

# Cuantificación en 3D de forma y deformación en objetos usando técnicas ópticas no-destructivas

Fernando Mendoza Santoyo y Carlos Pérez López  
Centro de Investigaciones en Optica, A.C.  
Loma del Bosque 115  
León, Guanajuato, 37150  
Tel: ++ 52- 4- 773 1017 ext. 167  
Fax: ++ 52- 4- 717 5000  
e-mail: fmendoza@foton.cio.mx

Resumen: Las técnicas ópticas no-destructivas son hoy en día utilizadas en la medición de un rango muy amplio de deformaciones en todo tipo de objetos. Por su importancia, su uso se da tanto en la industria, como en el sector científico y académico. Los datos que se obtienen de estudiar la forma del objeto y las deformaciones que éste pueda sufrir, son utilizados, por ejemplo, como parte del proceso de diseño y fabricación del mismo. En esta conferencia, presentamos la tecnología óptica de punta que hemos desarrollado para su aplicación en la medición de la forma y deformación que un objeto cilíndrico muestra al ser sometido a vibración armónica en un punto y, simultáneamente a la vibración, a amortiguación en otro punto. La técnica utilizada esta basada en holografía e interferometría de moteado digitales. Los resultados que se muestran se obtienen de combinar vectorialmente las componentes X,Y, Z de la deformación sobre la forma del objeto, notándose en particular el flujo neto de energía del punto de vibración al punto de amortiguación.

## INTRODUCCION

Muchos grupos de trabajo en el área de las pruebas ópticas no-destructivas dedican gran parte de su investigación a diseñar métodos para combinar los tres vectores de sensibilidad que describen totalmente en 3 dimensiones, junto con la forma del objeto, la deformación, estática o dinámica, en un objeto. Para lograr lo anterior y poder llevar estos métodos a ambientes no controlados, o sea fuera de laboratorio, se utilizan sistemas optoelectrónicos que incorporan láseres pulsados y cámaras de alta resolución/velocidad. Dos ejemplos de los métodos ópticos no-destructivos son la holografía e interferometría de moteado digital. Aquí expondremos una metodología basada en estas técnicas que permite adquirir datos, no simultáneamente, de tres fuentes puntuales distintas, utilizadas para iluminar un cilindro que vibra armónicamente. Estos datos son combinados con datos sobre la forma del cilindro, previamente obtenidos utilizando otro método óptico no destructivo conocido como doble longitud de onda, de forma tal que se obtenga una descripción vectorial completa del movimiento dinámico del cilindro.

El término no simultáneamente se refiere a un arreglo optoelectrónico que consiste en tres diferentes direcciones de iluminación para el cilindro, y una fibra óptica monomodal que lleva el haz de referencia hacia los sensores de tres cámaras de CCD localizadas como se muestra en la figura 1a. Para llevar a cabo las pruebas, dos de las direcciones de iluminación son cubiertas de

forma tal que solamente luz proveniente de una dirección ilumina al objeto y a las tres cámaras CCD. Así, consecutivamente y no simultáneamente, el haz de referencia es interferométricamente combinado con cada uno de los haces que iluminan al objeto desde las tres diferentes direcciones. De esta forma se forma un holograma digital para cada una de las direcciones.

## ARREGLO EXPERIMENTAL Y METODO

Se utilizo un láser de Nd:YAG de pulso gemelo, con una repetición de 60 Hz por pulso (la duración de cada pulso es de 20 ns). Dos pares de pulsos son necesarios para estudiar el cilindro vibrando: el primer par de pulsos (con una separación entre ellos de 50  $\mu\text{m}$ ) se dispara después de un tiempo  $t_1$  dentro de un ciclo de vibración, y el segundo par de

disparados después de un tiempo  $t_2$   $\mu$   
segundo pulso del primer par. Mediante una  $\mu$   
que ambos pares de pulsos se disparen dentro del

La figura 1b muestra el arreglo óptico para los dividida en dos haces. Un haz se acopla a una fibra otro haz es dividido en tres haces que sirven para diferentes. Estas tres direcciones de iluminación vectores de sensibilidad  $k_1, k_2, k_3$ . Los caminos

ópticos de cada uno de los tres haces y el correspondiente al haz de referencia son igualados para asegurar que la combinación de los haces objeto y referencia, en los sensores de la CCD, es coherente y dan como resultado un patrón de interferencia. Los hologramas digitales son capturados individualmente para cada combinación de par de haces iluminación-referencia, cubriendo los otros dos haces de iluminación que van en distintas direcciones. Este proceso se repite para cada pulso del láser, que para el problema que aquí se resuelve cuatro pulsos son disparados: el primer pulso es capturado, por ejemplo, por la CCD1, el segundo por la CCD2 mientras que el tercer y cuarto pulsos son capturados por la CCD3. Así, hasta 4 hologramas digitales son capturados para cada dirección de iluminación. Los datos de cada holograma digital son procesados usando la técnica de Fourier [1,2], con la cual se recupera la información de fase de la deformación. La deformación total, vector resultante, se obtiene de sumar los datos de fase que se obtienen para cada vector de sensibilidad, y la descripción completa en 3D se logra al combinar el vector resultante con los datos sobre la forma del cilindro. Las cámaras CCD utilizadas en los experimentos fueron marca SONY, con 640x480 pixeles, aproximadamente  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ .

Para describir con precisión la deformación en 3D de un objeto es necesario conocer su forma. En la actualidad hay muchos métodos ópticos no-destructivos para obtener la forma de un objeto, e.g., triangulación, proyección de franjas y métodos interferométricos (holografía y moteado). Para este caso, la forma del objeto se encontró cambiando la longitud de onda del láser usado. El uso del método de doble longitud de onda para encontrar la forma de un objeto en óptica no-destructiva ha sido previamente reportado [3]. Por ejemplo, el cambio de longitud de onda se produce al modificar la distancia entre las superficies reflectoras del etalón de salida en un láser de rubí. En nuestro caso los hologramas digitales fueron grabados con  $\Delta\lambda = 0.169 \text{ \AA}$ , mediante el arreglo mostrado en la figura 1a, con solamente una cámara de CCD y un haz de iluminación al cilindro, manteniendo el objeto estacionario.

### GRABACIONES EN 3D

El cilindro metálico era hueco, con 31 cm de altura, 15 cm de radio y 1mm de espesor en su pared, y fue rígidamente sujetado en su parte inferior. El origen de un sistema rectangular de coordenadas, imaginario, se origina en el centro del cilindro, figura 1b, el cual es usado para calcular las tres componentes del vector de desplazamiento correspondientes a los tres mapas de fase, i.e.,

$$\phi = (2\pi / \lambda) (\eta_o - \eta_c) \cdot \mathbf{d}, \quad (1)$$

en donde,  $(\eta_o - \eta_c)$  es definido como el vector de sensibilidad ( $k_1, k_2$  ó  $k_3$ ) y  $\mathbf{d}$  el vector de desplazamiento.  $\eta_o$  y  $\eta_c$  son vectores unitarios de la fuente de iluminación del objeto a un punto  $P$  sobre el objeto, y de ese punto al centro de la cámara de CCD, respectivamente. Así,  $\mathbf{d}$  es el vector resultante cuyas componentes  $d_x, d_y$  y  $d_z$  se deben de encontrar de los mapas de fase.

El cilindro fue excitado en su superficie interior por un vibrador, localizado a 23.2 cm de la parte inferior del cilindro, a una frecuencia senoidal de  $\nu = 1040$  Hz. Una barra metálica fue atornillada en la superficie interior del cilindro, a 10 cm por debajo del vibrador. La barra fue inmersa en un líquido viscoso para amortiguar la vibración del cilindro. Los dos pares de pulsos fueron disparados dentro del mismo ciclo senoidal de vibración, de tal manera que cuatro hologramas digitales fueron capturados: primer pulso/holograma en la CCD1, 50  $\mu\text{s}$  después la CCD2 capturó el segundo pulso/holograma, y 240  $\mu\text{s}$  después de este segundo pulso la CCD3 capturo los pulsos/hologramas tercero y cuarto (separados por 50  $\mu\text{s}$ ). Debido a limitaciones en el sistema de lentes, solamente fue posible ver parte del cilindro, 27 cm de altura por 17 cm de ancho, dando una imagen procesada de 360x560 pixeles.

Los mapas de fase desenvueltos para cada dirección de iluminación se obtienen de los hologramas digitales correspondientes. La figura 2a muestra el mapa de fase desenvuelto de una de estas direcciones. Del anterior y de los otros dos mapas de fase desenvueltos correspondientes a las otras dos direcciones, es posible calcular las componentes del vector  $\mathbf{d}$ . La figura 2b muestra el mapa de fase resultante (de las tres direcciones) sobre la superficie del cilindro. La figura 2c muestra una perspectiva en 2D del cilindro, con la componente  $d_z$  sobre su superficie. Las posiciones aproximadas de los puntos de vibración y amortiguación se pueden ver en esta figura a lo largo de la línea  $Y = 0$ . Esta imagen se puede comparar con la figura 2d que muestra la componente normal de la deformación (perpendicular a la superficie del cilindro),  $\mathbf{d} / \text{abs}(\mathbf{d})$ , sobre la superficie del cilindro. Se debe de notar de la comparación que la mayoría de la amplitud de deformación se halla a lo largo de la dirección normal a la superficie del cilindro.

