

MODELADO 3D Y DISEÑO DE UN ROBOT COLABORATIVO PARA TAREAS DE TRANSPORTE EN INVERNADEROS

J. C. Moreno^{a*}, F. Cañadas-Aránega^a, F. Rodríguez^a, J. Sánchez-Hermosilla^b, A. Giménez^b

^aDepartamento de Informática, ^bDepartamento de Ingeniería. Universidad de Almería
CIESOL Centro de Investigación en Energía Solar – Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario
Ceia3. Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería, España, *jcmoreno@ual.es

Resumen

El objetivo de los proyectos AGRICOBOT I y AGRICOBOT II es el desarrollo de un sistema multi-robot colaborativo para la asistencia del operario humano en las tareas de transporte en el interior de invernaderos. El entorno elegido para la experimentación es un invernadero tipo Almería, representativo de los invernaderos mediterráneos, que a pesar de ser en general poco adecuado para la navegación de robots. El sistema consta de dos robots aunque el trabajo se centra en uno de ellos. En este trabajo se presenta el modelado y el diseño preliminar del robot que trabajará en el invernadero colaborando con el operario y cooperando con otros robots, así como el modelado del entorno de trabajo.

Palabras clave: Sistemas multi-robot, Robótica Agrícola, IoT.

1 INTRODUCCIÓN

La superficie actual de invernaderos en el mundo supera las 350.000 ha, con un continuo crecimiento en los últimos años, estimándose en un 20% anual desde 1980. En España hay 75.538 ha [7] que suponen algo más del 20% de la superficie total dedicada a la producción de hortalizas, y se localizan fundamentalmente en el sudeste peninsular. Este sector genera unos 100.000 empleos directos y en torno a 25.000 empleos indirectos en industrias y servicios vinculados, lo que indica el interés social del subsector de cultivos en invernadero en España. Sin embargo, actualmente, se tiene que competir con sectores muy tecnificados de países desarrollados, que ofertan buena calidad y servicio a coste medio, y con nuevos sectores en países menos desarrollados con costes de producción muy bajos como Marruecos o Turquía. Únicamente, la mejora de la productividad y la calidad pueden permitir el mantenimiento de la rentabilidad, siendo la tecnología parte esencial de este proceso. Por otra parte, la creciente necesidad de alimentación animal y

humana, la falta de mano de obra en las zonas rurales y el mayor interés en sistemas autónomos como un efecto colateral de la pandemia provocada por la COVID-19, justifican también el uso de esta tecnología.

Este trabajo se centra en la tarea de transporte dentro de estos invernaderos, por considerarse un trabajo aburrido, sucio y peligroso (*Dull, Dirty and Dangerous*). Además de fundamental en agricultura, se trata de una tarea viable para ser desempeñada por un robot, trabajando junto a los operarios humanos que se encargarían de otras tareas más complejas como la eliminación de malas hierbas, poda, recolección,.... Actualmente existen muchos robots comerciales para agricultura pero ninguno trabaja bajo invernadero.

El trabajo se organiza del siguiente modo. En la sección 2 se explica a grandes rasgos el proyecto en el que se enmarca este trabajo. La sección 3 muestra los detalles del entorno de experimentación. En la sección 4 se explican los componentes del sistema multi-robot y finalmente en la sección 5 se muestran unas breves conclusiones.

2 PROYECTO AGRICOBOT

El proyecto AGRICOBOT (AGRICultural Collaborative roBot inside the IOT) consta de dos subproyectos, uno financiado por la Universidad de Almería (AGRICOBOT) y otro financiado por la Junta de Andalucía (AGRICOBOT II), ambos en el marco del Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020. El primero de ellos se centra en el desarrollo de un robot basado en una plataforma comercial, adaptada para trabajar de forma colaborativa con el operador humano en el interior de un invernadero, en principio asistiéndole en tareas de transporte, y tomando medidas de distinta naturaleza que son almacenadas en la nube para su posterior tratamiento o para ser usadas por el resto del sistema en tiempo real. En la tarea de recolección, el operario es el encargado de ir depositando la hortaliza recolectada en las cajas que transporta el robot. Cuando el robot recibe la orden de ir a la estación de descarga, este se desplaza por el camino óptimo de

