Reconstrucción de objetos 3d con simetría axial a partir de triangulación láser*

Dagoberto Mayorca Torres^{**⊠} Anghelo Marino López***

Cómo citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Mayorca, D. y López, A. (2017). Reconstrucción de objetos 3d con simetría axial a partir de triangulación láser. Revista UNIMAR, 35(2), 239-253.

Fecha de recepción: 16 de noviembre de 2016 Fecha de revisión: 03 de marzo de 2017 Fecha de aprobación: 05 de abril de 2017

RESUMEN

Esta investigación se centra en la implementación y análisis de un sistema de reconstrucción de objetos tridimensionales con simetría axial mediante técnica de triangulación láser. El sistema se basa en la disposición de una cámara web que permite la adquisición de las imágenes de un objeto que se encuentra frente a un sistema de proyección de base fija, y que permite la proyección directa de una línea láser sobre el objeto con superficie difusa. El barrido angular se realiza mediante un motor paso a paso que permite la rotación controlada del objeto; las imágenes son almacenadas y analizadas por algoritmos de procesamiento de imágenes que permiten finalmente la obtención de la topografía del objeto tridimensional. La resolución topográfica fue estimada mediante técnica de mínimos cuadrados y se realizó sobre figuras geométricas tridimensionales de dimensiones conocidas, como cilindro circular, cilindro rectangular y cilindro hexagonal. El valor obtenido de error fue basado en la comparación de los datos mapeados y medidas de referencia; el valor de error fue en promedio de $\pm 0,13$ en el eje X, $\pm 0,13$ mm en eje Y y ± 0.10 mm en el eje Z. La resolución del sistema es alrededor 0.3mm.

Palabras clave: Reconstrucción 3D, triangulación láser, metrología óptica, simetría axial.

Reconstruction of 3d objects with axial symmetry from laser triangulation

This article describes the 3D reconstruction of an object that possesses axial symmetry from the laser triangulation method; the system allows obtaining the shape and dimensions of an object by directional light projection in structured form and controlled rotation of the object. The system consists of a lighting stage through the projection of a laser line, a system of acquisition through the use of a webcam and the design of a platform that is responsible for the rotation controlled by a motor coupled to a box speed reducer. The software application allows synchronizing the system through the USB port, to finally perform the image processing and the display of the results obtained in a graphical interface. Experimental design considerations and their limitations as minimum resolution, accuracy of measures are detailed in this article.

Key words: 3D Reconstruction, laser triangulation, optical metrology, axial simmetry.



^{*} Artículo Resultado de Investigación.

^{**🖂} Especialista en gerencia de proyectos Ingeniero Físico (Universidad del Cauca). Docente Facultad de Ingeniería (Universidad Mariana), integrante del Grupo de Investigación GRIM de la Universidad Mariana; Correo electrónico institucional: dmayorca@umariana.edu.co.

^{***} Candidato a Magister en Sistemas Automáticos de Producción (Universidad Tecnologica de Pereira). Ingeniero Electronico (Universidad de Nariño). Director de Ingeniería mecatrónica, Integrante del Grupo de Investigación GRIM de la Universidad Mariana; Correo electrónico institucional: alopez@umariana.edu.co.

Reconstrução de objetos 3D com simetria axial da triangulação a laser

RESUMO

Este artigo descreve a reconstrução 3D de um objeto que tem uma simetria axial do método de triangulação laser; o sistema pode medir a forma e as dimensões de um objeto pela projeção de luz estruturada e rotação controlada do objeto. O sistema consiste de uma iluminação de palco, projetando uma linha de laser, um sistema de aquisição usando um webcam e projetar uma plataforma que é responsável por controlar a rotação de um motor acoplado a uma caixa redutora de velocidade. O aplicativo de software permite sincronizar o sistema através da porta USB para finalmente realizar o processamento de imagem e exibição dos resultados em uma interface gráfica. As considerações de design experimentais e limitações como resolução mínima, medições de precisão são detalhados neste artigo.

Palavras-chave: Reconstrução 3D, triangulação laser, metrologia óptica, simetria axial.

I. Introducción

El desarrollo de sistemas de reconstrucción 3D de objetos está cobrando gran relevancia, dadas sus potenciales aplicaciones en campos como la medicina, la seguridad, el desarrollo de entornos virtuales, la conservación de objetos de valor cultural, los procesos industriales y el control de calidad, entre otros. Esto es especialmente útil en objetos complejos en términos de sus formas, contornos y bordes, elementos clave en el modelado de piezas mecánicas, moldes, objetos ergonómicos o estéticos (Moccozet, s.f.).

La reconstrucción tridimensional consiste en la reproducción de un objeto real en el computador, de modo que sean conservadas sus características físicas como forma, dimensión, relación de aspecto y volumen. Las mejoras en la tecnología de medición óptica han hecho posible capturar geometrías tridimensionales con relativa facilidad. Muchos son los sistemas de reconstrucción de geometrías que han sido desarrollados; sin embargo, no ha sido establecida una metodología general y automatizada para crear modelos geométricos a partir de dicha tecnología (Santolaria, s.f.).

