

Jornadas de Automática

Sistema BIM2ROS para la integración de robots aéreos en el sector de la construcción

Martinez, Santiago¹, Cobano, José Antonio¹, Merino, Luis¹, Caballero, Fernando¹

Service Robotics Lab, Universidad Pablo de Olavide (Sevilla), Ctra. de Utrera km. 1, 41013 Sevilla, España.

To cite this article: Martinez, Santiago, Cobano, José Antonio, Merino, Luis, Caballero, Fernando. 2024. BIM2ROS system for the integration of aerial robots in the construction sector. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10974>

Resumen

El sector de la construcción es uno de los menos digitalizados y la robótica, los drones y el Building Information Modeling (BIM) pueden jugar un papel fundamental en esta digitalización. La mayoría de las soluciones robóticas se basan en la teleoperación por parte de los trabajadores, pero gracias a toda la información disponible en BIM se pueden automatizar estos procesos para ser llevados a cabo por robots móviles o drones. Este artículo trata sobre la integración de robots en el ámbito de la construcción sacando provecho de toda la información que puede aportar el BIM, tanto geométrica como semántica. Presentamos el sistema denominado BIM2ROS. La integración se lleva a cabo generando toda la información necesaria para el robot y poder trabajar con ROS (Robot Operating System) a partir del BIM. Una vez generado el mundo del robot, la información semántica se incluye en la planificación de caminos para navegar en el edificio considerado y se lleva a cabo también una identificación de los componentes del edificio construidos a partir de un sensor lidar 3D a bordo del dron y la información del BIM. Se muestran resultados experimentales en un edificio para mostrar el funcionamiento del sistema, la planificación y la identificación de elementos.

Palabras clave: robótica aérea, identificación de elementos, planificación de caminos

aerial robots identification of built elements path planning

Abstract

The construction sector is one of the least digitized, and robotics, drones, and Building Information Modeling (BIM) can play a fundamental role in this digitalization. Most robotic solutions rely on teleoperation by workers, but thanks to all the information available in BIM, these processes can be automated to be carried out by mobile robots or drones. This paper addresses the integration of robots in the construction field, taking advantage of all the information that BIM can provide, both geometric and semantic. We present a system called BIM2ROS. The integration is carried out by generating all the necessary information for the robot to work with ROS (Robot Operating System) from the BIM. Once the robot's world is generated, the semantic information is included in the path planning to navigate into the building, and an identification of the building components constructed from a 3D lidar sensor on board the drone and the BIM information is also performed. Experimental results are presented in a building to demonstrate as the system works, planning, and element identification.

Keywords: aerial robots, identification of built elements, path planning

1. Introducción

El sector de la construcción es un pilar clave de la economía de la Unión Europea (UE). Representa 18 millones de

puestos de trabajo y contribuye a casi el 9 % del PIB. Este sector se enfrenta a varios desafíos relacionados, entre otros, con la escasez de mano de obra, la competitividad, la eficiencia energética y de los recursos y la productividad. Las techno-

logías digitales y su integración en el sector de la construcción se consideran un elemento clave que puede ayudar a abordar algunos de estos desafíos. Sin embargo, el sector de la construcción es uno de los menos digitalizados de la economía.

Entre las tecnologías digitales claves identificadas recientemente por el “Observatorio Europeo del Sector de la Construcción” para la tecnologías más destacadas y transversales que afectan a los cuatro pilares básicos de la construcción: Diseño e ingeniería, construcción, operación, renovación y demolición. Aunque el despliegue de robots móviles o drones en la construcción ha crecido significativamente en la última década (Follini et al., 2020)(Kim and Peavy, 2022), hoy en día hay muchas tareas relacionadas con la construcción que no se pueden abordar con las tecnologías robóticas existentes. Por esta razón, la mayoría de las soluciones robóticas en el mercado se basan en la teleoperación por parte de los trabajadores, como, por ejemplo, el Hilti Jaibot ¹ (ver Figura 1).