modo completamente autónomo (Figura 1). El robot mantiene en todo momento un comportamiento colaborativo con el usuario, observando sus gestos y adaptando su movimiento para facilitar la recolección de la hortaliza, al tiempo que recoge los datos necesarios del entorno y traza un mapa que utilizará para optimizar las trayectorias en su desplazamiento autónomo por el invernadero. El segundo proyecto se centra en el desarrollo de una nueva plataforma, con un objetivo similar al comentado anteriormente, diseñada para trabajar de forma óptima en invernadero, manteniendo un compromiso entre rendimiento y coste que la haga rentable para un futuro uso comercial. En este proyecto se considera la existencia de diferentes robots que trabajarán de forma cooperativa en la tarea de transporte anteriormente citada. Se consideran robots con distintas configuraciones, el desarrollado en el subproyecto AGRICOBOT es un robot con mecanismo diferencial y el desarrollado en el AGRICOBOT II se basa en una estructura Ackermann. Ambos robots tienen las mínimas dimensiones que les permiten realizar el transporte de un número de cajas adecuado, desplazándose por pasillos de aproximadamente 1 metro de ancho a una velocidad no superior a 1 m/s. Estos robots permanecerán gran parte de su tiempo cerca de los humanos, por lo que en todo momento se ha considerado la normativa que garantiza la seguridad de los operarios. Para la programación de los robots se utiliza ROS2 (*Robot Operating System*) y para la conexión a la nube FIWARE [12].

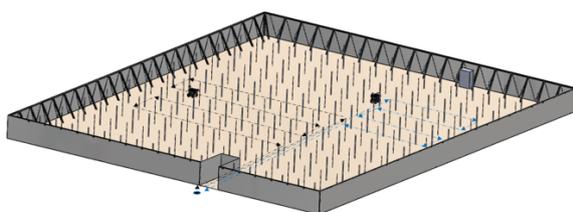


Figura 1: Simulación del sistema multi-robot desplazándose en el invernadero

3 ENTORNO DE PRODUCCIÓN: INVERNADERO MEDITERRÁNEO

3.1 INVERNADERO

3.1.1 Características generales

Las experiencias tendrán lugar en las instalaciones que el Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera y Alimentaria (IFAPA), posee en el Término Municipal de la Cañada de San Urbano (Almería) a 36°50' N y 2°24' O y a una altura de 3 m sobre el nivel del mar (Figura 2). La infraestructura

AgroConnect se ha cofinanciado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y fondos FEDER, en el marco de la convocatoria de ayudas para la adquisición de equipamiento científico-tecnológico (2019). Concretamente se está usando un invernadero tipo Almería con estructura de acero, cubierta de polietileno, orientación de cumbre este-oeste y superficie de 1850 m². Posee un pasillo central de 2 metros de ancho, del que se bifurcan pasillos secundarios con ancho de un metro por los que deben navegar los robots móviles. Se divide en dos sectores en los que se dispone de los siguientes sistemas de actuación para el control del crecimiento del cultivo: ventilación natural (cenital y lateral), calefacción y refrigeración por aire, sistemas de enriquecimiento de CO₂, humidificadores, deshumidificadores, sistema de riego y fertilización, e iluminación artificial led. Con el fin de monitorizar las variables del sistema y las condiciones meteorológicas dentro y fuera del invernadero, se cuenta con seis estaciones interiores IoT (*Internet of Things*) que permiten medir la temperatura, humedad relativa, presión ambiental, humedad de hoja, radiación solar, radiación PAR y concentración de CO₂; o incluso variables del terreno como el contenido volumétrico, conductividad eléctrica y temperatura del suelo. También se dispone de dos estaciones meteorológicas exteriores que miden variables externas como precipitación, velocidad y dirección del viento, radiación, temperatura y humedad y concentración de CO₂. A nivel de medida, control y supervisión, el invernadero posee su propia nube (*fog*), que a su vez se incorpora a la arquitectura basada en la nube (con las tres capas *Edge, Fog* y *Cloud*) [9] con la idea subyacente de proveedor de servicios [13] (Figura 3), que integra el resto de sistemas que componen las instalaciones y que necesitan intercambiar información y órdenes entre ellos: desalación solar, destilación por ósmosis, parque fotovoltaico, instalación solar térmica, fotobiorreactores de microalgas, etc; así como servicios externos como predicciones climáticas, información de precios, etc. Los diferentes robots que trabajan en estas instalaciones (los dos móviles de los proyectos AGRICOBOT y AGRICOBOT II, y drones para mantenimiento de instalaciones) se integran también en esta arquitectura, haciendo uso de su propia *fog*, ya que pueden utilizar y proporcionar información del y para el resto de sistemas.



