

Evaluación cortical de tareas bimanuales para control BCI

Vales, Y.^{a,*}, Barrios, J.A.^b, Rubira-Úbeda, P.^a, Martínez-Pascual, D.^a, Catalán, J.M.^a, García-Aracil, N.^a

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

^b Neuroscience Unit, HLA VistaHermosa Hospital, Alicante, Spain

Resumen

El uso de interfaces cerebro-computadora (BCI) integradas con exoesqueletos robóticos representa una estrategia prometedora para la rehabilitación motora tras una lesión neurológica. Sin embargo, la mayoría de sistemas BCI actuales se centran en el control unimanual, a pesar de que muchas actividades de la vida diaria requieren coordinación bimanual. En este estudio presentamos resultados preliminares del proyecto MUNICH, orientado al desarrollo de un sistema BCI bimanual asistido por exoesqueletos de mano. Se registró la actividad cerebral mediante EEG en cinco participantes sanos durante tareas unimanuales y bimanuales, tanto activas como pasivas, así como en tareas de observación de acciones. Los análisis topográficos revelaron diferencias en la dinámica cortical durante las fases tempranas del movimiento bimanual frente al unimanual, especialmente en la banda beta. Estos hallazgos sugieren patrones diferenciales de preparación motora que podrían aprovecharse para mejorar el control bimanual en sistemas BCI. Este trabajo constituye un primer paso hacia soluciones más personalizadas y funcionales en rehabilitación neurológica.

Palabras clave: Interfaces cerebro-computadora, Rehabilitación neurológica, Coordinación bimanual, Exoesqueletos robóticos, Electroencefalografía, Control motor, Robótica asistiva, Observación de acciones, Procesamiento de señales, Sistemas ciberfísicos

Cortical Evaluation of Bimanual Tasks for BCI Control

Abstract

The integration of brain-computer interfaces (BCI) with robotic exoskeletons offers a promising strategy for motor rehabilitation after neurological injury. However, most current BCI systems focus on unimanual control, despite the fact that many daily activities require bimanual coordination. This study presents preliminary results from the MUNICH project, aimed at developing a bimanual BCI system assisted by hand exoskeletons. EEG activity was recorded in five healthy participants during unimanual and bimanual tasks, including active, passive, and action observation conditions. Topographic analyses revealed differences in cortical dynamics during the early phases of bimanual versus unimanual movement, particularly in the beta frequency band. These findings suggest distinct motor preparation patterns that could be leveraged to enhance bimanual BCI control. This work represents an initial step toward more functional and personalized solutions in neurological rehabilitation.

Keywords: Brain-computer interfaces, Neurological rehabilitation, Bimanual coordination, Robotic exoskeletons, Electroencephalography, Motor control, Assistive robotics, Action observation, Signal processing, Cyber-physical systems

1. Introducción

Las alteraciones en la función motora de los miembros superiores (MMSS) representan una consecuencia frecuente tras una lesión neurológica y constituyen una de las principales causas de discapacidad crónica en la población adulta. Esta afectación implica una reducción significativa de la funcionalidad, derivando en la dependencia durante las actividades de la vida diaria (AVDs) (Steinmetz et al., 2024).

Con el objetivo de potenciar la recuperación motora de los MMSS, numerosos estudios se han enfocado en el desarrollo de estrategias específicas de rehabilitación, incluyendo el uso de tecnologías avanzadas como la rehabilitación robótica. Estos sistemas, inicialmente diseñados para su uso en entornos clínicos, han evolucionado hasta permitir su implementación en el domicilio del paciente, tanto con fines terapéuticos como asistenciales. Sin embargo, todavía es un reto adaptar estos sistemas a las necesidades del paciente (Crea et al., 2018).

*Autor para correspondencia: yvales@umh.es

Uno de los avances tecnológicos más prometedores tanto en el ámbito de la rehabilitación como en el de asistencia, es la integración de los sistemas Brain-Computer Interface (BCI) con exoesqueletos robotizados. Los sistemas BCI permiten registrar y traducir la actividad cerebral en comandos que posibilitan el control de dispositivos periféricos por parte del usuario. Esta combinación establece un circuito cerrado de retroalimentación entre el cerebro lesionado y el dispositivo robótico, promoviendo así la recuperación funcional y la interacción activa con el entorno.

