



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

“PERFILOMETRÍA LÁSER DE FORMA LIBRE PARA LA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS Y RECONSTRUCCIONES CILÍNDRICAS EN 3D”



Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Óptica)

Presenta: Mario Montoya Chávez

Director de Tesis: Dr. Yunuen Montelongo Flores

León • Guanajuato • México

2022

Dedicatoria

Agradezco a mis padres Catalina y Mario por el apoyo que me han dado toda mi vida, y que seguramente lo seguirán haciendo en este recorrido académico al cual le queda camino para algún día ser investigador. A mi madre Catalina por hablarme de sus años de experiencia cuando trabajó como asistente del Dr. Daniel Malacara Hernández, estoy seguro de que esas historias me impulsaron a querer estudiar el campo de la óptica.

A mis compañeros, ya que, sin duda alguna, sin el apoyo de ellos, lograr los objetivos por si solo hubiera sido una tarea muy compleja. Además, que me llevo amigos para toda una vida.

The universe doesn't allow perfection

Stephen Hawking

Agradecimientos

Agradezco a CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por haberme otorgado la beca de excelencia para realizar mis estudios para la Maestría en Ciencias (Óptica), sin ella este logro no hubiera sido posible.

Agradezco al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), en lo personal ha sido una gran experiencia de aprendizaje, profesional y sobre todo personal.

Agradezco a mi asesor de tesis el Dr. Yunuen Montelongo por el apoyo, paciencia y sobre todo por escucharme cada vez que surgía una idea, duda o en aquellos momentos de incertidumbre.

También agradezco al Dr. Jorge Ramón Parra Michel por el apoyo recibido en este trabajo de tesis, ya que fue parte fundamental.

Agradezco al comité de sinodales de tesis, la Dra. Amalia Martínez García y al Dr. Eden Morales Narváez por su tiempo y paciencia en el proceso de revisión de la tesis.

Por último, a cada investigador que me otorgo de su tiempo, de sus palabras de aliento. Ya que esto último, en muchas ocasiones es lo único que se necesita escuchar para poder seguir avanzando dentro de este camino. Sin duda alguna me llevo una de las mejores experiencias que he vivido y que han marcado mi vida de la manera más satisfactoria posible.

Publicaciones

1. Mario Montoya, Yunuen Montelongo, Nan Jiang, Steve Morris, and Jorge Parra-Michel "Free-form laser profilometry for pipeline inspection and three-dimensional cylindrical reconstructions", *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, pp. 297 – 303, Issue 1, January 2022.

Índice

Capítulo I: Introducción General	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Estructura de la Tesis	4
Capítulo II: Perfilometría láser.....	6
2.1 Antecedentes de la Perfilometría.....	6
2.2 Conceptos Básicos de la Perfilometría.....	10
2.3 Fundamentos de Perfilometría.....	16
2.3.1 Método de Detección de Intensidades.....	16
2.3.2 Técnica de Proyección Digital de Franjas.....	18
2.3.3 Técnicas de Cambio de Fase.....	19
2.3.4 Conversión de Fase a Coordenadas.....	21
2.3.5 Generación de Patrones de Franjas Sinusoidales por Desenfoque.....	22
Capítulo III: Análisis Matemático para Perfilometría Cilíndrica.....	24
3.1 Introducción.....	24
3.2 Planteamiento Matemático.....	24
3.3 Corrección del Índice de Refracción del Fluido.....	30
3.4 Propagación de Error del Índice de Refracción.....	33
3.5 Efecto de la Superficie de la Cápsula en la Precisión de la Captura de Datos...34	

Capítulo IV: Desarrollo Experimental de Barrido Cilíndrico.....	37
4.1 Aparato Experimental.....	37
4.2 Método de Inspección.....	41
4.3 Análisis de Datos.....	42
4.3.1 Procesamiento para el Tratamiento Digital de los Fotogramas.....	42
4.4 Demostración Experimental.....	44
Capítulo V: Conclusión y Trabajo a futuro.....	49
Referencias.....	51

Resumen

La inspección de infraestructura de tuberías es esencial en la gestión de su integridad para evitar formación de agentes corrosivos y prevenir fracturas internas. Además, la reducción del flujo es de gran importancia en la distribución de agua, gas y petróleo, dado que la eficiencia depende de esto. Sin embargo, los métodos actuales están limitados por una baja resolución y bajo alcance físico de medición. Además, las técnicas actuales como las acústicas, eléctricas, magnéticas y ópticas, poseen baja precisión que no permite reconstrucciones de tuberías en 3D. En este trabajo, se establece un modelo teórico de propagación láser basado en perfilometría láser de forma libre. Además, incorpora un sistema láser totalmente funcional compuesto por un espejo cónico dentro del sistema óptico integrado que contiene los elementos necesarios para recuperar la información de desplazamiento. El dispositivo óptico presenta alta resolución, precisión y velocidad de adquisición en comparación con tecnologías actuales. Además, el dispositivo puede sellarse completamente para protegerlo del entorno de las tuberías. Este trabajo allana el camino hacia los escáneres láser autónomos para inspecciones de tuberías submarinas. Ofreciendo un sistema completo de análisis para diagnóstico de tuberías. La obtención de datos es por un escaneo de una franja circular, esta morfología es adoptada por el haz láser que incide sobre el espejo giratorio. Posteriormente, se fragmentan los fotogramas del video, tratándolos en el canal rojo para evitar la saturación, debido al diodo láser utilizado de 532 nm. Con ello es posible visualizar valores de intensidad multinivel. Los fotogramas se analizan mediante un script de procesamiento de imágenes para recuperar las coordenadas de la línea láser. Se desarrolló un algoritmo personalizado basado en la técnica de procesamiento de imágenes "skeleton". Una vez procesada la información, las nubes de puntos son almacenadas en coordenadas euclidianas y cilíndricas, permitiendo su reconstrucción tridimensional.

Capítulo I: Introducción General

La infraestructura de tuberías para distribuir agua, gas y petróleo se ha convertido en un recurso básico para el desarrollo de una región. La inspección de las tuberías es fundamental para evitar pérdidas por fugas o reducción del caudal. Es necesario un plan de mantenimiento eficaz para mantener la infraestructura de tuberías en condiciones óptimas. Como ejemplo, Estados Unidos de América posee un impacto de más de 700 fallos en las tuberías de agua. Estas averías representan pérdidas de más de 1.000 millones de dólares al año [1]. Estos fallos corresponden principalmente a fugas de agua producidas por sustancias corrosivas. Aunque este fenómeno se produce de forma natural, algunos fallos de fabricación pueden acelerar el envejecimiento de zonas concretas de la tubería. Además, los esfuerzos mecánicos durante la instalación pueden provocar una fatiga crónica que culmina en una fractura. Debido a la gran variedad de materiales y geometrías, por esto se han propuesto diferentes mecanismos de inspección [2].

Entre los métodos de inspección de tuberías más recurrentes son: el acústico, eléctrico, magnético y óptico. En el mejor de los casos, el sensor óptico (cámara) se acopla al llamado "rover" (móvil a control remoto), este se desplaza a lo largo de la tubería. En el caso de los métodos acústicos, las anomalías se detectan a través de un sonar acoplado al rover. En este caso, es posible detectar las anomalías mediante la detección de la retro-reflexión de una señal acústica [3][4]. El oleoducto se mapea en pequeñas regiones bidimensionales y las anomalías se encuentran como sombras. Aunque este proceso ha tenido éxito, es lento, lo que restringe su utilidad a una pequeña área de interés. Además, tiene una baja

resolución y su aplicación en tres dimensiones es muy limitada.

Además, el régimen de trabajo de la longitud de onda depende del material y del espesor de la tubería [5]. Otras técnicas de mapeo consisten en el mapeo de campo eléctrico (EFM por sus siglas en inglés, electric field mapping) y la fuga de flujo magnético (MFL por sus siglas en inglés, magnetic flux leakage). En el caso del EFM, se utilizan dos electrodos para detectar la caída de potencial entre dos puntos [6]. Del mismo modo, en el caso de la MFL, se utiliza un potente imán para producir un flujo magnético [7]. Un detector magnético registra el flujo magnético que muestra un estado transitorio en presencia de un fallo. Al igual que los métodos acústicos, el EFM y el MFL son lentos, carecen de resolución y muestran un ruido constante durante la medición. Por estas razones, los métodos de detección preferidos siguen siendo la visualización óptica a través de cámaras montadas en rovers [8].

Los rovers deben poder desplazarse dentro de la tubería pero también deben ser capaces de mantenerse en posiciones estables para tomar imágenes de buena calidad. Para conseguirlo, se han añadido brazos rígidos a estos rovers [8]. Sin embargo, también se han desarrollado nuevos mecanismos para expandir o contraer los brazos mecánicos para que encajen en la tubería. Las cámaras y sensores montados en los rovers transmiten en tiempo real imágenes de la superficie interna de la tubería [1][9][10]. La inspección se realiza manualmente con un operador que examina las imágenes captadas por la cámara. Un elemento novedoso que se ha añadido a estos dispositivos es la Localización y Mapeo Simultáneo Visual (VSLAM por sus siglas en inglés, visual simultaneous localization and mapping), este proporciona la posición del rover durante la inspección [9][11][12]. Se ha

propuesto un paso importante hacia la inspección visual de una tubería basada en cámaras con un método de odometría (estimación de la posición del vehículo remoto), con una lente de ojo-peiz. La odometría visual requiere la detección de características similares para medir su desplazamiento cuando la cámara se mueve entre diferentes posiciones [13]. Aunque la odometría visual es capaz de localizar píxeles 3D en el espacio, este método no se utiliza como estándar de medición industrial, porque la precisión es baja y las características de los objetos requieren un fuerte contraste. De hecho, los progresos realizados para reconstruir con precisión las tuberías en 3D todavía son limitados [14][15][16].

La utilización de tecnologías basadas en el láser, como el LiDAR (por sus siglas en inglés, laser imaging detection and ranging) o la perfilometría, ofrecen una ventana de posibilidades más amplia al no estar restringida a objetos con características visibles [17]. En este trabajo hemos demostrado un método de perfilometría láser de forma libre basado en un espejo cónico para lograr ambas cosas: la reconstrucción 3D de una tubería en 360°, y el análisis de la superficie a través de la reflectancia del láser. Para conseguirlo, hemos desarrollado un modelo para la propagación del láser y hemos fabricado de forma racional un sistema láser totalmente funcional incrustado en una cápsula sellada. Además, hemos demostrado la funcionalidad de este dispositivo midiendo diferentes conductos y reconstruyéndolos en modelos tridimensionales. Por último, hemos realizado un análisis de tuberías probadas para mostrar las capacidades del dispositivo. Este método muestra resultados prometedores para la inspección de tuberías, no sólo por la alta resolución, precisión y la gran velocidad de adquisición que se consigue, sino también por la posibilidad de inspeccionar tuberías llenas de agua (o cualquier otro fluido transparente).

1.1 Objetivos

El objetivo general del trabajo de tesis es la reconstrucción tridimensional de la superficie interna de una tubería a través de perfilometría láser de forma libre.

Objetivos particulares:

- Implementar un arreglo óptico del tipo triangulación activa, montado dentro de una cápsula la cual fungirá como nuestro vehículo de inspección.
- Diseñar un algoritmo para el procesamiento digital de la franja de luz circular para la detección de los puntos centrales asociados al skeleton del haz formado.
- Calcular la corrección del índice de refracción del fluido, la propagación de error del índice de refracción y el efecto de la superficie de la cápsula en la precisión de la captura de datos.
- Estandarizar y optimizar del proceso adecuado para la reconstrucción tridimensional de la superficie interna de la tubería y un mapeo de inspección de alta resolución en 2D.

1.2 Estructura de la Tesis

A continuación, se muestra la estructura de este trabajo de tesis:

- En el **capítulo 2** se presenta una revisión literaria de los antecedentes y conceptos básicos de la perfilometría. Además, los fundamentos de perfilometría.
- En el **capítulo 3** se presenta el prototipo experimental desarrollado, el método de

inspección de la tubería, análisis de datos y su demostración experimental.

