

Prototipo para medir volumen de carga terrestre utilizando un modelo de metrología láser

José A. Padilla M.¹
Juan Prado O.¹
Raúl Palacios Z.²
Edith García G.²
Ángel T. Martínez G.¹
Yosafat G. Sámano F.¹

¹Instituto Tecnológico de Celaya,
Departamento de Ingeniería Electrónica,
Av. Tecnológico y A. García Cubas s/n,
Celaya, Guanajuato, CP 38010.
MÉXICO.

²Autotransportes de Carga Tresguerras S.A. de C.V.
Carr. Industrial Celaya-Villagrán km 3.57,
Celaya, Guanajuato, CP 38090.
MÉXICO.

correo electrónico (email): alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx
juan.prado@itcelaya.edu.mx
rpalacioszamora@gmail.com
gomez_tresguerras@hotmail.com

Recibido 15-06-2011, aceptado 09-04-2012.

Resumen

En el presente artículo se describe el desarrollo de un prototipo para medir el volumen de carga con base en una técnica de metrología láser, esta técnica hace uso de una delgada línea de luz láser de longitud de onda de 660 nanómetros que se desplaza y proyecta sobre la superficie de la carga con una potencia máxima de 1.1 mW. Consecuentemente, la línea láser se deforma debido a las variaciones de forma en la superficie de la carga; de esta manera, es posible registrar el desplazamiento de la línea en imágenes capturadas por una cámara de video monocromática. Con el desplazamiento de la línea y los parámetros de la geometría óptica del sistema,

los datos de la altura, ancho y largo de la carga son determinados para evaluar su volumen aproximando estas dimensiones a un ortoedro. Una de las partes relevantes del prototipo es el algoritmo desarrollado en Matlab el cual controla el desplazamiento de la línea láser sobre la carga, controla el proceso de captura de las imágenes de cada línea proyectada sobre la carga, analiza las imágenes y evalúa el volumen de la carga. Las pruebas realizadas del prototipo, diseñado para medir hasta 0.25 m³ de volumen, muestran la factibilidad de utilizar la técnica de metrología láser para medir el volumen de los objetos dado que se obtuvo un nivel de repetitividad arriba de 95% con un margen de error menor a 6%.

Palabras clave: volumen, metrología láser.

Abstract (Prototype for Measuring Land Freight Volume Using a Model of Laser Metrology)

This paper describes the development of a prototype to measure the volume charge based on a laser metrology technique, this technique uses a thin line of laser light wavelength of 660 nanometers and moving projected on the surface of the load with a maximum power of 1.1 mW. Consequently, the laser line is deformed due to variations in the surface shape of the load, in this way, it is possible to register the movement of the line images captured by a monochrome video camera. With displacement of the line and the parameters of the optical geometry of the system, the data of the height, width and length of the load are determined to evaluate these dimensions approximating its volume to a cube. One of the relevant parts of the prototype is developed in Matlab algorithm which controls the movement of the laser line on the load, controls the process of capturing images of each line projected on the load, analyzes the images and evaluates the volume of the load. Tests of the prototype, designed to measure up to one cubic meter volume, show the feasibility of using the technique of laser metrology to measure the volume of the objects was obtained as a level of repeatability above 95% with a margin of error less than 6%.

Key words: volume, laser metrology.

1. Introducción

En México, el comercio total ha crecido a tasas promedio anuales de 12.3% desde 1990, convirtiéndose en el séptimo país exportador; contradictoriamente, cada vez el traslado de carga es más caro en relación con Estados Unidos [1]. Cifras del Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) señalan que en el servicio de transporte de carga la tarifa por kilómetro para movilizar una tonelada de mercancía es 20% más elevada que en otros países [2]. Estos costos podrían disminuirse con técnicas más eficientes de medición del volumen de la carga. No obstante, la mejora en las vías de comunicación que ha logrado México en los últimos años posibilita un amplio desarrollo de la industria del transporte de carga.

Una alternativa para obtener mejores sistemas de medición del volumen de carga es el uso de sistemas de visión, los cuales permiten de forma rápida, segura y confiable, la supervisión de procesos industriales que implican tareas de identificación, evaluación y clasificación de objetos [3]. Sin embargo, los sistemas de visión tradicionales son muy sensibles a los cambios de iluminación y esto hace que su etapa de calibración sea muy tediosa y se lleve a cabo frecuentemente. La aparición del láser ha incentivado el desarrollo de distintas técnicas que han revolucionado la metrología óptica y los sistemas de visión al utilizar el láser como luz estructurada en técnicas de modelado de objetos tridimensionales lo que permite que el sistema de visión sea aún más confiable y que los datos adquiridos sean relativamente fáciles de interpretar [4,5].

