

Quantitative Determination of Periodic Size Variations in an Object via Phase Singularity Tracking in CGH

Determinación del cambio periódico de tamaño de un objeto a partir del seguimiento de singularidades de fase en CGH

Astrid Lorena Villamizar-Amado^{a,b}; Alejandro Velez-Zea,^c Myrian Tebaldi^{a,b}

^a Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata-CIC-UNLP), La Plata, Argentina

^b Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

^c Grupo de Óptica y Fotónica, Instituto de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia UdeA, Medellín, Colombia

Corresponding author: astridv@ciop.unlp.edu.ar

Submitted: 18-06, 2025. Accepted: 30-06, 2025.

Resumen

En este trabajo se propone, determinar los cambios de tamaño de un objeto a partir del seguimiento de vórtices ópticos contenidos en la información de pseudofase de videos holográficos generados por computadora (CGH), sin necesidad de reconstruir los hologramas. Para validar la propuesta, se generan videos holográficos de un objeto 3D con variación periódica de tamaño, utilizando un método basado en capas y dos aproximaciones para emular las superficies difusas por medio de máscaras aleatorias de fase. A continuación, se determinan los homólogos y se rastrean los vórtices en la información de pseudofase obtenida mediante el empleo de la transformada de Laguerre–Gauss. Esta alternativa permite controlar la cantidad de vórtices ópticos a rastrear. Se emplean las propiedades estructurales de los núcleos de dichos vórtices para la identificación, el seguimiento y la posterior determinación la variación periódica del tamaño del objeto a lo largo de los fotogramas del video holográfico.

Palabras clave: Transformada de Laguerre–Gauss; Vórtices ópticos; Videos holográficos generados por computadora.

Abstract

In this work we demonstrate that it is possible to determine the size changes of an object from the tracking of optical vortices contained in the pseudophase information of computer generated holographic (CGH) videos, without the need for holographic reconstruction. To validate the proposal, holographic videos of a 3D object with periodic changes in size are generated using a layer-based method with random phase. Two random phase approaches are tested to simulate the surface of a diffuse object during hologram generation. Next, homologous vortices are determined in the pseudophase information obtained by using the Laguerre-Gauss transform. The use of this transform allows precise control of the number of optical vortices to be tracked. The structural properties of the vortex cores are used to identified and to track the singularities and to determine the periodic variation of the object size along the frames of the holographic video.

Keywords: Laguerre-Gauss transform; Optical vortices; Computer generated holographic.

1. Introducción

Un holograma es un registro de la intensidad del patrón de interferencia entre la luz procedente de un objeto o escena y un haz de referencia. Este contiene información tanto de la fase como de la amplitud del campo del objeto, lo que permite su reconstrucción completa [1]. Hoy en día, la holografía es un elemento esencial en aplicaciones tecnológicas o industriales que van desde metrología [2], microscopía [3], pantallas y proyecciones holográficas [4,5], interferometría [6], la ontogenética [7,8] entre otras [9,10].

El registro experimental de hologramas usualmente requiere montajes interferómetros. La información holográfica puede registrarse mediante cámaras digitales, lo que permite almacenar, manipular y reconstruir computacionalmente dichos hologramas. Sin embargo, los tamaños relativamente grandes de los pixeles de las cámaras limitan el tamaño de la escena a ser almacenada.

Una alternativa flexible para obtener información holográfica es mediante el uso de hologramas generados por computadora (CGH, por sus siglas en inglés). En este caso, los hologramas se calculan numéricamente, lo que elimina las

restricciones de resolución o tamaño, y evita la necesidad de configuraciones experimentales complejas y costosas. Existen numerosos algoritmos de CGH, cuya elección depende del tipo de holograma que se desea generar y del esquema de visualización utilizado.

Los métodos más comunes para generar CGH de solo fase se derivan del algoritmo de Gerchberg-Saxton [11], el cual permite calcular la fase que conecta un plano de entrada con su plano de transformación de Fourier. Esta técnica, sin embargo, está limitada a la generación de hologramas a partir de objetos bidimensionales. Para extender su aplicación a objetos tridimensionales, puede recurrirse a un enfoque basado en capas: cortar un objeto 3D en capas transversales [12], generar el holograma de solo fase (HSF) para cada capa, y luego sumar todos los HSFs, se obtiene un único HSF representativo del objeto tridimensional completo.

En trabajos previos, se ha propuesto un método basado en vórtices ópticos para evaluar el desplazamiento de objetos 3D a partir de hologramas generados por computadora, sin necesidad de realizar un proceso de reconstrucción. Los vórtices ópticos, o singularidades de fase en campos ópticos, han sido ampliamente estudiados desde el trabajo original de Nye y Berry [13]. Estas singularidades se localizan en puntos donde la intensidad es nula y la fase del campo no está definida. Sin embargo, en la vecindad de estos puntos, la fase presenta propiedades muy interesantes que constituyen la clave de la metrología basada en singularidades de fase. [14-17]. En particular, para poder identificar y seguir inequívocamente un vórtice óptico, las propiedades estructurales de su núcleo deben permanecer inalteradas o con cambios pequeños durante la observación.

