

Métodos de Reconstrucción 3D por proyección de franjas: Estudio comparativo

Methods of 3D reconstruction by fringe projection: A comparative study

Hosman-Yadir Gelvez-Ramirez^a; Martha-Lucía Molina-Prado^b; Néstor-Alonso Arias-Hernández^b

^a Físico, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia,

^b Grupo de Investigaciones Óptica Moderna, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia

Corresponding author: nesarisher@unipamplona.edu.co

Submitted: Noviembre 10, 2023. Accepted: Enero 28, 2026.

Resumen

En este trabajo se propone el diseño y construcción de un sistema de reconstrucción tridimensional basado en proyección de franjas. El sistema está compuesto de una cámara tipo CMOS a color de 752x480 pixeles y un mini-videobeam DellM115HD con iluminación tipo LED, estos dispositivos se encuentran ubicados en configuración de triangulación. Se elaboró una interface en Matlab que controla el videobeam y la cámara, la cual permite la captura de las imágenes de las franjas proyectada sobre la muestra en forma automática. Además, se implementaron algunos algoritmos de reconstrucción 3D, tales como: Phase Shifting (3, 4 y 5 imágenes) y el algoritmo de análisis de fase por transformada de Fourier. En este trabajo se hace un análisis comparativo en precisión y resolución de los métodos, así como de ventajas y desventajas. Por último, se presentan reconstrucciones de diversos objetos por los diferentes algoritmos implementados.

Palabras clave: Reconstrucción 3D, proyección de franjas, Transformada de Fourier, Phase shifting.

Abstract

This work proposes the design and construction of a three-dimensional reconstruction system based on fringe projection. The system is composed of a 752x480 pixels CMOS color camera and a DellM115HD mini-videobeam with LED illumination, these devices are located in triangulation configuration. An interface was developed in Matlab that controls the videobeam and the camera, which allows the capture of the images of the fringes projected on the sample automatically. In addition, some 3D reconstruction algorithms were implemented, such as: Phase Shifting (3, 4 and 5 images) and the Fourier transform phase analysis algorithm. In this work, a comparative analysis of accuracy and resolution of the methods is made, as well as advantages and disadvantages. Finally, reconstructions of various objects by the different algorithms implemented are presented.

Keywords: 3D reconstruction, fringe projection, Fourier transform, Phase shifting.

1. Introducción

El estudio de la topografía y la deformación de objetos inertes y de seres vivos, así como construir replicas en tiempo real son operaciones de gran interés en diversas áreas como en el procesamiento automático, control de calidad, aplicaciones médicas, industriales, robóticos, entretenimiento, seguridad, diseño y fabricación. Sin embargo, debido a la naturaleza diversa de las aplicaciones mencionadas y a la complejidad geométrica, óptica y material de los objetos involucrados, la reconstrucción tridimensional precisa continúa siendo un desafío. Estas variaciones -en textura, reflectancia, curvatura, tamaño y condiciones de iluminación- afectan directamente la recuperación de la fase y la fidelidad topográfica. Por ello, se hace necesario evaluar las estrategias existentes con el propósito

de identificar sus características, precisiones, resoluciones y limitaciones. Conscientes de las anteriores áreas de trabajo este trabajo se fundamenta en el propósito de realizar un análisis topográfico de un objeto colocado sobre una superficie a cierta distancia, sin contacto físico y basado en el procesamiento de datos por computador. La ventaja de estos métodos de reconstrucción de objetos mediante la proyección de luz estructurada, viene dada por el hecho de analizar la topografía sin necesidad de entrar en contacto con el objeto y que son métodos de fácil control.

El trabajo se enfoca en algunas técnicas de medición de superficie 3D mediante la proyección de luz estructurada; La tecnología de proyección digital de luz y los sensores de imagen utilizados, permite la reconstrucción de superficies 3D con gran precisión y

resolución, la cual depende de la configuración que se implemente.

Hoy en día, existen algunas técnicas de reconstrucción 3D de objetos basado en luz estructurada tales como topografía moiré, proyección de franjas, mapeo de fase, visión estereoscópica, por perfilometría por transformada de Fourier (PTF), la medición de fase por perfilometría (PMP) y la triangulación de escaneo láser por nombrar algunas [1-6]. Los métodos de medición de objetos en 3D basado en la iluminación de luz estructurada, utilizan el análisis de la luz deformada para obtener la información del perfil del objeto estudiado. La información tridimensional del objeto se obtiene analizando la deformación que presentan las franjas proyectadas sobre su superficie. Para ello, una cámara fija registra una o varias imágenes del patrón deformado, las cuales son posteriormente procesadas mediante el método de reconstrucción seleccionado.

A pesar del amplio desarrollo de las técnicas de reconstrucción tridimensional basadas en luz estructurada, la literatura reciente muestra que la mayoría de los estudios se centran en analizar aspectos específicos de cada método —precisión en el cálculo de fase, robustez ante ruido, sensibilidad frente a variaciones fotométricas o estrategias de corrección, pero son escasos los trabajos que presenten una comparación experimental integral entre distintas técnicas bajo un mismo sistema físico de adquisición. Revisiones como las de Zuo et al. [30], Servin et al. [32] y Zhang y Huang [28] describen las ventajas y limitaciones de PSP y PTF desde el punto de vista teórico y algorítmico, pero no incluyen evaluaciones comparativas sobre un montaje real construido desde cero, ni consideran sistemas de bajo costo con geometrías no telecentricas como los que se emplean frecuentemente en laboratorios académicos.

En este contexto, surge la pregunta que orienta este trabajo: ¿Cuál de los métodos de reconstrucción tridimensional basados en proyección de franjas —Phase Shifting en sus variantes (3, 4 y 5 capturas), Phase Shifting a color y Perfilometría por Transformada de Fourier— ofrece mayor precisión y fidelidad geométrica en un sistema experimental de bajo costo configurado mediante triangulación óptica? Responder esta pregunta es relevante porque, en un sistema no telecentrico, las distorsiones geométricas, la linealidad fotométrica, la sensibilidad de fase y la estabilidad de los patrones proyectados afectan de manera distinta a cada técnica. Un análisis comparativo bajo condiciones experimentales idénticas permite establecer criterios de selección adecuados para aplicaciones donde los recursos disponibles son limitados o donde se requiere un compromiso entre precisión, velocidad y simplicidad de implementación.

Con base en lo anterior, los objetivos de este trabajo se plantean de la siguiente manera: Diseñar y construir un sistema de reconstrucción 3D basado en proyección de franjas utilizando componentes de bajo costo. Implementar los algoritmos Phase Shifting (3, 4 y 5 capturas), Phase Shifting a color y Perfilometría por Transformada de Fourier. Realizar una comparación experimental entre los métodos en términos de precisión,

estabilidad de fase y fidelidad geométrica bajo el mismo montaje óptico y condiciones de captura. Identificar el método que ofrezca el mejor desempeño para ser utilizado como técnica principal de reconstrucción en el sistema desarrollado.

Este trabajo busca así aportar una evaluación sistemática y práctica de las técnicas de reconstrucción más utilizadas, proporcionando información útil para investigadores que deseen implementar sistemas de proyección de franjas en entornos experimentales reales, particularmente cuando se utilizan equipos de proyección y captura de bajo costo.

Aunque existen revisiones exhaustivas sobre métodos de reconstrucción mediante proyección de franjas [29, 31, 33], dichas contribuciones se centran principalmente en el análisis teórico de los algoritmos, en su sensibilidad al ruido o en estrategias matemáticas de optimización. Sin embargo, no se identificaron estudios que presenten una comparación experimental integral de estas técnicas utilizando un mismo montaje óptico, la misma geometría y las mismas condiciones de calibración, especialmente en sistemas de bajo costo basados en triangulación. Esta ausencia en la literatura constituye el vacío que aborda este trabajo y define su aporte original: proporcionar una evaluación práctica, sistemática y cuantitativa del desempeño real de varias técnicas de proyección de franjas bajo condiciones experimentales controladas y reproducibles.

El trabajo se centra en la medición de superficie 3D mediante la proyección de luz estructurada, evaluando varias técnicas de reconstrucción basadas en patrones de franjas. En particular, se implementaron y compararon diferentes variantes del método de corrimiento de fase (Phase Shifting)—incluyendo las versiones de 3, 4, 5 capturas y la modalidad a color— así como la perfilometría por transformada de Fourier. Estas técnicas permiten adquirir la información topográfica del objeto mediante una cámara fija y procesarla posteriormente en el software desarrollado para la reconstrucción.

2. Descripción de las Técnicas de Reconstrucción 3D

Este trabajo se basa en analizar la deformación que sufren las franjas que se proyectan sobre un objeto. Esta deformación se debe a la topografía o relieve del objeto a reconstruir. La información contenida en las deformaciones pasa por un algoritmo único, que contiene una serie de técnicas de reconstrucción 3D, que permiten obtener un reconstrucción topográfica del objeto evaluado.

