

SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL APLICADO A LA EXPLORACIÓN SUPERFICIAL DE FALLAS Y DEFECTOS EN TUBERÍAS CON REFUERZO NO METÁLICO PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

Javier Arciniegas*, **Andrés L. González****, **Luz A. Quintero***, **Carlos R. Contreras**†**, **Jaime E. Meneses****

**Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT), Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander (UIS), Carrera 27 Calle 9 Ciudad Universitaria, Bucaramanga, Colombia.*

***Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS), Universidad Industrial de Santander (UIS), Escuela de Física, Carrera 27 Calle 9 Ciudad Universitaria, Bucaramanga, Colombia.*

Recibido 25 Noviembre 2013; aceptado 23 Febrero 2015

Disponible en línea: 27 Octubre 2015

Resumen: La reconstrucción tridimensional (3D) es una temática que constantemente produce un alto interés científico, y proporciona información para aplicaciones médicas, industriales e investigativas, entre otras. En el presente trabajo, desarrollado en conjunto por el GIMAT y el GOTS de la Universidad Industrial de Santander, se propone implementar un sistema de reconstrucción 3D en aplicaciones de exploración superficial de tuberías con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos. El sistema de reconstrucción está formado por una cámara CCD, un proyector portable y un computador portátil y se basa en la técnica de proyección de franjas. Los resultados muestran que el sistema desarrollado se puede implementar para llevar a cabo aplicaciones metrológicas en la industria petrolera.

Palabras clave: Reconstrucción tridimensional, Proyección de franjas, Transporte de hidrocarburos.

THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION SYSTEM APPLIED TO SURFACE EXPLORATION OF FAILURES AND DEFECTS IN PIPES WITH NON-METALLIC REINFORCEMENT FOR TRANSPORTATION OF HYDROCARBONS

Abstract: Three-dimensional shape measurement is a subject that consistently produces high scientific interest and provides information for medical, industrial and investigative applications, among others. In this paper, it is proposed to implement a three-dimensional reconstruction system for applications in superficial inspection of non-metallic piping for the hydrocarbons transport. The system is formed by a CCD camera, a projector and a laptop and it is based on fringe projection technique. The results show that the developed system can be implemented to carry out metrological applications in the oil industry.

Keywords: Three-dimensional reconstruction, Fringe projection, Hydrocarbons transport.

† Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel: (+577) 6344000 extensión 2752

E-mail: ricardocp07@gmail.com (Ricardo Contreras).

1. INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo en Colombia está en constante cambio con el propósito de mejorar la seguridad ambiental y el desempeño de los sistemas de transporte de hidrocarburos. Las nuevas tecnologías implementadas para el recobro secundario del petróleo provocan una aceleración en los mecanismos de fallas de las tuberías metálicas convencionales utilizadas para el transporte de hidrocarburos, lo que ocasiona un incremento en los daños que generan pérdidas económicas, afectaciones ambientales y costosas inversiones en recuperación de zonas afectadas.

Una nueva tecnología en tuberías elaboradas con materiales no metálicos se está convirtiendo en una alternativa para la industria, pues brinda características como fácil instalación, buena resistencia mecánica, resistencia a la corrosión interna, externa y menores pérdidas de presión.

En los últimos setenta años el plástico ha sido el material más utilizado en la fabricación de diversas tuberías. Esta tecnología ha sido introducida hace poco más de cinco años por la industria petrolera en Colombia, dando una pronta solución a las exigentes normativas ambientales a las que dicha industria se enfrenta y facilitando una significativa reducción de costos de mantenimiento.

A pesar de los buenos resultados obtenidos con este tipo de tubería, se han encontrado fallas tempranas en algunas de éstas cuando se encuentran en servicio, ocasionando fugas no controladas del producto transportado; las distintas fallas pueden ser producidas por errores de diseño, producción, instalación, almacenaje, transporte, condiciones de servicio y factores del ambiente incluyendo cargas mecánicas, efectos térmicos, agentes químicos y características de vida útil.

