

Entorno de simulación de vehículos no tripulados y sensores marinos

Conejero, V.Q.¹, Capitán, J.¹, Castaño, A.R.^{1,*}

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Av. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España.

To cite this article: Conejero, V.Q., Capitán, J., Castaño, A.R. 2023. Simulation framework for unmanned vessels and marine sensors. XLIV Jornadas de Automática, 459-464. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.459>

Resumen

Existe un creciente interés en el empleo de embarcaciones no tripuladas, comúnmente denominadas USVs (Unmanned Surface Vessel/Vehicles). Dado el coste económico y complejidad de experimentar con embarcaciones reales, en este artículo se propone un entorno de simulación que permita validar diversos tipos de algoritmos en una fase temprana y en diferentes condiciones de navegación. Este entorno de simulación permite definir escenarios con varios USVs y diversos modelos realistas de barcos, así como combinar diferentes sensores de ámbito marino en cada USV, como son receptores AIS (Automatic Identification System), radar, LIDAR 3D y cámaras. Con este simulador se puede abordar la validación de algoritmos de fusión de sensores para detectar otras embarcaciones y objetos flotantes, así como algoritmos de evitación de colisiones compatibles con la normativa náutica, de forma que los USVs puedan coexistir con las embarcaciones pilotadas manualmente.

Palabras clave: Vehículos marinos no tripulados, Sistemas multi-vehículo, Simulación, Navegación de sistemas marinos.

Simulation framework for unmanned vessels and marine sensors

Abstract

There is a growing interest in the use of unmanned vessels, commonly referred to as USVs (Unmanned Surface Vessels). Given the economic cost and complexity of experimenting with real vessels, this paper proposes a simulation environment that allows the validation of various types of algorithms at an early stage and under different navigation conditions. This simulation environment allows defining scenarios with several USVs and several realistic ship models, as well as combining several marine sensors in each USV, such as AIS (Automatic Identification System) receivers, radar, 3D LIDAR, and cameras. With this simulator it is possible to address the validation of sensor fusion algorithms to detect other vessels and floating objects, as well as collision avoidance algorithms compatible with nautical regulations, so that USVs can coexist with manually piloted vessels.

Keywords: Unmanned marine vehicles, Multi-vehicle systems, Simulation, Marine system navigation.

1. Introducción

Existe un creciente interés en el empleo de embarcaciones no tripuladas tanto en aguas interiores Demetillo and Taboada (2019) como en entornos marinos Li and Fung (2019). Se podría reducir la contaminación y coste de operación en el sector logístico Jovanović et al. (2022), realizar tareas de monitorización y limpieza del agua de forma más eficiente Chang

et al. (2021), o vigilar las costas y puertos de forma continua y en áreas extensas Molina-Molina et al. (2021). Sin embargo, experimentar con barcos reales tiene un alto coste, presenta dificultades legales y un riesgo inherente, por lo que resulta crucial disponer de herramientas de simulación que permitan validar exhaustivamente diferentes algoritmos y métodos antes de las pruebas de campo. En Paravisi et al. (2019) se presenta un entorno que combina la simulación de la dinámica de un USV

*Autor para correspondencia: castano@us.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

¹<https://www.ros.org>

²<http://www.irs.uji.es/uwsim>

mediante ROS/Gazebo ¹ con la visualización de agua y olas mediante UWSim ². Este entorno está enfocado a la mejora en la simulación de los efectos de flotación e hidrodinámicos del USV, pero no incluye modelos realistas de barcos, ni sensores para la detección de otras embarcaciones. El simulador desarrollado por Wang et al. (2022) también incluye el modelado de los efectos hidrodinámicos, añade algunos sensores como LIDAR y cámaras y también modelos de barcos realistas, pero apenas hay detalles de sus características. Se hace una descripción genérica de funcionalidades y módulos, pero sin ninguna referencia a su implementación o requisitos de ejecución.

