

Desarrollo de una aplicación domótica controlada por *Brain Computer Interface* (BCI)

R. Corralejo Palacios¹, R. Hornero Sánchez¹, D. Álvarez González¹

¹ Grupo de Ingeniería Biomédica, E. T. S. Ingenieros de Telecomunicación, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, rebecap@gmail.com, robhor@tel.uva.es, dalvgon@ribera.tel.uva.es

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una aplicación controlada mediante Brain Computer Interface (BCI) orientada al manejo de dispositivos domóticos presentes en una vivienda. Para ello, se registra la señal de electroencefalograma (EEG) y se seleccionan los ritmos sensoriomotores μ y β . Se ha empleado el sistema BCI2000, con el que se han implementado cuatro métodos de extracción de características, estudiando su funcionamiento en tiempo real. La evaluación preliminar de la metodología se ha realizado empleando un sujeto de estudio. Las mayores precisiones se han obtenido aplicando modelos autorregresivos (AR) con una anchura espectral de 3 Hz. Dicho modelo se ha integrado en una aplicación domótica que permite controlar la televisión, el reproductor de DVD y una cadena de música, así como las luces de una habitación. La aplicación propuesta, que integra las ventajas de los dispositivos domóticos y de los sistemas de control BCI, podría resultar muy útil y suponer un aumento en la calidad de vida de aquellas personas que presentan algún tipo de discapacidad física.

1. Introducción

Un sistema *Brain Computer Interface* (BCI) es aquel que monitoriza la actividad cerebral y traduce determinadas características, correspondientes a la intención del usuario, en comandos de control de un dispositivo [1]. Para registrar dicha actividad cerebral, el método más empleado en BCI es el electroencefalograma (EEG), ya que se trata de una técnica portátil, de bajo coste, fácil de usar y no invasiva [1].

Existen varios tipos de señales que se pueden emplear en el control de sistemas BCI a partir del EEG: potenciales evocados visuales (VEP), potenciales P300, ritmos sensoriomotores μ y β y potenciales corticales lentos (SCP) [1]. En el caso de VEP o P300 se habla de BCI exógeno, ya que es un estímulo externo el que provoca una actividad característica en el EEG, mientras que con SCP o ritmos μ y β se tiene un BCI endógeno, ya que depende de la capacidad del usuario para controlar la actividad EEG y se necesita un entrenamiento previo [1].

Los dispositivos domóticos se emplean en el hogar para accionar mediante interfaces inteligentes gran variedad de servicios. Estos nuevos interfaces facilitan la interacción de las personas dependientes con los dispositivos presentes en su entorno, que es el objetivo último del presente estudio. Para el control de la aplicación domótica desarrollada en este trabajo se van a emplear los ritmos sensoriomotores μ y β . Dichos ritmos (banda μ : 8-12 Hz, banda β : 16-24 Hz) presentan variaciones sobre la zona

motora del córtex cerebral cuando se realiza o se imagina un movimiento [2]. En concreto, el manejo de la aplicación se consigue mediante la imaginación de dos tipos de movimientos: movimiento de la mano derecha y de la mano izquierda. Cuando el movimiento está relacionado con la mano derecha se produce una disminución de los ritmos en el hemisferio izquierdo y viceversa. Esta disminución de los ritmos se conoce como *Event Related Desynchronization* (ERD) y se observa en el hemisferio contralateral hacia el que se realiza el movimiento [3]. Se necesitan dos etapas de procesado de señal para interpretar la intención del usuario a partir de la señal EEG: extracción de características y clasificación de las mismas. Los métodos de extracción de características realizan distintas combinaciones y transformaciones sobre la señal de EEG, con el objetivo de que las características obtenidas proporcionen la mayor capacidad discriminativa posible. Por su parte, los métodos de clasificación aplican diferentes modelos estadísticos al conjunto de características extraídas, para determinar el tipo de movimiento realizado o imaginado por el sujeto.

En este trabajo se estudian cuatro métodos de extracción de características que han sido implementados en el sistema de propósito general BCI2000: modelos autorregresivos (AR), transformada corta de Fourier (STFT), transformada *Wavelet* continua empleando *wavelets* de Morlet complejas (MW) y método del filtro adaptado (MF). Estudios previos han demostrado que estos cuatro métodos son adecuados para su utilización en aplicaciones BCI al ser implementados en MATLAB® [4]. En el presente estudio se evaluará su utilidad en una aplicación BCI en tiempo real. Como método de clasificación se ha empleado el clasificador lineal incorporado en la herramienta BCI2000. El objetivo del presente estudio consiste en evaluar con cuál de estos métodos de extracción se obtiene una mayor precisión al mover el cursor a la derecha y a la izquierda, para emplear dicho método en el control de una aplicación domótica.

La aplicación domótica implementada en este estudio se ha programado en lenguaje C++ mediante el entorno integrado de desarrollo Borland C++ 6. Dicha aplicación domótica emplea la capacidad del usuario de mover el cursor a la derecha y a la izquierda, mediante la imaginación de movimientos de las manos, para desplazarse por varios menús que permiten controlar varios dispositivos: un televisor, un reproductor de DVD, un equipo de música y las luces de una estancia.

2. Señales EEG y descripción de las pruebas

En el presente estudio el registro de la señal EEG se realiza mediante el amplificador de señales biomédicas g.USBamp (g.tec, Austria). Este amplificador dispone de 16 canales y se conecta al ordenador a través de un puerto USB. La frecuencia de muestreo f_s es de 128 Hz y las señales se filtran entre 2 y 60 Hz.

En el presente estudio de evaluación preliminar se ha empleado un único sujeto: una mujer sana de 26 años, que ha realizado las distintas sesiones necesarias para evaluar el funcionamiento de los métodos propuestos.

Tras un período de entrenamiento, en torno a 10-15 sesiones, se selecciona el canal C_4 como el electrodo óptimo para el control del sistema BCI por parte de nuestro sujeto. Se registran también los electrodos contiguos a los cuatro electrodos adyacentes para filtrar espacialmente la señal mediante un filtro Laplaciano grande [5]. En total se recogen cinco canales: C_4 , F_4 , T_8 , P_4 y C_z , según el sistema internacional 10-20. La señal con la que se trabaja es la siguiente [5]:

$$V_{Lap} = V_{C_4} - 0.25V_{F_4} - 0.25V_{T_8} - 0.25V_{P_4} - 0.25V_{C_z}. \quad (1)$$

Tras las sesiones de entrenamiento y aprendizaje, el sujeto aprende a visualizar correctamente cada clase de imágenes motoras (movimientos de la mano izquierda o derecha). Posteriormente, se realizan 10 sesiones de 20 intentos cada una para cada método de extracción de características. En total se obtienen 100 intentos de cada clase para cuantificar la precisión de cada método. Como clasificador se emplea siempre el clasificador lineal integrado en la herramienta BCI2000.

Al comienzo de cada intento aparece un objetivo a la derecha o a la izquierda de la pantalla y el usuario tiene 4 s para mover el cursor hacia dicho objetivo, considerándose un acierto cuando este es alcanzado. Para ello se emplea el módulo *CursorTask* de BCI2000. La precisión se mide como el porcentaje de aciertos respecto al número total de intentos.

El método de extracción con el que el sujeto obtiene los mejores resultados de precisión será el que se emplee para controlar la aplicación domótica desarrollada.

3. Métodos de extracción de características

3.1. Modelos autorregresivos (AR)

Los modelos autorregresivos (AR) son modelos paramétricos que describen la muestra actual como una combinación de las p muestras anteriores más un término de error [6]:

$$c(t) = \sum_{i=1}^p k_i c(t-i) + e(t). \quad (2)$$

En el presente estudio, los coeficientes k_i se estiman a partir del algoritmo de Burg o método de máxima entropía (*Maximum Entropy Method*, MEM). Para ello se emplean segmentos de 64 muestras (0.5 s a una frecuencia de muestreo de 128 Hz) [4]. La característica que se emplea es la potencia espectral correspondiente a la banda de frecuencias donde se haya encontrado una

mayor actividad de los ritmos en una sesión inicial. Para la implementación de este método se emplea el módulo *ARFilter* de BCI2000. Se proponen dos configuraciones:

AR1: Se calcula la potencia en bandas de 3 Hz de anchura espectral, situándose los centros de dichas bandas entre 0 y 30 Hz. Se emplea como característica la potencia de la banda correspondiente al ritmo μ del sujeto, que se ha localizado en las sesiones iniciales.

AR2: Se calcula la potencia en bandas de 1 Hz de anchura espectral, entre 0 y 30 Hz. Como características se emplean las potencias de las bandas correspondientes a los ritmos μ y β localizados en las sesiones iniciales.

