

Detección de Micro-Desplazamientos en Sistemas Cilíndricos Utilizando Interferometría Panorámica

Araceli Soto H., Juan B. Hurtado-Ramos, Jorge A. Huerta-Ruelas, Liliana Reséndiz S.

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional
Cerro Blanco 141, Col. Colinas del Cimatario, 76090, Querétaro, México.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos para la detección de micro-desplazamientos en objetos cilíndricos. El sistema propuesto utiliza el principio de visión panorámica con espejos convexos, en particular se han utilizado espejos de superficie paraboloide. Se aplican los principios de la interferometría de patrones de moteado electrónico conocida como ESPI u Holografía digital. Los resultados que se muestran fueron obtenidos con un interferómetro panorámico conformado por dos sistemas básicos, el de iluminación y el de captura, los cuales contienen, cada uno, un espejo paraboloide.

1. INTRODUCCIÓN

En 1960 surge la invención del láser [1], lo cual permitió obtener radiación luminosa con un alto grado de coherencia. Al utilizar esta fuente de luz, puede observarse que la mayoría de objetos iluminados por el láser aparecen cubiertos por un patrón de puntos oscuros y brillantes de aspecto granuloso o moteado. De los años 60's a los 70's diversos investigadores observaron y descubrieron que el fenómeno era debido a la interacción entre las ondas difundidas aleatoriamente por los diferentes puntos de las superficies rugosas, que el campo de puntos oscuros y brillantes puede ser fotografiado sin necesidad de formar una imagen del objeto del cual procede, que el fenómeno también se puede apreciar con luz parcialmente coherente pero se hace menos evidente. Se desarrollaron modelos tomando en cuenta las diversas condiciones de iluminación, naturaleza y estado del difusor, recuperándose información acerca del medio difusor y considerando diferentes geometrías de iluminación y observación. Se desarrollaron interferómetros de *speckle* sensibles a los desplazamientos de la superficie difusora en direcciones específicas [2]. Surge la idea de sustituir la película fotográfica por cámara de televisión y procesar electrónicamente la señal de video resultante a lo que se le llamo ESPI (Interferometría Electrónica de Patrones de *Speckle*) [2]. La Formación del patrón de *speckle* tiene una relación directa con la densidad de probabilidad de distribución de amplitud, intensidad y la fase. Además la polarización afecta al contraste de las franjas [3]. Las Técnicas ESPI, también llamadas Holografía TV, han experimentado en los últimos años, un gran desarrollo con la incorporación de nuevas tecnologías como las cámaras CCD,

sistemas de procesamiento digital de imágenes, fibras ópticas, etc.

2. TÉCNICAS ESPI (INTERFEROMETRIA ELECTRÓNICA DE PATRONES DE SPECKLE)

Es una técnica óptica, no destructiva, no invasiva que permite la visualización de los defectos o las deformaciones en objetos sólidos que poseen una superficie adecuadamente rugosa. La técnica hace uso de una propiedad única de la luz altamente coherente, que produce moteado al iluminar una superficie rugosa. La rugosidad involucrada se debe encontrar aproximadamente en el orden de magnitud de un tercio de la longitud de onda utilizada. En este caso las rugosidades se encuentran alrededor de los 250 nm puesto que la fuente es un láser He-Ne con longitud de onda de 632,8 nm. Con estas técnicas un objeto sometido a deformación estática o a vibración, puede ser monitoreado con alta sensibilidad dependiendo de la geometría de iluminación.

Una técnica ESPI se divide básicamente en dos partes:

Parte óptica.- constituida por un interferómetro de patrones de *speckle* con registro electrónico en el que se producen los hologramas.

Parte electrónica.- Con la que se forman y eventualmente se analizan las franjas de correlación.

Cuando se ilumina una superficie con rugosidad en el orden de unas pocas longitudes de onda de la luz utilizada, la zona iluminada aparece no como un campo homogéneamente iluminado, sino como un

campo formado por una infinidad de pequeñas motas de diferentes intensidades. Originalmente el fenómeno fue considerado como un defecto y una característica indeseable de la iluminación láser. Más tarde se descubrió que era una poderosa herramienta de medición ya que el moteado proporcionaba información importante sobre la superficie que lo producía.