2.1 Esquema de sistema de proyección de luz estructurada.

En la Fig. 1(a) se muestra el esquema del montaje utilizado, que consiste de dos brazos; en donde uno de ellos, se realizará la proyección del sistema de franjas sobre la superficie del objeto (L) y en el otro brazo se realizará la observación del sistema de franjas deformado por el objeto (D). Entre el brazo de proyección y de observación existe un ángulo Θ ; la deformación de las

franjas es debida a la topografía del objeto. Si la superficie del objeto es plana, el brazo de observación captará un sistema de franjas con una separación no uniforme, la

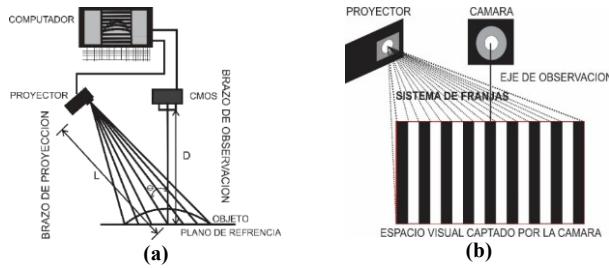


Figura 1. a) Esquema del montaje, (b) Componentes principales del esquema experimental. Fuente: Autor(es)

cual se caracteriza por una frecuencia portadora principal (o promedio), por otro lado, si la superficie no es plana, las franjas dejarán de ser paralelas, deformándose de acuerdo a las características del objeto.

2.1.1 Proyección del sistema de franjas

El sistema de franjas sobre el objeto se obtiene mediante un proyector DellM115HD con iluminación LED, donde este se encarga de proyectar unas franjas a blanco y negro o a color, creadas mediante un algoritmo en MATLAB, donde se puede controlar en tiempo real la amplitud, el periodo y la fase. Es importante establecer un ángulo entre los ejes de los dos brazos, si el ángulo es de cero grados, el sistema de franjas no se observará deformado, aunque haya un objeto muy deformado; también deberemos calcular una distancia entre las franjas sobre el plano de referencia que llamaremos P_o .

2.1.2 Observación del sistema de franjas

El plano donde se ubica el objeto lo llamaremos plano de referencia Fig. 1(a). Para mayor sencillez en el montaje y análisis matemático se ajustó un ángulo de cero grados entre el brazo de observación y la normal del plano de referencia.

Para obtener la información deseada en tiempo real, es necesario codificar la imagen (sistema de franjas) y enviarlas al computador para su análisis. Para este trabajo se utiliza los sensores de estado sólido, estos utilizan la tecnología conocida como CMOS para la transferencia de carga desde las celdas sensibles a los registros de lectura [7,8].

Los sensores CMOS (semiconductores de óxido metálico complementario) pueden recolectar y almacenar portadores de carga minoritarios, generados por la radiación luminosa, en pozos de potencial. Estos sensores ofrecen múltiples ventajas frente a otros tipos, como la ausencia de distorsión geométrica en la imagen, un tiempo de respuesta rápido a cambios de iluminación (conocido como lag), insensibilidad a campos magnéticos, tamaño compacto, alta densidad de sensores por unidad de superficie, bajo peso, gran linealidad en los niveles de gris y la capacidad de seleccionar, desde el hardware, una región específica del sensor, lo que aumenta los fps (cuadros por segundo) y reduce el tiempo de

adquisición. En este montaje se empleó una cámara a color con una resolución de 752x480 píxeles. La imagen digitalizada está compuesta por píxeles, cada uno de los cuales puede registrar un valor de intensidad luminosa digital o nivel de gris entre 0 y 255 (8 bits) [9].

2.2 Análisis del sistema de franjas

Se han desarrollado diversos métodos de perfilometría basados en patrones de luz estructurada, entre los que se encuentran técnicas como Moiré (TM) [10,11], perfilometría por cálculo de fase (PCF) [12,16], perfilometría por transformada de Fourier (PTF) [17,18], perfilometría por cálculo de modulación (PCM) [19], detección de fase espacial (DFE) [20], triangulación láser (TL) [21] y proyección de franjas con código de color, entre otras. Para este estudio, se han seleccionado dos técnicas de proyección de franjas: la perfilometría por corrimiento de fase (Phase Shifting, PS, en algunas de sus variantes) y la perfilometría por transformada de Fourier (PTF).

El plano de referencia, mostrado en la Fig. 1(a), se define como el plano situado en la región de máxima focalización o nitidez, donde los ejes ópticos del proyector y la cámara se intersecan. Este plano se alinea preferentemente con la zona de intersección de las profundidades de foco de ambos dispositivos, permitiendo la medición de la altura de un objeto situado en dicho plano. En este método, se evalúa un objeto ubicado en el plano de referencia.

2.2.1 Corrimiento de Fase (Phase Shifting)

La reconstrucción de objetos mediante proyección de franjas se fundamenta en la deformación que experimentan las franjas proyectadas sobre un objeto debido a la topografía de su superficie. Aunque la generación de patrones mediante la superposición de haces luminosos se ha utilizado como método de medición desde el siglo XIX, la interpretación cuantitativa de estos patrones fue prácticamente inviable hasta la llegada de las computadoras. Los avances tecnológicos que permitieron la fabricación de computadoras personales de alta potencia y sensores electrónicos de imagen, como los dispositivos de carga acoplada (CCD) y los semiconductores de óxido metálico complementario (CMOS), facilitaron el surgimiento y rápido desarrollo del análisis automático de patrones de franjas.

El análisis de los patrones de franjas se refiere a la recuperación o reconstrucción de la señal contenida en la fase. Algunas de las principales dificultades que esto representa son:

- ❖ El único observable es la intensidad total, en esta se tienen cantidades desconocidas, y enmascarada se encuentra una señal de interés, que también es desconocida.
- ❖ Debido a la periodicidad, la fase solo puede ser determinada con una ambigüedad de 2π .

La técnica más utilizada para la detección de la señal de interés, es lo que se conoce como corrimiento de fase o PS (Phase-Shifting). En la técnica de PS, una serie de patrones de franjas es generada introduciendo un desplazamiento lineal.

Las condiciones ideales para la aplicación de la técnica de PS son las siguientes:

- ❖ La intensidad luminosa del patrón de franjas se encuentra en el rango de operación lineal del sensor utilizado.
- ❖ Las franjas son capturados con la diferencia de fase exacta a la cual se ajustó el algoritmo correspondiente.
- ❖ Durante la captura digital de las franjas, todas las perturbaciones son pequeñas (cambios globales de intensidad, vibraciones, turbulencia de aire, etcétera).

Aplicando el PS encontraremos un mapa de fase, donde no han sido corregidas las falsas discontinuidades introducidas en el proceso interferométrico, a esto se conoce como fase envuelta o wrapping. El proceso de eliminación de dichas discontinuidades en la fase recuperada es conocido coloquialmente como desenvolvimiento de fase o unwrapping.

Una expresión general para la intensidad registrada se puede escribir [22];

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \beta(x, y) + \phi] \quad (1)$$

Donde,

$$2\pi f_0 x + \beta(x, y) = \varphi(x, y) \quad (2)$$

Siendo $\beta(x, y)$ la información topográfica y $2\pi f_0 x$ la fase de la frecuencia portadora y f_0 la frecuencia portadora de las franjas en la dirección x , luego, la intensidad registrada queda,

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \phi] \quad (3)$$

En tanto que, a , b y ϕ son funciones de las coordenadas espaciales. Aquí $a(x, y)$ es la intensidad media o iluminación de fondo y $b(x, y)$ contraste de franjas, ϕ es la diferencia que se introduce y permite controlar el número de corrimientos a registrar según la variante de la técnica de Phase Shifting.

Para recuperar la fase $\varphi(x, y)$, se describe un grupo de métodos de fase llamada perfilometría en la medición (PMI). PMI es la técnica más ampliamente utilizada hoy para la medición de fase y también se ha aplicado con éxito en la holográfica y Moiré. Técnicas de PMI se pueden dividir en dos categorías principales:

- ❖ Los que toman secuencialmente datos de fase.
- ❖ Los que toman los datos de fase de forma simultánea.

Los métodos de la primera, se conocen como PMI temporal o TPMI, y los del segundo tipo se conocen como PMI

espacial. El punto de partida para todas las técnicas de PMI es la expresión de la intensidad Ec. 3. La característica esencial de todas las técnicas de PMI es que ϕ es una modulación de fase que se introduce y se controla de forma experimental.

