

# Análisis comparativo de métodos de desdoblamiento de fase en perfilometría por desplazamiento de fase

Luis Arturo Alvarado Escoto, Jesús Carlos Pedraza Ortega,  
Juan Manuel Ramos Arreguin, Efren Gorrostieta Hurtado,  
Marco Antonio Aceves Fernandez

Universidad Autónoma de Querétaro,  
Facultad de Ingenierías,  
México

{luis.a.alvarado.e, efrenGORROSTIETA,  
marco.aceves}@gmail.com, {caryoko, jsistdig}@yahoo.com.mx

**Resumen.** La perfilometría por desplazamiento de fase se encuentra entre las técnicas más populares de medición óptica debido a sus numerosas ventajas como alta resolución y bajo costo computacional. En perfilometría por desplazamiento de fase una serie de patrones de franjas cuadradas o senoidales son capturados mientras la fase cambia. La combinación de estos patrones desplazados se utiliza para la extracción de fase, la cual contiene la información de altura del objeto. Dado que la fase extraída se encuentra envuelta, los algoritmos de desdoblamiento de fase se utilizan para remover las discontinuidades en fase. El presente trabajo se enfoca en un análisis sobre el desempeño de algunos de los algoritmos de desdoblamiento de fase más comunes utilizados en perfilometría por desplazamiento de fase. Dada la importancia que tiene el desdoblamiento de la fase se realizó un análisis en desempeño y tiempos de ejecución utilizando tres tipos de objetos: virtuales, reales simétricos y reales con superficies complejas. Como resultados, se encontró que el algoritmo Graph Cuts y el algoritmo Constantini presentan mejores y más rápidos resultados para el desdoblamiento de fase.

**Palabras clave:** Desdoblamiento de fase, proyección de franjas, desplazamiento de fase, perfilometría, reconstrucción 3D.

## A Comparative Analysis of Phase Unwrapping Methods in Phase Shifting Profilometry

**Abstract.** Phase-shifting profilometry is among the most popular techniques in optical measurement due to its numerous advantages like high resolution and low computational cost. In phase-shifting profilometry a series of interferometers are captured while the phase changes. Phase

extraction is used to obtain the height of the object under the interferometers. Given that the extracted phase is wrapped, phase unwrapping algorithms are used to remove the discontinuities caused by phase extraction. This paper focuses on a comparative analysis of some of the most common phase unwrapping algorithms used in PSP. Given the importance of phase unwrapping, an analysis on performance and runtime was made using three types of objects: virtual, real with symmetric dimensions and real objects with complex surfaces. Moreover, we found out that Graph Cuts and Constantini present fast and better performances for phase unwrapping.

**Keywords:** Phase unwrapping, fringe projection, phase shifting, profilometry, 3D reconstruction.

## 1. Introducción

El mundo real se visualiza en tres dimensiones. Las cámaras convencionales y los detectores de imágenes únicamente son capaces de obtener la información de intensidad de una escena en dos dimensiones, pero son incapaces de obtener la información de forma y profundidad de un objeto. Al igual que los humanos, que pueden apreciar el mundo tridimensional a través de los ojos, los sistemas de visión inteligentes deben ser capaces de obtener la información tridimensional de una escena a través de imágenes de entrada. Para enfrentar este reto, las tecnologías de medición 3D han desarrollado un sin número de técnicas que permiten obtener de manera cuantitativa la información geométrica en tres dimensiones a partir de imágenes de entrada bidimensionales.

Dentro de las técnicas de extracción de información tridimensional, las técnicas de luz estructurada se encuentran entre las más comunes debido a su alta resolución y bajo costo computacional. Consideradas técnicas de no-contacto, ya que no requieren de un contacto con la superficie bajo estudio, las técnicas de luz estructuradas se basan en dos principios, luz codificada y proyectada, así como en técnicas de patrones de franjas [1]. Los métodos de proyección de franjas consisten en crear un patrón definido de franjas a partir de señales senoidales o periódicas. Estos patrones son proyectados utilizando un proyector digital a la superficie del objeto bajo estudio, creando distorsiones en los patrones debido a la superficie del objeto, las distorsiones son entonces capturadas con una cámara desde un ángulo distinto. Las capturas permiten obtener la información tridimensional del objeto a través de la obtención de la fase [1, 3, 4].

Los métodos por desplazamiento de fase son utilizados ampliamente debido a sus gran cantidad de ventajas, tales como, bajo costo, alta resolución, menor sensibilidad a variaciones en los reflejos de la superficie y menor sensibilidad a la luz ambiente [6]. Los métodos por desplazamiento de fase utilizan al menos tres imágenes de entrada. Cada patrón de franjas proyectado se encuentra desfasado por un valor de  $2\pi/N$ , donde  $N$  representa el número de patrones a utilizar, los métodos más comunes son el *Three-step* y *Four-step*.