Dentro de los métodos existentes hay dos alternativas para su realización: el primero es a través del contacto mecánico entre el objeto de interés y una punta de prueba que recorre toda su superficie, transfiriendo las coordenadas de cada punto al computador. La resolución de este método depende de la resolución del sistema de desplazamiento de la punta; sin embargo, el proceso de reconstrucción es muy lento, pudiendo tardar horas, e incluso días, para reconstruir una pieza; además, el contacto mecánico puede dañar la superficie del objeto (Kus, 2009).

El segundo método se fundamenta en la interacción del objeto que elimina la necesidad de contacto mecánico. Dentro de estas técnicas, las que más aceptación han tenido y que han sido ampliamente estudiadas son las que están fundamentadas en métodos ópticos, que utilizan una configuración conocida de haces luminosos que son proyectados sobre el objeto de estudio, y a través de visión artificial se obtiene las coordenadas de los puntos muestreados del objeto. Con la ayuda de algoritmos se realiza la conexión entre ellos, para generar los elementos de superficie que permitan obtener la forma y dimensiones del objeto.

La triangulación láser es una técnica óptica que permite determinar las dimensiones de un objeto mediante la interpretación de la imagen generada por un haz de láser reflejado en la superficie analizada, basándose en los planteamientos teóricos del comportamiento de la perspectiva. Esto se logra mediante la obtención de una imagen con la posición del espectro del láser en la superficie del objeto en análisis. El desplazamiento medido se puede relacionar directamente con la distancia en la que se ubica la superficie respecto al sensor para, finalmente, obtener una topografía del objeto en 3D (Cock, 2000).

En este trabajo se describe la implementación de un sistema de reconstrucción tridimensional basado

en triangulación láser, que presenta una solución a la problemática de la reconstrucción superficial de productos, utilizando un escáner tridimensional basado en componentes comerciales de bajo costo, que permite obtener la forma completa del objeto a través de su rotación sobre un eje de referencia. Se describe el modelo utilizado, los algoritmos desarrollados, la calibración del sistema y los problemas encontrados (Geng, 2011).

1.1 Antecedentes Teóricos

Técnicas de procesamiento de imágenes. La visión artificial consiste en la deducción automática de la estructura y propiedades de un mundo tridimensional, mediante la captación de imágenes desde una cámara CCD y su posterior tratamiento a través de técnicas de procesamiento avanzadas, permitiendo así la extracción de características de una imagen, donde sus propiedades incluyen propiedades geométricas (forma, tamaño y localización) y propiedades materiales (color, textura, iluminación y composición).

El concepto de imagen está asociado a una función bidimensional, cuyo valor será el grado de intensidad de luz en el espacio en coordenadas de la imagen en cada punto. A cada punto discreto de la imagen se le llama píxel. El valor del píxel depende de la cantidad de luz que incide sobre el objeto, así como de la parte que es reflejada. Las principales causas que llevan a la pérdida de información cuando se adquiere una imagen, son la naturaleza discreta de los píxeles y los valores que son capaces de medir. No existen criterios que permitan decidir el número óptimo de píxeles y de bits con los que muestrear una determinada imagen. Distintos estudios experimentales han llegado a la conclusión de que existen determinados valores de umbral por encima de los cuales no se aprecia una significativa ganancia, pero por debajo de ellos sí se aprecia una pérdida efectiva en la imagen.

Técnica de Triangulación Láser. El método de triangulación láser centra su funcionamiento en proyectar una fuente de luz estructurada sobre un objeto para conocer las dimensiones en 3D del objeto. "La intersección entre la iluminación proyectada y la superficie del cuerpo a reconstruir, produce un único patrón deformado dependiendo de las di-

mensiones y forma del cuerpo" (Ledezma, Patiño, A., Patiño, J., 2007, p. 132). Con el fin de reconstruir el objeto, se hace necesario proyectar la línea láser sobre todos los puntos de interés; para lograrlo existen dos métodos, principalmente: la translación horizontal del objeto bajo el haz lineal de luz, y la rotación del objeto de 360 º bajo la línea láser alrededor de un eje de referencia.

Para el sistema de reconstrucción implementado se utilizó el método de rotación; en este caso el objeto se ubica sobre una plataforma rotatoria, como se ilustra en la Figura 1. La imagen de la línea deformada por la topografía del objeto es capturada por una cámara, cada vez que la plataforma rota un determinado ángulo, hasta completar los 360 °. El eje óptico de la cámara y el plano láser proyectado forman un ángulo de inclinación . El desplazamiento lateral d_i que sufre cada punto de la línea proyectada respecto a una línea de referencia depende de este ángulo de inclinación, de la topografía del objeto y de su coordenada radial respecto al eje de rotación (Forest, 2004).



Figura 1. Sistema de triangulación laser por rotación implementado para la reconstrucción del objeto.

