual depth z_0 for three different values of $\Delta\theta$. The value of $\Delta\theta = 11.4^\circ$ was the maximum allowing comfortable fusion.

Reference

1. B. Julesz, *Foundations of Cyclopean Perception* (U. Chicago Press, Chicago, 1971).

For information regarding the length of a Letter, number of illustrations and tables, and general preparation of manuscript, see *Information for Contributors on the second page of any issue.*

Multiple orientated speckle patterns: a study of the contrast

M. Trivi, E. E. Sicre, H. J. Rabal, and M. Garavaglia

Centro de Investigaciones Opticas,
Casilla de Correo 124, 1900 La Plata, Argentina.

Received 21 November 1985.

0003-6935/86/081260-02\$02.00/0.

© 1986 Optical Society of America.

The recording of multiple orientated speckle patterns in a single photographic plate has been used in many applications related to the display of information. By employing different pupil masks for producing adequate spatially modulated speckle patterns (i.e., slits, circular sectors, double apertures), several methods were developed for performing image processing operations, such as pseudocoloring and image subtraction.¹⁻¹¹ The common feature of all these methods is the observation step where the processed image is viewed through the light diffracted by the recorded speckle patterns. Therefore, either the spatial selectivity or the diffraction efficiency of the light field emerging from the recording becomes important parameters to get an adequate display. While the former diffraction feature can be controlled to a large extent by choosing a proper shape for the pupil of the image recording system, the latter one is closely related to the contrast of the whole speckle pattern. We analyze in this Letter the first-order statistical properties of a speckle pattern formed as the sum of N partially correlated speckle patterns. Each individual speckle pattern stores part of the overall information needed to obtain the required display. For example, in a pseudocoloring procedure it can be the image speckle pattern associated with the negative or reversed image contrast, and in a 3-D display it corresponds to a certain perspective of the scene. For this reason, the crosstalk between several speckle patterns which are present in the recording must be avoided or at least minimized. In a recent paper,¹² we proposed a method for obtaining a 3-D display based on simultaneous recording of N speckle patterns. To minimize their crosstalk, which otherwise would destroy the spatial modulation, we employed as pupil mask N different orientated apertures, each provided with a polarizer whose axis lies parallel to the main direction of the apertures. Although the method was proposed for 3-D display purposes, it can be used for other applications such as storing the chromatic components of a color image in black and white photosensitive plates.

From a statistical point of view, the recorded speckle pattern can be considered as the sum on an intensity basis of two partially correlated speckle patterns having crossed linearly polarized states. Each speckle pattern results from the sum of the amplitudes transmitted by each of the N apertures projected onto one of the two mutually perpendicular axes. Therefore, we obtain for the correlation coefficients the following expression:

$$u_{xy} = \langle A_x A_y^* \rangle = \sum_{k,j=1}^N \langle a_k a_j^* \rangle \sin(k\theta) \cos(j\theta), \quad (1)$$

where a_k is the amplitude of the speckle pattern formed by the k th aperture alone, θ is the angle formed by any two consecutive apertures, and $\langle \dots \rangle$ is an ensemble average. By considering the different light field components leaving each aperture as uncorrelated, i.e., $\langle a_k a_j^* \rangle = \langle I_k \rangle \delta_{kj}$, we get

$$u_{xy} = \sum_{k=1}^N \langle I_k \rangle \sin(k\theta) \cos(k\theta). \quad (2)$$

By performing the diagonalization of the coherence matrix defined by the coefficients given by Eq. (2), the corresponding eigenvalues λ_1 and λ_2 are obtained as

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^N \langle I_k \rangle \pm \sqrt{\sum_{k=1}^N \langle I_k \rangle \langle I_l \rangle [\cos 2(k-j)\theta] - 2 \sin[(\sqrt{4} j)\theta] \sin[(k-j)\theta]} \right) \quad (3)$$

