

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL DE FUERZA PARA UN ROBOT DE REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR

J.V. García-Pérez, A. Blanco, J.M. Catalán, S. Ezquerro, J. Álvarez-Pastor, M. Arnau-Papí  
N. Garcia-Aracil, Universidad Miguel Hernandez, Instituto de Bioingeniería, j.garciap@umh.es

## Resumen

*El envejecimiento de la población aumentará la incidencia de las enfermedades relacionadas con la edad, como los accidentes cerebrovasculares. La robótica ha demostrado ser efectiva en la aplicación de terapias de rehabilitación a personas que presenten una pérdida de movilidad asociada a estas patologías. Existen numerosos sistemas de control apropiados para la interacción entre robots y pacientes en este tipo de terapias. De entre ellos, en este artículo se propone el uso de campos de potencial de fuerza en un dispositivo robótico de rehabilitación de miembro superior para pacientes que hayan sufrido pérdida de movilidad debido a un accidente cerebrovascular. En la primera parte del artículo se expone la formulación de los campos de potencial y se define el dispositivo robótico en el que han sido implementados. Posteriormente, se plantea una experimentación con sujetos sanos para comprobar la validez de esta estrategia de control. Los resultados muestran una disminución del error en los movimientos de los sujetos y abren la puerta a pruebas posteriores con pacientes reales.*

**Palabras clave:** Robótica de rehabilitación, Sistemas de control, Campos de potencial de fuerza.

## 1 INTRODUCCIÓN

La población mayor de 65 años aumentará a nivel mundial más de un 200% en los próximos años, según datos de la Organización Mundial de la Salud [14]. Esto conllevará un aumento de casos de enfermedades relacionadas con la edad, como los accidentes cerebrovasculares, que pueden provocar, entre otras patologías, una pérdida parcial o total de movilidad en una o varias de las extremidades de quienes los sufren.

Se ha demostrado que ejercicios basados en movimientos voluntarios pueden producir resultados clínicos significativos en la rehabilitación motora [11, 12]. Asimismo, existen numerosos estudios que avalan la eficacia

de la terapia asistida por robots en la recuperación de la función motora en pacientes con este tipo de afecciones [1, 9, 13, 19].

Para lograr los mejores resultados en la terapia de rehabilitación es fundamental mantener al paciente en su nivel óptimo de esfuerzo [5]. Por ello, en sujetos que son capaces de iniciar el movimiento del brazo hacia un objetivo o incluso de realizarlo por completo con ciertas dificultades, interesa que el robot no aplique una asistencia total, sino que ayude a la persona realizando parte del esfuerzo, o bien que le corrija cuando se aleje demasiado del recorrido deseado.

La mayoría de estrategias de control relacionadas con el ámbito de la rehabilitación consisten en la implementación de controles de impedancia [15], si bien existen algunos casos en los que se han empleado campos de potencial de fuerza como alternativa [8, 16]. En este artículo se ha optado por la segunda opción debido a que su implementación resulta más sencilla por no requerir del sensado de las fuerzas de interacción con el usuario.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 SUJETOS

Para comprobar el funcionamiento de los campos de fuerza desarrollados se llevó a cabo una experimentación con 8 usuarios sanos, 7 varones y una mujer, de entre 23 y 45 años ( $28, 25 \pm 7, 23$  años).

### 2.2 DISPOSITIVO ROBÓTICO DE REHABILITACIÓN

Los campos de potencial de fuerza desarrollados en este artículo han sido implementados en el dispositivo robótico de rehabilitación Rubidium, comercializado y distribuido por la empresa iDRhA [10]. Este dispositivo es una plataforma robótica planar de 2 grados de libertad activos, portátil, de tipo escritorio, diseñada para la rehabilitación de miembro superior.

