

Generación de Ambientes Virtuales Utilizando un Robot Móvil Terrestre

Generation of Virtual Environments Using a Mobile Terrestrial Robot

	Fiona Danaé Reynaga Díaz	fiona.reynagad@alumno.buap.mx
	Juan Carlos Cruz Armas	juan.cruza@alumno.buap.mx
	Dante Castelán Carpinteyro	cc202320271@alm.buap.mx
	Daniel Isay López del Castillo	daniel.lopezddelcastillo@alumno.buap.mx
	María del Carmen Santiago Díaz	marycarmen.santiago@correo.buap.mx
	Ana Claudia Zenteno Vázquez	ana.zenteno@correo.buap.mx
	María Catalina Rivera Morales	maria.riveram@correo.buap.mx
	Gustavo Trinidad Rubín Linares	gustavo.rubin@correo.buap.mx

Facultad de Ciencias de la Computación
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México.

RESUMEN

Este trabajo aborda la generación de ambientes virtuales a partir de los datos obtenidos por un robot móvil terrestre. El sistema utiliza una Raspberry Pi equipada con una cámara V2 de 8 megapíxeles y un sensor inercial (IMU) MPU6050 para registrar el recorrido y las condiciones del entorno. Con la información se propone una metodología de procesamiento que permite reconstruir de forma virtual el terreno recorrido, mostrando cambios registrados por el acelerómetro y con la cámara en tiempo real. Además, plantea la creación de una base de datos propia que facilite la preparación y entrenamiento del sistema para futuros recorridos.

Palabras Clave: Robot móvil terrestre, ambientes virtuales, Raspberry Pi, reconstrucción de terreno y visión por computadora.

ABSTRACT

This work addresses the generation of virtual environments based on data obtained by a terrestrial mobile robot. The system uses a Raspberry Pi equipped with an 8-megapixel V2 camera and an MPU6050 inertial sensor (IMU) to record the route and environmental conditions. A processing methodology is proposed using this information to virtually reconstruct the terrain traversed, showing changes recorded by the accelerometer and camera in real time. Furthermore, it proposes the creation of a custom database to facilitate the preparation and training of the system for future routes.

Keywords: Mobile terrestrial robot, virtual environments, Raspberry Pi, terrain reconstruction and computer vision.

► I. Introducción

El desarrollo de ambientes virtuales como una herramienta educativa ha evolucionado significativamente en los últimos años. Esto permitió la creación de entornos de aprendizaje interactivos y colaborativos y trascienden las limitaciones espaciotemporales tradicionales. Estas tecnologías promueven la formación de estudiantes capaces de adaptarse a las demandas educativas, laborales y sociales de la actualidad, al integrar recursos digitales que favorecen el proceso de enseñanza más dinámico y significativo [1]. La utilización de ambientes virtuales de aprendizaje colaborativo representa una tendencia en crecimiento, potenciando la comunicación, autonomía y construcción conjunta del conocimiento mediante el apoyo de plataformas tecnológicas.

Así también, la robótica móvil terrestre ha adquirido un papel relevante como medio para la experimentación y la interacción dentro de entornos virtuales. Los vehículos terrestres no tripulados (UGV, Unmanned Ground Vehicles) constituyen una de las plataformas más empleadas, que integran sistemas de locomoción, sensores, control guiado y de comunicación, que permiten ejecutar tareas de exploración, monitoreo y desplazamiento autónomo [3]. La diversidad de mecanismos de movilidad posibilita la adaptación a diferentes condiciones de terreno, mientras su capacidad de respuesta ante entornos no estructurados hace de ellos una herramienta idónea para investigaciones educativas, científicas y tecnológicas [15]. Entre las técnicas más empleadas para dotar de autonomía a los robots destaca el método de localización y mapeo simultáneo (SLAM), el cual permite que un robot construya un mapa del entorno mientras determina su posición en tiempo real. Esta técnica ha mostrado avances considerables, destacando algoritmos robustos como ORB-SLAM [7], que permiten el uso de cámaras como sensores principales. El uso de estos sensores se ha popularizado debido a su bajo costo, reducido peso y elevada eficiencia energética, facilitando su implementación en sistemas embebidos [2]. El uso de visión computacional dentro del SLAM ha permitido optimizar el reconocimiento de

características del entorno, mejorando la precisión en la navegación autónoma.