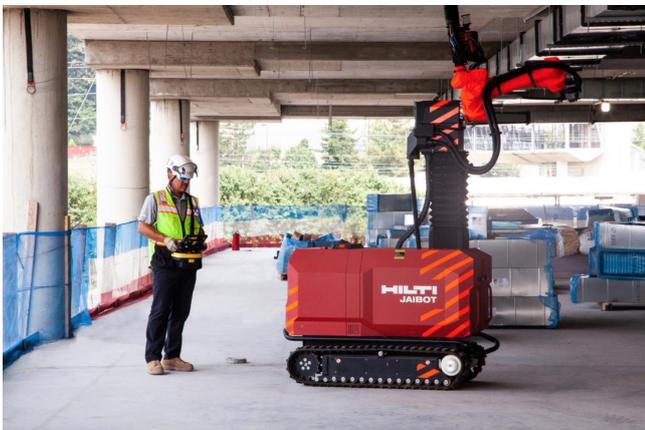


Figura 1: Robot Jaibot fabricado por Hilti.

El BIM ha surgido como un paradigma transformador en arquitectura, ingeniería y construcción, representando un alejamiento de los métodos tradicionales de diseño en 2D (Jin et al., 2019)(Chau et al., 2004). Basada en la gestión colaborativa de información, los proyectos BIM emplean modelos digitales tridimensionales enriquecidos con datos extensivos. En el ámbito científico, BIM se reconoce como un enfoque integral que integra datos geométricos con información detallada sobre las características físicas y funcionales de los componentes del edificio, fomentando la colaboración interdisciplinaria a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

El formato IFC (Industry Foundation Classes) es un componente fundamental en el ámbito del BIM sirviendo como un formato de archivo abierto y neutral que facilita la interoperabilidad y el intercambio de información a lo largo del ciclo de vida de un proyecto de construcción. Desarrollado por la International Alliance for Interoperability (IAI), ahora conocida como buildingSMART International, IFC está diseñado para superar las limitaciones de los formatos de archivo propietarios, promoviendo la colaboración y el intercambio de datos sin problemas entre diversas aplicaciones de software utilizadas en la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción.

Diversos estudios han explorado la integración de información semántica y archivos de tipo IFC para mejorar la comprensión de los entornos espaciales. En un trabajo pionero (Hamieh et al., 2020), los autores reconstruyeron un edificio utilizando un BIM. Posteriormente, generaron un gráfico de navegación para permitir que su agente discerniera las áreas accesibles dentro del entorno construido. En otro estudio (Naik et al., 2019), se empleó *OpenStreetMap* (OSM) como un recurso valioso para obtener información ambiental. Los autores reconocieron los beneficios potenciales de incorporar archivos IFC en su metodología. Esto subraya la importancia de utilizar diversas fuentes de datos para mejorar la información espacial. Otro enfoque utilizó una Red Neuronal Profunda (DNN) para extraer información semántica (Zhao et al., 2019). La fase de exploración se identificó como un requisito previo para obtener datos semánticos significativos, enfatizando la importancia de una investigación exhaustiva antes del análisis semántico.

El trabajo de (Bastianelli et al., 2013) está relacionado con el nuestro, donde los autores colaboraron con su agente para construir información semántica de manera colaborativa. A pesar de lograr una alta precisión en la recuperación de información, nuestro método propuesto supera esto al obtener información semántica integral previo al comienzo de cualquier interacción con el agente. Otro trabajo presenta similitudes con nuestro enfoque (Deeken et al., 2014). Sin embargo, su metodología para adquirir inicialmente la información semántica sigue siendo poco clara. En otro trabajo se empleó un cuadricóptero (Bartolomei et al., 2020), aunque la información semántica se proporcionó manualmente. Esto destaca el desafío continuo de automatizar la adquisición de datos semánticos en ciertas aplicaciones.

Este artículo aborda la integración de los robots en el sector de la construcción para conseguir aplicaciones robóticas autónomas a través del sistema propuesto que denominamos BIM2ROS. Para ello, usamos BIM para extraer toda la información posible en 3D, tanto geométrica como semántica, para poder generar el mundo del robot, es decir, generar la información necesaria para poder lanzar y usar aplicaciones en ROS (Robot Operating System). La información geométrica permitirá generar el escenario en el simulador Gazebo usado en ROS y el mapa 3D para poder planificar las trayectorias del dron. El conocimiento de la información semántica también se tiene en cuenta en la planificación de trayectorias. Por otro lado, ambas informaciones también se usarán para poder identificar con un Lidar 3D qué componentes del edificio se han construido y cuáles no durante la navegación de la trayectoria calculada.