Consiste en un mecanismo en forma de

paralelogramo articulado, accionado por dos motores eléctricos que le permiten aplicar una fuerza máxima en el efector final de 110 N, en un espacio de trabajo acotado por un semicírculo de 410 mm de radio. También dispone de un mando externo que cuenta con una seta de emergencia con la que detener de inmediato todo el sistema en caso de que sea necesario.

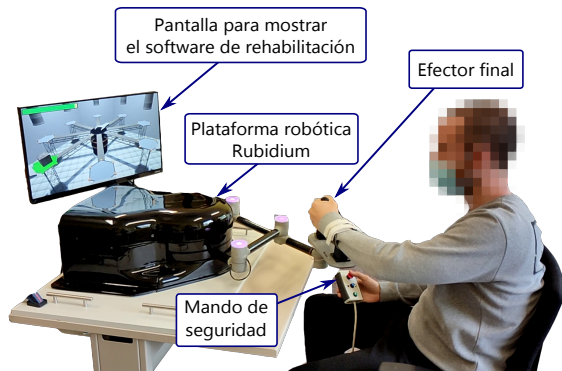


Figura 1: Set-up utilizado para la implementación y validación de los campos de potencial de fuerza

### 2.3 CAMPOS DE FUERZA

#### 2.3.1 Túnel

En este modo de funcionamiento se busca ayudar al usuario a seguir una trayectoria rectilínea. En primer lugar, se genera el recorrido a partir de los puntos inicial y final deseados para, posteriormente, calcular una fuerza perpendicular a éste que atraiga al efector final hacia él y cuya magnitud será proporcional a la distancia entre ambos según la ecuación 1.

$$\|\vec{F}_t\| = F_{m\acute{a}x} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-\delta^2}{2c^2}\right)\right) + F_f \quad (1)$$

donde

- $\|\vec{F}_t\|$  es la magnitud de la fuerza a aplicar
- $F_{m\acute{a}x}$  es la máxima fuerza que puede aplicar el robot
- $\delta$  es la distancia del usuario a la trayectoria
- $c$  es un parámetro que permite ajustar el ancho de la gaussiana
- $F_f$  es una fuerza que se añade para compensar la fricción que pueda presentar el robot

De este modo se genera todo un campo de potencial de fuerzas atractivo, de acuerdo con la Figura 2. En ella se representa la magnitud

de la fuerza aplicada en colores y se muestra la trayectoria con sus puntos inicial y final en color negro.

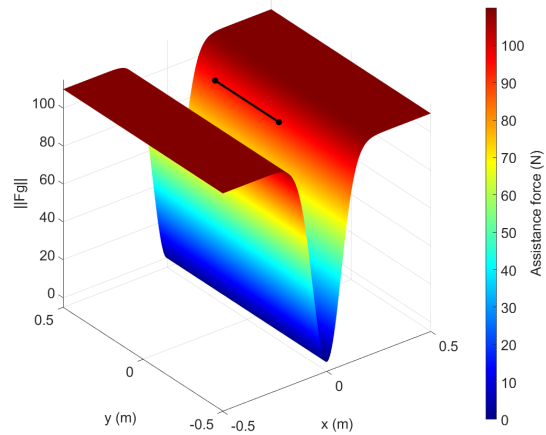


Figura 2: Campo de potencial de fuerza simulando un túnel en torno a una trayectoria rectilínea

#### 2.3.2 Túnel con extremos

Este campo de fuerza es una modificación del túnel en la que se busca evitar que el usuario sobrepase los puntos inicial y final de la trayectoria rectilínea. Para ello, cuando éste se encuentra más allá de alguno de estos puntos se aplica una fuerza calculada de forma análoga a la Ecuación 1.

Todo ello da como resultado un campo de potencial de fuerzas como el de la Figura 3, en la que se muestra en negro la trayectoria con sus puntos inicial y final y la fuerza aplicada es representada mediante una escala de colores.