En principio, el tener un mayor número de muestras disminuye el ruido en la intensidad y da pie a tener mayor precisión en las mediciones obtenidas. En perfilometría por desplazamiento de fase, una serie de patrones de franjas son capturados mientras la fase de referencia del patrón de franjas cambia. La fase se encuentra entonces codificada en las variaciones en el patrón de intensidad de las franjas, y un cálculo simple punto a punto recupera la fase. La intensidad en cada punto puede variar como una función sinusoidal de la fase desplazada que se introdujo, con un desplazamiento temporal dado por la fase desconocida del frente de onda. El presente trabajo se enfoca en las técnicas de desplazamiento de fase, en particular en el uso del método *three-step* [1–3].

Para obtener la altura de un objeto es necesario extraer la información inmersa dentro de la fase. Para esto, dos pasos básicos son necesarios: la obtención de la fase y el desdoblamiento de la misma. La fase envuelta puede expresarse de manera matemática de la siguiente forma [6]:

$$x_w(n) = W[x(n)], \quad (1)$$

donde  $x(n)$  es la fase continua original,  $W[\ ]$  es el operador de fase envuelta y  $x_w(n)$  es la fase envuelta.

El desdoblamiento de fase se realiza para eliminar las discontinuidades generadas por la extracción de fase, la cual debido al principio del valor de la función arco tangente, se encuentra limitada al intervalo  $[-\pi \ \pi]$ . El desdoblamiento de fase se conoce como el proceso de determinar el múltiplo entero desconocido de  $2\pi$  que debe ser agregado a cada píxel del mapa de fase envuelto para hacerlo continuo [3, 5]. En teoría, el desdoblamiento de la fase pareciera ser un cálculo trivial para mapas de fase obtenidos de buenos interferómetros. Sin embargo, la presencia de ruido, baja luminosidad, pocas o malas muestras, y las condiciones del objeto bajo estudio, hacen que el desdoblamiento de fase sea un proceso complejo. Debido a esto, existen un sin número de técnicas que permiten obtener distintos resultados en desdoblamiento de fase [6, 7]. En este trabajo, se presenta una comparativa en desempeño de algunos de los métodos de desdoblamiento más comunes.

## 2. Principios del método

Los patrones de franjas utilizados en el método *three-step* pueden ser descritos de la siguiente manera:

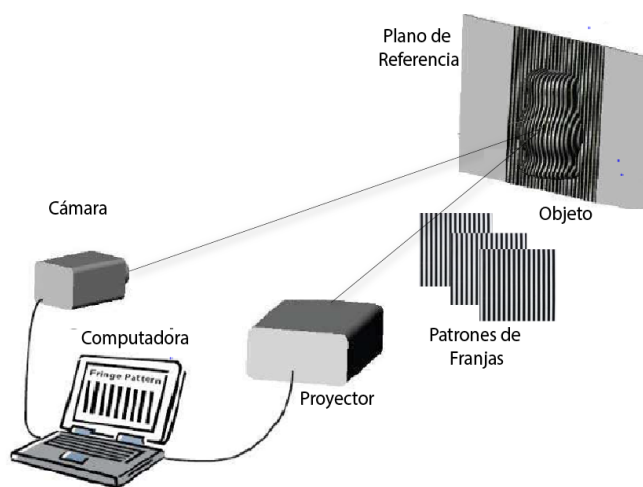
$$I_1 = I'(x, y) + I''(x, y)\text{Cos}(\phi(x, y)), \quad (2)$$

$$I_2 = I'(x, y) + I''(x, y)\text{Cos}(\phi(x, y) + \alpha), \quad (3)$$

$$I_3 = I'(x, y) + I''(x, y)\text{Cos}(\phi(x, y) + 2\alpha), \quad (4)$$

donde  $I'(x, y)$  es la intensidad promedio,  $I''(x, y)$  es la modulación de la intensidad,  $\phi(x, y)$  es la fase a resolver y  $\alpha$  es el desplazamiento dado en la fase [1, 2, 4]. Para este caso se utilizó un valor de  $\alpha = 2\pi/3$ .

Tal y como se muestra en la Fig. 1, los tres patrones de franjas son generados y proyectados sobre la superficie del objeto. La metodología propuesta requiere obtener capturas de los patrones de franjas proyectados sin el objeto, esto permitirá tener una referencia sobre la fase verdadera sin la distorsión generada por el objeto. Generalmente, se utiliza una distancia entre el proyector y la cámara de 18 a 30 cm esto asegura que el ángulo de captura se encuentre alrededor de los  $10^\circ$ .



**Fig. 1.** Sistema utilizado para la proyección y captura de las imágenes.

La fase a resolver esta dada entonces por la ecuación 5 [1], donde  $\delta_i = \frac{i2\pi}{N}$  y  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ , mientras que  $N$  representa el número de imágenes de entrada, en este caso  $N = 3$ . Una forma simplificada de para el método *three-step* puede ser descrita con la ecuación 6 [2]. De esta ecuación el mapa de fase puede ser obtenido aplicando el mismo proceso de manera puntual, píxel a píxel. Debido al rango de valores que se obtienen al aplicar la función arco tangente, algunos valores del mapa de fase en encuentran envueltos. Por lo tanto, el siguiente paso debe consistir en aplicar algunos métodos de desdoblamiento de fase:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{-\sum I_i \text{Sen}(\delta_i)}{\sum I_i \text{Cos}(\delta_i)} \right), \quad (5)$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left( \sqrt{3} \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right). \quad (6)$$

El proceso completo de perfilometría por desplazamiento de fase se encuentra descrito en la Fig. 2. Además de las capturas de las franjas proyectadas sobre los objetos, se realiza una captura extra de las imágenes de referencia, es decir,

los patrones de franjas. Este plano de referencia pasa por el mismo proceso que las imágenes capturadas conteniendo al objeto bajo estudio. Los tres patrones de franjas descritos por las ecuaciones (2), (3) y (4) son proyectadas sobre el objeto y capturadas al igual que las imágenes de referencia proyectadas. Antes de obtener el mapa de fase de las capturas, se realizó un ajuste de las imágenes a dimensiones similares y se corrigió la perspectiva de estas.

Posteriormente, se realizó una corrección gamma de las imágenes y una ecualización de histograma si es necesario. El mapa de fase del objeto y del plano de referencia son obtenidos utilizando (6). La Fig. 3 muestra un ejemplo de las imágenes obtenidas para el método *three-step* y los mapas de fase obtenidas tanto para el objeto como para el plano de referencia. La fase absoluta envuelta puede ser obtenida obteniendo la diferencia en fase entre el mapa de fase del objeto y el mapa de fase del plano de referencia.

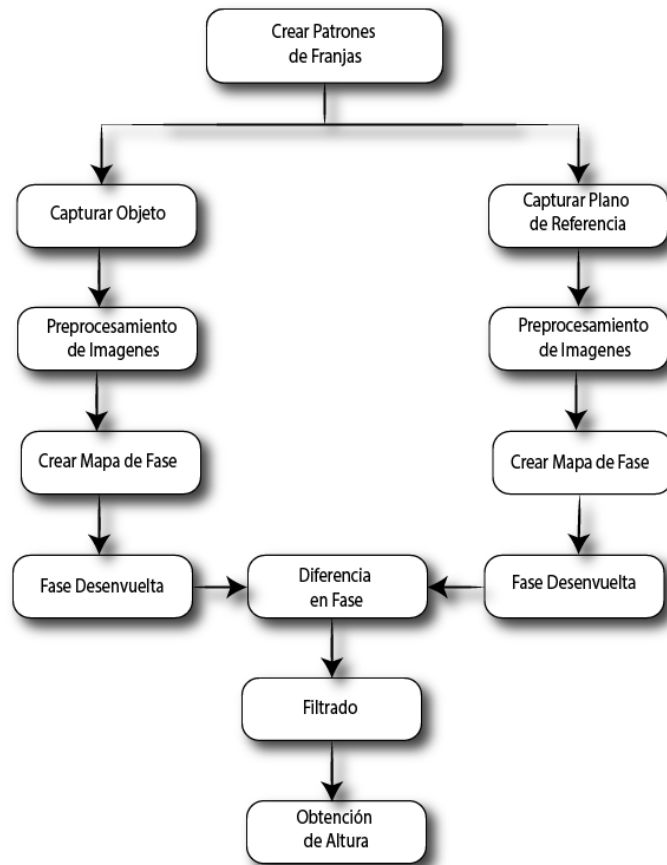
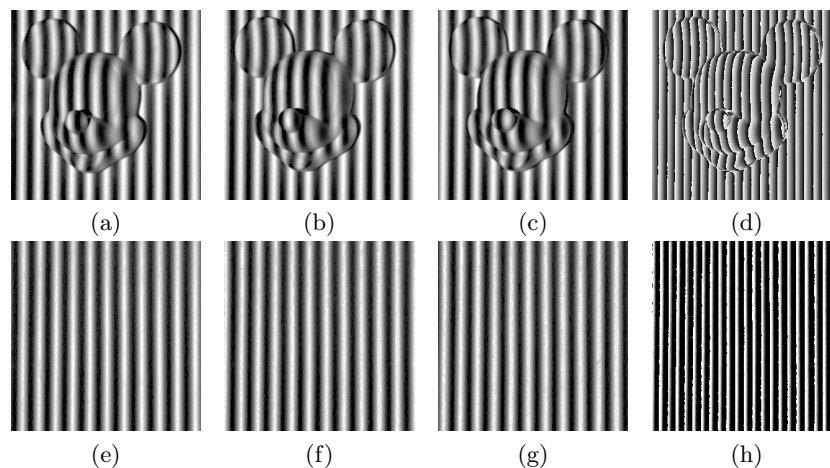


Fig. 2. Metodología utilizada para el proceso de reconstrucción.