3.2. Transformada corta de Fourier (STFT)

La STFT, o transformada corta de Fourier, se emplea para determinar el contenido en frecuencia y fase de secciones locales de una señal, según cambia a lo largo del tiempo. En el caso discreto, los datos a transformar pueden separarse en segmentos que normalmente se solapan entre sí. El resultado de cada transformada se añade a una matriz, que almacena los valores de magnitud y fase para cada punto en tiempo y en frecuencia. La expresión de esta transformada es la siguiente [7]:

$$STFT \{x[n]\} \equiv X(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] w[n-m] e^{-j\omega n}, \quad (3)$$

siendo $x[n]$ la señal de interés y $w[n]$ una función de enventanado en el dominio del tiempo. Para la implementación de este método se usa el módulo *FFTFilter* de BCI2000 y se emplea una STFT con una ventana de *Hamming* de 128 puntos (1 s) de forma que cada muestra de la STFT cubre un ancho espectral de 1 Hz [4]. Como características de entrada al clasificador se emplean dos potencias correspondientes a las bandas frecuenciales donde se haya encontrado una mayor actividad de los ritmos μ y β en la sesión inicial.

3.3. Transformada Wavelet Continua empleando Wavelets de Morlet complejas (MW)

Este algoritmo de extracción de características basado en *wavelets* toma como referencia el método ganador de la Competición BCI 2003 para el conjunto de datos III, que consiste en un filtrado de las señales EEG mediante *wavelets* de Morlet complejas [3]. Estas funciones vienen definidas por una *wavelet* madre que tiene la forma de un impulso gaussiano modulado con una frecuencia característica ω_0 . Para localizar la *wavelet* en el dominio tiempo-frecuencia, la *wavelet* madre tiene que ser escalada (factor de escala s) y desplazada temporalmente (valor τ), según la siguiente expresión [3]:

$$\Psi_{\tau,s(f)}(t) = \frac{1}{\sqrt{s(f)}} \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 \frac{t-\tau}{s(f)}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\tau}{s(f)}\right)^2}. \quad (4)$$

Se parte de dos *wavelets* complejas de Morlet escaladas teniendo en cuenta las frecuencias donde se ha encontrado una mayor actividad de los ritmos μ y β en la sesión inicial. Posteriormente, se realiza la transformada *wavelet* continua de un segmento de la señal EEG de 64 muestras (0.5 s) con cada una de las *wavelets* creadas [4]. Como características se emplean las dos amplitudes instantáneas

de las transformadas. Para la implementación de este método se utiliza el módulo *MATLABFilter* de BCI2000.

3.4. Filtro adaptado (*Matched Filter*, MF)

Este método se basa en la obtención de un modelo parametrizado del ritmo μ presente en las señales a partir del estudio de señales de entrenamiento [8]. En primer lugar, se realiza un estudio de las señales EEG para determinar cuál es la frecuencia fundamental f_F en la que aparece el ritmo μ mediante un análisis *offline*. A partir de un conjunto de intentos similares a los del conjunto de datos III de la Competición BCI 2003 [3] se extrae el ritmo μ característico del usuario. Una vez obtenido, este se descompone en un número discreto de componentes sinusoidales [8]. Para ello, se calculan las amplitudes de los dos primeros armónicos (A_2 y A_3) y del pico fundamental (A_1) y las fases de los dos primeros armónicos (ϕ_2 y ϕ_3) y de la componente fundamental (ϕ_1). Por tanto, el filtro adaptado se modela como una suma de los armónicos de la señal patrón. Para evitar el efecto del *jitter* (variación en el retardo) de la señal durante el procesado en tiempo real se utiliza un filtro adaptado complejo: uno real, con funciones base de tipo coseno, y el otro, imaginario, con funciones base de tipo seno. Las expresiones de ambos filtros se muestran a continuación:

$$MF_{real}(n) = \sum_{m=1}^N A_m \cos\left(\frac{2\pi n m f_F}{f_S} + \phi_m\right), \quad (5)$$

$$MF_{imag}(n) = \sum_{m=1}^N A_m \sin\left(\frac{2\pi n m f_F}{f_S} + \phi_m\right). \quad (6)$$

Se obtienen dos plantillas de 32 muestras (0.25 s) para el ritmo μ , una real, empleando funciones coseno, y otra imaginaria, empleando funciones seno [4]. Se emplean como características las amplitudes rms obtenidas al convolucionar simultáneamente un segmento de 8 muestras de la señal EEG con cada uno de los filtros adaptados obtenidos previamente. Para la realización del filtrado se trabaja con el módulo *FIRFilter* de BCI2000.

4. Diseño de la aplicación domótica

Se pretende aprovechar la capacidad de discriminar entre dos clases de imágenes motoras para navegar por el menú de una aplicación que controla el estado de varios dispositivos. La Figura 1 muestra la aplicación domótica diseñada, cuya interfaz principal está dividida en dos partes. En la mitad de la izquierda se muestran dos botones, uno a cada lado, y una bola. Es el usuario de la aplicación quien, mediante la imaginación de movimientos de la mano izquierda o derecha, mueve esa bola hacia un botón u otro, respectivamente. El botón de la derecha sirve para desplazarse por el menú de la aplicación, que se muestra a la derecha, y el botón izquierdo sirve para ejecutar la opción del menú que aparezca seleccionada en cada momento. En la mitad de la derecha se muestra un menú principal en el que aparecen cuatro botones para acceder a los menús de la televisión, el DVD, el equipo de música y las luces. Cuando se accede a alguno de ellos se muestra un submenú de control de las funciones de cada dispositivo. La Figura 2 muestra los submenús Televisión y Música.



Figura 1. Imagen de la aplicación *DomoInterface.exe*

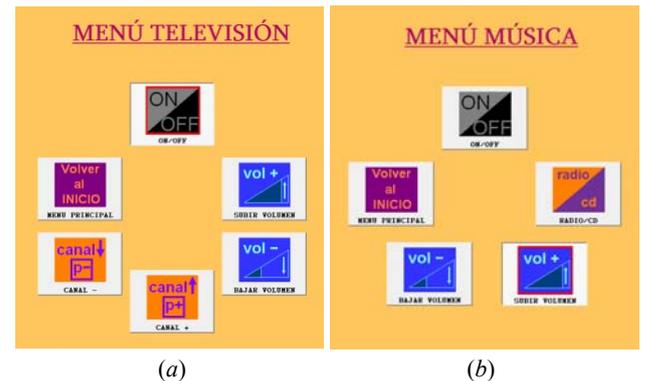


Figura 2. Menús presentes en la aplicación para controlar: (a) la televisión y (b) el equipo de música

Los desplazamientos a través de los distintos menús se realizan de forma circular en sentido horario. Cada submenú incorpora un botón que permite volver siempre al menú principal.

5. Resultados

5.1. Método de extracción de características óptimo

Para medir la precisión de cada uno de los métodos se emplea una aplicación sencilla integrada en BCI2000. El objetivo consiste en mover una bola hacia la izquierda o la derecha para seleccionar uno de los dos botones que aparecen en los extremos laterales de la pantalla. El sujeto de este estudio ha realizado un total de 100 intentos de cada clase para cada método propuesto. Posteriormente, se ha calculado la precisión obtenida al tratar de llevar la bola hacia el objetivo indicado en la pantalla empleando cada uno de los métodos de extracción. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1. Se observa que la mejor precisión media se alcanza con el método AR1.

5.2. Aplicación domótica

La aplicación domótica se ha desarrollado con el sistema BCI2000. En concreto, se han empleado los módulos *gUSBampSource*, *ARFilter* y *CursorTask*. El primer módulo, *gUSBampSource*, se configura para obtener del amplificador las señales de los cinco canales seleccionados y realizar el filtrado espacial mediante el Laplaciano largo. Debido a que los modelos AR han alcanzado las mayores precisiones entre los métodos propuestos, se selecciona el módulo *ARFilter* de BCI2000, implementando la configuración AR1. Por

	Precisión (%)		
	Media	Máxima	Mínima
AR1	92.08	100.00	83.33
AR2	90.18	100.00	72.22
STFT	83.10	88.89	73.68
MW	82.50	94.44	63.64
MF	81.07	93.75	58.82

Tabla 1. Valores de precisión obtenidos por cada método de extracción de características implementado en BCI2000

último, el módulo *CursorTask* se ha modificado para que siempre aparezca un botón a cada lado de la pantalla y sea el usuario quien decida hacia qué lado mover la bola. La aplicación diseñada, *DomoInterface.exe*, se comunica con el operador de BCI2000 mediante el protocolo *App Connector* y recibe información sobre el estado del programa y sus distintos módulos en cada instante.

Para ejecutar los diferentes comandos que permite la aplicación (encender/apagar el televisor, subir/bajar el volumen, etc.) se dispone de un dispositivo emisor de infrarrojos conectado a través de un puerto USB. Este dispositivo es capaz de aprender las señales de los mandos a distancia tradicionales, de forma que puede replicarlas y usarlas para controlar desde el ordenador los dispositivos integrados en el sistema.

