

Arquitectura de control modular de un exoesqueleto bimanual

Peral-Sempere, E.^{a,*}, Miñano-Ruiz, F.J.^a, Martínez-Pascual, D.^a, Chinchilla-Pastor, J.^a, Blanco-Ivorra, A.^b, Catalán, J.M.^c,
García-Aracil, N.^a

^aGrupo de Robótica e Inteligencia Artificial, Instituto de Bioingeniería de Elche, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad, s/n. 03202 Elche, Alicante, España

^bDepartamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad, s/n. 03202 Elche, Alicante, España

^cDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad, s/n. 03202 Elche, Alicante, España

Resumen

Cerca de 80 millones de personas en la UE, un sexto de su población, tienen alguna discapacidad. La accesibilidad es un derecho básico según el artículo 9 de la Convención de las Naciones Unidas, firmada por la Comisión Europea en 2010. El propósito de la accesibilidad es permitir que las personas con discapacidad vivan de forma independiente y participen plenamente en la sociedad. El desarrollo de un exoesqueleto bimanual de asistencia, cuyo control pueda resolver la coordinación de ambos brazos, es clave en esta búsqueda de autonomía. A diferencia de los dispositivos unimanuales, que limitan el rango de acción, un sistema bimanual imita con mayor precisión el movimiento natural humano y permite realizar actividades más complejas en el hogar. En este trabajo de fin de master se presenta la arquitectura de control diseñada para un exoesqueleto bimanual desarrollado para permitir al usuario realizar actividades coordinando ambos brazos. Se incluyen los principios de diseño y los diferentes modos de interacción considerados.

Palabras clave: Ingeniería de rehabilitación y prestación de servicios de salud, Tecnología de asistencia e ingeniería de rehabilitación, Tecnología robótica, Control compartido, cooperación y grado de automatización, Automatización centrada en el ser humano.

Modular control architecture of a bimanual exoskeleton

Abstract

Around 80 million people in the EU—one-sixth of its population—live with some form of disability. Accessibility is a fundamental right according to Article 9 of the United Nations Convention, which was signed by the European Commission in 2010. The purpose of accessibility is to enable people with disabilities to live independently and participate fully in society. The development of an assistive bimanual exoskeleton, featuring a control system capable of managing dual-arm coordination, is key to this pursuit of autonomy. Unlike unimanual devices, which limit the range of action, a bimanual system more accurately mimics natural human movement and allows for the performance of more complex activities within the home. This article presents the control architecture designed for a bimanual exoskeleton developed to allow users to perform activities by coordinating both arms. It includes the design principles and the various interaction modes considered.

Keywords: Rehabilitation engineering and healthcare delivery, Assistive technology and rehabilitation engineering, Robotics technology, Shared control, cooperation and degree of automation, Human centred automation.

1. Introducción

En la actualidad, las personas con discapacidades motoras severas suelen depender de la asistencia continua de terceros para la realización de actividades de la vida diaria (AVD), tales

como la alimentación, la higiene personal o el vestido (European Commission, 2021). Esta dependencia funcional no solo limita su autonomía física, sino que también tiene un impacto significativo en su bienestar psicológico, su autoestima y su calidad de vida, incrementando el riesgo de aislamiento social y

deterioro emocional (Scherer, 2019). En este contexto, el desarrollo de tecnologías de asistencia avanzadas se presenta como un elemento clave para promover la inclusión social y la participación activa de las personas con diversidad funcional motora en la sociedad.

La Organización Mundial de la Salud introdujo la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud (CIF) como un marco conceptual para describir el funcionamiento humano, la discapacidad y la salud de manera integral (World Health Organization, 2001). La CIF permite caracterizar tanto el nivel de capacidad como el nivel de desempeño. Este enfoque resulta especialmente relevante para el diseño de sistemas de asistencia robótica centrados en el usuario, ya que desplaza el foco desde la limitación funcional hacia el potencial de funcionamiento.