- En el **capítulo 4** se presenta el planteamiento matemático utilizado para calcular: la corrección del índice de refracción del fluido, propagación del error del índice de refracción y el efecto causado de la superficie de la cápsula en la precisión de la captura de datos.
- En el **capítulo 5** se presenta la conclusión y mejoras propuestas para trabajo a futuro.

Capítulo II: Perfilometría Láser

2.1 Antecedentes de la Perfilometría

La perfilometría tridimensional es una herramienta óptica utilizada desde 1960. Durante esta época, la captura de formas en 3D de un objeto por fotografía era una tarea complicada. No obstante, durante la década de los 70's surgen las primeras técnicas de perfilometría para una reconstrucción tridimensional. Esto sería por un registro fotográfico, para este método necesariamente se utilizaba instrumentación de medición óptica de alto grado de sensibilidad. Sin mencionar, que el tiempo necesario para los cálculos matemáticos era muy demandante [18].

En el año de 1970 surge la topografía de Moiré, esta fue inventada por el profesor Hiroshi Takasaki. Este fue un avance significativo dentro del campo de la perfilometría tridimensional, logrando generar formas en 3D a través de los contornos de Moiré. Por esta razón, la topografía de Moiré es considerada como un principio estereoscópico, ya que su configuración óptica depende de dos ejes ópticos, estos corresponden a: uno de proyección y otro de observación. Posteriormente, surge el método de ángulo crítico utilizando un prisma de ángulo recto, presentado por Kohno y sus colegas en el año de 1988. Este principio se adoptó para instrumentación comercial, en este caso el sensor de superficie de alta precisión (HIPOSS por sus siglas en inglés, high precision surface sensor). Consecutivamente, se presenta el auge de las técnicas de proyección digital de franjas (DFP por sus siglas en inglés, digital fringe projection) para realizar topografía de superficies

tridimensionales y su reconstrucción en 3D [18]. Con el surgimiento de las técnicas de proyección de franjas y con las técnicas de Moiré, surge la perfilometría de Moiré. Cabe mencionar que esta requiere de un eje óptico adicional en su diseño. Este método utiliza una fuente de proyección para la iluminación del objeto con patrones de luz estructurada, de esta forma se evitan los problemas del procesamiento de las señales digitales de la perfilometría de estereovisión (más adelante se aborda la perfilometría de estereovisión). Una vez hecho el análisis bajo un ángulo bien definido, los patrones de las franjas proyectadas se deforman cuando interactúan con el objeto. Por esto en la perfilometría de Moiré, la interferencia mecánica se induce por una rejilla de demodulación de fase ligeramente desalineada con respecto a la rejilla de proyección original, posicionadas entre el objeto y la cámara digital. A partir de esta interferencia resultante, es posible extraer los contornos de misma altura. Sin embargo, en la práctica el inducir rejillas para la interferencia complica la configuración del hardware del montaje experimental [19]. Recientemente surgen las técnicas de luz estructurada, estas emplean la misma configuración con una cámara proyector de Moiré pero sin las rejillas de demodulación. En estas técnicas de luz estructurada, la altura de la superficie se extrae del análisis de la imagen formada por la deformación de los patrones de luz proyectados. Por ende, al eliminar la rejilla permite diseñar un montaje experimental sencillo y estable. Además, la extracción de la profundidad puede realizarse de diferentes maneras. Cabe mencionar, que esto estará ligado a la forma y cantidad de patrones de franjas proyectadas [20]. Viviendo en un entorno físico tridimensional, las tecnologías de adquisición y procesamiento de imágenes en 3D, refleja la capacidad de adaptación del humano al entorno físico que lo

rodea. Por ello, las cámaras convencionales y detectores de imágenes no son suficientes para esta adaptación, ya que únicamente proporcionan información bidimensional, reduciendo enormemente registrar información de forma tridimensional.

De esta forma se han desarrollado tecnologías de medición en 3D para la cuantificación de información geométrica tridimensional de objetos, y así proporcionar información sobre su estado y permitir su reconstrucción en un modelado 3D CAD (por sus siglas en inglés, computer aided design), de alta precisión y rápida respuesta. Además, este tipo de mediciones de forma tridimensional se califican de dos maneras: invasivas y no invasivas. Los métodos invasivos, pueden medir y reconstruir geometrías en 3D, escaneando la superficie mediante un tacto físico. Un ejemplo de este caso, es la implementada en la máquina de medición de coordenadas (CMM por sus siglas en inglés, coordinate measuring machine). Esta permite medir geometrías en 3D por medio de un sistema móvil articulado. Cabe mencionar que, a pesar de su alta resolución, comúnmente está limitada por una baja eficiencia de alcance físico durante el proceso de medición [18].

Por otra parte, las técnicas no invasivas, se centran en fuentes de luz y dispositivos muy sensibles para la captura de información. En resultado a esto, se han desarrollado nuevos enfoques en la metrología óptica para la medición de formas en 3D. Algunos ejemplos son: interferometría óptica, la técnica de tiempo de vuelo en perfilometría, visión estereoscópica. Más adelante se abordan estas técnicas. Una de las características de estos métodos, es que se basan en diferentes principios de medición óptica con parámetros iguales en cualquiera de los casos, como: sensibilidad de medición, resolución espacial-temporal, y un rango definido de tiempo de medición [19]. Recientemente, las técnicas de

mediciones ópticas de superficies no invasivas poseen la capacidad de generar sistemas de imágenes tridimensionales de alta resolución y un escaneo rápido. Principalmente, este tipo de métodos se dirigen al campo de la medicina, sector industrial y entretenimiento. Por una parte, tenemos los llamados perfilómetros de tiempo de vuelo, estos toman el tiempo necesario para que un haz de luz viaje desde la fuente transmisora a un objeto, este lo escanee y regrese al receptor. La técnica para esta medición es escanear punto por punto acumulando un conjunto de muestras con densidades aproximadas, y posteriormente generar un mapa de profundidades.

Este tipo de métodos de tiempo de vuelo, generalmente son para reconstrucciones en 3D sencillas que no requieren algún tipo de calibración para producir datos de profundidad absoluta [20]. Por otra parte, tenemos las técnicas de análisis de imágenes, en este caso se genera una imagen y se analiza como la iluminación afecta los elementos que componen a la matriz de píxeles de la imagen. De esta imagen, se extrae información de los objetos tridimensionales por medio de una representación bidimensional del objeto vía un análisis de pixel por pixel. No obstante, los métodos de “Shape from shading”, reconstruyen la morfología de la superficie de la imagen escaneada, a través de un modelado de variaciones graduales en escala de grises, de esta forma se determina la distancia relativa de cada píxel en la imagen. Mientras que los métodos de forma de enfoque y desenfoque, se centran en una recuperación de la forma de la superficie correlacionando el grado de desenfoque local del objeto, tomando una distancia relativa entre el objeto y el sensor.

Las técnicas de perfilometría de visión estereoscópica, su principal función, es implementar la visión humana por medio de una cámara extra posicionada en ángulo con la cámara

original del sistema óptico. Esta técnica, identifica propiedades intrínsecas del objeto en las imágenes generadas desde múltiples perspectivas. Además, el alineamiento estereoscópico permite la reconstrucción de la forma de la superficie del objeto mediante técnicas de triangulación estándar. Una característica de las técnicas de perfilometría centrada en la obtención de imágenes, únicamente requieren de una cámara digital o siendo el caso de la técnica de visión estereoscópica, se necesitan dos cámaras. Sin embargo, estos métodos carecen de una alta precisión de las mediciones de profundidad y los requisitos necesarios para el procesamiento de las señales digitales, reduciendo la utilidad en configuraciones de perfilometría de tiempo real [20].

2.2 Conceptos Básicos de Perfilometría

Es pertinente exponer los principios teóricos utilizados para el desarrollo de esta investigación, ya que son las bases utilizadas para la explicación teórica y experimental.

Partimos con un concepto básico y fundamental en el campo de la óptica, ¿qué es un rayo de luz? Un rayo de luz, es un fenómeno físico formado por un campo electromagnético, el cual representa la dirección de propagación de la radiación de una onda de luz. Entonces, una onda luminosa es una propagación ondulatoria que posee crestas de onda, formando una superficie denominada frente de onda. Este frente de onda, se define como una superficie imaginaria cuya onda es constante. Además, podemos agregar que la distancia existente entre dos frentes de onda consecutivos con una misma fase, se denomina como la longitud de onda [21].

La óptica geométrica puede reducirse al principio de Fermat. Ya que este principio plantea

que un rayo de luz se propaga de un punto a otro, tomando aquella dirección que demore el menor tiempo posible en realizar dicha propagación. Por lo tanto, el tiempo del trayecto debe ser extremo o estacionario respecto a otras trayectorias. Dicho de otro modo, de todas aquellas trayectorias geométricas (camino óptico) que pueden ser recorridas por un haz de luz, solo se recorrerán aquellas que tengan valores extremos, es decir: máximos, mínimos o estacionarios para el camino óptico. Dicho de otro modo, el principio de Fermat es el análogo de la óptica al principio de mínima acción de la mecánica [22]. Para comprender mejor este principio, es fundamental abarcar las leyes de reflexión y refracción. Partiendo con las leyes de la reflexión, la primera define que los rayos incidentes, reflejados, y la normal a la superficie reflectora. Estarán en un mismo plano. La segunda ley, indica que la magnitud de un ángulo de reflexión será igual a la magnitud del ángulo de incidencia. Otro fenómeno óptico utilizado en este principio es la refracción. La primera ley define que el conjunto de rayos incidentes y refractados, junto con la normal a la superficie refractora, se encuentran en un plano en común. Podemos concluir, que la primera ley también es una consecuencia directa del principio de Fermat [22]. Por otra parte, la segunda ley es la también llamada ley de Snell (1)

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (1)$$

Los subíndices de las componentes n_i y θ_i , corresponden al rayo de incidencia. Mientras que para n_t y θ_t , corresponden al rayo transmitido. Generalmente estas magnitudes son dependientes de la frecuencia [21].

Por medio de la reflectancia generamos los mapeos de alta resolución, para poder analizar la superficie interna de la tubería y la detección de fallas superficiales.

Las técnicas de reflectancia pueden ser utilizadas para muestreos complejos de analizar por el método de la transmitancia convencional. Estas técnicas de reflectancia se dividen en dos tipos: en reflexión especular y difusa [22].

Para nuestro caso utilizamos ambos tipos de reflexión. Para el escaneo de la superficie interna de la tubería se ocupó la reflexión difusa. En este caso la interfaz es: aire-superficie interna de la tubería. De esta forma fue posible la detección de las diferentes alturas ocasionadas por anomalías superficiales.

Mientras que la reflexión especular se genera cuando el haz incide sobre el espejo cónico. Ya es un cono metálico con terminado de pulido tipo espejo. Y así poder analizar la radiación reflejada de la superficie de la muestra. Entonces, al tener interacción de radiación electromagnética con una muestra, la luz podrá experimentar los dos tipos de reflexión. Es importante señalar que en la práctica es posible tener los dos tipos de reflexión en el mismo lapso de tiempo, pero con diferentes contribuciones. La reflexión especular define el comportamiento del haz de luz al momento de ser reflejado por una superficie lisa (aquella superficie que posea una pequeña irregularidad en comparación con la longitud de onda) en un ángulo definido. Mientras que la reflexión difusa, es producida por superficies rugosas que reflejan luz en todas direcciones [21].

Ahora abarcamos el tema del trazado de rayos, ya que es una herramienta fundamental en el campo de la óptica. En este caso una superficie refractora es la más común. Por ende, es posible definir los siguientes parámetros [21]:

- 1 Centro de curvatura: centro de una esfera imaginaria que posee una superficie

refractora.

- 2 Radio de curvatura: distancia de la superficie refractora en relación con el centro de curvatura.
- 3 Vértice: punto localizado en la superficie refractora, con su centro de abertura libre. (Dicha abertura es circular).
- 4 Eje óptico: línea imaginaria que atraviesa el vértice y el centro de curvatura.