2. BIM2ROS

Los modelos BIM están siendo utilizados para varios propósitos, incluyendo el análisis del rendimiento del edificio basado en modelos (Jin et al., 2019) o la planificación de la construcción (Chau et al., 2004), pero se ha prestado poca atención a la transferencia de información de BIM para generar el mundo de un robot en el que pueda navegar para llevar

¹<https://www.hilti.es/content/hilti/E2/ES/es/business/business/trends/jaibot.html>

a cabo diferentes aplicaciones. Por lo tanto, es necesario vincular BIM con un mundo robótico como ROS (Correa, 2016). La ventajas de usar BIM para generar toda la información para el robot podría traer una representación más matizada y detallada del entorno. La información en BIM puede proporcionar una alternativa a la creación de mapas de robots, por ejemplo con técnicas SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) Perez-Grau et al. (2017) y enriquecerlos con información semántica que también proporcionan. Entre los trabajos que utilizan BIM para tareas de robots se pueden destacar (Follini et al., 2020)(Kim and Peavy, 2022), aunque ambos carecen de información semántica que influya en la planificación de trayectorias de los robots y consideran dimensiones en 2D.

La información de un BIM es sumamente extensa ya que pueden proporcionar detalles tan específicos como la instalación eléctrica o de agua. Para nuestro caso, la información más relevante pueden ser los elementos arquitectónicos, o lo que conocemos como información semántica. Gracias a esta información somos capaces de conocer qué elementos se encuentran en una determinada posición del espacio. Lo distintivo de nuestras herramientas es que no intentan convertir IFC a otros formatos más extendidos, sino que consultamos la información directamente en el propio fichero mediante diversas estructuras de datos usando la librería *IfcOpenShell*². Esta librería ha sido usada en diferentes trabajos publicados como en (Pauwels et al., 2023) donde se presentan métodos de transferencia de datos BIM para crear mapas semánticos y de ocupación para la navegación de robots. Los métodos IFC-JSON y servidor LBD fueron validados con éxito. Se destaca la importancia de la estandarización y la precisión del modelo BIM para mejorar la navegación robotizada en interiores. En (Pan et al., 2023) se presenta un marco de tres módulos para reconstruir automáticamente modelos BIM de sistemas MEP (Mechanical, Electrical and Plumbing) a partir de dibujos 2D, mejorando la precisión y eficiencia de operaciones de mantenimiento de edificios envejecidos. Utiliza *pythonOCC*³ e *IfcOpenShell* para automatizar la reconstrucción BIM basada en IFC, mejorando la precisión y eficiencia del modelado de componentes irregulares. BIM2ROS es un conjunto de herramientas creadas específicamente para permitir la obtención de información de los modelos BIM para ser usadas en aplicaciones robóticas en el sistema ROS. A partir de fichero IFC, BIM2ROS puede obtener:

- El fichero del escenario a cargar en el simulador Gazebo de ROS (fichero .obj) para simular el escenario de BIM.
- Nube de puntos 3D que describen el edificio para generar el mapa de ocupación.
- Información semántica de todos los componentes del edificio

Además, para la identificación de componentes construidos en el edificio, BIM2ROS usa las lecturas de un sensor lidar 3D a bordo del dron para verificar con el BIM si ese componente está construido o no (ver Sección 3).

2.1. Simulador Gazebo

El modelo 3D del edificio para cargar en Gazebo se genera mediante el plugin de *IfcOpenShell* para Blender. Con este modelo 3D en formato .obj podemos generar una simulación en el software Gazebo en el que poder llevar a cabo nuestros experimentos. Gazebo es un software de simulación altamente extendido en el mundo de la robótica, este permite realizar pruebas y experimentos en entornos virtuales detallados, proporcionando una plataforma para la simulación de robots y sus interacciones con el entorno. El nivel de detalle de este simulador es elevado, permitiendo generar interacciones complejas con luz, gravedad, y diferentes materiales para los elementos.