Utilizando un sistema de coordenadas cilíndricas, con el eje *z* coincidiendo con el eje de rotación, las coordenadas ($r_{,\prime}\theta_{,\prime}z_{,\prime}$) del i-ésimo punto en la intersección de la superficie del objeto y la línea proyectada, se determina mediante aproximación telecéntrica dada por las ecuaciones (1,2 y 3):

$$r_i = \frac{d_i}{sen(\theta_i)} \tag{1}$$

$$\theta_i = \Delta \theta_i i \tag{2}$$

$$z_i = z_i \tag{3}$$

... donde $\Delta \theta$ es el ángulo mínimo que puede girar la plataforma de manera controlada, mientras que *i* es el número de pasos que ha girado la plataforma:

$$i = 1, 2, 3, \dots, \frac{360^{\circ}}{\Delta \theta}$$
 (4)

A partir de la imagen capturada por la cámara, es posible determinar d_i y z_i que corresponden al desplazamiento lateral que sufre la línea con respecto a la línea de referencia sin objeto y la profundidad del objeto calculado a partir de la deformación. Para lograrlo se hace necesario determinar de manera precisa la relación que existe entre la posición del píxel y las coordenadas del mundo real, lo que se consigue a través de un proceso experimental de calibración, el cual permite traducir los píxeles de la cámara a su equivalencia en milímetros sobre el sistema coordenado (x, y, z) del cuerpo, teniendo en cuenta la perspectiva de observación (Schnee y Futterlieb, 2011). Para reconstruir la totalidad de la superficie se captura una imagen por cada paso de barrido, pero de esa imagen solo es importante la información que contiene de la línea deformada; lo demás es información del fondo que no es de interés, situación que se maximiza si se tiene en cuenta que por cada desplazamiento angular de la plataforma es necesario capturar una imagen.

Con el fin de representar gráficamente la superficie reconstruida, se hace necesario convertir el conjunto de coordenadas cilíndricas en coordenadas rectangulares; para realizarlo se utiliza las siguientes transformaciones:

$$x_i = r_i \cos(\theta_i) \tag{5}$$

$$y_i = r_i \ sen(\theta_i) \tag{6}$$

$$z_i = z_i \tag{7}$$

Una vez se tiene las coordenadas rectangulares 3D del objeto, se puede enviar los resultados de la nube de puntos a una API de visualización en 3D; en este caso, se usa la plataforma de OPENGL, biblioteca que permite la visualización de escenas tridimensionales complejas a partir de primitivas geométricas simples de puntos adquiridos para la generación de gráficos y reconstrucción de superficies. Un proceso subyacente es la generación de la superficie y generación de la malla mediante métodos de interpolación de datos (Argüello-Sarmiento, Barrero-Pérez y Meneses-Fonseca, 2012).

2. Metodología

El sistema desarrollado se puede descomponer en tres partes: Un sistema mecánico de rotación controlado por computador, el sistema de iluminación y captura de las imágenes y una aplicación software que se encarga de la sincronización de los dos sistemas anteriores y del registro, procesamiento y despliegue de la información 3D del objeto a reconstruirse. Finalmente, se aplica un método para la generación de la malla basado en métodos de interpolación de puntos y basado en la información de color de la escena.

En la Figura 2 se muestra un diagrama de bloques que describe todo el proceso, cada una de las etapas que realiza el software de reconstrucción y la secuencia que sigue.



Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de reconstrucción.

2.1 Calibración de cámara

Los instrumentos de medición requieren métodos que permitan garantizar la precisión y la exactitud; los procedimientos de calibración establecen una comparación del instrumento con un patrón de referencia para la estimación de errores. Cuando se realiza mediciones sobre imágenes digitales, la calibración de la cámara permite obtener distancias en el mundo real a partir de las imágenes tomadas. Una parte de la calibración de la cámara es la estimación de los parámetros intrínsecos de la misma, los cuales modelan la geometría interna de la cámara y las características ópticas del sensor. Estos parámetros determinan las coordenadas de un punto en la imagen a partir de la posición del punto en la escena, mientras los parámetros extrínsecos miden la posición y la orientación de la cámara respecto al sistema de coordenadas establecido para el mundo.

En la actualidad existen varios métodos para la calibración de una cámara. Uno de ellos son los métodos lineales que utilizan resolución de sistemas de ecuaciones basados en mínimos cuadrados que obtienen una matriz de transformación que relaciona los puntos tridimensionales en el mundo, con sus proyecciones sobre la imagen. Otros métodos de calibración incluyen las distorsiones que produce la cámara; es necesario minimizar índices no lineales de forma iterativa; su ventaja radica en que cualquier modelo puede ser calculado y además, la exactitud del mismo aumenta con el número de iteraciones hasta que converge (Ahmed y Farag, 2005). Existen estudios sobre los errores cometidos en la calibración, debidos a imprecisiones en las medidas del plano de la imagen, dando como resultado una asociación errónea de un punto en el mundo real. Un modelo muy complejo puede complicar mucho el algoritmo de búsqueda, y los resultados obtenidos, no mejorar significativamente frente a otro modelo más simple (Weng, Huang y Ahuja, 1989).

