



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“Caracterización morfológica de muestras mediante
procesamiento de imágenes”

TESIS

Para Obtener el grado de
Maestría en Ingeniería Mecatrónica

Presenta
Ing. Rodrigo Ahuatzí Ahuactzin

Director
Dr. José Federico Casco Vásquez
Codirector
Dr. Rafael Ordoñez Flores



Enero 2019, Apizaco, Tlaxcala México.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

Mi familia por todo el apoyo brindado durante el proceso de desarrollo de mi formación académica, sin ellos no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

Al Instituto Tecnológico de Apizaco por brindarme el espacio, la infraestructura, personal docente, administrativo y todo lo que conlleva la estancia dentro de la institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada que hizo posible que no descuidara mis estudios y dedicarme de tiempo completo a ellos.

Al Director de Tesis Dr. José Federico Casco quien me brindo su tiempo, conocimiento y experiencia de manera incondicional durante este proceso.

RESUMEN

La obtención topográfica de la forma de un objeto de gran interés en muchas áreas del conocimiento es un motivo por el cual existen diversos métodos de obtención de esta información, estos métodos varían desde sistemas ópticos, mecánicos, ultrasónicos, por mencionar algunos ejemplos. Al lograr digitalizar los datos obtenidos de la forma de la muestra sujeta a análisis es posible darle una aplicación práctica en el control de calidad en líneas de producción.

Este trabajo muestra el desarrollo de un sistema de proyección de franjas y captura de imágenes para lograr obtener datos topográficos de las muestras mediante métodos ópticos, ya que a través de este sistema es posible proyectar franjas lumínicas sobre el objeto de estudio las cuales se deformarán de acuerdo al propio perfil de la muestra, obteniendo imágenes mediante una cámara digital que al aplicarle una serie de filtros y algoritmos es posible hacer una recuperación tridimensional del objeto de análisis, todos estos datos son contenidos en una matriz que almacena la información detallada de la forma real de la muestra para su análisis y posterior comparativo con una referencia.

Se representa de forma gráfica la reconstrucción tridimensional de los objetos tomados como muestras mediante la herramienta surf de Matlab en la que se grafica la matriz de datos obtenida después de realizar todos los algoritmos correspondientes al procesamiento de imágenes, finalmente esta matriz es la que contiene toda la información de la forma real del objeto, con esto, es posible analizar un objeto real de forma digital.

ABSTRACT

Obtaining topography of the shape of an object of great interest in many areas of knowledge is why there are various methods of obtaining this information, these methods vary from optical, mechanical, ultrasonic systems, to mention a few examples. By digitizing the data obtained from the sample form subject to analysis it is possible to give a practical application in quality control in production lines.

This work shows the development of a system projection of fringes and capture of images to obtain topographic data of the samples by optical methods, since through this system it is possible to project light strips on the object of study which will be deformed according to its own profile of the sample, obtaining images through a digital camera that by applying a series of filters and algorithms it is possible to make a three-dimensional recovery of the object of analysis, all this data is contained in a matrix that stores the detailed information of the real form of the sample for its analysis and subsequent comparison with a reference.

The three-dimensional reconstruction of the objects taken as samples is graphically represented by the Matlab surf tool in which the data matrix obtained after performing all the algorithms corresponding to the image processing is plotted, finally this matrix is the one that contains all the information of the real form of the object, with this, it is possible to analyze a real object digitally.

ÍNDICE

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 OBJETIVO GENERAL	4
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.6 HIPÓTESIS	4
1.7 ESTRUCTURA DE TESIS	5
1.8 ALCANCES	7
1.9 LIMITACIONES	8
1.10 ESTADO DE LA TÉCNICA	9
1.10.1 Sistemas de análisis superficiales de objetos	9
1.10.1.1 Líquidos penetrantes	9
1.10.1.2 Técnicas de reconstrucción 3D para análisis de perfiles	12
1.10.1.2.1 Técnicas de no contacto	13
1.10.1.2.1.1 Proyección de Franjas	14
1.10.1.2.1.2 Reconstrucción láser	28
1.10.1.2.1.3 Escáner por triangulación	29
1.10.1.2.2 Técnicas por contacto	31
1.10.2 Método Seleccionado para análisis superficiales en objetos	33
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS	34
2.1 PROCESAMIENTO DIGITAL	34
2.2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	34
2.3 FILTRADO	35
2.4 GENERALIDADES DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	36
2.5 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	37
2.6 SUPERPOSICIÓN DE ONDAS	39
2.7 INTERFERÓMETRO	39
2.8 PATRÓN DE MOIRÉ	41
2.9 MOIRÉ POR PROYECCIÓN	42
2.10 GENERACIÓN DE FRANJAS POR COMPUTADORA	42
2.11 MEDICIÓN DE FASE	43

2.11.1 Método de Fourier-Takeda	44
2.11.2 Método de desplazamiento de fase	44
2.12 DESENVOLVIMIENTO DE FASE	45
CAPÍTULO III DESARROLLO	47
3.1 OBTENCIÓN TOPOGRÁFICA DE UN OBJETO POR PROYECCIÓN DE FRANJAS	47
3.2 ARREGLO EXPERIMENTAL.....	48
3.3 MÉTODO DE DESPLAZAMIENTO DE FASE DE 4 PASOS.	50
3.4 MÉTODO FOURIER-TAKEDA.....	58
CAPÍTULO IV RESULTADOS.....	67
4.1 RESULTADOS.....	67
4.2 RESULTADOS FINALES MÉTODO DE 4 PASOS.....	67
4.3 RESULTADOS FINALES MÉTODO FOURIER-TAKEDA	72
CAPÍTULO V CONCLUSIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	81

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La representación tridimensional digitalizada de objetos (recuperación 3D) es de gran interés en muchas áreas del conocimiento como lo son: medicina, arquitectura, arqueología, ingeniería inversa por mencionar algunos ejemplos.

Esta recuperación 3D consiste en digitalizar un objeto en sus tres dimensiones (largo, ancho y profundidad) para manipular o analizar el objeto en un computador, estas técnicas se pueden clasificar en dos fundamentales las cuales son: por contacto y sin contacto, en adelante nos enfocaremos en técnicas sin contacto.

La proyección de franjas es una técnica óptica donde se proyectan patrones de franjas definidos sobre la superficie del objeto de análisis, estas franjas son deformadas de acuerdo a la topografía del objeto de estudio, posteriormente, mediante captura de imágenes y algoritmos computacionales es posible digitalizar la topografía del objeto.

Una vez digitalizada la muestra es posible analizarla e incluso compárala con otra muestra de las mismas características, siendo de suma importancia en la industria ya que esto tiene una aplicación práctica en el control de calidad de manufactura de objetos. Con base en lo anterior se propone desarrollar un sistema automático que pueda digitalizar un objeto para su análisis haciendo uso de componentes existentes y de fácil acceso.

Esta propuesta se apoya de una cámara digital de alta definición, un proyector de video y una computadora que mediante el desarrollo de un software de procesamiento de imágenes digitales se obtienen las muestras que serán analizadas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de la industria de la manufactura en muchas ocasiones al momento de la creación de objetos, éstos traen consigo errores de diseño, fabricación, compuestos con los que fueron creados, condiciones físicas no controladas en el momento de la elaboración de piezas, calidad en los materiales, tratamiento térmico defectuoso o manufactura defectuosa. Para detectar la presencia de dichos errores en la creación de objetos existen herramientas, mecanismos y acciones para demostrar que los objetos cumplen los requisitos mínimos de calidad y dependiendo del tipo de objeto se realiza un método de análisis diferente, estos dependen del tipo de pieza, materiales que lo componen y forma del objeto.

Existen kits específicos para cada tipo de análisis, estos van desde fotocolometría, luminiscencia, análisis morfológicos, fotometría. Inclusive al aplicar algunos de esos métodos el objeto es alterado, a estas pruebas se le denomina “Ensayos destructivos”. Nosotros nos enfocaremos en las pruebas denominadas “Ensayos no destructivos” ya que el método de análisis no tiene contacto directo o no cambia la forma de la muestra.

Estos ensayos requieren de personal altamente calificado para operar la maquinaria utilizada en el análisis, en algunos casos se utiliza equipo muy sofisticado y en otros se hace de manera manual como en el caso de la inspección visual, es aquí donde se pretende innovar un método de inspección mediante proyección de franjas y procesamiento de imágenes ya que al escanear el objeto se evidencian posibles errores en la superficie de las piezas.

El escaneo 3D consiste en un método de captura tridimensional de información topográfica de cualquier objeto que mediante un software específico se construye un modelo tridimensional el cual será sujeto a análisis.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Dentro de la industria al fabricar todo tipo de objetos es necesario la aplicación de sistemas que garanticen un óptimo control de calidad en maquilado de piezas, estos deben ser precisos por lo que se debe contar con herramientas y equipo que garantice un análisis óptimo de los objetos de estudio. El trabajo aquí presentado muestra una opción viable que cubre esta necesidad.

De acuerdo al tipo de pieza o material de estudio existen diversos ensayos no destructivos para analizarlos, cada método tiene características específicas de operación y de maquinaria utilizada para hacer el análisis.

Este trabajo se enfocará principalmente en la automatización de la inspección visual y el procesamiento de imágenes, ya que es un método de análisis que se puede implementar sin necesidades especiales o equipos sofisticados, se pueden obtener detalles topográficos del orden de milímetros, incluso de micras, con esto se logra analizar un objeto a gran detalle en un tiempo relativamente corto.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema para la obtención topográfica de la superficie de muestras con la finalidad de analizar la forma real del objeto en una forma tridimensional digitalizada mediante pruebas no destructivas en materiales, apoyándose del método de proyección de franjas y procesamiento de imágenes por computadora.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un arreglo de proyección de franjas y toma de imágenes sobre una superficie de referencia.
- Aplicar algoritmos de filtrado en las imágenes obtenidas del sistema de captura (cámara fotográfica) mediante un software de computadora.
- Desarrollar un algoritmo de computadora para la obtención y procesamiento de imágenes de las muestras a ser analizadas.
- Aplicar algoritmos matemáticos en imágenes para la obtención topográfica de muestras.
- Obtención de una matriz de datos que contenga la forma física del objeto de muestra.
- Representación tridimensional digitalizada de muestras analizadas.

1.6 HIPÓTESIS

Bajo condiciones controladas de iluminación y proyección de franjas lumínicas en muestras es posible con la adquisición de imágenes de una cámara digital de alta definición y una computadora, analizar la forma física de la superficie de muestras con la finalidad de compararla con una referencia mediante pruebas no destructivas en los materiales.

1.7 ESTRUCTURA DE TESIS

Dentro de este tópico se muestran el tipo de investigación que sustenta este proyecto para lograr los objetivos antes plateados. Además, se establece el diseño de la investigación, las herramientas necesarias para su desarrollo y en conjunto los aspectos necesarios para la obtención del sistema a desarrollar.

De acuerdo a Tamayo [1], la investigación es un proceso que, mediante la aplicación del método científico, procura obtener información relevante y fidedigna, para entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento. La investigación recoge conocimientos o datos de fuentes primarias y los sistematiza para el logro de nuevos conocimientos, cuya característica fundamental es el descubrimiento de principios generados. Así el punto de partida para desarrollar este sistema surge de investigaciones previas que se dan en el campo de la electrónica, sistemas computacionales, óptica, mecánica, entre otras áreas, estos conocimientos se van desarrollado en las diferentes etapas de este proyecto.

Parte del proceso de investigación y desarrollo de este proyecto se realizó de forma empírica. De acuerdo con Suárez [2]. Este tipo de conocimiento se caracteriza principalmente por un enfoque que se basa en la experiencia y que responde directamente a una u otra demanda social o necesidad práctica. Los éxitos de las investigaciones empíricas se valoran por la práctica.

A continuación, se enumera el desarrollo de este trabajo.

Capítulo I se muestra la descripción del área de oportunidad que se tiene al implementar el método de proyección de franjas para la digitalización de una muestra dentro de la industria.

Capítulo II se describen conceptos básicos sobre generalidades de ondas electromagnéticas, sistemas de recuperación 3D por medio de sistemas ópticos, así como algoritmos de desenvolvimiento de fase; principalmente nos enfocamos en dos técnicas muy utilizadas en sistemas de adquisición 3D las cuales son corrimiento de fase y método de Fourier-Takeda.

Capítulo III se enfoca en el desarrollo experimental del proyecto, empezando por el desarrollo de scripts en Matlab, (Esta herramienta sirve para obtener los componentes básicos de las imágenes como lo son: filtros, contrastes, patrones y mapas de bits) Hasta las pruebas en objetos de estudio.

Capítulo IV se muestran los resultados obtenidos, así como problemáticas claves para el desarrollo de este proyecto y como fueron resueltos.

Capítulo V se muestra la comparación de dos métodos de desarrollo presentados en este documento, ventajas y desventajas de cada uno, así como las conclusiones finales de este trabajo y posibles aplicaciones.

1.8 ALCANCES

El presente proyecto abarca en la parte física un sistema de proyección de video, el cual se ocupó para proyectar patrones de franjas sobre una superficie de referencia, un sistema de adquisición de imágenes mediante una cámara fotográfica de alta definición y un sistema de procesamiento de imágenes (computadora), esto en conjunto es el sistema de medición topográfica de objetos para, posteriormente, hacer la representación tridimensional del objeto para su análisis.

En la parte lógica se desarrolla software de procesamiento de imágenes utilizando la plataforma matemática Matlab, es aquí donde se implementan los algoritmos matemáticos para el proceso de recuperación de perfiles en la muestra.

Estas dos partes conforman todo el sistema de adquisición de datos con lo cual es posible almacenar los datos en una matriz para su posterior análisis. El desarrollo de este sistema se realizó dentro de las instalaciones del Tecnológico de Apizaco abarcando el correspondiente ciclo escolar.

Se realiza la validación del sistema con diez objetos de prueba de diferentes formas y tamaños para comprobar que los algoritmos realizados cumplan con los objetivos planteados, de los cuales solo se mostraran los resultados más representativos en este documento.

1.9 LIMITACIONES

El presente proyecto pretende abarcar objetos de una sola pieza, que no contengan morfología extravagante o con espacios vacíos, obtendrá detalles topográficos solo en la superficie de la muestra sin abarcar características internas dentro de la misma.

La muestra no debe de sobrepasar 40 centímetros cuadrados de área ya que el sistema de proyección y toma de imágenes solo soporta ese espacio.

Para la toma de muestras sólo se utilizan objetos comunes con el fin de probar los algoritmos y software desarrollado, no alcanzando a desarrollar pruebas en alguna industria.

1.10 ESTADO DE LA TÉCNICA

En el presente apartado se revisa bibliografía disponible sobre conocimientos existentes en el tema y algunos ejemplos relevantes sobre el procesamiento de imágenes por computadora, inspección visual y análisis superficial en muestras.

Esta información será de gran apoyo para saber de dónde podemos partir y así alcanzar los objetivos planteados al inicio de este documento. A continuación, se va listando la información y herramientas de las cuales haremos uso para lograr el desarrollo de este proyecto empleando sistemas existentes que están vigentes en la actualidad.

1.10.1 Sistemas de análisis superficiales de objetos

El principal objetivo de esta sección es conocer las técnicas en análisis superficiales de muestras ya que es de interés para este proyecto. Analizando la superficie de muestras podemos obtener detalles como: errores de manufactura, uso inadecuado del objeto, deformaciones por uso, mala calidad en los materiales empleados en la fabricación y control de calidad en la manufactura, por mencionar algunos ejemplos. Esta es la importancia de dicho análisis y más aún un correcto sistema que lleve la recolección de esta información.

1.10.1.1 Líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes se define como un procedimiento de inspección no destructiva diseñado para detectar y exponer discontinuidades superficiales en materiales. Es un método en el que se aplica un fluido, en algunos casos fotoluminiscente, el cual se impregna o concentra en grietas de las muestras a analizar y de esta forma es posible visualizar posibles defectos en las piezas [3].

Una aplicación de este método es en el ramo de la soldadura de juntas de acero al carbón para tener un control de calidad de dicha actividad. En este caso una vez aplicada la soldadura es necesario hacer un análisis superficial de la pieza para determinar la calidad de la soldadura realizada, ya que cotidianamente en la industria se presenta la necesidad de controlar la calidad de juntas soldadas de varios componentes, siendo muchas de estas piezas críticas, motivo por el cual se requieren métodos de mayor sensibilidad en la detección de defectos que pueden ocasionar el mal funcionamiento o colapso de máquinas y/o estructuras [4].

De acuerdo a la investigación realizada por Oswaldo en el ramo del control de calidad de soldaduras, desarrolló una serie de probetas que bajo la acción de la luz negra con tintas penetrantes fluorescentes permitan detectar los defectos existentes en juntas soldadas a través de procedimientos establecidos en normas internacionales como ASTM E-165, ASTM E-1417, ASTM E-1219, los resultados obtenidos con las tintas penetrantes fluorescentes bajo la acción de la luz negra son satisfactorios en lo que corresponde a la evaluación de los defectos en las juntas soldadas con criterios de aceptación o rechazo según AWS D1.1. Con esto se demuestra que el método planteado presenta confiabilidad [4].

Otra investigación en el mismo ramo es la que presenta Jairo David Corrales [5], muestra el análisis de dos tipos de alambres utilizados en el proceso de soldadura GMAW en el proceso de fabricación de carrocerías para evaluar y reducir los defectos a partir de pruebas realizadas con líquidos penetrantes. El objetivo de Jairo es estudiar la variación de los parámetros del proceso de soldadura GMAW con dos tipos de alambres ER70S-3 y ER70S-6 en el proceso de fabricación de carrocerías utilizando perfiles conformados de acero galvanizado ASTM A-924M para reducir los defectos en las juntas soldadas.

Para realizar el análisis, determinó el proceso de obtención de probetas para los ensayos bajo ciertas normas, definió los parámetros que intervienen en el proceso de

soldadura GMAW en acero galvanizado. También determinó los defectos de las juntas soldadas del acero galvanizado utilizando el método de líquidos penetrantes.

En el procedimiento del ensayo de tintas penetrantes fluorescentes ASTM E-165 en aerosol, realizó la limpieza y aplicación del líquido sobre la superficie dejándolo actuar para que penetre sobre los posibles defectos, posteriormente retiró el exceso para aplicar un revelador que evidencia el defecto sobre la pieza.

Los resultados obtenidos de las pruebas del ensayo demuestran que es posible observar los defectos como: porosidad, falta de fusión y socavaduras, así como ubicar sus coordenadas, longitud y diámetro, obteniendo así un porcentaje de aprobación y no aprobación del tipo de soldadura aplicada sobre la probeta. En este caso, el resultado obtenido es que el alambre ER70S-6 tiene mayor aprobación con un 67% que el alambre ER70S-3 con un 33% de aprobación.

Jairo concluye el análisis demostrando que los ensayos de tintas penetrantes muestran perfectamente los tipos de defectos hallados sobre la soldadura de ambos alambres. De la misma forma remarca la importancia del equipo de seguridad al momento de la aplicación de las tintas ya que se tratan de químicos nocivos para la salud. En la figura 1.1 podemos observar el uso de líquidos penetrantes en juntas soldadas.



Fig.1.1 Método de líquidos penetrantes [5].

De acuerdo a la NOM-B-133-1994 Y ASTM E-165 existen diferentes métodos de inspección con líquidos penetrantes de acuerdo al tamaño, forma y peso de las piezas a inspeccionar, así como su número, influyen de manera determinante en la selección del sistema a emplear, por lo que su campo de aplicación es extenso.

