

Diseño de la configuración de brazos robóticos vestibles para tareas de instalación y mantenimiento

Jesús Álvarez-Pastor^{a,*}, David Martínez-Pascual^a, Andrea Blanco^a, Jose María Catalán^a, Nicolás García-Aracil^a,
Francisco López-Labrador^b

^aRobótica e Inteligencia Artificial, Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad, s/n. 03202 Elche, Alicante, España
^bEiffage Energía, 02006 Ctra. Mahora km 3,2, Albacete, España

To cite this article: Álvarez-Pastor, J., Martínez-Pascual, D., Blanco, A., Catalán, J. M. García-Aracil, N., López-Labrador, F., 2024. Configuration design of wearable robotic arms used in installation and maintenance tasks. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 21, 62-68. <https://doi.org/10.4995/riai.2023.18746>

Resumen

En este artículo, se presenta el sistema robótico supernumerario desarrollado dentro del proyecto SecondArmS y se recogen los resultados del estudio inicial del espacio de trabajo y del estudio de manipulabilidad del dispositivo. En base a estos resultados, se justifica la selección de la muñeca del dispositivo entre dos planteamientos diferentes.

Palabras clave: Robótica de asistencia, robot supernumerario, robots manipuladores, diseño de robots, cinemática de robots

Configuration design of wearable robotic arms used in installation and maintenance tasks

Abstract

Physical injuries are frequently caused by industrial installation and maintenance tasks such as handling heavy loads, repetitive movements or working in awkward positions. Passive exoskeletons are often used to address this issue. However, the use of supernumerary robotic systems is another approach. This article presents the supernumerary robotic device developed in the SecondArmS project. The results of the initial study of the workspace of the robotic device and the results of the manipulability and singularity analysis of the robotic device are presented. Based on these results, the choice of the wrist of the device between the two alternatives is justified.

Keywords: Assistive robotics, supernumerary robot, robots manipulators, robots design, robots kinematics.

1. Introducción

Las tareas de instalación y mantenimiento en el ámbito industrial, tales como la manipulación de cargas pesadas, trabajos por encima de la cabeza o adopción de posturas incómodas, suelen requerir de un esfuerzo físico por parte del operario de forma continua que, en muchas ocasiones, acaba en una lesión física que provoca la baja de las personas afectadas y conlleva un coste económico que repercute tanto para la empresa como para la administración (Kosk-Bienko, 2009).

De acuerdo con la VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo, estas lesiones son producidas, particularmente en el ámbito industrial, por la realización de movimientos repetitivos durante la jornada laboral pero también por el transporte de

cargas pesadas o la adopción de posturas incómodas durante un tiempo prolongado (Almodóvar et al., 2011).

Con el fin de abordar esta problemática se propone la introducción de exoesqueletos pasivos que ayuden a mantener una postura correcta (Kobayashi et al., 2009), o también, la introducción de exoesqueletos activos que otorguen una capacidad de carga superior (Blanco et al., 2019, 2022). Otro planteamiento sería la incorporación de sistemas robóticos bimanuales vestibles, también conocidos como supernumerarios, que sean capaces de colaborar y de asistir, a la persona que lo porte, en sus funciones (Prattichizzo et al., 2014; Salvietti et al., 2021; Husain et al., 2019; Saraji et al., 2018; Parietti and Asada, 2017).

*Autor para correspondencia: jesus.alvarezp@umh.es

Un sistema robótico supernumerario es un dispositivo robótico vestible diseñado para aumentar las capacidades físicas de la persona que lo vista. Estos robots añaden grados de libertad (GDL) adicionales al cuerpo humano y, a diferencia de los exoesqueletos, no tienen por qué duplicar la estructura cinemática de la parte del cuerpo en la que van a ser llevados ya que se diseñan y se controlan para trabajar de forma independiente al resto de miembros.

El uso de este tipo de dispositivos robóticos vestibles tienen un gran potencial en el desempeño de tareas dentro del ámbito industrial. Estos dispositivos ayudan en la realización de actividades complejas, como por ejemplo, aquellas en la que se requiera de un buen nivel de precisión. Además, tienen el potencial de aumentar la productividad de un usuario al realizar una tarea monótona, a la vez que reduce el cansancio físico del usuario. Otro aspecto interesante es el aumento del espacio de trabajo alcanzable del cuerpo humano.

El dispositivo presentado por Bonilla and Asada (2014) es un robot vestible montado sobre los hombros del usuario y desarrollado para asistir a la persona que lo porta en la ejecución de tareas por encima de la cabeza. El dispositivo está compuesto por dos brazos robóticos de cinco GDL.

