

Comparación de controladores fuzzy y pid en la sincronización de AGVs

Quevedo-Dueñas, E.^{a,*}, Sierra-García, J. E.^a, Santos, M^b

^aDepartamento de Digitalización, Universidad de Burgos, Campus Río Vena, Avda. Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España.

^bInstituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

To cite this article: Quevedo-Dueñas, E., Sierra-García, J.E., Santos, M. 2020. Comparison of fuzzy and pid controllers for AGV synchronization. XX Simposio CEA de Control Inteligente, Huelva (Spain), 2025.

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio comparativo entre un controlador Fuzzy y un controlador PID aplicados a la sincronización de dos AGVs (Vehículos Guiados Automatizados) que transportan una carga compartida. La dinámica del sistema se modela mediante una función de transferencia obtenida experimentalmente, y se implementan ambos controladores en un entorno de simulación desarrollado en Python. El controlador Fuzzy, basado en lógica difusa, y el controlador PID se evalúan bajo las mismas condiciones. Los resultados muestran que el controlador Fuzzy ofrece una convergencia más rápida y estable del error, con menor sensibilidad a perturbaciones externas, en comparación con el PID. Estas ventajas destacan la robustez y adaptabilidad del enfoque Fuzzy, particularmente en sistemas dinámicos con incertidumbre.

Palabras clave: Controlador Fuzzy, Controlador PID, AGVs, sincronización, industria 4.0

Comparison of Fuzzy and PID Controllers for AGV Synchronization

Abstract

This work presents a comparative study between a Fuzzy controller and a PID controller applied to the synchronization of two AGVs (Automated Guided Vehicles) carrying a shared load. The system dynamics is modeled using an experimentally obtained transfer function, and both controllers are implemented in a simulation environment developed in Python. The Fuzzy controller, based on fuzzy logic, and the PID controller are evaluated under the same conditions. The results show that the Fuzzy controller offers faster and more stable error convergence, with less sensitivity to external disturbances, compared to the PID controller. These advantages highlight the robustness and adaptability of the Fuzzy approach, particularly in dynamic systems with uncertainty.

Keywords: Fuzzy Controller, PID Controller, AGVs, synchronization, industry 4.0.

1. Introducción

En la actualidad, especialmente con la llegada de la Industria 4.0 (Mertens et al., 2022), los Vehículos Guiados Automatizados (AGVs) desempeñan un papel clave en la automatización de procesos logísticos e industriales. Su capacidad para transportar materiales de manera autónoma contribuye significativamente a mejorar la eficiencia y la seguridad en entornos productivos (Sierra-García, et al., 2023). Entre los desafíos asociados al uso de AGVs destaca la sincronización precisa de múltiples unidades, especialmente en tareas que implican el transporte de una carga compartida (Espinosa et al., 2021). En estos casos, garantizar una mínima

diferencia de posición entre los AGVs es crucial para evitar tensiones mecánicas y asegurar un transporte estable.

Los AGVs desempeñan un papel fundamental en procesos industriales, donde su control preciso es esencial para garantizar operaciones eficientes (Sierra-García, & Santos, 2024^a). En este caso, se aborda el transporte coordinado de una carga pesada entre dos AGVs, lo que permite ahorrar costes al evitar la necesidad de adquirir robótica de mayores dimensiones y aprovechar recursos ya establecidos en la industria.

Tradicionalmente, los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) han sido la solución preferida en aplicaciones industriales debido a su simplicidad y eficacia en sistemas lineales (Abajo et al., 2022). Sin embargo, presentan limitaciones en escenarios con dinámicas no lineales,

*Autor para correspondencia: equevedo@ubu.es

incertidumbre o condiciones cambiantes, donde su desempeño puede verse comprometido (Konstantopoulos & Baldvieso-Monasterios, 2020).

Aunque los controladores PID han sido ampliamente utilizados debido a su simplicidad, presentan limitaciones significativas en escenarios como este, donde las condiciones del sistema pueden variar y es necesario manejar no linealidades (Liu et al., 2022). Estas limitaciones incluyen fluctuaciones en la respuesta y una menor adaptabilidad ante cambios en las dinámicas del sistema. Por ello, el uso de tecnologías inteligentes, como los controladores Fuzzy, ha surgido como una alternativa prometedora (Chen et al., 2024) (Sierra-Garcia, & Santos, 2024b). Estos controladores son capaces de operar en tiempo real, manejar no linealidades y mejorar tanto la estabilidad como la precisión en sistemas de seguimiento (Xu et al., 2021).

