

Sistema para el Control de Calidad de Piezas Metalúrgicas a partir de Imágenes 3D

Quality Control System Metallurgical Parts using 3D images

Andrés Felipe Calvo Salcedo¹, Arley Bejarano Martínez², Edwin Andrés Quintero Salazar³

^{1,2} Ingeniero Electrónico, Grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica de Pereira

³ Magíster en Instrumentación Física, Universidad Tecnológica de Pereira, Complejo Educativo la Julita, Pereira, Colombia, equintero@utp.edu.co

Recibido 2/05/13, Aceptado 22/06/2013

RESUMEN

En este documento se presenta el diseño y construcción de un prototipo experimental que realiza el dimensionamiento de piezas metalúrgicas a partir de modelos tridimensionales digitalizados, con el fin de adelantar un control de calidad de las mismas. Los datos entregados por el láser 3D utilizado como sensor, son transformados en una nube de puntos por medio de la plataforma ROS (Robotic Operating System) y procesados con la librería PCL (Point Cloud Library). También se muestran los resultados obtenidos al medir una muestra poblacional de cilindros de gas fabricados bajo la norma NTC 522-1 5ta actualización, los cuales fueron proporcionados por la empresa *Electrigas* de la ciudad de Pereira, Risaralda; notándose que en ningún caso el error en la medición supera el 5%.

Palabras Clave: Control de calidad, nube de puntos, telémetro laser, PCL, ROS.

ABSTRACT

This paper presents the design and construction of an experimental prototype that performs metalworking sizing from digitized three-dimensional models, in order to advance quality control of them. The data provided by the 3D laser, are transformed into a point cloud platform through ROS (Robotic Operating System) and processed with the library PCL (Point Cloud Library). Also shown are the results obtained by measuring a sample of gas cylinders manufactured under the 5th 522-1 NTC update, which were provided by the company *Electrigas* city of Pereira, Risaralda, noticing that in no case the error in the measurement exceeds 5%.

Keywords: Quality control, point cloud, laser rangefinder, PCL, ROS

1. INTRODUCCIÓN

Un escáner 3D es un dispositivo que suministra la información tridimensional de una escena, con el fin de analizar su geometría y color. Este tipo de tecnología tiene la ventaja de proporcionar medidas y características de los objetos sin necesidad de tener contacto físico con la escena; por lo tanto, puede ser de gran ayuda para las empresas del sector industrial, al momento de tratar de garantizar que sus productos cuentan con las dimensiones establecidas por las políticas de calidad.

Actualmente, este tipo de dispositivos es utilizado en arquitectura [1], levantamiento topográfico, reconstrucción de aeronaves [2], simulaciones tridimensionales, medicina [3], [4] y en control de calidad de productos [5], [6], [7]. En la industria metalúrgica, la gran mayoría de las empresas recurren a inspecciones manuales para cumplir los estándares de calidad. Así las cosas, deben realizar la verificación de los productos manualmente y medirlos con instrumentos mecánicos, por lo cual el cálculo de las dimensiones es afectado por la percepción humana y el desgaste instrumental.

Esta situación convierte en pertinente la implementación de un sistema de escaneo 3D que permita la realización de dicha tarea de manera apropiada. Así, las empresas del sector podrían contar con un modelo digital tridimensional del producto con el fin de optimizar el control de calidad, trayendo beneficios y utilidades para la misma, ya que se elimina la subjetividad en la medida. Además, este tipo de ayudas tecnológicas proporcionan herramientas para determinar posibles fallas en las piezas, facilitando la detección y el diagnóstico de inconvenientes en la línea de producción.

Existen diferentes métodos para lograr la adquisición de imágenes en 3D, como lo son: triangulación activa, tiempo de vuelo y diferencia de fase. Estas son técnicas ópticas utilizadas para obtener medidas de distancia, color y otras propiedades de un objeto determinado, por medio de las ondas de luz emitidas por un láser [8]. El método utilizado para el desarrollo del sistema de escaneo 3D presentado en este documento es el de tiempo de vuelo. Este método se basa en la emisión de un pulso de láser hacia el objeto a evaluar, medir el tiempo que se demora el rayo en propagarse, reflejarse en el objeto, y en ser capturado por el receptor, para así por medio de la velocidad de la luz determinar la distancia deseada.

Para la generación del modelo tridimensional se utilizó el telémetro láser UTM30LX de la marca Hokuyo© operado desde el sistema operativo ROS (Robotic Operating System), y para la visualización y el procesamiento de las nubes de puntos (conjunto de datos capturados por el sensor) se recurrió a la librería PCL (Point Cloud Library).

2. METODOLOGÍA

2.1 Hardware

Para la generación del modelo tridimensional, es necesario obtener las distancias x , y , z de los diferentes objetos de una

escena [9], [10]. Un método para lograr este objetivo consiste en utilizar un sensor que entregue las distancias x , y a las que se encuentra un objeto determinado, y por medio de un dispositivo mecánico desplazar la información x , y a través de los diferentes puntos en el eje z para obtener así el modelo deseado. Este procedimiento permite obtener un modelo tridimensional de un objeto evaluado, donde la precisión de su altura z , entendiendo que el sensor es el origen en sus puntos cartesianos, depende de la velocidad con que el sensor se desplace y la perpendicularidad de su movimiento con respecto al plano.