El método de Tsai (Tsai, 1987) representa un proceso clásico de calibración basado en las medidas de las coordenadas de los puntos de una plantilla 3D respecto a un punto de referencia fijo. Por el contrario, el método de Zhang (1998) representa una nueva era en el proceso de calibrado de la cámara. Este método utiliza las coordenadas de los puntos situados en un patrón de ajedrez 2D, tomando diferentes imágenes desde distintas posiciones y orientaciones. Este modo de calibración resulta muy flexible desde el punto de vista de que tanto la cámara como la plantilla pueden ser movidas libremente, y además se puede tomar tantas imágenes como se quiera, sin tener que volver a realizar medidas en la plantilla. El método de calibración de Zhang basado en plantilla 2D no requiere especial diseño de la plantilla, y tampoco una medición tan exacta de los puntos de la misma. A partir de los resultados obtenidos por estos dos autores, se toma el método de Zhang como referencia para el calibrado de la cámara.



Figura 3. Método de calibración mediante patrón de ajedrez.

El patrón de calibración usado fue un arreglo de ajedrez de 12x7 cuadros, con un valor de 13mm de lado, y se realizó el proceso de calibración con un total de 40 imágenes, suficientes para la determinación de matriz intrínseca de la cámara. La matriz obtenida fue la siguiente:

$$M_{intrinseca} = \begin{vmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3792.2 & 0 & 684.3 \\ 0 & 3749.5 & 469.8 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$
(6)

Los parámetros hacen referencia a las distancias focales en cada uno de los ejes, mientras la coordenada del centro de la imagen, en pixeles de la ecuación (6). Con relación a los parámetros extrínsecos, se obtuvo la pose de la cámara mediante matriz de rotación R y vector de translación T.



Figura 4. Estimación de pose de la cámara.

244

Las matrices obtenidas están descritas a continuación:

 $M_{rotación} = \begin{vmatrix} 0.0 & 0.999 & -0.017 \\ -0.0089 & 3749.5 & -0.999 \\ -0.999 & -0.0016 & -0.008 \end{vmatrix} M_{Traslación} = |-5.77 \quad 72.95 \quad 314.14 |$ (6)

2.2 Sistema de control de rotación

Tiene como objetivo, permitir el desplazamiento angular del objeto, de tal forma que la línea láser pueda iluminar todos los puntos de interés sobre la superficie a reconstruir. Este sistema debe estar debidamente ajustado y balanceado, de modo que no introduzca desplazamientos laterales que distorsionen la reconstrucción.

En este módulo se utilizó como actuador, un motor paso a paso con una resolución de 1.8 grados por paso, lo que permitiría digitalizar el contorno del objeto con 200 pasos. Para aumentar su resolución del sistema se le adicionó una caja reductora de velocidad con una relación de 1 a 3.5, lo que aumentó la resolución del paso de giro hasta 0.51 grados por paso, permitiendo una digitalización del contorno con 700 pasos. El movimiento del motor se controla con la ayuda de un microcontrolador, el cual se encarga de suministrar las señales correspondientes para su rotación; la señal de sincronización entre los elementos del sistema se genera a través del computador y se comunica al microcontrolador a través del puerto USB.

2.3 Sistema de iluminación

La iluminación del objeto se realiza mediante luz láser que se encuentra colocada en una base fija, a una altura de 0.15m, cuyo objetivo principal es interceptar la superficie del objeto y, mediante una estimación de la deformación de la línea, obtener una relación de profundidad del mismo. La línea láser de foco ajustable de 5mW a 5v Industrial Grade, que genera un haz con una longitud de onda de 650 nm, corresponde a luz roja visible. Uno de los principales factores a tener en cuenta es que la distribución del patrón de intensidad generado es mayor hacia el centro de la línea, debido a que una de las características del sistema es por proyección telecéntrica, donde el eje de simetría de la plataforma debe coincidir con la línea láser proyectada; esto se consiguió colocando un sistema de guía a lo largo del eje y, mediante rotación controlada del objeto, se verifica la simetría de la línea con respecto a la referencia; de esta manera se realiza el ajuste en el sistema de iluminación. El sistema inicia el proceso de reconstrucción una vez es validada esta etapa.



Figura 5. Alineación de eje geométrico de simetría con eje de giro de la plataforma.

2.4 Procesamiento de imágenes

El software utilizado para realizar la reconstrucción fue desarrollado en lenguaje C++ y la biblioteca que se utilizó fue OpenCV, la cual permite de una manera rápida y eficiente el uso de funciones de procesamiento de imágenes. La primera etapa es registrar y almacenar las imágenes capturadas del objeto, así como sincronizar el movimiento de la plataforma giratoria, con el fin de obtener la imagen cuando el objeto se encuentre estático, de tal manera que sea posible determinar y registrar la posición angular del objeto en el momento de la captura. El sistema de captura consta de una cámara conectada al computador a través del puerto USB y una plataforma ajustable que permitía posicionarla de acuerdo con los requerimientos del montaje. El ángulo formado entre la línea láser y el eje óptico de la cámara era de 30°.



Figura 6. Componentes del sistema de reconstrucción.