Un aspecto a tomar en cuenta con este método es que de acuerdo a la norma mexicana MNX-B482 se establece un sistema para la capacitación, calificación y certificación de la competencia de personal que efectúa, testifica, administra, supervisa y evalúa los resultados obtenidos al aplicar los diferentes métodos y técnicas de ensayos no destructivos (líquidos penetrantes). Como se puede verificar, al final es necesaria la inspección visual mediante personal calificado para determinar las fracturas y deformaciones que relevan el método empleado, de ésta manera se puede deducir que con un sistema de visión por computadora que haga el análisis de manera automática puede mejorarse dicho método.

Como se explicó en los párrafos anteriores con la técnica de líquidos penetrantes es posible analizar detalles en la superficie de objetos con la finalidad de evidenciar defectos en los mismos como los son: fracturas, corrosión y mala manufactura, esto va acorde a los propósitos de este proyecto, sin embargo, la inspección visual se sigue haciendo de forma tradicional motivo por el cual puede mejorarse con sistemas de procesamiento de imágenes por computadora.

1.10.1.2 Técnicas de reconstrucción 3D para análisis de perfiles

La reconstrucción tridimensional (3D) de objetos, es un proceso mediante el cual los objetos reales son reproducidos digitalmente en sus tres dimensiones (alto, ancho y profundidad) en una computadora. En los últimos años, la investigación en el desarrollo de las técnicas de reconstrucción tridimensional ha dado lugar a escáneres comerciales en 3D con los cuales se pretende tener sistemas ópticos fáciles de manejar en la obtención de topografía de objetos diversos [6].

Básicamente se pueden dividir estas técnicas en dos tipos de reconstrucción: por contacto y sin contacto, este trabajo se enfoca en técnicas sin contacto ya que son más fáciles de implementar y de mucho menor costo en comparación con las técnicas de contacto.

Al contar con una técnica de digitalización tridimensional de un objeto es posible hacer un análisis superficial de la muestra, ya que dicho análisis puede programarse a través de un computador con algoritmos matemáticos, lo que supone una ventaja enorme en comparación con la inspección visual tradicional, es por esto la necesidad de conocer las técnicas de recuperación 3D.

1.10.1.2.1 Técnicas de no contacto

Las técnicas de no contacto son una alternativa para la obtención topográfica 3D de objetos y análisis superficiales, estas técnicas se dan muy común en el campo de la tomografía computarizada por rayo x, escáner láser, fotometría, ultrasonido, entre otros. Estas técnicas se pueden subdividir en activas y pasivas. Las primeras consisten en técnicas que no emiten ninguna clase de radiación, pero se enfocan en detectar la reflejada en el ambiente como puede ser la luz visible. Las segundas son aquellas técnicas que se caracterizan por emitir alguna clase de radiación (luz, ultrasonido u ondas de radio). La medición de la forma del objeto se logra analizando la energía reflejada o transmitida por la superficie del objeto [7].

Las ventajas principales de estas técnicas son:

- Rapidez con la que se toman las muestras.
- Facilidad en la toma de muestras.
- No manipulación directa del objeto.
- Altamente preciso al tomar mediciones.

Un ejemplo de técnica pasiva es la fotogrametría, la cual consiste en la creación de modelos tridimensionales a partir de la medición y análisis de las características geométricas de objetos representados en imágenes digitales de dos dimensiones. Emplea dos cámaras fotográficas un tanto apartadas apuntando al mismo objetivo. Analizando las diferencias entre las tomas de las cámaras puede determinarse la distancia entre los lentes y el objeto en diferentes puntos de las imágenes [8].

1.10.1.2.1.1 Proyección de Franjas

Un método eficiente para la reconstrucción 3D es el llamado proyección de franjas, es un método muy utilizado gracias a la precisión que se obtiene en la medición de objetos y la versatilidad de la técnica, este método consta de un sistema proyector de franjas, un plano de referencia y un sistema de observación [6], la figura 1.2 muestra una representación muy simple de este sistema.

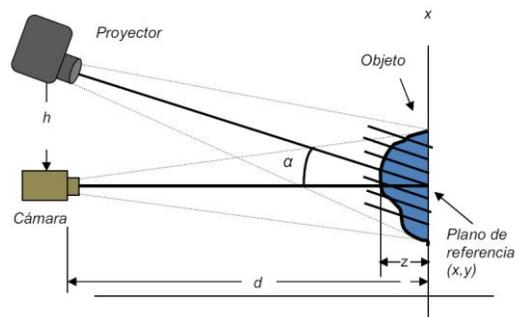


Fig.1.2 Método de proyección de franjas para medición de perfiles y reconstrucción 3D [6].

Una aplicación práctica de esta técnica se muestra en el trabajo de investigación presentado por German Reséndiz [9] consiste en el diseño de un prototipo de escáner que usa la técnica de proyección de luz estructurada para reconstruir de manera digital la forma tridimensional de objetos.

El objetivo de la investigación consiste en digitalizar un objeto proyectando franjas, recuperando su información de fase utilizando el método de 4 pasos y posteriormente compararlo con un objeto de referencia para realizar un control de calidad e implementarse con el fin de beneficiar a ciertos sectores industriales.

Para realizar su trabajo utilizó un proyector convencional y una cámara de 5 Megapíxeles CCD, los cuales se proyectarán y capturarán respectivamente el patrón de franjas deformado por el objeto de prueba para obtener la fase óptica y calcular la morfología del objeto de prueba. Para el procesamiento de la fase óptica realizó una proyección de cuatro imágenes del patrón de franjas con corrimientos relativos de $\pi/2$ con apoyo del programa Matlab y posteriormente utilizó el algoritmo de 4-pasos de fase.

Los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados por Germán muestran que es posible obtener la topografía de un objeto extendido empleando la técnica de proyección de franjas y aplicando el método de cuatro pasos de corrimiento de fase.

En la figura 1.3 y 1.4 se puede ver una reconstrucción parcial aplicando el método de proyección de franjas, en la figura 1.3 se muestra un rostro que al proyectar franjas son deformadas por el mismo objeto, en la figura 1.4 se muestra su reconstrucción parcial. Esta información es obtenida del trabajo desarrollado por S. Fernandez A. [10].

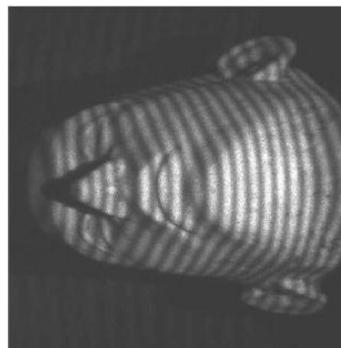


Fig.1.3 Método de proyección para recuperación de perfiles [10].

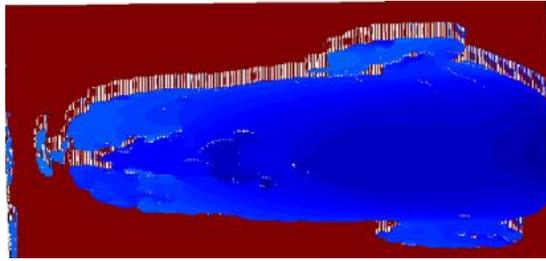


Fig.1.4 Recuperación de perfil de objeto [10].

Otra aplicación de esta técnica la muestra la investigación presentada por Claudia de la Rosa [11] en la cual obtiene la digitalización de un objeto mediante técnicas ópticas, explica el modelo matemático del efecto de Moiré y la técnica de sombra como base para métodos de reconstrucción de objetos en 3D, utilizando el desenvolvimiento de fase y aplicándolo en programas especializados para implementarlo en el sector médico con el objetivo de analizar anomalías o deformaciones del cuerpo humano mediante un mapa topográfico de la superficie.

A través de la investigación, Claudia realizó un experimento de tres fases que consiste en: Seleccionar una técnica de Moiré adecuada para los materiales con los que cuenta, en este caso, Moiré de sombra y programar las rejillas necesarias sobre acetatos. Posteriormente realizar experimentos, inicialmente con objetos simétricos pequeños del tamaño de la rejilla y más adelante con partes del cuerpo como caras y manos comprobando que se obtuvieran las curvas de nivel. Para finalizar se realiza el experimento sobre espaldas de estudiantes para comprobar su funcionalidad en mediciones médicas, como se observa en la figura 1.5

Las conclusiones obtenidas de la experimentación muestran que la topografía de Moiré presenta una sensibilidad del 100% con el mejor resultado y una especificidad del 83.5% comparado con el Test de Adams, la Medida giba y el Escoliómetro. Sin embargo, es necesario desarrollar un método que sea adaptable y cuente con las condiciones ideales para realizar la topografía con los mejores resultados.

A partir del desarrollo del análisis matemático, Claudia concluye que la técnica de Moiré de sombra no es invasiva, la implementación tiene menor desgaste, mayor robustez y el objeto analizado no sufre modificaciones por acción del sistema. También menciona que el efecto producido por sombreado proporciona una imagen de las curvas de nivel del objeto analizado y a su vez, cuando se produce por la técnica de sombra, representa la elevación del plano de la superficie, el cual es un mapa de contornos del objeto.

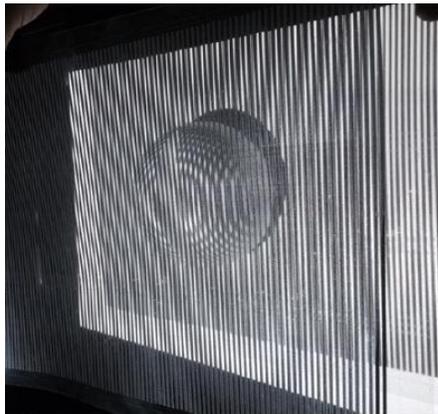


Fig.1.5 Aplicación de la técnica Moiré [11].

Otra investigación similar al método anterior pero que se enfoca en mejorar el desenvolvimiento de fase optimizando el método de Goldstein es la que presenta Abel López Ocaña [12]. Propone una estrategia de partición por bloques del mapa de fase para acelerar el algoritmo de Goldstein mediante programación paralela, utilizando el concepto de residuos para mejorar la eficacia del algoritmo del desenvolvimiento de fase guiado por calidad.

El objetivo principal de Abel consiste en mejorar la eficiencia en tiempo de ejecución y eficacia de los métodos de desenvolvimiento de fase espaciales como el algoritmo de Goldstein y el algoritmo guiado por calidad.

Para realizar el desarrollo de la optimización de las técnicas, Abel estudia la importancia de la fase en una señal, el proceso de desenvolvimiento y el desenvolvimiento

de fase en una y dos dimensiones analizando el funcionamiento del algoritmo de Itoh. También detalla el funcionamiento del algoritmo de Goldstein para presentar una versión paralela del algoritmo propuesto que se sometió a experimentos contemplando mapas de fase reales y sintéticos. Además, explica a detalle el desenvolvimiento de fase guiado por mapa de calidad para comprender su estructura y funcionamiento del algoritmo, presentando una mejora en la construcción de mapas de calidad usando el concepto de residuo.

Del análisis, diseño e implementación de los algoritmos, Abel obtuvo resultados competitivos respecto a la versión original utilizando una arquitectura multi-núcleo. También presenta la propuesta de una mejora en la construcción de los mapas de calidad para el algoritmo de desenvolvimiento guiado por calidad haciendo uso del concepto de residuos obteniendo mejores resultados comparados con los del algoritmo de Goldstein.

Análisis en proyección de franjas

Shien Ri [13] realiza una comparación entre los métodos de muestreo de Moiré y la transformada de Fourier de tiempo reducido empleando como referencia la técnica de la transformada de Fourier en dos dimensiones. El algoritmo seleccionado para este caso es el de Windowed Fourier Ridges debido a que es ideal para procesar los datos de la proyección de franjas debido a que el método de muestreo de Moiré procesa los patrones fila por fila. Los elementos considerados para los experimentos son: distribuciones de fase lineales, distribuciones de fase no lineales y condiciones diferentes de ruido.

Shien Ri realiza un análisis presentando los principios de los métodos a emplear para la extracción de fases de un portador de proyección de franjas, posteriormente muestra la comparación del entorno y los resultados de la simulación con fases lineales, no lineales y bajos condiciones de ruido diferentes, después compara los tiempos de computación en los tres métodos. Para finalizar, verifica la precisión de la medición

basado en los datos de la perfilometría experimental y menciona los problemas de rendimiento de los algoritmos.

Al comparar ambos métodos, concluye que el muestreo de Moiré y la transformada de Fourier, ambos en una sola dimensión producen resultados casi idénticos tanto en simulación como en los experimentos. Al realizarlo con base en la referencia de la transformada de Fourier en dos dimensiones los resultados en pruebas de simulación se comportan similares, pero se superan en los experimentos reales.

Xian Wang [14] propone un método mejorado de construcción de tensor de estructura no lineal para implementar en las interferencias de la proyección de franjas que provoca que la difusión sea impulsada por la densidad de la proyección de franjas.

En el desarrollo del método, Xian describe a detalle las características de la extracción de textura propuesta, basado en la estructura del tensor y la difusión no lineal. Después incorpora el modelo Chan-Vese en el valor del vector. Para finalizar, aplica el método propuesto a una secuencia de proyección de franjas y compara los resultados del experimento con los métodos tradicionales.

Xian realizó pruebas en dientes de diferentes engranes para comprobar la funcionalidad del método propuesto, los resultados obtenidos mostraron que es posible obtener una mejor segmentación de la región de interferencia comparado con los métodos tradicionales. También menciona que es posible aplicar el método a otras partes recolectando las frecuencias de la interferometría.

Manuel Servin [15] propone un algoritmo de desenvolvimiento de fase temporal de dos pasos que utiliza dos fases demoduladas-envueltas susceptibles, ampliamente separadas de una superficie estática.

Manuel describe que la demodulación de la primera fase tiene como máximo una sensibilidad de una longitud de onda y la segunda es G -veces ($G \gg 1.0$) más sensible. También explica que las dos aplicaciones importantes para el algoritmo de desenvolvimiento de dos pasos son la perfilometría y la interferometría del radar de apertura sintética. En estas aplicaciones el objeto o superficie de análisis se encuentra

estático y altamente discontinuo, por lo que el desenvolvimiento temporal es la mejor estrategia que emplea.

Las ventajas y limitaciones que Manuel dedujo a partir de la comparación del algoritmo de desenvolvimiento de fase temporal de dos pasos con el desenvolvimiento de fase temporal estándar de N pasos se resumen en que los beneficios anti-ruido se mantienen sin cambios.

El objetivo de Haixia Wang [16] fue desarrollar un método que sea capaz de resolver los problemas de ruido y discontinuidad en el análisis de proyección de franjas.

El método presentado tiene las siguientes características. Es genérico y adaptable a los métodos de última generación de extracción y desenvolvimiento de fase. La eliminación de ruido se implementa para actuar con el método en el análisis de viabilidad de las pruebas, ya que la eliminación de ruido es el primer paso crítico para el análisis complementario. El método es robusto y preciso para que el análisis de proyección de franjas sea confiable y automático.

Haixia propone un método de segmentación de franja en la coherencia de orientación local y un método de difusión de mejora de la coherencia con reconocimiento de límites. También decide segmentar las piezas en los campos de medición como un enfoque sencillo y eficaz para las tareas generales de análisis de franjas. Además, utiliza la coherencia de orientación indicada por los tensores de la estructura local para el reconocimiento de discontinuidad, seguida del fin de los límites y el refinamiento para una mejor precisión.

La conclusión obtenida por Haixia en el análisis de los resultados simulados y experimentales verifican el método propuesto, también explica que los métodos de segmentación de franja en la coherencia de orientación local y difusión de mejora de la coherencia con reconocimiento de límites pueden trabajar de manera eficiente y automática incluso en proyecciones de franjas con demasiado ruido. Además de que el enfoque basado en la segmentación proporciona un marco general para incorporar otras técnicas recuperación y desenvolvimiento de fase.

Chao Tian [17] propone un algoritmo simple y robusto de demodulación de fase de dos disparos para proyección de franjas con cambios de fase arbitrarios. El algoritmo es insensible a defectos o ruido y es capaz de extraer pequeños cambios de fase, así como recuperar la fase de números bajos de franjas.

Chao concluye a partir de las pruebas y simulaciones realizadas con el algoritmo que el demodulador de fase propuesto es demasiado robusto para el ruido o defectos locales y es particularmente bueno en la recuperación de fase de números bajos o baja frecuencia de interferogramas. También explica que funciona con interferogramas de dos disparos con pequeños desplazamientos de fase.

Para finalizar, menciona que la técnica demuestra una desventaja computacional debido a que es costosa por las grandes dimensiones de optimización global y puede no ser adecuado para el proceso de proyección con franjas demasiado irregulares o discontinuas. El algoritmo puede extenderse para recuperar fases con disparos arbitrarios o fases desplazadas de interferogramas.

Mciej Trusiak [18] propone un algoritmo novedoso para el análisis eficiente de proyección de franjas de calidad y forma arbitraria. Combina el estimador de dirección robusto basado en el análisis de componentes principales con la técnica de análisis de franjas basado en la transformada de Hilbert-Huang. El esquema propuesto es capaz de realizar con precisión cada tarea de procesamiento (eliminación de ruido, desvío) y análisis (demodulación de amplitud y fase) con robustez a la forma de la franja local (orientación, espaciado) y deterioros de la calidad (fondo desigual, modulación e influencia del ruido).

En el desarrollo del algoritmo, Mciej describe la metodología híbrida propuesta HHT-PCA con mayor énfasis en el análisis de componentes principales y la modificación adaptada del HHT filtrado/demodulación. Posteriormente realiza una evaluación experimental y sintética del esquema propuesto para la demodulación de proyección de franjas de disparo único. Para finalizar, el esquema propuesto es comparado con otras técnicas de análisis de franjas.

El resultado de la experimentación obtenido por Mciej demuestra que el algoritmo es efectivo en un amplio rango de proyección de franjas complicados con ruido, cambios rápidos de contraste, influencia desigual de fondo, variaciones de periodo y orientación significativa de franjas. También recalca que cuenta una precisión mayor a 0,03 radianes, siendo comparado favorablemente con otras técnicas. Finaliza mencionando que el método puede aplicarse en elementos ópticos de prueba, añadiendo otras técnicas de medición óptica basados en franjas.

Ronggang Zhu [19] propone un método de demodulación de fase basado en el método de franjas espacio-temporales (Spatial-Temporal Fringes). Este método utiliza únicamente dos estructuras con cambio de franjas de fase con portador lineal fusionados en una imagen de franjas espacio-temporales. Posteriormente la fase medida puede ser extraída desde el espectro de frecuencia.

Para realizar el análisis, Ronggang deduce el algoritmo extendiendo la teoría tradicional de STF (Spatial-Temporal Fringes) con al menos tres estructuras de franjas. En las simulaciones, Ronggang compara su desempeño con el método de la transformada de Fourier, analiza las diferentes condiciones del portador y los pasos de fase donde la precisión se puede garantizar en la mayoría de los casos. Para finalizar, valida el algoritmo mediante algunos experimentos.

Ronggang concluye explicando que el método tiene requisitos flexibles en cuando al valor del cambio de fase y la cantidad de cuadros de franjas proporciona una amplia área de aplicación comparado con métodos tradicionales como los casos de medición con calibración de cambio de fase y vibraciones del entorno inexactas, o la demanda de captura a alta velocidad. Por otra parte, recalca que sólo utiliza un marco de franjas y esto permite obtener un menor error de retroceso.

Shaoyan Gai [20] presenta una novedosa mejora en los sistemas de medición de dos cámaras basado en un método estéreo empleando una correlación de imagen digital, proyectando patrones moteados y franjas sinusoidales en los objetos.

