



Reconstrucción tridimensional de objetos sintéticos mediante desplazamiento de fase

Alfaro Montúfar José Gustavo✉, Pedraza Ortega Jesús Carlos✉, Aceves Fernández Marco Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro

✉ gustavo.alfaro.m@gmail.com

✉ caryoko@yahoo.com

Resumen

La reconstrucción tridimensional de objetos se ha convertido en un área importante de investigación en la rama de visión por computadora por su importancia en diferentes industrias entre las que destacan la medicina, entretenimiento, fabricación de piezas, entre otros. Existen diversas técnicas que permiten representar un objeto tridimensional de manera digital, en este artículo se emplea la representación basada en una imagen en escala de grises en donde la tonalidad de cada píxel representa la profundidad del objeto, de tal manera que al graficarse, se pueda apreciar una malla ajustada a la superficie del objeto. El presente artículo detalla el procedimiento empleado para reproducir la técnica de reconstrucción tridimensional de objetos denominada desplazamiento de fase (phase-shifting), utilizando proyección de franjas en un objeto, en este caso, se emplea como base un modelo digital u objeto sintético. Las franjas proyectadas sobre el objeto permiten medir el nivel de la superficie a través de la deformación de dicha franja, para que el método funcione se debe emplear diferentes posiciones de proyección denominadas pasos, en este caso se utilizaron 3 pasos que en conjunto permiten obtener la aproximación gráfica del objeto original. Un modelo digital tiene ciertas ventajas en comparación con un objeto físico, la principal es conocer su dimensión y forma real que permite una comparación precisa entre el resultado obtenido de la metodología desarrollada y el objeto de referencia, otra ventaja es la facilidad de rotación que permite colocar el objeto en prácticamente cualquier ángulo. La relevancia de esta metodología es la calidad con la cual se obtiene el resultado, a simple vista el objeto obtenido a partir de desplazamiento de fase se asemeja al objeto real, a nivel cuantitativo se emplean las métricas del error cuadrático medio y la relación pico señal-ruido que demuestran la calidad del objeto reconstruido. La finalidad del presente artículo es obtener una base de datos que consta de 28 objetos sintéticos y sus respectivas imágenes con franjas proyectadas, así como conocer a nivel cuantitativo el valor del error de dicha reconstrucción.

Palabras clave: Reconstrucción tridimensional, desplazamiento de fase, imágenes de profundidad, desdoblamiento de fase, visualización tridimensional, objetos sintéticos.

Abstract

The three-dimensional reconstruction of objects has become an important area of research in the field of computer vision due to its importance in different industries, among which are medicine, entertainment, and parts manufacturing, among others. There are several techniques that allow representing a three-dimensional object digitally, in this article the representation based on a grayscale image is used where the tonality of each pixel represents the depth of the object, in such a way that when graphing it can be appreciated a mesh fitted to the surface of the object. This article details the



procedure used to reproduce the three-dimensional object reconstruction technique called phase shifting using fringe projection on an object, in this case, a digital model or syntetic object was used as a basis. The fringes projected on the object allow the surface level to be measured through the deformation of said fringe, for the method to work different projection positions called steps must be used, in this case 3 steps were used that together allow obtaining the graphic approximation of the original object. A digital model has certain advantages compared to a physical object, the main one is to know its real size and shape that allows a precise comparison between the result obtained from the developed methodology and the reference object, another advantage is the ease of rotation that it allows place the object at virtually any angle. The relevance of this methodology is the quality with which the result is obtained, at first glance the object obtained from the phase shift resembles the real object, at a quantitative level the metrics of the mean square error and the peak signal noise ratio are used. that demonstrate the quality of the reconstructed object. The purpose of this article is to obtain a database consisting of 28 synthetic objects and their respective images with projected fringes, as well as to know at a quantitative level the error value of said reconstruction.

Keywords: Three-dimensional reconstruction, phase shifting, depth images, phase unwrapping, three-dimensional visualization, synthetic objects.

1. Introducción

Existen diversos métodos para la adquisición de las formas tridimensionales, las dos ramas principales son por medio de contacto y sin contacto.

Las técnicas por contacto, como su nombre lo indica, están basadas en el contacto con la superficie del objeto, lo cual tiene ciertas limitaciones en diversos aspectos tales como la sensibilidad al contacto con la pieza, la delicadeza, deformación, limitación en cuanto al tiempo de escaneo, dificultad en objetos en movimiento, entre otros.

Por otro lado, se encuentran las técnicas sin contacto las cuales están diseñadas para recibir información a partir de sensores que captan la luz o señales emitidas de manera natural o artificialmente que son reflejadas por el objeto analizado.

Obtener la forma tridimensional de un objeto ha representado un reto tecnológico enorme debido a que existen algunas dificultades tales como obtener la superficie suavizada del objeto que se pretende reconstruir, las sombras que se generan a raíz de la proyección de los patrones de luz y la detección de bordes y discontinuidades del objeto.

En el presente artículo, se empleará el método conocido como desplazamiento de fase [1] para obtener la forma tridimensional del objeto, dicha técnica está contenida en la categoría de adquisición sin contacto y en la subcategoría de ópticas activas, la cual emplea la proyección artificial de luz estructurada sobre el objeto, lo cual quiere decir que se proyecta luz en determinados patrones y posiciones.