De acuerdo a las necesidades planteadas inicialmente, se optó por utilizar las siguientes herramientas de hardware para el desarrollo del prototipo:

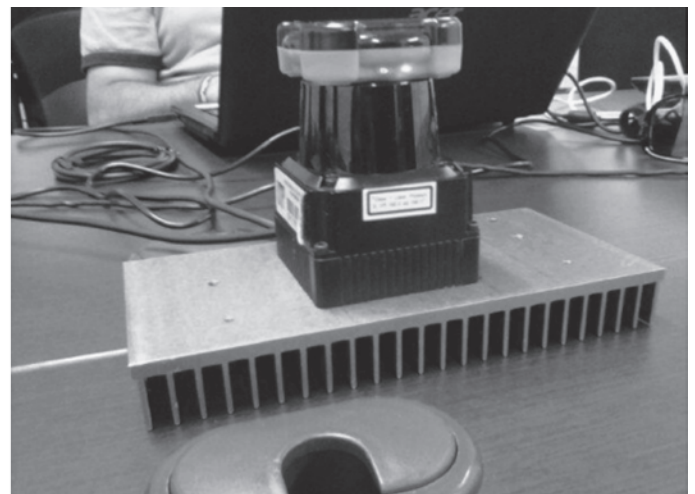
- Láser UTM-30LX de la marca Hokuyo©.
- Sistema electromecánico de desplazamiento.

Sensor UTM-30LX de la marca Hokuyo©

Este sensor se escogió entre otros dispositivos y mecanismos, ya que se trata de un sistema robusto y relativamente poco sensible a los cambios en la iluminación, evitando de esta manera el diseño de un ambiente contralado. El UTM-30LX es un telémetro láser que mide la distancia a la que se encuentra un elemento de su referencia. Este láser es el de mayor gama que posee la empresa Hokuyo©, y realiza el escaneo de un entorno en dos dimensiones entregando el radio y el ángulo al que se encuentra el objeto [11]. Este sensor opera en una longitud de onda de 905 nm, con un rango angular de 270°, en el que se pueden tomar 1080 datos con una resolución angular de 0,25°. Estas medidas se pueden tomar en un tiempo de 25 ms gracias a la alta velocidad de rotación del motor en el láser, 2400 rpm. El sensor en cuestión se puede observar en la Figura 1.

Figura 1. Sensor UTM-30LX de la marca Hokuyo© utilizado en sistema de escaneo 3D.

Figure 1. Hokuyo© UTM-30LX sensor used in 3D scanning system.



La comunicación del láser con otros dispositivos se realiza mediante el protocolo *SCIP 2.0*, el cual fue desarrollado por un grupo de investigadores de la Universidad de Tsukuba, Japón, con el objetivo de obtener mayor flexibilidad y eficiencia [12].

Sistema Electromecánico de Desplazamiento

Como es necesario desplazar el sensor en el eje *z* para obtener el modelo tridimensional, se desarrolló un sistema electromecánico autónomo de un grado de libertad, que garantiza un movimiento constante en el eje *z*, al tiempo que evita la vibración del sensor, con el fin de reducir las perturbaciones que pueden llegar a alterar las medidas realizadas. El sistema electromecánico desarrollado se presenta en la Figura 2. Para lograr una sincronización perfecta entre el algoritmo de captura y la plataforma mecánica de desplazamiento, se utilizó el microcontrolador *PIC16F876A* de la marca *Microchip*® [13], ya que cuenta con un módulo de comunicación *USART*. La función del microcontrolador es recibir un carácter enviado vía serial desde el computador y controlar el inicio y el fin de la adquisición, además de detener el nodo que se encarga de la toma de datos. El diagrama de bloques del sistema con los elementos de hardware utilizados se observa en la Figura

2.2 Entorno de desarrollo

A continuación se describen las herramientas de software involucradas en el desarrollo del sistema de escaneo 3D para el control de calidad de piezas metalúrgicas.

ROS (Robotic Operating System)

Para desarrollar el prototipo experimental es necesario capturar los datos enviados por el sensor y procesarlos, para de esta manera construir una nube puntos. Con el fin de llevar a cabo esta tarea se utilizó el sistema operativo conocido como *ROS* (Robotic Operating System), el cual es un proyecto desarrollado por *Willow Garage*® que surgió ante la necesidad de facilitar la manipulación y comunicación del hardware con algunas plataformas [14]. Su código es abierto y ofrece los servicios que se esperarían de un sistema operativo, tales como la abstracción de hardware a bajo nivel, la comunicación, y la gestión de procesos. También proporciona herramientas y bibliotecas para la construcción, escritura y ejecución de código. Sobre esta plataforma se desarrolló un controlador que captura los datos del sensor *Hokuyo*®, lo que soluciona el problema de comunicación entre el computador y el dispositivo. La Figura 4 presenta una vista general de la plataforma *ROS*.

Figura 2. Montaje electromecánico desarrollado para el desplazamiento del láser en el eje *z*.

Figure 2. Electromechanical assembly developed for the displacement of the laser along the *z* axis.

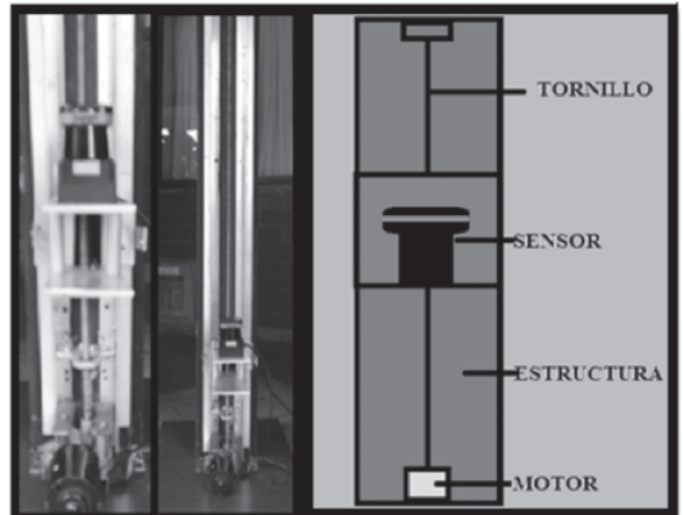
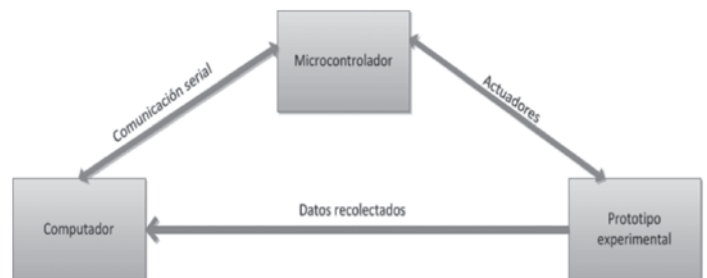


Figura 3. Diagrama de bloques del hardware utilizado en el sistema de escaneo 3D.