Thus the contrast of the whole speckle pattern recording, defined as $C = \sigma_I / \langle I \rangle$ (where σ_I is the standard deviation and $\langle I \rangle$ the mean intensity), can be found from the expressions of the eigenvalues given by Eq. (3) (see Ref. 13) as

$$C = \sqrt{2\lambda_1^2 - 2\lambda_1 + 1} \quad (4)$$

In Eq. (4), it was assumed a unitary mean intensity: $\langle I \rangle = \lambda_1 + \lambda_2 = 1$. To illustrate how the contrast changes for different values of N and θ , we show in Fig. 1 the corresponding contrast variation for different values of N with the angle θ as an additional parameter. The higher contrast values occur for the lower values of θ , but, of course, in this case the second-order statistics will determine a very poor spatial modulation for the individual speckle patterns. Thus the value of θ should be selected from a compromise between a good degree of spatial selectivity for the light diffracted by the speckle recording and a high diffraction efficiency which will be mainly determined by the speckle contrast.

References

1. V. Kopf, "Application of Speckling in Carrier Frequency Photography," in *International Optical Computing Conference, Zurich* (IEEE, New York, 1974), catalog no. 74, p. 862-3c.
2. H. J. Rabal, N. Bolognini, E. E. Sicre, and M. Garavaglia, "Optical Image Subtraction Through Speckle Modulated by Young's Fringes," *Opt. Commun.* **34**, 7 (1980).
3. E. E. Sicre, N. Bolognini, H. J. Rabal, and M. Garavaglia, "Color Storage and Image Processing Through Young's Fringes Modulated Speckle," *Appl. Opt.* **19**, 3262 (1980).
4. H. J. Rabal, E. E. Sicre, N. Bolognini, and M. Garavaglia, "A Speckle Method of Gray Level Pseudocoloring," *Opt. Commun.* **39**, 225 (1981).
5. F. T. S. Yu and P. H. Ruterbusch, "Color Image Retrieval from Coherent Speckles by White-Light Processing," *Appl. Opt.* **21**, 2300 (1982).
6. G. R. Gerhart and P. H. Ruterbusch, "Multiple-Aperture Three-Dimensional Image Construction Utilizing Fringe-Modulated Speckle Patterns," *Opt. Lett.* **7**, 599 (1982).
7. N. Bolognini, E. E. Sicre, R. Arizaga, H. J. Rabal, and M. Garavaglia, "Pseudocoloring Method Using Two Different Spatial Modulations," *Appl. Opt.* **21**, 2099 (1982).
8. P. H. Ruterbusch, J. A. Tome, and F. T. S. Yu, "Multiplexed Speckle and Holographic Interferometry with Color Encoding by White Light," *Opt. Eng.* **22**, 501 (1983).
9. H. J. Rabal, E. E. Sicre, N. Bolognini, R. Arizaga, and M. Garavaglia, "Stereograms Through a Speckle Carrier," *Appl. Opt.* **22**, 881 (1983).
10. M. Trivi, N. Bolognini, E. E. Sicre, H. J. Rabal, and M. Garavaglia, "Color Storage and Gray Level Pseudocoloring Using a Speckle Carrier," *Appl. Opt.* **23**, 341 (1984).

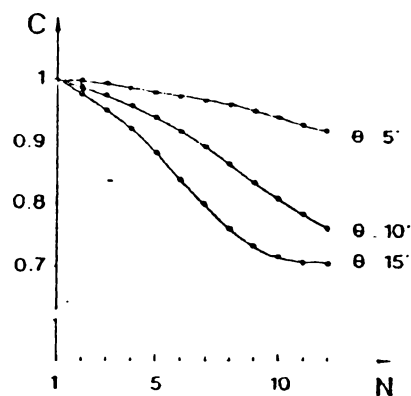


Fig. 1. Contrast of the whole speckle pattern plotted as a function of the number N of individual speckle patterns for three different values of θ .

11. G. G. Mu, Z. Q. Wang, Q. Gong, Q. W. Song, and F. X. Wu, "White Light Image Processing Using Oriented Speckle-Screen Encoding," *Opt. Lett.* **10**, 375 (1985).
12. M. Trivi, H. J. Rabal, N. Bolognini, E. E. Sicre, and M. Garavaglia, "Three-Dimensional Display Through Speckle Stereograms," submitted to *Appl. Opt.*
13. J. C. Dainty, Ed., *Laser Speckle and Related Phenomena* (Springer-Verlag, Berlin, 1975), Chap. 2, pp. 25.

