

Jornadas de Automática

Diseño de un dispositivo de rehabilitación robótica para la mano en entorno acuático

Miñano, F. Javier^{a,*}, Belmonte-Cerdán, Elías^a, Bernal-Ripoll, Iván^a, Peral-Sempere, Esther^a, Blanco-Ivorra, Andrea^b, Catalán, José M.^a, García-Aracil, Nicolás^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

To cite this article: Miñano, F.J., Belmonte-Cerdán, E., Bernal-Ripoll, I., Peral-Sempere, E., Blanco-Ivorra, A., Catalán, J.M., García-Aracil, N. 2025. Design of a robotic rehabilitation device in an aquatic environment. Jornadas de Automática, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12185>

Resumen

Los trastornos neurológicos como el ictus, la esclerosis múltiple o neuropatías graves afectan gravemente la autonomía y calidad de vida. Aunque las tecnologías de rehabilitación han demostrado un gran potencial, esto no suelen ser aplicables a pacientes con alta severidad, especialmente con altos niveles de espasticidad. La terapia acuática, ha mostrado ser capaz de reducir dicha espasticidad gracias a las propiedades del agua, que facilitan el movimiento y promueven la relajación muscular. En este marco nace el proyecto MIRRA, que propone un enfoque innovador al combinar tecnologías robóticas con los beneficios del medio acuático. Este artículo presenta el diseño mecánico inicial de un nuevo sistema robótico para la rehabilitación de la mano en entorno acuático.

Palabras clave: Mecatrónica, Mecatrónica biomédica, Robótica submarina, Tecnología asistencial e ingeniería de rehabilitación, Tecnología robótica

Design of a robotic rehabilitation device in an aquatic environment.

Abstract

Neurological disorders such as stroke, multiple sclerosis, or severe neuropathies severely impact autonomy and quality of life. Although rehabilitation technologies have shown great potential, they are often not applicable to patients with high severity, particularly those with significant spasticity. Aquatic therapy has proven effective in reducing spasticity, thanks to the properties of water that facilitate movement and promote muscle relaxation. Within this context, the MIRRA project emerges, proposing an innovative approach by combining robotic technologies with the benefits of the aquatic environment. This article presents the initial mechanical design of a new robotic system for hand rehabilitation in an aquatic setting.

Keywords: Mechatronics, Biomedical Mechatronics Underwater robotics, Assistive technology and rehabilitation engineering, Robotics technology

1. Introducción

En Europa, cientos de miles de personas ven profundamente afectada su autonomía y calidad de vida como consecuencia de accidentes cerebrovasculares (ACV), esclerosis múltiple y neuropatías severas (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population

Division, 2022). En los últimos años, se ha demostrado el potencial de la robótica de rehabilitación durante el proceso terapéutico de estos pacientes (Wang et al., 2024; Mehrholz et al., 2020). No obstante, quienes presentan sintomatología más severa suelen ser excluidos de los ensayos clínicos, ya que las soluciones tecnológicas actuales no están adecuadamente

* Autor para correspondencia: autor1@ceautomatica.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

diseñadas para responder a sus necesidades específicas (Kiyono et al., 2024; Zanatta et al., 2022).

Entre los síntomas más limitantes en los trastornos neurológicos graves se encuentra la espasticidad, una condición que compromete la movilidad funcional y deteriora significativamente la calidad de vida de quienes la padecen (Qu et al., 2023). A pesar de su alta prevalencia e impacto clínico, las opciones tecnológicas orientadas a su tratamiento siguen siendo escasas o ineficaces (Forbrigger et al., 2023; Huang et al., 2024).

Dentro del ámbito de la rehabilitación neurológica, la terapia acuática ha emergido como una alternativa prometedora (Palladino et al., 2023; Lozano-Puertas et al., 2018). Las propiedades del medio acuático, como la flotación, la presión hidrostática y la resistencia al movimiento, facilitan la ejecución del ejercicio físico, reducen la espasticidad y favorecen tanto el entrenamiento funcional como la relajación corporal (Xiang et al., 2024).

En este contexto surgió el proyecto MIRRA (PID2022-139957OB-I00). El objetivo principal de este proyecto es estudiar en profundidad los beneficios del agua en la rehabilitación de pacientes con espasticidad. En este artículo se presenta el primer diseño de un sistema robótico subacuático para la rehabilitación de la mano. Este dispositivo sumerge completamente el brazo del usuario en agua. De esta forma, aprovecha el entorno acuático para relajar la musculatura de los pacientes con espasticidad mediante el control de la temperatura del agua y la estimulación por chorros, al mismo tiempo que moviliza de forma independiente el movimiento de los cinco dedos de la mano para realizar tareas de rehabilitación.

2. Sistema robótico

2.1. Descripción general

En la Figura 1 se muestra una descripción del diseño general del dispositivo que se presenta en este artículo.

Tal y como puede apreciarse, el sistema está diseñado para ser utilizado con el usuario sentado en un lateral. Cuenta con un sistema de elevación motorizado para el ajuste de la altura del dispositivo, lo que permite, entre otras cosas, el uso de silla de ruedas en el caso en que fuera necesario. El mecanismo para la flexión-extensión de las falanges de la mano se encuentra dentro de un tanque que estará lleno de agua, manteniendo de esta manera el brazo del usuario sumergido. El dispositivo permite controlar la temperatura del agua del tanque, a la vez que incorpora un sistema de estimulación por chorro integrado en el mecanismo de sujeción del brazo del usuario para estimular los músculos encargados de la flexión y extensión de la mano.

2.2. Mecanismo de flexión-extensión de los dedos

El principal objetivo del dispositivo es movilizar los dedos del usuario de forma independiente. Para ello se ha estudiado de forma experimental la trayectoria que deben seguir los dedos, con el fin de diseñar un mecanismo que permita movilizar los dedos de forma anatómicamente correcta.

Analizando el movimiento de apertura y cierre de la mano sobre una maqueta impresa en 3D con varios usuarios, se observó un pequeño ángulo de inclinación de los dedos índice a meñique durante la flexión y extensión de los dedos. Esta inclinación se reduce cuanto más cerrada se encuentre la mano, es decir, cuando los dedos están más próximos entre sí, dependiendo de la anatomía de cada persona. Teniendo esto en cuenta, realizar trayectorias rectas para movilizar los dedos solo es anatómicamente correcto si se mantienen los dedos relativamente juntos.

Por otro lado, el movimiento del dedo pulgar se ha estudiado de forma independiente, puesto que tiene una configuración diferente, contando únicamente con dos falanges, y además, su movimiento es más complejo que el del resto de dedos, involucrando flexión, abducción y rotación.

