

Exploración y dimensionamiento de espacios desconocidos utilizando un robot terrestre

A. Bello-Germán¹, A. Gumeta-López¹, O. Villegas-Olguín¹,
P.J. Escamilla-Ambrosio²

¹ Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco,
México

² Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Investigación en Computación,
México

pescamilla@cic.ipn.mx

Resumen. En este artículo se presenta el trabajo llevado a cabo para realizar una prueba de concepto (PoC) en un ambiente controlado para demostrar la implementación de un robot móvil terrestre en situaciones donde debe de evitar obstáculos. El robot cuenta con una cámara RGBD, una cámara de seguimiento (tracking camera), y un sensor ultrasónico, que tiene como finalidad realizar la construcción de un mapa en 3D, y el registro de la trayectoria del robot terrestre demostrando que es viable su utilización. Además, con la realización de la fusión de sensores mediante la implementación del algoritmo conocido como filtro Kalman, para poder predecir el estado del sistema. Los sensores y demás periféricos son integrados en una tarjeta de desarrollo NVIDIA Jetson Nano, la cual controla los parámetros recolectados, además de procesar los datos (distancias, velocidad, puntos de referencia, etc.) que posteriormente son de utilidad para su uso de la estrategia de navegación desarrollado. Además, se demuestra que la nube de puntos es capaz de mostrar la forma de diferentes objetos haciéndolos de fácil identificación en el entorno, y haciendo posible su uso en situaciones de difícil acceso para el ser humano.

Palabras clave: Fusión de sensores, RGBD, seguimiento, Mapa 3D, robot móvil, exploración, espacios desconocidos.

Exploration and Sizing of Unknown Spaces Using a Ground Robot

Abstract. This article presents the work carried out to carry out a proof of concept (PoC) in a controlled environment to demonstrate the implementation of a land mobile robot in situations where it must avoid obstacles. The robot has an RGBD camera, a tracking camera, and an ultrasonic sensor, whose purpose is to construct a 3D map, and record the trajectory of the terrestrial robot, demonstrating that its use is feasible. . In addition, with the realization of the

fusion of sensors through the implementation of the algorithm known as the Kalman filter, to be able to predict the state of the system. The sensors and other peripherals are integrated into an NVIDIA Jetson Nano development card, which controls the collected parameters, in addition to processing the data (distances, speed, reference points, etc.) that are later useful for the use of the device, navigation strategy is developed. In addition, it is shown that the point cloud is capable of showing the shape of different objects, making them easy to identify in the environment, and making it possible to use them in situations that are difficult to access for humans.

Keywords: Sensor fusion, RGBD, tracking, 3D map, mobile robot, exploration, unknown spaces.

1. Introducción

La robótica móvil ha tenido un gran desarrollo a través de estos años, permitiendo la utilización de diversos robots en muchos campos de la industria con un alto grado de confiabilidad. Desde la década de los 70's, se han planteado las bases para poder llevar a cabo estos avances, las cuales se han plasmado en el libro titulado "Manipulators: Mathematics, Programming and Control", escrito por Richard Paul del MIT [1].

Actualmente, diferentes robots móviles han tenido participación en la navegación de lugares hostiles, como lo es el caso de la luna o el desierto de Mojave [2]. Esto ha causado que su utilización para el reconocimiento de lugares desconocidos sea altamente demandado, facilitando la tarea al ser humano, y no solo eso, sino también se vuelven productos para la realización de tareas complejas, tediosas o de alto riesgo.

Para la contribución de este trabajo, se planteó la utilización de dos cámaras desarrolladas por Intel para la creación de la trayectoria que sigue un robot y la generación del mapa del área que recorre, haciendo la utilización de técnicas como la fusión de sensores para poder tener una mayor confiabilidad en los datos recabados por las cámaras, y así tener una predicción del movimiento del robot, facilitando además la estrategia de navegación.

Este trabajo se estructura en ocho partes las cuales seis (de la sección 2 a la 7) son las que explican el desarrollo del proyecto. Comenzando la lectura sobre el proyecto en la sección número dos, donde se describe la integración de los componentes que se utilizan para la construcción y desarrollo del robot móvil, en la sección tres se tocan las consideraciones de software que se utilizó para la construcción del mapa en 3D.

Para la sección cuatro, se describe la estrategia de desplazamiento que se desarrolló para la navegación en el entorno. En la sección cinco se habla sobre la alineación espacial que se debe de tomar en cuenta para el uso de las cámaras y el sensor ultrasónico, además de mostrar los pormenores matemáticos que se realizaron para la fusión de sensores.

Para la sección seis, se habla sobre las pruebas que se realizaron para comprobar la navegación del robot evitando obstáculos, en donde la nube de puntos es de utilidad para la creación del mapa y la identificación de objetos, así como que es posible conocer su trayectoria. En la séptima sección se presentan las conclusiones y trabajo futuro de esta investigación.

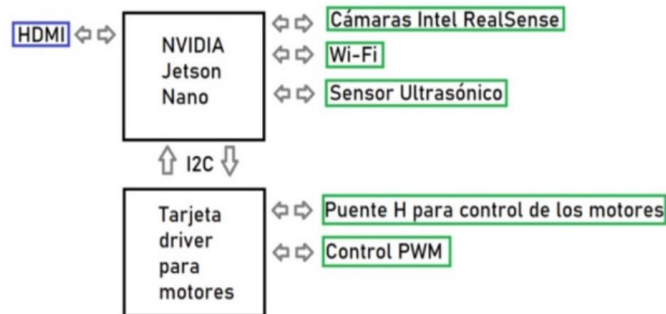


Fig. 1. Diagrama a bloques de la integración de los componentes.

2. Integración de componentes

El robot está conformado por una tarjeta de desarrollo NVIDIA Jetson Nano (SBC, Single Board Computer), la cual tiene como sistema operativo Ubuntu 18.04 LTS. Se tiene un sensor ultrasónico HC-SR04, el cual será de utilidad para la navegación del robot. Cuenta con dos cámaras desarrolladas por INTEL de la gama RealSense: Tracking Camera T265 y Depth D435i [3].

La tarjeta Jetson Nano es utilizada para el procesamiento de la información, control e integración de los componentes periféricos. Además, ejecuta el framework de ROS para la integración de todos los códigos necesarios para poder llevar a cabo en conjunto la navegación del robot junto con la creación del mapa.

La función del sensor HC-SR04 es orientar al robot en espacios estrechos, así como facilitar el algoritmo de navegación de éste.

La implementación de ambas cámaras tiene como fin realizar una nube de puntos y conocer la trayectoria que realiza el robot. La cámara T265 es la encargada de marcar la trayectoria que recorre el robot a través del sensor interno IMU (Inertial Measurement Unit), el cual cuenta con sensores de aceleración y velocidad angular de 3 ejes, que facilita la medición de la posición en la que se encuentra la cámara, otorgando datos en los tres ejes (X, Y, Z) del plano cartesiano.

La cámara D435i realiza la nube de puntos, el cual ayuda con la generación del mapa en 3D, así como la recolección de las distancias que mide con ayuda de un láser interno. Las distancias medidas son entre el robot y un objeto interpuesto en la trayectoria.

En conjunto con las cámaras, el sensor ultrasónico, los periféricos (motores dc, baterías, etc.), se realiza la interconexión de los elementos en la tarjeta Jetson Nano para el funcionamiento apropiado del robot como se muestra en la Figura 1 [4].

Los componentes que se pueden observar en la Figura 1, muestran cómo están interconectados a la tarjeta Jetson Nano y a un puente H, haciendo que sea de fácil entendimiento la conexión a las tarjetas.



Fig. 2. Diagrama a bloques de la transformación de los datos recolectados por las cámaras.

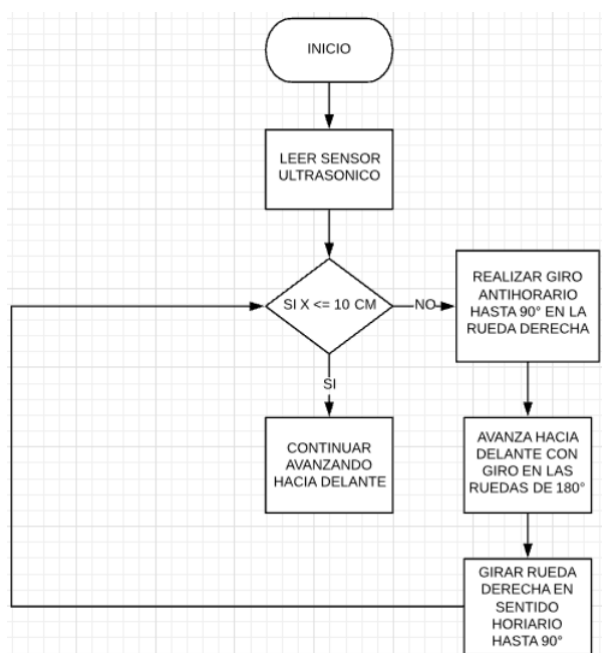


Fig. 3. Diagrama de estrategia de navegación con el sensor ultrasónico.

3. Software

Se utilizó ROS (Robotic Operating System) para la implementación del software encargado del manejo del robot, se emplean los programas Rviz y RealSense Viewer, para la observación de la nube de puntos, y la construcción del mapa en 3D, además de la utilización de los lenguajes de programación en Python y C++, para desarrollar la estrategia de navegación con los datos recolectados por los sensores.

La programación del robot es desarrollada e integrada por el framework llamado ROS Melodic, integrando los códigos desarrollados en Python y en C++ para el control del sensor ultrasónico junto con los motores DC, que tiene como finalidad la corrección del movimiento del robot móvil conforme a la estrategia de desplazamiento en el entorno. El framework es el encargado de abstraer la información y utilizarla para que

el robot pueda moverse libremente, para evitar obstáculos, para la construcción del mapa y la obtención de datos de la posición del entorno [5].

El proceso del framework para la transformación de los datos recolectados por las cámaras se observa en la Figura 2, pero es importante realizar el énfasis que, para poder realizar el rastreo y mapeo con las cámaras, se debe de tener en consideración como será el flujo de la información, que es como se muestra en la figura ya mencionada. Además, es de importancia remarcar que la cámara D435i es la encargada de realizar la construcción de la nube de puntos, y la cámara T265 es la que realiza el posicionamiento del robot.

4. Estrategia de desplazamiento

La estrategia que se muestra en la Figura 3, se encuentra apoyado en el uso de un sensor ultrasónico el cual hace que el robot móvil siempre conduzca cercano a alguna pared u objeto que se encuentre al lado derecho del robot. Lo anterior con el fin de facilitar la navegación del robot, sin la necesidad de desarrollar algún otro algoritmo que requiera de algún tipo de entrenamiento como lo sería con la utilización de machine learning.

Con el diagrama anterior, se asegura que el robot siempre guarde una distancia de 10 cm con respecto a alguna pared u objeto que se encuentre en su lado izquierdo, haciendo que su desplazamiento sea siempre predecible y seguro.

Para realizar la lectura de los datos recabados por el sensor, se implementa un código realizado en Python, el cual recaba las mediciones y realiza las comparaciones pertinentes para poder aproximar al robot a la pared u objeto, además de realizar las correcciones necesarias con la activación de los motores DC para siempre mantener el margen deseado.

5. Alineación espacial y fusión de sensores

Las cámaras se enlazan entre sí para realizar el entendimiento del entorno en 3D que se genera, de igual manera para conocer la posición y la orientación del robot. A la técnica empleada para que este enlace se lleve a cabo se le conoce como Alineación Espacial [3], lo cual implica marcar un punto de referencia estático en el entorno y contar con un cuadro de referencia utilizando las coordenadas 0,0,0 (x,y,z). La Alineación Espacial también tiene como fin que los puntos obtenidos sean transformados a cuadros de profundidad (Depth Frame), y así tener una referencia real del entorno.

Los parámetros para tener en consideración son la traslación (t_x, t_y, t_z) y la rotación, definida como una matriz 3x3, como se muestra en la ecuación 1.

$$a_p = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} b_p + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Los programas que se utilizan arrojan las coordenadas r_{ij} , t_x , t_y y t_z , siempre con unidades en metros [3].



Fig. 4. Identificación de una persona con la generación de la nube de puntos.

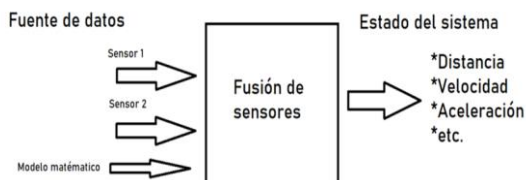


Fig.5. Descripción gráfica de la fusión de sensores.

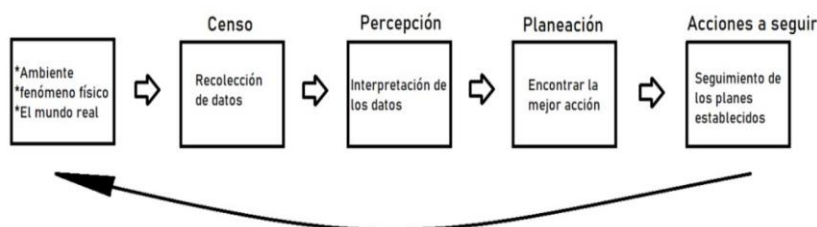


Fig. 6. Diagrama a bloques de los pasos a seguir para la fusión de sensores.

Con la ayuda del láser de la cámara D435i, se escanea el ambiente para construir el mapa en 3D, con esto se mide de manera automática las distancias y la profundidad, así como la distinción a los objetos. En la Figura 4 se observa la distinción de una persona (al centro en azul) con la ayuda de la nube de puntos [6, 7].

Al tener diferentes fuentes de datos la medición de un fenómeno físico se vuelve más complicada la comprensión de los datos, es por esto, por lo que con la fusión de sensores se puede tener un dato confiable y de gran precisión [8] En la Figura 5, se muestra un diagrama a bloques de cómo opera la fusión de sensores.

Al combinar múltiples sensores para la medición de un fenómeno físico como la aceleración o la posición de un objeto, se llevan a cabo diferentes procesos para poder determinar qué acción siguiente será la mejor, además de obtener información más precisa. Los pasos que seguir para llevar a cabo la fusión de sensores se observan en la Figura 6 [9, 10].

Para llevar a cabo la fusión de sensores se necesitan las distribuciones normales de probabilidad de las diferentes medidas que se obtienen al momento de caracterizar los sensores, ya que ayuda a conocer el promedio y la varianza entre los diferentes sensores, además que al utilizar un método como el filtro Kalman para fusionar los sensores, haciendo que se tenga la estimación del sistema de forma recursiva. Para este proyecto se realizaron 100 mediciones en el rango de 20 cm a 1.13 m, (a menos de 20 cm la cámara D435i no detecta eficientemente los objetos). En la Figura 7 se muestra la caracterización de la cámara D435i, junto con el sensor HC-SR04.

Al hacer la comparación de las medidas entre la cámara y el sensor ultrasónico se observó que la cámara es mucho más precisa debido a la precisión del láser para obtener



Fig. 7. caracterización de los sensores.

Tabla 1. Promedio de sensores.

Promedio distancia	Promedio cámara RGB	Promedio sensor ultrasónico
66.6606	65.5757	64.3030

la distribución normal, como se muestra en la Tabla 1. Además, el sensor ultrasónico cuenta con el inconveniente de que se encuentra sujeto al su ángulo de medición, y de la superficie en la que reboten las ondas, ya que la onda debe de incidir directamente sin contar con ningún ángulo ya que medición puede ser errónea.

Con los datos obtenidos de la Tabla 1 se obtuvo la distribución normal con la ecuación 2, como también se observa en las distribuciones normales de la Figura 8.

$$G_{x,\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2)$$

Observando las gráficas que se encuentran en la Figura 8, se notan que son muy similares, indicando que no existe gran variación en cuanto a los datos obtenidos por los sensores respecto con las medidas realizadas con un flexómetro. Entonces se puede decir que se cuenta con una resolución bastante buena en los sensores.

Esta ligera diferencia también puede ser debido a que cuentan con un funcionamiento diferente, también de que el ruido que produce el sensor ultrasónico es mayor al de la cámara RGBD.

El ruido que producen los sensores es de gran importancia en su análisis, ya que pueden producir errores en las mediciones que, en este caso, son las distancias medidas por los sensores.

A partir de la ecuación 2 se obtienen los pesos (w) para cada sensor, para conocer cuál será el sensor que tendrá mayor relevancia al momento de obtener los datos.

Primero se obtiene la varianza de cada sensor teniendo como resultado los que se muestran en la Tabla 2.

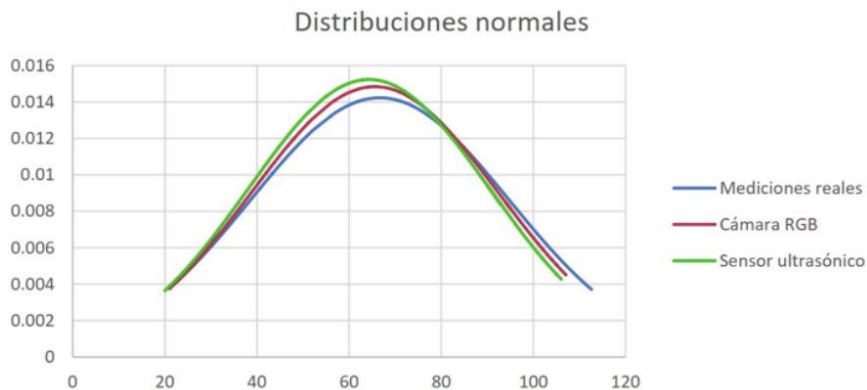


Fig. 8. Mapa en 3D generado con la nube de puntos.

Tabla 2. Promedio de sensores.

Varianza cámara RGB	Varianza sensor ultrasónico
722.593692	685.8460111

Tabla 3. Promedio de sensores.

w ₁ cámara RGB	w ₂ sensor ultrasónico
0.486954	0.513045

Con la siguiente ecuación, se obtienen los pesos para cada sensor:

$$x = \left[\frac{\sigma^2_{z2}}{\sigma^2_{z1} + \sigma^2_{z2}} \right] Z_1 + \left[\frac{\sigma^2_{z1}}{\sigma^2_{z1} + \sigma^2_{z2}} \right] Z_2, \tag{3}$$

donde Z_1 y Z_2 son las correcciones de término, que sirven para que los datos finales no permanezcan con ruido innecesario debido a las mediciones [10].

En la Tabla 3 se muestran los pesos para cada sensor. La media o promedio de la fusión de sensores es $X_2 = 64.9558$. Al utilizar esta forma de fusionar los sensores a partir de los datos recabados, se tiene como fin el solo reconocer los objetos que pudieran estar enfrente del robot.

6. Prueba de funcionamiento

Para comprobar la construcción del mapa en 3D se planteó que el robot realice un recorrido a través de 3 obstáculos, donde sea capaz de evitar los objetos que encuentre durante el recorrido, que se puedan identificar la forma de los objetos, y finalmente

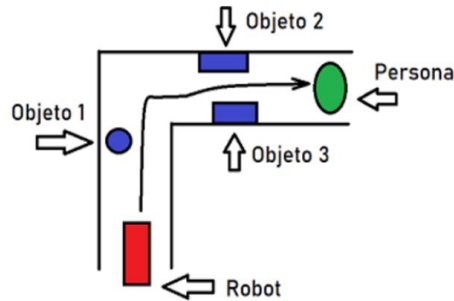


Fig. 9. Ruta de desplazamiento realizado por el robot.

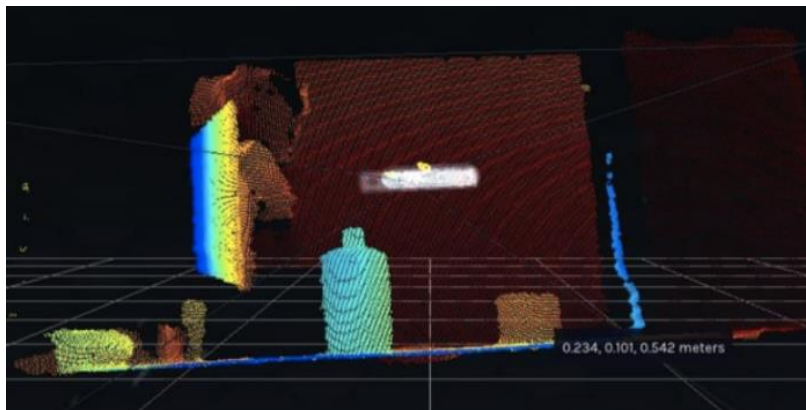


Fig. 10. Posición inicial del robot, mostrando un bote enfrente.

encontrar al final del recorrido a una persona recostada en el suelo. El recorrido planteado se observa en la Figura 9. Este recorrido debe de cumplir con los requerimientos planteados en la estrategia de navegación del cual ya se ha hablado.

Para el recorrido del robot, se planteó la identificación de tres objetos, los cuales son un bote y dos cajas. En la posición inicial colocamos el robot en la posición (0,0,0) donde se muestra en la Figura 10, y en una primera instancia al objeto 1, el cual es un bote que se puede distinguir con vasta claridad con la nube de puntos, además de proporcionarnos la distancia en la que se encuentra en relación con el objeto.

De acuerdo con la estrategia desarrollada, se inicia acercando hacia el lado izquierdo, ya que se encuentra colocado el sensor ultrasónico de ese lado, manteniendo una distancia con la pared de 10 cm, y activando ambas ruedas para avanzar hacia adelante, realizando solamente las correcciones necesarias para mantener la distancia fijada. A continuación, se realiza un giro antihorario en la rueda derecha para dar un giro hacia la derecha, que es como se muestra en la Figura 9, y así continuar su desplazamiento hacia adelante. Como se observa en la Figura 11 el robot avanza generando una línea de seguimiento, la cual muestra con precisión el andar del robot, además se muestra como la cámara RGBD genera la nube de puntos identificando al objeto 2.

Para la continuación del recorrido, se tiene que pasar por en medio de dos objetos (objeto 2 y 3), las cuales son unas cajas. Por las condiciones del recorrido, se permite

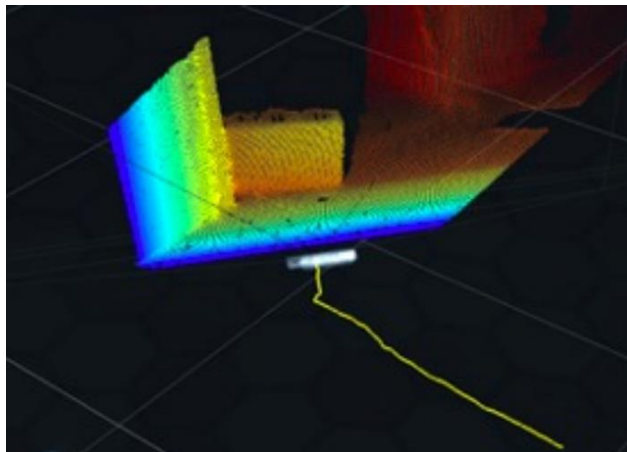


Fig. 11. Desplazamiento del robot, mostrando su trayectoria y un segundo objeto enfrente del robot móvil.

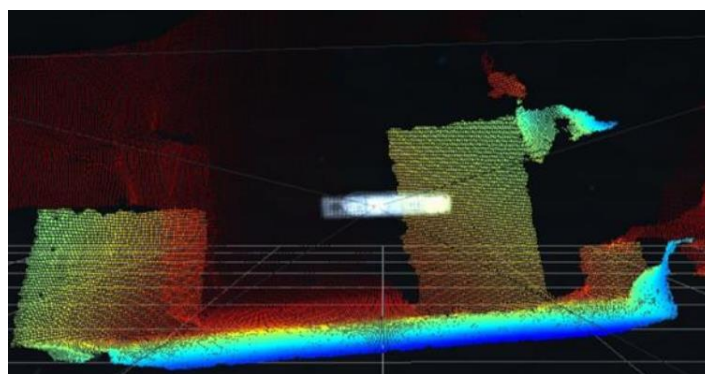


Fig. 12. Después de realizar el giro hacia la derecha, se pueden observar los objetos 2 y 3.

que el robot pueda pasar con titubeos entre los dos objetos, ya que tiende a alejarse del objeto 2, acercándose demasiado al objeto 3.

Después de cruzar por los objetos 2 y 3, los cuales se observan en la figura 12, el recorrido prosigue con ajustes menores hacia delante, y regresando a la tendencia de mantener la distancia con la pared. En la instancia final del recorrido, se encuentra a una persona recostada en el suelo, simulando que se encuentra inconsciente. Se puede verificar que con la nube de puntos y la línea de trayectoria es posible identificar objetos con vasta claridad, además de conocer su posición como se observa en la Figura 13.

7. Conclusiones y trabajo a futuro

El robot móvil terrestre que se desarrolló a través de la implementación de un sensor ultrasónico y cámaras (cámara tracking y cámara RGBD), que hacen posible conocer

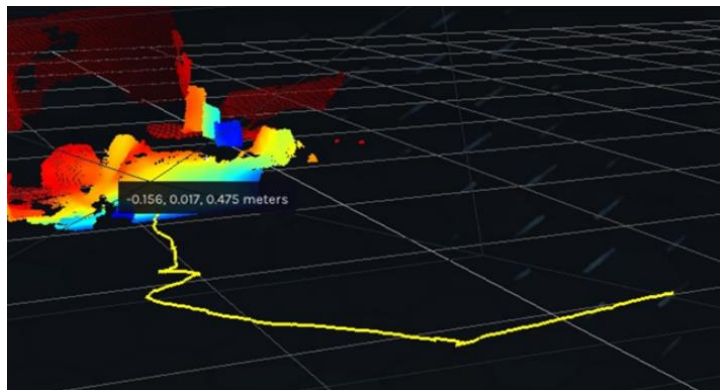


Fig. 13. Desplazamiento del robot, mostrando su trayectoria.