Figure 3. Block diagram of the hardware used in the 3D scanning system.



Controlador para el Hokuyo UTM30LX (*hokuyo_node*)

El *hokuyo_node* es un controlador creado por los investigadores Brian P. Gerkey, Jeremy Leibs y Blaise Gassend que facilita la comunicación del sensor láser con el computador por medio del *SCIP 2.0*, protocolo de comunicación con el que funcionan la gran mayoría de los telémetros láser de la marca *Hokuyo*®. Este driver fue desarrollado inicialmente para el modelo *UTM-30LX* [15]. El controlador publica los datos de ángulo y radio de barrido en una línea en 2 dimensiones que se encuentra definida por un ángulo de apertura desde 0° hasta 270°. En la Figura 5 se presenta una captura del proceso de configuración del controlador que permite la comunicación entre la plataforma *ROS* y el sensor láser.

Figura 4. Aspecto general de la plataforma ROS.
Figure 4. General appearance ROS platform.

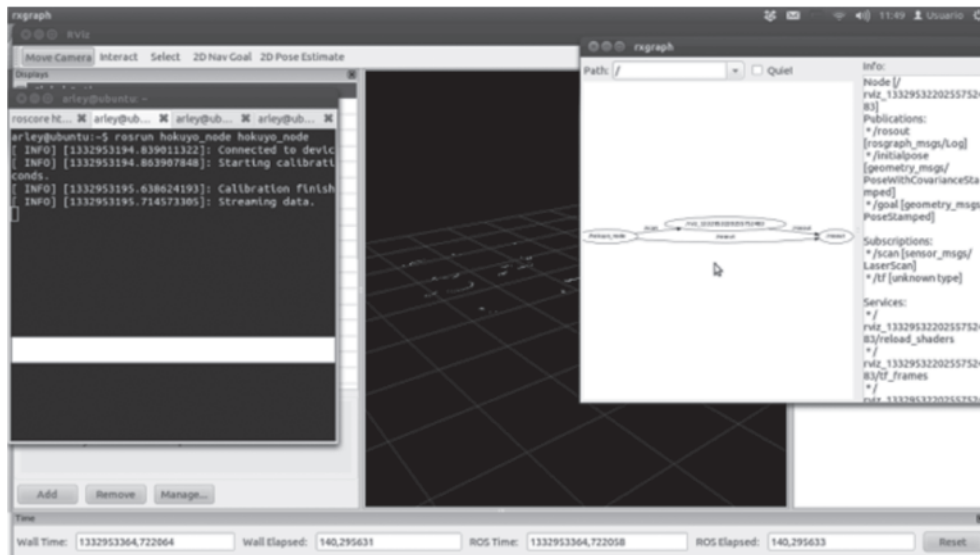
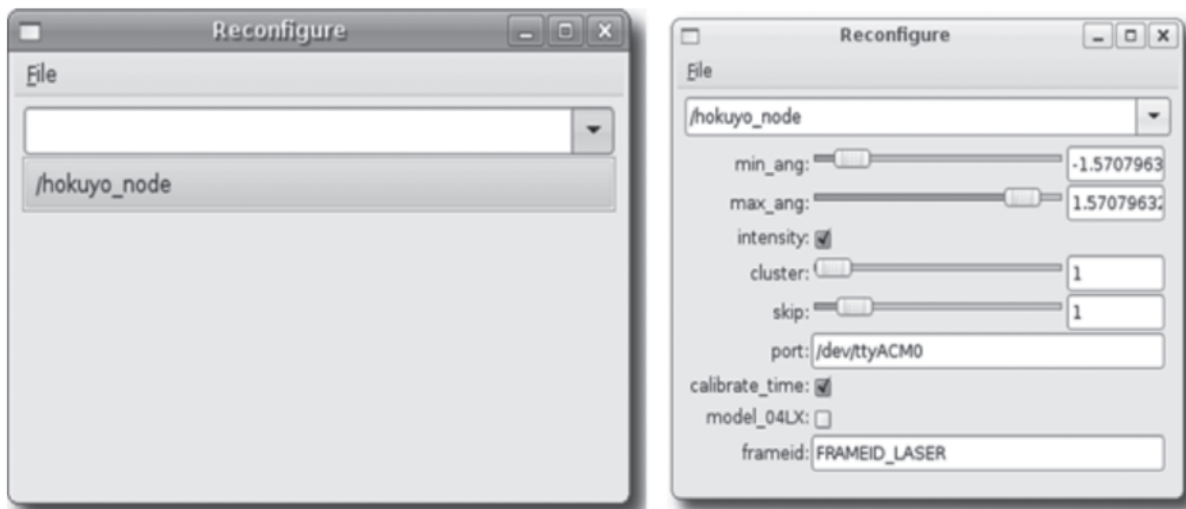


Figura 5. Aspecto general del controlador *hokuyo_node*.
Figure 5. Viewing the controller *hokuyo_node*.