En primer lugar, los puntos correspondientes se obtienen con la ayuda de los patrones moteados. Shaoyan propone un método de combinación de fase moteado para mejorar el desempeño. En segundo lugar, los puntos correspondientes se obtienen apropiadamente ajustando las coordenadas iniciales localmente de acuerdo al mapa de fase envuelto. Para realizar el desarrollo, Shaoyan analiza tres casos para asegurar que las coordenadas exactas se obtienen sin puntos perdidos. Por lo tanto, busca obtener un mejor resultado de construcción 3D sin necesidad del proceso de desenvolvimiento de fase y el número de patrones proyectados se reduce considerablemente.

Para concluir el análisis, Shaoyan menciona que el método propuesto es eficiente en tareas de medición 3D. Los experimentos a su vez demuestran que, comparado con los métodos clásicos, el método propuesto puede lograr resultados de reconstrucción precisos en un tiempo de medición reducido.

Junzheng Peng [21] propone un método que modifica la fase portadora en la proyección de franjas según la distorsión del proyector basada en la fase portadora de flexión. Como consecuencia, la proyección de franjas con espaciado de manera desigual (también llamados patrones adaptativos de franjas) se genera en el plano de proyección.

Durante el desarrollo, Junzheng realizó la experimentación del método y demostró que, al proyectar los patrones adaptativos de franjas, la fase portadora de flexión se encuentra en offset, con esto las franjas uniformemente espaciadas se restauran en un plano perpendicular al eje óptico de la lente del proyector. También afirma que debido a que la fase del portador de flexión se obtiene midiendo una placa estándar colocada en cualquier posición, el método es más conveniente y rápido. Este método se basa en la configuración de medición particular y para eliminar la influencia de la distorsión del proyecto, este se calibró antes de generar la proyección de franjas no uniformes.

Mediante los resultados obtenidos de la experimentación Junzheng demostró que el método tiene grandes ventajas comparados con otros métodos. Recalca la importancia de que no requiere la calibración del proyector, tiene poca complejidad computacional y mejora la precisión de la medida. También menciona que el método sólo requiere de colocar una placa estándar en cualquier posición dentro del volumen de medición, por lo cual, el tiempo de preparación es menor que el de la calibración del proyector. Para finalizar, el método permite suprimir la distorsión del proyector en un sistema de patrones adaptativos de franjas dispuesto arbitrariamente.

Xinran Liu [22] presenta un método de proyección de franjas para la medición de formas de la superficie que utiliza proyecciones de franjas de modulación de fondo de alta frecuencia, donde el patrón con mayor frecuencia permite solo dos candidatos de puntos correspondientes en el volumen de medición para una selección confiable de puntos correspondientes, este se determina empleando un modelo que relaciona la longitud de onda marginal con las restricciones de la geometría del sistema.

Para realizar el método, Xinran presenta el desarrollo matemático que incluye las expresiones de los parámetros de restricción geométrica permitiendo el cálculo de los parámetros inmediatamente después de la calibración del sistema antes de la medición, con esto permite el uso de una tabla de consulta almacenada para reducir el cálculo durante la medición. Al realizar el experimento, Xinran demostró que el método requiere únicamente de cuatro proyecciones de franja para mediciones de forma de superficie de campo completo y maneja objetos con discontinuidades de superficie.

En los resultados obtenidos, Xinran muestra que el método tiene la capacidad de realizar mediciones de forma en campo completo en 3D con alta precisión en superficies con discontinuidad geométrica, para objetos aislados espacialmente emplea únicamente cuatro proyecciones de franjas de alta frecuencia. Xiran explica que la computación se realiza en píxel-wise y por lo tanto es prometedora para la computación paralela.

Ali Babaei [23] presenta un método pasivo de manejo del sistema gamma no lineal que expresa la proyección de franjas como una función exponencial y desarrolla un modelo matemático para el cálculo de fase independiente de gamma.

El método presentado por Ali reduce considerablemente el efecto de no linealidad del proyector, además no requiere tener conocimientos previos o posteriores del proyector y no involucra procesos iterativos o un alto costo computacional. Ali menciona que gracias a las características anteriores reduce en gran medida la configuración y la preparación del sistema óptico antes de la medición permitiendo un fácil uso.

Posterior a los resultados obtenidos de la experimentación, Ali concluye que el método de proyección exponencial de proyección de franjas redujo en gran medida la no linealidad gamma en comparación con el método convencional sin corrección. Además, el nuevo método tuvo un funcionamiento similar al método de franja pre-distorsionada (corregida) empleando una tabla de consulta. También explica que el método de proyección exponencial de proyección de franjas tuvo un error de fase ligeramente más alto que el método pre-distorsionado (corregido). De la misma forma, menciona que el método exponencial tiene la ventaja de no requerir conocimientos previos del comportamiento gamma no lineal de la cámara y el proyector, siendo esto una excelente opción que no requiere de procedimientos de calibración del sistema óptico.

Hak Gu Kim [24] propone un nuevo cálculo de holograma generado por computadora basado en una capa ultrarrápida que explota la dispersión de la proyección de franjas de holograma en una capa de objetos 3D. La proyección de franjas holográficas de cada capa de profundidad se calcula rápidamente por difracción plana con la transformada rápida de Fourier o la transformada rápida de Fourier dispersa, en lugar del método de trazado de rayos para difracción de luz puntual.

Para desarrollar el método, Hak diseñó una proyección de plantilla de franjas holográficas dispersas. Explica además que la proyección de franjas holográficas se calculó rápidamente agregando la proyección de plantilla de franjas dispersas en cada

posición del objeto. Durante la experimentación comprobó que es posible reducir la carga computacional debido a que el tamaño de la proyección de franjas holográficas de la plantilla es más pequeño que el plano de cálculo de holograma generado por computadora.

Los resultados obtenidos por Hank mostraron que el método propuesto fue capaz de acelerar considerablemente el cálculo de holograma generado por computadora para objetos 3D, siendo estos 10 a 20 mseg para 1024x1024 píxeles y conservando la calidad visual.

Haixia Wang [25] realizó la verificación de los métodos de demodulación típicos: el rastreador de fase guiado por frecuencia con coincidencia de fase cuadrática, Windowed Fourier Rigdes y la cuadratura transformada de fase en espiral para demostrar cómo los métodos de demodulación pueden detectar los límites.

En el desarrollo de la verificación, Haixia explica que una segmentación clara de la proyección de franjas puede funcionar como un paso de pre-procesamiento universal para diversas tareas de procesamiento de proyección de franjas discontinuas, incluyendo eliminación de ruido, demodulación, desenvolvimiento, etc.

El primer paso que realizó fue incorporar las ideas para crear un diagrama de flujo completo para el procesamiento discontinuo de proyección de franjas, posteriormente propuso una forma sistemática de introducir la detección de límites en los métodos de demodulación. Como siguiente paso presentó una función de enmascaramiento para excluir los píxeles irrelevantes y mejorar la precisión del procesamiento. También propuso una estrategia de escaneo de calidad guiada para posponer el procesamiento de píxeles de límite y mejorar la robustez del procesamiento. Como último paso, aplicó la función de enmascaramiento y la estrategia de escaneo en los tres métodos de demodulación, así como en la fase de desenvolvimiento.

Los resultados obtenidos por Haixia muestran que fue posible realizar una excelente implementación y adaptación en los métodos. Concluye explicando que los resultados de discontinuidad son satisfactorios.

Jorge L. Flores [26] propone una nueva técnica que permite obtener la forma en 3D de un objeto dinámico proyectando una imagen en color sobre la superficie del objeto mientras éste se transporta en un movimiento lineal con velocidad uniforme. La imagen RGB consiste en la proyección de franjas sinusoidales que se codifica en canal rojo y un fondo homogéneo (nivel 255 de grises) se codifica en canal azul. Este último se utiliza para rastrear el objeto, y el primero para estimar la profundidad del objeto empleando el algoritmo iterativo avanzado.

Para realizar la experimentación de la técnica, Jorge empleó un sistema online de medición 3D el cual consiste en: un proyector digital que realiza la proyección de franjas RGB generado por software, una cámara de alta resolución acoplado (CCD) empleada para capturar un video donde la proyección de franjas está modulada por la superficie del objeto y una plataforma que realiza movimientos en el eje x positivo con una velocidad aproximadamente constante.

El procedimiento del experimento se realiza en dos pasos. En el primer paso una proyección de franjas sinusoidales sin valores de desplazamiento asignado de fase y una imagen en blanco (255 niveles de grises) se codifican en los canales R y B de una imagen en color, posteriormente el proyector realiza la proyección de la imagen de color mencionada sobre la superficie del objeto y la cámara adquiere una secuencia de imágenes. Para el segundo paso se recuperan dos imágenes (de los canales R y B) de cada uno de los cuadros adquiridos. La primera se utiliza para estimar la profundidad del objeto y la segunda se emplea para rastrear la posición del objeto a medida que se mueve a lo largo de la dirección de x.

A partir de la experimentación, Jorge demuestra que el uso del algoritmo iterativo con pasos de fase con N espaciados arbitrarios en aplicaciones con objetos en movimiento, supera la necesidad de un control eficiente en la velocidad de la etapa de viaje en línea. Por lo tanto, demostró que puede recuperar la fase sin calibración previa entre el proyector/sistema de cámara y la plataforma de viaje.

Jorge concluye explicando que la precisión de la técnica puede mejorarse si se emplean algoritmos de paso de fase robustos para desfasar armónicos aleatoriamente. Añade también que el método propuesto es potencialmente útil para mediciones dinámicas y aplicaciones en tiempo real.

Gang Rao [27] propone un método de proyección de franjas sinusoidal de frecuencia variable que se optimiza por la profundidad de medición y con ello mejorar la precisión de la medición 3D en la perfilometría de proyección de bordes. Este método mejora la precisión de coincidencia de píxeles y con ello aumenta la precisión de la medición.

Para reducir el error de coincidencia de píxeles provocado por el ruido intenso en la imagen capturada, Gang derivó la frecuencia óptima en función de la profundidad, con esto logró determinar el grado de desenfoque del proyector y la cámara. Posteriormente realizó la optimización de la frecuencia en línea a lo largo de los ejes de abscisas y ordenas en la proyección de franjas sinusoidales de acuerdo con la retroalimentación de profundidad y añadió los métodos de codificación y decodificación para proyección de franjas sinusoidales de frecuencia variable.

Los resultados experimentales obtenidos por Gang demuestran que la eficiencia del método propuesto mejora la precisión de la medición de formas 3D con profundidad variable mediante la proyección de franjas de frecuencia variable.

1.10.1.2.1.2 Reconstrucción láser

Otra técnica de no contacto muy utilizada en la reconstrucción 3D y análisis superficial es el telémetro láser. Para examinar la superficie de un objeto mide la distancia del apuntador láser y el objeto tomando en cuenta el tiempo que se proyectó el haz de luz a su vez que este retorna al punto de origen, la principal ventaja es que puede medir distancias largas, incluso kilómetros. La desventaja principal es que debe cambiar de posición para cada toma de muestras [28]. Un ejemplo de equipos de reconstrucción 3D por medio de láser se muestra en la figura 1.6.



Fig. 1.6 Faro Focus escáner 3D [28].

La empresa “Bohic Ruz explorer society” hace uso de estas técnicas de scanner 3D, su uso principal es en la rama de la Arqueología y Geología haciendo levantamientos digitales 3D de monumentos, museos virtuales, entre otros.

1.10.1.2.1.3 Escáner por triangulación

El sistema de escáner por triangulación forma parte de las técnicas denominadas de no contacto y es ampliamente utilizada en la actualidad para análisis de superficies, aplica un haz de luz sobre la superficie del objeto, el reflejo de ésta es captado por una cámara ccd o cmos con la que se puede analizar la distorsión del haz de luz [29].

De acuerdo a Daniel López [30], muestra el desarrollo un escáner 3D utilizando un sensor láser 2D de alta precisión en conjunto con un sistema de movimiento en un plano cartesiano para generar nubes de puntos y realizar la extracción de primitivas geométricas que permitan reconstruir los objetos escaneados mediante modelos matemáticos.

Durante la creación del escáner, Daniel realizó el desarrollo e implementación de una mesa de pruebas con aislamiento de vibraciones del entorno, un módulo de hardware

que permite el control de posicionamiento de un objeto sobre un plano cartesiano, un módulo de software para sintonizar el movimiento de los objetos en un plano cartesiano para escanear el objeto y generar archivos de nubes de puntos, y una metodología que permite integrar las diferentes nubes de puntos que describen un objeto.

Para realizar el proyecto se construyó una mesa de pruebas con el fin de reducir el ruido y vibraciones del medio ambiente, así como el análisis del error del escáner que se presentaba en el proceso de operación.

También en el desarrollo describe el algoritmo MAC y el modo de empleo para el ajuste de los parámetros de ecuaciones primitivas geométricas a partir de una nube de puntos. También explica la optimización para lograr disminuir el número de iteraciones necesarias en el proceso del algoritmo MAC.

Durante el desarrollo se presenta el problema del registro de nubes de puntos y el uso de descriptores de superficie, así como la solución presentada con el uso de datos de los vértices de los puntos. Posteriormente se aplica la metodología a las pruebas y los resultados del registro de nubes de puntos obtenidos por el escáner.

Con base en los resultados obtenidos de la experimentación, Daniel demuestra que: el desempeño de la metodología propuesta para extraer primitivas geométricas, fue mejorado al disminuir la cantidad de iteraciones necesarias para converger, al hacer uso del conocimiento de que los datos están ordenados y nos son aleatorios. Entonces la muestra de consenso se busca a cada dos líneas de escaneo en vez de en todos los puntos escaneados. Esto dio como resultado una mejora de 737% con respecto al número de iteraciones requeridas por un muestreo uniforme.

Además, demuestra que el uso de la metodología propuesta y empleando un subconjunto de puntos 3D del total de conjunto de la nube de puntos permite una mejora en tiempo de aproximadamente 1,799%.

La desventaja de este trabajo es que se necesita un eje móvil para desplazar la muestra a su vez que el sensor láser tome toda la información necesaria del perfil de objeto para ir reconstruyendo el objeto.

1.10.1.2.2 Técnicas por contacto

Los sistemas de adquisición de formas por contacto físico son aquellos que exploran la superficie de los objetos por medio de dispositivos que tienen contacto directo con la superficie a explorar. Alcanzan gran precisión y son usados frecuentemente en la industria [8]. Un ejemplo de estos es el palpador que me muestra en la figura 1.7.



Fig. 1.7 Palpador 3D para máquina herramienta [31].

El ejemplo de la figura 1.7 es para montado en máquinas herramientas o robots CNC, se utiliza para posicionar, detectar dimensiones y centrar un trabajo.

Algunas desventajas de este tipo de técnicas son [8]:

- No puede digitalizar detalles muy finos en los objetos.
- Puede llegar a alterar la superficie de objetos blandos o sensibles ya que depende del contacto directo.
- Proceso lento en la obtención de la topografía del objeto

- Sistemas costosos.

Una aplicación de este método para comparar coordenadas en objetos se hace con brazos robóticos en cuyo extremo contienen un palpador y es utilizada para medir dimensiones y diferencias en muestras para análisis superficiales. La rápida expansión de los brazos de medir por coordenadas por la industria ha supuesto la aceptación de un instrumento metrológico que aporta flexibilidad a la tarea de inspección. Aunque las bases de funcionamiento de los brazos de medir por coordenadas han sido ya estudiadas, todavía existen una gran falta de conocimiento sobre su comportamiento, la definición y la determinación de sus errores de medición, sus metodologías de evaluación y el impacto de las diferentes fuentes de error [32].



Fig. 1.8 Brazos articulados para medir coordenadas [32].

De acuerdo al trabajo de Daniel Gonzales, en su tesis presenta un estudio completo del conocimiento actual sobre brazos en medición por contacto para proponer una metodología capaz de determinar correctamente el error que alcanzan. El objetivo final que se pretende es aumentar la fiabilidad y trazabilidad de los procesos de medición con estos dispositivos metrológicos, punto fundamental para el logro de los elevados estándares de calidad requeridos en los procesos fabricación. La metodología de evaluación propuesta se basa en el uso de características geométricas y en los principios generales especificados en las normas internacionales para conseguir

revelar el error cometido en mediciones reales. Para ello, ha diseñado y fabricado un patrón de evaluación adaptado a dicha metodología y a las características únicas de los brazos de medición [32].

Este tipo de máquinas son muy utilizadas para la inspección y comparación en la forma de un objeto, la principal desventaja de este tipo de artefactos es que difícilmente puede hacer un análisis de muestras muy pequeñas o detalles muy finos lo que supone vacío en algunas aplicaciones que requieren alto grado de exactitud, sin embargo, se da un panorama de la digitalización y comparación por coordenadas de objetos por computador.

1.10.2 Método Seleccionado para análisis superficiales en objetos

De acuerdo a los métodos investigados en este capítulo acerca del análisis superficial en la forma del objeto, se concluye que a pesar de algunos ser muy robustos y de buenos resultados no todos pueden ser aplicados para cubrir los objetivos indicados al inicio de este documento, principiante se requiere que los componentes sean de fácil acceso, fácil implementación y de costo bajo, por lo que el método de proyección de franjas es la mejor opción para aplicar en este proyecto. Por otro lado, aunque la proyección de franjas es muy utilizada desde décadas atrás, aún no hay una aplicación directa, de fácil implementación y bajo costo en el control de calidad de muestras por procesamiento de imágenes utilizando esta técnica, lo que crea un área de oportunidad para el desarrollo propuesto.

CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El objetivo de esta sección es revisar los conceptos fundamentales de los cuales se apoya el desarrollo de este proyecto, conceptos de procesamiento de imágenes principalmente, ya que se tiene relación directa con sistemas ópticos. Revisaremos características básicas sobre las propiedades de la luz.

2.1 PROCESAMIENTO DIGITAL

Al igual que en el caso del procesamiento óptico, los principios fundamentales del procesamiento digital de imágenes están establecidos desde hace muchos años, pero no se llevaban a cabo debido a la falta de computadoras capaces de hacer cálculos demasiado complejos en un tiempo relativamente rápido. Con la aparición de las computadoras de alta capacidad y memoria, era natural que se comenzara a desarrollar este campo. Uno de los primeros lugares donde se empezó a realizar el procesamiento digital fue en el Jet Propulsion Laboratory en 1959, con el propósito de mejorar las imágenes enviadas por los cohetes. Los resultados obtenidos en un tiempo relativamente corto fueron tan impresionantes que muy pronto se extendieron las aplicaciones del método a otros campos [33].

2.2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Como eje fundamental de este proyecto nos remontamos a los conceptos básicos de “Imagen Digital”. La imagen digital es el archivo resultante de una desratización de una imagen natural ó sintética en elementos de imagen llamadas pixeles. Una imagen digital puede definirse como una función bidimensional $f(x,y)$ donde x,y son coordenadas en el plano y la amplitud f es llamada intensidad o nivel de gris en ese punto [34].

Hoy en día las técnicas para el procesamiento de imágenes han alcanzado un nivel de desarrollo bastante elevado gracias al hardware en los equipos de cómputo como lo son procesadores de gran velocidad, memorias RAM de gran capacidad, hardware con aceleradores de gráficos, etc. Estas características en las computadoras personales hacen posible la obtención y manipulación de imágenes y video para aplicaciones de gran complejidad en prácticamente tiempo real.

La parte más avanzada en el procesamiento de imágenes viene dada por los algoritmos matemáticos que se implementan en las imágenes para obtener resultados deseados.

2.3 FILTRADO

El filtrado es el conjunto de técnicas englobadas dentro del pre-procesamiento de imágenes cuyo objetivo fundamental es obtener, a partir de una imagen origen, otra final cuyo resultado sea más adecuado para una aplicación específica mejorando ciertas características de la misma que posibilite efectuar operaciones del procesado sobre ella [35].