En nuestra propuesta, las singularidades presentes en la información de pseudofase obtenida a partir de los hologramas generados por computadora son marcadores característicos asociados al objeto. Las propiedades de la estructura del núcleo permiten identificar los vórtices entre los distintos fotogramas de un video holográfico. En este trabajo demostraremos que el seguimiento de los vórtices permite determinar las variaciones periódicas en el tamaño del objeto a partir de la información de fase contenida en el holograma, sin necesidad de efectuar su reconstrucción.

2. Generación del holograma y seguimiento vórtices

2.1 Generación de hologramas

A continuación, detallaremos el método de generación de hologramas utilizado para las pruebas de seguimiento empleadas en este trabajo. En primer lugar, se obtiene una imagen de intensidad y una imagen de profundidad de la escena 3D cuyo holograma se desea generar. Para ello, puede utilizarse un software convencional de modelado y renderizado 3D.

La imagen de profundidad es una imagen en escala de grises, en la que cada valor representa la distancia entre ese píxel y el plano de la cámara o del holograma.

En la Figura 1 se muestran la imagen de intensidad y la imagen de profundidad correspondientes a nuestra escena 3D de entrada. Utilizando la imagen de profundidad, es posible segmentar la imagen de intensidad en varias capas, separadas axialmente por una cierta distancia dz , como se ilustra en la Fig. 2.

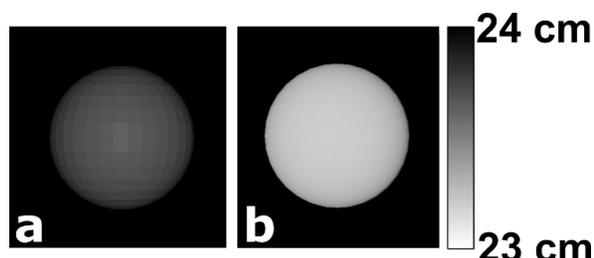


Figura 1. a) Imagen de intensidad de la escena 3D b) imagen de profundidad de la misma Escena.

Posteriormente, se generan hologramas utilizando dos enfoques. En el primero, se multiplica cada capa por una máscara de fase aleatoria y se retropropaga cada capa al plano del holograma utilizando un propagador de Fresnel. Luego, se suman todas las capas y se descarta la amplitud del resultado. La función de fase obtenida constituye el holograma del objeto 3D completo. A este método de generación de hologramas se lo denomina **MAF** (Máscara Aleatoria de Fase). El segundo enfoque consiste en asignar una fase aleatoria fija a cada punto del objeto 3D; este método se denomina **FAF** (Fase Aleatoria Fija). La diferencia entre ambos enfoques radica en que, en el primero, la fase aleatoria varía entre capas y fotogramas de video, mientras que, en el segundo la fase aleatoria es una característica inherente a la superficie del objeto y, por lo tanto, permanece invariante incluso cuando el objeto está en movimiento.

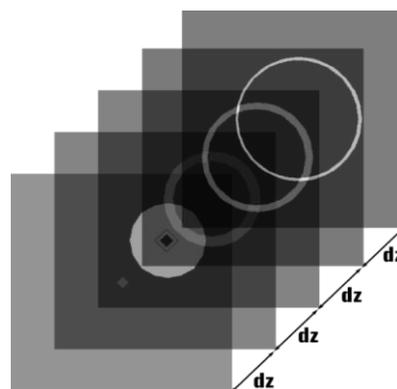


Figura 2. Corte en profundidad de la imagen en intensidad utilizando la información de profundidad.

Para nuestra propuesta, se generaron hologramas con una resolución de 1920×1920 píxeles. La ventana del objeto tiene un tamaño de 1500×1500 píxeles. La distancia entre cada

plano del objeto es de 0,2 mm, y la distancia entre el objeto y el plano del holograma es de 23 cm. El objeto se divide en 50 capas de profundidad. El tamaño del píxel es de 8 μm y la longitud de onda de iluminación es de 532 nm.

En la Figura 3 se muestra el holograma generado utilizando los métodos de generación detallados anteriormente, junto con sus respectivas reconstrucciones. Visualmente, la calidad de reconstrucción es muy similar en ambos casos. La diferencia entre los dos enfoques se evidencia al observar el comportamiento del ruido speckle: en el método MAF, este ruido varía entre fotogramas debido al cambio de la fase aleatoria; en cambio, en los hologramas generados mediante el método FAF, el ruido speckle en la esfera permanece constante a lo largo de todos los fotogramas del video holográfico.