La Ec. 3 contiene tres incógnitas a , b y ϕ , que requieren un mínimo de tres ecuaciones (mediciones de la intensidad) para determinar la fase. El desplazamiento de fase entre las mediciones adyacentes puede ser cualquiera entre los 0 y 2π . Por fase arbitraria desplaza ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 obtenemos

$$\begin{aligned} I_1 &= a + b \cos(\varphi + \phi_1) \\ I_2 &= a + b \cos(\varphi + \phi_2) \\ I_3 &= a + b \cos(\varphi + \phi_3) \end{aligned} \quad (4)$$

de estas ecuaciones se despeja φ

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{(I_2 - I_3) \cos \phi_1 - (I_1 - I_3) \cos \phi_2 - (I_1 - I_2) \cos \phi_3}{(I_2 - I_3) \sin \phi_1 - (I_1 - I_3) \sin \phi_2 - (I_1 - I_2) \sin \phi_3} \quad (5)$$

Existen muchas maneras de realizar el método de Phase Shifting. Sin embargo, todos usan múltiples imágenes y su propio algoritmo, cada algoritmo tiene su ventaja y su desventaja, teniendo como meta resolver ciertos problemas tales como, velocidad, la precisión y la geometría del objeto a reconstruir. En los siguientes métodos se proyectan franjas a blanco y negro, con un corrimiento determinado ϕ , que recordando es una modulación de fase que se introduce y se controla de forma experimental, el código realiza los desplazamientos correspondientes y para cada desplazamiento de las franjas realiza la captura correspondiente.

2.2.1.1 Técnica en tres capturas (phase shifting a 3 capturas wyant 1984) [23]

| Desplazamiento | Cálculo de la fase |
|--|---|
| $\phi_i = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$ | $\varphi = \tan^{-1} \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2}$ |

(6)

2.2.1.2 Técnica en tres capturas a color (phase shifting color)

Esta técnica se basa en el anterior método. Para lograr la captura de los datos en un solo disparo, se modifica la proyección de franjas, en el anterior método se proyectan franjas a blanco y negro y se realiza los desplazamientos correspondientes, para cada desplazamiento se realiza un disparo para la toma de datos, lo que cambia para esta técnica es que ya no se proyectarán franjas a blanco y negro, si no franjas a color, la cámara realizará un único disparo guardando la información simultánea de los tres planos

(R,G,B), el proceso de lectura de la información de cada plano se desarrollará internamente en el algoritmo creado.

$$\begin{array}{ll} \text{desplazamiento} & \text{Cálculo de la fase} \\ \phi_i = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4} & \varphi = \tan^{-1} \frac{I_B - I_G}{I_R - I_G} \end{array} \quad (7)$$

2.2.1.3 Técnica en cuatro capturas (phase shifting a 4 capturas Schwider, 1993) [24-25]

$$\begin{array}{ll} \text{Desplazamiento} & \text{Cálculo de la fase} \\ \phi_i = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} & \varphi = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \end{array} \quad (8)$$

2.2.1.4 Técnica en cinco capturas (phase shifting a 5 capturas hariharan et al 1987) [26-27]

$$\begin{array}{ll} \text{Desplazamiento} & \text{Cálculo de la fase} \\ \phi_i = -\pi, -\frac{\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}, \pi. & \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{7(I_2 - I_4)}{-4I_1 + I_2 + 6I_3 + I_4 - 6I_5} \right) \end{array} \quad (9)$$

2.2.2 Reconstrucción utilizando la transformada de Fourier [27]

La transformada de Fourier llamada así en honor a Joseph Fourier, fue desarrollada para funciones periódicas y no periódicas; esta transformada convierte una función del dominio espacial o temporal, al dominio de las frecuencias y viceversa.

Matemáticamente la transformada de Fourier de una función $f(x)$, está definida por:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i2\pi ux} dx \quad (10)$$

Donde u es una variable real. Si esta integral existe para todos los valores de $F(u)$, entonces, se dice que es la transformada de Fourier de la función $f(x)$. La función $f(x)$, tiene Transformada si

- ❖ Es absolutamente integrable, sobre un dominio infinito.
- ❖ En cualquier intervalo finito debe existir un número finito de máximos y mínimos.
- ❖ En este mismo intervalo de existir un numero finito de discontinuidades.

La transformada de Fourier inversa se define por:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) e^{i2\pi ux} du \quad (11)$$

La transformada de Fourier simplemente es un diagrama donde se reportan las frecuencias y amplitudes de las funciones senoidales utilizadas para la reconstrucción de cualquier función. Si la función no es periódica la transformada será una función continua de frecuencias. La información contenida en la transformada es la misma que posee la función original, la diferencia radica en la manera como se presenta la información. El análisis de Fourier

permite examinar la función en el plano frecuencial y no en el dominio espacial.

Partiremos con el patrón de franjas Ec. 1, donde f_0 es la frecuencia portadora de las franjas en la dirección x , para este método no tendremos en cuenta el parámetro que controla el corrimiento de fase $\phi(x, y)$, con esto la Ec. 1 quedará de la siguiente forma:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\beta(x, y) + 2\pi f_0 x] \quad (12)$$

Siguiendo el método de Takeda [29], reescribimos la Ec. 12;

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) e^{i2\pi f_0 x} + c^*(x, y) e^{-i2\pi f_0 x} \quad (13a)$$

con

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{i\beta(x, y)} \quad (13b)$$

donde $a(x, y)$ es la iluminación de fondo y $b(x, y)$ es el contraste de franjas. El patrón de la transformada de Fourier de las franjas con respecto a x , queda

$$G(f_x, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C^*(f_x + f_0, y) \quad (14)$$

Donde las letras mayúsculas denotan espectros de Fourier y f_x es la frecuencia espacial en la dirección x. El método de trabajo depende del paso del sistema de franjas y de las deformaciones sufridas por las franjas, se obtiene tres lóbulos separados. El lóbulo central corresponde al fondo continuo $A(f_x, y)$ y el plano de frecuencia y los lóbulos laterales contiene información sobre $C(f_x - f_0, y)$ y $C^*(f_x + f_0, y)$, los espectros de Fourier serán separados como se muestra esquemáticamente en la Fig. 2. Para obtener la fase es necesario la transformada inversa de alguno de los lóbulos laterales, esto se realizará aislando uno de los lóbulos mediante el uso de un filtrado,

$$C(f_x - f_0, y) = G(f_x, y) H(f_x - f_0, y) \quad (15)$$

Trasladándolo f_0 hacia el origen para eliminar la portadora y obtener $C(f_x, y)$,

$$C(f_x, y) = C(f_x - f_0 + f_0, y) \quad (16)$$

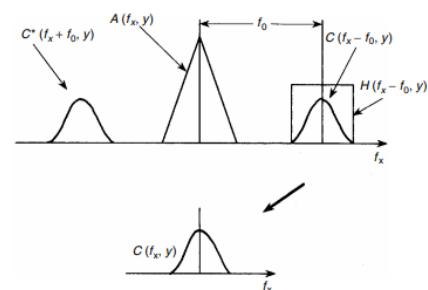


Figura 2. Espectros de Fourier de un patrón de franjas. Fuente: [30]. La transformada de Fourier inversa de esta función se calcula y, como resultado se obtiene la función compleja $c(x, y)$ de la Ec. 15.

$$c(x,y) = \text{FFT}^{-1}\{C(f_x,y)\}_{fx} \quad (17)$$

Calculando la fase de la función compleja obtenida Ec. 17, de la transformada de Fourier inversa. La fase es determinada por

$$\varphi(x,y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[c(x,y)]}{\text{Re}[c(x,y)]} \quad (18)$$

2.3 Desdoblamiento de la fase (unwrapping) [30]

La solución de φ es una función parecida a un diente de sierra y las discontinuidades ocurren cada vez que φ cambia por 2π .

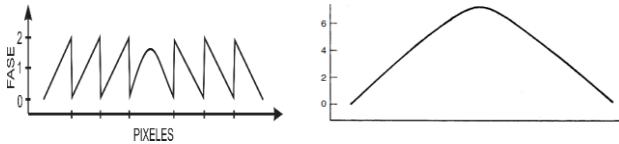


Figura 3. (a) Función característica de fase envuelta; (b) Función de fase continua obtenida por el unwrapping de los datos de (a). Fuente: [26]

El Unwrapping surge debido a que el paso final en el proceso de medida del patrón de franjas es desenvolver la fase a lo largo de una de la trayectoria, contando las discontinuidades cada 2π . Se añade 2π si el cambio es de -2π y se resta 2π si el cambio es de 2π . Si φ aumenta, la pendiente de la función es positiva, y viceversa para la disminución de fase. La clave para desarrollar algoritmos de desenvolvimiento de la fase es la capacidad para detectar con precisión los saltos de fase 2π .

3. Implementación y aplicación

3.1 Descripción del sistema

El sistema de reconstrucción se compone de tres módulos principales: el brazo de proyección, el brazo de observación (que conforman el montaje óptico) y el software de procesamiento, encargado de interpretar la información registrada y transformarla en medidas de altura, es decir, en la topografía tridimensional del objeto.