Adicionalmente, el empleo de sensores inerciales como acelerómetros ha demostrado ser una alternativa viable para complementar la estimación de posición en robots móviles. Aunque presenten errores acumulativos por deriva, su implementación de filtros de Kalman o algoritmos de gradiente descendente como el de Madgwick [10] permite compensar dichas desviaciones y mantener una precisión adecuada para desplazamientos de corta duración [4]. Estas características hacen que los sensores inerciales sean apropiados para aplicaciones donde se requiere un seguimiento continuo del movimiento o integración coherente entre entorno físico y virtual. La fusión de datos visuales e inerciales (VINS) se ha consolidado como una estrategia estándar para mejorar la precisión en entornos complejos [11].

Por otra parte, en [5] desarrollaron un sistema de teleoperación basado en realidad virtual para el control de múltiples robots móviles, tanto terrestres como aéreos. Su enfoque permite reconstruir el entorno en tiempo real mediante cámaras de profundidad y transmitirlo al usuario como un entorno virtual inmersivo, posibilitando una visualización tridimensional del terreno y la planificación de trayectorias intuitivas. Este trabajo demuestra el potencial de combinar reconstrucción 3D, sensores de percepción y entornos virtuales para mapeo y exploración remota, lo cual guarda una estrecha relación con la generación de ambientes virtuales a partir de la información capturada por el robot móvil terrestre.

Finalmente, la tendencia hacia los Gemelos Digitales permite que la reconstrucción de terrenos no sólo sea visual, sino funcional [12]. Investigaciones recientes han demostrado la viabilidad de utilizar plataformas de bajo costo, como Raspberry Pi, para tareas de navegación y procesamiento en tiempo real [8], así como el uso de técnicas de fotogrametría para el modelado detallado de patrimonio y terrenos [13], [14]. Otros estudios amplían la noción de mapeo hacia la caracterización física del terreno. En [16] se

propone un método probabilístico para predecir el costo energético del desplazamiento de un robot terrestre mediante Gaussian Process Regression (GPR), generando un mapa espacial del terreno “off-road” basado en los datos capturados por el propio robot. Con este enfoque permite obtener una representación más rica del entorno útil para la simulación, navegación autónoma y reconstrucción virtual del espacio recorrido. Por otra parte, se han desarrollado enfoques más recientes que optimizan la exploración autónoma del entorno. En [17] se presenta un sistema de mapeo topológico multirresolución (MRTM) que combina información de elevación, transitabilidad y fronteras de exploración, alcanzando una representación eficiente y detallada del entorno mediante cómputo acelerado por GPU. Este modelo permite cubrir áreas complejas, seleccionar vistas óptimas de la exploración y planificar rutas globales más eficientes en robots. Estos avances resultan relevantes para proyectos que buscan generar ambientes virtuales basados en la información recolectada por un robot móvil terrestre, ya que estos integran percepción en 3D, mapeo estructurado y toma de decisiones autónoma.

En el presente trabajo se propone la creación de entornos visuales generados a partir de información recopilada directamente por un robot móvil terrestre. Esta alternativa es una solución viable para sistemas que requieren una respuesta en tiempo real y que son el núcleo de la gran cantidad de sistemas robóticos autónomos.

» II. Metodología

A. Plataforma de Adquisición

El sistema físico de recolección de datos está constituido por una Raspberry Pi como unidad central de procesamiento. Para la medición de las fuerzas inerciales se integró el módulo MPU6050, cuyo desempeño en la estabilización y captura de orientación ha sido validado en diversas aplicaciones de robótica móvil [9], un dispositivo de 6 grados de libertad (6DoF) que combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes, así como un sensor de

temperatura, comunicado a través del protocolo I2C. Este sensor es el encargado de capturar las variaciones de movimiento y orientación del robot móvil terrestre.

Una vez establecida la plataforma hardware, el desarrollo del sistema propuesto se llevará a cabo con la siguiente metodología tecnológica virtual, orientada a la adquisición de datos sensoriales, procesamiento de la información y recreación de ambientes virtuales a partir del recorrido realizado por el robot terrestre (rover).

B. Generación de la base de datos

Se diseñó una base de datos propia para el registro de información proveniente del desplazamiento físico del robot móvil.

La base de datos almacena:

- Datos inerciales: valores de aceleración y rotación experimentados en los ejes X, Y y Z.
- Datos visuales: secuencias de imágenes o fotogramas del entorno real capturados por la cámara.
- Datos de posición: coordenadas espaciales estimadas con base en el procesamiento de los sensores físicos.

Se partió de una base de datos generada por el acelerómetro y que en general es la que brinda cualquier sensor genérico, aunque muchos brindan información de la velocidad y aceleraciones, se prefiere solo la posición a fin de generar los parámetros mencionados posteriormente a fin de no cargar de procesos el microcontrolador. En la Fig. 1 se presentan algunas de las gráficas obtenidas con el dataset generado.