**Fig. 3.** (a) Paso 1:  $0^\circ$ . (b) Paso 2:  $120^\circ$ . (c) Paso 3:  $240^\circ$ . (d) Mapa de referencia del objeto. (e) Referencia Paso 1:  $0^\circ$ . (f) Referencia paso 2:  $120^\circ$ . (g) Referencia paso 3:  $240^\circ$ . (h) Mapa de fase del plano de referencia.

Algún método de desdoblamiento de fase es aplicado a ambos mapas de fase y finalmente el objeto tridimensional es obtenido a través de la diferencia en fase de ambas fases desenvueltas. De manera opcional, algún filtrado puede ser agregado para eliminar el ruido en la imagen resultante, o para reducir las altas frecuencias generadas por el desdoblamiento de fase. En este trabajo se aplicó únicamente un filtro mediano para reducir estas altas frecuencias.

Finalmente, se obtiene la altura del objeto real multiplicando un factor por la altura obtenida en la reconstrucción. Este factor es obtenido realizando una calibración del sistema con un objeto de dimensión conocida.

Para evaluar el desempeño de los algoritmos de fase se utilizaron más de 30 objetos reales y 10 imágenes de profundidad u objetos virtuales en escala de grises. En el caso de los objetos virtuales no se realizó la captura de imágenes, debido a que las franjas son agregadas de manera simulada al objeto ideal, ningún pre-procesamiento se lleva a cabo debido a que es considerado un proceso ideal. Los objetos virtuales permiten evaluar el desempeño de los algoritmos en condiciones ideales, donde las capturas no presentan problemas de luminosidad o resolución. De igual manera, el error es más sencillo de obtener debido a que se tiene una representación digital del objeto real, lo cual no es el caso de los objetos reales. El desempeño en objetos reales puede ser más complicado de evaluar debido a que las condiciones de luminosidad o captura pueden afectar el desempeño de estas técnicas. Se utilizaron objetos tanto de dimensión conocida, como objetos con una superficie más compleja. Para los objetos de dimensión conocida se evaluó el desempeño de los algoritmos comparando la altura real del objeto con la obtenida del objeto reconstruido en tres dimensiones.

## 2.1. Métodos de desdoblamiento de fase

El desdoblamiento de fase es un proceso puntual que consiste en localizar las discontinuidades de magnitud cercanas a  $2\pi$  en cada píxel y agregar o restar este valor de acuerdo al signo de cambio en la fase. Existe una gran cantidad de algoritmos de desdoblamiento de fase, cada uno basado en un principio distinto.

Los algoritmos utilizados en el presente trabajo son mencionados a continuación:

- **Itoh 2D** Este algoritmo corrige los ángulos de fase en un vector agregando múltiplos de  $\pm 2\pi$  cuando existen saltos absolutos en elementos consecutivos. El algoritmo realiza un desdoblamiento en cada fila, una por una, seguida por un desdoblamiento por columnas, una por una [8].
- **Graph cuts** Desdoblamiento de fase a través de minimización de energía, donde la minimización es alcanzada por una secuencia finita de minimizaciones binarias, cada una resuelta eficientemente por un cálculo de flujo/min-corte en ciertos grafos [9].
- **Constantini phase unwrapping** Método propuesto que explota el hecho de que las derivadas discretas de la fase desenvuelta son estimadas con un error que es un múltiplo entero de  $2\pi$ . Esto conlleva a que el problema de desdoblamiento de fase sea un problema de minimización con variables enteras. En esta técnica se minimiza la desviación entre las derivadas discretas estimadas y las derivadas desconocida de la fase desenvuelta [10].
- **Quality guided** En esta técnica, la fase envuelta es desenvuelta en partes siguiendo un cierto camino dependiendo de la calidad del mapa de fase. El algoritmo divide el mapa completo en  $n$  mapas de calidad y realiza el desdoblamiento de estos de manera iterativa. De cada mapa se elige un píxel inicial que tenga la mayor calidad y se agrega a una lista. De esta lista se elige el píxel con mayor calidad y se desenvuelve. Este píxel se elimina de la lista y el proceso se repite nuevamente hasta que la lista quede vacía [11].

## 3. Resultados

El desempeño de los algoritmos de desdoblamiento de fase discutidos anteriormente fue evaluado utilizando tres diferentes tipos de objetos: objetos virtuales y perfectos, objetos reales de dimensión conocida y objetos reales con superficies complejas. Para todos los experimentos se proyectaron 32 franjas en escala de grises y se obtuvo el mapa de fase utilizando la ecuación 6. El equipo utilizado para los experimentos es una computadora Dell G3 con 16GB de RAM, Intel® Core™ i7-8750GHz y Windows 10 64 bits. El software utilizado para la implementación fue Matlab R2018b. Se utilizó un proyector DLP marca Asus S1 y una cámara web marca Logitech modelo C920 Pro.

Se utilizaron tres métricas para evaluar el desempeño de cada uno de los algoritmos de desdoblamiento de fase. El tiempo de ejecución permitirá evaluar el tiempo de procesamiento requerido por el algoritmo para realizar el desdoblamiento de la fase. Mientras que, *error cuadrático medio* (MSE) y *proporción*

máxima de señal a ruido (PSNR), permitirán evaluar la calidad de la imagen reconstruida con respecto al objeto original. El error cuadrático medio representa la diferencia promedio entre una imagen y una referencia, es decir, a menor MSE, mayor similitud entre ambas imágenes. En este caso, un MSE menor representa un mejor desdoblamiento en fase.

Por el otro lado, PSNR permite evaluar que tanto una imagen degradada o con ruido ha sido reconstruida para coincidir con una imagen de referencia. Por lo tanto, un mayor PSNR indica mayor calidad en la imagen reconstruida resultando en un mejor algoritmo de desdoblamiento de fase.

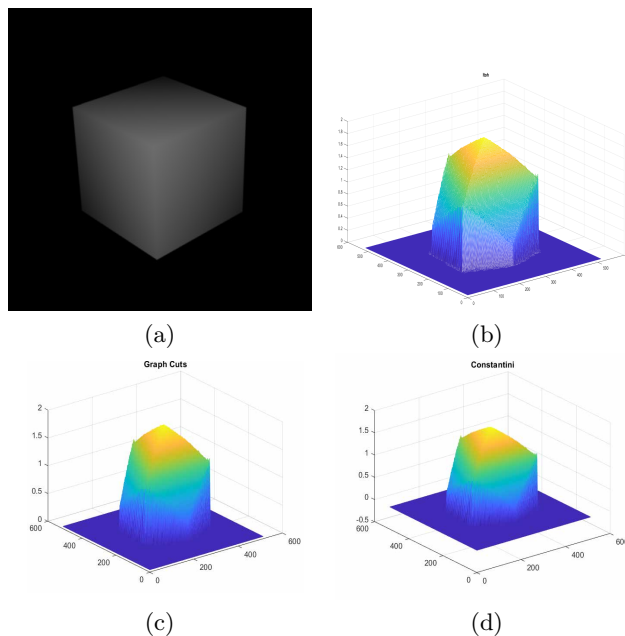
La Fig. 4 muestra los resultados obtenidos al aplicar los distintos métodos de reconstrucción en un objeto virtual. Aunque a simple vista una diferencia no es notable, la Tabla 1 contiene las métricas obtenidas para cada uno de los métodos de desdoblamiento. En este caso, las franjas fueron agregadas de manera virtual y se utilizó como plano de referencia, las franjas agregadas al objeto virtual. Para los objetos virtuales, las métricas fueron obtenidas realizando una comparativa píxel a píxel entre la reconstrucción obtenida por cada algoritmo y la representación 3D del objeto virtual (ground truth). Para este tipo de objetos el algoritmo Itoh muestra un mejor desempeño ya que además de tener un error menor, el tiempo de ejecución es mucho menor comparado con los de Graph Cuts y Constantini, indicando que en condiciones idóneas, Itoh presenta resultados favorables en menor tiempo. Con objetos virtuales se puede obtener de manera sencilla el error obtenido por el método de desdoblamiento de fase ya que se tiene una representación virtual del objeto real. Sin embargo, debido a que las condiciones de captura son idóneas, la falta de ruido y condiciones reales pueden hacer que las reconstrucciones obtenidas sean casi perfectas, este no es el caso de las pruebas realizadas con objetos reales.

**Tabla 1.** Métricas obtenidas para el desempeño de los algoritmos de desdoblamiento de fase utilizando imágenes de profundidad virtuales.

Método	MSE	PSNR	Tiempo de ejecución(seg)
Itoh 2D	31248558509e-08	75.0517001178832	0.138235
Graph Cuts	3.12485585093176e-08	75.0517001178832	72.845235
Constantini	3.12485585107644e-08	75.0517001176822	5.9397588

En la Fig. 5 se observan las reconstrucciones obtenidas utilizando un objeto de dimensión conocida. Para objetos reales no se puede realizar una comparación de manera directa entre la imagen reconstruida y el objeto real tal y como se manejó en las imágenes virtuales debido a que no se tiene una representación virtual del objeto. Para esto, es posible seleccionar un perfil de los resultados y examinarlo en 2D. Debido a que el objeto real tiene dimensiones que conocemos, es posible formar un perfil perfecto del objeto real y obtener métricas de error entre estos perfiles, tal y como se muestra en la Tabla 2 y en la Fig. 6. Al igual que en los objetos virtuales, las métricas MSE y PSNR evalúan la calidad





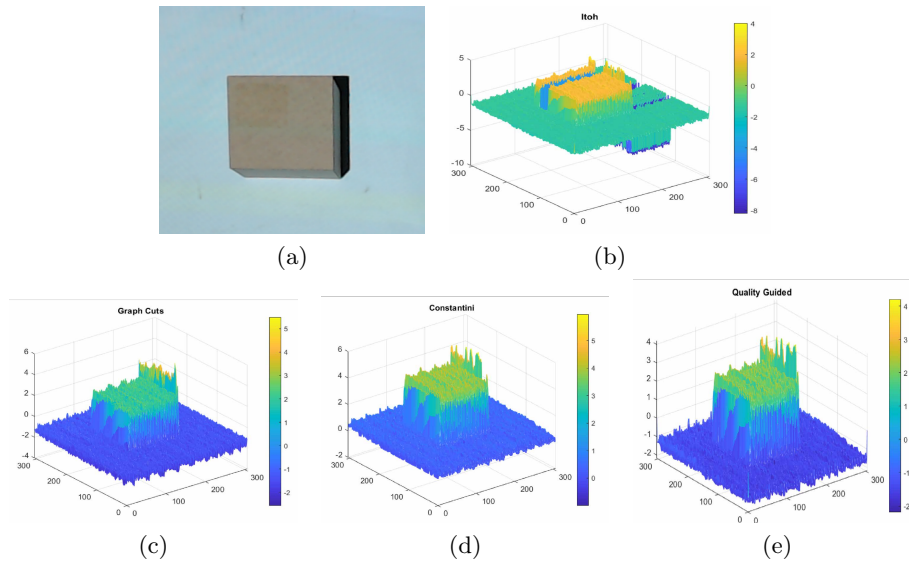
**Fig. 4.** (a) Imagen Original. (b) Reconstrucción Itoh. (c) Reconstrucción Graph Cuts. (d) Reconstrucción Constantini.

del perfil realizando una comparativa píxel a píxel entre el perfil reconstruido, utilizando PSP y los diferentes métodos de desdoblamiento de fase, y el perfil perfecto del objeto real. En la Tabla 2 se observa que Quality Guided obtuvo un mejor desempeño contra el resto de las técnicas, obteniendo un MSE menor que el resto de los algoritmos y un PSNR de mayor calidad, pero su tiempo de ejecución se eleva muy por encima de los demás. Es importante mencionar que tal y como se observa en la Fig. 5 algunos objetos presentan zonas o regiones con sombras, lo cual produce muchos brinco en la fase que producen valores desconocidos en la reconstrucción.

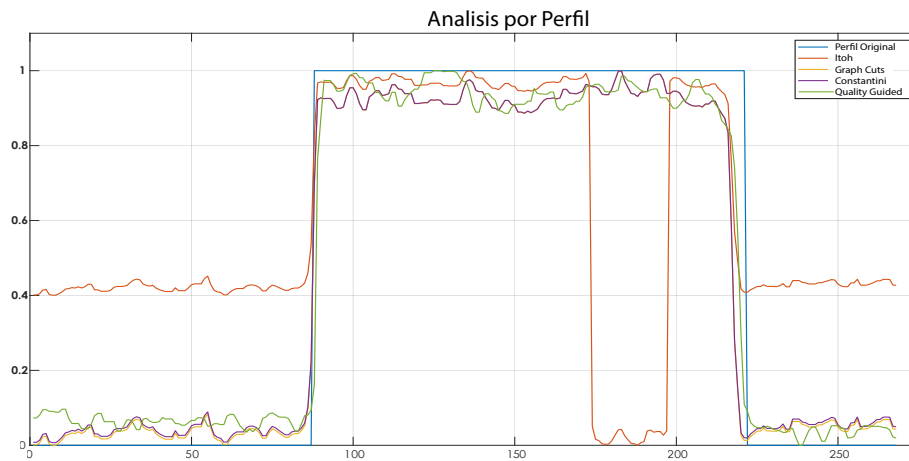
La Fig. 7 muestra las superficies obtenidas para cada uno de los métodos de desdoblamiento utilizando un objeto con una superficie compleja, es decir, cuyas dimensiones exactas no son conocidas.

Para este tipo de objetos se realizó una evaluación en tiempos de ejecución para cada algoritmo como valoración de su desempeño tal y como se muestra en la Tabla 3. Al igual que en los objetos simétricos, se obtuvo un perfil en dos dimensiones de cada uno de los resultados observado en la Fig. 8. Es importante notar que nuevamente Itoh 2D, aunque es un algoritmo realmente veloz, no presenta buenos resultados en cuanto al desdoblamiento correcto de la fase: no es capaz de identificar los saltos de fase de la imagen envuelta de manera correcta.

En la Tabla 4 se presenta una comparativa entre los resultados obtenidos de cada método para el objeto de superficie compleja. En este caso, se evalúa la



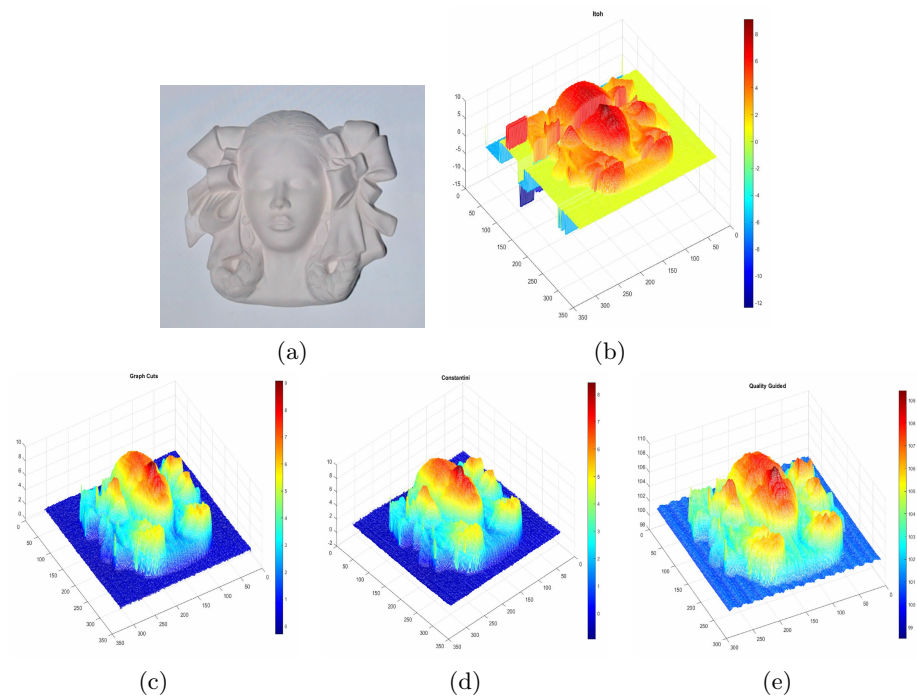
**Fig. 5.** (a) Objeto real de dimensión conocida. (b) Reconstrucción Itoh. (c) Reconstrucción Graph Cuts. (d) Reconstrucción Constantini. (e) Reconstrucción Quality Guided.



**Fig. 6.** Análisis por perfil de los resultados de cada método de desdoblamiento utilizando una figura de dimensión conocida.

**Tabla 2.** Métricas obtenidas para el desempeño de los algoritmos de desdoblamiento de fase utilizando imágenes con dimensión conocida.

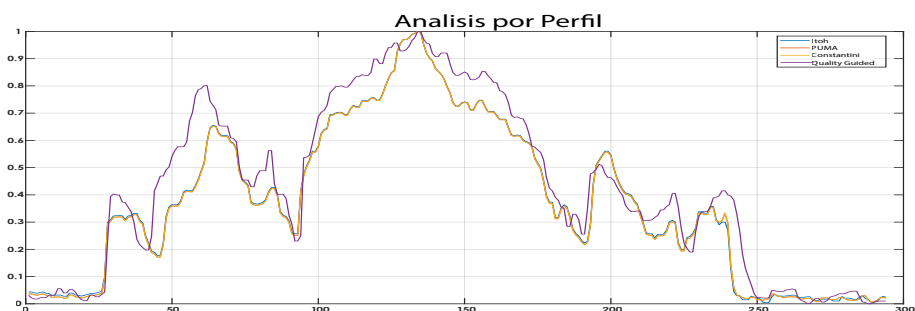
Método	MSE	PSNR	Tiempo de ejecución(seg)
Itoh 2D	0.1808	7.4271	0.422698
Graph Cuts	0.0214	16.6868	61.74066
Constantini	0.0214	16.6914	4.971914
Quality Guided	0.0191	17.1974	104.820844



**Fig. 7.** (a) Objeto real de superficie compleja. (b) Reconstrucción Itoh. (c) Reconstrucción Graph Cuts. (d) Reconstrucción Constantini. (e) Reconstrucción Quality Guided.

**Tabla 3.** Tiempos de ejecución promedio para objetos de superficie compleja.

Método	Tiempo de ejecución(seg)
Itoh 2D	0.067956
Graph Cuts	37.43721
Constantini	2.741103
Quality Guided	110.985259



**Fig. 8.** Análisis por perfil de los resultados de cada método de desdoblamiento utilizando una figura con superficie compleja.

diferencia entre cada algoritmo de reconstrucción. Un menor MSE indica que los algoritmos presentaron resultados similares al realizar el desdoblamiento de fase. Vale la pena mencionar, que el algoritmo Graph Cuts y Constantini presentan diferencias muy bajas entre si obteniendo un MSE relativamente mínimo, lo que indica que ambos algoritmos presentan un desempeño similar, aunque como se vio en tablas anteriores el tiempo de ejecución de Constantini es mucho menor a Graph Cuts.

#### 4. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se realizó un estudio de algunos de los métodos más comunes de desdoblamiento de fase y se evaluó su desempeño en términos de efectividad y velocidad.

Las técnicas fueron aplicadas en un proceso de reconstrucción tridimensional utilizando perfilometría por desplazamiento de fase, específicamente el método three-step. El cual consiste en proyectar tres patrones de franjas sobre el objeto y obtener su representación tridimensional virtual a partir de estos patrones.

Se utilizaron tres diferentes tipos de objetos para evaluar el desempeño de los algoritmos: objetos virtuales, objetos reales simétricos y objetos reales con superficies complejas. Los resultados mostraron que en condiciones ideales, todos

**Tabla 4.** Comparación del error medio cuadrático entre los métodos de desdoblamiento de fase.

Método	MSE
Itoh 2D vs GC	2.88E-05
Itoh 2D vs QG	2.88Ee-05
Itoh 2D vs Constantini	0.0091
GC vs Constantini	1.05E-28
GC vs QG	0.0093
Constantini vs QG	0.0093

los algoritmos son capaces de obtener un buen desempeño, siendo Itoh 2D el algoritmo más veloz. Sin embargo utilizando objetos reales Itoh 2D no es capaz de realizar un buen desdoblamiento debido a los altos saltos de fase que ese encuentran presentes. Graph Cuts y Constantini presentaron resultados similares tanto para los objetos simétricos como para los de superficies no simétricas. Teniendo Constantini un tiempo de ejecución mucho menor a Graph Cuts. El algoritmo Quality Guided aunque presenta resultados favorable en los objetos simétricos tiene un tiempo de ejecución muy elevado en todos los casos.

Como trabajo futuro se espera reducir el error obtenido después del desdoblamiento de fase a través de filtros de suavizado y eliminación de altas frecuencias. Esto con el fin, de agregar mayor suavidad a la imagen resultante y tener una mejor estimación de las dimensiones reales de los objetos. También se trabaja en reducir el ruido producido por las sombras, con el fin de mejorar las reconstrucciones específicamente de las zonas donde se presenta este tipo de ruido. Además, se pretende trabajar con métodos de desdoblamiento de fase basados en técnicas de *machine learning* tal es el caso de K-Means y K-NN.

## Referencias

1. Kato, J.: Fringe Analysis. In: Yosizawa, T. (ed), Handbook of optical metrology principles and applications, pp. 541–554, CRC Press, Boca Raton, FL. (2015)
2. Schreiber, H., Bruning, J.: Phase shifting interferometry. In: Malacara, D. (ed), Optical shop testing, pp. 547–667, Wiley Interscience (2007)
3. Gorthi, S., Rastogi P.: Fringe Projection Techniques: Whither we are? Optics and lasers in engineering, 48(2), 133–140 (2010)
4. Garcia, J.: Review in digitization of solid through structured light. Centro de investigaciones en óptica, A.C. (2015)
5. Zuo, C., Feng, S., Huang, L., Tao, T., Yin, W., Chen, Q.: Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. Optics and lasers in engineering (2018)
6. Guerrero, R.E.D., Morales, J.C.M., Arreguin, J.M.R., Soto, J.E.V., Ortega, J.C.P.: Comparative analysis of phase unwrapping in PSP using depth images. International conference in mechatronics, electronics and automotive engineering (ICMEAE), Prague, pp. 20–24 (2015)

7. Yuhe, L. Yanxiang, C. Qingxiang, L.: Phase unwrapping by k-means clustering in three-dimensional measurement. In: Third international conference on instrumentation, measurement, computer, communication and control, Shenyang, pp. 65–69 (2013)
8. Gdeisat, M., Lilley, F. : Two-dimensional phase unwrapping problem. John Moores University, Liverpool (2012)
9. Bioucas-Dias, J.M., Valadao, G.: Phase unwrapping via max flows. Image processing, IEEE transactions on, pp. 698–709 (2007)
10. Syakrani, N., Mengko, T.L.R., Suksmono, A.B. Baskoro, E.T.: Comparison of PUMA and CUNWRAP to 2-D phase unwrapping. In: Proceeding of the 2011 international conference of electrical engineering and informatics, Bandung, pp. 1–6 (2011)
11. Zhao, M., Huang, L., Zhang Q., Xianyu, S., Asundi, A., Kemaio, Q.: Quality-guided phase unwrapping technique: comparison of quality maps and guiding strategies. Applied optics (2011)