En este artículo se presenta un entorno de simulación enfocado principalmente a validar algoritmos y métodos en dos ámbitos concretos: la evitación de colisiones y la percepción del entorno. En escenarios marítimos las maniobras para evitar colisiones se rigen actualmente por el *Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes*, o *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*, conocido como COLREG y adoptado por la Organización Marítima Internacional (OMI) en 1972. Sin embargo, estas normas están actualmente en análisis y discusión Wróbel et al. (2022); Zhang et al. (2022), dado que fueron pensadas para ser aplicadas por personas, con definiciones difusas y magnitudes sin cuantificar y, por tanto, no permiten una aplicación automatizada de las mismas. Por otro lado, las normas COLREG solo contemplan situaciones embarcación-embarcación, no evalúan riesgos de colisión simultáneos entre varias embarcaciones.

La aplicación de cualquier maniobra de reducción del riesgo exige tener un conocimiento lo más preciso posible del entorno que rodea a la embarcación, en este caso principalmente otras embarcaciones, pero también posibles elementos flotantes en el agua. Para ello es necesario aplicar técnicas de fusión sensorial que permitan combinar los datos obtenidos de diversos sensores. En el entorno acuático los dispositivos más empleados son el AIS (Automatic Identification System), el radar y las cámaras (visuales e infrarrojas), pero en los últimos años se están incorporando también los dispositivos LIDAR 3D Chen et al. (2023). Estos sensores presentan distintos niveles de precisión Wawruch (2020), y son más o menos usados dependiendo del tipo de embarcación. Por tanto, el uso de técnicas de fusión sensorial es ideal para combinar los distintos tipos de sensores y así compensar sus limitaciones y restricciones. Un ejemplo de la necesidad de avanzar en ese campo es el *dataset* publicado por Øystein Kaarstad Helgesen et al. (2022), que incluye radar, LIDAR y cámara infrarroja.

Entre los sensores indicados anteriormente, se simula el dispositivo AIS, que es específico del ámbito marítimo. Es una tecnología que permite la transmisión de la posición, velocidad y rumbo en tiempo real entre buques y con estaciones terrestres. Este sistema combina el uso de un receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) con un transmisor VHF (Very High Frequency) por el que se difunde la información. De esta forma, una embarcación equipada con un transpondedor AIS puede conocer las posiciones de otros barcos situados dentro de su rango de comunicaciones, que puede alcanzar las 50 millas náuticas (100 km) en algunos casos. En la sección 4.2 se detallan las características y limitaciones realistas que incorpora el simulador.

Dadas las necesidades expuestas, en este artículo se propone un simulador para USVs enfocado a la validación de algo-

ritos de evitación de colisiones y de métodos de fusión de datos para percepción del entorno. A diferencia de Paravisi et al. (2019), este incluye modelos realistas de barcos y sensores radar y AIS. El simulador de Wang et al. (2022) tampoco incluye estos sensores ni la capacidad de disponer de múltiples USVs en un escenario. Por el contrario, el entorno aquí presentado, en su estado actual, no incorpora una simulación de la dinámica en el agua como en Wang et al. (2022). Por tanto, las contribuciones principales del simulador presentado son:

- Se han implementado modelos realistas de embarcaciones de distinto tamaño, desde pequeños botes hasta buques tanque.
- Gracias a la independencia de procesos en la simulación de los múltiples USV se consigue, virtualmente, un número ilimitado de entidades independientes, cada uno de ellos con un conjunto de sensores específicos.
- Además de disponer de sensores LIDAR y cámaras visuales, se han modelado sensores radar y AIS, que no están incluidos en otros simuladores.
- Se pueden generar escenarios simulados de forma sencilla y modular.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta los objetivos y requisitos impuestos al diseño del simulador; la Sección 3 define la arquitectura software diseñada y los elementos de su implementación; la Sección 4 presenta los modelos y sensores disponibles en el simulador; la Sección 5 está dedicada a los resultados de los experimentos realizados para validar la implementación del simulador y sus capacidades; y la Sección 6 resume las conclusiones extraídas del trabajo y las propuestas de trabajos futuros.

