

Estrategias de control eficiente en sistemas de rehabilitación motora

Esteban Osella, Luciano Schiaffino, Carolina Tabernig, Sergio Escobar

Autores: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Entre Ríos. Ruta provincial 11 km 10 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

Contacto: esteban.osella@uner.edu.ar

ARK: <http://id.caicyt.gov.ar/ark://1d405ul2a>

Resumen

El área de investigación que combina distintos métodos de rehabilitación para miembro inferior se encuentra en crecimiento. Una estrategia en particular combina el uso de una bicicleta de pedaleo recostado, en conjunto con estimulación eléctrica funcional (FES). En este contexto, la potencia para mover los pedales es generada por la activación del sistema FES sobre distintos grupos musculares. Se han desarrollado diferentes estrategias de control para sistemas de rehabilitación de este tipo donde, en general, la variable controlada es la velocidad angular. En este trabajo presentamos el desarrollo de una bicicleta de pedaleo recostado combinada con FES, con el objeto de desarrollar y probar estrategias de control, haciendo foco en minimizar la incidencia de los efectos de la fatiga temprana. En esta plataforma, se introdujo adicionalmente un motor eléctrico, sensores de fuerza sobre los pedales y un sistema de registro de electromiografía de superficie. Todos estos sistemas han sido implementados en sistemas embebidos.

Palabras clave: Estimulación eléctrica funcional, rehabilitación en pedaleo recostado, CIAA, sistemas embebidos

1. Objetivos propuestos y cumplidos

En el proyecto informado se refirieron inicialmente los siguientes objetivos específicos:

1) Obtener una caracterización del sistema que permita determinar la dinámica de actuación en un dispositivo de rehabilitación híbrido (en particular, bicicleta de pedaleo recostado con EE neuromuscular y asistencia motora) con el objeto del diseño e implementación de estrategias de control que consideren señales fisiológicas en la señal de realimentación.

2) Desarrollar y evaluar estrategias de control para el sistema híbrido de rehabilitación antes descrito, que utilicen información mecánica y fisiológica (como ser la fatiga muscular producida por la EE) para el cálculo de la realimentación.

3) Evaluar las estrategias obtenidas en el contexto de un sistema cooperativo hombre-máquina para la generación de la potencia mecánica involucrada en los sistemas híbridos de pedaleo recostado destinados a rehabilitación y movilidad.

Se considera que se ha cumplido el objetivo 1), en base a la adaptación de un modelo proveniente de [1]. Para ello, se establecieron medidas específicas de la plataforma sobre la que se desarrolló y se realizaron nuevas implementaciones tendientes a mejorar el modo de representación del proceso de fatiga muscular temprana, brindando la posibilidad de ser consideradas al momento del cálculo de la fatiga muscular. Estas adaptaciones quedaron plasmadas en [2].

En cuanto al desarrollo de estrategias de control planteados en el objetivo 2), se implementaron estrategias previamente desarrolladas bajo herramientas de simulación en [2], utilizando los mecanismos de modelado de fatiga expuestos anteriormente. Por otro lado, debido a limitaciones propias de la herramienta de simulación (documentadas en dicho trabajo), los efectos de las pruebas a largo plazo no pudieron ser verificadas, y tampoco pudieron ser implementadas otras estrategias de control propuestas, como las basadas en control predictivo o las estrategias basadas en horizonte móvil.

Finalmente, en lo referente a la implementación planteada en el objetivo 3), se realizó la integración de diferentes dispositivos que permitieron elaborar una plataforma de evaluación de estrategias de control, la cual fue publicada en [3].

2. Marco teórico y metodológico

Existen estrategias de rehabilitación que involucran el uso de dispositivos mecánicos para producir movimientos específicos y controlados en el miembro a rehabilitar. El uso de estos dispositivos tiene múltiples ventajas por sobre los métodos que generan los mismos movimientos únicamente mediados por el terapeuta [4], las cuales van desde los resultados de la terapia de rehabilitación hasta consideraciones comerciales, por mencionar algunas. Ejemplos de este tipo de dispositivos incluyen desde simples articulaciones mecánicas sin actuadores activos, a sistemas complejos de rehabilitación, dispositivos de rehabilitación robótica, o exoesqueletos “vestibles” (*wearables*, en inglés) [5].