6. Discusión y conclusiones

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 1, el método con el que se consigue una mayor precisión es el AR1: un modelo AR con anchura espectral de 3 Hz entre muestras y tomando como característica la correspondiente al ritmo μ . Por lo tanto, se observa que se obtienen mejores resultados empleando anchuras espectrales de 3 Hz, en lugar de la anchura espectral de 1 Hz de la configuración AR2. El modelo AR2 alcanza mayores precisiones que el resto de métodos no autorregresivos, lo que indica que los modelos AR son los más adecuados para controlar el sistema BCI en la aplicación propuesta. Por su parte, el método STFT consigue una precisión media y mínima superior a la de los métodos MW y MF. Sin embargo, la precisión máxima obtenida con este método es la menor respecto al resto de modelos.

Cualitativamente, desde el punto de vista del usuario, los métodos con los que ha resultado más sencillo controlar el movimiento de la bola han sido AR1, AR2 y MW. Según la propia percepción del sujeto de este estudio, con dichos métodos el movimiento de la bola es más estable y resulta más sencillo mantener la concentración. Puesto que AR1 ha sido el más preciso a la hora de controlar el movimiento del cursor este método ha sido escogido para formar parte de la aplicación domótica desarrollada en este trabajo. Así, nuestro sujeto controlará con más precisión la aplicación domótica y podrá acceder a los menús y comandos que desee de una forma más rápida y precisa.

El principal objetivo de la aplicación es permitir que, mediante la señal de EEG, se puedan controlar dispositivos presentes en el hogar. Por lo tanto, la aplicación podría resultar muy útil para la asistencia de

personas con algún tipo de discapacidad física que les impida o dificulte controlar los dispositivos que les rodean en su entorno habitual. Por ello, se plantea como una línea futura inmediata el uso de esta aplicación por parte de personas con diferentes grados de discapacidad física. Sería necesario analizar si la aplicación se adecua a sus necesidades, pudiendo complementarse o adaptarse a ellas en caso necesario.

El presente trabajo presenta ciertas limitaciones que han de ser tenidas en cuenta. Al tratarse de un estudio preliminar sólo ha participado un sujeto sano. Sin embargo, sería interesante ampliar el estudio y las pruebas a sujetos con diferentes grados de discapacidad. Además, se podrían implementar nuevos métodos de procesamiento de señal para tratar de aumentar la precisión alcanzada.

En resumen, se ha comprobado que los modelos AR son adecuados para la extracción de características del EEG en sistemas BCI. Además, este tipo de interfaces podrían resultar muy útiles para el control de dispositivos domóticos integrados en el entorno habitual de personas dependientes.

Agradecimientos

Este estudio ha sido parcialmente financiado por el Instituto de Mayores y Servicios Sociales (IMSERSO) mediante el proyecto de investigación 18/2008 del Ministerio de Sanidad y Política Social.

Referencias

- [1] Wolpaw JR, Birbaumer N, McFarland DJ, Pfurtscheller G, Vaughan TM. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, vol 113, 2002, pp 767-791.
- [2] Pineda JA, Allison BZ, Vankov A. The effects of Self-Movement, Observation, and Imagination on Rhythms and Readiness Potentials (RP's): Toward a Brain-Computer Interface (BCI). *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol 8, no 2, 2000, pp 219-222.
- [3] Lemm S, Schafer C, Curio G. BCI competition 2003-data set III: Probabilistic Modeling of Sensorimotor μ -Rhythms for Classification of Imaginary Hand Movements. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol 51, no 6, 2004, pp 1077-1080.
- [4] Corralejo R, Hornero R, Abásolo D, Temprano J. Comparación de Métodos de Extracción de Características para su aplicación a Brain Computer Interface. *Libro de Actas del XXVI Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, Valladolid, 2008, pp 174-177.
- [5] McFarland DJ, McCane LM, David SV, Wolpaw JR. Spatial filter selection for EEG-based communication. *Electroencephalography Clinical Neurophysiology*, vol 103, 1997, pp 386-394.
- [6] Huan N, Palaniappan R. Classification of Mental Tasks Using Fixed and Adaptive Autoregressive Models of EEG Signals. *Proc. 2nd IEEE EMBS International Conference on Neural Engineering*, 2005, pp 633-636.
- [7] Portnoff MR. Time-Frequency Representations of Digital Signals and Systems Based on Short-Time Fourier Analysis. *IEEE Trans Acoust Speech Signal Process*, vol ASSP-28, no 1, 1980, pp 55-69.
- [8] Krusienski DJ, Schalk G, McFarland DJ, Wolpaw JR. A μ -Rhythm Matched Filter for Continuous Control of a Brain-Computer Interface. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol 54, no 2, 2007, pp 273-280.