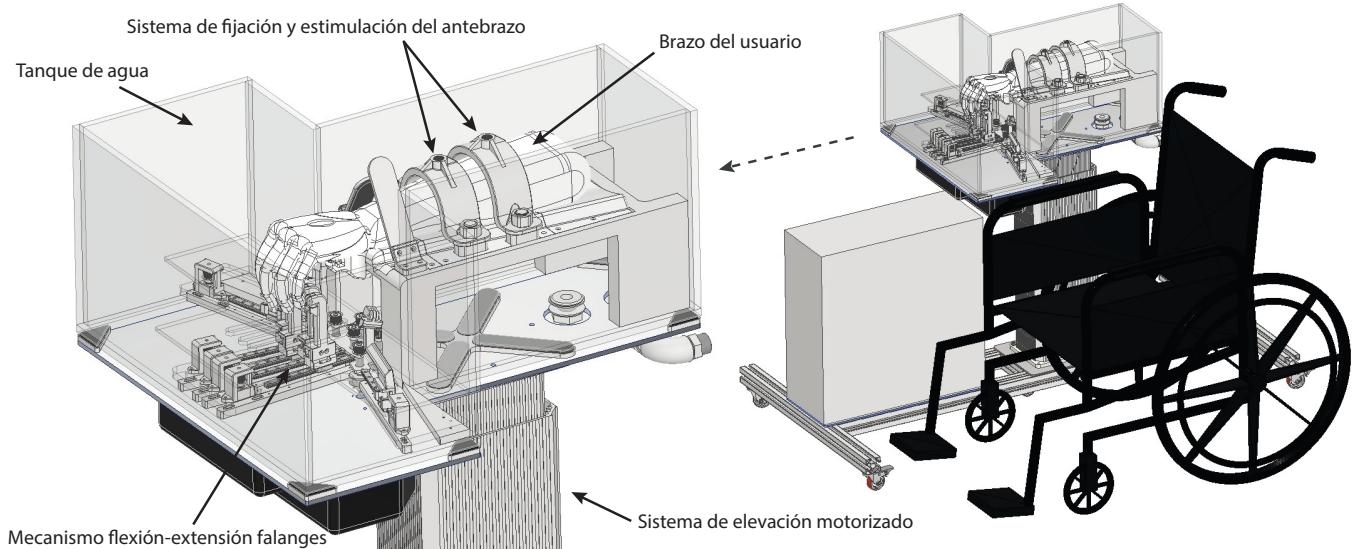


Figura 1: Descripción general de la primera propuesta de diseño de un sistema robótico subacuático para la rehabilitación de la mano

Para realizar el movimiento de apertura y cierre de la mano se transformará el movimiento giratorio de un actuador eléctrico en un movimiento lineal mediante un sistema de polea con correa que desplazará los soportes de los dedos anclados a unos carros sobre unas guías lineales, a modo de deslizaderas. Con el fin de aproximar los dedos entre sí lo máximo posible, se ha empleado una única guía en miniatura de la marca Igus®. Este tipo de guías requieren muy poco mantenimiento, no necesitan lubricante y son aptas para trabajar en entornos sumergidos.

Las poleas que hacen deslizar el soporte de dedo sobre las guías lineales se actúan por un conjunto motor-reductora desde la parte inferior (Figura 2), de forma que la propia plancha de soporte del dispositivo oculta los actuadores, quedando despejada el área de trabajo del paciente y protegiendo la parte electrónica del sistema de golpes y salpicaduras. La correa seleccionada para transmitir el movimiento tiene 2,5 mm de paso, y las poleas comerciales tienen 18 dientes, intentando reducir al mínimo el tamaño de las mismas. Se emplean dos poleas por transmisión, una actuada directamente por el motor y la otra conducida, que servirá además para tensar la correa. Ambas poleas son iguales, por lo que la relación de transmisión entre ellas es 1:1.

La selección de los motores se realizó en función de las necesidades de par que debía cumplir el dispositivo, que será la fuerza necesaria para llevar a cabo la apertura y cierre de la mano. Esta fuerza varía mucho en función de la complejidad y movilidad de cada individuo. Varios estudios indican que la fuerza máxima de agarre en adultos sanos puede variar entre 40 y 60 kg (aproximadamente 400–600 N) lo que implica una fuerza de aproximadamente 80–120 N por dedo siempre que se asuma una distribución uniforme de la fuerza entre los cinco dedos (Cha et al., 2014). Sin embargo, esta asunción no es del todo correcta, ya que otros estudios biomecánicos han demostrado que los dedos medio y anular contribuyen más significativamente a la fuerza de agarre total (Marniemi and Parkki, 1975).

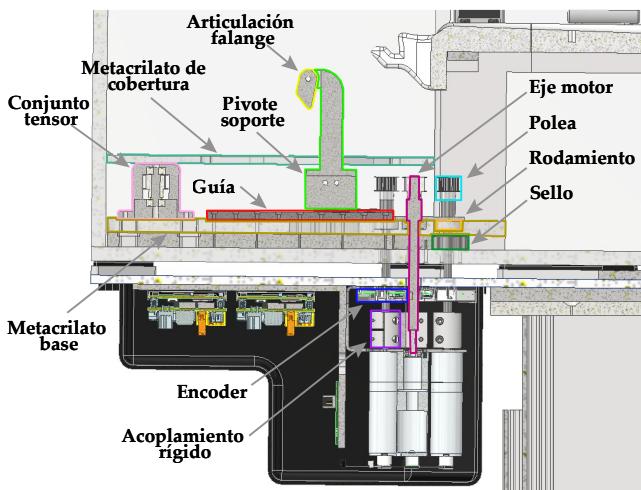


Figura 2: Descripción de los elementos que componen el sistema de transmisión del mecanismo de flexión-extensión de un dedo

Por otro lado, algunos estudios han determinado que las fuerzas individuales de los dedos durante la realización de actividades de la vida diaria pueden variar entre 1 y 41 N, dependiendo de la tareas realizada (Keller et al., 2022). Sin embargo, estos valores reflejan las fuerzas aplicadas en contextos funcionales y no necesariamente representan la capacidad máxima de fuerza de cada dedo. Teniendo en cuenta esta información y diseñando el dispositivo con un margen de seguridad, se toma como requisito que el sistema debe vencer 80 N de empuje, que multiplicada por el radio de la polea motora, da como resultado un par de 0.112 Nm.

En base a estos cálculos, se seleccionaron los actuadores DCX22L de la marca Maxon Motor®, con la reductora GPX22-A de la misma marca, con reducción 26:1, ofreciendo a la salida del conjunto 0.78 Nm.

Para evitar las posibles colisiones entre los distintos elementos que llevan a cabo el movimiento de los dedos, se estableció una distancia entre los centros de las guías lineales de 22 mm, y por tanto, una separación entre los ejes de actuación de las poleas de dicha distancia. Esta aproximación entre ejes de actuación facilita la trayectoria recta de los dedos corazón y anular, siendo insuficiente para los dedos de los extremos, índice y meñique.

Con el objetivo de suavizar la trayectoria y adaptarse mejor al movimiento anatómico de apertura y cierre de la mano, se establece un leve ángulo de 4° entre los dedos de los extremos y los intermedios. Asimismo, se proporciona a la trayectoria del dedo pulgar un ángulo de 15° con respecto a la horizontal (Figura 3).

En la Figura 4 se muestra el soporte de dedo anclado al carro que desliza sobre la guía lineal. En el extremo superior se ha diseñado una pieza sobre la que apoya el dedo, que permite el libre movimiento de la última falange del mismo, dotando al mecanismo de una mayor comodidad para el paciente. Para la sujeción del dedo a la pieza se ha incorporado una pequeña tira de velcro, de forma que el dispositivo se puede poner y quitar de forma rápida y cómoda.

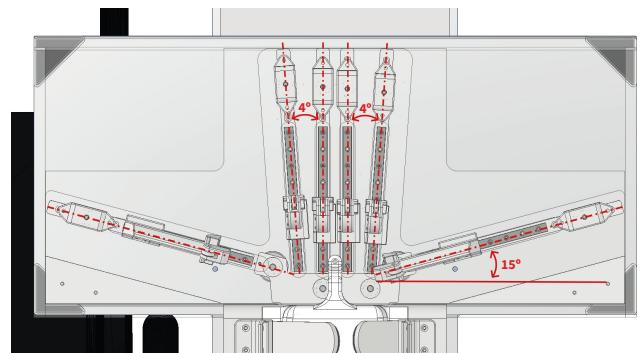


Figura 3: Descripción de la disposición de las guías lineales del mecanismo de flexión-extensión de dedo



Figura 4: Mecanismo de sujeción del dedo con cinta de velcro y articulación pasiva

2.3. Sistema de fijación y estimulación del antebrazo

Para mantener el brazo del usuario en la posición adecuada y totalmente sumergido, se han diseñado unos semiarcos impresos en 3D y forrados interiormente con etilvinilacetato (goma EVA), que es un material hipoalergénico que no se estropea en contacto con el agua y que además evita posibles rozaduras en la piel del paciente. A estas piezas se les han incorporado acoplos que permiten la conexión de latiguillos para conducir agua hacia puntos estratégicos del brazo (Figura 5). Además, se ha incorporado unas cintas de polímero blando TPU a la altura de la muñeca, incorporando unas hebillas en los extremos con correas para tensar el conjunto. Por otro lado, se ha incorporado otro punto de apoyo en la parte inferior de la palma de la mano. Este da soporte a la muñeca para evitar la flexión de la misma cuando se actúa el dispositivo.

También se han realizado los mismos conductos sobre la parte inferior del soporte del brazo con el mismo objetivo, estimular los músculos que intervienen en el movimiento de apertura y cierre de la mano. Además, como se muestra en la Figura 6, se ha diseñado la parte inferior del soporte del brazo de manera que dirija un chorro de agua directamente en la zona palmar de la mano.

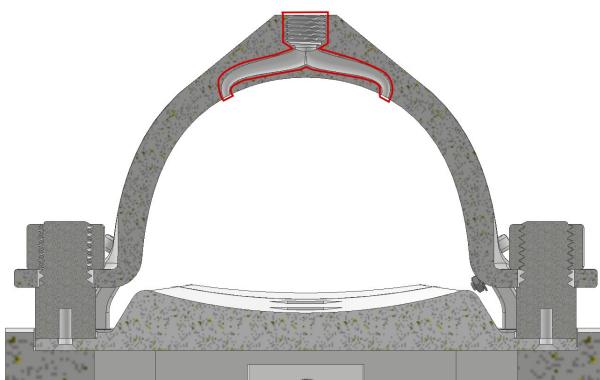


Figura 5: Conducto sobre el sistema de fijación del brazo para llevar a cabo la estimulación por chorro de agua

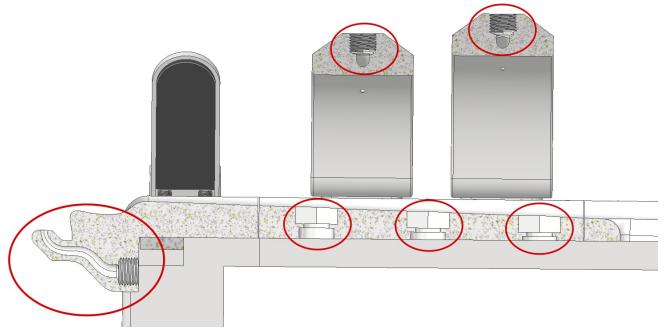


Figura 6: Conductos para la estimulación en la parte inferior del brazo

Todo esto permite la estimulación superficial de los músculos flexor común y extensor común, los cuales son responsables principales de la flexión y extensión de los dedos, respectivamente.

Los semiarcos deben estar fijos al bastidor del sistema durante la sesión de la terapia para evitar desacoplos a causa de movimientos involuntarios del paciente. Sin embargo, es importante que el acople de estas piezas se haga de forma rápida y sencilla, evitando el uso de herramientas por parte del personal que va a llevar a cabo la terapia. Es por ello que se han diseñado una tuercas grandes de plástico que irán apretadas a la base del soporte del brazo.

2.4. Tanque de agua

Para mantener el dispositivo robótico y el brazo del usuario sumergidos en agua, se ha diseñado un recipiente, en adelante *tanque*, que debe permitir la aproximación del paciente al sistema, y el acceso a todos los elementos del mecanismo para su mantenimiento. Se ha dispuesto en forma de "T", lo que permite el movimiento del dedo pulgar en ambas configuraciones, *brazo derecho* o *brazo izquierdo*, colocados sobre la parte ancha, y por otro lado reduce al mínimo el espacio para alojar el brazo del usuario, situado en la parte estrecha.

Se han hecho unos alojamientos para los tubos de llenado y vaciado del tanque en la parte inferior del mismo, así como para transmitir el movimiento de los ejes de los motores, que quedan fuera del tanque, a las poleas que están en su interior. Para reforzar la parte inferior del tanque, se ha diseñado una plancha metálica que soportará el peso del conjunto y lo anclará al sistema de elevación motorizado.

Para dimensionarla, se llevó a cabo un análisis de elementos finitos bajo distintas hipótesis de carga. Teniendo en cuenta el volumen interior del tanque, la densidad del agua y el peso aproximado de los elementos que componen el dispositivo, se estima que la plancha soportará unos 385 kg/m^2 . Con este dato, se realizó una simulación de la pieza suponiendo que es de aluminio, debido a sus propiedades contra la oxidación su bajo peso en comparación con otros materiales como el acero inoxidable.

Se analizó en primer lugar con espesor de la plancha de 6 mm de espesor, y aunque el coeficiente de seguridad era de 3 en el punto más desfavorable, se obtuvieron unas deformaciones elevadas en uno de los extremos. Posteriormente se aumentó el espesor de la plancha a 8 mm, y aunque se observaron deformaciones en la misma parte de la

pieza que en el caso anterior, se consideran aceptables para este diseño. En la Figura 7 se aprecia el resultado tras la simulación de la plancha bajo la carga indicada, donde se ha obtenido una deformación máxima de 2.5 mm en el extremo más ancho de la plancha.

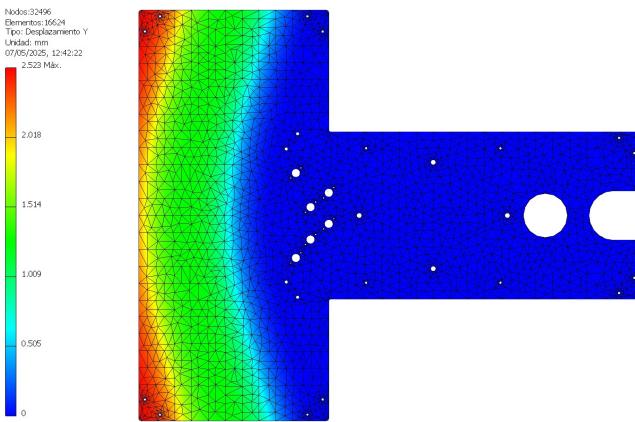


Figura 7: Análisis de deformaciones en la plancha soporte de 8 mm

3. Conclusiones

En este artículo se ha presentado el estado actual del diseño y la fabricación de un nuevo sistema robótico para la rehabilitación de la mano en un entorno acuático. Este sistema, que está siendo desarrollado en el marco del proyecto MIRRA (PID2022-139957OB-I00), aún se encuentra en fase de desarrollo. Actualmente, estamos elaborando diversas maquetas para evaluar distintos aspectos relevantes del dispositivo, tales como la ergonomía, el mecanismo de flexión-extensión de los dedos y el sistema hidráulico encargado de la estimulación y el calentamiento del agua. El objetivo del proyecto es contar, en el próximo año, con un primer prototipo que permita realizar pruebas de viabilidad con sujetos sanos, para posteriormente evaluarlo con pacientes.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por la Conselleria de Educación, Cultura, Universidades y Empleo de la Comunidad Valenciana a través de la ayuda CIPROM/2022/12 y la Agencia Estatal de Investigación a través de los proyectos PDC2022-133622-I00 y PID2022-139957OB-I00.

