

Jornadas de Automática

Supervisión de sistemas multi-robot mediante proyección adaptativa sobre mapa común

Bayón-Gutiérrez, Martín^a, Prieto-Fernández, Natalia^{a,*}, García-Ordás, María Teresa^b, Benavides, Carmen^a, Benítez Andrades, José Alberto^b

^aGrupo SECOMUCI, Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León, España

^bGrupo ALBA, Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León, España

To cite this article: Bayón-Gutiérrez, M., Prieto-Fernández, N., García-Ordás, M.T., Benavides, C., Benítez Andrade, J.A. 2025. Supervision of multi-robot systems by adaptive projection onto common map.

Jornadas de Automática, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12270>

Resumen

Este trabajo presenta un sistema para la representación adaptativa del estado de múltiples plataformas robóticas en un entorno compartido. El sistema se basa en la metodología CAD2SLAM para realizar una proyección de las posiciones individuales de cada robot sobre un mapa base común empleando una rejilla de proyección no-rígida ajustada mediante un conjunto de puntos de correspondencia y un proceso de optimización de mínimos cuadrados. Esto permite representar de forma coherente y comprensible la posición relativa de cada robot, independientemente del tipo de sensores o mapa que este utilice. El operador puede supervisar el estado global del sistema multi-robot de forma más intuitiva y eficiente, sin alterar la arquitectura interna ni el funcionamiento de los robots. Validado en entornos simulados y reales, demuestra robustez y ejecución en tiempo real. La principal novedad es el uso de un mapa base común, que facilita la cooperación entre plataformas heterogéneas y la interpretación visual del entorno.

Palabras clave: Percepción y detección, Localización, Mapeado, Sistemas multi-agente, Robots móviles, Teleoperación

Supervision of multi-robot systems by adaptive projection onto common map

Abstract

This manuscript presents a system for the adaptive representation of the pose of multiple robotic platforms operating in the same environment. The system is based on the CAD2SLAM methodology and projects the individual positions of each robot onto a common base map employing a non-rigid projection grid adjusted using a set of correspondence points and least-squares optimization. This enables a coherent and easy to understand representation of each robot's relative position, regardless of the type of sensors or SLAM system. The human operator can supervise the global state of the multi-robot system in a more intuitive and efficient manner, without altering the internal architecture and the normal operation of the robots. Validated in both simulated and real-world scenarios, it demonstrates robustness and real-time execution. The main novelty of this system lies in the use of a base map as a common reference system for all robots, facilitating cooperation between heterogeneous platforms and improving the visual interpretation of the environment.

Keywords: Perception and sensing, Localization, Map building, Multi-agent Systems, Mobile robots, Teleoperation

* Autor para correspondencia: nprif@unileon.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. Introducción

El uso creciente de sistemas robóticos en entornos domésticos e industriales ha dado lugar en los últimos años a una gran diversidad de plataformas móviles, sensores y arquitecturas software que, a menudo, deben funcionar de forma simultánea. Esta heterogeneidad en los equipos conlleva una problemática relevante en contextos donde múltiples robots deben operar en una misma región del espacio y en el que cada uno de ellos dispone de una representación del entorno explorado (Lajoie et al., 2022).

La diferencia entre los mapas de entorno generado por cada sistema robótico utilizado supone un reto en la combinación de la información de estos, y dificulta el análisis de la situación por parte de un operador humano encargado de la supervisión de los robots (Wang et al., 2025).

Una de las aproximaciones más habituales para la cooperación entre múltiples robots consiste en enmarcar el problema dentro del paradigma de SLAM colaborativo (C-SLAM), en el que cada agente no solo explora y mapea de forma autónoma su entorno, sino que también intercambia activamente información con el resto del sistema para construir de manera conjunta un único mapa global del entorno. Esta interacción puede implementarse de forma centralizada o descentralizada (Lajoie and Beltrame, 2023). Sin embargo, en entornos donde se dispone de un mapa base preexistente —por ejemplo, levantamientos topográficos previos o modelos CAD del espacio— puede resultar más conveniente prescindir de la fase de fusión colaborativa en tiempo real y, en su lugar, tratar cada mapa local de forma individual. Cada robot realiza su propio proceso de localización y mapeo, generando un mapa local que luego se alinea —mediante técnicas de map-matching (Suganuma and Uozumi, 2011; Xia et al., 2023) o correspondencia de características— con el modelo de referencia conocido. Este enfoque simplifica la arquitectura de comunicación y reduce la complejidad computacional al delegar la consistencia global en el mapa externo, aunque pierde la capacidad de adaptación conjunta a cambios inesperados en el entorno.

Este trabajo presenta una solución a esta problemática basada en el uso de una proyección adaptativa que permite representar de forma unificada la posición relativa de cada robot sobre un mapa base común, véase figura 1. Esta representación facilita la comprensión global del entorno, independientemente de los robots implicados, y permite al operador humano interpretar el estado del sistema de forma más intuitiva y eficiente. Para ello, se establecen un conjunto de posiciones de correspondencia en el entorno explorado, que permiten la optimización de una malla no-rígida de proyección. El resultado es un sistema de proyección que no interfiere en el funcionamiento habitual de la plataforma robótica, y permite analizar el entorno desde un punto de vista general.

2. Problemática

Debido a la gran expansión de los sistemas robóticos actuales, resulta habitual que en un entorno industrial o doméstico puedan coexistir distintos sistemas robóticos independientes, cada uno con sus propias peculiaridades, y que pudieran requerir de coordinación para realizar labores cooperativas (Rizk et al., 2019).

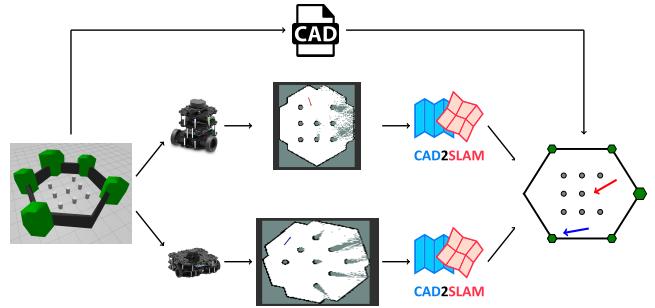


Figura 1: Diagrama de funcionamiento del sistema propuesto. El entorno real es analizado por dos robots independientes, que generan su propio mapa con diversas distorsiones. El sistema CAD2SLAM tiene en cuenta esta circunstancia a la hora de proyectar las posiciones de ambos robots sobre una versión CAD del entorno analizado.

Adicionalmente, es habitual que dichos sistemas sean supervisados por un operador humano, que asegure la correcta realización de las tareas asignadas.

En este sentido, puede darse la situación de que un robot móvil, basado en el uso de ruedas, incorpore un sensor LiDAR (Light Detection and Ranging) bidimensional con el que genere un mapa de cuadrículas de su entorno similar al representado en la Figura 2a. Por otro lado, robots con capacidades de desplazamiento tridimensional -como drones- o robots caminadores podrían incorporar sistemas de visión RGB, y representar su entorno en forma de mapa de características similares al presentado en la Figura 2b.

En caso de sistemas multi-robot, existen algoritmos SLAM basados en la generación de mapas de características elaborados a partir de los submapas locales que genera cada robot (Chen et al., 2021), así como algoritmos que fusionan los mapas de cuadrículas de cada uno de ellos (Birk and Carpin, 2006).

Incluso cuando los robots presentes en un entorno son similares e incorporan el mismo tipo de sensores, puede suceder que los mapas de entorno generados por cada robot presenten grandes diferencias entre ellos, debido, por ejemplo, a la posición y orientación concreta de los sensores, la inexactitud de las estimaciones odométricas, o a la existencia de elementos dinámicos en el momento en que el mapa fue generado.

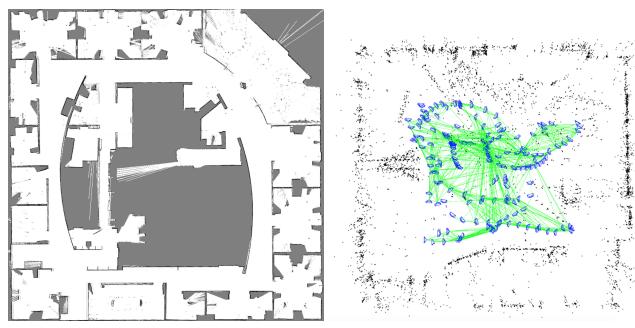


Figura 2: Distintas representaciones del entorno, en función del sensor utilizado para generar el mapa y el tipo de información almacenada (Holz and Behnke, 2010; Cadena et al., 2016).

Adicionalmente, los mapas del entorno elaborados por las unidades robóticas existentes en este podrían no resultar sencillas de interpretar para un operador humano, que no tiene por qué disponer de conocimientos avanzados sobre el funcionamiento interno de los robots que debe supervisar.

Estas circunstancias justifican la necesidad de diseñar y desarrollar un sistema que permita facilitar la cooperación de los distintos sistemas robóticos, así como ofrecer una representación sencilla de estos para un operador humano.

3. Propuesta

En este trabajo, presentamos un sistema que pretende solventar los inconvenientes previamente expuestos en el uso de múltiples robots en un mismo entorno.

El sistema propuesto permite realizar una representación de la posición de un número indeterminado de robots, de forma simultánea, y en un mapa de entorno sencillo de comprender por el operador humano.

De forma general, nuestra propuesta consiste en la utilización de un mapa de entorno base, sobre el que se proyecta cada mapa de entorno de los distintos robots, de forma que:

$$f(\mathbf{X}_{r_i}) \rightarrow \mathbf{X}_{\text{base}} \quad (1)$$

La función $f(\cdot)$ permite por tanto proyectar la posición de un robot en su propio mapa \mathbf{X}_{r_i} a su correspondiente posición en el mapa base $\mathbf{X}_{\text{base}_i}$.

Realizar este proceso de proyección para todos los robots existentes en un entorno dará como resultado la representación de estos en un mapa sencillo de comprender por el operador humano, y que se encuentra presentado en la Figura 1.

En este trabajo se emplea la metodología CAD2SLAM para la realizar este proceso de proyección (Bayón-Gutiérrez et al., 2025).

4. Metodología

Consideremos la función $f(\cdot)$ expuesta previamente, y describamos $\mathbf{X}_{r_i} \in SE(2)$ como la posición de un robot en el espacio bidimensional, definido por sus coordenadas x, y y un valor de orientación θ . Esta posición podrá ser representada como una transformación homogénea de 3×3 , de la siguiente forma:

$$\mathbf{X}_{r_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{2 \times 2} & \mathbf{t}_{2 \times 1} \\ 0_{1 \times 2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La proyección de la posición del robot desde su propio mapa de entorno a su correspondiente posición en el mapa base del operador viene dada por el uso de una rejilla de proyección no rígida. Esta rejilla está compuesta por un conjunto de matrices de transformación homogéneas en $SE(2)$ que proporcionan un método de transformación entre ambos mapas utilizados.

Será necesario el uso de tantas rejillas de proyección como robots se encuentren en el entorno analizado, cada una de estas adaptada a las particularidades de cada mapa generado por los distintos robots.

Consideremos \mathbf{P}_i la rejilla de proyección de un robot tal que:

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{1,1} & \cdots & \mathbf{p}_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{p}_{m,1} & \cdots & \mathbf{p}_{m,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde m y n representan las dimensiones de la rejilla de proyección, y que serán iguales para todos los robots en función del entorno analizado.

De este modo, la posición de un robot en la vecindad de un elemento $\mathbf{p}_{i,j}$ se proyecta al mapa base utilizando:

$$\mathbf{X}_{\text{base}} = \mathbf{p}_{i,j} \cdot \mathbf{X}_r \quad (4)$$

El resultado de la proyección es una posición en el mapa base, que representa la posición equivalente del robot en su propio mapa interno, de forma adaptativa y dependiente de la rejilla de proyección.

4.1. Ajuste de la proyección

Tal y como se deduce de la ecuación (4), el ajuste de la proyección realizada dependerá del valor de los elementos $\mathbf{p}_{i,j}$ correspondientes a la rejilla de proyección de cada robot.

Por este motivo, la rejilla de proyección ha de sufrir un proceso de ajuste, que atiende a las inconsistencias existentes entre el mapa base del operador humano, y el mapa SLAM generado por el robot.

Inicialmente, la rejilla de proyección es generada de forma determinista atendiendo a la resolución del mapa base del operador humano, y a la morfología de este, tal y como se presenta en la Figura 3.

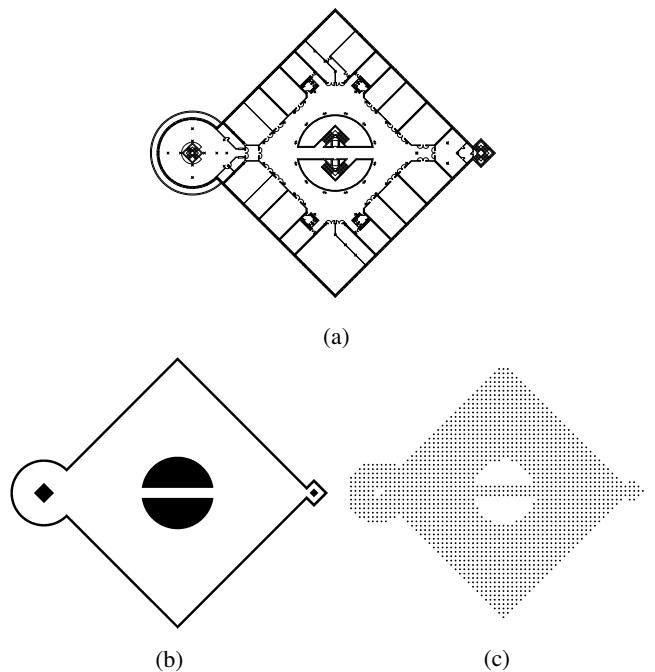


Figura 3: Proceso de generación de la rejilla de proyección. Un mapa CAD de un entorno (a), puede ser adaptado para identificar aquellas áreas del entorno libres de obstáculos (b). La segmentación determinista de este entorno, da lugar a una rejilla de dimensión constante de matrices de transformación (c) (Bayón Gutiérrez, 2025).

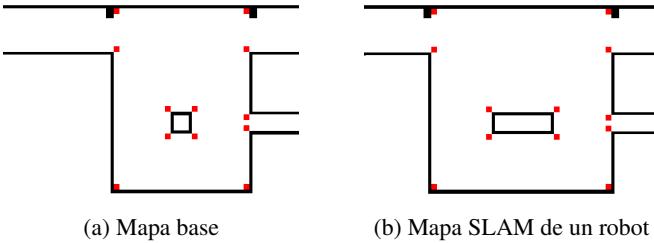


Figura 4: Conjunto de puntos de correspondencia en un entorno concreto para el cual un robot ha generado un mapa distorsionado (Bayón Gutiérrez, 2025).

A continuación, el ajuste de la rejilla de proyección se realiza utilizando un proceso de optimización no lineal por mínimos cuadrados, en el que la posición de un conjunto de puntos de correspondencia $\{\langle \mathbf{c}_{\text{base}}, \mathbf{c}_{\text{r}_i} \rangle\}$ en ambos mapas debe ser minimizada con arreglo a los valores de \mathbf{P}_i .

La posición de los puntos de correspondencia del conjunto corresponderán a elementos fácilmente identificables en el entorno como esquinas, puntos de luz, marcadores visuales, etc; y podrán ser identificados manualmente por el instalador del sistema propuesto o extraídos automáticamente utilizando herramientas de percepción y análisis del entorno incluidas en los propios sistemas robóticos. La Figura 4 presenta un ejemplo de la identificación de puntos de correspondencia en dos mapas con grandes inconsistencias.

5. Implementación

El sistema de proyección adaptativa puede ser implementado de forma sencilla para su uso en cualquier sistema robótico. En concreto, se propone a continuación un procedimiento

para la implementación del sistema de proyección adaptativa utilizando mensajes estándar del framework ROS2.

La Figura 5, presenta un ejemplo del grafo de conexiones de *topics* y nodos propios de ROS2 según el sistema propuesto. En este, los elementos azules indican los componentes fundamentales para este sistema, el servidor del mapa base, y dos o más robots propios de un entorno, mientras que los elementos de color rojo indican mensajes estándar y habituales en la arquitectura ROS2. Por último, se indican en color verde aquellos mensajes de ROS2 propios del sistema propuesto, al mismo tiempo que los elementos de color violeta presentan aquellos componentes software que soportan la proyección y visualización de las posiciones de los sistemas robóticos en el entorno.

Cabe destacar que el sistema propuesto no limita ni dificulta el funcionamiento habitual de los sistemas propuestos de cada plataforma robótica, por lo que la utilización de este sistema no tendría ningún tipo de efecto no deseado en el correcto funcionamiento de estos.

6. Resultados

El sistema de proyección adaptativa descrito en este trabajo ha sido validado en distintos escenarios representativos, tanto en entornos simulados como reales, empleando diversas plataformas robóticas. En todos los casos, el sistema ha demostrado su capacidad para representar de forma unificada y visual la posición absoluta de los distintos robots en el mapa base, independientemente de la tecnología utilizada para generar su propio mapa del entorno.

Esta representación integrada ha facilitado significativamente la labor del operador humano, permitiendo una interpretación más intuitiva del estado y la posición de los distintos sistemas robóticos.

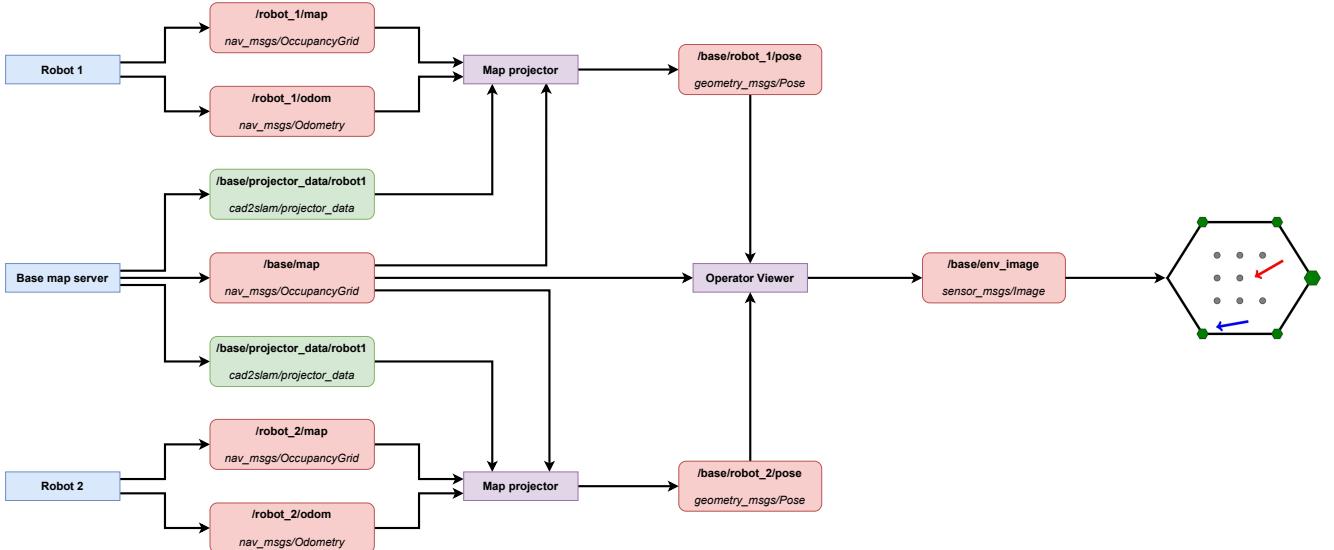


Figura 5: Diagrama ROS2 de procesos e intercambio de mensajes en el sistema propuesto. Los recuadros con esquinas redondeadas representan el *topic* de comunicación y tipo de mensaje transmitido, mientras que los recuadros con esquinas rectas representan los sistemas de generación o procesamiento de datos. El resultado del sistema es la generación de una imagen del mapa base en el que se encuentran representadas las posiciones de ambos robots.

Adicionalmente, la implementación propuesta, basada en componentes estándar del framework ROS2, no introduce interferencias en el comportamiento habitual de los robots supervisados, lo que asegura su compatibilidad con una amplia variedad de arquitecturas existentes.

El sistema propuesto ofrece una tasa de actualización compatible con la ejecución de este en tiempo real a la vez que ofrece una alta precisión en la interpretación de la posición ocupada por el robot, tal y como ha sido analizado y presentado en trabajos anteriores (Bayón-Gutiérrez et al., 2025).

7. Conclusiones

Este trabajo presenta un sistema para la representación adaptativa del estado de múltiples robots en un entorno compartido, empleando la metodología CAD2SLAM para realizar una proyección adaptativa en el entorno.

La principal aportación de este sistema radica en el uso de un mapa base general sobre el que se indican las posiciones de todos los robots presentes en un entorno, lo que facilita tanto la coordinación como la cooperación entre plataformas robóticas en una amplia variedad de entornos. Adicionalmente, se ofrece al operador humano una herramienta visual sencilla, clara y de bajo impacto sobre el sistema robótico, que facilita la supervisión y el control de escenarios multi-robot.

El sistema propuesto destaca por su simplicidad, su compatibilidad con arquitecturas ROS2 ya existentes y su aplicabilidad a diferentes tipos de plataformas móviles, así como su facilidad de visualización. No obstante, una de las principales limitaciones actuales reside en la necesidad de establecer manual o semi-automáticamente puntos de correspondencia entre el mapa base y los mapas individuales generados por los robots.

Futuros trabajos se centrarán en la automatización del proceso de extracción de puntos de correspondencia, así como en la implementación de los paquetes del framework ROS2 necesarios para disponer de un sistema totalmente automático e integrable en plataformas robóticas de distinto tipo.

Referencias

- Bayón Gutiérrez, M., 2025. Percepción y optimización en plataformas robóticas autónomas. Ph.D. thesis, Universidad de León.
DOI: 10.18002/10612/24650
- Bayón-Gutiérrez, M., Prieto-Fernández, N., García-Ordás, M. T., Benítez-Andrades, J. A., Alaliz-Moretón, H., Grisetti, G., 2025. Cad2slam: Adaptive projection between cad blueprints and slam maps. IEEE Rootics and Automation Letters.
DOI: 10.1109/LRA.2024.3522838
- Birk, A., Carpin, S., 2006. Merging occupancy grid maps from multiple robots. Proceedings of the IEEE 94 (7), 1384–1397.
DOI: 10.1109/JPROC.2006.876965
- Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I., Leonard, J. J., 2016. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. IEEE Transactions on Robotics 32 (6), 1309–1332.
DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754
- Chen, S., Han, R., Zhao, L., Hang, S., Hao, Q., 2021. Multi-robot feature-based slam using submap joining. In: Australasian Conference on Robotics and Automation. ARAA.
- Holz, D., Behnke, S., 2010. Sancta simplicitas - on the efficiency and achievable results of slam using icp-based incremental registration. In: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 1380–1387.
DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509918
- Lajoie, P.-Y., Beltrame, G., 2023. Swarm-slam: Sparse decentralized collaborative simultaneous localization and mapping framework for multi-robot systems. IEEE Rootics and Automation Letters 9 (1), 475–482.
DOI: 10.1109/LRA.2023.3333742
- Lajoie, P.-Y., Ramtoula, B., Wu, F., Beltrame, G., 2022. Towards collaborative simultaneous localization and mapping: a survey of the current research landscape. Field Robotics 2, 971–1000.
DOI: 10.55417/fr.2022032
- Rizk, Y., Awad, M., Tunstel, E. W., 2019. Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey. ACM Computing Surveys (CSUR) 52 (2), 1–31.
DOI: 10.1145/3303848
- Suganuma, N., Uozumi, T., 2011. Precise position estimation of autonomous vehicle based on map-matching. In: 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). pp. 296–301.
DOI: 10.1109/IVS.2011.5940510
- Wang, C., Yu, C., Xu, X., Gao, Y., Yang, X., Tang, W., Yu, S., Chen, Y., Gao, F., Jian, Z., et al., 2025. Multi-robot system for cooperative exploration in unknown environments: A survey. arXiv preprint arXiv:2503.07278.
- Xia, X., Bhatt, N. P., Khajepour, A., Hashemi, E., 2023. Integrated inertial-lidar-based map matching localization for varying environments. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles 8 (10), 4307–4318.
DOI: 10.1109/ITIV.2023.3298892