

Jornadas de Automática

Control de precisión en manipuladores móviles industriales: desafíos y soluciones

Núñez-Calvo, N.^{a,b,*}, Sorrosal, G.^a, Cabanes, I.^b, Mancisidor, A.^b

^aIkerlan Technology Research Centre, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), 20500 Arrasate, Spain.

^bBilbao School of Engineering, University of the Basque Country (UPV/EHU), 48013 Bilbao, Spain.

To cite this article: Núñez-Calvo, N., Sorrosal, G., Cabanes, I., Mancisidor, A. 2024. Precision control in industrial mobile manipulators: challenges and solutions.

Jornadas de Automática, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10906>

Resumen

Los avances en la industria, en la tecnología y en otros factores, han generado nuevas exigencias a la hora de fabricar. Últimamente, el uso de los manipuladores móviles, conformado por un brazo robótico montado sobre un robot móvil, ha aumentado para afrontar las nuevas necesidades de rapidez, precisión y flexibilidad. Sin embargo, aún no alcanzan las precisiones requeridas en aplicaciones industriales de gran exigencia, como en la soldadura o el ensamblaje. En este artículo se identifican y presentan las fuentes de error principales tanto en los manipuladores móviles como en los elementos que lo conforman. Asimismo, se muestran las diferentes soluciones aportadas en la literatura, definiendo sus limitaciones y planteando los retos que quedan aún por abordar. Por último, se plantea una propuesta de control acoplado para conseguir el aumento de precisión de los manipuladores móviles aunando los rasgos positivos de los sistemas que lo componen: la precisión de un brazo robótico y la movilidad que proporciona una plataforma móvil.

Palabras clave: Robots Móviles, Robots Manipuladores, Sistemas de Control de Movimiento, Seguimiento de Trayectorias, Posicionamiento Dinámico, Tecnología Robótica.

Precision control in industrial mobile manipulators: challenges and solutions

Abstract

Advances in industry, technology, and other factors have generated new demands in manufacturing. Recently, the use of mobile manipulators, consisting of a robotic arm mounted on a mobile robot, has increased to meet new needs for speed, precision, and flexibility. However, they still do not achieve the required precision for highly demanding industrial applications, such as welding or assembly. This article identifies and presents the main sources of error in mobile manipulators and their components. Additionally, it discusses the different solutions provided in the literature, defining their limitations and outlining the challenges that still need to be addressed. Finally, a proposal for coupled control is presented to increase the precision of mobile manipulators by combining the positive features of the systems that comprise them: the precision of a robotic arm and the mobility provided by a mobile platform.

Keywords: Mobile Robots, Robots manipulators, Motion Control Systems, Trajectory Tracking, Dynamic positioning, Robotics technology.

1. Introducción

La industria está en continua evolución, lo que implica nuevos retos y requisitos emergentes a cumplir. Una tendencia que cada vez acoge más fuerza es la denominada

personalización masiva (Inoue et al., 2021), donde el objetivo principal es la fabricación de productos personalizados con un coste de producción semejante al de la producción en masa. Esto implica la inclusión de herramientas flexibles y versátiles capaces de ejecutar las tareas con gran rapidez y eficacia.

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

Los manipuladores móviles tienen el potencial de abordar los nuevos requisitos planteados. Estos sistemas se componen de dos elementos: una plataforma móvil y uno o varios manipuladores robóticos unidos a dicha plataforma. Con este sistema se pretende aunar la precisión que otorga un brazo robótico para ejecutar tareas y la flexibilidad de movimiento entre estaciones que proporciona una plataforma móvil. Uniendo las ventajas que poseen, se espera que puedan emplearse en diversas tareas como las mostradas en la Tabla 1, las cuales se han identificado como las más adecuadas que pueden ejecutar los manipuladores móviles.

La cantidad de tareas realizables por los manipuladores móviles refleja la necesidad de su uso en la industria. Sin embargo, a pesar del esfuerzo investigador de los últimos años, en la literatura solo existen unos pocos ejemplos de aplicación de manipuladores móviles en entornos reales de fabricación (Madsen et al., 2015). Estos sistemas, aunque tienen muchas ventajas, aún presentan retos que deben abordarse para su implementación en la industria, como la planificación del movimiento del manipulador, la localización precisa de la base móvil, y la coordinación entre la base móvil y el manipulador (Yu and Chang, 2023). Es por ello que su uso sigue restringido principalmente debido a su baja precisión. En la industria actual, los requisitos de aplicación son muy exigentes, con unos tiempos de ciclo muy ajustados y un error de posicionamiento mínimo, llegando a demandar una precisión de la herramienta de hasta $\pm 1\text{mm}$ (Hvilshøj et al., 2012), condición que el manipulador móvil todavía tiene dificultades para conseguir (Yaw et al., 2018).

