

Apéndice A

Captación digital de hologramas

A parte de la representación de información compleja, otro aspecto a contemplar relacionado con la holografía es la captación de frentes de ondas, que normalmente se realiza a través de la interferencia del frente de onda a captar y un haz de referencia. Tradicionalmente se utilizaba película o placa holográfica como soporte para realizar el registro, que, tras el proceso de revelado necesario, permite recuperar la información almacenada al iluminarse de nuevo con un haz similar al de referencia. El desarrollo de las cámaras digitales y el aumento de resolución de las CCDs (*charged coupled devices*), que cuentan con el tamaño y número de píxeles necesarios para captar las interferencias, ha permitido sustituir los soportes fotográficos clásicos por dispositivos digitales, en los que la captación se realiza directamente con una CCD y la reconstrucción posterior se realiza mediante métodos numéricos [SJ94] [JST01] [NFFP02] [ML02] [ZPOT03]. Esto ha hecho que la holografía digital se desarrolle ampliamente y sea de utilidad en diversas aplicaciones [SJ02], entre ellas en el análisis de deformaciones y medidas de formas [PST99] [HJJ04] [MWLJ04], microscopía holográfica [TO00] [DMM⁺02], localización y seguimiento de partículas [LBCM03] [PM03], o en la medida de parámetros de polarización [CCM⁺04].

Como ejemplo de esta captación digital de hologramas en nuestro caso hemos utilizado una cámara fotográfica digital comercial para captar un holograma fuera de eje. La cámara digital que utilizamos es una Canon 300D con una resolución de 6.3 Megapíxeles y una arquitectura reflex que permite trabajar sin lentes. Con esta cámara realizamos la captación directa de las interferencias entre el objeto a reconstruir y el haz de referencia, sin utilizar ninguna lente entre el objeto y la cámara, de forma que solo se utiliza la propagación de la luz. La reconstrucción del holograma se realiza después de forma numérica mediante el cálculo de la transformada de Fres-

nel tal como se ha visto en el capítulo 2. También se puede considerar la posibilidad de utilizar una cámara digital con lente fija, en este caso el montaje necesario y la reconstrucción numérica son diferentes, como se muestra en [SP02].

A.1. Resolución del holograma

Un primer aspecto a tener en cuenta a la hora de realizar el registro de los hologramas es la resolución espacial con la que se cuenta, ya que esta limitará la frecuencia de las interferencias que se pueden captar y por tanto el ángulo con el que se puede separar la reconstrucción del objeto respecto al eje óptico. En el caso de la cámara Canon que utilizamos tiene una CCD de $22,7 \times 15,1$ mm de tamaño que trabajando a la máxima resolución se divide en 3072×2048 píxeles de $7,39 \times 7,37 \mu\text{m}$ cada uno. Si consideramos que para resolver las interferencias como mínimo se necesitan dos píxeles consecutivos, uno para el máximo y otro para el mínimo, tenemos que las líneas que puede resolver la cámara son $\Delta l = 2\Delta x = 14,78 \mu\text{m}$, lo que se corresponde a una frecuencia espacial de unos 68 pares de línea por milímetro. Esta resolución queda lejos de las resoluciones típicas de las placas holográficas, que tienen del orden de miles de líneas por milímetro, con lo que se ve que los hologramas que se pueden captar mediante una cámara digital serán de muy poca resolución. Una de las limitaciones que se tiene es la del ángulo entre el haz que proviene del objeto a captar y el de referencia, que permite separar la reconstrucción del objeto del término central, tal como se vio en el capítulo 2. Si tenemos en cuenta la relación que existe entre la frecuencia espacial p y el ángulo θ de las interferencias, conforme a la condición de Bragg [Sax94]:

$$p = \frac{2}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{A.1})$$

Utilizando una longitud de onda de 632.8 nm el ángulo máximo con el que se pueden captar las interferencias es de 2.45° . Este ángulo y las dimensiones y resolución de la CCD de la cámara limitan el tamaño de los objetos que se pueden captar para registrar un holograma de Fresnel utilizando solo la propagación de la luz, sin utilizar lentes o otros métodos para formar imagen del objeto a captar. Esta resolución teórica de la cámara se ha probado experimentalmente para captar las interferencias formadas por un sistema de doble espejo que se ilumina con una onda plana. En ese caso se han llegado a resolver sin problemas pares de líneas de hasta $23.7 \mu\text{m}$ ocupando entre 3 y 4 píxeles cada período, con lo que se comprueba la capacidad de resolución

