



Ingenius. Revista de Ciencia y
Tecnología
ISSN: 1390-650X
revistaingenius@ups.edu.ec
Universidad Politécnica Salesiana
Ecuador

Musuña Toapanta, Juan; Zapata Chancusig, Byron; Oñate Cadena, Luis; Campusano
Nieto, Gonzalo

Diseño y construcción de un robot móvil que permite la obtención de una nube de puntos
del escaneo de habitaciones utilizando láser y webcams

Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, núm. 11, enero-junio, 2014, pp. 53-61
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=505554817007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL QUE PERMITA LA OBTENCIÓN DE UNA NUBE DE PUNTOS DEL ESCANEO DE HABITACIONES UTILIZANDO LÁSER Y WEBCAMS

Juan Musuña Toapanta¹, Byron Zapata Chancusig², Luis Oñate Cadena³ y
Gonzalo Campusano Nieto⁴

Resumen

Se desarrolló un algoritmo y se construyó un *hardware* para la obtención de una nube de puntos en coordenadas X , Y , Z , de un conjunto de imágenes capturadas de una habitación con proyección de láser, las imágenes son obtenidas por medio de la adquisición y procesamiento de imágenes utilizando visión artificial y la teoría de visión estéreo, para un escaneo bifocal por medio de láser y webcams. Mediante la utilización de filtros digitales se logra digitalizar las imágenes para obtener las coordenadas X , Y que representan proyección del láser en el plano de la imagen, por medio de la fórmula de cálculo de profundidades con visión estereoscópica se logra obtener la coordenada en Z que representa la profundidad o distancia de separación entre las cámaras y los objetos en los que se proyecta el láser. Los resultados obtenidos por la reconstrucción tridimensional son semejantes a las habitaciones que se aplicó el escaneo con un margen de error pequeño que representa la disparidad entre puntos correspondientes.

Palabras clave: Nube de puntos, visión estéreo, sistema bifocal, procesamiento de imágenes.

Abstract

We have built some hardware and developed an algorithm in order to obtain a cloud of X , Y , Z coordinates representing a set of images captured inside a room. The images are captured with artificial vision techniques, like the stereo vision theory, based on laser projection, data acquisition and image preprocessing, using bifocal scanning and webcams. In order to obtain the X , Y coordinates over a laser projection plane; the images were digitalized using digital filters. Additionally, in order to obtain the Z coordinates, the stereoscopic formula was used for depth calculation. The Z coordinate represents the distance between the cameras and the laser projected objects. The rooms and objects captured as 3D images using this technique are similar, with a small error margin, to the rooms where the scanning was applied.

Keywords: Point cloud, stereo vision, bifocal system, preprocessing of images.

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica - Universidad Politécnica Salesiana, Egresado.

²Estudiante de Ingeniería Electrónica - Universidad Politécnica Salesiana, Encargado del Laboratorio de Automatización Industrial, UPS, sede Quito.

³Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones – Escuela Politécnica Nacional, Docente, UPS, sede Quito.

^{4,*}Físico, Especialista en Visión Artificial – Universidad Politécnica Salesiana, Docente - UPS - sede Quito. Autor para correspondencia : gcampusano@ups.edu.ec

Recibido: 31-01-2014, Aprobado tras revisión: 11-04-2014.

Forma sugerida de citación: Musuña, J., Zapata, B., Onáte, L. y Campusano, G. (2014). "Diseño y construcción de un robot móvil que permita la obtención de una nube de puntos del escaneo de habitaciones utilizando láser y webcams ". INGENIUS. N.º11, (Julio-Diciembre). pp. 53-61. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

En la actualidad, tanto ingenieros como arquitectos realizan diseños de prototipos en planos CAD de dos dimensiones y en ciertos casos hacen figuras en tres dimensiones; pero estas resultan complicadas y demorosas de realizar; en ocasiones, se pierde la forma del objeto real por lo que se tiene que analizar punto a punto el objeto real para poder representarlo en un *software* de computadora, este problema ha conllevado a que con el transcurso de los años se fabriquen impresoras y escáneres tridimensionales, con los cuales se puede obtener el objeto real a pequeña escala y con la facilidad de manipulación.

Los escáneres tridimensionales tienen el principio de poder mostrar los objetos reales en un *software* de computador, obteniéndoles así en forma digital para ser manipulados y modificados a gusto de las personas que tengan acceso a estos escáneres.

Los diseñadores de escáneres tridimensionales han ido evolucionando y mejorando sus diseños, hasta el punto que en la actualidad se puede tener objetos digitales más aproximados a los objetos reales.

Estos escáneres tridimensionales son muy utilizados en la industria cinematográfica, para realizar la representación digital tridimensional de los actores y actrices y colocarlos en escenarios virtuales.