Considerando la técnica de metrología láser, presentamos en este artículo el desarrollo de un prototipo con base en un sistema óptico, un servomecanismo para el movimiento de este sistema y un algoritmo desarrollado, utilizando el software matlab para controlar el movimiento del sistema óptico, analizar las imágenes y evaluar el volumen.

El objetivo del prototipo propuesto es medir volumen de carga mediante una cámara monocromática que registra cada línea proyectada sobre la carga para obtener un patrón de franjas o perfiles del objeto. Tanto el diodo láser, que a través de una lente cilíndrica con un ángulo de dispersión de 60° proyecta una línea de luz homogénea, como la cámara CCD se desplazan sobre el eje x (Fig. 1) por medio de un servomecanismo para obtener una aproximación a un ortoedro midiendo el largo, ancho y alto de la carga. Posteriormente, estos parámetros son usados por el sistema computacional para calcular las dimensiones de la superficie del objeto. Esta técnica es utilizada en el sistema propuesto, debido a que el tiempo de recorrido de la carga puede llevarse a cabo en un tiempo promedio máximo de 30 segundos.

El algoritmo propuesto, además de controlar el movimiento del sistema óptico y registrar las imágenes de la línea láser proyectada sobre la carga, realiza las tareas de procesamiento de las imágenes, reconstrucción 3D de la carga y aplicación de técnica de triangulación láser para evaluar el volumen.

2. Distribución de radiación del Láser

La emisión de un diodo láser difiere de otras fuentes luminosas, la radiación electromagnética tiene una distribución e intensidad de campo eléctrico transversal descritas por una función Gaussiana. Esto se cumple para cualquier material de la superficie donde incide el láser, lo único que varía es la cantidad de energía que reflejan las superficies la cual es significativamente abundante en superficies altamente reflejantes y disminuye en aquellas menos reflejantes. Si se considera una lente cilíndrica que difracta el haz de luz láser con las propiedades de distribución Gaussiana, es posible el desarrollo de un sistema de visión que identifique la línea láser que representa el perfil del objeto donde ésta se proyecta. Esta característica posibilita el hecho de que una línea láser pueda ser identificada fácilmente por un sistema de visión aun cuando exista un porcentaje considerable de saturación de sensores en la cámara [6].

Cuando las imágenes de las líneas láser son analizadas con un algoritmo de cómputo los valores de intensidad de éstas son representados como $(x_0, z_0), (x_1, z_1), (x_2, z_2), \dots, (x_n, z_n)$, donde x_i es la posición del pixel y z_i es la intensidad del pixel. Una manera de representar estos valores es mediante una función gaussiana, la cual se define como:

$$f(x) = \frac{N_i}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

Donde, N_i es el área bajo la curva, μ y σ son la media y desviación estándar de la función de distribución de pixeles, respectivamente. Para simplificar la ecuación 1, se consideran los niveles de intensidad de los pixeles normalizados en el intervalo $[0,1]$; consecuentemente, es posible considerar $N_i = 1$ [7-9]. Para conocer la posición de la línea láser se evalúa la media (μ), la cual representa el centro de la función gaussiana y se obtiene utilizando la ecuación 2:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i z_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \quad (2)$$

El valor de μ se pondera con respecto los niveles de intensidad z_i de los pixeles en cada renglón. Este valor se obtiene en todos los renglones de cada una de las imágenes capturadas para obtener el perfil del objeto en la región de proyección de

la línea láser. La desviación estándar (σ) se obtiene a partir de la ecuación 3:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

3. Triangulación láser

La configuración del arreglo óptico de la técnica de triangulación láser considera un dispositivo electromecánico controlado por una computadora para mover sobre el eje x al proyector de línea láser (diodo láser y lente cilíndrica que difracta el spot del láser) y la cámara CCD. El objeto (la carga) se coloca en el plano de referencia (Fig. 1).