PCL (Point Cloud Library)

Después de obtener la nube de puntos por medio de la plataforma ROS, es necesario procesar los datos con el fin de mejorar la captura y filtrar la información requerida para el cálculo de las dimensiones de la pieza metalúrgica objeto de estudio. Para esta tarea se utilizó la librería PCL, la cual se tra-

ta de una iniciativa a gran escala liderada por Willow Garage, Nvidia, Google, Toyota, Trimble, Urban Robotics, Honda Research Institute y Sandia Intelligent Systems and Robotics; que pretende optimizar el procesamiento de nubes de puntos [16]. Esta librería contiene algoritmos para la aplicación de filtros, estimación de funciones, reconstrucción de superficies, segmentación, entre otros [17], tal como se observa en la Figura 6.

Desarrollo de la aplicación en la plataforma ROS

La plataforma de software para la adquisición y el procesamiento de los datos capturados, se construyó en lenguaje C++ y se compiló en la herramienta *roscpp* de ROS. Esta herramienta consta de dos nodos que se intercomunican entre sí. El primero de ellos se encar-

ga de la comunicación serial y el inicio y final de la adquisición de los datos; mientras que el segundo es quien recibe la información del nodo serial y del *hokuyo_node*. Como se puede observar en la Figura 7, estos dos nodos proporcionan la información necesaria para el correcto funcionamiento del sistema de escaneo 3D desarrollado.

Figura 6. Estructura de PCL.

Figure 6. PCL structure.

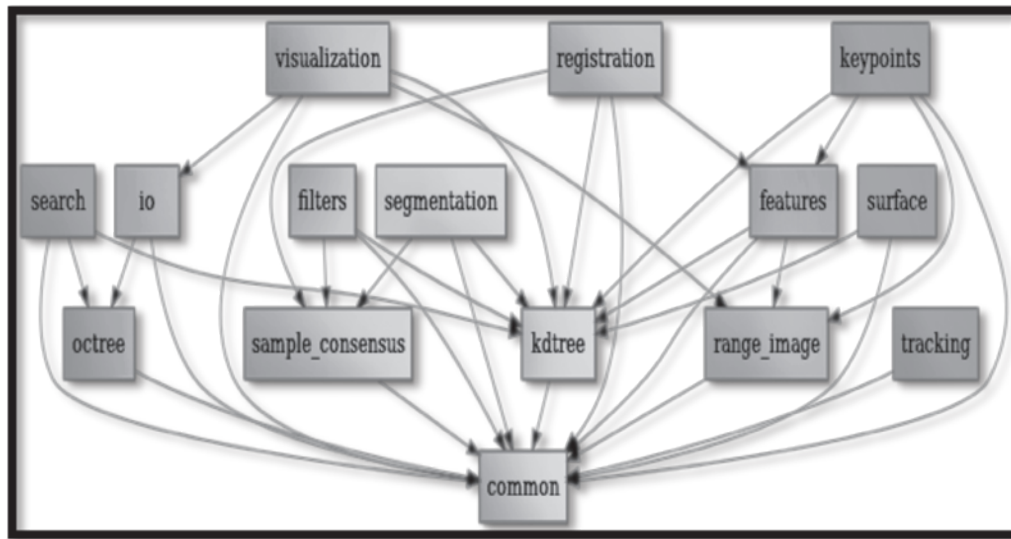
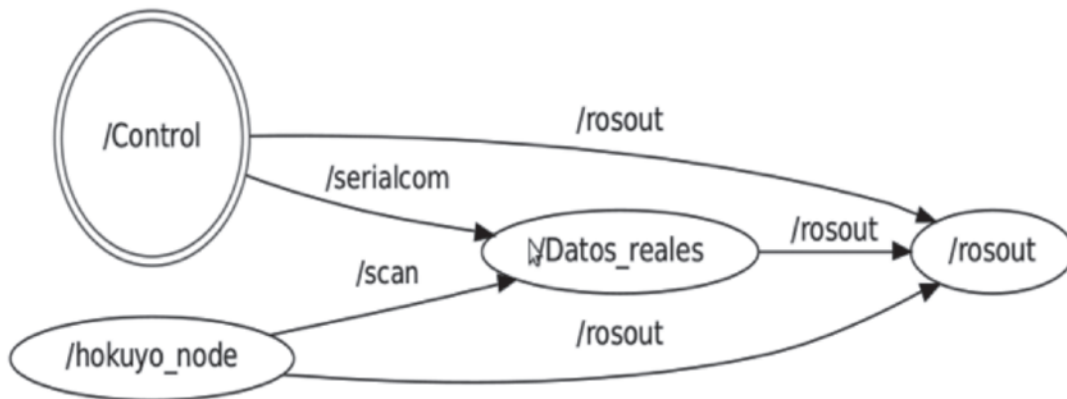


Figure 7. Comunicación entre los nodos del compilador *roscpp*.

Figura 7. Communication between nodes *roscpp* compiler.



El programa principal desarrollado tiene como función capturar los puntos enviados por el telémetro láser y agregar la coordenada z para obtener la nube de puntos deseada. Después de que esta última es procesada y almacenada, se procede a realizar un filtrado por medio de las herramientas PCL

para así obtener mejores resultados en el algoritmo que extrae las medidas de la pieza escaneada. Finalmente, la Figura 8 presenta el diagrama de flujo que describe todas las etapas de software desarrolladas para la construcción del sistema de escaneo 3D, mientras que la Figura 9, la Figura 10, y la Figura 11

presentan en detalle los diagramas de flujo de las aplicaciones de adquisición, filtrado y control, respectivamente.

Extracción de medidas del objeto de interés

Para determinar las medidas del objeto de estudio, se aplica inicialmente un algoritmo para la extracción de los bordes

de la pieza, el cual está basado en la detección de los cambios bruscos de profundidad hallados con la primera derivada de la coordenadas y, z con respecto a x [18]. Después de determinar los puntos que son bordes en el objeto, se consideran las distancias de interés eliminando de la nube de puntos las demás medidas, por medio de un filtrado no lineal [19], [20].