Este artículo se centra en la identificación de las causas de error en la precisión de los manipuladores móviles y cómo afrontarlo teniendo en cuenta la literatura acerca de esta temática. En la Sección 2 se identifican las principales fuentes de error de posicionado de los manipuladores móviles. La Sección 3 expone las soluciones utilizadas comúnmente para estos sistemas y en la Sección 4 se muestran los retos aún pendientes por solucionar que impiden la expansión industrial de los manipuladores móviles. Por último, se presenta una nueva propuesta de control en la Sección 5 y se finaliza con la Sección 6 proporcionando las conclusiones del estudio realizado.

Tabla 1: Potenciales tareas para los manipuladores móviles (Hvilshøj et al., 2012)

Asistencia	Logística	Servicio
<ul style="list-style-type: none"> · Atención de máquinas · (Pre)Ensamblaje · Inspección · Ejecución de procesos 	<ul style="list-style-type: none"> · Transporte · Alimentación una pieza · Alimentación múltiples piezas 	<ul style="list-style-type: none"> · Mantenimiento y revisión de equipo · Reparación · Limpieza

2. Falta de precisión: Problemática

La falta de precisión es una gran limitante para la inclusión de los manipuladores móviles en la industria (Xing et al., 2021). Las principales fuentes de error se pueden agrupar en: los errores propios del manipulador robótico (ver Sección

2.1), los errores de la plataforma móvil (ver Sección 2.2) y los errores causados por la interacción de ambos sistemas (ver Sección 2.3).

2.1. Manipulador robótico

Los manipuladores robóticos industriales son una herramienta cuya aplicación ha ido aumentando a lo largo de los años por las capacidades que poseen y por la gran cantidad de tareas que pueden ejecutar. Aunque estos poseen gran repetibilidad, en un rango entre $\pm 0.03\text{mm}$ y $\pm 0.1\text{mm}$, su error de precisión es mayor, oscilando entre $\pm 1\text{mm}$ y $\pm 3\text{mm}$ (Li et al., 2023). En lo que concierne a los errores de posicionado del manipulador, se pueden clasificar en geométricos y no-geométricos (Wu, 2014).

Los errores geométricos se pueden definir como la desviación entre los parámetros geométricos de diseño o nominales y las medidas reales. La mayoría de estos (véase Tabla 2), provienen de los propios fallos de fabricación y ensamblaje o del desgaste que sufre el robot durante la operación (Boby and Klimchik, 2021). A pesar de que los errores geométricos representan una parte significativa del error total (Wu, 2014), en robots industriales pesados y en manipuladores con baja rigidez la situación es diferente. En estos casos, los errores no-geométricos, especialmente aquellos relacionados con la rigidez, tienden a predominar sobre los geométricos, llegando a constituir hasta un 90 % del error total (Wu, 2014). Estos se generan a causa de las fuerzas o torques asociados con la herramienta o la pieza de trabajo que provocan deformaciones debido a los efectos presentados en la Tabla 2.

Tabla 2: Clasificación de errores de un manipulador robótico

Errores geométricos	Errores no-geométricos
<ul style="list-style-type: none"> · Longitud de los eslabones · Offsets de las articulaciones · Errores de ensamblaje 	<ul style="list-style-type: none"> · Flexibilidad de articulaciones y eslabones · Fricción, juego, desgaste · Factores ambientales · Errores de control

2.2. Plataforma móvil

Comparando con un manipulador robótico, la precisión de la plataforma móvil suele ser menor, llegando a un error de posicionado de $\pm 30\text{ mm}$ (Oba et al., 2021). Aparte de los errores geométricos semejantes a los de los manipuladores, otro de los factores que contribuye a la falta de precisión es el deslizamiento. La exactitud de la base móvil se puede ver distorsionada por las irregularidades del suelo y el contacto desconocido entre las ruedas y el suelo (Xing et al., 2021). Además, las plataformas móviles autónomas hacen uso de sensores para conocer su localización, los cuales también conllevan errores en la propia medición de su posición (Meng et al., 2021). Dicha localización mediante sensores también se ve afectada por el entorno en el que trabajan los manipuladores móviles como la falta de iluminación, el polvo o los entornos dinámicos, donde se presentan obstáculos u objetos móviles (como personas, entre otros) que la plataforma debe evitar (Tzafestas, 2018).

