



**Nova Scientia**

E-ISSN: 2007-0705

[nova\\_scientia@delasalle.edu.mx](mailto:nova_scientia@delasalle.edu.mx)

Universidad De La Salle Bajío

México

Saucedo Anaya, Tonatiuh; Puch Ceballos, Felipe  
Medición simultánea en dos dimensiones por interferometría holográfica digital utilizando dos láseres y  
una cámara 3CCD

Nova Scientia, vol. 6, núm. 11, noviembre-abril, 2013, pp. 67-80  
Universidad De La Salle Bajío  
León, Guanajuato, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203329578005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Revista Electrónica Nova Scientia*

Medición simultánea en dos dimensiones por  
interferometría holográfica digital utilizando dos  
láseres y una cámara 3CCD

Simultaneous two-dimensional measurement by  
digital holographic interferometry using two  
lasers and a 3CCD camera

**Tonatiuh Saucedo Anaya<sup>1</sup> y Felipe Puch Ceballos<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup>Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas

---

México

*Felipe Puch Ceballos.* E-mail: [frpuch@fisica.uaz.edu.mx](mailto:frpuch@fisica.uaz.edu.mx)

## Resumen

Se presenta un arreglo en Interferometría Holográfica Digital (IHD) para medir simultáneamente en 2D micro deformaciones en la superficie de objetos ópticamente rugosos. En el arreglo se usa una cámara 3CCD color y dos fuentes de luz láser de 458nm y 633nm que permite grabar simultáneamente dos hologramas digitales. El arreglo se prueba en una placa metálica la cual es microscópicamente deformada al ser calentada ligeramente por un cautín. Los resultados experimentales muestran el potencial metrológico del sistema para caracterizar cantidades mecánicas en la estructura del objeto.

**Palabras clave:** Interferometría holográfica digital, metrología, micro deformación, caracterización mecánica.

Recepción: 06-02-2013

Aceptación: 06-08-2013

## Abstract

An arrangement in Digital Holographic Interferometry (DHI) is presented for simultaneously 2D measuring micro deformations in the surface of optically rough objects. For this arrangement a 3CCD color camera and two laser sources 458nm and 633nm were used, this allows to record two digital holograms simultaneously. The arrangement is tested on a metal plate which is slightly microscopically deformed when heated by a soldering iron. The experimental results show the metrological potential of the system for mechanical quantities characterizing the structure of the object.

**Keywords:** Digital Holographic Interferometry, metrology, micro deformation, mechanics characterization

## 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 superficies de objetos, con muy 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 (Vest, 1979; Gåsvik, 2002).

La IHD tiene amplio rango de aplicación como herramienta para caracterizar parámetros mecánicos en materiales. Por ejemplo, se puede caracterizar la rigidez en materiales midiendo micro-deformaciones en objetos bajo cierto estímulo (Saucedo-Anaya, 2009). En algunas aplicaciones se requiere tener información de distintas direcciones de deformación. En un sistema coordenado, para medir las componentes ortogonales, se necesita generar al menos el mismo número de *vectores sensibilidad* que de componentes ortogonales de deformación (Kreis, 2004). Esto se logra iluminando o bien observando desde diferentes posiciones la superficie del objeto de prueba.

Por otro lado, tenemos que en la gran mayoría de los casos, cuando los experimentos no se pueden repetir, cuando los eventos son transitorios, se debe de obtener la información de manera simultánea. Saucedo-Anaya & Mendoza & De la Torre & Pedrini & Osten (2006), Mann & Bingham & Paquit & Tobin (2008) y Fu & Pedrini & Hennelly & Groves (2009) presentan trabajos donde se obtiene la información en un solo instante, iluminando simultáneamente al objeto desde distintas posiciones. En estos sistemas, la longitud de camino óptico de cada *haz objeto* se ajusta con la de su correspondiente *haz de referencia* de tal suerte, que cada par de haces queda fuera de coherencia de los otros, y de esta manera, se graba independientemente cada holograma en el sensor de la cámara CCD. Este procedimiento requiere un enorme esfuerzo experimental, además, en la medida que aumenta el número de hologramas superpuestos se reduce la resolución del sistema.