El método de desplazamiento de fase es uno de los métodos ópticos que obtiene el menor error respecto al objeto original (ground truth) en comparación con otras técnicas [2], el método consiste en la proyección de franjas verticales sobre el objeto utilizando un proyector convencional, por otro lado, se encuentra una cámara digital que obtiene una imagen en una posición distinta al del proyector con el fin de que pueda captar la modulación o distorsión de dichas franjas sobre la forma del objeto, este proceso se repite en diversas ocasiones procurando que en cada iteración las franjas se desplacen un cierto rango hasta cubrir el total de la imagen.

En el método de desplazamiento de fase, se recomienda realizar los cálculos con al menos 3 tomas (three-step), se ha demostrado que con más tomas se mejora el resultado [3]. La salida del



método es una imagen de profundidad en 2D en escala de grises o niveles de intensidad, dichos niveles representan la altura del objeto resultante, y para observar el modelo tridimensional es necesario utilizar una gráfica de malla (mesh) que permita visualizar el resultado desde diferentes ángulos.

De manera tradicional, la técnica de desplazamiento de fase utiliza un sistema de perfilometría y objetos reales para obtener la representación tridimensional del objeto, [4] para realizar la equivalencia a unidad de medida en centímetros el resultado de la medición emplea un objeto de forma trapezoidal [5] que sirve como medida de calibración para calcular la medida real del objeto a medir.

Una vez que se realizan los cálculos del algoritmo de desplazamiento de fase, la imagen resultante se denomina fase envuelta. Para que el resultado se pueda visualizar como imagen de profundidad, y por lo tanto en tercera dimensión, es necesario aplicarle un algoritmo de desdoblamiento de fase, en este artículo se usará el algoritmo de Goldstein [6].

En esta investigación, se utilizan objetos sintéticos a diferencia de otras investigaciones de la literatura que utilizan objetos reales, asimismo, la proyección de las franjas se realiza de manera digital sobre la superficie del objeto sintético.

2. Objetos tridimensionales

La representación de objetos tridimensionales puede llevarse a cabo por medio de colores y tonalidades [7] que representan la profundidad de la imagen, de acuerdo con el color o tonalidad se puede distinguir entre una profundidad y otra.

La principal bondad del uso de mapas de profundidad, es la posibilidad de representar un objeto tridimensional en dos dimensiones (2D), es decir, en una sola imagen se puede observar el relieve de una escena. Asimismo, con el empleo de una gráfica de malla se puede tener una interacción con la imagen para realizar acercamientos en cierta región o inclusive, cambiar en ángulo de visión.

Entre las desventajas que se presentan con uso de mapas de profundidad, es que únicamente se puede observar el relieve del objeto en una sola vista sin poder observar su contenido por detrás de la imagen, tampoco se puede observar la representación gráfica de huecos que tengan dos o más niveles de profundidades distintas.

3. Sistema de perfilometría

Un sistema perfilometría consta de diferentes elementos que interactúan entre sí para obtener las imágenes con franjas proyectadas.

Por un lado, debe existir una unidad de proyección que se encarga de proyectar patrones de luz estructurada sobre la superficie de un objeto, detrás de dicho objeto debe existir un fondo con superficie completamente plana que funciona como un delimitador de referencia en las mediciones.

Por otro lado, debe existir una cámara la cual se encarga de obtener las imágenes del objeto al que se le proyectan las franjas, dicha cámara tiene la finalidad de obtener la modulación de las franjas sobre el objeto, el diagrama general de un sistema de perfilometría se muestra en la Figura 1.

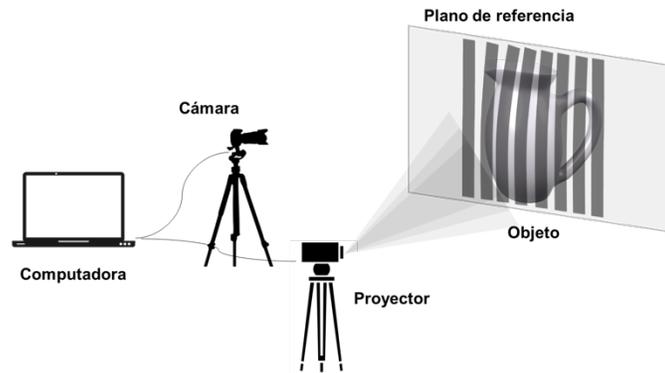


Figura 1. Sistema de perfilometría tradicional [8].

Finalmente, un equipo de cómputo se encargará de reunir el conjunto de imágenes obtenidas de la cámara y realizar el procesamiento de la información.