El montaje se configura siguiendo un esquema clásico de triangulación óptica. El brazo de observación se coloca perpendicular al plano de referencia, mientras que el brazo de proyección se ajusta a un ángulo adecuado que garantice una deformación suficiente de las franjas y, al mismo tiempo, que el patrón proyectado cubra la totalidad de la superficie a reconstruir. Esta disposición minimiza la complejidad matemática del sistema, ya que evita la necesidad de introducir correcciones adicionales por ángulos oblicuos en la cámara, lo que podría incrementar los errores de medición.

Con el fin de garantizar una comparación justa entre las distintas técnicas analizadas, todas las reconstrucciones se realizaron bajo un mismo protocolo experimental. Se utilizó la misma configuración geométrica del sistema (distancia

cámara–objeto, distancia proyector–objeto y ángulo de triangulación), el mismo campo de observación, el mismo plano de referencia y la misma calibración gamma. Asimismo, todas las técnicas emplearon un mismo periodo de franjas y la misma curva fase–altura obtenida mediante el patrón escalonado. Como objeto de prueba se empleó una pirámide de dimensiones conocidas, y para cada método se calcularon la fase envuelta, el unwrapping, la fase absoluta y la correspondiente topografía. Finalmente, se compararon las dimensiones reconstruidas (altura y base) con los valores reales mediante el error porcentual, lo que permitió evaluar la precisión y fidelidad geométrica de cada técnica bajo condiciones idénticas.

3.2 Descripción del montaje

El montaje óptico para la reconstrucción 3D se compone de tres bloques: un sistema de proyección, encargado de generar el patrón de franjas sobre la superficie del objeto; un sistema de adquisición, que registra dicho patrón tanto el plano de referencia como en presencia del objeto; y una unidad de control y procesamiento, que sincroniza la captura de imágenes y ejecuta el tratamiento numérico de la información.

La Fig. 4 muestra el sistema óptico implementado para el registro de información tridimensional mediante proyección de franjas, construido a partir del esquema presentado en la Fig. 1(a).

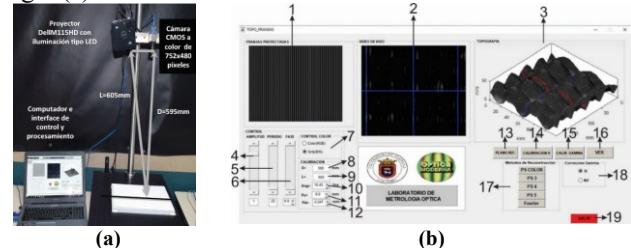


Figura 4. (a) Imagen del montaje óptico para el registro de información 3D usando la técnica de proyección de franjas. (b) Interfaz de trabajo

Una descripción de los componentes de este dispositivo, se presenta aquí;

- ❖ **Sistema de proyección:** se empleó un proyector DellM115HD con fuente de iluminación LED. Los patrones de franjas (monocromáticos o a color) fueron generados computacionalmente en MATLAB, permitiendo ajustar en tiempo real parámetros como amplitud, periodo y fase.
- ❖ **Sistema de observación:** se utilizó una cámara CMOS a color con el eje óptico dispuesto perpendicular al plano de referencia. La cámara fue montada sobre un soporte diseñado específicamente para garantizar su alineación. La distancia de la lente al plano de referencia fue de 59.5 cm, logrando un campo de observación de 215×135 mm. con un objetivo de Longitud focal 12 mm, Apertura ($f / \#$): $f / 1.8 - f / 16$,

tipo de lente de longitud focal fija, distancia de trabajo de $100 - \infty$ (mm).

- ❖ **Sistema de control y procesamiento:** la adquisición y el análisis de datos se realizaron con un portátil ASUSTek modelo X555DG con un procesador AMD A10-8700P Radeon R6, 10 Compute Cores 4C + 6G de 1,80 GHz, con una memoria ram de 8 GB utilizando, con un sistema operativo de 64 bits para digitalizar y procesar las imágenes captadas por la CMOS. La correcta integración de estos tres componentes permitió no solo la captura confiable de la información, sino también la implementación de rutinas específicas de calibración y reconstrucción. Estos procedimientos fueron gestionados a través de un software propio, cuya descripción detallada se presenta en la siguiente sección.

3.2 Software de reconstrucción

El software de reconstrucción fue diseñado para integrar de manera secuencial los procesos de generación de patrones, adquisición de datos, calibración y reconstrucción topográfica. Su funcionamiento puede describirse en las siguientes etapas:

Configuración inicial: selección de los parámetros del patrón de franjas a proyectar (modo monocromático o a color, amplitud, periodo y fase).

Carga de parámetros de calibración: incorporación de las correcciones geométricas y radiométricas necesarias para garantizar la linealidad del sistema, incluyendo los parámetros intrínsecos y extrínsecos, la calibración gamma y la fase correspondiente al plano de referencia.

Selección del método de reconstrucción: el usuario puede elegir entre distintos algoritmos implementados (Phase Shifting en sus variantes de tres, cuatro y cinco imágenes, o el método de proyección a color y transformada de Fourier).

Adquisición de imágenes: proyección secuencial de los patrones de franjas y registro mediante la cámara CMOS. El número de imágenes adquiridas depende del método seleccionado.

Cálculo de fase: determinación de la fase envuelta del objeto a partir de los patrones registrados, según el algoritmo de reconstrucción empleado.

Desenvolvimiento de fase (Unwrapping): aplicación de un algoritmo de desenvolvimiento básico para transformar la fase envuelta en una fase continua.

Proceso de Reconstrucción Topográfica



Figura 5. Diagrama de flujo del software de reconstrucción implementado. Se muestra la secuencia de etapas desde la configuración inicial de parámetros hasta la visualización final de la topografía 3D.

Sustracción de la fase de referencia: resta de la fase asociada al plano de referencia, obtenida en una etapa de calibración previa, con el fin de aislar exclusivamente la información topográfica del objeto.

Conversión fase-altura: aplicación de la curva de calibración establecida mediante el método de mínimos cuadrados, que permite asociar los valores de fase a alturas métricas reales.

Visualización de resultados: representación final de la reconstrucción tridimensional, disponible en formato 2D (mapa de alturas) o 3D (modelo topográfico interactivo).

Este flujo asegura que el sistema transforme de manera consistente los patrones de franjas proyectados en información topográfica cuantitativa, garantizando la trazabilidad y reproducibilidad del proceso Fig. 5.

Se desarrolló una interfaz gráfica en MATLAB Fig. 4(b) que permite controlar el proyector, la cámara y los parámetros de proyección. Esta interfaz facilita la captura secuencial de imágenes, la calibración del sistema y la ejecución de los algoritmos de reconstrucción. Su función principal es integrar en un único entorno el flujo completo de adquisición y procesamiento.

4. Implementación y aplicación

4.1 Corrección Gamma

La perfilometría por proyección de luz estructurada permite realizar reconstrucciones tridimensionales, pero es susceptible también a errores por distorsión gamma. Esta distorsión, causada por la respuesta no lineal de proyectores y cámaras digitales, altera la intensidad de las franjas

proyectadas, reduciendo la precisión de las mediciones. La fidelidad de estas reconstrucciones depende críticamente de la correcta interpretación de las intensidades luminosas. En este contexto, la corrección gamma se revela no solo como una herramienta útil, sino como una necesidad imperativa para garantizar la exactitud y robustez de los datos 3D obtenidos. La corrección gamma es un proceso no lineal que ajusta la relación entre el valor numérico de un píxel en una imagen y su intensidad luminosa real o percibida.

La relación entre la intensidad de entrada I_E y la intensidad de salida I_S , en estos dispositivos a menudo sigue una función de potencia, donde la I_S es proporcional a la I_E elevada a una potencia γ (gamma). Si $\gamma > 1$, la curva de respuesta es cóncava (oscureciendo las sombras y aclarando los medios tonos); si $\gamma < 1$, es convexa (aclarando las sombras y oscureciendo los medios tonos). La corrección gamma busca compensar esta no linealidad aplicando la función inversa, típicamente elevando los valores de intensidad a la potencia $1/\gamma$, para tratar restaurar una relación lineal entre la escena real y la representación digital final.