Una estrategia terapéutica particular es la generación de contracciones musculares selectivas por medio de la aplicación de corriente eléctrica sobre la placa motora. Este mecanismo es conocido como Estimulación Eléctrica Funcional (FES, por sus siglas en inglés). Cuando se aplica la corriente, se produce un fenómeno de reclutamiento de fibras musculares inverso al fisiológico, generándose primero la contracción de fibras gruesas y de rápida fatiga, antes que la contracción de las fibras finas y resistentes. De este modo,

la señal electromiográfica de superficie resulta en una señal característica denominada onda M [6, 7], distinta a la tradicional onda del sEMG vinculada a la contracción fisiológica.

A pesar del hecho de que la FES tiene más de 50 años de uso en el campo de la rehabilitación clínica y de la investigación, existen aún cuestiones abiertas respecto al fenómeno de aparición temprana de fatiga, producido por el método de reclutamiento alternativo al fisiológico. Se han propuesto muchos métodos para estimar la fatiga a fin de poder contar con una estimación de la capacidad muscular contráctil remanente [8, 9, 10], por medio de herramientas de análisis tanto temporal como frecuencial. El uso de FES a lazo cerrado (esto es, sin considerar la evolución de la fatiga muscular) puede conducir a resultados de rehabilitación pobres, lo cual evidencia la necesidad de ampliar los esfuerzos a realizar en dicha área de investigación [11].

Algunas estrategias de rehabilitación y/o restauración motora combinan dispositivos de rehabilitación robóticos con FES. En particular, para el miembro inferior, existe un área con creciente interés donde se vincula un triciclo de pedaleo recostado con un dispositivo FES, el cual estimula siguiendo un patrón específico con el objetivo de que el paciente produzca el gesto de pedaleo [12, 13, 14].

Algunos de estos dispositivos son frecuentemente instrumentados con un motor eléctrico conectado a los pedales, a fin de asistir a los movimientos del paciente. El uso de estos dispositivos está indicado para producir beneficios cardiovasculares, incrementar la potencia y el tónus muscular, prevenir la rigidez articular o prevenir la retracción de estructuras blandas, por mencionar algunos.

Parte de este proyecto se orientó al desarrollo de experiencias vinculadas a la simulación de la dinámica de este tipo de sistemas en computadora. Estas herramientas permiten la evaluación preliminar *in silico* de los algoritmos a implementar, estimando no solamente su comportamiento sino también evaluando el impacto de su implementación en el sistema embebido donde se ejecutará. En este sentido, se trabajó sobre una plataforma de simulación que integra *OpenSim* con *Matlab*. Esto permite utilizar no solamente distintas estrategias de control, sino también distintos modelos de reacción muscular y la evolución de la fatiga [1].

Si bien existen algunos dispositivos comerciales que realizan terapias de pedaleo producida por FES, existen aún cuestiones abiertas relativas a las estrategias de control involucradas en los patrones de estimulación, la mitigación de los efectos de la fatiga temprana y el uso de los motores eléctricos. Estos aspectos previenen a los investigadores de utilizar estas plataformas cerradas para realizar sus investigaciones en el área, debido al hecho de no tener acceso a las señales registradas ni poder ajustar las acciones de control en tiempo real. Por otro lado, la utilización de plataformas cerradas frecuentemente es reacia a la integración en tiempo real con dispositivos o software de terceras marcas, como sistemas de registro de sEMG, acelerómetros, celdas de carga, etc.

En este proyecto se desarrolló el diseño e implementación de una bicicleta de pedaleo recostado integrada con FES. Involucró el uso de una plataforma abierta para la medición de señales y la integración de las salidas de control del sistema. La plataforma desarrollada es capaz de obtener las medidas de sEMG, la posición angular absoluta del eje de la pedalera y la fuerza normal ejercida por el paciente sobre el pedal. Por otro lado, la plataforma permite señales de salida sobre el sistema FES y para el control de movimiento del motor. Los resultados evidencian que se ha dado una implementación lo suficientemente reducida que permite la inclusión de estrategias de control más complejas en el sistema o la integración con otros sensores.

3. Síntesis de resultados y conclusiones

3.1. Herramientas de simulación

En cuanto al desarrollo de herramientas de simulación, se implementaron mecanismos de modelado de la fatiga a partir del modelo propuesto en [15], sobre la base de simulación de [1].