Linear phase shift removal in OTF measurements

Ronald E. Jodoin

Rochester Institute of Technology, Physics Department, Rochester, New York 14623.

Received 9 January 1986.

0003-6935/86/081261-02\$02.00/0.

© 1986 Optical Society of America.

It is well known from the theorems of Fourier analysis¹ that if the spread function of an optical system $h(x)$ is symmetric with its peak at the origin, the phase transfer function (PTF) will be zero for all spatial frequencies k . Furthermore, the shifting theorem tells us that if $H(k)$ is the optical transfer function (OTF), i.e., the Fourier transform of $h(x)$, then $h(x - x_0)$ has as its OTF the function $H(k) \exp(-2\pi i x_0 k)$. The magnitude of the OTF, the modulation transfer function (MTF) is unaffected by the shift, but the phase changes linearly with frequency at a rate $2\pi x_0$. Real spread functions are not, in general, symmetric. In fact, the asymmetry is an indicator of the aberrations in the optical system.² Such asymmetric spread functions will have a PTF that is a nonlinear function of frequency. This leads to a practical problem in measurement of the OTF, namely, how to separate out the linear part of the PTF which is due to uncertainty in the absolute position of the image from the higher-order terms representing the aberrations.

Consider a typical OTF measurement system. The spread of a point source is measured by a slit scan or by differentiating an edge scan of the image. If this spread function $h(x)$ is transformed directly, it contains in its PTF a linear term due to the arbitrary choice of the origin for the scan. The PTF also contains some nonlinear variation with spatial frequency due to the imperfections of the optical system under test. [There is no constant term since the PTF

Three-dimensional display through speckle stereograms

Marcelo Trivi, Hector J. Rabal, Nestor Bolognini, Enrique E. Sicre, and Mario J. Garavaglia

Two methods for obtaining a 3-D image are proposed, based on an adequate combination of the directivity properties of light diffracted by an oriented speckle pattern with the well-known stereovision requirements. Compatibility between an actual 3-D display and 3-D diffracted light distribution is reached in such a way that depth perception and a quasi-continuous variation of perspective are present. The analysis of several angular parameters involved is done to minimize some common limitations such as the flipping effect.

1. Introduction

In spite of the 2-D nature of the retina as a receiver, we perceive 3-D images because of some well-known properties of the human vision: binocular parallax, monocular movement parallax, eye accommodation, etc. Therefore, if we wish to employ all the information processing capability of the visual system, we need to develop efficient techniques for recording and displaying 3-D information. From an optical point of view, light transports information about the surface of an opaque 3-D object through the amplitude of the wave front. In the case of holography, such amplitude is recorded in a coded way to save the phase information. In the reconstruction step, an emergent wave front as originated in the object is obtained from the holographic plate through a diffraction process. Although there is not a unique correspondence between objects and wave fronts (i.e., a given wave front can be associated with several objects), an observer viewing through the hologram recognizes a 3-D image. Thus, the *a priori* knowledge and the brain image processing supply the additional information to produce 3-D vision. Normally, the amount of information stored in a hologram is very large. However, by taking into account the several features related to the human visual system (finite size of the pupil, geometrical aberrations, etc.), far less information is needed to originate 3-D perception. In addition, this amount of information should be related to the features that characterize 3-D vision which must be present. For example, if only depth perception is required, the stereoscopic

techniques provide an adequate 3-D display. The basic stereoscopic principle is based on selecting two different perspectives from a single 3-D object, which are independently seen by each eye. This image pair should satisfy the horizontal parallax condition, that is, they should correspond to right- and to left-eye views of the object. Since this condition represents the main one contributing to 3-D perception of real-life objects, an actual 3-D image is observed even if other conditions, such as proper focusing and scaling, are not completely fulfilled. In recent years, several optical techniques were developed to optimize stereoscopic devices.¹ Furthermore, artificial stereo methods have been proposed for encoding, such as depth information, different image characteristics (intensity, color, etc).^{2,3} In this way, the several methods based on stereoscopy enlarge the field of 3-D vision as a useful tool for displaying information.