La implementación efectiva de la corrección gamma requiere una calibración de la respuesta gamma de la cámara y del proyector. Esto implica proyectar patrones de intensidad conocidos y medir la respuesta del sistema para determinar el valor de gamma. En este trabajo para calibrar experimentalmente la corrección gamma del sistema de proyección y captura, se proyectaron patrones con niveles de gris conocidos (intensidad de entrada I_E) y se registraron las respuestas de la cámara (intensidad de salida I_S), promediando 10 mediciones cada 10 niveles de gris. Se analizó el efecto de los parámetros de la cámara (gamma, ganancia, exposición, brillo y contraste), encontrando que los más determinantes fueron gamma, ganancia y exposición. Se identificó la configuración óptima (gamma = 100, ganancia = 0, exposición = -4) al obtener una curva entrada-salida suave, creciente y con buen rango dinámico. A partir de esta curva, se ajustó una función logarítmica Fig. 5(a) que permite invertir el comportamiento no lineal del sistema, obteniendo la ecuación de corrección gamma:

$$I_E = 32,986 \cdot \ln(I_S) - 62,3226 \quad (19)$$

Esta expresión se aplica punto a punto sobre las imágenes capturadas, de modo que las intensidades corregidas sean consistentes con los niveles de entrada originales. La Figura 5(a) presenta la curva de ajuste obtenida experimentalmente a partir de la relación entre las intensidad de entrada I_E y de salida I_S .

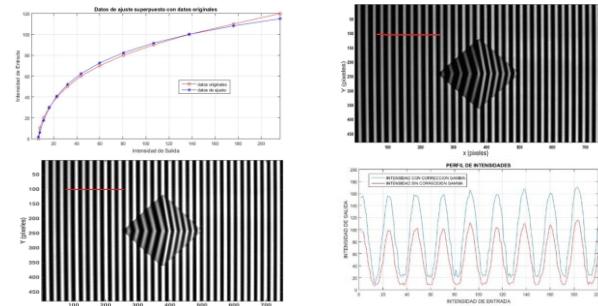


Figura 5. (a) Curva de ajuste que permite realizar la corrección gamma del proyector y la cámara. (b) imagen registrada de la franjas sin corrección gamma. (c). imagen registrada de la franjas con corrección gamma. (d) perfil de las franjas sin y con corrección gamma.

En la Figura 5(b) se observa la imagen de franjas registrada sin aplicar corrección gamma. La Figura 5(c) muestra la misma escena, pero con la corrección gamma aplicada, evidenciando mejora en el contraste en la regularidad del patrón. Finalmente, la Figura 5(d) compara el perfil de intensidades correspondiente a ambas imágenes (con y sin corrección), demostrando que la corrección permite recuperar una distribución de intensidad más uniforme, lo cual es fundamental para una reconstrucción precisa.

4.2 Calibración del campo visual

Para la calibración del campo visual se utilizó la resolución nativa del sensor, expresada en número de píxeles horizontales y verticales. Esta información permite establecer la relación entre las dimensiones digitales capturadas por la cámara y las dimensiones físicas del objeto en el plano de referencia, necesaria para determinar adecuadamente el tamaño del campo visual y la correspondencia espacial entre píxeles y milímetros.

La distancia entre la cámara y el plano de referencia desempeña un papel fundamental en esta calibración, pues define directamente el tamaño real del campo visual y el número de píxeles útiles disponibles para muestrear la superficie del objeto. Una distancia inadecuada puede provocar pérdida de información en los bordes, reducción de la resolución espacial o una distribución no óptima de los píxeles sobre el área medida. Por ello, es necesario analizar cuidadosamente la configuración geométrica del sistema a fin de garantizar una reconstrucción precisa y estable.

Aunque el sistema implementado no es telecentrico, se evaluó la posible influencia de distorsiones geométricas introducidas por la óptica. Para ello, se analizó la rectilíneidad de patrones lineales paralelos a las filas y columnas de la cámara en los extremos del campo de observación. Los resultados mostraron que la desviación respecto a la linealidad ideal se mantiene en una fracción de píxel, valor inferior al umbral de un píxel comúnmente aceptado en la literatura para considerar este efecto como

despreciable. Por tanto, las distorsiones geométricas pueden considerarse despreciables y no afectan de manera significativa la precisión de las reconstrucciones realizadas en este trabajo.

Aunque existen varios métodos más sofisticados para el cálculo del tamaño del pixel [29], en este trabajo se utilizó el más simple para tal fin. El tamaño del pixel lo calculamos dividiendo el tamaño del campo visual con respecto al número de píxeles. Recordemos que la resolución de la cámara es de 752 x 480 píxeles, donde los 752 son los píxeles por columnas que capta la cámara y los 480 son los píxeles que capta la cámara por filas; obtendríamos un tamaño de pixel para el eje x de 0,285 mm y para el eje y de 0,281, ver Fig. 6 (a).

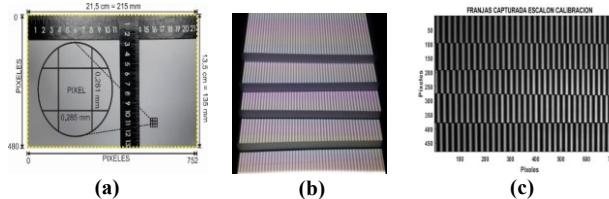


Figura 6. (a) Espacio visual captado por la cámara, (b) Franjas de escalón para la calibración, (c) Franjas de escalón para la calibración tomadas con la interfaz.

4.3 Calibración de alturas

En esta etapa se obtiene una ecuación que permite la conversión de valores de fase a alturas en milímetros. Para la calibración en alturas, debemos conocer con anterioridad la altura precisa de un objeto, en esta calibración utilizamos unos escalones con alturas previamente medida.

La altura de cada escalón fue medida con la ayuda de un vernier, cuya resolución es de 0.02mm, los valores se pueden ver en la Fig. 6(b) y Fig. 7(a), estos fueron cuidadosamente seleccionados (valores menores a 2π) con el propósito de evitar ambigüedades de fase. La resolución del vernier empleado (0.02 mm) es significativamente mayor que la resolución efectiva alcanzada por los métodos de reconstrucción evaluados, cuyos errores típicos se encuentran entre 0.2 y 0.5 mm. Por tanto, el instrumento utilizado no limita la precisión del proceso de calibración y proporciona una referencia suficientemente fina para el ajuste fase–altura.

Para el cálculo de la fase se proyecta un sistema de franjas sobre los escalones, Fig. 6(b y c), y posteriormente se calcula la fase. Para este análisis se utilizó el algoritmo de Phase Shifthing a 5 imágenes, una vez obtenida la fase, se aísla los valores de fase de cada escalón, obteniendo de ahí, el valor promedio de fase y la dispersión de los mismos (desviación estándar).

Obteniendo la fase en radianes de la escalera, se le asociara la altura real en milímetros de cada escalón, con esta relación se realiza el proceso para encontrar las ecuación de

calibraciones mediante el ajuste por mínimos cuadrados Fig. 7(b). Para este caso el comportamiento encontrado es lineal, de la forma que satisface la siguiente ecuación

$$Z = m\varphi + B \text{ (mm)} \quad (20)$$

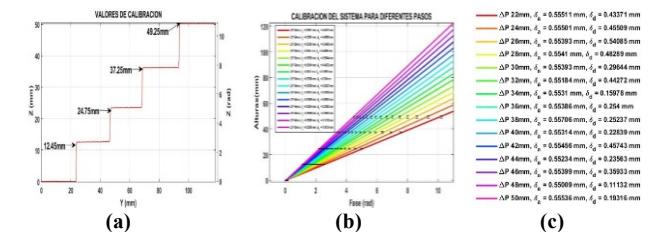


Figura 7. (a) Perfil topográfico de los escalones con sus respectivas relaciones de fase a alturas de cada peldaño, (b) Curvas de calibración, (c) resultados de la desviación estándar promedio de los datos medidos y de la desviación estándar del ajuste de la curva para cada paso.

La desviación estándar (δ_a) obtenida por las rectas de ajuste es de alrededor de 0.5 mm, analizadas para los pasos de las franjas (ΔP) que posee el proceso de reconstrucción, que va desde un paso mínimo de 22mm hasta un paso máximo de 50mm, con un intervalo de 2 mm por cada paso, esto quiere decir que en total se realiza este proceso para un total de 15 pasos; por otro lado, la dispersión de los datos (δ_d) se encuentran entre 0.2 y 0.4 mm aproximadamente, obteniendo un aumento en esta dispersión en la medida que disminuye el paso de las franjas, ver Fig. 7(b y c).

En la Fig. 7(c) podemos ver la desviación estándar que sufre la calibración. Teniendo en cuenta la desviación estándar promedio de los datos medios para cada paso δ_d , se puede ver que es menor para los pasos de menor dimensión. Por otro lado, la desviación estándar del ajuste de la curva de calibración δ_a , se mantiene constante. También observamos que para una altura de escalón determinada la dispersión se hace mayor, mientras el paso disminuye y de igual modo, esta aumenta si se aumenta la altura, para un valor de paso particular.