Estos modelos utilizan pedaleo recostado en combinación con FES y la asistencia de un motor eléctrico, y permiten implementar controladores orientados a mantener cadencia constante. Las modificaciones propuestas por el grupo en términos de los modelos considerados fueron tendientes a considerar los mecanismos de recuperación ante la no activación (o descanso) de los grupos musculares. A la vez, se consideró la utilización de un mecanismo de inhibición a la estimulación para casos en los que el músculo se encuentre totalmente fatigado, en base a un umbral definido por el usuario. Con el fin de evaluar el impacto de estas estrategias, se implementaron estrategias de control PID y se obtuvieron resultados acordes a las modificaciones planteadas, redundando en una mayor acción del motor ante la inacción de los músculos cuando hay carencia de estímulo, pero con un mejor recupero debido al descanso.

Una particularidad que se encontró en la implementación del modelo propuesto por [1] es que las simulaciones tienen un desempeño de acuerdo a lo esperable (en términos de los ángulos articulares y las consignas de velocidad angular) hasta alrededor de los 35 segundos. Luego de ese tiempo, independientemente del modo de control y los parámetros pre-configurados que se utilicen, el comportamiento del sistema resulta errático, sin generar estimulación y aumentando sistemáticamente el error de velocidad calculado. A pesar del análisis realizado sobre el código, no se pudo detectar la fuente de conflicto, pero se estima que, considerando algunas salvedades, los resultados en las simulaciones de hasta 35 segundos pueden ser extrapolados, por lo que la herramienta puede ser tenida en cuenta para futuras aproximaciones. Estos resultados fueron publicados en [2].

3.2. Implementación de la plataforma de ensayos

En lo referente a la implementación de la plataforma de ensayo de estrategias de control, se realizó un montaje a partir de una bicicleta fija de pedaleo recostado de tipo comercial, con capacidad para personas de hasta 120kg de peso. Este dispositivo fue equipado con un motor de corriente continua sin escobillas de 350[W], el cual fue vinculado al eje de la pedalera mediante una polea con una reducción 1:4.7. De momento, este motor funciona mediante su controlador de fábrica (con una entrada analógica al driver de corriente), pero se encuentran en desarrollo trabajos tendientes a reemplazarlo por una placa de desarrollo orientada específicamente al control de motores de esta tecnología (STEVAL-SPIN3202).

La posición absoluta del eje de los pedales es medida mediante un integrado basado en efecto Hall, el A1335 (ALLEGRO MicroSystems, Manchester, NH). Este mide el alineamiento contra un campo magnético externo. Dicha medición es digitalizada a 31[Ksps] con 12 bits de resolución y enviada al controlador central a través del puerto I2C, con protocolo estándar. El campo magnético es generado mediante un imán en el eje de un engranaje de relación 1:1 con el eje de la pedalera.

4. Indicadores de producción

Durante el desarrollo del presente proyecto, los investigadores realizaron diversas publicaciones en revistas indexadas internacionales (13) y diversas presentaciones en congresos nacionales (9) e internacionales (2), y 1 capítulo de libro. Se dictaron 9 cursos de posgrado, se dirigieron 7 tesis de posgrado, 4 pasantes y 7 tesis de grado. Paralelamente, se lograron integrar los distintos periféricos para ser monitoreados y controlados mediante una unidad de cómputo embebido, a partir del desarrollo e integración de drivers diseñados ad-hoc.

Publicaciones con referato:

1. A usability evaluation protocol for an hybrid brain-computer interface aimed at attention-deficit disorder rehabilitation. M. B. Masset, L. C. Carrere and C. B. Tabernig. Aceptado para publicación en Proceeding de IFMBE. Springer, 2022.
2. "Cognitask: BCI system based on P300 for cognitive therapies". F Barreto, C Carrere and Carolina B Tabernig. IEEE Latin America Transactions, febrero 2022, 20(6), 884-890.
<https://latamt.ieeeer9.org/index.php/transactions/article/view/6030>
3. "A new signal source module for BCI2000 interface to an open-source multichannel acquisition system," D. C. Vertiz del Valle, L. Carolina Carrere and C. B. Tabernig, IEEE Explorer 2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC), diciembre 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/RPIC53795.2021.9648493.
4. "A hybrid BCI for neurofeedback-based attention training: design and preliminary evaluation" C. Brigitte Aguilar Gonzales, Augusto Muñoz, Pedro Paulucci Müller, L. Carolina Carrere and Carolina B. Tabernig. IEEE Latin Transaction, diciembre 2021, 20(5)
<https://latamt.ieeeer9.org/index.php/transactions/article/view/5835>
5. Effects of brain-computer interface with functional electrical stimulation for gait rehabilitation in multiple sclerosis patients: preliminary findings in gait speed and event-related desynchronization onset latency". Carrere, L Carolina; Taborda Melisa; Ballario Carlos; Tabernig Carolina. Journal of Neural Engineering. Vol 28, pp 1-12, noviembre 2021 <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac39b8>
6. "Optimization of the KNN Supervised Classification Algorithm as a Support Tool for the Implantation of Deep Brain Stimulators in Patients with Parkinson's Disease". G. M. Bellino, L. Schiaffino, M. Battisti, J. Guerrero, y A. Rosado-Muñoz, Entropy, vol. 21, n.o 4, p. 346, abr. 2019. ISSN 1099-4300. Editorial MDPI. <https://doi.org/10.3390/e21040346>.
7. "Fuzzy Logic as a Control Strategy to Command a Deep Brain Stimulator in Patients with Parkinson Disease". G. M. Bellino, C. R. Ramirez, A. M. Massafra y L. Schiaffino, CLAIB 2019, IFMBE Proceedings 75, pp. 129-137, oct 2019. On line ISSN 1433-9277. Editorial Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30648-9_18
8. "Optimal Fixation Position of Deep Brain Stimulation Electrodes for Parkinson's Disease in Humans". Alfredo Rosado-Muñoz, Juan F. Guerrero-Martinez, Luciano Schiaffino, Manuel Bataller-Mompeán y Antonio Gutiérrez. ISSN 1940087X. Editorial MYJoVE Corporation. <https://www.jove.com/video/60959/optimal-fixation-position-deep-brain-stimulation-electrodes-for>.

9. R. GATTI, Y. ATUM, L. SCHIAFFINO, M. JOCHUMSEN y J. BIURRUN MANRESA “Decoding kinetic features of hand motor preparation from single-trial EEG using convolutional neural networks”. *European Journal of Neuroscience*, agosto 2020. ISSN: 1460-9568. Wiley-Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/ejn.14936>
10. G. M. BELLINO y L. SCHIAFFINO. “Adaptive neuro-fuzzy as a closed-loop model for deep brain stimulation in Parkinson’s disease”. *Revista Argentina de Bioingeniería*, Vol 24(3), pp. 55-60, jun 2020. ISSN 0329-5257. Editorial de la Sociedad Argentina de Bioingeniería. <https://sabi.org.ar/revista/3.2.1-4/index.php/revista/article/view/342>
11. Wireless Functional Electrical Stimulator for Foot Drop: Design and Preliminary Results. Cecilia Molina, Sergio O. Escobar and Carolina B. Tabernig. *Revista Argentina de Bioingeniería*, vol: 23 (3): 40-45, 2020
12. R. Leonardi, M. Ibañez, E. Osella, y J. Heinrich. “Laboratory-scale reproduction of lighting conditions for an outdoor vertical column photobioreactor: Theoretical fundamentals and operation of a programmable LED module”. *Algal Research*. 2021(55). <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102227>
13. Does feedback based on FES-evoked nociceptive withdrawal reflex condition event-related desynchronization? An exploratory study with brain-computer interfaces. Carolina B. Tabernig, L. Carolina Carrere, José Biurrun Manresa y Erika G. Spaich. *Journal Biomedical Physics & Engineering Express*, vol. 7: 1-11, 2021, [doi:10.1088/2057-1976/ac2077](https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac2077)

Libros como co-autor:

1. Brain computer interfaces with functional electrical stimulation for motor neuro-rehabilitation: from research to clinical practice”. Carrere Carolina, Ballario Carlos H., Tabernig Carolina B. En “*Medicine Based Informatics and Engineering*”. pag. 37-49 Eds Bertemes Filho Pedro, Simini Franco, 2022. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-87845-0>

Referencias

- [1] A. C. C. de Sousa, F. M. Ramos, M. C. Narvaez Dorado, L. O. da Fonseca y A. P. Lanari Bó (2016). A Comparative Study on Control Strategies for FES Cycling Using a Detailed Musculoskeletal Model. *IFAC-PapersOnLine*, 49(32), 204–209.
- [2] C. Chaves-Garcia y E. N. Osella (2022). Simulating an alternative fes induced fatigue in a recumbent cycling rehabilitation platform: limitations and perspectives. *International Federation for Medical and Biological Engineering*.
- [3] L. S. Ignacio Riveros y E. N. Osella (2022). Towards an open rehabilitation device using recumbent cycling. *XXIII Congreso Argentino de Bioingeniería y XII Jornadas de Ingeniería Clínica*.
- [4] R. Newport (2006). Ventajas de la rehabilitación asistida mediante robot en la recuperación de las funciones motriz y visuoespacial en pacientes en fase de recuperación de un accidente cerebrovascular. *Revista Española de Geriatria y Gerontología*, 41, 66–73.
- [5] M. Shishehgar, D. Kerr y J. Blake (2018). A systematic review of research into how robotic technology can help older people. *Smart Health*.
- [6] D. Graupe (jul. 1989). EMG pattern analysis for patient-responsive control of FES in paraplegics for walker-supported walking. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 36(7), 711–719.