En cada movimiento del sistema óptico la línea láser incide en el objeto para algorítmicamente obtener una imagen del perfil que adopta la forma del objeto conforme cambia de posición en el plano de la imagen. Cada línea proyectada sobre el objeto se captura con una cámara de video hasta obtener una serie de imágenes que conforman la sección transversal del objeto. El sistema óptico móvil es útil cuando existen zonas ocultas que desde un punto fijo de la cámara no pueden capturarse.

La relación entre la posición de la línea láser y la superficie del objeto se muestra en la figura 1. En el plano de referencia están localizados el eje y , el eje x y la superficie del objeto representada por $h(x, y)$. Los puntos A y B corresponden a

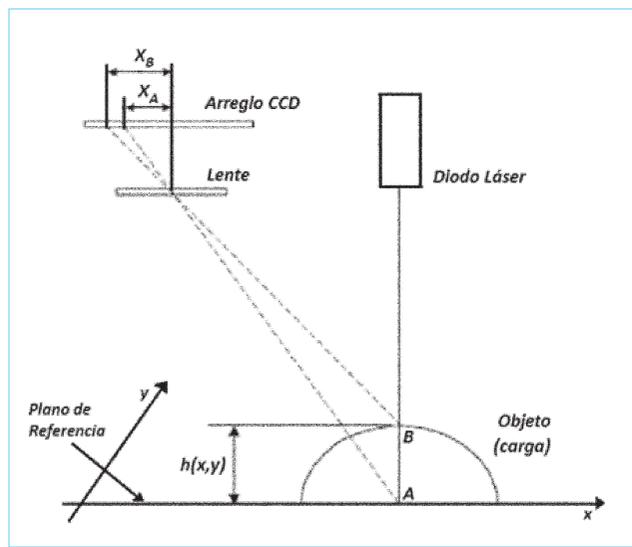


Fig. 1. Geometría del arreglo experimental.

la línea láser proyectada sobre el plano de referencia y sobre el objeto, respectivamente. Cuando una línea láser se proyecta sobre el objeto, ésta se mueve en el plano de la imagen del punto X_A al X_B . Este desplazamiento es representado como:

$$S(x, y) = X_A - X_B \quad (4)$$

$S(x, y)$ es proporcional a la superficie del objeto $h(x, y)$ la cual se determina mediante una aproximación geométrica de la posición de la línea láser en cada renglón de la imagen para así obtener la información de una sección transversal del objeto. Esta posición es obtenida con una resolución de fracción de pixel considerando que los valores de posición y nivel de intensidad de los pixeles en cada renglón de la imagen se aproximan a una distribución Gaussiana representada por la ecuación 1, la cual considera como media (μ) el valor encontrado utilizando la ecuación 2. $S(x, y)$ se obtiene de la ecuación 4, siendo X_A el valor central y X_B la media gaussiana obtenida con la ecuación 2. Con esto, se obtiene el perfil del objeto de la región donde se proyectó la línea láser. Los desplazamientos corresponden al perfil del objeto representados como $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, los cuales se procesan por el algoritmo para obtener una aproximación del volumen del objeto (carga).

4. Metodología

El sistema de visión desarrollado comprende aspectos de hardware para el control del motor que mueve, el sistema óptico y software para la captura y análisis de las imágenes; sin embargo, se presta especial atención a la descripción del software.

La figura 2 muestra la geometría del arreglo óptico utilizado para hacer el barrido de las líneas láser sobre la carga.

Para la proyección de la línea láser sobre la carga, que puede medir un máximo de 0.25 m^3 , se ha utilizado un diodo láser modelo LAS-SNF-XXX-660-35 con potencia de salida de 35 mW y longitud de onda de 660 nm , al diodo láser se acopla una lente cilíndrica con la finalidad de modificar el puntero láser de forma circular a una forma lineal que permita el escaneo de los objetos, la potencia en la superficie de la carga es de un promedio de 1.1 mW sobre el largo de la línea.