El avance para identificar fallas tempranas en este tipo de tuberías está en proceso de desarrollo y en manos de las empresas fabricantes debido al carácter novedoso de esta tecnología; comparando con las tuberías de acero, las técnicas no destructivas para la detección de fallas no está consolidada en la literatura. Esta coyuntura da inicio a la investigación y desarrollo de técnicas que ayuden a determinar el daño estructural

durante los años de servicio en los diferentes tipos de ambiente a los que será sometida la tubería.

El objetivo principal de este trabajo es investigar el potencial de aplicar la técnica de proyección de franjas para obtener la reconstrucción 3D de las diferentes fallas que se pueden presentar en la superficie de las tuberías con refuerzo no metálico que son utilizadas para el transporte de hidrocarburos. El análisis detallado de las reconstrucciones tridimensionales obtenidas permitirá identificar las fallas que pueden afectar la integridad estructural de la tubería.

2. RECONSTRUCCIÓN 3D POR EL MÉTODO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS

En la actualidad los métodos ópticos ([Chen et al., 2000](#)) son muy utilizados para obtener la reconstrucción 3D de diversos objetos de estudio debido a que poseen características, tales como: alta precisión, amplio campo de trabajo y a que el uso de los mismos no implica el contacto con la superficie del objeto. Entre estos métodos, el de proyección de franjas ha sido muy estudiado y aplicado en muchos campos debido a su sencillo montaje experimental, procesamiento automático y alta precisión.

Un sistema clásico de proyección de franjas está formado por un proyector y una cámara, ver [Fig. 1](#). El proyector se usa para proyectar un patrón de franjas sobre la superficie del objeto. Debido a las variaciones topográficas de la superficie del objeto el patrón proyectado se distorsiona. Este patrón distorsionado es capturado utilizando la cámara, la cual debe estar ubicada formando un ángulo específico respecto a la dirección de proyección. Luego se calcula el mapa de fase bidimensional (2D) a partir de métodos de recuperación de fase, tales como el método de la transformada de Fourier ([Quan et al., 1995](#); [Takeda et al., 1982](#); [Chen et al., 2010](#)), el de la transformada de Hilbert ([Kumar et al., 2013](#)) o la técnica de corrimiento de fase ([Quan et al., 2001](#); [Chen et al., 2005](#)). Por último, por medio de un procedimiento de calibración que permite convertir el mapa de fase 2D a alturas sobre la superficie del objeto, el cual es llamado mapeo

fase-altura, se puede reconstruir el perfil de la superficie del mismo.

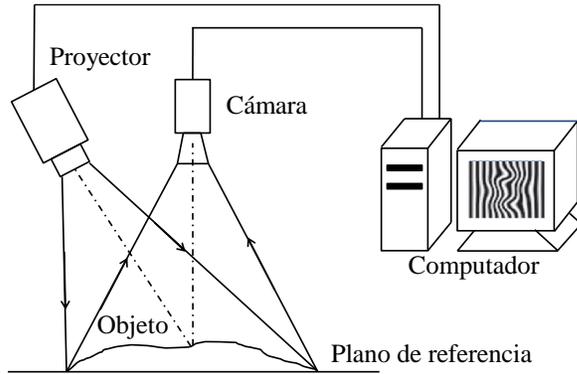


Fig. 1. Montaje experimental de un sistema de proyección de franjas.