(a) Exterior



(b) Vista panorámica del interior

Figura 2: Invernadero

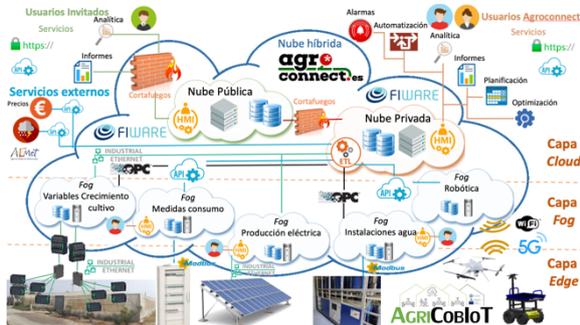


Figura 3: Arquitectura IoT en la que se integra el invernadero

3.1.2 Modelado 3D

Un correcto modelado 3D del invernadero juega un papel fundamental a la hora de simular el sistema multi-robot en Gazebo [10], un entorno de código abierto muy utilizado en robótica. En este contexto, y con medidas tomadas en el invernadero físico descrito en el apartado anterior, la Figura 4 muestra un modelado del mismo en SolidWorks. En el modelo se puede observar toda la estructura con los elementos puntales y diagonales de sujeción que existen en el invernadero real.

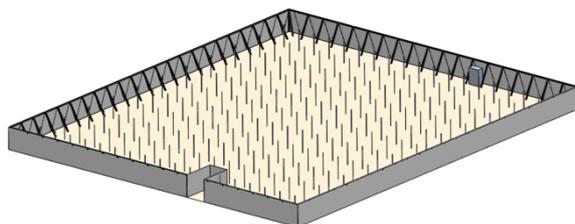


Figura 4: Modelo 3D del invernadero

Además, se ha modelado el cultivo de tomate a partir de una planta normalizada con las medidas que indica la normativa de comercialización de frutas y hortalizas [15] (ver Figura 5).

Es interesante incluir el modelo de la planta de tomate en el modelo del invernadero, ya que cuanto más realista sea la simulación, menor esfuerzo habrá que invertir en trasladar los algoritmos desarrollados al entorno real. En la Figura 6 se muestra una posible disposición de las plantas en el invernadero,

remarcando que la posición corporal de la tomatera es cambiante, simulando el azar de crecimiento de las mismas. La Figura 7 muestra la vista 3D que observaría el robot en su movimiento a través del pasillo central del invernadero y, la Figura 8 la vista del robot para un pasillo lateral.

Por tanto, para este proyecto, como eje fundamental para el desarrollo de la tarea de control, se ha desarrollado una configuración de simulación con los modelos expuestos a lo largo de esta sección. El entorno de simulación seleccionado ha sido Gazebo. Esta elección está basada en la versatilidad que ofrece para conmutar del robot simulado al real sin realizar cambios adicionales en el resto de módulos empleados en la red en la que opera el robot. Si bien es cierto que es el entorno que ofrece una interfaz menos amigable, su uso es el más extendido en robótica junto con ROS/ROS2 [8].

4 SISTEMA MULTI-ROBOT

4.1. Especificaciones

Una de las tareas fundamentales del proyecto es desarrollar un entorno colaborativo y cooperativo con dos robots, en principio, aunque extrapolable a una



Figura 5: Modelo 3D de planta de tomate

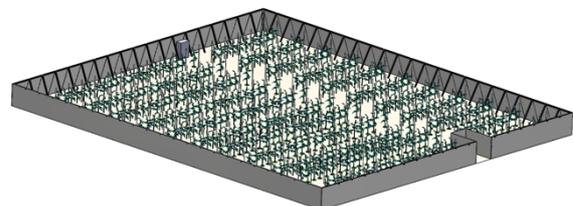


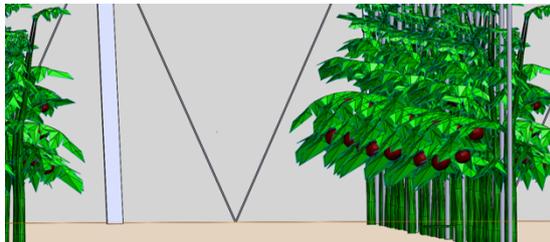
Figura 6: Modelo del invernadero incluyendo el cultivo



Figura 7: Vista robot pasillo central



(a) Vista real



(b) Vista en simulación

Figura 8: Vista robot pasillo lateral

flota con un mayor número de vehículos en el futuro, basado en ROS2.

Cada robot debe ser capaz de transportar un peso máximo de entre 60 y 100 Kg, repartido en cajas de 60x60x32cm. Estas dimensiones están normalizadas y corresponden a las cajas de mayor tamaño para los cultivos con los que se pretende trabajar (tomate, berenjena, calabacín y pimiento), según el reglamento [15]. Concretamente estas cajas se usan para el transporte de pimiento californiano.

Por otra parte, los robots deben ser capaces de desplazarse de forma autónoma a una velocidad máxima de 1 m/s entre pasillos con una anchura mínima de 1 metro sobre un suelo enarenado.

Cada robot debe trabajar de forma colaborativa con los operarios de campo, por lo que en su diseño debe tenerse en cuenta la normativa de seguridad aplicable a robots móviles colaborativos con este perfil. Concretamente:

- ANSI/RIA R15.08-1-2020 [5] - Safety Requirements. Requirements for the Industrial Mobile Robot: Diseño y medidas reducidas para un robot de uso general, control de seguridad, estabilidad, centro de masa y lista de peligros.
- UNE ISO 13482 [3] - Requirements for the Industrial Mobile Robot: Seguridad con el uso de baterías, almacenamiento, encendido y apagado del robot y peligros debido al

diseño con elementos cortantes, punzantes o que puedan causar daños.

- ISO DIS 31101 [6] - Application services provided by service. Safety management systems requirements: Planificación y actividades para reducir el riesgo de robots colaborativos con humanos y con otros robots.
- UNE ISO 10218-1:2 [1] - Safety management systems requirements. Sistemas robot e integración: Diseño sobre el sistema de detección de presencia y funcionamiento de robots cooperativos con humanos y con otros robots.
- UNE ISO/TR 23482-2 [2] - Application services provided by service: Elementos de seguridad para robots transportadores.
- UNE ISO/TS 15066 – 2016 [4] - Robots and robotic devices. Collaborative robots: Parámetros de control para robots colaborativos.

4.2. Estructura mecatrónica

Como se indicó en la sección 2, el robot desarrollado en el marco del proyecto AGRICOTBIOT I está basado en una plataforma comercial, concretamente en el robot Husky de Clearpath [11].

Se trata de un robot diferencial que permite realizar giros con radio nulo, dotándole de una característica de vital importancia para desplazarse por los pasillos del invernadero. Es importante resaltar que la estructura que proporciona la empresa no tiene un buen diseño para el transporte de cajas por lo que, para que sea capaz de cumplir con las tareas propuestas en las bases del proyecto, ha sido necesario el diseño de una estructura que, por un lado, pueda ayudar al agricultor en la recolección y, por otro lado, posea el espacio suficiente para la colocación de todos los sensores y cargas. Esta plataforma consta de 4 pilares centrales que la elevan a una altura cómoda para que el operario pueda depositar las hortalizas. Además, se ha diseñado un implemento extraíble para el transporte de las cajas mediante unos railes guiados. Este implemento tiene el tamaño de la caja normalizada más desfavorable que se puede usar en la zona y está apoyado sobre la base de la estructura donde se colocan unos sensores de ultrasonidos para detectar los obstáculos cercanos. Por último, cuenta con un mástil trasero multinivel donde irá colocada una cámara de detección de personas que es capaz de ajustarse a las necesidades de la tarea, En la Figura 9

se muestra el diseño final de la plataforma incluyendo todos los sensores.

El diseño del elemento de color azul está ajustado a las dimensiones normalizadas de 2 cajas de pimiento californiano.