Una característica de una superficie refractora es que los rayos inciden con diversas orientaciones. Por lo que, según la dirección de estos, los rayos incidentes pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- a) Rayo meridional: rayo que junto al eje óptico definen un plano, llamado meridional. En esta particularidad, la normal a la superficie y el rayo refractado se encuentran en dicho plano.
- b) Rayo oblicuo: cualquier rayo no meridional. Es decir, el rayo no tendrá algún punto en común con el eje óptico y tampoco será paralelo a él.
- c) Rayo paraxial: rayo meridional cuyo ángulo respecto al eje óptico ser muy pequeño.

El método utilizado para la recopilación de los datos por medio del escaneo de la superficie de la tubería fue por medio de un barrido de franja circular. Por ende, es pertinente abordar el tema de luz estructurada.

El término de luz estructurada se utiliza para la generación de campos de luz personalizados. Sabiendo que la luz es una onda electromagnética formada por un campo eléctrico y uno magnético. Cuando estos oscilan en dirección a un mismo plano, se dice que la luz es linealmente polarizada. Por lo que los fotones que componen este tipo de luz tendrán un momento lineal. Ahora para dicho caso, si la dirección del plano a la que vibran los fotones gira a la vez que la onda se propaga, entonces se tiene un haz de luz con una polarización circular. Para este cambio de polarización decimos que tenemos un giro en el momento angular. Otra característica propia de los haces de luz, estos pueden comportarse de manera distinta, es decir, en lugar de propagarse en línea recta, divergir o convergir, pueden también doblarse, girar y propagarse de manera helicoidal [25].

De este modo el proyectar haces de luz estructurados, es un medio óptimo para la codificación de información de una muestra como la profundidad de ciertas características de la muestra. Así de esta forma se codificaron los datos de las rupturas de la tubería, estos datos se codificaron en un patron de franjas que se deforman y se capturaron por medio de algún sensor de adquisición de imágenes.

El método de luz estructurada posee características fundamentales como:

- a) Fácil implementación.
- b) El cambio de fase, la densidad de las franjas y el cambio de dirección, pueden realizarse sin piezas móviles, siempre y cuando se tenga un equipo de cómputo.
- c) Es de medición rápida para un campo completo.

Además, esta técnica está basada en dos sistemas: sistema de coordenadas globales, y

sistema de coordenadas locales. Junto con un sistema de imágenes de luz estructurada, es posible la medición de estructuras tridimensionales desde una vista definida, y así calcular el valor de la fase absoluto en cada punto del objeto. Por lo que los valores de fase, junto con un modelo óptico geométrico del sistema de medición podrán determinarse las coordenadas tridimensionales locales de cada punto del objeto [24]. Para el caso de mediciones de 360°, se utilizan tres técnicas distintas: rotación del objeto, técnica del transporte del sistema de cámara – imagen y el enfoque de un sistema de imagen fija con múltiples cámaras. Para objetos grandes se utiliza el desplazamiento de la cámara, por lo que la medición se repite en diferentes vistas para cubrir en su totalidad el objeto. Además, que todas las coordenadas locales se transforman en un sistema de coordenadas global, unificándolas por medio de métodos de mínimos cuadrados. Por lo que las coordenadas finales del objeto pueden ser comparadas con los datos propios del CAD.

En general, al utilizar luz estructurada con un desplazamiento de fase para el escaneo tridimensional de objetos, únicamente proporcionara valores de fase relativos. Por ende, el desplazamiento de fase determinará el orden fraccionario de las franjas en cualquier píxel. Estos órdenes fraccionarios, se unifican utilizando sus órdenes enteros adyacentes, denominados como proceso de desenvolvimiento de fase. Sin embargo, si hay una diferencia de fase entre cada píxel adyacente mayor a 2π , el orden de las franjas se volverá ambiguo. Por lo que, al cambiar la sensibilidad del sensor, este producirá cambios de densidades en las franjas proyectadas. Estos cambios de densidad podrán considerarse para el dominio espacial como en el temporal [24].

La idea básica es que al cambiar la sensibilidad del sistema de medición se producen

cambios en la densidad de la proyección de las franjas estructuradas. Por lo que esta discontinuidad determinará directamente el orden de las franjas durante el proceso del desenvolvimiento de la fase envuelta [18].

2.3 Fundamentos de Perfilometría

2.3.1 Método de Detección de Intensidades

En este método una imagen emitida por una fuente con un pinhole, se proyecta sobre la superficie de una muestra, esta proyección recorre un camino óptico hasta incidir sobre un divisor de haz y un objetivo de microscopio (ver figura 1). La luz reflejada de la superficie de la muestra formará una imagen en puntos focales del sistema óptico. Posteriormente, un fotodetector de gran superficie medirá la intensidad total de la luz que es reflejada (I_1). Mientras que un segundo detector con una rendija mide la intensidad de la luz reflejada que atraviesa la rendija (I_2). Con este análisis se obtienen dos registros de intensidades: la intensidad I_1 pertenece a una medida de reflectividad de la superficie de la muestra, y la intensidad I_2 , es una medida del desplazamiento sobre el eje óptico. Por lo que la señal de salida del sistema estará normalizada por ambas intensidades, de esta forma se tendrá una relación entre ellas $\frac{I_2}{I_1}$. En todo caso que la superficie de la muestra se desplace una pequeña cantidad longitudinal (z), la posición de la imagen del sistema estará desplazado por una magnificación lateral (M^2z). Ahora al utilizar una aproximación geométrica para $z \ll \frac{d}{M^2}$, se podrá expresar la intensidad en función de un pequeño desplazamiento en z [5][24]:

$$I_2(z) = \frac{\Delta s I_1(b-d)}{\pi d^2 r_0} M^2 z + I_2(0) \quad (2)$$

Donde:

$I_2(z)$ Y $I_2(0)$, son intensidades del detector en posiciones longitudinales de la superficie z y 0 (posición de referencia), respectivamente.

Δs , es la anchura de la rejilla.

r_0 , radio de la pupila de la lente del objeto. b , distancia del plano de la pupila del objetivo al punto de referencia de la imagen.

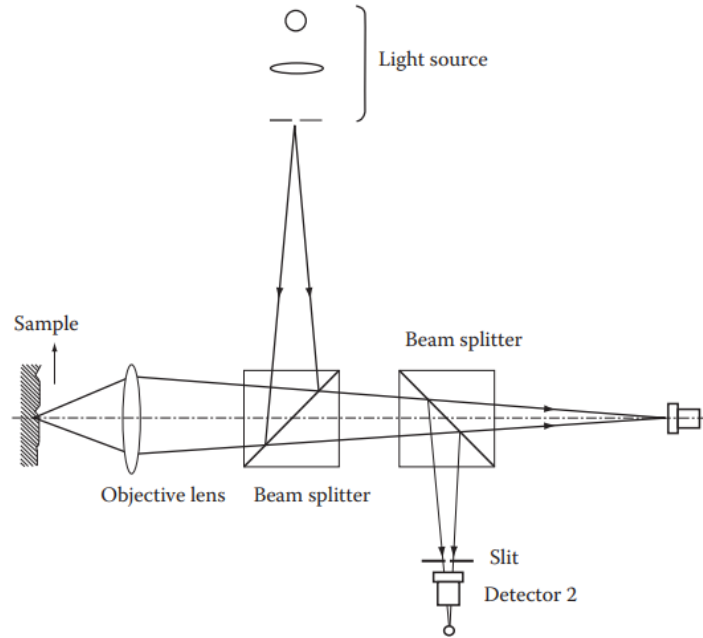


Figura 1. Representación pictórica del método de detección de intensidades. La imagen se proyecta desde el pinhole y esta incide sobre la superficie de una muestra por medio del divisor de haz (1) y el objetivo del microscopio. Por lo que la luz reflejada por la muestra forma dos imágenes. Por último un foto detector con una rejilla mide la intensidad de la luz que atraviesa la rendija. Nota: De "Handbook of Optical Metrology, principles and applications" (p.442), por Toru Yoshizawa,

2008, Taylor & Francis Group.

2.3.2 Técnica de Proyección Digital de Franjas

La técnica de proyección de franjas es un tipo de método de luz estructurada basada en la triangulación (ver figura 2). En este caso se proyecta un patron de franjas paralelas al eje y , mientras que el eje z coincide a la dirección del plano de observación y el plano xy se toma como aquel plano de referencia. En este caso, la altura será 0. Por lo que la normal del conjunto de franjas proyectas hará un ángulo respecto al eje óptico. Para esta técnica se utiliza un proyector el cual proyecta dichas franjas con luz incoherente, estas franjas inciden

sobre un objeto. Por lo que la superficie a examinar distorsionará las imágenes de las franjas, experimentando un cambio de morfología, de líneas rectas pasan a curvas. Una cámara CCD se encarga de capturar las imágenes de las franjas distorsionadas desde otro ángulo. En este sistema, la correspondencia se establece analizando la distorsión de los patrones estructurados de las franjas por medio de técnicas de análisis de franjas [25][26].

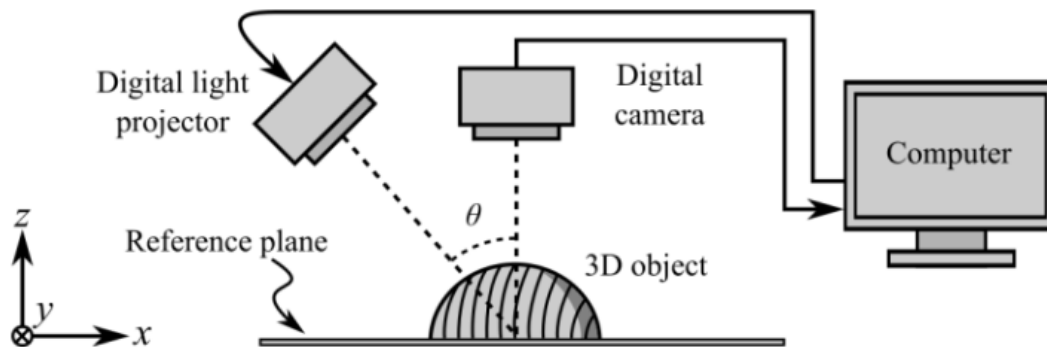


Figura 2. Arreglo básico para la proyección digital de franjas para perfilometría digital mono-proyector con una cámara [27]. Nota: De "Profilometry with digital fringe-projection at the spatial and temporal Nyquist frequencies", por M. Padilla, M. Servin & G. Garnica, *Optics Express* 25 19 (2017): 22292-22302.

2.3.3 Técnicas de Cambio de Fase

Dentro del campo de la interferometría, el desplazamiento de cambio de fase, se relaciona al frente de onda de referencia el cual experimenta un movimiento sobre una dirección en la cual se propaga respecto al frente de onda de interés. De esta este desplazamiento de la fase es la diferencia de fase. Además, al analizar los cambios de intensidades para varios desplazamientos de fase puede determinarse la fase de una onda relativa a una onda de referencia para cualquier punto medio del frente de onda origen. El cambio de fase es

posible generarse por diferentes circunstancias, por ejemplo: utilizando un espejo con un transductor lineal, al rotar una placa de vidrio, desplazar una rejilla de difracción, o al cambiar la frecuencia de la fuente puntal de iluminación [25][26].

Esta técnica de cambio de fase permite tener una mayor exactitud en la toma de datos y además es insensible a perturbaciones del entorno. Además, se tienen los algoritmos de cambio de fase, estos algoritmos se definen a partir del número de datos del muestreo obtenido, las posiciones de fase y características de la muestra. Normalmente con un algoritmo de tres pasos es suficiente para identificar estas variables, pequeñas fallas en el proceso de medición afectarán de manera significativa los resultados obtenidos. Es por esto que se tienen diferentes algoritmos de cambio de fase, por ejemplo: los algoritmos de tres pasos, cuatro pasos y cinco pasos. En general, los patrones de franjas para cualquier tipo de algoritmo de cambio de fase N , se expresa de la siguiente manera:

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

Donde:

$I'(x, y)$, es la intensidad de fondo y $I''(x, y)$, es la amplitud de la franja. Mientras que $\phi(x, y)$, es la fase a resolver, y $n = 1, 2, 3, \dots$

Resolviendo esta ecuación, nos conduce a una fase que dependerá de una relación de intensidades:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \quad (4)$$

De esta expresión (4), se obtiene una fase que tiende de $-\pi$ a π con una discontinuidad de

2π . Para obtener la fase continua se implementa un desenvolvimiento de fase y así, obtener una reconstrucción tridimensional [25].