4. Metodología

4.1 Desplazamiento de fase

Los patrones de interferencia que utiliza el algoritmo de desplazamiento de fase de 3-step están dados por la siguiente ecuación (1):

$$I_k(u, v) = b \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{p} u + \delta_k \right) \right] + a \quad (1)$$

Donde:

- a es un desplazamiento
- b es la amplitud de los patrones de franja
- p es el ancho de la franja en pixeles
- k es el paso k
- u y v son las coordenadas de cada pixel

Dado lo anterior, los patrones para 3-step se establecen de la siguiente manera (2), (3) y (4):

$$I_1(u, v) = b \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{p} u - \frac{2\pi}{3} \right) \right] + a \quad (2)$$

$$I_2(u, v) = b \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{p} u \right) \right] + a \quad (3)$$

$$I_3(u, v) = b \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{p} u + \frac{2\pi}{3} \right) \right] + a \quad (4)$$



Por otro lado, las intensidades de los patrones proyectados sobre el objeto están definidos por medio de la ecuación fundamental de desplazamiento de fase, la cual está definida como (5):

$$I_k(x, y) = I' + I'' \cos(\phi + \delta_k) \quad (5)$$

Donde:

- I' es la intensidad promedio
- I'' es la modulación
- ϕ es la fase
- δ_k es el desplazamiento de fase del paso k

Las intensidades para cada patrón 3-step proyectado sobre el objeto considera el mismo valor de desplazamiento k son (6), (7) y (8):

$$I_1(x, y) = I' + I'' \cos\left(\phi - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6)$$

$$I_2(x, y) = I' + I'' \cos(\phi) \quad (7)$$

$$I_3(x, y) = I' + I'' \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (8)$$

Posteriormente, se obtienen las fórmulas de desplazamiento de fase que se componen por la ecuación de la intensidad promedio (9) y la modulación de las franjas proyectadas sobre el objeto (10) cuyo resultado se le conoce como el algoritmo de desplazamiento de fase de 3-step.

$$I'(x, y) = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \quad (9)$$

$$I''(x, y) = \frac{\sqrt{3(I_1 - I_3)^2 + (2I_2 - I_1 - I_3)^2}}{I_1 + I_2 + I_3} \quad (10)$$

Asimismo, se encuentra la fase envuelta caracterizada por saltos de 2π por lo que su solución es a través de la función arco tangente definida en un rango de $-\pi/2$ y $\pi/2$, dicha fase contiene la información física de la superficie del objeto y es representada por la siguiente ecuación (11):

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3} \right] \quad (11)$$

4.2 Desdoblamiento de fase

La fase envuelta obtenida del algoritmo de desplazamiento de fase considera su solución por medio de la tangente inversa, la cual está definida en el rango $-\pi/2$ y $\pi/2$, por lo que se presentan discontinuidades, basado en lo anterior se busca obtener el resultado de la fase continua que también se le conoce como fase desenvuelta.

El resultado de la fase desenvuelta se obtiene a partir de una estimación de la fase envuelta que se representa mediante la siguiente formula (12):

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi \cdot m(x, y) \quad (12)$$



Donde $m(x,y)$ es una variable conocida como valor de campo de tipo entero.

El cálculo de desenvolvimiento de fase tiene como objetivo encontrar el valor de campo adecuado para la medición de la fase.

En el presente artículo se utilizará el algoritmo de Goldstein para resolver el problema de desenvolvimiento de fase por las bondades que ofrece tales como un mejor manejo de zonas discontinuas y que evita la propagación de errores.

En términos generales el algoritmo de Goldstein sigue una serie de pasos [9], comienza con la identificación de los residuos con el fin de detectar inconsistencias en las rutas de integración, dichos residuos son identificados en ventanas de 2×2 cuando los resultados suman -2π o 2π , el signo determina si el residuo es positivo o negativo.

Posteriormente se generan los cortes trazando líneas entre residuos más cercanos, las cuales tienen la finalidad de establecer las fronteras entre un corte y otro.

Finalmente, se realiza la integración de los cortes identificados tomando un punto del corte y dividiéndolo entre un punto inicial distinto a un residuo, el resto de los pixeles del mismo corte se van determinando con base en el valor del vecino inmediato anterior.

4.3 Cuantificación de las diferencias

Para determinar qué diferencia existe entre un objeto de referencia y un objeto reconstruido [10], serán utilizadas dos métricas, la primera es el error cuadrático medio y la segunda, la relación pico señal-ruido.

4.3.1 Error cuadrático medio

Aplicado a imágenes se interpreta como una medida de calidad, la ecuación para calcular dicho valor es la siguiente (13):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum \sum (E_{ij} - O_{ij})^2 \quad (13)$$

Donde N es el tamaño de la imagen en pixeles, E_{ij} es la imagen estimada, O_{ij} es la imagen de referencia.

4.3.2 Relación pico señal-ruido

Valor que permite medir la calidad entre una imagen estimada y una de referencia. Los valores más altos se interpretan como una mejor calidad de la imagen de salida, la unidad de medida resultante se denomina decibeles (dB) y su ecuación es la siguiente (14):

$$\begin{aligned} PSNR &= 10 * \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \\ &= 20 * \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \\ &= 20 * \log_{10}(MAX_I) - 10 * \log_{10}(MSE) \end{aligned} \quad (14)$$

Donde MSE es el valor del error cuadrático medio, MAX_I es el valor máximo posible de la imagen.

5. Experimentación

El conjunto de datos del presente artículo consta de 28 objetos digitales o sintéticos en tercera dimensión almacenados en archivos con extensión *.obj, dichos objetos fueron obtenidos del sitio web <https://free3d.com> en su mayoría pertenecientes a animales, los cuales se trabajaron a través del software denominado Blender, el cual permite la manipulación de objetos tridimensionales, tales como escalamiento, rotaciones, traslaciones, entre otras.