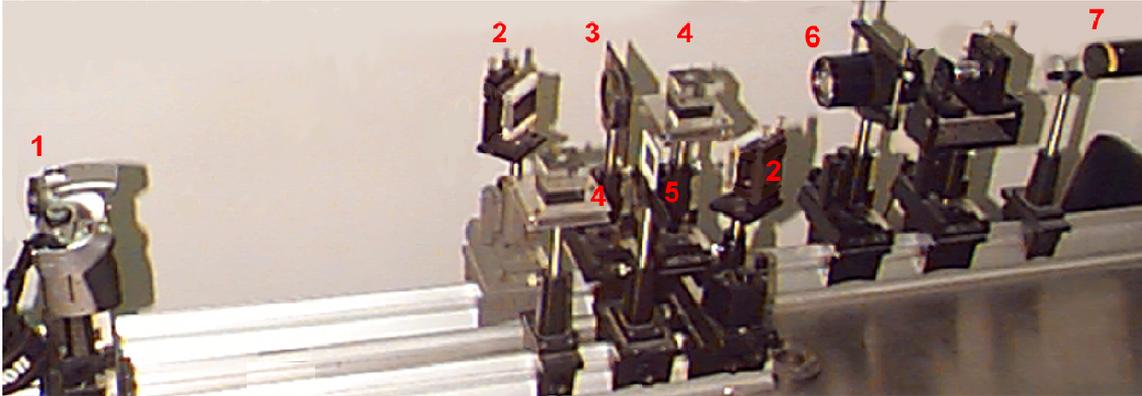


Figura A.1: Imagen del montaje para el registro del holograma: (1) cámara digital, (2) espejos, (3) diafragma, (4) divisores de haz, (5) objeto, (6) lente colimadora y (7) láser

de la cámara.

A.2. Montaje y resultados experimentales

El montaje que se lleva a cabo para registrar el holograma es similar a un interferómetro de Mach-Zehnder (figura A.1), con lo que el objeto que se capta se ilumina por transmisión, en nuestro caso este objeto es una diapositiva con una letra k de $1,6 \times 1,4$ mm de tamaño. Se utiliza un láser de He-Ne de 632.8 nm que se colima mediante una lente para obtener una onda plana con la que se ilumina el montaje. Un primer divisor de haz divide esta onda en los dos brazos, de forma que por uno de ellos llegará a la diapositiva con la k , con lo que tendremos la onda que proviene del objeto, que será la difracción de esta letra y por el otro brazo tendremos la onda plana que hará de referencia. El ángulo entre la onda de referencia y la onda del objeto se controla mediante los espejos del montaje, de forma que antes de colocar el objeto en uno de los brazos, se observan las interferencias entre las dos ondas planas que se forman tras el segundo divisor de haz, calculando el número de líneas de interferencia que aparecen se puede ajustar el ángulo entre los dos frentes de onda. A la hora de captar un holograma se utiliza un diafragma para limitar el tamaño del haz de la onda de referencia de forma que se aproxime al tamaño de la k , así a la hora de reconstruir el objeto, éste puede quedar fuera del término central y sin un fondo fijo debido a la onda de referencia.

La cámara se coloca a 550 mm de la diapositiva, distancia a la que se capta el holograma. La imagen captada se recorta a 2048×2048 píxeles para poder realizar la

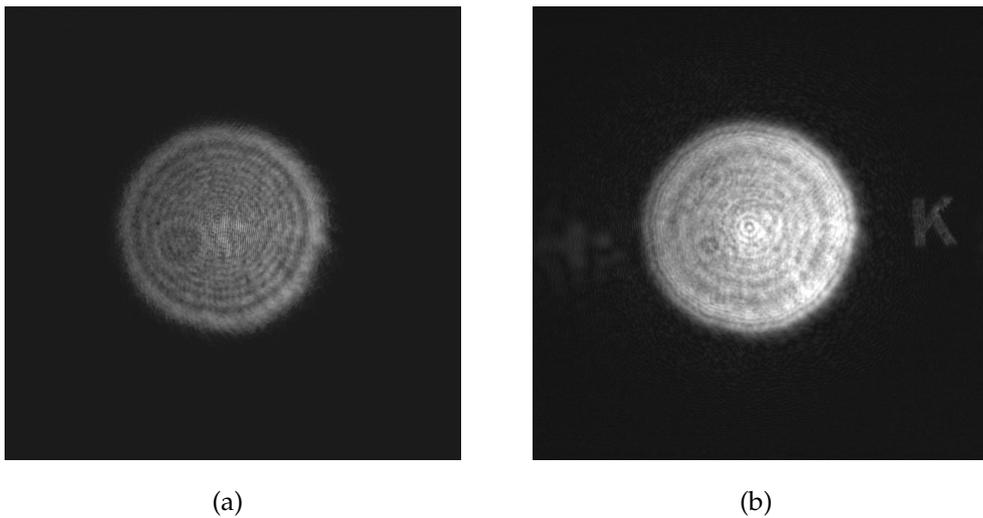


Figura A.2: (a) Imagen del holograma captado con la cámara digital y (b) reconstrucción del objeto a 550 mm



Figura A.3: Detalle de la reconstrucción de la k a 550 mm

reconstrucción utilizando el algoritmo de la FFT, esta imagen se muestra en la figura A.2(a), donde se pueden observar las franjas de interferencia en el centro de la imagen, superpuestas a la difracción del círculo que forma el diafragma de la onda de referencia. Con esta imagen se realiza una retropropagación hasta -550 mm utilizando la transformada de Fresnel, de forma que se obtiene la reconstrucción del objeto, que se muestra en la figura A.2(b), donde se ve la reconstrucción de la letra k desplazada del centro correspondiente al término central, que es más energético. Este desplazamiento corresponde a unos 5 mm, que teniendo en cuenta la distancia de propagación resulta una separación angular de alrededor de medio grado. Esta reconstrucción corresponde a la imagen virtual del objeto, tal como se muestra en la figura 2.6, si en lugar de retropropagar se propaga a 550 mm se obtiene una reconstrucción similar, esta vez correspondiente a la imagen real.

En la figura A.3 se muestra en detalle la reconstrucción de la letra k, donde se puede observar que se recupera el objeto de forma aceptable, aunque afectado por el ruido de la iluminación y la limitación en la resolución con la se cuenta al utilizar la cámara digital. Esto muestra la posibilidad de registrar un holograma de Fresnel mediante una cámara digital de uso habitual, y empleando solo la propagación libre de la luz.

Una alternativa a los hologramas obtenidos por transmisión, es captar hologramas de reflexión, en los que el objeto a reconstruir se ilumina con el láser, de forma que la luz reflejada se capta con la cámara junto con el haz de referencia. El montaje experimental es similar al anterior, donde el espejo del brazo del objeto se desvía hacia un segundo espejo encargado de focalizar el haz sobre el objeto. En este caso la calidad de la reconstrucción del holograma se ve más afectada por la limitación en la resolución de la cámara, que influye directamente en el tamaño de los granos de *speckle* que aparecen debido a la interferencias de las reflexiones de los distintos puntos del objeto [PTZ96] [JST01]. El tamaño s del grano del *speckle* de un holograma cuadrado viene dado por la fórmula $s = \lambda d/h$, con h el tamaño del holograma. En el caso de realizar la reconstrucción a 1 m de distancia el tamaño del grano es de alrededor de $42 \mu\text{m}$, que teniendo en cuenta el tamaño de los objetos que se pueden captar por propagación libre, se puede ver como la reconstrucción se ve perjudicada de forma no despreciable por este efecto.

Así, a parte de la representación de información compleja mediante medios digitales que se ha presentado a lo largo de todo el trabajo, se ve también la posibilidad de captar esta información compleja también digitalmente, lo que hace posible que el uso de este tipo de información, necesaria en múltiples aplicaciones, sea de más fácil acceso y más sencilla de manipular.

Apéndice B

Publicaciones relacionadas con el trabajo

A continuación se presenta una lista de las publicaciones aparecidas en revistas, así como de las comunicaciones a congresos internacionales y nacionales, relacionadas directamente con el trabajo desarrollado en esta tesis.