Para facilitar su uso, es común registrar las señales cerebrales mediante métodos no invasivos como la electroencefalografía (EEG), permitiendo un control intuitivo de un exoesqueleto de mano (Soekadar et al., 2011). Asimismo, la monitorización de los cambios neurofisiológicos mediante el análisis cuantitativo de la EEG junto con el uso de exoesqueletos de mano, ha proporcionado información valiosa sobre los mecanismos implicados en la recuperación del ictus (Vales et al., 2024; Zhang et al., 2025).

Sin embargo, las AVDs suelen requerir movimientos coordinados y sincronizados que involucren ambos MMSS, es decir, un control bimanual. En el ámbito de rehabilitación el entrenamiento bimanual resulta especialmente eficaz, ya que no solo mejora el rendimiento en tareas bimanuales sino que también beneficia la ejecución motora unimanual, debido al fortalecimiento de las vías de comunicación interhemisféricas (Cauraugh et al., 2010).

No obstante, a pesar del entrenamiento bimanual en neurorrehabilitación, y la necesidad del uso de los dos miembros en las AVDs la investigación de los sistemas BCI con un control bimanual continúa siendo limitada (Tantawanich et al., 2025). Esta brecha evidencia la necesidad de desarrollar enfoques que integren la coordinación bimanual en las estrategias de control neuronal de dispositivos robóticos.

El proyecto MUNICH (referencia PLEC2022-009424) tiene como objetivo mejorar los sistemas BCI actuales mediante el desarrollo de un control bimanual coordinado de dos exoesqueletos de brazo-mano. Pretende facilitar una interacción natural con el entorno, especialmente en el ámbito doméstico. El sistema incorporará además señales de electrooculografía (EOG) y electromiografía (EMG) como apoyo para la detección y corrección de errores.

Como fase inicial, MUNICH se centrará en analizar la actividad cortical registrada mediante EEG durante tareas motoras unimanuales y bimanuales, con el fin de comprender los mecanismos cerebrales implicados en la ejecución de AVDs.

En este contexto, este estudio presenta los datos preliminares obtenidos mediante EEG en 5 personas sin discapacidad, con el objetivo de explorar las oscilaciones corticales asociadas a tareas bimanuales en comparación con unimanuales, en diferentes condiciones: movimientos voluntarios y movimientos asistidos por exoesqueletos de mano. De esta manera se pretende avanzar en la comprensión de los mecanismos cerebrales implicados en la coordinación bimanual frente a la unimanual, con el fin de aproximarse al desarrollo de un sistema BCI bimanual funcional.

2. Material y métodos

2.1. Población del estudio

El estudio se ha desarrollado en el Instituto de Bioingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche (Alicante, España). Participaron 5 adultos varones sanos, sin antecedentes de lesiones neurológicas ni discapacidad física. Las edades de los participantes oscilaron entre los 21 y 33 años (media $26,4 \pm 4,98$ años). Todos los participantes eran diestros.

Previamente al inicio del estudio, todos los participantes fueron informados sobre el procedimiento experimental, y firmaron el correspondiente consentimiento informado.

2.2. Montaje experimental

El estudio se desarrolló en una sala silenciosa, acondicionada para reducir al mínimo posibles distracciones visuales y auditivas. Tal y como se muestra en la Figura 1, los participantes permanecieron en posición de sedestación frente a una mesa, sobre la cual se colocó un monitor para la presentación de las instrucciones necesarias para la ejecución de las tareas.

Sobre la mesa se situaron dos exoesqueletos de mano Helium, comercializados y distribuidos por la spin-off iDRhA (iDRhA, 2019; Díez et al., 2018). Estos dispositivos fueron los encargados de asistir el movimiento de los dedos durante las tareas pasivas, generando de forma controlada la apertura y el cierre de la mano. Los exoesqueletos fueron ajustados a las dimensiones y anatomía de cada participante, adaptando tanto la longitud de cada dedo como el grosor de las anillas de agarre, con el fin de facilitar un movimiento cómodo y natural de toda la mano.

