



Posicionamiento robótico colaborativo en la Fabricación Inteligente

I. Sánchez-Calleja¹, R. Ferrero-Guillén¹, A. Martínez-Gutiérrez¹, J. Díez-González¹, H. Pérez¹

¹Dpto. de Ingeniería Mecánica, Informática y Aeroespacial. Universidad de León. isanc@unileon.es

La Fabricación Inteligente supone un avance significativo en el paradigma industrial actual, dotándolo de mayor flexibilidad, calidad, personalización y eficiencia a la cadena de valor y de una alta interoperabilidad entre todos los agentes del proceso. En este contexto, la unión de la robótica colaborativa y los Robots Móviles Autónomos dentro de un marco de integración común es fundamental para diseñar entornos colaborativos, siendo un factor determinante la ubicación relativa entre los dispositivos. Dada la dificultad de alcanzar un marco de posicionamiento efectivo entre los equipos, no se puede garantizar la continuidad ni la calidad de los procesos productivos, pues estos equipos no contemplan ni la situación de otros activos ni la de los productos, induciendo a limitaciones e ineficiencias operativas. A su vez, los errores de navegación de cada dispositivo son de diferente magnitud, los cuales deben ser formalizados, cuantificados y compensados bajo una perspectiva de interacción entre equipos. Sin embargo, a pesar de disponer de metodologías de alta exactitud en la literatura, en la práctica las condiciones de medida pueden afectar a su implementación, generando errores inadmisibles frente a procesos de altas exigencias dimensionales. Así pues, en este artículo se propone la implementación de un nuevo marco de integración que aborda los errores de posicionamiento para la realización de operaciones autónomas de altas exigencias dimensionales. Para ello, se ha realizado un estudio de los distintos errores de posicionamiento y se ha diseñado una nueva metodología para su compensación basada en la definición de puntos ficticios. Las métricas obtenidas demostraron unas altas prestaciones frente a una experimentación práctica de montaje de piezas, suponiendo una novedad en el campo de la robótica colaborativa de precisión.

1. Introducción

La robótica colaborativa y los Robots Móviles Autónomos (RMAs) son pilares fundamentales para la creación de entornos colaborativos dentro del paradigma industrial actual, pues permiten realizar operaciones junto al ser humano de forma segura sin restricciones [1-3]. Por un lado, los robots colaborativos son una tipología de brazo robótico destinado a trabajar con operarios conjuntamente al tener la capacidad de detectar colisiones mediante sensores de fuerza con el fin no comprometer la seguridad del operario [4]. Por otro lado, los RMAs son un tipo de robots no holónicos destinados a labores de intralogística autónoma gracias a sensores y algoritmos de navegación para desplazarse de forma segura y eficiente [5]. A través de estos dos tipos de robots no solo se consigue compensar las carencias y limitaciones de otros agentes involucrados, sino que además permite una mayor generación de valor añadido, altos niveles de automatización y una mayor flexibilidad y calidad en los procesos industriales [6]. Sin embargo, la arquitectura y funcionamiento de estos robots son independientes y únicos entre sí, dificultando la interacción de estos robots con los demás activos que conforman la planta industrial. Además, estos robots operan de forma local sin contemplar la situación del resto de activos ni la ubicación de los productos que deben manipular, pudiendo restringir la continuidad de los procesos productivos.

En este sentido, la sincronización operativa y la ubicación relativa entre los equipos son factores críticos para garantizar la continuidad de los procesos de fabricación, especialmente cuando se requiere el traslado de productos entre los activos y espacios de trabajo en la planta industrial [7-8]. A su vez, en el caso de operar dos o más activos simultáneamente sobre un producto, cada activo presentará un error de posicionamiento o error de navegación individual (i.e., el error de ubicación medido desde su centro geométrico). Sin embargo, el resto de activos en lugar de corregir dicho error, deberán conocer en cambio el error de posicionamiento relativo o de interacción (i.e., el error de ubicación relativa al activo con el que va a colaborar) para poder trabajar coordinadamente. En el caso de

un posicionamiento insuficiente, se generarán errores dimensionales y de calidad en el producto, propagándose a lo largo de la cadena de valor y comprometiendo los objetivos preestablecidos [9].

Esta falta de sincronización, de exactitud y de entendimiento entre equipos limitan la calidad y flexibilidad de los procesos tanto a nivel local como global, siendo especialmente crítico en aquellas operaciones que exigen altas exigencias dimensionales en los productos. De esta forma, la integración efectiva de estos robots dentro de la cadena de valor resulta un reto en el paradigma industrial actual [10] y ha sido objeto de investigación por diversos autores a través de distintas metodologías de posicionamiento robótico en interiores.

Respecto al posicionamiento de RMAs, son comunes los IDentificadores de RadioFrecuencia (IDRF) por su versatilidad y rango de cobertura [11]. De forma similar, los sistemas de Ultra Banda Ancha (UBA) ofrecen unas altas prestaciones para distintas distribuciones en planta y entornos dinámicos, alcanzando precisiones del orden de centímetros [12-13]. También, los sensores LiDAR desempeñan unas capacidades competitivas, pues los RMAs suelen estar equipados con estos dispositivos junto a técnicas de Mapeado y Localización Simultánea (MLS) para su posicionamiento local de forma autónoma [14]. En cualquier caso, estas metodologías no son lo suficientemente precisas hacia objetos de pequeñas dimensiones y altas exigencias dimensionales puesto que la exactitud alcanzada por estos tres sistemas es superior al milímetro. A su vez, presentan limitaciones cuando existen obstáculos entre el sensor y el objetivo (e.g., sólidos y partículas suspendidas), y cuando la superficie del objetivo es transparente.

Por otro lado, en la robótica colaborativa es frecuente el uso de sistemas basados en visión artificial, los cuales permiten la interpretación del espacio cercano de forma rápida y precisa [15]. Sin embargo, estos sistemas resultan costosos, exigen elevados recursos para el entrenamiento de los algoritmos y dependen fuertemente de las condiciones de exposición del entorno.

Actualmente, los sensores táctiles están siendo de interés dentro de la robótica colaborativa al ofrecer precisiones micrométricas para piezas de diversas geometrías [16]. Su funcionamiento se basa en palpar la superficie del elemento a medir aprovechando propiedades físicas como la presión o el magnetismo, incluso pudiendo llegar a complementarse con visión artificial.

En este contexto, los robots colaborativos tienen equipados sensores de contacto en sus motores para detectar colisiones, siendo los responsables de permitir el trabajo junto al ser humano con seguridad. A raíz de ello, surge el Método de Sistemas de Contacto (MSC), el cual se basa en un modelo matemático analítico capaz de determinar la orientación y posición de un cuerpo en el espacio a través de contactos sobre éste [17]. En contraste a los demás sensores táctiles, su coste económico y computacional son reducidos y permite aprovechar toda la exactitud del robot colaborativo. Las condiciones del entorno (e.g., desgaste, suciedad, planitud de la superficie de contacto) pueden reducir las capacidades del MSC, generando errores sistemáticos en los que, en algunas operaciones de altas exigencias dimensionales, pueden resultar restrictivos. Sin embargo, el MSC tiene potencial de mejora si se abordan estas ineficiencias al tratarse de errores sistemáticos, pudiendo alcanzar exactitudes competitivas en entornos cambiantes.

Ante la diversidad de metodologías de interpretación de errores de interacción en la literatura, la introducción de estos robots en la cadena productiva aún presenta ciertas limitaciones e ineficiencias que no permiten la automatización flexible y de calidad. Estas ineficiencias no son debidas solamente a la metodología utilizada, sino que también depende de las condiciones del entorno. Esto exige la necesidad de modelizar, calcular y compensar los errores de interacción producidos por la introducción de diferentes robots en un mismo espacio de trabajo. Así pues, el objetivo de este artículo es la definición de un marco de posicionamiento que abarque la formalización, el análisis y la compensación de los errores de interacción mediante una novedosa metodología basada en la definición de puntos ficticios.

Tras describir la propuesta del marco de posicionamiento, se ha diseñado un caso de estudio basado en una experimentación práctica de montaje de piezas de encaje de altas exigencias donde se comparan los resultados obtenidos con el MSC y los obtenidos con la metodología de compensación tras el MSC. De esta forma, es posible comparar bajo las mismas condiciones el nuevo marco de posicionamiento con una metodología competitiva de alta exactitud para evaluar el desempeño de la propuesta.

2. Consideraciones para el marco de posicionamiento

La precisión de los equipos, las condiciones del entorno y la disponibilidad de espacio para la colocación de elementos complementarios son, entre otros, algunos de los factores a considerar al acotar el marco de posicionamiento. Si bien las capacidades de los equipos pueden ser suficientes independientemente, el conocimiento sobre la situación relativa entre los mismos (i.e., el error de interacción) es crucial para poder operar de forma sincronizada y eficiente. De esta forma, es necesario establecer un sistema de coordenadas absoluto en el dispositivo de mayor precisión que sirva de referencia para poder conocer la ubicación del otro dispositivo para trabajar en conjunto.

En el caso que aplica, se va a emplear un brazo robótico colaborativo UR5 e-Series de seis grados de libertad con un error asociado de posicionamiento que está contenido en $\pm 0,1$ mm según el fabricante destinado a tareas de manipulación de productos de pequeñas dimensiones. También, se va a utilizar un RMA MiR 100 con una estructura portante para habilitar labores de intralogística autónoma y cuenta con una incertidumbre en su ubicación de ± 50 mm. Además, la estructura portante del RMA permite la colocación de elementos complementarios en su periferia para no ocupar su espacio de trabajo en la parte superior. Así pues, dado que el robot colaborativo cuenta con una mayor exactitud, se ha establecido el sistema de coordenadas absoluto en su sistema base. Cabe destacar que pueden darse dos configuraciones: el robot colaborativo se encuentra en puesto fijo y el RMA acude hacia él, o el robot colaborativo se encuentra montado sobre el RMA y operan en conjunto sobre un espacio de trabajo inmóvil e independiente. En cualquier caso, la problemática es la misma al tener que conocer el robot colaborativo el error de interacción del espacio de trabajo en base al error de navegación cometido por el RMA. La Figura 1 muestra la situación de los dispositivos en el espacio de experimentación adoptando la configuración independiente.

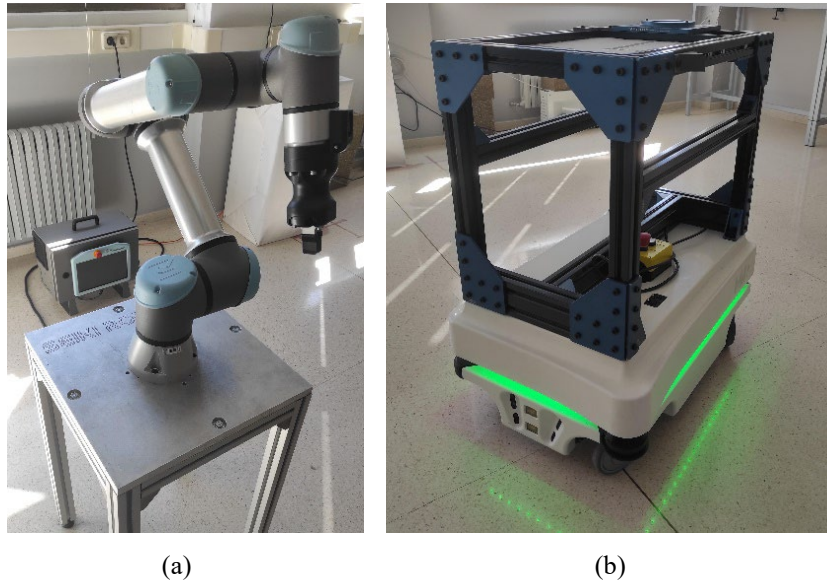


Figura 1: Dispositivos empleados en este trabajo, siendo (a) el brazo robótico colaborativo y (b) el RMA.

Al adoptar esta configuración de trabajo y poder el RMA trasladar productos con su estructura portante, la parte superior de dicha estructura será el espacio de trabajo, por lo que el RMA deberá acercarse a los alrededores del robot colaborativo para que interprete los errores de interacción existentes y para posteriormente trasladar y manipular productos. De esta forma, el espacio de trabajo principal de análisis será el del RMA, el cual es plano, tiene unas dimensiones de 500 x 360 mm y es el que contendrá los errores de interacción que deberá interpretar el robot colaborativo.

Así pues, para abordar eficientemente el posicionamiento relativo entre robots, se deberá conocer para cada acercamiento del RMA al robot colaborativo los errores de interacción existentes derivados del error de navegación del RMA. De esta forma, se podrá conocer y modelizar la situación para detectar las posibles causas de los errores; y compensar dichos errores para minimizar sus consecuencias.

3. Formalización y modelización de los errores de interacción

Atendiendo al teorema de Euler del sólido rígido [18], el desplazamiento de cualquier cuerpo en el espacio se puede descomponer en una traslación y una rotación. De forma análoga con el caso de estudio, el error de interacción de un cuerpo en el espacio (i.e., el RMA) respecto a un sistema de referencia fijo (i.e., el robot colaborativo) es el desplazamiento del cuerpo respecto a la ubicación objetivo, la cual se puede descomponer en una rotación y una traslación. Dado que las dimensiones de los RMAs permanecen constantes y operan sobre suelos planos, los errores de interacción se reducen a tres grados de libertad (i.e., dos grados de libertad traslacionales paralelas al plano del suelo; y un grado de libertad rotacional perpendicular a dicho plano). Así pues, los errores de interacción a contemplar son los siguientes:

- Error angular: Es la diferencia entre la orientación del origen del sistema de referencia alcanzado y el del objetivo. Su obtención reside en determinar el ángulo de cada eje de coordenadas del sistema de referencia con el eje de coordenadas asociado del sólido de análisis.

$$\alpha_{z,error} = \arccos\left(\frac{\langle \vec{O}_{alcanzado}, \vec{O}_{objetivo} \rangle}{\|\vec{O}_{alcanzado}\| \cdot \|\vec{O}_{objetivo}\|}\right) \quad (1)$$

- Error de rotación: Es el error producido ante un desplazamiento con error angular siendo el origen del sistema de referencia alcanzado y el del objetivo coincidentes. El vector se calcula mediante la matriz de rotación aplicada según el plano de trabajo, tal y como se muestra en la Ecuación 2. Dado que el error angular se mantiene constante en todo el espacio para cada caso de estudio, las matrices de rotación estarán compuestas por coeficientes constantes, por lo que el error de rotación es lineal y proporcional a la distancia respecto al origen de referencia.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{rotaciónx} \\ \epsilon_{rotacióny} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \cos(\alpha_{z,error}) & -\text{sen}(\alpha_{z,error}) \\ \text{sen}(\alpha_{z,error}) & 1 - \cos(\alpha_{z,error}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \end{pmatrix}_{alcanzado} \quad (2)$$

- Error de traslación: Es la diferencia de posición del origen del sistema de referencia alcanzado respecto del origen del sistema de referencia objetivo bajo condiciones de error angular nulos. En este caso, el error no depende del desplazamiento del sólido, por lo que éste se mantiene constante en todo el espacio. La Ecuación 3 enuncia la caracterización de este error.

$$\overrightarrow{\epsilon_{traslación}} = \overrightarrow{O_{alcanzado}} - \overrightarrow{O_{objetivo}} \quad (3)$$

- Error de ubicación: Es la suma vectorial del error de rotación y de traslación, según se muestra en la Ecuación 4. Éste es el error que se observa finalmente desde el sistema de referencia real, por lo que es el error principal que se debe minimizar.

$$\overrightarrow{\epsilon_{ubicación}} = \overrightarrow{\epsilon_{rotación}} + \overrightarrow{\epsilon_{traslación}} \quad (4)$$

La Figura 2 ilustra gráficamente los diferentes errores de interacción en su forma vectorial para un caso genérico bidimensional.

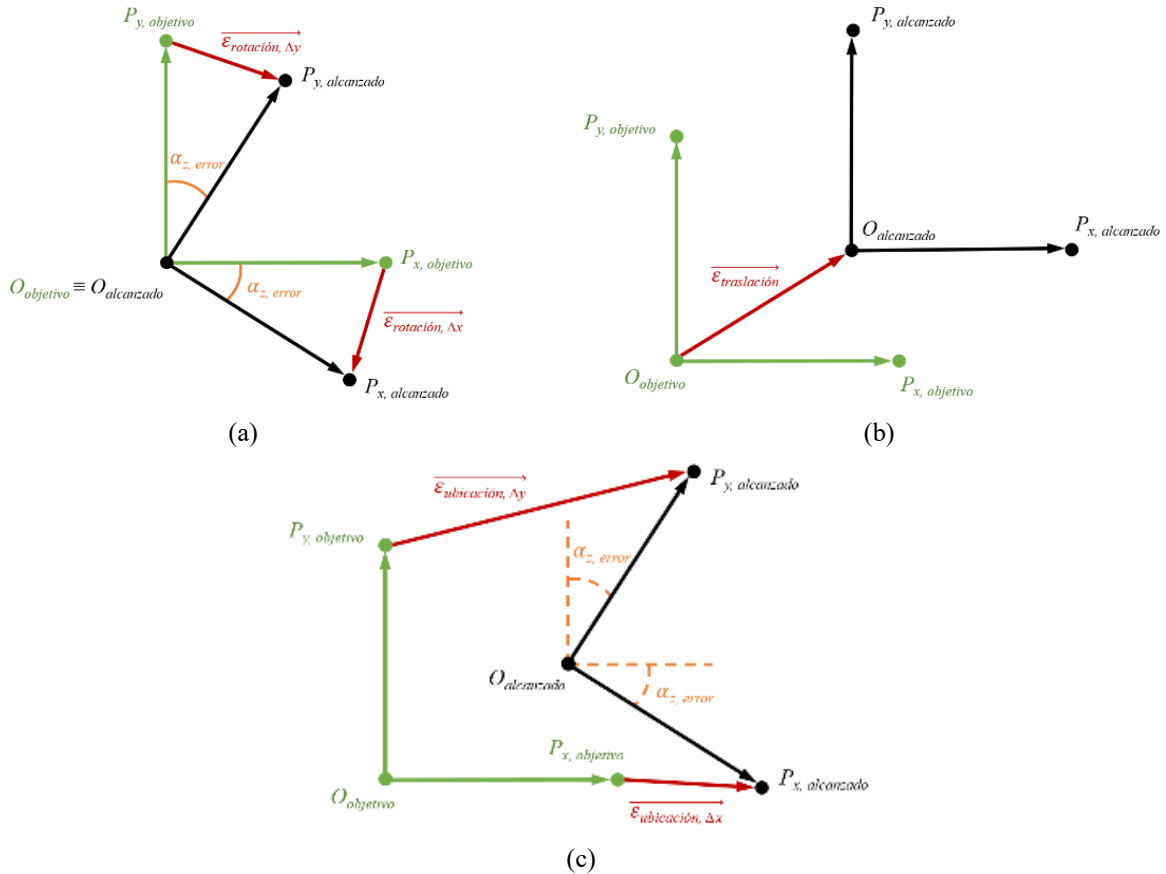


Figura 2: Representación bidimensional de los errores (a) de rotación, (b) de traslación y (c) de ubicación.

Como se comentó previamente, el espacio de trabajo de análisis va a ser el de la estructura portante del RMA, pues es el espacio sobre el que va a interactuar el robot colaborativo. En este sentido, a través de las ecuaciones previas se puede modelizar los mapas de campo vectorial y de contorno de los diferentes errores de interacción de este espacio de trabajo para cada iteración. Para generar los mapas de contorno del espacio de trabajo, se tomará el módulo del vector error para cada punto del espacio de trabajo. Las Figuras 3, 4 y 5 muestran los mapas de campo vectorial y de contorno bidimensionales para cada error de interacción basado en el espacio de trabajo del RMA dado un caso de estudio con un error angular de $-2,25^\circ$ y un error de traslación de $(13, -7)$ mm.

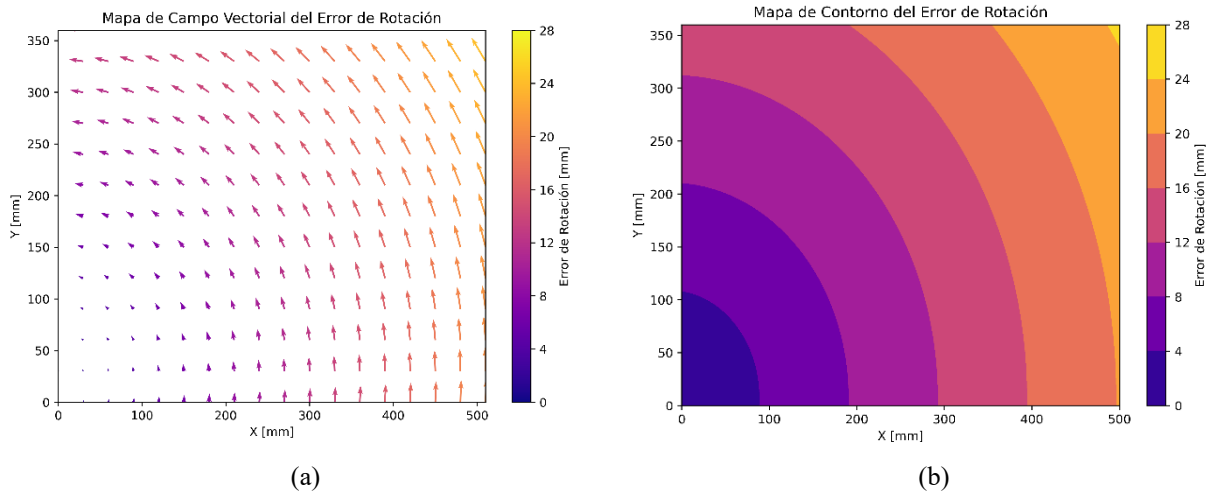


Figura 3: Errores de rotación bidimensionales del espacio de trabajo del RMA representados como (a) mapa de campo vectorial y (b) mapa de contorno.

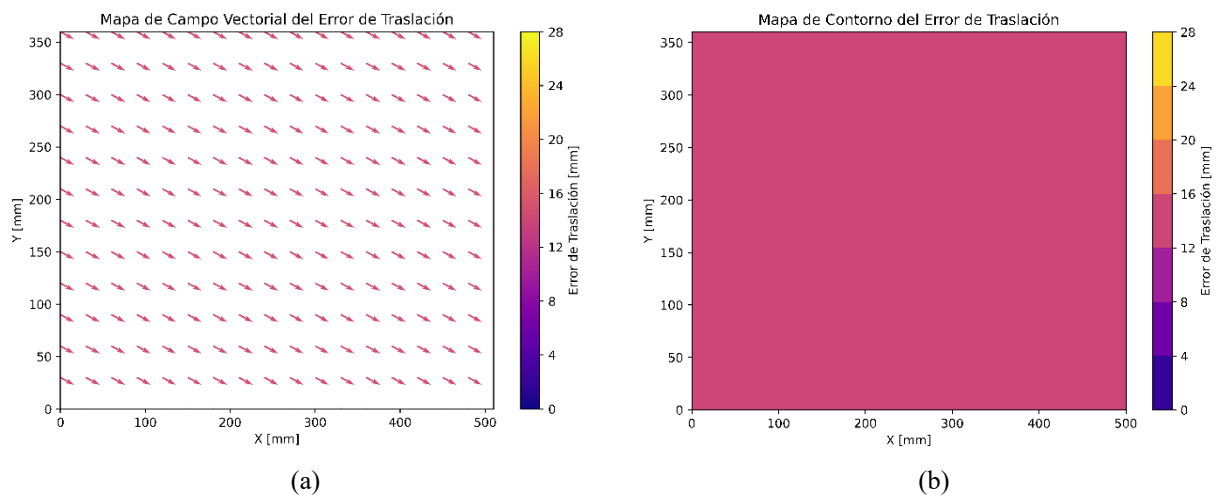


Figura 4: Errores de traslación bidimensionales del espacio de trabajo del RMA representados como (a) mapa de campo vectorial y (b) mapa de contorno.

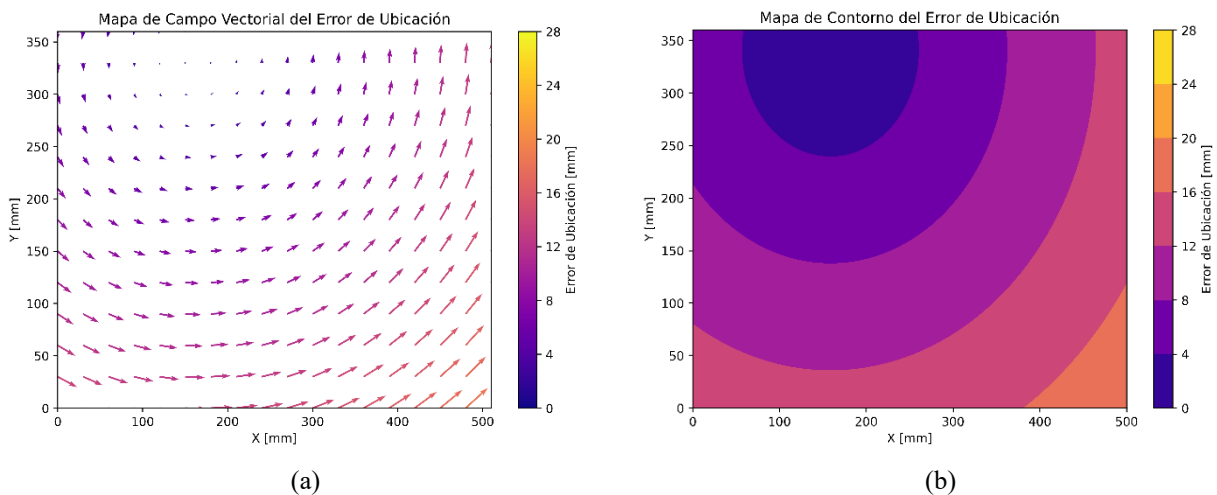


Figura 5: Errores de ubicación bidimensionales del espacio de trabajo del RMA representados como (a) mapa de campo vectorial y (b) mapa de contorno.

Tras formalizar y modelizar los distintos errores de interacción que puedan presentarse en el espacio bidimensional, en el siguiente apartado se desarrollan la metodología de obtención y la de compensación de dichos errores basada en la definición de puntos ficticios para su posterior implementación ante una experimentación práctica industrial.

4. Obtención y compensación de errores mediante puntos ficticios

En ciertos casos, no es viable corregir los errores de interacción del origen calculado si éste es representativo, pues puede ocasionar un gran desgaste en los componentes de sendos robots o incluso obligar a adaptar el efector final hacia un punto interior de un sólido. Por ello, la metodología propuesta pretende afrontar dichas limitaciones bajo condiciones de errores de rotación y de traslación no nulos dirigiendo al robot colaborativo hacia un punto tal que el error de ubicación lo coloque realmente en el punto objetivo.

Previamente, es necesario determinar el error angular y el error de traslación del caso para introducirlos en las ecuaciones definidas previamente. En este sentido, se ha empleado el esquema de movimientos mostrado en la Figura 3 tras haber preestablecido las distancias objetivo entre los puntos a registrar. Mediante dichas distancias, se calculan las desviaciones entre las coordenadas de los puntos registrados y, a través de las Ecuaciones 5 y 6, se obtienen los parámetros de error necesarios para implementar la metodología de compensación de errores por puntos ficticios [17].

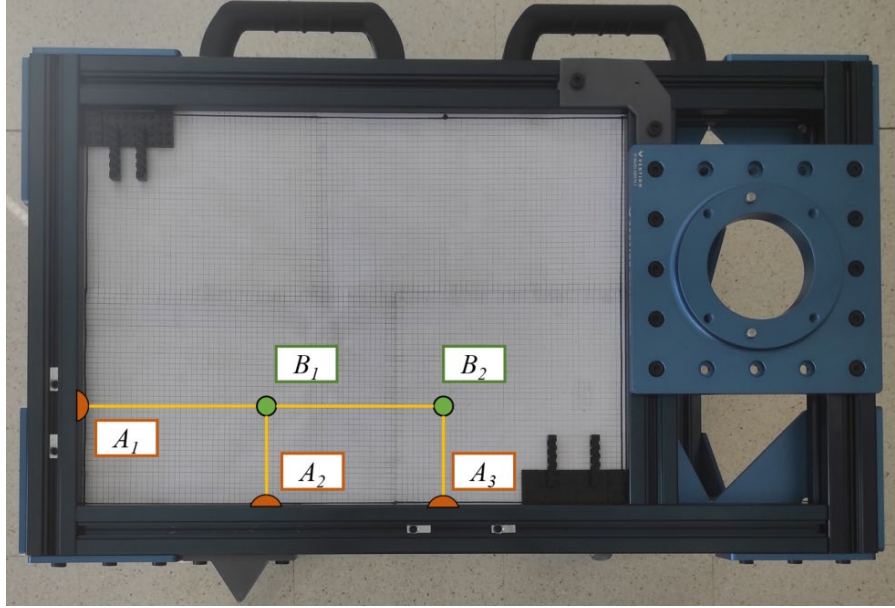


Figura 6: Esquema de movimientos sobre el RMA para la obtención del error angular y de traslación del caso.

$$\alpha_{RMA} = \arctg\left(\frac{\|A_2B_1\| - \|A_3B_2\|}{\|B_2B_1\|}\right) \quad (5)$$

$$\vec{\varepsilon}_{traslación} = \left(\|A_1B_1\| \cdot \cos(\alpha_{RMA}) - d_{x_{objetivo}}, \|A_2B_1\| \cdot \cos(\alpha_{RMA}) - d_{y_{objetivo}} \right) \quad (6)$$

Tras obtener los parámetros de error, se aplica la compensación de errores por puntos ficticios al punto B_1 al estar referenciadas las desviaciones respecto a este punto. Tomando que el punto alcanzado es la suma de la posición real más el error en dicho punto, se asigna el punto ficticio como el punto que debe alcanzar el robot colaborativo para posicionarlo en el punto objetivo. La Ecuación 7 ilustra la formalización matemática de este concepto.

$$\begin{aligned} \vec{P}_{ficticio} &= \vec{P}_{real} + \vec{\varepsilon}_{ubicación}(\alpha_{RMA}, \vec{\varepsilon}_{traslación}, P_{ficticio}); \\ \begin{pmatrix} P_{x_{ficticio}} \\ P_{y_{ficticio}} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{RMA}) & -\sin(\alpha_{RMA}) \\ \sin(\alpha_{RMA}) & \cos(\alpha_{RMA}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{x_{objetivo}} + \varepsilon_{x_{traslación}} \\ P_{y_{objetivo}} + \varepsilon_{y_{traslación}} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Por otro lado, cabe destacar que el primer punto ficticio pretende minimizar todos los errores de posicionamiento y, dado que el error de traslación es constante para todo el espacio de trabajo, todos los puntos referenciados a este primer punto ficticio no requerirán de compensación de error de traslación al haber sido compensado previamente.

Finalmente, con el objetivo de evaluar el desempeño de esta nueva metodología, se ha diseñado una experimentación basada en un caso práctico de ensamblaje mecánico aplicando el MSC y aplicando la compensación por puntos ficticios tras realizar el MSC. En el caso donde no se aplica la compensación, estos errores de interacción se mantendrían y, dependiendo de la zona del espacio de trabajo para el ensamblaje, la suma vectorial de los errores de rotación con los de traslación hará que éste aumente o disminuya. Así pues, la experimentación deberá contemplar diferentes ubicaciones para manejar diferentes errores y poder verificar realmente si la compensación de errores por puntos ficticios mejora el rendimiento del posicionamiento en comparación con el MSC.

5. Resultados

La experimentación práctica que se propone consiste en la colocación de piezas prismáticas por parte del robot colaborativo en dos bases de encaje dispuestas en el espacio de trabajo del RMA. Cabe destacar que las piezas a encajar colocadas previamente en el puesto de trabajo del robot colaborativo prescinden de lubricación y son de altas exigencias dimensionales, haciendo que los encajes exijan de mayores niveles de exactitud. Por otro lado, las bases de encaje fijadas en el espacio de trabajo del RMA se encuentran en posiciones opuestas para operar bajo distintas condiciones de error tanto en dirección como en magnitud para estudiar el desempeño de las metodologías bajo diferentes condiciones. Para cada iteración, el RMA se acercará a los alrededores del puesto de trabajo del robot colaborativo y seguidamente el robot colaborativo realizará un posicionamiento previo empleando el MSC para asegurar que los contactos de la metodología de compensación de errores no se realicen contra las bases de encaje. Finalmente, en un caso se procederá a la colocación directa de las piezas prismáticas sobre las bases de encaje y en el otro se procederá a realizar la compensación de errores por puntos ficticios antes de colocar las piezas. En sendos casos se anotarán los aciertos y fallos cometidos por cada pieza prismática, tomando como forma de validación del acierto el correcto encaje en las muescas asignadas haciendo que la pieza prismática se encuentre perfectamente en voladizo sobre la base de encaje correspondiente. La Figura 7 ilustra un ejemplo de fallo y acierto de las piezas sobre las bases de y la Figura 8 encaje las condiciones iniciales de experimentación en el laboratorio.

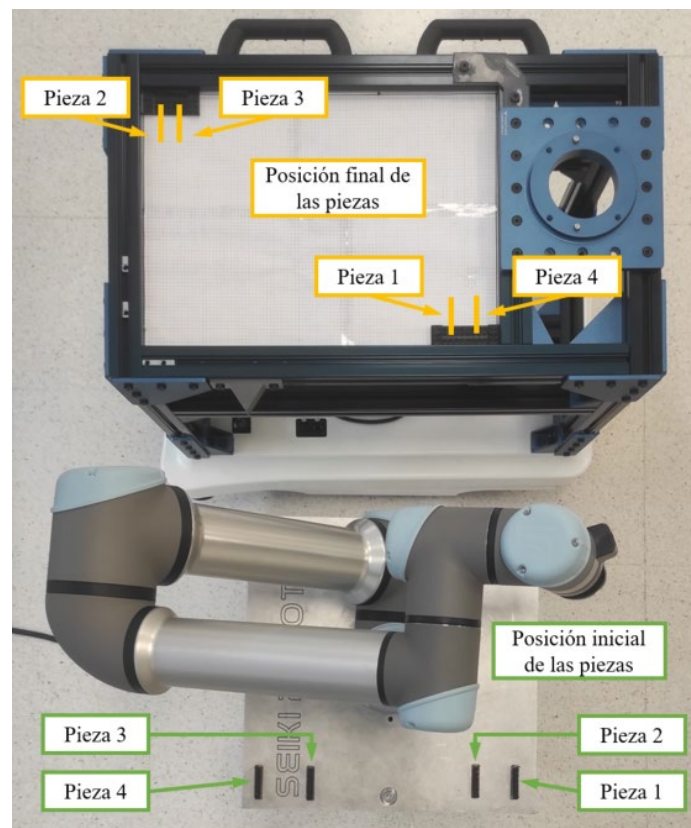


Figura 7: Condiciones iniciales para cada iteración del caso práctico de ensamblaje mecánico, donde se encajarán en la base superior izquierda las piezas 2 y 3; y en la base inferior derecha las piezas 1 y 4.

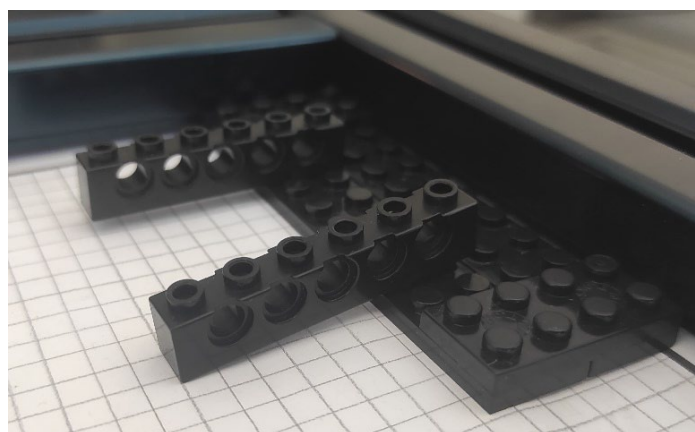


Figura 8: Ejemplo de acierto y fallo de encaje de piezas de altas exigencias dimensionales.

Se han realizado 40 iteraciones aplicando solamente el MSC y aplicando la compensación por puntos ficticios con la finalidad de comparar sus capacidades directamente frente a este caso de aplicación industrial. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para cada pieza de encaje tras las experimentaciones.

Tabla 1: Resultados obtenidos de la experimentación práctica de ensamblaje mecánico.

	Aplicando solo el MSC				Aplicando el MSC y puntos ficticios			
	Pieza 1	Pieza 2	Pieza 3	Pieza 4	Pieza 1	Pieza 2	Pieza 3	Pieza 4
Aciertos	25	18	17	23	33	30	38	31
Porcentaje de éxito	62,50%	45,00%	42,50%	57,50%	82,50%	75,00%	95,00%	77,50%

Puede observarse en la experimentación con el MSC que las piezas de encaje 2 y 3 han cometido más fallos que sus opuestas a pesar de encontrarse más cerca del origen. Esto puede deberse a que la suma del error de rotación y el error de traslación incrementan el error de ubicación para la zona superior, mientras que para la zona inferior estos errores generan menor repercusión. En comparativa con los mapas que modelizan el error, estos resultados pueden parecer contradictorios, sin embargo, cada caso de estudio tiene parámetros de error diferentes que pueden hacer que la zona de menor error se encuentre en otra zona del espacio de trabajo (e.g., errores angulares de diferente signo cambian el sentido de los errores de rotación, y magnitudes y direcciones de vectores de error de traslación diferentes).

Para el caso donde se aplica la compensación de errores por puntos ficticios, los fallos cometidos en ambas bases son más parejos entre sí. Además, se ha conseguido un porcentaje de éxito igual o superior al 75% para todas las piezas, mientras que en el caso donde no se aplica ha alcanzado un máximo del 62,50%, lo que indica que la metodología de compensación supone una mejora notable para este tipo de aplicaciones.

De esta forma, se corroboran las capacidades de esta nueva metodología de compensación de errores de posicionamiento frente a este tipo de casos de aplicación, consiguiendo tasas de éxito competitivas a lo largo del espacio de trabajo y un mayor nivel de integración y automatización por parte de los robots que conforman este tipo de procesos.

6. Conclusiones

La compensación de errores de posicionamiento propuesta ha permitido cuantificar, analizar y compensar los diferentes tipos de error de interacción dentro del espacio de trabajo de forma analítica y sin la necesidad de colocar elementos complementarios. Dada la naturaleza de estos robots, ha sido preciso abordar la sincronización operativa y la ubicación relativa entre equipos ya que éstos, al operar bajo una arquitectura independiente y única, no contemplan el resto de activos tanto a nivel local como global, dificultando la flexibilidad y calidad en procesos y productos dentro de la Fabricación Inteligente. En este sentido, la insuficiente exactitud de los sistemas de posicionamiento, las condiciones y variables del entorno y los errores de navegación de cada dispositivo hacen que se produzcan errores de interacción que reducen el rendimiento del posicionamiento y del proceso, siendo especialmente crítico en aquellos procesos que exigen altas exigencias dimensionales. De esta forma, el marco de posicionamiento propuesto basado en la definición de puntos ficticios permite abordar dichos errores para reducirlos y no propagarlos aguas abajo del proceso.

Dadas las características de los errores de interacción, la metodología propuesta ha permitido generar mapas de campo vectorial y de contorno para cada error de interacción, así como poder cuantificarlos y compensarlos para cada punto sin la necesidad de acudir físicamente con el efector final del robot colaborativo de manera sucesiva.

Tras implementar la metodología de compensación de errores en una experimentación práctica basada en montajes mecánicos en seco, se demostró su competitividad frente al MSC de forma directa, llegando a tasas de éxito superiores al 75% para las cuatro piezas distribuidas en ubicaciones opuestas dentro del espacio de trabajo. De esta forma, se ha verificado una mejora notable frente a operaciones de altas exigencias dimensionales, permitiendo un nuevo enfoque de altas prestaciones para el campo del posicionamiento robótico de precisión.

7. Agradecimientos

Este artículo ha podido ser desarrollado gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España a través del proyecto de investigación con número de referencia PID2023-153047OB100, a la financiación de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y el autor Iván Sánchez Calleja agradece la financiación del programa de ayudas para la realización de estudios de doctorado en el marco del programa propio de investigación de la Universidad de León 2024.

8. Referencias

- [1] A. Bonci, P. D. C. Cheng, M. Indri, G. Nabissi, and F. Sibona, "Human-Robot Perception in Industrial Environments: A Survey", *Sensors*, Vol. **21**, p. 1571, 2021.

- [2] T. Ruppert, A. Lockin, D. Romero, and J. Abonyi, “Intelligent Collaborative Manufacturing Space for Augmenting Human Workers in Semi-Automated Manufacturing Systems”, *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2022.
- [3] M. A. Rosen *et al.*, “Interaction between a Human and an AGV System in a Shared Workspace—A Literature Review Identifying Research Areas”, *Sustainability*, Vol. **16**, p. 974, 2024.
- [4] Z. Huang, Y. Shen, J. Li, M. Fey, and C. Brecher, “A Survey on AI-Driven Digital Twins in Industry 4.0: Smart Manufacturing and Advanced Robotics”, *Sensors*, Vol. **21**, p. 6340, 2021.
- [5] A. Martínez-Gutiérrez, J. Díez-González, R. Ferrero-Guillén, P. Verde, R. Álvarez, and H. Perez, “Digital Twin for Automatic Transportation in Industry 4.0”, *Sensors*, Vol. **21**, p. 3344, 2021.
- [6] F. Sherwani, M. M. Asad, and B. S. K. K. Ibrahim, “Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0)”, *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*, 2020.
- [7] Y. Jiang, L. Yu, H. Jia, H. Zhao, and H. Xia, “Absolute Positioning Accuracy Improvement in an Industrial Robot”, *Sensors*, Vol. **20**, p. 4354, 2020.
- [8] B. Li, W. Tian, C. Zhang, F. Hua, G. Cui, and Y. Li, “Positioning error compensation of an industrial robot using neural networks and experimental study”, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. **35**, pp. 346–360, 2022.
- [9] J. Zhang, F. Ding, J. Liu, L. Cao, and K. Li, “Uncertainty Inverse Analysis of Positioning Accuracy for Error Sources Identification of Industrial Robots”, *IEEE Trans Reliab*, Vol. **72**, pp. 1123–1133, 2023.
- [10] A. Martinez-Gutierrez, J. Diez-Gonzalez, P. Verde, R. Ferrero-Guillen, and H. Perez, “Hyperconnectivity Proposal for Smart Manufacturing”, *IEEE Access*, Vol. **11**, pp. 70947–70959, 2023.
- [11] J. Xu *et al.*, “The Principle, Methods and Recent Progress in RFID Positioning Techniques: A Review”, *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, Vol. **7**, pp. 50–63, 2023.
- [12] J. Díez-González, R. Ferrero-Guillén, P. Verde, A. Martínez-Gutiérrez, R. Álvarez, and J. Torres-Sospedra, “Time-based UWB localization architectures analysis for UAVs positioning in industry,” *Ad Hoc Networks*, Vol. **157**, p. 103419, 2024.
- [13] R. Álvarez, R. Ferrero-Guillén, P. Verde, A. Martínez-Gutiérrez, J. Díez-González, and H. Perez, “Time of Arrival Error Characterization for Precise Indoor Localization of Autonomous Ground Vehicles”, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. **14001**, pp. 421–432, 2023.
- [14] P. T. T. Nguyen, S. W. Yan, J. F. Liao, and C. H. Kuo, “Autonomous Mobile Robot Navigation in Sparse LiDAR Feature Environments”. *Applied Sciences*, Vol. **11**, p. 5963, 2021.
- [15] F. Jia, Y. Ma, and R. Ahmad, “Review of current vision-based robotic machine-tending applications”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. **131**, pp. 1039–1057, 2024.
- [16] M. Meribout *et al.*, “Tactile sensors: A review”, *Measurement*, Vol. **238**, p. 115332, 2024.
- [17] I. Sánchez-Calleja, A. Martínez-Gutiérrez, R. Ferrero-Guillén, J. Díez-González, and H. Perez, “Contact System Method for the Precise Interaction Between Cobots and Mobile Robots in Smart Manufacturing”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. **25**, pp. 303–318, 2024.
- [18] John J. Uicker, G. R. P. Jr, and Joseph E. Shigley, “Theory of Machines and Mechanisms”. Cambridge University Press, 2023.