Un aspecto fundamental de la autonomía humana es su carácter bimanual. La mayoría de las AVD requieren una coordinación precisa entre ambas extremidades superiores, implicando diferentes roles funcionales (mano dominante y no dominante) y patrones de control complementarios (Gull et al., 2020; Johansson and Flanagan, 2009). Sin embargo, gran parte de los dispositivos de asistencia robótica existentes se centran en soluciones monomanuales, lo que limita su eficacia en tareas reales del día a día y reduce su aceptación por parte de los usuarios.

Para abordar esta complejidad funcional, es necesario el desarrollo de arquitecturas de control que vayan más allá del uso de una única fuente de entrada. El control multimodal es la clave, al permitir la integración simultánea de información procedente de sensores de posición, fuerza, interacción y señales biológicas con el fin de establecer un lazo de control en tiempo real (Ajoudani et al., 2018; Novak and Rienner, 2015). Este enfoque facilita una adaptación continua del sistema a las variaciones dinámicas tanto del entorno como del estado físico y cognitivo del usuario.

En este documento se presenta la arquitectura de control multimodal diseñada para un exoesqueleto bimanual desarrollado con objetivo de restaurar la capacidad del usuario para realizar actividades de la vida diaria de manera autónoma coordinando ambos brazos. Se detallan sus principios de diseño, los diferentes modos de interacción considerados. Finalmente, se evalúa la calidad en la ejecución de los movimientos.

2. Arquitectura del Sistema

El sistema robótico está compuesto por dos exoesqueletos de brazo. Estos han sido configurados bajo una disposición simétrica para dotar al usuario de una asistencia bimanual (Figura 1), siguiendo el diseño presentado en un estudio anterior (Fernández-Irles et al., 2024).

Cada brazo robótico posee cinco grados de libertad (GDL) pensados para replicar los movimientos fisiológicos del brazo humano. Esta cadena cinemática permite ejecutar los movimientos de abducción/aducción de hombro, flexión/extensión de hombro, rotación interna/externa de hombro, flexión/extensión de codo y pronosupinación.

Para garantizar movimientos seguros y dentro de los límites articulares normales y asegurar que las propias articulaciones

no colisionan entre ellas, se establecen límites mecánicos haciendo uso de finales de carrera.

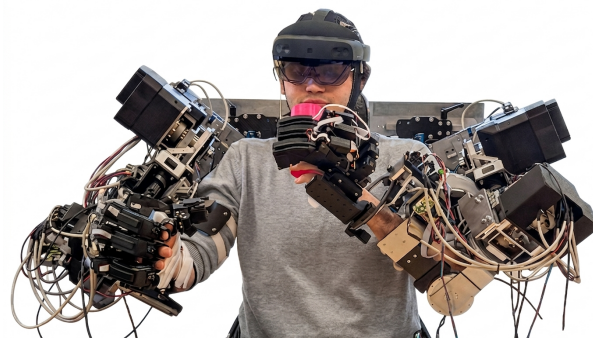


Figura 1: Usuario haciendo uso de los exoesqueletos de brazo desarrollados

Se define la configuración de reposos del exoesqueleto ($q_i = 0$ para todas las articulaciones) como aquella en la que el brazo se encuentra paralelo al tronco del usuario, con la articulación del codo flexionada a 90° y las palmas de las manos orientadas perpendicularmente al suelo como se muestra en la Figura 3. A partir de este estado de referencia, se establecen los límites mecánicos operativos cuyos valores angulares se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Rangos de movimiento de un exoesqueleto de brazo

Articulación	q_{min} ($^\circ$)	q_{max} ($^\circ$)
Abducción/aducción hombro	0.0	90.0
Flexión/extensión hombro	0.0	180.0
Rotación interna/externa hombro	-40.0	40.0
Flexión/extensión codo	-70.0	20.0
Pronosupinación	-80.0	80.0