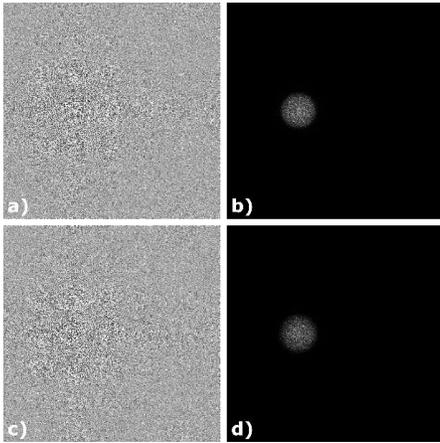


Figura 3. a) Holograma generado mediante método RPM, b) objeto reconstruido a partir del holograma a), c) holograma generado mediante método FRP, y d) objeto reconstruido a partir de c).

2.2 Propiedades estructurales y determinación de vórtices homólogos

Los vórtices o singularidades de fase pueden ser caracterizados de forma única gracias a las propiedades estructurales de su núcleo, lo que permite utilizarlos como una "huella dactilar" del campo óptico. Esta identificación unívoca posibilita rastrear el movimiento o desplazamiento de cada vórtice en sucesivos fotogramas.

Como mencionamos, las singularidades de fase distribuidas aleatoriamente en la información de fase de los hologramas están correlacionadas con el objeto. Así, el desplazamiento o modificaciones en el tamaño del objeto puede estimarse a partir del movimiento de los vórtices dentro del área de rastreo.

En ref. [18], se mostró que es posible rastrear objetos 3D a partir de los hologramas sin necesidad de realizar la reconstrucción completa del mismo. La propuesta consistió

en implementar un método de seguimiento o rastreo de las singularidades de fase o pseudofase, presentes en la información de fase o pseudo-fase del holograma. Cabe aclarar que, si bien la propuesta podría implementarse directamente sobre la información de fase del holograma, con el objetivo de aumentar el número de singularidades de fase a rastrear se propuso la generación de información de pseudofase empleando la transformada de Laguerre Gauss. A partir de los datos complejos holográficos $g(x, y)$ y su transformada de Fourier $\mathfrak{F}\{g(x, y)\}$, es posible obtener una nueva señal compleja analítica $\tilde{G}(x, y)$ dada por:

$$\tilde{G}(x, y) = \iint LG(f_x, f_y) \mathfrak{F}\{g(x, y)\} e^{i2\pi(xf_x + yf_y)} df_x df_y$$

donde el filtro Laguerre-Gauss LG expresado en el dominio de la frecuencia se expresa como:

$$LG(f_x, f_y) = (f_x + if_y) e^{-\frac{(f_x^2 + f_y^2)}{\omega^2}}$$

donde f_x y f_y son las coordenadas en el dominio de la frecuencia, y ω es un parámetro del filtro que controla el ancho de banda de la frecuencia espacial. Es importante destacar que esta nueva representación compleja, generada mediante la transformada de Laguerre-Gauss, no introduce información adicional; sin embargo, permite controlar la densidad de las singularidades de fase mediante la elección adecuada del ancho de banda del filtro Laguerre-Gauss ω . Por lo tanto, la información de pseudo-fase así generada permite aumentar el número de vórtices disponibles para el análisis del video holográfico. El incremento en el número de singularidades de fase disponibles conlleva un aumento en la cantidad de vórtices homólogos, lo cual proporciona un medio más robusto y eficaz para determinar los cambios del objeto 3D, como por ejemplo tamaño o posición del objeto 3D. Denominamos esta alternativa como rastreo de vórtices en pseudo-fase.

Como mencionamos las singularidades se localizan en puntos donde la intensidad es nula, por lo tanto, la parte real e imaginaria del campo complejo $\tilde{G}(x, y)$ generado aplicando la transformada de Laguerre Gauss deben ser cero en el mismo punto. En general, en las vecindades de un vórtice, el campo complejo puede expresarse como:

$$\Re[\tilde{G}(x, y)] = a_r x + b_r y + c_r$$

$$\Im[\tilde{G}(x, y)] = a_i x + b_i y + c_i$$

donde los coeficientes a_k, b_k, c_k ($k = r, i$) se obtienen por el ajuste por el método de mínimos cuadrados de un plano a partir de los valores complejos cercanos a cada singularidad de fase. A partir de las partes real e imaginarias interpoladas de la representación de la señal compleja $\tilde{G}(x, y)$, podemos obtener un perfil de la pseudofase alrededor del vórtice