5. Resultados

Antes de presentar la comparación entre los métodos, es importante aclarar las métricas empleadas. La exactitud se evaluó comparando las dimensiones reconstruidas del objeto de prueba (altura y base) con las medidas reales obtenidas con el vernier, lo que permite cuantificar el error absoluto asociado a cada técnica. La precisión se determinó mediante la desviación estándar de las mediciones obtenidas durante el proceso de calibración fase–altura y refleja la estabilidad de cada método frente a variaciones en la fase recuperada. De este modo, la evaluación incluye tanto la exactitud geométrica como la repetibilidad del proceso de reconstrucción.

Para efectuar una comparación justa entre los distintos métodos de reconstrucción, todas las técnicas fueron

evaluadas bajo las mismas condiciones de captura, iluminación, geometría y parámetros de proyección. Tanto el periodo de las franjas, la distancia proyector–objeto, el ángulo de triangulación y la configuración óptica permanecieron constantes para todos los experimentos. Asimismo, todas las técnicas utilizaron la misma calibración gamma, el mismo plano de referencia y la misma curva de calibración fase–altura, con el fin de eliminar sesgos sistemáticos y atribuir las diferencias exclusivamente al método de reconstrucción.

La métrica seleccionada para la comparación fue el error en la medición de altura y base de un objeto patrón. Esta elección se justifica porque dichas magnitudes tienen significado físico directo, son fácilmente verificables mediante instrumentos independientes (vernier de 0.02 mm de resolución) y representan parámetros geométricos sensibles a errores de fase, linealidad fotométrica y ruido, lo cual permite evaluar el desempeño global de cada técnica. Este tipo de análisis es habitual en estudios experimentales de comparación de técnicas basadas en luz estructurada, como señalan Zuo et al. [30] y Zhang y Huang [28], quienes destacan el error geométrico como indicador primario de calidad de reconstrucción. Aunque existen trabajos que comparan aspectos algorítmicos de PSP y PTF, no se encontraron reportes que describan comparaciones experimentales completas utilizando un mismo montaje físico; por tanto, este estudio aporta una evaluación integral de desempeño en condiciones controladas.

Para garantizar el rigor científico y evitar que las diferencias observadas entre los métodos se deban a errores sistemáticos del hardware, se verificó previamente la contribución de las aberraciones ópticas y radiométricas del sistema. En primer lugar, se evaluó la distorsión geométrica de la cámara mediante patrones lineales, observándose desviaciones inferiores a una fracción de píxel en los bordes del campo visual (sección 4.2), valor por debajo del umbral típico que afecta de manera significativa la fase reconstruida. En segundo lugar, se aplicó la corrección gamma del sistema proyector–cámara (sección 4.1), de modo que todas las técnicas operaran bajo un comportamiento fotométrico lineal.

Finalmente, la resta de la fase del plano de referencia permitió eliminar los errores sistemáticos asociados a la geometría no telecentrica, asegurando que todos los métodos partieran de una misma fase base. Bajo estas condiciones, las aberraciones ópticas y radiométricas afectan por igual a todas las técnicas evaluadas, por lo que las diferencias en los errores de reconstrucción pueden atribuirse al desempeño intrínseco de cada método y no al hardware empleado.

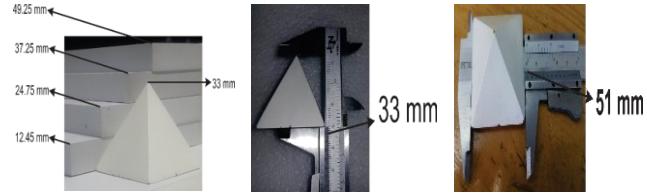


Figura 8. Medidas del objeto de prueba

La precisión de los métodos utilizados, se obtienen comparando las medidas obtenidas por los métodos implementados con las dimensiones reales del objeto de prueba. Para evaluar la precisión de los métodos implementados, se construyó un objeto con geometría piramidal con una altura conocida, de esta forma se puede comparar la medida reportada por la reconstrucción la cual es más fácil apreciarla graficándola con el perfil topográfico y las medidas del objeto de prueba, utilizando un vernier, ver Fig. 8.

En la primera etapa se aprecia las capturas de cada sistema de franja con sus respectivos desfases, la fase calculada, el resultado del Unwrapping y finalmente la topografía del objeto de prueba después de ser sometido a cada método de reconstrucción, Fig (9-13).

5.1 Phase Shifthing I captura a color

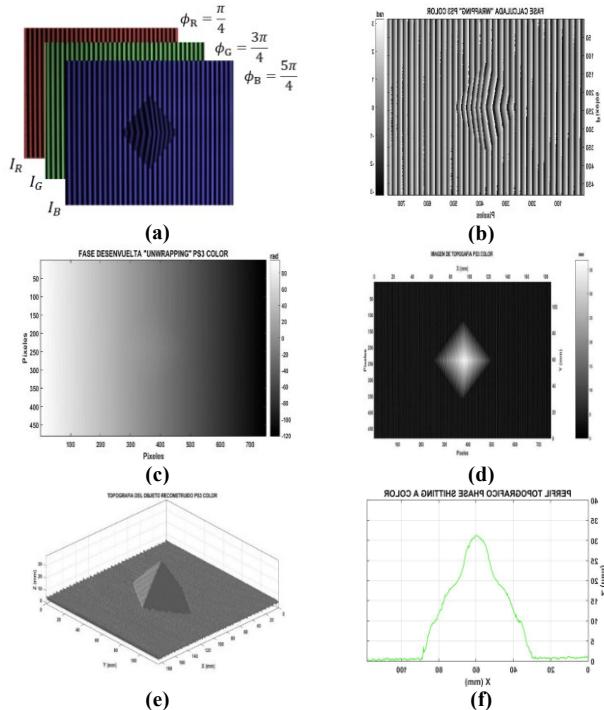


Figura 9. (a) Planos RGB de las franjas a color capturadas, (b) Fase calculada PS color, (c) Fase desenvuelta PS color, (d) Topografía objeto reconstruido vista superior PS color, (e) Topografía 3D objeto reconstruido PS color (f) perfil topográfico método PS a color

5.1 Phase Shifting 3 capturas

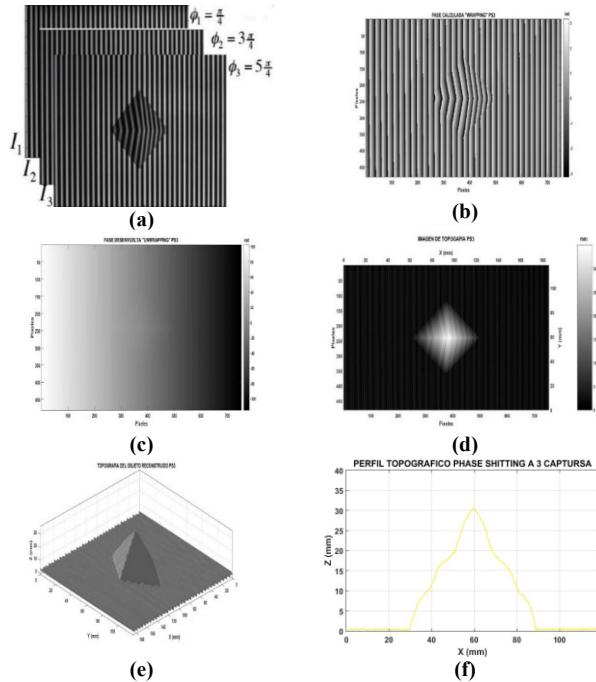


Figura 10. (a) Imágenes capturadas PS3, (b) Fase calculada PS3, (c) Fase desenvuelta PS3, (d) Topografía objeto reconstruido vista superior PS3, (e) Topografía 3D objeto reconstruido PS3, (f) perfil topográfico método PS3.

5.1 Phase Shifting 4 capturas

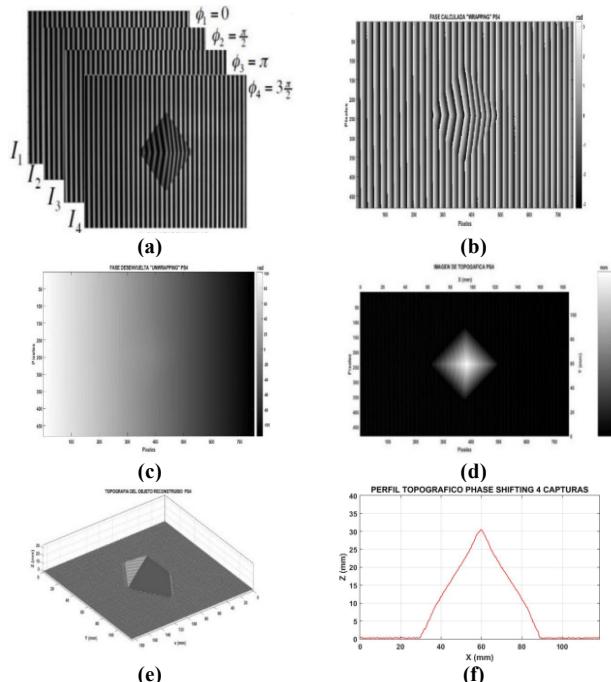


Figura 11. (a) Imágenes capturadas PS4, (b) Fase calculada PS4, (c) Fase desenvuelta PS4, (d) Topografía objeto reconstruido vista superior PS4, (e) Topografía 3D objeto reconstruido PS4, (f) perfil topográfico método PS4

5.1 Phase Shifting 5 capturas

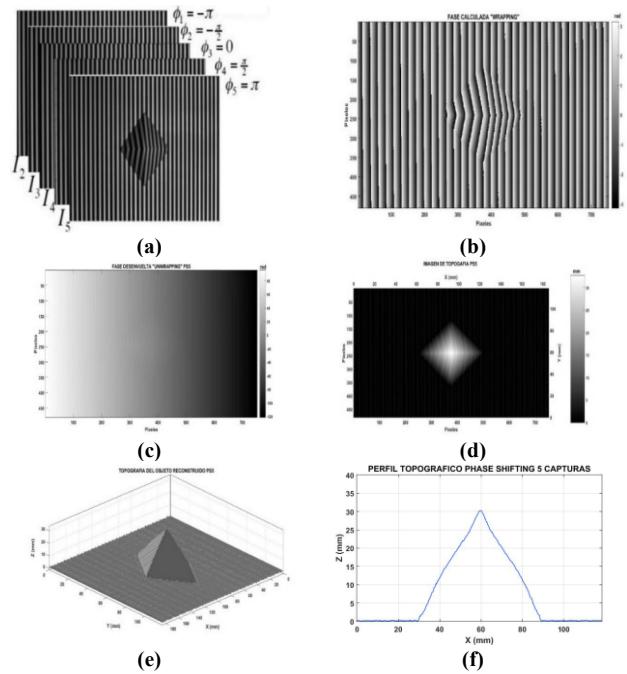


Figura 12. (a) Imágenes capturadas PS5, (b) Fase calculada PS5, (c) Fase desenvuelta PS5, (d) Topografía objeto reconstruido vista superior PS5, (e) Topografía 3D objeto reconstruido PS5, (f) perfil topográfico método PS5

5.1 Transformada de Fourier

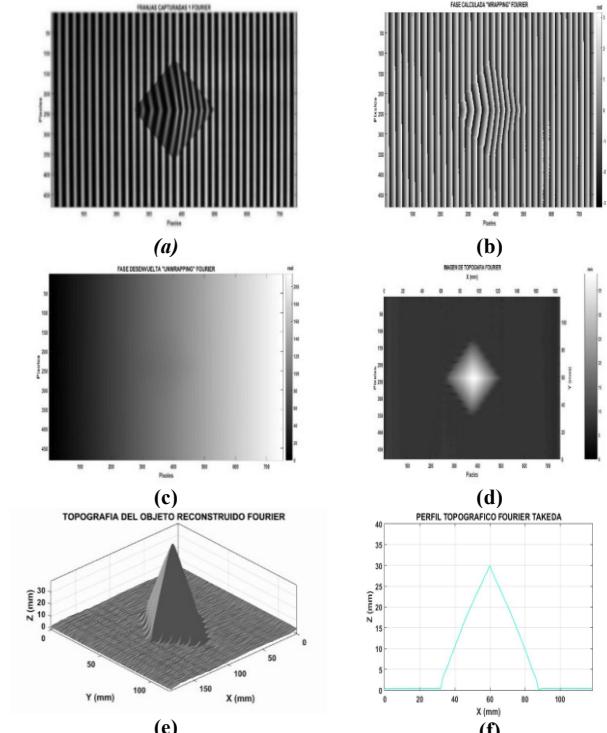


Figura 13. (a) Imagen capturada - Fourier, (b) Fase calculada -Fourier, (c) Fase desenvuelta - Fourier, (d) Topografía objeto reconstruido vista

superior - Fourier, (e) Topografía 3D objeto reconstruido - Fourier (f) perfil topográfico método TF.

En la Fig. [9-12] (f) podemos apreciar el resultado de cada método, graficando el perfil topográfico de cada método, realizando un análisis a los datos de estos resultados, podremos saber el porcentaje de error, obteniendo los presentados en la Tabla 1.

Con estos resultados llegamos a que el mejor método de reconstrucción es Phase Shifting a 5 capturas, esto debido a que este reconstruye más fielmente la forma tridimensional o topográfica del objeto de prueba con un error aceptable.

Tabla 1. Resultados con porcentajes de error de altura y base del objeto

| Método | Altura (mm) | Error (%) | Base (mm) | Error (%) |
|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| PS Color | 31.19 | 5.48 | 54.25 | 5.99 |
| PS 3 | 30.44 | 7.75 | 53.83 | 5.54 |
| PS 4 | 30.54 | 7.45 | 53.12 | 4.15 |
| PS 5 | 30.22 | 8.42 | 52.57 | 3.07 |
| Fourier | 29.86 | 9.51 | 52.33 | 2.60 |

En la última etapa de resultados realizamos la reconstrucción de 3 objetos utilizando el mejor método PS5, obteniendo los resultados presentados en al Fig. 14.

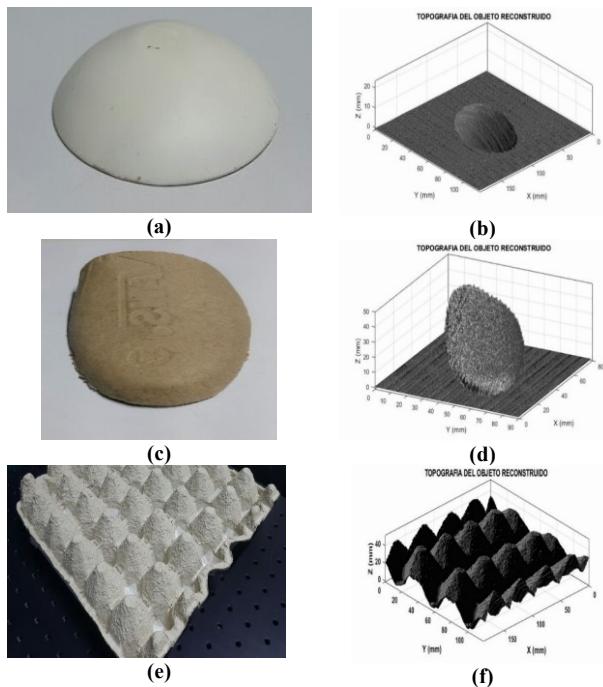


Figura 14. (a) Cuarta parte de una esfera, (b) Reconstrucción de una cuarta parte de una esfera. (c) Molde de zapatos, (d) Reconstrucción del molde para zapatos. (e) Cartón de huevos, (f) Reconstrucción del cartón de huevos.

Se realizó un análisis comparativo considerando la variabilidad inherente del sistema. Las desviaciones estándar obtenidas en la calibración fase–altura (Fig. 7c) muestran variaciones entre 0.2 y 0.5 mm, lo cual establece el nivel de fluctuación esperada debido al montaje y al procesamiento.

Al comparar estos valores con los errores reportados en la Tabla 1, se observa que las diferencias entre los métodos exceden sistemáticamente el nivel de variabilidad del sistema. En particular, el método PS5 presenta el menor error en la medición de la base (3.07 %) y uno de los valores más bajos en altura, consistentemente por debajo de los métodos PS3, PS4 y PTF. Dado que estas diferencias son superiores al umbral de ruido y dispersión medidos experimentalmente, constituye evidencia estadística suficiente para concluir que el método PS5 ofrece un desempeño superior en este sistema experimental.

5. Conclusiones

Se diseñó y construyó un sistema de reconstrucción 3D a partir de la técnica de proyección de franjas. El sistema implementado permite reconstruir objetos en un campo de observación de 215mm x 135mm. Y cuya configuración se describe en detalle en al Fig. 4 (a).

Como herramienta de apoyo al proceso experimental, se empleó una interface de usuario que permite el control automático del proyector de franjas, como el de la cámara que registra la información, ver Fig. 4 (b). Además de controlar varios aspectos de las franjas proyectadas, tales como: el paso, la amplitud, la fase, etc. Así mismo, esta interface permite seleccionar el algoritmo de reconstrucción con el que se pretende realizar la reconstrucción. Del mismo modo, la interface permite la visualización de la información tridimensional del objeto y poder almacenarla. Se implementaron varias técnicas de reconstrucción, para lo cual se elaboraron diferentes algoritmos, todos controlados por la interface de control.

Se evaluó diferentes algoritmos tales como PS3, PS3 a color, PS4, PS5 TF. En donde, el algoritmo que presentó mejores resultados fue el de PS5. Sin embargo, se debe tener en cuenta, que este utiliza mayor tiempo para su captura. Mientras que PS3 a color, es bastante rápido, pues solo es necesario una captura. Esta comparación fue realizada utilizando un objeto de prueba en forma de pirámide. En donde, fue posible reconstruirla por cada uno de los métodos anteriormente descritos, ver Fig. (9-13).

Se realizó un proceso de calibración de forma cuidadosa que nos permitió que el sistema puede medir alturas de con buena precisión. Para esto se utilizó unos escalones de altura conocida, ver Fig.(7) Se reconstruyó varios objetos, observándose buenos resultados. Finalmente se realizó la reconstrucción de parte de una esfera, de un molde para zapatos y de un cartón de huevos, donde se puede apreciar que los resultados son bastante buenos, ver Fig. 14.

En las reconstrucciones experimentales se observan ondulaciones locales en los mapas de fase y ligeras modulaciones residuales en el relieve. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura: en FTP puede

originarse por fugas de la portadora y solapamiento espectral durante la demodulación [25,30]; en PSP suele asociarse a descalibración del paso de fase (detuning), no uniformidad espacial y no linealidades fotométricas (gamma) del proyector/cámara [31–35]. Por ello se han considerado medidas de mitigación, como la corrección de gamma [33–35], la compensación de errores no lineales/detuning [31,32,37], con el fin de disminuir dichas ondulaciones y mejorar la fidelidad geométrica. Sin embargo, no fue lograda como se esperaba. Se tiene pensado en un trabajo futuro en donde se focalicen los esfuerzos en evaluar y mitigar estos errores con técnicas más actuales.

Referencias

- [1] D. M. Meadows, W. O. Johnson, and J. B. Allen, “Generation of surface contours by moiré patterns,” *Applied Optics*, vol. 9, no. 5, pp. 942–947, 1970. doi: 10.1364/AO.9.000942
- [2] M. Takeda and K. Mutoh, “Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes,” *Applied Optics*, vol. 22, no. 24, pp. 3977–3982, 1983. doi: 10.1364/AO.22.003977
- [3] V. Srinivasan, H.-C. Liu, and M. Halioua, “Automated phase-measuring profilometry of 3D diffuse objects,” *Applied Optics*, vol. 23, no. 18, pp. 3105–3108, 1984. doi: 10.1364/AO.23.003105
- [4] M. Rioux, “Laser range finder based on synchronized scanners,” *Applied Optics*, vol. 23, no. 21, pp. 3837–3844, 1984. doi: 10.1364/AO.23.003837
- [5] J. Sánchez, M. Molina, and N. Arias, “Construcción de un microscopio perfilométrico por interferometría de luz blanca,” *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, no. 36, 2020.
- [6] N. Arias, M. Molina, M. Suárez, J. Meneses, and T. Gharbi, “Codificador 2D de posición, desplazamiento y orientación utilizando un patrón de referencia periódico y la transformada de Fourier,” *Revista Bistua*, vol. 12, no. 1, 2014.
- [7] E. Spidell, “Selecting the optimum image sensors: camera tubes vs. solid-state arrays,” *Optical Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 158–163, 1984.
- [8] IDS Imaging Development Systems GmbH, “USB 3.0 uEye cameras,” Available: <https://es.ids-imaging.com/store/products/cameras/usb-3-0-cameras/ueye-cp.html> Accessed: Feb. 2025.
- [9] J. E. Meneses, “Análisis de sistemas de franjas en tiempo real con aplicación a la interferometría y la topografía de formas estructurales,” Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1990.
- [10] J. D. Gaskill, *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics*. Tucson, AZ: Optical Sciences Center, University of Arizona, 1978.
- [11] P. O. J. Scherer, *Computational Physics: Simulation of Classical and Quantum Systems*. Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [12] H. S. Abdul-Rahman, M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor, F. Lilley, and A. Abid, “Three-dimensional Fourier fringe analysis,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, no. 5, pp. 446–455, 2008. doi: 10.1016/j.optlaseng.2008.01.004
- [13] H. Abdul-Rahman, M. Gdeisat, D. Burton, and M. Lalor, “Fast three-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path,” in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*, Munich, Germany: SPIE, 2005. doi: 10.1117/12.611415.
- [14] H. Abdul-Rahman, M. Gdeisat, D. Burton, M. Lalor, F. Lilley, and C. Moore, “Fast and robust three-dimensional best-path phase-unwrapping algorithm,” *Applied Optics*, vol. 46, no. 26, pp. 6623–6635, 2007. doi: 10.1364/AO.46.006623
- [15] R. Cusack and N. Papadakis, “New robust 3-D phase-unwrapping algorithms: Application to magnetic field mapping and undistorting echo planar images,” *NeuroImage*, vol. 16, no. 3, pp. 754–764, 2002. doi: 10.1006/nimg.2002.1092
- [16] N. Arias, J. Meneses, M. A. Suárez, and T. Gharbi, “Medida de la orientación, posición y desplazamiento en el plano de un objeto por codificación de fase,” *Revista Bistua*, vol. 7, no. 2, pp. 70–76, 2009.
- [17] N. A. Arias et al., “A hand-held 3D laser scanning system with global positioning of subvoxel precision,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 274, 2011. doi: 10.1088/1742-6596/274/1/012068
- [18] N. A. Arias, P. Sandoz, J. E. Meneses, M. A. Suárez, and T. Gharbi, “3D localization of a labeled target by means of a stereo vision configuration with subvoxel resolution,” *Optics Express*, vol. 18, no. 23, pp. 24152–24162, 2010. doi: 10.1364/OE.18.024152
- [19] K. J. Gasvik, *Optical Metrology*, 3rd ed. Trondheim, Norway: Spectral Vision AS, 2002.
- [20] C. J. Wyant et al., “An optical profilometer for surface characterization of magnetic media,” *ASLE Transactions*, vol. 27, pp. 101–113, 1984.
- [21] C. J. Wyant, “Interferometric optical metrology: basic systems and principles,” *Laser Focus*, pp. 65–71, 1982.
- [22] J. Schwider, O. Falkenstorfer, H. Schreiber, A. Zoller, and N. Streibl, “New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry,” *Optical Engineering*, vol. 32, pp. 1883–1885, 1993. doi: 10.1117/12.143340
- [23] P. Hariharan, B. F. Oreb, and T. Eiju, “Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm,” *Applied Optics*, vol. 26, no. 13, pp. 2504–2505, 1987. doi: 10.1364/AO.26.002504
- [24] J. Schwider, R. Burow, R. Grzanna, R. Spolaczky, and K. Merkel, “Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources,” *Applied Optics*, vol. 22, no. 21, pp. 3421–3432, 1983. doi: 10.1364/AO.22.003421
- [25] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 72, no. 1, pp. 156–160, Jan. 1982. doi: 10.1364/JOSA.72.000156
- [26] Kjell J. Gasvik, *Optical Metrology*, 3rd ed., Trondheim, Norway: Spectral Vision AS, 2002.
- [27] D. W. Robinson and G. T. Reid (Eds.), *Digital Fringe Pattern Techniques for Measurement and Interferometry*, Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 1993.
- [28] S. Zhang and P. S. Huang, “Phase error compensation for three-dimensional shape measurement system based on the phase-shifting method,” *Optical Engineering*, vol. 46, no. 6, 2007.
- [29] J. Heikkilä and O. Silven, “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction,” *Proc. IEEE CVPR*, San Juan, PR, USA, 1997, pp. 1106–1112. doi: 10.1109/CVPR.1997.609468
- [30] C. Zuo, S. Feng, L. Huang, T. Tao, W. Yin, and Q. Chen, “Phase-shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 109, pp. 23–59, 2018. doi: 10.1016/j.optlaseng.2018.04.019
- [31] K. Hibino, M. Idesawa, and T. Yatagai, “Phase-shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform environments,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 14, no. 4, pp. 918–930, 1997.
- [32] M. Servin, G. Garnica, R. Medina, J. M. Lara, A. Caballero, and H. J. Escalante, “The general theory of phase shifting algorithms,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 24, pp. 21867–21881, 2009.
- [33] H. Guo, H. He, and M. Chen, “Gamma correction for digital fringe projection profilometry,” *Applied Optics*, vol. 43, no. 14, pp. 2906–2914, 2004.
- [34] T. Hoang, B. Pan, Z. Wang, and K. Qian, “Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 12, pp. 1992–1994, 2010.
- [35] Z. Li, X. Chen, et al., “Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for PMP,” *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 2, pp. 154–156, 2011.
- [36] C. Xu, et al., “Nonlinear error full-field compensation method for phase-shifting profilometry,” *Applied Optics*, vol. 61, no. 32, pp. 9360–9369, 2022.
- [37] Z. Liu, et al., “Motion-induced error compensation for phase-shifting profilometry,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 10, pp. 12632–12643, 2018.