In a general sense, the 3-D display involves a certain degree of multiplexing. In the case of a single stereoscopic pair, it can be said that it has associated a twofold multiplexing. But, if we want to perceive a vivid 3-D image of the original scene, i.e., not only depth perception but also a continuous variation of perspective, a higher degree of multiplexing is required. Thus, the light distribution emerging from such multiplexed recording can be considered a sampled version of the wave front that would be needed to store in a hologram to get a complete 3-D image. If the sampling rate is beyond the discrimination of the visual system, the amount of information stored in the multiplexing, although smaller than that contained in a hologram, is still enough to originate a vivid 3-D image. Otherwise, some defects, such as a discontinuous steplike variation of perspective, flipping effect, etc., will be present in the image observed. From all the decoding mechanisms (which take into account light parameters such as polarization, wavelength), we are only interested in a multiplexing image decoding in a space-direction scheme.

The authors are with Centro de Investigaciones Opticas, Casilla de Correo 124, 1900 La Plata, Argentina.

Received 26 October 1985.

0003-6935/86/203776-05\$02.00/0.

© 1986 Optical Society of America.

In a previous paper⁴ we proposed a method for obtaining black-and-white stereograms where an oriented speckle pattern is used to produce the required spatial directivity in the decoding step. A coherent optical system whose pupil mask consists of a double-aperture (i.e., two circular sectors opposed by their apices) is employed to record the different images. The recordings are done with different pupil orientations. Furthermore, each recorded image corresponds to a different point of view of a single 3-D object. In the decoding step, because of the limited spatial frequency range of each recorded speckle pattern, a given image can only be seen from a restricted solid angle, so maintaining the required directivity. In this way, each observer observes only a certain image, and if both satisfy stereoscopic conditions, a 3-D image is perceived. However, some problems could not be avoided, such as a limited range of variations in perspective, flipping effects. Therefore, to observe a vivid 3-D image, a large amount of information to be stored in the multiplexed recording becomes necessary. For this purpose, we present in this paper a method based on a finer spatial modulation of the speckle pattern. We analyze the properties of an N -fold multiplexed recording where N is a number large enough to avoid the common flipping effect but not so large as to originate serious overlapping between diffracted beams associated with successive perspectives of the object. Of course, the storing capacity of the photosensitive medium employed for recording the multiplexing also establishes an upper limit on the maximum number N of different object perspectives that can be selected. Finally, we also propose a single-exposure method for obtaining a 3-D image (but limited to a small number of perspectives) by using a slightly modified optical system.

Three-Dimensional Display Through Multiple Multiplexed Stereograms

The storage of several images coded through oriented speckle patterns and their subsequent independent reconstruction was first suggested by Kopf.⁵ Originally a slit was employed as the pupil of a coherent imaging system in such a way that high spatial directivity was achieved in the decoding step and spurious reconstruction of undesired images was prevented. In this case, high spatial directivity is undesirable since it would mean that each stored image could only be observed from a very restricted region, so limiting the usefulness of such multiplexing as a stereo device for 3-D display purposes. Therefore, we need a more efficient pupil for the optical system to be used. This means that the spatially modulated speckle pattern should still preserve a certain spatial directivity for the diffracted light but, in addition, this light distribution should have a better degree of uniformity. A compromise between these opposite conditions would permit observing each recorded image, in an independent way, from a larger solid angle. To find the adequate pupil function, we investigate the diffraction properties of a single recorded speckle pattern. The relation-

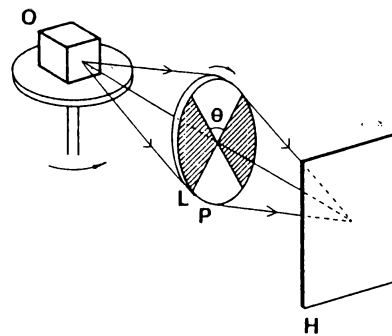


Fig. 1. Scheme of the coherent optical system used to encode several object perspectives.