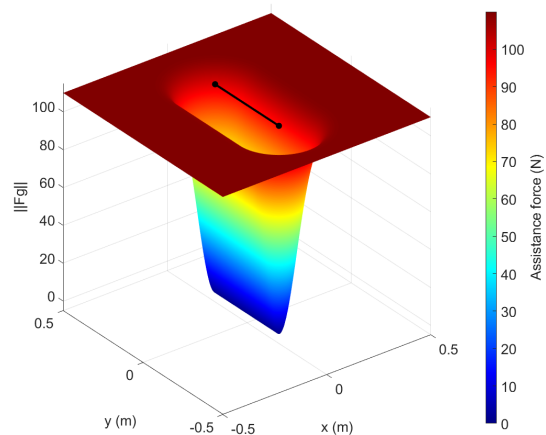


Figura 3: Campo de potencial de fuerza en torno a una trayectoria rectilínea cerrada en sus extremos

## 2.4 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Los participantes debían realizar una de las tareas de rehabilitación del robot Rubidium, que aparece representada en la Figura 4.

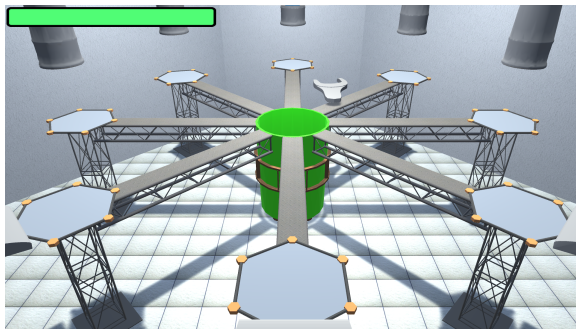


Figura 4: Captura de pantalla del software de rehabilitación utilizado para la validación de los campos de potencial de fuerza

Los sujetos se situaban frente al dispositivo robótico, sobre el cual se dispuso una pantalla que permitía visualizar el software de rehabilitación. A continuación, se les explicaba el funcionamiento del juego y se les colocaba el brazo sobre el robot, agarrando el efector final con su mano tal y como se muestra en la Figura 1.

La posición del efector final del equipo se utilizaba para mover el cursor en el software de rehabilitación, representado mediante una llave fija como la que aparece en la Figura 4.

El juego comenzaba al situar la llave fija en el centro del escenario. Acto seguido, aparecía una caja en una de las plataformas exteriores y se daba un tiempo a la persona para alcanzarla. Una vez se cogía la caja o bien se agotaba el tiempo, se debía volver al centro de la pantalla para repetir el proceso.

Puesto que los sujetos que participaron en la experimentación eran capaces de realizar movimientos rectilíneos sin asistencia, se establecieron ciertas condiciones con la intención de propiciar el fallo y estudiar así si existen diferencias al introducir los campos de potencial de fuerza frente a realizar los movimientos de forma libre.

- Todos los participantes realizaron 3 veces seguidas la misma tarea bajo distintas condiciones. En una ocasión no se aplicaba ningún campo de fuerza, en otra, para cada desplazamiento se añadía un túnel de fuerza y, en la restante, se establecía el túnel de fuerza con extremos entre el centro del escenario y cada objetivo. El orden en el que se aplicaron estas condiciones fue aleatorio

para cada usuario.

- Los campos de fuerza fueron calibrados para aplicar 100 N a 7 cm de distancia a la trayectoria.
- En cada tarea aparecían 8 objetivos siguiendo un orden en sentido horario, comenzando desde el más alejado del usuario.
- Se dejó un descanso entre tareas de un minuto de duración.
- Los participantes utilizaron siempre su mano no hábil y no se podían ayudar con la otra.

La Figura 5 resume el protocolo seguido durante la experimentación.