La actividad cortical cerebral fue registrada durante toda la sesión mediante un casco EEG BrainVision® Liveamp de 32 electrodos, colocados según el Sistema Internacional 10/20.

2.3. Protocolo del estudio

El estudio se llevó a cabo en una única sesión experimental, con una duración aproximada de una hora. Las actividades realizadas estuvieron compuestas por una secuencia de tareas, distribuidas de forma aleatoria. Las posibles tareas fueron las siguientes:

- **RELAX:** Sin movimiento; se indicó al participante que mantuviera la atención centrada en una actividad mental relajante.
- **DERECHA:** Apertura y cierre de la mano derecha.
- **IZQUIERDA:** Apertura y cierre de la mano izquierda.
- **JUNTAS:** Movimiento simultáneo de ambas manos.
- **ALTERNANDO:** Abrir y cerrar de forma alterna ambas manos, evitando moverlas simultáneamente.

La Figura 2 muestra la secuencia temporal que compone cada tarea. Cada una inicia con la presentación del símbolo “O” durante 1 segundo, como señal preparatoria. A continuación, se mostró en pantalla la instrucción correspondiente a una de las tareas anterior durante 3 segundos. Finalmente, se presentó un periodo de reposo de 3 segundos, representado mediante el

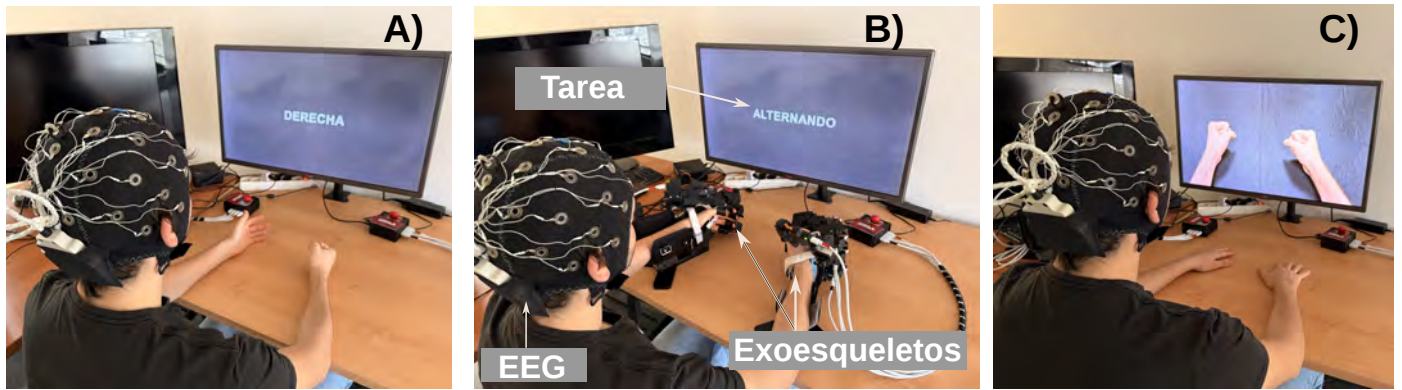


Figura 1: **Montaje experimental en los tres tipos de actividades.** (A) Activa. El participante ejecuta con movimiento voluntario la tarea indicada en la pantalla. (B) Pasiva. Los exoesqueletos movilizan las manos según las instrucciones, sin intervención activa del participante. (C) Observación de acciones (AO). El participante observa un vídeo que muestra la ejecución de las distintas tareas motoras sin realizar ningún movimiento.

símbolo “+”, antes del inicio de la siguiente tarea. Cada tarea se repitió 10 veces dentro de la actividad correspondiente.

A continuación, se describen las actividades compuestas por las diferentes tareas:

- *Unimanual derecha.* Alternancia entre RELAX y DERECHA.
- *Unimanual izquierda.* Alternancia entre RELAX e IZQUIERDA.
- *Bimanual:* Incluyeron las tareas de RELAX, JUNTAS y ALTERNANDO.
- *Variada* Presentación de las cinco instrucciones (RELAX, DERECHA, IZQUIERDA, JUNTAS y ALTERNANDO).