2. Objetivos y requisitos del simulador

Para poder diseñar estrategias, controladores y métodos que puedan ser empleados en el ámbito marino profesional, deben de ser validados previamente. Mediante el simulador propuesto en este artículo se ofrece una plataforma para realizar las primeras validaciones y evitar complejidad en elementos fuera del área de interés, así como evitar los altos costes de la experimentación en embarcaciones reales. Se han establecido los siguientes objetivos para dar soporte a dichas validaciones:

1. Capacidad de recrear situaciones reales de COLREG simultáneamente: Las situaciones COLREG, situaciones con posibilidad de colisión entre embarcaciones, son un elemento del ámbito marino con mucho interés para sistemas autónomos debido a su complejidad.
2. Evaluación de sistemas de control y navegación: Dotar de la capacidad de implementar distintos algoritmos de forma ágil, pudiendo centrar los esfuerzos en la evaluación y diseño.
3. Capacidad de realizar ensayos con sistemas multi-USV: Habilitar la posibilidad de desplegar más de un USV, así como permitir la comunicación entre varios de ellos.

Tras definir los objetivos principales del simulador, los siguientes requisitos son extraídos para poder cumplir satisfactoriamente dichos objetivos:

1. Capacidad de representar modelos realistas de embarcaciones: Será un requisito indispensable para poder validar métodos que utilicen cámaras o sensores LIDAR.
2. Capacidad de simular el comportamiento de sensores ampliamente utilizados en los vehículos marinos
3. Agilidad en la elaboración de escenarios: Implementar una arquitectura que permita diseñar, guardar y ejecutar escenarios con distintos casos.
4. Arquitectura modular y escalable a sistemas complejos: Dado que los modelos marinos poseen una alta complejidad, será requisito indispensable plantear una arquitectura escalable.

3. Arquitectura software

En esta sección del artículo se presenta la arquitectura software desarrollada para el simulador, se justifican distintas decisiones tomadas en su planteamiento, así como se comentarán distintos elementos destacables de la implementación.

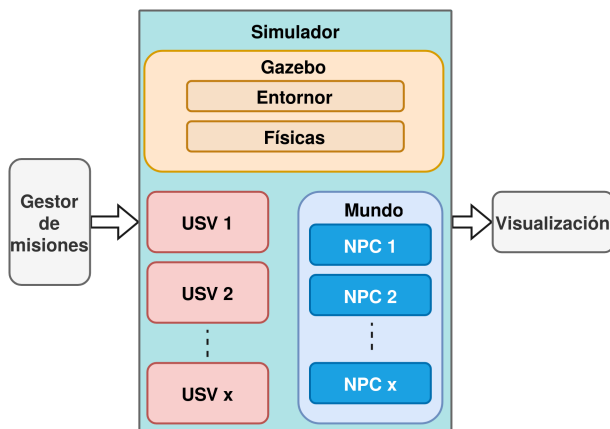


Figura 1: Esquema de la arquitectura software del simulador.

3.1. Diseño de la arquitectura

Como se puede observar en la Figura 1, se plantea una arquitectura software distribuida y modular, por un lado, tenemos un gestor de misiones que proporciona la información del escenario y maniobras a simular, seguido a este nos encontramos con una serie de aplicaciones que constituyen el simulador y por último una aplicación de alto nivel para monitorizar los parámetros simulados. De esta forma conseguimos un sistema ágil desde el punto de vista de la escalabilidad, permitiendo ejecutarse los distintos programas en dispositivos independientes, además de facilitar las tareas de ampliación y trabajo colaborativo, permitiendo sustituir módulos de forma independiente.

Para implementar esta arquitectura se emplea el esquema de comunicaciones de ROS, el entorno de simulaciones físicas de Gazebo y la fluida representación de información mediante RVIZ, que es la herramienta estándar de visualización de ROS.

Cabe destacar la independencia de la implementación de los USVs respecto a los barcos *dummy*, denominados NPC (Non-Playable Character) en este artículo. Estos NPC navegarán por el escenario realizando rutas predefinidas y, por tanto, sin capacidad de controlarlos en tiempo real. El esquema de implementación distribuido favorece la escalabilidad en funcionalidad de

los USVs, como la implementación de modelos dinámicos o algoritmos de seguimiento de rutas, mientras que se mantienen la sencillez de los NPCs, lo cual se ve traducido en un bajo coste computacional.