Para cada objeto se seleccionó una posición lateral o frontal, además de colocar el objeto completo dentro del cuadro de visualización de la cámara, dicha posición conforma cada una de las escenas del experimento, una vez establecidas dichas condiciones se aplicaron los pasos de la figura 2.

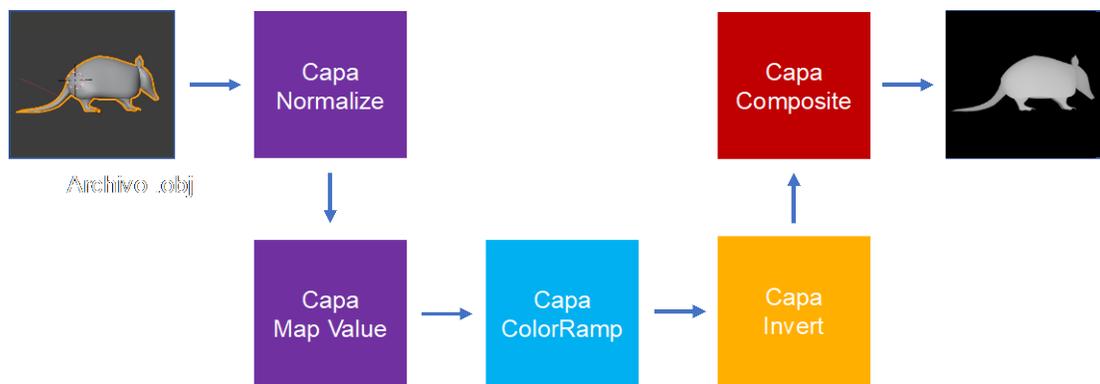


Figura 2. Capas aplicadas al objeto para obtener la imagen de profundidad.

- **Normalize**, el cual se encarga de normalizar la imagen para las capas posteriores.
- **Map Value**, el cual permite modificar los valores de entrada para discriminarlos o bien, determinar el rango de umbralización, en este caso no se modificaron los valores establecidos por default.
- **ColorRamp**, permite determinar las tonalidades de variación de color del blanco (valor de 1) al negro (valor de 0), en este experimento se definieron dos rangos el primero de 0 a 0.255 y el segundo de 0.255 a 1.
- **Invert**, permite invertir el resultado de las capas anteriores.
- **Composite**, reúne todos los componentes de las capas anteriores para el renderizado.

Al aplicar el procedimiento mostrado en la Figura 2 a los 28 objetos digitales o sintéticos, el resultado se muestra en la Figura 3.

Una vez que se ha renderizado la imagen, finaliza el proceso al guardar el resultado en archivo *.png, dicho resultado es la imagen del objeto en profundidad, por lo tanto, también es la imagen de referencia (ground truth) con la que se comparará el resultado final del método de desplazamiento de fase, cada imagen tiene una dimensión de 1024 x 1024 píxeles.

Posteriormente se le aplica el patrón de franjas al objeto con el fin de observar la modulación que representa la forma del objeto, dicho patrón está conformado por 3 pasos. La fórmula para obtener el patrón de franjas está descrita en la sección 4.1, denominada desplazamiento de fase.

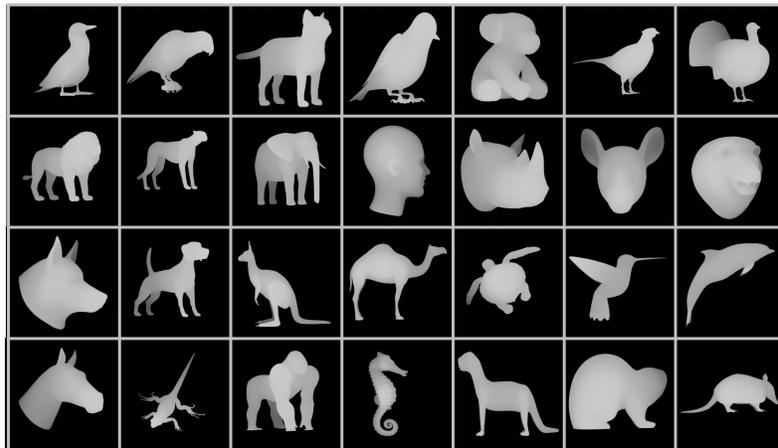


Figura 3. Imágenes de profundidad del conjunto de datos.

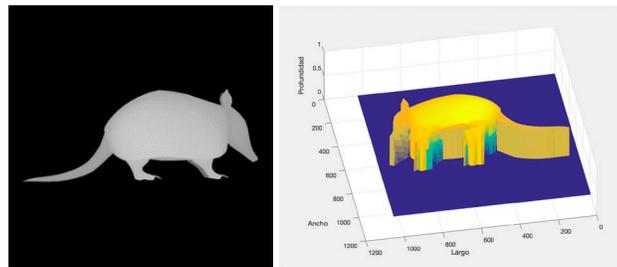


Figura 3. Mapa de profundidad (lado izquierdo) y gráfica de malla del objeto original (lado derecho).