2. Robots móviles

Los robots con ruedas son diseñados para eliminar las limitaciones de los robots fijos, aquellos son utilizados para tener movilidad en superficies o terrenos complejos a altas velocidades y para el transporte de materiales [1].

Los robots omnidireccionales que poseen tres grados de libertad se mueven en cualquier posición y orientación en el plano (X, Y, θ). Estos utilizan una configuración de cuatro ruedas como se muestra en la Figura 1, esta configuración utiliza un motor por cada rueda para obtener movimientos separados y girar en diversas direcciones o movimientos unidos para moverse en un mismo sentido como un solo sistema.

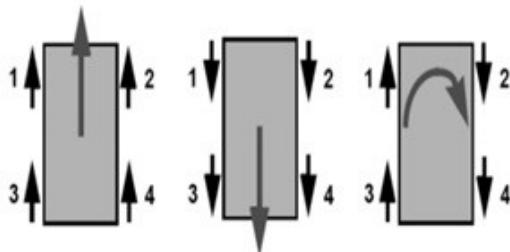


Figura 1. Movimiento del robot [1].

2.1. Odometría de robots móviles con configuración diferencial

Debido a la existencia de una relación entre el posicionamiento del robot móvil y las técnicas de reconstrucción tridimensional se utiliza la técnica de odometría para el cálculo de posicionamiento del robot.

La odometría es una técnica utilizada para la estimación del posicionamiento de robots; es implementada comúnmente con codificadores ópticos los cuales son ubicados en las ruedas del robot para contabilizar el número de pulsaciones por giro de las ruedas que emite el codificador óptico.

La odometría no determina el posicionamiento del robot, ya que acumula errores en la precisión de la medición durante el tiempo de recorrido, estos errores se deben a:

- Los diámetros de la ruedas no son iguales.
- Mala alineación de las ruedas.
- Resolución discreta del encoder [2].

2.1.1. Codificadores ópticos

Son sensores que utilizan un diodo emisor de luz infrarroja y un diodo receptor, el cual capta la luz infrarroja emitida por el emisor y la convierte en pulsaciones (1 o 0 digital) [3].

La presencia o ausencia de luz al diodo receptor, se la controla por medio de una rueda segmentada (perforada) por revolución, como se muestra en la Figura 2.

2.1.2. Ecuaciones de recorrido con encoders incrementales

La ecuación 1, representa el factor de conversión para poder obtener las pulsaciones del encoder en centímetros, tanto de la rueda izquierda y derecha del robot, en esta ecuación se utiliza el radio de las ruedas, las constantes de segmentación por revolución de la rueda y la cantidad de pulsaciones que genera el encoder [3].

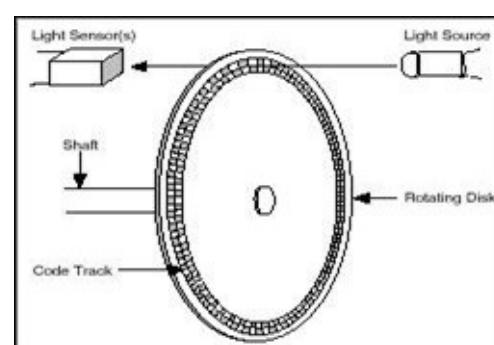


Figura 2. Segmentación de rueda para cálculo de recorrido del robot [3].

$$S = \frac{R \times 2\pi \times C}{PPV} \quad (1)$$

Donde:

S: distancia recorrida (factor de conversión).

R: radio de la rueda.

PPV: segmentación de la rueda.

C: pulsaciones por recorrido.

Para el cálculo de la posición del robot en el plano cartesiano se utiliza las ecuaciones de odometría 5, 6 y 7. Obteniendo la ecuación 8 y 9 que representan el posicionamiento *x*, *y* en el plano.

$$x = \left(\frac{S_{\text{Izquierda}} + S_{\text{Derecha}}}{2} \right) \times \sin \theta + x_0 \quad (5)$$

$$x = \left(\frac{S_{\text{Izquierda}} + S_{\text{Derecha}}}{2} \right) \times \cos \theta + y_0 \quad (6)$$

2.1.3. Ecuación de cambio de dirección con encoders incrementales

Para el cálculo de cambio de dirección del robot se utiliza la longitud entre las ruedas y el número de pulsaciones del encoder en cada rueda.

Para el cálculo de la orientación del robot se emplea la ecuación 1, obteniendo las siguientes ecuaciones de desplazamiento para cada llanta del robot respectivamente.

$$S_{\text{Izquierda}} = \frac{R \times 2\pi \times C}{PPV} \quad (2)$$

$$S_{\text{Derecha}} = \frac{R \times 2\pi \times C}{PPV} \quad (3)$$

Utiliza (2) y (3):

$$\theta = S \times \frac{S_{\text{Derecha}} - S_{\text{Izquierda}}}{2l} \quad (4)$$

θ: ángulo de rotación del robot.

S: distancia recorrida (factor de conversión).

S_{Derecha}: desplazamiento rueda derecha.

S_{Izquierda}: desplazamiento rueda izquierda.

l: longitud entre ruedas.

2.1.4. Posicionamiento del robot en el plano

La orientación del robot móvil se encuentra representada en el plano cartesiano *x*, *y* con un ángulo de inclinación *θ*, como se muestra en la Figura 3.

2.1.5. Traslación y rotación del robot

Los movimientos efectuados por un robot, así como el movimiento de algunas de sus piezas, conlleva a aplicar métodos que requieren de una representación conjunta de la posición y de la orientación, para ello se utilizan matrices que representan la traslación y rotación efectuadas por el robot [4].

La traslación consiste en mover el robot a cierta distancia en una determinada dirección.

Por lo tanto la matriz homogénea que determina la traslación está dada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Matriz de rotación utilizada para calcular la rotación alrededor de los ejes coordenados *X*, *Y* o *Z* son:

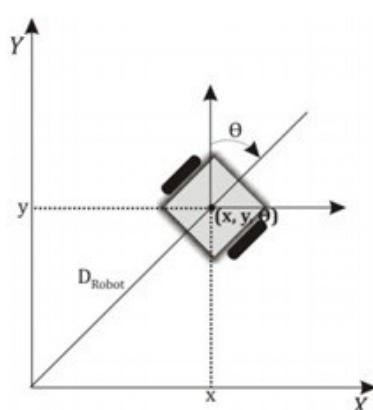


Figura 3. Posición del robot en el plano cartesiano [1].

$$R(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$R(y, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.1.6. Ecuación para el cálculo del ángulo de rotación de las cámaras

Debido a que existe una relación matemática entre el ángulo de rotación de las cámaras y el procesamiento de las imágenes, se utiliza el método de odometría con la ecuación 10 para calcular el ángulo de giro de las cámaras por medio de encoders.

$$\phi = \frac{360C}{PPV} \quad (9)$$

Con la ecuación 10 se obtiene el ángulo de giro de las cámaras, girando sobre un propio eje con un grado de libertad de 360° , las medidas del ángulo de giro dependen de la cantidad de segmentos por revolución de la rueda de sensado del encoder.

2.2. Visión estereoscópica

Es la capacidad que tienen los seres humanos para percibir el entorno a través de imágenes tomadas de dos perspectivas diferentes, izquierda y derecha, combinando similitudes entre ambas para generar una imagen donde se tiene la sensación de profundidad.

En visión artificial se utilizan dos cámaras (sensores de visión) para emular la visión humana, estas cámaras se encuentran separadas a una distancia D ; cabe recalcar que la distancia D , entre cámaras y la distancia Z de las cámaras a los objetos influye en el momento de encontrar similitudes entre ambas perspectivas. El campo de visión representa la medida del área de la imagen que visualiza cada cámara. “Se define a la profundidad de campo como el espacio en el cual se ve el objeto totalmente nítido. Depende de la longitud focal de la lente empleada” [5]. La profundidad es utilizada para medir la distancia existente entre los objetos de estudio y las cámaras del sistema.

2.3. Ecuación para el cálculo de profundidad con visión estereoscópica

Debido a la importancia del cálculo de profundidad para la reconstrucción tridimensional de habitaciones se utiliza la representación geométrica mostrada en la Figura 4.

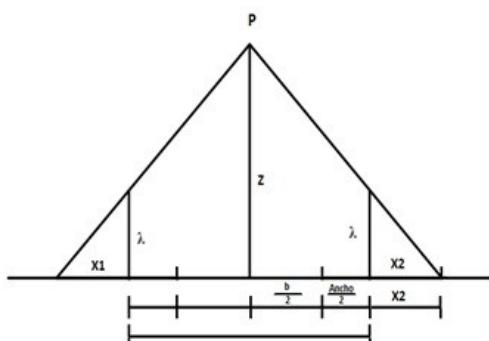


Figura 4. Triangulación para cálculo de profundidad.

De la representación geométrica obtiene una ecuación para el cálculo de la profundidad.

$$Z = \frac{b \times F}{X_i \times X_d} \quad (10)$$

Donde:

b : distancia entre centros ópticos.

F : foco.

X_i : posición izquierda.

X_d : posición derecha.

2.4. Calibración de cámaras

En esta etapa de calibración se regulan las cámaras y se determina la constante F (distancia focal), misma que será utilizada para realizar el escaneo de las habitaciones.

En la Figura 5 se muestra la visualización estéreo de la cámara 1 y la cámara 2.



Figura 5. Par de imágenes.

Para calibrar las cámaras se midió la distancia entre cámaras, 35 cm. Ambas deben ajustarse de tal manera que se encuentren a la misma altura.

En el punto inicial el robot deberá estar a 50 cm de la pared y se procede a retroceder y capturar las imágenes hasta un máximo de 400 cm.

2.5. Disparidad entre imágenes

“Se llama disparidad a la distancia de un pixel en una imagen con su correspondiente en la otra” [6]. La disparidad entre puntos de las imágenes de las cámaras 1 y 2 se calcula utilizando la ecuación 12.

$$d = X_i - X_d \quad (11)$$

Donde:

d : disparidad

X_i : posición horizontal de puntos en la cámara izquierda.

X_d : posición horizontal de puntos en la cámara derecha.

Pequeñas variaciones en la disparidad producen grandes variaciones en la profundidad; en cambio, si el valor de disparidad es grande, pequeñas variaciones en la disparidad no producen diferencias de profundidad, por lo tanto, si el valor de disparidad es muy pequeño o muy grande, la disparidad no brinda información sobre la distancia a la que se encuentra un objeto [4].

Mientras la separación de los objetos a las cámaras tenga una distancia pequeña o una distancia grande los errores de profundidad son mayores. La Figura 6 muestra que la profundidad es inversamente proporcional a la disparidad.

3. Desarrollo del equipo

A continuación se presenta el diseño del *hardware* y el desarrollo del *software*, que intervienen en el proceso de reconstrucción tridimensional.

3.1. Diseño del hardware

El diagrama de bloques que se indica en la Figura 7, muestra el *hardware* usado para el proceso de reconstrucción, el cual se basa en la utilización de un microcontrolador para el control de movimiento del robot y de las cámaras, un computador (computador 1) para la adquisición de imágenes de las capturas de las cámaras tanto izquierda como derecha y un computador (computador 2) para el procesamiento de imágenes y reconstrucción tridimensional.

El microcontrolador es el encargado del control de movimiento del robot, todos sus movimientos se los controla a través del usuario que manipula el computador 2; el computador 1 recibe la información del computador 2 y envía esta información en modo de datos al microcontrolador por medio de comunicación serial a una velocidad de 9600 baudios.

El microcontrolador recibe los datos en forma de cadenas de texto (*String*) y los compara para efectuar el control de los actuadores.

Para el control de potencia de los actuadores se utiliza un puente H con relés, el cual permite obtener 12 voltios DC y un margen entre 20 – 50 amperios de corriente DC a la salida del puente H y a la entrada de cada servomotor.

Los actuadores se encuentran configurados para dar movimiento al robot y para el movimiento rotacional de las cámaras.

Cada actuador consta de sensores (encoders), los cuales captan la segmentación de la rueda y envían una señal cuadrática al microcontrolador, que contabiliza cada pulsación de los encoders y la transforma a números enteros para luego enviar estos datos a través

el puerto de comunicación serial a una velocidad de 9600 baudios.

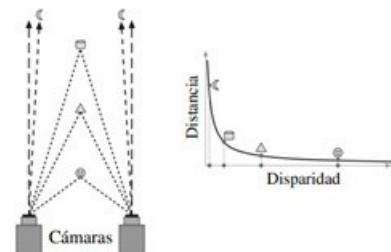


Figura 6. Curva de disparidad vs. distancia [4].

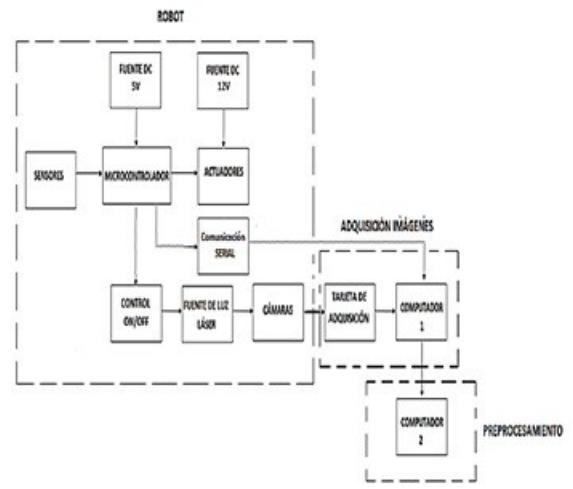


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de escáner tridimensional.

El control de iluminación láser por medio de un control *on/off* permite tener un tiempo de trabajo determinado para que el láser permanezca encendido.

3.2. Diseño del software

Debido a las tres etapas de las que consta el sistema, se realiza tres diagramas de flujo para el funcionamiento del sistema de escaneo tridimensional.

La gráfica que se muestra en la Figura 8, corresponde al algoritmo, empleado para encontrar las coordenadas del haz de láser.

La etapa de procesamiento consiste en leer cada uno de los archivos de imagen, procesarlas individualmente, segmentarlas para separar el haz de láser del resto de la escena; además, se modifica el contraste brillo y gamma para atenuar secciones que no intervienen en el proceso.

En esta etapa se obtendrán las coordenadas de la proyección del láser en la habitación tanto de la cámara 1 como de la cámara 2, se procede a exportar las coordenadas generadas en un archivo de formato vls para su posterior procesamiento.

La gráfica que se muestra en la Figura 9, representa el algoritmo utilizado para generar la nube de puntos.

La etapa de obtención de nube de puntos consiste en leer cada uno de los archivos de coordenadas generados en la etapa de procesamiento de imágenes.

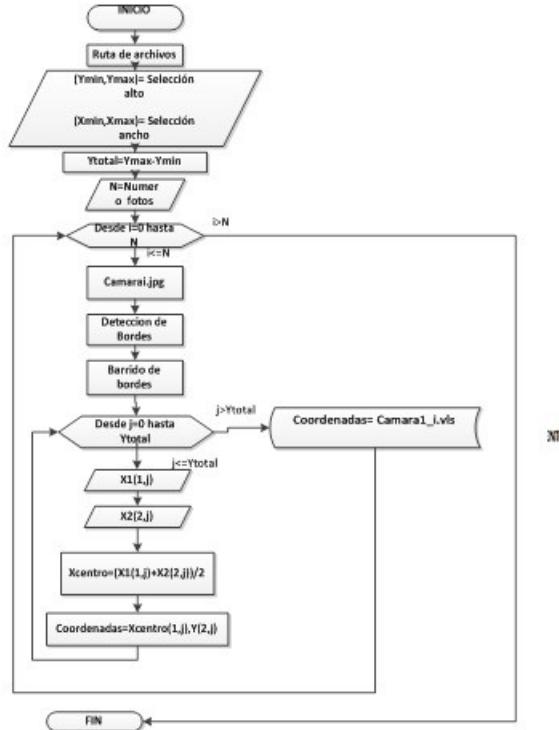


Figura 8. Diagrama de flujo para determinar las coordenadas de proyección del haz de láser.

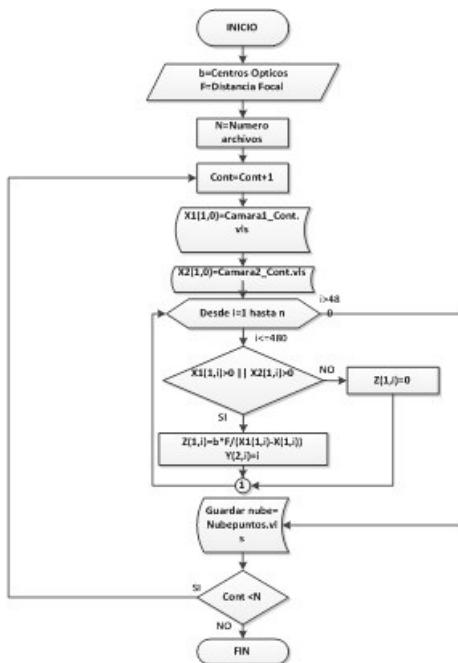


Figura 9. Diagrama de flujo para determinar las coordenadas de proyección del haz de láser.

En el proceso de calibración se calculan: b (distancia entre centros ópticos) y f (distancia focal). Se procede a calcular la profundidad utilizando la ecuación 10.

4. Resultados y discusión

4.1. Error en el cálculo de profundidad

Los resultados del cálculo de errores experimentales de la profundidad calculada con la profundidad medida tiene un error porcentual de 8,68%, tal como se muestra en la Tabla 1, para el cálculo de errores se realizaron 6 mediciones variando la distancia entre las cámaras y una pared; en la Tabla 1 también se presentan los resultados de disparidad entre las cámaras.

Tabla 1. Resultados de error en cálculos de profundidad.

Disparidad (mm)	Profundidad real (cm)	Profundidad exp. (cm)	Error absoluto
143,65	50	77,83	27,83
67,38	100	103,61	3,61
39,56	150	137,77	12,23
25,85	200	181,63	18,37
21,83	225	204,95	20,05
17,2	250	245,31	4,69
12,17	300	323,9	23,9
Suma	1275	1275	110,67
Error porcentual	8,68		

En la Figura 10, se muestra la curva de distancia vs. disparidad, la cual representa los errores existentes cuando la distancia entre el robot y la pared es demasiado corta o demasiado grande.

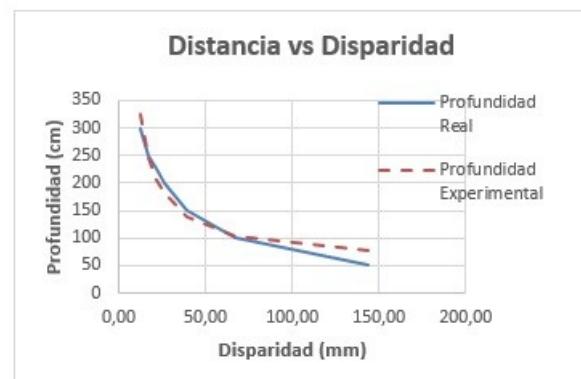


Figura 10. Curva de distancia vs. disparidad de la profundidad real y experimental.

4.2. Error en el cálculo de traslación y rotación

Los cálculos de desplazamiento aplicando la ecuación 1 de odometría dan como resultado un error de 4,25% en la medida de distancia de traslación. La Tabla 2 muestra las distancias tomadas para el cálculo de error absoluto y porcentual de la traslación real vs. la traslación medida.

Al igual que para los cálculos de traslación del robot se utilizó el cálculo odométrico aplicando la ecuación 7 de rotación del robot; el error obtenido en la rotación del robot es igual al 4,87%. La Tabla 3 muestra los valores reales tomados y los valores experimentales para obtener el error absoluto y porcentual.

Tabla 2. Resultados de error en cálculos de traslación del robot.

Traslación real (cm)	Traslación medida (cm)	Error absoluto
100	94,24	5,76
150	169,64	19,64
200	207,34	7,34
300	320,44	20,44
350	358,14	8,14
400	414,69	14,69
500	508,93	8,93
2000	2073,42	84,94
Error porcentual		4,25

Tabla 3. Resultados de error en cálculos de rotación del robot

Rotación real (grados)	Rotación medida (grados)	Error absoluto absoluto
45	40,48	4,52
90	87,23	2,77
135	136,4	1,4
180	185,24	5,24
225	231,46	6,46
270	290,14	20,14
315	335,86	20,86
1260		61,39
Error porcentual		4,87

4.3. Resultados

A continuación se presenta los resultados obtenidos del proceso de escaneo tridimensional aplicado a una habitación de dimensiones $4 \times 3,10 \text{ m}^2$; en la Figura 11 se muestran imágenes capturadas de la habitación en 2D de cada esquina representativa para tener una representación de la habitación; en la Figura 12 se muestra la habitación representada en nube de puntos reconstruida en 3D.

En la Figura 11 se representa la habitación en nube de puntos en tres dimensiones, que se obtuvo al final del proceso de reconstrucción tridimensional, esta nube de puntos se asemeja a la habitación real como

se puede observar al comparar cada una de las imágenes pertenecientes a la Figura 11 con las imágenes correspondientes a la Figura 12.

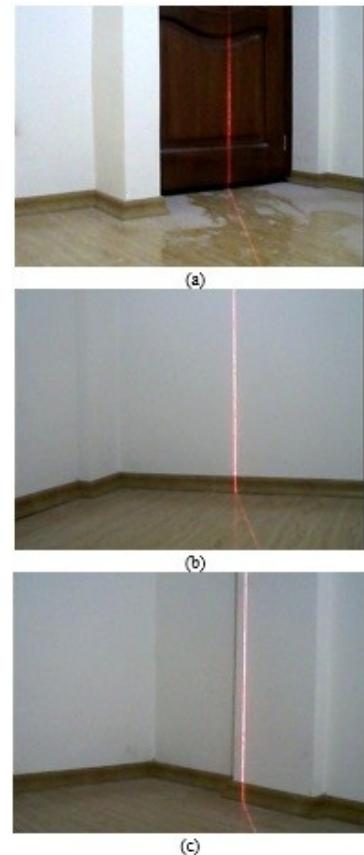


Figura 11. Imágenes 2D sin procesar de la habitación a), b) y c), corresponden a las esquinas de la habitación

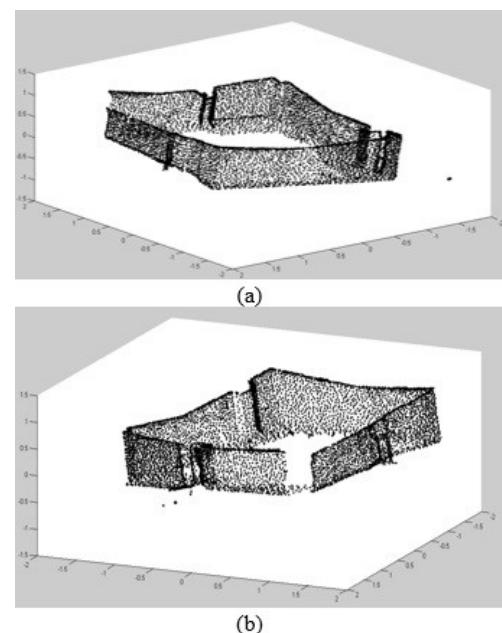


Figura 12. Imágenes 3D de la habitación. a), y b) corresponde a las esquinas en nube de puntos de la habitación

4.3.1. Resultados de traslación y rotación del robot

En la Figura 13 se muestra el resultado de trasladar el robot móvil de su posición inicial a 3.80 m hacia atrás para poder formar las dos primeras nubes de puntos que representan un solo pasillo, la unión de las dos primeras nubes de puntos se obtiene al multiplicar las ecuaciones 8 y 10

La Figura 14 muestra el resultado de rotar el robot móvil; para poder formar la nube de puntos de las partes excluidas que presentan oclusión en la habitación se utilizó el método de rotación del robot, la ecuación de rotación se obtiene al multiplicar las ecuaciones 9 y 10, el resultado se muestra en la Figura 15.

Al unir las tres nubes de puntos al trasladar y rotar el robot se obtiene los resultados de la Figura 16, en la cual se representa de color negro la nube de puntos de la primera captura de imágenes del pasillo donde el robot se ubicaba en la posición (0, 0, 0), la segunda nube de puntos de color azul se obtiene del resultado de trasladar al robot a la posición (3.86, 0, 0) y por último la nube de puntos de color verde se obtiene al capturar las imágenes del pasillo en el proceso de rotación del robot a la posición (3.86, 0, 90).

La nube de puntos de color negro de la Figura 15 representa la parte inicial del pasillo, y la nube de puntos de color azul de la misma figura a la segunda parte del pasillo, que se obtuvo al aplicar la traslación, la nube de puntos de color verde representan la rotación a 90° para escanear el resto de la habitación.

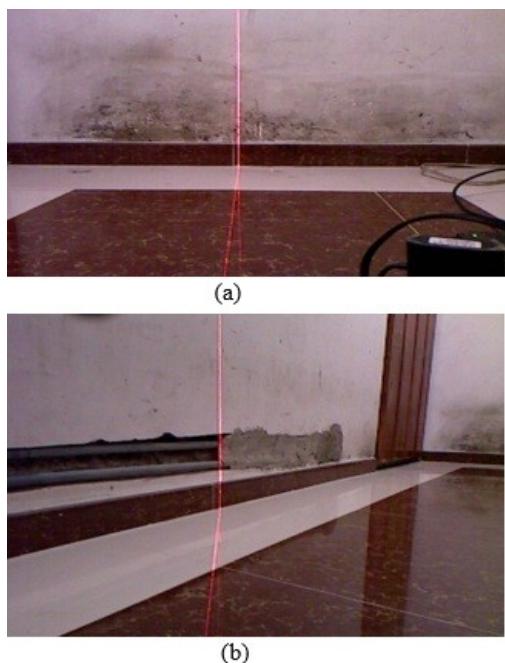


Figura 13. Imágenes 2D del pasillo. a) Representa el robot en su posición inicial, b) representa al robot desplazado 3,80 m.

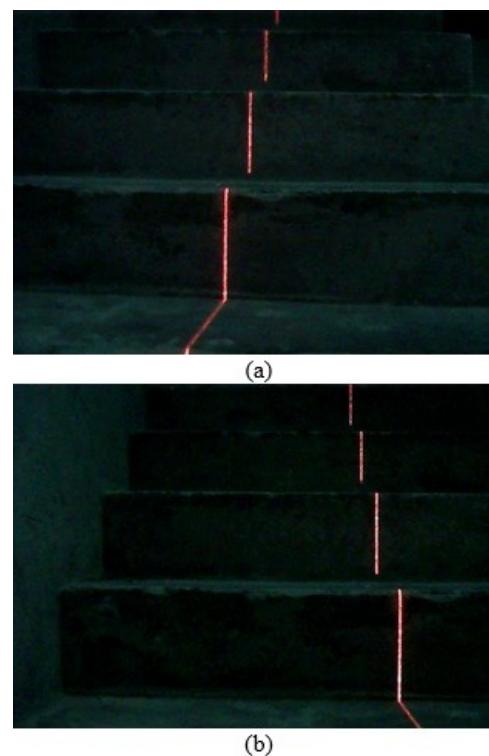


Figura 14. Imágenes 2D del pasillo en nube de puntos. a) y b) Representa la nube de puntos de la rotación en 90° a la derecha.

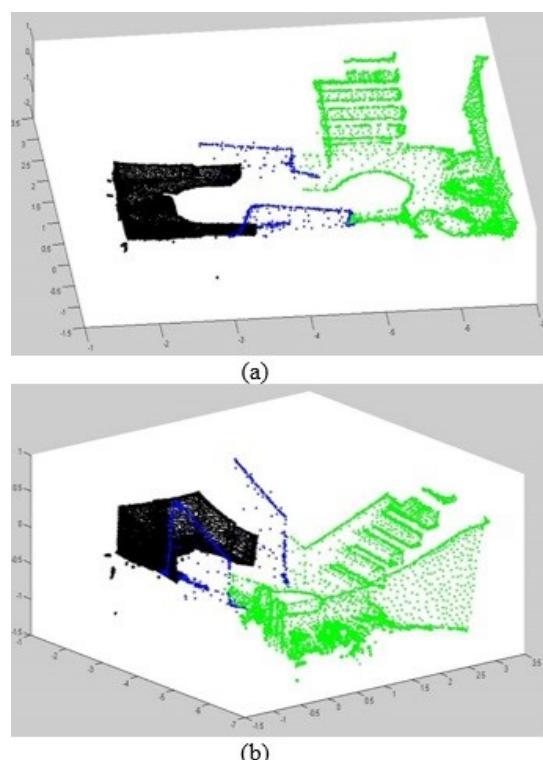


Figura 15. Imágenes 3D del pasillo en nube de puntos. a) y b) Representa la nube de puntos de traslación desde su posición inicial a 3,8 m y la rotación en 90° a la derecha.

5. Conclusiones

Las mediciones hechas durante la etapa de calibración mostraron que el robot móvil alcanza una distancia mínima de 50 cm y una máxima de 4 m por lo cual es recomendable estar en este rango para evitar obtener datos erróneos.

La gráfica de distancia vs. disparidad muestra que la existencia de disparidad entre las cámaras 1 y 2 tienen un margen umbral para el cálculo de profundidades de 50 cm a 4 m, el margen de error del cálculo de profundidad entre estos límites es aceptable.

En el proceso de tratamiento de imágenes la luz de la escena debe influir de manera reducida a la proyección del láser para no afectar la obtención de puntos. La separación horizontal de las cámaras en el proceso de calibración influye ya que a mayor separación se necesita tener más datos para calcular la distancia focal.

El escaneo tridimensional se limita por la visión de las cámaras al capturar la línea del láser produciendo occlusiones o pérdidas de visión de espacios de la habitación, en este caso es necesario el desplazamiento y rotación del robot para incluir secciones no capturadas en la primera etapa del escaneo tridimensional.

Al unir las imágenes tanto de rotación como traslación se puede observar variaciones en el plano de la nube de puntos, este error se produce debido a los cálculos matemáticos que se realizan y al error que se produce al rotar y trasladar el robot, los errores producen un desfase y solapamiento entre la nube de puntos.

Existe concavidad en la nube de puntos que representa la habitación debido al alejamiento que se pro-

duce cuando el robot se desplaza, las imágenes capturadas con las cámaras no muestran el techo de la habitación provoca el efecto cóncavo que se observa en la Figura 12a

Referencias

- [1] D. Mujica, “Navegación autónoma de un robot móvil dentro de entornos real / virtual,” Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias en ingeniería electrónica, Instituto Politécnico Nacional, 2008.
- [2] J. González, “Rutas de navegación y evasión de obstáculos de robots móviles en terrenos exteriores,” Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias de la computación, Instituto Politécnico Nacional, 2012.
- [3] National Instruments. Visión general de un codificador y sus aplicaciones. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/7109/es/>
- [4] T. Pire. Evasión de obstáculos en tiempo real usando visión estéreo. Universidad de Buenos Aires. Argentina. [Online]. Available: http://robotica.dc.uba.ar/public/papers/jar-2012_pire.pdf
- [5] IES-SEP, CENTRE INTEGRAL, MIGUEL ALTUNA, INTEPLAST, INGENING, OM-RON, LAZPIUR, IKUSPE. Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales. [Online]. Available: http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/UD_1_didac_Conceptos_previos.pdf
- [6] B. Cabrera and J. Juárez, “Cálculo de profundidad con imágenes estereoscópicas,” in *Congreso Nacional de Instrumentación*, México, 2013.