2.3. Manipulador móvil

Como ya se ha mencionado, tanto los manipuladores robóticos como las plataformas móviles tienen sus fuentes de imprecisión. Ambos sistemas conforman un manipulador móvil y la interacción entre ellos dos generan errores adicionales de gran importancia. Cuando el manipulador móvil está estático, la precisión no se ve tan afectada, ya que es equivalente a un sistema de un manipulador robótico con una base fija. En cambio, cuando el manipulador móvil está en movimiento, el error aumenta debido a la dinámica acoplada y a la redundancia por el gran número de grados de libertad que puede tener (Yang et al., 2019).

El hecho de que un manipulador y una plataforma móvil estén acoplados genera entre ellos unas fuerzas dinámicas a las que se ven afectados (Moosavian and Alipour, 2007). Esto conlleva complejidades adicionales en el modelo cinemático y dinámico. Es decir, basándose en el principio de acción y reacción, este sistema se ve afectado por los efectos de derrape y la interacción vehículo-manipulador en la que las fuerzas de contacto con el suelo se propagan de la base al brazo. Por otro lado, el brazo en movimiento provoca desplazamientos en el centro de masa del robot y la propagación de fuerzas de vuelta a la base móvil (Aguilera et al., 2014). Adicionalmente, el movimiento del manipulador hace que el chasis se desplace, lo que compromete aún más la precisión del efector final (Feng et al., 2023). Finalmente, uno de los mayores problemas causado por el movimiento de la base es la inestabilidad debido a las fuerzas e inercias generadas por el manipulador. Este fenómeno puede producirse cuando la plataforma intenta subir por un terreno inclinado, cuando el manipulador realiza maniobras rápidas o cuando manipula objetos o herramientas de gran peso (Korayem et al., 2010).

3. Incremento de precisión: Soluciones

Los errores mencionados en la sección anterior dificultan el uso de los manipuladores móviles en tareas de alta precisión (Yaw et al., 2018), las cuales pueden llegar a requerir una precisión de hasta $\pm 1\text{mm}$ (Hvilshøj et al., 2012). Por ello, existen múltiples soluciones para intentar abordar dichas problemáticas. Teniendo en cuenta que el error de precisión se centra en la diferencia entre la posición real y la comandada, las soluciones actuales se pueden clasificar en: compensación de trayectoria (ver Sección 3.1) y control activo de la trayectoria (ver Sección 3.2).

3.1. Métodos por compensación de trayectoria

La compensación de trayectoria se basa en la modificación de la trayectoria de referencia apoyándose en un modelo al que se le han rectificado sus parámetros para que se ajuste al sistema real. Utilizando dicho modelo se anticipan los errores y se corrige la trayectoria ajustando las posiciones de referencia (Olabi et al., 2012). Existen dos métodos: la compensación offline y online. La estrategia offline se basa en la calibración de los parámetros del sistema antes de comenzar a realizar sus tareas. Este método tiene muchas limitaciones por la elaboración de modelos explícitos multiparamétricos y la obtención y actualización de los mismos (Ferrari et al., 2024). La creación de un modelo

preciso es de gran complejidad debido a la redundancia cinemática por la alta cantidad de grados de libertad, a la dinámica acoplada entre el manipulador y la plataforma, y a las restricciones no-holonómicas de la plataforma móvil (Zhou et al., 2022). Asimismo, los errores no-geométricos presentados anteriormente tienen una tendencia no-lineal, reduciendo la precisión del modelo y aumentando su complejidad computacional (Ryu and Moon, 2023). Por otra parte, la experimentación a realizar para el ajuste de parámetros es útil para un único robot y debe ser repetido para diferentes condiciones de funcionamiento o estado de degradación del robot (Sigron et al., 2023).

La estrategia online, se basa en compensar la trayectoria utilizando medidas en tiempo real mientras la tarea se está ejecutando (Gonzalez et al., 2022). Este método es útil en tareas de alta precisión porque es capaz de hacer frente a los cambios de pesos y fuerzas que experimenta el sistema, junto a las degradaciones que sufrirá a lo largo de su vida útil. Aunque no es necesario un modelo fiel, este proceso conlleva un aumento en el coste de computación. Además, suele requerir de sistema de medición de alto coste, como láseres o cámaras, que deben estar disponibles durante el funcionamiento. Además, su fiabilidad puede verse afectada en entornos difíciles, donde la suciedad y la iluminación pueden alterar la medición realizada (Sigron et al., 2023).