3.2. USVs y barcos NPC

El USV es el elemento principal de interés del software de simulación y por ello se ha planteado la ejecución de cada una de las aplicaciones que simulan el comportamiento de los USVs de forma independiente. A diferencia de lo anterior, los NPCs son gestionados por una única aplicación que gestiona la aparición y movimiento de cada uno de ellos. Esta diferencia de implementación está sustentada debido al potencial coste computacional que pueden desarrollar las implementaciones realistas de los USVs, así como un acercamiento a un entorno real, donde cada uno de los USVs tendrán equipos de cómputo independientes.

3.3. Gazebo

Mediante el uso de Gazebo es posible realizar la representación de elementos 3D en entornos realistas, así como proporcionar la capacidad de simular el comportamiento de diferentes sensores, siendo de especial interés la simulación del LIDAR y las cámaras montadas a bordo de los USVs. Gracias a la representación de elementos 3D obtenemos una simulación realista de los sensores, pudiendo validar sobre ellos distintas técnicas de reconocimiento, detección o seguimiento de elementos en el entorno.

3.4. Gestor de misiones

El módulo Gestor de misiones se plantea como una herramienta de alto nivel desarrollada para agilizar la construcción de escenarios de simulación. Consta de dos modos de uso:

1. **Sandbox**, que permite al usuario agregar, eliminar o modificar los distintos NPCs del escenario mediante una interfaz. Tras establecer un escenario acorde a la situación a recrear es posible guardarlo en un fichero para su posterior uso.
2. **Testbench**, que permite al usuario cargar distintos entornos prediseñados y realizar pruebas para la validación de los distintos algoritmos planteados sobre los USVs.

Gracias a esta aplicación se pretende facilitar la validación de los métodos mediante el uso de un conjunto de escenarios deterministas, pudiendo automatizar las pruebas y adaptar los escenarios de una forma cómoda.

4. Modelos de embarcaciones y sensores

En esta sección se presentan los distintos modelos de embarcaciones y sensores implementados en el simulador.

4.1. Modelos

Para dotar de mayor realismo al simulador, se han incorporado numerosos modelos 3D realistas de embarcaciones, lo que permite recrear una amplia variedad de situaciones. Como se muestra en la Tabla 4.1, se pueden encontrar embarcaciones de diversas dimensiones y con diferentes comportamientos de AIS asociados. Cabe destacar la posibilidad de desactivar el emisor AIS o modificar su configuración para ajustarlo al comportamiento deseado.

Tabla 1: Tabla de NPCs

Nombre	Eslora (m)	Manga (m)	Clase AIS
small	7	2	B
tanker	296	35	A
fishboat	63	13	B
yacht	82	14	A
ferry	66	19	A
sail	25	8	B
powerboat	8	2	A
smallboat	20	8	B
cargo	158	26	A

Además de los modelos de embarcaciones, los USVs pueden equiparse con una amplia variedad de modelos de sensores, los cuales se detallan a continuación.

4.2. Sensores

AIS - Esta tecnología marítima permite la transmisión de la posición, velocidad y rumbo en tiempo real entre buques y con estaciones terrestres, combinando un receptor GNSS con un transmisor de radiofrecuencia VHF por el que se difunde la información. Dentro de los dispositivos AIS existen dos categorías: clase A y clase B. La diferencia entre ambas clases radica en la potencia del transmisor VHF y en la frecuencia con que se transmite la información. En cuanto al rango de operación, un AIS clase A puede alcanzar las 50 millas náuticas (100 km), mientras que un AIS clase B alcanza las 12 millas náuticas (19 km). Este dispositivo también presenta las siguientes limitaciones:

- No está presente en todas las embarcaciones. La OMI únicamente exige el uso de AIS clase A en algunos tipos de barco (más de 300 toneladas brutas o de pasajeros, independientemente de su tamaño). En España también es obligatorio el uso de AIS en barcos de pesca, pero no en embarcaciones de recreo.
- La tasa de actualización del sensor es variable y dependiente de la velocidad de desplazamiento, tal como se muestra en la Tabla 4.2.
- Su precisión depende de la del receptor GNSS, que puede sufrir degradaciones en situaciones de baja visibilidad de los satélites.

El simulador genera datos de posicionamiento AIS para cada barco a la tasa correspondiente según sus condiciones de navegación y tipo, e incluyendo el ruido correspondiente a una señal GNSS.

Tabla 2: Tabla de frecuencia de transmisión de datos de AIS

Velocidad	Clase A	Clase B
Barco fondeado	3 min	3 min
0-2 nudos	10 seg	3 min
2-14 nudos	10 seg	30 seg
2-14 nudos y cambio rumbo	3.3 seg	30 seg
14-23 nudos	6 seg	15 seg
14-23 nudos y cambio rumbo	2 seg	15 seg
Mayor de 23 nudos	2 seg	5 seg

Radar - El dispositivo más ampliamente empleado en el ámbito marino profesional es el sistema ARPA (Automatic Radar Plotting Aid), basado en un sensor radar. Este proporciona información como la posición, velocidad y rumbo estimado de embarcaciones o elementos flotantes detectados (denominados trazas). Tienen un alcance de varios kilómetros y, como contrapartida, se trata de un sensor sensible a las condiciones meteorológicas, así como con un rango de uso mínimo; es ineficiente en situaciones de proximidad con otras embarcaciones. Además, el tamaño y material del que está hecha una embarcación pueden dificultar su detección por el radar. El simulador de radar genera trazas a una frecuencia de actualización configurable y teniendo en cuenta las posibles ocultaciones de embarcaciones que pueden producirse.

LIDAR - El empleo de sensores LIDAR 3D, muy habituales en los ámbitos de robótica terrestre y de automoción, también presentan retos no resueltos en el ámbito marino Chen et al. (2023). Este sensor tiene un funcionamiento complementario con el sensor radar. En cuanto al rango de funcionamiento, es limitado (unos 300 m máximo) pero con una buena capacidad de detección a corta distancia (menos de 200 m); a esas distancias cortas es donde peor funciona el radar. En cuanto a la capacidad de detección dentro del rango, el LIDAR 3D puede detectar objetos flotantes pequeños o embarcaciones cuyo casco no refleje la señal radar. En este simulador se ha incluido el plugin de Velodyne de Gazebo ³.

Cámaras - Las cámaras visuales representan un elemento complementario a la tarea de detección de embarcaciones, brinda la posibilidad de identificar otras embarcaciones, boyas o elementos flotantes mediante algoritmos de percepción. Además, estos sensores permiten inspeccionar de forma visual el entorno de la embarcación, lo cual representa un requisito para tareas de monitorización o vigilancia costera. En el simulador se ha incluido el modelo de cámara visual de *gazebo_plugins* ⁴.

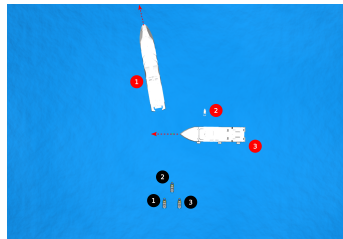
GNSS IMU - Mediante el sistema de GNSS e IMU podemos conocer el estado de la embarcación en todo momento, así como la posición de la embarcación en coordenadas geodésicas. Este sistema también es necesario para poder completar la información referente a los mensajes AIS.

³https://bitbucket.org/DataspeedInc/velodyne_simulator/src/master/

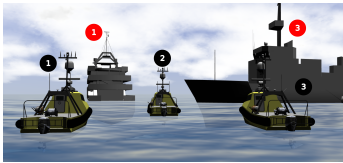
⁴https://github.com/ros-simulation/gazebo_ros_pkgs/blob/noetic-devel/gazebo_plugins/src/gazebo_ros_camera.cpp

5. Experimentos

En esta sección se presenta un escenario demostrativo de las capacidades del simulador de embarcaciones. Como se puede observar en la Figura 2, se presenta un escenario con tres USVs estáticos y tres NPCs, dos de ellos con velocidad constante (NPC-1 y NPC-3) y otro estático (NPC-2). Como puede apreciarse, el NPC-3 queda oculto a los sensores radar y LIDAR de los USVs, y solo es visible para sus receptores AIS.



(a) Vista cenital



(b) Vista en perspectiva

Figura 2: Escenario simulado con varias embarcaciones. Enumeración con fondo negro para los USVs, fondo rojo para los NPCs.

5.1. Cámaras visuales

Se ha equipado cada uno de los USV con una cámara frontal para tomar imágenes durante la ejecución del escenario. En la Figura 3, se muestran imágenes en 2 instantes distintos. En el instante inicial podemos observar como el NPC-1 y el NPC-3 son visibles desde los tres USVs, mientras que el NPC-2 queda oculto. En el instante intermedio, podemos observar como el avance del NPC-3 hacia la izquierda provoca que el NPC-1 quede oculto a las cámaras, pero a cambio el NPC-2 entra en el campo de visión del USV-2 y el USV-3. En este instante intermedio el NPC-2 sigue fuera del campo de visión del USV-1.

5.2. Radar

Para este escenario se han equipado todos los USV con un sistema radar para la detección de las embarcaciones. En la Figura 4, se muestran las trazas del radar del USV-2 hasta los instantes de tiempo T1 y T2. Las trazas del NPC-1 se muestran en verde, las del NPC-2 en rojo y las del NPC-3 en azul. Esas trazas son el registro de las posiciones del radar a lo largo del tiempo. Puede observarse como en el instante T1 ya se han registrado varias posiciones del NPC-1 en su movimiento en dirección noroeste y también varias posiciones del NPC-3 en su navegación dirección oeste. Antes del instante T1 el NPC-2 (trazas rojas) no es detectado por el radar, dado que se encuentra oculto tras el NPC-3. Justo en ese instante T1 el radar registra la primera posición del NPC-2 (punto en rojo). Ya en el instante T2 se aprecia como el NPC-1 y el NPC-2 han evolucionado en su movimiento (dirección noroeste y oeste respectivamente), mientras que el NPC-2 permanece detenido en el mismo lugar.

También puede apreciarse el ruido que incorporan las medidas del radar.

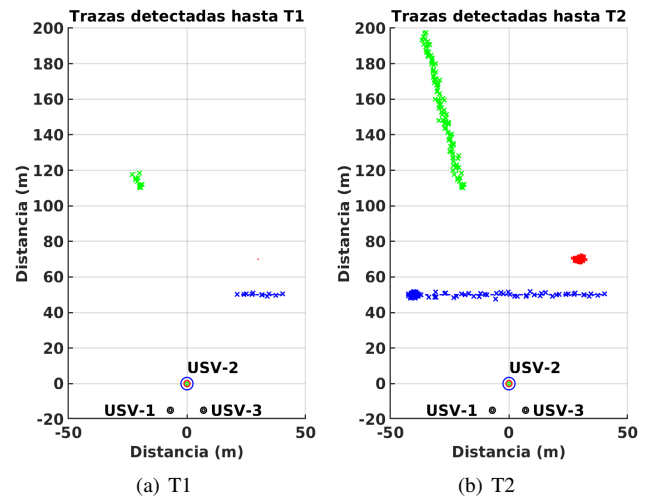


Figura 4: Representación de las trazas del radar embarcado en el USV-2 recogidas durante el escenario de pruebas. El instante T1 (izquierda) representa todas las trazas hasta la primera detección del NPC-2 (punto rojo), el instante T2 (derecha) representa todas las trazas recogidas durante la simulación.

5.3. LIDAR

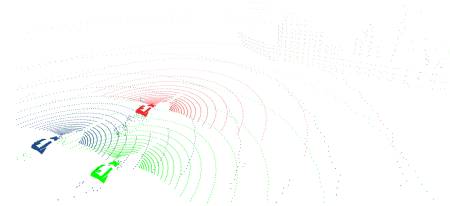


Figura 5: Representación en el software RVIZ de la información recibida por los sensores LIDAR durante el escenario de pruebas. En color azul, rojo y verde para los LIDARs embarcados en los USV-1, USV-2 y USV-3 respectivamente.

Cada USV se ha equipado también con un LIDAR 3D en el mástil situado en la proa. Como se puede observar en la Figura 5, mediante el uso del LIDAR podemos detectar embarcaciones cercanas y determinar su posición relativa a la embarcación.

5.4. AIS

Por último, se validará la simulación de los dispositivos AIS, y para ello se ha equipado cada uno de los USVs, además de los NPC-1 y NPC-3, con un AIS clase A, y el NPC-2 con un AIS clase B. Para la validación se ha registrado el periodo de emisión de cada una de las embarcaciones. Como se observa en la Figura 6, el periodo de emisión de los AIS de los barcos USV-1, USV-2, USV-3 y NPC-2 está alrededor de 3 minutos, dado que todos ellos están fondeados, mientras que en el caso de los barcos NPC-1 y NPC-3 el periodo de emisión está alrededor de 10 segundos, que es lo que caracteriza un AIS clase A cuando el barco se desplaza a velocidades inferiores a 14 nudos (Tabla 4.2).

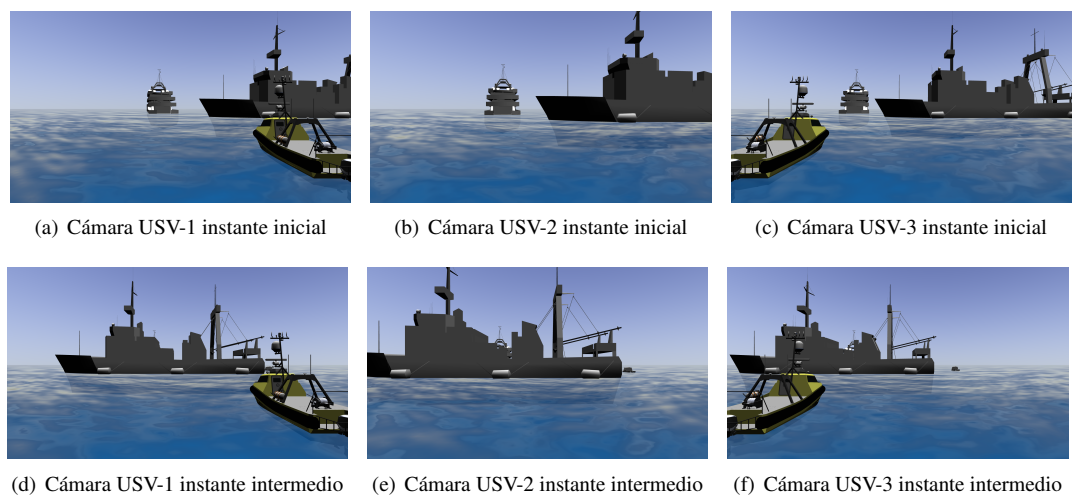


Figura 3: Imágenes de las cámaras de los USV-1, USV-2 y USV-3 en dos instantes de tiempo durante la ejecución de la simulación.

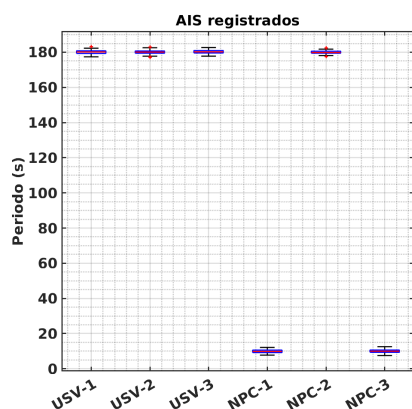


Figura 6: Registro del periodo de emisión de las señales AIS de cada barco.

6. Conclusiones

Se ha desarrollado un entorno que permite simular escenarios marinos con varios USVs y barcos no controlados (NPCs) simultáneamente. Este entorno incluye la posibilidad de equipar cada USV con un conjunto de sensores específicos, entre los que se incluyen cámaras visuales, LIDAR 3D, radar y dispositivos AIS, y cada barco NPC se puede configurar con un dispositivo AIS de clase A, de clase B o sin él. Se han validado los modelos de los distintos sensores, sobre todo los sensores radar y AIS desarrollados. Este simulador, por tanto, puede emplearse para desarrollar y validar métodos de fusión sensorial para percepción del entorno y algoritmos de evitación de colisiones.

El trabajo futuro incluye la mejora de los modelos dinámicos tanto de USVs como de NPCs en la línea de Paravisi et al. (2019), el aumento de realismo del sensor radar añadiendo la posibilidad de falsos positivos y pérdidas de trazas, y la inclusión de otros elementos flotantes como boyas de señalización.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto PID2020-119027RB-I00 y el proyecto HOMPOT (P20.00597) del plan PAIDI.

Referencias

- Chang, H.-C., Hsu, Y.-L., Hung, S.-S., Ou, G.-R., Wu, J.-R., Hsu, C., 2021. Autonomous water quality monitoring and water surface cleaning for unmanned surface vehicle. *Sensors* 21 (4). DOI: 10.3390/s21041102
- Chen, Y., Leng, Y., Zhang, Y., 2023. An obstacle detection method for lidar after removing water surface clutter. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Vol. 12566.
- Demetillo, A., Taboada, E., 2019. Real-time water quality monitoring for small aquatic area using unmanned surface vehicle. *Engineering, Technology and Applied Science Research* 9 (2), 3959–3964. DOI: 10.48084/etasr.2661
- Jovanović, I., Perčić, M., Koričan, M., Vladimir, N., Fan, A., 2022. Investigation of the viability of unmanned autonomous container ships under different carbon pricing scenarios. *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (12). DOI: 10.3390/jmse10121991
- Li, S., Fung, K., 2019. Maritime autonomous surface ships (mass): implementation and legal issues. *Maritime Business Review* 4 (4), 330–339. DOI: 10.1108/MABR-01-2019-0006
- Molina-Molina, J. C., Salhaoui, M., Guerrero-González, A., Arioua, M., 2021. Autonomous marine robot based on ai recognition for permanent surveillance in marine protected areas. *Sensors* 21 (8). DOI: 10.3390/s21082664
- Paravisi, M., H. Santos, D., Jorge, V., Heck, G., Gonçalves, L. M., Amory, A., Mar. 2019. Unmanned surface vehicle simulator with realistic environmental disturbances. *Sensors* 19 (5). DOI: 10.3390/s19051068
- Wang, W., Zhang, H., Li, Y., Zhang, Z., Luo, X., Xie, S., 2022. Usvs-sim: A general simulation platform for unmanned surface vessels autonomous learning. *Concurrency and Computation: Practice and Experience* 34 (3). DOI: 10.1002/cpe.6567
- Wawruch, R., Mar. 2020. Comparative analysis of the usefulness of ais and arpa for anti-collision purposes. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 14 (4), 885–899. DOI: 10.12716/1001.14.04.13
- Wróbel, K., Gil, M., Huang, Y., Wawruch, R., 2022. The vagueness of colreg versus collision avoidance techniques: a discussion on the current state and future challenges concerning the operation of autonomous ships. *Sustainability* 14 (24). DOI: 10.3390/su142416516
- Zhang, P., Chen, Q., Macdonald, T., Lau, Y.-Y., Tang, Y.-M., 2022. Game change: A critical review of applicable collision avoidance rules between traditional and autonomous ships. *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (11). DOI: 10.3390/jmse10111655
- Øystein Kaarstad Helgesen, Vasstein, K., Brekke, E. F., Stahl, A., 2022. Heterogeneous multi-sensor tracking for an autonomous surface vehicle in a littoral environment. *Ocean Engineering* 252, 111168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111168>