

Sistema de Teleoperación Multi-Robot basado en Interfaz Cerebro-Computador

Carlos Escolano, Javier Minguez

*Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas (DIIS)
Universidad Zaragoza, España, (e-mail: {cescolan, jminguez}@unizar.es)*

Resumen: Este artículo presenta un sistema de teleoperación multi-robot basado en una interfaz cerebro-computador que permite al usuario controlar de manera simultánea un número arbitrario de robots, únicamente con su actividad cerebral. El objetivo final de estos dispositivos está orientado hacia personas con fuertes deficiencias neuromusculares, ofreciendo telepresencia a través de un sistema robótico, con un modo de interacción via internet basado únicamente en el pensamiento. El presente trabajo es una extensión de un sistema de teleoperación cuyas innovaciones son el soporte para teleoperar N robots, y el uso de robots miniaturizados y portátiles (de dimensión dos órdenes de magnitud inferior respecto al original). La interfaz cerebro-computador está basada en EEG y el potencial evocado P300 como protocolo de control. Los robots están dotados de las capacidades de navegar, interactuar mediante el envío de alarmas, y percibir visualmente los entornos remotos. El sistema ha sido validado con dos usuarios sanos y el principal resultado es que ambos fueron capaces de completar exitosamente las tareas propuestas sin reportar ningún error, lo que demuestra la validez y alta robustez del prototipo en conjunto. *Copyright © 2011 CEA.*

Palabras Clave: interfaz cerebro-computador, robótica, teleoperación.

1. INTRODUCCIÓN

Recuperar o sustituir funciones humanas motoras ha sido una de las áreas más fascinantes aunque frustrantes de investigación del último siglo. La posibilidad de interconectar el sistema nervioso humano con un sistema mecatrónico y usar este concepto para recuperar alguna función motora ha motivado enormemente a los científicos durante años. El paradigma típico de trabajo es un paciente con una lesión medular grave o una enfermedad neuromuscular crónica que interrumpe el flujo de información neural motora hacia las extremidades del cuerpo. En los últimos años, los grandes avances en la interacción cerebro-computador y la robótica han hecho posible utilizar la actividad cerebral en línea para el control de dispositivos robóticos con un objetivo de recuperación o sustitución motora.

La tecnología de interfaces cerebro-computador (se referirá a ellos como BCIs, siglas del término inglés *brain-computer interfaces*) permite traducir en tiempo real la actividad eléctrica cerebral en comandos que pueden ser utilizados para controlar dispositivos. Esto ofrece un canal de comunicación directo desde el cerebro a los dispositivos, evitando el uso de los caminos neuronales que ya no pueden ser utilizados normalmente debido a la presencia de enfermedades neuromusculares graves tales como la esclerosis lateral amiotrófica, infarto cerebral, parálisis cerebral y lesiones en la médula espinal. Por otro lado, el avance de la robótica en diferentes materias como sensores, actuadores, capacidad de procesamiento y autonomía ha proporcionado, en el contexto de la robótica móvil, entidades físicas preparadas para percibir, navegar, explorar e interactuar con el entorno. La sinergia de ambos campos ha abierto un

amplio abanico de posibilidades en términos de investigación para la recuperación o sustitución de capacidades humanas.

En relación con las BCIs, uno de los aspectos clave que ha favorecido el auge del desarrollo de sistemas para seres humanos ha sido la mejora en los métodos de registro de la actividad cerebral no invasivos, siendo el más popular el electroencefalograma (EEG). Sistemas basados en EEG humano han servido para el control del ratón de un computador (Wolpaw *et al.*, 1991), para la comunicación (Birbaumer *et al.*, 1999), o para el uso de un buscador de internet (Karim *et al.*, 2006), entre otros. En cuanto a su aplicación conjunta con la robótica, el primer control de un robot con EEG se realizó en 2004 (del R. Millán *et al.*, 2004). Desde entonces, la investigación en BCIs aplicada a la robótica para aplicaciones de sustitución motora ha estado centrada en la línea de las neuroprótesis (Popovic *et al.*, 2002) y de forma más intensa en sillas de ruedas controladas por la actividad cerebral (Iturrate *et al.*, 2009). Todas estas aplicaciones comparten una propiedad importante: tanto el usuario como el robot se encuentran físicamente en el mismo escenario.

La capacidad de controlar dispositivos robóticos en un entorno remoto (teleoperación) por medio de comandos extraídos directamente de la actividad cerebral, y enviados a través de un medio como internet, ofrece una aplicación que podría tener un valor añadido para pacientes con graves deficiencias neuromusculares. Estos dispositivos podrían percibir, explorar e interactuar con entornos alejados del usuario donde la telepresencia podría verse como una extensión de las funciones sensoriales de la vida diaria. Además, se ha sugerido que la implicación del paciente en este tipo de sistemas podría producir un efecto de neurorehabilitación, manteniendo la actividad neuronal relacionada con la navegación espacial, acción y comunicación,

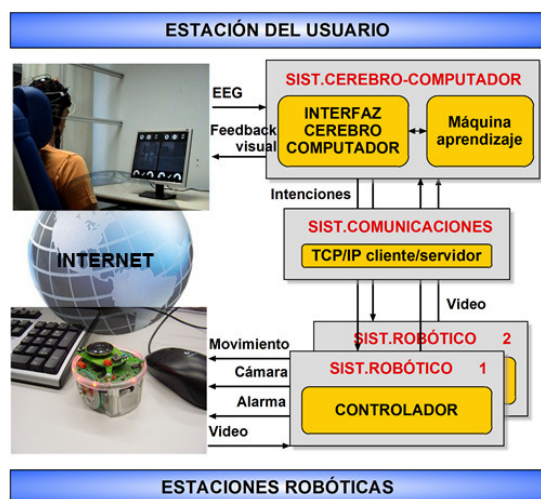


Figura 1. Diseño del sistema: la estación del usuario, las dos estaciones robóticas, y el flujo de información entre ellas.

evitando o retrasando de esta forma la extinción del pensamiento que hipotéticamente ocurre en etapas avanzadas de pacientes de esclerosis lateral amiotrófica (Kübler and Birbaumer, 2008).

Para abordar esta aplicación de robótica asistencial, se desarrolló un sistema integrado de teleoperación por medio de una interfaz cerebro-computador de un robot móvil con capacidad de navegación y exploración, y se realizó un pre-estudio de aplicabilidad de esta tecnología a pacientes con usuarios sanos (Escolano *et al.*, 2009). Partiendo de ese sistema, se ampliaron sus funcionalidades para soportar mecanismos sencillos de interacción con el entorno de acuerdo a los requerimientos de los usuarios finales, y se realizaron pruebas iniciales con pacientes de esclerosis lateral amiotrófica (Escolano *et al.*, 2010). Aunque los resultados fueron muy satisfactorios, las principales limitaciones tecnológicas detectadas fueron: (i) la incapacidad de tener presencia en diferentes entornos simultáneamente, y (ii) el elevado precio y limitada portabilidad (15 kg de peso) del robot empleado. El presente trabajo presenta un nuevo diseño del sistema de teleoperación en el que (i) se ofrece soporte para controlar un número arbitrario de robots simultáneamente, y (ii) se utilizan robots de precio y peso dos órdenes de magnitud inferior frente al original. A nivel de ingeniería, la pérdida de prestaciones del sistema es significativamente baja en comparación con los beneficios del sistema completo: sistema multi-robot (se puede disponer de N robots en N localizaciones distintas) de robots minituarizados de bajo coste. A nivel de usuario, la prueba de concepto ha sido validada por dos usuarios sanos en dos fases: (i) *screening* y entrenamiento de los usuarios, y (ii) tarea de teleoperación de dos robots situados en distintos entornos. A raíz de los resultados obtenidos se ha elaborado una evaluación técnica del sistema y de sus principales subsistemas. El principal resultado es que ambos usuarios fueron capaces de resolver las tareas propuestas con éxito, sin reportar ningún error y mostrando una alta robustez del sistema.

El presente artículo se desglosa de la siguiente forma. La sección 2 describe una visión general del sistema, la sección 3 la tecnología de interfaz cerebro-computador, la sección 4 el dispositivo robótico y la sección 5 la integración de ambas tecnologías y el protocolo de ejecución del sistema. La metodología de experimentación y los resultados obtenidos se describen en las secciones 6 y 7 respectivamente. Finalmente, en la sección 8 se resumen las conclusiones de este trabajo.

2. RESUMEN DEL SISTEMA DE TELEOPERACIÓN

Este artículo presenta un sistema de teleoperación multi-robot basado en EEG que permite al usuario controlar de manera simultánea un número arbitrario de robots de bajo coste y dimensiones únicamente con su actividad cerebral. Sin embargo, la interfaz gráfica descrita en este trabajo se ha restringido a dos robots para desarrollar la prueba de concepto de esta tecnología. El sistema consta por tanto de una estación de usuario y de dos estaciones robóticas (una por cada dispositivo robótico involucrado) situadas de forma remota entre sí y conectadas por internet (Fig. 1). Esta configuración ofrece al usuario presencia simultánea en entornos remotos, dotándole de las capacidades de percepción visual, navegación, e interacción mediante el envío de alarmas.

El funcionamiento del sistema es el siguiente: (i) la interfaz gráfica del sistema BCI muestra, superpuestas sobre el vídeo captado en los entornos, un conjunto de opciones de movimiento, de interacción y de cambio de robot a controlar; (ii) el usuario se concentra en una opción determinada de la interfaz mientras el sistema estimula visualmente todas las opciones; (iii) dicha estimulación produce el fenómeno neurológico deseado que siendo medido por los sensores e identificado por las técnicas de procesamiento de señal permite decodificar la intención del usuario; (iv) finalmente esa intención se transfiere al sistema robótico a través de internet, el cual ejecuta de forma autónoma los comandos relevantes. Mientras el robot ejecuta estos comandos se envía vídeo a la estación del usuario para que pueda percibir en línea el resultado de sus decisiones.

Este sistema consta de tres partes bien diferenciadas: el sistema cerebro-computador, los sistemas robóticos y su integración. A continuación se describen las tres partes.

3. SISTEMA CEREBRO-COMPUTADOR

Esta sección describe el diseño de las partes que componen la tecnología del sistema cerebro-computador: el protocolo neurofisiológico e instrumentación, la interfaz gráfica y el sistema de procesamiento de señal.

3.1 Protocolo neurofisiológico e instrumentación

La BCI desarrollada en este trabajo está basada en una respuesta evocada a estímulos externos. En éstas el usuario centra su atención en uno de los posibles estímulos visuales, auditivos o somatosensoriales y la BCI se encarga de determinar el estímulo en el que estaba concentrado el usuario. Más en concreto, el presente trabajo está basado en el potencial visualmente evocado P300 (Sutton *et al.*, 1965). Este potencial se manifiesta como una deflexión positiva en el EEG a una latencia de aproximadamente 300 ms tras la aparición del estímulo deseado dentro de una secuencia aleatoria de estímulos y se registra con mayor intensidad sobre los lóbulos parietal y occipital (Fig. 2). Estudios neurofisiológicos (Patel and Azzam, 2005) han revelado que el tiempo de respuesta y la amplitud de este potencial están correlados con la fatiga del usuario y las características del estímulo (color, contraste, brillo, duración, etc.).

La instrumentación consta de un sistema de EEG comercial de la empresa gTec (un gorro de EEG, 16 electrodos y un amplificador gUSBamp). Los electrodos se situaron de acuerdo a estudios previos (Krusienski *et al.*, 2006) en las posiciones

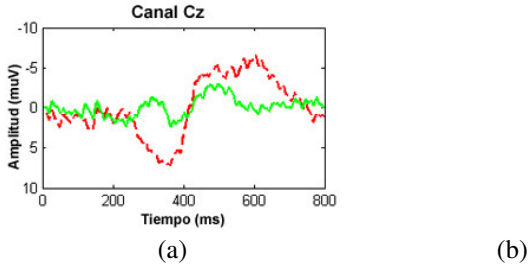


Figura 2. (a) Representación visual de un potencial P300. Se muestra la diferencia en voltaje en el canal Cz entre la respuesta al estímulo objetivo (línea rayada) y la respuesta a los estímulos no objetivo (línea sólida). (b) Mapa topográfico de la distribución de los valores r^2 (proporción de la varianza de la señal en *single-trial* que es debida a la aparición del estímulo deseado) sobre la superficie de la cabeza a aproximadamente 300 ms. Los lóbulos parietal y occipital son las áreas con mayor r^2 a esa latencia.

del sistema internacional 10/20: Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, T7, T8, Cp3, Cp4, Fz, Pz, Cz y Oz. El electrodo de tierra se situó en la posición FPz y el de referencia en el lóbulo de la oreja izquierda. El EEG fue amplificado y digitalizado a una frecuencia de 256Hz. A su vez se aplicó un filtro *notch* a 50Hz y un filtro pasabandas de 0.5Hz a 30Hz. El registro de la señal, su procesamiento y la interfaz gráfica se desarrollaron dentro de la plataforma software BCI2000 (Schalk *et al.*, 2004), ejecutada en un computador Intel Core2 Duo @ 2.10GHz con Windows XP como sistema operativo.

3.2 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica presenta una doble funcionalidad: (i) muestra al usuario un *feedback* visual para la percepción del entorno, toma de decisiones y control del sistema; y (ii) realiza un proceso de estimulación visual para producir el potencial visualmente evocado P300 en el EEG del usuario y así permitir al sistema de procesamiento de señal decodificar sus intenciones. A continuación se describen ambas funcionalidades:

Visualización de opciones La interfaz gráfica permite percibir en tiempo real el vídeo capturado por las cámaras de los robots en sus respectivos entornos. Además muestra un conjunto de opciones para el control del sistema. La interfaz gráfica se encuentra dividida en dos ventanas idénticas, cada una asociada a un robot (Fig. 3a). Se denomina *ventana activa* a aquella sobre la que se realiza el proceso de estimulación (descrito a continuación), y por tanto sobre la que se pueden seleccionar opciones. Cada ventana muestra 12 opciones agrupadas en una matriz 4×3 para favorecer el proceso de estimulación. Estas opciones están distribuidas en tres zonas: la fila de iconos superior e inferior de la pantalla, y la zona central (Fig. 3b).

En la zona central se muestra un conjunto de destinos superpuestos sobre el entorno a los que el usuario puede ordenar al robot moverse. Los destinos se muestran como puntos sobre un mallado polar $N \times M$ relativos a la posición del robot. Su dimensión es personalizable y para este trabajo se estableció a $(0,25m, 1m) \times (-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ)$. Por tanto se proporcionan 6 destinos de navegación, un número reducido pero que demostró ser suficiente en la experimentación para la navegación en entornos reales. En la fila de iconos superior se representan las siguientes opciones, de izquierda a derecha: (i) pausar; (ii)

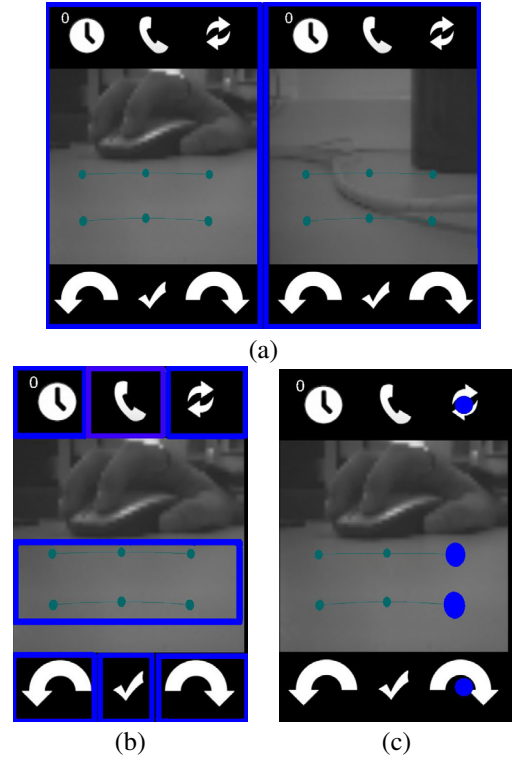


Figura 3. (a) Interfaz gráfica del sistema cerebro-computador con las dos ventanas correspondientes a los dos robots. (b) Elementos que componen una ventana: 6 iconos distribuidos entre la fila superior e inferior de la pantalla, y la zona central. (c) Estimulación visual de la tercera columna.

reproducción de un sonido a modo de alarma; y (iii) cambio al control del otro robot. En la fila de iconos inferior se representan las siguientes opciones, de izquierda a derecha: (i) giro del robot 90° a la izquierda; (ii) validación; y (iii) giro del robot 90° a la derecha. La opción de pausar permite al usuario recibir vídeo en tiempo real de los dos robots deteniendo durante ese tiempo el proceso de estimulación. Esto permite desacoplar en ciertos aspectos el funcionamiento síncrono de un sistema basado en el protocolo P300 y así evitar el excesivo cansancio mental. Con el fin de minimizar la probabilidad de enviar comandos no deseados al sistema robótico toda opción debe ser *validada*. Se denomina *validar* una opción a la selección de la opción de validación inmediatamente después de la selección de la opción deseada por el usuario, lo cual provoca el envío al sistema robótico de dicha opción deseada. En la sección 5.2 se describe el protocolo de ejecución de las opciones aquí citadas.

Los elementos de la interfaz gráfica se pueden personalizar en cuanto a color, forma, tamaño y posición para equilibrar la capacidad y preferencias de cada usuario con el rendimiento del sistema (recuérdese que el tiempo de respuesta y amplitud del potencial P300 están correlados con estos aspectos visuales).

Estimulación visual El proceso de estimulación visual debe producir el potencial visualmente evocado P300 en el EEG del usuario cuando se encuentra concentrado en una opción de la interfaz gráfica. Este proceso de estimulación se produce sobre las 12 opciones de la ventana activa. Las opciones se estimulan mediante un mecanismo de *flasheos* consistente en dibujar un círculo azul sobre un punto del mallado o sobre un icono. Se denomina *secuencia* a la estimulación de todas las opciones de forma aleatoria. Con la intención de reducir el

Figura 4. Valores r^2 para cada canal en el intervalo [0 - 800] ms tras la aparición del estímulo objetivo mostrados en una escala de grises. En esta gráfica concreta los canales F3, F4, C3, C4, Cp4, Fz, Pz y Cz presentan los valores más altos a una latencia de 300 ms.

tiempo de duración de este proceso y el orden de magnitud del subsiguiente problema de clasificación se ha seguido el paradigma (Farwell and Donchin, 1988). Según este paradigma la estimulación de las opciones se realiza por medio de filas y columnas en lugar de estimular cada opción individualmente, dando lugar a 7 estimulaciones (4 filas más 3 columnas) por secuencia (Fig. 3c). La opción deseada será la intersección de la fila y columna deseadas. El número de secuencias y la secuenciación temporal de este proceso (principalmente tiempo de exposición de cada estímulo y tiempo entre estímulos) puede ser modificado para equilibrar la capacidad y preferencias de cada usuario con el rendimiento del sistema.

3.3 Procesamiento de señal

Un módulo de aprendizaje supervisado es entrenado para reconocer la aparición del potencial evocado P300 en el EEG y así decodificar las intenciones del usuario. Dada la interfaz gráfica diseñada el potencial P300 se produce para una de las 4 filas o 3 columnas durante una secuencia de estimulación. Por lo tanto se deben resolver dos subproblemas de clasificación, de 4 y 3 clases. El primer paso consiste en entrenar el sistema. Para ello, el usuario se enfrenta al proceso de estimulación visual y debe concentrarse en una secuencia predefinida de opciones que deben cubrir todas las clases. Mientras tanto se registra su actividad cerebral y posteriormente se utiliza para entrenar el algoritmo de clasificación. Este algoritmo consiste en dos etapas: (i) extracción de características y (ii) algoritmo de clasificación. A continuación se describen ambas etapas:

Extracción de características Se ha utilizado la técnica descrita en (Krusienski *et al.*, 2006). El potencial P300 está caracterizado en el dominio del tiempo por lo que la información se encuentra en su forma de onda y tiempos de latencia. En primer lugar se extraen *samples* del tamaño de 1 segundo para cada canal después de la aparición de cada estímulo. Estos segmentos de señales se filtran usando la técnica de *moving average*¹ y se *subsamlean* por un factor de 16. A continuación se calcula y se muestra gráficamente la medida de r^2 (proporción de la varianza de la señal en *single-trial* debida a la aparición del estímulo deseado (Schalk *et al.*, 2004)) por cada canal (Fig. 4). Aquellos canales con mayor r^2 se seleccionan por inspección visual. Esos son los canales que presentan mayor variación entre la señal objetivo y no objetivo, por lo que a priori son mejores características para un clasificador lineal.

¹ Técnica consistente en aplicar un promediado con una ventana deslizando.

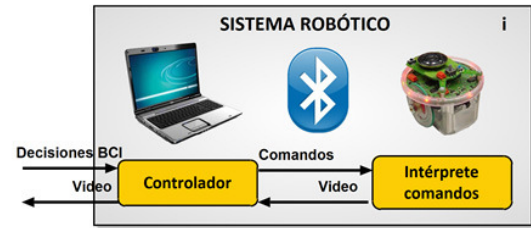


Figura 5. Diseño de cada sistema robótico: entidades físicas y flujo de información entre las entidades lógicas (controlador e intérprete de comandos).

Posteriormente, se concatenan los segmentos de datos de cada canal seleccionado creando un vector de características para la siguiente fase (por ejemplo, la longitud de dicho vector si se seleccionan 10 canales es $256/16 \text{ samples} \times 10 \text{ canales} = 160$).

Algoritmo de clasificación Se usa *StepWise Linear Discriminant Analysis* (SWLDA), estudiado de manera extensiva para problemas de clasificación del potencial evocado P300 (Farwell and Donchin, 1988), para la solución de los dos subproblemas de clasificación. Brevemente, SWLDA es una extensión de *Fisher Linear Discriminant Analysis* (FLDA), el cual produce una reducción en el espacio de características seleccionando las más convenientes para ser incluidas en una función discriminante (FLDA busca un hiperplano que subdivida el espacio de características en dos clases maximizando la distancia entre las medias de las características de las dos clases y minimizando sus varianzas dentro de cada clase).

Aplicando estas técnicas se obtuvo un rendimiento superior al 90 % en menos de una hora de entrenamiento. Estos resultados están en línea con otros estudios para el control de dispositivos robóticos usando el potencial P300 (Escolano *et al.*, 2009; Iturrate *et al.*, 2009).

4. SISTEMAS ROBÓTICOS

Esta sección describe el diseño de cada uno de los sistemas robóticos que componen el sistema de teleoperación. Un sistema robótico está formado por dos entidades físicas: un computador externo y un robot, conectados a través de una conexión *Bluetooth* (Fig. 5). El computador externo tiene una doble funcionalidad: (i) enlace con el sistema BCI del que recibe las decisiones del usuario y al que envía el vídeo capturado por el robot; y (ii) control de la lógica del robot por medio de su controlador. El robot es un dispositivo comercial *e-puck* (Mondada *et al.*, 2009). Se trata de un robot móvil de bajo coste y de pequeñas dimensiones (7 cm de diámetro por 5.5 cm de altura y 150 gramos de peso). Está equipado con una memoria interna de 8 KBytes, *encoders* incrementales para las ruedas, 8 sensores de proximidad infrarrojos con un alcance máximo de 6 cm, una cámara VGA de 640×480 pixels de resolución máxima, conexión *Bluetooth*, altavoz integrado y baterías con una autonomía aproximada de 3 horas en movimiento continuo. En la práctica la limitada memoria interna del robot y el requerimiento de adquirir el mayor número de imágenes por segundo obligó a adquirir imágenes en blanco y negro a resolución de 60×60 pixels, obteniendo una cadencia de 2 imágenes/segundo. Se decidió no usar los sensores infrarrojos tras un estudio de su precisión ante distintos materiales.

El funcionamiento de este sistema se describe a continuación. En primer lugar el computador externo recibe las decisiones

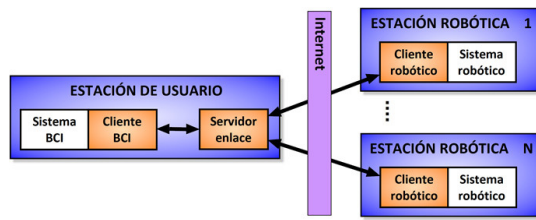


Figura 6. Diseño del sistema de comunicaciones: conexiones entre los elementos lógicos de las estaciones que componen el sistema de teleoperación. Los elementos coloreados representan las entidades propias de este sistema.

del usuario a través de internet (previamente decodificadas por el sistema BCI). Éstas son tratadas por el controlador del computador, el cual las traduce a comandos de bajo nivel de movimiento, de control de la cámara y del altavoz. Por último, los comandos se envían al intérprete de comandos embebido dentro del robot *e-puck* a través del enlace *Bluetooth* y el robot los ejecuta. Mientras son ejecutados, el robot envía vídeo al computador externo, que a su vez lo retransmite al sistema BCI para ofrecer al usuario un *feedback* visual del entorno.

5. INTEGRACIÓN Y PROTOCOLO DE EJECUCIÓN

Esta sección describe el sistema de comunicaciones, que realiza la integración entre el sistema BCI y los sistemas robóticos, y el protocolo de ejecución.

5.1 Integración

El sistema de comunicaciones está compuesto por tres tipos de entidades: dos tipos de clientes (uno para el sistema BCI y otro para los sistemas robóticos) y un servidor de enlace que concentra el flujo de información y confiere escalabilidad al sistema. Todas las conexiones entre estas entidades están basadas en el paradigma cliente/servidor sobre TCP/IP (Fig. 6).

El cliente del sistema cerebro-computador se encuentra en la estación del usuario, integrado dentro de la plataforma software BCI2000 (que también realiza la adquisición, procesamiento y muestra la interfaz gráfica). Este cliente se ejecuta de forma periódica cada aproximadamente 30 ms. Se comunica con el servidor de enlace a través de una conexión local para desacoplar el funcionamiento en tiempo real de la plataforma BCI2000 con los retrasos típicos de una conexión por internet. El cliente de cada sistema robótico se encuentra en su estación robótica correspondiente y se ejecuta físicamente en su computador externo. Se comunica con el servidor de enlace a través de internet. Los requerimientos máximos de ancho de banda vienen impuestos por el ratio de transferencia de imágenes. Las imágenes se capturaron en blanco y negro a una resolución de 60×60 pixels (3.6 KB) y a una tasa de 2 imágenes/segundo debido a las características de los robots. Por tanto, cada estación robótica necesita un ancho de banda aproximado de 8 KB/s y la estación de usuario 16 KB/s. Estos valores no suponen ninguna restricción para el orden de magnitud de las conexiones actuales. Este diseño permite el control remoto de robots situados en cualquier entorno remoto con acceso a internet.

5.2 Protocolo de ejecución

El usuario controla el sistema de teleoperación por medio de la interfaz gráfica del sistema BCI de acuerdo al protocolo

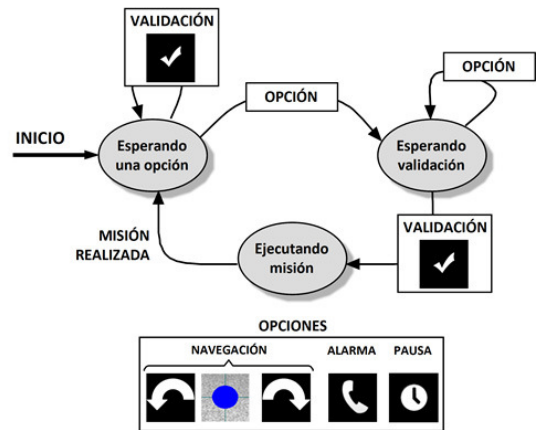


Figura 7. Máquina de estados finita que modela el protocolo de ejecución.

de ejecución (Fig. 7). Inicialmente los sistemas robóticos se encuentran a la espera de una decisión del usuario y se establece como robot activo uno de ellos arbitrariamente. Se genera el proceso de estimulación sobre la ventana correspondiente al robot activo y una opción es seleccionada. Una vez que el sistema reconoce la opción deseada por el usuario dicha opción debe ser validada (véase sección 3.2), y es entonces enviada al sistema robótico correspondiente (se referirá a este hecho como una misión). El robot ejecuta la misión recibida. Mientras es ejecutada, la interfaz gráfica muestra vídeo en tiempo real capturado por la cámara del robot y el sistema BCI congela el proceso de estimulación. Cuando la misión finaliza termina el envío de vídeo y el proceso de estimulación vuelve a empezar.

6. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN

Esta sección describe la metodología de experimentación seguida con el objetivo de realizar un estudio de validación técnica y de usabilidad del sistema a modo de pre-estudio de aplicabilidad de la tecnología para usuarios finales con usuarios sanos. 2 participantes fueron seleccionados para el estudio. Ambos eran estudiantes de la Universidad de Zaragoza, hombres, de 23 años y diestros. Ninguno de ellos había utilizado antes ninguna interfaz cerebro-computador ni conocían de antemano el funcionamiento del sistema de teleoperación.

A continuación se detalla el protocolo de experimentación definido, el cual consistía en dos fases: (i) *screening* y entrenamiento, y (ii) experimentos de teleoperación.

6.1 Fase I: screening y entrenamiento

Esta fase se componía de dos tareas: (i) tarea de *screening* para estudiar la respuesta P300 ante la interfaz gráfica y validar la elección de las características de los estímulos visuales²; y (ii) tarea de entrenamiento para calibrar el sistema y evaluar el rendimiento de las técnicas de procesamiento de la señal.

Dichas tareas estaban formadas por un conjunto de ejecuciones. Se denominará ejecución a un experimento con una configuración determinada (duración, número de secuencias, secuenciación de la estimulación visual, etc.). Estas ejecuciones pueden dividirse en dos grandes grupos: ejecuciones *offline* y

² El tiempo de respuesta y la amplitud del potencial P300 están correlados con las características del estímulo (ver subsección 3.1), y por tanto pueden afectar al rendimiento de las técnicas de procesamiento de señal.



Figura 8. Escenarios usados en la configuración de los experimentos.

online. En las ejecuciones *offline* el usuario debe prestar atención a una secuencia predeterminada de opciones en la interfaz gráfica (tanto el número de opciones como las propias opciones a seleccionar están predefinidos). De esta forma el sistema y el usuario se encuentran sincronizados, es decir, el sistema es capaz de marcar cada estimulación como estimulación objetivo o no objetivo, aportando una información valiosa a la hora de entrenar un clasificador. En las ejecuciones *online* el usuario puede utilizar el sistema libremente de forma no supervisada, seleccionando cualquier opción que ofrece la interfaz.

En la tarea de *screening* el usuario tenía que realizar una ejecución *offline* que constaba de la selección de 3 opciones. El número de secuencias se estableció a 5, la duración del estímulo a 125 ms, y el tiempo entre estímulos a 1 s (para evitar el solapamiento entre respuestas P300). En la tarea de entrenamiento el usuario tenía que realizar 8 ejecuciones *offline* para calibrar el sistema. Cada ejecución comprendía la selección de 6 opciones (para cubrir todas las clases del problema de clasificación se escogieron las pares en 4 ejecuciones y las impares en las otras 4). Los datos del entrenamiento se usaron para calibrar el sistema y posteriormente se realizó una ejecución *online* de 20 opciones para evaluar su rendimiento. Se estableció un umbral mínimo del 90 % de rendimiento para cualificar al usuario para participar en la siguiente fase de experimentación. Para esta tarea el número de secuencias se estableció a 10, la duración del estímulo a 125 ms, y el tiempo entre estímulos a 75 ms. Para cada usuario esta fase duró aproximadamente una hora.

6.2 Fase II: Experimentos de teleoperación

El objetivo de estos experimentos era la realización de una validación técnica del sistema de teleoperación y de sus principales subsistemas. Para ello se realizaron experimentos entre el Laboratorio de BCI de la Universidad de Zaragoza, donde se encontraban los usuarios (LabBCI); el Laboratorio de Robótica de la Universidad de Zaragoza (LabRob), donde se encontraba el primer robot; y una vivienda particular de Zaragoza (ParRob), donde se encontraba el segundo robot (Fig. 8). Se diseñó una tarea que requería el uso conjunto de las capacidades de navegación del robot y de exploración visual para ser resuelta con éxito. Estaba definida de la siguiente forma:

1. (LabRob). Ejecución de una tarea de movimiento hasta visualizar a una persona situada a 4 metros de distancia.
2. (LabRob). Ejecución de la opción de pausar para visualizar las acciones de la persona.
3. (LabRob). Cambio a control del otro robot (ParRob).
4. (ParRob). Ejecución de una tarea de movimiento hasta visualizar a una persona situada a 4 metros de distancia.
5. (ParRob). Ejecución de una alarma para llamar la atención de la persona.

Debe resaltarse que los usuarios no conocían los entornos remotos (sólo se les mostraron mapas de éstos). Los usuarios debían realizar dos ejecuciones de la tarea. La secuenciación temporal se estableció a los mismos valores que los de la ejecución *online* de la tarea de entrenamiento de la Fase I. Para cada participante esta fase de teleoperación duró aproximadamente una hora.

7. RESULTADOS Y EVALUACIÓN

Esta sección describe los resultados obtenidos en la realización del protocolo de experimentación. La Fase I consistía en una tarea de *screening* y entrenamiento. En cuanto a la tarea de *screening* se comprobó por inspección visual del EEG adquirido que se producía el potencial P300 para los dos usuarios, validando así el diseño de la interfaz gráfica y de las características visuales de su proceso de estimulación. En cuanto a la tarea de entrenamiento los usuarios realizaron las ejecuciones *offline*, se seleccionaron por inspección visual los canales con mejor respuesta P300 (10 y 9 canales para cada usuario) y se aplicaron las técnicas de procesamiento de señal para calibrar el sistema. Posteriormente realizaron la ejecución *online* obteniendo un rendimiento del sistema BCI superior al 90 %, y por tanto quedaron cualificados para la segunda fase. La Fase II consistía en la realización de dos ejecuciones *online* de una tarea predefinida que requería el uso conjunto de las capacidades de navegación y exploración. El resultado global es que los dos usuarios fueron capaces de controlar el sistema con éxito, sin obtener errores, mostrando una alta robustez del sistema en su conjunto. En las siguientes subsecciones se describe una evaluación técnica del sistema de teleoperación y de sus principales subsistemas: el sistema cerebro-computador y el sistema robótico.

7.1 Evaluación global del sistema de teleoperación

Siguiendo (Montesano *et al.*, 2010; Iturrate *et al.*, 2009) se han propuesto las siguientes métricas:

- Éxito de la tarea.
- Tiempo (s): tiempo total para completar la tarea.
- Distancia (m): distancia total recorrida entre los dos robots para completar la tarea.
- Número de misiones ³ para completar la tarea.
- Rendimiento del sistema BCI.

La Tabla 1 resume los resultados (mínimo, máximo, media y desviación típica) para las cuatro ejecuciones (2 ejecuciones por participante).

³ Las misiones se definen como los comandos enviados al sistema robótico (ver sección 5.1).

Tabla1. Métricas para evaluar el rendimiento global del sistema de teleoperación

	min	max	mean	std
Éxito	1	1	1	0
Tiempo(s)	382	614	492	95.25
Distancia(m)	1.25	2.50	5	0.54
# misiones	7	10	9	1.41
Rendimiento BCI	0.85	1.00	0.94	0.06

La tarea de teleoperación fue resuelta con éxito en las dos ejecuciones de cada participante, lo cual es el mejor indicador de la robustez y validez del sistema de teleoperación. Además se puede concluir que las opciones proporcionadas por la interfaz gráfica fueron prácticas y suficientes, y que la interfaz es usable dado que los participantes pudieron comprenderla tras un breve tutorial explicatorio. En cuanto a la navegación del robot no se registraron colisiones. Debe notarse que hay una relativa variabilidad en los tiempos y distancias entre las ejecuciones de la tarea, lo cual se debe a que podía ser resuelta utilizando diferentes estrategias. Uno de los aspectos determinantes de estos sistemas es la robustez y precisión en la interacción con el sistema BCI, la cual fue muy satisfactoria logrando un rendimiento en media del 94 % y siempre superior al 85 %. Los resultados son muy prometedores porque muestran la capacidad de este sistema para resolver tareas simples en las que tanto navegación como exploración son necesarias, en entornos desconocidos y en una configuración real.

7.2 Evaluación del sistema cerebro-computador

La evaluación del sistema BCI abarca la evaluación del rendimiento de las técnicas de procesamiento de señal y del diseño de la interfaz gráfica. Siguiendo (Mason *et al.*, 2006; Montesano *et al.*, 2010) se han propuesto las métricas:

- Rendimiento BCI: tasa de aciertos en el reconocimiento.
- Número de selecciones.
- Número de errores: errores de reconocimiento de las técnicas de procesamiento de señal (opciones seleccionadas que no eran las deseadas por el usuario).
- Número de misiones.
- Ratio de usabilidad: número de selecciones por misión.
- Número de misiones por minuto.
- Número de secuencias en el proceso de estimulación.
- Número de errores causados por una falta de comprensión de la interfaz.

Los resultados de las cuatro ejecuciones se encuentran resumidos en la Tabla 2.

Tabla2. Métricas para evaluar el sistema cerebro-computador

	min	max	mean	std
Rendimiento BCI	0.85	1.00	0.94	0.06
# selecciones	16	27	20.75	4.57
# errores	0	4	1.50	1.73
# misiones	7	10	9	1.41
Ratio de usabilidad	2.00	2.70	2.30	0.30
# misiones/min	0.98	1.26	1.11	0.12
# secuencias	8	8	8	0
# errores entendimiento	0	0	0	0

El rendimiento BCI obtenido en los experimentos fue en media del 94 % y siempre superior al 85 %, lo que indica un alto rendimiento para ambos participantes. El número de secuencias se redujo a 8 para reducir el tiempo necesario del

proceso de estimulación (el número de secuencias en la tarea de entrenamiento de la Fase I fue 10). Dado ese número de secuencias y la secuenciación temporal del proceso (definida de antemano en la metodología), el número de selecciones por minuto quedó fijado a 5. El ratio de usabilidad del sistema, definido como el número de selecciones por misión, es idealmente igual a 2 debido al protocolo de ejecución del sistema (se necesitan al menos 2 selecciones para ordenar una misión, esto es, para enviar un comando al sistema robótico). Los errores de reconocimiento del sistema BCI y los de entendimiento de la interfaz por parte del usuario aumentan el ratio de usabilidad, que en media fue de 2.30. A su vez, esos mismos errores establecen el número de misiones por minuto del sistema, que fue de 1.11 en media. La ausencia de errores debido a una mala comprensión de la interfaz sugiere que ésta es relativamente fácil de comprender. Además todas las opciones proporcionadas por la interfaz fueron usadas, demostrando así que no hay opciones inútiles. En general el diseño de la interfaz es válido dado que los usuarios fueron capaces de resolver las tareas usando las funcionalidades proporcionadas. Estos resultados indican que la integración de la interfaz gráfica en la interfaz cerebro-computador es apropiada para el control del presente sistema de teleoperación multi-robot.

7.3 Evaluación de los sistemas robóticos

Basado en (Montesano *et al.*, 2010) se han propuesto las siguientes métricas para evaluar los sistemas robóticos:

- Distancia (m) total recorrida por los robots.
- Número de misiones de navegación: número de comandos de movimiento enviados a los robots.
- Tiempo de navegación (s) por misión: tiempo empleado en completar las misiones de navegación.

Los resultados de las cuatro ejecuciones se encuentran resumidos en la Tabla 3.

Tabla3. Métricas para evaluar los sistemas robóticos

	min	max	mean	std
Distancia(m)	1.25	2.50	5	0.54
# misiones navegación	2	7	5.00	2.16
Tiempo(s)/misión	4	23	7.10	6.01

En total se llevaron a cabo 20 misiones de navegación sin colisiones con los elementos del entorno. Debe citarse que el sistema robótico no dispone de ningún sistema de navegación ni de evitación de obstáculos debido a las limitaciones de sus sensores de proximidad. En general el rendimiento del sistema robótico fue aceptable considerando las limitaciones técnicas que conlleva la miniaturización de un robot y cabe destacar que los robots fueron capaces de navegar en entornos reales sin reportar errores. Además debe notarse que la calidad de vídeo ofrecida por la cámara fue suficiente puesto que la consecución de la tarea requería la capacidad de exploración visual.

8. CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta un sistema de teleoperación multi-robot basado en interfaz cerebro-computador en el que se utilizan robots miniaturizados de bajo coste. Este sistema ofrece al usuario presencia simultánea en entornos remotos únicamente con la condición de tener acceso a internet, dotándole de las capacidades de percepción visual, navegación, y una interacción simple mediante el envío de alarmas. Además el sistema puede

ser pausado por el usuario durante un tiempo si así lo desea. Desde el punto de vista de la interacción con el sistema BCI este sistema tiene propiedades similares a aquellos basados en el protocolo síncrono P300: alto rendimiento en el reconocimiento y poco tiempo necesario para su calibración, pero limitado ratio de transferencia de información (ITR). Sin embargo este sistema presenta dos ventajas: (i) una vez que la orden es enviada a los dispositivos robóticos el usuario se puede relajar dado que las funcionalidades están automatizadas, evitando procesos mentales exhaustivos; y (ii) la información tiene que viajar a través de internet pero es ejecutada autónomamente en el robot, evitando el problema de retraso en la transferencia por internet de sistemas de teleoperación con control continuo.

Este sistema no solo tiene uso como un dispositivo de teleoperación sino que además se ha sugerido que la implicación del paciente en este tipo de sistemas podría producir un efecto de neurorehabilitación, manteniendo la actividad neuronal relacionada con la navegación espacial, acción y comunicación, evitando o retrasando de esta forma la extinción del pensamiento que hipotéticamente ocurre en etapas avanzadas de pacientes de esclerosis lateral amiotrófica (Kübler and Birbaumer, 2008).

A nivel de ingeniería la minituarización de los dispositivos robóticos conlleva una degradación de prestaciones: cámara de baja resolución, limitada tasa de transferencia de vídeo, y sensores de proximidad poco precisos. Sin embargo la percepción visual proporcionada se ha demostrado suficiente para la consecución de las tareas de experimentación. La mejora en las prestaciones de estos dispositivos robóticos de bajo coste y dimensiones implicaría de forma directa la mejora del presente sistema de teleoperación así como posibilitaría la incorporación de estrategias de alto nivel para la ayuda al usuario, como por ejemplo sistemas de navegación o evitación de obstáculos.

El sistema de teleoperación propuesto ha sido evaluado con 2 usuarios sanos a modo de pre-estudio de aplicabilidad de esta tecnología en pacientes. Se elaboró una metodología de experimentación para validar el sistema BCI por separado y para la evaluación del sistema de teleoperación (en conjunto y por cada uno de sus principales subsistemas). Debe notarse que aunque el sistema soporta el control de un número arbitrario de robots, dicho número se restringió a dos en las fases de experimentación. El principal resultado es que ambos usuarios fueron capaces de resolver las tareas propuestas con éxito, sin reportar ningún error y mostrando una alta robustez del sistema. Esto indica que usuarios sin lesiones pueden utilizar el sistema para las tareas propias de un paciente, lo cual es un buen indicador de la madurez de la tecnología para ser reorientada hacia usuarios finales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte ofrecido por el equipo de la Universidad, y muy especialmente a Rodrigo García por su trabajo en el proyecto. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos HYPER-CSD2009-00067 y DPI2009-14732-C02-01.

REFERENCIAS

Birbaumer, N., N. Ghanayim, T. Hinterberger, I. Iversen, B. Kotchoubey, A. Kübler, J. Perelmouter, E. Taub and H. Flor (1999). A spelling device for the paralyzed. *Nature* **398**, 297–298.

del R. Millán, José, F. Renkens, J. Mourino and W. Gerstner (2004). Noninvasive brain-actuated control of a mobile robot by human EEG. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on* **51**(6), 1026–1033.

Escolano, C., A. Ramos, T. Matuz, N. Birbaumer and J. Mínguez (2010). A Telepresence Robotic System operated with a P300-based Brain-Computer Interface: Initial Tests with ALS patients. *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*.

Escolano, C., J. Antelis and J. Mínguez (2009). Human Brain-Teleoperated Robot between Remote Places. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.

Farwell, L.A. and E. Donchin (1988). Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *EEG Clinical Neurophysiology* **70**(6), 510–23.

Iturrate, I., J. Antelis, A. Kübler and J. Mínguez (2009). A Non-Invasive Brain-Actuated Wheelchair based on a P300 Neurophysiological Protocol and Automated Navigation. *IEEE Transactions on Robotics* **25**(3), 614–627.

Karim, A. A., T. Hinterberger and J. Richter (2006). Neural Internet: Web surfing with brain potentials for the completely paralyzed. *Neurorehabilitation and Neural Repair* **20**(4), 508–515.

Krusienski, D. J., E. W. Sellers, F. Cabestaing, S. Bayouth, D. J. McFarland, T. M. Vaughan and J. R. Wolpaw (2006). A comparison of classification techniques for the P300 Speller. *Journal of Neural Engineering* **3**, 299–305.

Kübler, A. and N. Birbaumer (2008). Brain-computer interfaces and communication in paralysis: Extinction of goal directed thinking in completely paralysed patients?. *Clinical Neurophysiology* **119**(11), 2658 – 2666.

Mason, S., J. Kronegg, J. Huggins, M. Fatourehchi and A. Schlogl (2006). Evaluating the Performance of Self-Paced Brain-Computer Interface Technology. Technical report. Neil Squire Society, Vancouver, Canada.

Mondada, F., M. Bonani, X. Raemy, J. Pugh, C. Cianci, A. Klapotocz, S. Magnenat, J.C. Zufferey, D. Floreano and A. Martinoli (2009). The e-puck, a Robot Designed for Education in Engineering. In: *Proceedings of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*. Vol. 1. pp. 59–65.

Montesano, L., M. Diaz, S. Bhaskar and J. Mínguez (2010). Towards an Intelligent Wheelchair System for Cerebral Palsy Subjects. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*.

Patel, S.H. and P.N. Azzam (2005). Characterization of N200 and P300: Selected Studies of the Event-Related Potential. *International Journal of Medical Sciences* pp. 147–154.

Popovic, M.R., D.B. Popovic and T. Keller (2002). Neuroprostheses for grasping. *Neurological Research* **24**(5), 443–452.

Schalk, G., D.J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer and J.R. Wolpaw (2004). BCI2000: A General-Purpose Brain-Computer Interface (BCI) System. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **51**(6), 1034–43.

Sutton, S., M. Braren, J. Zublin and E. R. John (1965). Evoked potential correlates of stimulus uncertainty. *Science* **150**(3700), 1187–1188.

Wolpaw, J. R., D. J. McFarland, G. W. Neat and C. A. Forneris (1991). An EEG-based brain-computer interface for cursor control. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* **78**(3), 252–259.