

Automatic experimental optimization of capture of interference patterns of a Double-Aperture Common-path interferometer to reduce negative effects of mechanical vibrations.

Optimización experimental automática de captura de patrones de interferencia de un interferómetro de trayectoria común de doble apertura para reducir efectos negativos de las vibraciones mecánicas.

A. Barcelata-Pinzon¹, P. Prieto-Cortés¹, R. I. Álvarez-Tamayo², R. Limón-Bonilla¹, G. Saldaña-González¹, M. Espinosa-Martínez¹, U. Rivera-Ortega¹, J.A. Moreno-Guzmán¹, C. Rangel-Romero¹

1. Universidad Tecnológica de Puebla

2. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

(*) E-mail: antonio.barcelata@utpuebla.edu.mx

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received: 23/03/2023

Accepted: 18/07/2023

DOI: 10.7149/OPA.56.3.51137

ABSTRACT:

This paper reports an experimental system implemented to a Double Aperture Common Path Interferometer (DACPI) which automatically captures interferograms at the moment in which the system presents a minimum of mechanical vibrations. This is determined by $m \times n$ matrix analysis of a region of interest of the interferogram in question seeking to capture more stable images which will have an impact on an improvement for their subsequent analysis when the system does not have an optimum mechanical isolation. Experimental and comparative results with a non-optimized system are presented.

Key words: mechanical vibrations, optimization, automatic system, interferometer

RESUMEN:

Este trabajo reporta un sistema experimental implementado en un Interferómetro de trayectoria común de doble apertura (DACPI por sus siglas en inglés), el cual captura automáticamente interferogramas en el momento que el sistema presenta un mínimo de vibraciones mecánicas. Esto se lleva a cabo mediante un análisis de una matriz $m \times n$ de una región de interés del interferograma en cuestión buscando capturar imágenes más estables que tengan un impacto en la mejora del análisis subsecuente aun cuando el sistema no tenga aislamiento mecánico. Se muestran resultados experimentales y la comparativa contra un sistema no optimizado.

Palabras clave: vibraciones mecánicas, optimización, sistema automático, interferómetro

References

- [1] R. Sabella, P. Iovanna, G. Bottari, F. Cavaliere, "Optical transport for Industry 4.0," *J OptCommunNetw*12, 264–276 (2020)
- [2] J. D. Briers, "Laser speckle contrast imaging for measuring blood flow," *Opt Appl* 37,139-152 (2007)