En la Figura 6 se muestra una imagen del sistema implementado, en donde se observa la disposición de los elementos que conforman el sistema de reconstrucción dentro de un contenedor que consiste en una caja metálica que cumple dos funciones: la primera es brindarles protección a los dispositivos, manteniéndolos aislados del entorno de trabajo, y la segunda es impedir que la iluminación externa introduzca alteraciones en la reconstrucción del objeto. El proceso que sigue es realizar corrección de distorsiones y transformaciones de translación y rotación a partir de sistema de referencia mediante la aplicación de las matrices de coeficientes obtenidas en el proceso de calibración ya descrito; el resultado se puede observar en Figura 7-a, que presenta la imagen calibrada.

Una de las principales etapas en los sistemas de visión artificial es el mejoramiento de las características a determinar mediante etapa de preprocesamiento. La primera etapa es para una conversión en escala de grises, como se observa en la Figura 7-b, y de esta manera realizar un mejoramiento mediante filtrado basado en el alto contraste de las imágenes debido al patrón de *Speckle* (Castañeda, 1994) de la iluminación del láser; se hace indispensable realizar un suavizado de las imágenes sin perder información detallada de la línea. Para este objetivo se aplica Filtro Kuwahara, filtro no lineal, donde se atenúa las componentes de alta frecuencia que no pertenecen a los bordes (Figura 7-c) para, a partir de ella, realizar el proceso de segmentación que consiste en la separación de la línea láser del fondo; dados los cambios de iluminación presentes en las imágenes se decide utilizar el método de mezcla de gaussianas (Mixtures of Gaussians), aproximación que accede a los valores de intensidad de cada píxel y determina las intensidades más probables del fondo, donde se obtiene una imagen binarizada (Figura 7-d).



Figura 7. Etapas del módulo de procesamiento: a. Imagen capturada, b. Imagen en niveles de gris, c. Imagen filtrada.

Finalmente se obtiene el centro de la línea láser de tal forma que su espesor sea de un píxel mediante esqueletización. Una vez se ha obtenido la imagen segmentada se aplica filtrado de suavizado de la línea a fin de minimizar el número de artefactos para el proceso de esqueletización. Ésta tiene por objetivo, obtener una línea representativa del objeto inicial. El objetivo de los algoritmos de esqueletización es la obtención del esqueleto con la menor distorsión posible, consumiendo el menor número de recursos computacionales.

El algoritmo que se implementó fue el propuesto por Zhang y Suen (1984). Los algoritmos de esqueletización están basados en la ejecución de un conjunto de iteraciones, donde en cada una se realiza el borrado de los pixeles pertenecientes a los bordes de la imagen, hasta que solamente queda el esqueleto. El borrado de cada pixel requiere de un análisis local de los pixeles vecinos, para determinar si pertenece al borde de la imagen, y si su borrado permite conservar conectividad con el resto del esqueleto. La mayoría de diferencias entre algoritmos están en la forma implementada para asegurar la conectividad (Lam, Lee y Suen, 1992). Los resultados obtenidos de la aplicación del proceso de esqueletización pueden ser observados en la Figura 8, donde es posible apreciar el paso de la iteración y sub-iteración del kernel 3x3 usado para esta etapa.



Figura 8. a. Segmentación de la imagen, b. Esqueleto de la imagen con ramificaciones, c. Esqueleto de la imagen sin ramificaciones.

El procedimiento que realiza el algoritmo es el siguiente: en cada iteración se tiene dos sub-iteraciones, donde se evalúa cada pixel de la imagen con relación a cuatro condiciones que debe cumplirse, que permiten que el pixel en cuestión sea borrado, por no tratarse de una parte fundamental del esqueleto de la firma. El resultado de la imagen con los pixeles que hayan cumplido las condiciones de borrados, será la entrada para la siguiente sub-iteración. La última iteración se da cuando se cumple dos sub-iteraciones, donde ningún pixel se borra. Esta información es almacenada en una matriz donde se etiqueta a qué posición angular corresponde, lo que permite desechar la información del fondo, ya que no es relevante para la reconstrucción, pero sí consume recursos de cómputo.

2.5 Reconstrucción 3D y generación de la malla

El módulo de reconstrucción recibe la matriz de datos generada en el módulo anterior, y le realiza la transformación de coordenadas cilíndricas a coordenadas rectangulares, le aplica una corrección para obtener las dimensiones reales del objeto, donde los coeficientes de esta transformación son obtenidos por medio de un proceso de calibración. Los datos correspondientes al mundo real son proyectados en el sistema de coordenadas bidimensionales de la pantalla, con el fin de generar una imagen con aspecto tridimensional.

El módulo cuenta con un gestor de mensajes que identifica los movimientos del 'ratón' del computador y los traduce en desplazamientos y rotaciones del objeto reconstruido, de tal manera que es posible visualizar el objeto desde diferentes perspectivas. Para el desarrollo de esta etapa se utilizó la librería OpenGL, que cuenta con un grupo de funciones optimizadas para realizar software de animación tridimensional con alta eficiencia. El método usado para la interpolación de los puntos y generación de la malla es mediante la triangulación Delaunay, una de las más interesantes por ser aplicable para la resolución de multitud de problemas geométricos que involucran la formación a partir de un arreglo de puntos, una red de triángulos conexos y convexos. Esta condición dice que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo, y por contar con algoritmos bastante eficientes, se usa la implementación dada por la biblioteca de Opencv para la realización de la malla.