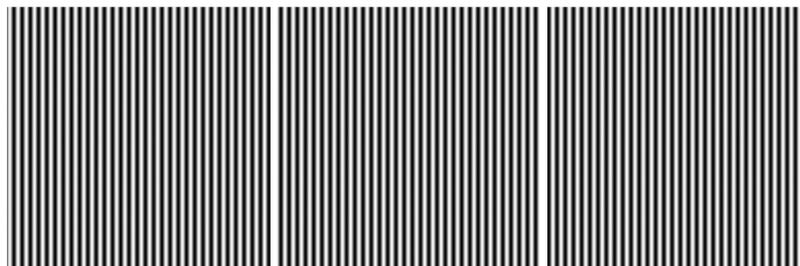


Figura 4. Franjas proyectadas sobre el plano de fondo en 3-step.

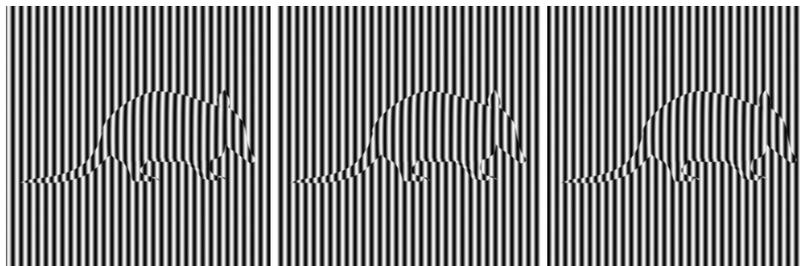


Figura 5. Franjas proyectadas sobre el objeto en 3-step.

Como resultado del paso anterior, se obtiene el conjunto de imágenes de franjas sin objeto (Figura 4) y con objeto (Figura 5), en total se contabilizan 6 imágenes por escena, las imágenes del plano de fondo se repiten en cada una.

El conjunto de imágenes de cada escena es la entrada del algoritmo de desplazamiento de fase programado en Matlab, el resultado obtenido es una imagen del mapa de fase, posteriormente se le aplica el algoritmo de Goldstein para el desdoblamiento de fase con el fin de obtener la imagen de profundidad predicha con base en las imágenes con franjas. El resultado se puede observar en la Figura 6.

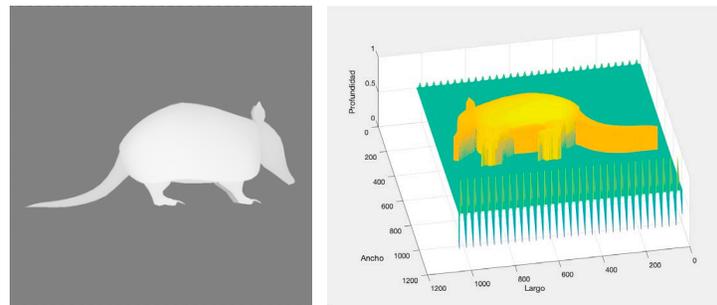


Figura 6. Mapa de profundidad (lado izquierdo) y gráfica de malla del objeto obtenido por medio del método de desplazamiento de fase (lado derecho).

En principio, se puede observar que la imagen de profundidad en sus extremos superior e inferior tienen ruido periódico, lo anterior a consecuencia del procesamiento para obtener el mapa de profundidad a partir de la imagen de franjas, dado que los extremos no contienen información que sea útil para el análisis, se igualan al valor de la base en el siguiente paso.

Por otro lado, la base plana que soporta el objeto final es un conjunto de puntos no uniformes con diferentes altitudes, en este caso, para homologar dicho valor se obtuvo a partir de las frecuencias más altas del histograma y estableciendo la base en el punto medio del rango de la imagen.

En la Figura 7 se presentan las frecuencias de las tonalidades de la imagen normalizada, se puede observar que 3 de las mayores frecuencias son las que prevalecen en la imagen y demuestran la presencia de una base con variaciones leves, lo que se busca es unificar el valor de la base, en todas las imágenes del conjunto se pueden observar exactamente las mismas frecuencias de base, en este ejercicio se unificaron al valor 0.5.

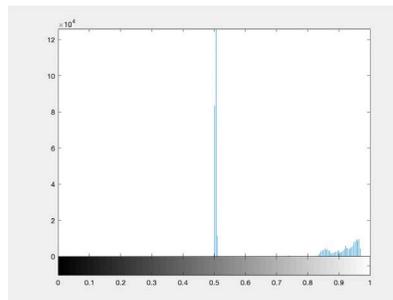


Figura 7. Histograma de la imagen reconstruida por desplazamiento de fase.

Se puede observar en la Figura 8 que, al aplicar los pasos anteriores, la imagen resultante debe ser ajustada a la misma escala que la imagen de referencia con el fin de que el punto más alto de ambas imágenes sea el mismo, en el objeto de referencia los valores de altitud son distintos a los del objeto reconstruido, ya que la altura del primero va de 0 a 0.8 y el segundo, de 0 a 1.