Los principales objetivos que se persiguen con la aplicación de filtros son:

- Suavizar la imagen: reducir la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
- Eliminar ruido: eliminar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos y cuyo origen puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen como en el de transmisión.
- Realzar bordes: destacar los bordes que se localizan en una imagen.
- Detectar bordes: detectar los píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.

Por tanto, se consideran los filtros como operaciones que se aplican a los píxeles de una imagen digital para optimizarla, enfatizar cierta información o conseguir un efecto especial en ella. El proceso de filtrado puede llevarse a cabo sobre los dominios de frecuencia y/o espacio.

Como vemos la parte del filtrado es esencial a considerar para el desarrollo de este proyecto. Para estas tareas nos podemos apoyar de múltiples softwares que nos faciliten esa tarea, en el caso de Matlab, éste provee las instrucciones para filtrado de imágenes, lo que en muchos casos se aplica directamente la instrucción dentro del algoritmo.

2.4 GENERALIDADES DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Al estudiar la electricidad y el magnetismo uno pronto se entera del hecho de que hay un número de relaciones que se describen por productos vectoriales, o si lo desea, por reglas de la mano derecha. En otras palabras, un suceso de un tipo produce una respuesta afín perpendicularmente dirigida. De interés inmediato es el hecho de que un campo \vec{E} , variable en el tiempo, genera un campo \vec{B} que es en todas partes perpendicular a la dirección en la que \vec{E} cambia. En la misma forma, un campo \vec{B} variable con el tiempo genera un campo \vec{E} que es perpendicular en todas partes a la dirección en la que \vec{B} cambia. Se podría, por lo tanto, anticipar la naturaleza transversal general de los campos \vec{E} y \vec{B} en una perturbación electromagnética [36].

Básicamente, la radiación electromagnética tiene un componente eléctrico y un componente magnético, presenta propiedades ondulatorias y corpusculares. Los fenómenos de refracción, reflexión y dispersión de la luz son considerados como una onda electromagnética y no necesitan un medio material para propagarse. Ejemplos: la luz visible y las ondas de radio, televisión y telefonía.

2.5 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Un concepto fundamental dentro del espectro electromagnético es la longitud de onda, lo cual es una distancia que recorre una perturbación en un determinado lapso de tiempo, este intervalo ocurre entre las magnitudes más altas de la onda, se simboliza por la letra griega lambda λ . Ver figura 2.1 [6].

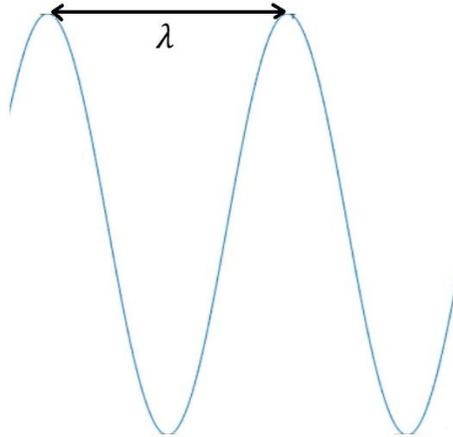


Fig. 2.1 Representación de lambda en una onda.

El espectro electromagnético es el conjunto de longitudes de onda de radiaciones electromagnéticas. Esas radiaciones incluyen los siguientes ejemplos:

- Los rayos gamma tienen las longitudes de onda más cortas y las frecuencias más altas conocidas. Son ondas de alta energía capaces de viajar a larga distancia a través del aire y son las más penetrantes.
- Los rayos X tienen longitudes de onda más largas que los rayos gamma, pero menores que la radiación ultravioleta y, por lo tanto, su energía es mayor que la de estos últimos. Se utilizan en diversas aplicaciones científicas e industriales, pero principalmente se utilizan en la medicina como la radiografía. Consisten en una forma de radiación ionizante y como tal pueden ser peligrosos. Los rayos X son emitidos por electrones del exterior del núcleo, mientras que los rayos gamma son emitidos por el núcleo.

- La radiación ultravioleta (UV) se define como la porción del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible.
- La luz visible —también espectro visible— es la parte de espectro electromagnético que los ojos humanos son capaces de detectar. Cubre todos los colores del azul a 400 nm al rojo a 700 nm. La luz azul contiene más energía que la roja.
- La radiación infrarroja (IR) —también radiación térmica— es la parte del espectro electromagnético que se encuentra entre la luz visible y las microondas. La fuente natural más importante de radiación infrarroja es el Sol.
- Las ondas radioeléctricas tienen longitudes de onda largas que varían unos pocos centímetros a miles de kilómetros de longitud. Sus principales usos son en la televisión, los teléfonos móviles y las comunicaciones por radio [37].

La figura 2.2 muestra un resumen de lo comentado anteriormente.

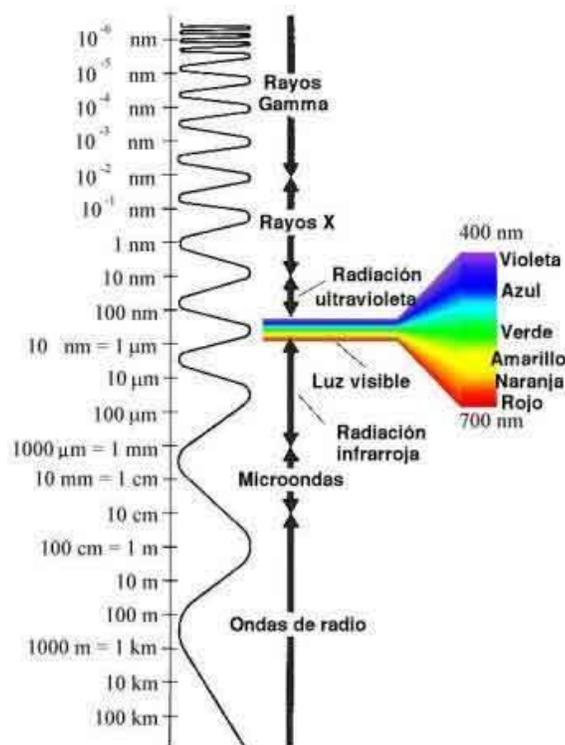


Fig. 2.2 Espectro electromagnético [37].

2.6 SUPERPOSICIÓN DE ONDAS

Las circunstancias precisas que gobiernan esta superposición, por supuesto, determinan la perturbación óptica final. Entre otras cosas, se está interesado en comprender cómo las propiedades específicas de cada onda constitutiva (es decir, amplitud, fase, frecuencia, etc.) influyen la forma última de la perturbación compuesta [36]. Esto quiere decir que cuando dos o más ondas se superponen en la misma región del espacio producen una resultante como se muestra en la figura 2.3. Estas pueden sumarse, restarse o inclusive anularse.

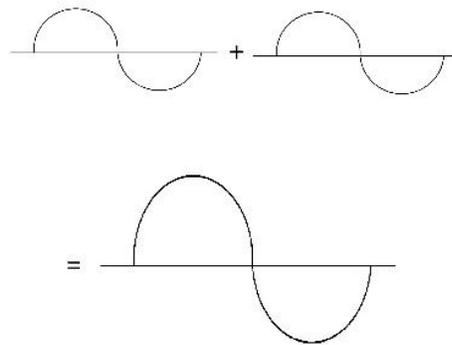


Fig. 2.3. Superposición de ondas.

2.7 INTERFERÓMETRO

El interferómetro es un instrumento óptico que emplea la interferencia de las ondas de luz para medir con gran precisión longitudes de onda de la misma luz. Hay muchos tipos de interferómetros, en todos ellos se utilizan dos haces de luz que recorren dos trayectorias ópticas distintas, determinadas por un sistema generalmente de espejos y prismas que, finalmente, convergen para formar un patrón de interferencia [35].

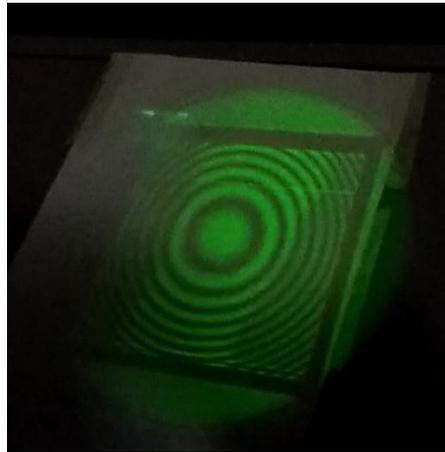


Fig. 2.4 Patrón de interferencia formado por un interferómetro de Michelson.

El interferómetro de Michelson produce franjas de interferencia mediante la división de un haz de luz monocromática, de modo que un rayo golpea un espejo fijo y el otro un espejo móvil. Cuando los haces reflejados son llevados de vuelta juntos hacia el detector, se produce un patrón de interferencia, figura 2.4.

El armado de este interferómetro se muestra en la figura 2.5. Estos interferómetros sirven para proyectar patrones de franjas sobre los objetos, de suma importancia y muy utilizada en muchos métodos de medición de perfiles y reconstrucción 3D.



Fig. 2.5 Interferómetro de Michelson.

2.8 PATRÓN DE MOIRÉ

Un método fundamental en el desarrollo de este proyecto es el patrón de franjas, dentro de este método existen algunos conceptos necesarios de comprender para cumplir con los objetivos planteados al inicio de este documento.

Un patrón de Moiré en óptica es un patrón de franjas formado en la Superposición de dos patrones de franjas, a las que les llamaremos franjas primarias, las rejillas superpuestas estarán a cierto ángulo entre sí, un ligero desplazamiento entre ellas o rejillas de diferente tamaño, esto da como resultado la figura 2.6 [29].

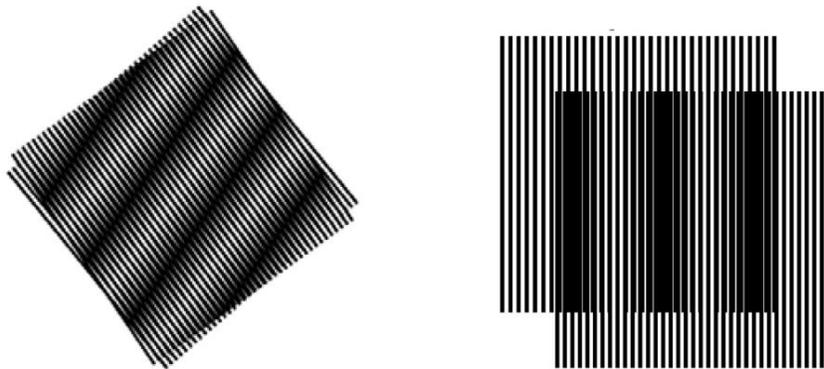


Fig. 2.6 Patrón de Moiré [29].

La descripción matemática de los patrones de Moiré resultantes de la superposición de dos rejillas senoidales es la misma que del patrón de interferencia formado por ondas electromagnéticas. El efecto Moiré es por consiguiente referido como interferencia mecánica. El Moiré es una técnica de medición que se remonta muchos años atrás y actualmente las técnicas utilizando rejillas o franjas son ampliamente utilizadas debido a sus múltiples aplicaciones, ya que se pueden resolver problemas en óptica, movimiento de onda, análisis de esfuerzos, criptografía, matemáticas y psicología de percepción [6].

2.9 MOIRÉ POR PROYECCIÓN

El interferómetro de Moiré puede ser aplicado mediante proyección de franjas o rejillas sobre un objeto para ser observado desde el frente del mismo, este método es muy eficiente ya que es relativamente fácil proyectar las rejillas, ya sea a través de un proyector de video comercial de computadora o a través de una fuente luminosa detrás de rejillas como en la figura 2.7.

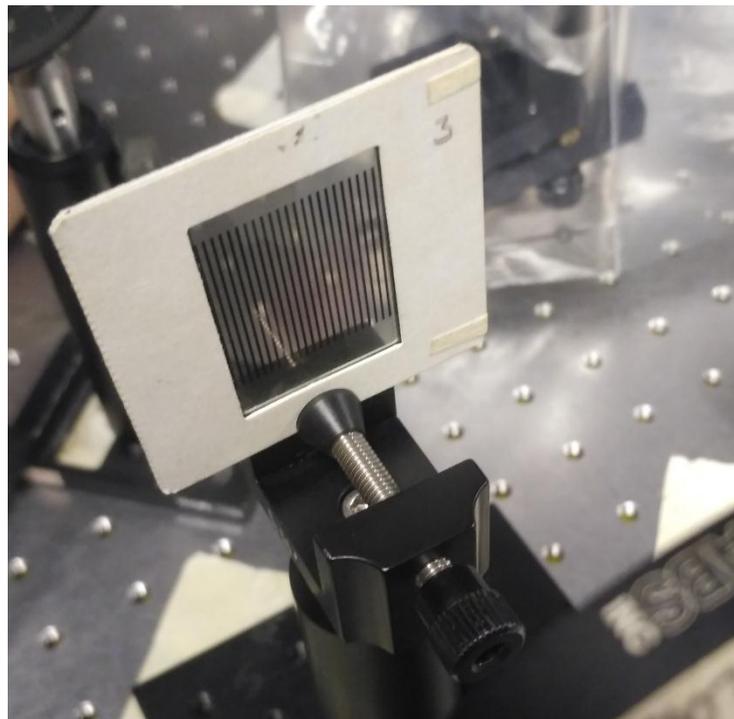


Fig. 2.7. Rejilla para formar patrón de franjas sobre un objeto.

2.10 GENERACIÓN DE FRANJAS POR COMPUTADORA

Un método simple para generar patrones de interferencia es mediante la proyección de franjas por computadora con la ayuda de un proyector de imágenes, estas franjas deformadas por el objeto es la técnica por la cual se puede obtener la forma del mismo. El patrón más común son las franjas cosenoidales con un periodo constante, como se ve en la figura 2.8.

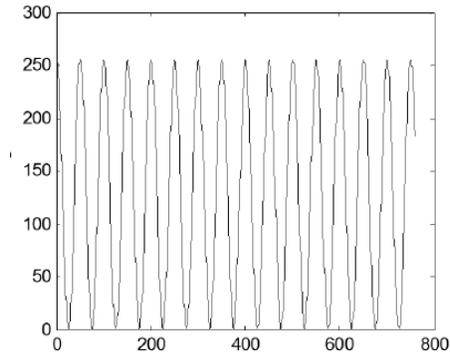


Fig. 2.8 Gráfica de onda cosenoidal.

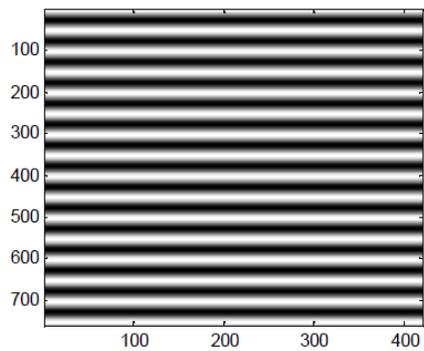


Fig. 2.9 Patrón de ondas formada por ondas cosenoidales.

2.11 MEDICIÓN DE FASE

La finalidad de la técnica de proyección de franjas es la obtención de medidas tridimensionales de la superficie de una muestra, una parte fundamental de dicha técnica consiste en la detección de la fase, ya que ésta se encuentra asociada directamente con la profundidad en cada punto de la superficie de la muestra.

Desde hace décadas se ha analizado y utilizado técnicas interferométricas como método para medir perfiles de objetos siendo el problema principal de estas técnicas la medición de fase, este documento se centra en dos métodos principales para la

obtención de fase, el primero denominado Fourier-Taketa y el segundo desplazamiento de fase (método de 4 pasos).

2.11.1 Método de Fourier-Takeda

El uso de técnicas de análisis espacial como la transformada de Fourier se ha convertido en un método muy popular debido a que se puede obtener información de fase a partir de una sola toma, es decir, este método puede ser aplicado en eventos en donde el objeto de prueba está en movimiento o éste varía respecto al tiempo, esta técnica se basa en el procesamiento de imágenes, transformando información de intensidad en datos en el dominio de la frecuencia o dominio de Fourier [38].

Normalmente el patrón de franjas utilizado en mediciones ópticas está representado de la forma:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (1.0)$$

Donde la fase $\phi(x, y)$ contiene la información deseada y $a(x, y)$, $b(x, y)$ representan variaciones no deseadas de irradiancia que surge de la reflexión de la luz no uniforme o transmisión del objeto de prueba, en la mayoría de casos $a(x, y)$, $b(x, y)$ y $\phi(x, y)$ varían lentamente en comparación con la variación introducida por la frecuencia portadora f_0 .

2.11.2 Método de desplazamiento de fase

El método de desplazamiento de fase involucra la captura de múltiples imágenes. En este método se proyectan N patrones de franjas donde la fase inicial es comúnmente cero y ésta se va modificando conforme N incrementa en un factor de $\Delta\psi$ [39].

Todos los N patrones de franjas tienen la siguiente forma:

$$I_k = I_A + I_B \cos(\phi(x, y) + \Delta\psi_k) \quad (1.1)$$

Como podemos notar 1.0 y 1.1 es la misma ecuación pero se representan con diferentes variables de acuerdo a las fuentes consultadas, sin embargo lo que se busca es el mismo fin en ambos métodos, lo cual es despejar la fase ϕ .

Este documento usa un algoritmo de $N = 4$ pasos, se utilizan 4 interferogramas para el desarrollo de este algoritmo de cambio de fase $\frac{\pi}{4}$.

2.12 DESENVOLVIMIENTO DE FASE

En los dos métodos de recuperación de fase descritos anteriormente se utiliza la función arcotangente al despejar de la fórmula la fase, por tal motivo la fase obtenida se encuentra envuelta en un rango de $[-\pi, \pi]$, esto produce saltos y discontinuidades de fase en píxeles adyacentes. Estas discontinuidades se dan cada vez que se presenta un salto de 2π . Por tal motivo se necesita una función que corrija estas discontinuidades para así poder obtener la topografía del objeto.

Básicamente se trata de sumar o restar 2π cuando el salto en la discontinuidad supera cierto umbral, esto se va haciendo a lo largo del camino de datos, en este caso como es una imagen este proceso se hace a lo largo de la matriz que contiene los valores. En el caso en que la diferencia entre los puntos no exceda el umbral, se suma la diferencia actual más el punto anterior de la fase envuelta.

Un ejemplo de esto se ve la figura 2.10 tomada de la publicación de Takeda de 1982 en la que se puede ver en la parte superior los datos discontinuos que al aplicarle un algoritmo de desenvolvimiento de fase se reconstruye la señal en la parte inferior.

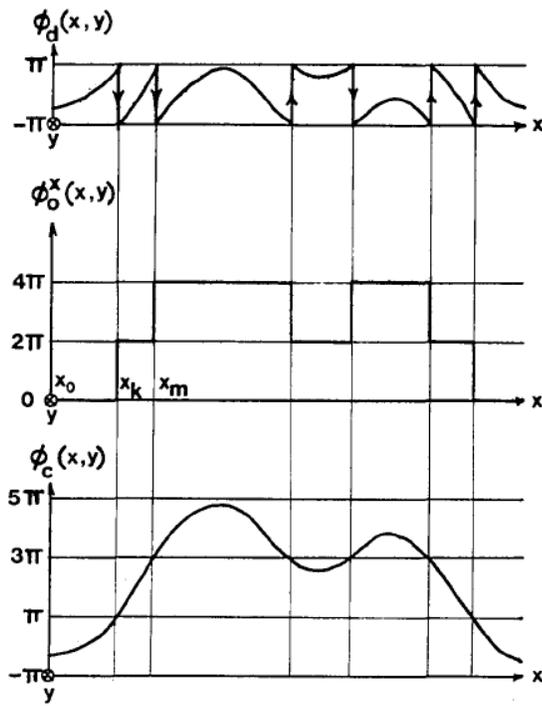


Fig. 2.10 Desenvolvimento de fase [38].