En la Fig. 2 se observa el desplazamiento alrededor de la dirección X, además de contar con cambios de velocidad generando un movimiento acelerado, a diferencia de las mediciones en Y y Z, donde se mantiene alrededor de sus posiciones de equilibrio.

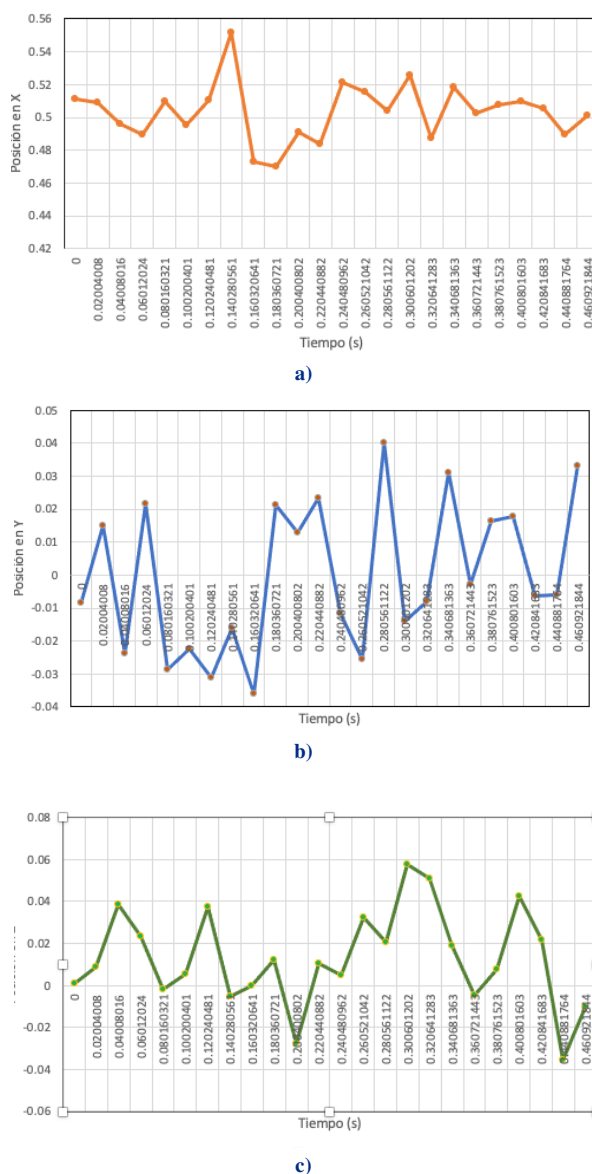


Fig. 1. Resumen de 25 datos de velocidad para el desplazamiento en: a) X, b) Y, y c) Z.

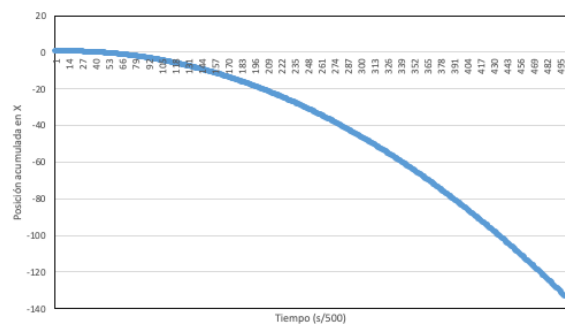


Fig. 2. Movimiento alrededor de la dirección X.

La trayectoria del desplazamiento corresponde a la siguiente ecuación:

$$x(t) = -0.0006t^2 + 0.0142t + 3E-05. \quad (1)$$

En general, un desplazamiento presenta un comportamiento de segundo orden, por lo cual los primeros puntos se pueden utilizar para ir generando la gráfica de la trayectoria siguiendo la ecuación, lo cual nos permite por superposición utilizar el mismo resultado a los tres ejes y así generar una ecuación tridimensional del desplazamiento $R(t)$ como la siguiente ecuación:

$$R(t) = x(t) + y(t) + z(t). \quad (2)$$

Esto nos permite que el robot móvil sin importar la trayectoria que seleccione dependiendo de sensores que eviten la colisión con obstáculos, va a generar mediciones de profundidad en base al desplazamiento y las condiciones del escenario en XYZ, mediante el siguiente diagrama de bloques de la Fig. 3.