Para la captura de las imágenes se utilizó una cámara monocromática tipo USB UI-2210RE INFAIMON que proporciona imágenes monocromáticas de 256 niveles de gris a una resolución de 640×480 pixeles, a la cámara se adaptó un filtro de paso a 660 nm para atenuar la radiación reflejada por los objetos a longitudes de onda diferentes a la del diodo

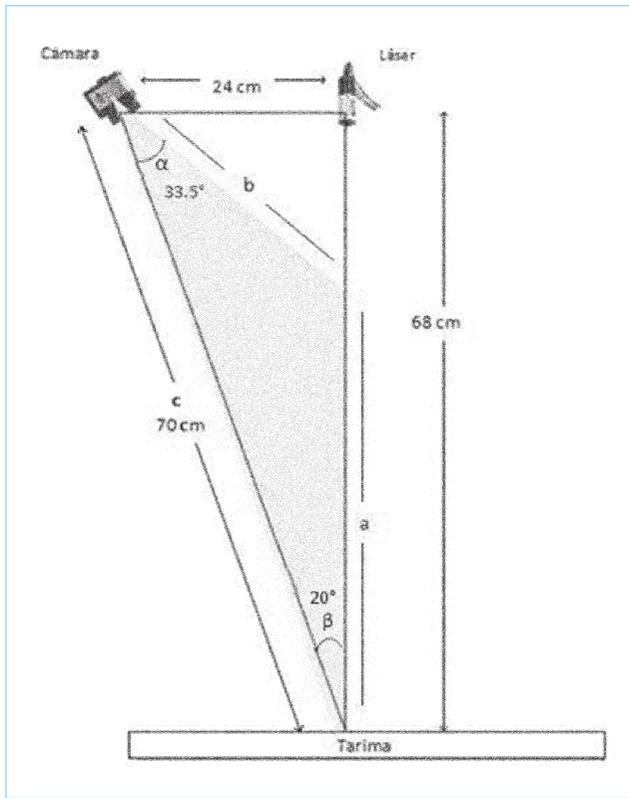


Fig. 2. Sistema óptico para la captura de las imágenes.

láser utilizado, esto permitió obtener imágenes mejor contrastadas que facilitaron su análisis.

Medición de altura, largo y ancho

La cámara CCD se comunica con la PC a través del puerto USB 2.0 y espera una instrucción proveniente del algoritmo para iniciar el proceso de captura de las imágenes. El número de imágenes por segundo que se capturan y analizan en cada medición es limitado por la velocidad de barrido del motor de pasos que mueve al sistema óptico. Este dato es utilizado para evaluar el largo de la carga; esto es, si se considera la velocidad del motor de 1cm/seg y 0.5 cm de distancia entre cada línea, es posible capturar 2 líneas por segundo. Entonces, para una carga de 30 cm de largo, al final del recorrido de la línea láser sobre esta se habrán capturado hasta 60 imágenes. De esta manera, el algoritmo incluyó un procedimiento para detectar cuándo la línea no se deforma y conocer el inicio y fin de escaneo de la carga.

Para evaluar la altura de la carga, se considera la geometría del arreglo óptico (Fig. 2) en la cual se identifica el ángulo

$\alpha = 33.5^\circ$ derivado de la altura máxima del objeto a medir, midiendo la altura de diversos objetos fue posible corroborar que existe una relación lineal entre el ángulo α y la altura en pixeles de los objetos a dimensionar; consecuentemente, fue posible establecer una relación de $0.075^\circ/\text{pixel}$. Para corroborar esta relación, se aplicó un procedimiento geométrico para obtener una expresión para encontrar la altura de la carga y, precisamente, éste se describe con detalle a continuación.

En la figura 2 se forma un triángulo escaleno con los ángulos indicados y con las distancias de la base a la cámara CCD (c), del punto más alto del objeto a la cámara CCD (b) y de la base de la tarima al punto más alto del objeto (a). Para obtener la altura del objeto (a) los ángulos y distancias se relacionan a través de las ecuaciones 5 y 6.

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha \quad (5)$$

$$\frac{b}{\sin \beta} = \frac{a}{\sin \alpha} \quad (6)$$

despejando b de la ecuación 6 y sustituyendo en la ecuación 5 se obtiene una expresión cuadrática para a :

$$a^2 \left[\frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha} - 1 \right] - a \left[\frac{2c \sin \beta \cos \alpha}{\sin \alpha} \right] + c^2 = 0 \quad (7)$$

La ecuación 7 se resuelve para a , para obtener la altura del objeto. Un procedimiento similar fue utilizado para evaluar el ancho de la carga.

La estructura utilizada para la captura de las imágenes de la línea láser proyectada sobre la carga se muestra en la figura 3.

En la figura 3 se muestra la estructura metálica que soporta y desplaza el sistema móvil utilizando un tornillo sinfín acoplado a un motor a pasos que suministra desplazamiento al mismo lo que hace que el soporte de la cámara y el diodo láser realicen un desplazamiento lineal uniforme a lo largo de la estructura. De esta manera, el diodo láser genera un barrido a toda la carga por debajo de la estructura mientras que la cámara CCD captura las imágenes que se utilizarán en la evaluación del volumen de la carga.

