

Jornadas de Automática

Navegación de un robot Ackermann para tareas de transporte en invernaderos de tipo Mediterráneo con MultiVehicle Simulator (MVSIm)

Cañadas-Aránega, F.^{a,*}, Blanco-Claraco, José L.^b, Mañas-Álvarez, Francisco J.^c, Moreno, José C.^a

^aDepartamento de Informática, Universidad de Almería, CIESOL, ceiA3, Almería, 04120, Spain (e-mail: fernando.ca@ual.es, jcmoreno@ual.es)

^bDepartamento de Ingeniería, Universidad de Almería, ceiA3, Almería 04120, Spain (email: jlblanco@ual.es)

^cDepartamento de Informática y Automática, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid 28040, Spain (email: fmanas@dia.uned.es)

To cite this article: Cañadas-Aránega, F., Blanco-Claraco, José L., Mañas-Alvarez, Francisco J., Moreno, José C. 2024. Navigation of an Ackermann Robot for Transportation Tasks in Mediterranean Greenhouses with MultiVehicle Simulator (MVSIm). *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10753>

Resumen

La agricultura intensiva bajo invernadero se ha convertido en uno de los pilares del crecimiento demográfico de la sociedad. Sin embargo, a medida que pasan los años, el aumento de la superpoblación tanto en los humanos como en el mundo animal, supone un problema para la humanidad, por lo que la agricultura existente debe ser más eficiente y sostenible. En esta búsqueda, la automatización y, en particular, los robots, juegan un papel fundamental ya que son herramientas para la resolución óptima de algunos problemas claves en este campo relacionados con el desarrollo de tareas tediosas, sucias y/o peligrosas, las tareas denominadas DDD (del inglés *Dull, Dirty, Dangerous*). Este trabajo se centra en uno de los resultados del proyecto *Agricultural Collaborative Robots inside IoT II* (AGRICOBOT II), en particular, en un robot móvil Ackermann destinado a realizar tareas de transporte dentro de invernaderos de tipo Mediterráneo, diseñado y construido en la propia Universidad de Almería para poder trabajar de forma colaborativa con el agricultor. Este trabajo describe los detalles de este robot, validando su funcionamiento en el simulador MVSIm, a partir de un modelo 3D del mismo. En particular, el trabajo se centra en el problema de navegación durante el transporte teniendo en cuenta la presencia de personas y objetos inesperados o dinámicos mediante el *framework* de navegación autónoma Nav2.

Palabras clave: Robótica en agricultura, Invernaderos, Robot móvil, Modelado 3D, Simulación, ROS 2

Navigation of an Ackermann robot for transport tasks in Mediterranean greenhouses with the MultiVehicle Simulator (MVSIm).

Abstract

Intensive greenhouse agriculture has become one of the most fundamental pillars for population growth in society. However, as the years go by, overpopulation is increasing both in humans and animal world, so existing agriculture must become more efficient and sustainable. In this quest, automation, and particular robots, play a crucial role as they are tools for the optimal resolution of some key problems in this field, mainly related to the development of Dull, Dirty and/or Dangerous tasks (DDD). This article focuses on one of the project's results "Agricultural Collaborative Robots inside IoT II" (AGRICOBOT II), in particular in a mobile Ackermann robot designed and built at the University of Almeria to performance transport tasks in Mediterranean greenhouses, collaborating with the farmer. This work describes the details of this robot, validating its operation in a novel simulator called MVSIm, using a 3D model of it. In particular, this paper focuses on the problem of navigation during transport, considering the presence of people and unexpected or dynamic objects by means of a global planner of the framework Nav2.

Keywords: Agricultural robotics, Greenhouse, Mobile robot, 3D modelling, Simulation, ROS 2