2.3.4 Conversión de Fase a Coordenadas

Para este método la calibración entre la cámara y el proyector se optimiza durante el proceso de visualización de una imagen que es proyectada con una matriz de k elementos en relación con los pixeles de la imagen emitida. Para este tipo de calibración, es posible modelar el sistema de proyección digital de franjas como si se tratara de un sistema de estereovisión, en este caso se modela el dispositivo digital de micro espejos (DMD por sus siglas en inglés, digital micromirror device) del proyector como un sensor de imagen. Una vez realizada esta calibración, el modelo de cámara lineal y el proyector se expresan en forma de una matriz:

$$P = \begin{bmatrix} f_u & \alpha & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & t_x \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & t_y \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & t_z \end{bmatrix} = A[R, t] \quad (5)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} f_u & \alpha & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}; t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

Las coordenadas de los puntos de referencia están dadas por (u_0, v_0) , las distancias focales a lo largo de los ejes u y v , están definidas por f_u y f_v . Y α , es el parámetro que describe la asimetría que existe entre los ejes de la imagen. Cabe mencionar que estos parámetros son propios a los objetivos, sensores de la cámara y del proyector. Dicho de otro modo, la matriz de calibración A , está formada por parámetros intrínsecos del sistema óptico. Mientras que

la matriz R y t , representan la rotación y traslación de las coordenadas del objetivo (lente) (x^c, y^c, z^c) , para su representación como coordenadas globales (x^w, y^w, z^w) . Por último, es relevante mencionar que, en este modelo lineal, no se toman en cuenta las distorsiones ocasionadas por la lente. El objetivo de este modelo es obtener una relación entre el sensor de la cámara y el sensor del proyector, para tener un sistema mapeado uno a uno. Esto quiere decir, que cada punto del sensor de la cámara corresponderá de manera directa a cada punto del sensor del proyector [25][26].

2.3.5 Generación de Patrones de Franjas Sinusoidales por Desenfoque

Para este caso, se toma como referencia un patrón de franjas binario estructurado el cual se convierte a un tipo pseudosinusoidal al desenfocar la imagen adecuadamente. En este caso, el proyector desenfoca en diferentes grados, mientras que la cámara está enfocada. En esta metodología se implementan juegos de franjas denominadas como patrón binario cuadrado (SBM por sus siglas en inglés, square binary pattern). A medida que el proyector se desenfoca, el patrón binario estructurado de franjas se deforma en relación con el desenfoque. Esto se puede explicar de una forma sencilla, cuando el proyector está enfocado, las estructuras binarias son claras. A medida que aumenta el grado de desenfoque, las estructuras de las franjas son cada vez menos claras, y en este punto las sinusoidales son más evidentes. No obstante, si el proyector llega a un desenfoque muy pronunciado las estructuras sinusoidales son cada vez menos nítidas (véase la figura 3) [25].

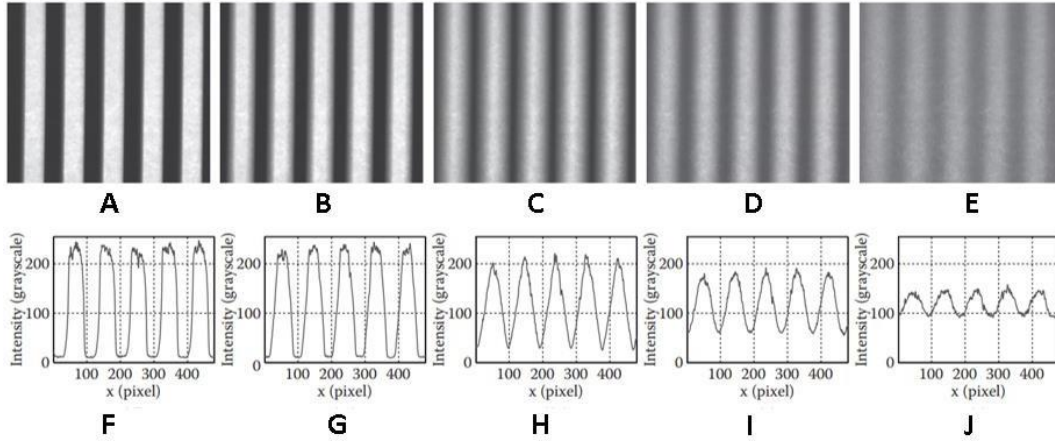


Figura 3. Demostración de la generación de franjas sinusoidales a través del desenfoque de un patrón estructurado binario. **A** el proyector se encuentra enfocado. De **B** a **E** el reflector se desenfoca de manera gradual. De **F** a **J** se muestra como a mayor medida de desenfoque la sinusoidal cada vez es más nítida. Nota: De “Handbook of 3D Machine Vision – Optical Metrology and Imaging” (p.245), por Song Zhang, 2013, Taylor & Francis Group.

Capítulo III: Análisis Matemático para Perfilometría Cilíndrica

3.1 Introducción

El método de la perfilometría consiste en la proyección de una línea láser en la superficie de un objeto para detectar un desplazamiento visual en su trayectoria. Este método puede aplicarse a cualquier superficie arbitraria siempre que una cámara pueda detectar el desplazamiento de la línea láser. Aunque el método de la perfilometría está bien establecido, se ha avanzado poco hacia el escaneo completo y las reconstrucciones de tuberías. El principal reto en las tuberías, en comparación con el método tradicional de perfilometría, consiste en ampliar el campo de visión para detectar la geometría en 360°. Este reto requiere la implementación de ópticas de forma libre diseñadas a medida y capaces de recoger la luz en coordenadas cilíndricas [8]. Aquí abordamos este reto incorporando un espejo cónico dentro de un sistema óptico integrado que contiene todos los elementos necesarios para recuperar la información de desplazamiento. Todos estos elementos se han incrustado dentro de una cápsula sellada que, en principio, puede funcionar bajo el agua.

3.2 Planteamiento Matemático

El primer elemento de la cápsula es un láser que emite un haz colimado en la dirección axial de la tubería (véase la figura 4A). El segundo elemento consiste en un espejo giratorio

inclinado con un ángulo α . Siguiendo las leyes de la reflexión, encontramos que el haz se desvía en 2α . Una vez que el rayo láser llega a la superficie este se dispersa en todas direcciones. Por lo tanto, se necesita una lente para proyectar la trayectoria del láser en el sensor de la cámara. Teniendo en cuenta que el espejo rotativo girará 360° creando un barrido circular, se monta un espejo cónico con un ángulo de apertura de β para detectar toda la luz dispersada. Aquí trazamos el camino más corto según el principio de Fermat y proyectamos el punto dispersado hacia el sensor de la cámara. Obsérvese que el espejo cónico está colocado en la trayectoria, por lo que el haz se desvía en 2β con respecto a la orientación axial de la tubería.

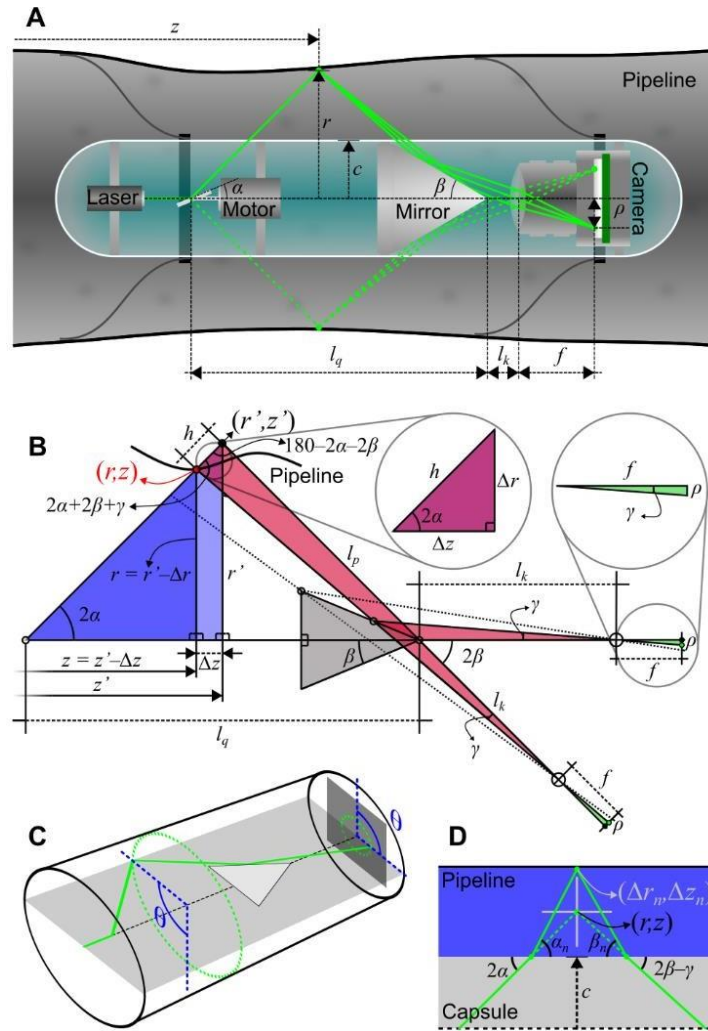


Figura 4. Esquema geométrico del sistema de escaneo de tuberías. **A** Sección transversal del dispositivo mostrando el láser, el motor, el espejo y la cámara. **B** Geometría de los rayos que correlaciona la proyección del láser en el sensor y la superficie de la tubería. **C** Perspectiva tridimensional que muestra la orientación angular de un punto proyectado en la superficie. **D** Reubicación de las coordenadas requeridas a partir de la contracción aparente cuando se presenta un índice de refracción diferente fuera de la cápsula. Nota: De “Free-form laser profilometry for pipeline inspection and three-dimensional cylindrical reconstructions”, por M. Mario Montoya, Y.

Montelongo et al, 2022, IEEE Sens. J [28]. IEEE Copyright line © 2022

Nuestro principal objetivo en este método consiste en encontrar el desplazamiento del punto láser incidente con respecto a la trayectoria del rayo láser. Para facilitar este análisis, hemos diseñado una representación geométrica que muestra tres segmentos independientes (véase la figura 4B). El primer segmento muestra la trayectoria del láser desde el espejo giratorio hasta la superficie de la tubería. El segundo segmento muestra un rayo que viaja desde la superficie de la tubería del espejo cónico. Por último, el tercer segmento muestra la trayectoria entre el espejo cónico y el sensor que cruza por el centro de la lente. La interpretación de este diagrama se facilita considerablemente si se ignora la reflexión del espejo cónico y se fusiona el tercer segmento con el segundo. En la trayectoria en perspectiva ampliada que se muestra en la Figura 4B, podemos visualizar los dos puntos principales del análisis: en primer lugar, el punto rojo que muestra el desplazamiento en la tubería, y en segundo lugar, su proyección hacia la cámara mostrada con un punto verde. El objetivo consiste en encontrar las coordenadas r y z en el punto rojo, conociendo la longitud ρ que es la distancia entre la línea axial y la proyección del punto láser en verde. De hecho, el análisis se simplifica aún más considerando sólo el desplazamiento angular γ , que se obtiene a partir de la distancia ρ y la distancia focal f como:

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{\rho}{f}\right) \quad (7)$$

La coordenada (r, z) sólo puede encontrarse como un desplazamiento $(\Delta r, \Delta z)$ desde una posición fija (r', z') mostrada como un punto negro:

$$r = r' - \Delta r \quad \text{y} \quad z = z' - \Delta z \quad (8)$$

Por lo tanto, es imprescindible calcular la posición fija de r' y z' . Por un lado, z' se define

como la posición absoluta de la cápsula dentro de la tubería en un momento dado. En un sistema autónomo puede obtenerse con un Sistema de Posición Global (GPS por sus siglas en inglés, global positioning system), aunque puede obtenerse una localización más precisa si se tira de la cápsula con algún dispositivo mecánico, en nuestro caso con un carrete automatizado. Sin embargo, el valor de r' es una constante característica bien definida del sistema óptico, que representa los radios máximos detectables. Podemos calcular este valor trazando una línea desde el punto negro en los radios máximos, hasta la punta del cono, creando un triángulo rectangular. Definiendo la hipotenusa del triángulo como l_p , así encontramos el valor de r' como:

$$r' = l_p \sin(2\beta) \quad (9)$$

Aunque l_p , no se conoce en este momento, se puede calcular con la longitud entre el espejo giratorio y la punta del espejo cónico. A partir de aquí aplicamos la ley de los senos y encontramos:

$$l_p = \frac{l_q}{\sin(180-2\alpha-2\beta)} \sin(2\alpha) \quad (10)$$

Obsérvese que el ángulo opuesto de l_p es $180 - 2\alpha - 2\beta$. Y, por lo tanto, ahora se conocen todos los valores. El siguiente paso consiste en calcular el desplazamiento del láser h en la tubería, que a su vez define el desplazamiento $(\Delta r, \Delta z)$ con simples relaciones trigonométricas:

$$\Delta z = h \cos(2\alpha) \quad \text{y} \quad \Delta r = h \sin(2\alpha) \quad (11)$$

Del mismo modo, h se encuentra aplicando la ley de los senos en el triángulo rojo:

$$h = \frac{l_p + l_k}{\sin(2\alpha + 2\beta + \gamma)} \sin(\gamma) \quad (12)$$

Donde l_k , es la distancia entre la punta del espejo cónico y la lente de enfoque. Además, el ángulo opuesto a la trayectoria $l_p + l_k$, se puede deducir con los dos ángulos restantes del triángulo. Por lo tanto, el valor del punto (r, z) queda definido a partir de ρ , y el resto de los parámetros físicos del sistema. Sin embargo, la coordenada (r, z) sólo define la posición del punto en una sección axial determinada (véase la figura 4C). Para definir completamente el punto en coordenadas cilíndricas, es necesario recuperar la orientación angular θ , en la que se proyecta un punto en el sensor. Si conocemos la coordenada física (p_x, p_y) del punto proyectado en una matriz pixelada del sensor, tanto ρ como θ , pueden calcularse directamente como:

$$\rho = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad \gamma \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{p_y}{p_x} \right) \quad (13)$$

Hasta ahora, hemos discutido la propagación del haz sin considerar un fluido en la tubería. Si un fluido con un índice de refracción n está presente fuera de la cápsula de exploración, habrá una reducción aparente de los radios medidos (véase la figura 4D). Para compensar esta reducción, consideramos una cápsula cilíndrica de radio c . Como primera aproximación, es posible escalar la sección del fluido como $(r - c)n + c$. Sin embargo, una descripción más precisa de la expansión requiere la aplicación de la ley de Snell en ambas interfaces: aire-fluido y fluido-aire. Para obtener una expresión del desplazamiento producido por el índice de refracción, introducimos un término de desplazamiento que reubicará la coordenada en una nueva posición $(r - \Delta r_n, z - \Delta z_n)$. Si centramos un sistema de coordenadas en (r, z) , el problema se reduce a encontrar el punto de

convergencia de dos líneas que salen de los puntos límite. Por lo tanto, utilizamos la definición de línea recta, con la pendiente en el lado izquierdo de la ecuación:

$$\tan(\alpha_n) = \frac{\Delta r_n - (r-c)}{\left(\Delta z_n - \frac{(r-c)}{\tan(2\alpha)}\right)} \quad \text{y} \quad \tan(\beta_n) = \frac{\Delta r_n - (r-c)}{\left(\Delta z_n + \frac{(r-c)}{\tan(2\beta-\gamma)}\right)} \quad (14)$$

Donde α_n y β_n , son los ángulos de los rayos hacia afuera y hacia adentro en el lado del fluido. Estos ángulos pueden obtenerse directamente de la ley de Snell. Por lo tanto, las expresiones se reducen a:

$$\sqrt{n^2 - \cos^2(2\alpha)} = \sin(2\alpha) \frac{\Delta r_n - r + c}{(\Delta z_n \tan(2\alpha) - r + c)} \quad (15)$$

Y

$$\sqrt{n^2 - \cos^2(2\beta - \gamma)} = \sin(2\beta - \gamma) \frac{\Delta r_n - r + c}{(\Delta z_n \tan(2\beta - \gamma) - r + c)} \quad (16)$$

La solución de este sistema de ecuaciones lineales produce el valor de Δr_n y Δz_n , y por lo tanto la nueva coordenada se define en términos de valores conocidos.

3.3 Corrección del Índice de Refracción del Fluido

Cabe mencionar que durante el recorrido del haz se genera aparentemente una reducción de este, ocasionado por la presencia de algún tipo de fluido de índice de refracción n . Por lo que se incluye la variable d del radio de la cápsula. Además, se agregan los valores de α_n y β_n , de los ángulos opuestos de α and β (véase la figura 5).

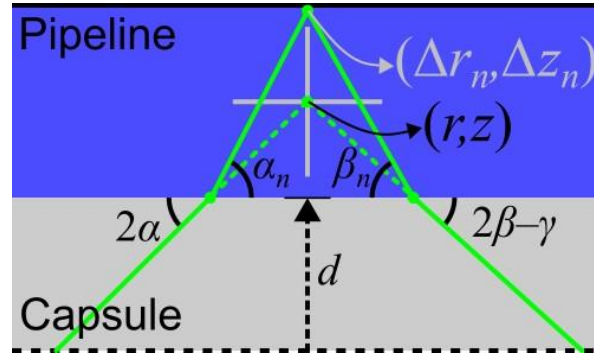


Figura 5. Reubicación de las coordenadas requeridas a partir de la contracción aparente, cuando un índice de refracción n diferente está presente fuera de la cápsula. Nota: De “Free-form laser profilometry for pipeline inspection and three-dimensional cylindrical reconstructions”, por M.

Mario Montoya, Y. Montelongo et al, 2022, IEEE Sens. J [28]. IEEE Copyright line © 2022

Para el lado izquierdo del diagrama de la figura 5 relativo al valor de α_n , utilizamos la relación trigonométrica:

$$\tan(\alpha_n) = \frac{\Delta r_n - (r-d)}{\left(\Delta z_n - \frac{(r-d)}{\tan(2\alpha)}\right)} \quad (14)$$

Y con la ley de Snell (para ángulos desde la interfaz y no desde la normal):

$$n \cos(\alpha_n) = \cos(2\alpha) \quad (17)$$

Con estas dos ecuaciones encontramos:

$$n \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\Delta r_n - (r-d)}{\left(\Delta z_n - \frac{(r-d)}{\tan(2\alpha)}\right)} \right) \right) = \cos(2\alpha) \quad (18)$$

Simplificando esto:

$$\frac{n}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta r_n - (r-d)}{\left(\Delta z_n - \frac{(r-d)}{\tan(2\alpha)}\right)} \right)^2}} = \cos(2\alpha) \quad (19)$$

Reordenando la ecuación:

$$\frac{n^2}{\cos^2(2\alpha)} = 1 + \left(\frac{\Delta r_n - (r-d)}{(\Delta z_n \tan(2\alpha))} \right)^2 \quad (20)$$

Entonces:

$$\sqrt{n^2 - \cos^2(2\alpha)} = \cos(2\alpha) \tan(2\alpha) \left(\frac{\Delta r_n - (r-d)}{(\Delta z_n \tan(2\alpha) - (r-d))} \right) \quad (21)$$

Que es lo mismo que:

$$\sqrt{n^2 - \cos^2(2\alpha)} = \sin(2\alpha) \frac{\Delta r_n - r + d}{(\Delta z_n \tan(2\alpha) - r + d)} \quad (22)$$

Para el lado derecho del diagrama de la figura 5 seguimos un procedimiento similar para

β_n :

$$\sqrt{n^2 - \cos^2(2\beta - \gamma)} = \sin(2\beta - \gamma) \frac{\Delta r_n - r + d}{(\Delta z_n \tan(2\beta - \gamma) - r + d)} \quad (23)$$

Con las ecuaciones (16) y (17) obtenemos:

$$\frac{\sqrt{n^2 - \cos^2(2\alpha)}}{\sin(2\alpha)} (\Delta z_n \tan(2\alpha) - r + d) = \frac{\sqrt{n^2 - \cos^2(2\beta - \gamma)}}{\sin(2\beta - \gamma)} (\Delta z_n \tan(2\beta - \gamma) - r + d) \quad (24)$$

Aislado Δz_n obtenemos:

$$\Delta z_n = \frac{B-A}{A \tan(2\alpha) - B \tan(2\beta - \gamma)} (d - r) \quad (25)$$

Donde A y B, se definen como:

$$A = \frac{\sqrt{n^2 - \cos^2(2\alpha)}}{\sin(2\alpha)} \quad (26) \quad \text{y} \quad B = \frac{\sqrt{n^2 - \cos^2(2\beta - \gamma)}}{\sin(2\beta - \gamma)} \quad (27)$$

Y para Δr_n :

$$\Delta r_n = A\Delta z_n \tan(2\alpha) + (r - d)(1 - A) \quad (28)$$

La figura 6 muestra el desplazamiento de corrección con los parámetros del prototipo en función del índice de refracción n en el fluido.

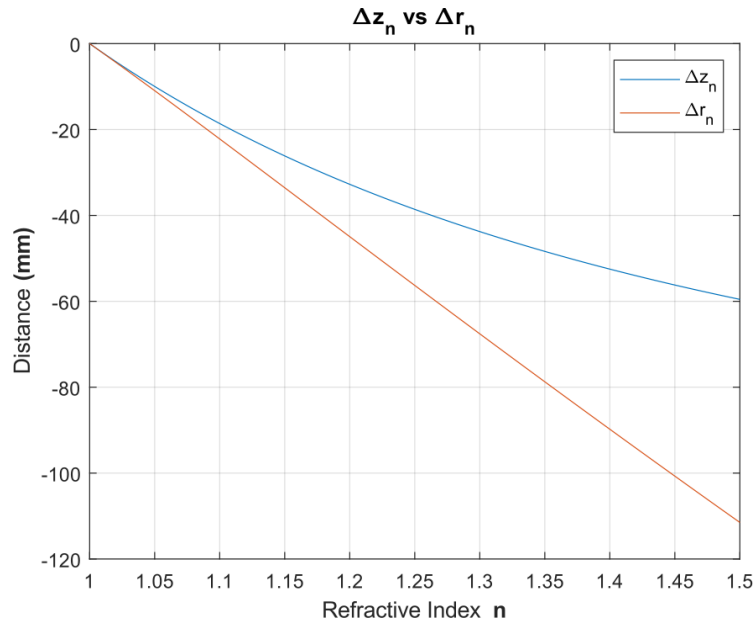


Figura 6. Distancia desplazada en z y r en función del índice de refracción en el fluido.

3.4 Propagación de Error del Índice de Refracción

Utilizando las ecuaciones (25) y (28) para describir la diferencia de distancia medida para Δz_n y Δr_n . La figura 7 muestra el desplazamiento producido por una diferencia en el índice de refracción con respecto a la línea base del agua. El desplazamiento puede ser de hasta 2,5 mm dentro del 1% en el error del índice de refracción.

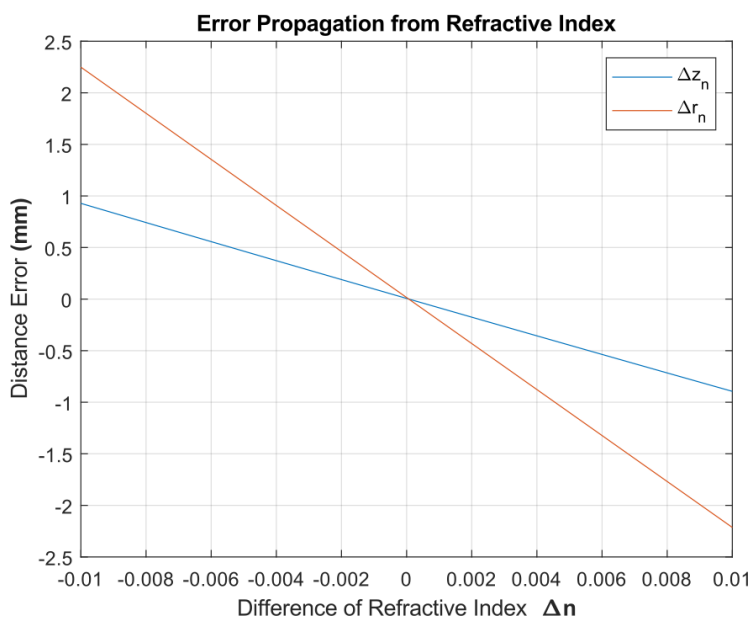


Figura 7. Error propagado por un cambio en el índice de refracción considerando el agua como línea de base.

3.5 Efecto de la Superficie de la Cápsula en la Precisión de la Captura de Datos

Analizando el efecto producido por el espesor de la cápsula. En la figura 8 se describe el desplazamiento producido por una diferencia de índice de refracción en la superficie de la cápsula. El índice de refracción del PMMA crea un desplazamiento efectivo en Δz_n . Sin embargo, fuera de la cápsula la trayectoria del rayo es paralela al rayo original. Esto implica que sólo hay un desplazamiento relativo Δz_t el cual es constante para la cápsula.

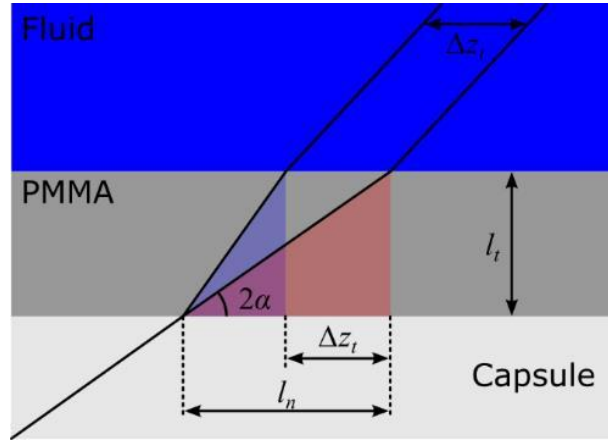


Figura 8. Desplazamiento producido por la capa de PMMA entre la región interior y la región exterior de la capsula.

Para calcular el desplazamiento Δz_t , se utilizó el principio de Fermat en ambas trayectorias. La trayectoria con la capa de protección (borde de la capsula) incluye el factor de índice de refracción n_c del PMMA:

$$\sqrt{l_n^2 + l_t^2} = n_c \sqrt{(l_n - \Delta z_t)^2 + l_t^2} \quad (29)$$

Aislando Δz_t obtenemos:

$$\Delta z_t = l_n - \sqrt{\frac{l_n^2 + l_t^2}{n_c^2} - l_t^2} \quad (30)$$

El valor de l_n se encuentra con la relación trigonométrica:

$$\tan(2\alpha) = \frac{l_t}{l_n} \quad (31)$$

Entonces obtenemos:

$$\Delta z_n = \frac{l_t}{\tan(2\alpha)} - \sqrt{\frac{\left(\frac{l_t}{\tan(2\alpha)}\right)^2 + l_t^2}{n_c^2} - l_t^2} \quad (32)$$

Que es lo mismo que:

$$\Delta z_t = l_t \left(\cot(2\alpha) - \sqrt{\left(\frac{\csc(2\alpha)}{n_c}\right)^2 - 1} \right) \quad (33)$$

De esta ecuación se desprende que el desplazamiento Δz_t producido por la capa de PMMA con los parámetros del prototipo corresponde a 3,3 mm. Sin embargo, este desplazamiento es relativo y todo el perfil del escaneo permanecerá inalterado.

Capítulo IV: Desarrollo Experimental de Barrido Cilíndrico

4.1 Aparato Experimental

Se diseñó y construyó un prototipo experimental utilizando los parámetros adecuados para escanear una tubería con un diámetro máximo de 28 cm (véase la figura 9). El tubo principal del prototipo consiste en una tubería transparente de polimetilmetacrilato (PMMA) de 5,08 cm de diámetro. Este tubo de PMMA se utiliza para mantener los brazos exteriores en su sitio, pero también para sellar y fijar los elementos del sistema óptico en el interior. Los brazos exteriores consisten en tres placas alargadas de acero inoxidable unidas a ambos extremos del tubo de PMMA. Cada pata se ha doblado con la ayuda de un cilindro para alcanzar un perfil circular flexible de 11 cm de diámetro. Estas patas son flexibles, lo que permite que la cápsula se auto centre dentro de la tubería de ensayo. Las patas se han fijado al cilindro mediante un anillo de bloqueo de acero inoxidable.

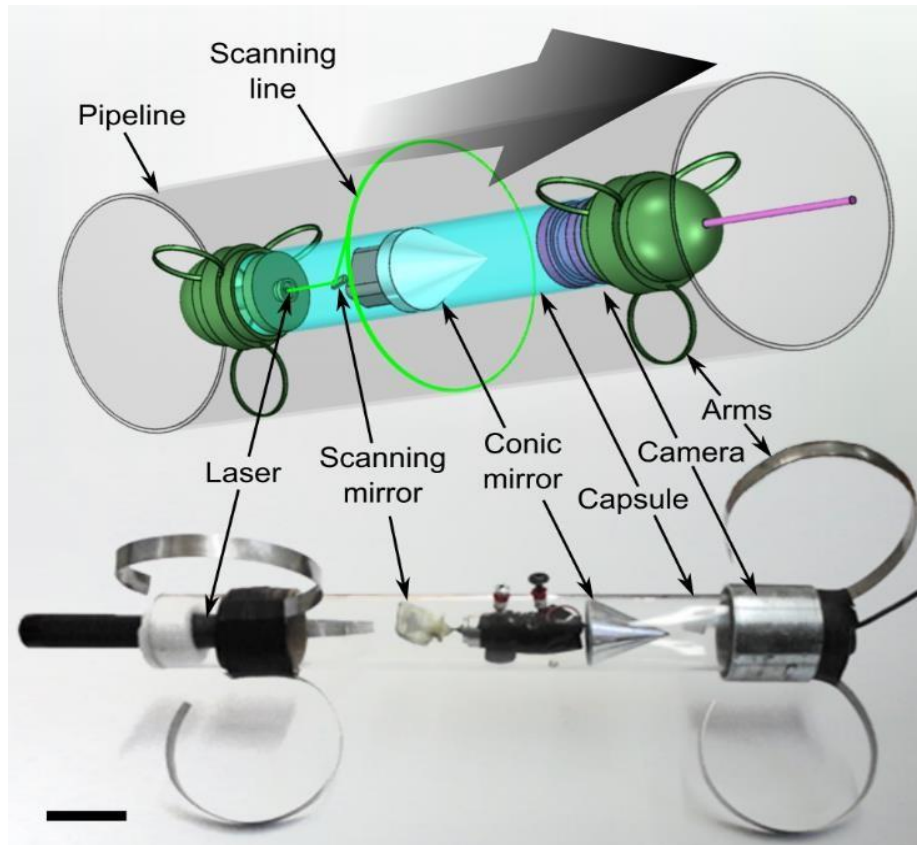


Figura 9. Prototipo experimental. Diseño (arriba) y fabricación (abajo) una cápsula autónoma. La cápsula contiene todos los elementos necesarios para el escaneo, incluyendo: una fuente láser, un espejo de escaneo, un espejo cónico, un módulo de cámara y seis brazos flexibles (barra negra de escala 5 cm). Nota: De “Free-form laser profilometry for pipeline inspection and three-dimensional cylindrical reconstructions”, por M. Mario Montoya, Y. Montelongo et al, 2022, IEEE Sens. J [28].

IEEE Copyright line © 2022

Dentro de la cápsula de PMMA se montaron todos los componentes necesarios para la exploración óptica. El primer elemento consiste en un láser de estado sólido bombeado por diodos y alimentado por una batería (alimentada por un cableado externo), con una longitud de onda de 532 nm y una intensidad de 100 mW. El láser se sujeta en un soporte de poliestireno que se alinea cuidadosamente para producir un haz centrado en el eje axial

del sistema óptico. El segundo elemento consiste en un espejo giratorio situado a 11 cm de la salida del láser. Éste tiene una forma cuadrada con 2,4 cm de apertura clara y 22,5° de ángulo de inclinación. El espejo está unido a un motor alimentado por batería a través de un soporte hecho a medida. El motor gira a 6000 rpm (revoluciones por minuto) produciendo una línea de barrido circular en la superficie de la tubería. El motor se fija al marco de PMMA mediante dos anillos de bloqueo y tres tornillos. Los tornillos tienen la función de mantener el motor en una posición estable, pero también, de alinearlo en el centro de la cápsula. Estos tornillos están asegurados con tuercas y sellados con arandelas. El tercer elemento consiste en un espejo cónico convexo que ha sido alineado y fijado al motor antes de ser introducido en la cápsula. El cono tiene un diámetro de 5 cm, un ángulo de apertura de 25° y una distancia total de 15 cm desde el centro del espejo giratorio hasta la punta del cono. Para obtener estos parámetros, el espejo cónico tuvo que ser fabricado con las características de pulido del tipo espejo. Un cilindro de acero inoxidable fue cortado con un torno a una velocidad de 1200 rpm para formar la superficie cónica. El acabado de espejo en la superficie se consiguió con el esmerilado y el pulido a una velocidad similar en un torno. El último elemento del dispositivo es una cámara montada en un soporte de poliestireno a 7,5 cm de la punta del espejo cónico. La cámara contiene un objetivo de 8 mm, y posteriormente un sensor CMOS (por sus siglas en inglés, complementary metal-oxide-semiconductor) de 0.84 cm (C3188A). El sensor CMOS tiene una resolución VGA (por sus siglas en inglés, video graphics array) (640 × 480 píxeles) con un tamaño de píxel de 7,6 μm × 7,6 μm. El cable de la cámara se utiliza para suministrar energía, pero también, para

recuperar la información de vídeo. El dispositivo final consiste en una cápsula sellada autónoma de 43 cm de longitud. La exploración del dispositivo a través de la tubería se realizó tirando de la cápsula con un cable de Kevlar. El cable de la cámara está unido a este cable de arrastre para facilitar la manipulación. Durante los experimentos de este trabajo el cable se enrolló en una bobina mediante un motor de 4 hp (caballos de fuerza). La velocidad final de barrido con este proceso fue de 4,3 cm/s.

Cabe mencionar que el objetivo final es utilizar el prototipo en tuberías con fluidos, por lo que hasta el momento solo se ha probado en tramos de tuberías dañadas y drenadas, demostrando así un resultado exitoso. Principalmente, este prototipo se diseñó pensando para ambientes libres de riesgo de sustancias inflamables (por ejemplo, tuberías de agua). En este caso, se implementó un cableado externo que alimenta a los componentes eléctricos del sistema. De esta forma se evita el uso de baterías autónomas y facilita la implementación de un sistema hermético, ya que permite sellar totalmente la capsula sin la necesidad de abrirla de manera recurrente para la recarga de las baterías. No obstante, una de las mejoras que se han propuesto de la cápsula, es el incremento del tamaño entre 5 y 10 cm de longitud, y así cubrir en su totalidad el tramo expuesto del láser. Con esta mejora, se estaría logrando un sistema totalmente eficiente para interactuar con cualquier tipo de fluidos no inflamables, en caso de que la tubería no pueda ser drenada para su inspección.

En caso de trabajar con sustancias inflamables se deberían de implementar algunas modificaciones en el sistema. Específicamente en la sustitución de todos los elementos electrónicos por un sistema de múltiples fibras ópticas, con el objetivo de prevenir cualquier

tipo de descarga eléctrica. Algunas de estas modificaciones propuestas son:

1. Sustituir el diodo láser por una fibra óptica para la propagación del haz de luz.
2. Cambiar el sistema mecánico (espejo giratorio y motor DC) por un elemento difractiva capaz de generar un holograma cónico, capaz de propagarse de la misma manera que el haz estructurado circular.
3. La proyección de la imagen en la cámara ahora sería transmitida por un sistema endoscópico de múltiples fibras ópticas.

4.2 Método de Inspección

El método utilizado para la inspección de la tubería se realizó por medio de escaneo láser. El haz utilizado adopta una forma circular debido a que el haz láser incide sobre el espejo giratorio. Al trabajar con una tubería con anomalías en su superficie la intensidad de la franja experimenta cambios. Estos cambios se relacionan con el ruido registrado en la captura de los datos, y se relación con fallas en la superficie interna del tubo, de esta forma se facilita la detección de estas deformaciones y beneficia directamente al análisis matemático para la reconstrucción tridimensional. Además, es posible generar un mapeo de reflectancia el cual ocurre en la superficie interna. Este análisis de reflectancia proporciona los picos de intensidades registrados en el estudio.

Dentro de este estudio, hay tres elementos a considerar: corrosión y formación de sarro, deformaciones tridimensionales e intensidades de la reflexión. Para realizar esta inspección de la forma más eficiente el escaneo de la superficie interna de la tubería se realizó por un

haz estructurado, permitiendo la detección de diferentes niveles de intensidades e identificar las anomalías mecánicas. Posteriormente a la captura de datos, se realiza un análisis matemático para una reconstrucción tridimensional.

4.3 Análisis de Datos

4.3.1 Procesamiento para el Tratamiento Digital de los Fotogramas

Como se describe en la descripción teórica, las coordenadas de la superficie se extraen de la proyección láser en el sensor de la cámara. El primer factor que hay que tener en cuenta es que el espejo de barrido rotativo debe girar a una velocidad considerablemente mayor que la velocidad de captura de la cámara. En nuestro caso, la rotación del láser escanea la superficie a 100 rpm (revoluciones por minuto), mientras que el sensor de la cámara captura imágenes a una velocidad de 15 fps (fotogramas por segundo). Con estos valores podemos concluir que la cámara capturará una línea efectiva proyectada en el sensor. Otro factor para tener en cuenta es que el sensor CMOS de la cámara proporciona una representación en una escala multinivel rojo-verde-azul (RGB por sus siglas en inglés, red-green-blue). Por lo tanto, debe seleccionarse un canal para recuperar la información de intensidad. El canal más sensible para captar la emisión láser de 532 nm es el verde. Sin embargo, este canal se satura fácilmente, por lo que hemos seleccionado el canal rojo que definió una línea no saturada que muestra valores de intensidad multinivel.

La figura 10, muestra fotogramas reales capturados en el canal rojo a través de un vídeo grabado a 15 fps. Cada fotograma se ha capturado por separado y luego se ha analizado mediante un script de procesamiento de imágenes desarrollado en MATLAB para recuperar las coordenadas de la línea láser. El escenario más sencillo requiere la extracción de las coordenadas de los píxeles aplicando una binarización mediante un umbral de intensidad. Sin embargo, este método no es preciso, ya que descarta valores relevantes y crea múltiples puntos agregados en regiones reducidas. Para evitar este problema, se ha desarrollado un algoritmo personalizado basado en la técnica de procesamiento de imágenes "skeleton". Este proceso consta en general de cuatro etapas. En la primera etapa, uno de los canales de la línea proyectada se codifica en una matriz pixelada en escala de grises. A continuación, se aplica el proceso de skeleton, que convierte la imagen en escala de grises en una imagen de profundidad de 1 bit. A diferencia de la binarización por umbral, aquí las regiones aglomeradas se reducen a líneas de un píxel de ancho. Aunque se forman varias islas, sólo se tiene en cuenta la más grande para el proceso siguiente. En la tercera etapa, se detecta un centro ajustando un círculo en los píxeles blancos. A continuación, se recuperan y almacenan los índices de los píxeles blancos. En la siguiente etapa se recupera la distancia y el ángulo formado entre los puntos indexados y el centro, se almacena en una base de datos. Esta distancia se transforma de unidades de píxel a unidades físicas considerando el tamaño del píxel ($7,6 \mu\text{m}$). Por último, la intensidad de la reflectancia en los píxeles blancos, también se almacena en la base de datos. Esta reflectancia proporciona información valiosa sobre la textura en la superficie de la tubería.

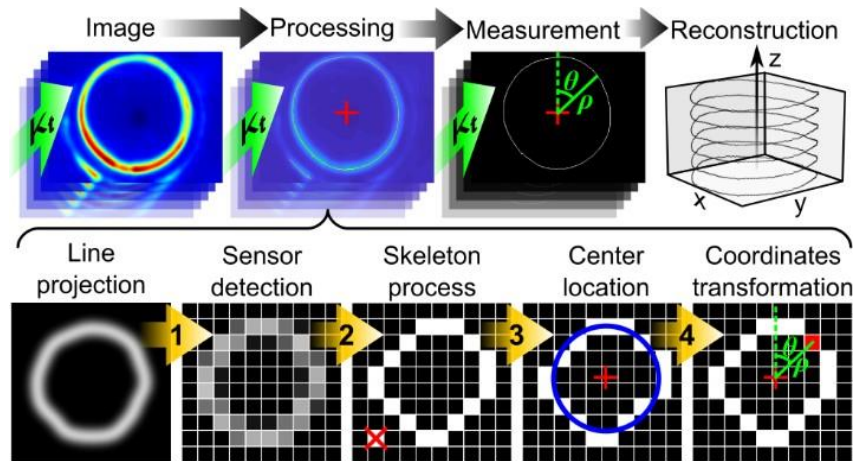


Figura 10. Análisis de datos. Se recuperan múltiples fotogramas de un vídeo para obtener las coordenadas mediante un algoritmo de procesamiento de imágenes (arriba). El procesamiento de la imagen (abajo) consiste en la pixelación de la línea proyectada, la binarización del esqueleto del haz, la localización del centro y la transformación de las coordenadas. Nota: De “Free-form laser profilometry for pipeline inspection and three-dimensional cylindrical reconstructions”, por M.

Mario Montoya, Y. Montelongo et al, 2022, *IEEE Sens. J* [28]. IEEE Copyright line © 2022

Para este trabajo, las nubes de puntos se han almacenado en coordenadas euclidianas, pero también en coordenadas cilíndricas. Disponer de ambos tipos de coordenadas facilita el análisis y la inspección de las tuberías. Aunque la acumulación de puntos describe mediciones reales, es necesario reconstruir una malla creando polígonos entre puntos vecinos. Para reconstruir la malla hemos utilizado un método de pivote de bola y un método de Poisson mediante el software MeshLab.

4.4 Demostración Experimental

Se prepararon dos pruebas de tuberías para evaluar el rendimiento del dispositivo de escaneo. En la primera prueba, se utilizó una tubería comercial de cloruro de polivinilo (PVC)

de 25,4 cm para evaluar la capacidad de reconstruir superficies cilíndricas con roturas y grandes distorsiones. Para ello, la tubería se distorsionó artificialmente con la aplicación de calor, y se añadieron dos agujeros de aproximadamente 1 cm para simular fugas. Se escaneó una sección de 1,60 metros a una velocidad de 4,3 cm/s alcanzando un número total de fotogramas de 558 y un número total de puntos de 492,387. Este número de puntos se reduce a 20,000 mediante un algoritmo heurístico para facilitar la formación de la malla (véase la figura 11A). El siguiente paso es la reconstrucción de Poisson, que une los puntos vecinos para construir la malla poligonal (véase la figura 11B). Por último, la malla reconstruida se colorea mediante un proceso de análisis de curvatura para detectar las zonas de tensión y las roturas. La figura 11C, muestra una perspectiva de la tubería y un zoom en un punto de rotura. En la figura 11D, se muestran las cuatro caras del modelo reconstruido. Las zonas rojas son regiones de tensión con una curvatura hacia adentro, mientras que la región azul representa una curvatura hacia afuera. A través de este método de coloración es posible realizar un mantenimiento preventivo para evitar cualquier fatiga que eventualmente pueda conducir a una rotura en la tubería. Si la fuga ya está presente, el punto de rotura aparecerá como un punto rojo en el modelo tridimensional.

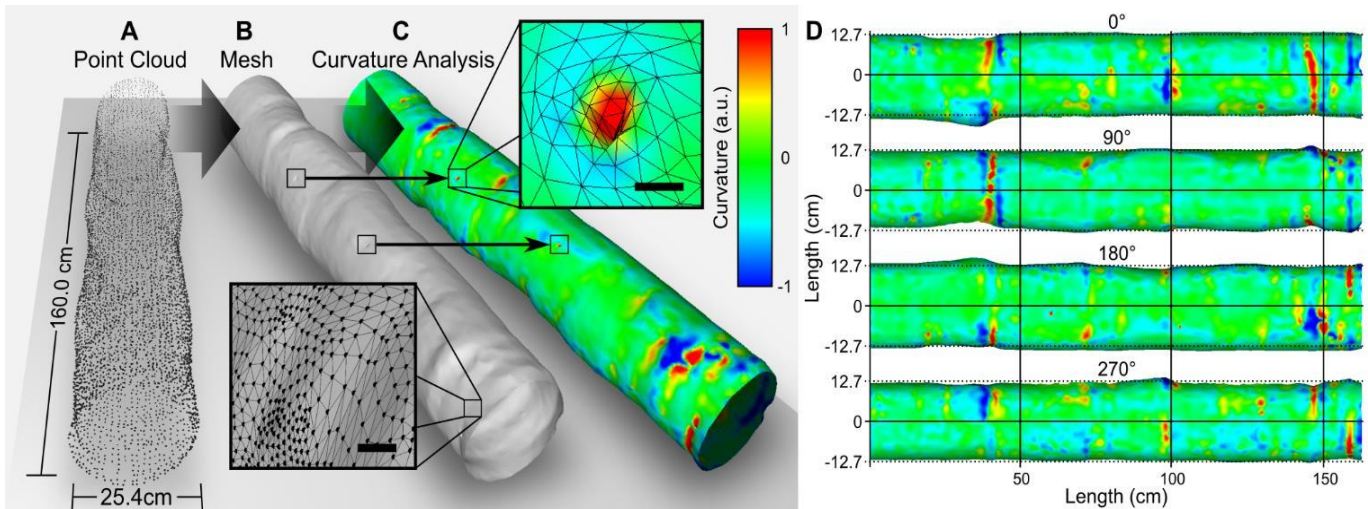


Figura 11. Reconstrucción de la malla. **A** Nube de puntos recuperada a partir de las coordenadas escaneadas en el oleoducto. **B** Se reconstruye una malla con el método de Poisson (un zoom en la superficie muestra la reconstrucción de los polígonos) (barra de escala 1 cm). **C** La malla se colorea según la curvatura (un zoom en la superficie muestra un punto de frenado) (barra de escala 1 cm). **D** Cuatro proyecciones en diferentes ángulos muestran las regiones de tensión con colores rojo y azul. Nota: De “Free-form laser profilometry for pipeline inspection and three-dimensional cylindrical reconstructions”, por M. Mario Montoya, Y. Montelongo et al, 2022, IEEE Sens. J [28].

IEEE Copyright line © 2022

La segunda demostración experimental consiste en una tubería realista de PVC de 25,4 cm en la que las zonas de tensión no son abruptas y la tubería no tiene fugas. Hemos hecho circular agua sucia con residuos de suciedad para detectar las capacidades del análisis de reflectancia. La figura 12A, muestra dos secciones de 23 cm de longitud que han sido coloreadas según la reflectancia obtenida del sensor CMOS. El número total de puntos se redujo a 20,000 en cada muestra. En la zona inferior de la tubería, se puede observar en rojo un aumento de la reflectancia. El aumento de la intensidad corresponde a una textura rugosa producida por el revestimiento residual que deja el agua tras el secado. Para facilitar

la inspección, se han utilizado las coordenadas cilíndricas para desplegar la tubería. Las dos secciones de la tubería de la figura 12A, muestran una línea discontinua en la que el cilindro está abierto para su despliegue. La figura 12B, muestra las dos secciones desplegadas con mayor reflectancia cerca de la zona de ángulo cero. El mallado en la nube de puntos desplegada se reconstruyó con un método de pivote de bola. Los datos de reflectancia proporcionan una alta resolución sobre la textura de la superficie, incluyendo algunas características de fabricación como las líneas onduladas que no son visibles a simple vista. Por último, se ha coloreado según la profundidad de la superficie desplegada (véase la figura 12C). A diferencia de la coloración de la curvatura, esto proporciona información del desplazamiento absoluto en lugar del gradiente. Se puede observar que la información de la textura no está necesariamente relacionada con la distorsión del perfil cilíndrico. La coloración de desplazamiento muestra características en el régimen milimétrico, mientras que la coloración de reflectancia muestra texturas producidas por características en el régimen micrométrico.

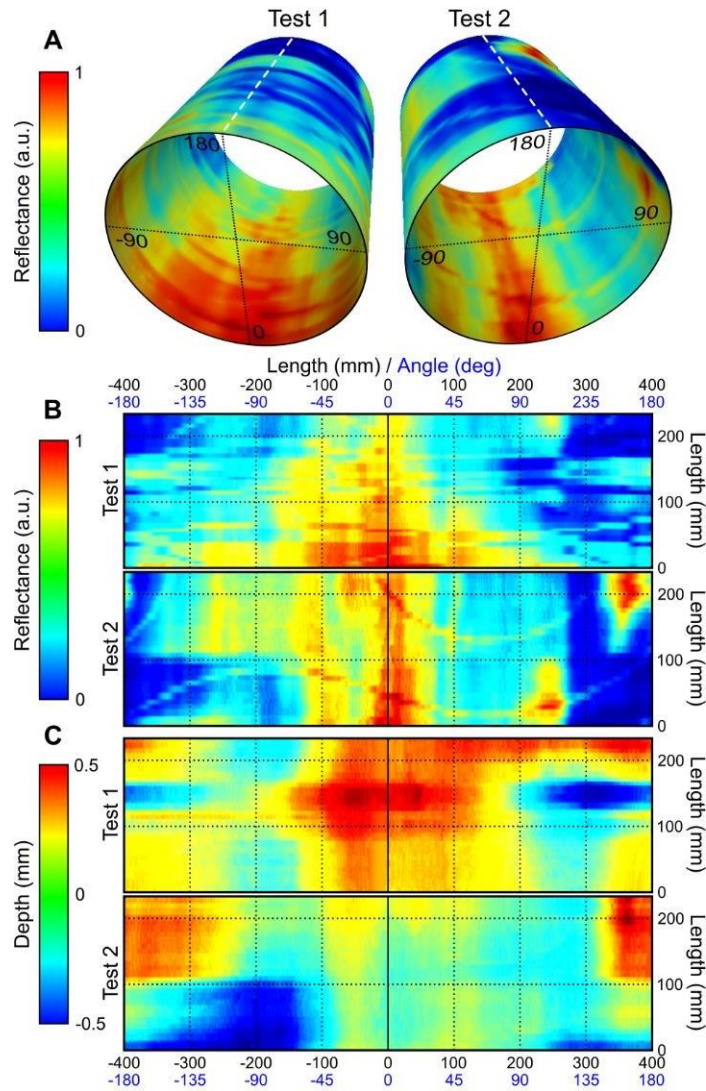


Figura 12. Inspección de alta resolución. **A** Dos secciones de tuberías con solado residual en la parte inferior, coloreadas según la reflectancia. Una línea discontinua en la muestra la apertura para desplegar la superficie. **B** Dos secciones desplegadas coloreadas según la reflectancia. El solado residual se muestra cerca del ángulo cero. **C** Las superficies desplegadas están coloreadas según la profundidad. Nota. De “Free-form laser profilometry for pipeline inspection and three-dimensional cylindrical reconstructions”, por M. Mario Montoya, Y. Montelongo et al, 2022, IEEE

Sens. J [28]. IEEE Copyright line © 2022

Capítulo V: Conclusiones y Trabajo a Futuro

Se desarrolló un dispositivo óptico alojado en una cápsula para la exploración láser de tuberías. Este dispositivo contiene un láser, un espejo de exploración, un espejo cónico, una cámara y brazos ajustables. Los datos generados por el sistema de escaneo láser se han utilizado para producir nubes de puntos tridimensionales. Además, las nubes de puntos se utilizaron para la reconstrucción de mallas. Las mallas resultantes se han coloreado mediante un proceso de análisis de curvatura para detectar las zonas de tensión y roturas. También se utilizó un proceso de coloración basado en la reflectancia y el relieve para detectar texturas de alta resolución en la superficie. El dispositivo de escaneo ha demostrado proporcionar una inspección fiable, de alta resolución y alta precisión en las tuberías. Este método ha mostrado resultados prometedores para la gestión preventiva de las infraestructuras de tuberías.

En cuanto a trabajo a futuro se han propuesto mejoras en la cápsula, de esta manera se estaría optimizando el sistema móvil, y a su vez mejorando la capacidad de uso en diferentes medios. Con ello llegar a poder realizar inspecciones sin la necesidad de drenar la tubería siempre y cuando no se interactúe con fluidos inflamables. Debido a las consecuencias que puede generarse por un mal uso de este dispositivo. Siendo el caso de trabajar con sustancias inflamables se sustituirían los elementos electrónicos por un sistema de múltiples fibras ópticas y así prevenir cualquier tipo de descarga eléctrica. Estas mejoras consisten en sustituir el diodo láser por fibra óptica para la propagación del haz, cambiar el motor DC encargado de girar el espejo plano por un elemento difractivo capaz

de generar un holograma cónico y con la capacidad de mantener la propagación de la misma manera que la franja circular. Por último, hacer un cambio en la cámara por un sistema endoscópico de fibras ópticas.

Referencias

- [1] H. Najjaran, R. Sadiq, and B. Rajani, "Fuzzy expert system to assess corrosion of cast/ductile iron pipes from backfill properties," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 67–77, 2006, doi: 10.1111/j.1467-8667.2005.00417.
- [2] H. Sahli and N. El-Sheimy, "A novel method to enhance pipeline trajectory determination using pipeline junctions," *Sensors*, vol. 16, no. 4, pp. 567–584, 2016, doi: 10.3390/s16040567.
- [3] J. Okamoto, J. C. Adamowski, M. S. G. Tsuzuki, F. Buiochi, and C. S. Camerini, "Autonomous system for oil pipelines inspection," *Mechatronics*, vol. 9, no. 7, pp. 731–743, 1999, doi: 10.1016/s0957-4158(99)00031-8.
- [4] O. Calvo, A. Sousa, A. Rozenfeld and G. Acosta, "Smooth path planning for autonomous pipeline inspections," *2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, 2009, pp. 1-9, doi: 10.1109/SSD.2009.4956800.
- [5] S. Siqueira, N. Gatts, R. R. Da Silva, and A. Rebello, "The use of ultrasonic guided waves and wavelets analysis in pipe inspection," *Ultrasonics*, vol. 41, no. 10, pp. 785–797, 2004, doi: 10.1016/j.ultras.2004.02.013.
- [6] H. Cho, S. Ogawa, and M. Takemoto, "Non-contact laser ultrasonics for detecting subsurface lateral defects," *NDT E Int.*, vol. 29, no. 5 SPEC , pp. 301–306, 1996, doi: 10.1016/s0963-8695(96)00033-3.
- [7] M. Ho, S. El-Borgi, D. Patil, and G. Song, "Inspection and monitoring systems subsea

pipelines: A review paper,” *Struct. Heal. Monit.*, vol. 19, no. 2, pp. 606–645, 2020, doi: 10.1177/1475921719837718.

[8] Y. Zhang and G. Yan, “In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 42, no. 12, pp. 1618–1631, 2007, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.12.004.

[9] G. Roh and H. R. Choi, “Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–17, 2005, doi: 10.1109/TRO.2004.838000.

[10] T. Wu, S. Lu, and Y. Tang, “An in-pipe internal defects inspection system based on the active stereo omnidirectional vision sensor,” 2015 12th Int. Conf. Fuzzy Syst. Knowl. Discov. FSKD 2015, pp. 2637–2641, 2016, doi: 10.1109/FSKD.2015.7382373.

[11] D. Krys and H. Najjaran, “Development of visual simultaneous localization and mapping (VSLAM) for a pipe inspection robot,” *Proc. 2007 IEEE Int. Symp. Comput. Intell. Robot. Autom. CIRA*, pp. 344–349, doi: 10.1109/CIRA.2007.382850.

[12] H. R. Choi and S. M. Ryew, “Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines,” *Mechatronics*, vol. 12, no. 5, pp. 713–736, 2002, doi: 10.1016/S0957-4158(01)00022-8.

[13] C. Piciarelli, D. Avola, D. Pannone, and G. L. Foresti, “A Vision-Based System for Internal Pipeline Inspection,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 6, pp. 3289–3299, 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873237.

[14] F. Al-Masri, M. F. Abdel-Hafez, and M. A. Jaradat, “Inertial Navigation System of

Pipeline Inspection Gauge,” IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 28, no. 2, pp. 609–616, 2020, doi: 10.1109/TCST.2018.2879628.

[15] P. Hansen, H. Alismail, P. Rander, and B. Browning, “Visual mapping for natural gas pipe inspection,” Int. J. Rob. Res., vol. 34, no. 4–5, pp. 532–538, 2015, doi: 10.1177/0278364914550133.

[16] P. Huynh, R. Ross, A. Martchenko, and J. Devlin, “Anomaly inspection in sewer pipes using stereo vision,” IEEE Int. Conf. Signal Image Process. Appl. ICSIPA 2015 - Proc., pp. 60–64, 2016, doi: 10.1109/ICSIPA.2015.7412164.

[17] B. H. Zhuang, “Noncontact laser sensor for pipe inner wall inspection,” Opt. Eng., vol. 37, no. 5, p. 1643-1647, 1998, doi: 10.1117/1.601677.

[18] T. Yoshizawa, (2008) “Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications”, CRC Press, Cap. 19, pp. 441.

[19] C. Zuo, S. Feng, L. Huang, T. Tao, W. Yin, and Q. Chen, “Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review,” Opt. Lasers Eng., vol. 109, no. 200, pp. 23–59, 2018, doi: 10.1016/j.optlaseng.2018.04.019.

[20] S. Van der Jeught and J. Dirckx, “Real-time structured light profilometry: A review,” Opt. Lasers Eng., vol. 87, no. 2016, pp. 18–31, 2015, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.01.011.

[21] D. Malacara, (2015). “Óptica Básica”, Fondo de Cultura Economica, USA, 3ra Ed. Cap. 1. pp. 30-37.

[22] E. Hecht, (2016). “Óptica”, Pearson, Madrid, España, 5ta Ed. Cap. 4. pp. 96-125.

- [23] Z. Khoshhesab, (2012). Reflectance IR Spectroscopy. In (Ed.), Infrared Spectroscopy Materials Science, Engineering and Technology. IntechOpen. Cap. 11. Pp. 233 -246.
- [24] M. Bahl, 2019, 'Structured Light Fields in Optical Fibers', in P. Steglich, F. De Matteis (eds.), Fiber Optics - From Fundamentals to Industrial Applications, IntechOpen, London. Cap. 3. Pp 1-14.
- [25] Z. Song, (2013) "Handbook of 3D Machine Vision", CRC Press, Cap. 9, pp 236 – 245.}
- [26] Yolanda Yanet López Domínguez, Topometría y asociación de color real de los objetos, Tesis de Maestría, Agosto de 2010, Centro de Investigaciones en Óptica, León, Gto. México.
- [27] M. Padilla, M. Servin and G. Garnica, (2017). Profilometry with digital fringe-projection at the spatial and temporal Nyquist frequencies. Opt. Express, 25 19, 22292-22302 .
- [28] M. Montoya, Y. Montelongo, N. Jiang, S. Morris & J. Parra-Michel (2022). "Free-form laser profilometry for pipeline inspection and three-dimensional cylindrical reconstructions", IEEE Sens. J, vol. 22, pp. 297-303.