CAPÍTULO III DESARROLLO

3.1 OBTENCIÓN TOPOGRÁFICA DE UN OBJETO POR PROYECCIÓN DE FRANJAS

El método de proyección de franjas es un método eficiente para la obtención topográfica de la superficie del objeto ya que se puede implementar con componentes accesibles, este consta de un sistema de proyección, un sistema de observación y un plano de referencia. La figura 1.6 muestra la representación de este tipo de sistemas en el que se muestra de forma general los tres elementos mencionados.

La generación de franjas por computadora se da mediante la función matemática coseno programada en Matlab, esta función genera un patrón que se muestra en la figura 3.1. Con este código se puede aumentar o disminuir la frecuencia de las franjas de acuerdo a las necesidades, con esta manipulación es posible dar mayor detalle al objeto analizado ya que a mayor frecuencia se pueden obtener más detalles del objeto.

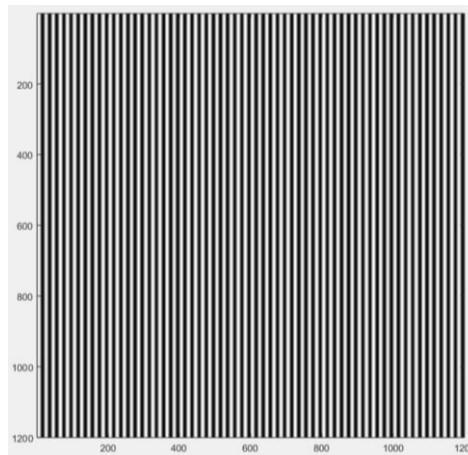


Fig. 3.1 Generación de franjas con función coseno hecha en Matlab.

La obtención de la altura del objeto en cualquier punto del mismo se obtiene mediante la deformación que el objeto genera en las franjas visto desde el sistema de observación mediante un arreglo experimental que se describe en el siguiente punto.

3.2 ARREGLO EXPERIMENTAL

El sistema experimental para la toma de muestras y desarrollo de los algoritmos se muestra en la figura 3.2, 3.3 y 3.4, estas figuras muestran el sistema de proyección, el sistema de observación y el plano de referencia, respectivamente.

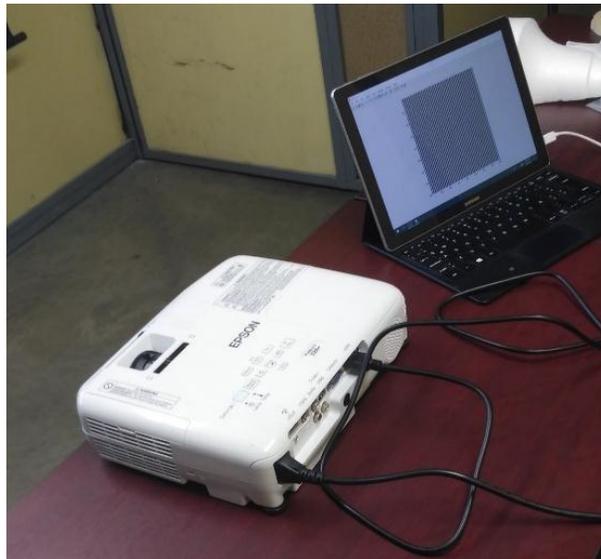


Fig. 3.2 Sistema de proyección.



Fig. 3.3 Sistema de observación.

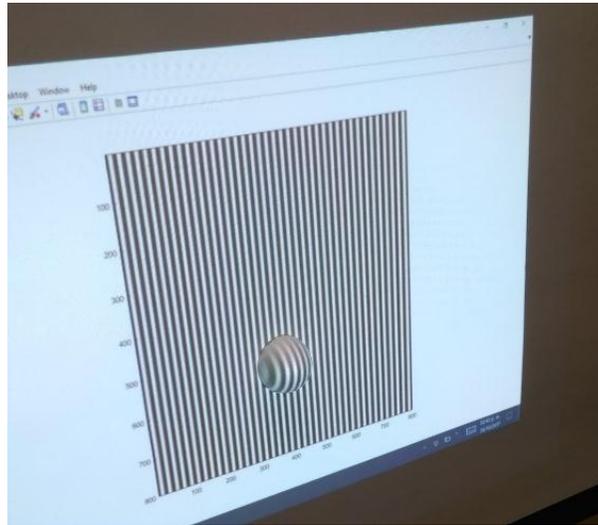


Fig. 3.4 Plano de referencia con objeto de muestra.

Como prueba se utiliza un objeto simple para facilitar el proceso de desarrollo, en este caso una esfera de unicel como se ve la figura 3.5, esta esfera se recorta por la mitad para poderla pegar al plano de referencia como se ve en la figura 3.6.



Fig. 3.5 Objeto de prueba.



Fig. 3.6 Objeto de prueba recortado.

En la figura 3.4 se puede observar el plano de referencia del sistema de proyección de franjas, al colocar un objeto frente al plano de referencia, estas franjas son deformadas de acuerdo al perfil de la muestra, esas deformaciones contienen toda la información topográfica del objeto, esta información puede ser digitalizada y mostrada en una representación tridimensional para su análisis.

Para poder digitalizar el perfil del objeto y hacer su representación tridimensional es necesario despejar de la ecuación 1.0 la fase, por lo tanto, el principal objetivo es la obtención de fase de la imagen. Para lograr esto hay muchos métodos algorítmicos de diferentes niveles de complejidad, este proyecto desarrolla dos métodos muy utilizados en perfilometría óptica, estos son el método de desplazamiento de fase de 4 pasos y el método Fourier Takeda. A continuación, se describen ambos métodos.

3.3 MÉTODO DE DESPLAZAMIENTO DE FASE DE 4 PASOS.

El método de 4 pasos es un método de desplazamiento de fase muy utilizado debido a que es fácil de implementar en cualquier software de desarrollo de programación, por su practicidad y buenos resultados es uno de los dos métodos planteados en este

proyecto. Sin embargo, una desventaja de este método es que se toman 4 interferómetros para obtener la imagen de fase, esto supone mayor tiempo en el procesamiento computacional de los resultados de una muestra.

En interferómetros de desplazamiento de fase, el frente de onda de referencia es movido a lo largo de la dirección de propagación con respecto al frente de onda que está siendo analizado, cambiando así la diferencia de fases.

Midiendo los cambios de intensidad para varios desplazamientos de fase, es posible determinar la fase de una onda relativa a la onda de referencia para cada punto medido de ese frente de onda. La intensidad $I(x, y)$ en el punto (x, y) cambia con la fase y está dado en la ecuación 1.0.

Donde $a(x, y)$ describe las variaciones de la intensidad de fondo en el patrón de franjas, $b(x, y)$ describe la amplitud de las franjas, $\phi(x, y)$ es la información de la fase buscada y ϕ es un desplazamiento de fase introducido [6].

La ecuación 1.0 muestra tres incógnitas, por lo que es necesario como mínimo tres mediciones de intensidad para obtener la fase. Para este caso se utiliza el algoritmo de cuatro pasos para despejar las incógnitas, los valores intensidad son medidos utilizando 4 valores de fase con incrementos de $\Delta\phi=90^\circ$ por tal motivo las cuatro ecuaciones quedarían de la siguiente manera:

$$I_1 = a + b\cos(\phi) \quad (1.2)$$

$$I_2 = a + b\cos(\phi + 90) \quad (1.3)$$

$$I_3 = a + b\cos(\phi + 180) \quad (1.4)$$

$$I_4 = a + b\cos(\phi + 270) \quad (1.5)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones de 1.2 a 1.5 obtenemos como resultado la ecuación 1.6.

$$\tan\phi = -\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \quad (1.6)$$

El resultado de las imágenes de cuatro interferogramas con desplazamiento de fase de 90° se muestra en la figura 3.7. Estos interferogramas se proyectan sobre una base plana la cual funciona como referencia.

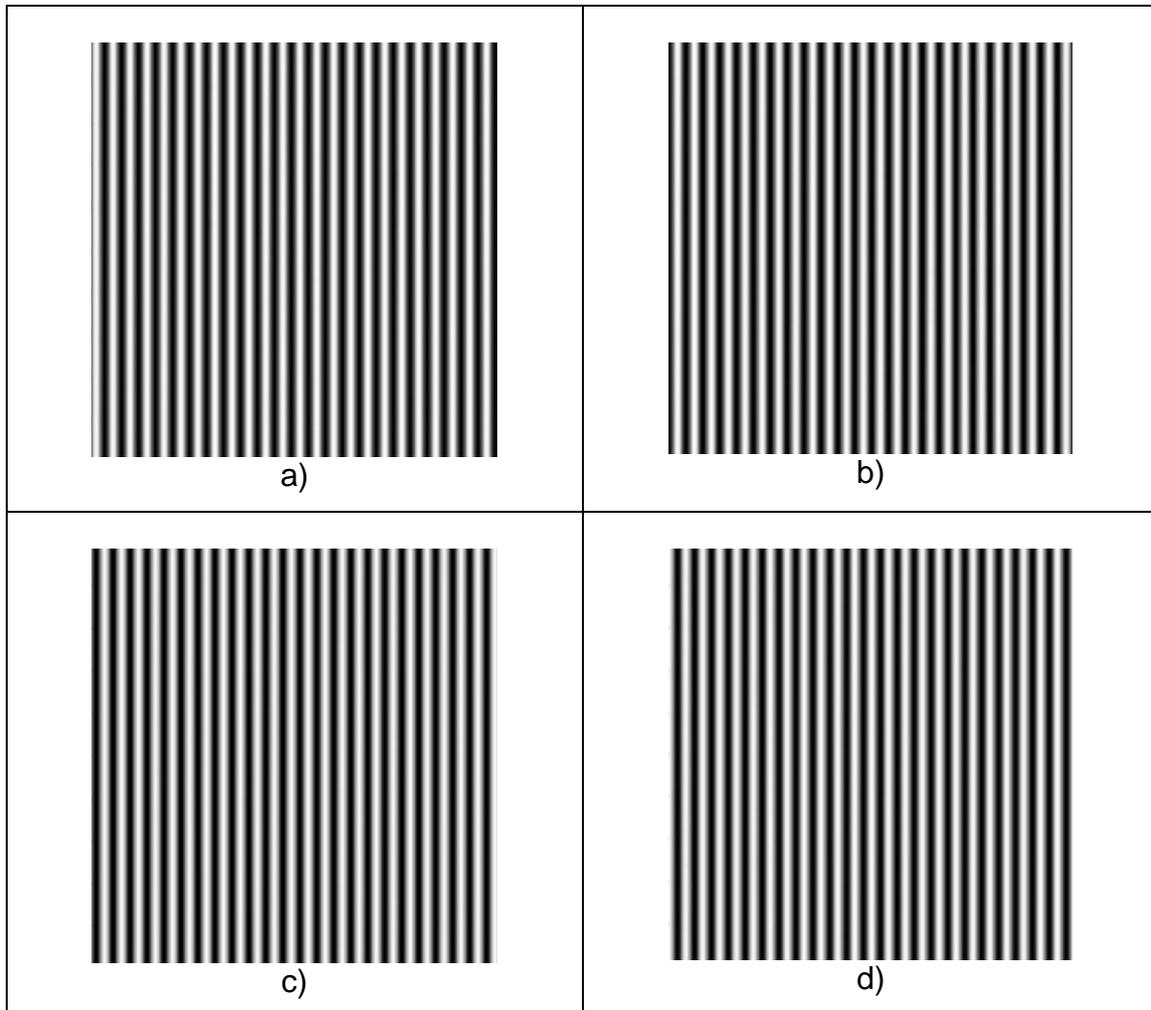


Fig. 3.7 Desplazamiento de fase de 4 pasos generado en matlab, a)0, b) $\pi/2$, c) π , d) $3\pi/2$.

Al proyectar los 4 patrones de franjas uno tras otro e ir tomando la captura de imágenes a través de una cámara fotográfica sobre la base de referencia con un objeto, podemos ver los resultados en la figura 3.8.

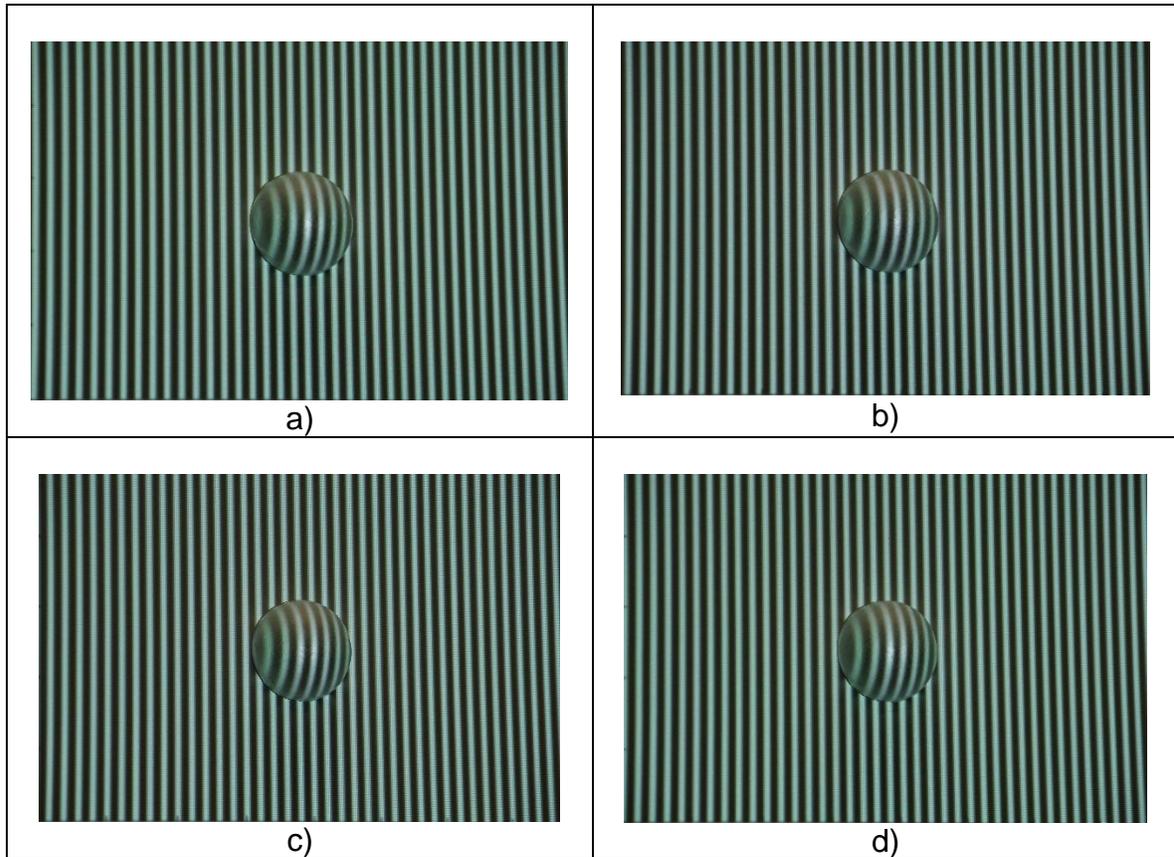


Fig. 3.8. Desplazamiento de fase de 4 pasos, a)0, b) $\pi/2$, c) π , d) $3\pi/2$.

En la figura 3.8 se ve el proceso en que las franjas se desplazan $\pi/2$ en cada imagen una de otra, con estas 4 imágenes es posible hacer una obtención topográfica del objeto vía sistemas ópticos.

Muy importante en este punto es el filtrado de la imagen, en la mayoría de los casos de la toma de captura, estas vienen con ruido ambiental, lo que producen píxeles no uniformes dentro de la imagen, este ruido interviene en el desarrollo del procesamiento ya que puede mostrar resultados erróneos en la fase de la imagen.

Lo que sigue a continuación es pasar a la imagen a una escala de grises, ya que de esta manera es más fácil manipular las imágenes como una matriz de datos de un solo color en lugar de tres como lo sería con RGB. En la figura 3.9 se muestra una captura en escala de grises.

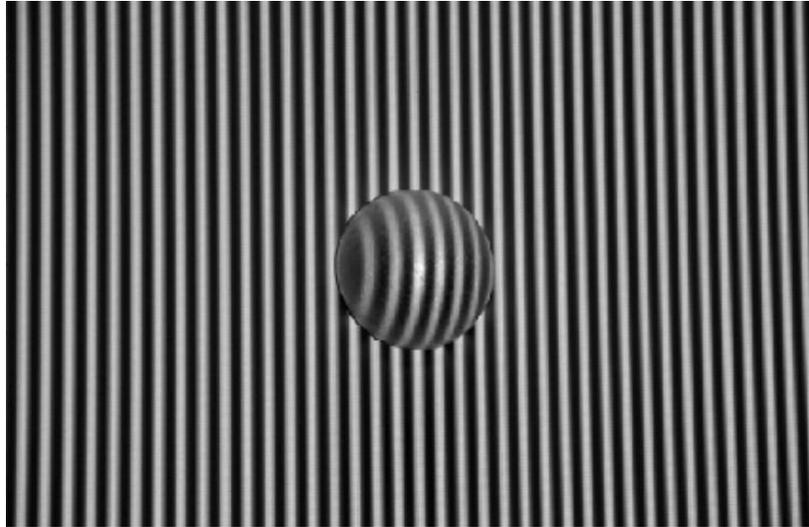


Fig. 3.9. Interferograma con objeto en escala de grises.

Una vez teniendo los cuatro interferogramas con el objeto se procede a sacar el mapa de fase de imagen, esto se hace a través de la ecuación ya despejada 1.6. Como es una imagen, los datos están contenidos en una matriz de dos dimensiones, por lo que es necesario hacer el procedimiento píxel por píxel en las 4 imágenes.

Para este caso vamos a sacar dos mapas de fase, uno de plano de referencia sin el objeto y otro del plano de referencia con el objeto, en la figura 3.10 se muestra el mapa de fase de los 4 interferogramas del plano de referencia sin el objeto, en la figura 3.11 se muestra el mapa de fase de los 4 interferogramas con el objeto de muestra, como podemos ver se aprecia claramente la muestra en el centro de la imagen, esta matriz de datos por sí sola ya contiene la información de profundidad y altura de la muestra, sin embargo como se explicó en el capítulo 2.12, estos datos están envueltos por lo que es necesario hacer un procedimiento para desenvolver estos datos.

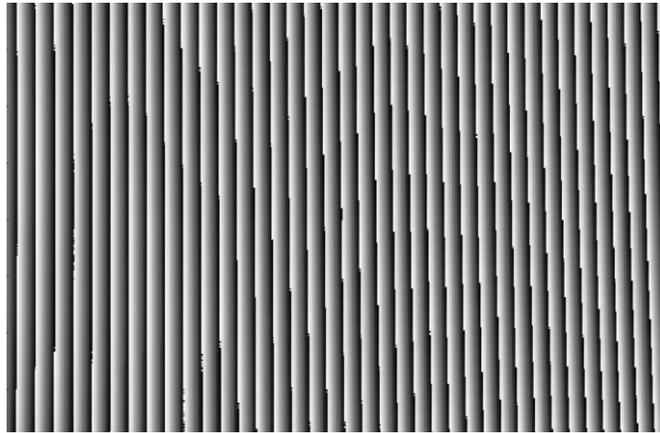


Fig. 3.10 Mapa de fase de plano de referencia.