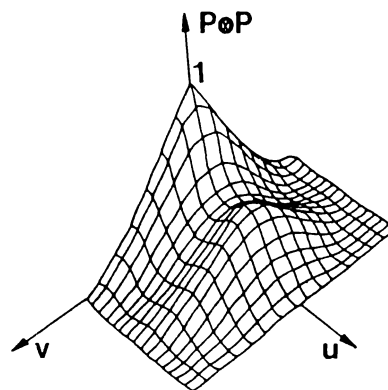


Fig. 2. Graph of the normalized autocorrelation product associated with the pupil function employed. The u axis is parallel to the bisector of both circular sectors.

ship between the spectral content of the diffracted field and the shape of the pupil is given through the expression of the power-spectral density of the speckle pattern.⁶

$$\bar{I}(u,v) = a\delta(u,v) + b \iint_{-\infty}^{\infty} |P(\zeta - \lambda z_i, u, \eta - \lambda z_i, v)|^2 |P(\zeta, \eta)|^2 d\zeta d\eta, \quad (1)$$

where z_i is the image distance, and a and b are two real constants. If we restrict our analysis to binary pupil functions, Eq. (1) can be rewritten as

$$\bar{I}(u,v) = a\delta(u,v) + bP(\lambda z_i, u, \lambda z_i, v) \otimes P(\lambda z_i, u, \lambda z_i, v). \quad (2)$$

Thus, apart from a zero-order term, the power-spectral density is proportional to the autocorrelation product of the pupil function. By taking Eq. (2) into account, we can choose an adequate function $P(x,y)$ satisfying both these requirements. Since spatial directivity involves a shifting of a band of spatial frequencies while uniformity requires a smooth form of the autocorrelation function inside the band, we select for the pupil a binary function which is only nonzero inside two circular sectors opposed by their apices (see Figs. 1 and 2). To increase the uniformity of the shifted band of spatial frequencies (which permits one to see the recorded image from a larger space region or otherwise to observe a larger image from the same region), it is more

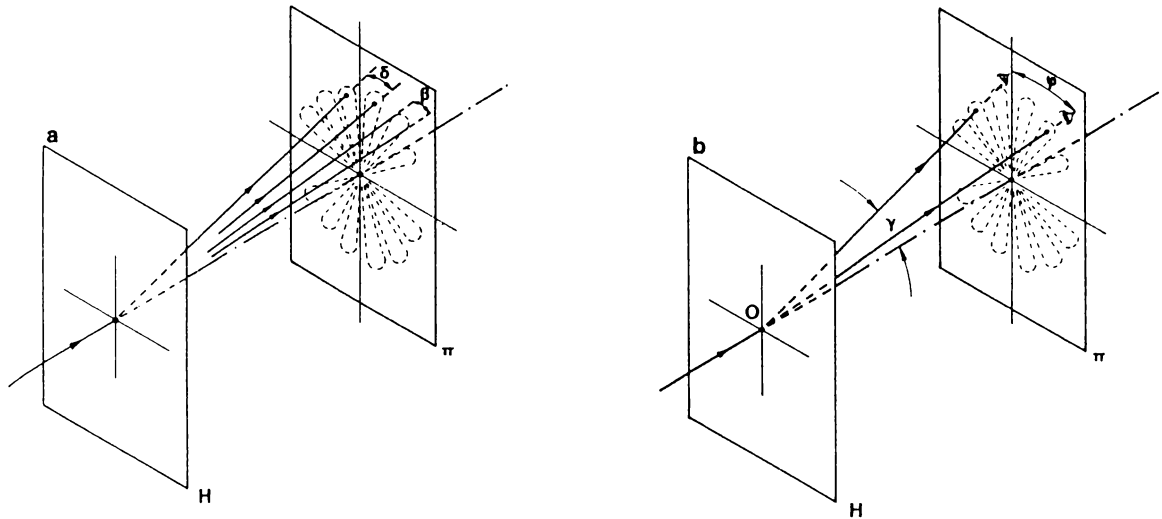


Fig. 4. Scheme of the decoding step geometry: (a) δ is the angle between consecutive secondary maxima; β is the diffraction lobe angular width; (b) γ is the angle between the optical axis and the diffraction direction corresponding to the secondary maxima; φ is the angular eye separation as seen from point O .

which we call β . It depends on the value of the circular sector angle θ , as can be seen from Fig. 3(b). As we want each recorded image to be seen as a whole from the proper location of the viewer, the following restriction on β should be accomplished: $\beta \approx l/D$, where l is the maximum lateral size of the image. This relationship can be satisfied by choosing an appropriate value of θ .

We now require that there be no overlapping between diffracted beams corresponding to successively recorded images. By calling δ this angular separation between adjacent beams, we impose the condition that $\delta \approx \beta$. This can be easily fulfilled by performing the multiple recordings with an in-plane rotation angle α of the pupil mask equal to β . As a final condition to optimize the 3-D vision, we require that $\varphi = n\beta$, where φ is the angular separation of the eyes. By taking into account the normal value of ≈ 7 cm for eye separation, the value of φ is fixed for a given observation distance. For that location of the viewer, the integer n represents the number of different object perspectives that can be stored between the two images simultaneously observed. A typical value for n is five (ten exposures). In addition, the variation of perspective should be accomplished in such a way that the observed image satisfies the disparity condition, so producing stereoscopic vision. As the viewer moves laterally, different image pairs are observed. Therefore, depth perception and a quasi-continuous variation of perspective are achieved.

Single-Exposure Method of a 3-D Display

Here we discuss a single-exposure method for the display when only depth perception is required in the 3-D display. The scheme of the optical system employed for this alternative method is illustrated in Fig. 5. As we only need a single stereoscopic image pair (twofold multiplexing), two different perspectives of the object must be present at the same time in the recording step.

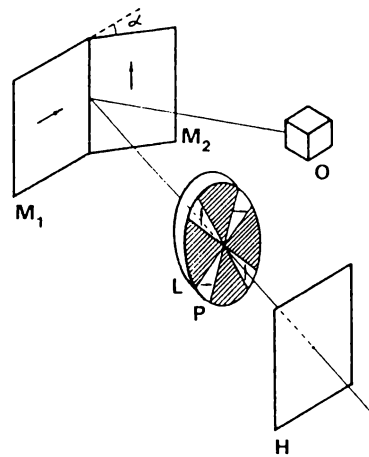


Fig. 5. Scheme of the optical system employed to record a single stereoscopic image pair.

These images are obtained by inserting two plane mirrors M_1 and M_2 between the object and the imaging lens. The angle α formed by the mirrors should be selected in such a way that both object perspectives satisfy the disparity condition. Also, attached to each mirror, there is a polarizer sheet arranged to produce both object points of view with crossed linear polarization states. The pupil mask of the lens now consists of two double circular sectors, each provided with a polarizer sheet. Since both polarizers have a crossed polarization axis, we prevent light interference from different double circular sectors. The image of each object perspective is formed by only one double circular sector; hence, a simultaneous recording of the two image speckle patterns can be obtained avoiding crosstalk. Thus, we maintain the spatial modulation of the whole speckle pattern, so preserving the angular selectivity of the diffracted light in the decoding step. However, as the aperture of the lens should be illuminated

ated by light reflected in both mirrors, the main contribution is originated by light coming from the joining region of the mirrors. So there is a restriction on the lens aperture region from which significant light interference can occur. An effective pupil appears in the system which may reduce the spatial modulation of the speckle patterns. To avoid this effect, small object fields are required to produce the 3-D display.

Conclusions

We have proposed two methods for obtaining a 3-D display, both combining the requirements of stereoscopic vision with the diffraction properties of properly spatially modulated speckle patterns. In the first method, several image speckle patterns are recorded through a multiple exposure procedure in a single photographic plate. In the decoding step, an observer perceives by a diffraction process a sequence of stereoscopic image pairs when moving laterally, producing not only depth perception but also a quasi-continuous variation of the object perspective. An analysis of the several parameters involved in the method was done to optimize the 3-D vision, so diminishing image defects such as the common flipping effect. The second method is adequate when only depth perception is needed in the 3-D display. The two object perspectives, which

satisfy the disparity condition, are simultaneously recorded. To avoid crosstalk between them, which otherwise would affect the spatial selectivity in the decoding step, both image speckle patterns have crossed linear polarization states. However, there is a limitation on the size of the 3-D objects which can be encoded by this alternative technique.

We are currently implementing a cycloramic display using the diffraction properties of the pupil we have analyzed in this paper.

References

1. J. Hamasaki, "Autostereoscopic 3-D Television Experiments," in *Proceedings, Optics in Four Dimensions Conference*, L. M. Narducci and M. A. Machado, Eds. (AIP, New York, 1981), pp. 531-556.
2. A. A. Sawchuk, "Artificial Stereo," *Appl. Opt.* **17**, 3869 (1978).
3. H. Bartelt, P. Edl, and A. W. Lohmann, "Pseudo-Stereo," *Annual Report 1983* (Erlangen-Nurnberg U., Germany), pp. 14 and 15.
4. H. J. Rabal, E. E. Sicre, N. Bolognini, R. Arizaga, and M. Garavaglia, "Stereograms Through a Speckle Carrier," *Appl. Opt.* **22**, 881 (1983).
5. U. Kopf, "Application of Speckling in Carrier-Frequency Photography," in *Proceedings, International Optical Computing Conference, Zurich* (IEEE, New York, 1974), Catalog No. 74, pp. 862-3C.
6. J. C. Dainty, Ed., *Laser Speckle and Related Phenomena* (Springer-Verlag, Berlin, 1975).

3-DIMENSIONAL DISPLAY THROUGH A SPECKLE PATTERN RECORDING: INFORMATION CONTENT AND STORAGE REQUIREMENTS.

Marcelo Trivi, Enrique E. Sicre, Héctor J. Rabal, and Mario Garavaglia.

Centro de Investigaciones Ópticas, (CIC)

Casilla de Correo 124, 1900 La Plata, ARGENTINA.

The 3-Dimensional data display is a useful tool in many optical devices for optimizing the information processing capabilities of the human observer. These devices are used for several applications such as metrology, diagnostic, advertising, art, etc. In a general sense, they can be classified into holographic and nonholographic devices⁽¹⁾. Among these latter ones, we have developed an optical method for storing in a single recording plate different perspectives of a 3-Dimensional scene^(2,3). The encoding procedure is performed by properly spatial modulating a multiple speckle pattern recording. In the decoding step, each perspective can be independently seen by the observer due to the selectivity properties of the light diffracted by each orientated speckle pattern associated to a certain perspective. Besides, the two perspectives observed at each fixed viewer location constitute an image stereoscopic pair. Thus, depth perception and a quasi-continuous variation of parallax is achieved when the observer moves inside the viewing zone. This approach to the 3-Dimensional display can be considered as a sampling of the wave-front that would emerge from a hologram of the same scene. This reduction of the information contained in the display is justified if we take into account the high redundancy which is normally present in holography, and the several limitations of the human vision such as the finite extent of the retina. However, it is worthwhile to compare the multiple exposure speckle method with the holographic approach from the point of view of their information contents, so obtaining the corresponding requirements for storing and transmission purposes.

In order to perform such comparison, let us consider a 3-Dimensional object which is confined within a volume defined by Δx_0 , Δy_0 , and Δz_0 . First, we analyze the information content (IC) stored in a Fresnel hologram of such object. We characterize the display given by the hologram by the visual field of view Ψ and

the viewing zone Ω , which are defined as:

$$\Psi_x = \text{tg}^{-1}(\Delta x_0 / z_0) \quad ; \quad \Psi_y = \text{tg}^{-1}(\Delta y_0 / z_0) \quad (1)$$

$$\Omega_x = \text{tg}^{-1}(a / z_0) \quad : \quad \Omega_y = \text{tg}^{-1}(b / z_0)$$

where z_0 is the mean distance between the object and the hologram, and a and b are the linear dimensions of the holographic plate. In these conditions, the IC stored in the hologram can be approximately expressed by the sampling point number, which can be written as⁽⁴⁾:

$$P_H = 4 \Omega_x \Omega_y \Psi_x \Psi_y (z_0 / \lambda)^2 \quad . \quad (2)$$

Typical values for standard holograms are: $P_H \approx 10^{10}$. The resolution limit for the reconstructed virtual image is:

$$\delta \approx 2 \lambda (D + z_0) / A \quad (3)$$

where D is the distance between the hologram and the observer, and A denotes the pupil diameter of the eye. Thus, for $D = z_0 = 300$ mm, we get: $\delta \approx 300 \mu\text{m}$. Therefore, a large hologram width is required, not to give enough resolution but to achieve enough viewing zone. Now, if we wish to compare the IC for the hologram as given by Eq. (2) with the IC stored in a multiple exposure speckle stereogram, we should refer to the same 3-Dimensional display; i.e., the observed image should have associated the same values of the visual field of view and of the viewing zone than those given by Eqs. (1).

Due to the pupil shape of the recording optical system, the light distribution diffracted by each individual speckle pattern shows a secondary maximum with an angular extent given by β_x^* and

β_y . If d_x and d_y denote the main dimensions of the pupil aperture, then we obtain:

$$\beta_x = d_x / z_i \quad ; \quad \beta_y = d_y / z_i \quad , \quad (4)$$

where z_i is the image distance in the recording step. Since we want that each recorded image can be seen as a whole from a proper location of the viewer, the following restrictions on β_x and β_y should be accomplished:

$$\beta_x = x_0 / D = \psi_x \quad ; \quad \beta_y = y_0 / D = \psi_y \quad , \quad (5)$$

being x_0 and y_0 the maximum lateral sizes of a certain image. As we wish to store N different perspectives of the 3-Dimensional scene, and we require that there is no overlapping between diffracted beams corresponding to successive registered images, it should hold for the viewing zone:

$$\Omega_x = N \beta_x \quad ; \quad \Omega_y = \beta_y \quad . \quad (6)$$

Therefore, the IC stored in the multiple exposure speckle stereogram can be expressed through an equivalent sampling point number P_S , which can be written as:

$$P_S = (2x_0 d_x / \lambda z_i) (2y_0 d_y / \lambda z_i) \quad ; \quad (7a)$$

or alternatively, by using Eqs. (4) to (6),

$$P_S = 4\Omega_x \Omega_y \psi_x \psi_y (D^2 / \lambda^2 N) \quad . \quad (7b)$$

Of course, the value of N is restricted by the condition:

$N \leq \pi D / x_0$. In practical cases, the maximum number of recorded

images is: $N \leq 20$. In this method, the image resolution is fixed by the average sizes of the speckle grains, which are normally well beyond the resolution limit δ of the observer (given by Eq. (3)). Thus, in normal conditions, we can obtain a value of P_S 10^2 times smaller than the sampling point number for the holographic case. However, there still exists the redundancy associated with the stereoscopic vision⁽⁵⁾, whose removal can further reduce the IC of the speckle stereograms. This fact is particularly useful if we employ computer generated speckle patterns to originate the whole 3-Dimensional display. Hence, this method seems to be promising concerning with transmission techniques of 3-Dimensional images, which otherwise should employ some of such information-reduction procedures.

References

- /1/ "Three Dimensional Imaging". Proc. SPIE, Vol 402, April 18-22 (1983)
- /2/ H.J. Rabal, E.E. Sicre, N. Bolognini, R. Arizaga and M. Garavaglia, "Stereograms through a speckle carrier", Appl. Opt. 22, 881 (1983).
- /3/ M. Trivi, H.J. Rabal, N. Bolognini, E.E. Sicre and M. Garavaglia, "3-Dimensional display through speckle stereograms", Appl. Opt. (to be published).
- /4/ T. Okoshi, "Three-dimensional displays", Proc. IEEE 68, 548 (1980).
- /5/ L.P. Yaroslavski, "On the redundancy of stereoscopic pictures" Proc. Of "Image Science '85". Vol 1, 82. June 11-14 (1985).