- [3] A. Sijan, "Development of military lasers for optical countermeasures in the mid-IR", Proc. SPIE 7483 in Technologies for Optical Countermeasures VI 7483, (2009)
- [4] S. L. Jacques, "Erratum: Optical properties of biological tissues: A review," Phys Med Biol 58, 5007–5008, (2013)
- [5] P. J. De Groot, L. L. Deck, "Numerical simulations of vibration in phase-shifting interferometry," Appl Opt 35, 2172-2178 (1996)
- [6] O. D. Cortázar, V. Feliu, "A simple and robust fiber optics system for measuring the lead-acid battery state-of-charge", J Power Sources 159, 728–733 (2006)
- [7] A. Guesalaga, B. Neichel, M. Boccas, C. D'Orgeville, F. Rigaut, D. Guzman, J. Anguita "Improving stability, robustness, and performance of laser systems," Proc. SPIE 8447 in Adaptive Optics Systems III 8447 (2012)
- [8] F. Lilley, M. J. Lalor, D. R. Burton, "Robust fringe analysis system for human body shape measurement," Opt Eng 39, 187-195 (2000)
- [9] V. Arrizón, D. Sánchez-de-la-Llave, "Common-path interferometry with one-dimensional periodic filters," Opt Lett 29, 141-143 (2004)
- [10] C. Meneses-Fabian, G. Rodriguez-Zurita, V. Arrizón, "Optical tomography of transparent objects with phase-shifting interferometry and stepwise-shifted Ronchi ruling," J Opt Soc Am A 23, 298-305 (2006)
- [11] C. Meneses-Fabian, G. Rodriguez-Zurita, J. F. Vazquez-Castillo, C. Robledo-Sanchez, V. Arrizón, "Common-path phase-shifting interferometer with binary grating," Opt Commun 264, 13–17 (2006)
- [12] A. Barcelata-Pinzon, C. Meneses-Fabian, L. Moreno-Alvarez, R. Pastrana-Sanchez, "Common-path speckle interferometer for phase objects studies," Opt Commun 304, 153–157 (2013)
- [13] K. Qian, F. Shu, X. Wu, "Determination of the best phase step of the Carré algorithm in phase shifting interferometry," Meas Sci Technol 11, 1220–1223 (2000)
- [14] K. Creath, "Phase-shifting speckle interferometry," Appl Opt 24, 3053-3058 (1985)
- [15] R. Takahashi, K. Arai, T. Collaboration, "Improvement of the vibration isolation system for TAMA300," Quantum Grav 19, 1599-1604 (2002)
- [16] B. K. A. Ngoi, K. Venkatakrishnan, N. R. Sivakumar, "Phase-shifting interferometry immune to vibration," Appl Opt, 40, 3211-3214 (2001)
- [17] C. L. Koliopoulos, "Simultaneous phase shift interferometer," Proc. SPIE 1531 in Advanced Optical Manufacturing and Testing II 1531, (1992)
- [18] L. Pettazzi, E. Fedrigo, R. Muradore, P. Haguenaer, L. Pallanca, "Improving the accuracy of interferometric measurements through adaptive vibration cancellation," 2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA), 95-100 (2015)
- [19] X. F. Xu, L. Z. Cai, Y. R. Wang, X. F. Meng, W. J. Sun, H. Zhang, X. C. Cheng, G. Y. Dong, X. X. Shen "Simple direct extraction of unknown phase shift and wavefront reconstruction in generalized phase-shifting interferometry: algorithm and experiments," Opt Lett 33, 776-778 (2008)
- [20] J. C. Gomez-Conde, C. Meneses-Fabian, "Real-time measurements of phase steps out-of-range $(0, 2\pi)$ by a dynamic self-calibrating generalized phase-shifting algorithm," Opt Lasers Eng 140, 1-8 (2021)
- [21] J. C. Gomez-Conde, C. Meneses-Fabian, "Real-time phase step measurement using the volume enclosed by a surface algorithm in self-calibrating phase-shifting interferometry," Meas 153, 1-9 (2020)
- [22] C. Meneses-Fabian, "Self-calibrating generalized phase-shifting interferometry of three phase-steps based on geometric concept of volume enclosed by a surface," J Opt 18, 1-7 (2016)
- [23] A. Barcelata-Pinzon, R. I. Alvarez-Tamayo, P. Prieto-Cortés, "A Real-Time Automated System for Dual-Aperture Common-Path Interferometer Phase-Shifting," Appl Sci 11, 1–10 (2021)
- [24] L. J. S. Murray R. Spiegel, Estadística, 4ta edición. México, McGraw Hill (2009)

1. Introducción

Recientemente, los sistemas ópticos han tenido un gran desarrollo en áreas importantes tales como la industria [1], medicina [2], milicia [3], biología [4], entre otras. Esto es debido en gran parte a que dichos sistemas presentan ventajas comparativas sobre otros como lo son una alta precisión, la no necesidad de tener contacto físico con la variable a medir y la inmediatez para obtener resultados que permitan estudiar la o las variables en cuestión. La robustez y estabilidad de los sistemas ópticos son condiciones fundamentales para garantizar las ventajas antes mencionadas pero que requieren, en la gran mayoría de los casos, de una calibración exhaustiva, de componentes caros y de condiciones óptimas de aislamiento a fin de evitar vibraciones mecánicas [5] que afecten cuantitativamente las mediciones a realizar [6–8]. Por otro lado, un Interferómetro de Trayectoria Común de Doble Apertura (DACPI por sus siglas en inglés) es un sistema telecéntrico $4f$ [9] que consiste de dos ventanas o aperturas en el plano objeto, una rejilla de difracción en el plano de frecuencias y un sistema de detección en el plano imagen [10], [11]. El DACPI, en el caso particular para objetos transparentes [12], es capaz de hallar la diferencia de fase existente entre ambas aperturas. La recuperación de la misma se lleva a cabo mediante algoritmos de corrimiento de fase [13], [14] aplicados a los interferogramas resultantes de la traslación transversal de la rejilla de difracción al eje óptico [9]. La robustez de este tipo de interferómetro es una de sus características principales debido a que el haz de luz procedente de la fuente viaja por la misma ruta y los mismos elementos, sin embargo, sigue siendo susceptible de presentar resultados imprecisos en presencia de vibraciones mecánicas considerables. Actualmente, existen sistemas ópticos que minimizan al máximo el efecto de las vibraciones mecánicas haciendo uso de sistemas neumáticos y/o hidráulicos acoplados a mesas de trabajo. Estos sistemas son muy costosos y requieren de un mantenimiento y cuidados especiales para su adecuado funcionamiento [15]. Existen trabajos previos en los cuales se ha logrado disminuir los efectos negativos de las vibraciones sobre la precisión de la extracción de fase caracterizando la frecuencia de vibración utilizando la transformada de Fourier [16], implementando un mayor número de cámaras [17] o usando una cancelación adaptativa de vibraciones [18] entre otros. Este trabajo propone una optimización computacional la cual compara los promedios numéricos de una región de un interferograma capturado en tiempo real, con sus valores posteriores a lo largo de un tiempo predeterminado. Posteriormente se extraerá la desviación estándar a dichos valores, esta desviación estándar se comparará con un umbral numérico predefinido por el usuario y dependerá si supera o no el umbral para que se accione un mecanismo automático que permitirá que la rejilla de difracción se traslade transversalmente al eje óptico y se realice la captura de un nuevo patrón de interferencia. La traslación de la rejilla introduce cambios de fase al interferograma. Esto permite al algoritmo encargado de hallar la diferencia de fase, desenvolverse con mayor precisión los patrones a analizar. El programa realiza la secuencia en automático capturando los interferogramas únicamente cuando el valor proporcionado por la imagen presente la menor cantidad de movimiento. Se muestran resultados experimentales por medio de un algoritmo computacional.

2. Metodología

En un sistema óptico las imágenes se capturan en formato de imagen utilizando comúnmente una CCD para ser procesadas posteriormente de forma computacional. Para este caso particular, el DACPI requiere patrones de interferencia consecutivos descritos por las expresiones $I_0(x, y, t)$, $I_1(x, y, t)$, ..., $I_n(x, y, t)$. Cada patrón tiene la forma

$$I(x, y, t) = A(x, y, t) + B(x, y, t) \cos[\Delta\phi(x, y, t) + \alpha_j(x, y, t)]; \quad (1)$$

donde $\Delta\phi(x, y, t) = \phi_t(x, y, t) - \phi_r(x, y, t)$ y representa la diferencia de fase entre un objeto de prueba $\phi_t(x, y, t)$ y un objeto de referencia $\phi_r(x, y, t)$, $A(x, y, t)$ y $B(x, y, t)$ son las luces de fondo y modulación respectivamente, $\alpha_j(x, y, t)$ es la fase agregada y j es un subíndice entero que nos permitirá distinguir entre un valor y su consecutivo asociado a la fase. Es preciso mencionar en este punto que la dependencia espacial de los patrones de interferencia ha sido explicada de manera recurrente en varios artículos [10–14] mientras que el término temporal indica que el patrón a capturar en este análisis, tiene una naturaleza dinámica y cambia constantemente en el dominio del tiempo. Posterior a las capturas se aplicará algún método de corrimiento de fase como el PSI, GPSI, SGPSI entre otros [13], [14], [19–22] para hallar la diferencia de fase entre la prueba y la referencia. En la Fig. 1 se muestra la configuración básica de un

DACPI con la mejora en optimización publicada previamente por nuestro grupo de trabajo [23] en donde la idea principal es capturar de manera automática, continua y consecutiva dichos patrones de interferencia. La fiabilidad de la mayoría de los algoritmos parte del hecho de que las imágenes estén bien contrastadas y nítidas y esto dependerá en gran medida de que la captura de la imagen se realice cuando ésta se encuentre fija o con el mínimo de movimiento lo cual se vuelve complicado en un ambiente en el cual las vibraciones mecánicas son inevitables y no se cuenta con un sistema de aislamiento óptico adecuado. Por otro lado, una imagen digital en escala de grises de 8 bits puede describirse como una matriz bidimensional de $m \times n$ en la cual, cada elemento es un número entero comprendido entre 0 y 255 que representa un tono en una escala de grises el concepto se hace extensivo para una secuencia de video si partimos de que ésta se compone de imágenes consecutivas desfasadas temporalmente.

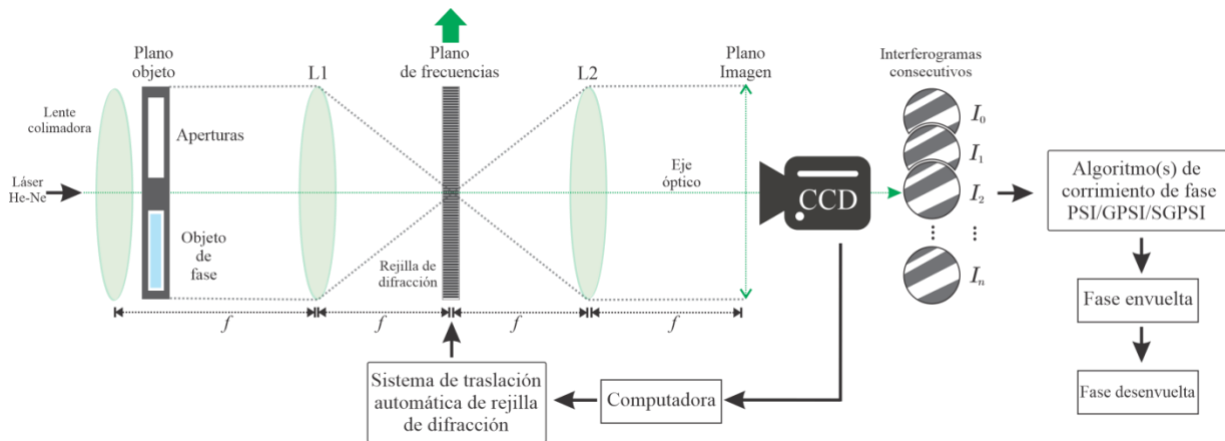


Fig.1. Configuración básica para un DACPI donde L_1 y L_2 son lentes positivas y f es la distancia focal de las mismas.

El promedio numérico temporal de los valores de la matriz que definen una imagen digital en movimiento en escala de grises que captura un patrón con nula o mínima perturbación mantendrá su valor a lo largo del tiempo a menos que exista un cambio en algún parámetro de la imagen como una alteración en el brillo, contraste, nitidez y/o desplazamiento el cual será típicamente una consecuencia de vibraciones mecánicas que impidan que la cámara enfoque el objetivo modificando su valor en un instante particular. Por otro lado, se sabe que la desviación estándar calcula el grado de dispersión de un conjunto de datos respecto del promedio de dichos valores [24], esta medida se calculará de manera continua a lo largo de un intervalo de tiempo para conocer la variación de los valores capturados con el sistema. Utilizando estas herramientas estadísticas se implementó un sistema que calcula el promedio numérico de la matriz proveniente de la imagen que recibe la CCD en un intervalo de tiempo definido. Los promedios calculados en cada intervalo se guardan en una matriz de una sola columna y de renglones predefinidos por el usuario. Posteriormente se obtiene la desviación estándar de dichos promedios. Se sabe también que la desviación estándar de un conjunto de datos iguales entre si es cero, y esta irá aumentando conforme los datos vayan siendo desiguales y se observarán valores cada vez más alejados de cero si existe una variación mayúscula entre dichos datos. Esta cualidad nos permite identificar si el promedio de la imagen observada se mantiene o cambia y permite establecer que, bajo condiciones controladas de iluminación, la imagen presenta alteración por movimiento si la desviación estándar de un número definido de promedios temporales supera un umbral predeterminado previamente establecido. En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques del sistema implementado.

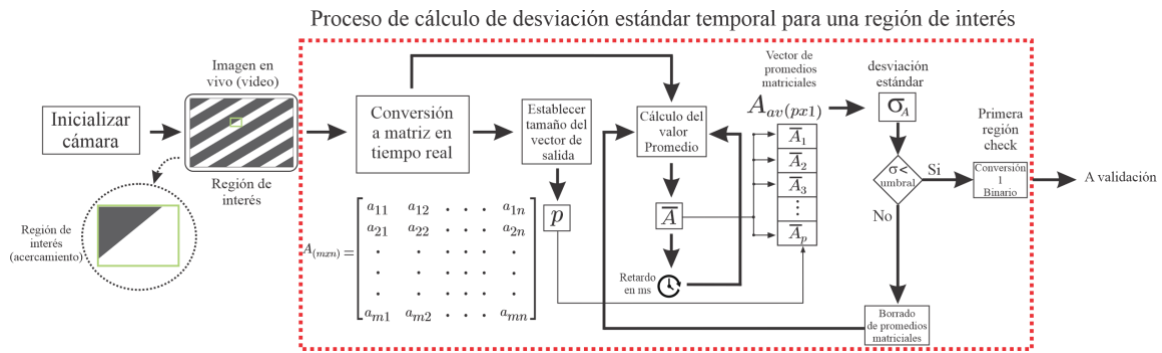


Fig.2. Diagrama a bloques del sistema implementado, donde p determina el tamaño del vector de promedios, \bar{A} es el valor promedio de la matriz $m \times n$ y σ_A es la desviación estándar de los promedios

La cámara se inicializa para posteriormente elegir una región de interés (ROI por sus siglas en inglés) rectangular, esta ROI se fijará preferente pero no necesariamente en alguna sección en la cual exista una frontera entre una franja clara y una franja oscura con la finalidad de disminuir la probabilidad de duplicidades en el cálculo temporal del promedio que pudiera presentar un patrón que incluyera un mayor número de franjas, y conseguir de esta manera, que el sistema sea capaz de detectar con mayor precisión el cambio de promedio. Posteriormente, el video es convertido en tiempo real en una matriz A en escala de grises de tamaño $m \times n$, este tamaño estará determinado por las dimensiones de la ROI elegida. Se calculará entonces el promedio \bar{A} de la matriz en cuestión, espaciado por un tiempo de retraso y se guardará secuencialmente cada valor en una nueva matriz A_{av} de dimensiones $p \times 1$ en donde p es el valor predefinido y editable del número de filas de la matriz hasta llegar a p filas. Una vez completado el vector de promedios matriciales, se calculará la desviación estándar σ_A . Con la finalidad de aumentar la precisión del sistema, se consideraron tres regiones de interés en distintos sectores del patrón de interferencia (R_A, R_B, R_C), en las cuales será aplicado en paralelo el mismo procedimiento descrito anteriormente y se obtendrán tres promedios (A_{av}, B_{av}, C_{av}) y tres desviaciones estándar temporales ($\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C$) para cada (ROI). Los valores temporales de las desviaciones estándar serán comparados con un mismo umbral de referencia mediante una compuerta lógica (AND) y en el instante cuyos valores se encuentren por debajo de éste, se accionará el mecanismo de captura de imagen y traslado de la rejilla repitiendo el proceso cuando ese hecho no ocurra. Una vez que la imagen se capture y la rejilla haya sido desplazada, el sistema tendrá un retardo predeterminado para reinicializar el vector de promedios y comenzar el ciclo nuevamente. El diagrama a bloques del cálculo de las regiones se muestra en la Fig. 3.

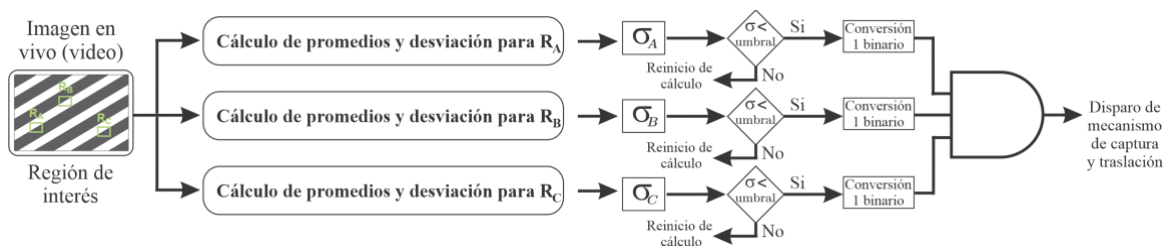


Fig. 3.- Diagrama a bloques del cálculo de promedios y desviación estándar para tres regiones del interferograma para el disparo del mecanismo de captura y traslación.

La interfaz computacional de usuario se elaboró en LabView como se muestra en la Fig. 4.

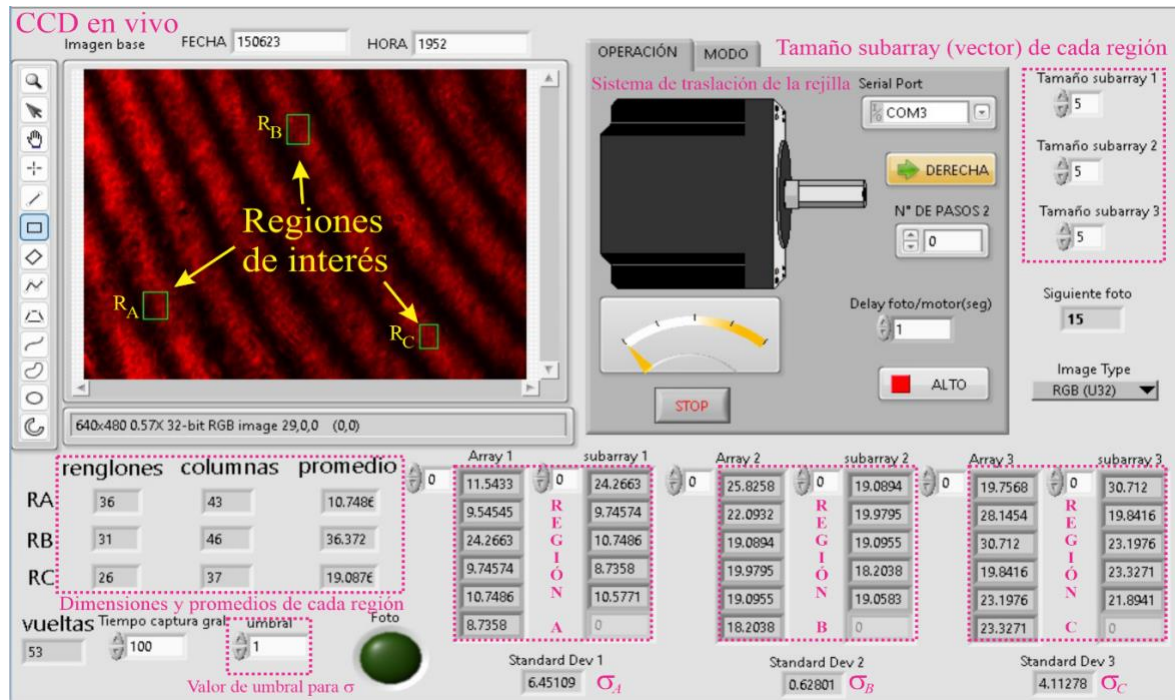


Fig. 4.- Interfaz de usuario en LabView de la implementación computacional.

En la Fig. 4 se puede ver que hay tres regiones de interés en distintas zonas del interferograma de distintas dimensiones R_A , R_B y R_C . Se muestran también los promedios temporales de cada región, así como también el cálculo de la desviación estándar de cada una (σ_A , σ_B , σ_C).

3. Resultados experimentales

Para el caso particular del DACPI, el mecanismo captura la imagen hasta que el valor de σ se encuentre por debajo del umbral previamente mencionado, acto seguido se envía una señal digital que activa un sistema de engranes 5 a 1 movido por un motor a pasos (Nema 17) adaptado a un tornillo micrométrico (Mitutoyo Head Series 149)[23] que a su vez trasladará la rejilla de difracción de 500 líneas/mm $u_p = 2\mu\text{m}$ una distancia lineal de $u_d = 3.175\mu\text{m}$ consiguiendo una corrimiento teórico[12], [23] de fase $\alpha_T = 2\pi u_d/u_p$ equivalente a 1.9949 radianes por cada traslación, esto generará los interferogramas necesarios $I_0(x, y, t), I_1(x, y, t) \dots I_n(x, y, t)$ para aplicar un algoritmo de autocalibración SGPSI [20-21] y obtener las fases envuelta y desenvuelta de $\Delta\phi(x, y, t)$ posteriormente. Es importante mencionar que mientras existan vibraciones mecánicas que impidan que el valor de σ disminuya hasta cierto nivel, el sistema no realizará ninguna captura y no desplazará la rejilla, asegurando con esto, que la toma y traslación se realicen únicamente cuando el sistema detecte que las vibraciones se encuentran en un nivel mínimo. Se tomaron 45 capturas utilizando un sistema no optimizado, es decir, se realizaba la captura y se trasladaba la rejilla con un tiempo de espera determinado sin considerar la mejora implementada. Posteriormente se realizaron 45 capturas con la optimización computacional. La comparativa puede verse en la Fig. 5.

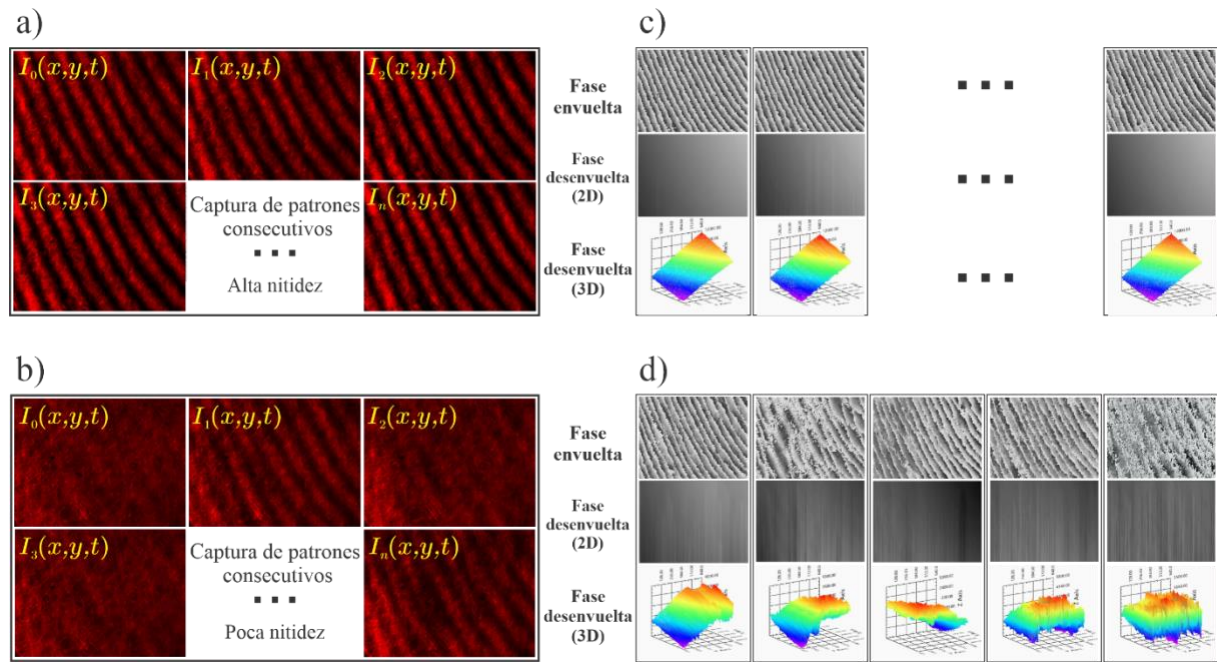


Fig. 5. a) Patrones consecutivos nítidos con sistema optimizado, b) Patrones consecutivos borrosos y con poca nitidez con sistema sin optimización, c) fases envuelta, desenvuelta en 2D y 3D para sistema optimizado (se muestran pocas debido a que la mayoría de ellas presentan la misma definición), d) fases envuelta, desenvuelta en 2D y 3D para sistema no optimizado.

La Fig. 5 muestra distintos interferogramas capturados con los sistemas no optimizado y optimizado. Las capturas se realizaron bajo condiciones generales adversas en cuanto a vibraciones mecánicas se refiere y se observa como los patrones capturados por el sistema sin optimización presentan poco contraste y definición debido a la exposición a las vibraciones mecánicas, así como también una distorsión en la obtención de las fases envuelta y desenvuelta, mientras que los interferogramas obtenidos utilizando el método propuesto mejoran en cuanto a esos parámetros y por tanto únicamente se muestran tres análisis en la Fig. 5c). Cuantitativamente, el promedio de fase experimental α introducida por el desplazamiento de la rejilla con el sistema optimizado para las 45 tomas es de $\overline{\alpha_{op}} = 1.9932$ radianes mientras que para el sistema no optimizado se obtuvo $\overline{\alpha_{nop}} = 2.4887$ radianes lo cual representa un BIAS de 0.0017 y de 0.4938 respectivamente con respecto al valor teórico α_T , mostrando de esta manera una mejora de dos órdenes de magnitud con respecto al error entre un sistema y otro. La desviación estándar correspondiente a la dispersión entre los valores de fase obtenidos con el desplazamiento de la rejilla nos muestra que mientras el sistema no optimizado presenta un valor de $\sigma_{nop} = 1.9994$, el sistema propuesto tiene una de $\sigma_{op} = 0.87704$ lo cual es un poco menos del doble del valor presentado por un sistema sin optimizar en un ambiente de vibraciones significativas.

5. Conclusiones

Se implementó un sistema computacional que buscaba reducir el efecto negativo de las vibraciones mecánicas sobre el proceso de captura digital de interferogramas obtenidos a partir de la traslación transversal de una rejilla de difracción en un DACPI mediante un sistema automatizado. Los resultados muestran que el sistema, en presencia de vibraciones mecánicas es capaz de evaluar los promedios de una a tres zonas determinadas de un interferograma en escala de grises, así como su desviación estándar para determinar el momento óptimo para indicarle al sistema realizar la captura del patrón de interferencia y desplazar la rejilla para comenzar el ciclo nuevamente. Se pudo calcular la diferencia de fase entre una referencia y un objeto de prueba en donde se observa que las capturas realizadas con el sistema optimizado presentan poca o nula distorsión mientras que para el sistema sin optimización los mapas de fase presentan irregularidades en distintos niveles. Con respecto a la fase añadida $\alpha(x, y, t)$, el sistema no optimizado obtuvo una desviación estándar superior al sistema optimizado y el promedio de fase presenta una menor diferencia con el valor teórico cuando se utiliza el sistema implementado. Es menester mencionar que las capturas se realizaron en un ambiente en donde no hubo aislamiento mecánico por lo que estos resultados podrían ser perfectibles bajo condiciones de pocas vibraciones o de máximo aislamiento.

Acknowledgements

Los autores agradecen a la División de Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Puebla y a la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo, así como para su publicación.

A Estancias Posdoctorales por México CONACyT.

Partes de este trabajo fueron presentadas en el congreso RIAO/OPTILASE 2023 en Automatic experimental optimization of capture of interference patterns of a Double-Aperture Common-path interferometer to reduce negative effects of mechanical vibrations, 2023.