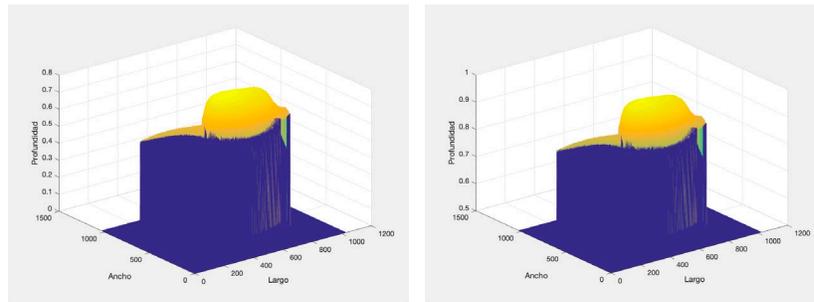


Figura 8. Gráfica de malla de la imagen de referencia (lado izquierdo) y de la reconstruida por desplazamiento de fase (lado derecho).

Posteriormente se realizó otro cálculo para determinar un factor que ajusta la altura en intervalos de 0.001, para encontrar dicho factor se le aplicó una serie de iteraciones a cada una de las imágenes del conjunto de datos con el criterio de paro determinado por la condición que el error actual sea menor al error anterior, se usó la metodología del error cuadrático medio, como resultado de este paso se logró encontrar el factor promedio de 0.0622, dicho valor será utilizado como generalización para todas las imágenes con el fin de que aplique a todas las imágenes por igual sin conocerlas, en principio, dado que aplicado a un objeto no se tendría el valor real con el cual comparar.

Finalmente, en la Figura 9 se presenta el resultado obtenido al ajustar la escala basada en las condiciones establecidas anteriormente, visualmente se puede observar que las medidas y tamaños de los ejes son los mismos, así como apreciarse de un tamaño similar.

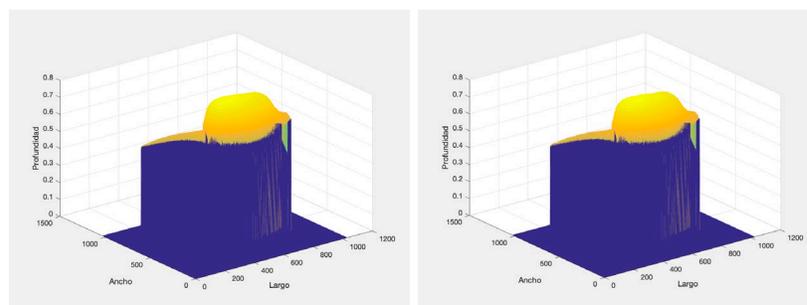


Figura 9. Gráfica de malla de la imagen de referencia (lado izquierdo) y de la reconstruida con la escala ajustada (lado derecho).

6. Resultados

En la Figura 10 se presentan dos de las imágenes tomadas del conjunto de datos generado mediante el método de desplazamiento de fase (a y c), así como el objeto de referencia respectivo de

cada una de ellas (b y d), se seleccionaron los objetos que tuvieron el mejor y peor resultado basados en las métricas del error cuadrático medio (MSE) y relación pico señal-ruido (PSNR).

En el caso del colibrí, cuenta con un MSE de 0.000011, dicho valor es obtenido de la comparativa entre la imagen original y la imagen reconstruida que se evalúa pixel a pixel, el cual es el menor valor del conjunto de datos reconstruido, mientras que el valor de PSNR es de 49.472 el cual es el mayor valor del conjunto, ambos valores, en su campo de aplicación, representan el mejor resultado del conjunto, lo cual significa que es la mejor reconstrucción.

Por otro lado, el objeto que da como resultado la calidad más baja al aplicar las métricas es la reconstrucción de la cabeza de ratón, la cual cuenta con un valor de MSE de 0.000071, que es el mayor valor del conjunto de datos reconstruido, mientras que el valor de PSNR es de 41.477 el cual es el menor valor del conjunto.

Dado que la diferencia entre el objeto de referencia y el objeto reconstruido es prácticamente imperceptible de manera visual, se propone mostrar dicha variación en una gráfica que represente la diferencia entre ambas imágenes. El resultado se puede observar en la Figura 11.

Se puede apreciar que los valores del error se concentran en su mayoría en el rango de -0.02 y 0.02 , también se puede observar que la base de la gráfica tiene cierto volumen el cual que se debe a que la base de la imagen original tiene pequeñas variaciones de altura que se originan al momento de la transformación de objeto sintético a imagen de profundidad.

Adicionalmente, en la Tabla 1 se presentan los errores de cada una de las imágenes que componen el conjunto de datos reconstruido, es importante mencionar que para calcular la diferencia entre el objeto reconstruido y el objeto de referencia se consideraron únicamente los valores de la modulación propia del objeto y se ignoraron los valores del plano de referencia, lo anterior para evitar que ruido generado a partir de la base del objeto pueda interferir en el resultado.