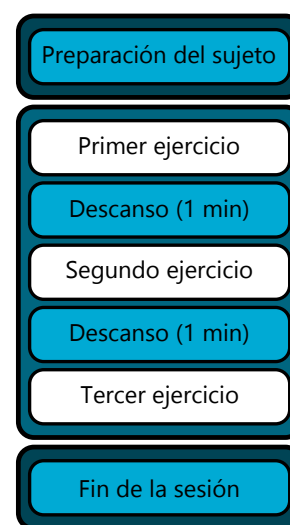


Figura 5: Etapas de la experimentación realizada

## 2.5 DATOS ADQUIRIDOS

Durante toda la sesión el robot registró la posición del efector final, al que está acoplada la mano del usuario, así como la fuerza aplicada debida a los campos de potencial.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 6 muestra la posición de uno de los sujetos del estudio registrada en las diferentes condiciones de asistencia: en rojo, sin campos de potencial o en modo libre (Fig. 6a); en verde, aplicando túneles de fuerza entre el centro de la tarea y los objetivos (Fig. 6b), y en azul, incorporando extremos a estos túneles (Fig. 6c). La trayectoria ideal se representa mediante líneas discontinuas en color negro.

Puede apreciarse cómo la presencia de túneles de fuerza, tanto con extremos como sin ellos, provoca

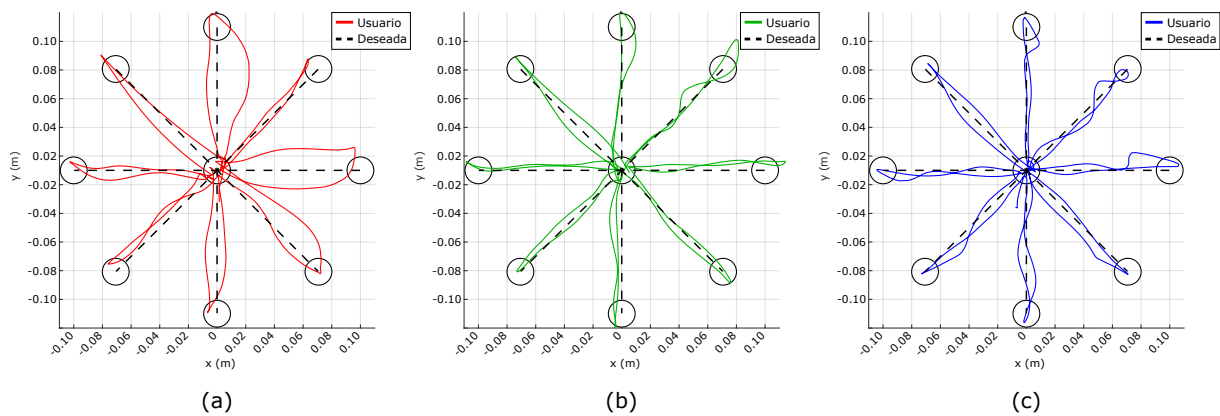


Figura 6: Trayectorias descritas por un usuario bajo diferentes condiciones de asistencia. (a) Rojo: modo libre, sin asistencia. (b) Verde: con túneles de fuerza sin extremos. (c) Azul: con túneles de fuerza con extremos.

que las trayectorias sean más rectilíneas. Por otra parte, el hecho de añadir extremos a los túneles de fuerza impide que se sobrepasen los objetivos, lo que puede resultar interesante en etapas avanzadas de la rehabilitación, en las que se busca que el paciente adquiera una mayor destreza y un control motor más fino.

Para estudiar la efectividad de los campos implementados a la hora de corregir el movimiento del usuario, se ha llevado a cabo el siguiente proceso:

1. Dividir los datos registrados en *trials*, que comprenden el movimiento de ir desde el centro hasta un objetivo y volver.
2. Calcular el error en posición para cada *trial*, entendido como la distancia del usuario hasta la trayectoria deseada en cada instante:  $\epsilon$ .
3. Obtener el valor medio de dicho error:  $\bar{\epsilon}$ .
4. Calcular, para cada usuario, la media de los errores medios anteriores:  $\langle \bar{\epsilon} \rangle$ .

Los errores medios de todos los usuarios han sido representados en el diagrama de la Figura 7, agrupados para las 3 condiciones de la experimentación: sin fuerza, con el túnel y con el túnel con extremos.