La figura 2e muestra la combinación de las componentes  $d_x$  y  $d_y$ , la deformación tangencial, cuya magnitud es mucho menor que la deformación normal. Hay algunos puntos que notar de esta

imagen: a) los vectores apuntan hacia arriba, desde la parte inferior rígidamente sujeta; b) los vectores apuntan hacia los lados del cilindro. Habrá que recordar que solo parte del cilindro es visto por las 3 CCDs, así es que ambos puntos dan una idea de la forma real en la que el cilindro esta siendo deformado en las direcciones X e Y.

## CONCLUSIONES

El método descrito muestra el estado del arte en la metrología óptica no-destructiva en 3D, en particular la holografía digital, la cual puede ser utilizada en eventos de deformación dinámicos. El método se puede aplicar en ambientes hostiles, o sea fuera del ambiente controlado de laboratorio, lo anterior gracias al uso de láseres pulsados. Los resultados muestran que el método es de campo completo, lo que nos permite observar la deformación completa en todo el objeto, y no puntualmente como sucede con métodos no ópticos tradicionales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente realizado con financiamiento de CONACYT, 32709-A.

## REFERENCIAS

- [1] Ph. Froening, G. Pedrini, H. J. Tiziani y F. Mendoza Santoyo, "Vibration mode separation of transient phenomena using multi-pulse digital holography," *Optical Engineering*, **38** (12), pp. 2062-2068 (1999).
- [2] G. Pedrini y H. J. Tiziani, "Quantitative evaluation of two-dimensional dynamic deformations using digital holography," *Optics and Laser Technology*, pp. 249-256 (1997).
- [3] A. A. Friesen y U. Levy, "Fringe formation in two-wavelength contour holography," *Applied Optics*, **15**, pp. 3009-3020 (1976).