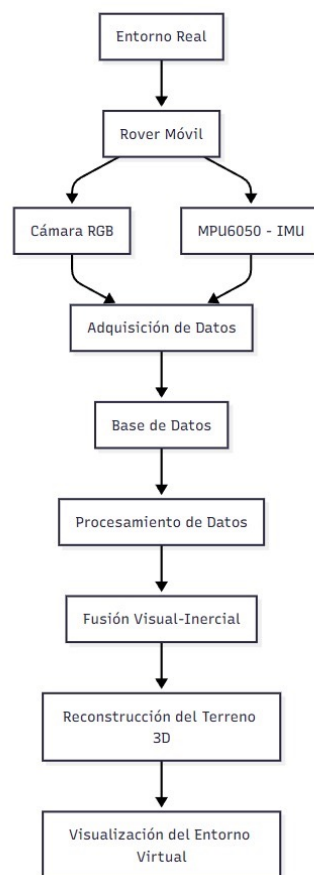


Fig. 3. Diagrama de bloques general del procesamiento de la cámara y el acelerómetro para construir escenario virtual

C. Procesamiento de datos

El procesamiento se orienta a la integración de la información visual e inercial, siguiendo las siguientes etapas:

1. Sincronización temporal de datos, donde cada lectura del acelerómetro se asocia al instante de captura de imagen correspondiente.
2. Estimación de movimiento, calculando la trayectoria aproximada del robot a partir de la integración de la aceleración y rotación en el tiempo.

El resultado de esta fase es una trayectoria digital que describe el movimiento físico del robot para su proyección dentro del entorno virtual.

D. Reconstrucción del terreno virtual

A partir de los datos visuales y de movimiento, se genera la representación tridimensional del entorno, para lo cual se pueden utilizar 2 posibles modelos, uno con Inteligencia Artificial y el otro exclusivamente con la información de los sensores, acelerómetro y detector de obstáculos, como se muestra en la Fig. 4. Con todo esto el sistema crea un entorno virtual que reproduce los cambios de terreno y desplazamiento experimentados por el robot físico.

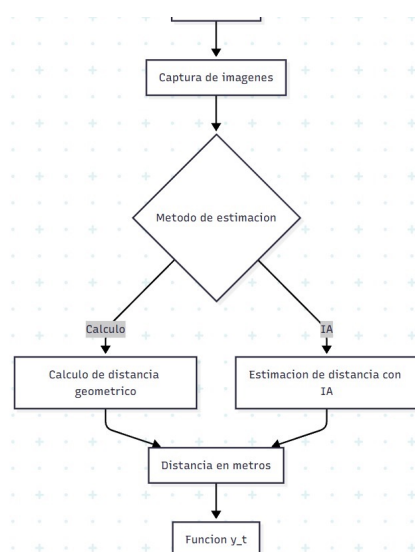


Fig. 4. Diagrama a bloques para la reconstrucción de un ambiente virtual utilizando IA o sensores.

E. Visualización y análisis del entorno

El entorno virtual resultante se despliega en el modelo digital del rover. Este entorno permite:

- Observar el comportamiento dinámico del rover.
- Analizar la relación entre los datos inerciales y la topografía del terreno.
- Validar los algoritmos de reconstrucción.

F. Validación

Para validar el sistema, se realizaron comparaciones entre las trayectorias estimadas y las trayectorias teóricas predefinidas en el entorno virtual.

Se evaluaron los errores de posición, la consistencia del mapeo del terreno y la coherencia visual entre la simulación y la reconstrucción generada.

» III. Resultados

En la Fig. 5 se observa el escenario de prueba de navegación del robot móvil con un algoritmo para librar obstáculos con giro a la izquierda (o derecha). Se obtiene una matriz de profundidad la cual en todo momento se compara con las capturas de la imagen. El proceso es relativamente sencillo, pero implica que ahora ya se tiene un conocimiento de la profundidad de cada elemento de la imagen y con ello una certeza del desplazamiento. Con ello se obtiene información de los elementos asociados en la imagen como se muestra en la Tabla I.

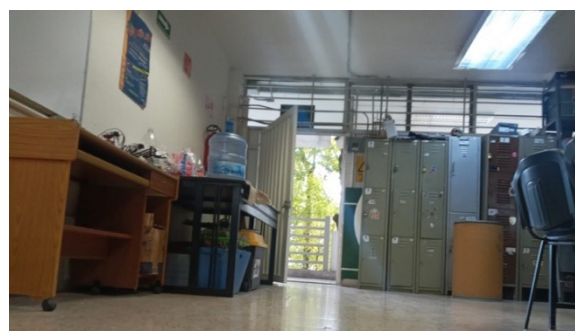


Fig. 3. Topology of SDN-based drone

Tabla I. Profundidad de los objetos captados automáticamente por el algoritmo y robot