Aunque el sistema de los AGVs presenta comportamientos no lineales, el uso del controlador PID se incluye como referencia por su uso extendido en la industria. La comparación busca evidenciar las ventajas de los controladores fuzzy frente a métodos tradicionales bajo condiciones no ideales.

El objetivo de este trabajo es comparar el desempeño de un controlador Fuzzy y un controlador PID en la sincronización de dos AGVs que transportan una carga compartida. Para ello, se modeló el sistema dinámico mediante una función de transferencia obtenida experimentalmente, y se desarrolló un entorno de simulación en Python que permitió evaluar ambos controladores bajo las mismas condiciones. Los resultados obtenidos evidencian las ventajas del enfoque Fuzzy en términos de precisión, robustez y adaptabilidad, destacando su aplicabilidad en entornos industriales complejos.

La restante parte del artículo se estructura de la siguiente forma. La identificación del sistema se explica en la sección 2. La arquitectura de control y el diseño de los controladores se detalla en la sección 3. La sección 4 recoge los resultados de la evaluación de los controladores. El artículo finaliza con las conclusiones y líneas futuras.

2. Modelado e identificación del sistema

En esta subsección se detalla el proceso experimental utilizado para obtener la función de transferencia de las velocidades de los AGVs. Este proceso incluye barridos por las velocidades de operación del AGV y el análisis de la respuesta en escalera, modelado posteriormente mediante MATLAB (Moshayedi et al., 2021).

Para identificar el sistema se emplea en lazo abierto un perfil de velocidad con escalones como el que se muestra en la Figura 1.

La Figura 2 muestra el perfil de velocidad conjuntamente con la velocidad descrita por el AGV.

Para la identificación de la función de transferencia se emplea la toolbox System Identification de Matlab, que permite modelar dinámicas de sistemas basadas en datos experimentales, utilizando entradas y salidas medidas para trabajar con sistemas lineales y no lineales (Ljung, 1995). Para que la identificación funcione de forma adecuada es necesario que los datos de entrada y de salida tengan coherencia y estén sincronizados.

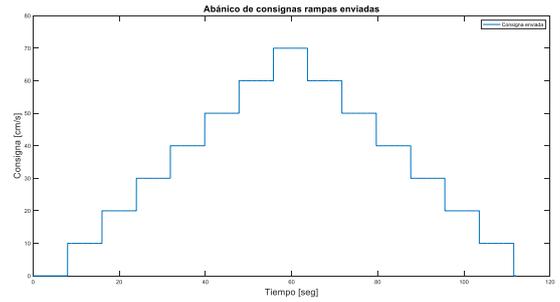


Figura 1. Perfil de velocidad empleado durante la identificación.

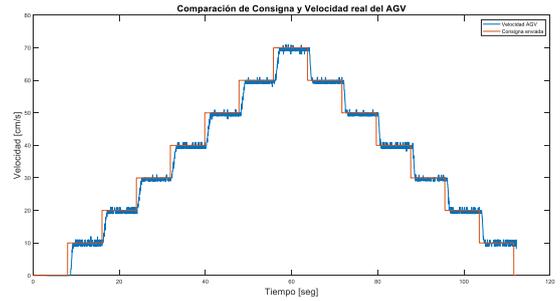


Figura 2. Comparación Velocidad consigna y Velocidad real del AGV.

Se obtiene la función de transferencia de la ecuación (1).

$$H(s) = \frac{-1,233s + 6,255}{s^2 + 3,672s + 6,309} \quad (1)$$

3. Arquitectura de control y diseño de los controladores

3.1. Arquitectura de control

La arquitectura de control se muestra en la Figura

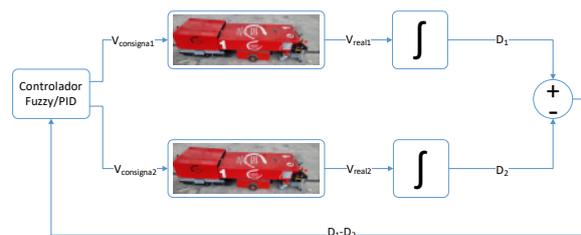


Figura 3. Arquitectura de control.

El esquema está compuesto por los siguientes bloques principales:

1. Controlador Fuzzy/PID: Genera las consignas de velocidad para cada AGV ($V_{consigna1}$ y $V_{consigna2}$) basándose en el error calculado como la diferencia entre las distancias deseadas (D_1 y D_2).

2. Planta (AGVs): Representa mediante una función de transferencia que modela la relación entre la velocidad de referencia ($V_{consigna}$) y la velocidad real (V_{real}) de los AGVs.

3. Integración de velocidad: Convierte las velocidades reales (V_{real}) en las distancias recorridas (D_1 , D_2).

4. Cálculo del error: Determina la diferencia entre las distancias de los AGVs (D1-D2), que sirve como entrada para el controlador.

3.2. Controlador Fuzzy

3.2.1 Funciones de pertenencia de entrada

Las funciones de pertenencia de entrada son fundamentales en un sistema de control fuzzy, ya que permiten transformar las entradas (valores numéricos precisos) en conjuntos difusos que pueden ser procesados por las reglas del sistema (Liu et al., 2022). En este trabajo, la variable de entrada utilizada es el error de distancia entre los dos AGVs. Este error se clasifica lingüísticamente en las categorías “muy negativo”, “negativo”, “cero”, “positivo” y “muy positivo”, representando diferentes niveles de discrepancia en la sincronización (Chen et al., 2024). La etiqueta “muy negativo” indica una diferencia de distancias muy grande entre uno y otro y “muy positivo” indica lo mismo, pero cambiando el signo del error. Cada categoría se modela mediante funciones de pertenencia específicas que reflejan el grado de pertenencia de un valor a un conjunto difuso. Estas funciones incluyen:

- Funciones trapezoidales: Utilizadas para representar categorías con límites suaves en sus extremos, como “muy negativo” y “muy positivo”.
- Funciones triangulares: Usadas para categorías intermedias como “negativo”, “cero” y “positivo”, donde el grado de pertenencia alcanza un único máximo.

Matemáticamente una función de membresía se define:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1] \quad (2)$$

donde X es el universo de discurso y $\mu_A(x)$ representa el grado de pertenencia del valor x al conjunto difuso A (Xu et al., 2021).

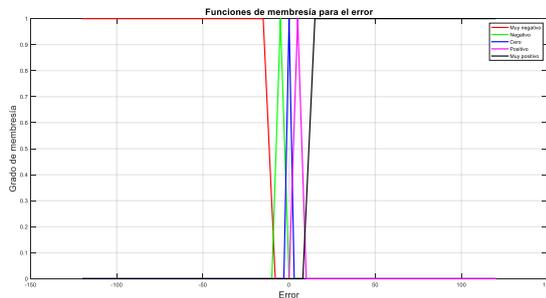


Figura 4. Funciones de pertenencia de entrada.

Se utilizaron cinco funciones de membresía para capturar con precisión el rango de posibles errores de sincronización, desde desviaciones extremas hasta sincronización perfecta. Las funciones triangulares y trapezoidales fueron elegidas por su simplicidad computacional y su capacidad para modelar transiciones suaves entre estados.

3.2.2 Funciones de pertenencia de salida

La salida del sistema fuzzy está representada por el ajuste de velocidad necesario para corregir el error de distancia entre los AGVs (Liu et al., 2022). Las categorías lingüísticas de salida incluyen “disminuir fuertemente”, “disminuir”, “sin ajuste”, “aumentar” y “aumentar fuertemente”. Las funciones de pertenencia de salida se construyen de manera similar a las de entrada, utilizando funciones trapezoidales y triangulares. Estas funciones permiten determinar el grado en que el sistema debe ajustar la velocidad clave para la estabilidad del sistema.

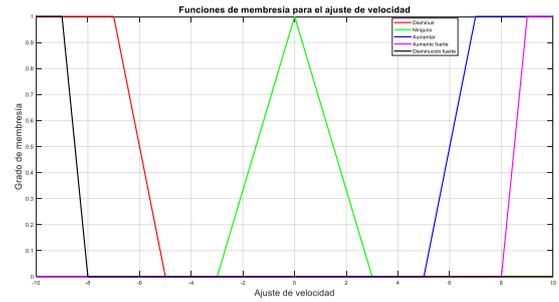


Figura 5. Funciones de pertenencia de salida.

3.2.3 Reglas difusas

Las reglas difusas forman la base del sistema de inferencia. Cada regla se estructura como una expresión del tipo: “SI A ENTONCES B”

Donde:

- A: Condición o antecedente definido en términos de las funciones de pertenencia de entrada.
- B: Conclusión o consecuente, representando una acción específica del sistema.

Estas reglas que emplean operadores lógicos difusos como AND y OR, que se definen mediante operaciones matemáticas sobre los grados de pertenencia (Chen et al., 2024). En este trabajo, el operador AND se implementa como el mínimo de los grados de pertenencia (3):

$$\mu_A(x) \cap \mu_B(x): \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3)$$

El conjunto de reglas está diseñado para garantizar una transición fluida entre las diferentes categorías, proporcionando un control robusto y preciso.

3.2.4 Proceso de defuzzificación

La defuzzificación convierte las salidas difusas en un valor que puede ser aplicado al sistema físico. Este proceso es crucial para traducir la lógica difusa en una acción práctica, en este caso, el ajuste de velocidad de los AGVs (Liu et al., 2022). En este caso se utiliza el método del centroide (Centre of Gravity,

COG), que calcula el centro de masa del conjunto difuso acumulado. Matemáticamente viene dado por (4):

$$y = \frac{\sum_i \mu(x_i)x_i}{\sum_i \mu(x_i)} \quad (4)$$

donde $u(x)$ es la función de pertenencia de la salida acumulada. Este método es ampliamente reconocido por su precisión y suavidad, lo que lo hace ideal para sistemas dinámicos como el control de AGVs (Xu et al., 2021).

3.3. Controlador PID

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es una técnica clásica ampliamente utilizada en la industria para regular sistemas dinámicos. El controlador PID ajusta la salida del sistema basándose en tres términos dependientes del error actual ($e(t)$), su integral y su derivada (Morales et al., 2023).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

donde:

- K_p : Ganancia proporcional, ajusta la respuesta directamente en función del error.
- K_i : Ganancia integral, corrige errores acumulados para eliminar el offset.
- K_d : Ganancia derivativa, anticipa cambios futuros en el error basándose en sus tasa de variación.

El controlador PID se configura con los siguientes parámetros ajustados mediante simulación:

- $K_p = 0,3907$: Determina la intensidad de la acción proporcional.
- $K_i = 0,0686$: Ajusta la corrección por error acumulado.
- $K_d = 0,5539$: Aumenta la anticipación de los cambios en el error.

Los parámetros K_p , K_i y K_d se determinaron utilizando el método de prueba y error sobre la respuesta escalón del sistema modelado, verificando el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y el error estacionario. Esta aproximación empírica fue seleccionada por su eficacia en entornos simulados y su sencillez de implementación

3.4. Implementación del software

El sistema se desarrolló completamente en Python, utilizando bibliotecas especializadas para simular y analizar el comportamiento dinámico del sistema:

- `Scipy.signal`: Para implementar la función de transferencia de los AGVs y simular la respuesta dinámica de los mismos.
- `Numpy`: Para manejar operaciones matemáticas como la integración numérica mediante el método trapezoidal.

El controlador se integró en el bucle de simulación principal, donde en cada iteración, se calcula el error, se genera el ajuste necesario y se actualizan las velocidades y distancias de los AGVs (Morales et al., 2023)

3.4.1 Flujo de simulación

El proceso de simulación sigue los siguientes pasos:

1. Inicialización de parámetros del sistema, incluyendo las ganancias del controlador PID y las funciones de membresía para el controlador Fuzzy.
2. Cálculo del error basado en las distancias actuales de los AGVs.
3. Generación de las consignas de velocidad mediante el controlador seleccionado.
4. Simulación de las velocidades reales de los AGVs a través de la función de transferencia.
5. Integración de las velocidades para obtener las distancias acumuladas.
6. Repetir el proceso para cada paso de tiempo en la simulación.

4. Resultados

4.1 Respuesta del sistema con el controlador Fuzzy

La Figura 6 ilustra cómo evoluciona el error de distancia durante la simulación. Inicialmente, el error es significativo, pero el controlador Fuzzy lo reduce de manera progresiva.

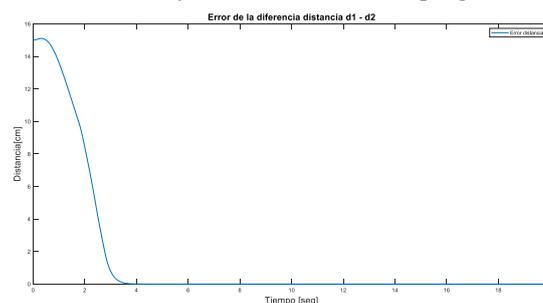


Figura 6. Evolución del error de distancia con controlador Fuzzy.

Comparando las velocidades de ambos AGVs se aprecia como el sistema se acerca a una velocidad constante tanto en el AGV1 como en el AGV2 (Figuras 7-8).

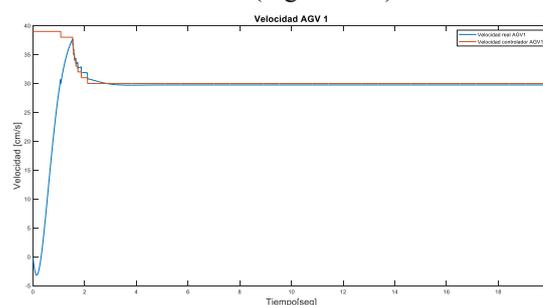


Figura 7. Velocidades de consigna y real en el AGV1 con controlador Fuzzy.

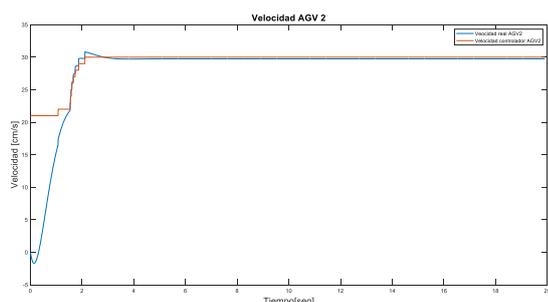


Figura 8. Velocidades de consigna y real en el AGV2 con el controlador Fuzzy.

4.2 Respuesta del sistema con el controlador PID

Las Figura 9 y 10 muestran la evolución del error de distancia y la velocidad cuando se aplica el controlador PID.

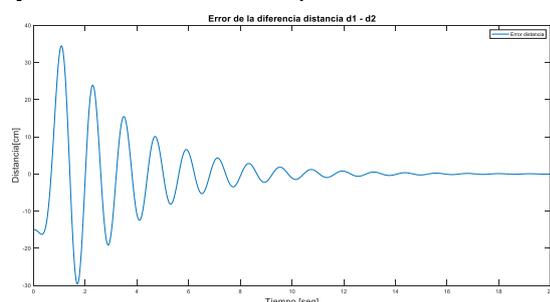


Figura 9. Evolución del error de distancia con controlador PID.

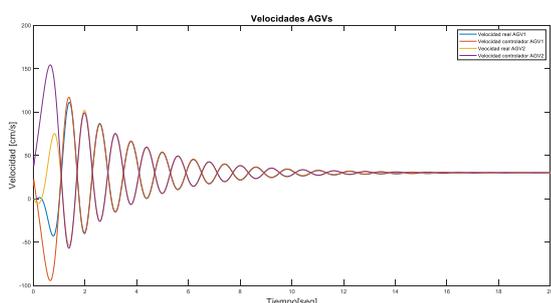


Figura 10. Velocidades de AGVs con PID.

Existe una convergencia del error, ya que se reduce el error inicial de manera efectiva y la velocidad se ajusta hasta alcanzar una velocidad estable y constante para ambos vehículos. Sin embargo, el comportamiento con el PID es demasiado oscilante. Estos resultados sugieren que sería interesante realizar un estudio en detalle para mejorar la sintonía del controlador.

5. Conclusiones y líneas futuras

En este trabajo se han evaluado y comparado dos estrategias de control: un controlador PID clásico y un controlador Fuzzy, aplicados al problema de sincronización de dos AGVs para el transporte de una carga compartida.

Ambos controladores lograron reducir el error de distancia inicial entre los AGVs alcanzado un estado estable en la sincronización. Pero, es posible observar como el controlador PID requiere más tiempo para reducir el error a valores cercanos a cero, lo que puede ser un limitante en aplicaciones que demanden tiempos de respuesta cortos. En cambio, el

controlador Fuzzy muestra una convergencia más rápida y eficiente. Por otro lado, el controlador PID presentó oscilaciones leves antes de estabilizarse, lo que podría afectar la precisión y generar un comportamiento menos predecible en condiciones específicas. Por el contrario, el controlador Fuzzy no mostró oscilaciones significativas, manteniendo un comportamiento suave y estable durante todo el proceso.

En términos de desempeño general, el controlador PID fue efectivo para alcanzar el objetivo de sincronización, pero presenta limitaciones al manejar sistemas con no linealidades, incertidumbres y dinámicas cambiantes. En cambio, el controlador Fuzzy destacó por su adaptabilidad ya que es capaz de ajustarse a cambios dinámicos, su precisión ya que es capaz de hacer una reducción más rápida y estable del error y por una mejor robustez frente al PID.

Como líneas de investigación futuras cabe destacar, la evaluación del desempeño de los controladores en escenarios más complejos, con múltiples AGVs y en entornos dinámicos; la ejecución del controlador en el edge implementando tecnologías avanzadas de comunicación como el 5G; y la implementación externa de la localización y monitorización de los AGVs mediante técnicas de clusterización. También se evaluará la robustez de ambos controlares ante cargas variables, ruidos en la señal, perturbaciones externas, etc.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Comisión Europea en el marco del proyecto europeo MANiBOT, número de referencia 101120823.

Referencias

- Abajo, M. R., Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2022). Evolutive tuning optimization of a PID controller for autonomous path-following robot. In 16th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2021) (pp. 451-460). Springer International Publishing
DOI: 10.1007/978-3-030-87869-6
- Chen, Y., Chen, J., Cheng, S., & Qin, J. (2024). Research on AGV cart control system based on fuzzy PID control. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences
DOI: 10.2478/amns.2023.2.00127
- Espinosa, F., Santos, C., & Sierra-García, J. E. (2021). Transporte multi-AGV de una carga: estado del arte y propuesta centralizada. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 18(1), 82-91.
DOI: 10.4995/riai.2020.12846
- Konstantopoulos, G. C., & Baldivieso-Monasterios, P. R. (2020). State-limiting PID controller for a class of nonlinear systems with constant uncertainties. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 30(5), 1770-1787
DOI: 10.1002/rnc.4853
- Liu, W., Li, M., & Liu, C. (2022, December). AGV dual-wheel speed synchronous control based on adaptive fuzzy PID. In 2022 IEEE 5th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC) (Vol. 5, pp. 564-569). IEEE.
DOI: 10.1109/IMCEC55388.2022.10020073
- Ljung, L. (1995). System identification toolbox: User's guide. Natick, MA, USA: MathWorks Incorporated
- Mertens, C., Alonso, J., Lázaro, O., Palansuriya, C., Böge, G., Nizamis, A., ... & Poulakidas, A. (2022). A framework for big data sovereignty: the European industrial data space (EIDS). In Data Spaces: Design, Deployment and Future Directions (pp. 201-226). Cham: Springer International Publishing.
DOI: 10.1007/978-3-030-98636-0

- Morales, G. R., Canto, S. E., & Hernandez, V. G. (2023, October). Speed Control of DC Servo Motor Under Comparison with PID Tuner Control and Neural Network Control Using Simulink and ESP32. In 2023 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV) (pp. 1-8). IEEE
DOI: 10.1109/ICEV59168.2023.10329699
- Moshayedi, A. J., Li, J., & Liao, L. (2021, June). Simulation study and PID tune of automated guided vehicles (AGV). In 2021 IEEE international conference on computational intelligence and virtual environments for measurement systems and applications (CIVEMSA) (pp. 1-7). IEEE
DOI: 10.1109/CIVEMSA52099.2021.9493679
- Sierra-García, J. E., Fernández-Rodríguez, V., Santos, M., & Quevedo, E. (2023). Development and experimental validation of control algorithm for person-following autonomous robots. *Electronics*, 12(9), 2077.
DOI: 10.3390/electronics12092077
- Sierra-Garcia, J. E., & Santos, M. (2024a). Federated discrete reinforcement learning for automatic guided vehicle control. *Future Generation Computer Systems*, 150, 78-89.
DOI: 10.1016/j.future.2023.08.021
- Sierra-Garcia, J. E., & Santos, M. (2024b). AGV fuzzy control optimized by genetic algorithms. *Logic Journal of the IGPL*, 32(6), 955-970.
DOI: 10.1093/jigpal/jzae033
- Xu, X., Su, P., Wang, F., Chen, L., Xie, J., & Atindana, V. A. (2021). Coordinated control of dual-motor using the interval type-2 fuzzy logic in autonomous steering system of AGV. *International Journal of Fuzzy Systems*, 23, 1070-1086.
DOI: 10.1007/s40815-020-00886-x