3.2. Métodos por control activo de trayectoria

Un control en lazo cerrado se encarga de monitorizar el sistema y ajustar activamente la señal en consecuencia, minimizando el error entre la respuesta y la referencia. Una de las mayores ventajas de este método es su gran robustez, que permite hacer frente a las incertidumbres del modelo y a las perturbaciones externas que afectan a la precisión (Peng et al., 2019), así como evitar los movimientos bruscos generados por los cambios de referencia. Actualmente se identifican dos tipos de arquitecturas de control para el seguimiento de trayectoria de los manipuladores móviles: el desacoplado o descentralizado y el control acoplado o centralizado.

El primero trata el brazo y la plataforma del manipulador móvil como dos sistemas independientes. Cada uno tiene su propio control que trabaja de manera individual pero interconectados (Brahmi et al., 2022). En este caso, para hacer frente a las dinámicas acopladas (ver Sección 2.3) e incertidumbres del modelo, es necesario un componente de sincronización y compensación. Aunque el control desacoplado es el más utilizado por su simplicidad y su bajo coste computacional, el sistema puede inestabilizarse con velocidades altas (Peng et al., 2019).

El segundo de ellos, el acoplado o centralizado, trata el sistema como una unidad y se controla con un único sistema de control. Así se evita tener que compensar la interacción entre ellos y permite la ejecución de movimientos coordinados con un control directo (Misawa et al., 2022). Hoy en día, los autores destacan la importancia de implementar dicho control acoplado a los manipuladores móviles (Yuan et al., 2023). Sin embargo, la complejidad del modelo, su dinámica no lineal, el alto coste computacional que conlleva, las incertidumbres paramétricas y las perturbaciones externas, dificultan su implementación en entornos industriales (Brahmi et al., 2022).

Debido a los problemas de sincronización de la estrategia de control desacoplada, cada vez es más común en la literatura utilizar el enfoque de la estrategia de control acoplada por las ventajas que posee. El algoritmo de control debe tratar la problemática de la dinámica acoplada, las incertidumbres del modelo y las perturbaciones externas. Con intención de reducir el error de la trayectoria lo máximo posible, autores como Mai and Tran (2023), han propuesto estructuras de control acopladas basadas en diferentes módulos, los cuales son: control principal, control compensativo, control robusto y control adaptativo.

El control principal se encarga de seguir la referencia y corregir las desviaciones del sistema. Entre los más utilizados se encuentran el proporcional-integral-derivativo (PID) (Mai, 2021), el control predictivo por modelo (MPC) (Misawa et al., 2022), el control de modo deslizante (SMC) (Peng et al., 2019) y el control Backstepping (BSC) (Mai and Tran, 2023).

No obstante, la eficacia de estas técnicas de control está intrínsecamente vinculada a la calidad del modelo obtenido. Este problema resulta más notorio en un manipulador móvil, donde modelar la dinámica de manera precisa resulta complejo debido a los desafíos mencionados en el apartado anterior (ver Sección 3.2). Para reducir esta problemática se usa el módulo compensativo, el cual compensa las incertidumbres y errores del modelo del sistema. En este módulo se suelen utilizar tecnologías como redes neuronales (Wang et al., 2014) u observadores de estados (Zheng et al., 2022) que, teniendo en cuenta los errores anteriores, aprenden el comportamiento del sistema y se anticipan corrigiéndolos de antemano. Pero las estimaciones del modelo conllevan una nueva fuente de imprecisión (Peng et al., 2019). Este error de estimación es solucionado por el control robusto, así como la imprecisión del sistema causada por las perturbaciones que no son conocidas previamente, proporcionando una mayor estabilidad al sistema (Brahmi et al., 2022).

Por último, el componente adaptativo es el responsable de actualizar los parámetros del controlador con intención de mejorar su valor de salida frente a la referencia de entrada (Mai, 2021). Mediante el uso de ecuaciones adaptativas o de inteligencia artificial, se observa el estado actual del robot y teniendo en cuenta el error actual, los parámetros de los demás módulos son ajustados. Con este componente que engloba todo el controlador, se puede gestionar la inexactitud del modelo junto con los cambios que pueda sufrir el sistema, ya sea un cambio de herramienta, el deterioro del robot o cambios de fuerza en la herramienta (Wang et al., 2014).

4. Discusión: Retos actuales

En la sección anterior se han mencionado las diferentes soluciones propuestas en la literatura para hacer frente a los errores de precisión que suelen tener los manipuladores móviles. Sin embargo, aunque estas soluciones consiguen cierta mejora del posicionado de la herramienta, aún presentan ciertas limitaciones. En este apartado se han identificado los retos que todavía se deben abordar y que influyen en la inserción total de estos sistemas en la industria.

El primer reto consiste en conseguir aplicar una estrategia control acoplada en un manipulador móvil industrial. Esta estrategia permite el uso coordinado del sistema en conjunto,

aumentando la precisión del sistema y simplificando el diseño de la arquitectura de control (Zhou et al., 2022). No obstante, la implementación de esta arquitectura afecta al coste computacional y de programación debido a la complejidad del sistema (Yuan et al., 2023). Las dinámicas acopladas generadas por la interacción de las fuerzas entre el manipulador robótico y la plataforma, junto con las restricciones no-holonómicas de la plataforma se traduce en un comportamiento no-lineal del sistema (Zhou et al., 2022). Esto da como resultado grandes complicaciones en la obtención de modelos cinemáticos y dinámicos precisos (Zheng et al., 2022), los cuales se utilizan para la implementación de los algoritmos de control. Del mismo modo, la cantidad de grados de libertad que ofrece un manipulador móvil también origina un aumento en el coste de computación de las leyes de control (Aguilera et al., 2014), dificultando su implementación. Mencionando su implementación en un entorno real, la dinámica del sistema es incierta y las perturbaciones son desconocidas, lo que multiplica significativamente la complejidad de aplicar una ley de control (Brahmi et al., 2017).

En la literatura aparecen una gran cantidad de controladores innovadores de gran precisión y acoplados. Sin embargo, la mayoría comprueban su funcionalidad en simulación (Misawa et al., 2022). Si la experimentación se lleva a un entorno real, en la mayoría se utilizan manipuladores de 3 grados de libertad, a diferencia de los manipuladores que se ven en la industria que suelen ser de 6 o 7 grados de libertad (Wang et al., 2014). Asimismo, la mayoría de los manipuladores móviles en los que se han implementado estrategias de control acopladas son diseñados *ad hoc* (Brahmi et al., 2017) y son de tamaño reducido (Misawa et al., 2022). Esto refleja que, aunque se hayan realizado avances en la mejora de la precisión, la implementación de un control de un manipulador móvil todavía supone un desafío computacional.

El segundo reto parte de mejorar la precisión de la posición de la herramienta. En la literatura se han identificado dos tipos de soluciones (ver Sección 3). El método de compensación de trayectoria tiene en cuenta los errores geométricos y no-geométricos que afectan al posicionado del sistema, como el cambio de herramienta del robot, su peso o la deformación generada por los propios elementos del sistema (Bai et al., 2022). Por otra parte, los métodos de control activo de trayectoria permiten garantizar la estabilidad frente a la incertidumbre de los parámetros, la dinámica no modelada y las perturbaciones desconocidas. Cada uno de estos métodos está diseñado para resolver un aspecto específico del problema de error de posicionamiento. Sin embargo, cada método no aborda la cuestión que el otro método soluciona. Esto implica que si solo se utiliza un único método, el sistema no alcanzará su máximo potencial de mejora y el aumento de precisión será limitado.

El último reto es derivado de abordar los dos desafíos anteriores. La inclusión de un control acoplado permite hacer frente a las perturbaciones e incertidumbres del sistema, mientras que una compensación de trayectoria va a permitir corregir los errores geométricos y no-geométricos del sistema. Pero, partiendo de la dificultad que supone implementar un algoritmo de control acoplado en un sistema industrial real, el hecho de introducir un algoritmo que compense la

trayectoria supondrá añadir complejidad al sistema (Sigron et al., 2023). En un entorno industrial, es necesario cumplir con los requisitos de rapidez y eficacia, por lo que este último reto puede definirse como la obtención de un manipulador móvil capaz de proporcionar una alta precisión y velocidad, pero que tenga un bajo coste computacional y económico para su implementación.

5. Propuesta de control

Para que los manipuladores móviles puedan ejecutar tareas industriales de alta precisión, es necesario superar los retos comentados en la sección anterior (ver Sección 4). Con objeto de mejorar la precisión y funcionalidad de los manipuladores móviles, se plantea una nueva estrategia de control. Se presenta una nueva arquitectura de control acoplado, que permitirá un control directo del manipulador móvil y hará frente a las dinámicas acopladas de manera más efectiva que uno desacoplado. Esta solución propuesta se refleja en la Figura 1 con color azul, en la cual, partiendo de la arquitectura de control de referencia de la literatura (en color negro), se integra un sistema de compensación online en una estrategia de control adaptativo-robusto, a la vez que se reduce el coste computacional de la solución mediante el uso de redes neuronales como mecanismo de compensación.

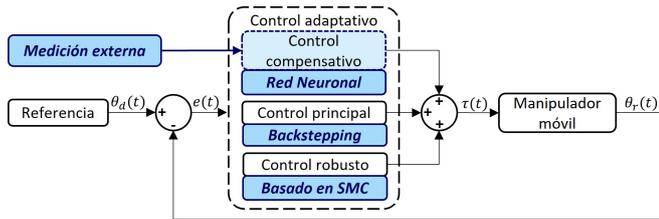


Figura 1: Esquema de la estrategia de control utilizada en la literatura (negro) y la nueva estrategia propuesta (azul)

El controlador principal va a tomar como referencia el utilizado por (Mai and Tran, 2023), que reduce considerablemente el error de precisión. Utiliza la técnica de backstepping, que puede ofrecer un mayor rendimiento del control de seguimiento con un coste computacional reducido, así como una convergencia en tiempo finito. Para compensar los errores utiliza un estimador de dinámica, mientras que para las incertidumbres y perturbaciones utiliza un término robusto basado en un controlador en modo deslizante (SMC). Todos los términos van actualizándose constantemente mediante ecuaciones adaptativas. Aunque estas funcionalidades se han validado en simulación mediante robots ligeros y con pocos grados de libertad (hasta 15 kg y 3 grados de libertad), su uso en manipuladores móviles industriales de gran tamaño trae consigo problemáticas adicionales no contempladas. Estos se pueden resumir en la falta de precisión debido a los errores no-geométricos y la dinámica acoplada, y en el alto coste computacional que supone el control de un sistema con comportamiento no-lineal y con gran número de grados de libertad.

Se ha mencionado la falta de compensación de los errores geométricos y no-geométricos de los manipuladores móviles en técnicas de control de trayectoria. Para solventarlo, se

propone la introducción de una técnica de compensación online gracias a la inserción de un elemento externo de medición (ver Sección 3.1), lo cual permitirá reducir el error de precisión real del sistema. No obstante, esto aumenta significativamente el coste computacional. Por ello, se propone el uso de redes neuronales dado su potencial y capacidad para abordar problemas complejos. Entre sus cualidades se encuentran la reducción de costes computacionales para aplicaciones de identificación y control, la capacidad de aproximación a modelos matemáticos y la robustez frente a perturbaciones (Galvan-Perez et al., 2023). En la propuesta de control, estas redes se incorporarán como término compensativo y utilizarán las medidas proporcionadas por la medición externa. De esta manera, se conseguirá una mejor identificación de los errores y una mejora en la respuesta del término compensativo con un coste computacional reducido. Con la implementación del algoritmo de control acoplado, el elemento externo de medición y la red neuronal, la nueva estrategia pretende englobar los tres retos identificados (ver Sección 4).

6. Conclusiones

Los avances en la industria y tecnología han generado nuevos requisitos en los procesos de fabricación. Los manipuladores móviles son capaces de proporcionar manipulabilidad y flexibilidad al mismo tiempo. Sin embargo, estos sistemas todavía presentan limitaciones en tareas de alta precisión. En este artículo se han analizado las fuentes de error de este sistema y se han presentado las soluciones actuales. Asimismo, se han identificado los desafíos pendientes y se ha concluido con un nuevo enfoque en el diseño de la estrategia de control que permitirá la mejora de la precisión de estos sistemas para su posible implementación en la industria. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de la estrategia de control propuesta. Además, como trabajo futuro, se plantea la implementación de dicho algoritmo en un entorno realista. Específicamente, se tiene como objetivo realizar pruebas tanto en simulación como en manipuladores móviles reales, con el fin de validar la mejora en la precisión y la reducción de la complejidad del sistema a través del nuevo enfoque propuesto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por la beca 024-B2/2023 del Programa Bikaintek para la Realización de Doctorados Industriales y para la Incorporación de Investigadores a la Industria del Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, así como por el proyecto IT1726-22, también del Gobierno Vasco.

Referencias

- Aguilera, S., Torres-Torriti, M., Auat, F., 10 2014. Modeling of skid-steer mobile manipulators using spatial vector algebra and experimental validation with a compact loader. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1649–1655.
DOI: 10.1109/IRoS.2014.6942776

- Bai, Q., Li, P., Tian, W., Shen, J., Li, B., Zhang, L., 8 2022. Coordinated motion planning of the mobile redundant manipulator for processing large complex components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 121 (9-10), 6703–6721.
DOI: 10.1007/s00170-022-09785-x
- Boby, R. A., Klimchik, A., 10 2021. Combination of geometric and parametric approaches for kinematic identification of an industrial robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 71.
DOI: 10.1016/J.RCIM.2021.102142
- Brahmi, A., Saad, M., Brahmi, B., Bojairami, I. E., Gauthier, G., Ghommam, J., 2 2022. Robust adaptive tracking control for uncertain nonholonomic mobile manipulator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering* 236 (2), 395–405.
DOI: 10.1177/09596518211027716
- Brahmi, A., Saad, M., Gauthier, G., Zhu, W. H., Ghommam, J., 2017. Tracking control of mobile manipulator robot based on adaptive backstepping approach. *International Journal of Digital Signals and Smart Systems* 1 (3), 224.
DOI: 10.1504/IJDSS.2017.088207
- Feng, Y., Tian, X., Li, T., Jiang, Y., 12 2023. Measurement of mobile manipulator chassis pose change caused by suspension deformation and end-effector accuracy improvement based on multi-sensor fusion. *Robotics and Autonomous Systems* 170.
DOI: 10.1016/J.RB0T.2023.104553
- Ferrarini, S., Bilancia, P., Raffaelli, R., Peruzzini, M., Pellicciari, M., 2 2024. A method for the assessment and compensation of positioning errors in industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 85, 102622.
DOI: 10.1016/J.RCIM.2023.102622
- Galvan-Perez, D., Beltran-Carbajal, F., Rivas-Camero, I., Yañez-Badillo, H., Favela-Contreras, A., Tapia-Olvera, R., 8 2023. Motion-Tracking Control of Mobile Manipulation Robotic Systems Using Artificial Neural Networks for Manufacturing Applications. *Mathematics* 2023, Vol. 11, Page 3489 11 (16), 3489.
DOI: 10.3390/MATH11163489
- Gonzalez, M. K., Theissen, N. A., Barrios, A., Archenti, A., 8 2022. Online compliance error compensation system for industrial manipulators in contact applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 76, 102305.
DOI: 10.1016/J.RCIM.2021.102305
- Hvilshøj, M., Bøgh, S., Nielsen, O. S., Madsen, O., 2012. Autonomous industrial mobile manipulation (AIMM): Past, present and future. *Industrial Robot* 39 (2), 120–135.
DOI: 10.1108/01439911211201582
- Inoue, S., Urata, A., Kodama, T., Huwer, T., Maruyama, Y., Fujita, S., Shinno, H., Yoshioka, H., 9 2021. High-precision mobile robotic manipulator for reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Automation Technology* 15 (5), 651–660.
DOI: 10.20965/IJAT.2021.P0651
- Korayem, M. H., Azimirad, V., Nikoobin, A., Boroujeni, Z., 1 2010. Maximum load-carrying capacity of autonomous mobile manipulator in an environment with obstacle considering tip over stability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46 (5-8), 811–829.
DOI: 10.1007/S00170-009-2146-0/METRICS
- Li, R., Ding, N., Zhao, Y., Liu, H., 2 2023. Real-time trajectory position error compensation technology of industrial robot. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 208.
DOI: 10.1016/j.measurement.2022.112418
- Madsen, O., Bøgh, S., Schou, C., Andersen, R. S., Damgaard, J. S., Pedersen, M. R., Krüger, V., 1 2015. Integration of mobile manipulators in an industrial production. *Industrial Robot* 42 (1), 11–18.
DOI: 10.1108/IR-09-2014-0390
- Mai, T., 11 2021. Hybrid adaptive tracking control method for mobile manipulator robot based on Proportional–Integral–Derivative technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 235 (22), 6463–6480.
DOI: 10.1177/09544062211014916
- Mai, T. L., Tran, H. T., 6 2023. An adaptive robust backstepping improved control scheme for mobile manipulators robot. *ISA Transactions* 137, 446–456.
DOI: 10.1016/J.ISATRA.2023.01.005