óptico. Los parámetros geométricos y físicos que caracterizan la singularidad son la excentricidad ε , el ángulo del cruce por cero entre la parte real e imaginaria θ_{RI} , la carga topológica q y la vorticidad Ω . En términos de los coeficientes de ajuste las propiedades estructurales del núcleo de las singularidades están definidas como:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{(a_r^2 + a_i^2 + b_r^2 + b_i^2) - \sqrt{(a_r^2 + a_i^2 - b_r^2 - b_i^2)^2 + 4(a_r b_r + a_i b_i)^2}}{(a_r^2 + a_i^2 + b_r^2 + b_i^2) + \sqrt{(a_r^2 + a_i^2 - b_r^2 - b_i^2)^2 + 4(a_r b_r + a_i b_i)^2}}}$$

$$\theta_{RI} = \begin{cases} \left| \tan^{-1} \left(\frac{a_r b_i - a_i b_r}{a_r a_i - b_r b_i} \right) \right| & \text{si } |\theta_{RI}| < \frac{\pi}{2}, \\ \pi - \left| \tan^{-1} \left(\frac{a_r b_i - a_i b_r}{a_r a_i - b_r b_i} \right) \right| & \text{si } |\theta_{RI}| > \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

$$q = \text{sgn}(\vec{\Omega} \cdot \vec{e}_z) = \text{sgn}(a_r b_i - a_i b_r)$$

$$\Omega = |\vec{\Omega}| = |a_r b_i - a_i b_r|$$

Es así como las propiedades de la estructura del núcleo permiten una correcta identificación de las singularidades homologas en cada fotograma del video holográfico.

Los cambios del objeto en el holograma pueden estimarse a partir del cambio de coordenadas de la singularidad de fase $(\Delta x, \Delta y)$ a lo largo del vídeo. Obsérvese que las singularidades de fase con grandes diferencias en sus estructuras centrales no lograron encontrar su homólogo y deben ser eliminadas [19].

Si bien ningún par de singularidad de fase antes y después del cambio tiene exactamente los mismos valores de las propiedades estructurales, es posible establecer algunas condiciones para la correcta identificación de las singularidades de fase en los distintos estados del objeto. Las condiciones detalladas se expresan como:

$$|\Delta| = |(\Omega - \Omega')/(\Omega + \Omega')| < \varepsilon_1$$

$$q = q'$$

$$|\Delta e| = |e - e'| < \varepsilon_2$$

$$\Delta \theta_{RI} = |\theta_{RI} - \theta'_{RI}| < \varepsilon_3$$

donde los parámetros primados están relacionados con las singularidades o vórtices después del cambio. Tras escoger los valores umbrales de ε_1 , ε_2 y ε_3 , las singularidades de fase con grandes diferencias en sus propiedades estructurales pueden eliminarse. Una vez identificados los vórtices homólogos en la pseudo-fase asociada a los distintos

fotogramas del video holográfico, el desplazamiento de los vórtices en el plano, relacionado con los cambios del objeto en el holograma, puede estimarse a partir del cambio de coordenadas $(\Delta x, \Delta y)$ correspondiente a cada singularidad de pseudo-fase.

En la sección siguiente, se evalúa la validez de esta estrategia de seguimiento.

3. Seguimiento o rastreo de vórtices en CGH

Para seguir el cambio del objeto a partir de sus videos holográficos generados por los métodos MAF y FAF, se caracterizan los vórtices a partir de las propiedades estructurales lo que permite determinar los homólogos y realizar el seguimiento a lo largo del tiempo. Inicialmente, se estudia la posibilidad de determinar la variación temporal del radio de una esfera; posteriormente, se analiza un objeto carente de simetría, como el corazón. Para cada método de generación, se analizan las 30 escenas que conforman el video holográfico correspondiente, en el cual el radio en el video renderizado presenta una variación de 195 píxeles, entre un valor mínimo de 128 y un máximo de 323 píxeles. En la Figura 4 se muestran tres fotogramas del objeto 3D del video renderizado, donde se observa el cambio de tamaño de la esfera a lo largo del tiempo.

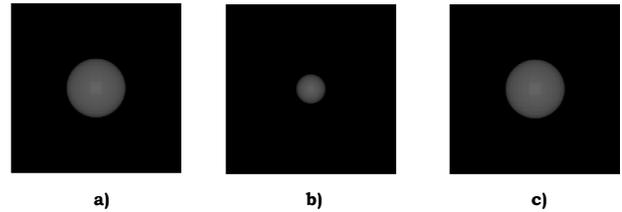


Figura 4. Fotogramas del objeto donde se observa el cambio periódico de su tamaño, a) $t=1$, b) $t=10$ y c) $t=20$

Para realizar el seguimiento, en primer lugar, se seleccionan tres zonas de sondeo marcadas en color verde, azul y rojo en la información fase de cada fotograma del CGH como se muestra en la Figura 5. Las dimensiones de estas zonas son de 50x50 píxeles, estas mismas regiones se seleccionan en cada una de las escenas que componen el video holográfico.