Parietti and Asada (2014) y Parietti et al. (2014) presentan en sus estudios otro robot supernumerario compuesto por 2 brazos robóticos con seis GDL en total situados a la altura de la cadera. Asimilando este manipulador a un brazo humano, la flexión de hombro, tiene un par motor máximo de 69 Nm y un rango de movimiento de 270 grados. La abducción de hombro tiene un par máximo de 39 Nm y un rango de movimiento de 90 grados. Por último, la flexión de codo tiene un rango de movimiento de 180 grados y un par máximo de 39 Nm. Cada articulación está actuada por un motor DC a través de una reductora de tipo armónico con una relación de reducción de 50:1. Para anclarse al entorno, utiliza un efector final provisto de un electroimán, o bien, en el caso de que el entorno no sea magnético, unas ventosas de vacío.

La evolución del anterior robot supernumerario se presenta en (Parietti and Asada, 2016). En este caso, el dispositivo permite anclar el cuerpo humano al suelo, paredes o estructuras circundantes para que el usuario pueda realizar una tarea con seguridad, estabilidad y comodidad. En esta nueva versión, Cada miembro está compuesto por dos articulaciones rotacionales servomotorizadas con un par máximo de 20 Nm y una articulación prismática actuada por un actuador lineal de 666 N y una carrera de 0,46 metros. La masa del dispositivo es de 13 kg sin tener en cuenta baterías.

El robot supernumerario MantisBot (Kurek and Asada, 2017; Daniel and Asada, 2020) es un dispositivo que se ancla a la parte superior del torso y cuenta con dos miembros que alcanzan el suelo cuando el usuario se encuentra en posición de ganeo para soportar el peso del torso del usuario. De esta manera, los miembros superiores de la persona quedan libres para la realización de cualquier tarea. Sus cuatro articulaciones están actuadas mediante motores AC Maxon EC60 acoplados a una reductora planetaria con una relación de reducción de 81:1 entregando a su salida un par máximo de 30 Nm.

Es preferible que un dispositivo robótico supernumerario tenga una masa reducida para evitar un mayor consumo metabólico de la persona y evitar lesiones por sobrecarga de la

estructura ósea y/o muscular. Por tanto, se busca disponer del menor número de GDL posible siempre teniendo en cuenta las aplicaciones a las que va a ser destinado el dispositivo.

En ciertas aplicaciones, donde se requieran de actuadores potentes que ofrezcan un alto par motor, y que por lo tanto, la masa del conjunto sea elevada, se podría dotar el dispositivo de estructuras mecánicas que permitan descargar la masa del robot al suelo con el fin de reducir el esfuerzo físico necesario para llevar el sistema. Una posibilidad sería implementar unas piernas robóticas supernumerarias (Parietti and Asada, 2016). Por otro lado, un exoesqueleto de piernas permitiría al usuario moverse libremente por todo el espacio de trabajo y, además de transferir la carga al suelo, ofrecer asistencia en la marcha mediante articulaciones activas actuadas por un conjunto motorreductor.

En este artículo se presenta el estado actual del primer prototipo del dispositivo robótico supernumerario del proyecto SecondArmS, especificando los requisitos de diseño del dispositivo robótico y, más en detalle, las características del manipulador robótico diseñado. Además, se muestran los resultados del estudio inicial del espacio de trabajo del brazo robótico donde se comparan diferentes espacios de trabajo para diferentes longitudes de eslabones con el fin de seleccionar la configuración que ofrezca una mayor área de trabajo delante del usuario. Por último, se realiza un estudio de la manipulabilidad y singularidades del brazo robótico para dos configuraciones diferentes de muñeca para así seleccionar la configuración más conveniente para las tareas a realizar por el dispositivo supernumerario.

2. Dispositivo SecondArmS

El proyecto SecondArmS surge de la necesidad de eliminar o reducir los trastornos musculoesqueléticos (TME) provocados por la manipulación de cargas pesadas, malas posturas y la repetición de movimientos asociados a los trabajos de instalación y mantenimiento de instalaciones industriales.

Para ello, se propone el desarrollo de unos brazos robóticos portables soportados por una estructura de tipo exoesqueleto para los miembros inferiores. El concepto del dispositivo se representa en la Figura 1. Este dispositivo será capaz de asistir al usuario evitando posturas peligrosas durante tareas de mantenimiento de instalaciones, por ejemplo, en tareas que requieran trabajar por encima del nivel de la cabeza (Martínez-Pascual et al., 2021).

Los brazos robóticos se situarán a la espalda del usuario y, con el fin de aumentar el espacio de trabajo, tendrán que ser capaces de trasladarse longitudinalmente desde la cadera hasta los hombros de la persona que porte el sistema, mediante un sistema de elevación actuado por un husillo.

