

IHD para medir simultáneamente en 2D, usando dos fuentes independientes de luz láser con longitud de coherencia grande

T. Saucedo, L. Pérez-Arrieta, S. Hinojosa, and J.M. Rivera
Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas,
Calzada Solidaridad Esq. Con Paseo La Bufa S/N, 98060, Zacatecas, México,
e-mail: tsaucedo@fisica.uaz.edu.mx

Received 28 November 2011; accepted 25 October 2012

Se presenta un arreglo para medir simultáneamente dos componentes ortogonales de deformación en la superficie de un objeto. El arreglo, basado en interferometría holográfica digital, usa dos láseres para grabar independientemente dos hologramas en un sólo cuadro de la cámara CCD. El arreglo se prueba con una placa metálica que cambia ligeramente sus dimensiones al ser calentada. Trabajos recientes en el desarrollo de este tipo de arreglos, muestran limitantes en el hecho de no poder usar fuentes de luz con longitud de coherencia relativamente grandes. Este arreglo está exento de esa limitante.

Descriptor: Interferometría holográfica; patrones de Speckle y Moiré; técnicas de pruebas ópticas; interferometría de desplazamiento de fase.

One presents an arrangement to measure simultaneously two orthogonal components of deformation in the surface of an object. The arrangement, based in digital holographic interferometry, uses two lasers to record two holograms independently in a single frame from the camera CCD. The arrangement is proved by a metallic plate that changes lightly his dimensions to be heated. Recent works in the development of this type of arrangement, show constraints in the fact to not use light sources with relatively large coherence length. This arrangement is exempt from this limitation.

Keywords: Holographic interferometry; Speckle and Moiré patterns; optical testing techniques; phase shifting interferometry.

PACS: 2.40.Kw; 42.30.Ms; 42.87.-d; 42.87.Bg.

1. Introducción

La Interferometría Holográfica Digital (IHD) es una técnica metrológica óptica basada en el principio de holografía que permite medir interferométricamente deformaciones y desplazamientos en objetos opacos con alta sensibilidad ($\sim \lambda/30$). Es una técnica de campo completo, no invasiva, no destructiva, que junto con el desarrollo en tecnología optoelectrónica y de cómputo, ha permitido ser aplicada en condiciones reales de trabajo fuera del laboratorio [1,2].

La IHD tiene amplio rango de aplicación como herramienta para caracteriza parámetros mecánicos en materiales, por ejemplo detección de micro esfuerzos [3]. En algunas aplicaciones se requiere medir deformaciones en dos direcciones. Un caso específico es medir las componentes ortogonales de deformación. Para medir estas componentes ortogonales se requiere generar al menos el mismo número de *vectores sensibilidad* que de componentes ortogonales de deformación [4]. Por otro lado, tenemos que en algunos casos cuando los experimentos no se pueden repetir, cuando los eventos son transitorios, se debe de obtener la información de manera simultánea.

Las Refs. 5-8 presentan trabajos donde con una sola fuente de luz láser se mide simultáneamente, en dos y tres dimensiones. En estos arreglos, se ilumina la superficie del objeto desde distintas posiciones y la longitud de camino óptico de cada haz objeto se ajusta con su correspondiente haz de referencia. Cada par de haces (objeto-referencia) queda fuera de coherencia del otro y en consecuencia los hologramas pue-

den ser grabados de manera independientemente en un sólo cuadro de la cámara CCD. Es importante señalar que en este tipo de arreglos, técnicamente se complica mantener fuera de coherencia a los pares de haces cuando la fuente de luz tiene longitud de coherencia relativamente grande; se requiere de mayor espacio, de un mayor número de componentes ópticas, de más longitud de fibra, etc., además de reducir la calidad de los haces de luz y aumentar el ruido en los hologramas. Por lo anterior, se entiende por qué la fuente de luz de estos sistemas debe de tener una longitud de coherencia corta. Tal situación limita al arreglo óptico a medir solo en áreas pequeñas de la superficie del objeto de prueba.