el entorno de forma gráfica, y poder conocer una ruta libre de obstáculos para desplazarse. La cámara RGBD demostró que es capaz de crear un mapa en 3D mediante la nube de puntos, y con la cámara tracking se puede seguir la línea de desplazamiento, siendo posible conocer la localización exacta de algún objeto de interés, además de arrojar una imagen con objetos de fácil reconocimiento para el ser humano.

Un reto constante en la realización del robot móvil es conocer la ubicación del robot, y tener la certeza de que su desplazamiento es realizado conforme al plan, es por eso por lo que con la implementación de la fusión de sensores a través del filtro Kalman, el robot tiene una mejor captación de la información que es obtenida del entorno donde se encuentra desplazándose, permitiendo un mejor entendimiento de los datos. El robot tiene un desplazamiento mucho más fluido, ya que las señales se encuentran en constante recursividad, haciendo que sus mediciones sean procesadas en tiempo real, teniendo la capacidad de hacer las correcciones necesarias en el momento, y prediciendo un posible movimiento con los datos obtenidos.

En cuanto a la programación, la tarjeta Jetson Nano solo soporta la versión de 18.04 de Ubuntu, reduciendo la utilización de librerías que se han desarrollado anteriormente, siendo así retrasado el desarrollo del robot móvil, cuando el tiempo con el que se cuenta es muy poco. Las diferentes herramientas que se han desarrollado para versiones anteriores no funcionan para esta versión del sistema operativo de Linux, haciendo que muchas de las cosas ya existentes se deban de comenzar desde cero.

Una mejora a futuro es el de otorgar al robot la posibilidad de tomar alguna decisión con base a los datos que está recabando (Inteligencia artificial o machine learning), para mejorar la navegación del robot, ya que, con la utilización del sensor ultrasónico, el desplazamiento se ve entorpecido por los múltiples ajustes que se deben de realizar para evitar los obstáculos que se encuentran en el entorno. Siendo clave algún tipo de entrenamiento para el robot para mejorar su navegación.

También se podría tomar la elección de implementar un Lidar (Light Detection and Ranging), para complementar la creación de un mapa en 3D, sin la necesidad de recorrer todo el entorno para conocer los por menores del lugar. Ya que, con el solo uso de las cámaras, si se desea conocer un entorno grande, tomaría mucho tiempo el

recorrido del lugar, ya que el robot tendría que pasar por todos los rincones del lugar, haciendo ineficiente la captura del mapa.

Referencias

1. Brady, M., Paul, R.: Robotics research. In: First International Symposium (1984)
2. Dempsey, C.: Robotics in cartography. Gislounge (2008)
3. Schmidt, P., Scaife, J., Harville, M., Liman, S., Ahmed, A.: Intel® RealSense™ Tracking Camera T265 and Intel® RealSense™ Depth Camera D435 - Tracking and Depth. Real Sense (2019)
4. Braunl, T.: EyeBot: A family of autonomous mobile robots. In: 6th International Conference on Neural Information Processing. Proceedings (ICONIP'99, ANZIIS'99, ANNES'99 & ACNN'99), 2, pp. 645–649 (1999)
5. Lentin, J.: ROS robotics projects. Packt Publishing Ltd (2017)
6. Intel: Intel® RealSense™ tracking camera T265 and depth cameras D400 series – Better together (2020)
7. Mujica, D.: Navegación autónoma de un robot móvil dentro de entornos real/virtual. Tesis Instituto Politécnico Nacional (2008)
8. MathWorks: Fusión de datos de sensores para sistemas autónomos (2019)
9. Marković, I., Petrović, I.: Bayesian sensor fusion methods for dynamic object tracking. A Comparative Study. *Automatika Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 55(4), pp. 386–398 (2017)
10. Escamilla-Ambrosio, P.J., Mort, N.: A hybrid Kalman filter-fuzzy logic architecture for multisensor data fusion. In: Proceeding of the IEEE International Symposium on Intelligent Control ISIC'01, pp. 364–369 (2001)