Las actividades se desarrollaron bajo dos condiciones experimentales diferenciadas según el modo de ejecución. En la condición **Activa** los participantes ejecutaron voluntariamente los movimientos. En la condición **Pasiva**, los mismos movimientos fueron asistidos mediante uno o dos exoesqueletos de mano, sin implicación motora activa del sujeto. La combinación de ambas condiciones dieron lugar a un total de 8 actividades.

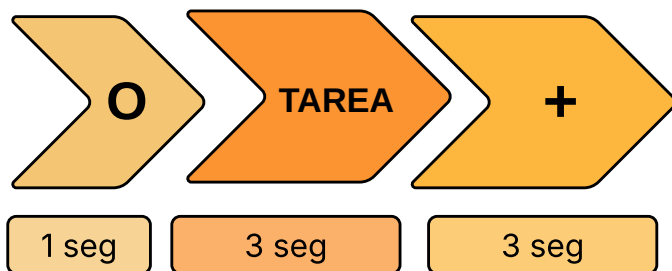


Figura 2: **Estructura completa de una tarea.** Cada tarea se compone de tres fases: una fase de preparación, indicada con el símbolo “O” mostrado durante 1 segundo; la presentación de la tarea motora correspondiente durante 3 segundos; y un periodo de descanso, representado con un símbolo “+”, de 3 segundos, antes de la siguiente tarea.

Adicionalmente, se incluyó una novena actividad correspondiente a la condición de observación de acciones **AO**, en la que los participantes observaron vídeos con escenas reales que mostraban la ejecución de las tareas motoras de la actividad *Variada*. Las imágenes, realizadas desde una perspectiva egocéntrica, simulaban el punto de vista del propio participante respecto a sus extremidades superiores. Estos vídeos sustituyeron las instrucciones escritas y mostraban la realización de las distintas tareas motoras, mientras que los participantes debían observar atentamente sin ejecutar ningún movimiento.

2.4. Análisis de los datos EEG

Para la adquisición de señales EEG durante la ejecución de las actividades experimentales se empleó el software BCI2000 (Schalk et al., 2004), ampliamente utilizado en investigaciones basadas en sistemas BCI. Durante toda la sesión, los participantes realizaron las tareas motoras descritas, mientras su actividad cerebral era monitorizada y registrada de forma continua.

Las señales EEG adquiridas fueron sometidas a varios pasos de procesamiento con el objetivo de garantizar la calidad de los datos y eliminar artefactos. Este proceso se realizó utilizando EEGLAB (version 2023.1) y scripts personalizados desarrollados en Matlab® R2018B.

La señal fue muestreada a 500Hz, con un filtro paso de banda entre 0,1 – 40 Hz. Posteriormente, los datos fueron remuestreados a 128 Hz para facilitar su análisis.

Las señales fueron inspeccionadas visualmente para identificar y descartar ensayos contaminados por artefactos, como actividad muscular, movimientos oculares, parpadeos o ruido específico de canales. Para separar de forma más precisa las fuentes neuronales de las no neuronales, se aplicó un análisis de componentes independientes (ICA).

Tras la eliminación de artefactos, se seleccionaron las épocas correspondientes a las tareas experimentales específicas. Los ensayos fueron clasificados según el tipo de actividad, y únicamente se conservaron aquellos que cumplieran con los criterios de calidad establecidos.

Cada época tuvo una duración total de 7 segundos: 1 segundo de preparación, 3 segundos correspondientes a la

ejecución de la tarea y 3 segundos posteriores. El tiempo cero fue alineado con el inicio de la instrucción motora, abarcando un rango temporal de 0 a 3 segundos. Este procedimiento garantizó una cobertura temporal adecuada para el análisis de los fenómenos neuronales asociados a las tareas.