La Figura 3 muestra el escenario considerado en este artículo mostrado con el software Autodesk Revit y el escenario generado en Gazebo.

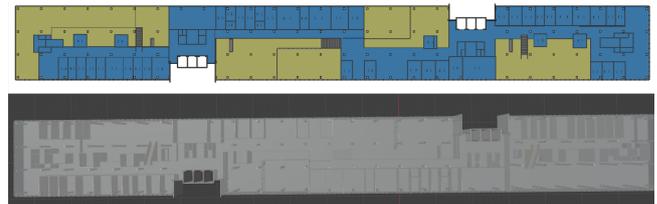


Figura 2: Escenario considerado en este trabajo: Edificio de la Universidad Técnica de Eindhoven (Países Bajos)-(Pauwels et al., 2023): Imagen con Autodesk Revit (arriba) y simulación del edificio en Gazebo (abajo).

2.2. Mapa de ocupación 3D

Para generar el mapa de ocupación 3D del escenario debemos generar la nube de puntos 3D que genere el escenario. Para ello usamos el software CloudCompare que genera una nube de puntos 3D en formato .pcd. Esta nube de puntos se publica usando la librería PCL (Point Cloud Library) y con el paquete de ROS octomap generamos el fichero .bt que describe el edificio. A partir de este fichero podemos generar en nuestro paquete implementado el mapa de ocupación y la nube de puntos 3D que serán usadas para la planificación de trayectorias del dron.

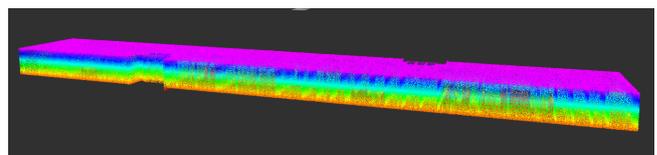


Figura 3: Mapa de ocupación a partir de la nube de puntos 3D del escenario considerado.

2.3. Capa Semántica

La capa semántica es una de las muchas estructuras que estas herramientas son capaces de facilitar. Esta consiste en un grid que ocupa la totalidad de la estructura del edificio, asignando a cada celda un valor acorde al elemento que ahí se encuentra (puerta, columna, etc.).

Para generar esta capa semántica, el nodo realiza una consulta al fichero IFC sobre los elementos que se quieren diferenciar, como por ejemplo, paredes, columnas, puertas, etc.

²<https://ifcopenshell.org/>

³<https://dev.opencascade.org/project/pythonocc>

Una vez tenemos definidos estos elementos, obtenemos su posición y dimensiones del fichero IFC. A partir de esta información se van completando las celdas correspondientes de la capa semántica identificando el elemento de cada una (ver los diferentes colores en Figura 4). Una vez completada la capa, un servicio de ROS se encarga de publicarla. De este modo, un cliente de ROS en el planificador puede acceder a esta información semántica y usarla para planificar caminos.

La Figura 4 ilustra la información semántica que incluye al capa generada con el nodo implementado.

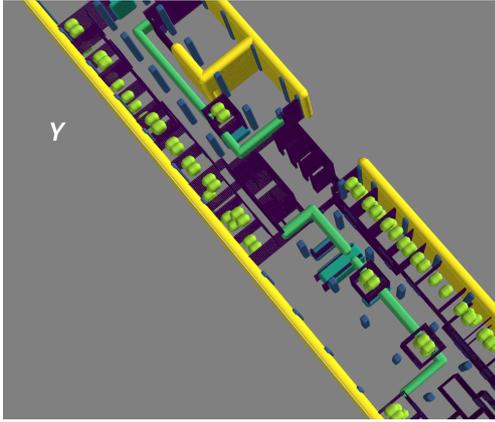


Figura 4: Mapa semántico generado con el nodo implementado del escenario considerado.

3. Identificación

Una de las tareas que se han desarrollado en BIMtoROS es la detección de elementos presentes en una construcción durante el vuelo de un dron mediante el uso de un sensor lidar 3D y la librería *IFCOpenShell*.

El dron puede volar las trayectorias planificadas a partir de la información semántica (ver Sección 4) y realizar la identificación de elementos que están construidos. El nodo implementado en ROS va verificando durante el vuelo qué elemento del fichero IFC detecta cada punto de la nube de puntos recibida del sensor lidar 3D (bloque Detección en el diagrama de la Figura 5). Para ello se usa la función *tree.search* de la librería *IFCOpenShell*. La entrada de esta función es la posición de un punto de la nube y la salida es el elemento en el cual el punto cae dentro de su volumen. Los puntos que detectan el suelo se consideran que no identifican ningún elemento. Además el nodo contabiliza el número de puntos que etiquetan un determinado elemento y los puntos que no pertenecen a ningún elemento con el bloque Identificador de la Figura 5 que recibe los elementos asociados a cada punto de la nube de puntos del lidar 3D.

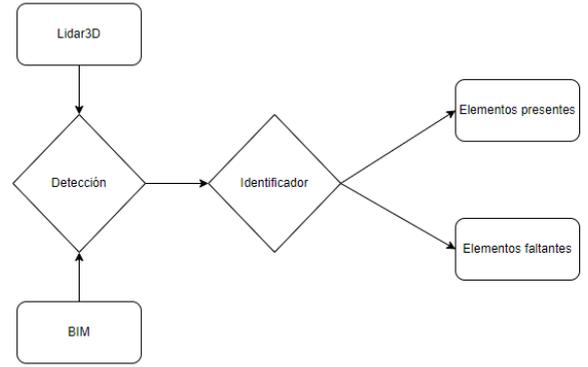


Figura 5: Diagrama del sistema planteado.

4. Planificación de caminos considerando información semántica

Se ha implementado un planificador de caminos basado en búsqueda heurística que considera la información semántica extraída del BIM. Concretamente en el algoritmo Lazy Theta* Nash and Tovey (2010). El planificador hace una consulta al servicio implementado para recibir la capa semántica cuya información se tiene en cuenta en la función de coste.

El planificador heurístico semántico utiliza un mapa de ocupación y un *grid* 3D que contienen la información semántica (ver Sección 2.3 y 2.2) generada offline. La *grid* representa el gráfico empleado en el planificador. El coste asociado a la información semántica está incluido en la función de coste y se calcula de manera diferente a Nash and Tovey (2010). El coste acumulado de un nodo dado en el camino es dado por:

$$g(s_{i+1}) = g(s_i) + c(s_{i+1}) \cdot \|s_{i+1} - s_i\| \quad (1)$$

donde $g(s_i)$ es el coste del nodo padre s_i , $\|s_{i+1} - s_i\|$ es la distancia entre los nodos s_i y s_{i+1} , y $c(s_{i+1})$ es el factor calculado desde la capa semántica del entorno incluido en el nodo $i + 1$. Por lo tanto, c depende de cada elemento (puerta o pared u otro, y el tipo de material) codificado en un nodo. $c = \mu \cdot c_{element}$ donde μ da más o menos influencia a los elementos semánticos en la planificación. ($\mu > 1$) y $c_{element}$ depende de la información semántica de ese elemento. Es decir, c_{door} puede ser diferente a c_{wall} .

$c_{element}$ se define de manera que siempre es mayor o igual que 1, por tanto la distancia $\|s_{i+1} - s_i\|$ es siempre menor o igual al coste real del camino óptimo, que garantiza la admisibilidad. $c(s_{i+1})$ es igual a 1 cuando el nodo está en espacio libre, por tanto el coste sería equivalente a su distancia euclídea $\|s_{i+1} - s_i\|$.

Los nodos a lo largo del segmento definido por s_i y s_{i+1} se deben considerar. Ese caso se calcula $c(s_{i+1})$ de este modo:

$$c(s_{i+1}) = \sum_{j=1}^N c(s_j) \quad (2)$$

donde $c(s_j)$ es el factor calculado desde la información semántica de los N nodos a lo largo del segmento.

Nuestro planificador calcula el factor $c(s_{i+1})$ de manera que depende de la distancia al obstáculo más cercano, $dist$ del *element* correspondiente.

$$c(s_{i+1}) = (\mu \cdot c_{element}) / dist \quad (3)$$

Por lo tanto, el valor de $c(s + i)$ disminuye a medida que $dist$ aumenta hasta la distancia inflada. Sabemos que $c_{element} \geq 1$ y que $\mu > 1$, por lo que debemos asegurarnos de que $\mu \cdot c_{element}$ sea siempre mayor que la distancia inflada.

5. Resultados experimentales

Esta sección muestra los resultados de las pruebas de realizadas para planificar un camino considerando la información semántica y la identificación de elementos construidos en el edificio.

En primer lugar se muestra un camino generado con el planificador en el escenario considerado (ver Figura 6). Se muestra la influencia del valor de μ en la generación del camino desde la primera planta a la segunda. Los caminos generados con $\mu = 2$ ó 3 son diferentes. En el último caso, el camino evita pasar por el pasillo debido a la presencia de puertas y columnas, como se puede ver en la Figura 6-izquierda. También se muestra el camino generado por el planificador presentado en Cobano et al. (2022), CALT*+M1, que considera campos de distancias euclídeas para compararlos. Tanto CALT*+M1 como el planificador heurístico semántico con $\mu = 2$ generan un camino más corto pasando por el pasillo.

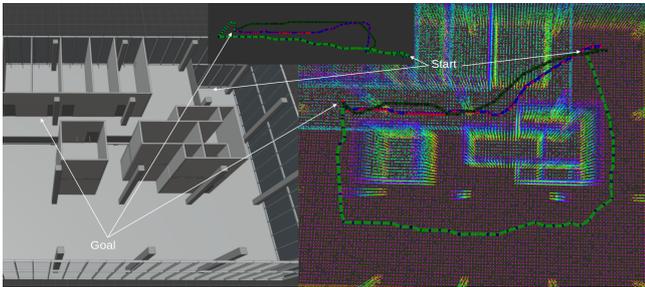


Figura 6: Influencia de μ en los caminos generados con el planificador heurístico semántico: la línea verde oscura considera $\mu = 2$, la línea verde clara $\mu = 3$ y CALT*+M1 se muestra también en una línea azul-roja. La imagen pequeña en la parte superior muestra la vista YZ.

A continuación se muestran datos de diferentes instantes del vuelo del dron para presentar cómo se lleva a cabo la identificación de los elementos construidos.

Las Figuras 7 y 8 muestran un instante del vuelo del dron dentro del edificio, los elementos arquitectónicos presentes para detectar en Gazebo y los resultados correspondientes en el visualizador Rviz. En la Figura 8 observamos que para cada elemento arquitectónico se ha colocado un punto de color verde indicando que se ha identificado en base a la información del fichero IFC y los puntos del lidar 3D (en color rojo en la Figura 8). El método de identificación actual es determinista; es decir, si N puntos pertenecen a un elemento, dicho elemento se considera existente. En estas pruebas se ha considerado $N = 50$. Se puede observar como se detectan como construidas las dos columnas además de las paredes de alrededor. Los puntos verdes de la Figura 8 no son los centros de

los elementos construidos, son los valores de la posición que se obtienen desde el fichero IFC para cada elemento. No se tiene en cuenta, por ejemplo, la distribución de dichas detecciones. Esta última tarea está en proceso de desarrollo.

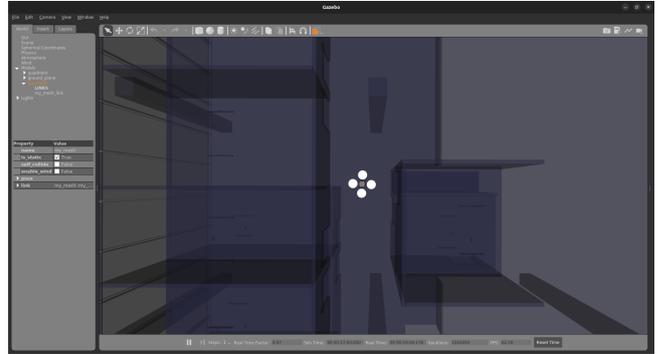


Figura 7: Instante del vuelo del dron en el edificio con los elementos construidos (simulador Gazebo).



Figura 8: Identificación de elementos: los puntos del sensor lidar 3D en rojo, los elementos identificados en verde.

También se han realizado pruebas donde hay elemento no construidos pero que aparecen en el fichero IFC. En las Figuras 9 y 10 observamos las diferencias entre un mundo al que hemos sustraído ciertos elementos para verificar que efectivamente estos no están siendo detectados e identificados como construidos. La Figura 11 muestra en Rviz los elementos identificados por el nodo de ROS implementado. Observamos que las columnas y escalera sustraídas, efectivamente no están siendo detectadas, por ende, ningún marcador se están colocando en su posición. En su lugar, elementos que si se encuentran presentes como la columna y los paneles exteriores, están siendo identificados y marcados.

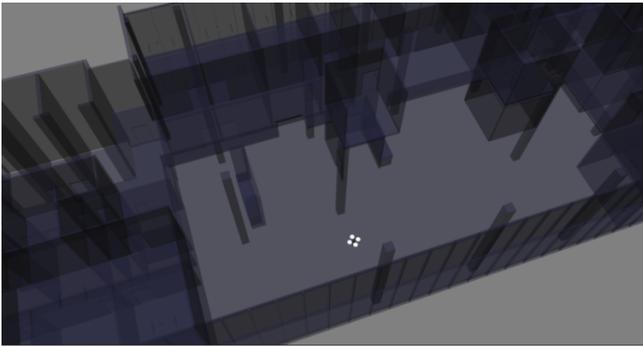


Figura 9: Mundo sin ciertos elementos construidos, entre ellos columnas y escaleras.

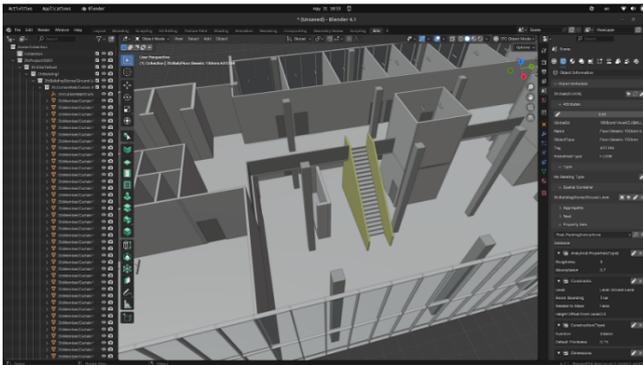


Figura 10: Plano completo de como debería ser la zona.

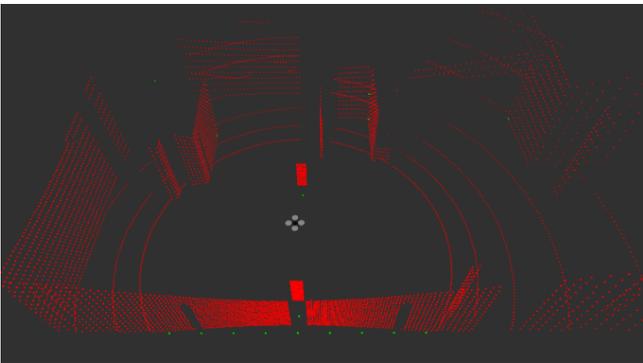


Figura 11: Identificación de elementos cuando algunos no están construidos: ningún punto verde se encuentra en las posiciones de los elementos que no están construidos (columnas y escaleras).

6. Conclusiones

Este artículo presenta un sistema para integrar los robots en el sector de la construcción llamado BIM2ROS. Para ello, convierte la información de un BIM en todo lo necesario para un robot aéreo, mapas con información geométrica y semántica, en el mundo de ROS. Varios nodos han sido implementados y las pruebas en el escenario considerado se pueden llevar a cabo usando tanto Gazebo como Rviz.

La información proporcionada por BIM2ROS es usada por un planificador heurístico semántico para planificar las trayectorias 3D dentro del edificio y poder revisar qué parte del edificio se ha construido. La información semántica es incluida en

la función de coste del planificador basado en un Lazy Theta*. Estas trayectorias son voladas por el dron en Gazebo y se muestran resultados de la identificación de los elementos que están construidos en el edificio a partir de las lecturas de un sensor lidar 3D y la información que proporciona el BIM a través de su fichero IFC.

Los resultados mostrados muestran como conectar BIM con ROS y planificar conociendo qué tipo de elementos hay en el entorno e identificando el estado de la construcción sabiendo los elementos construidos.

7. Acknowledgements

This work was supported by the grants INSERTION PID2021-127648OB-C31 and NORDIC TED2021-132476B-I00, funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and “European Union NextGenerationEU/PRTR”.

Referencias

- Bartolomei, L., Teixeira, L., Chli, M., 2020. Perception-aware path planning for uavs using semantic segmentation. In: 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 5808–5815. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341347
- Bastianelli, E., Bloisi, D., Capobianco, R., Cossu, F., Gemignani, G., Iocchi, L., Nardi, D., 11 2013. On-line semantic mapping. DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766501
- Chau, K., Anson, M., Zhang, J., 08 2004. Four-dimensional visualization of construction scheduling and site utilization. *Journal of Construction Engineering and Management* 130. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:4(598)
- Cobano, J. A., Rey, R., Merino, L., Caballero, F., 2022. Fast cost-aware lazy-theta over euclidean distance functions for 3d planning of aerial robots in building-like environments. In: 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 13486–13493. DOI: 10.1109/IROS47612.2022.9982180
- Correa, F., 07 2016. Robot-oriented design for production in the context of building information modeling. DOI: 10.22260/ISARC2016/0103
- Deeken, H., Puetz, S., Wiemann, T., Lingemann, K., Hertzberg, J., 2014. Integrating semantic information in navigational planning. In: *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics*. pp. 1–8.
- Follini, C., Magnago, V., Freitag, K., Terzer, M., Marcher, C., Riedl, M., Giusti, A., Matt, D., 12 2020. Bim-integrated collaborative robotics for application in building construction and maintenance. *Robotics* 10, 2. DOI: 10.3390/robotics10010002
- Hamieh, A., Ben Makhlof, A., Louhichi, B., Deneux, D., 2020. A bim-based method to plan indoor paths. *Automation in Construction* 113, 103120. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519308283> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103120>
- Jin, R., Zhong, B., Ma, L., Hashemi, A., Ding, L., 2019. Integrating bim with building performance analysis in project life-cycle. *Automation in Construction* 106, 102861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102861>
- Kim, K., Peavy, M., 2022. Bim-based semantic building world modeling for robot task planning and execution in built environments. *Automation in Construction* 138, 104247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104247>
- Naik, L., Blumenthal, S., Huebel, N., Bruyninckx, H., Prassler, E., 2019. Semantic mapping extension for openstreetmap applied to indoor robot navigation. In: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 3839–3845. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793641
- Nash, S. K., Tovey, C., 2010. Lazy theta*: Any-angle path planning and path length analysis in 3d. In: *Proceedings of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*. p. 147–154.
- Pan, Z., Yu, Y., Xiao, F., Zhang, J., 2023. Recovering building information model from 2d drawings for mechanical, electrical and plumbing systems of ageing buildings. *Automation in Construction* 152, 104914.

- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523001747>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104914>
- Pauwels, P., de Koning, R., Hendriks, B., Torta, E., 2023. Live semantic data from building digital twins for robot navigation: Overview of data transfer methods. *Advanced Engineering Informatics* 56, 101959.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101959>
- Perez-Grau, F. J., Caballero, F., Merino, L., Viguria, A., 2017. Multi-modal mapping and localization of unmanned aerial robots based on ultra-wideband and rgb-d sensing. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 3495–3502.
DOI: 10.1109/IROS.2017.8206191
- Zhao, Y., Liu, P., Xue, W., Miao, R., Gong, Z., Ying, R., 2019. Semantic probabilistic traversable map generation for robot path planning. In: 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). pp. 2576–2582.
DOI: 10.1109/ROBIO49542.2019.8961533