Básicamente la interferometría de moteado consiste en iluminar la superficie rugosa de un objeto con un haz láser. El patrón de moteado que se obtiene se utiliza como el haz objeto de un interferómetro clásico (Michelson, Mach-Zehnder, Fizeau, etcétera), el cual se hace interferir con un haz de referencia proveniente de la misma fuente láser. El patrón de interferencia resultante se registra en el CCD de una cámara y se almacena en forma de imagen digital. La mayoría de los formatos de imagen son válidos en este punto (.jpeg, .tiff, .raw, .bmp, etcétera).

Posteriormente se induce una perturbación en el objeto analizado, un calentamiento, una deformación, vibración, etcétera, esta modificación puede ser interpretada como un desplazamiento de la superficie del objeto bajo estudio. Este desplazamiento modificará la superficie del objeto, lo que a su vez generará cambios en el patrón de interferencia que captura la cámara CCD. Generándose una nueva imagen que se almacena también y se utiliza en el procesamiento del correlograma.

Las dos imágenes obtenidas se correlacionan de diversas maneras, principalmente con una resta de intensidades, que en un procesamiento de imágenes es básicamente una resta punto a punto de las imágenes en valor absoluto. La resta producirá un patrón de franjas llamadas franjas de correlación, estas franjas nos proporcionan la información del desplazamiento que sufrió la zona del objeto bajo observación. Por lo tanto, el resto del procedimiento, que será fundamentalmente análisis de imágenes consistirá en extraer esa información del número y perfil de las franjas de correlación mediante varias técnicas posibles.

Si representamos al interferograma antes de la deformación como:

$$I_a = I_m [1 + V \cos(\Psi_{1a} - \Psi_{2a})] = I_m (1 + V \cos \Psi_a); \quad (1)$$

y el interferograma después de la deformación como:

$$I_b = I_m [1 + V \cos(\Psi_{1b} - \Psi_{2b})] = I_m (1 + V \cos \Psi_b). \quad (2)$$

Que también se puede representar como:

$$I_b = I_m [1 + V \cos(\Psi_a - \Delta\Psi)], \quad (3)$$

donde I_m es la intensidad media local, V la visibilidad y Ψ_x la fase del interferograma;

$$\Delta\Psi = \Psi_b - \Psi_a = (\Psi_{1b} - \Psi_{2b}) - (\Psi_{1a} - \Psi_{2a}), \quad (4)$$

donde $\Delta\Psi$ es básicamente el cambio sufrido por el objeto y el que se trata de determinar. El correlograma se obtendrá en nuestro caso con la diferencia de intensidades:

$$C = |I_b - I_a|. \quad (5)$$

3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

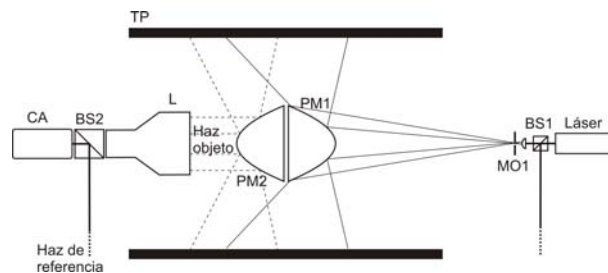


Fig. 1 Esquema del arreglo ESPI panorámico con espejos parabólicos propuesto.

En la Fig. 1 se muestra el arreglo experimental utilizado. Se utilizó un láser He-Ne que emite a una longitud de onda de 632,8 nm, con 50 mW de potencia. El haz de salida se separa en dos haces mediante un cubo divisor de haz (BS1). Uno de los haces resultantes será el de referencia y se retomará más adelante. El otro se hace pasar por un objetivo de microscopio (MO1) para expandirlo e iluminar completamente el espejo parabólico (PM1) del módulo de iluminación. El espejo PM1 ilumina homogéneamente una región del cilindro de prueba (TP), que coincide con una parte del área de visión del espejo parabólico del módulo de visión (PM2) cuya imagen es enfocada en el CCD de la cámara (CA), después de pasar por una lente (L) y un segundo divisor de haz (BS2). La lente (L) es

preferentemente telecéntrica para facilitar los cálculos del modelo panorámico. Por otro lado el primer haz, que antes se dejó pendiente, se guía utilizando los espejos necesarios por el exterior del tubo de prueba (TP) hasta el segundo divisor de haz (BS2) y de allí al CCD de la cámara. En ese dispositivo se superpone con el haz objeto y se consigue el interferograma digital.