En este trabajo se describe un sistema que usa dos láseres de 532 nm y 632 nm de longitud de onda. Cada fuente de luz láser permite grabar independiente un holograma, quedando el área de análisis en función principalmente de la longitud de coherencia más corta de los láseres, esto elimina las limitantes antes descritas.

2. Metodología

En Interferometría holográfica existe un parámetro importante llamado *vector sensibilidad*, que indica la dirección en la cual dicho interferómetro es sensible [9]. Este vector se define como la diferencia entre el vector unitario de iluminación \hat{n}_i (dirección en la cual se ilumina al objeto) y el vector unitario de observación \hat{n}_o (dirección donde se observa al objeto). Para medir las dos componentes ortogonales de un vector de deformación \vec{d} , se requiere generar al menos dos *vectores sensi-*

bilidad linealmente independientes. Una manera de lograrlo es iluminar al objeto desde dos posiciones distintas. Y más aún, si se requiere que dicha medición sea simultánea, se tiene que iluminar al objeto en el mismo tiempo.

La expresión 1, representa estos dos vectores sensibilidad, donde λ_m son las longitudes de onda de cada fuente de luz láser.

$$\vec{S}_{\lambda_m} = \hat{n}_o - \hat{n}_{\lambda_m}, \quad m = 1, 2. \quad (1)$$

En el sistema propuesto, se superponen dos hologramas en un mismo cuadro de la cámara CCD. Para que la información de cada holograma se pueda discriminar de uno con otro, se requiere que las fuentes de luz láser sean ópticamente incoherentes [6]. La intensidad (I) de la imagen del objeto grabada en el plano del sensor (ξ, η) , puede ser representada por:

$$\begin{aligned} I(\xi, \eta) &= \sum_{m=1}^2 I_{\lambda_m}(\xi, \eta) \\ &= \sum_{m=1}^2 \left[|R_{\lambda_m}(\xi, \eta) + O_{\lambda_m}(\xi, \eta)|^2 \right], \\ m &= 1, 2. \end{aligned} \quad (2)$$

Aquí R_{λ_m} y O_{λ_m} son el par de haces referencia objeto de cada fuente de luz láser. Para evaluar la fase de cada holograma superpuesto, se usa el método de la transformada de Fourier [10]. La diferencia entre los mapas de fase de los hologramas antes y después de haber sufrido una deformación $\Delta\varphi_{\lambda_m}$, están dados por:

$$\Delta\varphi_{\lambda_m}(\xi, \eta) = \varphi'_{\lambda_m}(\xi, \eta) - \varphi_{\lambda_m}(\xi, \eta) \quad m = 1, 2. \quad (3)$$

Donde φ_{λ_m} y φ'_{λ_m} representa los mapas de fase de los hologramas correspondientes a los estados “no deformado” y “deformado” respectivamente. La diferencia de fase $\Delta\varphi_{\lambda_m}$ se relaciona con el vector deformación \vec{d} y con los vectores sensibilidad \vec{S}_{λ_m} por medio del producto escalar

$$\Delta\varphi_{\lambda_m} = (2\pi/\lambda_m)\vec{d} \cdot \vec{S}_m, \quad m = 1, 2. \quad (4)$$

En el experimento, el origen del sistema de referencia de coordenadas cartesianas, se localiza en el centro de la superficie iluminada del objeto (ver Fig. 1). Con esto, podemos representar con una buena aproximación, los vectores de sensibilidad:

$$\begin{aligned} \vec{S}_1 &= (\text{sen}\alpha, 0, 1 + \text{cos}\alpha) \\ \vec{S}_2 &= (-\text{sen}\alpha, 0, 1 + \text{cos}\alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde α es el ángulo entre los vectores de iluminación $(\hat{n}_{\lambda_1}$ y $\hat{n}_{\lambda_2})$ y de observación (\hat{n}_o) (Ver Fig. 1)

Se observa que el ángulo que forma cada vector sensibilidad con el sistema de coordenadas cartesianas, define el grado de sensibilidad del arreglo en cada eje coordenado. La

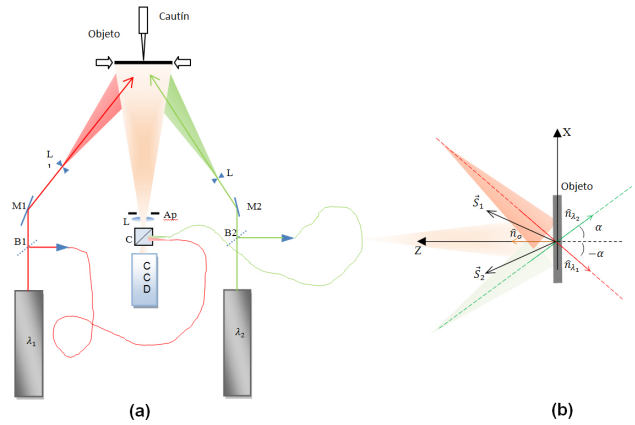


FIGURA 1. Arreglo experimental. (a) Esquema donde se describe el uso de dos fuentes de luz láser para iluminar la superficie del objeto desde dos posiciones distintas. (b) Sistema de referencia coordinado.

Ec. (4), representa una matriz en donde la única variable desconocida es el vector deformación \vec{d} , ya que tanto los mapas de fase como los vectores sensibilidad se obtienen experimentalmente. Además, de la misma Ec. (4) se observa que la magnitud de \vec{d} se da en el orden de la longitud de onda de la fuente de iluminación, es decir, en fracciones de micrómetros.

3. Detalles experimentales y resultados

La Fig. 1 muestra un arreglo en IHD que se usa para medir simultáneamente dos componentes ortogonales de deformación usando dos fuentes de luz láser. Un primer láser He-Ne emite un haz de luz de longitud de onda $\lambda_1 = 632$ nm con potencia de salida de 15 mW. Este haz es dividido en dos por

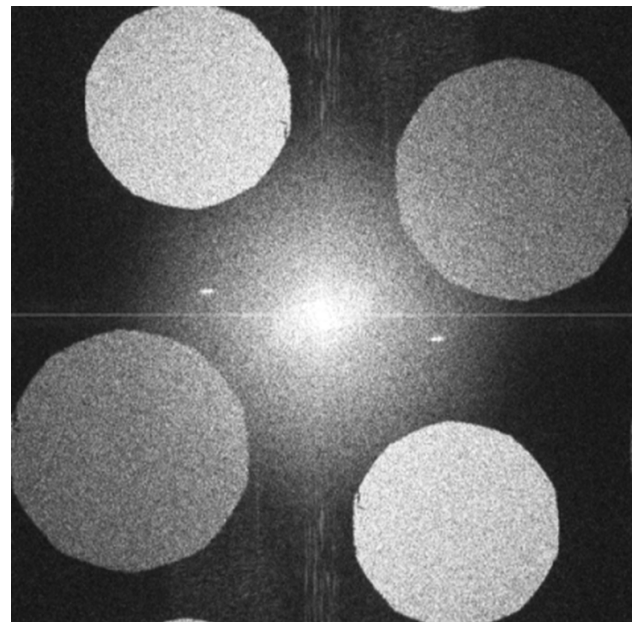


FIGURA 2. Espectro de frecuencias de la intensidad correspondiente a dos hologramas superpuestos con frecuencia portadora.

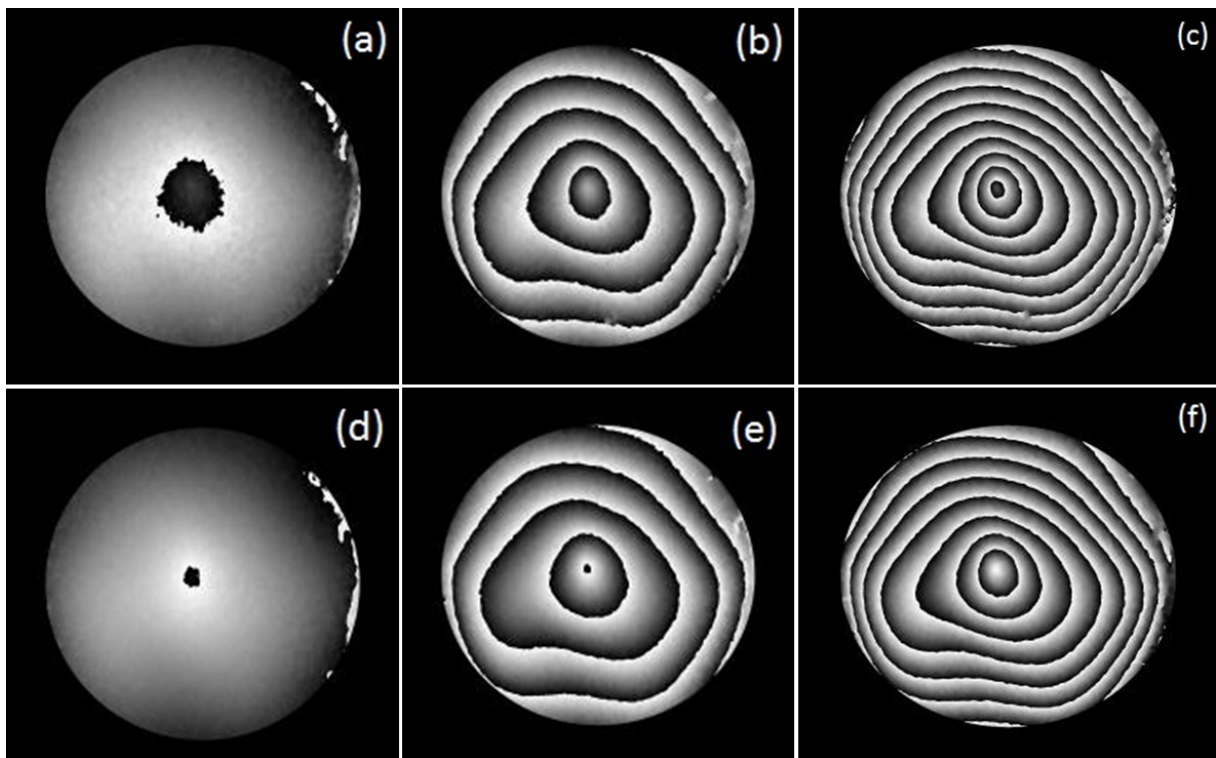


FIGURA 3. Mapas de diferencia fase envuelta. (a) (d) Entre los primeros dos hologramas correspondientes al estado “no deformado” y un segundo par después de ser calentada la placa, en un estado ya deformado. (b) (e) Entre los primeros dos hologramas y un tercer par de ellos grabados 0.1 s después de los segundos. (c) (f) Entre los primeros dos hologramas y un cuarto par de ellos grabados 0.2 s después de los terceros.

un divisor de luz plano B_1 . El haz de luz reflejado (al que llamaremos “haz de referencia”), se acopla a una fibra mono modal. La luz que sale por el extremo opuesto de la fibra se refleja en el cubo “combinador” de haces C para finalmente incidir en el sensor de la cámara.

El haz transmitido (“haz objeto”) se refleja en el espejo $M1$, incide en una lente negativa $L1$ que expande la luz e ilumina completamente la superficie del objeto de prueba. Parte de la luz reflejada por la superficie del objeto, es recolectada por una lente positiva L en el sensor de la cámara, para interferir con el haz de referencia en dicho sensor. Simultáneamente, la otra fuente de luz (Nd:YAG, $\lambda_2 = 532$ nm y 500 mW de potencia, se usa un atenuador para igualar la potencia a 15 mW) realiza un procedimiento similar desde una posición distinta de iluminación. De esta manera, se graban dos hologramas digitales en un sólo cuadro de la cámara correspondientes a dos posiciones de iluminación.

Para evaluar la fase, se hace uso del método de la transformada de Fourier [10]. Con un algoritmo en la computadora se calcula la transformada de Fourier de las intensidades de los hologramas (los hologramas tienen una frecuencia portadora tal que en el espectro de frecuencias, las frecuencias correspondientes a cada holograma aparecen separadas), las frecuencias de cada holograma se filtran de manera independiente para después calcular la transformada inversa de Fourier de estos espectros. Como resultado, se tienen dos matri-

ces complejas de donde se generan los mapas de fase de cada holograma.

Para introducir una frecuencia portadora en los hologramas digitales, que permita en el espectro de frecuencias separar independientemente los dos hologramas superpuestos, se genera un pequeño ángulo entre la normal de la superficie del sensor y la dirección de incidencia de los haces de referencia. En la Fig. 2 se observa una imagen del espectro de frecuencias de los dos hologramas digitales superpuestos en un cuadro de la cámara. En esta imagen se puede ver la separación independiente de los espectros de cada holograma. Los “círculos” de la imagen corresponden a la geometría circular de la pupila Ap del arreglo.

La máxima frecuencia espacial que puede ser grabada por la cámara CCD, está dada por medida del centro de la lente L . Donde es el diámetro de apertura y la distancia medida del centro de la lente L (ver Fig. 1) al sensor de la cámara. La longitud de onda más pequeña que se usó en el arreglo, permitió calcular el valor aproximado de la apertura: 3.6 mm de diámetro.

Con el fin simplificar los cálculos, la superficie del objeto se ilumina de manera simétrica, de tal manera que los ángulos entre la normal a la superficie del objeto y las direcciones de iluminación sean iguales. La dirección de los haces de iluminación, forman un ángulo de 25° con la normal a la superficie del objeto (ver Fig. 1).

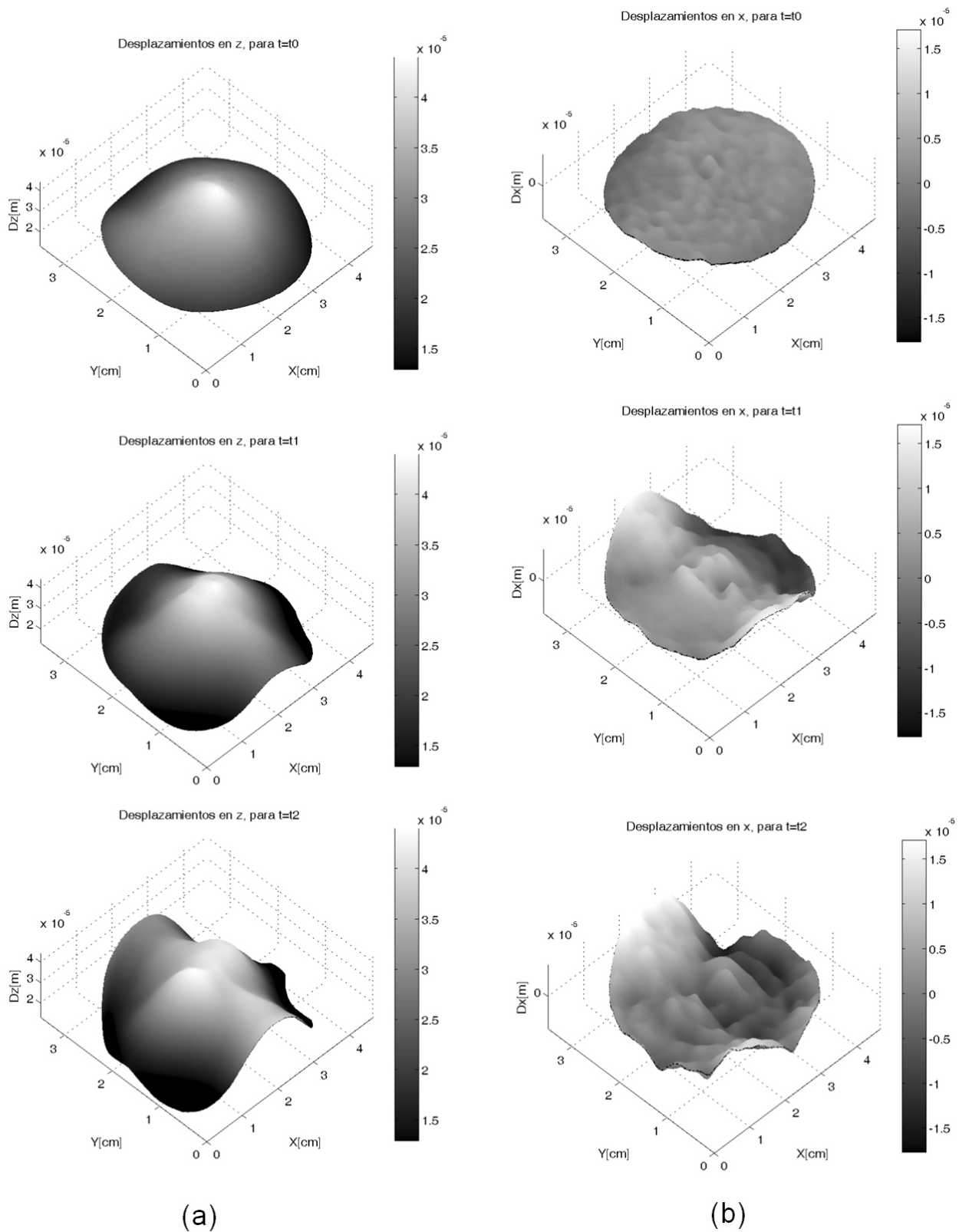


FIGURA 4. Mapas de desplazamientos. (a) En la dirección z correspondientes a los primeros tres momentos de grabado, después de conectar el cañón. (b) En la dirección x correspondientes a los primeros tres momentos de grabado.

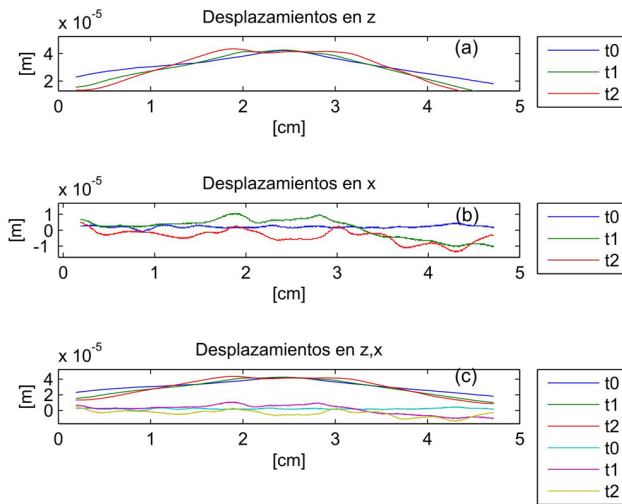


FIGURA 5. Gráficas bidimensionales que corresponden a una línea de valores de deformación la cual atraviesa perpendicularmente al eje Y. (a) Gráficas que representan los valores de deformación en la dirección z para los primeros tres momentos de grabado después de conectar el caudín, (b) Gráficas que representan los valores de deformación en la dirección x para los primeros tres momentos de deformación antes señalados, (c) Gráficas que representan los valores de deformación en la dirección x y z.

El objeto bajo estudio es una placa metálica circular de 50 mm de diámetro. La placa se sujeta firmemente por los extremos usando una prensa mecánica. Esta prensa se fija a una mesa holográfica. Detrás de la placa se posiciona un caudín que mantiene la punta metálica en contacto con la superficie de ésta (ver Fig. 1). Antes de calentar la placa, dos hologramas digitales, correspondientes a dos posiciones distintas de iluminación, se graban en un cuadro- imagen. Tiempo después, se conecta el caudín a la corriente eléctrica y secuencialmente se comienzan a grabar hologramas con una frecuencia de captura de 10 cuadros por segundo.

Con un algoritmo en la computadora se calcula la diferencia de fase de los hologramas del primer cuadro-imagen con los subsecuentes. En la Fig. 3 se muestran tres pares de mapas de diferencia de fase envuelta, correspondientes a los primeros tres momentos registrados, después de conectar el caudín (t_0 , t_1 y t_2).

Haciendo uso de las ecuaciones arriba descritas y con los datos de los mapas de fase ya desenvueltos, se calculan los mapas de desplazamientos para las componentes ortogonales del vector deformación \vec{d} . En la Fig. 4 se muestran dos columnas de gráficas de mapas de desplazamientos para las direcciones ortogonales z (columna izquierda) y x (columna derecha) correspondientes a los tres momentos de deformación antes señalados. En las gráficas los ejes X y Y represen-

tan las dimensiones de la superficie de la placa y el eje Z las deformaciones microscópicas del objeto de prueba.

La tonalidad de gris en cada punto de las gráficas representa una medida de deformación en la superficie del objeto. Este valor cuantitativo se representa por la barra de niveles de grises que aparece del lado derecho de cada columna. Se observa que existe una mayor deformación en la dirección z que en x (hecho que es fácil de intuir por la forma en que se sujeta la muestra y la posición del caudín (ver Fig. 1). Además de los valores de deformación en la dirección de z son todos positivos, es decir, los desplazamientos fueron en la dirección normal a la superficie iluminada.

En la dirección x hubo valores positivos y negativos de deformación, por lo que podemos afirmar que aunque los vectores de deformación de cada punto de la superficie del objeto apuntan a una dirección principalmente normal a la superficie hay pequeñas inclinaciones hacia ambas direcciones del eje x. Ver Fig. 1 (b).

La Fig. 5 ayuda a visualizar algunos aspectos de lo anteriormente señalado. En esta figura se muestran tres cuadros de gráficas bidimensionales que corresponden a una línea de valores de deformación la cual atraviesa perpendicularmente al eje Y. En la Fig. 5(a) tres gráficas de colores representan los valores de deformación en la dirección z correspondientes a los primeros tres momentos registrados después de haber conectar el caudín (t_0 , t_1 y t_2).

En la Fig. 5(b) las líneas curvas de los valores de deformación en la dirección x correspondientes a los ya mencionados tres primeros momentos de registro. Y finalmente la Fig. 5(c) muestra el conjunto todas estas gráficas.

4. Conclusiones

Se presenta un arreglo para medir simultáneamente dos componentes ortogonales de deformación en la superficie de un objeto usando dos fuentes de luz láser. El uso de estas dos fuentes independientes permite superponer hologramas digitales en un solo cuadro-imagen de la cámara CCD, para después ser digitalmente separados en el espectro de frecuencias. Para probar el arreglo, se miden las deformaciones en la superficie de una placa metálica circular cuando esta era calentada por medio de un caudín. Aunque en este trabajo se analizó un área relativamente pequeña, el arreglo está libre de la limitante que muestran trabajos semejantes, en el sentido de analizar superficies relativamente pequeñas por el requerimiento de usar fuentes de luz láser de corta longitud de coherencia. En este arreglo, se puede medir superficies relativamente grandes, simplemente sustituyendo los láseres por otros con mayor longitud de coherencia.

1. C. M. Vest, *Holography Interferometry*, (Wyle, New York, 1979).
2. K. J. Gåsvik, *Optical Metrology*, (John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2002).
3. T. Saucedo Anaya, M. De la Torre, and F. Mendoza Santoyo, *Opt. Eng.* **47** (2008) 073601.
4. Thomas Kreis, *Handbook of holographic interferometry*, (WILEY-VCH Verlag GmbH and Co., 2005)
5. T. Saucedo A, F. M. Santoyo, M. De la Torre Ibarra, G. Pedrini, and W. Osten, *Appl. Opt.* **45** (2006) 4534.
6. T. Saucedo A., F. Mendoza Santoyo, M. De la Torre-Ibarra, G. Pedrini, and W. Osten, *Opt. Express* **14** (2006) 1468.
7. C. J. Mann, P. R. Bingham, V. C. Paquit, and K. W. Tobin, *Opt. Express* **16** (2008) 9753.
8. Y. Fu, G. Pedrini, B. M. Hennelly, R. M. Groves, and W. Osten, *Opt. Lasers Eng.* **47** (2009) 552.
9. U. Schnars and Werner Jueptner, “*Digital Holography; digital hologram recording, numerical reconstruction and related techniques*”. (Springer, Berlin, 2005).
10. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, *J. Opt. Soc. Am.* **72** (1982) 156.