Con el fin de adaptar el sistema a la anatomía específica de cada usuario, los exoesqueletos cuentan con diversos mecanismos de ajuste. En primer lugar, la estructura permite modificar dimensiones como la distancia entre hombros y el ancho de estros, el largo del brazo superior y el largo del antebrazo. Estos ajustes permiten asegurar que los ejes del exoesqueleto coincidan con las articulaciones humanas. En segundo lugar, para colocar el exoesqueleto al usuario se reparten a lo largo de los eslabones una serie de órtesis distribuidas en el brazo, antebrazo y mano. Estos elementos se aseguran mediante cinchas de velcro.

3. Hardware y Comunicaciones

Cada exoesqueleto está formado por un sistema de actuación distribuido en cada uno de sus cinco GDL por brazo. Cada GDL se actúa gracias a motores Maxon. Cada motor se conecta a su electrónica de control correspondiente y se acopla a un encoder incremental, que indica la posición de la articulación mientras el exoesqueleto permanece en funcionamiento, y a un encoder absoluto, que conserva la lectura de la posición aunque el sistema se apague o pierda la conexión.

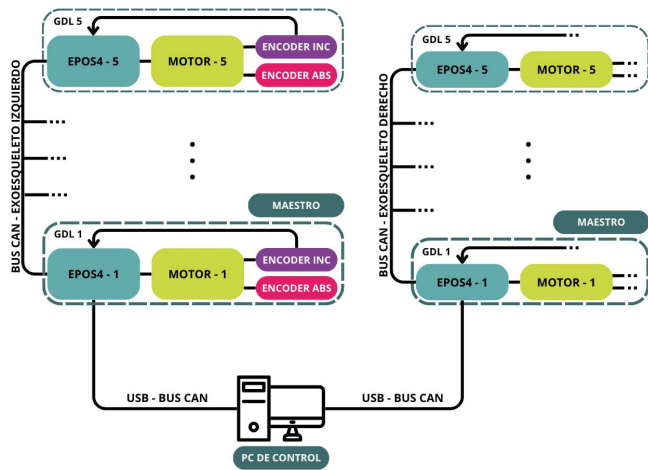


Figura 2: Esquema de la arquitectura de control y comunicaciones del sistema robótico.

Cada motor es gestionado por controladoras EPOS4, unidades que se encargan del control de los actuadores y de su comunicación interna. La conexión de las electrónicas de control se realiza a través del protocolo bus CAN. Cada EPOS4 cuenta con un identificador único que distingue las diferentes articulaciones dentro de la red.

Además de controlar los motores, las EPOS4 permiten gestionar entradas y salidas digitales y analógicas. Por un lado, las entradas se emplean para conocer la posición de cada articulación mediante encoders y restringir el rango de movimiento mediante los finales de carrera. Por otro lado, las salidas nos permiten accionar los frenos mecánicos.

El esquema de conexiones de la electrónica de control es el que se muestra en la Figura 2. En primer lugar se conecta el PC de control a cada una de las unidades EPOS4 maestras mediante una interfaz CAN-USB *Kvaser Leaf Light* de doble canal, asignando un puerto a cada brazo. En cada exoesqueleto, el controlador situado en el primer grado de libertad (movimiento de abducción/aducción de hombro) se configura como el primer nodo de la línea bus CAN, mientras que el del quinto grado de libertad, el que se corresponde con el movimiento de pronosupinación, se configura como el último dispositivo de la línea.

4. Sistema de Control

El sistema de control del exoesqueleto se articula mediante una arquitectura basada en ROS2 (Robot Operating System). ROS2 permite integrar ambos exoesqueletos de forma coordinada bajo un único sistema de control ofreciendo una arquitectura modular. Además ROS2 nos facilitará agregar y eliminar elementos de manera sencilla, pudiendo usar así cada exoesqueleto por separado si se desea.

Cabe destacar que para implementar la descripción del sistema en ROS2, se ha modelado ambos exoesqueletos de brazo mediante archivos URDF (Unified Robot Description Format). Aunque el sistema robótico está compuesto por dos brazos independientes, ambos se integran en un único archivo. Este modelizado permite al sistema de control monitorizar estado de los

dos exoesqueletos a la vez, facilitando la prevención de colisiones entre ambos brazos. Además, este modelo permite incorporar elementos externos (como mesas), garantizando la planificación de trayectorias seguras, tanto para el sistema como para el usuario.

Para gestionar el sistema, el flujo de información y control se organiza en una arquitectura que conecta la planificación de alto nivel con el hardware real. Este ecosistema de comunicación se detalla en el esquema de la Figura 4.

5. Modelo Cinemático

5.1. Cinemática Directa

La cinemática directa (FK) permite determinar la pose del efector final (centro de la palma del usuario), respecto a las coordenadas de referencia, colocadas en el punto medio entre los ejes de las primeras articulaciones de ambos exoesqueletos (Figura 3), para poder emplear la misma referencia en ambos. Para un exoesqueleto de cinco grados de libertad, la transformación viene definida por la matriz de transformación homogénea T_H :

$$T_H(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5) = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1_{1 \times 1} \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (1)$$

Donde las variables q_i hacen referencia a los cinco valores articulares con los que cuenta el exoesqueleto, R hace referencia a la matriz de rotación que define la orientación del efector final y P hace referencia a la posición en el espacio en la que se encuentra.

En este sistema, MoveIt2 calcula la cinemática directa obteniendo la transformada del efector final respecto al punto de referencia. Esta información se extrae del modelo de estados de robot y se publica de forma continua en un *topic* de ROS2, permitiendo que otros módulos del sistema puedan conocer la ubicación exacta del efector final en todo momento.

5.2. Cinemática Inversa

La cinemática inversa (IK), para un robot de 5 GDL viene definida por la función:

$$IK(T) = q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5]^T \quad (2)$$

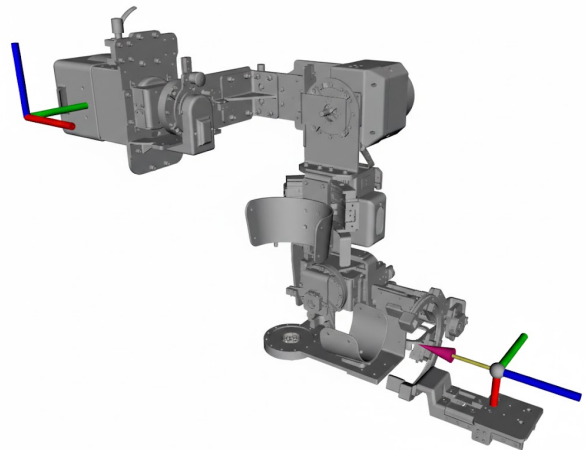


Figura 3: Sistema de referencia empleado para el cálculo de cinemática con el exoesqueleto en la posición inicial.

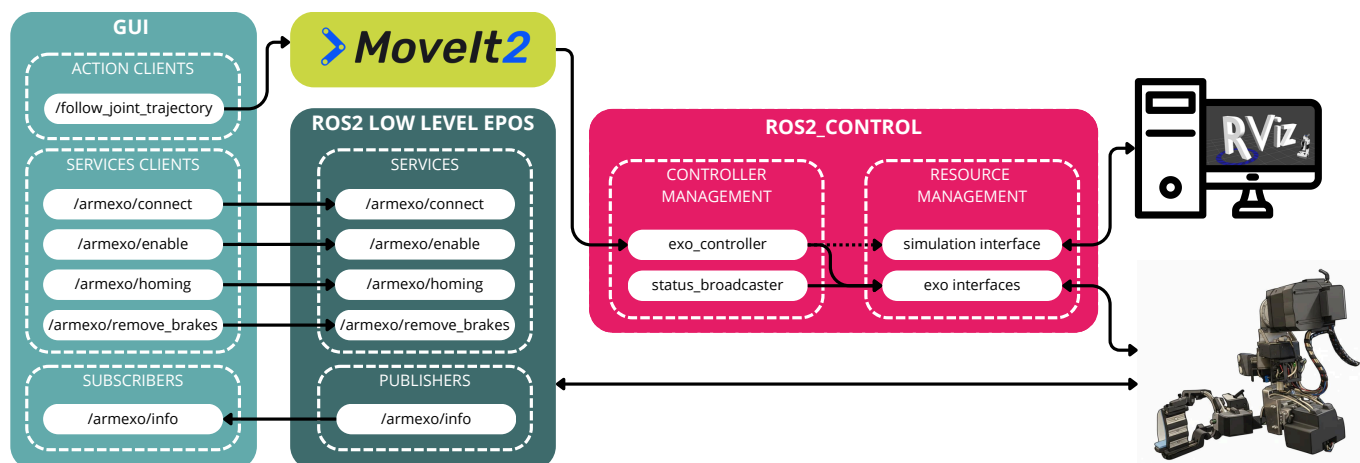


Figura 4: Diagrama de la arquitectura de control y comunicación en ROS2.

Para calcular la cinemática inversa se ha optado por obtener la solución mediante el planificador *Pilz Industrial Motion* de MoveIt2. Este componente permite resolver las posiciones articulares necesarias mediante el generador de trayectorias *Point-to-Point* (PTP). Dicho generador sigue una estrategia de control donde la trayectoria se interpola en el espacio articular, garantizando que todos los grados de libertad inicien y finalicen su desplazamiento de forma síncrona priorizando así la velocidad y la integridad mecánica sobre la geometría de la trayectoria en el espacio cartesiano.

Al contar con cinco grados de libertad, el sistema se ve restringido a alcanzar posiciones con orientaciones arbitrarias. Por esta razón se configura el algoritmo para priorizar la posición deseada, permitiendo total flexibilidad en la orientación.

El proceso de la obtención de las posiciones articulares consiste en generar una trayectoria válida hacia la pose objetivo y extraer el estado final de la misma, obteniendo así los valores articulares.

6. Control de Bajo Nivel

6.1. Gestión de las Controladoras EPOS4

El nodo de ROS2 `ros2_low_level_epos` gestiona la comunicación directa con las controladoras EPOS4, supervisa el estado del sistema y proporciona distintos modos de operación. Además, en este nodo se implementan varios canales de comunicación para interactuar con el *hardware*: comunicación CANopen con las controladoras EPOS4, lectura de encoders absolutos mediante comunicación serie con un Arduino y recepción de comandos externos mediante UDP.

Para inicializar el robótico, se debe seguir una secuencia que garantiza la operación segura del exoesqueleto. Dicho proceso se articula mediante una serie de servicios de ROS2 que deben ejecutarse en un orden lógico.

En primer lugar, se realiza la conexión con las EPOS mediante el servicio `/armexo/connect`, lo que establece el canal de comunicación CANopen y ejecuta una configuración completa de cada controlador. Durante esta fase se configura la gestión de las entradas digitales que monitorizan los finales de ca-

rrera. Asimismo, se definen umbrales de seguridad en las salidas, estableciendo límites estrictos de tensión, corriente, velocidad y aceleración máxima para proteger tanto los actuadores como la integridad mecánica del usuario. Finalmente, configura el control de los frenos y se define el Modo de Posición como el modo de operación principal para los motores.

En segundo lugar, se habilitarán los motores mediante el servicio `/armexo/enable` y se liberarán los frenos, haciendo uso del servicio `/armexo/remove_brakes`, para transicionar el sistema a un estado operativo. Estos frenos se encuentran bloqueados por defecto y solo se liberan cuando la EPOS4 les suministra corriente. De esta manera, se garantiza que ante una pérdida inesperada de alimentación, el exoesqueleto bloqueará instantáneamente su posición actual, evitando el colapso por gravedad y protegiendo al usuario.

Por último se realiza el proceso de *homing* con el servicio `/armexo/homing`. Durante este estado, se sincroniza el encoder absoluto que mantiene la referencia mecánica real con el encoder incremental. Esto permite obtener la posición real incluso tras la pérdida de alimentación del sistema manteniendo una lectura de alta resolución en tiempo real gracias al encoder incremental. El *homing* se completa de manera casi instantánea sin requerir movimiento físico, a diferencia de sistemas tradicionales que requieren de la búsqueda de finales de carrera. Gracias a esta arquitectura, el usuario puede iniciar el exoesqueleto mientras lo lleva equipado de forma segura. Además, la lógica de control define que, una vez finalizado el proceso de *homing*, la activación de cualquier final de carrera transfiere la EPOS4 a un estado de error, deshabilitando el motor afectado y activando todos los frenos del sistema.

Tras inicializar el sistema, el exoesqueleto queda listo para recibir peticiones de la posición a alcanzar por parte del usuario.

6.2. ROS2 control e Interfaz de Hardware

ROS2 incorpora `ros.control`, un conjunto de paquetes que permiten interactuar y controlar los actuadores de las articulaciones de los exoesqueletos. Estos paquetes toman el estado actual del robot y el estado objetivo (posición, velocidad, par), de forma que se envían los comandos a los actuadores por medio

de un bucle de control. Estos comandos de control se envían a través de los controladores, y llegan a los actuadores del dispositivo robótico a través de la interfaz hardware.

Para controlar el sistema, se implementa un controlador y una interfaz de hardware para cada una de las articulaciones, lo que permite monitorizar el estado actual del robot y controlar las articulaciones en posición.

Una vez el controlador recibe la trayectoria o posición deseada, `ros2_control` traduce las consignas en datos compatibles que se envían a la EPOS4, las cuales ejecutan el movimiento físico mientras devuelven el feedback de los encoders en tiempo real. La trayectoria se considera finalizada cuando el error de posición de las articulaciones se sitúa por debajo del umbral de tolerancia definido. En este momento el sistema confirma la ejecución de la tarea.

7. Control de Alto Nivel

7.1. Interfaz Gráfica de Usuario

El flujo de control inicia en el nodo de la Interfaz Gráfica de (Figura 5), desarrollada mediante la librería `CustomTkinter` de `Python`. La interfaz es la encargada de traducir las peticiones del usuario en comandos.

Como se observa en el esquema de control (Figura 4), la comunicación de la interfaz con el resto del sistema se basa en el uso de acciones y `topics` de ROS2.

En el panel lateral izquierdo de cada brazo, la interfaz cuenta con una serie de botones que activan los servicios que gestionan el estado del hardware:

- Botón *Connect to EPOS* y *Connect to Encoders*: Permite establecer conexión con las EPOS4 y encoders. Hacen uso del servicio `/armexo/connect`.
- Botón *Enable Motors*: Permite habilitar los motores de las articulaciones haciendo uso del servicio `/armexo/enable`.
- Botón *Homing*: Hace que comience el proceso de *homing*. Hace uso del servicio `/armexo/homing`.
- Botón *Send Joints Position*: Permite, enviar las posiciones articulares que se desean alcanzar. Esta acción se logra gracias a la acción `/follow_joints_trajectory`.
- Interruptor de *Brakes Enabled*: Permite elegir entre activar o desactivar los frenos del sistema mediante el servicio `/armexo/remove_brakes`.

En la parte derecha de la interfaz, se visualizan las variables de estados divididas entre *Outputs* e *Inputs*. En el recuadro de salidas, se observa la posición de las articulaciones en tiempo real mientras que, en el recuadro de entradas, el usuario puede escribir las posiciones que se desean alcanzar, estas serán las posiciones enviadas al robot, tras accionar el botón de *Send Joints Position*.

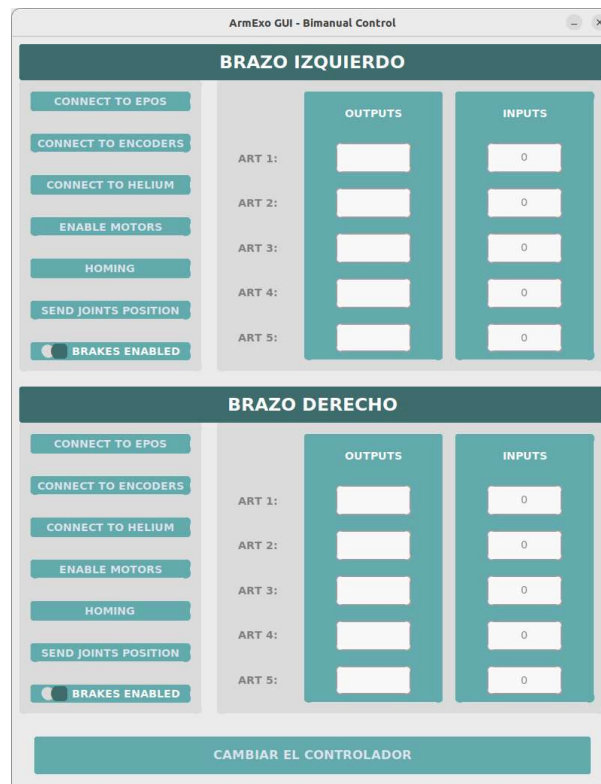


Figura 5: Interfaz de Usuario (GUI) para el control bimanual del exoesqueleto

7.2. Planificación de Movimientos con MoveIt2

La planificación de movimientos se realiza mediante `MoveIt2`. Esta herramienta proporciona la capacidad de planificar trayectorias libres de colisiones, y validar los movimientos en el espacio de trabajo. Su integración permite especificar objetivos en el espacio cartesiano, para traducirlos en trayectorias articulares.

Antes de ejecutar la planificación con `MoveIt2`, se debe establecer una serie de configuraciones previas. Se debe definir las cadenas cinemáticas, en este caso se establecen dos, una por cada exoesqueleto de brazo. Asimismo, se configuran los modelos geométricos de los exoesqueletos y de colisiones externas, para crear las matrices de colisiones que las trayectorias calculadas deben evitar.

Tras la selección por parte del usuario de un punto en el espacio que se desea alcanzar, `MoveIt2` empleará el planificador seleccionado, en este caso el planificador *Point-to-Point* para calcular la trayectoria articular óptima.

8. Resultados y Discusión

Para comprobar la funcionalidad del sistema real se hace una prueba de control del exoesqueleto en posiciones articulares mediante el cálculo de la cinemática inversa. Esta prueba consiste en elegir un punto en el espacio que debe ser alcanzado por el efector final del exoesqueleto. Para lograr este control en coordenadas, primero se calculará la cinemática inversa como se describe en la Sección 5.2, obteniendo de esta manera una trayectoria en posiciones articulares que permitan alcanzar ese punto establecido. Estas posiciones articulares serán enviadas a los actuadores del exoesqueleto mediante `ros2_control`.

En esta prueba se han realizado una serie de intentos para uno de los brazos, asegurando condiciones iniciales idénticas. El resultado medio de estas pruebas queda reflejado en la gráfica que se muestra en la Figura 6 donde las posiciones en los tres ejes del espacio se representan en tres colores distintos: el rojo para el eje x , en azul para el eje y , y en verde el eje z . Asimismo el trazo discontinuo representa la consigna de posición enviada y el sombreado la desviación estándar.

El error medio de posición durante los 5 intentos, considerando que la señal se estabiliza cuando se comete un error de menos del 5 % durante al menos 0.5 segundos, es de $3,72 \pm 0,02$ mm. Este resultado demuestra la alta repetibilidad entre sesiones, además de un rendimiento consistente y preciso del sistema de control del exoesqueleto de brazo.

El tiempo de establecimiento medio se sitúa en $5,02 \pm 0,075$ s. Teniendo en cuenta la distancia del recorrido (13 cm), es un tiempo que garantiza la seguridad del usuario, evitando movimientos bruscos y a la vez permite una respuesta ágil.

Estos resultados validan la integración del modelo cinemático con la arquitectura de control en ROS2, demostrando que el exoesqueleto es capaz de posicionar el miembro del usuario con precisión.

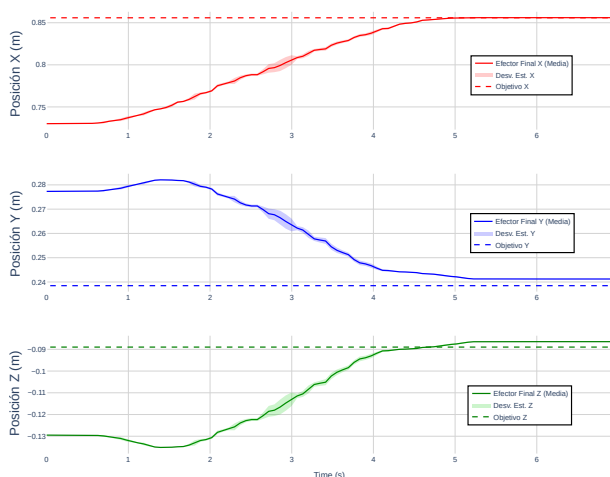


Figura 6: Evolución temporal de la posición del efector final de un exoesqueleto frente a la posición deseada

9. Conclusión

En este artículo se reúnen las bases del control de dos exoesqueletos de brazo, aprovechando las ventajas de ROS2 para conformar un sistema modular con la capacidad de adaptarse a cambios en sus componentes. Se obtiene un primer resultado preliminar que demuestra que el exoesqueleto se puede controlar de manera precisa.

Como líneas de trabajos futuros, se contempla la implementación de un control por impedancia mediante la integración de sensores de par colocados en cada una de las articulaciones del exoesqueleto. Esto permitirá gestionar la interacción física entre el robot y el usuario, permitiendo una mayor personalización de los comandos de control.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por Agencia Estatal de Investigación, la Unión Europea-Next Generation EU y Generalitat Valenciana a través de los proyectos CIPRO-M/2022/12 y PLEC2022-009424.

Referencias

- Ajoudani, A., Zanchettin, A. M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K., Khattib, O., 2018. Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Autonomous Robots* 42 (5), 957–975.
- European Commission, 2021. Disability and inclusion in the european union. Tech. rep., Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Fernández-Irles, C., Miñano, F. J., Blanco-Ivorra, A., Belmonte-Cerdán, E., Catalán, J. M., García-Aracil, N., 2024. Mechanical design of a bimanual exoskeleton for assistance in daily living activities. In: *Jornadas de Automática*. Vol. 45.
- Gull, M. A., Bai, S., Bak, T., 2020. Bimanual rehabilitation robotics: A review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 17 (1), 1–18.
- Johansson, R. S., Flanagan, J. R., 2009. Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks. *Nature Reviews Neuroscience* 10 (5), 345–359.
- Novak, D., Riener, R., 2015. A survey of sensor fusion methods in wearable robotics. *Robotics and Autonomous Systems* 73, 155–170.
- Scherer, M. J., 2019. *Assistive Technologies and Other Supports for People with Brain Impairment*. Springer, New York, USA.
- World Health Organization, 2001. *International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF)*. World Health Organization, Geneva, Switzerland, updated online version accessed in 2025.