*Autor para correspondencia: fernando.ca@ual.es

1. Introducción

En los últimos años, la superficie de invernaderos en el mundo supera las 490.000 ha, con un crecimiento anual estimado en un 20 % desde 1980. Entorno al 20 % de esta superficie, se encuentra en España, en concreto, en el sureste peninsular donde la superficie total dedicada a hortalizas supera las 77.000 ha (Trenda, 2023). Este sector cuenta con un interés social muy alto en el sector del cultivo de invernaderos en la península ya que genera unos 100.000 empleos directos y alrededor de 25.000 indirectos. El invernadero en España es representativo del invernadero de tipo Mediterráneo, que supone un 92 % de la superficie mundial de invernaderos, con un nivel de tecnificación bajo o medio (Belmonte-Ureña et al., 2020). Sin embargo, en la actualidad este sector se está viendo obligado a competir con sistemas que cuentan con una tecnología altamente cualificada en países desarrollados, como Holanda, y con sistemas con un bajo nivel de tecnificación pero con unos costes asociados muy inferiores (por ejemplo Marruecos o Turquía). Para mantener la rentabilidad, es necesario mejorar la productividad y la calidad, siendo la tecnología un pilar fundamental. Por otra parte, la creciente demanda de alimentos para humanos y para animales, unida a la escasez de mano de obra en las zonas rurales y al creciente interés por los sistemas autónomos, estimulado en parte por la pandemia de COVID-19, justifican aún más la investigación de dicha tecnología.

En este escenario, aunque los invernaderos pueden presentar cierto grado de organización estructural, se alejan fundamentalmente de los entornos controlados que suelen encontrarse en ambientes industriales, como por ejemplo las cadenas de montaje en la industria de la automoción. Para afrontar este reto, el uso de maquinaria altamente automatizada es crucial para garantizar el desarrollo y avance de la agricultura bajo invernadero y, por consecuencia, de la humanidad. Una de las claves para el empleo de robots en este contexto es el uso de una sensorica adecuada, que permita determinar la presencia de obstáculos y localizar al robot en el invernadero, a pesar de la imprecisión de los datos capturados dentro de un entorno muy cambiante y con una configuración complicada para la transmisión de señales (Bac et al., 2013; Ko et al., 2014). Estos sistemas pueden cumplir diversas funciones aparte de las relacionadas con la propia navegación, como por ejemplo la monitorización del estado del cultivo. Maximizar la utilización de la superficie invernada es una estrategia fundamental para garantizar una productividad óptima, por lo que es trivial adaptar los algoritmos de navegación de modo que puedan trabajar con esta restricción.

El uso de robots en invernaderos es un tema en el que se está trabajando desde el año 1987. Desde entonces han aparecido muchos prototipos pero ninguno de ellos ha pasado a una fase de comercialización (Sánchez-Molina et al., 2024). Algunos de los últimos desarrollos cuentan con tecnología *Light Detection and Ranging* (LiDAR) para mapear el entorno y otros con cámaras *Red, Green, Blue, and depth* (RGB-D), que permiten detectar e identificar objetos con profundidad. El uso de los entornos de simulación permite desarrollar aplicaciones automatizadas en distintos entornos, pudiendo obtener resultados previos, detectando y corrigiendo los problemas antes de construir los prototipos. En (Abanay et al., 2022), utilizan el

robot “AgriEco” con un LiDAR 2D para realizar un método de navegación dentro de un invernadero de frambuesas, haciendo uso previamente de un simulador de la cinemática del robot. En (Choudhary et al., 2021), se presenta un trabajo similar en el que se realiza una localización y mapeo simultáneo o *Simultaneous Localization And Mapping* (SLAM), con un LiDAR y una cámara RGB-D en un invernadero con un cultivo de tomate, para el transporte de herramientas, simulado con Gazebo (Furrer et al., 2016). En esta etapa de simulación, también pueden usarse mapas virtuales realizando un mapeo de los entornos reales. En (Cañadas-Aránega et al., 2024) se realiza un mapeo con dos LiDAR 3D y una cámara estéreo de un invernadero de tipo Mediterráneo, cuyos datos fueron registrados durante dos meses de una plantación de tomate. Estos datos han permitido crear modelos 3D de plantas que podrían ser especialmente beneficiosos, por ejemplo, para la simulación de las operaciones automatizadas de pulverización, en las que se optimiza la aplicación de productos fitosanitarios, coordinando la velocidad del robot y la tasa de pulverización (Sánchez-Hermosilla et al., 2010; Sánchez-Hermosilla et al., 2013). En particular, existen bastantes trabajos relacionados con la navegación de los robots en invernaderos (Sánchez-Molina et al., 2024). Este trabajo se centra en la simulación de la navegación autónoma de un robot Ackermann en un invernadero de tipo Mediterráneo, haciendo uso del simulador *MultiVehicle Simulator* (MVSIM) (Blanco-Claraco et al., 2023) de bajo coste computacional con el sistema operativo *Robot Operating System* (ROS) (Maruyama et al., 2016). Cabe destacar que este simulador está disponible en todas las distribuciones de ROS 1 y ROS 2.