*Nota: La figura 1a se halla al final del manuscrito.*

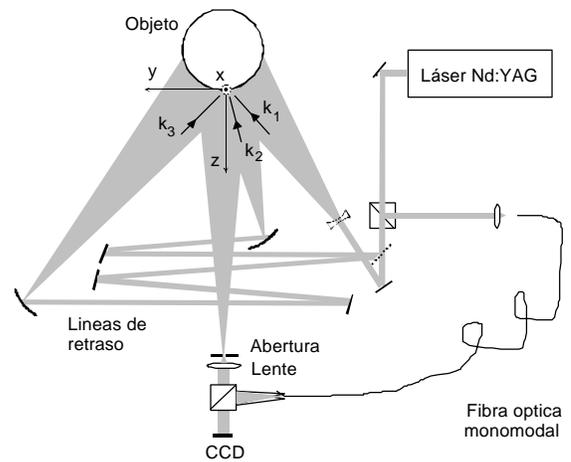


Figura 1b



Figura 2a

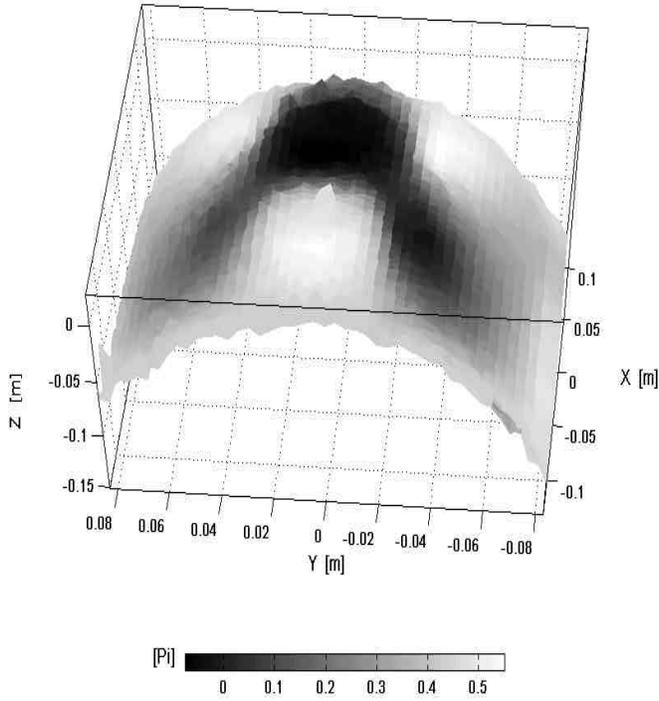


Figura 2b

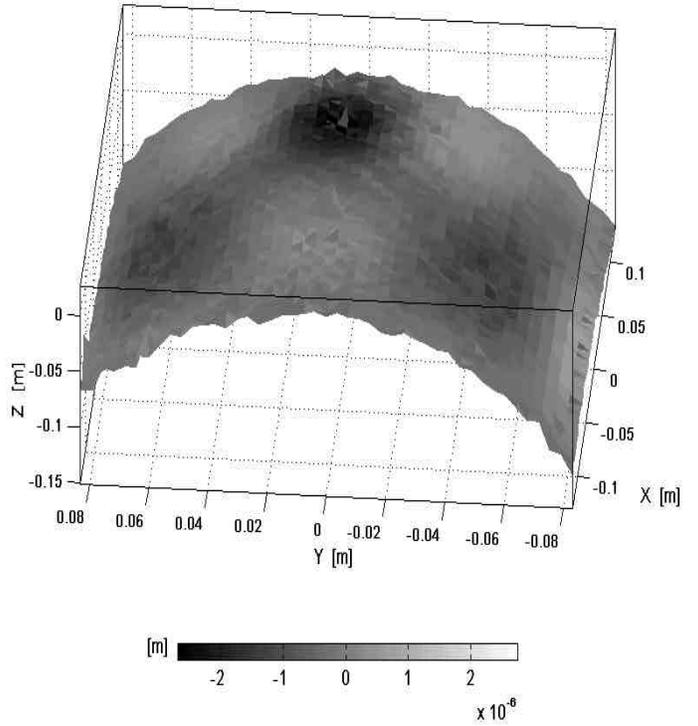


Figura 2d

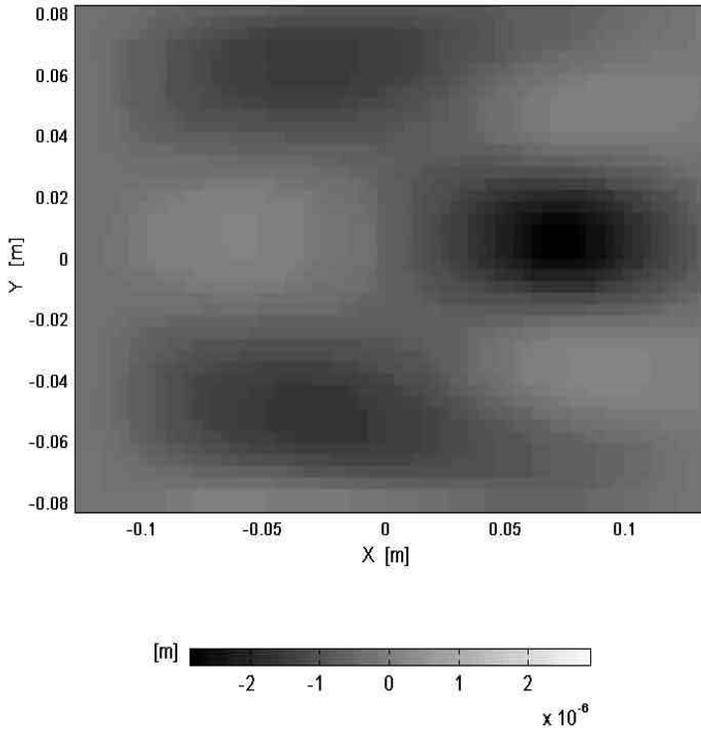


Figura 2c

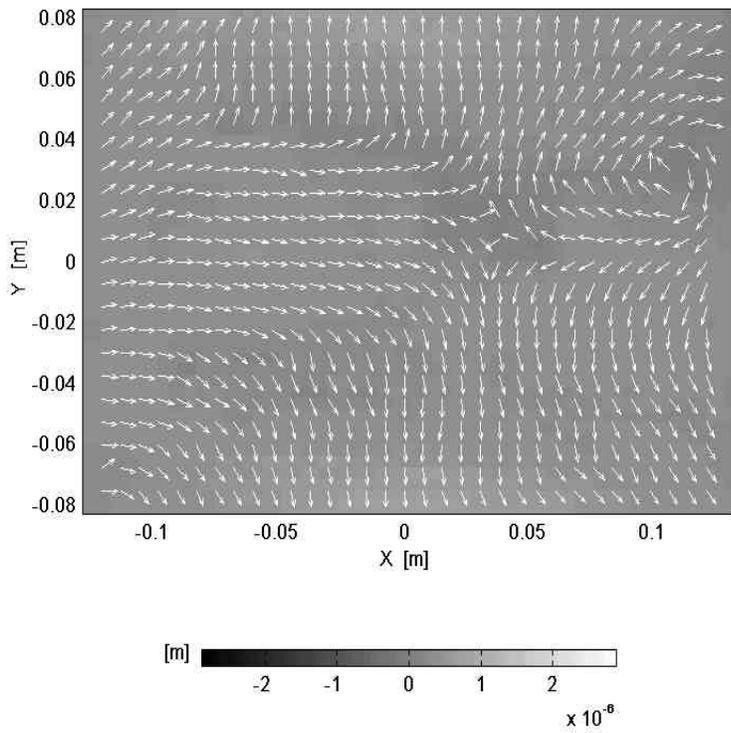


Figura 2e

Figura 1a