Para realizar el rastreo en cada zona de sondeo, mediante la transformada Laguerre Gauss del holograma original se genera una pseudofase. A partir de la selección de un ancho de banda adecuado ω en el filtro de Laguerre Gauss es posible aumentar el número de singularidades a ser rastreadas. Una vez encontrados los vórtices en cada fotograma, se identifican los pares homólogos mediante las

propiedades del núcleo. En nuestro análisis se consideran únicamente vórtices con carga topológica positiva. Posteriormente, se determina la posición de cada vórtice a lo largo de la pseudofase generada a partir de los fotogramas y se determina el desplazamiento de cada vórtice.

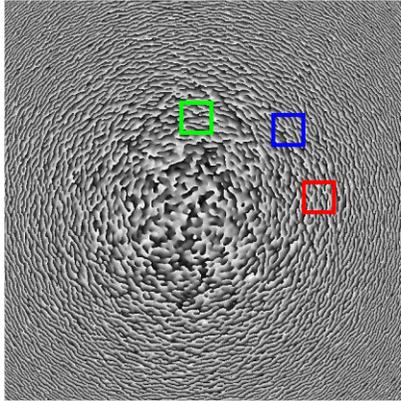


Figura 5. Fotograma del video holográfico donde se detallan las zonas de sondeo

Los rombos verdes de la Figura 6 indican las singularidades en las cuales no pudo realizarse el seguimiento a lo largo de todos los fotogramas. En los casos mencionados no fue posible encontrar vórtices homólogos que cumplan con los valores umbrales ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 , definidos para las propiedades estructurales del núcleo de las singularidades. En nuestra propuesta solo se rastrearán aquellos vórtices que están presentes durante todos los fotogramas del video holográfico (puntos rojos Figura 6).

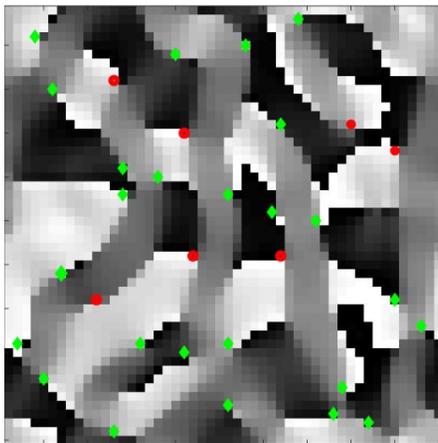


Figura 6. Pseudofase de la zona de sondeo indicada con color verde en la Figura 5 correspondiente al primer fotograma del video holográfico MAF. Los puntos rojos indican las singularidades que pudieron rastrearse en todos los fotogramas mientras los rombos verdes indican las singularidades en las que falla la asignación de los homólogos.

En la Figura 7 se muestra los resultados del seguimiento de los vórtices ópticos a partir de la información de

pseudofase en los CGH de las esferas generado por el método MAF. Se selecciono un ancho de filtro LG de $\omega= 0.11$ y se analizaron las tres regiones indicadas en la Figura 5. En el caso de la primera zona señalada en color verde (Figura 6) fue posible rastrear o realizar el seguimiento de siete singularidades de pseudofase y a partir de ellas se determinó la variación del radio para el video holográfico generado bajo el método MAF. En la Tabla 1, se resumen los valores obtenidos de la variación en el radio para cada región de sondeo seleccionada y el promedio de ellas. Para el método MAF el cambio o variación promedio del radio medido a partir del seguimiento de las singularidades, es de 3.752 pixeles.

Se repite la prueba para el video generado por el método FAF. Los resultados se observan en la Figura 8, donde se muestra las variaciones promedio del radio para las mismas zonas indicadas en la Figura 5.

En la Tabla 2, se muestran los valores de la variación del radio determinado mediante el rastreo de vórtices ópticos para cada región de sondeo seleccionada y el promedio de ellas. Para el método FAF el cambio o variación promedio del radio medido con las singularidades, es de 4.158 pixeles.

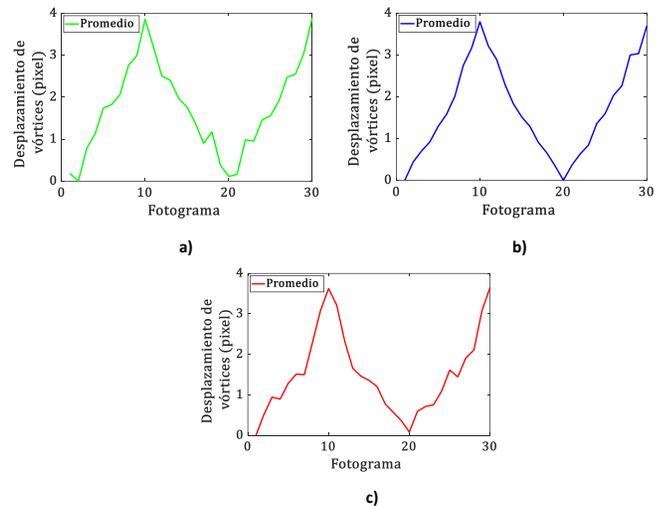


Figure 7. Variación promedio en el tiempo del radio de una esfera mediante rastreo con vórtices ópticos para hologramas MAF, medido en a) Zona 1, b) Zona 2 y c) Zona 3.

Tabla 1. Variación del radio de la esfera a partir del rastreo de los vórtices para los videos holográficos generados por el método MAF en cada una de las tres regiones de sondeo indicadas en la Figura 5 y su promedio.

Region de sondeo	Desplazamiento de vórtices (pixel)
Zona 1 (Verde)	3.8715
Zona 2 (Azul)	3.745
Zona 3 (Rojo)	3.6395
Promedio	3.752

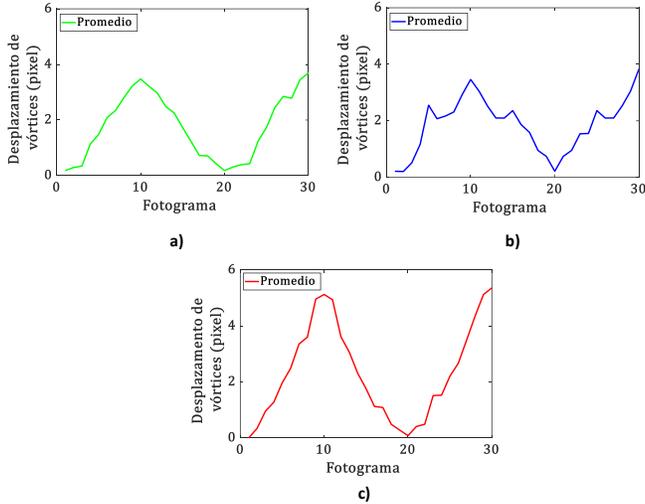


Figure 8. Variación promedio en el tiempo del radio de una esfera mediante rastreo con vórtices ópticos para hologramas FAF, medido en a) Zona 1, b) Zona 2 y c) Zona 3.

Tabla 2. Variación del radio de la esfera a partir del rastreo de los vórtices para los videos holográficos generados por el método FAF en cada una de las tres regiones de sondeo indicadas en la Figura 5 y su promedio.

Region de sondeo	Desplazamiento de vórtices (pixel)
Zona 1 (Verde)	3.586
Zona 2 (Azul)	3.6485
Zona 3 (Rojo)	5.2395
Promedio	4.158

Al observar los resultados obtenidos con los dos métodos se evidencia la variación periódica del radio durante el video holográfico. Además, se puede observar que el valor obtenido para la variación del radio por el método FAF es mayor que por el método MAF, esto debido a las diferencias en cómo se generan los hologramas. En el primer método (MAF) la máscara aleatoria va cambiando entre hologramas sucesivos, aumentando la decorrelación temporal. En el método FAF, esto no ocurre, ya que la máscara aleatoria es fija. Como resultado de esta menor decorrelación temporal, el método FAF permite rastrear un mayor número de singularidades en el tiempo.

A continuación, se analiza un objeto sin simetría, un corazón. En este caso, el corazón es generado empleando un software de modelado y renderizado 3D. Luego, a partir de este video se generan videos holográficos utilizando cada uno de los métodos de generación mencionados anteriormente MAF y FAF.

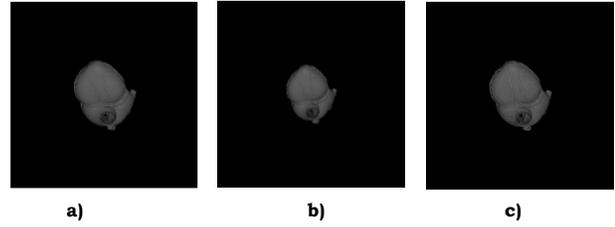


Figure 9. Fotogramas del video renderizado donde un corazón modelado en 3D cambia periódicamente su tamaño, a) t=1, b) t=10 y c) t=20.

En el caso del corazón, el cambio de tamaño es diferente en cada dirección y en particular en cada eje coordenado. En el eje horizontal es de 56 pixeles mientras que en el eje vertical es de 66 pixeles: El video holográfico al igual que el caso de la esfera está compuesto por 30 fotogramas o escenas.

En la Figura 9 se puede observar tres fotogramas que permiten ver el cambio del tamaño del objeto a lo largo del video.

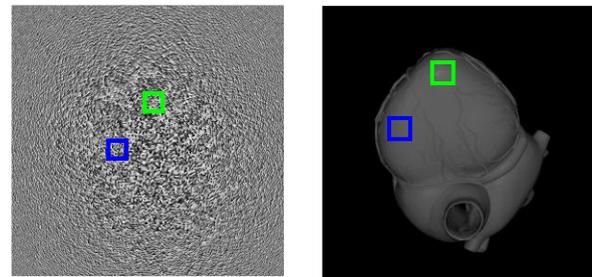


Figure 10. Fotogramas del video holográfico y del video renderizado donde un corazón cambia periódicamente su tamaño. Se toman dos zonas de interés para realizar el rastreo implementando las singularidades de fase, zona 1 en azul y zona 2 verde.

En este caso se consideraron dos regiones de rastreo para realizar el seguimiento, una en cada eje coordenado, como se puede ver en la Figura 10.

Las escenas del video holográfico generado por el método MAF se analizan empleando un filtro *LG* con un valor de $\omega = 0.11$, se localizan los vórtices homólogos y se los rastrea a lo largo del tiempo (ver Figura 11). Se calcula el desplazamiento de los vórtices homólogos para cada una de las regiones a lo largo del tiempo.

En la Tabla 3, se muestran los valores medidos en el rastreo de singularidades de fase del desplazamiento para cada región de sondeo. Para el método MAF el desplazamiento en la zona 1 (eje horizontal en color azul en la Figura 10) es de 2.191 pixeles, mientras para la zona 2 (eje vertical en color verde en la Figura 10) el desplazamiento medido es de 2.459 pixeles.

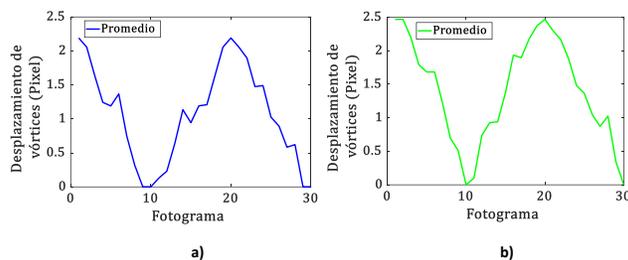


Figure 11. Variación promedio en el tiempo de las dimensiones de un corazón mediante rastreo con vórtices ópticos para hologramas MAF, medido en a) zona 1 y b) zona 2.

Tabla 3. Variación de las dimensiones de un corazón a partir del rastreo de los vórtices para los videos holográficos generados por el método MAF en cada una de las tres regiones de sondeo indicadas en la Figura 10 y su promedio.

Region de sondeo	Desplazamiento de vórtices (pixel)
Zona 1 (Azul)	2.191
Zona 2 (Verde)	2.459

De la misma manera, se realiza el rastreo de los vórtices para las dos regiones de sondeo en el video generado con el método FAF. Los resultados para cada zona de sondeo se muestran en la Figura 12.

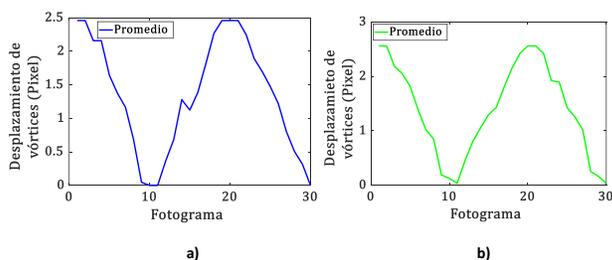


Figure 12. Variación promedio en el tiempo de las dimensiones de un corazón mediante rastreo con vórtices ópticos para hologramas FAF, medido en a) zona 1 y b) zona 2.

En la Tabla 4, se muestran los valores medidos al rastrear los vórtices ópticos en cada región de sondeo en el CGH obtenido mediante el método FAF. En este caso, el desplazamiento en la zona 1 (eje horizontal en color azul) es de 2.451 píxeles, mientras para la zona 2 (eje vertical en color verde) el desplazamiento medido es de 2.751 píxeles.

Tabla 4. Variación de las dimensiones de un corazón a partir del rastreo de los vórtices para los videos holográficos generados por el método FAF en cada una de las tres regiones de sondeo indicadas en la Figura 10 y su promedio.

Region de sondeo	Desplazamiento de vórtices (pixel)
Zona 1 (Azul)	2.451
Zona 2 (Verde)	2.751

Si comparamos los dos métodos y además las dos zonas seleccionadas que en el video presentaban una diferencia en

la variación de sus dimensiones (56 píxeles en horizontal y 66 píxeles en vertical), notamos que al realizar el rastreo con los dos métodos es evidente que en eje vertical se presenta un cambio mayor al compararlo con el eje horizontal. Asimismo, como se mostró al rastrear la variación en el radio para la esfera, el método FAF presenta mayor precisión al compararlo con el método MAF.