Este primer interferograma puede almacenarse en la PC para utilizarlo como la imagen de referencia. Después de tomar un primer interferograma, se indujeron desplazamientos controlados del objeto (en el orden de unas cuantas micras) en las tres direcciones principales del sistema: a lo largo del eje que une el centro del CCD con la salida del láser; en la dirección arriba-debajo de acuerdo a la geometría de la Fig.1 y en la dirección perpendicular al plano del dibujo de la Fig. 1. (X, Y y Z, respectivamente).

Después de cada uno de los desplazamientos se obtuvieron imágenes de interferogramas, que fueron correlacionadas con las imágenes de referencia que se almacenaron antes del movimiento.

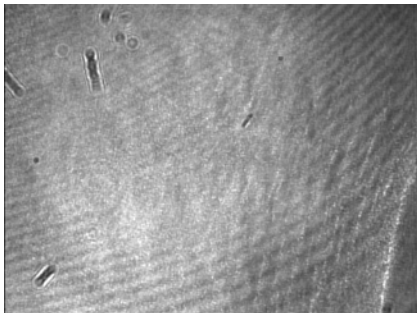


Fig. 2 Imagen del interferograma de referencia.

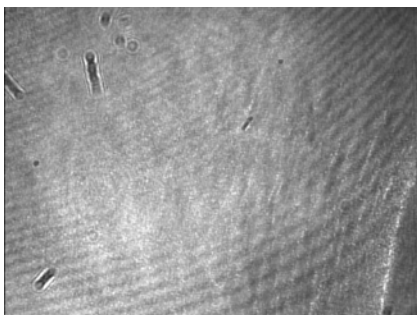


Fig. 3 Imagen del segundo interferograma en el que se ha introducido un desplazamiento.

En la Fig. 2 se muestra un ejemplo de imagen de referencia, que fue correlacionada con la imagen

mostrada en la Fig. 3, en la que ya se ha introducido información de desplazamiento. Como se espera, ambas imágenes son muy similares pues los movimientos realizados son de muy baja magnitud. Finalmente en la Fig. 4 se muestran las franjas de correlación obtenidas a partir de las dos imágenes mencionadas. Este correlograma permite distinguir franjas que son asociadas al micropdesplazamiento efectuado. Estas franjas son ya distinguibles pero pueden ser mejoradas mediante la optimización del sistema.

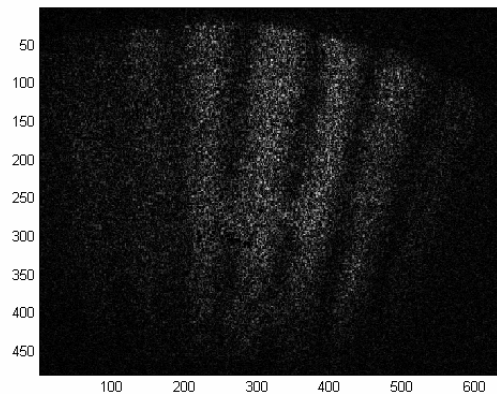


Fig. 4 Imagen del Correlograma. Estas franjas corresponden específicamente a un desplazamiento axial del objeto

3.1 Variaciones Experimentales

El arreglo original mostrado en la Fig. 1 requiere una intensidad luminosa alta, debido a que la luz disponible para iluminar el interior del tubo es dividida primero entre dos al salir de la fuente reduciéndose a la mitad la intensidad disponible. Enseguida se utiliza un objetivo de microscopio para expandir el haz de luz e iluminar completamente el espejo del sistema de iluminación. Esta expansión provoca que la intensidad de iluminación por unidad de área disminuya. Esta intensidad se ve disminuida todavía más debido a su reflexión en el espejo parabólico, que incrementa la expansión del haz. Todo lo anterior deja poca luz disponible para el CCD de la cámara.

La solución que nosotros utilizamos fue utilizar una fuente de mayor intensidad, pero al no disponer de ésta, se ha decidió concentrar la iluminación disponible solo en uno de los vértices del espejo parabólico (Fig. 5) y hacer el estudio por partes. También se utilizó una lente que disminuye el campo de visión de la cámara para aprovechar al máximo la iluminación disponible. Se realizaron diferentes experimentos en cuatro zonas del espejo,

obteniéndose resultados similares en cada una, lo que da indicaciones de éxito cuando se disponga de una fuente de mayor intensidad, la cual permitirá obtener un mapa completo de las microdeformaciones en toda la superficie cilíndrica bajo análisis en una sola imagen.