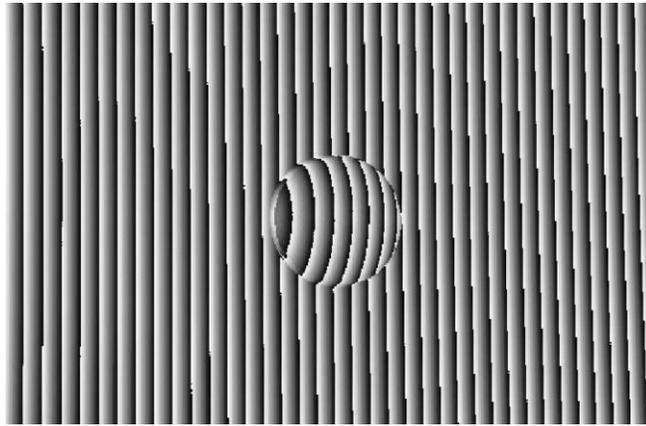


Fig. 3.11 Mapa de fase de plano de referencia con objeto.

Para realizar un desenvolvimiento de fase en primera instancia vamos a utilizar el método más simple, por cada salto negativo vamos a sumar múltiplos de 2π y por cada salto positivo vamos a restar 2π , ya que, como se comentó anteriormente, la fase está envuelta en valores de $-\pi$ a π , de esta manera se va a codificar valores discontinuos en valores continuos.

La figura 3.12 muestra el desenvolvimiento de fase de la matriz del plano de referencia, como se observa en la imagen los datos son más lineales en comparación con la figura 3.10.

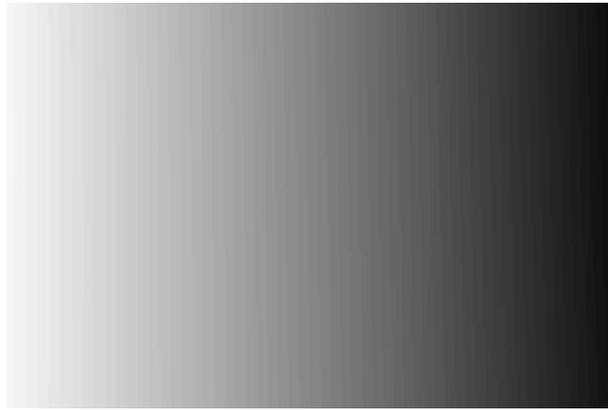


Fig. 3.12 Mapa de fase desenvuelta del plano de referencia.

Al aplicar el mismo método en la matriz de la imagen con el objeto sobre el plano de referencia podemos apreciar cómo se regenera el objeto ligeramente, sin embargo, se aprecian un corrimiento del centro de la imagen hacia el lado inferior, esto debido a la toma de la muestra ya que se generan sombras no deseadas dependiendo de la posición de la cámara, el objeto y el proyector.



Fig. 3.13. Mapa de fase desenvuelta del plano de referencia con objeto.

Para finalizar, este método de 4 pasos para la obtención topográfica del objeto, es necesario restar punto a punto la matriz de fase desenvuelta de la imagen con el

objeto, de la matriz de la imagen del plano de referencia, tal como se aprecia en la figura 3.14, aquí ya podemos ver el objeto reconstruido totalmente, sin embargo como se mencionó en el párrafo anterior, esta reconstrucción tiene defectos debido a la captura de las imágenes ya que se generaron sombras que, al aplicar el algoritmo de desenvolvimiento, se corrieron del centro hacia debajo de la figura; para eliminar este problema hay varias técnicas, la primera es mejorar la posición de los instrumentos y de esta manera evitar en todo lo posible las sombras del mismo objeto, lo segundo es aplicar un filtro que suavice la unión entre los píxeles adyacentes y la tercera es mejorar el algoritmo de desenvolvimiento de fase.

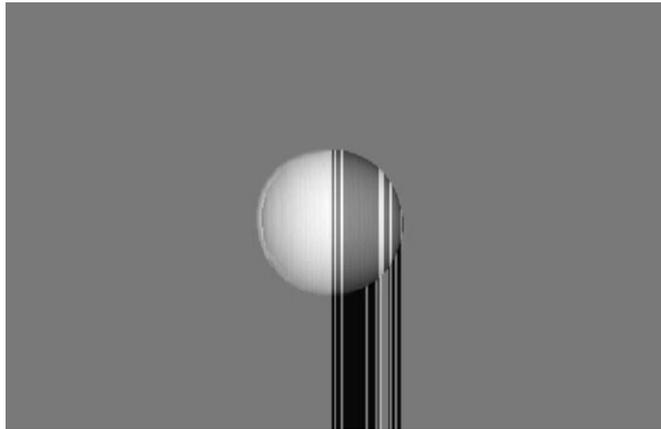


Fig. 3.14 Resta de fase desenvuelta de objeto menos plano de referencia.

En este punto ya se tienen todos los datos de topografía del objeto, esta matriz que obtuvimos al restar los dos mapas de fase (objeto y plano de referencia), contiene la altura en cada punto de la muestra, esta altura es proporcional al tamaño del objeto real, por lo que en esta matriz se hace el análisis necesario de la muestra ya digitalizada en computadora, la figura 3.15 muestra la representación tridimensional y manipulable de la muestra en Matlab.

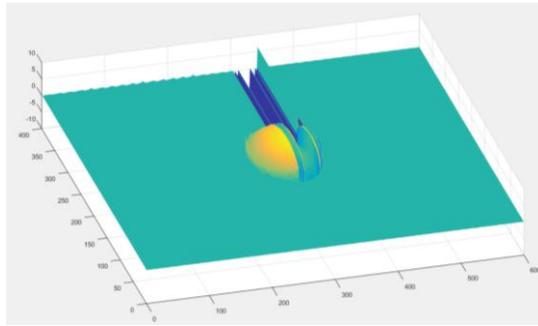


Fig. 3.15 Representación tridimensional de la muestra.

3.4 MÉTODO FOURIER-TAKEDA

Es un método de medición de fase desarrollado por Mitsuo Takeda y Kazuhiro Mutoh a principios de los años 80's, esta técnica hace uso de la transformada de Fourier, de ahí el nombre de la técnica "Fourier-Takeda". El uso de esta técnica es muy utilizado debido a que es posible obtener los datos de fase en una sola captura de imagen en comparación con el método de 4 pasos, esto supone una ventaja en el tiempo de adquisición de datos.

El patrón de franjas utilizado en mediciones ópticas normalmente viene representado por la ecuación 1.0 al igual que en el método de 4 pasos, estas franjas deformadas se interpretan como múltiples señales deformadas en fase $\phi(x, y)$, en amplitud $a(x, y)$ y con una frecuencia espacial portadora f_0 .

De acuerdo a Takeda [38]. La representación exponencial de la ecuación 1.0 se muestra en la ecuación 1.7.

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y)e^{2\pi f_0 x} + c(x, y) * e^{-2\pi f_0 x} \quad (1.7)$$

Donde:

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{i\phi(x, y)} \quad (1.8)$$

Y donde * denota el conjugado complejo.

Para este método se utiliza el interferograma de la figura 3.16, como se ve en la imagen, se antepone un objeto entre el proyector de las franjas y el plano de referencia, de esta manera se muestra la deformación de las franjas producida por el objeto.

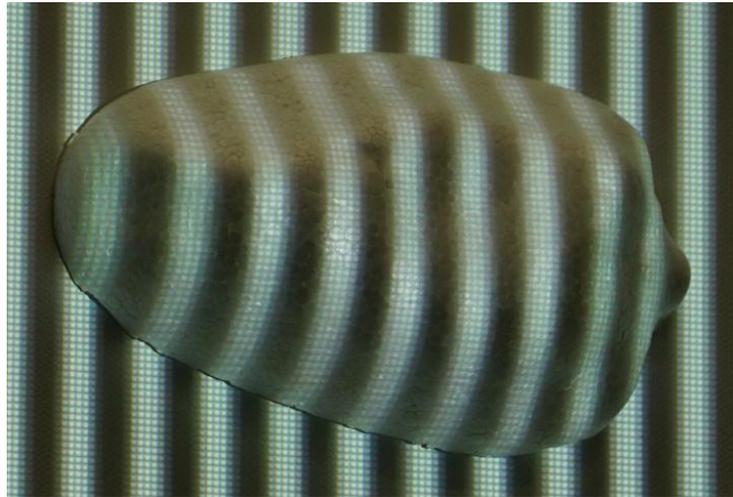


Fig. 3.16. Interferograma de ejemplo para método Fourier-Takeda.

Para poder manipularla de una forma más rápida y el algoritmo sea más eficiente se convierte la imagen en una escala de grises como lo muestra la figura 3.17.

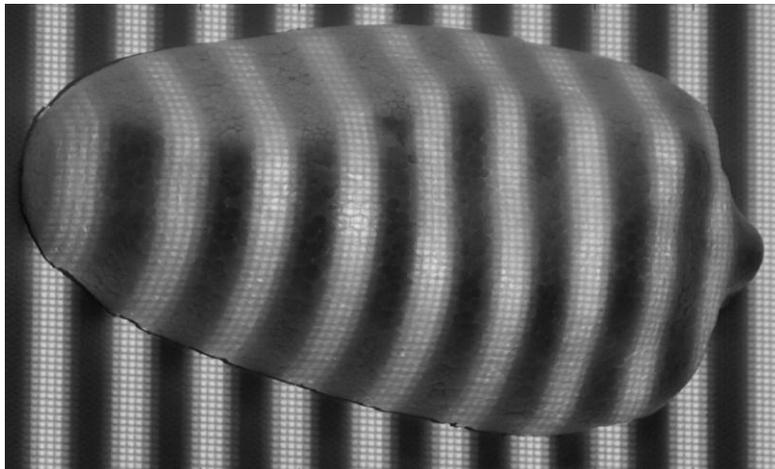


Fig. 3.17 Interferograma de ejemplo para método Fourier-Takeda en escala de grises.

Posteriormente se aplica la transformada de Fourier a la ecuación 1.7 respecto de x , utilizando el algoritmo denominado transformada rápida de Fourier (FFT) para poder obtener $G(x, y)$:

$$G(x, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y) \quad (1.9)$$

Donde las letras mayúsculas denotan el espectro de Fourier y f la frecuencia espacial en dirección de x . Como las variaciones espaciales de $a(x, y)$, $b(x, y)$ y $c(x, y)$ varían lentamente en comparación con la frecuencia espacial f_0 , los espectros de Fourier se separan como se muestra en la figura 3.18.

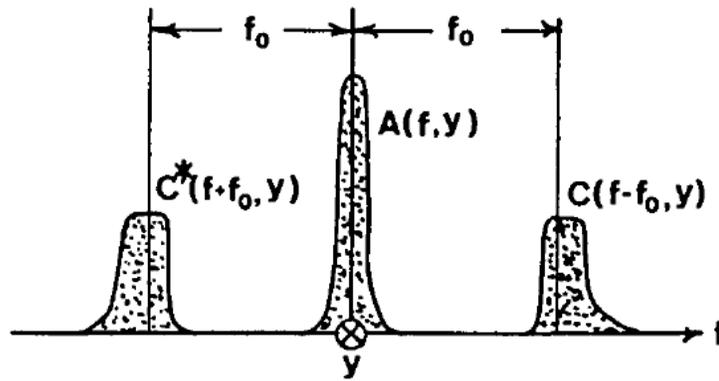


Fig. 3.18 Espectro de Fourier de un patrón de franjas abiertas [38].

Al aplicar la transformada de Fourier en la figura 3.17 nos da como resultado los espectros generados en la figura 3.19, lo cual es muy similar el resultado de la figura 3.18.

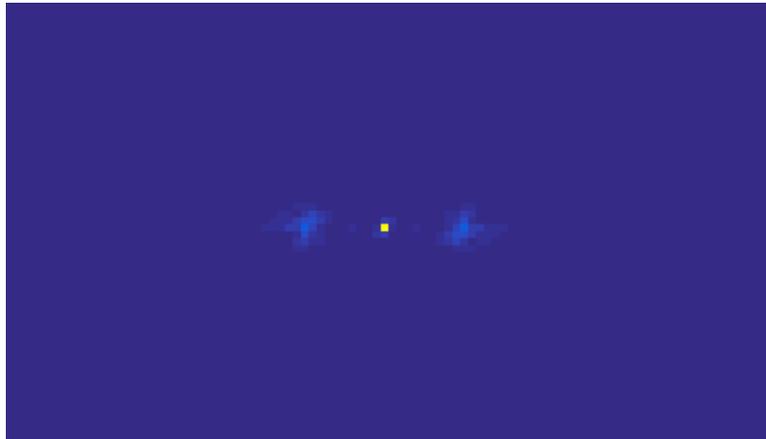


Fig. 3.19. Espectro de Fourier de un patrón franjas con objeto.

Hacemos uso de cualquiera de los dos espectros de la señal portadora y lo trasladamos al origen desplazándolo una distancia f_0 a lo largo de f para obtener $C(f - f_0, y)$, el resultado de muestra en la figura 3.20.

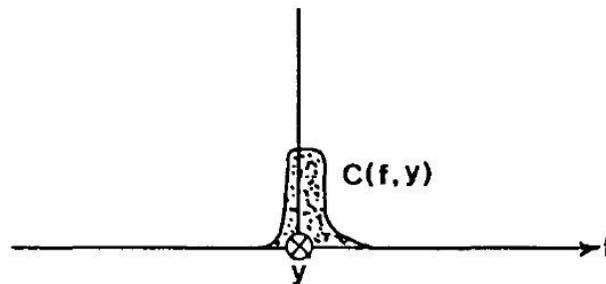


Fig. 3.20 Espectro trasladado al origen [38].

Al filtrar y dejar únicamente el espectro del lado derecho de la figura 3.18 se elimina la variación de fondo $a(x, y)$.

Para aplicar este procedimiento en la imagen se crea un algoritmo de programación para únicamente filtrar el lado derecho del espectro, para este caso generamos una matriz del mismo tamaño que la matriz de la imagen a procesar, llenamos la matriz de valores cero y únicamente generamos un círculo de la misma área y en el mismo lugar

que el espectro que queremos seleccionar con valores de uno, una vez hecho esto procedemos a multiplicar ambas matrices punto a punto para obtener únicamente el espectro escogido, de esta manera todos los demás datos se eliminan logrando así un filtrado de espectros.

En la figura 3.21 se ve el resultado del algoritmo comentado en el párrafo anterior, como se observa en la imagen, únicamente se conservan los datos del lado derecho, ya que todos los demás datos han sido eliminados por completo.

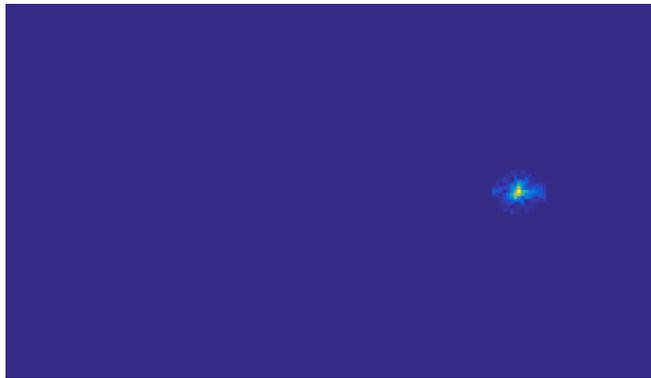


Fig. 3.21 Filtrado de espectro derecho en matriz de imagen.

El siguiente paso es trasladar ese espectro filtrado al origen o al centro de la imagen, esto se hace mediante un algoritmo de corrimiento de datos en toda la matriz hacia la izquierda, dando como resultado la figura 3.22.

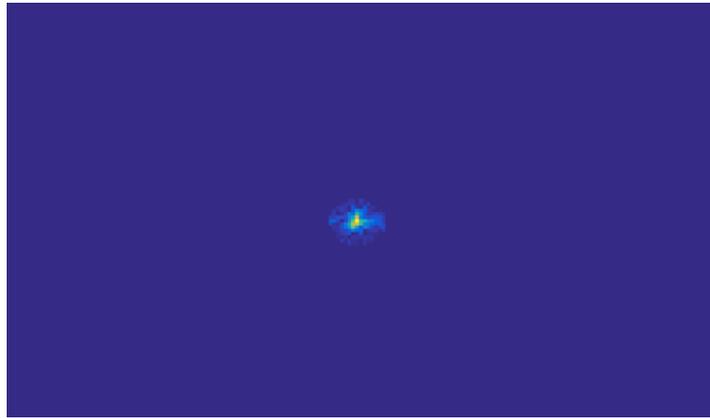


Fig. 3.22. Espectro de Fourier trasladado al origen.

De esta manera el siguiente paso es aplicar la transformada inversa de Fourier para $C(f, y)$ con respecto a f para obtener $c(x, y)$ definido en la ecuación 1.8. Después de calcular el logaritmo se obtiene:

$$\log[c(x, y)] = \log\left[\frac{1}{2}b(x, y)\right] + i\phi(x, y) \quad (1.10)$$

Con esto obtenemos la fase con un método alternativo como se muestra en la ecuación (1.11).

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{\text{Im}(c(x, y))}{\text{Re}(c(x, y))}\right] \quad (1.11)$$

Por lo tanto, en la matriz de datos de muestra procedemos a aplicar la transformada rápida inversa de Fourier o IFFT de dos dimensiones ya que es una matriz, esto nos da como resultado la figura 3.23.

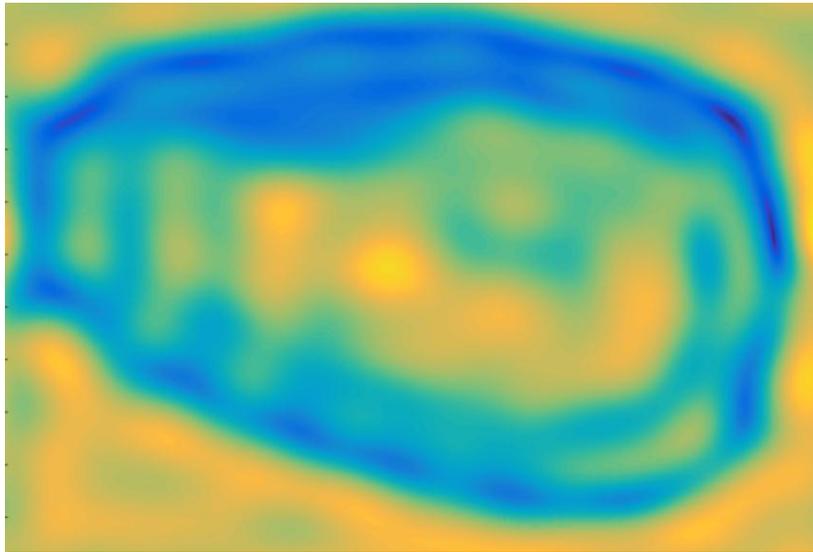


Fig. 3.23. Transformada de Fourier inversa en imagen de muestra.

Como se aprecia en la figura se alcanza a ver la reconstrucción parcial del objeto ya que se han eliminado ciertas frecuencias de la imagen, lo que sigue a continuación es aplicar la ecuación 1.11 a esta última matriz de datos. El resultado de esta ecuación aplicada en la matriz de datos de la imagen de muestra se ve en la figura 3.24.