La revisión bibliográfica permite establecer diferentes estrategias para realizar la calibración de un sistema de proyección de franjas. Básicamente los montajes experimentales son de dos tipos: particulares y generalizados. En el primer caso la cámara y el proyector se ubican en posiciones específicas. Por ejemplo ubica el eje óptico de la cámara perpendicular al plano de referencia y el eje óptico del proyector forma un ángulo con respecto al eje óptico de la cámara, estos ejes se cruzan sobre el plano de referencia. Para esta situación la ecuación de conversión fase-altura depende de los parámetros del montaje y está dada por:

$$h(x, y) = \frac{l_0 \Delta\phi(x, y)}{\Delta\phi(x, y) + 2\pi f_0 d}, \quad (1)$$

donde d y l_0 son parámetros del montaje óptico; d representa la distancia entre la pupila de entrada de la cámara y la pupila de salida del proyector, f_0 representa la frecuencia espacial del patrón de franjas proyectado y $\Delta\phi(x, y)$ es la fase relacionada con la forma del objeto (Takeda et al, 1983). En algunos casos dichos parámetros se pueden medir, pero generan errores en la medición por la dificultad de definir los ejes ópticos o las posiciones de las pupilas, etc. En otros casos (Chen et al, 2009) estos valores son determinados de manera indirecta, usando un objeto patrón con dimensiones conocidas. En los montajes experimentales generalizados, la cámara

y el proyector no tienen condiciones específicas, sólo se busca que sus campos de observación se superpongan para explorar el objeto de estudio.

La calibración del sistema de proyección-observación se realiza desplazando el plano de referencia en dirección perpendicular a incrementos conocidos, empleando motores de traslación de alta precisión, de esta manera, para cada píxel en el plano imagen de la cámara se obtienen datos experimentales de fases y alturas para el volumen de calibración. Estos se ajustan a partir del método de mínimos cuadrados empleando polinomios o funciones fraccionales.

El principal inconveniente se presenta debido al uso de motores de alta precisión. Aunque la coordenada z de un punto sobre la superficie del objeto se determina a partir de la curva de calibración, las coordenadas transversales (x, y) son calculadas en función del montaje experimental. En situaciones particulares donde el eje óptico de la cámara es perpendicular al plano de referencia, se asume un modelo tele-céntrico de observación y con el factor de ampliación geométrico se determinan las coordenadas transversales. En situaciones más exactas o generalizadas, debido al carácter no tele-céntrico en la proyección y en la observación, se suele emplear el modelo de proyección puntual o modelo *pinhole* con el propósito de modelizar el sistema.

El modelo define los parámetros intrínsecos y extrínsecos los cuales son obtenidos al calibrar la CCD. En éste se recurre tradicionalmente al uso de un patrón de calibración ajedrezado y a un procedimiento de optimización no lineal. Sin embargo modelizar de la misma forma el proyector es difícil debido a la naturaleza inversa del mismo, ya que éste proyecta imágenes en vez de formarlas. En (Zhang et al, 2006) se modeliza y calibra el proyector como si éste formara imágenes, en éste método el procedimiento de calibración del sistema de proyección-observación se lleva a cabo utilizando los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara.

La idea es construir una imagen virtual del proyector, asociando un punto del proyector a un punto en píxeles sobre el plano imagen de la cámara, de esta forma una imagen proyectada por el proyector es convertida a una imagen virtual de

la cámara. En ([Feipeng et al, 2008](#)) se emplea el modelo puntual de calibración para modelizar la cámara y el proyector y se obtiene una ecuación de conversión de fase a altura que depende de los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara y el proyector. Estos parámetros se calculan usando un objeto de forma conocida y un procedimiento de ajuste por mínimos cuadrados.

Un avance importante orientado hacia la fácil calibración fue realizado por ([Zappa et al, 2011](#)), en el procedimiento propuesto no se requiere de sistemas de desplazamiento motorizados y se emplea un patrón de calibración que sirve para calibrar la cámara individualmente y el sistema de

proyección-observación. El patrón de calibración se ubica manualmente en posiciones aleatorias dentro del campo de visión de la cámara. Aunque el procedimiento es fácil y versátil, no se obtiene una resolución apropiada para cuantificar pequeñas variaciones topográficas presentes en la superficie del objeto de estudio.

