

Reconstrucción tridimensional de deformaciones mecánicas superficiales en platinas, basada en la proyección de franjas

Three-dimensional reconstruction of superficial mechanical deformations in metallic plates, based on fringes projection

Diana Margarita Quintero Oliveros^{1}, Rodolfo Villamizar Mejía² y Edward Yesith Mendoza¹*

¹Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander. Carrera 27 Calle 9 Bucaramanga, Colombia.

²Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones - Grupo de investigación CEMOS, Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 Calle 9 Bucaramanga, Colombia.

(Recibido el 26 de mayo de 2010. Aceptado el 13 de abril de 2011)

Resumen

En este artículo se presenta una metodología para la reconstrucción tridimensional de la superficie de platinas metálicas deformadas, a partir de técnicas no destructivas. Específicamente se utilizó el método óptico de proyección de franjas y el algoritmo de corrimiento de fase para reconstruir tridimensionalmente las superficies con deformaciones, de diferente color y textura. A partir de esta reconstrucción, y mediante tratamiento de imágenes, se realizó el dimensionamiento de la máxima profundidad, longitud y área de los mismos. Los resultados se compararon con las medidas obtenidas con elementos manuales. Con el modelo implementado se alcanzó una resolución de 14 μm (micrómetros) para un área de observación de 12x10 cm^2 , lo que hace pertinente su uso en la extracción de parámetros de profundidad, diámetro y área de defectos presentes por ejemplo en tubería de transporte de fluidos, para lo cual se podrían calcular adecuadamente parámetros asociados a su integridad usando una prueba no destructiva (END).

----- *Palabras clave:* Reconstrucción tridimensional, proyección de franjas, corrimiento de fase, ensayo no destructivo, desenvolvimiento de fase, fase continua

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 7 + 632 12 49, correo electrónico: electronicadiana@hotmail.com (D.M. Quintero)

Abstract

This paper presents a methodology for three-dimensional reconstruction of deformed metallic surface plates, by using nondestructive techniques. Specifically, the fringe projection optic method and phase shifting algorithm were used for three-dimensional reconstruction of deformed surfaces with different color and texture. Based on this reconstruction and by using image digital processing, maximum depth, length and area of defect were measured. Resultant measurements were compared with those obtained by using manual elements. In the experiment, a resolution of 14 μm was obtained for an observation area of 12x10 cm^2 , which makes this approach appropriated for computing depth, diameter and area of defects present for example in oil pipes, and integrity parameters could be adequately computed by using a Nondestructive Testing (NDT).

----- **Keywords:** Three-dimensional reconstruction, fringe projection, phase shifting, nondestructive testing, phase unwrapping, continuous phase

Introducción

Cuantificar adecuadamente defectos superficiales tales como corrosión en tuberías usadas para el transporte de hidrocarburos, se constituye en un factor fundamental al momento de tomar determinaciones de continuidad de operación de dicha tubería, dado que en esta industria, una estimación inadecuada de la integridad de la misma puede provocar su ruptura o una parada operacional, lo que conlleva a elevadas pérdidas, económicas, sociales y ambientales. La corrosión es una de las causas más comunes de generación de deformaciones [1], y por tanto es indispensable disponer de herramientas de monitoreo no destructivas, económicas y fáciles de operar en campo, que permitan cuantificar adecuadamente dicha variación superficial, para emitir un concepto de cómo operar de forma segura una tubería.

Existen herramientas automáticas e instrumentadas (por ejemplo, *intelligent pigs* [2]) que permiten localizar áreas de corrosión y estimar de manera aproximada el área corroída; sin embargo para el equipo encargado de la integridad de la tubería se requiere la mayor información posible de la misma (profundidad, área, volumen) en los puntos con deformaciones

superficiales continuas, consideradas críticas, para tomar decisiones de continuidad o parada.

Actualmente el dimensionamiento en campo de dicho tipo de defectos se realiza con elementos de medida manuales, tales como relojes comparadores [3] y rugosímetros [4] en puntos discretos de la deformación, lo que genera altos tiempos de ejecución, mayor esfuerzo humano, subjetividad en la medida y datos manuales de puntos específicos, haciendo evidente la necesidad de obtener un método rápido, confiable, de fácil uso, no destructivo y con capacidad de almacenamiento de información de toda el área observada, para realizar este dimensionamiento.