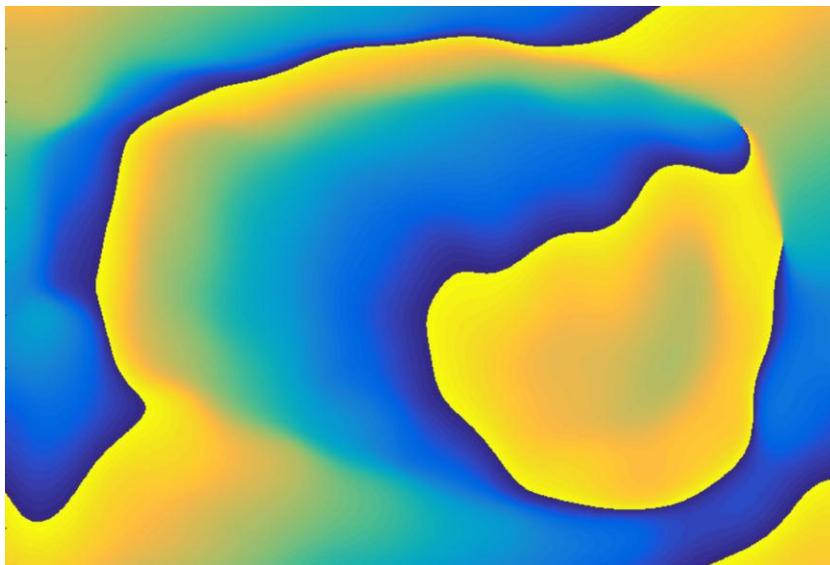


Fig. 3.24 Aplicación de ecuación 1.11 a imagen de muestra.

En este punto ya se tienen los datos de topografía del objeto, sin embargo, al igual que en el método de cuatro pasos, la fase se encuentra contenida en un factor de 2π que va de $-\pi$ a π ; por lo que es necesario aplicar el algoritmo de desenvolvimiento de fase para convertir estos valores discontinuos en valores continuos, de forma similar como en lo mostrado en la figura 3.25 pero para dos dimensiones, ya que los datos de la imagen se encuentran contenidos en una matriz de dos dimensiones.

El resultado del desenvolvimiento de fase de la matriz se aprecia en la figura 3.24. Aquí se muestra el objeto ya reconstruido con los datos de altura en cada punto de la imagen, sin embargo se aprecia del lado derecho un corrimiento de datos no deseado de arriba hacia abajo de la imagen, esto debido a sombras no deseadas en el momento de la captura de la imagen.

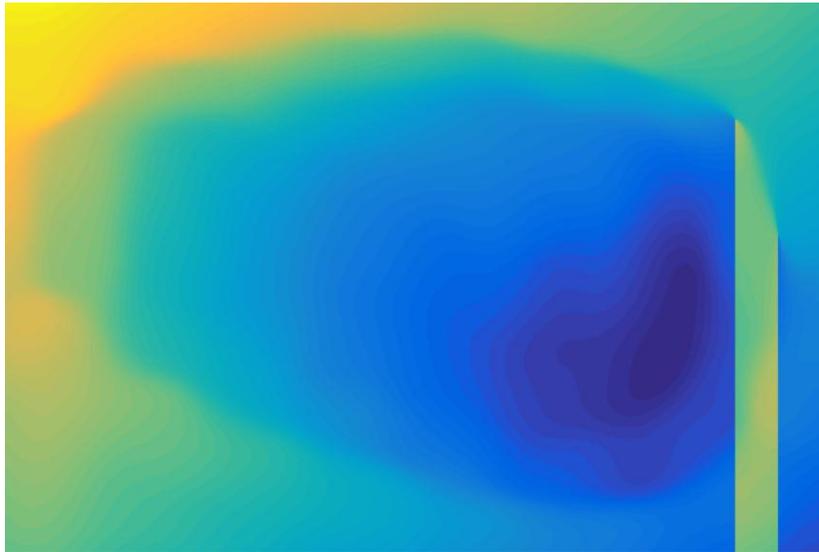


Fig. 3.25 Desenvolvimiento de fase de imagen de muestra.

Finalmente se genera una reproducción 3D hecha en Matlab que ejemplifica los datos de la matriz resultante para la obtención topográfica mediante el método de Fourier-Takeda, estos datos se ven reflejados en la figura 3.26.

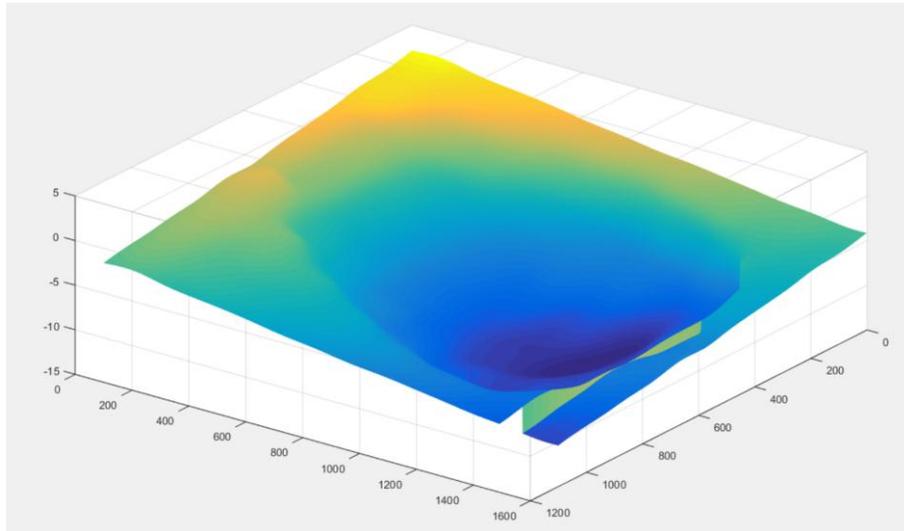


Fig. 3.26 Reconstrucción 3D de imagen de muestra con método Fourier-Takeda.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1 RESULTADOS

Al aplicar dos métodos diferentes para el análisis superficial de la topografía del objeto vemos que en ambos casos se tienen resultados similares, sin embargo, vemos en los capítulos 3.1 y 3.4 que estos datos tienen errores de corrimiento de datos que alteran la matriz de datos, por consiguiente, en la representación tridimensional se ve reflejado evidentemente el error. Eliminar este tipo de valores no deseados es de suma importancia ya que al hacer un análisis real estos datos nos arrojaran falsos positivos sobre la forma real del objeto.

4.2 RESULTADOS FINALES MÉTODO DE 4 PASOS

El error principal al aplicar este tipo de métodos se nos presenta en la toma de la muestra, al generar la captura de la imagen dependiendo de la posición del proyector y la cámara se pueden generar sombras no deseadas, estas sombras genera en los puntos de unión del plano de referencia y el objeto una serie de discontinuidades en las franjas que provocan los corrimientos de la figura 3.14.

Lo comentado en el párrafo anterior se comprobó de la siguiente manera, en la figura 3.8 con la misma muestra, únicamente se toma un área del centro de la imagen que no cubre el contorno de la imagen, ya que el contorno es donde se generaron sombras, principalmente del lado derecho de la imagen. El resultado de la obtención de fase de la imagen se ve en la figura 4.1 en la que se muestra únicamente una selección de la imagen total.

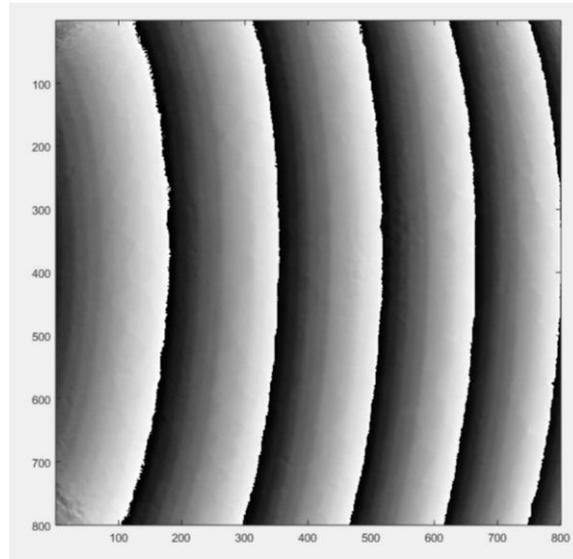


Fig. 4.1 Obtención de fase de un área de la muestra.

Como podemos ver en la figura 4.1 se aplicó todo el mismo método de los 4 pasos del capítulo 3.3 a la misma muestra con la única diferencia de la selección del área, se puede ver claramente la obtención de fase de la imagen, a continuación, como lo dice el método se aplica el algoritmo de desenvolvimiento de fase, se resta de la matriz punto a punto de la muestra con el plano de referencia para, finalmente con la herramienta de Matlab hacer su representación tridimensional. El resultado se muestra en la figura 4.2.

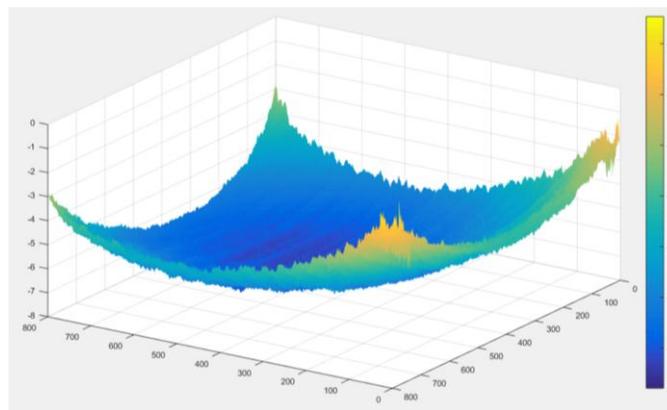


Fig. 4.2 Reconstrucción 3D de un área de la muestra con método de 4 pasos.

Como podemos ver en la figura 4.2 ya no existe ningún corrimiento de datos, por lo tanto, esta matriz de datos ya la podemos utilizar para hacer un análisis de la forma del objeto, al tener esta matriz como un patrón de referencia es posible compararla con otra muestra de las mismas características para ver qué tan diferente es en la superficie y así evidenciar algún defecto que la segunda muestra pudiera tener.

Algo a considerar en estos métodos de obtención topográfico para la reconstrucción 3D es la misma forma de la figura, en algunos casos las muestras pudieran tener formas muy extravagantes o discontinuas, esto es un problema para el desarrollo de estos métodos ópticos, pudiendo no ser la mejor forma de obtención topográfica, habría que verificar otros métodos existentes.

Es de suma importancia para este método que al proyectar las franjas sobre el objeto nos aseguremos que las franjas no pierdan continuidad ya que al perderlas se genera un efecto similar al de las sombras y los valores con errores pueden correrse a lo largo de toda la matriz afectando seriamente la obtención de datos para el análisis.

Al aplicar el método de 4 pasos para la figura 4.3 después de aplicarle un filtro gaussiano y reducir el tamaño de píxeles de la imagen en automático se genera un filtro de datos que elimina las sombras no deseadas, de tal manera que el proceso de obtención topográfico por método de 4 pasos con imagen filtrada se ve reflejado en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

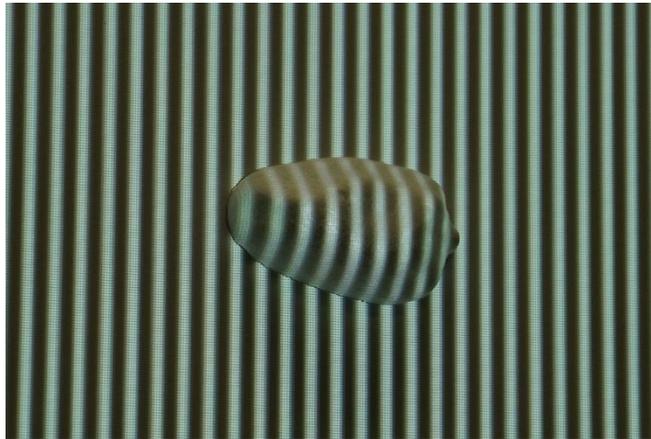


Fig. 4.3 Imagen muestra.

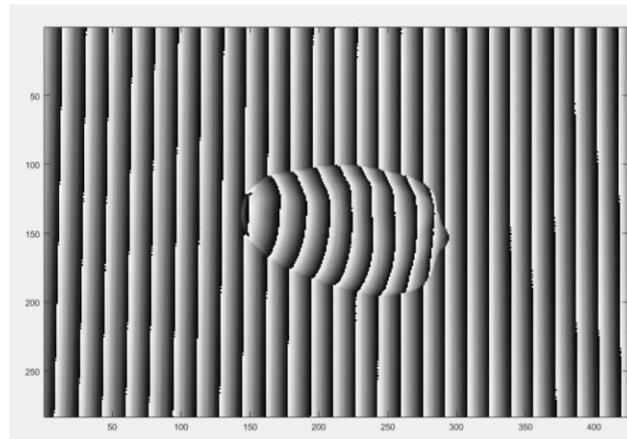


Fig. 4.4 Obtención de fase con método de 4 pasos.

En la Figura 4.4 se muestra la obtención de fase de la imagen de referencia, como se alcanza a notar las franjas están de forma continua sin que haya sombras que alteren los resultados en la matriz de datos.

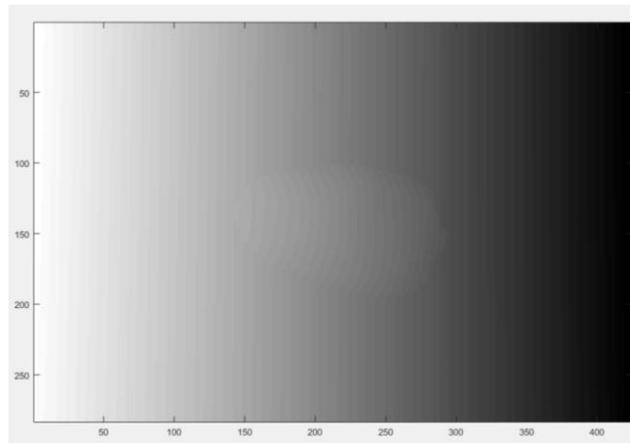


Fig. 4.5 Desenvolvimiento de fase con método de 4 pasos.

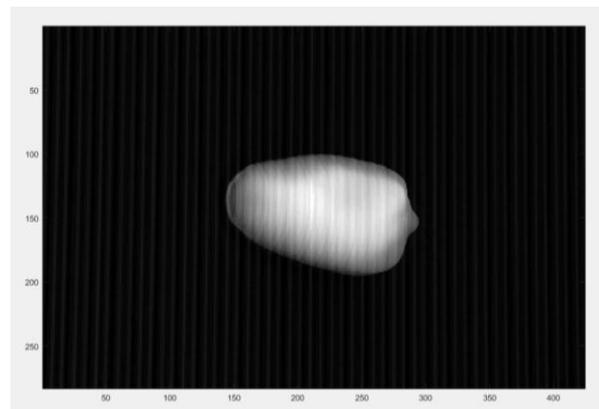


Fig. 4.6 Obtención topográfica de muestra con método de 4 pasos.

En la figura 4.5 se muestra el resultado después de hacer el desenvolvimiento de fase de la imagen 4.4, la figura 4.7 muestra el resultado de restar punto a punto la matriz de la imagen con objeto de la matriz del plano de referencia. Esta matriz ya contiene los datos para ser analizados, por lo que puede considerarse como el resultado final de este método de obtención topográfica vía método óptico de 4 pasos.

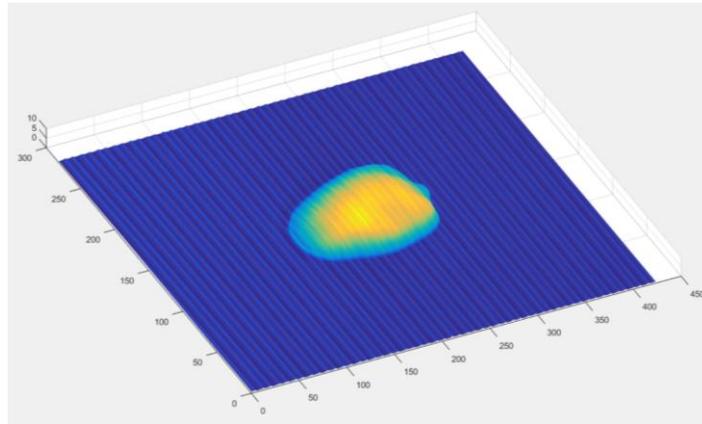


Fig. 4.7 Reconstrucción 3D con método de 4 pasos.

El resultado final de la matriz de datos de la figura 4.6 se muestra en su representación tridimensional (reconstrucción 3D) en la figura 4.7 con la ayuda de la herramienta de gráficos de Matlab.

4.3 RESULTADOS FINALES MÉTODO FOURIER-TAKEDA

Como se comentó al inicio del capítulo 4.2 el error principal se da por las sombras no deseadas de la unión del objeto y el plano de referencia, además, algunos objetos no son aptos para este procedimiento debido a su forma y finalmente la calidad de la cámara ocupada para la toma de las muestras.

Para la obtención de resultados finales con el método Fourier-Takeda se ocupó la misma muestra del capítulo 4.2 (figura 4.3) para lograr un comparativo entre ambos métodos.

Para evitar el problema de corrimiento de datos en la matriz al aplicar el desenvolvimiento de fase primero aplicamos un filtro gaussiano a la figura 4.3, posteriormente cambiamos el tamaño de la imagen para reducir datos, de esta manera se genera un filtro instantáneo de datos que elimina sombras no deseadas.

Al aplicar la transformada rápida de Fourier a la matriz de datos se genera una nueva matriz cuya representación gráfica se muestra en la figura 4.8.

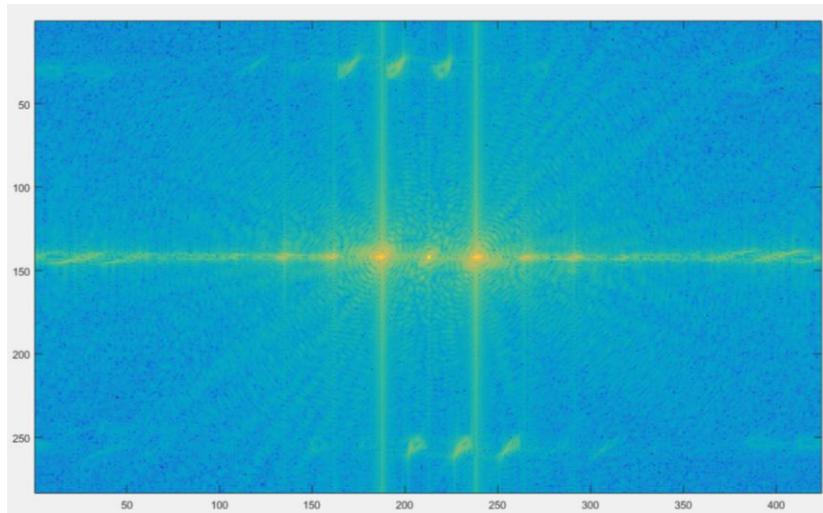


Fig. 4.8 Espectro de Fourier de muestra.

Después de seleccionar el espectro de Fourier del lado izquierdo se le aplica un filtro de datos, seleccionando únicamente ese espectro y los datos restantes eliminarlos para posteriormente pasar ese espectro al centro de la matriz.

El paso siguiente es aplicar una transformada rápida de inversa de Fourier a la matriz resultante, lo que se ve en la representación gráfica de la figura 4.8.

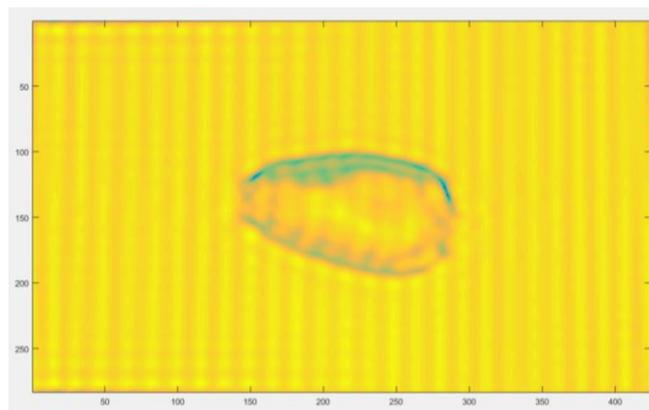


Fig. 4.9 Transformada de Fourier inversa de muestra.