Figura 8. Diagrama de flujo general de la aplicación desarrollada.

Figure 8. Flowchart of the developed application.

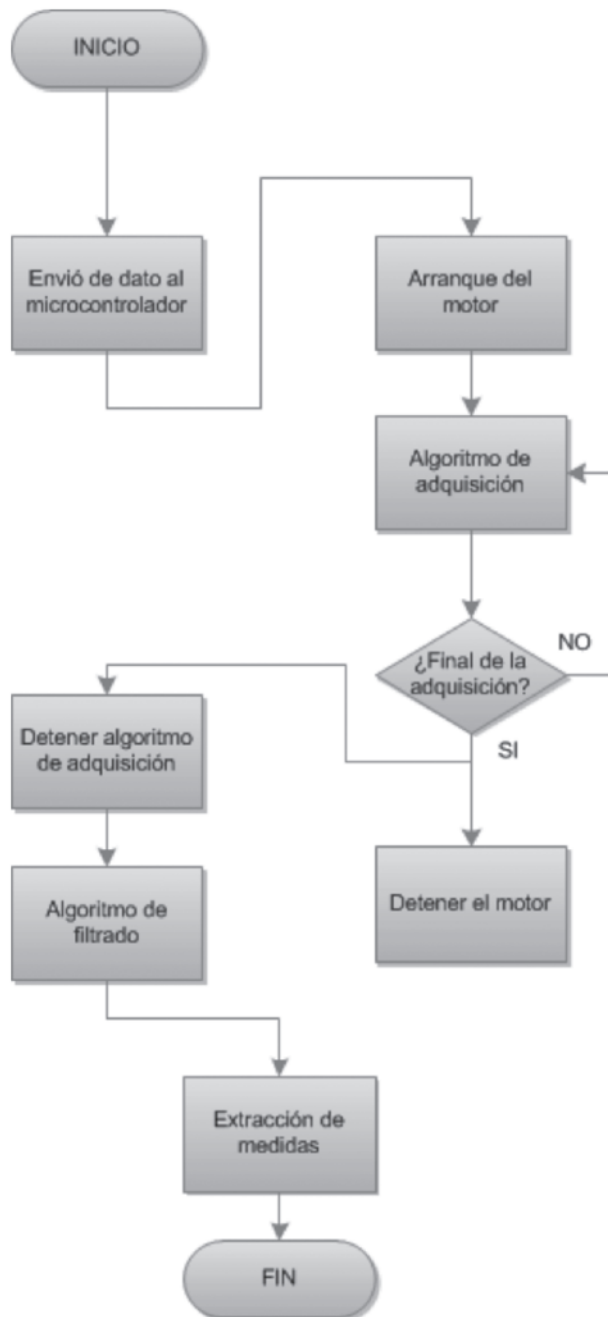


Figura 9. Diagrama de flujo del nodo de adquisición de datos.
Figure 9. Flowchart of the node for data acquisition.

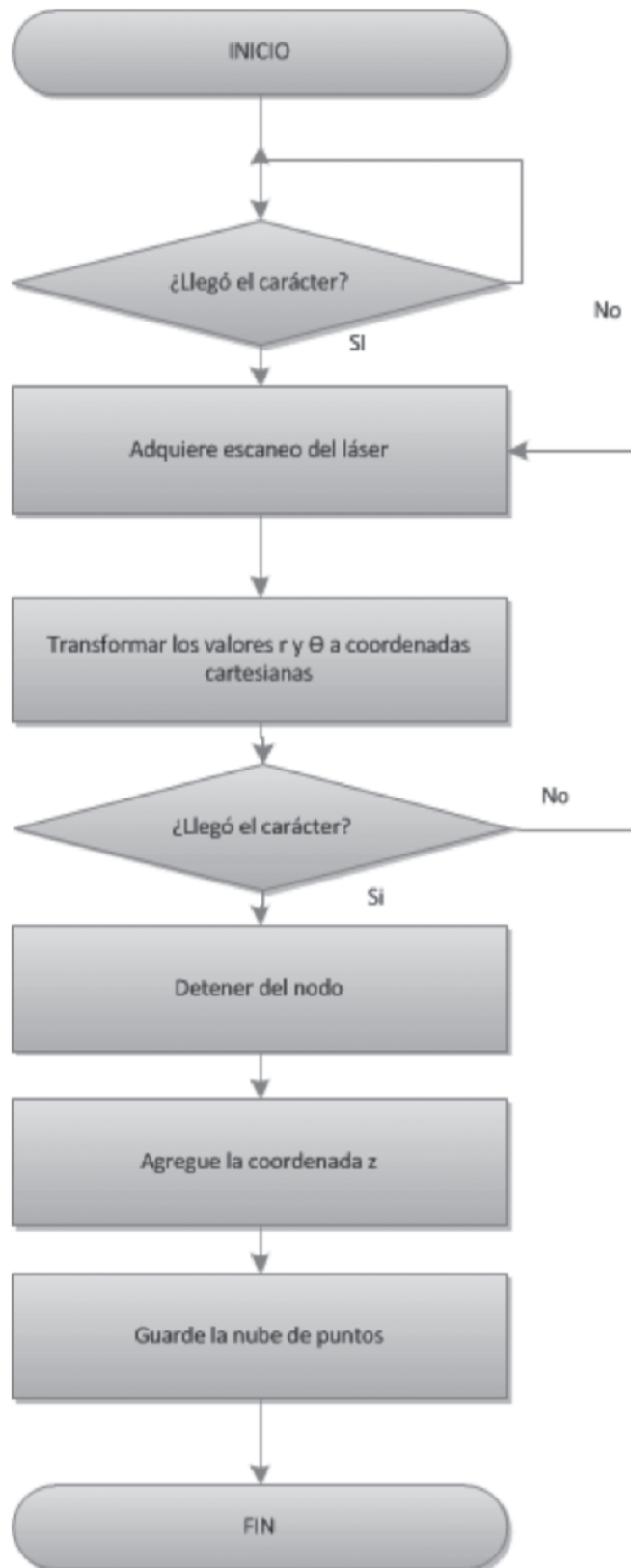


Figura 10. Diagrama de flujo del nodo de filtrado y generación de bordes.
Figure 10. Node flowchart designed for filtering and generating edges.

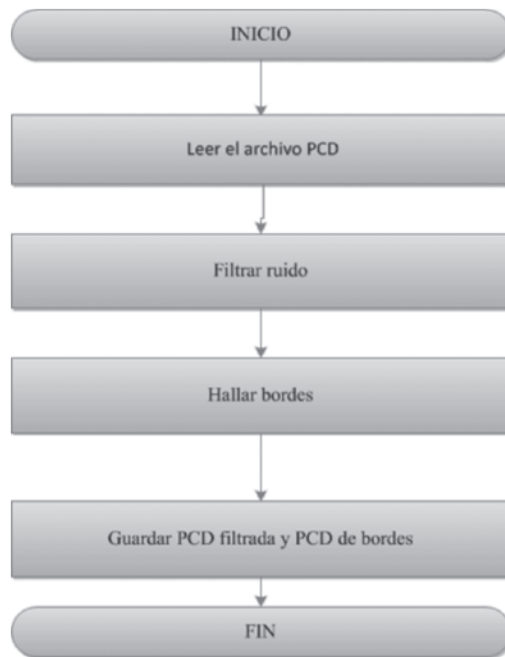
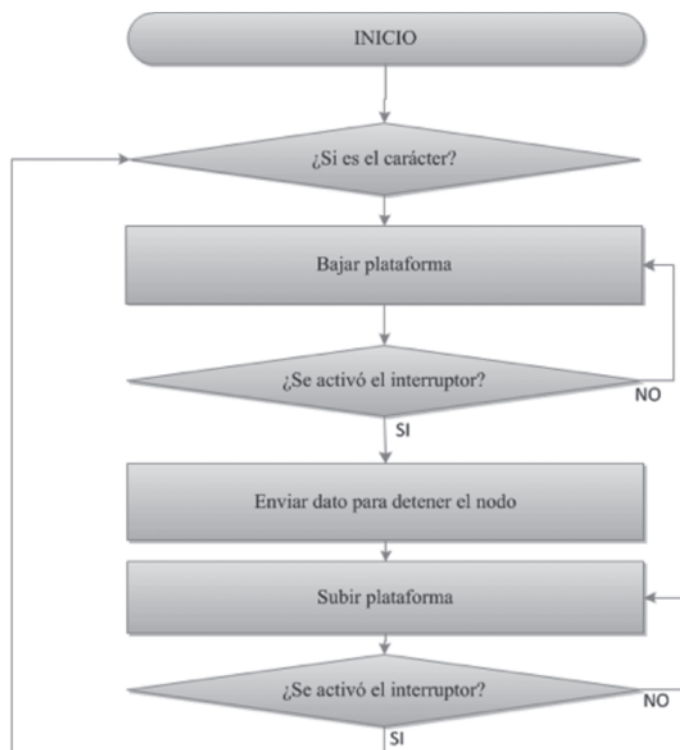


Figura 11. Diagrama de flujo del programa para la activación de la plataforma.
Figure 11. Program flowchart for activation of the platform.



3. RESULTADOS

Para poner a prueba el prototipo desarrollado en el presente proyecto, los autores contactaron a la empresa *Electricas* de la ciudad de Pereira, Risaralda, la cual proporcionó una muestra de 9 cilindros de gas fabricados bajo la norma técnica Colombiana *NTC 522-1*, 5ta actualización.

La empresa facilitó tres ejemplares del mismo tipo, por lo cual se tomaron tres cilindros de 10 lb, tres de 20 lb, y tres de 40 lb, y de cada uno se tomaron tres medidas, obteniéndose un total de 27 nubes de puntos, cada una con un aproximado de un millón trescientos mil puntos. A estas nubes se les aplicó un filtrado estadístico para eliminar el ruido que se presenta en la adquisición. Posteriormente, se aplicó la derivada para extraer los bordes tal como se explicó en secciones anteriores, y, finalmente, con el algoritmo desarrollado se implementó el método para la obtención de medidas.

Por su parte, el algoritmo de filtrado y detección de bordes entregó un valor aproximado de catorce mil puntos, para un total de siete mil distancias del cilindro.

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos, se consideraron las distancias *A*, *C* y *D* suministradas por el fabricante, las cuales se presentan en la Figura 12. Las variaciones máximas tolerables por el fabricante para las dimensiones de los cilindros, se encuentran establecidas de acuerdo a la norma *NTC 522-1* 5ta actualización. Así mismo, en la Figura 13 se presenta uno de los escaneos 3D realizados a los cilindros establecidos como muestra.

Figura 12. Medidas realizadas para los cilindros tomados como muestra.

Figure 12. Measures taken to the cylinders used as a sample.

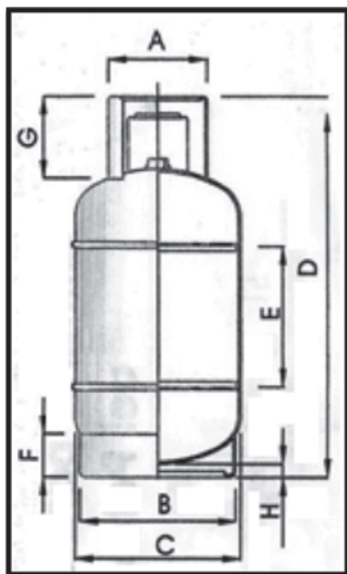
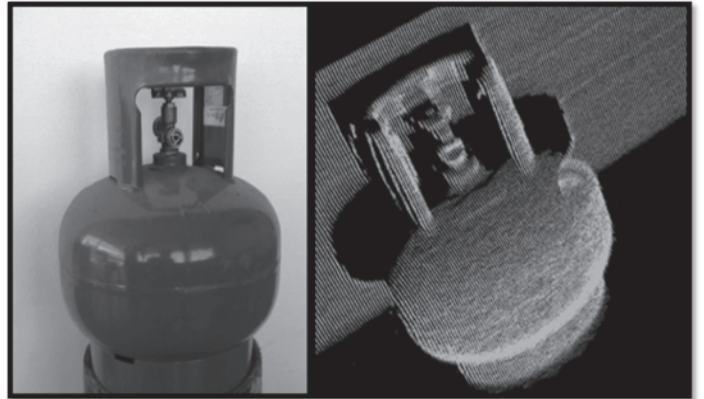


Figura 13. Cilindro de gas objeto de estudio (izquierda) y resultado del escaneo 3D (derecha).

Figure 13. Gas cylinder under study (left) and 3D scan result (right).



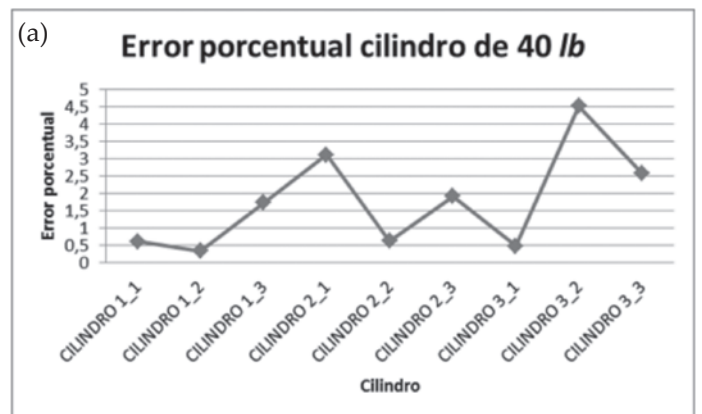
De las siete mil distancias entregadas por el algoritmo para los nueve cilindros escaneados, se tomó una muestra de 130 medidas de cada uno de los 27 cilindros, con el fin de determinar los valores para las distancias *A*, *C* y *D*.

En la Figura 14 se presenta de manera gráfica el comportamiento del error para las diferentes medidas realizadas en los cilindros utilizados como muestra. Allí se observa que el error fluctúa entre 0,03225326 % y 4,5288761 %, con una desviación estándar relativamente baja, por lo cual se concluye que los datos arrojados por el sensor presentan una alta repetibilidad, lo cual agrega confiabilidad al sistema de escaneo 3D desarrollado.

En la Figura 15 se evidencia el comportamiento de la desviación estándar para las distancias medidas en los diferentes cilindros utilizados como muestra. Allí es posible observar que el prototipo entrega medidas repetitivas. La mínima desviación estándar se ubicó en 0,0018552 % y la máxima fue de 0,00581616 %.

Figura 14. Error porcentual de las medidas tomadas a los cilindros de 40 lb, 20 lb y 10 lb, respectivamente.

Figure 14. Error percentage of the measures taken to cylinders of 40 lb, 20 lb and 10 lb, respectively.



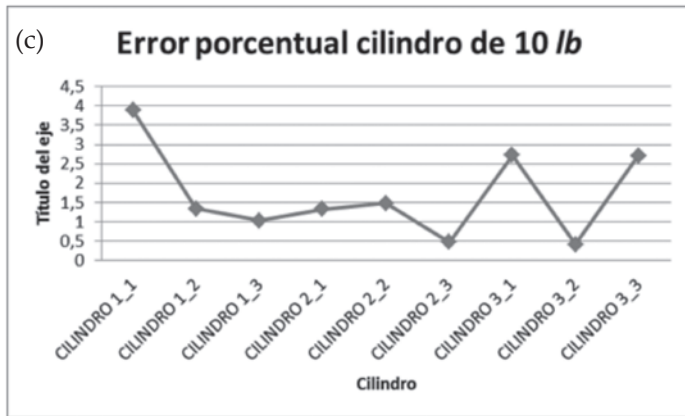
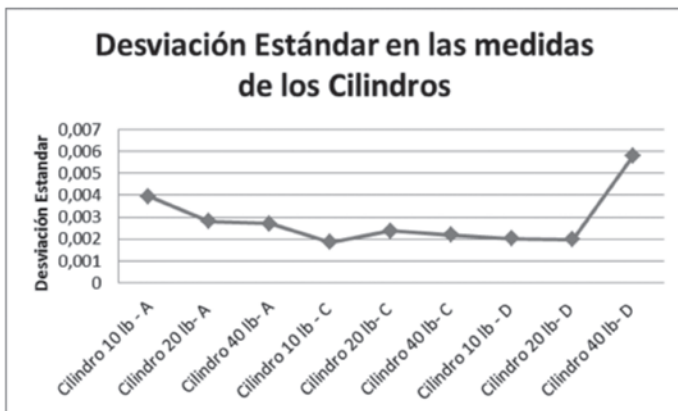


Figura 15. Desviación estándar en las diferentes medidas tomadas sobre las imágenes tridimensionales construidas para los cilindros utilizados como muestra.

Figure 15. Standard deviation in the various measures taken on the three-dimensional images constructed for cylinders used as sample.



4. CONCLUSIONES

- El driver diseñado en la plataforma ROS afecta la cantidad de puntos entregados por el sensor, obligando a determinar experimentalmente el ángulo de apertura. Las herramientas proporcionadas por ROS para la generación de nubes de puntos no se utilizaron debido a que su costo computacional es significativamente alto, agregando retardo en la adquisición y procesamiento de los datos. Por esta razón se desarrolló un proceso más transparente que permite minimizar estas dificultades.
- El método planteado para agregar la coordenada z por medio del movimiento del sensor, consiste en una primera aproximación que permite obtener resultados con una confiabilidad aceptable. Sin embargo, con el fin de incrementar este parámetro, es necesario calibrar el prototipo experimental, ya que las revoluciones por minuto del motor cambian según la tensión de alimentación, la cual naturalmente no es constante. Para solucionar este problema se debe construir en un trabajo futuro una etapa de regulación que cumpla con los requerimientos de potencia necesarios y/o desarrollar un control de velocidad para el motor.
- El desplazamiento de la base para el sistema de escaneo 3D desarrollado es notablemente lento; se sitúa alrededor de 4 cm/s aproximadamente. Por esta razón, el tiempo de medida es deficiente, lo cual conlleva a obtener una nube de puntos con exceso de información, creando una carga computacional alta. Sin embargo, lo anterior garantiza una excelente muestra poblacional para un proceso estadístico, y, al tratarse de un escaneo por líneas, se podría determinar una falla en la pieza (golpes, hendiduras, entre otros). Para mejorar la eficiencia de los algoritmos desarrollados es necesario diseñar una estructura electromecánica más robusta, que mejore el tiempo de escaneo, garantizando los requerimientos enunciados en el diseño.
- Con los datos obtenidos en el análisis estadístico se puede observar que el prototipo experimental desarrollado presenta el comportamiento de un sistema dinámico de variables aleatorias, el cual podría ser estimado para obtener los parámetros intrínsecos, y de esta manera mejorar la confiabilidad en la medida.

REFERENCIAS

- [1] B. P. Mañana, "Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido", DIALNET, no. 5, p. 15-32, Nov., 2008.
- [2] L. Alfredo, P. S. Omar, "Aplicaciones de láser escáner 3D trimble-mensi en estudios de accidentes y de criminología (forensics)", DIALNET, no. 97, p. 70, Nov., 2004.

- [3] A. González, "Aplicaciones de la Estereoscopia". Disponible: <http://www.red3i.es/stereoweb/aplica.htm>
- [4] M. Barrios, H. Ramírez & P. Bonaveri. Segmentación de Imágenes de Tomografía Computarizada en Pacientes que han Sufrido un Accidente Cerebro Vascular. Revista Prospectiva de la Universidad Autónoma del Caribe, Vol. 9, N° 2, pp. 48-53, Diciembre de 2011.
- [5] A. B. Quintanilla, "Aplicación de un escáner 3D a fines didácticos". Disponible: <http://www.cea-fac.es/actividades/jornadas/XXII/documentos/C01D.pdf>
- [6] Z. Sandoval & F. Prieto. Procesamiento de Imágenes para la Clasificación de Café Cereza. Revista Prospectiva de la Universidad Autónoma del Caribe, Vol. 7, N° 1, pp. 67-75, Julio de 2009.
- [7] P. Martínez. Propuesta Metodológica para el Diseño de un Banco de Pruebas para Engranajes Cilíndricos Rectos. Revista Prospectiva de la Universidad Autónoma del Caribe, Vol. 10, N° 2, pp. 64-73, Diciembre de 2012.
- [8] C. Cano, "Telémetro láser 3D con sensor Hokuyo UTM-30Lx", DIALNET, p. 5-13, Feb. 2010.
- [9] M. Cely & A. Díaz. Tomografía Computarizada en 3D para Análisis y Diseño de Prótesis Transtibial. Revista Prospectiva de la Universidad Autónoma del Caribe, Vol. 7, N° 1, pp. 71-578, Julio de 2012.
- [10] C. Díaz & C. Romero. Navegación de Robot Móvil usando Kinect, OpenCV y Arduino. Revista Prospectiva de la Universidad Autónoma del Caribe, Vol. 10, N° 1, pp. 47-52, Julio de 2009.
- [11] HOKUYO-AUT, "Datasheet Scanning Laser Range Finder UTM-30LX/LN". Disponible: <http://www.sentekeurope.com/utm-30lx.html>
- [12] HOKUYO-AUT, "Protocolo de Comunicación SCIP 2.0". Disponible: <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/data/URGSCIP20.pdf>
- [13] MICROCHIP, "Data Sheet PIC16F87XA". Disponible: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>
- [14] W. Garage, "ROS Documentation". Disponible: <http://www.ros.org>
- [15] B. P. GERKEY, J. LEIBS, and B. Gassend, "HokuyoNode-ROS". Disponible: <http://www.ros.org/wiki/hokuyonode>
- [16] W. Garage, "What is PCL?". Disponible: <http://pointclouds.org/about.html>
- [17] A. Salazar, S. L. Gonzalo, and F. Prieto, "Sistema de adquisición de imágenes de rango con base en estéreo-activo", DYNA. no. 153, p. 301-311, Nov. 2007.
- [18] P. Trujillo, "Localización de contornos con precisión sub-píxel en imágenes bidimensionales y tridimensionales". Ph. D. dissertation, Las Palmas de Gran Canaria, Universidad Las Palmas de Gran Canaria, 2004.
- [19] J. D. Franca, "A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view", "IEEE 3-D Digital Imaging and Modeling", vol. 1, p. I- 425-8, Sep. 2005.
- [20] M. M. Muja, D. G. Lowe, "Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration", presented at the Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), Lisbon, Portugal, February 5-8 2009.