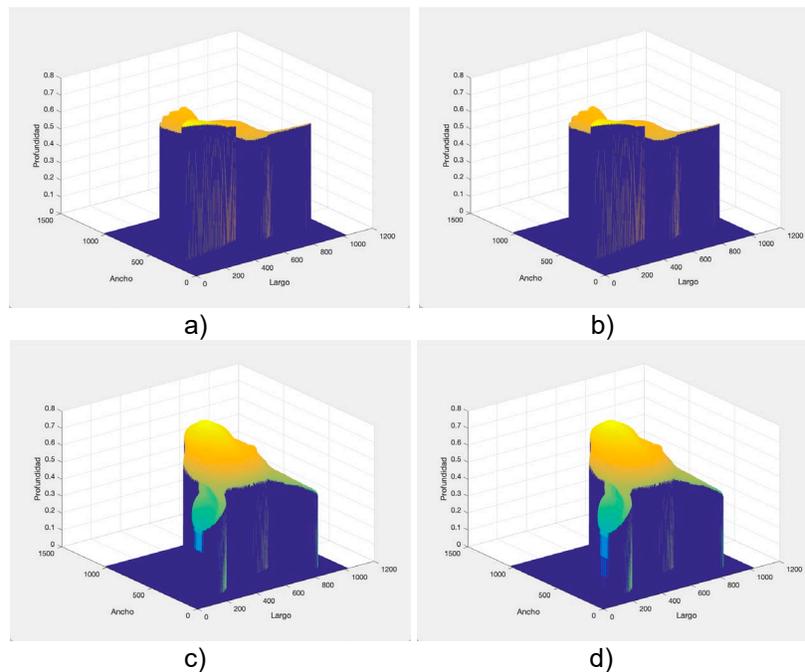


Figura 10. Gráfica de malla de algunos de los objetos reconstruidos con la escala ajustada, Las imágenes a y c pertenecen a objetos reconstruidos, mientras que b y d son los objetos de referencia.

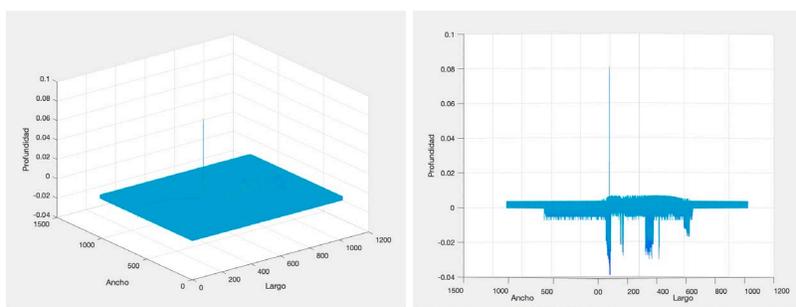


Figura 11. Superficie del error en vista superior (lado izquierdo) y vista en perfil (lado derecho).

El primer indicador es el error cuadrático medio, el cual se obtiene al calcular el promedio de la diferencia de la imagen reconstruida y la de referencia en cada uno de sus pixeles, dicha diferencia es elevada al cuadrado para evitar que los valores negativos neutralicen los valores positivos, entre menor sea el valor resultante, mejor será la calidad de la reconstrucción.

Tabla 1. Error cuadrático medio de cada objeto en comparación con su reconstrucción.

Objeto 1	Objeto 2	Objeto 3	Objeto 4	Objeto 5	Objeto 6	Objeto 7
0.000013	0.000014	0.000013	0.000011	0.000016	0.000019	0.000015
Objeto 8	Objeto 9	Objeto 10	Objeto 11	Objeto 12	Objeto 13	Objeto 14
0.000013	0.000035	0.000034	0.000031	0.000046	0.000017	0.000019
Objeto 15	Objeto 16	Objeto 17	Objeto 18	Objeto 19	Objeto 20	Objeto 21
0.000015	0.000071	0.000027	0.000023	0.000029	0.000029	0.000021
Objeto 22	Objeto 23	Objeto 24	Objeto 25	Objeto 26	Objeto 27	Objeto 28
0.000050	0.000014	0.000012	0.000022	0.000024	0.000022	0.000020

Asimismo, se calculó la relación pico señal-ruido la cual es una medición ampliamente utilizada para medir la calidad de una imagen comprimida en relación con su original, a la unidad de medida se denomina decibeles (dB), en el presente artículo se utilizará para medir la reconstrucción en comparación con el objeto de referencia. En una imagen de 8 bits, como las utilizadas en el presente artículo, los valores resultantes se encuentran entre 41 y 50 dB, a mayor valor, mejor será la calidad de la imagen. En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos en el conjunto de datos de cada imagen por individual.

7. Conclusiones

Uno de los objetivos principales que se quiere alcanzar con el presente artículo es la creación de un conjunto de datos sintéticos que sirvan para prueba y validación para la implementación de una metodología de reconstrucción tridimensional por medio de redes neuronales.

Como se pudo observar en la experimentación, el método de desplazamiento de fase de 3-step da como resultado una reconstrucción visualmente similar, sin embargo, es necesario realizar los escalamientos y ajustes necesarios para homologar las medidas.



Tabla 2. Relación pico señal-ruido de cada objeto en comparación con su reconstrucción.

Objeto 1	Objeto 2	Objeto 3	Objeto 4	Objeto 5	Objeto 6	Objeto 7
48.965	48.438	48.751	49.472	47.983	47.195	48.175
Objeto 8	Objeto 9	Objeto 10	Objeto 11	Objeto 12	Objeto 13	Objeto 14
48.737	44.615	44.646	45.103	43.367	47.693	47.111
Objeto 15	Objeto 16	Objeto 17	Objeto 18	Objeto 19	Objeto 20	Objeto 21
48.385	41.477	45.721	46.457	45.338	45.339	46.869
Objeto 22	Objeto 23	Objeto 24	Objeto 25	Objeto 26	Objeto 27	Objeto 28
43.054	48.539	49.131	46.627	46.283	46.572	46.930

Por otro lado, es posible realizar reconstrucciones de objetos sin que se tenga un precedente de referencia, dado que el resultado de la experimentación demostró que se pueden establecer factores de ajuste estandarizados, es decir, valores estándar que se apliquen de manera generalizada en cualquiera de los casos.