Al tratarse de un robot colaborativo, el sistema tendrá que estar dotado de sensores de par, capaces de proteger al usuario en caso de colisión con el dispositivo y que, a su vez, permitan interactuar con el brazo robótico con el fin de grabar y replicar una trayectoria o posicionarlo en un punto concreto de su área de trabajo.

Por otro lado, la estructura de tipo exoesqueleto para los miembros inferiores estará articulada en el plano sagital y será la encargada de transmitir todo el peso del conjunto al suelo de tal manera que éste sea inapreciable, muscularmente, por el



Figura 1: Diseño del dispositivo robótico SecondArmS.

usuario. Con el fin de asistir al usuario al caminar, las articulaciones de flexión/extensión de cadera y de flexión/extensión de rodilla estarán actuadas mediante un conjunto motorreductor eléctrico. La articulación de flexión/extensión de tobillo se mantendrá pasiva.

Los manipuladores robóticos y la plataforma elevadora están actuados mediante motores eléctricos Maxon, cuya comunicación y control se realiza a través de las electrónicas de control EPOS4. La conexión con las electrónicas de control de los manipuladores se realiza a través del protocolo CANopen, un protocolo de comunicaciones de alto nivel para uso industrial basado en el bus CAN. Cada una de las tarjetas controladoras posee un identificador único, de forma que puede identificarse fácilmente cada uno de los nodos. La conexión entre PC de control y bus CAN se ha empleado una interfaz CAN-USB Kvaser Leaf Light con doble puerto, uno por manipulador. Cabe destacar que las EPOS4 correspondientes a los manipuladores robóticos se han conectado con una configuración maestro-esclavo, de forma que se establece comunicación con la primera (maestro), y esta se conecta con el resto de tarjetas esclavas. Además, la conexión con la EPOS4 que controla la plataforma elevadora se ha conectado con el PC de control mediante un puerto USB independiente. Por último, el control de bajo nivel del sistema SecondArmS se ha desarrollado en Ubuntu 20.04, programado en lenguaje C++. Por otro lado, el control de alto nivel se ha desarrollado en ROS (Robot Operating System) Noetic para integrar los manipuladores robóticos, la plataforma y los diferentes sensores empleados.

2.1. Diseño de la cinemática de los manipuladores robóticos

La Figura 2 muestra una vista en detalle de uno de los manipuladores del primer prototipo del dispositivo SecondArmS. Este manipulador cuenta con seis articulaciones compuestas por un motor eléctrico DC acoplado a un freno electromagnético y a una reductora armónica (Figura 3). Además, estas cuentan con

un encoder absoluto multivuelta, un sensor de par e interruptores finales de carrera. En la Tabla 1 se muestran las masas, pares articulares máximos y nominales de cada articulación del dispositivo.

Tabla 1: Características electromecánicas de las articulaciones del brazo manipulador

	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
Voltaje (V)	48	24	24	24	24	24
Potencia (W)	260	160	100	50	50	60
Relación reducción	120	100	120	100	100	138
Par máximo ($N \cdot m$)	115.7	45.7	54.8	9.1	9.1	8
Masa (kg)	3	3.3	2.5	1.2	1.2	1

Note. Los motores empleados en todas las articulaciones son del fabricante Maxon Motors. Se han empleado motores EC90 para las articulaciones q_1 y q_2 , un motor EC60 para la articulación q_3 , motores EC45 para las articulaciones q_4 y q_5 y un motor DCX19S para la última articulación.

La construcción de este primer prototipo ha sido fruto de un estudio previo donde se analizó el espacio de trabajo para la elección de los grados de libertad, las longitudes de los eslabones y su configuración.

2.2. Grados de libertad

A la hora de seleccionar el número de GDL de cada manipulador robótico se decidió diseñar un manipulador de 7 GDL. La particularidad que tiene esta configuración es que permite al dispositivo moverse por lo que se conoce como espacio nulo (Dietrich et al., 2015). Dotar al dispositivo de la capacidad de moverse por el espacio nulo, significa que este es capaz de moverse manteniendo fija la posición y la orientación del efector final, maximizando de esta manera el nivel de manipulabilidad del dispositivo. Esto también permite seleccionar entre las diferentes posibles configuraciones aquella que resulte más cómoda



Figura 2: Vista en detalle de uno de los manipuladores del primer prototipo del dispositivo SecondArmS.

para el usuario cuando se desee alcanzar una determinada posición y orientación objetivo. Sin embargo, el principal inconveniente de esta configuración es el peso. En nuestros criterios de diseño se buscaba diseñar un manipulador con un peso inferior a 10 Kg. Cumplir este criterio de diseño para un manipulador de 7 GDL no nos fué posible. Por este motivo, se optó por diseñar un brazo robótico con 6 GDL. Buscando un compromiso entre manipulabilidad y masa, se emplearon 3 GDL para determinar la posición y 3 GDL para la orientación.

Las diferentes posibles configuraciones de muñeca pueden clasificarse en dos tipos, muñecas esféricas y muñecas no esféricas. Las muñecas esféricas son aquellas en las que los ejes de las articulaciones que la componen se cortan en un punto. Por el contrario, las muñecas no esféricas son todas aquellas en las que este fenómeno no ocurre.

Para justificar la elección de la configuración de la muñeca, se realizó un estudio sobre el espacio de trabajo y la manipulabilidad del dispositivo robótico para cada ambas configuraciones de muñeca.

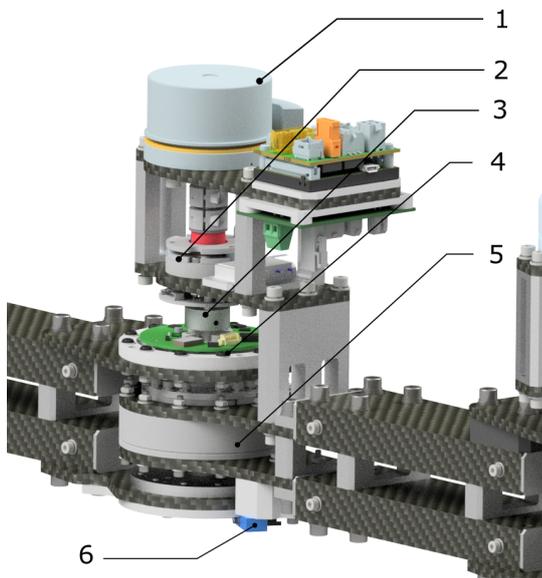


Figura 3: Vista en detalle de la articulación q_3 de uno de los manipuladores del primer prototipo del dispositivo SecondArmS. (1) Motor DC (2) Freno (3) Encoder absoluto multivuelta (4) Sensor de par (5) Reductora armónica (6) Interruptor final de carrera.

2.3. Configuración de la muñeca y espacio de trabajo

Cuando hacemos referencia a la muñeca del dispositivo, hablamos de los últimos 3 GDL del brazo robótico (q_4 , q_5 y q_6).

2.3.1. Resolución de la cinemática directa del manipulador

El primer paso para realizar el estudio es resolver la cinemática directa de los brazos robóticos mediante el método Denavit-Hartenberg (D-H). La resolución de la cinemática directa es esencial para poder calcular el espacio de trabajo y su manipulabilidad. Para ello, se realizan dos modelos simplificados del brazo robótico, uno por cada configuración de muñeca.

Los resultados de la cinemática directa para la muñeca esférica se presentan en la Figura 4 y la Tabla 2, mientras que los resultados de la cinemática directa para la muñeca no esférica se muestran en la Figura 5 y la Tabla 3. Una vez identificados los parámetros D-H podremos obtener las matrices de transformación homogénea (A_i^{i-1}) que permiten resolver la cinemática directa de los mecanismos planteados.

2.3.2. Cálculo del espacio de trabajo

Para el cálculo del espacio de trabajo, será necesario establecer los rangos articulares (Tabla 4). Los rangos articulares de las 3 primeras articulaciones o GDL (q_1 , q_2 y q_3), serán comunes para ambas configuraciones de muñeca, y se restringen buscando la seguridad del usuario. De esta manera, se reducen los riesgos de colisión con el operador. Para los GDL de la muñeca, se busca que los rangos articulares sean equivalentes para poder comparar entre sí las diferentes configuraciones.

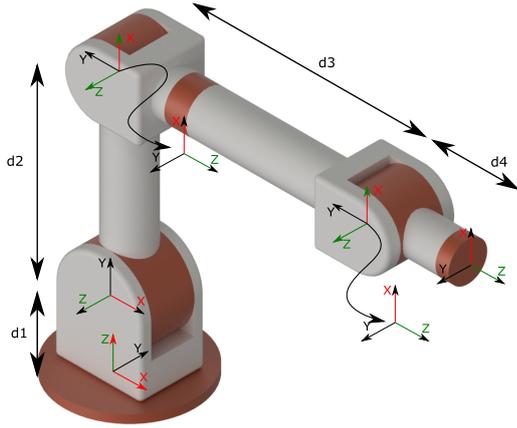


Figura 4: Sistemas de referencia D-H para brazo robótico con muñeca esférica.

Tabla 2: Resolución D-H para brazo robótico de 6 GDL con muñeca esférica.

T	θ	d	a	α
0-1	q_1	d1	0	90°
1-2	$q_2 + 90^\circ$	0	d2	0°
2-3	q_3	0	0	90°
3-4	q_4	d3	0	-90°
4-5	q_5	0	0	90°
5-6	q_6	d4	0	0°

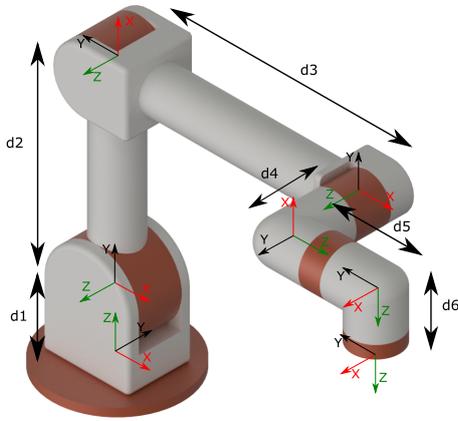


Figura 5: Sistemas de referencia D-H para brazo robótico con muñeca no esférica.

Tabla 3: Resolución D-H para brazo robótico de 6 GDL con muñeca no esférica.

T	θ	d	a	α
0-1	q_1	d1	0	90°
1-2	$q_2 + 90^\circ$	0	d2	0°
2-3	$q_3 - 90^\circ$	0	d3	0°
3-4	$q_4 + 90^\circ$	d4	0	90°
4-5	$q_5 + 90^\circ$	d5	0	-90°
5-6	q_6	d6	0	0°

Otra característica necesaria en el cálculo del espacio de trabajo son las longitudes de los diferentes eslabones. Debido a

que la finalidad de este manipulador es la de asistir a la persona que lleve puesto el dispositivo robótico, este deberá tener un tamaño y alcance similares a los de un brazo humano.

Tabla 4: Rangos articulares para las configuraciones de muñeca esférica y muñeca no esférica.

Muñeca esférica		Muñeca no esférica	
Articulación	Rangos ($^\circ$)	Articulación	Rangos ($^\circ$)
q_1	[-180; 180]	q_1	[-180; 180]
q_2	[-70; 90]	q_2	[-70; 90]
q_3	[-30; 210]	q_3	[-30; 210]
q_4	[-180; 180]	q_4	[-120; 120]
q_5	[-120; 120]	q_5	[-180; 180]
q_6	[-360; 360]	q_6	[-360; 360]

Bajo esta premisa, se restringe que la suma de las longitudes del segundo (d2) y del tercer eslabón (d3) sea de 700 mm (Pheasant and Haslegrave, 2005). De forma preliminar, se ajusta el resto de las longitudes a 100 mm.

El cálculo de los espacios de trabajo se lleva a cabo mediante el método de Monte Carlo (Handschin, 1970). Para el cálculo de los espacios de trabajo, se generan N puntos aleatorios en el espacio articular, dentro del rango especificado para cada articulación, y se resolverá la cinemática directa del brazo manipulador.

Se calculan dos tipos de espacio de trabajo:

- El espacio de trabajo de la muñeca
- El espacio de trabajo alcanzable

Para el cálculo de los puntos alcanzables de la muñeca, se realiza el cálculo de la matriz de transformación A_4^0 que indica la pose del centro de coordenadas de la articulación 4 con respecto al centro de coordenadas de la base, y se define como:

$$A_4^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3 \quad (1)$$

Finalmente, a partir de la definición de la matriz de transformación homogénea, de la matriz A_4^0 podremos extraer la posición de la muñeca T_4^0 .

Los valores q_1 y q_4 se fijan a 0 debido a que se calcula el espacio de trabajo sobre un plano horizontal. Por otro lado, para las articulaciones 2 y 3 se toman valores articulares aleatorios para calcular el espacio de trabajo en el plano, de acuerdo con los rangos especificados en la Tabla 4. El espacio de trabajo de la muñeca en el espacio 3D resultará de aplicar una revolución sobre el eje q_1 del espacio de trabajo en el plano. Con los valores obtenidos, el espacio de trabajo de la muñeca S_W se definirá como la suma de las N posiciones alcanzadas

$$S_W = \sum_{i=0}^N T_4^0(q_1, q_{2,i}, q_{3,i}, q_4) \quad (2)$$

El cálculo del espacio alcanzable de los brazos manipuladores surge del cálculo de la matriz de transformación A_6^0 . De igual forma, se fija el ángulo de la primera articulación a 0 para realizar el cálculo del espacio alcanzable sobre el plano horizontal, y los valores que toman las articulaciones q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 y q_6 de los manipuladores con muñeca esférica y no esférica serán valores aleatorios dentro de los rangos especificados en la Tabla 4. Por tanto, el espacio de trabajo alcanzable S_R para los mecanismos propuestos se define como

$$S_R = \sum_{i=0}^N T_6^0(q_1, q_{2,i}, q_{3,i}, q_{3,i}, q_{5,i}, q_{6,i}) \quad (3)$$

En la Figura 6 se representa los diferentes espacios de trabajo en el plano partiendo de la restricción de que la suma de la longitud de los eslabones d2 y d3 sea igual a 700 mm y se estudian diferentes combinaciones de longitudes para d2 y d3 con el fin de seleccionar la configuración que maximice el alcance delante del usuario. Finalmente, se comprueba que la combinación d2=300 mm y d3=400 mm permite un mayor espacio de trabajo delante del usuario que el resto de las combinaciones estudiadas.

2.3.3. Estudio de la manipulabilidad y de las singularidades

Para el estudio de las diferentes tipologías de muñecas, se decidió realizar un estudio de la manipulabilidad del brazo robótico sobre el espacio de trabajo alcanzable. El estudio de manipulabilidad ha sido previamente estudiado por R. P. Paul (Paul, 1981) y por T. Yoshikawa (Yoshikawa, 1985), en cuyos trabajos se emplea la jacobiana del manipulador como herramienta principal para analizar dicha manipulabilidad.

La Ecuación 4 muestra como la jacobiana del manipulador (J) relaciona las velocidades articulares (q̇) con la velocidad del manipulador (Ẋ) en el espacio cartesiano, donde J se expresa como una matriz MxN, siendo M los GDL de la tarea y N los GDL del manipulador. Por lo tanto, en nuestro caso, la Jacobiana será una matriz cuadrada de 6x6 (Barrientos et al., 2007).

$$\dot{X} = J(q) \cdot \dot{q} \quad (4)$$

T. Yoshikawa propone cuantificar, de forma general, la manipulabilidad de un manipulador (w) como un escalar que se define como se muestra en la Ecuación 5.

$$w = \sqrt{|JxJ^T|} \quad (5)$$

No obstante, para el caso en que se emplee un manipulador no redundante, como es el caso de estos brazos robóticos, la medida de la manipulabilidad se obtiene mediante el cálculo del determinante de la Jacobiana (Ecuación 6).

$$w = |J| \quad (6)$$

Esta magnitud nos permite cuantificar la manipulabilidad de los mecanismos planteados, a la par que permite identificar sobre el espacio de trabajo en qué zonas se concentran las singularidades. Para ello, igual que previamente, se calcula, para una serie de puntos aleatorios en el espacio articular, la cinemática directa del mecanismo, a la vez que se compone la Jacobiana y se calcula w para dicho punto.

La Figura 7 muestra los mapas de manipulabilidad obtenidos para un brazo robótico situado a la izquierda del usuario, con muñeca esférica, representado en la figura superior y con muñeca no esférica, representado en la figura inferior. Las longitudes de los eslabones utilizadas en la simulación son: d2 = 300 mm, d3 = 400 mm y d1, d4, d5 = 100 mm). A la vista de los resultados obtenidos (Figura 7), para ambas cinemáticas de la muñeca, la mayor concentración de singularidades (color rojo) aparecerán en zonas de manipulación poco habituales, como es la parte superior del espacio de trabajo y en la zona lateral del usuario. Además, para la muñeca esférica se observa una mayor concentración de singularidades y zonas de manipulabilidad baja en los límites del espacio de trabajo (cuando los ejes q4 y q6 están alineados) y frente al usuario, zona previsiblemente habitual de manipulación. Por el contrario, emplear una muñeca no esférica evita que aparezcan dichas zonas de manipulabilidad baja y singularidades en zonas de manipulación habituales. Es por ello por lo que la configuración de muñeca no esférica es la que mejor se adapta a las necesidades del sistema robótico SecondArmS.

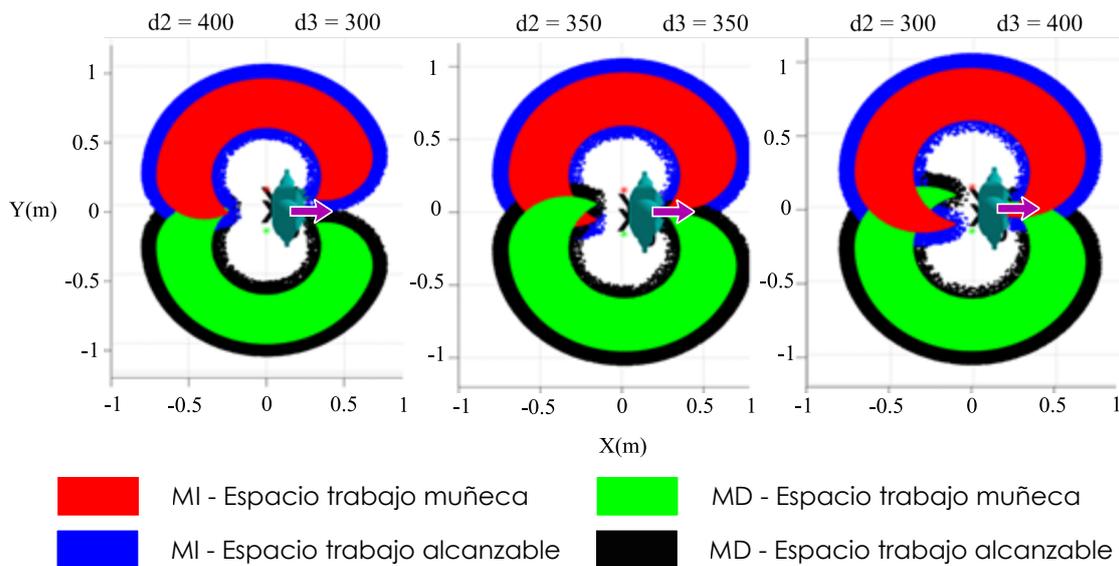


Figura 6: Representación del espacio de trabajo de la muñeca y espacio de trabajo alcanzable de los manipuladores robóticos izquierdo (MI) y derecho (MD) para diferentes longitudes de eslabones d2 y d3. La flecha morada apunta en dirección al área frente al usuario.

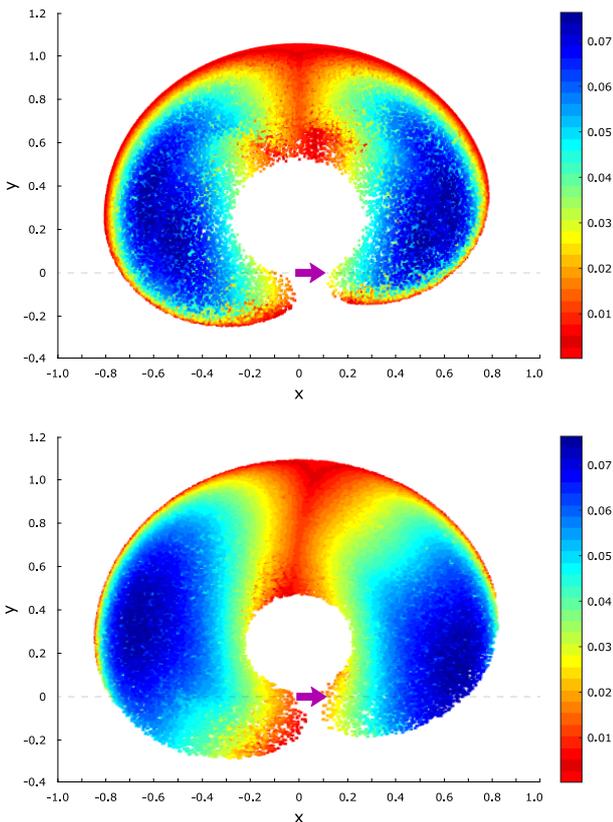


Figura 7: Mapas de manipulabilidad de un brazo robótico con muñeca esférica (arriba) y no esférica (abajo) en un plano horizontal. El valor del escalar w se representa en cada punto del espacio de trabajo, donde los valores más altos (azul) indican alta manipulabilidad y los valores más bajos (rojo) indican menor manipulabilidad. Una flecha morada señala el área frente al usuario.

3. Conclusión

En este estudio se presenta el estado actual del sistema robótico supernumerario SecondArmS y se destacan los aspectos relevantes para su caracterización y aplicación segura. Se analizan los resultados del estudio del espacio de trabajo y la manipulabilidad de brazos robóticos con muñeca esférica y no esférica. Estos resultados respaldan la decisión de diseñar un manipulador de 6 grados de libertad con una configuración de muñeca no esférica, demostrando un nivel adecuado de espacio de trabajo y manipulabilidad, y obteniendo mejores resultados que con una configuración de muñeca esférica.

Agradecimientos

Este estudio ha sido subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) perteneciente al Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del proyecto IDI-20190764 (Cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional. FEDER, una manera de hacer Europa); por el Ministerio de Universidades a través de la beca de Formación de Profesorado Universitario FPU20/05137; y por el Ministerio de Universidades de España y la Unión Europea "financiado por la Unión Europea - Next Generation EU," a través de la beca postdoctoral Margarita Salas para la formación de jóvenes doctores.

Referencias

Almodóvar, A., Galiana, M., Hervás, P., Pinilla, F., De la Orden, M., Dfía, C., et al., 2011. VII encuesta nacional de condiciones de trabajo. Madrid: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

- Barrientos, A., et al., 2007. Fundamentos de robótica. Biblioteca Hernán Malo González.
- Blanco, A., Catalán, J. M., Díez, J. A., García, J. V., Lobato, E., García-Aracil, N., 2019. Electromyography assessment of the assistance provided by an upper-limb exoskeleton in maintenance tasks. *Sensors* 19 (15), 3391.
- Blanco, A., Catalán, J. M., Martínez-Pascual, D., García-Pérez, J. V., García-Aracil, N., 2022. The effect of an active upper-limb exoskeleton on metabolic parameters and muscle activity during a repetitive industrial task. *Ieee Access* 10, 16479–16488.
- Bonilla, B. L., Asada, H. H., 2014. A robot on the shoulder: Coordinated human-wearable robot control using coloured petri nets and partial least squares predictions. In: 2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, pp. 119–125.
- Daniel, P. H., Asada, H. H., 2020. Stable crawling policy for wearable superlimbs attached to a human with tuned impedance. In: 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 3496–3503.
- Dietrich, A., Ott, C., Albu-Schäffer, A., 2015. An overview of null space projections for redundant, torque-controlled robots. *The International Journal of Robotics Research* 34 (11), 1385–1400.
- Handschin, J., 1970. Monte carlo techniques for prediction and filtering of non-linear stochastic processes. *Automatica* 6 (4), 555–563.
- Hussain, I., Anwar, M., Iqbal, Z., Muthusamy, R., Malvezzi, M., Seneviratne, L., Gan, D., Renda, F., Prattichizzo, D., 2019. Design and prototype of supernumerary robotic finger (srf) inspired by fin ray effect for patients suffering from sensorimotor hand impairment. In: 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, pp. 398–403.
- Kobayashi, H., Aida, T., Hashimoto, T., 2009. Muscle suit development and factory application. *International journal of automation technology* 3 (6), 709–715.
- Kosk-Bienko, J., 2009. European agency for safety and health at work (eu-osh) workplace exposure to nanoparticles. Spain: EU-OSHA.
- Kurek, D. A., Asada, H. H., 2017. The mantisbot: Design and impedance control of supernumerary robotic limbs for near-ground work. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 5942–5947.
- Martínez-Pascual, D., Álvarez-Pastor, J., Verdú-García, F. J., Arnau-Papí, M., Lledó Pérez, L. D., López-Labrador, F., Bernal, M. Á., García Aracil, N., 2021. Análisis de planificación de trayectorias libres de colisiones con el operador humano en sistemas robóticos de tipo supernumerario. In: XLII Jornadas de Automática. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, pp. 419–426.
- Parietti, F., Asada, H., 2016. Supernumerary robotic limbs for human body support. *IEEE Transactions on Robotics* 32 (2), 301–311.
- Parietti, F., Asada, H. H., 2014. Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: body stabilization and guidance by bracing. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 1176–1183.
- Parietti, F., Asada, H. H., 2017. Independent, voluntary control of extra robotic limbs. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 5954–5961.
- Parietti, F., Chan, K., Asada, H. H., 2014. Bracing the human body with supernumerary robotic limbs for physical assistance and load reduction. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 141–148.
- Paul, R. P., 1981. Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot manipulators. Richard Paul.
- Pheasant, S., Haslegrave, C. M., 2005. Bodyspace: Anthropometry, ergonomics and the design of work. CRC press.
- Prattichizzo, D., Malvezzi, M., Hussain, I., Salvietti, G., 2014. The sixth-finger: a modular extra-finger to enhance human hand capabilities. In: The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. IEEE, pp. 993–998.
- Salvietti, G., Franco, L., Tschiersky, M., Wolterink, G., Bianchi, M., Bicchi, A., Barontini, F., Catalano, M., Grioli, G., Poggiani, M., et al., 2021. Integration of a passive exoskeleton and a robotic supernumerary finger for grasping compensation in chronic stroke patients: The softpro wearable system. *Frontiers in Robotics and AI* 8, 661354.
- Saraji, M. Y., Sasaki, T., Kunze, K., Minamizawa, K., Inami, M., 2018. Meta-arms: Body remapping using feet-controlled artificial arms. In: Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. pp. 65–74.
- Yoshikawa, T., 1985. Manipulability of robotic mechanisms. *The international journal of Robotics Research* 4 (2), 3–9.