La reconstrucción tridimensional satisface la necesidad mencionada, puesto que proporciona información simultánea de alturas para todos los puntos de la superficie de un volumen observado, además de que se puede lograr utilizando técnicas no destructivas como lo son los métodos ópticos [1, 5, 6] y entre ellos la técnica de proyección de franjas, la cual es la base de la metodología propuesta. Este artículo presenta los resultados obtenidos al aplicar el método óptico de proyección de franjas, bajo condiciones controladas a nivel de laboratorio, en la reconstrucción tridimensional y dimensionamiento de defectos superficiales

continuos en platinas metálicas y su comparación con medidas obtenidas con elementos manuales.

Método de proyección de franjas

El método de reconstrucción por proyección de franjas consta de un sistema de proyección, un sistema de observación y un plano de referencia, donde se focaliza el sistema de observación, ubicado en la coordenada $Z_0=0$ del sistema coordinado (X_0, Y_0, Z_0) como se observa en la figura 1 en la cual se presenta el modelo comúnmente utilizado [1]. Cuando se proyectan franjas sobre el plano de referencia, las franjas se ven paralelas entre sí.

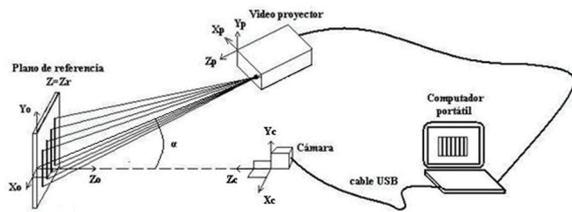


Figura 1 Sistema de reconstrucción tridimensional por proyección de franjas

Codificación de la altura

En un sistema de proyección de franjas ideal, la función de intensidad captada por la cámara, tiene un perfil sinusoidal [5] y su fase codifica la deformación de las franjas proyectadas sobre cualquier objeto teniendo en cuenta la no telecentricidad [7] del sistema óptico, el ángulo α entre los ejes de proyección y observación [1, 6, 8, 9] y la influencia de las aberraciones geométricas [10].

Al ubicar el objeto a reconstruir, sobre el plano de referencia con una fase inicial ϕ_0 , las franjas sufren una deformación en dirección del eje X_0 , que se ve reflejado en un cambio en la fase de la función de intensidad captada. Por lo tanto, cada cambio en la altura del punto (x_0, y_0) del objeto observado, se manifiesta como un cambio $\Delta\phi(x_0, y_0)$ en su fase $\phi(x_0, y_0)$, y si se logra extraer esta fase, se puede recuperar su altura [11].

Cálculo de fase

La fase de un sistema de franjas, se puede obtener por diversos métodos utilizando imágenes de intensidad de las franjas proyectadas; entre ellos se encuentran el método de la transformada de Fourier [5, 12] y el método de corrimiento de fase [1, 6].

En este trabajo se optó por el método de corrimiento de fase puesto que permite obtener la fase de cada punto sin que los puntos vecinos influyan en el cálculo de la misma [10]. De esta manera, se desarrolló un algoritmo donde se toman 4 imágenes de intensidad I_i como se muestra en la figura 2 con cambios sucesivos ϕ_i en la fase, dados por la ecuación 1, donde $N=4$.

$$\phi_i = \left(\frac{2\pi}{N} \right) (i-1) \quad i=1,2,3,\dots,N \quad (1)$$

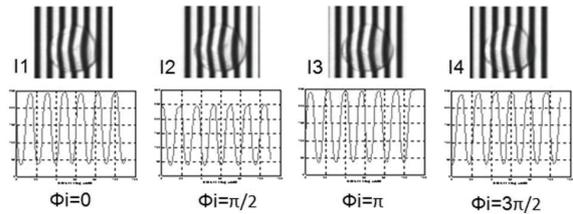


Figura 2 Imágenes de intensidad con cambios sucesivos en fase dados por la ecuación 1 y su respectivo perfil trazado sobre una fila sin defecto

Debido a que los corrimientos de fase se hicieron hacia la derecha, la fase se puede obtener de la ecuación 2 [9].

$$\tan \phi = \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \quad (2)$$

Experimentación

Esta investigación fue realizada a nivel de laboratorio, y el montaje utilizado para su desarrollo se puede observar en la figura 3, cuya configuración, sigue el modelo descrito en la figura 1.



Figura 3 Modelo experimental implementado

Como se observa en la figura 3, las franjas se proyectan hacia un plano de referencia articulado sobre un sistema de desplazamiento micrométrico, utilizando un video proyector convencional de luz blanca [5] con tecnología DLP [13]. El sistema de observación está conformado por una cámara uEye EO 1312C v3,2 de IDS (Imaging Development Systems) de tecnología CMOS, con resolución de 1280x1024 pixeles y un lente de 16mm de longitud focal, conectada vía USB2,0 a un computador portátil con sistema operativo Windows vista de 32 bits. Este montaje permite realizar automáticamente mediante algoritmos desarrollados en Matlab [14 - 16], la proyección de franjas con sus respectivos corrimientos en fase y la captura de imágenes de las mismas.

Con el fin de obtener un campo de observación de aproximadamente 12x10 cm², las distancias entre los elementos del modelo de la figura 3 son: 61 cm entre el lente del proyector y el plano de referencia, 32,5 cm entre el lente de la cámara y el plano de referencia. El ángulo α entre el eje de proyección y el eje óptico es de 31,6°.

Ajuste del modelo

Para la reconstrucción tridimensional de objetos con este modelo, se realizó una calibración de alturas respecto al plano de referencia en el espacio de trabajo, obteniéndose su relación con el cambio de fase respecto al mismo. Posteriormente se ubicó el objeto a reconstruir, dentro de este campo calibrado, para hallar su

fase y por medio de la diferencia entre la fase del objeto y del plano de referencia se obtuvo la reconstrucción en 3D del mismo.

Calibración del modelo

Esta etapa de calibración, permite obtener una ecuación experimental de conversión de fase en altura que tiene en cuenta todos los parámetros intrínsecos del modelo.

Para realizar esta calibración se desplazó un plano ubicado inicialmente en las coordenadas del plano de referencia ($Z_0=0$), en dirección positiva y negativa del eje Z_0 (de -2 cm a 2 cm) a intervalos de 500 μ m y para cada desplazamiento se obtuvo su fase utilizando el método de corrimiento de fase mencionado anteriormente. Así mismo se aplicó el algoritmo clásico [9] de desenvolvimiento de fase “unwrapping” [17] desarrollado con base en la función unwrap de Matlab, para eliminar discontinuidades debidas al uso de la función tangente inversa [18].

Coefficientes de calibración

Posteriormente, se halló el cambio de fase de cada plano respecto a la del plano de referencia obteniendo superficies parabólicas.

Puesto que solo se buscó diferencias de fase para desplazamientos discretos (500 μ m), es necesario obtener una función por medio de interpolación para poder reconstruir toda la superficie del objeto. Se ajustó entonces a los datos de $\Delta\phi$ obtenidos en la calibración para un punto del plano, mediante el método de mínimos cuadrados, un polinomio cuadrático [8] que relaciona el cambio de fase con la altura y que está definido en la ecuación 3.

$$\begin{aligned} \Delta\phi(x_o, y_o) &= \phi(x_o, y_o) - \phi_o(x_o, y_o) \\ &= a(x_o, y_o)Z^2 + b(x_o, y_o)Z + c(x_o, y_o) \end{aligned} \quad (3)$$

A partir de la ecuación 3 se calculan las matrices de coeficientes a, b, c [9], con las cuales si se obtiene $\Delta\phi$ para un objeto, se puede obtener su altura correspondiente Z.

Eliminación de ruido

El ruido en el sistema principalmente se debe al patrón de franjas proyectado. El procedimiento descrito para extraer la fase utiliza un patrón de franjas de perfil sinusoidal, pero el perfil del patrón de franjas proyectado presenta un perfil de onda cuadrada [9] debido a que se creó un algoritmo que proyecta franjas negras y blancas de dos pixeles de grosor.

Puesto que una onda sinusoidal solo tiene componentes en la frecuencia fundamental, se aplicó sobre la imagen de intensidad de las franjas, un filtro en frecuencia que deja pasar solamente el primer armónico de su transformada de Fourier eliminando los armónicos mayores, logrando obtener una función de intensidad más sinusoidal.

Factor de relación entre pixel y longitud

Puesto que en la reconstrucción obtenida de dimensiones (X, Y, Z), la dimensión Z está en micrómetros y las dimensiones X y Y en pixeles, es necesario obtener un factor de conversión de pixeles a unidades en el sistema coordenado del objeto. Debido a que las aberraciones de

la cámara son mínimas, no se hace necesaria una calibración para obtener sus parámetros intrínsecos y los factores de corrección [16], y por lo tanto puede obtenerse un factor lineal de conversión de unidades dentro del campo de observación [9,18]. En este caso se obtuvo un factor de 20/213 mm/pixel; de esta manera se pueden obtener medidas de los ejes X y Y en milímetros.

Resultados y discusión

El método descrito se adaptó para reconstruir platinas metálicas de diferentes colores y texturas, y el procedimiento se llevó a cabo como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 4.

Una vez obtenida la fase continua del objeto como se desarrolla en la figura 4, se puede obtener la diferencia de fase entre el objeto y el plano de referencia. Conociendo esta cantidad $\Delta\phi$ y los coeficiente a, b, c para cada punto del plano obtenidos en la calibración, se aplica la ecuación 3 para obtener la altura de cada punto del cuerpo y por lo tanto su reconstrucción tridimensional.



Figura 4 Procedimiento de reconstrucción tridimensional

Resolución de la metodología implementada

Con el fin de conocer la resolución del modelo, se realizó inicialmente la reconstrucción del plano utilizado en el proceso de calibración, ubicado en la coordenada $Z_0=0$. En la figura 5 se muestra la reconstrucción de este plano y un detalle de la misma.

La desviación de esta reconstrucción respecto a un plano ideal, se debe al ruido del sistema que no

fue eliminado en el filtrado y a la no uniformidad de su cubierta, debido a que el plano utilizado es un vidrio cubierto con pintura de color blanco mate aplicada en aerosol manualmente.

Como se observa en la tabla 1, al realizar el mismo procedimiento para diferentes ubicaciones del plano, se encuentra que la amplitud máxima del ruido así como su desviación estándar no varía significativamente.

En la bibliografía se pueden encontrar resoluciones mayores en aplicaciones diferentes del montaje

experimental como se observa en la tabla 2. El montaje 1 [9] es similar al implementado en esta investigación y en el montaje 2 [1] la proyección

fue realizada con una rejilla de difracción que permite mayor resolución pero un área de trabajo menor.

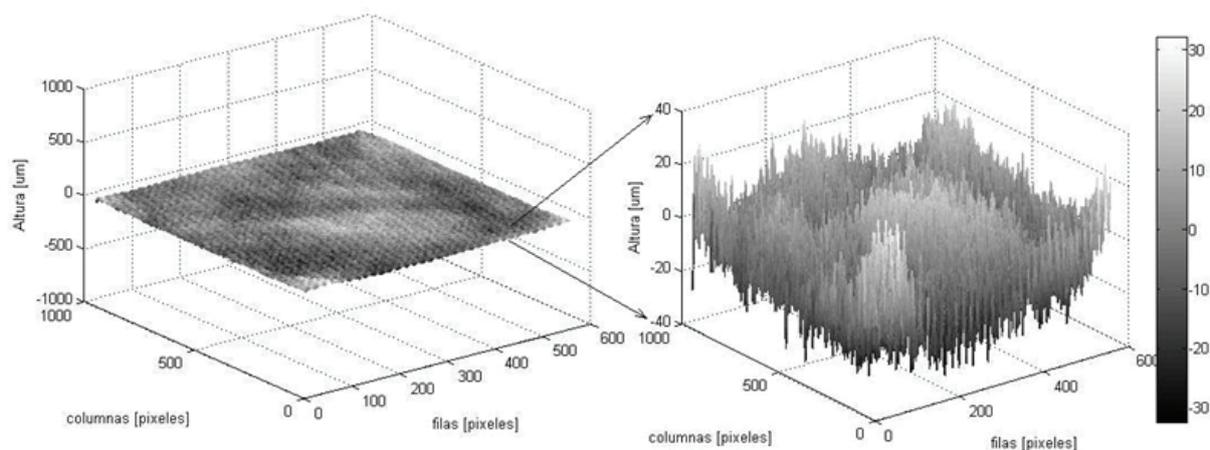


Figura 5 Reconstrucción tridimensional del plano utilizado en el proceso de calibración, ubicado en $Z_0=0$ y un detalle de la misma

Tabla 1 Ruido en el modelo implementado

<i>Desplazamiento [µm]</i>	<i>Desplazamiento medio obtenido [µm]</i>	<i>Desviación estándar del ruido [µm]</i>
-500	-496,26	6,03
500	528,72	6,61
5.000	5.009,60	6,65
10.000	10.000,30	6,75
20.000	20.015,00	6,71

Tabla 2 Comparación con otros montajes implementados basados en proyección de franjas

<i>Montaje</i>	<i>Autor</i>	<i>Area de Observación</i>	<i>Resolución</i>
1	D.Gómez	12x9 cm ²	20 µm
2	Z. Pérez y L. Romero	4x3 mm ²	10 µm
3	Montaje Implementado	12x10 cm ²	14 µm

Para corroborar la resolución del método, se realizó la reconstrucción de una escalerilla de

papel de grosor aproximado de 100 µm, adherida sobre un plano como se observa en la figura 6.