El motor que desplaza al sistema óptico cuenta con seis líneas de polarización de las cuales dos son señales de referencia, el desplazamiento está controlado por un microcontrolador PIC 16F84A, el cual tiene comunicación serial con la computadora a través del puerto USB para recibir las instrucciones de inicio y fin de desplazamiento del sistema móvil.

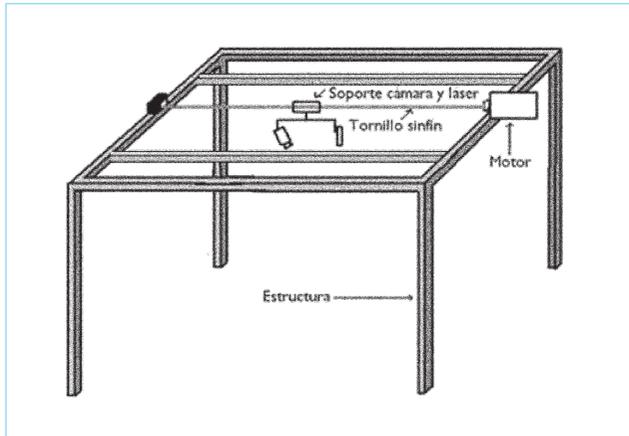


Fig. 3. Estructura metálica que soporta y desplaza el sistema óptico.

A continuación se muestra en pseudocódigo el algoritmo desarrollado para el control de movimiento del motor, captura y análisis de las imágenes y evaluación del volumen de la carga aproximándola a un ortoedro.

Begin

inicia desplazamiento sistema móvil

While línea láser se deforma

Do

 captura n imágenes

Until línea láser no deforma

detiene desplazamiento sistema móvil

largo carga = $n/2$ cm

For $i=1$ ton

 lee i -ésima imagen

 evalúa μ usando Ec. 2

 binariza imagen

 concatena imagen

End

aproxima y exhibe ortoedro

evalúa alto y ancho de carga

evalúa volumen

End

5. Resultados

A continuación, se describen algunos de los resultados obtenidos, éstos se muestran considerando diferentes volúmenes y formas de la carga con la finalidad de ilustrar la forma en cómo el algoritmo propuesto aproxima la carga a un ortoedro considerando las dimensiones de largo, ancho y largo descritas en la sección 3. Además, se muestran los resultados que permiten evaluar el porcentaje de error del sistema propuesto. La figura 4, muestra la forma en cómo con la técnica pro-

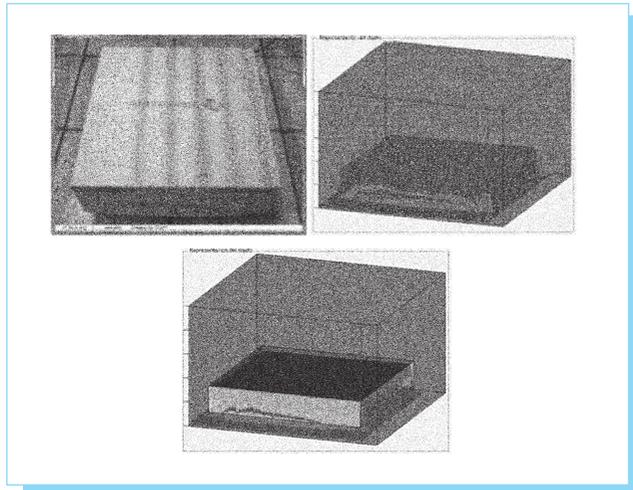


Fig. 4. a) Objeto (carga con 1 caja) original, b) Graficado de los perfiles del objeto, c) Aproximación a un ortoedro del objeto.

puesta se obtiene un perfil 3D del objeto (Fig. 4a); para esta representación 3D, cada imagen capturada genera un perfil la cual es graficada en un plano de tres dimensiones. De esta manera, la primera imagen se gráfica en la coordenada $z = 1$ y la n -ésima imagen capturada del objeto se grafica en la coordenada $z = n$ (Fig. 4b). Posteriormente, sobre la gráfica que contiene los perfiles del objeto se sobrepone el ortoedro correspondiente a las dimensiones del objeto.