- [7] M. Levy, J. Mizrahi, Y. Steinvil, Z. Susak y P. Solzi (1990). The time-dependent output of paraplegic's quadriceps muscles activated by FES. *Advances in External Control of Human Extremities*, 555–570.
- [8] N. C. Chesler y W. K. Durfee (mar. 1997). Surface EMG as a fatigue indicator during FES-induced isometric muscle contractions. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 7(1), 27–37.
- [9] M. M. Eken, R. Richards, H. Beckerman, M. van der Krogt, K. Gerrits, M. Rietberg, V. de Groot y M. Heine (feb. 2020). Quantifying muscle fatigue during walking in people with multiple sclerosis. *Clin Biomech*, 72, 94–101.
- [10] P. Karthick, D. M. Ghosh y S. Ramakrishnan (feb. 2018). Surface electromyography based muscle fatigue detection using high-resolution time-frequency methods and machine learning algorithms. *Comput. Methods Programs Biomed*, 154, 45–56.
- [11] J. Naeem, N. A. Hamzaid, A. W. Azman y M. Bijak (abr. 2020). Electrical stimulator with mechanomyography-based real-time monitoring, muscle fatigue detection, and safety shut-off: a pilot study. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 65(4), 461–468.
- [12] M. J. Bellman, R. J. Downey, A. Parikh y W. E. Dixon (2016). Automatic control of cycling induced by functional electrical stimulation with electric motor assistance. *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, 14(2), 1225–1234.
- [13] N. A. Lanese, D. H. Myszka, A. L. Bazler y A. P. Murray (feb. 2022). Six-bar linkage models of a recumbent tricycle mechanism to increase power throughput in FES cycling. *Robotics, Bioingeniería*, 11(1), 26.
- [14] M. Schmoll, R. L. Guillou, C. Fattal y C. A. Coste (abr. 2022). OIDA: An optimal interval detection algorithm for automatized determination of stimulation patterns for FES-cycling in individuals with SCI. *J. NeuroEng. Rehabil*, 19(1).
- [15] N. Wannawas, M. Subramanian y A. A. Faisal (2021). Neuromechanics-based deep reinforcement learning of neurostimulation control in FES cycling. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER, 2021-May*, 381–384.
- [16] E. Filomena y G. Cuenca (2018) Poncho de digitalización de biopotenciales para la educación npx. *Congreso Argentino de Sistemas Embebidos*.
- [17] A. Y. Kallel, Z. Hu y O. Kanoun (ene. 2022). Comparative study of AC signal analysis methods for impedance spectroscopy implementation in embedded systems. *Applied Sciences*, 12(2), 591.
- [18] M. A. Wickert (ago. 2015). Using the arm cortex-m4 and the cmsis-dsp library for teaching real-time dsp. *2015 IEEE SP/SPE, Aug 2015*, 283–288.
- [19] D. S. Reay (may. 2014). Hands-on real-time DSP teaching using inexpensive arm cortex m4 development systems. *IEEE ICASSP. IEEE*.

PID 6193 Denominación del Proyecto
Estrategias de control eficiente en sistemas de rehabilitación motora

Director
Osella, Esteban Nahuel

Codirector
Schiaffino, Luciano

Unidad de Ejecución
Universidad Nacional de Entre Ríos

Dependencia
Facultad de Ingeniería

Contacto
esteban.osella@uner.edu.ar

Cátedra/s, área o disciplina científica
Centro de Ingeniería en Rehabilitación e Investigaciones Neuromusculares y Sensoriales (LIRINS)

Integrantes del proyecto
Docentes: Escobar, Sergio O.; Tabernig, Carolina B. Becario: Riveros, Ignacio

Fechas de iniciación y de finalización efectivas
01/02/2019 y 24/12/2022
Aprobación del Informe Final por Resolución C.S. N° 297/23 (01-09-2023)