Para que el robot sea capaz de moverse a través del invernadero, debe de llevar consigo un sistema de percepción que le permita navegar evitando colisionar con obstáculos, ya sean fijos o móviles. Para ello, se ha equipado el robot con los siguientes componentes:

- LiDAR Ouster: Se trata de un equipo de detección y mapeo láser (OUSTER – OS0) que permite detectar los obstáculos y construir un mapa del entorno. Se ha instalado en la parte frontal del vehículo a una altura de 37 cm sobre el suelo.
- Sónares: Sistema de detección basado en ultrasonidos (Valeo Mobility Kit). Un total de 12 sensores instalados recorriendo todo el perímetro del robot, a una altura de 66 cm sobre el suelo.
- Sistema de visión: El robot se ha equipado con 2 cámaras, una Orbbec Persee+ y una AXIS P3905-R Mk II Network Camera. La cámara AXIS, ubicada en la parte inferior del robot, también a 66 cm del suelo, es la encargada del reconocimiento del suelo (cajas, piedras, herramientas...) La cámara Persee+ es de tipo RGB-D y cuenta con un sistema empotrado que le permite acondicionar los datos recogidos, eliminando esa tarea del computador central. Está ubicada en la parte superior del mástil multinivel y se encarga del reconocimiento 3D del comportamiento de los operarios en el módulo de colaboración.
- GPS: Se ha instalado un GPS marca Garmin 18x USB para localización del robot fuera del invernadero, que irá colocado junto a la cámara 3D en el mástil. Asimismo está previsto el análisis de la viabilidad de este sensor en el interior.
- Neu X302: Se trata de un computador industrial con un procesador Intel Core i7, 32 GB de RAM, 6 puertos COM y un SSD M.2 de 256GB. Su tarea principal es el control del movimiento del vehículo.

Todos estos elementos irán conectados al computador central y alimentados por 2 baterías: una de ellas alimenta a los motores de tracción y al computador; La segunda batería alimenta al resto de dispositivos

que requieren alimentación externa: cámara Persee+, LiDAR Ouster y ultrasonidos. Gracias a esta configuración de baterías, el Husky tiene una autonomía de 4 – 5 h a máxima potencia.

Como se ha indicado anteriormente, en el marco del proyecto AGRICOBOT II se ha desarrollado un robot completamente nuevo, con una estructura tipo Ackermann adaptada a las necesidades del trabajo en invernadero. Su envergadura es ligeramente superior a la del Husky y su autonomía es mucho mayor, soportando una carga máxima de 100 Kg frente a los 60 del Husky. En este momento se está tramitando la patente de esta plataforma.

Hay que señalar que el diseño de este vehículo se ha realizado teniendo en cuenta las normativas comentadas en el caso del Husky, además de otras normas de especial interés.

4.3 Arquitectura software

La red de comunicación en la que opera el robot está implementada en ROS2. Siendo ROS uno de los estándares más implementados en aplicaciones robóticas actualmente, para este proyecto se ha considerado oportuno el empleo de su segunda versión. ROS2 es un sistema que mantiene la esencia de ROS pero ofrece mejoras significativas que responden a las aplicaciones donde la robótica se está desarrollando más recientemente [14]. Entre ellas cabe destacar una arquitectura distribuida frente a la centralizada de ROS, que está diseñado para las versiones más recientes de los principales lenguajes de programación, Python 3.5 y C++17, y que permite trabajar en Windows, Linux y Mac de forma nativa, lo que favorece una integración más heterogénea de equipos en la red.

El sistema multi-robot se conecta a la nube a través de FIWARE (tal y como se muestra en la Figura 3). Esta conexión permite utilizar información recabada por los sensores repartidos por las diferentes instalaciones del sistema invernadero descrito en la sección 2 y de otros robots, así como proporcionar información que pueda resultar útil para el resto de sistemas. La conexión con FIWARE se realiza mediante ROS2 [12].

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra el estado actual de los proyectos AGRICOBOT I y AGRICOBOT II. En las primeras tareas de estos proyectos se han desarrollado modelos 3D de dos robots, uno basado en una plataforma comercial y otro desarrollado completamente en la Universidad de Almería, además del invernadero experimental que se va a usar para la validación del sistema completo. Estos modelos,

aunque solo uno de ellos se ha descrito en este trabajo, han sido integrados en Gazebo y se están usando actualmente para el desarrollo de la tarea de control. El siguiente paso será estudiar, también en simulación el módulo colaborativo y el módulo cooperativo, al tiempo que se empiezan a realizar las primeras pruebas de campo con todo el sistema sensorial, prestando especial interés a la viabilidad del GPS en el interior del invernadero para las tareas de navegación y supervisión.