El objetivo principal del robot es la automatización de la tarea de transporte dentro de un invernadero con un bajo nivel de tecnificación, un invernadero de tipo Mediterráneo, permitiendo así a los operarios humanos concentrarse en responsabilidades más intrincadas como el deshierbe, la poda y la cosecha. En esta investigación, la navegación, situada dentro de una estructura de control jerárquica, se realiza a partir de un modelo 3D que abarca tanto el robot como el invernadero. Esto sirve como fase preliminar que precede a la experimentación sobre el terreno. En esta simulación se tienen en cuenta los objetos dinámicos y la presencia humana, para lo cual se emplean los planificadores locales y globales del *framework* Nav2 (Macenski et al., 2020) con el fin de conseguir la navegación autónoma del robot en el simulador *MultiVehicle Simulator*, de forma similar a como se hace en (López-Gázquez et al., 2023) para el robot AGRICOBOT I haciendo uso de Gazebo.

El documento está organizado con la siguiente estructura. La sección 2 ofrece una visión general del proyecto en el que se enmarca este estudio y los detalles del escenario experimental y el robot autónomo. La sección 3 explica los resultados de la simulación utilizando los modelos derivados de la configuración experimental y el robot móvil. Por último, la sección 4 presenta las conclusiones extraídas de la investigación.

2. Materiales y métodos

En esta sección se desarrolla la explicación de los materiales y métodos utilizados para el desarrollo del trabajo.

2.1. Materiales

En esta sección se describen los materiales utilizados en el desarrollo del presente trabajo.

2.1.1. Invernadero

Para realizar la simulación se utiliza un modelo 3D del invernadero experimental que forma parte de Agroconnect. Estas instalaciones, que recibieron financiación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades en colaboración con el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) dentro del programa de ayudas para la adquisición de equipamiento científico y tecnológico de vanguardia en 2019, están ubicadas en el Término Municipal de La Cañada de San Urbano, en Almería, dentro de las instalaciones del IFAPA (Instituto de investigación y Formación Agraria, Pesquera y alimentaria y de la producción ecológica de Andalucía) que hay junto a la Universidad de Almería (Figura 1a). Se trata de un invernadero con un estilo común en esta zona de la península, un invernadero de tipo Mediterráneo. Tiene una superficie de 1.850 metros cuadrados, una consistente estructura de acero y una cubierta de polietileno. El invernadero está dispuesto en una configuración de cumbre “Este-Oeste” para beneficiarse y aprovechar la ventilación natural de las dos direcciones del viento predominantes en la región. Un camino central de 2 metros de ancho en el invernadero es utilizado como vía principal de acceso y conduce a once pasillos a cada lado. Los pasillos en la parte norte miden 2 metros de ancho y 12,5 metros de largo, mientras que los del lado sur miden 2 metros de ancho y 22,5 metros de largo.



(a) Exterior del invernadero



(b) Interior del invernadero

Figura 1: Invernadero experimental del IFAPA

El modelado 3D preciso del invernadero es un pilar trivial cuando se trata de simular el comportamiento de un robot móvil en el entorno *MultiVehicle Simulator*. En este contexto, y aprovechando los datos recopilados del invernadero real en (Cañadas-Aránega et al., 2024), la Figura 2 muestra una representación en SolidWorks de la estructura. Este modelo reproduce meticulosamente todas las facetas de la arquitectura del invernadero, capturando fielmente sus matices estructurales, incluidas las columnas de soporte fundamentales y los elementos de refuerzo diagonales, reflejando con precisión sus equivalentes en el mundo real.

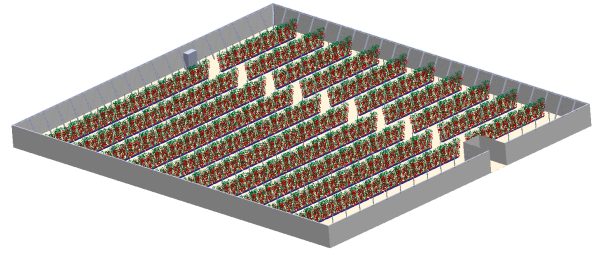


Figura 2: Modelo 3D del invernadero del IFAPA

Como se puede observar, también se incluye un modelo 3D a escala real de la tomatera plantada en las instalaciones (Figura 3) y un modelo de la caja de tomates utilizada (Figura 4). Estas plantas han sido colocadas en la misma ubicación en la que se encuentran en la realidad. La Figura 5 muestra el aspecto de una sección de uno de los pasillos por los que el robot debe navegar.

