



**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE MISANTLA**

**RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE
OBJETOS: COMPARACIÓN ENTRE LUZ
ESTRUCTURADA Y NUBE DE PUNTOS**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
SISTEMAS COMPUTACIONALES**

QUE P R E S E N T A
IGNACIO MARTÍNEZ ROJAS.

DIRECTOR:
DR. SIMÓN PEDRO ARGUIJO HERNÁNDEZ

CO-DIRECTOR:
DR. FRANCISCO JAVIER CUEVAS DE LA ROSA

MISANTLA, VERACRUZ

ENERO, 2020



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA

FECHA: 14 de Enero de 2020.

ASUNTO: **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS.**

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio de la presente se hace constar que el (la) C:

IGNACIO MARTÍNEZ ROJAS

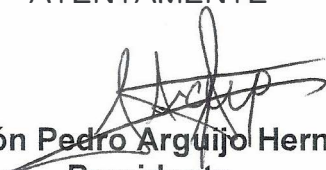
estudiante de la maestría en SISTEMAS COMPUTACIONALES con No. de Control 172T0802 ha cumplido satisfactoriamente con lo estipulado por el **Lineamiento de Posgrado para la obtención del grado de Maestría** mediante **Tesis.**

Por tal motivo se **Autoriza** la impresión del **Tema** titulado:

RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE OBJETOS: COMPARACIÓN ENTRE LUZ ESTRUCTURADA Y NUBE DE PUNTOS

Dándose un plazo no mayor de un mes de la expedición de la presente a la solicitud del examen para la obtención del grado de maestría.

ATENTAMENTE


Dr. Simón Pedro Arguijo Hernández
Presidente




MSC. José Antonio Hiram Vázquez López
Secretario


M.I.A. Roberto Ángel Meléndez Armenta
Vocal

Archivo.

Dedicatoria.

A la memoria de mi madre Esperanza Rojas Marín.

Le dedico esta tesis a mi madre, quien siempre estuvo ahí para mí, guiándome de manera correcta en la vida con principios y valores, por todos los aprendizajes que me dejó y los tantos consejos que me dio, siempre acompañándome a cada momento con ese amor incondicional. Quien siempre quiso verme alcanzando mis metas motivándome con todas sus fuerzas hasta el último día.

Sin su apoyo en cada una de mis decisiones estas no hubiesen sido posibles, porque siempre tuvo fe en mí y me aconsejó para salir adelante hasta el último momento. Porque no sé dónde estaría sin sus consejos, su cariño y amor.

Por que dónde quiera que este siempre esté orgullosa de mí.

Agradecimientos.

A mis formadores en el objetivo de obtener el grado de maestría, por su paciencia y esfuerzo en ayudarme a superarme.

Le agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por todo el apoyo brindado durante mi formación académica.

Al Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO) y su Dirección de Formación Académica por brindarme la oportunidad de hacer uso de sus instalaciones y equipos para la realización del presente trabajo.

De igual forma le agradezco al Dr. Francisco Javier Cuevas de la Rosa por su paciencia y el gran apoyo que me dio en la realización del presente trabajo durante mi estancia en el CIO al transmitirme los conocimientos requeridos en el área.

También le agradezco al Dr. Simón Pedro Aguijo Hernández por sus consejos y recomendaciones, quien se ha esforzado por transmitirme los conocimientos necesarios para salir adelante con el presente trabajo y me ha aconsejado durante estos dos años de preparación.

Les doy un especial agradecimiento a mis sinodales quienes se han tomado su tiempo para realizar las revisiones correspondientes al presente trabajo, con el fin de ayudarme a mejorar.

Asimismo, le agradezco a Juan Vicente Sosa y a Jaziel Salazar por las recomendaciones y el apoyo que mediaron durante los meses de estancia en el CIO.

Le agradezco a mis padres Ignacio y Esperanza, sin olvidar a mi hermano Eulises porque a pesar de las contrariedades que han pasado en este corto tiempo siempre me apoyaron y motivaron para que me esfuerce a ser mejor como persona y cumplir mis metas.

De todo corazón y con todo mi amor le agradezco a mi novia por estar ahí para mí, impulsándome siempre. Por ser la persona que me dio las fuerzas necesarias para salir adelante cuando más lo necesitaba, siempre a mi lado a pesar los momentos amargos por los que pasé. Por qué no sé qué hubiese hecho sin tu amor incondicional y tu paciencia para guiarme, desde lo más profundo de mi ser te doy las gracias Carmen Juliana.

Resumen.

Actualmente, la metrología óptica es uno de los campos de investigación por demás activos debido a las diversas aplicaciones industriales y científicas que tiene, por ejemplo, la reconstrucción 3D de objetos, la medición y caracterización de deformación de superficies, entre otras.

La proyección de luz estructurada, en la metrología óptica, permite la captura de valores procedentes de imágenes de forma discreta, la cual proporciona información cuantitativa del objeto bajo prueba. A partir de este conjunto de valores se generan un modelo matricial que contiene implícita información de forma, tamaño, volumen, etc.

En el ámbito de la reconstrucción tridimensional se realiza el uso de proyección de líneas o de una nube, lo cual permite realizar la medición automática del área seleccionada. En caso de la proyección de puntos se capturan miles de puntos por segundo. Se han reportado trabajos que realizan proyección y detección de puntos para obtener trayectorias, como es el caso del movimiento de un objeto, una mano o una pierna permitiendo determinar la dirección en la que se desplaza, estos tipos de medidas con respecto al desplazamiento, de manera general, se realizan en una escena con cierta profundidad la cual puede ser medida. Por otro lado, las técnicas basadas en el desplazamiento de fase (Phase Shifting) se han estudiado a profundidad, realizando la replicación de objetos de interés o la medición de estos a partir de un patrón base como control de calidad industrial [8]. Existen variantes en cuanto a las reconstrucciones tridimensionales basadas en proyección de franjas como lo es el uso de técnicas de tres, cuatro pasos o incluso mediante la transformada de Fourier donde esta técnica proporciona información simultánea de alturas para todos los puntos de la superficie de un volumen observado. Una ventaja clara de este tipo de técnicas es la gran calidad en cuanto a los detalles superficiales de un objeto por lo que una implementación usual es la metrología facial para aplicaciones biomédicas.

Una característica del uso de este tipo de técnicas es la reconstrucción tridimensional de objetos físicos en un entorno computarizado de manera completa en alta resolución, de forma no invasiva y mediante el desplazamiento de una secuencia de patrones consecutivos. En este trabajo se utiliza la proyección de luz estructurada junto con un ajuste polinómico para obtener la profundidad de un objeto bajo prueba y realizar su reconstrucción tridimensional. Se muestran resultados de ambos casos, el primero basado en Proyección de Puntos y el segundo mediante técnicas de desplazamiento de Fase (Phase Shifting), se realiza una comparación respecto a la medición de error, así mismo se determinan cuál de estos métodos requiere menor tiempo de procesamiento.

Índice general

Autorización de impresión	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Capítulo 1	1
Generalidades.	1
Introducción.	1
Planteamiento del problema.	2
Justificación.	2
Objetivos.	3
Propuesta de solución.	3
Alcances y Limitaciones.	4
Estructura de la tesis.	4
Capítulo 2	7
Marco teórico.	7
Imagen digital.	7
Procesamiento digital de imágenes.	8
Segmentación.	9
Umbralizado (método de Otsu).	9
Cálculo de centroides de una imagen binaria.	11
Algoritmo Flood fill.	12
Tipos de reflexión de luz	13
Superficie especular y difusa.	13
Reflexión Especular.	14
Reflexión difusa (Lambertiana).	15
Reconstrucción tridimensional.	15
Visión Estereoscópica.	16
Luz estructurada.	17
Desplazamiento de Fases (Phase Shifting).	18

Algoritmo de Itoh.....	19
Proyección de puntos.....	20
Ajuste de Curvas.....	20
Ajuste por Mínimos Cuadrados.....	21
Regresión Polinomial.....	21
Capítulo 3	23
Antecedentes.....	23
Capítulo 4	26
Implementación.....	26
Sistema Optométrico.....	26
Calibración eje Z por puntos.....	27
Calibración ejes X, Y con malla de puntos.....	28
Calibración ejes X, Y para desplazamiento de fase.....	29
Envolvimiento y desenvolvimiento de fase.....	29
Calibración eje Z Cambio de Fase.....	31
Capítulo 5	32
Resultados.....	32
Capítulo 6	38
Conclusiones.....	38
Referencias.....	39
Anexos.....	42
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX

Índice de figuras

Fig. 1: Metodología de cascada implementada.....	5
Fig. 2: Representación matricial de una imagen digital.....	7
Fig. 3: Imagen a color y sus correspondientes bandas de color.....	7
Fig. 4: Representación de la formación de una imagen.....	8
Fig. 5: Umbral óptimo.....	10
Fig. 6: a) Imagen Original. b) Imagen binarizada considerando el umbral óptimo por el método de Otsu.....	11
Fig. 7: Representación de imagen binaria $f(x,y)$	11
Fig. 8: La reflectancia es la radiación incidente reflejada por una superficie.....	13
Fig. 9: Reflexión de haz de luz.....	14
Fig. 10: Reflexión especular de luz sobre una superficie.....	14
Fig. 11: Reflexión difusa (Lambertiana) de luz sobre una superficie.....	15
Fig. 12: Detección de correspondencias en visión estereoscópica.....	17
Fig. 13: Implementación y captura de una proyección de luz estructurada. a) proyección de puntos, b) proyección de franjas.....	18
Fig. 14: Patrón sinusoidal con desplazamiento de fase.....	18
Fig. 15: Sistema Optomecatrónico implementado.....	26
Fig. 16: Representación de n número de desplazamientos del plano de referencia.....	27
Fig. 17: Representación de desplazamiento correspondientes en valores de 0 a n cm a razón de 0.5 cm.....	27
Fig. 18: a) Cuadrícula utilizada para calibración, b) Imagen capturada del plano Z donde la cuadrícula superpuesta sobre el plano de referencia.....	28
Fig. 19: a) Patrón con puntos de calibración, cuadrante no. 1, b) Patrón con punto en tonalidad azul a localizar mediante de la imagen de calibración.....	28
Fig. 20: Imagen de Calibración de ejes xy	29
Fig. 21: Función sinusoidal con 4 desplazamientos.....	30
Fig. 22: a) Fase envuelta grafica 3D, b) Grafica 2D de las discontinuidades de un vector de la fase envuelta.....	30
Fig. 23: a) Fase envuelta grafica 3D, b) Grafica 2D de un vector de la fase sin discontinuidades.....	31

Fig. 24: Ajuste de planos para calibración de eje z mediante la sumativa de k cantidades de $\pi/2$.	31
Fig. 25: Superficies Impresas para reconstrucción tridimensional de perfiles.	32
Fig. 26: Patrón de puntos proyectados sobre los objetos. a) Objeto 1. b) Objeto 2. c) Objeto 3.	32
Fig. 27: Patrón de franjas sinusoidales proyectadas. a) Objeto 1. b) Objeto 2. c) Objeto 3.	33
Fig. 28: Captura de plano de calibración para los ejes xy a razón de 11cm, 5cm y 3cm con respecto a cada cuádrate de puntos.	33
Fig. 29: Malla de 8 puntos para comprobación de calibración xy.	34
Fig. 30: a) Objeto de prueba (Busto de poliestireno), b) Reconstrucción tridimensional del objeto de prueba.	37

Índice de tablas

Tabla. 1: Técnicas de procesamiento digital de imágenes y ejemplo de las operaciones de éstas.....	8
Tabla. 2: Resultados de calibración de las imágenes.	28
Tabla. 3: Posiciones de coordenadas obtenidas por cada punto perteneciente a la Fig.28.	34
Tabla. 4: Posiciones de los puntos obtenidos en los ejes x,y de la Fig.29, se pueden apreciar también cuales son los 4 puntos externos de la figura en cuestión, así como los internos.	35
Tabla. 5: Error porcentual de la calibración xy . En la tabla se observan a que puntos corresponde cada distancia, de igual manera la distancia está dada en pixeles obtenidos, distancia obtenida (Centímetros) y la distancia real (Centímetros), se pueden observar.	35
Tabla. 6: Error porcentual de la calibración xy . En la tabla se observan a que puntos corresponde cada distancia, de igual manera la distancia está dada en pixeles obtenidos, distancia obtenida (Centímetros) y la distancia real (Centímetros), se pueden observar.	35
Tabla. 7: Resultados de reconstrucción tridimensional mediante proyección de puntos y cambio de fase.	36

Capítulo 1

Generalidades.

Introducción.

La visión artificial consiste en la deducción automática de la estructura y propiedades de un objeto tridimensional, mayormente dinámico, partiendo de una o varias imágenes bidimensionales. En esta área de conocimiento se aúnan conceptos de la física del color, óptica, electrónica, geometría, algoritmos, sistemas de computación, etc. [1]. La visión artificial parte de la idea de utilizar modelos matemáticos que permitan la identificación de objetos del mundo real, así como características que describen a estos.

El objetivo de un sistema de visión artificial es crear un modelo del mundo real a partir de imágenes. Un sistema de visión artificial recupera información útil sobre una escena a partir de sus proyecciones bidimensionales. Si las imágenes son proyecciones bidimensionales del mundo tridimensional la información contenida en estas no estará disponible de manera directa para su posterior análisis y estudio por lo que debe recuperarse. Los procesos de recuperación y procesamiento de información facilitan la identificación de formas, tonalidades, y profundidad de su entorno.

Se han implementados sistemas de visión artificial en diversos ámbitos como son la ciencia, la ingeniería y la industria. Algunos ejemplos del uso de un sistema de visión artificial son: En biomedicina análisis y conteo de células sanguíneas, cancerígenas o daño mitocondrial de estas; en reconocimiento biométrico ya sea para reconocimiento facial, reconocimiento de iris, biometría de oreja, etc.; en la reconstrucción tridimensional de objetos con el fin de obtener un modelo tridimensional de un modelo físico con muy alta precisión y exactitud.

Dichos métodos toman como base dos o varias imágenes que les permita la identificación uno o varios puntos de interés que sean coincidentes en las imágenes que se utilizan, el desarrollo de la reconstrucción tridimensional de objetos surge con la necesidad de efectuar mediciones precisas de la superficie de objetos. Algunas de estas mediciones ayudan a conocer las medidas exactas de objetos dañados por la erosión o cuyos relieves poseen formas que imposibilitan una medición física, dichos casos suelen observarse en objetos arqueológicos, fabricación de piezas milimétricas o replicación de objetos de gran valor. En este caso y como se mencionó, se utilizan varias vistas 2D del objeto bajo prueba, en las cuales se ven reflejadas las características físicas del objeto como son sus dimensiones, volumen y forma.

Existen dos métodos comúnmente utilizados para realizar una reconstrucción Tridimensional el primero utiliza dos cámaras para simular la manera en como las personas observan, este método se conoce como visión estéreo, y el segundo considera la proyección de luz estructurada, la cual al deformarse sobre el objeto adquiere información relevante de éste. En ambos casos se busca identificar la profundidad de una escena mediante el uso de imágenes.

Planteamiento del problema.

En este trabajo de investigación se utiliza la proyección de luz estructurada debido a su enfoque práctico en la reconstrucción tridimensional de objetos. Cabe mencionar que la proyección de luz estructurada se emplea de manera rutinaria en la metrología óptica al considerarla naturaleza ondulatoria de la luz.

Frecuentemente la superficie de los objetos sobre los que se proyecta luz estructurada presentan ciertas variaciones que llevan a diferentes cambios de altura o profundidad en el objeto, donde existirán problemas de contaminación por ruido a causa de emisiones de luz externa: luz natural o ambiental. Siendo un factor que causa este tipo de contaminación en la captura de información. Otra problemática es la presencia de sombras en las capturas de imágenes debido a una fuente de iluminación externa o causada por la propia luz proyectada sobre la superficie del objeto, este tipo de errores causados por la presencia de iluminación o sombras puede provocar la existencia de ciertos fallos en la reconstrucción tridimensional de un objeto presentando posibles deformaciones sobre la superficie digitalizada de éste.

Entre las técnicas de proyección de luz estructurada se destacan: proyección de franjas y proyección de una nube de puntos. Estos dos métodos permiten determinar la profundidad de una escena y los objetos pertenecientes a esta.

La mayoría de los trabajos que plantean una reconstrucción tridimensional de objetos hacen uso de técnicas de luz estructurada utilizando franjas que posteriormente se procesan por medio de la Transformada de Fourier lo que indica que estos trabajos se basan en el dominio de frecuencias. En algunos casos esto indica un alto coste computacional que se traduce en tiempo máquina. Por ello se consideró que, los métodos basados en el dominio de frecuencia no son factibles para la eficacia del sistema.

Justificación.

Actualmente, no existe un estudio concreto sobre las ventajas y diferencias de la proyección de puntos respecto a la proyección de luz estructurada en un mismo trabajo.

La literatura existente se basa en alguno de los dos métodos en concreto, esto con el fin de replicar los estudios previos y buscar características que ayuden a definir que metodología facilita una correcta reconstrucción tridimensional. Existe artículos y libros especializados en la proyección de franjas principalmente enfocados en la interpretación de los resultados bajo ciertas bases matemáticas, de igual forma se aplica lo mismo para la proyección de puntos, aunque en menor nivel.

En este trabajo se plantea la implementación de ambos métodos con el fin de determinar las ventajas y desventajas de dichos enfoques, así como la diferencia que pudiese existir entre ambos resultados obtenidos.

Objetivos.

Objetivo general.

Realizar la comparación en el error de la reconstrucción tridimensional de objetos con proyección de franjas haciendo uso de Phase shifting y proyección de puntos.

Objetivos específicos.

- Realizar una búsqueda de información referente a métodos proyección de luz estructurada.
- Determinar los algoritmos que permitan una correcta reconstrucción tridimensional.
- Establecer los medios de captura y proyección de luz estructurada.
- Establecer el tipo de superficies óptimas para el uso de las técnicas basadas en proyección de luz estructurada.
- Determinar que métodos son los más comunes en la reconstrucción tridimensional de objetos, considerar el tiempo computacional y realizar una comprobación de la precisión de estos.
- Realizar una calibración de las imágenes tomadas permitiendo la obtención de medidas reales en milímetros o centímetros comprobables con la superficie del objeto para determinar el grado de error presente.

Propuesta de solución.

Se plantea la elaboración del modelo de reconstrucción tridimensional, haciendo uso de dos métodos basados en proyección de patrones de luz estructurada los cuales son cambio de fase (phase shifting) y proyección de puntos. Para ambas metodologías es necesario implementar distintos algoritmos los cuales permiten realizar mediciones concretas de los datos de entrada y salida para los siguientes casos:

- Capturar y extraer información de una imagen que permitan generar una matriz de datos la cual contengan valores referentes a la profundidad de una escena.
- Analizar los datos obtenidos de una serie de imágenes a las cuales se les haya aplicado algún tipo de proyección de luz con un patrón que permita realizar medición de profundidad.
- Implementar los algoritmos correspondientes para la interpretación de la información capturada y así obtener su correspondiente matriz de profundidad.
- Graficar y visualizar los objetos reconstruidos y sobre los cuales se calcula el error de reconstrucción respecto al objeto real.

Alcances y Limitaciones.

Alcances.

- El conjunto de algoritmos de este trabajo se realiza sin el uso de librerías enfocadas a la visión artificial por lo que la implementación del sistema puede llevarse a cabo en otra máquina teniendo en cuenta que el único requisito sería la utilización de Visual Studio como plataforma de lanzamiento para C#.
- Las herramientas programadas se desarrollaron en etapas, permitiendo realizar diversos pasos por separado como: captura de imágenes, calibración de ejes X e Y, cálculo de profundidad y exportación de resultados.
- La implementación de algoritmos en la programación sin el uso de librerías facilita la asociación o vinculación de los datos procesados sin la necesidad de instalar librerías pertenecientes a software de terceros lo que permite que el sistema se pueda mudar de ordenador en caso de requerirse.

Limitaciones.

- Se necesita un ambiente de luz controlado que permita la minimización de ruido de fondo en la captura de imágenes, así mismo, se requiere el uso de una cámara de alta resolución para obtener una reconstrucción con mejor precisión.
- Se requiere de un equipo de cómputo con poder de procesamiento suficiente para realizar los cálculos de la reconstrucción.
- Se necesita equipo mecatrónico el cual permita realizar desplazamientos precisos en el proceso de calibración.

Estructura de la tesis.

El primer capítulo contiene el planteamiento general de la tesis. El segundo capítulo aborda el marco teórico donde se describen las diferentes herramientas computacionales que se utilizaron, así como los conceptos que son requeridos para el entendimiento de la investigación. Los antecedentes del trabajo se abordan en el tercer capítulo, haciendo énfasis en la literatura consultadas para la realización de esta investigación, el cuarto capítulo engloba la implementación de los métodos y algoritmos que se utilizaron para la realización de este trabajo, el quinto capítulo describe los resultados obtenidos durante el proceso de implementación y la finalización de estos, el sexto y último capítulo consiste en las conclusiones obtenidas.

El presente trabajo utiliza una metodología en cascada como modelo de desarrollo, de esta forma se da orden a la serie de pasos implementados durante el desarrollo de esta investigación, permitiendo un enfoque metodológico al plantear las etapas implementadas en los procesos de prueba. Cabe destacar que en este modelo no se inicia una etapa o fase hasta que se completa la anterior, una vez que se finaliza una etapa se debe obtener un resultado o producto final que, al ser revisado, validado y aprobado, sirve como aproximación de un punto de partida para la siguiente etapa.

El modelo de cascada implementado conlleva una serie de pasos en los que se determinaron las siguientes etapas a seguir, ver Figura 1.

Como ya se ha mencionado el proyecto se enfoca a la reconstrucción tridimensional de objetos mediante técnicas de visión artificial enfocadas en la Metrología Óptica por lo que en la sección de definición se establecen las bases de esta y las nociones de lo que se desea realizar, así como los métodos o algoritmos que existen y se han realizado anteriormente. Con base a las definiciones previas se pretende formar un amplio criterio de la temática a desarrollar.

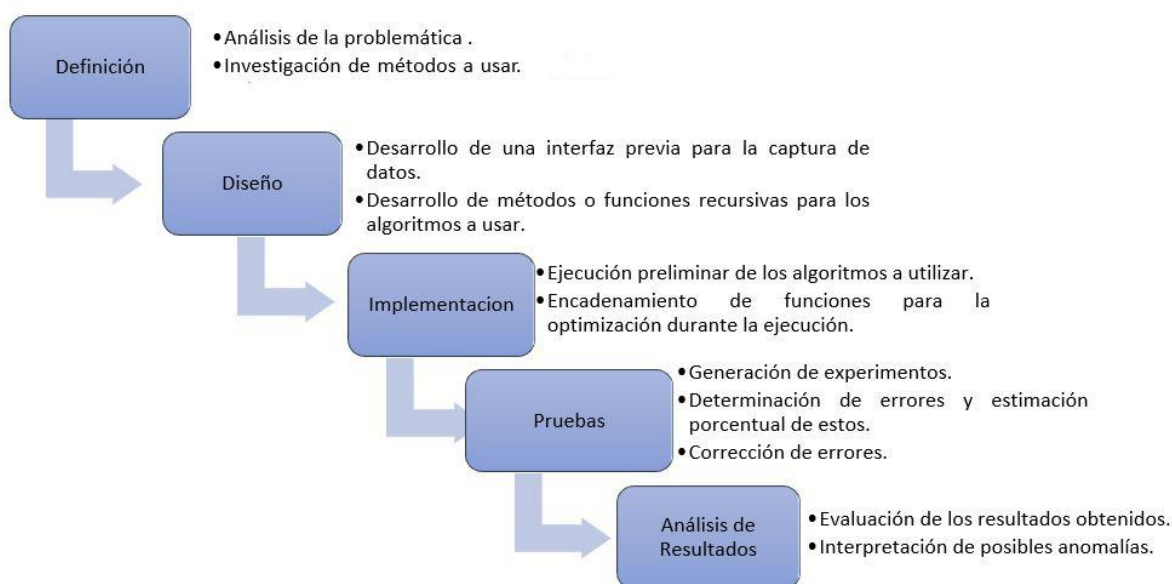


Fig. 1: Metodología de cascada implementada.

Los pasos del modelo en cascada de la Figura 1 se describe a continuación:

- **Definición:** busca analizar la problemática a solucionar, los posibles problemas que conlleva y la serie de métodos que se deben implementar en la resolución del problema.
- **Diseño:** determina las acciones a desarrollar de manera coordinada durante la realización del presente trabajo, en cuyo caso se planteó en primer lugar el uso de una interfaz gráfica que permita la captura de datos de forma amena, posterior a ello se planteó un orden interno que permita realizar llamamiento de métodos o funciones ya sea de uso único o de forma recursiva.
- **Implementación:** en esta fase se realiza la ejecución preliminar de los algoritmos utilizados con el fin de lograr encadenamientos entre estos que permitan una correcta funcionalidad del sistema a desarrollar, permitiendo una óptima ejecución de las funciones y un correcto funcionamiento.

- Pruebas: se basa en la realización de experimentos que determinen si existen posibles errores de diseño o implementación, facilitando así la depuración de errores en casa proceso que se realice.
- Análisis de resultados: última fase de la metodología enfocada en evaluar si los resultados obtenidos cumplen con los parámetros esperados, permite evaluar e interpreta la existencia de anomalías o errores de implementación con el fin de mejorar la funcionalidad y calidad del trabajo desarrollado.

Capítulo 2

Marco teórico.

Imagen digital.

Una imagen monocromática es una función bidimensional de intensidad de luz, $f(x, y)$, donde x, y son coordenadas espaciales y el valor de f en (x, y) es proporcional al brillo de la imagen en ese punto. Si se tiene una imagen a color, f es un vector y cada componente de éste indica el brillo de la imagen en el punto (x, y) en la banda de color correspondiente. Una imagen digital es una imagen $f(x, y)$ que se discretizó tanto en coordenadas espaciales como en brillo. [2]. Está representada por una matriz bidimensional; ver Figura 2, o una serie de matrices bidimensionales, una para cada banda de color; tal como se muestra en la Figura 3. El valor del brillo se denomina valor de intensidad o de nivel de gris.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1,N-1) \end{bmatrix}$$

Fig. 2: Representación matricial de una imagen digital.

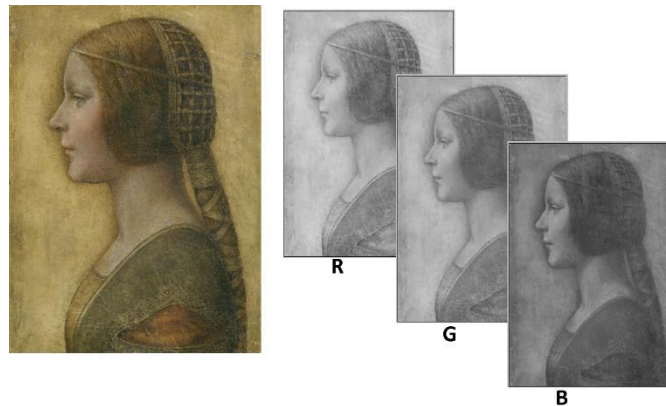


Fig. 3: Imagen a color y sus correspondientes bandas de color.

Cada elemento del arreglo se llama pixel. El tamaño del arreglo varía de acuerdo a su resolución espacial, $N \times M$, y presenta diferentes posibles niveles de gris.

Cada píxel de una imagen corresponde a una parte de un objeto físico en el mundo 3D. Este objeto físico está iluminado por una fuente de luz la cual se refleja y absorbe parcialmente por el objeto, ver Figura 4. Parte de la luz reflejada llega a un sensor que captura la escena y es responsable del valor registrado por el píxel específico. El valor registrado, por supuesto, depende del tipo de sensor utilizado para visualizar la escena, y de la forma en que este sensor responde al espectro de la luz reflejada. Sin embargo, como una escena completa se visualiza

por el mismo sensor, normalmente ignoramos estos detalles. Lo que es importante recordar es que los valores de brillo de los diferentes píxeles sólo tienen importancia en relación con los demás y no tienen sentido en términos absolutos. Por lo tanto, valores de píxeles entre diferentes imágenes sólo deben compararse si se ha tenido cuidado de que los procesos físicos utilizados para formar las dos imágenes sean idénticos, o si los valores de brillo de las dos imágenes se normalizaron de alguna manera para que los efectos de los diferentes procesos físicos se hayan eliminado.

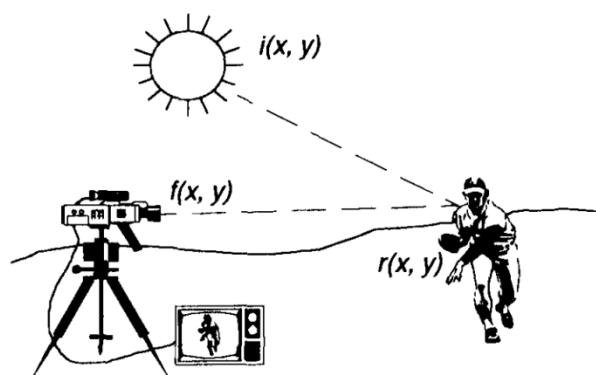


Fig. 4: Representación de la formación de una imagen.

Procesamiento digital de imágenes.

El procesamiento digital de imágenes es de naturaleza multidisciplinar. Utiliza ideas y técnicas de óptica, física de estado sólido, electrónica, arquitectura de computadoras, diseño de software, álgebra, estadística, teoría de gráficos y más, y las aplica a imágenes de todos los campos de las ciencias naturales y disciplinas técnicas. Se requiere conocimiento del área de aplicación, no sólo conocimiento de las técnicas de procesamiento de imágenes, para obtener la mejor solución a un problema en particular. Las técnicas y algoritmos del procesamiento digital de imágenes se enfocan a realizar algunas operaciones específicas a una imagen, con el fin de obtener una imagen mejorada o para extraer alguna información útil de ella [3]. Las operaciones de manipulación o procesamiento pueden agruparse, en términos generales, en cinco clases fundamentales: mejoramiento, restauración, análisis, compresión y síntesis de imágenes (Tabla 1). Cada clase contiene ciertas operaciones representativas.

Clases	Ejemplos de operaciones
Mejora de la imagen	Ajuste de brillo, mejora de contraste, promedio de imagen, convolución, filtrado de dominio de frecuencia, mejora de borde.
Restauración de imagen	Corrección fotométrica, filtrado inverso.
Análisis de imagen	Segmentación, extracción de características, clasificación de objetos.
Compresión de imagen	Compresión sin pérdidas y con pérdidas.
Síntesis de imagen	Imagen tomográfica, reconstrucción tridimensional.

Tabla. 1: Técnicas de procesamiento digital de imágenes y ejemplo de las operaciones de éstas.

Segmentación.

La segmentación es el proceso que subdivide una imagen en varias regiones uniformemente homogéneas. Cada región homogénea es un componente o un objeto de toda la escena. En otras palabras, la segmentación de una imagen se define por un conjunto de regiones que están conectadas y no se superponen, de modo que cada píxel en un segmento de la imagen adquiere una etiqueta de región única que indica la región a la que pertenece. La segmentación es uno de los elementos más importantes en el análisis de imágenes, principalmente porque en este paso los objetos u otras entidades de interés se extraen de una imagen para su posterior procesamiento, como la descripción y el reconocimiento [1]. Por ejemplo, en el caso de una imagen aérea que contenga el océano y la tierra, el problema es segmentar la imagen inicialmente en dos partes: un segmento terrestre y un cuerpo de agua o un segmento oceánico. A continuación, los objetos en la parte terrestre de la escena deben segmentarse adecuadamente y, posteriormente, clasificarse.

Existen principalmente cuatro tipos de técnicas de segmentación: técnicas de umbral, basadas en límites, basadas en regiones e híbridas. Los umbrales se basan en la suposición de que los grupos en el histograma corresponden al fondo u objetos de interés que pueden extraerse separando estos grupos del histograma. Además del umbral, muchos algoritmos de segmentación de imágenes se basan en dos propiedades básicas de las intensidades de píxeles en relación con su vecindario local: discontinuidad y similitud. Los métodos basados en la discontinuidad de píxeles se denominan métodos de extracción basados en límites o bordes, mientras que los métodos basados en la similitud de píxeles se denominan métodos basados en regiones. Los métodos basados en límites asumen que las propiedades de los píxeles, como la intensidad, el color y la textura, deben cambiar abruptamente entre diferentes regiones. Los métodos basados en regiones suponen que los píxeles vecinos dentro de la misma región deben tener valores similares (por ejemplo, intensidad, color y textura). Al combinar los métodos de detección de bordes con los de crecimiento de regiones se obtiene un mejor resultado de segmentación, lo cual da como resultado los métodos híbridos.

Umbralizado (método de Otsu).

El umbralizado es el proceso de separar una imagen, la cual que contenga un objeto y un fondo homogéneos, en diferentes regiones en función de su distribución de niveles de gris. La separación de los píxeles del objeto de los píxeles del fondo se realiza seleccionando un valor de nivel de gris K tal que todos los píxeles dentro de la imagen con $f(x, y) > K$ se clasifiquen como píxeles pertenecientes al objeto [4]. El objetivo del umbral es seleccionar un valor umbral que separe una imagen en dos niveles de gris distintos:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) \geq K \\ 0, & x < K \end{cases} \quad (1)$$

Típicamente, una imagen con dos niveles de gris se denomina imagen binaria. Se debe mencionar que diferentes valores de K dan resultados diferentes, por lo cual es por demás

importante seleccionar el valor adecuado de K . La clave para la selección de un valor óptimo de umbral es el histograma de una imagen, que define la distribución de los niveles de gris.

El método de Otsu es una de las técnicas más populares para encontrar el nivel de umbral óptimo. Esencialmente, la técnica de Otsu maximiza la probabilidad de que se elija el umbral para dividir la imagen entre un objeto y su fondo. Esto se logra seleccionando un umbral que ofrezca la mejor separación de clases, para todos los píxeles de una imagen, ver Figura 5.

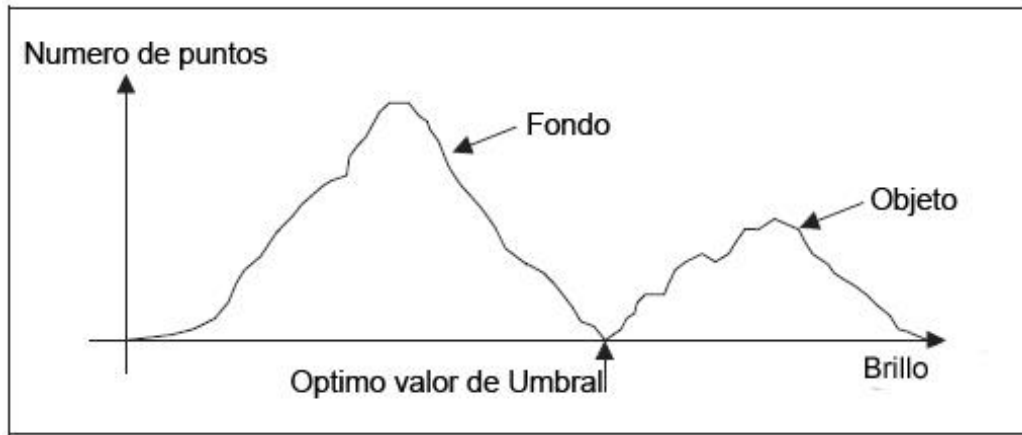


Fig. 5: Umbral óptimo.

La teoría está más allá del alcance de esta sección y solamente se indica de manera general cómo se implementa [5]. La base está en utilizar el histograma normalizado donde el número de ocurrencia de cada nivel de gris se divide entre el número total de píxeles en la imagen. Como tal, esto representa una distribución de probabilidad para los niveles de intensidad:

$$p(l) = \frac{N(l)}{N^2} \quad (2)$$

Esto se puede utilizar para calcular los momentos acumulativos de cero y primer orden del histograma normalizado hasta el nivel k th como:

$$w(k) = \sum_{l=1}^k l \cdot p(l) \quad (3)$$

Y

$$\mu(k) = \sum_{l=1}^k l \cdot p(l) \quad (4)$$

El nivel medio total de la imagen viene dado por:

$$\mu(k) = \sum_{l=1}^{N_{\max}} l \cdot p(l) \quad (5)$$

La varianza de la separabilidad de clase es entonces la relación:

$$\sigma_B^2(k) = \frac{(\mu T \cdot \omega(k) - \mu(k))^2}{\omega(k)(1 - \omega(k))} \quad \forall k \in 1, N_{\max} \quad (6)$$

El umbral óptimo es el nivel para el cual la varianza de la separabilidad de clase es máxima, es decir, el umbral óptimo T_{opt} es aquel para el cual la varianza:

$$\sigma_B^2(T_{opt}) = \max_{1 \leq k < N_{\max}} (\sigma_B^2(k)) \quad (7)$$

La Fig.6 muestra la implementación de Otsu en una imagen.

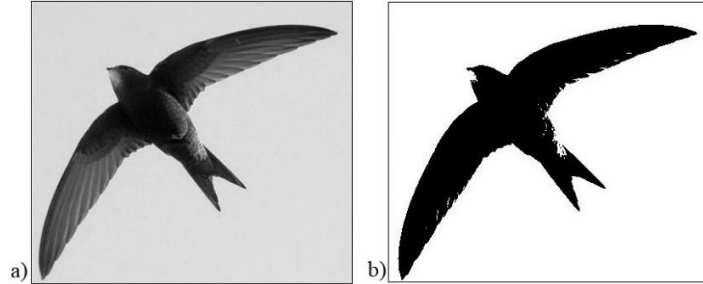


Fig. 6: a) Imagen Original. b) Imagen binarizada considerando el umbral óptimo por el método de Otsu.

Cálculo de centroides de una imagen binaria.

Una imagen binarizada puede contener uno o varios objetos que contrastan con el fondo y que presentan ciertas formas y agrupaciones, al determinar las formas de estos surgen ciertas implicaciones para determinar sus características, muchas veces cuando se tiene una imagen, el objeto en cuestión se puede encontrar colocado en diferentes partes del campo de visión, rotado o amplificado [6]. La detección de las distintas posiciones en las que un objeto se puede encontrar en una imagen implica una difícil detección del objeto y su forma, para ello hay que entender que la posición de un objeto en una imagen binaria puede ser definida por el centro del área de este, obteniendo algunas de sus propiedades geométricas tales como su área, y centro de masa.

Definiendo a la imagen binaria como $f(x,y)$ donde $f(x,y)=0$ pertenece al objeto y $f(x,y)=1$ pertenece al fondo, Fig.5.

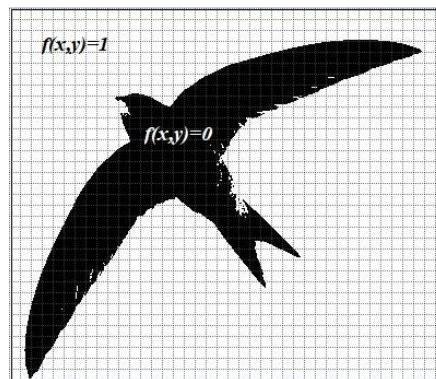


Fig. 7: Representación de imagen binaria $f(x,y)$.

Se puede determinar el área del objeto por medio de la integral de dicha función,

$$\iint_I f(x, y) dx dy \quad (8)$$

La posición de un objeto se puede determinar por un punto en concreto perteneciente a este y a una coordenada dentro de la imagen. Para ello se establecen los momentos sobre los ejes x e y , el momento del eje x está dado por la ecuación 9, mientras el momento del eje y está dado por la ecuación 10, donde (\bar{x}, \bar{y}) representan las coordenadas.

$$\bar{x} \iint f(x, y) dx dy = \iint x f(x, y) dx dy \quad (9)$$

$$\bar{y} \iint f(x, y) dx dy = \iint y f(x, y) dx dy \quad (10)$$

El centro de masa de un objeto puede calcularse mediante las ecuaciones 11 y 12 donde n representa el total de columnas, m representa el total de filas, i representa el índice de columnas y j el índice de filas.

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m i f(i, j)}{A} \quad (11)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m j f(i, j)}{A} \quad (12)$$

Algoritmo Flood fill

Flood fill se implementa con el fin de diferenciar y etiquetar objetos dentro de una imagen, este proceso se lleva a cabo posterior al umbralizado y cálculo de centroides de una proyección de puntos permitiendo obtener una matriz numerada de objetos, este método permite el etiquetado de dichos centroides con la finalidad de determinar sus correspondencias en las imágenes capturadas desde z_0 a z_n .

Este algoritmo se describe de manera concisa con recursividad, este método acepta una imagen de entrada de origen binario y regresa una imagen destino de color, donde las coordenadas del pixel p están dadas por las variables x e y mientras que la etiqueta o color se da como C que resulta ser cualquier color que no sea el del fondo de la fuente.

Dicho algoritmo se describe como:

- 1 flood Fill (Image SRC, Image DEST, int X, int Y, color C) {
- 2
- 3 if SRC(X,Y) is BACKGROUND return
- 4 if DEST(X,Y) is NOT BACKGROUND return
- 5 set the DEST sample a t (X,Y) to C

```

6   flood Fill (SRC, DEST, x-1, y , C)
7   flood Fill (SRC, DEST, x+1 , y , C)
8   flood Fill (SRC, DEST, x , y-1, C)
9   flood Fill (SRC, DEST, x , y+1 , C)
10  }

```

El método encuentra cada píxel que pertenece al mismo conectado a 4 componentes cercanos a p y le asigna el color C en el destino. Considerando la lógica subyacente al algoritmo de Flood fill. Si la ubicación (X, Y) denota un píxel de fondo de la imagen de origen, entonces este píxel no forma parte de ningún componente y no se debe hacer nada en el píxel de destino correspondiente. Además, si la ubicación (X, Y) denota un píxel ya coloreado en el destino, entonces no se debe realizar ninguna acción. Estos dos casos constituyen los casos base del algoritmo recursivo y se reflejan en las líneas 2 y 3. Sin embargo, en todos los demás casos, se debe colorear el píxel correspondiente del destino con el color C y proceder a rellenar cada uno de los 4 vecinos adyacentes, en el caso de etiquetado de 4 pixeles conectados, o los vecinos adyacentes, en el caso de etiquetado de 8 pixeles conectados [7].

Tipos de reflexión de luz

La luminosidad de un objeto depende de las reflectancia y características del material, por ejemplo, bajo las mismas condiciones de iluminación un objeto oscuro lucirá más opaco que un objeto brillante [8]. Los elementos de interés sólo pueden ser detectados únicamente cuando poseen diferencias de reflectancia en su entorno. La existencia y la irradiación se relaciona con la reflectancia de una superficie [9]. El ángulo de incidencia de la luz, así como el material del objeto y su forma inciden directamente en el tipo de reflectancia que el objeto puede poseer, ver Figura 8.

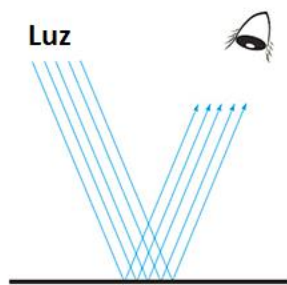


Fig. 8: La reflectancia es la radiación incidente reflejada por una superficie.

Superficie especular y difusa

Una superficie reflectante puede ser especularmente reflexiva, difusiva, o ambas. De hecho, la mayoría de las superficies reflectantes son especularmente reflexivas y difusivas al mismo tiempo. Se dice que las superficies son específicamente reflectantes cuando el componente especular de la luz reflejada es el prominente. Para las superficies difusivas, la mayoría de la radiación se refleja uniformemente en el hemisferio [10].

Una superficie óptica se describe como especular cuando refleja el haz de radiación incidente. En este caso, el ángulo que forma el haz reflejado con la normal de la superficie es igual al ángulo que forma el haz incidente con la normal de la superficie, ver Figura 9. Además, el haz reflejado se encuentra en el plano definido por el haz incidente y la normal de la superficie, denominado plano de orientación. Un ejemplo de una superficie reflectante es un componente óptico pulido, como un plano o un espejo curvo.

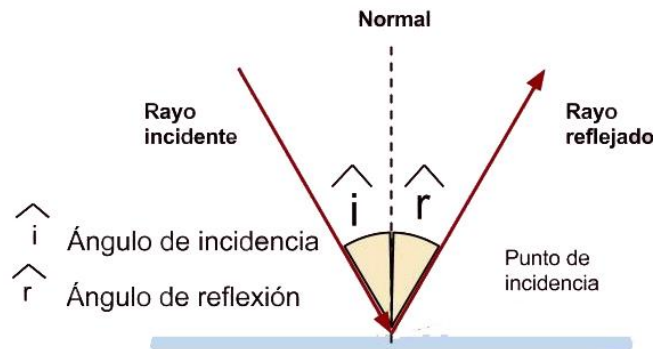


Fig. 9: Reflexión de haz de luz.

Una superficie que no refleja especularmente se conoce a menudo como una superficie dispersora. La dispersión de la luz es un fenómeno físico que ocurre cuando la radiación electromagnética interactúa con un límite con características de superficie rugosa, o cuando encuentra una partícula pequeña o una carga localizada dentro del medio. En todos estos casos, la trayectoria del haz cambia, y ya no sigue los principios de la óptica geométrica. Por lo tanto, la dispersión no es sólo un fenómeno de la superficie, ya que puede tener lugar en cualquier medio donde la radiación electromagnética pueda propagarse: vacío, gas, líquido, sólido, incluidos los materiales detectores.

Reflexión Especular.

Se dice que una superficie es especular o tiene una reflexión especular cuando esta está pulida y toda o la mayor parte de la energía que incide sobre ella se refleja en una única dirección, esto quiere decir que al ángulo de incidencia es igual al ángulo reflejado, ver Figura 10.

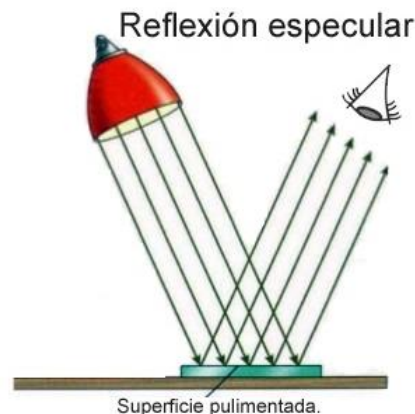


Fig. 10: Reflexión especular de luz sobre una superficie.

Reflexión difusa (Lambertiana).

Una superficie es difusa o tiene reflexión difusa cuando esta presenta una superficie rugosa y la energía que incide sobre esta se refleja en todas las direcciones, esto quiere decir que el ángulo de incidencia es desviado por la superficie del objeto generando una dispersión uniforme de la iluminación sobre él, ver Figura 11. En la óptica se utiliza el término dispersión para describir los efectos de superficie y volumen que poseen un objeto, se considera un efecto creado por el volumen, se produce cuando una partícula o carga interfiere con la propagación de la radiación y la desvía de su trayectoria inicial.

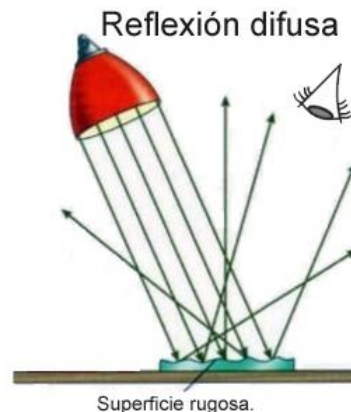


Fig. 11: Reflexión difusa (Lambertiana) de luz sobre una superficie.

Una superficie óptica se caracteriza generalmente por sus características de reflexión porque el acabado de cada superficie afecta la calidad de imagen y el rendimiento de todo el sistema óptico [10].

Reconstrucción tridimensional.

Las mejoras en los sistemas de adquisición de datos por computador han permitido una digitalización de precisión en las características que conforman un objeto o grupo de objetos [11], mediante el uso de este tipo de características se puede hacer una descripción del color, textura, forma, volumen, ancho y alto. La reconstrucción tridimensional hace uso de este tipo de características que pueden ser obtenidas mediante un sistema de cámaras que captura la información tridimensional que posee un objeto, posteriormente lo recalibra en las coordenadas x , y , y z las cuales describen la topografía del objeto de interés. En el desarrollo de la reconstrucción tridimensional de objetos existen dos grandes métodos el primero tiene que ver con métodos de visión estereoscópica (simula la visión humana con dos cámaras posicionadas usualmente en el mismo plano) y el segundo con proyección de luz estructurada.

La reconstrucción tridimensional hace uso de una serie de calibraciones que permiten convertir un grupo o una serie de imágenes consecutivas en una figura digital con propiedades similares a la original ya que presenta la forma, volumen y escala del objeto real.

Las características con las que cuentan las reconstrucciones tridimensionales las hacen esenciales en diversos campos de estudio como son la medicina e ingeniería.

Las técnicas de reconstrucción tridimensional hacen uso de la perfilometría 3D que se puede clasificar en dos tipos: métodos por contacto, métodos sin contacto.

- El primer método se considera invasivo debido a que interactúa directamente con los objetos, tal en el caso de una máquina de medición de coordenadas, (CMM-Coordinate Measurement Machine) la cual es una máquina que utiliza un puntero físico que se superpone contra el objeto de interés permitiendo hacer presión sobre este para determinar las coordenadas y almacenar éstas en un archivo [12].
- Los métodos sin contacto hacen uso de mediciones de luz mediante la triangulación óptica como es el caso de la estereovisión o la proyección de luz estructurada mediante un sistema de posicionamiento que aprovecha la sensibilidad a la fase de una mira periódica, que es registrada mediante el uso de un sistema de visión [13]. Los sistemas basados en triangulación pueden recuperar profundidad de a partir de la recombinación de dos o más imágenes de una escena partiendo de un algoritmo de correlación de imágenes digitales (DIC-Digital Image Correlation) que es una técnica óptica sin contacto capaz de realizar mediciones de forma y deformación 3D en escalas de longitud desde micras a metros [14].

Las técnicas de perfilometría con luz estructurada han obtenido medidas de objetos que van desde los nanómetros a milímetros de diferencia en el error que estas pueden contener con respecto al objeto real, al ser técnicas no invasivas se permite mantener el objeto de forma íntegra sin alteraciones de ningún tipo. Un claro ejemplo del uso de técnicas de luz estructuradas en México es el que se le ha dado en la arqueología, empleando en monumentos arquitectónicos como es el caso de estelas mayas, vasijas de cerámica, edificios precolombinos, entre otros [15].

Visión Estereoscópica.

El sistema de visión se basa en recuperar la tercera dimensión utilizando dos o más imágenes, en analogía con los sistemas de visión biológicos. Este principio se emula mediante la utilización de dos cámaras en posiciones distintas a cierta distancia para obtener dos imágenes de un mismo punto permitiendo recuperar su posición en 3D [3].

El uso de un sistema de visión estéreo plantea ciertos problemas a resolver durante su implementación como son la correspondencia de las imágenes y la correcta reconstrucción 3D. La correspondencia consiste en que para un punto de la imagen obtenida de una cámara deberá existir ese mismo punto en la imagen de la segunda cámara con el fin de obtener una coordenada de posición en un plano tridimensional. La reconstrucción trata de obtener, dados dos puntos correspondientes en ambos planos de la imagen las coordenadas 3D con respecto a un sistema de coordenadas del mundo real [16]. La reconstrucción por medio de visión estereoscópica se basa en cuatro pasos:

- Obtención de dos imágenes separadas por una misma distancia d .

- Identificación de puntos correspondientes en ambos planos de la imagen.
- Utilizar una triangulación para determinar las dos líneas en 3D en las que se encuentran los puntos de correspondencia.
- Interceptar las líneas para obtener el punto 3D.

La Figura 12 muestra de manera gráfica los pasos utilizados en la visión estereoscópica.

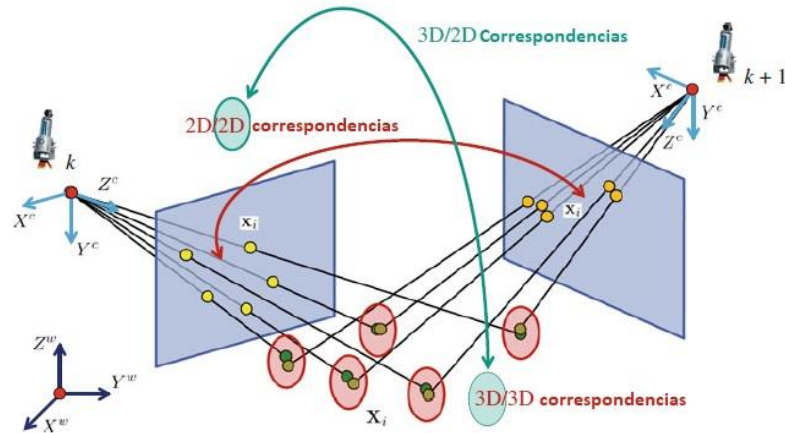


Fig. 12: Detección de correspondencias en visión estereoscópica.

Luz estructurada.

Entre los sistemas de escaneo 3D destacan los sistemas de luz estructurada. Estos utilizan técnicas no invasivas con las que se generan modelos de puntos 3D de alta calidad con unos valores de resolución y de precisión muy elevados. La proyección de luz sigue un patrón con una secuencia binaria que generalmente se desplaza de forma lineal, donde una cámara captura las imágenes del patrón de franjas, ondas o puntos, para cada posición sobre el objeto. [17]. La captación y el análisis de los datos se controlan mediante un software el cual procesa los datos y proporciona una imagen 3D del objeto.

Un sistema de luz estructurada al ser proyectado sobre una escena e interactuar con un objeto tiende a deformarse por la topología superficial del objeto, esta deformación se captura por un dispositivo de observación para la adquisición de imágenes (cámara), mediante el procesamiento de una serie de imágenes adquiridas se realiza la interpretación de las deformaciones que presenta la imagen con respecto al patrón de luz original lo cual permite generar un modelo tridimensional del objeto adquirido.

Este método ha jugado un papel muy importante en la actualidad, sobre todo con las mejoras en los equipos de proyección y captura permitiendo un mejor procesamiento de datos con mayor velocidad de captura y procesamiento y una mejor resolución. Dos claros ejemplos de la luz estructurada es el uso de un patrón de franjas sinusoidales y el uso de una nube de puntos los cuales presentan un agrupamiento perfecto que al ser proyectado permite recuperar información de un objeto real digitalizándolo en un entorno 3D, ver Figura 13.

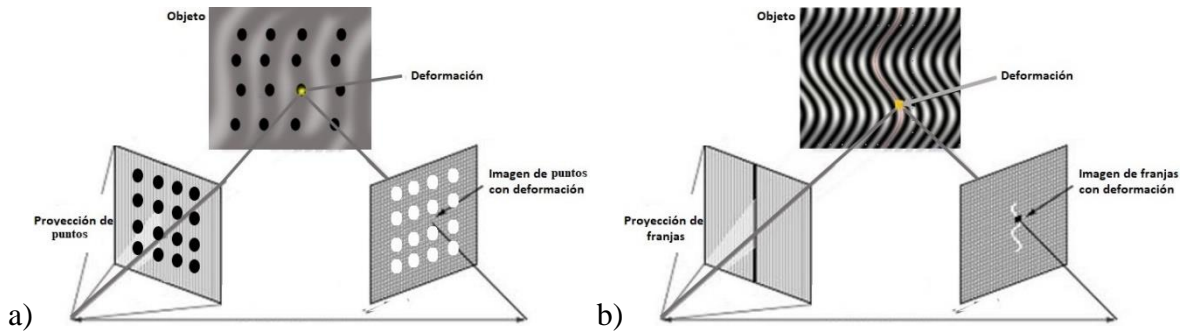


Fig. 13: Implementación y captura de una proyección de luz estructurada. a) proyección de puntos, b) proyección de franjas.

El método más utilizado para la extracción de características en la proyección de franjas es el método Fourier-Takeda [18]. A pesar de que Fourier-Takeda es muy reconocido en el uso de luz estructurada implementando la transformada de Fourier en 2D, tiene como principales desventajas el gasto computacional el cual se ve acrecentado en proporción del tamaño de la imagen, obteniendo así un cuello de botella computacional, además de tener ciertas limitaciones como es el hecho de que sólo funciona correctamente con objetos de topografía superficial suave. Por esta razón dicho método no fue considerado para su realización en el presente trabajo.

Desplazamiento de Fases (Phase Shifting).

El desplazamiento o cambio de fases es una de las técnicas más populares aplicadas generalmente al campo de la interferometría debido a que esta se encarga de realizar una medición que se aplica al fenómeno de interferencia de ondas (electromagnéticas.) Estas mediciones incluyen características que son propias del tipo de onda que se utilice y de los materiales sobre los que se propagan. Siendo descritas con respecto a las ondas de luz como una técnica que permite observar los cambios de desplazamiento, ver Figura 14.

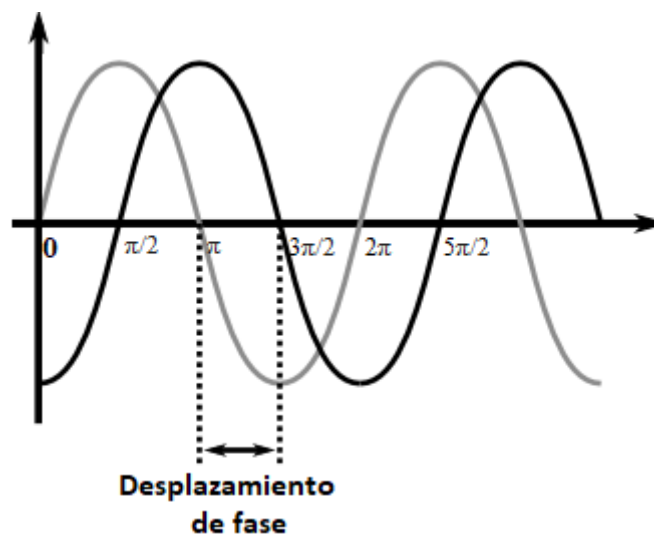


Fig. 14: Patrón sinusoidal con desplazamiento de fase.

La técnica de desplazamiento de fases varía de acuerdo a la cantidad de desplazamientos que se consideren necesarios para la obtención de características suficientes que describan la superficie de un objeto. Las más comunes son aquellas que sólo utilizan una cantidad mínima de desplazamientos de una función sinusoidal por lo que los más conocidos son los desplazamientos de tres y cuatro pasos.

En el área de metrología óptica se proyecta una serie de patrones de franjas periódicas desplazadas (phase-shifting) sobre un objeto bajo prueba, las cuales ofrecen información cuantitativa de la profundidad o deformaciones topográficas de la superficie del objeto [19]. La información se obtiene de la deformación que sufren las franjas al proyectarse sobre el objeto. Existen diversos algoritmos de desplazamiento de fase entre los que destacan los de tres pasos y cuatro pasos [20]. El método implementado en este trabajo es el de cuatro pasos. Las franjas que se proyectan se generan mediante una función sinusoidal, ecuación (13) que presenta un desplazamiento de fase [21]:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos(\phi(x, y) + \delta) \quad (13)$$

donde $A(x, y)$ indica la intensidad de fondo en la imagen, $B(x, y)$ es un factor que determina la visibilidad de las franjas observadas, $f(x, y)$ es la información a reconstruir y δ es el valor que señala los desplazamientos en la fase de las franjas que iluminan el objeto.

La topografía del objeto es directamente proporcional al término de fase $f(x, y)$. Existen diversos métodos para encontrar $f(x, y)$, por ejemplo, el método de Takeda que se basa en la transformada Fourier métodos [18], [22]. En nuestro caso se genera un sistema de ecuaciones que permite hallar las tres variables desconocidas: $A(x, y)$, $B(x, y)$ y $f(x, y)$. Como se mencionó se utiliza el método de cuatro pasos, donde los desplazamientos tienen valores de $0, \pi/2, \pi$ y $3\pi/2$, los cuales se expresan en la ecuación (14) como:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= A(x, y) + B(x, y)\cos(\phi(x, y)), \\ I_2(x, y) &= A(x, y) + B(x, y)\cos(\phi(x, y) + \pi/2), \\ I_3(x, y) &= A(x, y) + B(x, y)\cos(\phi(x, y) + \pi), \\ I_4(x, y) &= A(x, y) + B(x, y)\cos(\phi(x, y) + 3\pi/2). \end{aligned} \quad (14)$$

Algoritmo de Itoh.

La obtención de la fase se realiza en la ecuación (15) como:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}. \quad (15)$$

Se toma en cuenta que los valores obtenidos en la fase están entre los rangos desde $-\pi$ a π . El resultado obtenido con la función arco tangente se denomina como fase envuelta y la cual contiene discontinuidades.

Como se mencionó, las discontinuidades de 2π observadas no son parte de la fase real medida; en cambio, son valores introducidos por la función arco tangente. Por lo tanto, se utiliza un proceso de desenvolvimiento para eliminar estas discontinuidades no deseadas y obtener una fase continua [23]. El método de desenvolvimiento de fase utilizado es la integración en línea de las diferencias de fase envueltas descrito por Itoh [24]:

$$\phi(x) = \phi(x-1) + W[\varphi_w(x) + \varphi_w(x-1)] \quad (16)$$

$$\phi(x) = \varphi_w(0) + \sum_{n=0}^{x-1} W\{D[\varphi_w(n)]\} \quad (17)$$

Las ecuaciones (16) y (17) describen el método de Itoh [24], así como la estimación de la fase desenvuelta al integrar las diferencias envueltas de la fase envuelta.

Proyección de puntos.

La proyección de puntos o nube de puntos trata de un conjunto de información entregada por un sistema de medida, el cual debe de pasar por distintos procesos con el fin de mejorar la confiabilidad de los datos y obtener un correcto modelo tridimensional de una escena determinada [25]. Es importante señalar que los métodos clásicos de calibrado de cámaras consisten en algún tipo de regresión, en la que se aproxima una función de transformación de coordenadas a partir de la nube de puntos de la plantilla de calibrado.

En el presente trabajo se utiliza una nube de puntos en un patrón de luz estructurada con la finalidad de realizar una serie de proyecciones sobre ciertos objetos y obtener un modelo tridimensional del objeto, para ello se utiliza un mallado de puntos que será descrito en el capítulo 4.

Ajuste de Curvas

El uso de ajuste por curvas y los demás subtemas que se mencionan a continuación son necesarios para la implementación de la proyección de puntos, debido a que mediante un ajuste polinomial se puede recuperar la profundidad de una escena u objeto haciendo uso de un grupo de imágenes que determinan una distancia específica una de otra.

Un conjunto de datos también conocido como DataSet se define como una colección de valores tabulados que pueden ser utilizados para definir una serie de patrones por medio de estadística descriptiva, en ciencias e ingeniería de manera frecuente los experimentos producen dichos conjuntos de datos que van de $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, donde las abscisas $\{x_k\}$ suelen ser distintas entre sí. Un Dataset puede contener valores discretos a lo largo de un continuo. Es aquí donde se requiere la estimación de un punto entre los valores discretos que se tienen, para ello se utiliza una técnica llamada ajuste de curvas, dicha técnica permite tomar un conjunto de datos y a partir de ellos generar estimaciones intermedias mediante el uso de funciones de una o múltiples variables según sea requerido.

Existen diferentes formas de obtener aproximaciones intermedias de conjuntos de datos, las más comunes son aquellas que hacen uso de una función que puede ser simplificada que se ajuste a dichos valores, a estas aplicaciones se les conoce como ajuste de curvas.

Ajuste por Mínimos Cuadrados.

El ajuste por mínimos cuadrados es un procedimiento de análisis numérico donde un conjunto de datos se analiza con el fin de determinar puntos intermedios mediante una aproximación, la expresión del método de mínimos cuadrados se basa en la ecuación de la recta $y=mx+b$, determinando la pendiente con m y b como un punto de corte. En un conjunto de datos con cierto grado de error circunstancial el uso de mínimos cuadrados es el más utilizado, aunque comúnmente se busque una recta como patrón de dispersión de los datos mediante la que se pueden calcular puntos intermedios existen ciertos problemas con respecto al error que se pueden obtener entre los valores reales y las aproximaciones calculables mediante el ajuste de la recta. Una forma de minimizar el error es obtener una curva que minimice la discrepancia entre los puntos y la curva [26].

Regresión Polinomial

El ajuste polinomial se denomina como un problema de inferencia que se basa en datos multidimensionales donde se pretenden obtener los valores de parámetros con una mejor asociación a una curva, esto permite determinar si el modelo que se tiene es adecuado para el cálculo de estimación de valores intermedios. El método de mínimos cuadrados puede ser extraído de una regresión polinomial debido a que el ajuste de datos se puede adaptar para obtener un polinomio de segundo grado,

$$y = a + a_1x + a_2x^2. \quad (18)$$

En este caso, la suma de los cuadrados de los residuos es:

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)^2 \quad (19)$$

Al obtener la derivada:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_r}{\partial S_0} &= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \\ \frac{\partial S_r}{\partial S_1} &= -2 \sum x_i (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \\ \frac{\partial S_r}{\partial S_2} &= -2 \sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \end{aligned} \quad (20)$$

Partiendo de este tipo de ajuste se desarrollan un conjunto de ecuaciones normales

$$\begin{aligned}
(n)a_0 + (\sum x_i)a_1 + (\sum x_i^2)a_2 + \dots + (\sum x_i^n)a_n &= \sum y_i \\
(\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 + (\sum x_i^3)a_2 + \dots + (\sum x_i^n)a_n &= \sum x_i y_i \\
(\sum x_i^2)a_0 + (\sum x_i^3)a_1 + (\sum x_i^4)a_2 + \dots + (\sum x_i^n)a_n &= \sum x_i^n y_i.
\end{aligned} \tag{21}$$

Donde todas las sumatorias van desde $i = 1$ hasta n . Se puede observar que las tres ecuaciones anteriores son lineales y tienen tres incógnitas: a_0 , a_1 y a_2 . Los coeficientes de las incógnitas se evalúan de manera directa, a partir de los datos observados.

Consecuentemente, el problema de determinar un polinomio de segundo grado por mínimos cuadrados es equivalente a resolver un sistema de tres ecuaciones lineales simultáneas.

Este análisis se puede extender fácilmente a este caso más general. Así, se reconoce que la determinación de los coeficientes de un polinomio de m -ésimo grado es equivalente a resolver un sistema de $m + 1$ ecuaciones lineales simultáneas, ecuación 22.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \tag{22}$$

Un problema potencial en la implementación de la regresión polinomial en la computadora es que las ecuaciones normales algunas veces están mal condicionadas. Esto se presenta especialmente cuando se plantean polinomios de grado superior. En tales casos, los coeficientes calculados pueden ser altamente susceptibles al error de redondeo y, en consecuencia, los resultados serían inexactos. Entre otras cuestiones, este problema se relaciona con la estructura de las ecuaciones normales y con el hecho de que con polinomios de grado superior las ecuaciones normales pueden tener coeficientes muy grandes y muy pequeños. Lo anterior se debe a que los coeficientes son sumas de datos elevados a potencias.

Aunque las estrategias para disminuir el error de redondeo se basan en obtener dos o más dígitos a la derecha del punto decimal, una alternativa más simple consiste en usar una computadora con alta precisión. Por fortuna, la mayoría de los problemas prácticos están limitados a polinomios de grado inferior, en los cuales el error de redondeo generalmente es insignificante [26].

Capítulo 3

Antecedentes.

Ming-June Tsai y Chuan-Cheng propusieron un sistema de metrología de superficie de alta precisión mediante proyección de luz estructurada. Utilizaron un algoritmo de desplazamiento de fase para encontrar la fase envuelta y desenvuelta de los objetos, proponen un método de correspondencia que combina la codificación de niveles de grises y la detección de bordes de subpíxeles. Entre los aspectos se describe a la luz como un factor de importancia debido a que el exceso de esta puede causar una contaminación lumínica que desencadena una serie de errores de desenvolvimiento que imposibilitan el cálculo de niveles de gris, el uso controlado de la iluminación por otra parte influye en una correcta captura de la superficie, por lo que los valores obtenidos fueron satisfactorios debido a que se logró una reconstrucción parcial de buena calidad de los detalles superficiales de una moneda por lo que se consideró apto para micro escalas [27].

Zhongwei Li, Yusheng Shi y Congjun Wang propusieron un método de calibración para un sistema de luz estructurada debido a que este tipo de calibraciones son importantes para un correcto sistema de reconstrucción tridimensional, su trabajo se realizó mediante el uso de desplazamiento de fase donde se propone un algoritmo de interpolación que permita obtener una mayor exactitud en los valores de la imagen esto se logra mediante las calibraciones del proyector y la medición 3D, se utilizan este tipo de métodos debido a la velocidad en la que se pre procesan los datos y a ser un método no invasivo. Este tipo de sistemas difieren de un sistema de visión estero. En la literatura se pueden encontrar varios enfoques para calibrar los sistemas de luz estructurados, como las técnicas basadas en redes neuronales, ajuste de datos, o fase absoluta, en el que el proceso de calibración depende de la información de parámetros del sistema disponible y de la configuración del sistema. El desarrollo consistió en un mallado de puntos (9 x 11) sobre los que se proyectaba una serie de franjas desde diversos ángulos con el fin de determinar la orientación vertical y horizontal de las franjas a partir de la serie de puntos y en base a ello realizar un ajuste de los valores contenidos en la imagen, el sistema permitió una calibración de la cámara con respecto a la posición del proyector con resultados óptimos, con lo que se concluye que el uso de una serie de puntos de referencia para una correcta calibración es indispensable [28].

P. Navarro y colaboradores, plantearon como uno de sus objetivos, utilizar la tecnología integral del escáner láser 3D dirigida al levantamiento, intervención de restauración y puesta en valor del patrimonio histórico de México. Con la finalidad de preservar el patrimonio cultural en una base de datos digitales creados por el equipo de trabajo de escáner laser. Este trabajo concluyo en la generación de un ambiente tridimensional de patrimonios arquitectónicos como lo fue la pirámide de Quetzalcóatl, y el baluarte de San Juan de Ulúa donde la digitalización se llevó a cabo por medio de la proyección de una nube de puntos [15].

Byeong-Mook Chung propone un método de mínimos cuadrados mejorado para la relación de fase a altura en la perfilometría de proyección marginal, con el que se consiguen resultados

que muestran los efectos de la distorsión causados por la lente de las cámaras, para ellos aplica tres métodos diferentes, el primer método se basa en el cálculo de parámetros geométricos utilizando los ángulos y la distancia entre el proyector y el objeto, con lo que es difícil medir la posición del enfoque y la dirección de la línea central de la cámara. Por lo que es imposible considerar y medir el error de distorsión de la lente de la cámara, el segundo método se basa en un ajuste por mínimos cuadrados siendo el más flexible ya que permite disponer del sistema arbitrariamente evitando los problemas de precisión de los parámetros geométricos, utiliza dos series de valores de proyección, uno vertical y otro horizontal. Los errores de modelado se mejoraron considerablemente, aunque sólo se consideró la distorsión de la lente radial. El tercer método utiliza una tabla de consultas simples que relaciona los valores de la fase y las alturas de cada Píxel de la cámara. Este método obtiene la relación de fase a altura para cada píxel sin ningún análisis geométrico y luego almacena la información en la tabla, que utiliza para medir la altura por lo que es posible obtener el modelo exacto con toda la distorsión de la lente de la cámara o el proyector con este método, pero hay tantas funciones de modelado como píxeles de cámara. Este último método logró una mejoría con respecto al polinomial mediante la eliminación de ruido, en conclusión, se pudo expresar la relación de fase a altura como una ecuación, pero es difícil considerar completamente la distorsión de la lente, se consideró que el mejor sistema fue el último debido a que consideraba la distorsión de la lente, aunque el ruido de las imágenes sólo fue minimizado de manera parcial [29].

Huang, L., Chua de igual manera presenta un método de calibración de mínimos cuadrados para la perfilometría de proyección de franjas considerando la distorsión de la lente de la cámara donde se considera que la distorsión de la lente puede ser compensada mediante el mapeo de la fase de altura fuera del plano, con el método de mínimos cuadrados mediante el uso de varios bloques de calibración se proporcionan al sistema información de altura o profundidad diferente. Una vez que se conoce la altura fuera del plano de referencia, las dimensiones en el plano se pueden determinar mediante la calibración de la cámara con la altura conocida. El método propuesto sigue siendo muy flexible en la implementación real, al igual que en el método de calibración de mínimos cuadrados existente, ya que no se requiere una operación experimental adicional y el sistema también puede disponerse de manera arbitraria. Por otro lado, considerando la distorsión de la lente de la cámara, el método de calibración de mínimos cuadrados propuesto da un resultado con alta precisión y alta precisión, incluso bajo la condición de distorsión de la lente [30].

Chufan Jiang, Beiwen Li y Song Zhang propusieron la recuperación de fase absoluta píxel por píxel utilizando tres patrones de franjas de desplazamiento de fase sin el uso de marcadores, para ello implementaron los siguientes pasos:

- Segmentar el objeto medido en diferentes regiones utilizando un conocimiento aproximado de la geometría de la superficie a priori.
- Crear artificialmente mapas de fase en diferentes planos z usando restricciones geométricas del sistema de luz estructurado.

- Desarrollar el píxel de la fase por el píxel de cada región haciendo referencia al mapa de fase creado artificialmente.
- Fusionar las fases sin envolver de todas las regiones en un mapa de fase absoluto completo para la reconstrucción 3D.

Los resultados obtenidos se mostraron satisfactorios para este método de reconstrucción tridimensional [31].

X. Li y colaboradores implementaron un modelo de calibración para la perfilometría de proyección marginal con una técnica de desenfoque binario. Presenta teóricamente el principio de que los servidores de mapeo uno a uno son espacialmente invariantes para el entorno en la fase dominio cuando el proyector está desenfocado. En términos de este principio, sólo se introducen dos planos de referencia en el volumen de desenfoque del proyector. El modelo de cámara no lineal se utiliza para definir la otra restricción, es decir, los haces de luz reflejados. La combinación de estas dos restricciones calibrará la información 3D del objeto medido.

La perfilometría de proyección (FPP) desempeña un papel importante, la técnica de desenfoque binario que presenta es más difícil que los métodos de calibración existentes se apliquen directamente al calibrar el sistema de FPP donde el proyector está desenfocado ya que estos métodos requieren que el proyector esté enfocado. [32].

Diversos autores han publicado temas al respecto en los que se hace uso ya sea de forma total o parcial de los métodos que se implementan en la reconstrucción tridimensional de objetos, así como las descripciones de fenómenos físicos asociados a la deformación de óptica de la luz sobre los objetos ejemplos de consulta de ello son las leyes de Lambert en *Advanced Optical Instruments and Techniques* [10], a su vez existen libros publicados que describen y ejemplifican reglas de interferometría haciendo uso de proyecciones de luz estructurada e implementación de algoritmos de envolvimiento y desenvolvimiento de imágenes tal es el caso de *Interferogram Analysis for Optical Testing* [33], *Fringe Pattern Analysis for Optical Metrology* [34], *Handbook of optical metrology* [35], *Optical Metrology of Diffuse Surfaces* [36].

Capítulo 4

Implementación.

A continuación, se detalla el proceso de implementación de los diferentes algoritmos que se mencionaron en el capítulo 2. De manera introductoria se describe el arreglo Optomecatrónico que se utilizó para la realización del presente trabajo, este arreglo permitió la calibración de los modelos matemáticos, así como la correcta toma de imágenes de los objetos de prueba.

Sistema Optométrico.

El sistema Optomecatrónico, Fig.15, que se implementó durante la realización del presente trabajo está conformado por una serie de dispositivos los cuales son: una cámara, un proyector, un plano de referencia y un motor controlado a través de una tarjeta “*arduino uno*”. El funcionamiento del sistema se realizó efectuando una serie de órdenes de desplazamiento al motor que indicaban las revoluciones que este debía dar para hacer avances de 0.5 cm mediante los cuales se recorría la distancia necesaria para realizar las mediciones de calibración, así como la captura de los objetos.

La implementación de un plano de referencia fue necesaria debido a que sobre este se realizó la proyección de luz estructurada, permitiendo realizar la captura de los n número de planos necesarios para realizar una correcta calibración de la profundidad de la escena.

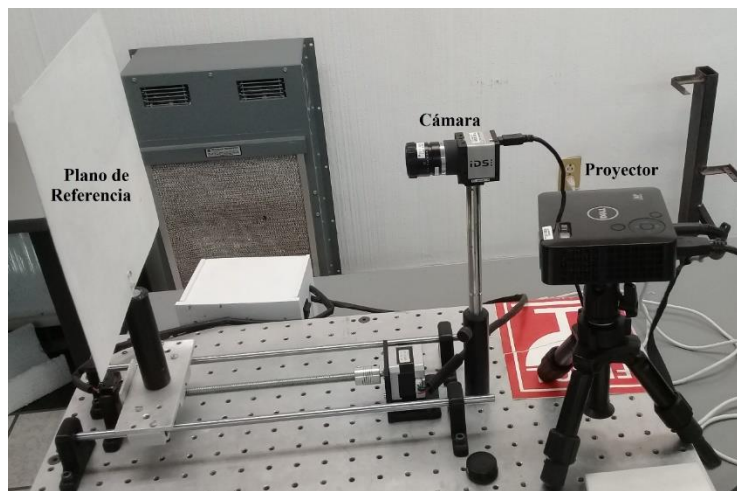


Fig. 15: Sistema Optomecatrónico implementado.

Cada imagen adquirida por el sistema Optomecatrónico representa un desplazamiento en el eje Z , en este caso n desplazamientos representan la profundidad en la escena permitiendo controlar el número de muestras de profundidad que se obtienen, iniciando en Z_0 y concluyendo en Z_n . En la Fig. 16 se representa dicho desplazamiento.

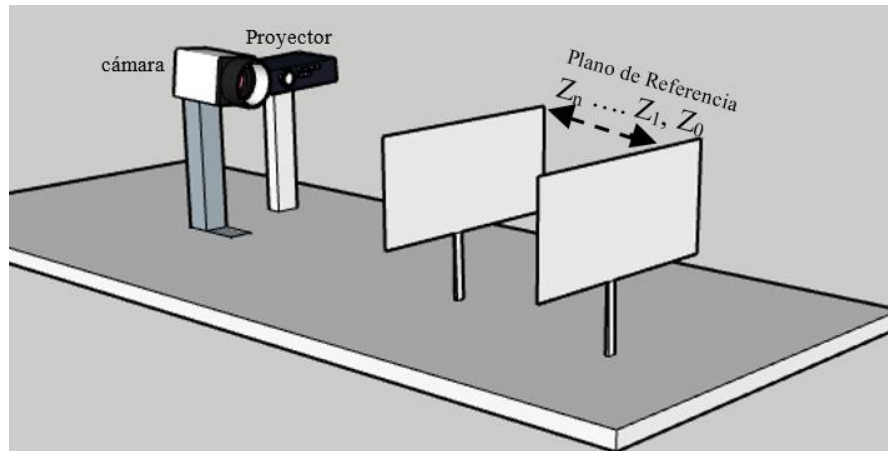


Fig. 16: Representación de n número de desplazamientos del plano de referencia.

Calibración eje Z por puntos.

El proceso de calibración del eje Z se inicializa con la proyección de un patrón de luz estructurada sobre un plano de referencia Z_0 , dicha escena se captura por una cámara digitalizándola en una imagen 2D, esta imagen previamente capturada se binariza implementado el algoritmo de Otsu descrito anteriormente, esto permite diferenciar los puntos que se proyectaron del fondo de la imagen y calcular los centroides de estos posteriormente. Mediante n corrimientos del plano de referencia se obtienen n cantidad de planos que son sometidos al mismo proceso de binarización y búsqueda de centroides, ver Figura 17.

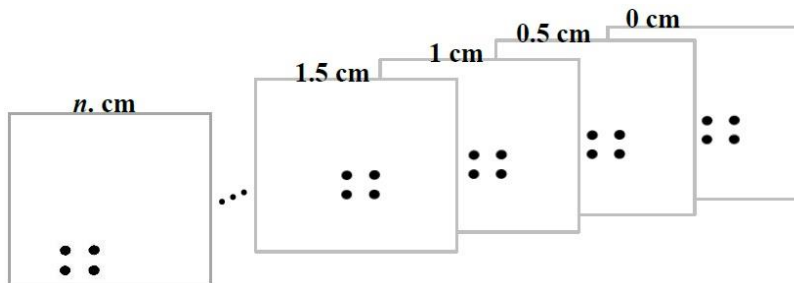


Fig. 17: Representación de desplazamiento correspondientes en valores de 0 a n cm a razón de 0.5 cm.

En las imágenes segmentadas se establece un orden de agrupamiento que permite diferenciar cada uno de los puntos de los demás y a su vez asociarlo en las demás imágenes pertenecientes a la calibración, esto se logra utilizando Flood Fill [7] con recursividad de cuatro pixeles. Con Flood Fill se localizan los centroides correspondientes a los puntos. Cada uno de los valores xy donde x e y representan una coordenada del centroide y z indica el desplazamiento en centímetros sobre el eje.

Para encontrar la relación entre las coordenadas de los centroides y los desplazamientos se ajustan los datos a una curva de calibración empleando regresión polinomial por mínimos cuadrados [26].

Calibración ejes X, Y con malla de puntos.

En el proceso de calibración de los ejes x e y hace uso de una cuadrícula de puntos colocada sobre el plano de referencia, cada punto se localiza a una distancia de un centímetro de sus semejantes en vertical y horizontal [6], ver Figura 18.

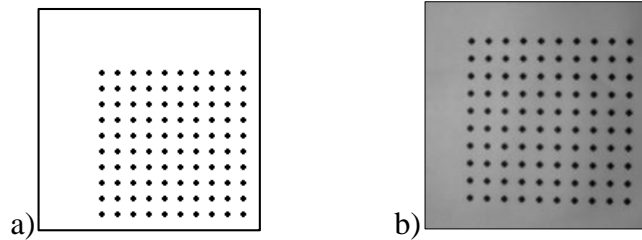


Fig. 18: a) Cuadrícula utilizada para calibración, b) Imagen capturada del plano Z donde la cuadrícula superpuesta sobre el plano de referencia.

Para realizar una calibración con mayor precisión se subdivide el mallado en cuadrantes con una distancia constante de 1 cm en vertical y horizontal respecto de cada punto. Si los puntos que se proyectan posteriormente se localizan dentro del algún cuadrante a este se le asigna un valor de posición en x e y que corresponde con los cuatro puntos que determinan cada cuadrante. En la Figura 19 se muestra el primer cuadrante y la distribución de distancias entre los puntos, marcando en verde los puntos de referencia para calibrar si un centroide se encuentra o no dentro del cuadrante. Existe una correlación de la imagen de calibración con su homóloga obteniendo una coincidencia óptima respecto una de otra [37].

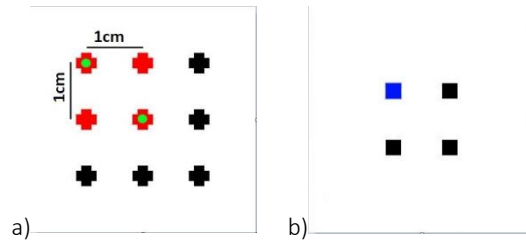


Fig. 19: a) Patrón con puntos de calibración, cuadrante no. 1, b) Patrón con punto en tonalidad azul a localizar mediante de la imagen de calibración.

De los valores obtenidos de la Fig. 19 se obtuvo la Tabla 2, donde se puede observar que si un centroide se localiza dentro de uno de los cuadrantes se obtienen medidas reales de este por medio de los valores referencia previamente calibrados para x e y en dicho cuadrante. Los valores obtenidos de la calibración de x e y se almacenan (.DAT) en una serie de vectores al igual que las posiciones de cada cuadrante.

X, Y	Coordenada X Calibrada	Coordenada Y Calibrada	Valor esperado X	Valor esperado Y	Error Absoluto	Error porcentual
Punto 1	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0%
Punto 2	0.5	1.5	0.5	1.5	0	0%
Punto 3	1.5	0.5	1.5	0.5	0	0%
Punto 4	1.5	1.5	1.5	1.5	0	0%

Tabla. 2: Resultados de calibración de las imágenes.

Calibración ejes X, Y para desplazamiento de fase.

La calibración de la cámara para el método de cambio de fase se implementa de manera inicial por medio de la calibraron los ejes xy utilizando una malla de puntos, Figura 20, de calibrado. Se obtienen valores de calibración a partir de una regla de tres, haciendo uso de la distancia real entre los puntos y la distancia de estos en pixeles. A partir de la calibración determino que cada pixel equivale a 0.0147 centímetros

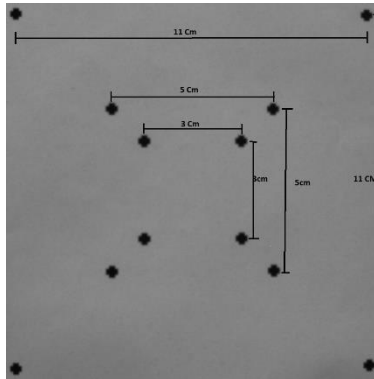


Fig. 20: Imagen de Calibración de ejes xy .

Envolvimiento y desenvolvimiento de fase.

Haciendo uso de los métodos descritos en el capítulo 2, titulados “Desplazamiento de fase” y “Algoritmo de Itoh” se realizaron las matrices de desplazamiento pertinentes que se implementan en el re corrimiento de fase.

Como se ha descrito en la ecuación (14) a partir de una serie de desplazamientos en relación con π se determinan 4 matrices partiendo de una función sinusoidal, obsérvese Fig.18. Estas matrices contienen un patrón de luz estructurada, el cual se proyecta sobre el objeto bajo prueba.

Esta serie de patrones describen un desplazamiento de fases el cual se logra mediante un corrimiento de la función seno, como se aprecia en la figura 21 cada desplazamiento se realiza a razón de $\pi/2$, al ser proyectados los patrones de manera consecutiva sobre un plano de referencia o el objeto se recupera información sobre la profundidad de la escena, la cual se puede extraer posteriormente mediante el proceso de envolvimiento y desenvolvimiento.

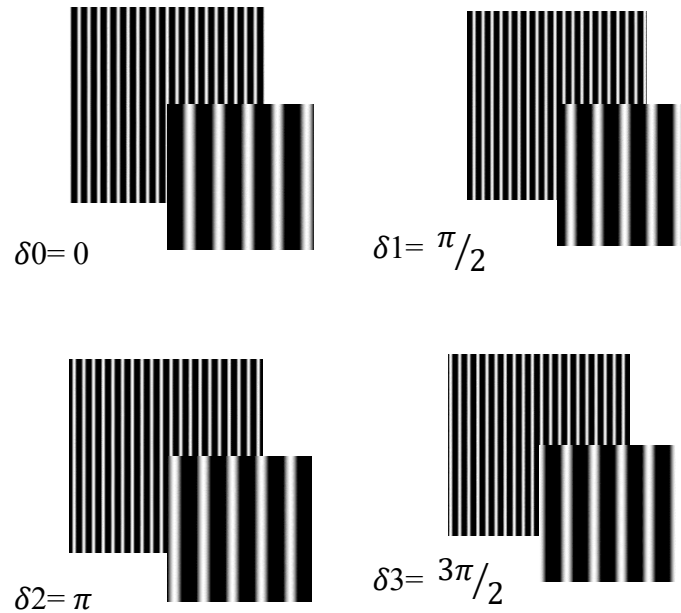


Fig. 21: Función sinusoidal con 4 desplazamientos.

A partir de la ecuación (15) se toman las imágenes obtenidas de la proyección de los cuatro desplazamientos de los que se adquiere una nueva matriz la cual contiene la fase envuelta en la que se encuentra la información correspondiente a la escena sobre la que se proyectó el patrón de luz estructurada.

La función Arco tangente de esta ecuación devuelve una matriz con discontinuidades como se aprecia en la Figura 22.

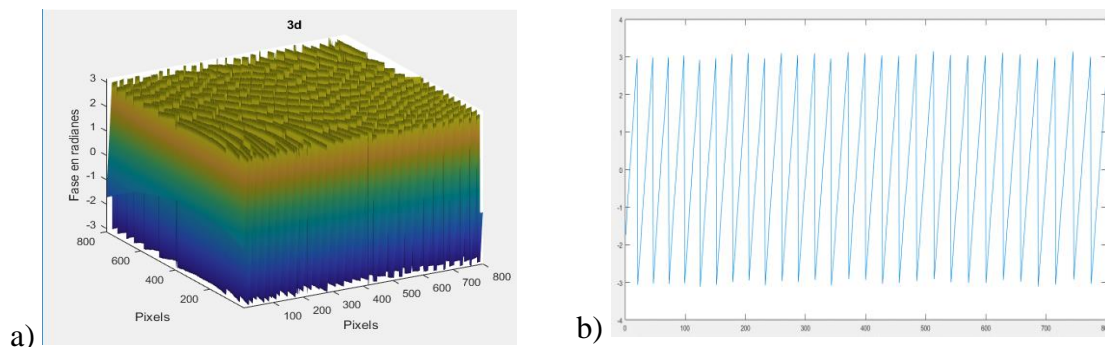


Fig. 22: a) Fase envuelta grafica 3D, b) Grafica 2D de las discontinuidades de un vector de la fase envuelta.

El desenvolvimiento de la fase envuelta se genera mediante las ecuaciones (16) y (17) que Itoh propone recuperando la fase sin discontinuidades, Fig.23.

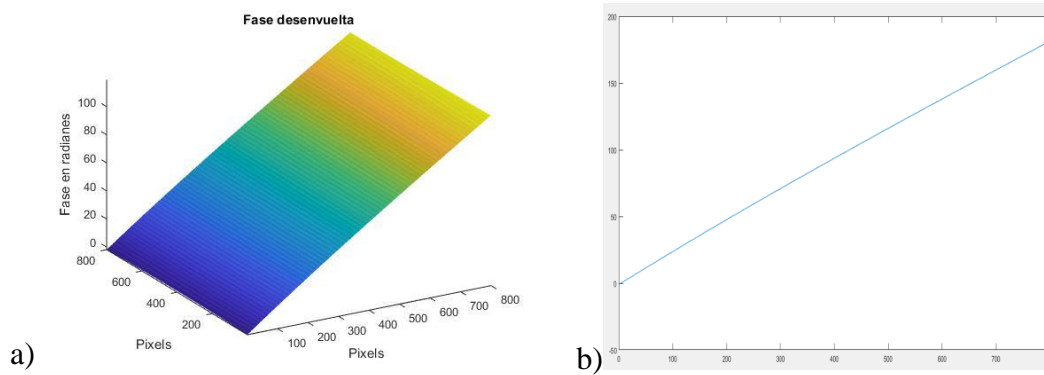


Fig. 23: a) Fase envuelta grafica 3D, b) Grafica 2D de un vector de la fase sin discontinuidades.

Calibración eje Z Cambio de Fase.

Con cada desplazamiento del plano se ejecutan de manera repetitiva los pasos antes mencionados generando n número de planos que se utilizan para la correspondiente calibración del eje Z, con cada avance del plano de referencia se reinicia la onda sinodal de cada plano lo cual causa un problema al identificar que plano corresponde a una distancia en concreto creando una confusión en los valores de la calibración, sin embargo, de manera empírica se puede solucionar esto realizando la adición de k cantidades de $\pi/2$ permitiendo separar los planos de manera ordenada para realizar un correcto ajuste polinomial, ver Figura 24.

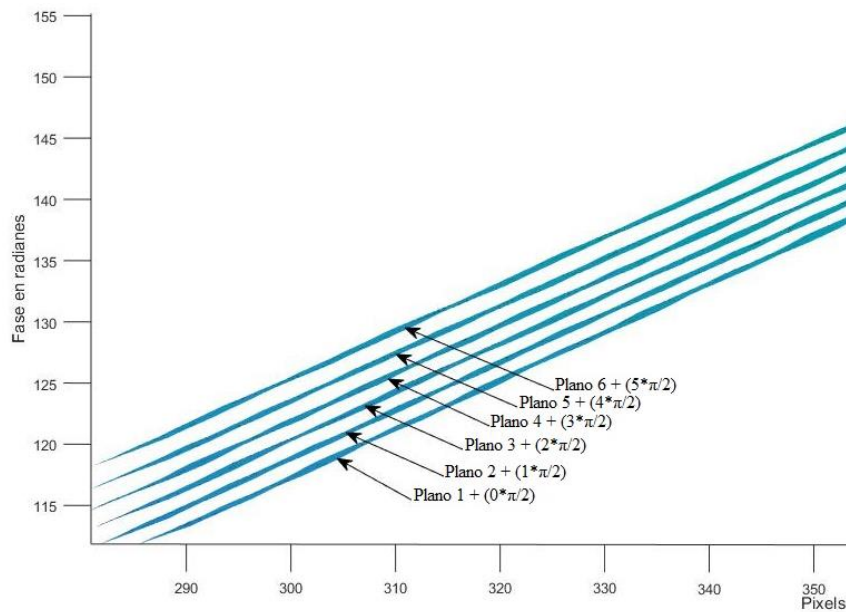


Fig. 24: Ajuste de planos para calibración de eje z mediante la sumativa de k cantidades de $\pi/2$.

La adición que se aplica a cada plano para realizar el ajuste deseado puede variar dependiendo de la cantidad de franjas que exista en la proyección de luz estructura y el número de planos a utilizar para la calibración.

Capítulo 5

Resultados.

Esta sección contiene los resultados obtenidos a partir de la calibración realizada a los dos modelos de reconstrucción tridimensional que se implementaron, el modelo por proyección de puntos y el modelo por desplazamiento de fase. Los resultados se obtuvieron utilizando una serie de piezas que están impresas en Ácido Poliláctico (PLA), dichas piezas son utilizadas como objetos de prueba. A continuación, se muestran los objetos en cuestión, así como la reconstrucción de los perfiles de estos mediante las dos técnicas de reconstrucción tridimensional utilizado un ajuste de curvar mediante una regresión polinomial en ambos casos.

Las imágenes que muestran en la Figura 25 corresponden a los objetos de prueba que se implementaron para realizar las pertinentes reconstrucciones tridimensionales de perfiles.



Fig. 25: Superficies Impresas para reconstrucción tridimensional de perfiles.

Haciendo uso de la proyección de puntos se generó una malla de 10 x 10 puntos adquiriendo de esta forma 100 puntos en total, siendo usados inicialmente para realizar la calibración del sistema y posteriormente la reconstrucción del perfil de cada objeto. La Figura 26 muestra la proyección del patrón de puntos obtenida sobre la superficie de cada objeto, se puede observar la deformación del patrón de acuerdo a los distintos perfiles superficiales de las piezas.

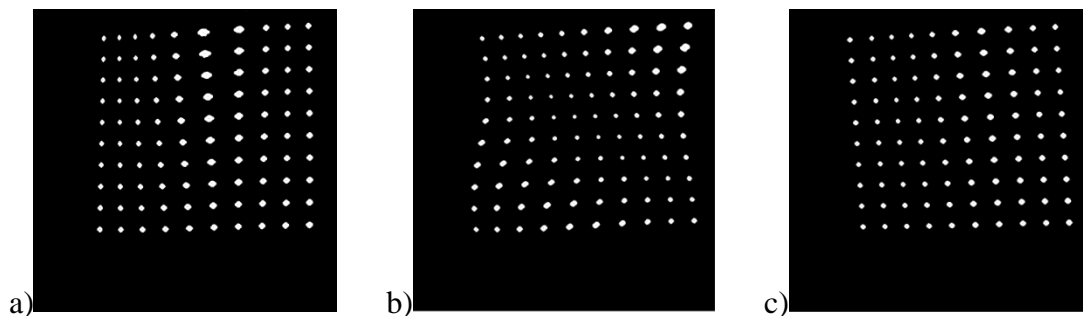


Fig. 26: Patrón de puntos proyectados sobre los objetos. a) Objeto 1. b) Objeto 2. c) Objeto 3.

De igual forma se implementó el método de desplazamiento de fase utilizando una frecuencia espacial de 100 franjas en una matriz de 800 x 800 píxeles generando imágenes que contienen los perfiles de los tres objetos. La Figura 27 muestra la proyección del patrón de franjas

obtenida sobre la superficie de cada objeto, se puede observar la deformación de las franjas de acuerdo a los distintos perfiles superficiales de las piezas.

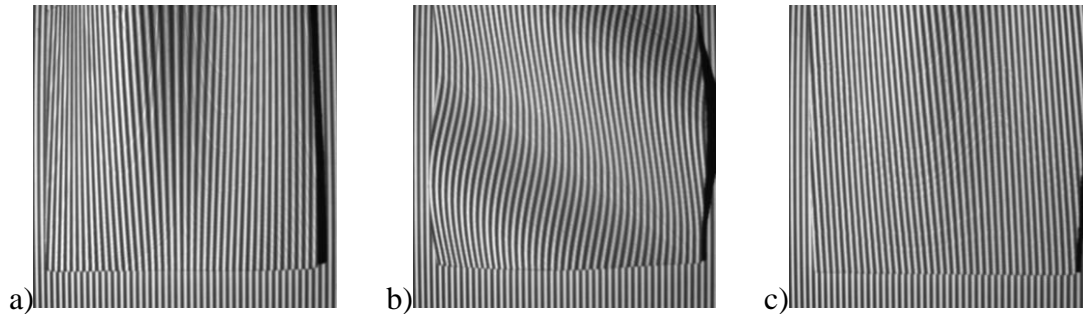


Fig. 27: Patrón de franjas sinusoidales proyectadas. a) Objeto 1. b) Objeto 2. c) Objeto 3.

Partiendo de ambos métodos se realizaron las calibraciones adecuadas para cada caso, de manera implícita el método basado en proyección de puntos hace uso del algoritmo de Otsu, posteriormente implementa la búsqueda de centroides estableciendo una calibración automática de las posiciones (x, y) basado en una malla de calibración de 10×10 puntos, la implementación por medio del ajuste de curvas polinomial de segundo orden retorna de manera directa las posiciones de los ejes x, y y a su vez la posición del punto en el eje z .

La calibración de los ejes xy aplicando el método de desplazamiento de fase se realiza de manera separada al método en sí, debido a que este método determina las posiciones sólo en el eje z sin realizar un escalamiento de píxeles a centímetros en x, y ; debido a esto se procede a calibrar las distancias correspondientes a los ejes x, y , obsérvese Figura 30 imagen de calibración obtenida. La implementación de una regla de tres permite determinar las distancias de cada punto, se implementa debido a que no es necesario realizar un cálculo complejo para determinar el número de píxeles equivalentes a 1 cm tanto en x como en y , se obtiene un valor por píxel de 0.148 milímetros para los ejes x, y respectivamente.

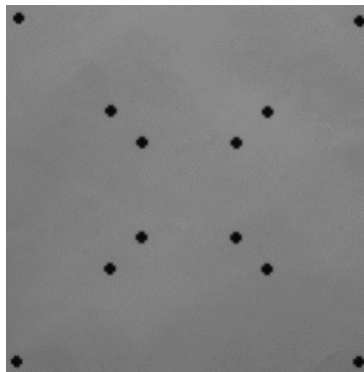


Fig. 28: Captura de plano de calibración para los ejes xy a razón de 11cm, 5cm y 3cm con respecto a cada cuadrante de puntos.

La Tabla. 3 muestra las coordenadas obtenidas de los 12 puntos pertenecientes a la Fig.28 mediante la búsqueda de sus centroides.

# Punto	Posición x	Posición y
1	27.243	28.094
2	22.5	772.357
3	227.549	229.008
4	225.539	571.466
5	295.428	297.460
6	294.220	503.237
7	500.414	298.411
8	499.553	504.182
9	568.318	231.480
10	567.011	572.414
11	768.550	34.511
12	766.6	773.091

Tabla. 3: Posiciones de coordenadas obtenidas por cada punto perteneciente a la Fig.28.

Para comprobar si la calibración de los ejes xy es correcta se implementó una segunda malla de 8 puntos, obsérvese Figura 29, esta malla permite determinar si la calibración es correcta.

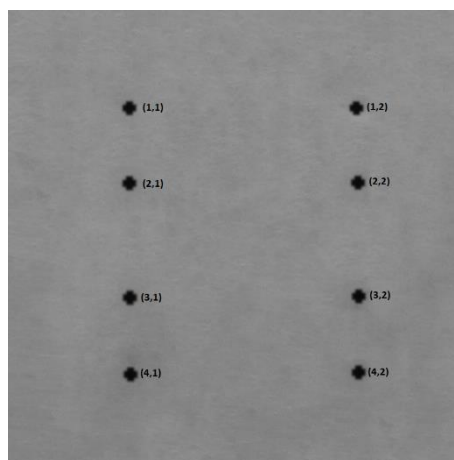


Fig. 29: Malla de 8 puntos para comprobación de calibración xy .

La Fig.29 muestra dos columnas de puntos que tienen una distancia entre sí de 6 centímetros, de igual manera los dos puntos externos de cada columna se encuentran a una distancia de 7 centímetros mientras que los dos puntos internos toman una distancia de 3 centímetros. La Tabla 4 muestra las posiciones de cada punto, así como lo puntos internos y externos a considerar para la comprobación de la calibración.

Punto	posición	Posición x	Posición y	Puntos externos	Puntos Internos
1	(1,1)	212.179939	171.963526	1	
2	(1,2)	613.921739	171.931677	2	
3	(2,1)	213.422287	304.202346		1
4	(2,2)	616.402402	302.427027		2
5	(3,1)	214.419075	505.413295		3
6	(3,2)	617.588571	502.991429		4
7	(4,1)	215.607345	640.30791	3	
8	(4,2)	617.440922	639.913833	4	

Tabla. 4: Posiciones de los puntos obtenidos en los ejes x,y de la Fig.29, se pueden apreciar también cuales son los 4 puntos externos de la figura en cuestión, así como los internos.

Las tablas 5 y 6 muestran los errores porcentuales obtenidos con respecto a las distancias en relación a los puntos externos (Tabla 5) y los internos (Tabla 6) obteniendo así un valor porcentual cercano al 1% en ambos casos, por lo que se determina que el error de calibración en los ejes xy es óptimo.

Puntos Externos					
	<i>Dist_Pixeles</i>	<i>Dist_Obtendida</i>	<i>Dist_Real</i>	<i>V_Absoluto</i>	<i>ERM</i>
Dist. x puntos 1 y 3	468.344384	6.93149688	7	0.06850312	0.98%
Dist. x puntos 2 y 4	467.982156	6.926135906	7	0.07386409	1.06%
Dist. y puntos 1 y 3	401.7418	5.945778639	6	0.05422136	0.90%
Dist. y puntos 2 y 4	401.833578	5.947136948	6	0.05286305	0.88%
Promedio					0.96%

Tabla. 5: Error porcentual de la calibración xy . En la tabla se observan a que puntos corresponde cada distancia, de igual manera la distancia está dada en pixeles obtenidos, distancia obtenida (Centímetros) y la distancia real (Centímetros), se pueden observar.

Puntos Internos					
	<i>Dist_Pixeles</i>	<i>Dist_Obtendida</i>	<i>Dist_Real</i>	<i>V_Absoluto</i>	<i>ERM</i>
Dist. x puntos 1 y 3	201.210949	2.977922042	3	0.02207796	0.74%
Dist. x puntos 2 y 4	200.564402	2.968353143	3	0.03164686	1.06%
Dist. y puntos 1 y 3	402.980115	5.964105702	6	0.0358943	0.60%
Dist. y puntos 2 y 4	401.981227	5.949322157	6	0.05067784	0.85%
Promedio					0.81%

Tabla. 6: Error porcentual de la calibración xy . En la tabla se observan a que puntos corresponde cada distancia, de igual manera la distancia está dada en pixeles obtenidos, distancia obtenida (Centímetros) y la distancia real (Centímetros), se pueden observar.


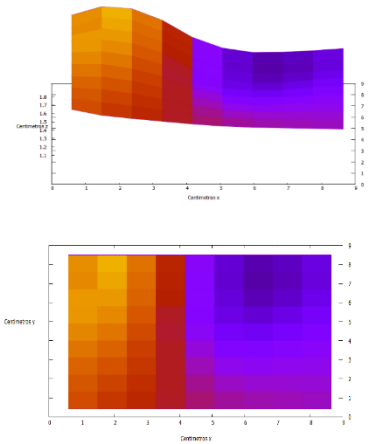
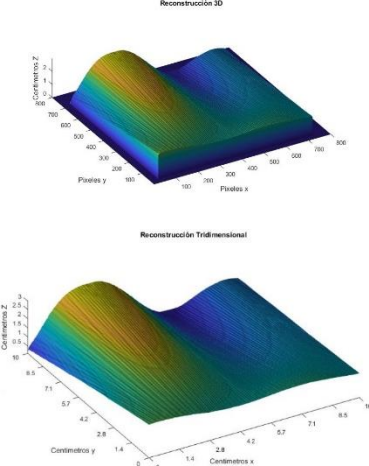

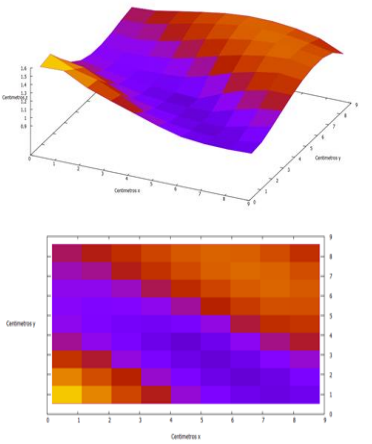
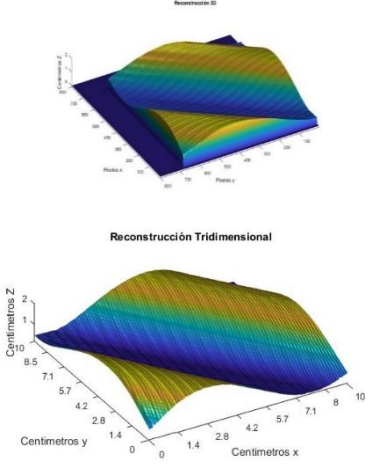

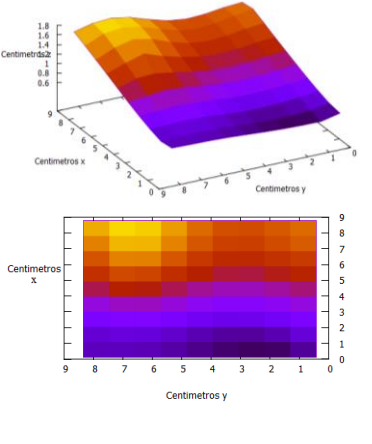
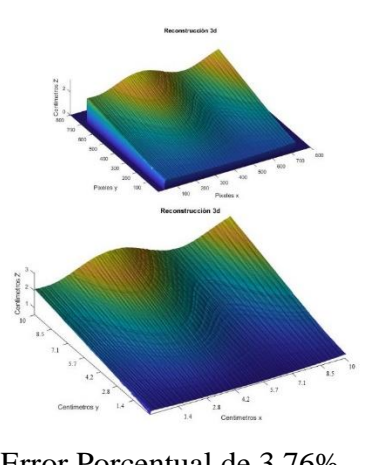
Objeto Impreso	Reconstrucción mediante uso de puntos.	Reconstrucción mediante Desplazamiento de Fase.
	 <p data-bbox="594 720 932 751">Error Porcentual de 2.77%</p>	 <p data-bbox="995 741 1333 772">Error Porcentual de 3.49%</p>
	 <p data-bbox="594 1232 932 1264">Error Porcentual de 4.78%</p>	 <p data-bbox="995 1253 1333 1285">Error Porcentual de 4.62%</p>
	 <p data-bbox="594 1736 932 1768">Error Porcentual de 4.89%</p>	 <p data-bbox="995 1757 1333 1789">Error Porcentual de 3.76%</p>

Tabla. 7: Resultados de reconstrucción tridimensional mediante proyección de puntos y cambio de fase.

La aplicación más común con la que se relaciona la reconstrucción tridimensional de objetos es el uso de esta en la reconstrucción de rostros mediante la que se pretende capturar todas las características faciales propias de un individuo, teniendo esto en cuenta se implementó la reconstrucción parcial de un maniquí de poliestireno permitiendo mostrar una de las posibles aplicaciones de la reconstrucción tridimensional, Obsérvese Fig. 30.

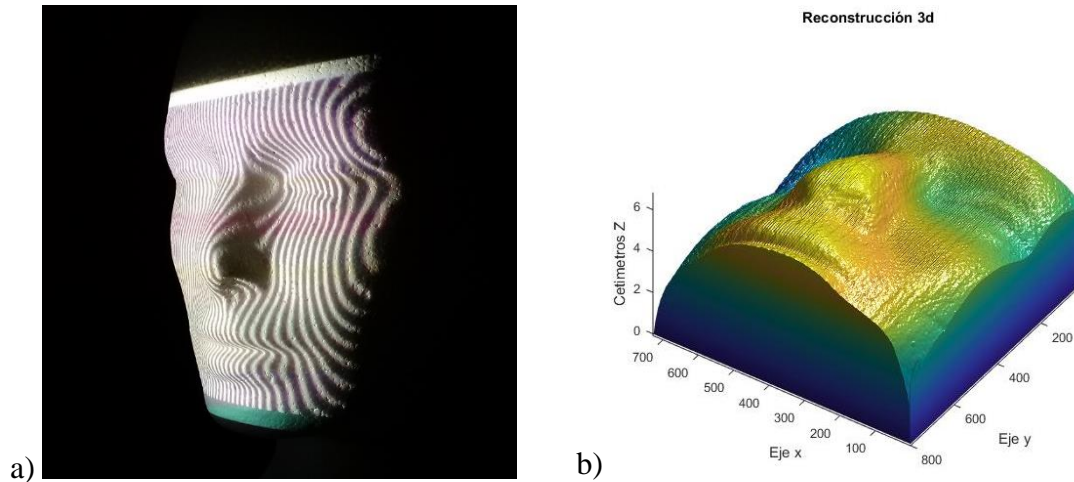


Fig. 30: a) Objeto de prueba (Busto de poliestireno), b) Reconstrucción tridimensional del objeto de prueba.

Capítulo 6

Conclusiones.

EL uso de luz estructura como implementación en la realización de mediciones de objetos físicos tiene como particularidad ser un método no invasivo o destructivo, por lo que se considera como una técnica de confianza en técnicas basadas en metrología óptica.

Las técnicas de metrología muestran resultados factibles en la obtención de las medidas superficiales de objetos permitiendo una reconstrucción basada en datos parciales del objeto de interés como es el caso de una proyección de puntos, obteniendo a pesar de la dispersión de los puntos sobre el objeto una reconstrucción moderada de su superficie, en el caso del método basado en el desplazamiento de fase la reconstrucción es adecuada considerando que tiene un conjunto de valores más amplio de toda la superficie del objeto. De manera objetiva el método basado en el desplazamiento de fase es más adecuado en cuanto a una reconstrucción integra de un objeto pudiendo obtener aquellos valores que son omitidos en el primer método porque se encuentran intermedios en la proyección de puntos.

De acuerdo al promedio de los errores porcentuales en ambos casos el método basado en desplazamiento de fase es el más adecuado en cuanto a un menor error de medición, por otro lado, en la búsqueda de obtener un método más rápido en cuanto al procesamiento para la generación de resultados el basado en la proyección de puntos es el más adecuado debido a que una vez calibrado el sistema sólo se requiere una imagen para obtener una medida acorde a la superficie de un objeto, mientras que en el caso del método de desplazamiento de fase se requieren 3, 4 o más, imágenes a procesar según sea el caso, realizando toda la serie de pasos mencionados en la sección 3 por cada grupo de imágenes que se capturen.

La implementación y efectividad de ambos métodos varía de acuerdo a la cantidad de imágenes requeridas para un correcto calibrado del sistema de igual modo en el método de desplazamiento de fase es necesario establecer el tamaño de la frecuencia espacial utilizada ya que una menor frecuencia genera valores con mayor error, en cambio una frecuencia demasiado alta puede provocar una saturación de los datos obtenidos provocando una incorrecta captura de fase.

Referencias

- [1] R. K. B. G. Ramesh Jain, Machine Vision, MacGraw-Hill, 1995.
- [2] E. P. G. & d. I. E. A. Alegre, Conceptos y Métodos en Visión por Computador., CEA, 2016.
- [3] L. E. Sucar, Vision Computacional, Puebla, Mexico: Instituto Nacional de Astrofisica, Optica y Electronica.
- [4] B. M. LÓPEZ-PORTILLA VIGIL, R. J. MENÉNDEZ ALONSO and M. E. I. d. A. d. O. s. F. R. C. d. C. I. 2. v. 1. n. 3. p. 1.-2. IGLESIAS MARTÍNEZ, "Implementación del Algoritmo de Otsu sobre FPGA.," *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 10, no. 3, pp. 16-26, 2016.
- [5] M. A. R.-M. a. F. V.-B. Arroyave-Giraldo, ""Incidencia de la Segmentación en la Obtención de Región de Interés en Imágenes de Palma de la Mano.," *Tecno Lógicas*, vol. 27, no. 1, pp. 119-138, 2011.
- [6] J. V. S. Balderas, *Proyección de Luz Estructurada Aplicada a la Biometría*, Leon, Gto: Centro de Investigaciones en Optica A.C, 2018.
- [7] K. A. Hunt, The Art of Image Processing with Java, Boca Raton.: CRC Press., 2010.
- [8] B. G. LATORRE and H. T. G. SOLÁ, "Contaminación lumínica.," 2013.
- [9] D. E. G. Gonzalez., "Radiometria y Fotometria.," *Universidad de sevilla.*, 2006.
- [10] B. J. T. Daniel Malacara Hernández, *Advanced Optical Instruments and Techniques*, CRC Press , 2017.
- [11] K. P. B. C. S. R. D. K. L. P. M. G. S. A. J. D. J. G. J. S. D. F. Marc Levoy 1, "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues," *ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co*, vol. 27, pp. 131-144, 2000.
- [12] R. J. & P. P. H. (. Hocken, *Coordinate measuring machines and systems.*, CRC press., 2016.
- [13] N. A. M.-P. M. L. & M.-F. J. E. Arias-Hernández, "Reconstrucción de objetos por perfilometría interferométrica con sistema de posicionamiento de mira periódica," *Dyna*, vol. 82, no. 190, pp. 153-159., 2015.

- [14] K. C. L. R. J. A. F. V. & M. A. Genovese, "Stereo-digital image correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism.," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, no. 3, pp. 278-285., 2013.
- [15] P. H. B. J. M. F. Á. B. e. C. H. R. D. & L. J. Navarro Esteve, "Aplicaciones de la tecnología de digitalización tridimensional por la coordinación de monumentos históricos del instituto nacional de arqueología e historia (INAH) en México DF.," *EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica*, vol. 16, no. 17, p. 12, 2011.
- [16] D. A. F. D. U. J. F. F. Revelo, "Reconstrucción 3D de escenas mediante un sistema de visión estéreo basado en extracción de características y desarrollado en openCV.," *Ingeniería y Universidad*, vol. 16, no. 2, pp. :485-485., 2012.
- [17] E. I. G. Vacas, "Análisis comparativo de diferentes sistemas de digitalización tridimensional aplicados a patrimonio escultórico," 2017-2018.
- [18] M. & M. K. Takeda, "Fourier transform profilometry for the automatic," *Applied optics*, vol. 22, no. 24, p. 3977-3982, 1983.
- [19] e. D. Malacara, *Optical Shop Testing 3rd ed.*, Hoboken, New Jersey.: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [20] J. Q. J. A. B. T. S. M. & E. J. C. Vargas, "Two-step self-tuning phase-shifting interferometry.," *Optics express*, vol. 19, no. 2, pp. 638-648-, 2011.
- [21] C. H. X. Y. W. C. F. T. C. J. S. H. M. Quan, "Comunicaciones Ópticas (Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting.," *Optics Communications*), vol. 189, no. 1-3, pp. 21-29., 2001.
- [22] M. I. H. & K. S. Takeda, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry.," *JosA.*, vol. 72, no. 1, pp. 156-160., 1982.
- [23] M. Q. J. A. & P. M. Servin, *Fringe pattern analysis for optical metrology: theory, algorithms, and applications.*, Germany.: John Wiley & Sons., 2014.
- [24] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping algorithm.," *Applied optics.*, vol. 21., no. 14., pp. 2470-247014, 1982.
- [25] A. B. M. E. A. Q. S. Andrés Felipe Calvo Salcedo, "Procesamiento de nubes de puntos por medio de la librería PCL.," *Scientia et Technica*, vol. 17, no. 52, p. 7, 2012.
- [26] S. C. & C. R. P. Chapra, *Métodos Numéricos Para Ingenieros. 5ta edición.*, McGRAWHILL, 2007.

- [27] M. J. & H. C. C. Tsai, "Development of a high-precision surface metrology system using structured light projection.," *Measurement*, vol. 38, no. 3, p. 236-247., 2005.
- [28] Y. S. C. W. Zhongwei Li, "Accurate calibration method for a structured light system," *Optical Engineering*, vol. 47, no. 5, 2008.
- [29] B.-M. CHUNG, "Improved least-squares method for phase-to-height relationship in fringe projection profilometry.," *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, vol. 11, no. 12, p. 11, 2016.
- [30] L. C. P. S. & A. A. Huang, "Least-squares calibration method for fringe projection profilometry considering camera lens distortion.," *Applied optics*, vol. 49, no. 9, p. 1539-1548., 2010.
- [31] C. L. B. & Z. S. Jiang, "Pixel-by-pixel absolute phase retrieval using three phase-shifted fringe patterns without markers.," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 91, no. 1, p. 232-241., 2017.
- [32] X. G. M. Z. Z. Z. Z. & Y. C. Li, "Calibration method for fringe projection profilometry with a binary defocusing technique.," *Optical Review*, vol. 24, no. 4, p. 495-504., 2017.
- [33] M. S. Z. M. Daniel Malacara, *Interferogram Analysis for Optical Testing*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
- [34] J. A. Q. a. J. M. P. Manuel Servin, *Fringe Pattern Analysis for Optical Metrology*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2014.
- [35] T. Yoshizawa, *Handbook of OPTICAL METROLOGY*, Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [36] J. S. J. C. W. K. Creath, *Optical Metrology of Diffuse Surfaces*, University of Arizona, Tucson: College of Optical Sciences, 2007.

Anexos.

El artículo publicado durante el proceso de realización del presente trabajo de investigación es el siguiente:

Ignacio Martínez Rojas, Mayra Pérez Robledo, Francisco Javier Cuevas de la Rosa, Pedro Arguijo, "Reconstrucción tridimensional de objetos mediante el uso de luz estructurada," Research in Computing Science 148/8, 91–103 (2019)

https://www.rcs.cic.ipn.mx/2019_148_8/Reconstruccion%20tridimensional%20de%20objetos%20mediante%20el%20uso%20de%20luz%20estructurada.pdf



La Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial (SMIA), la Unidad de Transferencia Tecnológica Tepic, del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE-UT³) y la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN)

OTORGAN ESTE CERTIFICADO A

Ignacio Martínez Rojas, Mayra Pérez Robledo, Francisco Javier Cuevas de la Rosa and Pedro Arguijo

POR LA PRESENTACIÓN DEL ARTÍCULO TITULADO

Reconstrucción tridimensional de objetos mediante el uso de luz estructurada

En el 11° Congreso Mexicano de Inteligencia Artificial – COMIA 2019, Tepic, Nayarit, México, del 4 al 7 de junio de 2019

A handwritten signature in black ink, appearing to read "F. Castro", written over a blue horizontal line.

DR. FÉLIX CASTRO ESPINOZA
PRESIDENTE SMIA

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Juan Martínez", written over a blue horizontal line.

DR. JUAN MARTÍNEZ MIRANDA
COMITÉ LOCAL COMIA