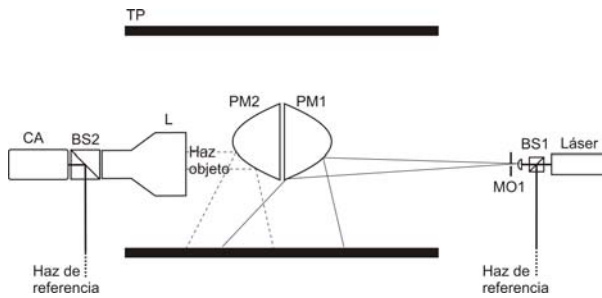


Fig. 5 Esquema de la variante experimental utilizada para aumentar la intensidad de la iluminación.

La variante del arreglo nos permitió concentrar toda la luz disponible en un área más pequeña, generándose imágenes de buena intensidad. Se ilumina la parte superior del interior del tubo y después cada uno de los lados del interior del tubo. En todos los casos se realizó un movimiento axial en la dirección del eje óptico de la cámara, un movimiento perpendicular en la dirección arriba abajo y por último movimiento perpendicular en la dirección de lado a lado con respecto al punto de vista de la cámara. Las franjas fueron obtenidas en dos de los tres casos y muestran en Figs. 4 y 6, los movimientos de lado-a-lado no produjeron ninguna franja.

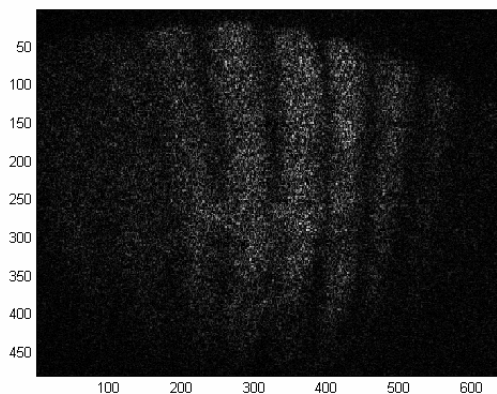


Fig. 6 Franjas obtenidas iluminando la parte superior del tubo y haciendo un desplazamiento de arriba abajo.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Se han logrado producir correlogramas (franjas de correlación) sensibles a los desplazamientos del sistema. En un futuro próximo esta información será útil en la medición de parámetros importantes de objetos como son micro-desplazamientos y/o micro-deformaciones.

Los correlogramas obtenidos son susceptibles de ser mejorados, mediante la optimización del arreglo óptico y la utilización de una fuente láser de mayor intensidad. El problema de la fuente se resolvió proponiendo un arreglo alternativo con el que se han generado correlogramas satisfactorios. El modelo de las franjas de correlación se encuentra todavía en desarrollo, en este momento solo se han logrado los resultados experimentales mostrados.

Todos los resultados indican que el sistema será exitoso en la determinación de deformaciones y micro-desplazamientos en geometrías cilíndricas utilizando un sistema de visión panorámico.

El sistema se encuentra actualmente en proceso de patentamiento por parte del Instituto Politécnico Nacional.

5. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la factibilidad de utilizar el principio de visión panorámico con espejos convexos en el desarrollo de una nueva técnica ESPI. Se han obtenido algunos correlogramas sensibles a los desplazamientos del sistema de visión. Se cuenta ahora con las herramientas necesarias para comenzar el desarrollo del modelo teórico que podrá ser usado para el dimensionamiento de los micro-desplazamientos detectados. De esta manera se trabaja en la medición de micro-deformaciones y micro-desplazamientos en cuerpos cilíndricos en campo completo.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional por su apoyo a través del proyecto SIP 20071007 y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo a través de los proyectos SEP-2004-C01-47938, 53177.

REFERENCIAS

[1] Pramod k. Rastogui, Digital Speckle Pattern Interferometry And Related Techniques, Ed. Wiley (2001), pp.5-6.

- [2] Ángel Manuel Fernández Doval, Tesis Doctoral Una aproximación sistemática a la holografía-TV y desarrollo de nuevas técnicas para la cuantificación y el análisis de magnitudes dinámicas con periodicidad temporal, Vigo (1997), pp.5-70.
- [3] J. W Goodman, <<Statistical properties of laser speckle patterns>> en laser speckle and related phenomena (Second edition), Ed. J.C. Dainty, Springer-Verlag, Berlin, 1984, pp.9-75.