El software también permite mostrar la matriz de datos de la superficie a ser reconstruida mediante un mapa de temperaturas, o también llamado 'falso color', donde el nivel de profundidad está asociado a una escala de color que va desde el azul hasta el rojo, donde la altura de cada punto está codificada en falso color. Para lograrlo se normaliza la matriz de datos, posteriormente se le asigna el color azul al valor más bajo y el color rojo al mayor valor; los valores intermedios resultan a través de una función de interpolación que permite degradar el color entre estos dos extremos en función de la altura de cada punto.

3. Resultados

El dispositivo de captura es una cámara web con una resolución de 1920 x 760. Al poseer diferente resolución entre el horizontal y el vertical, los ángulos de apertura (horizontal y vertical) del campo de visión son diferentes y tienen utilidades distintas. En el caso de la horizontal, será utilizado para determinar la distancia mínima que debe existir entre la cámara y el objeto, a fin de poder asegurar que todo el ancho del objeto se encuentre en el campo de visión de la cámara. En el caso de la vertical, será utilizado para calcular la equivalencia entre un píxel y los ángulos que corresponde.

Luego del desarrollo de cada una de las fases del sistema, se procedió a mostrar y detallar los resultados obtenidos en cada una de las fases. Luego del proceso de barrido del objeto se procedió a estimar la nube de puntos dada, las coordenadas cilíndricas del objeto y su posterior conversión a coordenadas rectangulares , el resultado obtenido es un conjunto de puntos, también llamada 'Nube de puntos' como se observa en la Figura 9a. A partir de la nube de puntos es posible generar malla; para ello se utiliza la función Delaunay, implementada en Opencv para la generación de triángulos de la malla. El resultado se puede observar en la Figura 9b.





En la Figura 9 se presenta la reconstrucción del mismo objeto, pero con la ayuda de la librería OpenGL; en este caso la visualización mejora sustancialmente, aunque la matriz de datos es la misma. Esta mejora en la visualización se logra debido a las funciones de interpolación con las que cuenta esta aplicación, al manejo de un *buffer*¹ de profundidad que permite identificar qué parte de la superficie es la más externa, de modo que no se grafique más de un punto de la superficie del objeto sobre el mismo punto del plano de visualización; además, la rotación y la translación del objeto son mucho más rápidas, de tal manera que casi no se percibe retardo entre el desplazamiento del 'ratón' y el movimiento

1 Buffer: memoria de almacenamiento temporal de información que permite transferir los datos entre unidades funcionales con características de transferencia diferentes (Diccionario de la Lengua Española, 2011). del objeto; esto se logra con el almacenamiento de las coordenadas de reconstrucción en una lista previamente llenada y a la técnica de visualización de doble *buffer*, donde se grafica primero en memoria y luego se copia al *buffer* de visualización.



Figura 10. Objeto reconstruido con OpenGL.

Las Figuras 11 y 12 muestran otros objetos que fueron tomados como muestra y su reconstrucción respectiva. En estas imágenes se observa que el sistema permite obtener la forma del objeto y se conserva la relación entre sus dimensiones, lo que se debe al proceso de calibración del sistema. La resolución de reconstrucción obtenida varía para cada uno de los ejes y fue \pm 0,3 mm en dirección horizontal, de \pm 0,1 mm en dirección vertical y de \pm 0.20 en la dirección radial. La diferencia se debe a que la dirección horizontal depende de la resolución de giro de la plataforma; para este caso, 0.51 grados sexagesimales por paso; para la vertical se digitalizó el objeto con 1.920 píxeles, y en profundidad depende del número de píxeles y del ángulo de observación.



Figura 11. Reconstrucción de una jarra en cerámica.



Figura 12. Reconstrucción de una olla de barro.

Los objetos reconstruidos no excedían los 8.0 cm. de diámetro y su altura era inferior a 8.0 cm. Su reconstrucción tardó alrededor de 3 minutos, invirtiendo la mayor cantidad de tiempo en la captura de los datos, debido al movimiento lento del sistema de rotación para evitar los cabeceos de la pieza.

4. Discusión

Una vez realizada la implementación del sistema de reconstrucción 3D se procede a la identificación de los errores presentes en las medidas, para su atenuación en cada una de las etapas de la reconstrucción; uno de los errores está relacionado con la sincronización del sistema de adquisición y rotación del objeto que puede generar vibraciones y movimiento sobre las imágenes obtenidas. Esto trae como consecuencia, pérdida de detalles en los bordes del objeto y suavizado de los mismos en la reconstrucción final.

El sistema óptico de captura de imágenes posee aberraciones y distorsiones ópticas que alteran las dimensiones del objeto; por ende, el proceso de calibración de la cámara es un proceso necesario a fin de reducir la influencia sobre las medidas del objeto. Otra fuente de error presente sobre el sistema es el ruido electrónico que afecta directamente el sensor CCD de la cámara, generado principalmente por el ruido coherente ocasionado por el láser, dado que éste interfiere en la distribución de intensidad y dificulta el proceso de identificación de los puntos centrales de la línea láser adquirida sobre la imagen digital. Estos errores son atenuados mediante algoritmo que permite la restauración de la línea, basado en la información de los píxeles vecinos y el patrón generado.

Dentro del proceso de reconstrucción se evidencia algunos problemas que afectan el funcionamiento del sistema; entre los principales se puede citar: -el ruido generado por el esparcimiento de la luz en los bordes del objeto, que origina dificultades en el proceso de segmentación y produce unos contornos con baja definición; -la no uniformidad en la iluminación de la línea láser, que produce dificultades para binarizar la imagen por métodos convencionales; -la dependencia de la reflexión de las propiedades de la superficie, en especial del color, lo que dificulta la separación de la línea del fondo; -la pérdida de la línea cuando hay variaciones en la continuidad del objeto.

La segmentación de las imágenes usa un modelo probabilístico basado en la máxima probabilidad de encontrar un pixel que corresponde al objeto de interés; este proceso es acumulativo y permite que sea adaptativo en el tiempo. Para mejorar la iluminación del objeto se usó talco para atenuar las diferencias de reflactancia entre sus zonas, y se aplicó filtros digitales a las imágenes, para mejorar la calidad de las imágenes de la línea láser.

Además de la captura de las imágenes, es necesario realizar la estimación de pose que comprende las trasformaciones de traslación y rotación del sistema coordenado basado en el cálculo del eje de rotación. De la misma manera, basándose en los parámetros extrínsecos de la cámara, se puede encontrar la relación entre la medida en píxeles en la imagen y la medida real del objeto. Este proceso de calibración tiene una relación directa con el grado de empalme entre las diferentes regiones de un cuerpo reconstruido.

Una vez realizado el análisis del error detallado de los componentes y su propagación a la imagen final, se realiza un análisis de error sobre la reconstrucción tridimensional de un objeto previamente medido, y se procede a realizar la estimación de error a partir de una comparación con otro instrumento de medida. Para hacer el análisis de error de los objetos reconstruidos, se tomó las medidas físicas del objeto con un calibrador y se comparó sus diferencias. Las figuras de referencia tomadas fueron un cilindro circular, uno rectangular y uno hexagonal. Las dimensiones de los objetos son plasmadas en la Tabla 1.

Objeto	Dimensiones		
Cilindro circular	Radio: 25.10 mm Altura:65.50		
Cilindro rectangular	Lado: 40.20 mm Altura:40.55		
Cilindro hexagonal	Lado: 15.50 mm Altura:35.55		

m 1 1	4 D'		1	C	1	C	
Tabla	1 1)11	nensiones	de	houras	de	reterei	1010
ruoiu	1. 00	1101101100	ne	112 minuo	ne	rejerer	10111

Para el análisis de error se consideró los objetos cuyo contorno eran un círculo, un rectángulo y un hexágono de dimensiones conocidas; los datos obtenidos fueron graficados para los datos reconstruidos para el cilindro circular (ver Figura 13). Debido a la simetría axial del objeto, se procedió a realizar los cálculos en la dirección axial y la dirección transversal.

El procedimiento para el cálculo de error fue realizar proyección de los puntos reconstruidos en el plano XY (Puntos azules de la figura) y figura de referencia a partir de geometría ideal, cuyas medidas fueron obtenidas con un calibrador. Luego se elaboró la diferencia entre el valor medido y el valor de referencia para obtener el valor absoluto, como se muestra en la Figura 13. El valor de error fue calculado a partir de la desviación estándar de las mediciones.



Figura 13. Distancia entre los datos reconstruidos y datos de referencia del contorno circular.

Para el caso del error transversal (a través del eje Z) se procede a tomar las líneas sobre el eje Z que forman el cilindro, también llamadas 'tirillas de reconstrucción'.



Figura 14. Distancia entre los datos reconstruidos y los datos de referencia del contorno circular.

Error en el plano: STD: 0.17

Estas mediciones de error fueron realizadas para las 3 figuras geométricas seleccionadas. El error total se obtuvo mediante la suma de los cuadrados del error axial, y el error transversal y los resultados fueron los siguientes:

<i>Tuolu</i> 2. Errores de los objetos para los 5 objetos reconstruïdos como referenc.	a 2. Errores de los objetos para los 3 objetos reconstruidos o	como referenci
----------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------	----------------

	Error Axial (desviación	Error Transversal (desviación	Error Total (desviación
Objeto	estándar)	estándar)	estándar)
	[mm]	[mm]	[mm]
Cilindro circular	0.11	0.07	0.13
Cilindro rectangular	0.12	0.08	0.14
Cilindro hexagonal	0.13	0.10	0.15

Como se logra observar, el máximo valor de error encontrado en la reconstrucción se cometió en el objeto con contorno hexagonal, lo que se esperaba, ya que es la figura más pequeña a reconstruir y por lo tanto es más sensible a errores, siendo aproximadamente 0.15 mm. Es decir, el sistema puede medir un contorno en un campo transversal de 35.50 mm con un error máximo del orden de 0.15 mm. Para la estimación de la resolución y determinar la eficacia para la detección de cambios sobre la región axial se procedió a añadir cinta adhesiva al contorno del cilindro circular. Se hizo pruebas para 1, 2 y 3 cintas adheridas y superpuestas, a fin de determinar el grosor de la cinta.

	Error Total (desviación	Crosser de la Cinta
Objeto	estándar)	
	[mm]	[mm]
1 capa de cinta	0.18	0.31
2 capas de cinta	0.17	0.60
3 capas de cinta	0.16	0.80

Tabla 3. Errores y cálculo de grosor de la cinta

A partir de la Tabla 3 se puede observar que el valor aproximado de espesor es de 0,3mm, lo cual es razonable, ya que el error total encontrado en el análisis anterior es del orden de 0.15mm. A partir de esta

información es posible encontrar el error: en el eje X es 0.13 mm; en el eje Y es 0.13 mm y en el eje Z es 0.10 mm. La resolución es de alrededor de 0.3mm.

5. Conclusiones

En este artículo se presenta los resultados procedentes del prototipo implementado. A partir de los datos obtenidos se evidencia lo siguiente:

- Se logró diseñar un sistema que realiza mediciones de profundidad mediante técnica de triangulación 3D con la aplicación de herramientas de geometría computacional, procesamiento de imágenes e interpolación, alcanzando un error total de 0.15mm. Se logró estimar el error axial y transversal.
- La presencia de cambios en el contorno del orden de 0,3 mm es fácilmente detectable y medible por el sistema.
- Se logró caracterizar al escáner láser de triangulación con una resolución angular de 0.5 °, así como elaborar un protocolo adecuado de adquisición de datos, demostrando que es posible su aplicación para medición y monitoreo de piezas de mayor escala.

• El sistema implementado permitió realizar la reconstrucción 3D de las muestras utilizadas con una precisión bastante alta, en parte debido a que los objetos eran de dimensiones relativamente pequeñas, lo que permitía su digitalización con un alto número de píxeles; sin embargo, aunque la reconstrucción fue exitosa, se hace necesario un tratamiento previo de la muestra, con el fin de disminuir los errores sistemáticos que pueden alterar su reconstrucción, y mejorar la definición del contorno. Es necesario diseñar una estrategia que permita minimizar el efecto del esparcimiento en los bordes, que no se logró eliminar en su totalidad en este trabajo.

6. Conflicto de intereses

Los autores de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses del trabajo presentado.

Referencias

- Ahmed, M. & Farag, A. (2005). Non metric calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(8), 1215-1230.
- Argüello-Sarmiento, G., Barrero-Pérez, J. y Meneses-Fonseca, J. (2012). Reconstrucción tridimensional de objetos con simetría axial a partir del método de triangulación láser con múltiples sistemas de observación. *Revista UIS Ingenierías 11*(2).
- Castañeda, R. (1994). Interferometría de Speckles. *Revista de la Facultad de Ciencias, 4*(2), Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Cock, J. (2000). El método de la triangulación aplicado en un escaner laser, para objetos tridimensionales. *Revista Universidad Eafit*, 25-31.
- Forest, J. (2004). *New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners* (Tesis doctoral). Universitat de Girona.
- Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3(2), 128-160.
- Kus, A. (2009). Implementation of 3D Optical Scanning Technology for Automotive applications. Recuperado de https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/ PMC3345859/

- Moccozet, L., Dellas, F., Magnenat-Thalmann, N., Biasotti, S., Mortara, M., Falcidieno, B. ... Veltkamp, R. (s.f.). *Animatable Human Body Model Reconstruction from 3D Scan Data using Templates*. Recuperado de http://www.patrickmin.nl/pubs/moccozet04.pdf
- Lam, L., Lee, S. & Suen, C. (1992). Thinning Methodologies - A Comprensive Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Inteligence*, 14(9), 869-885.
- Ledezma, Ó., Patiño, A. & Patiño, J. (2007). 3D Surface Scanner for Fuzzy Objects. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* 2(10), 131-134.
- Real Academia Española. (RAE). (2011). Real Diccionario de la Academia de la Lengua Española, RAE, vigésima segunda edición virtual. Recuperado de http://www. rae.es/rae.html
- Santolaria, J., Aguilar, J., Lope, M., Yagüe, J., Royo, J. y Puertas, J. (s.f.). Digitalización rápida de modelos: métodos, instrumentos, estrategias de digitalización y análisis de la precisión obtenida mediante un sensor láser por triangulación. Recuperado de http://www. egrafica.unizar.es/ingegraf/pdf/comunicacion17058.pdf
- Schnee, J. & Futterlieb, J. (2011). Laser Line Extraction with Dynamic Line Models. Recuperado de https://link. springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23672-3_16
- Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-self TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(4), 323-344.
- Weng, J., Huang, T. & Ahuja, N. (1989). Motion and structure from two perspective views: algorithms, error analysis and error estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11(5).
- Zhang, T. y Suen, C. (1984). A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns. *Communications of the ACM* 27(3), 236-239.
- Zhang, Z. (1998). A flexible new technique for camera calibration. Recuperado de citeseerx.ist.psu.edu/ viewdoc/download?doi=10.1.1.220