En este artículo se presenta un arreglo óptico que se compone principalmente de dos láseres y una cámara con arquitectura 3CCD Color, para medir simultáneamente micro deformaciones en 2D. La luz que llega a la cámara se separa en tres regiones por medio de un prisma dispersor (con lo que se generan los canales RGB). Cada fracción del espectro de luz, incide de manera

independiente en uno de los tres sensores CCD de la cámara. Dos hologramas se graban independientemente en la cámara cuando estos son generados por dos fuentes de luz láser que caen independientemente en los canales R y B. Tal configuración reduce en gran medida la complejidad de los arreglos antes mencionados.

## Método

En Interferometría holográfica existe un parámetro importante llamado *vector sensibilidad*  $\vec{S}$ , que indica la dirección en la cual dicho interferómetro es sensible (Schnars & Jueptner, 2004). Este vector se define como la diferencia entre el vector unitario de observación  $\hat{n}_o$  (dirección donde se observa al objeto) y el vector unitario de iluminación  $\hat{n}_i$  (dirección en la cual se ilumina al objeto)  $\vec{S} = \hat{n}_o - \hat{n}_i$  y está relacionado con la diferencia de fase  $\Delta\phi$ , por la relación  $\Delta\phi = (2\pi/\lambda)\vec{d} \cdot \vec{S}$ .

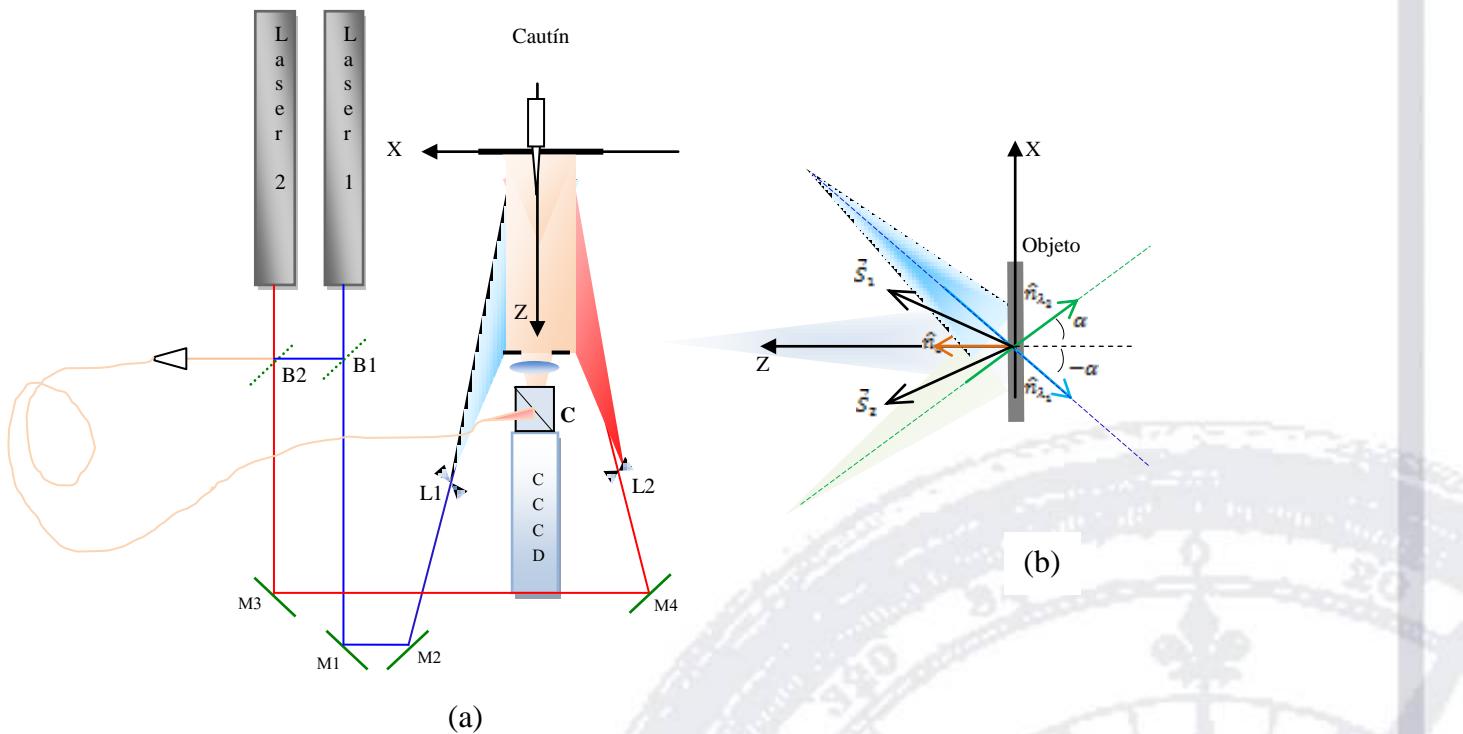
Para medir dos componentes ortogonales de un *vector deformación*  $\vec{d}$ , se requiere generar al menos dos *vectores sensibilidad* linealmente independientes (en este trabajo se propone el uso de dos fuentes de luz láser independientes, de donde se obtendrán estos dos vectores sensibilidad  $\vec{S}_{\lambda_1}$  y  $\vec{S}_{\lambda_2}$ ). Una manera de lograrlo es iluminar el objeto desde dos posiciones distintas. Si se

requiere que dicha medición sea simultánea, se tiene que iluminar el objeto en el mismo instante.

La Fig1(a) muestra el arreglo en IHD que se usó en este trabajo experimental para medir simultáneamente dos componentes ortogonales de deformación, usando dos fuentes de luz láser. Dos haces de luz, uno de un láser Argón-ion de longitud de onda  $\lambda_1 = 458\text{nm}$  y otro de He:Ne con longitud de onda  $\lambda_2 = 633\text{nm}$  son divididos en dos por divisores de haz  $B_1$  y  $B_2$ , respectivamente.

Los haces reflejados (llamados haces de referencia) se alinean para ser conjuntamente acoplados a una fibra mono modal. La luz que sale por el extremo opuesto de la fibra, incide sobre un cubo “combinador de haces” C para después reflejarse en dirección a la cámara.

Los haces transmitidos (“haces objeto”) se reflejan en una serie de espejos acomodados de manera tal que se ilumine simétricamente la superficie del objeto desde dos posiciones distintas, como se ilustra en la Fig1(b). Parte de la luz reflejada por la superficie del objeto, es recolectada por una lente positiva **L** y dirigida a la cámara.



**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 coordenado.

La luz combinada de haces objeto y referencia que llega a la cámara, se separa en dos, por medio de un prisma dispersor. Parte de la luz que corresponde a la longitud de onda  $\lambda_1=458\text{nm}$  incide en el sensor del canal B y la de longitud de onda  $\lambda_2=633\text{nm}$ , al canal R. De esta manera se graban simultáneamente e independientemente dos hologramas en la cámara CCD a color.

La intensidad ( $I$ ) que se registra en cada uno de los sensores estará determinada por:

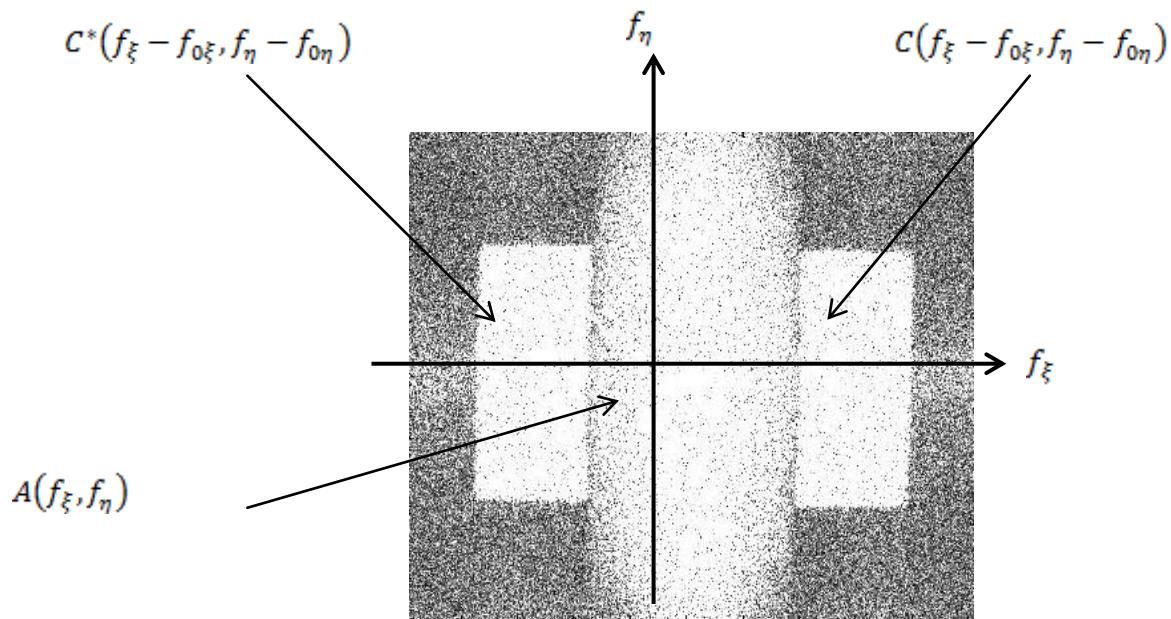
$$I(\xi, \eta) = |R(\xi, \eta) + O(\xi, \eta)|^2. \quad (1)$$

Donde  $(\xi, \eta)$  son las coordenadas ortogonales del plano de cada sensor.  $R$  y  $O$  son los haces referencia-objeto de cada fuente de luz.

$$O(\xi, \eta) = o(\xi, \eta) \exp[i\varphi(\xi, \eta)]. \quad (2)$$

$$R(\xi, \eta) = r(\xi, \eta) \exp[-2\pi i(f_{0\xi}\xi + f_{0\eta}\eta)]. \quad (3)$$

Como se había mencionado, el elemento de interés que hay que rescatar de esta intensidad, es la fase. Para este fin, se hace uso del método de la transformada de Fourier (Takeda & Ina & Kobayashi, 1982). En este método, se graban hologramas digitales con una frecuencia portadora espacial (En la Ec. 3,  $f_{0\xi}$  y  $f_{0\eta}$  representan las frecuencias portadoras a lo largo de las coordenadas  $(\xi, \eta)$ ) tal que permita separar, en el espacio de frecuencias, el espectro de cada holograma. Después, se calcula la transformada inversa, se obtiene una matriz compleja de donde se calcula la distribución de fase de cada holograma. Para introducir la frecuencia portadora en los hologramas, se genera un pequeño ángulo entre la normal a la superficie de la cámara y la dirección de incidencia de los haces de referencia. Como ejemplo, en la Fig.2 se observa una imagen del espectro de frecuencias de la intensidad grabada en el sensor del canal R.



**Figura 2.** Espectro de frecuencias de la intensidad grabada en el sensor del canal R.

Tenemos que la Ec.1 se puede escribir como:

$$\begin{aligned}
 I(\xi, \eta) = & a(\xi, \eta) + c(\xi, \eta) \exp[2\pi i(f_{0\xi}\xi + f_{0\eta}\eta)] + \\
 & c^*(\xi, \eta) \exp[-2\pi i(f_{0\xi}\xi + f_{0\eta}\eta)]. \tag{4}
 \end{aligned}$$

Con

$$a(\xi, \eta) = o^2(\xi, \eta) + r^2(\xi, \eta) \tag{5}$$

y

$$c(\xi, \eta) = o(\xi, \eta) r(\xi, \eta) \exp[i\varphi(\xi, \eta)]. \tag{6}$$

Cualquiera de los dos últimos términos de la Ec.4, representan a un holograma que tiene información sobre fase  $\varphi(\xi, \eta)$ . Para recuperar esta fase, hay que calcular la transformada de Fourier de  $I(\xi, \eta)$ .

$$FT[I(\xi, \eta)] = A(f_\xi, f_\eta) + C(f_\xi - f_{0\xi}, f_\eta - f_{0\eta}) + C^*(f_\xi - f_{0\xi}, f_\eta - f_{0\eta}). \quad (7)$$

Las letras capitales corresponden a la transformada de Fourier. Cualquiera de los términos  $C$  o  $C^*$  se filtra, para después calcular la transformada inversa de Fourier. De aquí se obtiene una matriz compleja de donde se calcula la distribución de fase para cada holograma, con la siguiente operación

$$\phi(\xi, \eta) = \arctan \frac{im[c(\xi, \eta)]}{re[c(\xi, \eta)]}. \quad (8)$$

Ahora, sea  $\varphi$  la distribución de fase de un primer holograma grabado en un estado sin perturbar el objeto de prueba. Y sea  $\varphi'$  la distribución de fase del holograma correspondiente a un estado perturbado o deformado del objeto. Como se había mencionado, la diferencia de fase  $\Delta\varphi(\xi, \eta) = \varphi'(\xi, \eta) - \varphi(\xi, \eta)$  se relaciona con el vector deformación  $\vec{d}$  y con los vectores sensibilidad  $\vec{S}_{\lambda_m}$  por medio del producto escalar

$$\Delta\varphi_{\lambda_m} = (2\pi/\lambda_m) \vec{d} \cdot \vec{S}_{\lambda_m}, \quad m=1,2. \quad (9)$$

En el experimento, el origen del sistema de referencia de coordenadas cartesianas, se localiza en el centro de la superficie iluminada del objeto (ver la Fig1(b)). Se puede representar con muy buena aproximación los vectores de sensibilidad:

$$\vec{s}_{\lambda_1} = (\sin \alpha, 0, 1 + \cos \alpha)$$

$$\vec{s}_{\lambda_2} = (-\sin \alpha, 0, 1 + \cos \alpha). \quad (10)$$

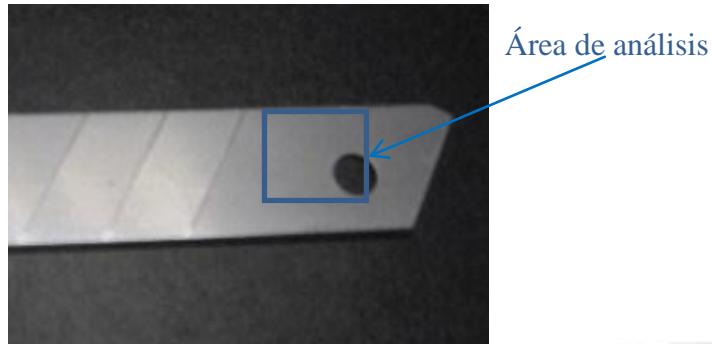
Donde  $\alpha$  es el ángulo entre los vectores de iluminación ( $\hat{n}_{\lambda_1}$  y  $\hat{n}_{\lambda_2}$ ) y el vector de observación ( $\hat{n}_o$ ). Se observa que el ángulo que forma cada vector sensibilidad con el sistema de coordenadas cartesianas, define el grado de sensibilidad del arreglo en cada eje coordenado. La Ec.9, representa una matriz en donde la única variable desconocida es el vector deformación  $\vec{d}$ , ya que tanto los mapas de distribución de fase como los vectores sensibilidad se obtienen experimentalmente. Además, de la misma Ec.9, se observa que la magnitud de  $\vec{d}$  se da en el orden de la longitud de onda de la fuente de luz láser, es decir, en fracciones de micrómetros. Cabe señalar que como en este sistema combinamos información de dos fuentes diferentes de luz laser, la resolución del sistema estará directamente relacionada con la longitud de onda más grande ( $\lambda_2 = 633\text{nm}$ ). Además, La resolución mínima en este tipo de sistemas es del orden  $\lambda/30$  y el máximo es del orden de  $100\lambda$ .

## Resultados

El dispositivo se prueba con una placa metálica rectangular. Parte de la superficie de la placa (un área rectangular aproximada de 25.6mm X 20 mm, ver Fig.3) se ilumina simétricamente desde dos posiciones distintas. Una prensa mecánica que está sujetada a la mesa holográfica, se usa para

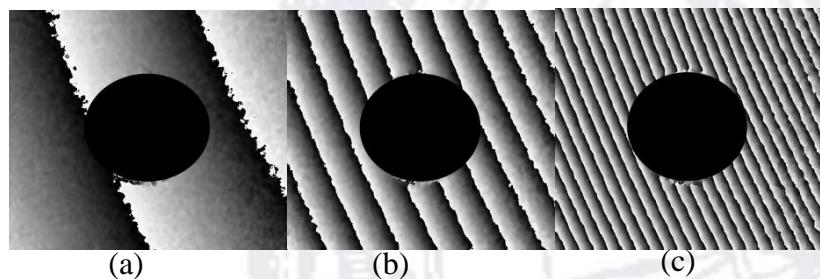
mantener inmóvil a la placa. Detrás de la placa, se instala un cautín que mantiene la punta metálica en contacto con la superficie del objeto.

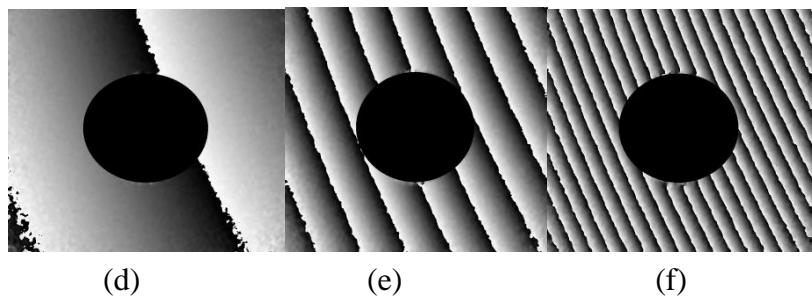
Una cámara a color HITACHI HV-F31, tricromática y de alta resolución (1024x768 pixeles, cada píxel tiene un área de  $4.65 \mu\text{m}^2$ ) hace una primera toma que permite grabar simultáneamente dos hologramas, correspondientes a dos posiciones distintas de iluminación. Tiempo después, se conecta el cautín a la corriente eléctrica y secuencialmente se comienza a grabar hologramas con una frecuencia de captura de 10 cuadros por segundo.



**Figura 3.** Objeto de prueba.

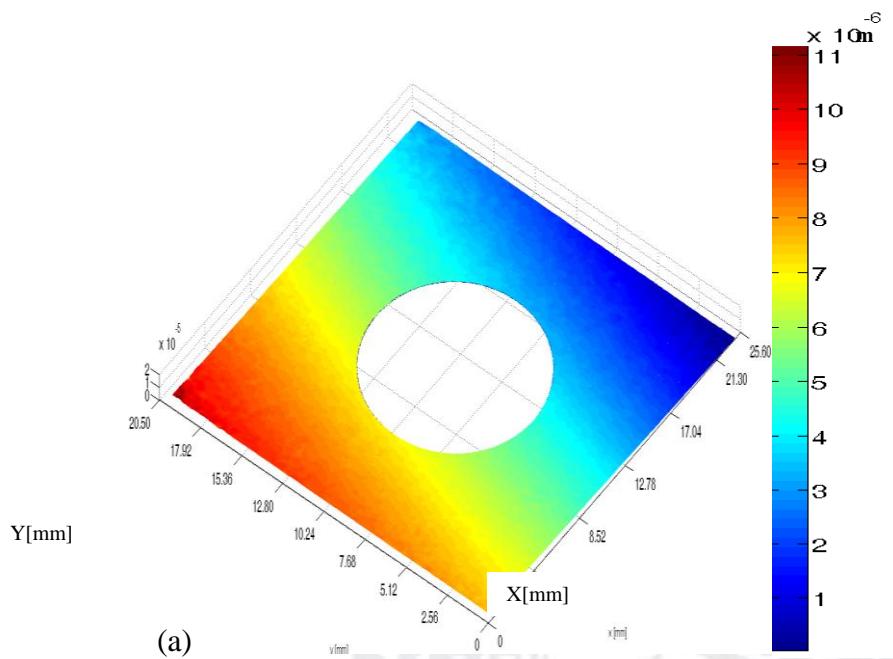
Con un algoritmo en la computadora, se calcula la diferencia de fase de los hologramas del primer cuadro—imagen en los canales R y B, con los subsecuentes. En la Fig.4 se muestran tres pares de mapas de diferencia de fase envuelta, correspondientes a los primeros tres momentos registrados, después de haber conectado el cautín.

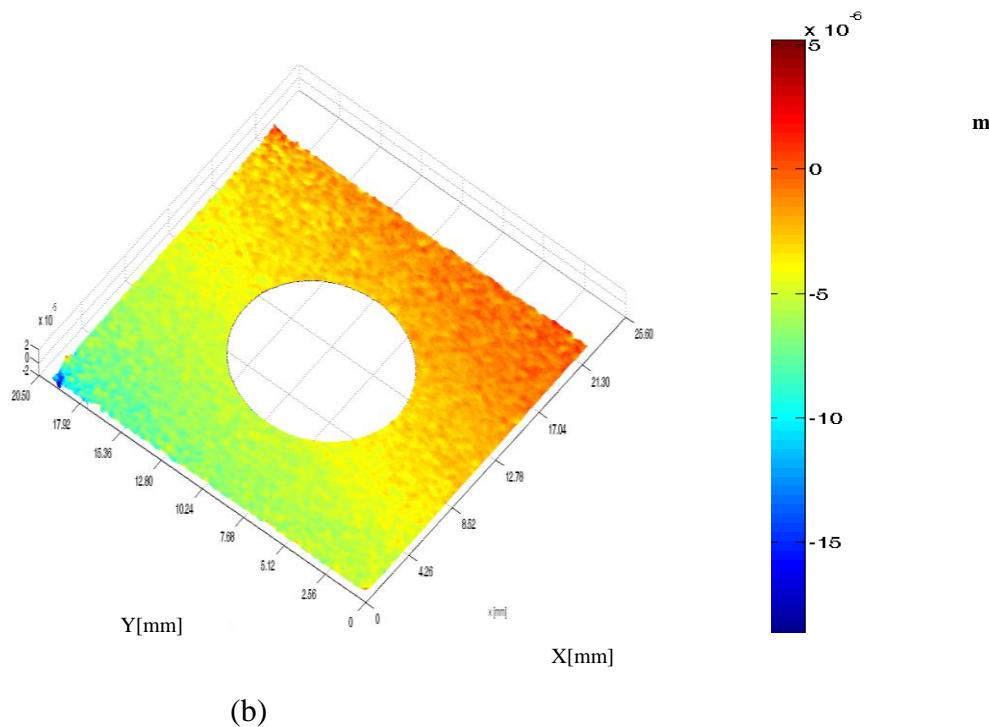




**Figura 4.** Mapas de diferencia de fase envuelta. (a), (b) y (c) correspondientes al cuadro del sensor del canal B. (d), (e) y (f) grabada en el sensor del canal R.