La figura 5 muestra los resultados obtenidos de la aproximación a un ortoedro de una carga que incluye 2 cajas apiladas.

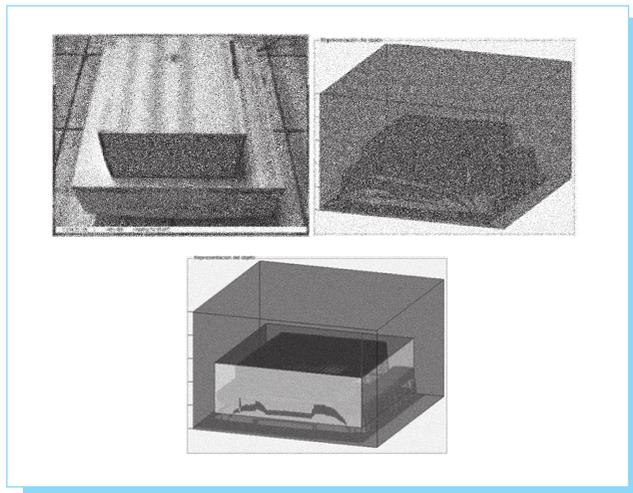


Fig. 5. a) Objeto (carga con 2 cajas) original, b) Graficado de los perfiles del objeto, c) Aproximación a un ortoedro de la carga.

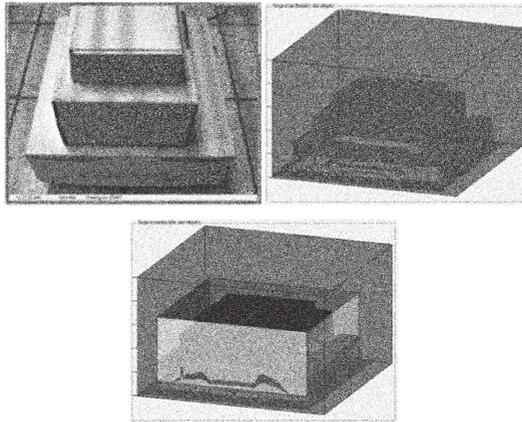


Fig. 6. a) Objeto (carga con 3 cajas) original, b) Graficado de los perfiles del objeto, c) Aproximación a un ortoedro del objeto.

Considerando una carga de 3 cajas apiladas, como se muestra en la figura 6.

De manera similar, se realizaron pruebas con objetos en diferentes posiciones y grados de inclinación. Todos los resultados obtenidos fueron satisfactorios y medidos en un tiempo promedio máximo de 50 segundos, 30 segundos dedicados al escaneo del objeto y 20 segundos de tiempo de ejecución del algoritmo. Es importante mencionar que las franjas claro oscuras que se presentan en las figuras 4a, 5a y 6a corresponden a las sombras generadas por los rieles de la estructura que mueven el sistema móvil (cámara CCD y proyector de línea láser) y el sistema de iluminación del área donde se instaló el prototipo, estas franjas no influyeron en los resultados obtenidos y que se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Medidas de las dimensiones de los objetos obtenidas y porcentaje de error.

Objeto	Volumen medición manual (cm ³)	Volumen medición con sistema (cm ³)	% de error
1	9504.00	9593.94	0.937
2	12096.00	12304.70	1.696
3	24108.00	24500.80	1.603
4	7480.00	7306.10	2.324
5	53792.00	54040.50	0.459
6	59410.95	63174.50	5.957

Margen de error

Una medida que se debe considerar en este tipo de sistemas es el error. Para corroborar el margen de error promedio se midió el volumen de diversas cargas con el sistema propuesto y de forma manual (utilizando cinta métrica). Estos resultados se muestran en la tabla 1.

De la tabla 1 es posible observar que el porcentaje de error puede variar desde 0.459% a 5.957%, porcentajes similares se obtuvieron para objetos con formas muy diferentes a las que es posible representar con cargas de una o varias cajas.

6. Conclusiones

Acorde con los resultados obtenidos fue posible observar que, a medida que los objetos evaluados se aproximan a un ortoedro, menor es el porcentaje de error. De la tabla 1 es posible observar que, a excepción de objeto 4, con el sistema propuesto se obtienen medidas de volumen mayores comparadas con la medición realizada de manera manual, esto se debe a que en la aproximación a un ortoedro del objeto, se obtienen dimensiones de alto, largo y ancho que incluyen volumen que no es parte del objeto a dimensionar.