3. Resultados

3.1. Diferencias topográficas entre tareas unilateral y bilateral

Para explorar posibles diferencias en la organización cortical, se unificaron las actividades activas y pasivas, clasificándolas entre tareas unilaterales (DERECHA/IZQUIERDA) y bilaterales (JUNTAS/ALTERNANDO). A continuación, se compararon los mapas topográficos promediados de ambas condiciones en dos ventanas temporales relevantes: una fase inicial (0–500 ms desde el inicio del movimiento) y una fase estable (900–2900 ms) (Figura 3).

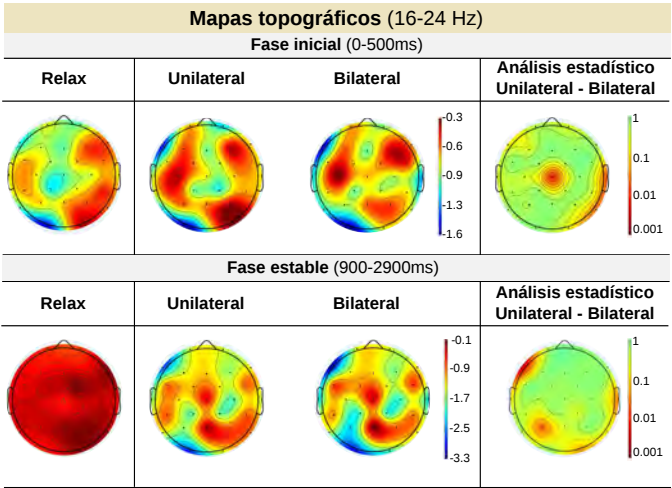


Figura 3: Mapas topográficos de la actividad EEG y análisis estadístico entre las tareas motoras unilaterales y bilaterales de las actividades activas y pasivas. Se muestran los mapas en banda beta (16-24 Hz) en las tareas de Relax, movimiento Unilateral y Bilateral durante el inicio de movimiento (0-500 ms tras la presentación de la instrucción) y fase estable (900-2900ms). En la última columna podemos ver las diferencias significativas entre las tareas unilaterales y bilaterales en cada fase, $p\text{-value}=0.05$.

Durante la fase inicial, se observaron patrones diferenciados entre ambas tareas. En la condición unilateral (Movimiento de mano derecha o mano izquierda, con el EEG durante la tarea de mano derecha previamente volteado para homogeneizar la lateralidad), la activación se concentró predominantemente en regiones centrales del hemisferio derecho y en la línea media. En contraste, la condición bilateral mostró una distribución más simétrica y extendida, con activación en ambos hemisferios. Este patrón fue respaldado por el análisis estadístico de diferencias punto a punto, que reveló diferencias significativas entre las condiciones en los electrodos centro-mediales (Cz).

En cambio, durante la fase estable del movimiento (900–2900 ms), los mapas topográficos resultaron notablemente similares entre tareas. La activación se mantuvo distribuida en la línea media y regiones centrales, sin diferencias aparentes en la lateralidad o extensión. El análisis

estadístico en esta ventana solo arrojó un punto significativo en región parietal izquierda, sin formar un cluster extenso, lo que sugiere que las tareas comparten un patrón cortical común una vez iniciado y estabilizado el movimiento.

Los resultados apoyan la idea de que las diferencias funcionales entre tareas motrices unilateral y bilateral se reflejan principalmente durante las fases tempranas de preparación o inicio del movimiento, mientras que las fases de ejecución sostenida presentan patrones de activación muy similares. Cabe destacar que, aunque las técnicas utilizadas permiten una comparación robusta en el dominio espacial-temporal, el uso de métodos más sensibles como análisis de conectividad o redes neuronales podría revelar diferencias más sutiles en la dinámica funcional de ambas condiciones.

No obstante, estos hallazgos deben considerarse preliminares, ya que el estudio se encuentra en su fase inicial. En esta etapa, debido al número reducido de participantes ha sido necesario agrupar las tareas activas y pasivas, sin realizar una distinción entre ellas ni incluir de forma diferenciada la tarea de AO. Aunque los datos preliminares sugieren la posible existencia de diferencias en esta última, el escaso tamaño muestral impide extraer conclusiones más detalladas. Actualmente este estudio continúa en desarrollo con la incorporación de un mayor número de participantes y con la aplicación de análisis más exhaustivos. El incremento en la muestra permitirá realizar comparaciones más detalladas entre las tareas y los distintos tipos de actividades, mejorando así la especificidad de los resultados.