Las diferencias de fase que se muestran en (a) y (d) corresponden a los primeros dos hologramas del estado “no deformado” y un segundo par después de calentada la placa, en un estado ya deformado. (b)(e) muestra los primeros dos hologramas y un tercer par de ellos grabados 0.1s después de los segundos. (c)(f) muestra los primeros dos hologramas y un cuarto par de ellos grabados 0.2s después de los terceros.





**Figura 5.** Mapas de desplazamientos correspondientes al primer momento de grabado después de haber conectar el cautín. (a) En la dirección z (b) En la dirección x.

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.5 se muestran un par de gráficas de mapas de desplazamientos en la direcciones ortogonales z y x, correspondientes al primer momento de deformación. En las gráficas, los ejes X y Y representan las dimensiones de la superficie de la placa y el eje Z las deformaciones microscópicas del objeto de prueba. El color en cada punto de las gráficas, representan una medida de deformación en la superficie del objeto. Este valor cuantitativo se representa en la barra de colores al lado de cada gráfica. Se observa que existe una mayor deformación en la dirección z que en x. Además de que 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, 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.

## Conclusión

Se presenta un arreglo para medir simultáneamente dos componentes ortogonales de deformación en la superficie de un objeto usando dos fuentes de luz láser y una cámara a color. El uso de dos láseres y una cámara a color permite grabar simultáneamente dos hologramas con una sola toma de la cámara. Para probar el arreglo, se miden las deformaciones en la superficie de una placa metálica cuando esta se calienta por medio de un cautín. Los resultados experimentales muestran la viabilidad y el potencial de la técnica metrológica óptica, para caracterizar parámetros mecánicos en superficies de objetos.

## Referencias

- Fu, Y. & Pedrini, G. & Hennelly, B. M. & Groves, R. M. & Osten, W. (2009). Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement. *Opt. Lasers Eng.*, **47**(5), 552–557.
- Gåsvik, K. J. (2002). *Optical Metrology*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Kreis, Thomas (2004). *Handbook of holographic interferometry*. Weinheim: WILEY-VCH GmbH and Co. KGaA.
- Mann, C. J. & Bingham, P. R. & Paquit, V. C. & Tobin, K. W. (2008). Quantitative phase imaging by three-wavelength digital holography. *Opt. Express* **16**(13), 9753–9764.
- Saucedo Anaya, T. & Mendoza Santoyo, F. & De la Torre, M. & Pedrini, G. & Osten, W. (2006). Simultaneous two-dimensional endoscopic pulsed digital holography for evaluation of dynamic displacements. *Appl. Opt.*, **45**(19), 4534–4539. Endoscopic pulsed digital holography for 3D measurements. *Opt. Express*, **14**(4), 1468–1475.
- Saucedo Anaya, & De la Torre, M. & Mendoza Santoyo, F. (2008). Microstrain detection using simultaneous endoscopic pulsed digital holography. *Opt. Eng.*, **47**(7), 073601.
- Schnars, U. & Jueptner, W. (2004). *Digital Holography; digital hologram recording, numerical reconstruction and related techniques*. Berlin: Springer.

Takeda, M. & Ina, H. & Kobayashi, S. (1982). Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer based Topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, **72**(1), 156–160.

Vest, C.M. (1979). *Holography Interferometry*. New York: Wyle.