Tabla 1: Error en las trayectorias registradas bajo diferentes condiciones de asistencia

Condición	Error en trayectoria (mm)
Modo libre	2,05 (1,81, 2,13)
Túnel de fuerza	1,29 (0,99, 1,65)
Túnel de fuerza con extremos	1,26 (1,05, 1,57)

Nota: Mediana ( $Q_1, Q_3$ )

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos. Al igual que en la Figura 7, se observa que

la mediana de los errores calculados disminuye cuando se aplican campos de fuerza, presentando dispersiones razonablemente similares. Cabe esperar que, en futuras investigaciones con sujetos que sí que presenten dificultades de movimiento, la diferencia entre los errores cometidos con y sin campos de fuerza aumente notablemente.

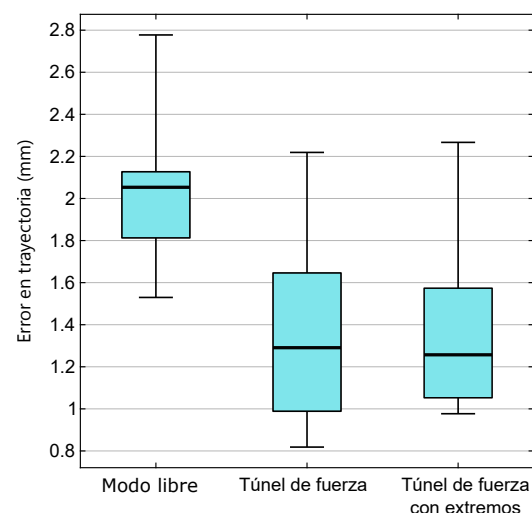


Figura 7: Error en trayectoria de los usuarios en las diferentes condiciones de la experimentación.

## 4 CONCLUSIÓN

En este artículo se ha expuesto la implementación de dos campos de potencial de fuerza, diseñados para ser utilizados en terapias robóticas de rehabilitación. En primer lugar, se ha presentado un campo de fuerza que emula un túnel en torno a una trayectoria rectilínea cuyo objetivo no es ayudar al usuario a efectuar el movimiento, sino guiarlo para evitar que se aleje de dicha trayectoria, así como otro campo que además evita que se sobrepasen sus extremos. A continuación,

se ha planteado una experimentación con 8 sujetos sanos en la que se ha comparado el desempeño durante una tarea de rehabilitación bajo diferentes condiciones: con campos de potencial y sin ellos. Finalmente, los resultados extraídos han permitido demostrar que el error medio en el seguimiento de la trayectoria disminuye significativamente al aplicar campos de potencial de fuerza y abren la puerta a futuras investigaciones con pacientes reales.

#### Agradecimientos

Este estudio ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, perteneciente a la Agencia Estatal de Investigación (AEI), a través de la ayuda PEJ2018-002670-A y de la ayuda PEJ2018-002684-A. (Cofinanciado por el Fondo Social Europeo. FSE invierte en tu futuro), y por la Consellería de Educación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana (GVA), a través de la ayuda ACIF/2018/214 y de la ayuda APOTIP/2020/014.

#### English summary

### DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FORCE CONTROL ALGORITHMS FOR AN UPPER-LIMB REHABILITATION ROBOT

#### Abstract

*The aging of population will increase the incidence of age-related diseases, such as strokes. Robotic devices have proven their effectiveness in rehabilitation therapies for people who have a lack of mobility due to these diseases. There are many different systems to control the robot-human interaction in this type of therapies. This article proposes the use of force potential fields in a robotic upper-limb rehabilitation device for stroke patients. In the first part of the article the formulation of the force potential fields is shown and the robotic device used for the study is presented. Finally, an experimentation with healthy subjects is proposed to check the validity of this control strategy. The results show a decrease in the error in the subjects' movements and open the door to further tests with real patients.*

