

Demodulación de franjas de interferencia usando diferentes configuraciones

Demodulation of fringes pattern using different configurations

LÓPEZ-ÁLVAREZ, Yadira Fabiola†*, JARA-RUÍZ, Ricardo, DELGADO-GUERRERO, Sergio Humberto y RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo

Universidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes, Aguascalientes, Estación Rincón, Rincón de Romos, Aguascalientes, 20400 México.

Universidad de Guadalajara, Lagos de Moreno, Jalisco, 47460, México.

ID 1^{er} Autor: *Yadira Fabiola, López-Álvarez* / **ORC ID:** 0000-0002-9041-1908, **Researcher ID Thomson:** T-1555-2018, **CVU CONACYT ID:** 375952

ID 1^{er} Coautor: *Ricardo, Jara-Ruiz* / **ORC ID:** 0000-0001-7725-4138, **Researcher ID Thomson:** T-1532-2018, **CVU CONACYT ID:** 630276

ID 2^{do} Coautor: *Sergio, Delgado-Guerrero* / **ORC ID:** 0000-0003-2521-5887, **Researcher ID Thomson:** V-1747-2018, **CVU CONACYT ID:** 240475

ID 3^{er} Coautor: *Martín Eduardo, Rodríguez-Franco* / **ORC ID:** 0000-0002-6804-4777, **Researcher ID Thomson:** T-1539-2018, **CVU CONACYT ID:** 660892

DOI: 10.35429/JSI.2020.13.4.21.26

Recibido Enero 18, 2020; Aceptado Marzo 31, 2020

Resumen

Las técnicas de no contacto para el análisis de deformaciones en superficies ha tenido gran auge y aceptación en diversos sectores de la ciencia. Cuando un haz de luz con características de coherencia temporal y espacial irradia sobre una superficie ópticamente rugosa, presenta una distribución aleatoria de la intensidad, dando lugar al fenómeno denominado moteado (speckle); dicho fenómeno es una representación de puntos brillantes y oscuros formados por la distribución al azar de dicha luz, esta distribución de patrones de speckle superpuestos generan franjas de interferencia, siempre que se tenga una diferencia de fase entre ellos, las cuales, dan información sobre el estado de deformación que sufre el material que es analizado. Este trabajo tiene como objetivo dar a conocer el procedimiento que se sigue para el análisis de deformaciones en materiales utilizando técnicas interferométricas. Se presentan diferentes configuraciones de franjas de interferencia, y se describe el procedimiento para su demodulación.

Franjas de interferencia, Demodulación, Patrón de speckle

Abstract

Non-contact techniques for the analysis of deformations on surfaces has had great boom and acceptance in various sectors of science. When a beam of light with characteristics of temporal and spatial coherence radiates about optically rough surface, it presents a random distribution of intensity, giving rise to the phenomenon called speckle; said phenomenon is a representation of bright and dark dots formed by the random distribution of said coherent light, this distribution of overlapping speckle patterns generate interference fringes, its fringes are presented when in second pattern fringes has phase difference between them, which, give information about the state of deformation suffered by the material that is analyzed. This work reports the procedure that is followed for the analysis of deformations in materials using interferometric techniques. Different configurations of interference fringes are presented, and the procedure for their demodulation is described.

Interference Fringe, Demodulation, Pattern speckle

Citación: LÓPEZ-ÁLVAREZ, Yadira Fabiola, JARA-RUÍZ, Ricardo, DELGADO-GUERRERO, Sergio Humberto y RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo. Demodulación de franjas de interferencia usando diferentes configuraciones. Revista de Innovación Sistemática. 2020. 4-13:21-26.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: yadira.lopez@utna.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Origen del patrón de speckle

Cuando un haz de luz con características de coherencia temporal y espacial irradia sobre una superficie ópticamente rugosa, presenta una distribución aleatoria de la intensidad, dando lugar al fenómeno denominado moteado “*speckle*” (Rastogi, 2001); dicho fenómeno es una representación de puntos brillantes y oscuros. Esta intensidad es determinada por la suma coherente de las contribuciones de las amplitudes complejas, considerando que la superficie de estudio es rugosa comparada con la longitud de onda; a nivel microscópico una superficie mostrará una distribución al azar de las contribuciones de amplitud de las diferencias de fase en un punto de observación P. Como consecuencia de esto, la suma coherente de cada una de las amplitudes tanto oscuras como brillantes, dependerán de cuantas fases lleguen a pasar por el punto P (Rastogi, 2001). La metrología de speckle es una importante aportación en las técnicas de medición óptica, las recientes aplicaciones de esta técnica abarcan la mecánica experimental, ingeniería, medicina, entre otras ciencias (Sjoedahi, 1997), utiliza la correlación de la distribución de los puntos brillantes y oscuros llamados speckle formados en el espacio (Sjoedahi, 1997), dicho patrón de speckle es portador de gran información sobre la deformación de un objeto o los cambios de fase de un speckle en específico (Rastogi, 2001), (Johnson, 1998).

Interferometría

Las técnicas de metrología óptica como la fotografía de speckle y la interferometría involucran técnicas fotográficas y el fenómeno de interferencia presente en el patrón de speckle, que es en sí, el resultado de interferencias múltiples de los mismos speckle. La diferencia principal entre estas dos técnicas es que para la fotografía de speckle, las imágenes adquiridas de la superficie difusora deben estar correlacionadas, sin embargo, si se forman franjas como resultado de la interacción de un par de patrones de speckle antes y después de la deformación de un objeto se le denomina interferometría de speckle; estas franjas son generadas al tomar el producto de estos dos patrones representando los contornos de los cambios de fase causados por la deformación del objeto.

La interferencia es entonces, la superposición coherente de un frente de onda en un punto dado; si dos campos tienen amplitudes complejas A_1 y A_2 y de intensidad I_1 e I_2 respectivamente, el resultado de esta superposición de los patrones de speckle producen un campo que es usualmente otro patrón de moteado y puede ser representado mediante:

$$\begin{aligned} I &= |A_1 + A_2|^2 \\ I &= |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2^* + A_1^* A_2 \\ I_T &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde ϕ_1 y ϕ_2 son las fases de las amplitudes complejas de los speckles individuales, esta diferencia de fases muestra la evolución mediante franjas de interferencia (Rastogi, 2001). Dentro de la interferometría son estudiados estos cambios de fase dependientes directamente de la aplicación, geometría, parámetros físicos, del grosor o del índice de refracción del objeto observado.

Deformación inducida

Ya que las técnicas de metrología óptica involucran el estudio de cambios en distintos objetos, la deformación se puede presentar en las coordenadas (x, y) , mostrando una geometría distinta en cada caso, ya sea horizontal, vertical, circular o con alguna otra configuración.

Demodulación de franjas de interferencia

Los métodos de demodulación convencionales utilizan Transformada de Fourier, esto para franjas abiertas (x, y) , (Muñoz, 2016), (Quan, 2010), incluso se ha utilizado transformada Wavelet (Bailic, 2019) y Hilbert (Trusiak, 2018). La distribución de la intensidad obtenida de un patrón de franjas dada por la Eq. (1), contiene la fase que se desea obtener $\phi(x, y)$ y representa la variable física que está siendo estimada, para determinar este valor se utiliza la Transformada de Fourier, donde se localiza el centro del espectro Fourier $\tilde{a}(u, v)$, $C(u + t, v)$ y $C^*(u - t, v)$, son funciones conjugadas complejas que contienen la demodulación y la información de la fase en el dominio frecuencia (Takeda, 1982), (Muñoz, 2011).

$$\begin{aligned} \tilde{I}(u, v) &= F\{I(u, y)\} \\ \tilde{I}(u, v) &= \tilde{a}(u, v) + C(u + t, v) + C^*(u - t, v) \end{aligned} \quad (2)$$

Usando filtros paso banda y paso alto es posible obtener la información contenida en los términos $C(u + t, v)$ y $C^*(u - t, v)$, y mediante la función \tan^{-1} obtener la fase envuelta (Muñoz, 2011).

$$\phi_w(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{imag}(F^{-1}(\tilde{I}(u,v)))}{\text{real}(F^{-1}(\tilde{I}(u,v)))} \right\} \quad (3)$$

Sin embargo, demodular franjas, en especial con una geometría circular y además que presenten ruido de interferencia, hacen de la demodulación un proceso en el que no es posible aplicar los métodos convencionales como Takeda, expuesto anteriormente.

Se han propuesto diversas metodologías para la demodulación de franjas de interferencia circulares, desde filtros parciales sobre el espectro de Fourier (Kreis, 1986). Kemao y Soon, exponen la demodulación guiada por frecuencia (Kemao, 2007), sin embargo, al resultado de la fase envuelta es necesario aplicarle algoritmos para determinar la deformación que es inducida al objeto, mediante la construcción de una imagen con características similares al interferograma original, usando ajuste de polinomios (Cuevas, 2002), (Mancilla, 2007), también se trabaja en métodos de partición de la imagen y superpuestas ligeramente (Toledo, 2008), (Cuevas, 2006), este método es capaz de demodular franjas con ruido y cerradas, sin necesidad de la aplicación de otro método para desenvolver.

La demodulación de un patrón de franjas puede estar estimado por dos variables, la primera relaciona la similitud que existe entre el interferograma obtenido de una medición física y el creado genéticamente, así como el ajuste entre la primera y segunda derivada de la función (Jiménez, 2012). En la actualidad se han utilizado métodos de algoritmos genéticos, métodos paramétricos, heurísticos como PSO (Particle Swarm Optimization) (da-Silva, 2014), (Kennedy, 1995), entre muchos otros, atendiendo a las características propias de cada interferograma.

Motivación del trabajo

Este trabajo tiene como objetivo proporcionar información sobre el proceso que se sigue en la demodulación de franjas de interferencia.

Surge la necesidad debido a que en la literatura es difícil determinar qué proceso es el más conveniente de utilizar para cada geometría. También, busca que alumnos de Física, Mecánica y Mecatrónica comprendan el proceso de la metrología óptica.

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se obtuvieron dos patrones de speckle según se indica en la Eq. (1), con deformación en las coordenadas (x, y) y con geometría circular según la ecuación $x^2 + y^2$. Para la demodulación de las primeras se utilizó la transformada de Fourier directa e inversa y para la demodulación de franjas cerradas se explica el proceso que es más adecuado.

Proceso de demodulación

1. Asignar valores a $x = i, y = j$, del tamaño de una imagen 256×256 .
2. Declarar la variable de la deformación, esta determinará el cambio en la geometría de las franjas $\phi_2 = 2\pi * x, y, x^2 + y^2$, etc.
3. Aplicar la Eq. (1), considerando dos intensidades, una de referencia y otra con deformación.

$$I_1(i, j) = 127 + 128 * \cos \phi_1$$

$$I_2(i, j) = 127 + 128 * \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

(a)
(b)

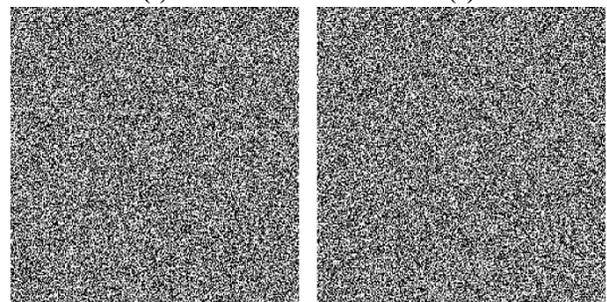


Figura 1 Patrones de speckle (a) referencia $I_1(i, j)$, (b)deformado $I_2(i, j)$

Fuente: elaboración propia [Matlab]

4. Ya que la interferometría es el resultado de la diferencia entre dos estados de intensidad. $I_T = I_1 - I_2$.

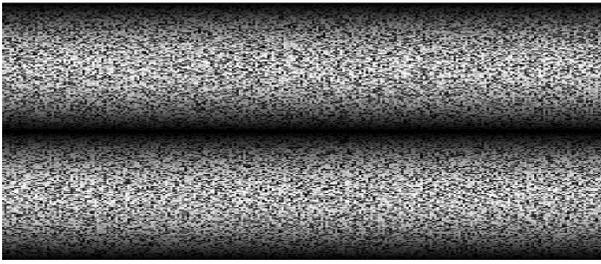


Figura 2 Franjas de interferencia con deformación el eje x
Fuente: elaboración propia [Matlab]

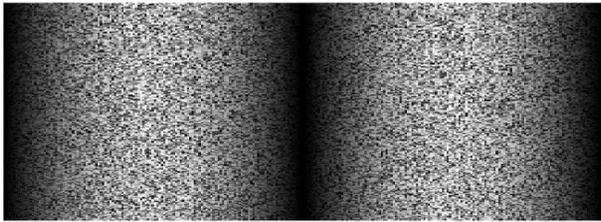


Figura 3 Franjas de interferencia con deformación en el eje y
Fuente: elaboración propia [Matlab]

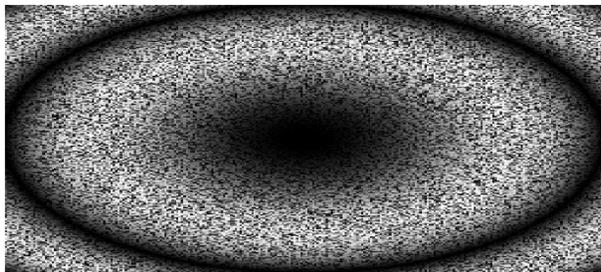


Figura 4 Franjas de interferencia con deformación en el eje (x^2+y^2)
Fuente: elaboración propia [Matlab]

Para la demodulación de las franjas con geometría horizontal y vertical, resultantes del paso 4, se utiliza la Transformada de Fourier directa e inversa. Mientras que para la demodulación de las franjas cerradas o circulares es necesario crear un interferograma artificial con las características del interferograma original, se puede determinar la fase envuelta del interferograma utilizando una aproximación en los valores del interferograma, sin embargo, el error en la demodulación puede aumentar.

Demodulación de franjas de interferencia

Obtener la trasformada de Fourier de cada interferogramas.

1. Crear filtro gaussiano y multiplicarlo por la trasformada del interferograma, paso 1.
2. Obtener la trasformada inversa de Fourier y aplicar la Eq. 3.

3. Para el caso de las franjas circulares, se aplican filtros basa banda en las coordenadas (x, y) .
4. Se determina la trasformada de Fourier directa e inversa de cada interferograma con filtrado en (x, y) , del paso 3 y se aplica la Eq. (3) a cada uno.
5. Se obtiene un interferograma sumando los obtenidos en el paso 4, con coordenadas en (x, y) .
6. A partir del interferograma anterior, se multiplica por la parte real e imaginaria del interferograma creado genéticamente, aplicándose la Eq. (3).

Desarrollo experimental

Para obtener patrón de franjas, se utilizó un interferómetro Mach Zehnder, construido con una fuente de luz coherente a 632.8 nm. Las imágenes se obtuvieron usando una cámara CCD XC-77, una computadora para procesar los datos.

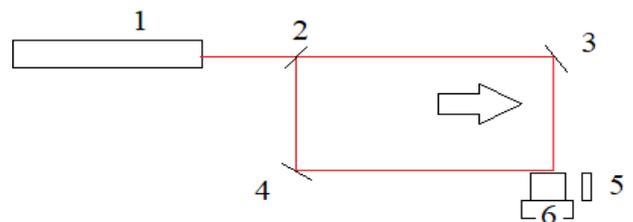


Figura 5 Interferómetro Mach Zehnder para obtener franjas de interferencia (1) Laser He-Ne, (2) Divisor de haz, (3), M1, (4) M2, (5) M3 y (6) CCD, la flecha indica una deformación en uno de los brazos del interferómetro
Fuente: elaboración propia

Resultados

Para la demostración del proceso de demodulación se introdujeron deformaciones en (x, y) , y (x^2+y^2) . La Figura 6, muestra (a) deformación en x, (b) mapa de fase de las franjas de interferencia con deformación en x, (c) deformación en y, (d) mapa de fase de la deformación en y.

Cuando se presentan franjas de interferencia, ya sean horizontales y verticales, en general el mapa de fase característico se presenta con un plano, cuando este plano muestra curvaturas, significa que las franjas tomadas por el sistema de la Figura 5, tiene pequeños desplazamientos.

La Figura 7, muestra las franjas de interferencia circulares, en correspondencia con las obtenidas en la Figura 4. Se muestra, también, el mapa de fase obtenido con el proceso de demodulación descrito con anterioridad.

En este caso, es importante el método que se utilice para determinar las características del interferograma creado genéticamente, ya que los errores en la demodulación del interferograma se pueden ver en el centro del mapa de fase, Figura 7 (b).

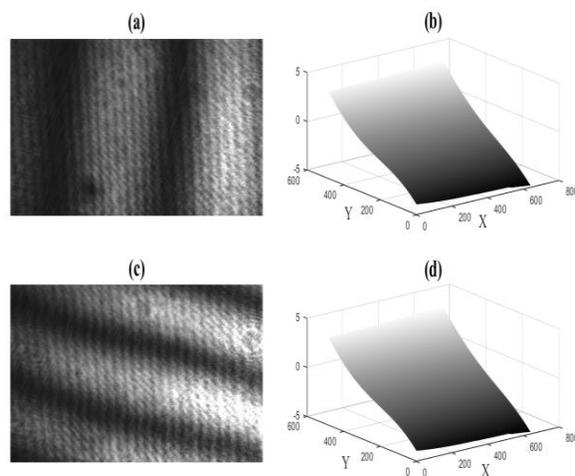


Figura 6 Franjas de interferencia, con deformación (a) deformación en y , (b) mapa de fase de las franjas de interferencia, con deformación en x , (c) deformación en x , (d) mapa de fase de las franjas de interferencia, con deformación en y

Fuente: elaboración propia [Matlab]

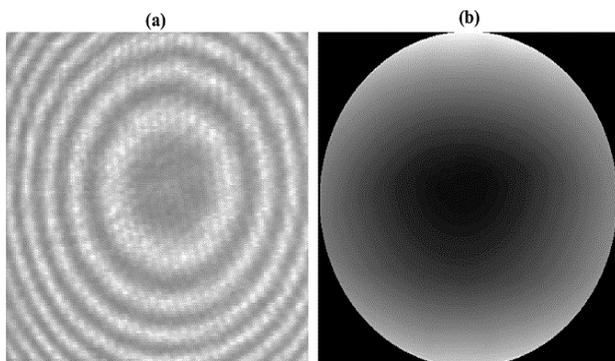


Figura 7 Demodulación del patrón de franjas circular, (a) franjas de interferencia con deformación (x^2+y^2) , (b) mapa de fase de las franjas de interferencia, con deformación en (x^2+y^2)

Fuente: elaboración propia [Matlab]

Conclusión

En este trabajo se muestran y describen las técnicas de demodulación de franjas de interferencia con diferentes configuraciones, para obtener los interferogramas se introdujo una deformación en el sistema óptico, tomando los ejes (x, y) , (x^2+y^2) . Se demostró que el mapa de fase para los interferogramas con deformación en los ejes (x, y) , se presenta de manera lineal; para el caso del interferograma circular el mapa de fase muestra un comportamiento de parábola. Para el caso de la demodulación del interferograma circular se considera un solo interferograma genético, para demodular los interferogramas experimentales, sin embargo, el uso de un interferograma genético para cada medición disminuirá los errores en las mediciones.

Referencias

Bailich M., et al. (2019) “Multidirectional wavelet-based fringe analysis for surface diagnosis by optical profilometry”, *Procedia Comput. Sci.* 148, 627–636.

Cuevas F., Sossa J. and Servin M. (2002). “A parametric method applied to phase recovery from a fringe pattern based on a genetic algorithm,” *Opt. Commun.* 203, 213–223.

Cuevas F.J., Mendoza F., Servin M. and Sossa J. H. (2006). “Window fringe pattern demodulation by multi-functional fitting using a genetic algorithm,” *Opt. Commun.* 261(2), 231–239.

Da- Silva Maciel and. Albertazzi A. G. (2014). “Swarm-based algorithm for phase unwrapping,” *Appl. Optics* 53(24), 5502–5509.

Jiménez J., et al. (2012). “Demodulation of interferograms based on particle swarm optimization,” *Polibits*, 45(1), 83-92.

Kemao Q. and Soon S. H. (2007). “Sequential demodulation of a single fringe pattern guided by local frequencies,” *Opt. Lett.* 32(2), 127–129.

Kennedy J., and Eberhart R. (1995). “Particle Swarm Optimization” *R. Proc IEEE Int Conf Neural Netw*, 4, 1942–1948.

Kreis T., (1986). “Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier transform method”, *J. Opt. Soc. Am. A.* 3(6), 847–855.

Mancilla E., et al. (2007). “Demodulation of Interferograms of Closed Fringes by Zernike Polynomials using a technique of Soft Computing,” *Eng. Lett.* 15, 99–104.

Muñoz, J., et al. (2016). Digital Processing, Techniques for Fringe Analysis, pp11.

Muñoz.J., et al. (2011). “Phase recovery from a single interferogram with closed fringes by phase unwrapping,” *Appl. Opt.* 50, 22–27.

Peder Johnson. (1998). Dual-beam Digital Speckle Photography, *Strain Field Measurements in Aerospace Applications.*

Quan C., Niu H. and Tay C.J. (2010). “An improved windowed Fourier transform for fringe demodulation”, *Opt. Laser Technol.* 42(1), 126–131

Rastogi P.K. (2001). Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques.

Sjoedahi Mikael, Synnergren Per, Johnson Peder. (1997). Applications of digital speckle photography in experimental mechanics, PIE 3098, *Optical Inspection and Micromasurement I.*

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

Toledo L. and Cuevas F. J. (2008). “Optical Metrology by Fringe Processing on Independent Windows Using a Genetic Algorithm,” *Exp. Mech.* 48(4), 559–569.

Trusiak M., Styk A. and Patorski K. (2018) “Hilbert–Huang transform based advanced Bessel fringe generation and demodulation for full-field vibration studies of specular reflection micro-objects”, *Opt. Lasers Eng.* 110, 100–112.