

Jornadas de Automática

Planificación de trayectorias robóticas libres de colisiones mediante el método de banda elástica

Atxurra, Cloe^a, Llona, Aitor^a, Cabanes, Itziar^{a,*}, Mancisidor, Aitziber^a, Garrote, Estíbaliz^{a,b}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Ingeniero Torres Quevedo Plaza, 1, 48013, Bilbao, Bizkaia, España.

^bTECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, Spain

To cite this article: Atxurra, C., Llona, A., Cabanes, I., Mancisidor, A., Garrote, E. 2025. Collision-free robotic path planning using the elastic band method. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12243>

Resumen

Este trabajo propone un nuevo algoritmo de evasión automática de colisiones para robots industriales y colaborativos. El algoritmo desarrollado se basa en el método de banda elástica que ha mostrado su eficacia en robots móviles. El planificador propuesto parte de una trayectoria inicial que se evalúa para detectar cualquier posible colisión. Si se detecta una colisión entre dos puntos de la trayectoria inicial, interviene el algoritmo de trayectorias basada en la banda elástica, generando un punto de transición entre ellos para evitar la colisión. Este enfoque ha sido validado tanto en simulación como en escenarios reales, utilizando un robot colaborativo de siete grados de libertad en una tarea de inspección de control de calidad. Los resultados obtenidos demuestran que la trayectoria del robot se adapta de forma autónoma, lo que incrementa la seguridad y reduce significativamente el esfuerzo requerido para programar la trayectoria del robot.

Palabras clave: Planificación de trayectorias, Tecnología robótica, Robot colaborativo.

Collision-free robotic path planning using the elastic band method

Abstract

This work proposes a new automatic collision avoidance algorithm for industrial and collaborative robots. The developed algorithm is based on the elastic band method, which has proven effective in mobile robots. The proposed planner starts from an initial trajectory that is evaluated to detect any potential collisions. If a collision is detected between two points along the initial trajectory, the elastic band-based trajectory algorithm intervenes, generating a transition point between them to avoid the collision. This approach has been validated both in simulation and in real-world scenarios, using a seven-degree-of-freedom collaborative robot in an inspection task aimed at quality control. The results obtained demonstrate that the robot's trajectory adapts autonomously, which increases operational safety and significantly reduces the effort required to program the robot's motion.

Keywords: Path Planning, Robotics technology, Collaborative robot.

1. Introducción

La fabricación moderna exige el cumplimiento de requisitos cada vez más numerosos y variados (Zhong et al., 2017). Ya sea por la variabilidad de los productos existentes o la introducción de nuevos, los procesos están en constante cambio.

Este escenario exige soluciones de fabricación más automatizadas, precisas y flexibles, características que suelen lograrse mediante la implementación de dispositivos robóticos. Sin embargo, esto implica la necesidad de generar un programa de robot específico por cada referencia o producto.

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

Por esta razón, la planificación automatizada de trayectorias robóticas ha sido ampliamente estudiada en distintos procesos de fabricación, como el ensamblaje (Liu et al., 2024; Li et al., 2021), la soldadura (Tang et al., 2024) o el mecanizado (Wu et al., 2024). Una de las aplicaciones más comunes es el control de calidad, incluyendo la detección de fallos y la medición de piezas y productos (Barari et al., 2021).

Los métodos de inspección tradicionales, ya sean realizados por un operario o con sistemas automáticos, tienen varios retos a los que enfrentarse. Para un operario, las tareas de control de calidad son repetitivas y exigen mucha atención, además de ser propensos a la interpretación subjetiva de los defectos. Por otra parte, los sistemas automatizados clásicos presentan una adaptabilidad limitada a los cambios en el producto. La nueva generación de sistemas de inspección adaptables requiere un mayor nivel de automatización, como la planificación automatizada de trayectorias robóticas.

En la literatura se pueden encontrar diversos estudios que se centran en la planificación automática de trayectorias robóticas para la inspección. Por ejemplo, en (Xiao et al., 2022) se presenta un método de planificación automática de trayectorias para completar una tarea de inspección de superficies de circuitos impresos (PCB). Por otro lado, el trabajo en (Jia et al., 2024) se centra en el objetivo de medir superficies de forma libre con un robot industrial y un escáner láser. Aunque estas investigaciones han demostrado la reducción de tiempo y la mejora de la eficiencia, la mayoría de los planificadores de trayectorias desarrolladas no abordan el problema de evasión de colisiones.

Con la intención de dar respuesta a esta necesidad, se han desarrollado distintas investigaciones basados en el modelado de volúmenes para detectar colisiones. Por ejemplo, en (Sadaoui et al., 2022) han generado un método iterativo de planificación de trayectorias para tareas de inspección con un sensor colocado en un cabezal giratorio. Para la detección de colisiones, el sensor se modela como un paralelepípedo y si una esquina del paralelepípedo pertenece al volumen que rodea la pieza, se detecta un problema de colisión y se crea una nueva trayectoria. Otras investigaciones, proponen el uso del volumen de seguridad del objeto (Deng et al., 2025). Asimismo existen investigaciones que centran su estrategia en un método iterativo para calcular la distancia mínima desde el efector final del robot hasta la trayectoria deseada, generando trayectorias humano-robot seguras (Secil and Ozkan, 2023).

Aunque existen diferentes soluciones para generar automáticamente trayectorias sin colisiones, se encuentra una laguna notable en la corrección de la trayectoria inicial con colisiones. Descartar todas las trayectorias con colisiones puede hacer que en muchos casos no sea posible ninguna solución. Pero, podría ser posible una trayectoria más óptima si se evita la colisión inicial. Por ello, este trabajo presenta un algoritmo de evasión de colisiones basado en el método de banda elástica.

El enfoque general de la banda elástica (Elastic Band, EB) consiste en una banda predefinida y deformable que se modifica en función de las fuerzas internas y externas que actúan sobre ella (Quinlan and Khatib, 1993). Las fuerzas internas representan las fuerzas de resorte que mantienen unida la banda, y las fuerzas externas simulan las fuerzas potenciales artificiales que mantienen la banda alejada de los obstáculos. Por lo

tanto, la banda elástica estará más tensa en las zonas donde haya obstáculos cerca, lo que indica que el robot tiene limitaciones de movimiento. Este método se ha utilizado en (Zhang et al., 2024a) para generar una trayectoria que evita obstáculos para un robot móvil. El EB se modifica en (Ou et al., 2024) para evitar no sólo los obstáculos estáticos sino también los dinámicos con robots móviles. Otros trabajos, como (Zhang et al., 2024b) y (Chen et al., 2025), han combinado el método EB con otras tecnologías para obtener resultados más adecuados para tareas específicas con robots móviles. Aunque estos enfoques han mostrado resultados prometedores en la generación automática de trayectorias para robots móviles, no se han encontrado investigaciones que utilicen el método de la banda elástica para la evasión de colisiones con robots industriales o colaborativos en procesos de fabricación.

El presente trabajo tiene como objetivo generar una trayectoria robótica libre de colisiones para tareas de control de calidad. Partiendo de una trayectoria inicial, se evalúa para detectar cualquier posible colisión a lo largo de ella. En caso de colisión, se ejecuta el algoritmo de trayectorias basada en la banda elástica hasta que se evita la colisión o se alcanza un límite máximo predefinido, lo que significa que la colisión es inevitable y se requiere una nueva trayectoria inicial.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se describen los fundamentos teóricos del algoritmo de evasión de colisiones propuesto. En la Sección 3 se presentan los experimentos realizados y los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección 4 concluye con una discusión de los resultados y sugerencias para trabajos futuros.

2. Algoritmo de generación trayectorias robóticas libres de colisiones mediante el método de banda elástica

El algoritmo de evasión de colisiones propuesto comienza con la evaluación de un recorrido de inspección inicial para identificar colisiones. Esto se hace en un entorno simulado por razones de seguridad. Para cada punto de inspección consecutivo en la trayectoria, el robot se mueve del punto de inspección i al punto de inspección $i + 1$. Si no se detecta ninguna colisión, el robot seguirá la trayectoria hasta que finalice y se considere válida y ejecutable. Sin embargo, si existe una colisión entre dos puntos de inspección consecutivos, se activa el proceso iterativo del algoritmo propuesto para generar una nueva trayectoria libre de colisiones entre los dos puntos de inspección.

El algoritmo para evitar colisiones es un proceso iterativo. En cada iteración, si se produce una colisión, se define un punto de transición (P_T) entre los puntos inicial (P_1) y final (P_2). P_T se modifica en cada iteración alargando la trayectoria como una banda elástica alrededor del objeto a inspeccionar. A continuación, se comprueba la nueva trayectoria. Si la colisión sigue produciéndose es necesaria una nueva iteración en la que el alargamiento de la banda elástica se incrementa un Δ para determinar el nuevo punto de transición (P_{Tnuevo}). El proceso iterativo continúa hasta que se obtiene una trayectoria libre de colisiones o hasta que se alcanza el valor máximo del desplazamiento D_{MAX} . Tanto Δ como D_{MAX} pueden adaptarse al tamaño del objeto, al alcance del robot y al campo de visión de la cámara (Field of View, FOV).

El algoritmo propuesto calcula la posición del punto de transición (P_T) teniendo en cuenta la forma de la superficie de la pieza inspeccionada. Esta información se codifica en la posición y orientación de los puntos de inspección inicial (P_1) y final (P_2). La orientación incluye 3 direcciones: la normal a la superficie y los dos ejes alineados con los lados del sensor que realiza la inspección. En el caso de una cámara 2D, son las líneas y el eje de las filas de la imagen capturada. Aparecen dos casos diferentes dependiendo de si los planos definidos por la normal a la superficie en los puntos de inspección P_1 y P_2 son planos de intersección o planos paralelos.

En las subsecciones siguientes se explican los cálculos para cada caso. Los conceptos teóricos se muestran en un cubo en el que la ubicación y orientación de los planos pueden mostrarse más fácilmente.

2.1. Planos intersectados

Este caso se produce cuando los planos definidos por las normales en los puntos de inspección P_1 y P_2 se cortan, como se muestra en la Figura 2(a). La trayectoria se define como una banda elástica entre P_1 y P_2 , y para evitar la colisión la banda (en verde en la Figura 2) se alarga imponiendo un punto de transición P_T . Este punto se sitúa en un plano obtenido calculando:

$$\text{plano}_{\text{trayectoria elástica}} = \text{PlanoBisector}(\text{plano}(\vec{n}_1; P_1) \cap \text{plano}(\vec{n}_2; P_2)) \quad (1)$$

Donde \vec{n}_1 y \vec{n}_2 son los vectores normales de P_1 y P_2 respectivamente. Entonces, P_T en la primera iteración (P_{T0}) se calcula como:

$$P_{T0} = \text{Media}(\text{Proyeccion}_{\text{en el plano trayectoria elástica}}(P_1, P_2)) \quad (2)$$

Con este cálculo geométrico se obtiene la localización de P_T en la primera iteración (P_{T0}) del método trayectorias propuesto en las dos direcciones posibles (Figura 2(b)).

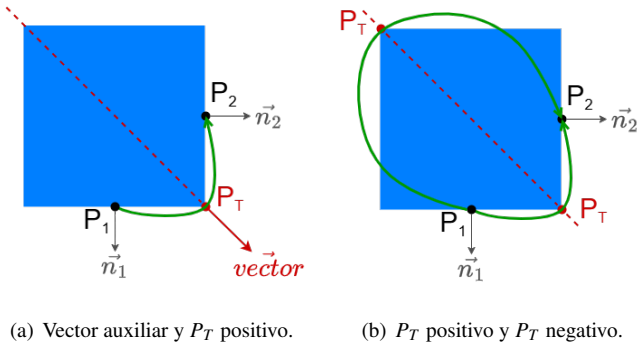


Figura 1: Planos intersectados: Cálculo del P_T inicial.

Si no se produce ninguna colisión al pasar por el punto de transición (P_{T0}) con al menos una configuración del robot, la trayectoria se considera válida y el algoritmo finaliza. En caso contrario, se requieren iteraciones adicionales en las que es necesario un alargamiento de la banda elástica. Para ello se define un vector auxiliar sobre el plano bisector con el que se establece la dirección sobre la que alargar la banda. Este vector (\vec{v}) se define por las siguientes condiciones:

$$\vec{v} \in \text{Planobisector} \quad (3)$$

$$\vec{v} \text{ pasa por } P_T \quad (4)$$

$$\vec{v} \perp \text{LineaIntersecada}(\text{plano}(\vec{n}_1; P_1), \text{plano}(\vec{n}_2; P_2)) \quad (5)$$

Se añade una distancia Δ en cada iteración al punto de transición (P_T) a lo largo de la dirección definida por \vec{v} , estirando la trayectoria inicial y alejándola del objeto generando una Banda Elástica (en verde en la Figura 2 (a)).

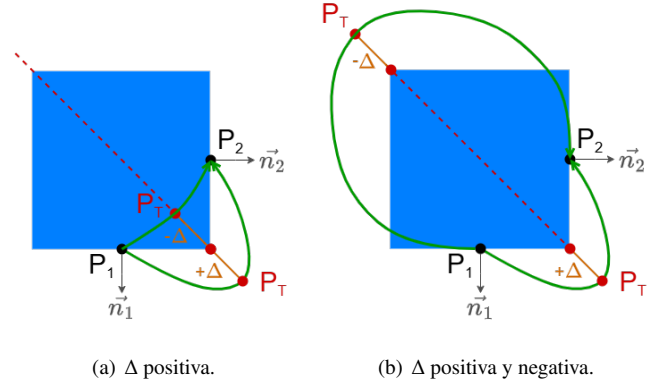


Figura 2: Planos intersectados: Aumento de la distancia Δ .

El proceso iterativo se repite tanto en el sentido positivo como negativo del vector hasta que se obtiene una trayectoria libre de colisiones para al menos una de las configuraciones del robot (Figura 2 (b)). En el caso de que haya más de una solución posible, se elige la trayectoria con menor tiempo de ejecución. Además, se define una distancia máxima del incremento Δ como otra forma de concluir el proceso iterativo, alcanzada la distancia máxima D_{MAX} , no se encuentra ninguna solución ejecutable para la trayectoria. Esta situación tiene una probabilidad muy baja de ocurrir.

2.2. Planos paralelos

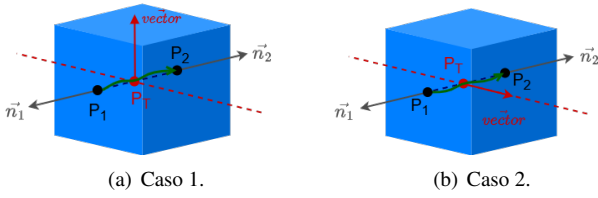
Cuando los planos asociados a los puntos de inspección inicial (P_1) y final (P_2) no se cortan, los planos son paralelos entre sí. Y la metodología anterior no es aplicable ya que los planos imagen no se intersectan. Sin embargo, se define una nueva metodología específica para estos casos siguiendo el mismo planteamiento donde P_T se sitúa en un plano obtenido como:

$$\text{plano}_{\text{trayectoria elástica}} = \text{PlanoIntermedio}(\text{plano}(\vec{n}_1; P_1) \text{plano}(\vec{n}_2; P_2)) \quad (6)$$

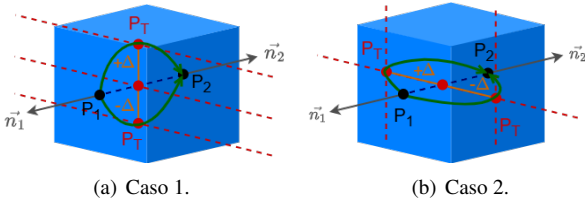
P_{T0} está situado en este plano y es el punto intermedio calculado considerando P_1 y P_2 como en el caso anterior 2.

El vector auxiliar (\vec{v}) tiene que cumplir las ecuaciones 3 y 4. En este caso, no sólo hay una dirección en la que se alarga la trayectoria, sino dos, definidas como:

1. Alineado con la referencia del lado rectangular más largo de P_1 , véase la Figura 3 (a).
2. Alineado con la referencia del lado rectangular más corto de P_1 , véase la Figura 3 (b).

Figura 3: Planos paralelos: Vector auxiliar P_T .

Siguiendo la metodología de los planos intersectados, se ejecuta una simulación para evaluar la trayectoria generada para todas las configuraciones posibles del robot. Si no se produce ninguna colisión la trayectoria se considera válida, en caso contrario se ejecuta el algoritmo propuesto para sumar Δ en cada iteración como en el caso de intersección de planos.

Figura 4: Planos paralelos: Δ positiva y negativa.

Al aplicar este algoritmo pueden darse diferentes situaciones en función del robot, la pieza a inspeccionar y el FOV, es por eso que toda la casuística está resumida en la Tabla 1. En los casos en los que existe una trayectoria inicial libre de colisiones para al menos una configuración del robot, no se ejecuta el algoritmo propuesto. En caso contrario, se modifica la trayectoria inicial de inspección para obtener una trayectoria libre de colisiones y, si es posible más de una solución, se elige la de menor tiempo de ejecución. Cuando el algoritmo propuesto no genera una trayectoria libre de colisiones ejecutable, hay que seleccionar una trayectoria inicial alternativa.

Tabla 1: Casuística del algoritmo propuesto

Trayectoria inicial	Ejecutar algoritmo	Trayectoria final
Sin colisión	No	Sin colisión
Colisión	Si	Sin colisión
Colisión & Fuera del rango de trabajo	Si	No ejecutable

3. Validación

Esta sección describe la validación del planificador de trayectorias robóticas libres de colisiones propuesto. Para la validación, se han utilizado el robot colaborativo de 7 grados de libertad LBR IIWA 14 de KUKA y la cámara de inspección IDS Cam U3-3080CP-M-GL con un sensor CMOS monocromo de 2448x2048 píxeles y con un campo de visión (Field of View, FOV) de 1 cm^2 .

Se ha inspeccionado un parachoques de coche, que fue elegida por su superficie curva (Figura 5) que conlleva complicaciones en las tareas de inspección automática. El proceso de

inspección impone la condición de tener la cámara en una posición determinada respecto a la normal de la superficie en cada punto de inspección. Este requisito restringe el rango de trabajo del robot, por lo que, conociendo el volumen de trabajo final del robot se ha impreso una versión a escala del parachoques en 3D para la validación del algoritmo propuesto.

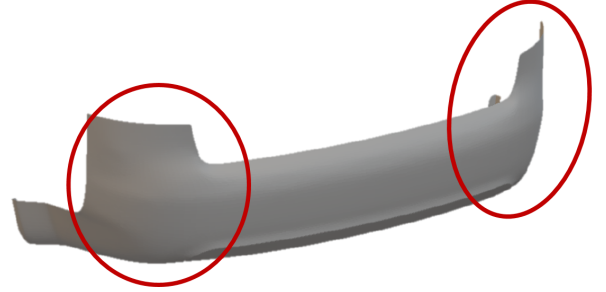


Figura 5: Modelo CAD del parachoques a inspeccionar, en rojo las dos zonas curvadas inspeccionadas.

Antes de validar el planificador de trayectorias robóticas libre de colisiones propuesto en un entorno real, se ha ejecutado en simulación utilizando el software de simulación CoppeliaSim. Se ha intentado que el entorno virtual generado en CoppeliaSim sea lo más similar posible a la configuración del mundo real. La Figura 6 muestra el escenario virtual. Además del robot, la cámara, el objeto de automoción a inspeccionar y una base de sujeción para colocar el objeto, se ha introducido un cilindro de 5 cm de longitud y 1 cm de diámetro para representar el FOV de la cámara.

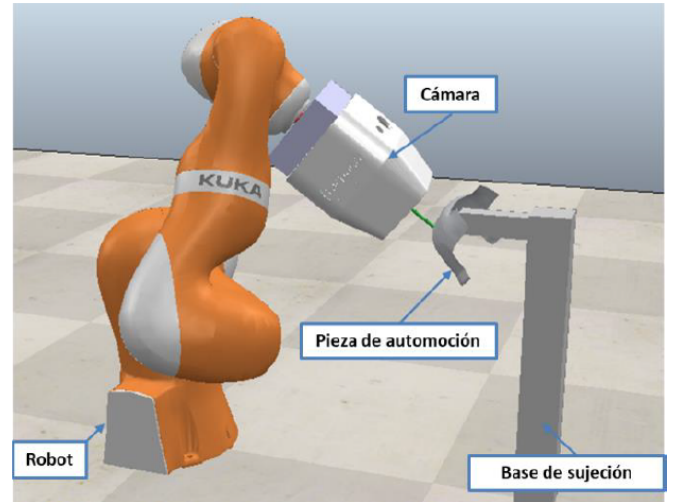


Figura 6: Simulación en el software CoppeliaSim del planificador de trayectorias robóticas libre de colisiones propuesto.

La Figura 7 muestra el entorno de la validación en el mundo real. Como ya se ha mencionado, aunque se selecciona un parachoques de coche para la inspección debido a sus zonas curvas, el objeto se escala para ajustar al espacio de trabajo del robot colaborativo LBR IIWA 14.

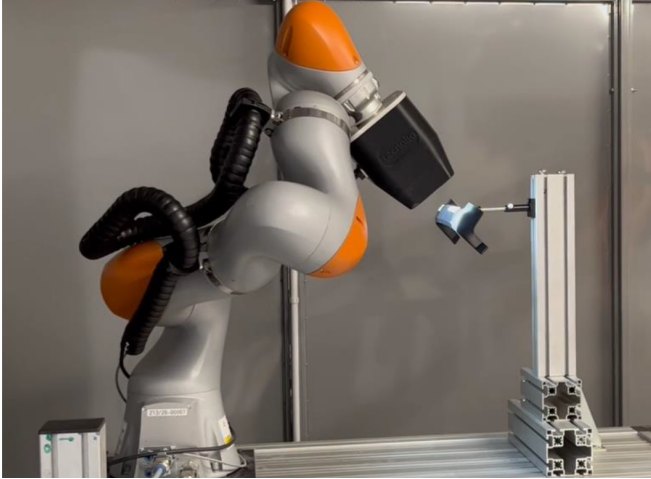


Figura 7: Entorno del mundo real con el parachoques a escala.

Se han realizado diferentes experimentos para validar el planificador de trayectorias robóticas libre de colisiones propuesto, abarcando dos áreas diferentes del parachoques (Figura 5). Cada una de las áreas cuenta con 25 puntos de inspección y el límite de velocidad se ha establecido en el 50 % de la velocidad máxima de cada articulación. La tabla 2 muestra el tiempo medido para ejecutar la tarea de inspección tanto en el entorno simulado como en el real.

Trayectoria	Simulación	Mundo real
T1	81,48 s	80,4 ± 1 s
T2	83,26 s	82,2 ± 1 s

Tabla 2: Tiempos de inspección

El tiempo necesario para ejecutar la trayectoria generada en la simulación y en el entorno real es muy similar, aproximadamente 80 segundos. Además, al visualizar las trayectorias en tiempo real se observa que ambas son idénticas.

4. Conclusiones

En este trabajo se propone un novedoso algoritmo para planificar trayectorias libres de colisiones para robots industriales y colaborativos. El algoritmo propuesto se basa en la modificación de la trayectoria inicial mediante el método de la banda elástica para evitar colisiones.

Se realiza una evaluación de una posible trayectoria inicial para detectar colisiones con cualquiera de las configuraciones del robot. Si se detecta una colisión entre dos puntos de inspección, se ejecuta el algoritmo propuesto, generando un punto de transición entre ellos para evitarla. El algoritmo propuesto continúa con un proceso iterativo de elongación, donde se modifica la posición del punto de transición con respecto a los puntos de inspección, hasta que se evita por completo la colisión. Los ensayos de validación han demostrado que la trayectoria de inspección se completa sin colisiones, tanto en simulación como en entornos reales.

En resumen, se puede concluir que el algoritmo desarrollado es un planificador automático de trayectorias robóticas libre de colisiones adecuado. Además, el método propuesto puede utilizarse con cualquier robot y para la inspección de

cualquier tipo de objeto. Asimismo, gracias a las características de la trayectoria generada, el algoritmo propuesto también es adecuado para otros procesos que requieren perpendicularidad y evasión de obstáculos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno Vasco: proyectos Ref. IT1726-22 y Ref. AURRERA KK-2024/0024.

Referencias

- Barari, A., de Sales Guerra Tsuzuki, M., Cohen, Y., Macchi, M., 2021. Intelligent manufacturing systems towards industry 4.0 era. *Journal of Intelligent Manufacturing* 32, 1793–1796.
DOI: 10.1007/s10845-021-01769-0
- Chen, L., Liu, R., Jia, D., Xian, S., Ma, G., 2025. Improvement of the TEB Algorithm for Local Path Planning of Car-like Mobile Robots Based on Fuzzy Logic Control. *Actuators* 14.
DOI: 10.3390/act14010012
- Deng, X., Hu, P., Li, Z., Zhang, W., He, D., Chen, Y., 2025. Reinforcement Learning-based five-axis continuous inspection method for complex free-form surface. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 94.
DOI: 10.1016/j.rcim.2025.102990
- Jia, H., Chen, H., Chen, C., Huang, Y., Lu, Y., Gao, R., Yu, L., 2024. Research on Path Planning Technology of a Line Scanning Measurement Robot Based on the CAD Model. *Actuators* 13.
DOI: 10.3390/act13080310
- Li, S., Chen, D., Wang, J., 7 2021. An optimal singularity-free motion planning method for a 6-DOF parallel manipulator. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application* 48, 290–299.
DOI: 10.1108/IR-04-2020-0079
- Liu, Y., Yi, W., Feng, Z., Yao, J., Zhao, Y., 2024. Design and motion planning of a 7-DOF assembly robot with heavy load in spacecraft module. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 86, 102645.
DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102645
- Ou, X., You, Z., He, X., 2024. Local Path Planner for Mobile Robot Considering Future Positions of Obstacles. *Processes* 12.
DOI: 10.3390/pr12050984
- Quinlan, S., Khatib, O., 1993. Elastic bands: Connecting path planning and control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 802–807.
- Sadaoui, S. E., Mehdi-Souzani, C., Lartigue, C., Brahimi, M., 2022. Automatic path planning for high performance measurement by laser plane sensors. *Optics and Lasers in Engineering* 159.
DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107194
- Secil, S., Ozkan, M., 2023. A collision-free path planning method for industrial robot manipulators considering safe human–robot interaction. *Intelligent Service Robotics* 16, 323–359.
DOI: 10.1007/s11370-023-00465-7
- Tang, Q., Ma, L., Zhao, D., Sun, Y., Lei, J., Wang, Q., 2024. A dual-robot cooperative arc welding path planning algorithm based on multi-objective cross-entropy optimization. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 89, 102760.
DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102760
- Wu, L., Zang, X., Yin, W., Zhang, X., Li, C., Zhu, Y., Zhao, J., 2024. Pose and Path Planning for Industrial Robot Surface Machining Based on Direction Fields. *IEEE Robotics and Automation Letters* 9, 10455 – 10462.
DOI: 10.1109/LRA.2024.3474521
- Xiao, Z., Wang, Z., Liu, D., Wang, H., 2022. A path planning algorithm for PCB surface quality automatic inspection. *Journal of Intelligent Manufacturing* 33, 1829–1841.
DOI: 10.1007/s10845-021-01766-3
- Zhang, F., Li, L., Xu, P., Zhang, P., 2024a. Enhanced Path Planning and Obstacle Avoidance Based on High-Precision Mapping and Positioning. *Sensors* 24.
DOI: 10.3390/s24103100
- Zhang, L., An, N., Ma, Z., 2024b. Research of hybrid path planning with improved A* and TEB in static and dynamic environments. *Journal of Supercomputing* 80, 18009–18047.
DOI: 10.1007/s11227-024-06155-0
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., Newman, S. T., 2017. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering* 3, 616–630.
DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.015e