Se aplica la obtención de fase de la matriz de datos, esto es desarrollar la ecuación 1.11 a la matriz de datos de la figura 4.9 lo que obtenemos la representación gráfica mostrada en la figura 4.10.

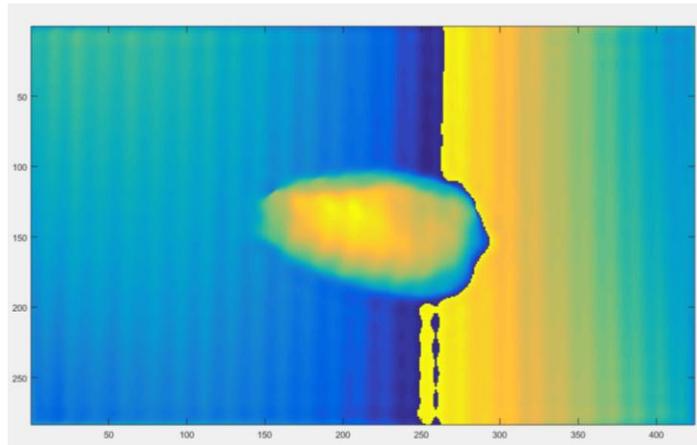


Fig. 4.10. Obtención de fase de muestra.

Como se ha comentado a lo largo de este documento, al aplicar la ecuación 1.11 se utiliza la función arcotangente por lo que los resultados están envueltos en un rango de 2π . Así que debemos aplicar un algoritmo de desenvolvimiento de fase para convertir esos valores discontinuos en valores continuos.

El resultado final de esta matriz de datos que contiene la información topográfica del objeto de muestra está representado en la figura 4.11. Esta matriz es donde se desarrolla el análisis de perfilometría de objeto, al ocupar este como muestra patrón es posible compararla con otra muestra punto a punto para saber qué tan diferente es en su forma para determinar un comparativo.

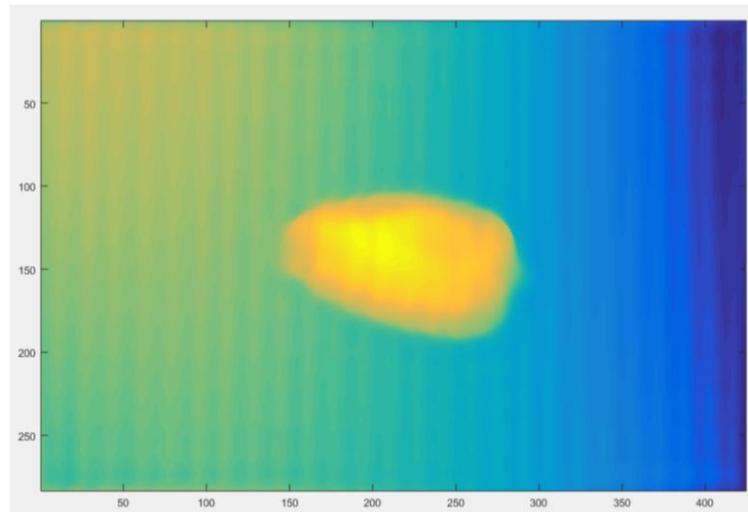


Fig. 4.11 Obtención topográfica de muestra.

Con la ayuda de Matlab se puede mostrar la representación tridimensional de la matriz resultante, esto se ve reflejado en la figura 4.12, como podemos ver es muy similar al resultado obtenido con el método de 4 pasos, ligeramente diferente, aunque se utilizó la misma muestra para desarrollar ambos métodos. Como apoyo adicional a la representación tridimensional se emplea el uso de comandos en Matlab para mostrar la gráfica con aspectos más realistas como se ve en la figura 4.13.

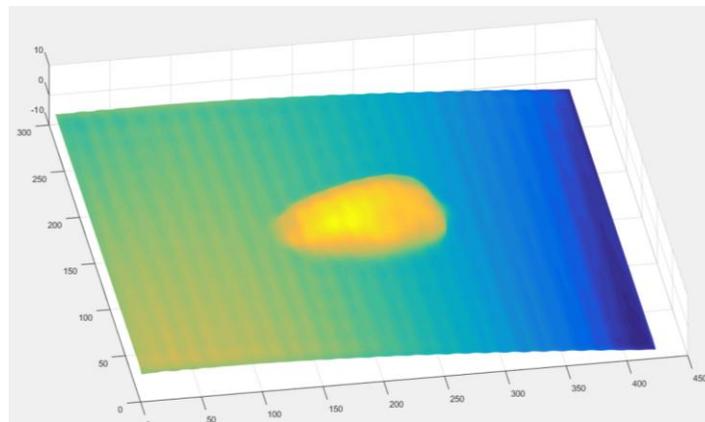


Fig. 4.12 Representación tridimensional de muestra.

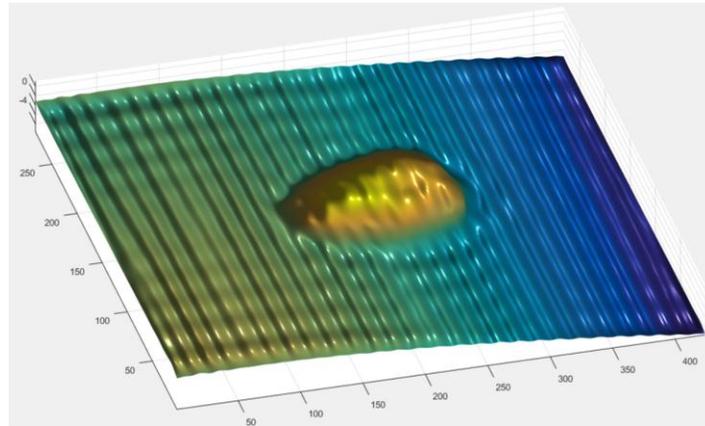


Fig. 4.13. Representación tridimensional de muestra realista.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

Se analizó información existente sobre métodos de perfilometría y obtención de datos topográficos en muestras, de las opciones analizadas se escogió el método de perfilometría óptica ya que es un método de bajo costo, sin requerimientos complejos para su aplicación, con materiales de fácil adquisición para su desarrollo y de relativamente fácil implementación.

Se desarrollaron dos métodos ópticos para la obtención topográfica de muestras con el fin de obtener datos sobre la forma de la muestra, estos dos métodos son los denominados: método de 4 pasos y método Fourier-Takeda.

Se aplicaron las ecuaciones de ambos métodos (método de 4 pasos y método Fourier-Takeda) mediante programación hecha en Matlab para el desarrollo de ambas técnicas, se registraron los resultados obtenidos conforme se desarrollaron los algoritmos, los cuales se fueron mostrando de forma gráfica por medio de imágenes.

Estas técnicas implementadas consisten en proyectar un patrón de franjas por medio de un proyector de video sobre un plano de referencia y encima de este último colocar un objeto de muestra. Al proyectar las franjas se deforman debido al perfil del objeto, siendo estas franjas las que contienen toda la información de la forma tridimensional de la muestra.

Básicamente el proceso de adquisición de datos de la muestra consta de lo siguiente: proyección de franjas sobre la superficie del objeto, obtención de mapa de fase de la muestra y análisis de la información obtenida.

Al aplicar ambos métodos de adquisición de información se encontraron problemas en el proceso lo que complicó obtener datos confiables de las muestras. El principal problema al empezar a desarrollar el algoritmo de obtención de fase se dio en el corrimiento de datos, al aplicar el desenvolvimiento de fase el mismo algoritmo utiliza un dato anterior al procesar el dato actual y seguir procesando con el dato siguiente, esto significa que si en un punto de la matriz hay un dato erróneo, este afectará todos

los siguientes datos dentro de la cadena de información, lo que provoca corrimientos de datos; al graficar estos datos en una imagen, esta se ve totalmente deformada en comparación con la imagen esperada.

El problema comentado en el párrafo anterior se debe en la mayoría de los casos al ruido digital (variación aleatoria que no corresponde a la realidad) en la toma de imágenes, esto puede suceder en cualquier píxel o punto de la captura, el resultado es que en algunos píxeles varían respecto de sus píxeles adyacentes. La solución de este problema se dio en el filtrado de la imagen de captura, aplicando filtro gaussiano, de color RGB, entre otros para mejorar la imagen.

Otro problema encontrado son las sombras que genera el mismo objeto al unirse al plano de referencia, por tal motivo no todos los objetos son candidatos para ser analizados por estos métodos, por lo tanto, nos limitamos a objetos ligeramente planos y de formas continuas, sin formas extravagantes.

La solución a las sombras se resolvió limitando el tipo de objetos por su forma y mejorando la posición de la cámara respecto al plano de referencia y respecto al proyector, al mejorar la posición de la cámara y proyector frente al objeto evitamos sombras indeseadas, lo que mejora la calidad de la captura de imágenes y esto a su vez evita corrimientos de datos erróneos.

Al tomar varias capturas de imágenes de la misma muestra en ocasiones se llegan a obtener variaciones leves en la forma del objeto, esto no se nota en la representación gráfica, sin embargo a nivel de una comparación de la matriz de datos con otra captura de la misma imagen sí, esto debido a variaciones de luminosidad del ambiente que a simple vista no es perceptible pero a nivel píxel sí, esto se soluciona teniendo un ambiente controlado de iluminación que reduce bastante esos posibles problemas, con esto se comprueba correctamente la hipótesis planteada al inicio de este documento.

En la elaboración del algoritmo para esta aplicación se intentó reducir el código al máximo para mejorar el procesamiento de la imagen y obtener en el menor tiempo posible los datos, en el caso de método de 4 pasos el procesamiento de cuatro

imágenes para adquisición de la forma real del objeto toma aproximadamente 3 segundos en imágenes de 0.7 megapíxeles y con una computadora de procesador de 1.8Ghz. En el caso del método Fourier-Takeda con las mismas características toma un tiempo aproximado de 2 segundos obtener los datos. Al contar con un equipo computacional de mayor procesamiento estos tiempos pueden mejorarse considerablemente.

Con el sistema de pruebas desarrollado se logró cumplir el objetivo principal, el cual es obtener los datos de la forma real del objeto, adquirir detalles topográficos de la muestra utilizando el método de proyección de franjas, se realizó el arreglo de proyección y captura de imágenes, se aplicaron algoritmos de filtrado de imagen, así como ecuaciones matemáticas, no se desarrolló un software para obtener estos datos sino se utilizó la plataforma denominada Matlab.

Al desarrollar dos métodos simultáneos (método de 4 pasos y Fourier-Takeda) se comprobó que ambos dan resultados similares, sin embargo dependiendo de las características de aplicación podría ser mejor uno que otro, en el método de 4 pasos es posible obtener mayor detalle de la topografía del objeto, por consiguiente se puede aplicar a piezas de escalas menores de tamaño y de piezas que se requiera mayor detalle, por otro lado la principal desventaja de este método es que se requiere mayor cantidad de capturas de imagen para una muestra, lo que significa mayor tiempo en la adquisición de datos y procesamiento de los mismos, por lo que este método puede ser muy conveniente para bancos de prueba estáticos.

Todas las pruebas se realizaron en forma experimental en condiciones controladas para comprobar los algoritmos desarrollados y verificar la correcta obtención de datos, este el primer paso antes de poder aplicarlo en situaciones reales, lo cual al momento queda como trabajo futuro, la principal aportación de este trabajo es la implementación de un sistema de obtención de datos topográficos de un objeto de fácil adquisición con el fin de almacenarlos en una matriz para su posterior comparación con una referencia y ser implementados en el control de calidad dentro de la industria.

En el caso del método Fourier-Takeda los datos obtenidos de muestras dan menor detalle en comparación con el otro método implementado, sin embargo, la principal ventaja es que únicamente se necesita de una captura de imagen en la muestra para obtener los datos topográficos, esto es de suma importancia ya que se puede implementar en aplicaciones reales donde no se disponga de mucho tiempo estático de la muestra o incluso esté en movimiento como lo es en una línea de producción. Así que, dependiendo de la aplicación, se tienen dos opciones que pueden ser utilizadas acorde a la situación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Tamayo y Tamayo, "El proceso de la investigación científica", México: Limusa, 2004.
- [2] E. G. Suárez, "Conocimiento empírico y conocimiento activo transformador: algunas de sus relaciones con la gestión del conocimiento", Revista Cubana de ACIMED, p. 10, 2011.
- [3] Ilog, "Líquidos Penetrantes", 29 Noviembre 2016. [En línea]. Available: www.ilogsa.mx. [Último acceso: 30 Enero 2018].
- [4] O. G. A. Aguilar, "Ensayo de tintas penetrantes y su incidencia en el control de caidad de las juntas soldadas en aceros al carbon", Ambato, Ecuador, 2011.
- [5] J. D. C. Córdova, "Estudio del proceso de soldadura gmaw con alambre er70s-3 y er70s-6 en el proceso de fabricación de carrocerías utilizando perfiles conformados de acero galvanizado astm a 924m para determinar la defectología en las juntas soldadas en la empresa carrocerí", Ambato Ecuador, 2016.
- [6] Y. Y. L. Dominguez, "Topometría y asociación de color real de los objetos", León, Guanajuato, 2010.
- [7] A. d. J. F. García, "Escaneo 3D en un campo de visión de 360° utilizando la técnica de proyeccion de franjas y un arreglo de espejos", León Guanajuato, 2013.
- [8] M. A. C. Chávez, "Medición de perfiles utilizando técnicas de proyección de franjas", Tonantzintla, Puebla, 2012.
- [9] M. G. R. López, "Reconstrucción tridimensional de formas utilizando el método de proyección de luz estructurada", Tulancingo, Hidalgo, México, 2016.
- [10] S. Fernandez A., G. Munther A., J. Salvi A. y D. Burton, "Automatic window size selection in Windowed Fourier Transform for 3D", Elsevier, vol. 2011, nº 284, p. 11, 2011.
- [11] C. M. d. I. R. Pérez, "Modelación del fenómeno de Moiré de sombra", Puebla, Pue., 2016.
- [12] A. L. Ocaña, "Optimización de las técnicas de desenvolvimiento de fase en dos dimensiones", Valle de chalco, México, 2017.

- [13] N. A. Q. W. a. Q. K. Shien Ri, "Comparative study of sampling moiré and windowed Fourier transform techniques for demodulation of a single-fringe pattern", *Optical Society of America*, vol. 57, n° 36, p. 10, 2018.
- [14] S. F. X. Z. J. J. P. Y. M. K. a. A. K. Xian Wang, "Nonlinear Diffusion and Structure Tensor Based Segmentation of Valid Measurement Region from Interference Fringe Patterns on Gear Systems", *Current Optics and Photonics*, vol. 1, n° 6, p. 11, 2017.
- [15] J. M. P. A. G. a. G. G. Manuel Servin, "Temporal phase-unwrapping of static surfaces with 2-sensitivity fringe-patterns", *OPTICS EXPRESS*, vol. 23, n° 12, p. 10, 2015.
- [16] H. W. a. Q. Kemaο, "Local orientation coherence based segmentation and boundary-aware diffusion for discontinuous fringe patterns", *OPTICS EXPRESS*, vol. 24, n° 14, p. 11, 2016.
- [17] C. T. a. S. Liu, "Demodulation of two-shot fringe patterns with random phase shifts by use of orthogonal polynomials and global optimization", *OPTICS EXPRESS*, vol. 24, n° 4, p. 14, 2016.
- [18] Ł. S. a. K. P. Mcej Trusiak, "Single shot fringe pattern phase demodulation using Hilbert-Huang transform aided by the principal component analysis", *OPTICS EXPRESS*, vol. 24, n° 4, p. 18, 2016.
- [19] B. L. R. Z. Y. H. a. J. L. Ronggang Zhu, "Phase extraction from two phase-shifting fringe patterns using spatial-temporal fringes method", *OPTICS EXPRESS*, vol. 24, n° 7, p. 11, 2016.
- [20] F. D. a. X. D. Shaoyan Gai, "Novel 3D measurement system based on speckle and fringe pattern projection", *OPTICS EXPRESS*, vol. 24, n° 16, p. 12, 2016.
- [21] X. L. D. D. H. G. Z. C. a. X. P. Junzheng Peng, "Suppression of projector distortion in phase-measuring profilometry by projecting adaptive fringe patterns", *OPTICS EXPRESS*, vol. 24, n° 19, p. 15, 2016.
- [22] X. L. a. J. Kofman, "High-frequency background modulation fringe patterns based on a fringe-wavelength geometry-constraint model for 3D surface-shape measurement", *OPTICS EXPRESS*, vol. 25, n° 14, p. 11, 2017.
- [23] M. S. a. J. K. Ali Babei, "Exponential fringe pattern projection approach to gamma-independent phase computation without calibration for gamma

nonlinearity in 3D optical metrology", OPTICS EXPRESS, vol. 25, nº 21, p. 12, 2017.

- [24] H. G. K. a. Y. M. Ro, "Ultrafast layer based computer-generated hologram calculation with sparse template holographic fringe pattern for 3-D object", OPTICS EXPRESS, vol. 25, nº 24, p. 10, 2017.
- [25] H. W. a. Q. Kema, "Boundary-aware single fringe pattern demodulation", OPTICS EXPRESS, vol. 25, nº 26, p. 17, 2017.
- [26] M. S. A. M. G. G.-T. S. O. a. A. C. Jorge L. Flores, "Dynamic 3D shape measurement by iterative phase shifting algorithms and colored fringe patterns", OPTICS EXPRESS, vol. 26, nº 10, p. 12, 2018.
- [27] L. S. S. Z. X. Y. K. C. a. J. X. Gang Rao, "2Depth-driven variable-frequency sinusoidal fringe pattern for accuracy improvement in fringe projection profilometry", OPTICS EXPRESS, vol. 26, nº 16, p. 23, 2018.
- [28] Faro, "Faro", 30 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.faro.com/es-mx/productos/construction-bim-cim/faro-focus/>. [Último acceso: 30 Enero 2018].
- [29] J. M. B. D. Diego Javier Risueño Chalapud, "Desarrollo de un sistema modelador de imágenes en 3d aplicando la técnica de moiré", San Juan de Pasto, 2011.
- [30] D. L. Escogido, "Escáner 3D de Alta Precisión", Cd de Mexico, 2016.
- [31] DirectIndustry, "EL SALÓN ONLINE DE LA INDUSTRIA", 20 enero 2018. [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/renishaw/product-5200-1335417.html>. [Último acceso: 20 Enero 2018].
- [32] D. G. Madruga, "Desarrollo de técnicas de mejora de la fiabilidad en la medición con brazos portátiles de medir por coordenadas", Leon, España, 2013.
- [33] ILCE, "bibliotecadigital.ilce.edu.mx", 25 Mayo 2017. [En línea]. Available: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/sec_9.htm. [Último acceso: 2018 Enero 30].
- [34] R. C. Gonzáles, R. E. Woods y S. L. , "Digital Image Processing Using Matlab", Gatesmark Publishing, 2009.
- [35] P. Q. Simbeni, "Procesamiento digital de imágenes", Bahía Blanca, Argentina, 2016.
- [36] E. Hecht, "Óptica", Madrid: Addison Wesley, 2000.

- [37] Desconocido, "Los Telescopios Ópticos", 30 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://astrojem.com/telescopiosopticos.html>. [Último acceso: 20 Febrero 2018].
- [38] H. I. a. S. K. M. Takeda, "Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry", The Journal of the Optical Society of America, vol. 72, pp. 156-160, 1982.
- [39] D. Malacara, "Phase shifting interferometry", J. Wiley & Sons, 1992.
- [40] G. R.C., W. y P. H. , "Procesamiento Digital de Imágenes", Addison-Wesley, 1996.