El material de la carga que se dimensionó no es transparente a la longitud de onda del láser (660nm) por lo que absorbe parte de la energía que incide sobre ésta, variando la cantidad de energía reflejada a los sensores de la cámara CCD. El nivel de absorción depende significativamente de la textura en la superficie de los objetos y del nivel de brillantez de éstos; esto es, objetos altamente rugosos y opacos reflejan poca energía a la cámara CCD y objetos lisos y brillantez reflejan mayor cantidad de energía a la cámara CCD. Se realizaron pruebas con objetos con diferentes niveles de absorción y fue posible constatar que los márgenes de error se mantuvieron en los valores mostrados en la tabla 1 cuando se trabajó con objetos altamente absorbentes; sin embargo, para objetos altamente reflejantes, los porcentajes de error incrementaron significativamente debido a que frecuentemente los sensores de la cámara se saturaban.

Respecto al tiempo de medición del volumen, se estima que éste puede reducirse hasta en un 40% respecto del tiempo total de 50 segundos, esto se debe a que el sistema mecánico utilizado para desplazar el sistema óptico con base en un tornillo sinfín es relativamente más lento respecto del tiempo que requiere la cámara para capturar una secuencia de imágenes.

Finalmente, es importante mencionar que la técnica de proyección de línea láser no requiere del uso de cámaras de

video con características muy específicas, esto posibilita el uso de cámaras a color o monocromáticas pero se debe considerar que la respuesta espectral de estas cámaras considere un nivel de recepción adecuado para la longitud de onda del diodo láser.

Agradecimientos

Este proyecto fue financiado, en parte, por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato y por la Dirección General de Educación Superior Tecnológica. Se agradece además la participación en desarrollo del proyecto de personal técnico y administrativo de la empresa Autotransportes de Carga Tresguerras S. A. de C. V.

Referencias

- [1] www.jornada.unam.mx/2005/05/16/004n1sec.html-19k (28/03/07 07:44 p.m.)
- [2] <http://www.Imco.com.mx/2007/05/37/89w4n3.sec.html>. (27/03/07 6:45 p.m.)
- [3] R. C. González, y R. E. Woods, "Digital Image Processing". 2ª ed., New Jersey: Prentice Hall, 2012.
- [4] A. M. Rodríguez, y V. Rodríguez. "Evaluation of the light line displacement location for object shape detection". *Journal of Modern Optics*, vol. 50, núm. 1, pp. 137-154, 2003.
- [5] J. A. Muñoz Rodríguez, y R. Rodríguez Vera. "Representation of Shape Based on Laser Stripe Projection and Modelling with Bezier approximation", *Journal Lasers in Engineering*, vol. 17 núm. 1, pp. 21-43, 2007.
- [6] W. D. Herzog, M. S. Unlu, B. B. Goldberg, y G. H. Rhodes. *Application Physics Letters. s.l.*, vol. 70, 1997.
- [7] J. A. Muñoz, A. Asundi, y R. Rodríguez Vera, "Aplicaciones de redes neuronales de aproximación a una línea láser para reconstrucción 3D de objetos", *Revista Mexicana de Física*, vol. 50, núm. 5, pp. 453-461, 2004.
- [8] J. A. Muñoz, "Online self-camera orientation base on laser metrology and computer algorithms", *Optics Communications*, núm. 284, pp. 5601-5612, 2011.
- [9] J. A. Muñoz, "Improving surface measurement by adaptive focal length adjustment and approximation networks", *Optics and Laser Technology*, vol. 48, pp. 83-95, 2013.
- [10] J. C. Russ, *The image processing: Handbook*. 5ª ed., Taylor & Francis, 2007.
- [11] M. Mortenson, *Geometric Modeling*. 2ª ed. Wiley Computer Publishing, 1997.
- [12] L. C. Chengen, Q. Cho-Jui, y Yu F. "Shape measurement using on frame projected sawtooth fringe pattern". *Opt. Com.*, vol. 246, 2005.
- [13] R. Klette, K. Schluns, y A. Koschan, *Computer vision: Three-dimensional data from images*. Singapore: Springer-Verlag, 1998.

Latindex

Sistema Regional de Información
en Línea para Revistas Científicas
de América Latina, el Caribe,
España y Portugal

<http://www.latindex.unam.mx/>