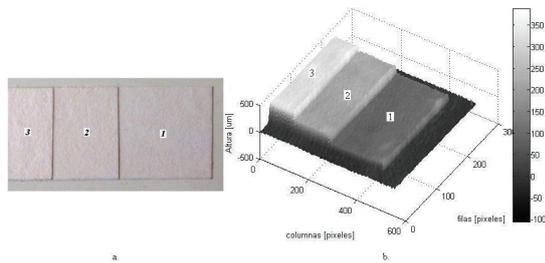


Figura 6 a. Escalerilla de papel. b. Reconstrucción tridimensional de la escalerilla

En la figura 7 se muestra el perfil de la reconstrucción en dirección de las filas, en donde se puede observar la altura de cada nivel, y se confirma la resolución del método.

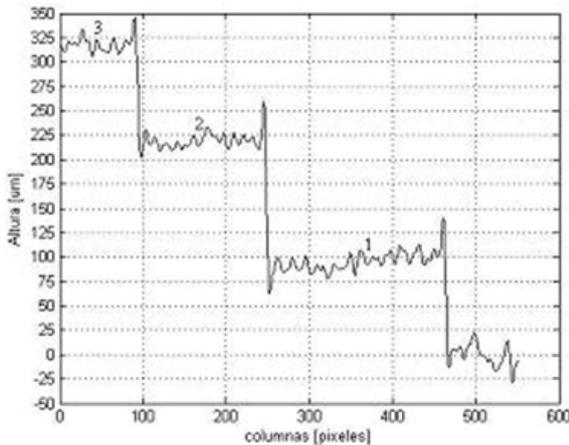


Figura 7 Perfil de la figura 6b en dirección de las filas

Reconstrucción de platinas de diferente color y textura

Se procedió a aplicar la metodología sobre platinas de acero a bajo carbono de referencia A36 y se comparó el dimensionamiento realizado a partir de la reconstrucción tridimensional, con las medidas obtenidas utilizando elementos manuales mecánicos convencionales.

Platina de acero a bajo carbono de referencia A36, con superficie reflectiva

Sobre una platina de acero A36, que inicialmente fue rectificada y a la que posteriormente se le

realizó un proceso de lijado que culminó con el uso de lija 300 para luego realizarle deformaciones mecánicamente como se observa en la figura 8a, se aplicó la metodología propuesta y se obtuvo la reconstrucción de la figura 8b.

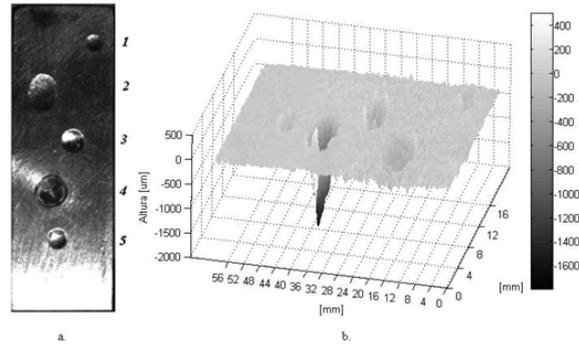


Figura 8 a Platina de Acero A36 con defectos causados mecánicamente. b Reconstrucción obtenida

Algunas superficies metálicas comúnmente tienen una fuerte reflexión que ocurre por la distribución no uniforme de la intensidad de la luz reflejada [19]. Este fenómeno hace que al proyectar franjas sobre el cuerpo, haya zonas en la imagen de intensidad, donde no aparecen franjas, como en el caso de esta platina. Por lo tanto el cálculo de fase en ellas será erróneo, y debido al algoritmo de desenvolvimiento utilizado, este error se propagará al resto de la superficie y la reconstrucción tridimensional del cuerpo será inexacta como la que se observó en la figura 8b donde se aprecian desviaciones de la pieza real. Estos errores de fase se pueden evitar si se obtiene una reflexión relativamente uniforme mediante una preparación de la pieza [11] o la manipulación de la iluminación para acentuar las características deseadas [20].

Platina de acero a bajo carbono de referencia A36, preparada con revelador

Para obtener buena definición en las franjas y asegurar su continuidad, se aplicó previamente sobre la platina de la figura 8a, un revelador con base disolvente marca Magnaflux, comúnmente aplicado en laboratorios de ensayos no destructivos

vos, que deja una fina capa blanca sobre la pieza como se observa en la figura 9.

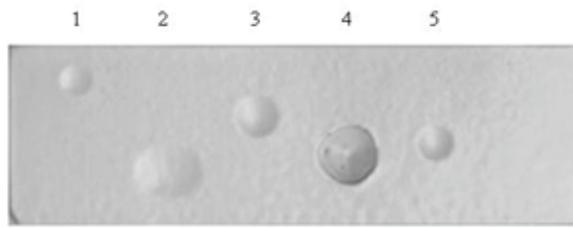


Figura 9 Platina de la figura 8a preparada con revelador

Se realizó así, nuevamente su reconstrucción como se puede apreciar en figura 10 donde se muestran dos perspectivas de la misma.

De la figura 10 se observa que la preparación de la platina, mejoró efectivamente la calidad de la reconstrucción y por lo tanto se procedió a realizar su dimensionamiento y comparar las medidas con las obtenidas con un reloj comparador y un calibrador digital.

Profundidad máxima: Para realizar la medida de profundidad de los defectos, se tomó la zona de la reconstrucción que contiene al defecto y por medio de un algoritmo se detectaron las coordenadas de su profundidad máxima. Para cada uno de los defectos, se extrajo el perfil en dirección de las filas y de las columnas en dichas coordenadas y se obtuvo su valor promedio. Los resultados se muestran en la tabla 3.

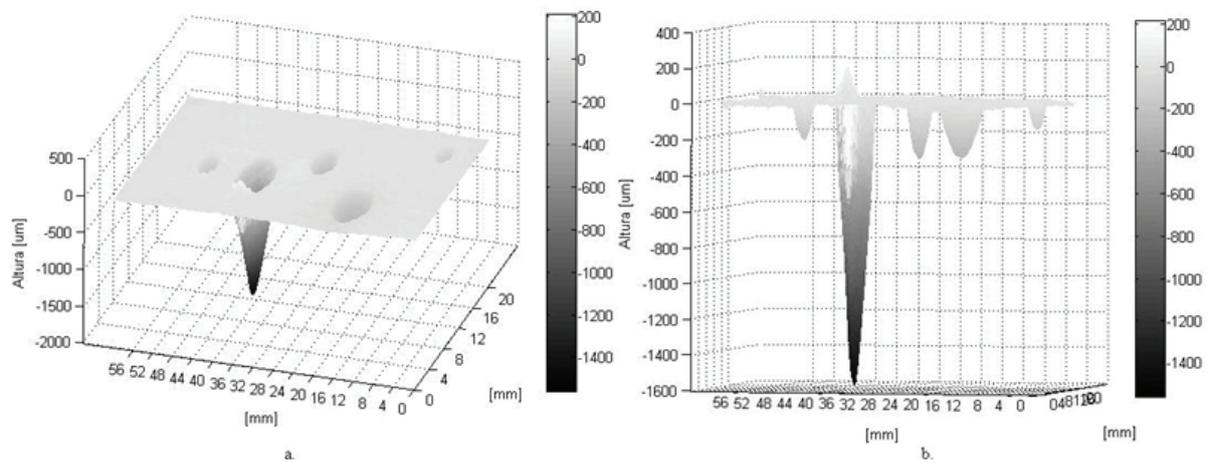


Figura 10 Reconstrucción de la platina de la figura 9. a. Perspectiva 1. b. Perspectiva 2

Se debe tener en cuenta que las medidas manuales se dificultan puesto que las dimensiones están en el orden de los micrómetros.

Diámetro: Puesto que los defectos no tienen una forma completamente circular, se muestra en la tabla 4 un promedio de varias medidas del diámetro de cada defecto, tomados con los elementos manuales; así como el promedio del diámetro en dirección de las filas y de las columnas hallado con la reconstrucción. Estos últimos se obtuvieron mediante la herramienta *imtool* de Matlab, que tiene la capacidad de medir distancias en píxeles directamente sobre

una imagen y modificar su contraste a partir de la manipulación de su histograma.

Cuando se analiza una reconstrucción en forma de imagen, los niveles de altura se ven traducidos a niveles de gris; si la platina tiene depresiones, estas se verán más oscuras que el resto de la superficie. Puesto que estos defectos fueron causados de manera no controlada, sus bordes no están bien definidos y la medida de su diámetro dependerá de un buen ajuste de contraste para cada defecto independientemente de los otros, por lo cual la herramienta mencionada facilita el dimensionamiento de estos diámetros.

Tabla 3 Profundidad promedio máxima de los defectos numerados en la platina de la figura 9

Número de defecto	Dispositivo de medida				%Error
	Calibrador digital [mm] (resolución 0.01mm)	Reconstrucción por proyección de franjas [mm]			
		Perfil en dirección de las filas	Perfil en dirección de las columnas	Promedio	
1	2,80	2,96	3,00	2,98	6,43
2	6,80	5,78	7,23	6,51	4,26
3	4,10	4,55	4,69	4,62	12,68
4	6,50	6,99	6,95	6,97	7,23
5	3,40	3,15	3,38	3,27	3,82

En la tabla 4, las unidades ya han sido convertidas a milímetros multiplicando por el factor 20/213 mm/pixel reportado anteriormente.

En este caso por tratarse de una platina rectificadora, un ajuste general de contraste definió

aproximadamente todos los defectos y por lo tanto no se realizó por zonas, por lo cual algunos de los diámetros hallados resultaron más exactos que otros.

Tabla 4 Diámetro promedio de los defectos numerados en la figura 9

Número de defecto	Dispositivo de Medida				%Error
	Calibrador digital [mm] (resolución 0.01mm)	Reconstrucción por proyección de franjas [mm]			
		Perfil en dirección de las filas	Perfil en dirección de las columnas	Promedio	
1	2,80	2,96	3,00	2,98	6,43
2	6,80	5,78	7,23	6,51	4,26
3	4,10	4,55	4,69	4,62	12,68
4	6,50	6,99	6,95	6,97	7,23
5	3,40	3,15	3,38	3,27	3,82

Área: Para cuantificar las áreas de los defectos a nivel de la superficie de la platina, se desarrolló

un algoritmo en Matlab que permite al usuario elegir un punto directamente sobre la imagen,

del cual se toma su nivel de gris para usarlo como umbral en la binarización dependiendo de las áreas que desea dejar pasar [18]. La imagen obtenida se somete a un proceso de filtrado para definir la forma de los defectos y así se procede a hallar el área en píxeles de cada uno de ellos y ubicarlas automáticamente sobre el respectivo espacio como se observa en la figura 11.

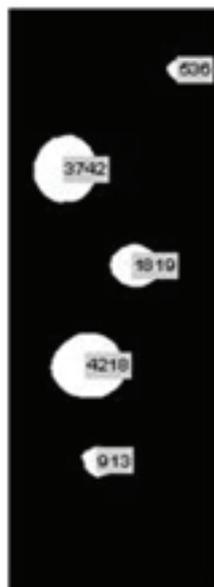


Figura 11 Área en píxeles de cada defecto de la platina de la figura 9

Para obtener el área en milímetros basta con multiplicar el área hallada en píxeles por el área de un píxel en milímetros que en este caso es de $8,8 \times 10^{-3} \text{mm}^2$.

En la tabla 5 se realiza una comparación con las medidas obtenidas con los elementos manuales utilizando los diámetros obtenidos con el calibrador digital y aproximando la forma de los defectos a una circunferencia.

Como se observa hay errores del orden del 20% y esto se debe en primera medida a la forma como se obtuvo el área teórica así como al umbral seleccionado en el algoritmo desarrollado, el cual no define de igual forma todos los defectos.

Conclusiones

La metodología implementada permitió la reconstrucción tridimensional de defectos superficiales en platinas metálicas y su efectividad está en función del contraste mostrado por las franjas, así como de la obtención de un perfil sinusoidal de las mismas.

Puesto que el método está desarrollado para imágenes de intensidad de franjas de perfil sinusoidal, es indispensable en el caso del uso de un proyector convencional, un filtrado de las imágenes del objeto a reconstruir, para eliminar armónicos de frecuencias mayores a la fundamental.

Tabla 5 Área de los defectos numerados en la figura 9

Número de defecto	Dispositivo de medida		
	Área teórica $\pi r^2 [\text{mm}^2]$ (hallada con el radio promedio)	Reconstrucción por proyección de franjas (algoritmo para hallar áreas) [mm^2]	%Error
1	6,16	4,73	23,21
2	36,30	32,99	9,12
3	13,20	16,00	21,21
4	33,20	37,18	11,99
5	9,08	8,00	11,89

Con el método de reconstrucción implementado en esta investigación, se obtuvo bajo condiciones controladas y a nivel de laboratorio, una resolución de aproximadamente 14 μm , lo que hace pertinente su uso en la extracción de parámetros para la evaluación de integridad de tuberías de grosor de pared mayores a 14 mm [21].

Debe tenerse en cuenta que el proceso de reconstrucción, está sujeto a una calibración precedente. El hecho de modificar las condiciones del montaje, implica la necesidad de una nueva calibración del espacio de trabajo.

Los errores reportados en los resultados se presentan debido al ruido residual del sistema que no fue eliminado con el filtrado, además de la incertidumbre en la medida de comparación realizada manualmente, ya que esta se encuentra en el orden de los micrómetros.

Para obtener mayor precisión en la medida del diámetro y área de cada defecto, se sugiere ajustar de forma individual el contraste de la zona que lo contiene.

La metodología implementada no permite medir la rugosidad de las platinas debido a que estas se encuentran en el orden de las decenas de micrómetros. Para tal fin se recomienda disminuir el área de trabajo y el grosor de las franjas proyectadas para obtener mayor resolución.

Referencias

1. Z. M. Pérez, L. Romero. *Sistema Óptico de Reconstrucción Tridimensional para la Detección de Ampollas en Recubrimientos*. Trabajo de Grado. Escuela de Física. Universidad Industrial de Santander. 2004. pp. 7-31.
2. R. Palmer-Jones, P. Hopkins, D. Eyre. "Understanding the results of an intelligent pig inspection". *Penspen Integrity*. Vol. 8. 2006. pp. 1-16.
3. W. D. Corbett. "Revestimientos protectores industriales". *ASTM Standardization News*. Vol. 34. 2006. pp.10-21.
4. J. W. Insausti, P. Benedetti, L. Iurman, A. Lucaioli, P. Traversa, N. Mazini. "Comparación de rugosidades de superficies metálicas medidas con rugosímetro electromecánico y con análisis de imágenes de microscopía electrónica". *Jornadas SAM 2000-IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*. Neuquén (Argentina). Vol. 1. 2000. pp. 863-870.
5. D. Tulsiani. *A Fringe Projection System for Measurement of Condensing Fluid Films in Reduced Gravity*. Thesis. Worcester Polytechnic Institute. 2005. pp. 11-32.
6. A. Martínez, J. A. Rayas, J. M. Flores, R. Rodríguez, D. Donato. "Técnicas Ópticas para el contorno de superficies tridimensionales". *Revista Mexicana de Física*. Vol. 51. 2005. pp. 431-436.
7. P. Gili, C. Carrasco, Jc. Martín, J. Yangüela, A. Arias. "Análisis Digital de la Papila con Cámara de Fondo Convencional: Estudio de Variabilidad". *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*. Vol. 79. 2004. pp. 125-130.
8. J. Meneses, T. Gharbi, J. Y. Cornu. "Sistema óptico de reconstrucción 3-D para el análisis de deformaciones por desgaste en prótesis de rodilla". *Óptica Pura y Aplicada*. Vol. 36. 2003. pp. 11-16.
9. D. A. Gómez. *Dispositivo óptico para la reconstrucción tridimensional de la piel humana por el método de proyección de franjas*. Trabajo de grado. Departamento de física. Universidad del Cauca. 2009. pp. 18-65.
10. Z. M. Pérez. *Aproximación Espacio-Temporal para la medida absoluta de la forma 3D de un objeto por proyección de franjas*. Trabajo de maestría. Escuela de Física. Universidad Industrial de Santander. 2006. pp. 19-23.
11. T. Luhmann, F. Bethmann, B. Herd, J. Ohm. "Comparison and verification of optical 3-d surface measurement systems". *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. Vol. XXXVII. 2008. pp. 51-56.
12. W. Lu-shen and P. Qing-jin. "Research and development of fringe projection-based methods in 3D shape reconstruction". *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. Vol. 7. 2006. pp. 1026-1036.
13. DLP™ Technology Texas Instruments. <http://www.plus-america.com/papers.html>. consultada el 22 enero de 2010.
14. Departamento de Electrónica, Automática e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Madrid. "Práctica 2: Adquisición y calibración de cámaras de video", *Prácticas de Robótica y Visión Artificial*. http://www.elai.upm.es:8009/spain/Asignaturas/MIP_

- VisionArtificial/PracticasVA/prac2VA_Adquisicion-GUI.pdf. Consultada el 22 enero de 2010.
15. Y. D. Amaya, J. A. Ruiz. *Localización dinámica de móviles y obstáculos en una escena controlada para aplicaciones en robótica*. Trabajo de grado. Escuela Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. 2005. pp. 8-13.
 16. The MathWorks, Inc. *Image Acquisition Toolbox 3, Acquire images and video from industry-standard hardware*. Vol. 4. 2007. pp. 1-4.
 17. J. Meneses, T. Gharbi, P. Humbert. "Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram". *Applied Optics*. Vol. 44. 2005. pp. 1207-1215.
 18. D. M. Quintero. *Reconstrucción de defectos tridimensionales mediante proyección de franjas, en platinas metálicas con deformaciones mecánicas superficiales*". Trabajo de grado. Escuela Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. 2010. pp. 1-14.
 19. R. Ernst, A. Weckenmann, R. Velgan. "Local wall thickness measurement of formed sheet metal using fringe projection technique". *XVII IMEKO World Congress, Metrology in the 3rd Millennium*. Croatia. 2003. pp.1802-1805.
 20. F. Pernkopf, P. O'Leary. "Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces". *NDT&E International*. Vol. 36. 2003. pp. 609-617.
 21. The American Society of Mechanical Engineers. "Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines. A supplement to ASME B31G code for pressure piping", *ASME B31G-1991(Revision of ANSI/ASME B31G-1984)*, ASME International. New York.1991. pp. 6-9.