Publicaciones en revistas

- R. Tudela, I. Labastida, E. Martín-Badosa, S. Vallmitjana, I. Juvells, A. Carnicer. "A simple method for displaying Fresnel holograms on liquid crystal panels". *Optics Communications* Vol. 214/1-6. Págs. 107-114 (2002).
- Raúl Tudela, Estela Martín-Badosa, Ignasi Labastida, Santiago Vallmitjana, Ignasi Juvells and Artur Carnicer. "Full complex Fresnel holograms displayed on liquid crystal devices." *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol. 5 n° 5 págs. S189-S194 (2003).
- Raúl Tudela, Estela Martín-Badosa, Ignasi Labastida, Santiago Vallmitjana and Artur Carnicer. "Reconstruction of Fresnel holograms using partial wave front information." *Proceedings SPIE Wave Optics and Photonic Devices for Optical Information Processing II* Vol. 5181, (Pierre Ambs, Fred R. Beyette, Jr., Eds) Págs. 154-162 (2003).
- Raúl Tudela, Estela Martín-Badosa, Ignasi Labastida, Santiago Vallmitjana and Artur Carnicer. "Wave front reconstruction by adding modulation capabilities of two liquid crystal devices." *Optical Engineering* (2004) Vol. 43 n° 11 (2004).

Comunicaciones a congresos

- A. Carnicer, I. Labastida, R. Tudela, E. Martín-Badosa, I. Juvells, S. Vallmitjana. "Displaying Fresnel holograms using full complex modulation." 4th Euro-American Workshop on Optoelectronic Information. Valencia 2001.
- R. Tudela, E. Martín-Badosa, I. Labastida, E. Pleguezuelos, S. Vallmitjana, I. Juvells, and A. Carnicer. "Full complex Fresnel holograms displayed on liquid cristal devices." ICO XIX: Optics for the Quality of Life. A. Consortini, G. C. Righini (Ed.) SPIE Proceedings Vol. 4829, pgs. 465-466 (2002) Firenze 2002.
- E. Martín-Badosa, R. Tudela, I. Labastida, I. Juvells, S. Vallmitjana, and A. Carnicer. "Full complex holograms using two ferroelectric liquid crystal devices." Proceedings 1st workshop of the EOS technical group on Information Optics, IOG 2002. Karl-Heinz Brenner and Pierre Ambs (Ed.) Pgs. 39-42 Mannheim 2002.
- R. Tudela, E. Martín-Badosa, I. Labastida, S. Vallmitjana, I. Juvells, and A. Carnicer. "Use of ferroelectric liquid crystal devices to display full complex Fresnel holograms." Proceedings of the Second IASTED International Conference: Visualization, Imaging and Image Processing. J. J. Villanueva (Ed.) Acta Press, pgs. 778-782 (2002) Málaga 2002.
- R. Tudela, E. Martín-Badosa, S. Vallmitjana, A. Carnicer. "Recent results of the Grup de Recerca en Òptica Física de la Universitat de Barcelona: Full complex Fresnel holograms displayed on liquid crystal devices." 3ª Jornada internacional de la xarxa Processament Òptic d'Imatges. Terrassa, Enero 2003.
- Raúl Tudela, Estela Martín-Badosa, Ignasi Labastida, Santiago Vallmitjana and Artur Carnicer. "Reconstruction of Fresnel holograms using partial wave front information." SPIE's 48th Annual Meeting: Wave Optics and Photonic Devices for Optical Information Processing II. San Diego, Agosto 2003.
- Raúl Tudela, Estela Martín-Badosa, Santiago Vallmitjana y Artur Carnicer. "Utilización de pantallas de cristal líquido para la representación de información compleja." Actas 7ª Reunión Nacional de Óptica. Págs. 602-604. Santander, Septiembre 2003.
- I. Juvells, S. Vallmitjana, S. Bosch, A. Carnicer, M. Montes, E. Martín, J. Ferré, I. Labastida, F. J. Rodríguez, J. Pérez, R. Tudela, J. Sancho, E. Pleguezuelos, S. Ar-

cos, J. Andilla. "Actividad investigadora del Grup de Recerca en Òptica Física de la Universidad de Barcelona." Actas 7^a Reunión Nacional de Óptica. Págs. 295-297. Santander, Septiembre 2003.