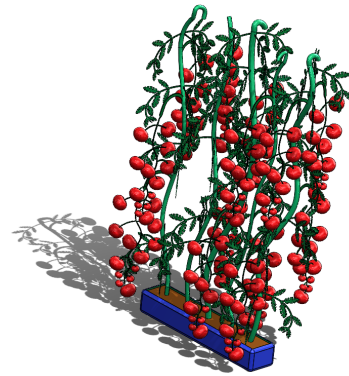


Figura 3: Modelo 3D de la tomatera

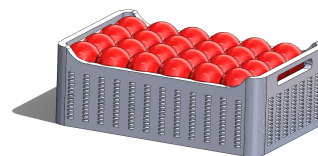


Figura 4: Modelo de la caja de tomates

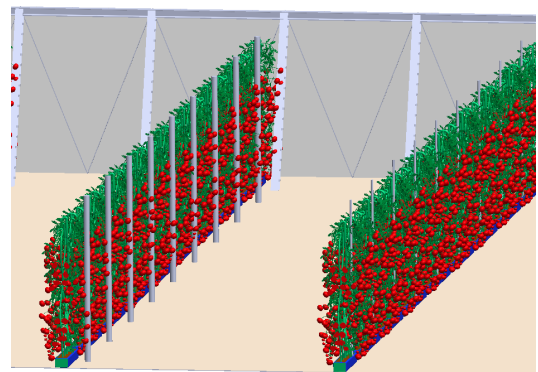


Figura 5: Vista en sección de uno de los pasillos de la zona norte del invernadero

2.1.2. Robot móvil autónomo AGRICOBLOT II

Las simulaciones se realizan con el modelo 3D del robot móvil real "AGRICOBLOT II", una plataforma diseñada y desarrollada íntegramente en la propia Universidad de Almería en el marco del proyecto AGRICOBLOT (Proyecto realizado parcialmente gracias al apoyo del proyecto PY20.00767 (CTEICU/FEDER)) (Moreno Úbeda et al., 2022). Se trata de un robot con una estructura Ackermann que permite giros con radio de 2 m. El robot ha sido diseñado específicamente para el transporte de cajas y herramientas en el interior del invernadero, destacando una plataforma en la parte superior con unas dimensiones adaptadas a las cajas utilizadas por los agricultores en los invernaderos de la zona. El robot consta de una estructura que forma el esqueleto de la máquina. Cuenta, por un lado, con dos horquilla unidas al chasis que, a su vez, están unidas a un motor para establecer la dirección del robot y, por otro, dos rodamientos unidos por un eje a dos ruedas impulsadas por un motor de tracción. En los laterales se encuentran dos chapas de protección donde van los logos del proyecto que lo financia y, en la parte delantera y trasera, lleva instalado dos paragolpes de *PolyVinyl Chloride* PVC rígido. Como novedad, este robot lleva un mástil extensible unido al paragolpes trasero, donde se instalan una serie de sensores para que pueda navegar a través del invernadero (e incluso en exteriores, por ejemplo para navegar hasta a una estación de recarga exterior o hasta otro invernadero) y colaborar con operadores humanos. El modelo 3D desarrollado en Solidworks para este robot se puede observar en la Figura 6

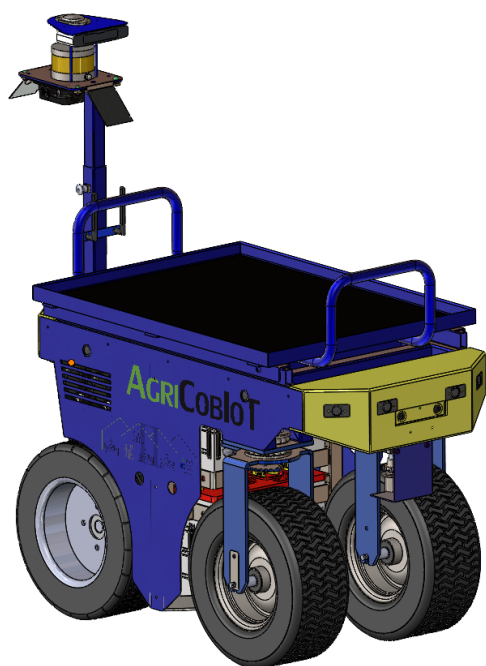


Figura 6: Modelo 3D en SolidWorks del robot AGRICOBLOT II

En cuanto al sistema sensorial instalado, el robot cuenta con un LiDAR Velodyne VLP16 localizado en la parte superior del mástil, junto a un Sistema global de navegación por satélite o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) Novatel A1 junto a una antena ANTCON 18X. También, colocado en el mástil y sin obstaculizar la visión del LiDAR y la antena,