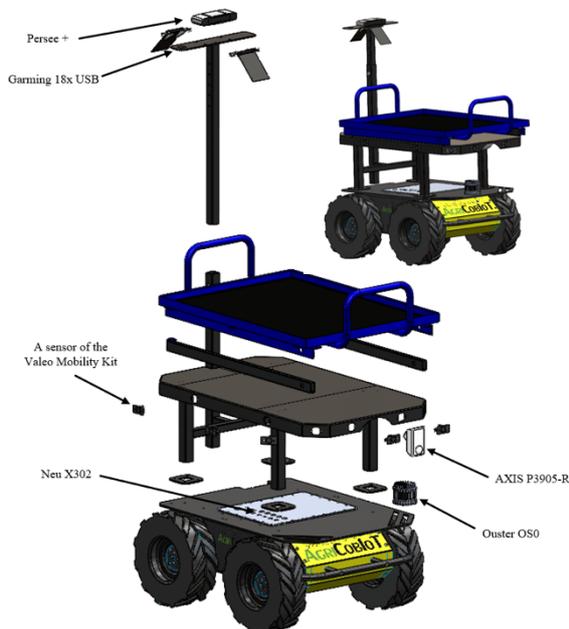


Figura 9: Diseño basado en plataforma Husky (robot AGRICOBOT I)

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de los proyectos UAL2020-TEP-A1991 (UAL/CTEICU/FEDER) y PY20_00767 (CTEICU/FEDER).

English summary

3D MODELLING AND DESIGN OF A COLLABORATIVE ROBOT FOR TRANSPORT TASKS IN GREENHOUSES

Abstract

The objective of the AGRICOBOT I and AGRICOBOT II projects is the development of a collaborative multi-robot system to assist the human operator in transport tasks inside greenhouses. The environment chosen for the experimentation is an Almeria type greenhouse, representative of Mediterranean greenhouses, which is generally not very suitable for robot navigation. The system consists of two robots, although the work focuses on one of them. This work presents the modelling and preliminary design of the robot that will work in the greenhouse collaborating with the operator and cooperating with other robots, as well as the modelling of the working environment.

Keywords: Multi-robot systems, Robotics in Agriculture, IoT.

Referencias

- [1] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2012). Requisitos de seguridad para robots industriales. (UNE – EN ISO 10218 – 1:2).
- [2] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2014). *Application guidelines. Part 2: lignes directrices sur l'application.* (UNE – IS/TR 23482 – 2).
- [3] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2014). *Requeriments for the Industrial Mobile Robot.* (UNE – EN – ISO 13482).
- [4] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2016). *Robots and robotic devices. Collaborative robots.* (UNE – EN – ISO 15066 - 2016).
- [5] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2020). *Safety requirements. Requirements for the Industrial Mobile Robot.* (ANSI/RIA R15.08 – 1 – 2020).
- [6] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2022). *Application services provided by service robots. Safety management systems requirements.* (UNE – ISO/DIS 31101).
- [7] Cabrera, T., Uclés, A., Agüera, D (2016). Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería.
- [8] Collins, J. Chand, S., Vanderkop, A., & Howard, D. (2021). *A review of physics simulators for*

robotic applications. IEEE Access, 9, 51416-51431.

- [9] Dastjerdi, A. V., Gupta, H., Calheiros, R. N., Ghosh, S. K., & Buyya, R. (2016). Fog Computing: Principles, architectures, and applications. En *Internet of Things: Principles and Paradigms* (pp. 61-75). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805395-9.00004-6>
- [10] Gazebo (sin fecha). Disponible en: <https://gazebosim.org/home> (Consultado: 22 Junio 2022).
- [11] Husky UGV – Outdoor Field Research Robot by Clearpath (sin fecha). Disponible en: <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/> (Consultado: 28 Junio 2022).
- [12] Home – IoT Agent ROS 2 (sin fecha). Disponible en: <https://iot-agent-ros2.readthedocs.io/en/latest/> (Consultado: 22 Junio 2022).
- [13] IBM. (2020). *Modelos de servicio de cloud IaaS PaaS SaaS - España | IBM*. <https://www.ibm.com/es-es/cloud/learn/iaas-paas-saas>
- [14] Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., & Woodall, W. (2022). *Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild*. Science Robotics. 7(66), eabm6074.
- [15] Reglamento delegado (UE) 2019/48 de la comisión 12 Julio. *Normas de comercialización de la fruta y hortalizas*. Ministerio de España.



© 2022 by the authors.
Submitted for possible
open access

publication under the terms and conditions
of the Creative Commons Attribution CC-
BY-NC-SA 4.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).