Referencias

- Cha, S. M., Shin, H. D., Kim, K. C., Park, J. W., 2014. Comparison of grip strength among 6 grip methods. *The Journal of Hand Surgery* 39 (11), 2277–2284.
- Forbrigger, S., DePaul, V. G., Davies, T. C., Morin, E., Hashtrudi-Zaad, K., 2023. Home-based upper limb stroke rehabilitation mechatronics: challenges and opportunities. *BioMedical Engineering OnLine* 22 (1), 67. DOI: 10.1186/s12938-023-01133-8
- Huang, Y., Yang, B., Wong, T. W.-L., Ng, S. S. M., Hu, X., 2024. Personalized robots for long-term telerehabilitation after stroke: a perspective on technological readiness and clinical translation. *Frontiers in Rehabilitation Sciences Volume 4 - 2023*. DOI: 10.3389/fresc.2023.1329927
- Keller, M., Barnes, R., Brandt, C., 2022. Evaluation of grip strength and finger forces while performing activities of daily living. *Occupational Health Southern Africa* 28 (5), 187–191.
- Kiyono, K., Tanabe, S., Hirano, S., Ii, T., Nakagawa, Y., Tan, K., Saitoh, E., Otaka, Y., 2024. Effectiveness of robotic devices for medical rehabilitation: An umbrella review. *Journal of Clinical Medicine* 13 (21). DOI: 10.3390/jcm13216616
- Lozano-Puertas, J., Torres-Sánchez, I., Cabrera-Martos, I., Ortiz-Rubio, A., López-López, L., Valenza, M. C., 2018. Efectividad de la terapia acuática en pacientes con accidente cerebrovascular: una revisión sistemática. *Fisioterapia* 40 (5), 265–272. DOI: 10.1016/j.ft.2018.04.001
- Marniemi, J., Parkki, M. G., 1975. Radiochemical assay of glutathione s-epoxide transferase and its enhancement by phenobarbital in rat liver in vivo. *Biochemical Pharmacology* 24 (17), 1569–1572.
- Mehrholz, J., Pollock, A., Pohl, M., Kugler, J., Elsner, B., 2020. Systematic review with network meta-analysis of randomized controlled trials of robotic-assisted arm training for improving activities of daily living and upper limb function after stroke. *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 17 (83), 1–14. DOI: 10.1186/s12984-020-00715-0
- Palladino, L., Ruotolo, I., Berardi, A., Carlizza, A., Galeoto, G., 2023. Efficacy of aquatic therapy in people with spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis. *Spinal Cord* 61 (6), 317–322. DOI: 10.1038/s41393-023-00892-4
- Qu, P., Wang, H., Wang, W., Du, S., Peng, Z., Hu, Q., Tang, X., 2023. Efficacy and safety of duhuo-jisheng decoction in rheumatoid arthritis: A systematic review and meta-analysis of 42 randomized controlled trials. *Medicine* 102 (44), e35513. DOI: 10.1097/MD.00000000000035513
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022. World population prospects 2022: Summary of results. DESA/POP/2022/TR/NO. 3., isbn: 978-92-1-148373-4.
- Wang, H., Wu, X., Li, Y., Yu, S., 2024. Efficacy of robot-assisted training on upper limb motor function after stroke: A systematic review and network meta-analysis. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*, 100387. DOI: 10.1016/j.arrct.2024.100387
- Xiang, A., Fu, Y., Wang, C., Huang, D., Qi, J., Zhao, R., Wu, L., Fan, C., Zhang, Q., 2024. Aquatic therapy for spastic cerebral palsy: a scoping review. *European Journal of Medical Research* 29 (1), 569. DOI: 10.1186/s40001-024-02171-1
- Zanatta, F., Giardini, A., Pierobon, A., D'Addario, M., Steca, P., 2022. A systematic review on the usability of robotic and virtual reality devices in neuromotor rehabilitation: patients' and healthcare professionals' perspective. *BMC health services research* 22 (1), 523.