Además de la inspección visual, se realizaron mediciones numéricas para confirmar el resultado, las cuales demostraron que el algoritmo de desplazamiento de fase consigue resultados que se asemejan al objeto de referencia, en este caso se utilizaron el error cuadrático medio en donde los resultados individuales promedian 0.0000241, este hallazgo es importante dado que demuestra el nivel de precisión que se logra obtener en la reconstrucción tridimensional con esta metodología.

Por lo anterior, se concluye que el algoritmo de desplazamiento de fase en conjunto con el algoritmo de Goldstein para el desdoblamiento de fase es una metodología que ofrece resultados favorables al demostrar que el objeto reconstruido es visualmente similar al objeto de referencia y que las medidas de comparación tales como el error cuadrático medio y la referencia pico señal-ruido confirman, de manera cuantitativa, que los resultados obtenidos se asemejan al objeto sintético.

Los resultados obtenidos tienen la posibilidad de ser utilizados en procesos de reconstrucción 3D en donde se requieran una gran cantidad de imágenes con franjas proyectadas y procesadas, por ejemplo, en redes neuronales convolucionales. La mayoría de los procesos basados en redes neuronales convolucionales presentan buenos resultados en sus publicaciones [11], pero no proporcionan información de las bases de datos que ocupan.

Como trabajo futuro enfocado a este artículo, se estimará una medición en centímetros considerando una figura de referencia, la cual permita calibrar el modelo mediante la equivalencia de tamaños tanto en los objetos sintéticos como en los objetos reconstruidos.

Referencias

- [1] Cruz-Santos W. et. al, A 3D Reconstruction System based on Phase-shifting Techniques, México.
- [2] Shijie F. et al, Fringe pattern analysis using deep learning, Advanced photonics, 2019.
- [3] Van der Jeught S. and Dirckx J., Deep neural networks for single shot structured light profilometry, Optics Express Vol. 27, pp. 17091-17101, 2019.
- [4] Chen L., Calibration of 3D surface profilometry using digital fringe projection, Measure Science of Technology Vol. 16, pp.1554-1566, 2005.
- [5] Zhang S. et al., Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement, Optics Express Vol. 18, pp. 9684-9689, 2010.



- [6] R. Goldstein, H. Zebker and C. Werner, Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, *Radio Science*, vol. 23, pp. 713-720, July-August 1988.
- [7] Paquim J., *Learning Depth from Single Monocular Images Using Stereo Supervisory Input*, 2016.
- [8] Belliot B. et al, *3D Image Acquisition System Based on Shape from Focus Technique*, Sensors, 2013.
- [9] Ghiglia D. and Pritt M., *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software*, Wiley-Interscience publication, 1998.
- [10] Khalifa N. and Benrejeb M., *On Nonidentical Discrete-Time Hyperchaotic Systems Synchronization: Towards Secure Medical Image Transmission*, *Recent Advances in Chaotic Systems and Synchronization*, 2019.
- [11] Quian J. et al, *Deep-learning-enabled geometric constraints and phase unwrapping for single-shot absolute 3D shape measurement*, 2020.

Autor

Jose Gustavo Alfaro Montúfar es licenciado en Matemáticas Aplicadas y Computación por la Universidad Nacional Autónoma de México. Cuenta con 8 años de experiencia en el sector público y privado en áreas de Pricing, Energía y Prevención de Lavado de Dinero. Actualmente se encuentra cursando la maestría en Ciencias en Inteligencia Artificial en la Universidad Autónoma de Querétaro. Su tema de tesis a desarrollar se titula "Reconstrucción 3D de objetos utilizando análisis de franjas y técnicas de aprendizaje profundo".

Jesús Carlos Pedraza Ortega. Realizó sus estudios de Maestría en la FIMEE, Universidad de Guanajuato. Obtuvo el Doctorado en Ingeniería Mecánica con especialidad en Robótica - Sistemas de Reconstrucción 3D en la University of Tsukuba en Japón, donde trabajó con el desarrollo de un sistema monocular de reconstrucción 3D. Como docente, ha impartido diferentes cursos en los tres niveles de estudios (Licenciatura, Maestría y Doctorado) desde 1997, actualmente en la Universidad Autónoma de Querétaro. Es Senior Member por la IEEE y es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Sus líneas de investigación son sistemas de reconstrucción 3D, inteligencia artificial aplicada a sistemas de visión, entre otros.

Marco Antonio Aceves Fernández. Es Ingeniero en Telemática por la Universidad de Colima en el año 2000, obtuvo su Maestría y su Doctorado en el área de Sistemas Inteligentes en la University of Liverpool, Reino Unido, éste último en el año 2005. Ha sido reconocido como miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) por parte del CONACyT de manera ininterrumpida desde el 2009. Es miembro Senior del IEEE y presidente honorario de la Asociación Mexicana de Software Embebido. Sus intereses incluyen Sistemas Embebidos, Inteligencia Artificial.