lleva instalada una cámara Orbbec Persee + con el objetivo de captar las imágenes de los operarios que detecte mientras está trabajando. Además, en esta zona lleva instalada una pantalla táctil para que tanto el programador como el agricultor puedan interactuar y supervisar el funcionamiento de la máquina. En la parte delantera lleva instalada una cámara estéreo Bumblebee 2 que será utilizada para identificar los objetos encontrados entre origen y final del invernadero. Finalmente, en todo su contorno lleva doce sensores de ultrasonidos para identificar los posibles obstáculos encontrados. Todos los sensores están conectados a un PC industrial eficiente con un procesador i7-8550U, 32 GB de memoria RAM y tarjeta gráfica Intel H620. Este ordenador alcanza un compromiso entre características técnicas y ambientales que garantiza el correcto funcionamiento en un entorno tan complicado como es un invernadero: altas temperaturas, humedad, presencia de polvo, etc.

2.2. Métodos

Para este trabajo, el sistemas de percepción del entorno juega un papel fundamental para determinar el correcto funcionamiento autónomo en las tareas del robot en el invernadero. Para poder llevarlo a cabo, el uso de simuladores es crucial para realizar la fase previa a la implementación real, llegando a emular todas las físicas reales que el robot se puede encontrar en el entorno real. En este caso, *MultiVehicle Simulator* (MVSIM) (Blanco-Claraco et al., 2023) es un entorno donde se puede simular un mundo con múltiples vehículos o robots en tiempo real, en entornos sencillos y complejos. MVSIM emplea modelos de fricción realistas basados en la física para la interacción entre los neumáticos y el suelo, simulándolo de forma precisa. El simulador admite el uso de los sensores modernos más comunes empleados en la investigación en robótica móvil y vehículos autónomos, como las cámaras RGB-D o los escáneres LiDAR 2D y 3D. Todos los sensores relacionados con la profundidad son capaces de medir con precisión distancias a modelos 3D proporcionados por el usuario para definir elementos de un entorno personalizado usando aceleración basada en la *Graphics Processing Unit* (GPU). Cuando se trabaja con vehículos terrestres, el simulador es muy eficiente, ya que se utiliza un motor de física 2D simplificado para las colisiones entre carrocerías y para resolver por separado las fuerzas de interacción entre las ruedas y el suelo.

Para poder trabajar con el simulador, es necesario diseñar el modelo del robot modularmente con los archivos con extensión .dae. Para poder importarlo, el modelo original de Solidworks es exportado en .stl y cargado en Blender (Cui et al., 2021), donde se le proporciona color y se exporta a .dae. Este proceso es necesario ya que permite definir las características físicas (posición, masa e inercia) de cada componente, así como su apariencia y modelo de colisión (López-Gázquez et al., 2023). Una vez obtenidos todos los modelos en esta extensión, se configuran y posicionan en las coordenadas correctas, determinando el tipo de unión en cada uno de los elementos, caracterizando un volumen y, por tanto, la geometría de colisión realista.

En cuanto a los sensores para realizar la simulación, se utilizan los modelos .dae de todos los sensores que lleva instalados, aunque para la navegación simulada en este trabajo solo se usan los datos obtenidos por el Velodyne VLP16.

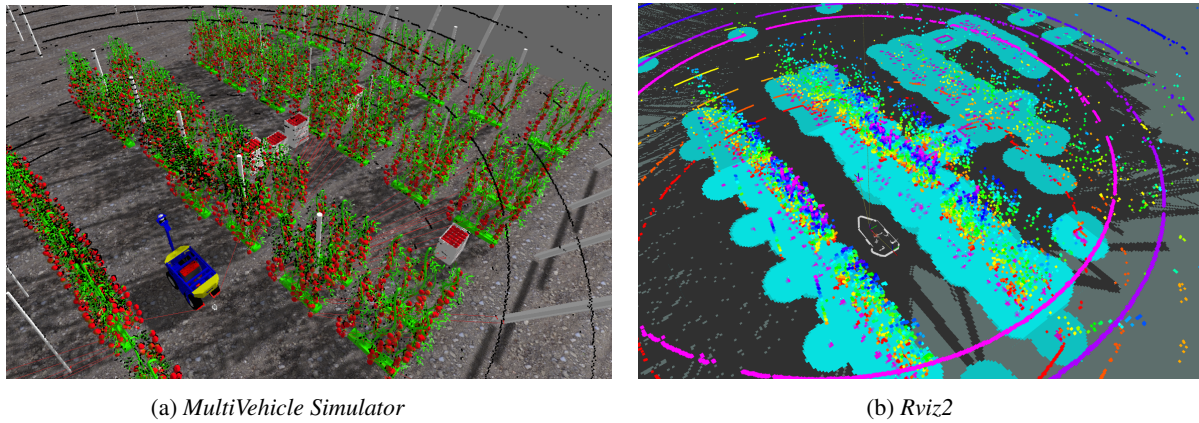


Figura 7: Entorno de simulación *MultiVehicle Simulator* con el algoritmo de navegación Nav2

Las funcionalidades adicionales incorporadas en cada sensor se han implementado mediante nodos que utilizan otros paquetes ROS 2. El árbol de transformaciones entre los distintos elementos se realiza a través del paquete ROS 2 *tf2*.

3. Resultados

El principal resultado derivado de este trabajo consiste en la navegación autónoma del robot AGRICOBOT II dentro del invernadero experimental de la sección anterior. La Figura 7a muestra al robot dentro del simulador MvSim, localizado en el pasillo central. La Figura 7b muestra la nube de puntos del mismo sensor con una gama de color *jet* y los mapas de coste cercanos (Jaillet et al., 2010), en la herramienta *rviz2* de ROS 2. En este caso, la navegación se hace únicamente con el sensor LiDAR haciendo uso de la nube de puntos generada por el mismo sensor. Para ello, se ha utilizado el framework reactivo de navegación de alta calidad Nav2. Este software proporciona un nivel de abstracción en cuanto a todos los procesos implicados en la navegación (percepción, planificación, control, localización, etc.) (Macenski et al., 2020).

En el primer paso, el robot tiene que escanear toda la instalación para obtener un mapa base de los elementos fijos (infraestructuras y cultivos). Este mapa es muy importante para la planificación precisa de la trayectoria de los sistemas autónomos ya que será la base que el robot usará para la toma de las distintas decisiones. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8, donde puede verse la distribución de los pasillos junto a una línea verde que indica la dirección. A partir de esta referencia, el robot planificará sus trayectorias globales y las modificará dinámicamente en función de los obstáculos que pueda encontrar (objetos estáticos, operarios u otros robots). En el archivo de configuración del sistema de navegación deben especificarse parámetros fundamentales para el movimiento del robot, como las velocidades y aceleraciones máximas y mínimas, y el margen de seguridad que debe mantener el robot para evitar la colisión con los obstáculos.

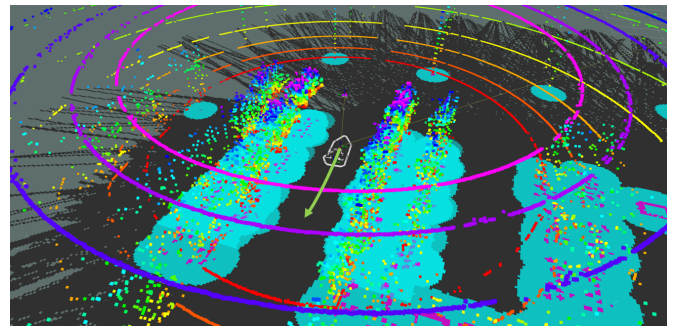


Figura 8: Recorrido inicial

Tras definir el entorno y las condiciones de funcionamiento, el siguiente paso es diseñar un *node* (fragmento de código encargado de una tarea específica) que controle las posiciones objetivo del robot. En este caso, el simulador se encarga de publicar el *path* (ruta de navegación) y de leer los *waypoints* (puntos a lo largo del *path* que el robot debe seguir) de un archivo o recibirlos dinámicamente a través de un *topic* (canal de comunicación entre nodos). Los datos generados por los sensores son especialmente útiles para tareas que el robot puede realizar de forma independiente, como actualizar el mapa o inspeccionar el cultivo atravesando la instalación, ya sea en su totalidad o en parte. Por ejemplo, cuando el robot realice un transporte de cajas, puede recibir la posición de dónde depositarlas y la posición de retorno a través de un *topic*. Otro ejemplo es el uso de las distintas posiciones conocidas y enviarlas a otros robots, de modo que ambos pueden establecer una ruta óptima para llegar al destino sin colisionar y de forma colaborativa.

La Figura 9 muestra un caso práctico en el que el robot navega por el invernadero. Cuando el robot va navegando y se encuentra con un obstáculo, la trayectoria se recalcula (se muestra mediante el giro de la flecha verde) y el algoritmo de navegación en Nav2 busca el camino alternativo óptimo. En los siguientes enlaces se puede observar una grabación de las pruebas realizadas en la simulación con un obstáculo, usando *MvSim* con los objetivos del robot y *Rviz2* para proporcionar los cambios de las trayectorias.

Es importante destacar que la simulación se ha realizado con un equipo con procesador Intel Core i7 12700K, tarjeta gráfica Nvidia GTX 4060 y 32 GB de RAM. Como ya se ha

comentado, en (López-Gázquez et al., 2023) se realiza una simulación con el mismo invernadero, conservando el mismo número de plantas y área de trabajo pero usando el robot diferencial AGRICOBOT I y Gazebo. En este caso la simulación consume un 117 % de GPU. Sin embargo, en el presente trabajo, usando MVSIM y el robot Ackermann AGRICOBOT II, la simulación consume un 85 % de GPU, lo que supone una mejora del 32 % en unas condiciones muy similares.

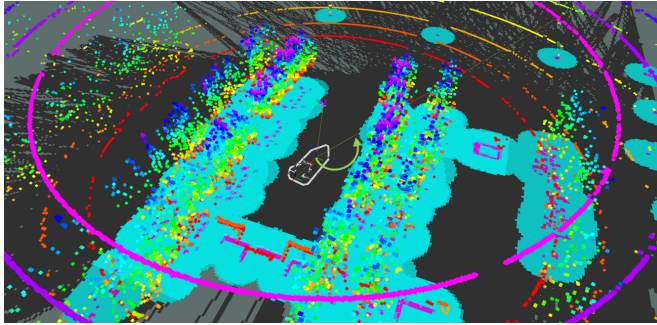


Figura 9: Actualización de la trayectoria al detectar un obstáculo

4. Conclusiones

En este artículo, se ha implementado un sistema de navegación autónomo de un robot móvil agrícola tipo Ackermann, diseñado por los propios autores para colaborar con humanos dentro de un invernadero de tipo Mediterráneo. Se ha descrito con detalle el modelo 3D del propio invernadero, haciendo especial hincapié tanto en el diseño físico como en el propio cultivo real plantado. Además, se ha descrito con detalle el propio modelo 3D del robot desarrollado en el proyecto AGRICOBOT, añadiendo una explicación clara del proceso de adaptación al simulador MVSIM. En simulación, este robot ha sido capaz de moverse a través de los pasillos del invernadero de forma autónoma mediante el *move to point* de forma dinámica con y sin obstáculos, mejorando el rendimiento de la simulación.

Este trabajo abre la posibilidad futura de implementar el algoritmo de navegación sobre el robot real, valorando la implementación del trabajo colaborativo con humanos y el desarrollo de estrategias de control cooperativas para la integración de sistemas multi-robot en el invernadero.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto 'CyberGreen', PID2021-122560OB-I00, y la infraestructura "AgroConnect.es" utilizada para llevar a cabo esta investigación, beca EQC2019-006658-P, ambos financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por FEDER A way to make Europe. Asimismo, el autor Fernando Cañadas-Aránega cuenta con una beca FPI (PRE2022-102415) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Referencias

Abanay, A., Masmoudi, L., El Ansari, M., Gonzalez-Jimenez, J., Moreno, F.-A., 2022. Lidar-based autonomous navigation method for an agricultural

- mobile robot in strawberry greenhouse: Agrieco robot. *AIMS Electron. Electr. Eng* 6, 317–328.
- Bac, C., Hemming, J., Van Henten, E., 2013. Robust pixel-based classification of obstacles for robotic harvesting of sweet-pepper. *Computers and electronics in agriculture* 96, 148–162.
- Belmonte-Ureña, L. J., Garrido-Cardenas, J. A., Camacho-Ferre, F., 2020. Analysis of world research on grafting in horticultural plants. *HortScience* 55 (1), 112–120.
- Blanco-Claraco, J.-L., Tymchenko, B., Mañas-Alvarez, F. J., Cañadas-Aránega, F., López-Gázquez, Á., Moreno, J. C., 2023. Multivehicle simulator (mvsim): Lightweight dynamics simulator for multiagents and mobile robotics research. *SoftwareX* 23, 101443.
- Cañadas-Aránega, F., Blanco-Claraco, J. L., Moreno, J. C., Rodríguez-Díaz, F., 2024. Multimodal mobile robotic dataset for a typical mediterranean greenhouse: The greenbot dataset. *Sensors* 24 (6).
URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/6/1874>
DOI: 10.3390/s24061874
- Choudhary, A., Kobayashi, Y., Arjonilla, F. J., Nagasaka, S., Koike, M., 2021. Evaluation of mapping and path planning for non-holonomic mobile robot navigation in narrow pathway for agricultural application. In: 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, Iwaki, Fukushima, Japan, pp. 17–22.
- Cui, Y., Yan, L., Cao, Z., Liu, D., 2021. Tf-blender: Temporal feature blender for video object detection. In: Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. IEEE Computer Society, Montreal, BC, Canada, pp. 8138–8147.
- Furrer, F., Burri, M., Achtelik, M., Siegwart, R., 2016. Rotors—a modular gazebo mav simulator framework. *Robot Operating System (ROS) The Complete Reference (Volume 1)*, 595–625.
- Jaillet, L., Cortés, J., Siméon, T., 2010. Sampling-based path planning on configuration-space costmaps. *IEEE Transactions on Robotics* 26 (4), 635–646.
- Ko, M. H., Ryuh, B.-S., Kim, K. C., Suprem, A., Mahalik, N. P., 2014. Autonomous greenhouse mobile robot driving strategies from system integration perspective: Review and application. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics* 20 (4), 1705–1716.
- López-Gázquez, A., Mañas-Álvarez, F. J., Moreno, J. C., Cañadas-Aránega, F., Sánchez, J. A., October 22–27 2023. Navigation of a differential robot for transporting tasks in mediterranean greenhouses. In: Proceedings of the 2023 International Symposium on New Technologies for Sustainable Greenhouse Systems (Greensys). ISHS (International Society for Horticultural Science), Cancún, Mexico, pp. 1–8.
- Macenski, S., Martín, F., White, R., Clavero, J. G., 2020. The marathon 2: A navigation system. In: 2020 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, Las Vegas, NV, USA, pp. 2718–2725.
- Maruyama, Y., Kato, S., Azumi, T., 2016. Exploring the performance of ros2. In: Proceedings of the 13th international conference on embedded software. Association for Computing Machinery, Pittsburgh Pennsylvania, pp. 1–10.
- Moreno Úbeda, J. C., Cañadas-Aránega, F., Rodríguez, F., Sánchez-Hermosilla, J., Giménez, A., 2022. Modelado 3d y diseño de un robot colaborativo para tareas de transporte en invernaderos. In: XLIII Jornadas de Automática. Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións, Logroño, La Rioja, Spain, pp. 785–791.
- Sánchez-Hermosilla, J., González, R., Rodríguez, F., Donaire, J., 2013. Mechatronic Description of a Laser Autoguided Vehicle for Greenhouse Operations. *Sensors* 13 (1), 769–784.
URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23299624>
<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC3574703>
<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/1/769>
DOI: 10.3390/s130100769
- Sánchez-Hermosilla, J., Rodríguez, F., Gonzalez, R., Luis, J., Berenguel, M., mar 2010. A Mechatronic Description of an Autonomous Mobile Robot for Agricultural Tasks in Greenhouses. In: *Mobile Robots Navigation. In-Tech*.
DOI: 10.5772/9003
- Sánchez-Molina, J., Rodríguez, F., Moreno, J., Sánchez-Hermosilla, J., Giménez, A., 2024. Robotics in greenhouses. scoping review. *Computers and Electronics in Agriculture* 219, 108750.
- Trenda, E., 2023. Greenhouse agricultural area in spain in 2022, by type of crop. <https://www.statista.com/statistics/1218871/greenhouse-area-spain-by-crop/>, accessed: 22 April 2023.