<i>Objeto</i>	<i>Profundidad relativa</i>	<i>Comentario</i>
<i>Piso (primer plano)</i>	<i>0.00–0.05</i>	<i>Zona más cercana al punto de vista.</i>
<i>Escritorio de madera (izquierda)</i>	<i>0.10–0.20</i>	<i>Ligeramente detrás del primer plano.</i>
<i>Sillas plásticas (derecha)</i>	<i>0.25–0.35</i>	<i>Similar al garrafón, algo más atrás.</i>
<i>Lockers (verde/gris/café)</i>	<i>0.40–0.60</i>	<i>Fondo interior del cuarto.</i>
<i>Puerta abierta</i>	<i>0.70–0.80</i>	<i>Más lejos que los lockers.</i>
<i>Vegetación exterior</i>	<i>0.90–1.00</i>	<i>Punto más lejano visible.</i>

► IV. Resultados

El desarrollo del proyecto demostró el potencial de mapear virtualmente terrenos a partir de la recolección de datos realizada por un robot móvil terrestre. La construcción de una base de datos propia, el procesamiento sincronizado de aceleraciones e imágenes y la aplicación de técnicas de visión computacional hicieron posible la reconstrucción tridimensional del entorno recorrido.

Los resultados obtenidos validan que la metodología propuesta es viable. Si bien existen desafíos inherentes al uso de sensores inerciales de bajo costo, la metodología planteada establece una base sólida para futuras mejoras.

Finalmente, este trabajo contribuye al campo de la robótica móvil y la recreación virtual al proponer un sistema capaz de transformar datos físicos en representaciones digitales. Esto abre numerosas oportunidades para aplicaciones

educativas, experimentales y de investigación, sirviendo como punto de partida para el desarrollo de herramientas avanzadas de navegación, mapeo y simulación en robots de exploración y principalmente evitando el uso de Técnicas de Inteligencia Artificial evitando un consumo de recursos de procesamiento innecesarios.

► V. Referencias

- [1] M. O. Arias, N. Ramírez, K. G. Salmerón, “Ambientes virtuales como herramienta para el aprendizaje”, *Revista de Ciencias de la Educación Academicus*, vol. 1, pp 28, Julio-Diciembre 2023.
- [2] R. F. Munguía, A. Grau, “SLAM con mediciones angulares: método por triangulación estocástica”, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 14, pp 257-274, April-Junio 2013.
- [3] J. Figueroa, W. Montalvo, M. Bayas, *Cinemática y Dinámica de Robots Móviles con Ruedas*, 1st. ed. 2023, pp 30-33.
- [4] H. Liu, G. Pang, Accelerometer for mobile robot positioning in Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, Phoenix, AZ, USA, 03-07 October 1999.
- [5] A. Tikanmäki, J. Rönning, and J. Mattila, “A virtual reality teleoperation system for multi-robot control,” *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Takamatsu, Japan, Aug. 6–9, 2017, pp. 607–612.
- [6] C. Cadena et al., “Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception-age”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 6, pp. 1309–1332, Dic. 2016.
- [7] R. Mur-Artal y J. D. Tardós, “ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 5, pp.

1255–1262, Oct. 2017.

[8] S. Gupta y P. Kumar, “Real-time navigation of mobile robot using Raspberry Pi and ultrasonic sensors”, en 2021 6th Int. Conf. on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 2021, pp. 1261-1265.

[9] A. S. Al-Araji, “PID controller for 2-wheel balancing robot based on MPU6050 sensor”, *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 56-64, 2020.

[10] S. Madgwick, A. J. L. Harrison, y R. Vaidyanathan, “Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm”, 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, 2011, pp. 1-7.

[11] G. Huang, “Visual-inertial navigation: A concise review”, 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 9572-9582.

[12] M. Grieves y J. Vickers, “Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems”, en *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, y A. Alves, Eds., Cham: Springer, 2017, pp. 85–113.

[13] F. Remondino, “Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning”, *Remote Sensing*, vol. 3, no. 6, pp. 1104–1138, 2011.

[14] L. Qian et al., “Terrain reconstruction and traversability analysis for off-road mobile robots”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 156, art. no. 104206, Oct. 2022.

[15] J. M. Angel-Fernandez y M. Vincze, “Towards a definition of educational robotics”, en *Austrian Robotics Workshop*, 2018.

[16] M. Quann, L. Ojeda, W. Smith, D. Rizzo, M. Castanier, and K. Barton, “Off-road

ground robot path energy cost prediction through probabilistic spatial mapping,” *Journal of Field Robotics*, vol. 37, no. 3, pp. 421–439, 2020.

[17] R. Jia, T. Fan, V. Berenz, and F. Ramos, “Unlocking Full Exploration Potential of Ground Robots by Multiresolution Topological Mapping,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2025.