4. Conclusiones

Este estudio presenta resultados preliminares sobre la actividad cortical asociada a tareas motoras unimanuales y bimanuales, activas, asistidas mediante exoesqueletos de mano. Los datos obtenidos en cinco participantes sanos muestran diferencias topográficas significativas durante las fases iniciales del movimiento bimanual frente al unimanual, particularmente en la banda beta, mientras que las fases estables presentan patrones más similares.

Estos hallazgos sugieren que los procesos de preparación motora difieren entre tareas unilaterales y bilaterales, lo que podría aprovecharse para diseñar algoritmos de detección específicos en sistemas BCI orientados al control bimanual. La tarea de AO y el uso de señales pasivas podrían complementar este enfoque, facilitando la adaptación del sistema a usuarios con movilidad reducida.

Como siguiente paso, se ampliará la muestra de participantes y se profundizará en el análisis de conectividad funcional y dinámica temporal. El objetivo final del proyecto MUNICH es desarrollar un sistema BCI bimanual funcional, adaptable y aplicable en contextos de rehabilitación neurológica domiciliaria.

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; el

Ministerio de Ciencia e Innovación y la Unión Europea, financiado por la Unión Europea – Next Generation EU, a través del proyecto PLEC2022-009424; y la Agencia Estatal de Investigación a través del proyecto PID2022-139957OB-I00.

Referencias

- Cauraugh, J. H., Lodha, N., Naik, S. K., Summers, J. J., 2010. Bilateral movement training and stroke motor recovery progress: a structured review and meta-analysis. *Human movement science* 29 (5), 853–870.
- 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), 10823.
- Diez, J. A., Blanco, A., Catalan, J. M., Badesa, F. J., Lledo, L. D., Garcia-Aracil, N., 2018. Hand exoskeleton for rehabilitation therapies with integrated optical force sensor. *Advances in Mechanical Engineering* 10 (2), 1–11.
- iDRhA, 2019. Innovative Devices for Rehabilitation & Assistance. <https://idrha.es/>, [Online; accessed 28-February-2024].
- Schalk, G., McFarland, D. J., Hinterberger, T., Birbaumer, N., Wolpaw, J. R., 2004. Bci2000: a general-purpose brain-computer interface (bci) system. *IEEE Transactions on biomedical engineering* 51 (6), 1034–1043.
- Soekadar, S. R., Witkowski, M., Mellinger, J., Ramos, A., Birbaumer, N., Cohen, L. G., 2011. Eeg-based online brain-machine interfaces (bmi) in the context of neurorehabilitation: optimizing bmi learning and performance. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 19 (5), 542–549.
- Steinmetz, J. D., Seher, K. M., Schiess, N., Nichols, E., Cao, B., Servili, C., Cavallera, V., Cousin, E., Hagins, H., Moberg, M. E., et al., 2024. Global, regional, and national burden of disorders affecting the nervous system, 1990–2021: a systematic analysis for the global burden of disease study 2021. *The Lancet Neurology* 23 (4), 344–381.
- Tantawanich, P., Phunruangsakao, C., Izumi, S.-I., Hayashibe, M., 2025. A systematic review of bimanual motor coordination in brain-computer interface. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 33, 266–285. DOI: 10.1109/TNSRE.2024.3522168
- Vales, Y., Catalan, J. M., Blanco-Ivorra, A., Barios, J. A., Garcia-Aracil, N., 2024. Comprehensive evaluation of stroke rehabilitation dynamics: Integrating brain-computer interface with robotized orthotic hand and longitudinal eeg changes. In: *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*. Springer, pp. 171–181.
- Zhang, X., Xie, L., Liu, W., Liang, S., Huang, L., Wang, M., Tian, L., Zhang, L., Liang, Z., Li, H., et al., 2025. Exoskeleton-guided passive movement elicits standardized eeg patterns for generalizable bcis in stroke rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 22, 97.