3. ALGORITMO DE CORRIMIENTO DE FASE

La técnica de corrimiento de fase es muy usada en metrología óptica debido a que posee las siguientes características: (i) medición punto a punto, (ii) es menos sensible a las variaciones de las características reflectantes de la superficie del objeto, (iii) es menos sensible a la luz del ambiente. Se han desarrollado una variedad de algoritmos de corrimiento de fase, que incluyen dos pasos (dos imágenes), tres pasos (tres imágenes) o cuatro pasos (cuatro imágenes). En el último caso la diferencia de fase entre cada patrón de franjas proyectado es igual a $\pi/2$, y la intensidad de cada uno de estos patrones está dada por,

$$I_i(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta_i], \quad (2)$$

Con $\delta_i = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. Donde $I'(x, y)$ es la intensidad de modulación y $\phi(x, y)$ es la fase que se debe recuperar. A partir de (2) se puede obtener la fase mencionada anteriormente, la cual está dada por,

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right), \quad (3)$$

y el contraste de las franjas por,

$$I''(x, y) = \frac{\sqrt{(I_2 - I_4)^2 + (I_1 - I_3)^2}}{2}. \quad (4)$$

La ecuación (3) solo proporciona los valores de fase ubicados en el intervalo $(-\pi, +\pi)$, la fase continua se obtiene a partir del algoritmo de 'phase unwrapping' ([Ghiglia et al, 1998](#)).

4. SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL IMPLEMENTADO

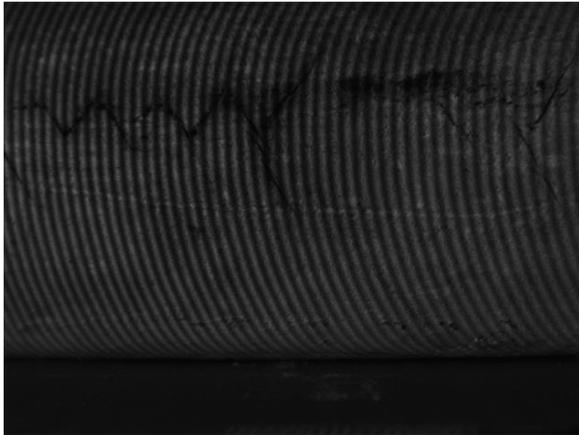
El sistema que se implementó está formado por un proyector Aigo Discovery Box PT 6216 2 GB de 100 lúmenes y resolución de 800 píxeles x 600 píxeles, una cámara CCD Ueye UI-2310-M, USB 2.0, monocromática y resolución 640 píxeles x 480 píxeles, con lente Computar de 12 milímetros. Para el procesamiento digital de las imágenes se usó el software MATLAB® R2010a instalado en un computador portátil SONY VAIO VPCEG30EL con procesador Intel Core i3 y 4 GB de RAM. Con el mismo software se diseñó un programa que genera los patrones de las franjas cuyas intensidades están dadas por la ecuación (2) y con el cual se controla la adquisición de los patrones deformados sobre la superficie del objeto de estudio.

5. RECONSTRUCCIÓN 3D DE LA SUPERFICIE DE LA TUBERÍA

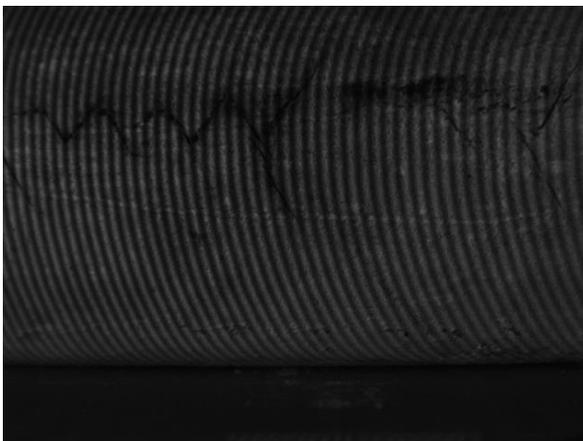
El patrón de franjas fue proyectado sobre la superficie de la tubería, se proyectaron cuatro patrones de franjas con diferencias de fase de $\delta_1 = 0, \delta_2 = \pi/2, \delta_3 = \pi, \delta_4 = 3\pi/2$ los cuales fueron adquiridos por la cámara. Estas imágenes se muestran en la [Fig. 2](#). La fase discontinua se muestra en la [Fig. 3a](#) mientras que la fase continua se muestra en la [Fig. 3b](#).

Por otra parte con el objetivo de cuantificar la longitud de una región de la grieta, su profundidad máxima y su profundidad promedio, se realiza un tratamiento digital que permite aislarla, esto debido a que por lo general la misma

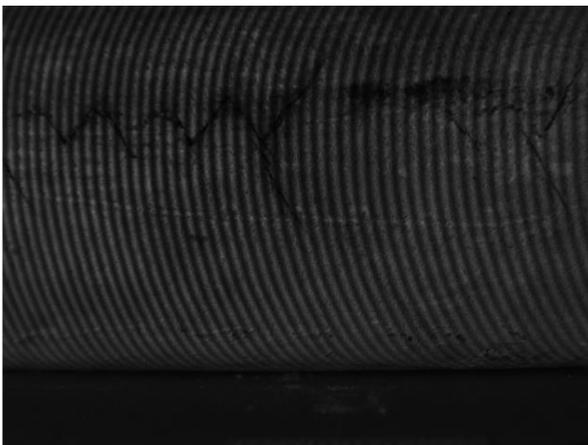
no es continua, es decir que no está a lo largo de toda la región reconstruida, ver [Fig. 4-6](#). La reconstrucción de una sección de la grieta y las características mencionadas anteriormente se muestran en la [Fig. 7](#).



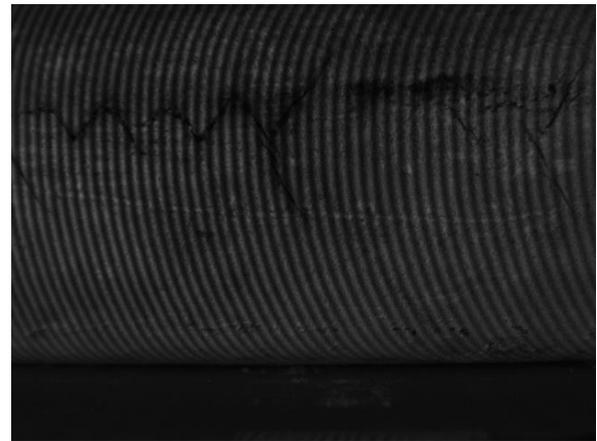
(a) Diferencia de fase de 0



(b) Diferencia de fase de $\pi/2$

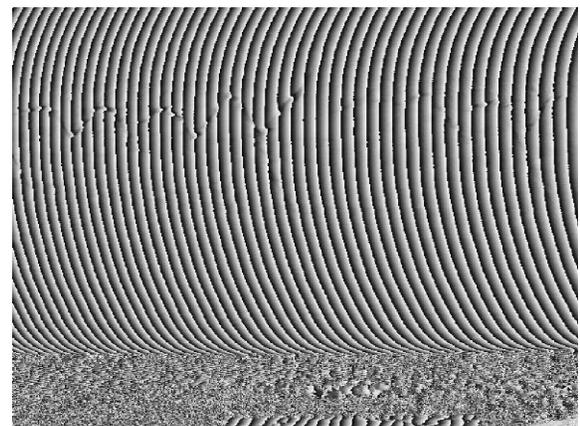


(c) Diferencia de fase de π



(d) Diferencia de fase de $3\pi/2$

Fig. 2. Franjas proyectadas sobre la superficie de la tubería.



(a) Fase discontinua



(b) Fase continua

Fig. 3. Fase del patrón de franjas proyectado.

