

Jornadas de Automática

Diseño mecánico de un exoesqueleto bimanual para la asistencia en actividades de la vida diaria

Fernández-Irles, C.^{a,*}, Miñano, F.J.^a, Blanco-Ivorra, A.^a, Belmonte-Cerdán, E.^a, Catalán, J.M.^a, García-Aracil, N.^a

^aGrupo de investigación de Robótica e Inteligencia Artificial del Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Avda. de la Universidad, 03202, Elche, España.

To cite this article: 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. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10936>

Resumen

En la actualidad, la robótica de asistencia ha demostrado su potencial como un método para ayudar a personas con déficits motores y/o cognitivos. Con la intención de mejorar la calidad de vida de estos usuarios, nace el proyecto MUNICH. Uno de los objetivos del proyecto MUNICH es el desarrollo de un exoesqueleto bimanual para la asistencia de actividades de la vida diaria, así como tareas de rehabilitación. Partiendo de un diseño anterior desarrollado a partir del proyecto AIDE (Horizonte 2020), en este artículo se presenta un rediseño completo de la estructura para mejorar la robustez del dispositivo, un nuevo sistema de ajuste y colocación del exoesqueleto, y el rediseño de la rotación interna-externa del hombro.

Palabras clave: Ingeniería de rehabilitación y asistencia sanitaria, Tecnología de asistencia e ingeniería de rehabilitación, Tecnología robótica, Mecatrónica, Mecatrónica biomédica

Mechanical design of a bimanual exoskeleton for assistance in daily living activities

Abstract

Currently, assistive robotics has demonstrated its potential as a method to help people with motor and/or cognitive deficits. With the intention of improving the quality of life for these users, the MUNICH project was born. One of the objectives of the MUNICH project is the development of a bimanual exoskeleton to assist with activities of daily living, and rehabilitation tasks. Starting from a previous design developed from the AIDE project (Horizon 2020), this article presents a complete redesign of the structure to improve the robustness of the device, a new system for adjusting and fitting the exoskeleton, and the redesign of the shoulder's internal-external rotation.

Keywords: Rehabilitation engineering and healthcare delivery, Assistive technology and rehabilitation engineering, Robotics technology, Mechatronics, Biomedical Mechatronics

1. Introducción

El envejecimiento de la población y el incremento progresivo de la esperanza de vida de los países desarrollados ha aumentado la incidencia de accidentes cerebrovasculares (ACVs), los cuales afectan a las capacidades motoras y cognitivas de las personas (Izzo et al., 2018), (Pantoni et al., 2009), y lesiones de la médula espinal o del sistema nervioso central, que son las causas más comunes en la edad adulta

(et al., 2012). Estas lesiones suelen provocar un notable deterioro de la calidad de vida (Fares et al., 2021), (Gold, 2012), (Mlinac and Feng, 2016). En este contexto, surgió la robótica de asistencia como una alternativa para ayudar a las personas con discapacidades motoras o cognitivas durante la realización de actividades de la vida diaria (AVDs).

En la literatura ya existen muchos ejemplos de dispositivos robóticos para la asistencia de personas con enfermedades

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

crónicas, los cuales han mostrado buenos resultados a la hora de mejorar la autonomía durante la realización de AVDs (Catalán et al., 2023), (Park et al., 2020). Entre los sistemas robóticos que pueden encontrarse en la literatura para la asistencia durante la realización de AVDs, es común que aparezcan propuestas basadas en el uso de manipuladores externos y exoesqueletos (Frisoli et al., 2022). Estos dispositivos, para ser eficaces, deben incorporar interfaces cognitivas capaces de detectar la intención del usuario con el objetivo de asistir adecuadamente a las acciones que el usuario desee realizar.

Surge así el proyecto MUNICH, que tiene la ambición de impulsar avances en la mejora de las interfaces de usuario para el control de dispositivos de asistencia de tipo exoesqueleto. Como continuación del proyecto europeo AIDE (Adaptive Multimodal Interfaces to Assist Disabled People in Daily Activities, Horizonte 2020), este proyecto se basará en el uso de interfaces multimodales modulares y adaptativas, con el objetivo de adaptar el sistema a las necesidades individuales de cada persona teniendo en cuenta su diversidad funcional y cognitiva (Catalán et al., 2023), (Crea et al., 2018), (Catalán et al., 2021). El proyecto MUNICH tiene como objetivo diseñar un exoesqueleto de brazo bimanual integrado en una silla de ruedas eléctrica para asistir durante la realización de AVDs. Para ello, se va a partir del trabajo realizado en el proyecto europeo AIDE (Adaptive Multimodal Interfaces to Assist Disabled People in Daily Activities, Horizonte 2020) y de la tesis doctoral (Blanco, 2022).

En estudios anteriores, se ha evaluado satisfactoriamente la efectividad en tareas industriales de la última versión del exoesqueleto de miembro superior, obteniendo resultados prometedores que muestran el potencial de este exoesqueleto para su uso en el ámbito de la rehabilitación y la asistencia (Blanco et al., 2020), (Blanco et al., 2022).

Tras analizar estos resultados obtenidos, se ha procedido

a llevar a cabo el rediseño del exoesqueleto de miembro superior que se presenta a lo largo de este trabajo. Esta nueva versión no sólo pretende mejorar la robustez del dispositivo, sino que tiene como objetivo facilitar el ajuste y colocación del exoesqueleto sobre el usuario, así como optimizar su funcionamiento.

2. Diseño Mecánico

2.1. Requisitos

Partiendo del trabajo realizado y la experiencia obtenida en los proyectos mencionados anteriormente, se plantearon a modo de resumen los siguientes requisitos previos:

1. Rediseño de la estructura para mejorar la robustez del dispositivo, manteniendo la distribución de los elementos, así como sus funciones principales.
2. Incorporar un nuevo sistema para mejorar el ajuste y colocación del exoesqueleto.
3. Rediseñar la articulación correspondiente al movimiento de rotación interna/externa del hombro (rI/E), persiguiendo obtener un sistema más compacto y menos intrusivo en el espacio de movimiento.

2.2. Rediseño del exoesqueleto de brazo

En la Figura 1a se muestra la nueva versión del exoesqueleto de brazo en comparación con la versión anterior (Figura 1b). El exoesqueleto asiste activamente 5 grados de libertad (GDLs) correspondientes a la abducción/aducción del hombro (sA/A), la flexión/extension de hombro (sF/E), la rI/E, la flexión/extension de codo (eF/E) y la pronación/supinación de muñeca (wP/S). Además, el exoesqueleto tiene la capacidad de detectar la intención de movimiento del usuario a través de sensores de par en todas sus articulaciones.

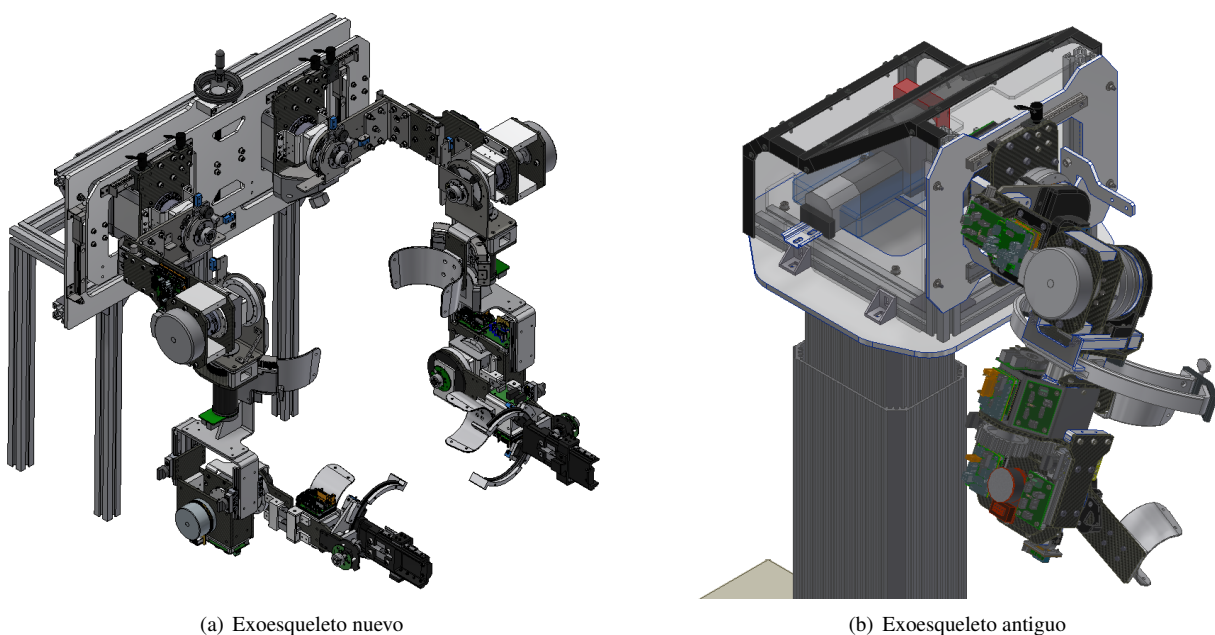


Figura 1: Exoesqueleto de brazo. (a) Diseño del nuevo exoesqueleto de brazo realizado dentro del proyecto MUNICH en comparación con la versión anterior (b), desarrollada en la tesis doctoral (Blanco, 2022) a partir del proyecto europeo AIDE

Tal y como puede observarse en la Figura 1a, se ha mantenido el diseño de los diferentes GDLs. Sin embargo, en cada bloque articular se han utilizado nuevos componentes con el objetivo de mejorar la fiabilidad, robustez, ligereza y el tamaño de cada uno. Para la selección de los componentes, se ha tenido en cuenta el nivel de certificación que ofrece cada uno. Se ha optado por nuevas reductoras de la marca Harmonic Drive, gama CPL, y por sensores de par AIDIN ATS 50.

En la Figura 2 se muestra la sección de la configuración del GDL sA/A. El resto de GDLs del exoesqueleto mantienen una configuración muy similar a los de la versión anterior.

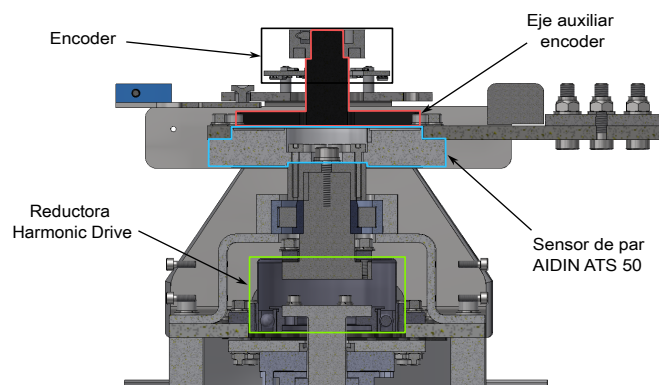
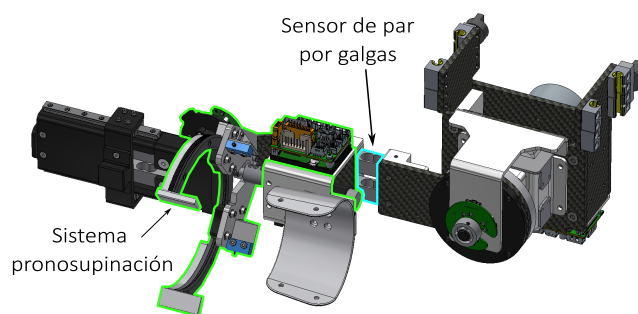


Figura 2: Vista en sección del GDL de sA/A.

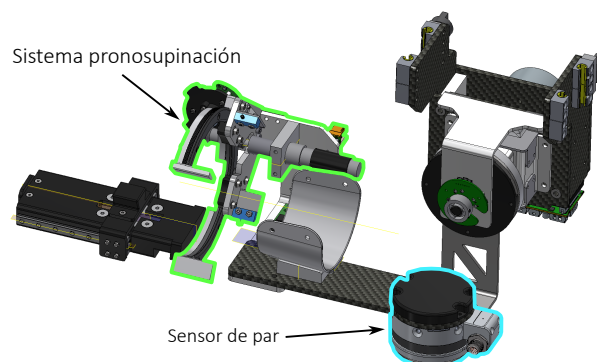
En la versión anterior, se optó por utilizar encoder magnéticos en el extremo de cada eslabón. Los encoders utilizados consistían en un lector que quedaba suspendido muy próximo a un anillo magnético. En este tipo de encoders, la tolerancia durante el montaje a la hora de colocar el lector sobre el anillo magnético es de aproximadamente 0,2 mm, una tolerancia muy baja que no solo dificultaba el montaje, si no que debido a la flexión de cada articulación, sobre todo en aquellas que soportan mayor peso (como los primeros grados de libertad), provocaba que el encoder no funcionara correctamente. En caso extremo, el encoder se llegaba a deteriorar debido a rozaduras entre el lector y el anillo magnético. Esta flexión se encontraba dentro del rango admisible y no suponía un problema estructural del brazo robótico.

En la nueva versión, se ha optado por instalar un encoder fuera del eje principal de actuación que une ambos eslabones, añadiéndose un eje secundario fijado al eslabón, exclusivo para la instalación del encoder (Figura 2). Además, se ha buscado un modelo de encoder con una mayor tolerancia entre los elementos que lo componen, 4mm, con el fin de evitar rozaduras debido a la flexión de la articulación.

Por otro lado, el diseño del GDL del exoesqueleto encargado de la pronosupinación del brazo se ha visto afectado directamente por el diseño de la rI/E. Actualmente se están valorando diferentes alternativas. Entre las distintas opciones para la pronosupinación, se ha optado por incorporar células de carga para medir la interacción con el usuario (Figura 3). Esta opción ya ha sido probada satisfactoriamente en versiones anteriores (Díez et al., 2017).



(a) Versión con células de carga



(b) Versión con sensor de par

Figura 3: Alternativas para medir la intención de movimiento en la rotación interna/externa del hombro. (a) Se emplean células de carga entre wP/S y rI/E. (b) Se emplea un sensor de par entre wP/S y rI/E.

En cuanto a la forma de sensar la rI/E se plantean 2 alternativas (Figura 3). En la primera versión (Figura 3a) se plantea medir la interacción con el usuario en el GDL de la pronosupinación y de la rI/E mediante células. Esta opción tiene como ventajas la liberación de la parte inferior del antebrazo, dejando espacio libre en el lateral para incorporar los diferentes elementos de control, protegiéndolos de las posibles colisiones a la hora de trabajar sobre superficies. Sin embargo, la estimación de la rI/E mediante células de carga podría ser compleja, sobre todo a la hora de discernir entre intención de movimiento y otro tipo de deformaciones.

Por otro lado, se plantea emplear un sensor de par alineado con el eje de rotación de la rI/E (Figura 3b). De esta forma es posible detectar perfectamente la intencionalidad de giro del usuario. Sin embargo, esta posibilidad incrementaría el tamaño del conjunto y cubriría toda la parte inferior del antebrazo.

Actualmente se están sopesando ambos diseños, y aún no se ha llegado a tomar la decisión de optar por ninguna de estas opciones, a la vez que se están buscando mejores alternativas a las dos expuestas.

2.3. Nuevo sistema de ajuste y colocación del exoesqueleto

Para realizar el ajuste y colocación del exoesqueleto, el sistema disponía de un ajuste tanto vertical como horizontal de todo el conjunto con respecto al bastidor del exoesqueleto, como el que se ilustra en la Figura 4a. En este caso el ajuste horizontal se realizaba a través de 2 carriles guía, uno de

los cuales lleva un carro con freno incorporado para fijar el conjunto en la posición de trabajo deseada. Para el ajuste vertical se disponía de una base elevable motorizada a la que se anclaba el conjunto completo.

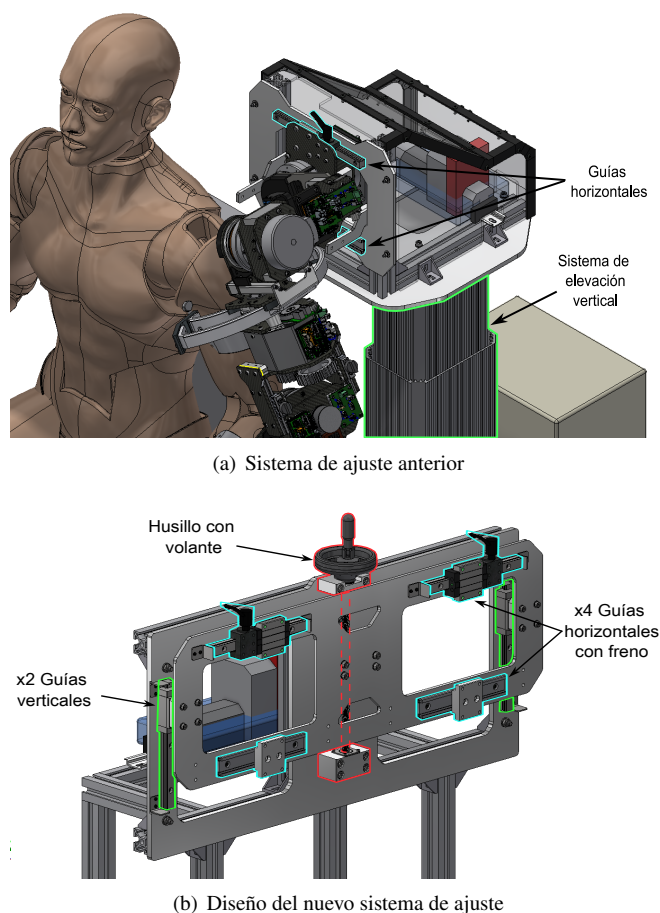


Figura 4: Comparación de los sistema de ajuste y colocación del exoesqueleto de brazo. (a) Sistema de ajuste implementado en la versión anterior (Blanco, 2022). (b) Sistema de ajuste de la nueva versión, junto con el nuevo bastidor principal, capaz de sujetar 2 exoesqueletos de brazo.

Para la nueva versión del dispositivo se ha planteado un rediseño completo del sistema de ajuste, así como del bastidor principal del exoesqueleto, con el fin de disponer de un sistema capaz de soportar 2 exoesqueletos de brazo para la realización de tareas bimanuales (Figura 4b). En esta nueva iteración se ha mantenido el sistema de ajuste horizontal en la base del primer GDL sA/A, pero se ha añadido una estructura de elevación a través de un husillo accionado manualmente por una manivela circular. Este cambio se ha llevado a cabo con el objetivo de facilitar la integración del sistema en una silla de ruedas eléctrica. La nueva estructura dispone de carriles guías ubicados de manera vertical en cada extremo del bastidor. Para la elección del husillo, en este caso de rosca trapezoidal TR10 x 2, se tuvo en cuenta su capacidad de autoretención, con el objetivo de que el sistema se mantuviera a la altura establecida sin peligro de que se cayera por su propio peso.

2.4. Rotación interna-externa de hombro (rI/E)

El diseño del grado de libertad para asistir el movimiento de la rI/E presenta una mayor complejidad tanto desde el punto de vista de la actuación como de la lectura de la interacción del usuario mediante sensores.

En la versión anterior se optó por accionar la articulación mediante un cable de acero enrollado en una polea con ambos extremos anclados a un semiarco fijo (Figura 5). La polea es accionada por el conjunto motoreductor y gira alrededor del semiarco fijo, que tiene como centro el eje de rotación del hombro. En este caso, el sensor de par se encontraba alineado con el eje del motor, pero no con el eje de rotación del hombro. De esta manera, el sensor de par se ubicaba entre el conjunto motoreductor y la reducción entre la polea y el arco.

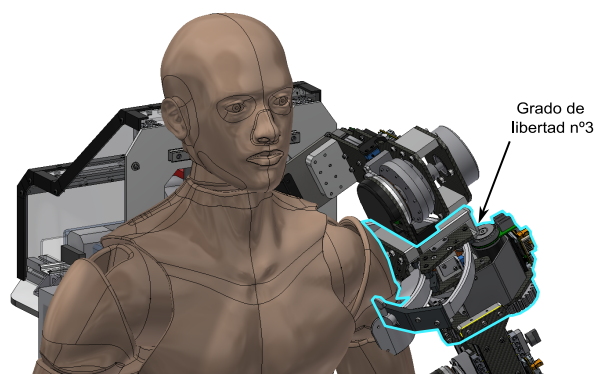


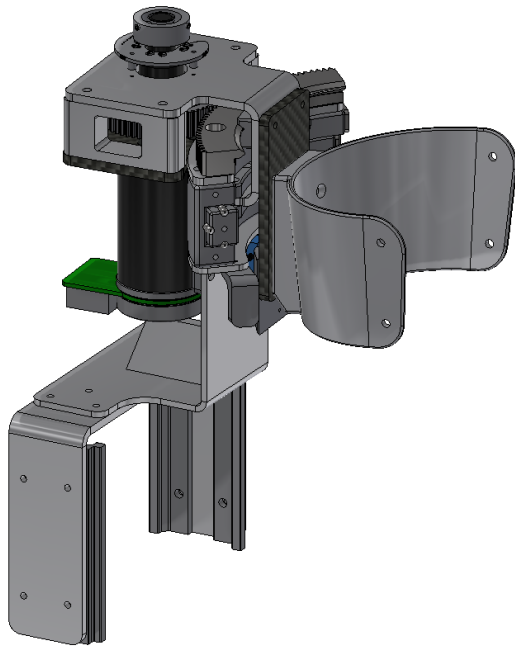
Figura 5: Detalle de la rotación interna-externa del hombro de la versión desarrollada en la tesis doctoral (Blanco, 2022).

En el rediseño de este GDL se ha buscado reducir lo máximo posible el volumen ocupado, ya que anteriormente los semi arcos rígidos utilizaban un considerable espacio. Para ello, se ha diseñado una guía con forma de segmento circular extensible. Este sistema abarca los mismos grados de rotación del modelo anterior, pero ocultándose totalmente cuando se encuentra en posición central. La guía se compone de dos piezas, que al colocar una dentro de la otra, forman diferentes carriles de segmento circular. En estos carriles se añaden un grupo de bolas de acero inoxidable de 4mm de diámetro, asemejándose así al funcionamiento de un rodamiento común. A diferencia de los rodamientos, los carriles tienen un número determinado de bolas de acero inoxidable que no llenan por completo la longitud del carril. Así, y dependiendo de las bolas que se hayan añadido, conseguiremos un mayor o menor grado de apertura, alcanzando su máximo cuando estas no puedan avanzar más y el sistema quede bloqueado. Los carriles disponen de unas tapas a cada extremo que ejercen de tope para las bolas de rodamiento. En la Figura 6 podemos observar el trazado de estos carriles.

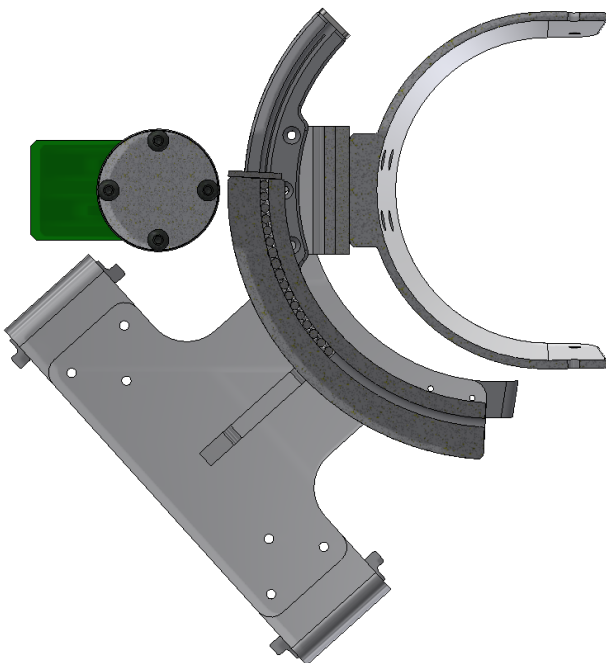
En la parte superior de la guía, se encuentra un semiarco con un dentado de módulo 1 en su parte externa, y una guía triangular en su parte interna. El exterior dentado se engrana con un piñón de 60 dientes, conducido por el motor eléctrico, ofreciendo una reducción de 3:1. Al instalar el sensor de par en la parte inferior del codo (Figura 3a y Figura 3b), fuera del accionamiento de este GDL y evitando etapas de reducción intermedias, se pretende mejorar la lectura de

dicho componente, siendo un punto mejorable en iteraciones anteriores. El conjunto ahora queda más compacto. El encoder se ha colocado en la parte superior, siguiendo la estructura vista en los anteriores GDL (Figura 2).

Para asegurar una buena resistencia estructural del GDL de la rI/E, se ha elegido una chapa plegada de 4mm de aluminio para construir el bastidor de la articulación. En esta chapa, se fija el motor eléctrico junto a el piñón, y todo el sistema de guía telescópica a los que van unidos los posteriores GDLs.



(a) Nuevo sistema de rotación interna/externa del hombro



(b) Detalle guía telescópica

Figura 6: Nuevo diseño de la rotación interna/externa del hombro (rI/E). (a) Imagen en perspectiva del GDL completo. (b) Detalle de la guía telescópica.

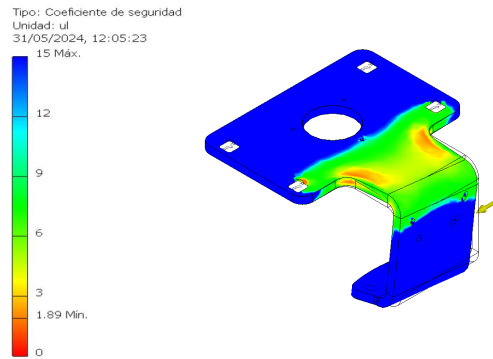


Figura 7: Cálculo de resistencia bastidor del GDL de la rotación interna/externa del hombro (rI/E).

Para la elección de este material, se ha hecho una simulación de los esfuerzos soportados por el bastidor de esta articulación (Figura 7). Para esta simulación, se ha elegido el caso más desfavorable. En este caso, la posición del exoesqueleto con el brazo completamente extendido, donde se le aplica a la pieza una fuerza de 40N correspondiente al peso del extremo del exoesqueleto. En el resultado de la simulación se ha obtenido un coeficiente de seguridad 1,89 (Figura 7). Se ha realizado una segunda simulación en otro punto crítico de posición del brazo con la misma carga de 40N, y el resultado es de 2,32 en el coeficiente de seguridad.

3. Conclusiones

El presente artículo introduce y describe el proceso de diseño de un exoesqueleto bimanual de 5 GDL para la asistencia de personas durante la realización de AVDs.

Partiendo del trabajo realizado y la experiencia obtenida en los proyectos anteriores mencionados (proyecto europeo AIDE, Horizonte 2020, y la tesis doctoral (Blanco, 2022)), se ha trabajado en la optimización y propuestas de mejora del exoesqueleto de brazo empleado, manteniendo la distribución de los elementos, así como sus funciones principales. Además de presentar un rediseño completo de la estructura para mejorar la robustez del dispositivo, se presenta la incorporación de un nuevo sistema de elevación manual para mejorar el ajuste y colocación del exoesqueleto, y un rediseño integral de la rI/E, persiguiendo un sistema menos intrusivo en el espacio de movimiento y más compacto.

Actualmente, el exoesqueleto se encuentra en proceso de fabricación, por lo que todavía no ha sido posible realizar pruebas experimentales para comprobar las mejoras en el desempeño del dispositivo en comparación con la versión anterior. Por otro lado, se está trabajando en el diseño de una silla de ruedas eléctrica que integre el bastidor principal del exoesqueleto y con ello dos exoesqueletos de brazo para poder realizar tareas bimanuales.

Referencias

Blanco, A., March 2022. Diseño y control de un dispositivo robótico modular de tipo exoesqueleto para la asistencia de la extremidad superior. Ph.D. thesis, Universidad Miguel Hernández de Elche, disponible en <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=2124243>.

- 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.
DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3150104
- Blanco, A., Martínez, D., Catalán, J. M., García, J. V., Ezquerro, S., Díez, J. A., García-Aracil, N. M., 2020. Oxygen consumption in industrial tasks assisted by an active upper-limb exoskeleton. In: 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). IEEE, pp. 576–580.
DOI: 10.1109/BioRob49111.2020.9224385
- Catalán, J. M., Trigili, E., Nann, M., Blanco-Ivorra, A., Lauretti, C., Cordella, F., Ivorra, E., Armstrong, E., Crea, S., Alcañiz, M., et al., 2023. Hybrid brain/neural interface and autonomous vision-guided whole-arm exoskeleton control to perform activities of daily living (adls). *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 20 (1), 61.
DOI: 10.1186/s12984-023-01185-w
- Catalán, J. M., Blanco, A., Bertomeu-Motos, A., Garcia-Perez, J. V., Almonacid, M., Puerto, R., Garcia-Aracil, N., 2021. A modular mobile robotic platform to assist people with different degrees of disability. *Applied Sciences* 11 (15).
DOI: 10.3390/app11157130
- Crea, S., Nann, M., Trigili, E., Cordella, F., Baldoni, A., Badesa, F. J., Catalán, J. M., Zollo, L., Vitiello, N., Aracil, N. G., et al., 2018. Feasibility and safety of shared eeg/eog and vision-guided autonomous whole-arm exoskeleton control to perform activities of daily living. *Scientific reports* 8 (1), 1–9.
DOI: 10.1038/s41598-018-29091-5
- Díez, J. A., Blanco, A., Catalán, J. M., Badesa, F. J., Sabater, J. M., García-Aracil, N., 2017. Design of a prono-supination mechanism for activities of daily living. In: *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II: Proceedings of the 3rd International Conference on NeuroRehabilitation (ICNR2016)*, October 18-21, 2016, Segovia, Spain. Springer, pp. 531–535.
DOI: 10.1007/978-3-319-46669-9_88
- et al., J. A. S., 2012. Common values in assessing health outcomes from disease and injury: disability weights measurement study for the global burden of disease study 2010. *The Lancet* 380 (9859), 2129–2143.
DOI: 10.1016/S0140-6736(12)61680-8
- Fares, N., Sherratt, R. S., Elhadj, I. H., 2021. Directing and orienting ict healthcare solutions to address the needs of the aging population. *Healthcare* 9 (2), pMID: 33540510.
DOI: 10.3390/healthcare9020147
- Frisoli, A., Barsotti, M., Sotgiu, E., Lamola, G., Procopio, C., Chisari, C., 2022. A randomized clinical control study on the efficacy of three-dimensional upper limb robotic exoskeleton training in chronic stroke. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 19 (1), 1–14.
DOI: 10.1186/s12984-022-00991-y
- Gold, D. A., 2012. An examination of instrumental activities of daily living assessment in older adults and mild cognitive impairment. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 34 (1), 11–34, pMID: 22053873.
DOI: 10.1080/13803395.2011.614598
- Izzo, C., Carrizzo, A., Alfano, A., Virtuoso, N., Capunzo, M., Calabrese, M., De Simone, E., Sciarretta, S., Frati, G., Oliveti, M., Damato, A., Ambrosio, M., De Caro, F., Remondelli, P., Vecchione, C., 2018. The impact of aging on cardio and cerebrovascular diseases. *International Journal of Molecular Sciences* 19 (2), pMID: 29415476.
DOI: 10.3390/ijms19020481
- Mlinac, M. E., Feng, M. C., 08 2016. Assessment of Activities of Daily Living, Self-Care, and Independence. *Archives of Clinical Neuropsychology* 31 (6), 506–516.
DOI: 10.1093/arcclin/acw049
- Pantoni, L., Poggesi, A., Inzitari, D., 2009. Cognitive decline and dementia related to cerebrovascular diseases: some evidence and concepts. *Cerebrovascular Diseases* 27 (Suppl. 1), 191–196.
DOI: 10.1159/000200459
- Park, D., Hoshi, Y., Mahajan, H. P., Kim, H. K., Erickson, Z., Rogers, W. A., Kemp, C. C., 2020. Active robot-assisted feeding with a general-purpose mobile manipulator: Design, evaluation, and lessons learned. *Robotics and Autonomous Systems* 124, 103344.
DOI: 10.1016/j.robot.2019.103344