- Meng, J., Wang, S., Li, G., Jiang, L., Zhang, X., Liu, C., Xie, Y., 4 2021. Iterative-learning error compensation for autonomous parking of mobile manipulator in harsh industrial environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 68, 102077.
DOI: 10.1016/J.RCIM.2020.102077
- Misawa, K., Xu, F., Sekiguchi, K., Nonaka, K., 11 2022. Model predictive control for mobile manipulators considering the mobility range and accuracy of each mechanism. *Artificial Life and Robotics* 27 (4), 855–866.
DOI: 10.1007/S10015-022-00799-Y
- Moosavian, S. A., Alipour, K., 2007. On the dynamic tip-over stability of wheeled mobile manipulators. *International Journal of Robotics and Automation* 22 (4), 322–328.
DOI: 10.2316/JOURNAL.206.2007.4.206-3036
- Oba, Y., Weaver, K., Parwal, A., Nagasue, H., Fujishima, M., 1 2021. High-accuracy pose estimation method for workpiece exchange automation by a mobile manipulator. *CIRP Annals* 70 (1), 357–360.
DOI: 10.1016/J.CIRP.2021.04.050
- Olabi, A., Damak, M., Bearee, R., Gibaru, O., Leleu, S., 2012. Improving the accuracy of industrial robots by offline compensation of joints errors. *2012 IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2012, Proceedings*, 492–497.
DOI: 10.1109/ICIT.2012.6209986
- Peng, J., Yang, Z., Wang, Y., Zhang, F., Liu, Y., 9 2019. Robust adaptive motion/force control scheme for crawler-type mobile manipulator with nonholonomic constraint based on sliding mode control approach. *ISA Transactions* 92, 166–179.
DOI: 10.1016/J.ISATRA.2019.02.009
- Ryu, S., Moon, H., 6 2023. Industrial manipulator calibration with geometric and non-geometric parameters for the enhanced positioning accuracy. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37 (6), 3103–3112.
DOI: 10.1007/S12206-023-0535-1
- Sigron, P., Aschwanden, I., Bambach, M., 2023. Compensation of geometric, backlash, and thermal drift errors using a universal industrial robot model. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
DOI: 10.1109/TASE.2023.3328835
- Tzafestas, S. G., 7 2018. Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* 91 (1), 35–58.
DOI: 10.1007/S10846-018-0805-9/METRICS
- Wang, Y., Mai, T., Mao, J., 2014. Adaptive motion/force control strategy for non-holonomic mobile manipulator robot using recurrent fuzzy wavelet neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 34, 137–153.
DOI: 10.1016/j.engappai.2014.05.009
- Wu, Y., 2014. Optimal pose selection for the identification of geometric and elastostatic parameters of machining robots.
- Xing, H., Torabi, A., Ding, L., Gao, H., Li, W., Tavakoli, M., 11 2021. Enhancing kinematic accuracy of redundant wheeled mobile manipulators via adaptive motion planning. *Mechatronics* 79.
DOI: 10.1016/J.MECHATRONICS.2021.102639
- Yang, M., Yang, E., Zante, R. C., Post, M., Liu, X., 9 2019. Collaborative mobile industrial manipulator: A review of system architecture and applications. *ICAC 2019 - 2019 25th IEEE International Conference on Automation and Computing*.
DOI: 10.23919/ICAC.2019.8895183
- Yaw, A. F. S., Messina, M., Medeiros, H., Marvel, J., Bostelman, R., 2018. Stochastic search methods for mobile manipulators. *Procedia Manufacturing* 17, 976–984.
DOI: 10.1016/J.PROMFG.2018.10.106
- Yu, T., Chang, Q., 11 2023. Scalable motion planning and task-oriented coordination scheme for mobile manipulators in smart manufacturing. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* 109 (3).
DOI: 10.1007/S10846-023-02005-Y
- Yuan, W., Liu, Y. H., Su, C. Y., Zhao, F., 3 2023. Whole-Body Control of an autonomous mobile manipulator using model predictive control and adaptive fuzzy technique. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 31 (3), 799–809.
DOI: 10.1109/TFUZZ.2022.3189808
- Zheng, Y., Liu, Y., Song, R., Ma, X., Li, Y., 6 2022. Adaptive neural control for mobile manipulator systems based on adaptive state observer. *Neurocomputing* 489, 504–520.
DOI: 10.1016/J.NEUCOM.2021.12.062
- Zhou, Z., Yang, X., Wang, H., Zhang, X., 10 2022. Coupled dynamic modeling and experimental validation of a collaborative industrial mobile manipulator with human-robot interaction. *Mechanism and Machine Theory* 176.
DOI: 10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2022.105025