**Keywords:** Robotic rehabilitation, Control systems, Force potential field.

#### Referencias

- [1] Aisen, M. L., Krebs, H. I., Hogan, N. et al. (1997). The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke. *Archives of neurology*, 54(4), pp. 443-446.
- [2] Badesa, F. J., Morales, R., Garcia-Aracil, N. et al. (2012). Multimodal interfaces to improve therapeutic outcomes in robot-assisted rehabilitation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(6), pp. 1152-1158.
- [3] Catalan, J. M., Garcia, J. V., Lopez, D. et al. (2018). Patient Evaluation of an Upper-Limb Rehabilitation Robotic Device for Home Use. *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)* (pp. 450-455). IEEE.
- [4] Catalán, J. M., Garcia, J. V., Lopez, D. et al. (2018) Evaluation of an upper-limb rehabilitation robotic device for home use from patient perspective. *International Conference on NeuroRehabilitation* (pp. 449-453). Springer, Cham.
- [5] Catalán, J. M., García-Pérez, J. V., Blanco, A. et al. (2021) Differences in Physiological Reactions Due to a Competitive Rehabilitation Game Modality. *Sensors*, 21(11), 3681.
- [6] Clemente, F. J. B. (2014). *Interfaz multimodal y control biocooperativo para sistemas de neuro-rehabilitación asistida por robots*. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández).
- [7] Díaz, I., Catalan, J. M., Badesa, F. J. et al. (2018). Development of a robotic device for post-stroke home tele-rehabilitation. *Advances in Mechanical Engineering*.
- [8] Díez, J. A., Badesa, F. J., Lledó, L. D., et al. (2016). Design and development of a pneumatic robot for neurorehabilitation therapies. *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference* (pp. 315-326). Springer, Cham.
- [9] Fasoli, S. E., Krebs, H. I., Stein, J. et al. (2003). Effects of robotic therapy on motor impairment and recovery in chronic

- stroke. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 84(4), pp. 477-482.
- [10] Innovative Devices for Rehabilitation & Assistance. <https://idrha.es/>
- [11] Jones, T. A., Chu, C. J., Grande, L. A. et al. (1999). Motor skills training enhances lesion-induced structural plasticity in the motor cortex of adult rats. *Journal of Neuroscience*, 19(22), pp. 10153-10163.
- [12] Kempermann, G., van Praag, H., Gage, F. H. (2000). Activity-dependent regulation of neuronal plasticity and self repair. *Progress in brain research*, 127, pp. 35-48.
- [13] Krebs, H. I., Hogan, N., Aisen, M. L., et al. (1996). Robot-Aided[26] MP Ottensmeyer. *Telerobotic surgery: Feedback time delay effects on Neurorehabilitation,* IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol. task assignment," Master's thesis, MIT, Cambridge, MA, 6, pp. 75-87.
- [14] Mackay, J., Mensah, G. A. (2004). *The atlas of heart disease and stroke*. World Health Organization.
- [15] Marchal-Crespo, L., Reinkensmeyer, D. J. (2009). Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 6(1), pp. 1-15.
- [16] Mihelj, M., Nef, T., Riener, R. (2007). A novel paradigm for patient-cooperative control of upper-limb rehabilitation robots. *Advanced Robotics*, pp. 21(8), 843-867.
- [17] Ottenbacher, K. J., Smith, P. M., Illig, S. B. et al. (2004). Trends in length of stay, living setting, functional outcome, and mortality following medical rehabilitation. *Jama*, 292(14), pp. 1687-1695.
- [18] Richards, L., Hanson, C., Wellborn, M. et al. (2008). Driving motor recovery after stroke. *Topics in stroke rehabilitation*, 15(5), pp. 397-411.
- [19] Volpe, B. T., Krebs, H. I., Hogan, N. et al. (1999). Robot training enhanced motor outcome in patients with stroke maintained over 3 years. *Neurology*, 53(8), p 1874.

under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication