

# MÉTODOS DE PROYECCIÓN DE UNA FRANJA

R. Arizaga, H. Rabal, M. Trivi,

Centro de Investigaciones Ópticas (CIOP), CC 124 (1900) La Plata.

E. Alanis, G. Romero

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta,  
Buenos Aires 177, (4400) Salta.

Se presentan dos experiencias de interferometría digital speckle (DSPI) para generar una traza luminosa sobre un objeto, que corresponde a la intersección de la superficie de éste con un plano matemático. Una de ellas se realiza por múltiple exposición con luz coherente y la otra usando un láser de reducida longitud de coherencia en un dispositivo similar a aquél utilizado en experimentos de "luz en vuelo" (light-in-flight).

We present two Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI) experiments to generate a light slice on an object corresponding to the intersection of it with a mathematical plane. One of them is done using multiple exposures in coherent light and the other using a laser with a short coherence length in a set-up similar to those of light-in-flight experiments.

## I. INTRODUCCIÓN

Es un procedimiento usual en metrología óptica, proyectar sobre un objeto un sistema de franjas u otra estructura periódica para determinar su topografía<sup>1</sup>. Existe en estos métodos una ambigüedad en el orden de la franja cuando se encuentran discontinuidades profundas. Varias técnicas han sido desarrolladas para remover esta ambigüedad, consistentes en la proyección secuencial de sólo una franja. Este método de proyección es conocido en la literatura como "lichtschnittverfahren". Algunas de ellas utilizan lentes cilíndricas<sup>2</sup> y otras un barrido del haz láser<sup>3</sup>.

En este trabajo se proponen dos nuevas técnicas alternativas que, básicamente, aprovechan luz de reducida coherencia, para materializar el lugar geométrico donde la diferencia de caminos ópticos de la luz, proveniente de dos fuentes puntuales, es aproximadamente nula.

En la primera de ellas, se modifica digitalmente la coherencia espacial de la luz de iluminación, en tanto que en la otra, se aprovecha el corto tiempo de coherencia de un láser de colorante.

## II. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA DE COHERENCIA ESPACIAL (SCE)

En un trabajo reciente<sup>4</sup>, algunos de los autores propusieron que las técnicas de contorneado mediante interferometría digital speckle (DSPI), podrían ser usadas para generar franjas de interferencia de

haces múltiples, como el método análogo de Hildebrand y Haines<sup>5</sup>. De esta manera, las franjas obtenidas son más estrechas y la ambigüedad en las discontinuidades puede removerse.

Es posible, como se mostrará más adelante, utilizar imágenes múltiples para sintetizar un perfil particular, por ejemplo, uno que aproxime una función delta. En consecuencia, se verá el objeto intersectado por un plano aproximadamente matemático, lo que dará información unívoca de la topografía del mismo.

La Fig. 1 muestra el montaje experimental. El haz del láser incide sobre el divisor de haz variable BS1. Uno de los haces es expandido y enfocado en el plano del diafragma de la cámara CCD y es usado como haz de referencia. El otro haz ilumina el objeto O, después de reflejarse en el espejo M<sub>1</sub>, el que puede ser rotado con precisión. La cámara CCD

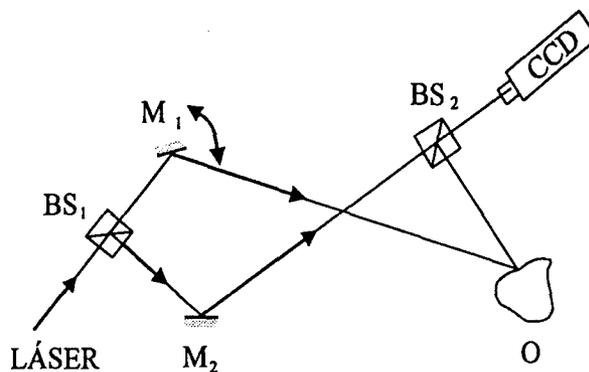


Fig. 1: Dispositivo experimental del SCE descrito en el texto.

registra  $N$  imágenes correspondientes a otras tantas posiciones angulares igualmente espaciadas del espejo  $M_1$ . Estas imágenes son digitalizadas por medio de un procesador de imágenes y almacenadas en memoria para su posterior tratamiento.

El procesamiento consiste en la substracción de pares de imágenes correspondientes a iluminación simétrica del objeto y en la adición posterior de los valores absolutos de estos resultados. Es decir: la imagen  $i$  es restada de la  $N-i$ . Cada uno de estos pares, después de restados, produce una imagen del objeto con franjas de Young proyectadas<sup>4</sup>, siendo la franja de orden cero siempre oscura. El espaciado de las franjas de Young es distinto en cada imagen, pero dado que la franja central permanece en la misma posición en todas ellas, el lugar donde ésta intersecta el objeto es siempre oscuro. En las regiones restantes del objeto, correspondientes a órdenes más altos de interferencia, los distintos sistemas de franjas de Young no coinciden en general y en consecuencia, cuando las imágenes son sumadas, sus diagramas de speckle se promedian resultando en una intensidad aproximadamente uniforme.

La intensidad  $I(i, j)$  en cada pixel de la imagen procesada se calcula como:

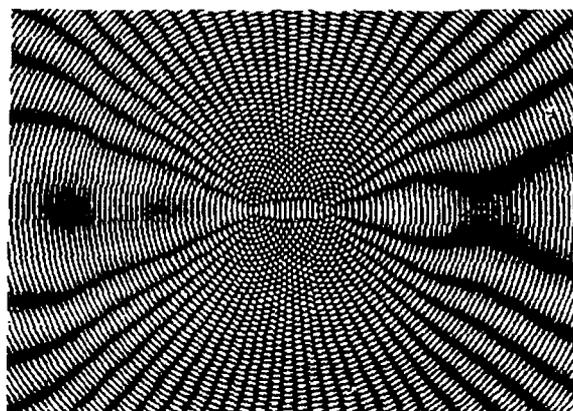
$$I(i, j) = W \sum_{k=1}^N |z_{ij}(\vartheta_k) - z_{ij}(-\vartheta_k)| \quad (1)$$

donde  $\vartheta_k$  es el ángulo que forma la normal al espejo con el plano que esta siendo sintetizado,  $z_{ij}(\vartheta)$  es la intensidad de cada pixel, registrada cuando el ángulo de incidencia es  $\vartheta_k$  y  $W$  es un factor de normalización.

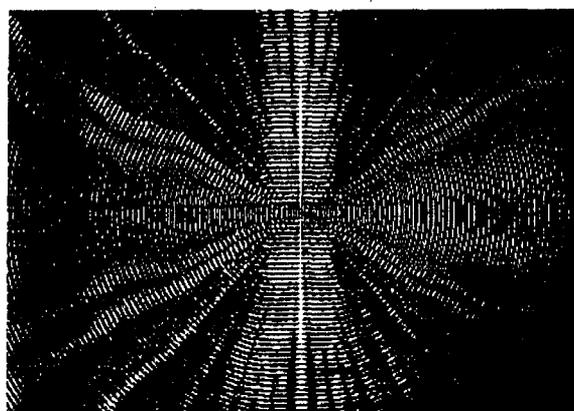
La Fig. 2 muestra una simulación de las franjas de Young utilizando "moire". En la Fig. 2a) se ve el diagrama de moire formado por dos sistemas de círculos concéntricos igualmente espaciados. La franja central de orden cero es brillante. La Fig. 2b) corresponde a la superposición de 16 patrones como el anterior, cada uno de ellos obtenidos desplazando ambos conjunto de círculos simultáneamente en direcciones opuestas y sumando los resultados. Puede observarse una franja central brillante y delgada en el centro, mientras que el resto de las franjas son considerablemente atenuadas.

La Fig. 3 muestra los resultados experimentales obtenidos. La franja oscura materializa la intersección de la superficie del objeto, en este caso un jarrón, con un plano. Se utilizaron 24 imágenes correspondientes a incrementos del ángulo  $\vartheta_k$  en pasos de  $2 \times 10^{-3}$  radianes, siendo la longitud de onda  $\lambda = 632$  nm.

Este experimento puede ser interpretado como



(a)



(b)

Fig. 2: Simulación de las franjas de Young mediante moire. a) Fig. de moire entre dos sistemas de círculos igualmente espaciados. b) Superposición de 16 figuras.



Fig. 3: Resultado del SCE. Puede verse una franja oscura en el cuello del jarrón.

una síntesis de Fourier de una función delta que representa un plano, en términos de la superposición de un continuo de frecuencias espaciales. En este caso el "continuo" es aproximado por un número finito de pasos de giro del espejo. La razón física es que la franja central permanece siempre brillante y en reposo al desplazar simétricamente ambas fuentes.

### III. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO DE COHERENCIA TEMPORAL (TCE)

En el segundo experimento se utilizó el montaje mostrado en la Fig. 4. Un láser de colorante, de reducida longitud de coherencia (Rhodamina 6-G, bombeado por un láser de argón) se divide en dos haces los que son expandidos y utilizados para iluminar el objeto con dos frentes de onda esféricos desde dos direcciones diferentes. La imagen del objeto se registra con una cámara CCD y se procesa. Uno de los espejos (PEM) es controlado piezoeléctricamente de manera tal que permite introducir una diferencia de fase entre ambos haces. El camino óptico de ambos haces es cuidadosamente igualado de manera que sobre el objeto existe una región restringida donde es posible observar interferencia. Una primer imagen es registrada por la cámara y luego se provoca un corrimiento de fase en  $\pi$  moviendo el espejo PEM, para registrar luego una segunda imagen. Esta última es restada a tiempo real de la primera y el módulo del resultado se muestra en un monitor de video.

Sobre la región de la imagen donde los dos haces son mutuamente incoherentes, las intensidades de los dos diagramas de speckle resgistrados son iguales y la diferencia produce un pixel oscuro. Inversamente, en las regiones donde la diferencia de caminos es menor que la longitud de coherencia, el corrimiento de fase en  $\pi$ , introducida por el desplazamiento del espejo, modifica el speckle resultante. La imagen muestra allí un pixel comparativamente más brillante. Esto ocurre en la intersección del objeto con un plano, si la diferencia de caminos ópticos en los focos de las lentes expansoras es cero. Si no es así, el pixel brillante estará en la intersección del objeto con un hiperboloide<sup>6</sup>.

La intersección muestra la topografía del objeto siguiendo la geometría usual de la proyección de franjas. Por ejemplo, si la franja es observada en una dirección que bisecta el ángulo entre los dos haces, entonces la intersección observada es una línea recta, independientemente de la forma del objeto. Desde otras direcciones se puede observar distintos

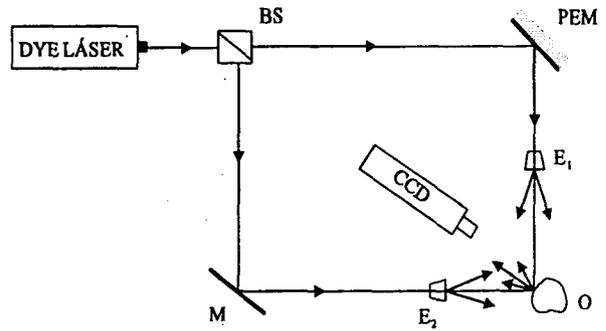


Fig. 4: Dispositivo experimental del TCE descrito en el texto.

contornos de la topografía del objeto, con sensibilidad creciente a medida que el ángulo con el bisector mencionado aumenta. La Fig. 5 muestra los resultados obtenidos con el mismo objeto de la experiencia anterior (Fig. 3). El procesamiento es más simple y rápido ya que sólo involucra un corrimiento del espejo y substracción a tiempo real. A pesar de que es una operación secuencial, puede ser procesada a la velocidad de barrido de T.V. La franja observada tiene mayor fineza que la que se obtiene con el SCE pero requiere el uso de un láser de colorante.

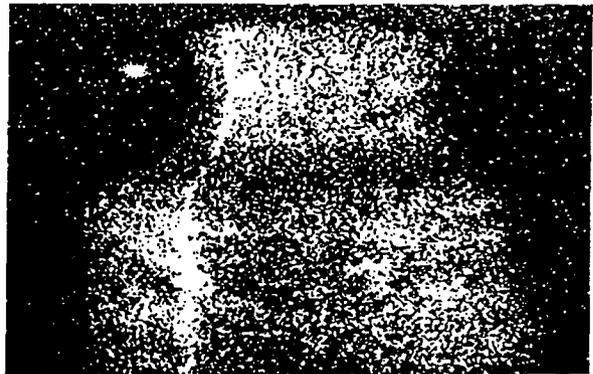


Fig. 5: Resultados del TCE. Una franja de contorno, brillante, puede verse sobre el mismo objeto de la Fig. 3.

### IV. CONCLUSIONES

Se ha propuesto y verificado la utilización de dos dispositivos experimentales para obtener intersecciones de un objeto con un plano matemático, usando DSPI. Uno de ellos opera con luz coherente,

pero simula coherencia espacial modificada ya que a las imágenes sólo se les permite interferir de a pares; la síntesis de la función delta aproximada se realiza sumando franjas de Young con diferentes espaciados.

En el segundo esquema experimental se ha usado la corta longitud de coherencia de un láser de colorante para seleccionar las regiones del objeto que están a la misma distancia de los focos de las lentes expansoras. El experimento es similar a un registro digital de luz en vuelo.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por un subsidio del CONICET-PID N° 3-071700/88. Los autores agradecen también la financiación parcial de la Fundación Antorchas y la ayuda del Grupo Láser del CIOP por facilitar el láser de colorante.

#### REFERENCIAS

1. L. Pirodda. "Shadow and projection moire technique for absolute or relative mapping of surface shapes". *Optical Engineering*, **21**, 640-649 (1982).
2. L. P. Thomas, R. Gratton, B. M. Marino y J. Simon. "Measurements of free surface profiles in transient flow by a simple light slicing method". *Applied Optics*. (In press).
3. G. Small, Z. Hegedus. "Measurements of rail cross section with solid state sensor arrays". *Optics and Laser Technology*, **18**, 43-47 (1986).
4. J. Pomarico, R. Arizaga, R. Torroba and H. Rabal. "Digital holographic contouring". *Optics Communications*, **98**, 257-260 (1993).
5. B. P. Hildebrand and K. A. Haines. "Multiple Wavelength and Multiple Source Holography Applied to Contour Generation". *Journal of Optical Society of America*, **57**, 155-162 (1967).
6. N. Abramson. "The Holo-diagram. VI: Practical device in coherent optics". *Applied Optics*, **11**, 2562-2571 (1972).
7. H. Rabal, J. Pomarico and R. Arizaga. "Digital Holography Display of Light-in-Flight". *Applied Optics*. (In Press).