4. Conclusiones

Hemos propuesto y validado una técnica para estimar la variación del tamaño de un objeto 3D a partir de la información contenida en un video holográfico, sin necesidad de realizar ningún cálculo de reconstrucción. Nuestra propuesta se basa en la metrología óptica de vórtices, aplicada a los datos de pseudo-fase obtenidos mediante una transformada de Laguerre-Gauss.

El rastreo de vórtices en pseudo-fase se evaluó utilizando videos holográficos generados a partir de un objeto tridimensional. Estos videos fueron sintetizados empleando dos métodos distintos basados en capas con fase aleatoria. En primer lugar, se identificaron los vórtices presentes en cada fotograma del video holográfico, analizando las propiedades estructurales de sus núcleos. A partir de los vórtices homólogos entre fotogramas, se calculó su desplazamiento, lo que permitió estimar la variación en el radio del objeto mediante la relación entre el movimiento de los vórtices y el cambio de tamaño del objeto.

Adicionalmente, se determinó que los videos holográficos generados mediante el método FAF son más adecuados para el seguimiento de vórtices, debido a la mayor estabilidad en la distribución de la pseudo-fase entre fotogramas.

Referencias

- [1] Gabor D 1948 A new microscopic principle Nature 161 777–8
- [2] Dong J, Jiang C and Jia S 2016 Digital holographic metrology based on multi-angle interferometry Opt. Lett. 41 4301–4
- [3] Zheng J, Gao P and Shao X 2017 Opposite-view digital holographic microscopy with autofocusing capability Sci. Rep. 7 1–9
- [4] Chang C, Cui W and Gao L 2019 Holographic multiplane near-eye display based on amplitude-only wavefront modulation Opt. Express 27 30960–70
- [5] Chlipala M and Kozacki T 2019 Color LED DMD holographic display with high resolution across large depth Opt. Lett. 44 4255–8
- [6] Petrov V, Pogoda A, Sementin V, Sevryugin A, Shalymov E, Venediktov D and Venediktov V 2022 Advances in Digital Holographic Interferometry PubMed Central 8(7): 196
- [7] Carrillo-Reid L, Han S, Yang W, Akrouh A and Yuste R 2019 Controlling visually guided behavior by holographic recalling of cortical ensembles Cell 178 447–57
- [8] Carmi I, De Battista M, Maddalena L, Carroll E C, Kienzler M A and Berlin S 2019 Holographic two-photon activation for synthetic optogenetics Nat. Protocols 14 864–900
- [9] Yokota M, Takeda K and Kusunoki E 2017 Digital holographic inspection systems for industrial applications OPJ-OSA Joint Symposia on Nanophotonics and Digital Photonics paper 30pOD6.

-
- [10] Haleem A, Javaid M, Singh R P, Suman R and Rab S 2022 Holography and its applications for industry 4.0: An overview Internet of Things and Cyber-Physical Systems 2, 42-48
 - [11] Gerchberg R. W., Saxton, W. O. (1972) A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures *Optik* 35, 237-246.
 - [12] Zhao Y, Cao L, Zhang H, Kong D, Jin G (2015) Accurate calculation of computer-generated holograms using angular-spectrum layer-oriented method. *Opt. Express*, 23, 25440-25449.
 - [13] Nye J F and Berry M V 1974 Dislocations in wave trains *Proc. R. Soc A* 336 165-90
 - [14] Wang W, Yokozeki T, Ishijima R, Matsuda A, Hanson S G and Takeda M 2006 Optical vortex metrology for nanometric speckle displacement measurement *Opt. Express* 14 120-7
 - [15] Wang W, Qiao Y, Ishijima R, Yokozeki T, Honda D, Matsuda A, Hanson S G and Takeda M 2008 Constellation of phase singularities in a speckle like pattern for optical vortex metrology applied to biological kinematic analysis *Opt. Express* 10 13908-17
 - [16] Angel-Toro Sierra-Sosa D, Tebaldi M and Bolognini N 2013 In- plane displacement measurement in vortex metrology by synthetic network correlation fringes *J. Opt. Soc. Am. A* 30 462-9
 - [17] Kumar P and Nishchal NK 2021 Formation of singular light fields using phase calibrated spatial light modulator *Opt. Lasers Eng.* 146 106720
 - [18] Villamizar-Amado A L, Velez-Zea A and Tebaldi M 2022 Vortex technique to track 3D object displacement in CGH *Journal of Optics* 24(7)
 - [19] Angel-Toro L, Sierra-Sosa D, Tebaldi M and Bolognini N 2012 Speckle decorrelation influence on measurements quality in vortex metrology *Opt. Commun.* 285 4312-6