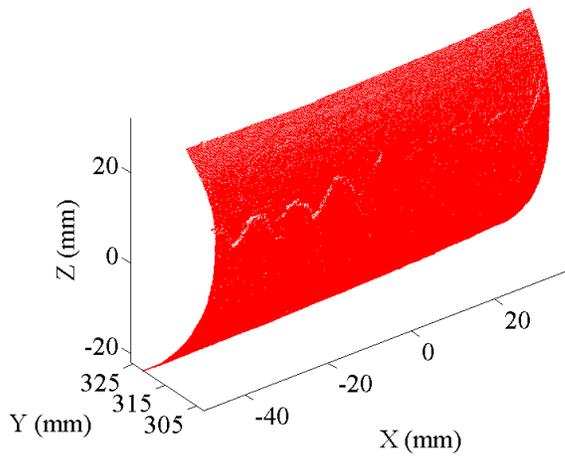


Fig. 4. Reconstrucción 3D de la superficie de la tubería.

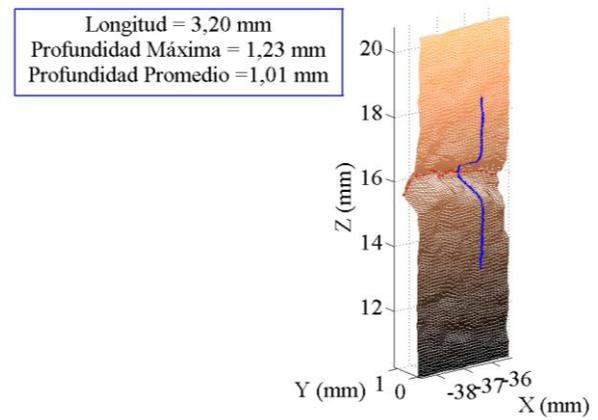


Fig. 7. Características de una de una de las grietas ubicada sobre la superficie de la tubería.

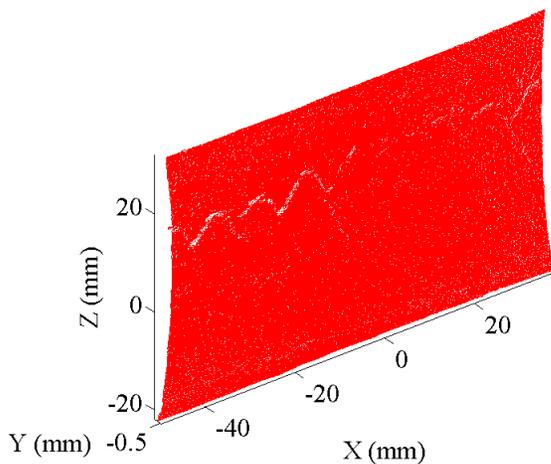


Fig. 5. Reconstrucción 3D después de eliminar la curvatura promedio de la superficie.

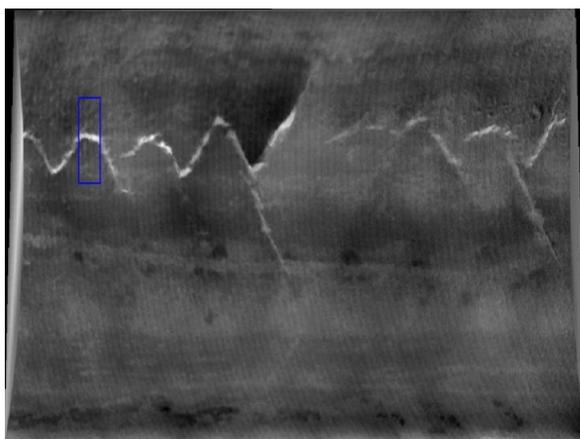


Fig. 6. Región de la grieta a caracterizar.

6. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un sistema de digitalización 3D formado por un proyector portable, una cámara CCD y un computador portátil; el sistema permite obtener información topográfica de las fallas presentes en la superficie del objeto de estudio, que en nuestro caso es una sección de una tubería con refuerzo no metálico utilizada para el transporte de hidrocarburos. Con el mismo sistema también es posible evaluar ciertas características de las grietas presentes en la superficie de la tubería, sin embargo debido a su robustez y versatilidad se podrán caracterizar o analizar otro tipo de fallas que puedan afectar la integridad estructural de la tubería. Cabe mencionar que los resultados se obtuvieron bajo condiciones de laboratorio por tratarse de un dispositivo preliminar, sin embargo se estudia la posibilidad de desarrollar un dispositivo que se pueda implementar en campo.

AGRADECIMIENTO

La presente investigación fue realizada con recursos de COLCIENCIAS y del SENA según proyecto titulado: Diseño y desarrollo de dispositivos de reconstrucción 3D aplicados a la exploración corporal, No. 110250226846 ante COLCIENCIAS y No. 8186 ante la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander.

REFERENCIAS

- Chen, F., Brown, G. M. and Song, M. (2000). Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*, **39**: 10-22.
- Chen, L., Quan, C., Tay, C. J. and Huang, Y. (2005). Fringe contrast-based 3D profilometry using fringe projection. *Optics Letters*, **30**: 2101-2103.
- Chen, L. C., Ho, H. W. and Nguyen, X. L. (2010). Fourier transform profilometry (FTP) using an innovative band-pass filter for accurate 3D surface reconstruction. *Optics and Lasers in Engineering*, **48**: 182-190.
- Chen, X., Chi, J., Yin, Y. and Sun, J. (2009). Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection. *Optics and Lasers in Engineering*, **47**: 310-319.
- Feipeng, D. and Shaoyan G. (2008). Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector. *Applied Optics*, **47**: 377-385.
- Ghiglia, D. C. and Pritt, M. D. (1998). *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*. New York, Wiley.
- Kumar, U. P., Somasundaram, U., Kothiyal, M. P. and Mohan, N. K. (2013). Single frame digital fringe projection for 3-D surface shape measurement. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. **124**: 166-169.
- Quan, C., Tay, C. J., Shang, H. M. and Brianston-Cross, P. J. (1995). Contour measurement by fibre optic fringe projection and Fourier transform analysis. *Optics Communications*, **118**: 479-483.
- Quan, C., He, X. Y., Wang, C. F. and Shang, H. M. (2001). Shape measurements of small objects using LCD fringe projection with phase shifting. *Optics Communications*, **189**: 21-29.
- Takeda, M., Ina, H. and Kobayashi, S. (1982). Fourier transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, **72**: 156-160.
- Takeda, M. and Mutoh, K. (1983). Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes. *Applied Optics*, **22**: 3977-3982.

Zhang, S. and Huang, P. S. (2006). Novel method for structured light system calibration. *Optical Engineering*, **45**: 083601.

Zappa, E., Busca, G. and Sala, P. (2011). Innovative calibration technique for fringe projection based 3D scanner. *Optics and Lasers in Engineering*, **49**: 331-340.

SOBRE LOS AUTORES

Javier Arciniegas

Estudiante de Maestría en Ingeniería de Materiales de la Universidad Industrial de Santander. Forma parte del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales desde el 2013.

Andrés L. González

Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), estudiante de Maestría en Telemática de la misma institución. Forma parte del grupo de Óptica y Tratamiento de Señales desde el 2012.

Luz A. Quintero

Ingeniera Metalúrgica, Magister en Ingeniería Metalúrgica y Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad Industrial de Santander. Profesora de planta de planta y Directora del Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT) de la Universidad Industrial de Santander.

Carlos R. Contreras

Físico, Magister en Física y estudiante de Doctorado en Ciencias Naturales Físicas de la Universidad Industrial de Santander. Es profesor de Cátedra de la misma institución desde 2007. Forma parte del grupo de Óptica y Tratamiento de Señales desde 2006.

Jaime E. Meneses

Físico y Magister en Física de la Universidad Industrial de Santander, Doctor en Sciences Pour L'ingénieur de la Université de Franche Comté. Especialista en Docencia Universitaria y profesor titular de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander.