

Interacción ocular con Robots: Una ayuda para discapacitados



José María Azorín-Poveda*
Eduardo Iáñez-Martínez*
Eduardo Fernández-Jover*
José María Sabater-Navarro*

Dr. Ingeniero
Ingeniero de Telecomunicación
Dr. en Medicina y Cirugía
Dr. Ingeniero Industrial

* Universidad Miguel Hernández. Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Instituto de Bioingeniería, Edificio Quorum V, Avda. de la Universidad, s/n - 03202 Elche (Alicante).
Tfno: +34 966 658902. jm.azorin@umh.es, eianez@umh.es, e.fernandez@umh.es, j.sabater@umh.es

Recibido: 11/05/2010 • Aceptado: 18/10/2010

Ocular interaction with Robots: An aid to the disabled

ABSTRACT

• This paper describes a technique to control remotely a robot arm from his eyes movement. This method will help disabled people to control a robot in order to aid them to perform tasks in their daily lives. The electrooculography technique (EOG) is used to detect the eyes movement. EOG registers the potential difference between the cornea and the retina using electrodes.

The eyes movement is used to control a remote robot arm of 6 degrees of freedom. First, the paper introduces several eye movement techniques to interact with devices, focusing on the EOG one. Then, the paper describes the system that allows interacting with a robot through the eyes movement. Finally, the paper shows some experimental results related to the robot controlled by the EOG-based interface.

• **KEYWORDS:** Man-machine interface, assistive technologies, robotics, electrooculography, remote control.

RESUMEN

En este artículo se describe una técnica que permite a una persona controlar a distancia un brazo robot a partir del movimiento de sus ojos. Esta técnica posibilitará que personas con un alto grado de discapacidad puedan controlar un robot para que les ayude a realizar tareas en su vida diaria. El movimiento de los ojos es registrado utilizando la técnica de electro-oculografía (EOG), que se basa en detectar la diferencia de potencial entre la córnea y la retina mediante electrodos. El movimiento realizado por los ojos es utilizado para controlar el extremo de un brazo robot de 6 grados de libertad. El artículo comienza introduciendo diferentes técnicas de interacción con dispositivos mediante el movimiento de los ojos y explicando con detalle la técnica de electro-oculografía. Posteriormente, el artículo describe el sistema que permite interaccionar con un robot mediante el movimiento de los ojos. Por último, el artículo muestra algunos resultados experimentales obtenidos al controlar un robot mediante la interfaz basada en electro-oculografía.

Palabras clave: Interfaz hombre-máquina, tecnologías de ayuda a

la discapacidad, robótica, electro-oculografía, control remoto.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen numerosos sistemas de ayuda para personas con discapacidad. Estos sistemas están destinados a conseguir una mejor movilidad de las personas afectadas y a facilitarles la interacción con los dispositivos. Por ejemplo, para mejorar la movilidad de las personas se han desarrollado sillas de ruedas automatizadas (Nisbet, 1996), prótesis robóticas para las extremidades (Jeong et al., 2000) o exoesqueletos (Sankai, 2006; Pons, 2008). Por otra parte, para facilitar la interacción con dispositivos se han desarrollado diferentes tipos de interfaces, como por ejemplo teclados de conceptos (Baloian, Breuer & Luther, 2005), navegadores de voz para invidentes como OpenBook (OpenBook, 2010), interfaces cerebro-máquina (Millán et al., 2004) o interfaces basadas en movimientos oculares. Todos estos sistemas tienen como finalidad facilitar la vida diaria a personas con discapacidad.

En el caso de las interfaces para interaccionar con dispositivos a partir

del movimiento de los ojos, existen diferentes alternativas que pueden utilizarse para registrar y detectar el movimiento ocular realizado (*eye-tracking interfaces*) (Hutchinson et al., 1989). Una de estas opciones son las basadas en video oculografía (Video-Oculography, VOG), en la cual se utiliza una cámara de vídeo y software de procesamiento de imágenes para evaluar la dirección de la mirada y el parpadeo (Oyekoya & Stentiford, 2006; Wei, 2008; Úbeda, 2009). La dirección de la mirada de una persona está determinada por dos factores: la orientación de la cara y la de los ojos. Considerando ambos factores puede obtenerse hacia donde mira la persona respecto a la referencia de la cámara. Este sistema tiene el inconveniente de tener una baja resolución y requerir un gran software y hardware de reconocimiento de imágenes. Además, es necesario que la persona se encuentre situada frente a la cámara y si no se tienen los ojos completamente abiertos o la iluminación no es la adecuada, se dificultará la detección del movimiento ocular realizado.

Otra de las opciones que se utilizan para detectar el movimiento de los ojos es la oculografía infrarroja (*InfraRed-OculoGraphy*, IROG) (Lo Castro, 2008; TOBII, 2010). Estas interfaces se basan en dirigir una fuente de luz infrarroja contra el ojo y medir la cantidad de luz reflejada detectando los cambios de posición de la pupila o si el párpado está abierto o cerrado. Se utiliza luz infrarroja porque es invisible a los ojos y no distrae al usuario. Normalmente se utiliza para medir movimientos horizontales más que verticales y puede alcanzar resoluciones espaciales del orden de 0.1° . La desventaja de esta técnica es el parpadeo, ya que no sólo se cubre el ojo, sino que el ojo se retrae ligeramente después del parpadeo, modificando la cantidad de luz reflejada por un corto tiempo. También, el no tener los ojos completamente abiertos dificultará la detección.

En las dos técnicas anteriores existe el inconveniente de que, si el sistema se monta sobre el propio usuario, será necesario un sistema adicional que proporcione la posición y la orientación del sistema respecto a un punto de referencia fijo, con el fin de poder obtener la dirección de la mirada globalmente o sobre un espacio concreto. Algunos ejemplos comerciales de estas interfaces son los sistemas HMD Systems (HMD Systems, 2010), EyeLink II (EyeLink II, 2010) y TOBII (TOBII, 2010), que se basan en VOG, o el sistema Smart Eye Pro 4.5 (Smart Eye, 2010), que se basa en IROG.

La alternativa que se plantea en el presente artículo es utilizar la técnica de la electro-oculografía (EOG) para registrar el movimiento ocular realizado por la persona (González, García & Tulli, 2005). La electro-oculografía se basa en detectar el movimiento de los ojos midiendo, mediante electrodos, la diferencia de potencial entre la córnea y la retina. La electro-oculografía presenta ciertas ventajas frente a las anteriores interfaces de detección de movimiento ocular: en primer lugar, la persona no debe estar alineada con ningún sistema de visión, de manera que no debe establecerse un espacio de trabajo libre de posibles oclusiones. Por otra parte, el resto de movimientos de la

persona no afecta a la detección. Además, la iluminación no es crítica y la cantidad de apertura del ojo no influye en la detección del movimiento.

En este artículo se describe un sistema basado en electro-oculografía que permite realizar el control de un brazo robot a distancia a partir del movimiento ocular de una persona. Este sistema permitirá que personas con un alto grado de discapacidad puedan controlar un brazo robot con la finalidad de que les ayude a realizar tareas cotidianas.

2. ¿QUÉ ES LA ELECTRO-OCULOGRAFÍA?

La electro-oculografía es una técnica que permite detectar movimientos oculares a partir de la diferencia de potencial entre la córnea y la retina (Nicolau, Burcet & Rial, 1995). En condiciones normales, la retina tiene un potencial bioeléctrico de carácter negativo respecto a la córnea. Por ello, los giros del globo ocular provocan cambios en la dirección del vector correspondiente a este dipolo eléctrico (Fig. 1). La electro-oculografía se basa precisamente en el registro neurofisiológico de dichos cambios.

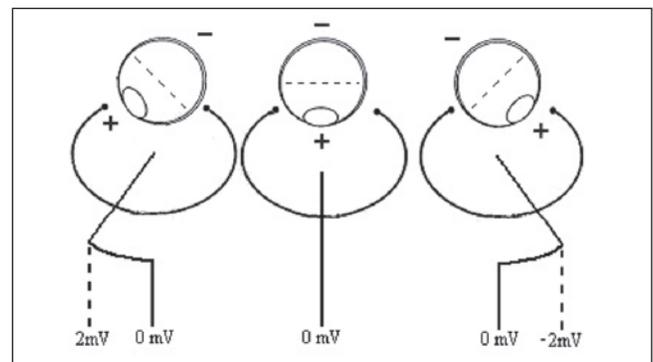


Figura 1: Dipolo ocular

En condiciones habituales existe una diferencia de potencial aproximativo desde 0.05 a 3.5 mV, con un rango de frecuencia entre DC y 100Hz, entre la córnea y la *membrana de Bruch* (capa interna del ojo entre los fotorreceptores y el nervio óptico) situada en la parte posterior del ojo (Barea et al., 2002). Esta variación de potencial se considera casi proporcional al desplazamiento del ojo hasta un ángulo de $\pm 50^\circ$ horizontal y de $\pm 30^\circ$ en vertical (Chen & Newman, 2004).

El origen de esta diferencia se encuentra en el epitelio pigmentario de la retina y permite considerar la presencia de un dipolo, el cual puede ser representado por un vector cuyo brazo coincide con el eje anteroposterior del globo ocular, donde la córnea corresponde al extremo positivo y la retina al extremo negativo de dicho dipolo. Al medir el potencial producido por un dipolo, la magnitud (voltaje) y polaridad del potencial registrado dependerán, en gran medida, de la angulación del dipolo con respecto a los electrodos pertenecientes a dichos sistemas de registro.

Para poder registrar dichos cambios se requiere colocar unos pequeños electrodos sobre la piel cerca de los ojos (Fig. 2). Para medir el desplazamiento vertical se situarán dos electrodos, uno sobre un ojo y otro bajo el mismo conectándolos a posteriori de forma diferencial; y para medir el desplazamiento horizontal se sitúan los electrodos a la derecha de un ojo y a la izquierda de otro, conectándolos también en forma diferencial; como referencia, la tierra es situada en la frente. La colocación se realiza, en primer lugar, aplicando un gel conductor para mejorar la conductividad de la piel y a continuación se fijan los electrodos mediante tela adhesiva o pegatinas de doble capa. No obstante, actualmente están apareciendo en el mercado electrodos secos, que no requieren el uso de gel conductor, lo que simplifica el proceso de colocación. Estos electrodos serán usados en trabajos futuros.

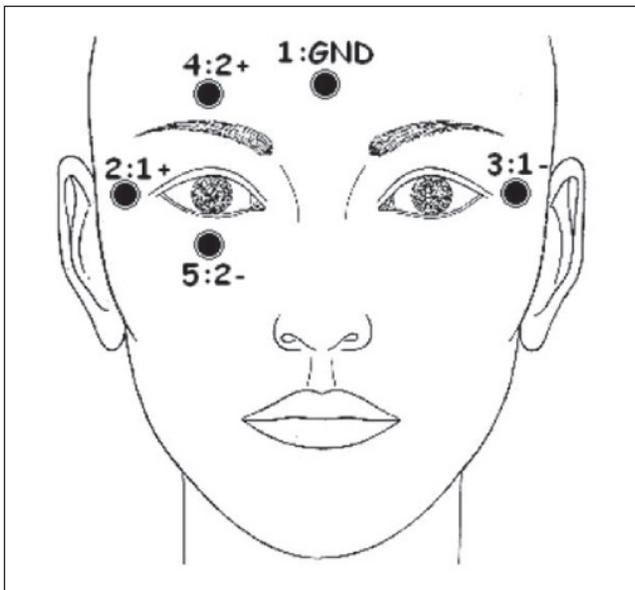


Figura 2: Posición de los electrodos en la cara. 1: electrodo de tierra. 2 y 3 para medir la desviación horizontal, y 4 y 5 para la vertical.

3. MATERIALES

Este apartado se divide en Materiales (elementos utilizados en el desarrollo) por una parte y en Métodos (procedimiento seguido en el trabajo) por otra.

3.1. MATERIALES

El sistema desarrollado que permite controlar a distancia un brazo robot a partir del movimiento ocular se distribuye entre el entorno local donde se encuentra la persona y el entorno remoto en el que se sitúa el robot. En la Fig. 3 se muestra el diagrama de bloques del sistema, indicando el hardware y el software empleados.

En el entorno local se encuentra, principalmente, además de la persona: el sistema de adquisición EOG, compuesto por los electrodos que recogerán las señales y el dispositivo *Nicolet Viking IV D*, encargado de la amplificación y el

filtrado de las señales; y una tarjeta de adquisición de datos para adquirir las señales EOG en un ordenador y realizar su posterior procesamiento. Por otra parte, en el entorno remoto principalmente se sitúa un robot *FANUC LR Mate 200iB*.

En el entorno local se realizará, además de la adquisición de las señales de EOG, su procesamiento con el objetivo de detectar el movimiento de ojo realizado y determinar el comando de control a enviar al robot. Este comando se enviará mediante una aplicación cliente desde el entorno local hasta un servidor de control del robot situado en el entorno remoto.

3.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN EOG

Como se ha indicado anteriormente, el sistema de adquisición EOG está compuesto por los electrodos que recogerán las señales y el dispositivo *Nicolet Viking IV D* encargado de la amplificación y el filtrado de las señales (ver Fig. 4).

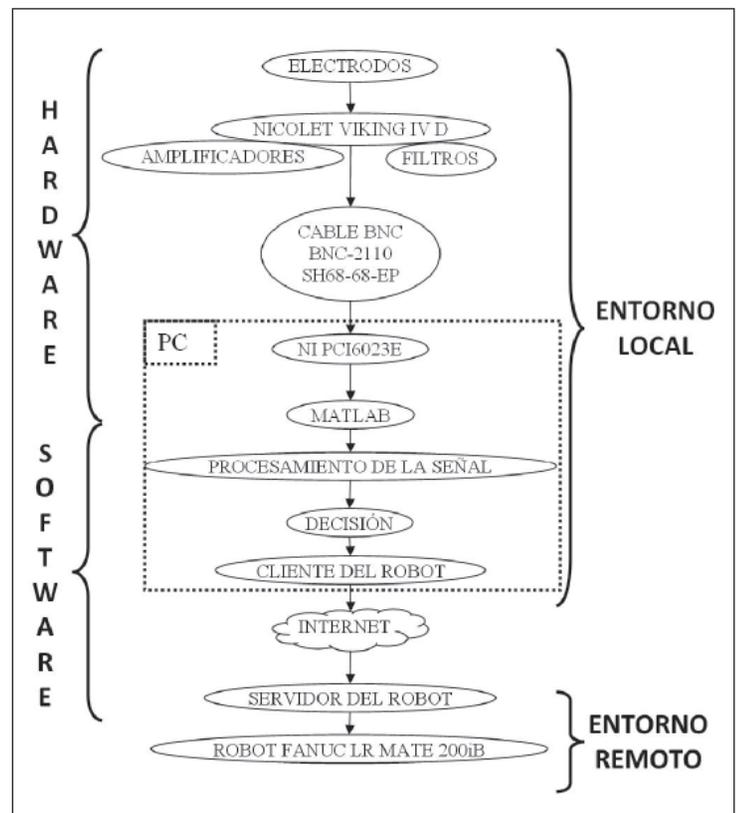


Figura 3: Diagrama de bloques general del sistema. Diferenciando hardware/software y entorno local/remoto.

Los electrodos utilizados son de cloruro de plata con un disco de 10mm de diámetro y una conexión de 2mm tipo *pin-jacks*. Para conseguir una mayor conductividad entre la piel y el electrodo se limpia previamente la piel con alcohol y se utiliza un gel conductor. Los electrodos se sitúan lo más cerca del ojo posible para obtener una mejor calidad de señal.

La colocación de los electrodos tiene la siguiente distribución (Fig. 2): 2 electrodos situados a derecha e



Figura 4: Sistema de adquisición EOG en el entorno local, donde aparece la persona con los electrodos puestos y el dispositivo Nicolet Viking IV D (derecha).

izquierda de los ojos respectivamente (2:1+ y 3:1-) para obtener el desplazamiento horizontal, 2 electrodos situados arriba y debajo de los ojos respectivamente (4:2+ y 5:2-) para obtener el desplazamiento vertical de los ojos, y por último se sitúa la tierra de referencia en la frente (1:Ground). La nomenclatura de los electrodos en la imagen indica, además del número del electrodo, el canal al que va conectado y si va conectado al terminal positivo o negativo. Los electrodos horizontales y verticales se conectan posteriormente a los amplificadores de forma diferencial y todos referidos a la tierra situada en la frente.

Como sistema de amplificación y filtrado se dispone del dispositivo *Nicolet Viking IVD*, que dispone de amplificadores y filtros de muy buena calidad. El dispositivo dispone de 4 amplificadores con la conexión *pin-jack* de 2mm (+, -, Ground) con una sensibilidad de 1 mV/div hasta 10mV/div en 13 pasos (ganancias entre 20 y 200.000) y 2V pico-pico de máxima escala de salida, un bajo ruido de menos de 0.7mV RMS desde 2 Hz hasta 10 KHz con entrada en cortocircuito, filtro *Notch* a 50 Hz y sendos filtros paso alto y paso bajo (ambos 12 dB/década) seleccionables a distintas frecuencias. Los filtros que han sido seleccionados son: filtro paso-alto (0.2 Hz; y filtro paso-bajo: 30 Hz). El dispositivo ofrece las señales de salida, además de por pantalla, mediante cable coaxial, uno por canal. La ganancia seleccionada para recoger las señales es de 1000 (seleccionando una en el dispositivo SNS=200uV). Se ha creado un perfil en el dispositivo con todos estos parámetros para seleccionarlo y poder trabajar directamente con esta configuración.

El dispositivo también permite medir la impedancia de los electrodos. Hay que tener en cuenta al colocarlos que la impedancia medida debe ser menor de 100K Ω para así obtener una calidad aceptable de señal.

3.3. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para adquirir las señales EOG en el ordenador y realizar su procesamiento se utiliza una tarjeta de adquisición de

National Instruments® PCI-6023E. Esta tarjeta muestreará y digitalizará la señal proveniente de los amplificadores. Para conectar la salida en cable coaxial de los amplificadores a la tarjeta PCI-6023E es necesario el bloque conector BNC-2110, que dispone de 8 canales analógicos con conexión coaxial, y un cable SH68-68-EP, que une dicho bloque con la tarjeta ubicada en el ordenador.

El modelo PCI-6023E dispone de 16 entradas analógicas, de las cuales sólo se utilizan 2, una por cada canal, 12 bits de resolución de entrada, un rango de entrada de ± 0.05 a ± 10 V, una sensibilidad media de 0.008 mV, y una máxima tasa de muestreo de 200 KS/s, siendo más que suficiente, ya que únicamente se muestrea cada canal a 100 Hz.

La captura de los datos en el ordenador se realiza desde *Matlab* utilizando el *Toolbox "Data Acquisition Tool"*, que permite conectarse a la tarjeta para configurarla y obtener las muestras, tanto para almacenarlas, como para trabajar en tiempo real. Se ha diseñado una función en *Matlab* que permite realizar estos procedimientos de forma automatizada.

3.4. ROBOT FANUC LR MATE 200IB

El brazo robot que está controlado a distancia mediante el movimiento ocular es el robot *FANUC LR Mate 200iB*. Este robot dispone de 6 grados de libertad y puede cargar en su extremo hasta 5 Kg. En la Fig. 5 se muestra el robot, junto a los ejes de los que dispone.

Hay que destacar que se ha colocado una cámara en el extremo del robot, es decir, unida directamente al eje J6, con la finalidad de poder ver desde el punto de vista del extremo del robot. Además se ha ubicado otra cámara externa en el entorno remoto para visualizar el robot completo. Ambas cámaras han sido utilizadas durante los experimentos para verificar los movimientos efectuados por el robot a partir de los movimientos oculares realizados por la persona.

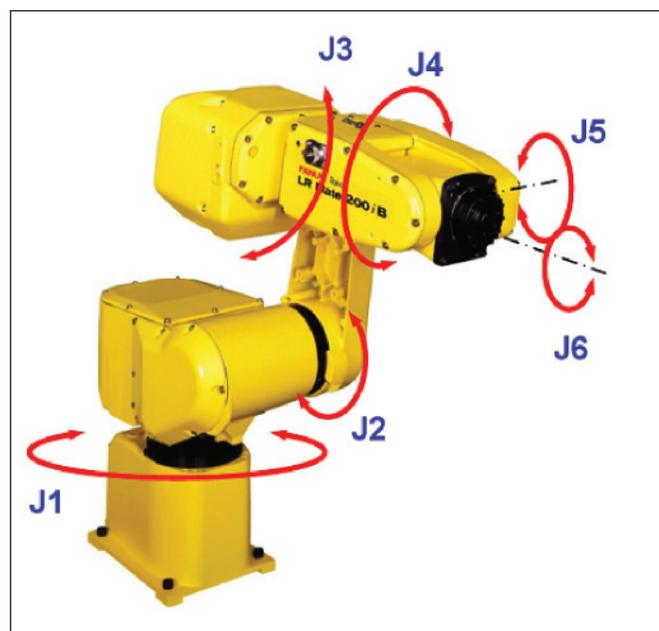


Figura 5: Robot FANUC LR Mate 200iB

Para controlar el robot *FANUC LR Mate 200iB* se ha utilizado un software en C++ compuesto de un sistema cliente/servidor basado en el protocolo RPC (*Remote Procedure Call*). El servidor se encuentra en un ordenador junto al robot en el entorno remoto y se conecta al robot mediante red para transmitirle las instrucciones pertinentes. El cliente se ejecuta en el ordenador que se utiliza para capturar las señales de EOG en el entorno local. Una vez iniciado el cliente e indicada la IP del servidor, éste se conectará y se pondrá a la espera de instrucciones. Cada vez que el cliente reciba una instrucción de movimiento del robot, se la enviará al servidor mediante RPC para que éste se la comunique al robot y el robot efectúe el movimiento correspondiente.

4. MÉTODOS

En este apartado se describe el software desarrollado para detectar el movimiento de los ojos, así como para realizar el control del robot. En la Fig. 6 se muestra el diagrama de bloques detallado del sistema de procesamiento software. Por otra parte, en la Fig. 7, se puede observar la evolución de las señales durante el procesamiento.

4.1. PROCESAMIENTO

Antes de explicar el procesamiento que se realiza sobre las señales de EOG para determinar el movimiento efectuado del ojo, hay que indicar que se han establecido dos modos de funcionamiento del sistema. Es decir, se han establecido dos modos de generar el comando del robot según el movimiento ocular efectuado. Los dos modos de funcionamiento que se han definido son los siguientes:

- **Modo 1: Movimiento sin retorno al centro.** Este modo consiste en mover el robot de forma continuada en la dirección a la que está mirando el ojo. De esta forma, el robot se moverá en la dirección del ojo hasta que la mirada vuelva al centro, momento en el cual se parará. Por ejemplo, en el caso de querer mover el robot a la derecha, la persona moverá sus ojos a la derecha. Mientras la persona tenga sus ojos hacia la derecha, el robot se moverá a la derecha. Para detener el robot la persona moverá sus ojos al centro.
- **Modo 2: Movimiento con retorno al centro.** Este modo se basa en generar el movimiento deseado del robot a partir de un movimiento rápido de los ojos en la dirección deseada y con regreso al centro. Es decir, en el caso de querer mover el robot a la derecha, la persona realizará un movimiento rápido de los ojos en esa dirección, pero con retorno al centro. A partir de este momento el robot empezará a moverse hacia la derecha. Para detener el robot la persona deberá realizar un movimiento rápido con retorno al centro en la dirección contraria. Si por ejemplo, el robot se estaba moviendo a la derecha

y se desea detener al robot, la persona realizará un movimiento rápido hacia la izquierda con retorno al centro.

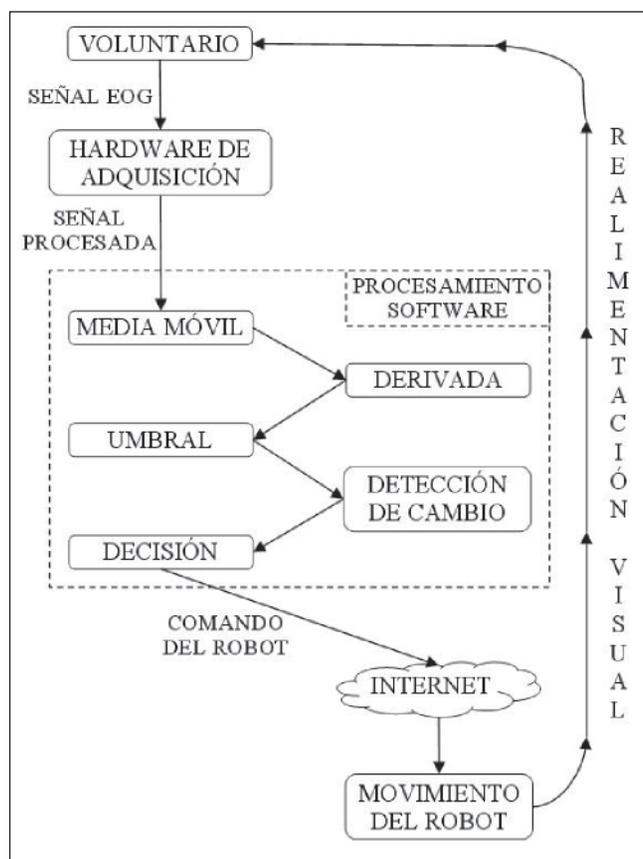


Figura 6: Diagrama de bloques del procesamiento software

El procesamiento que se realiza sobre las señales EOG para determinar el movimiento ocular realizado consta de los siguientes pasos (ver Fig. 6 y 7):

1. Inicialmente se calcula la media móvil para eliminar ruido y tener una señal más limpia.
2. A continuación se realiza la derivada, ya que, cuando la persona mira en una dirección, la señal cambia bruscamente. Este cambio rápido seguido de una caída suave es detectable mediante la derivada, obteniendo un valor alto en el instante en que se produjo.
3. El siguiente paso es utilizar un umbral para eliminar los valores que no hayan implicado estos cambios.
4. A continuación se comprueba cómo ha sido el cambio producido buscando los máximos y los mínimos. Para el modo 1 se buscará la secuencia máx/mín o mín/máx y para el modo 2 las secuencias máx/mín/máx o mín/máx/mín.
5. Una vez detectados los cambios se decide qué movimiento se ha efectuado y se envía a la máquina de estados que se explicará posteriormente.

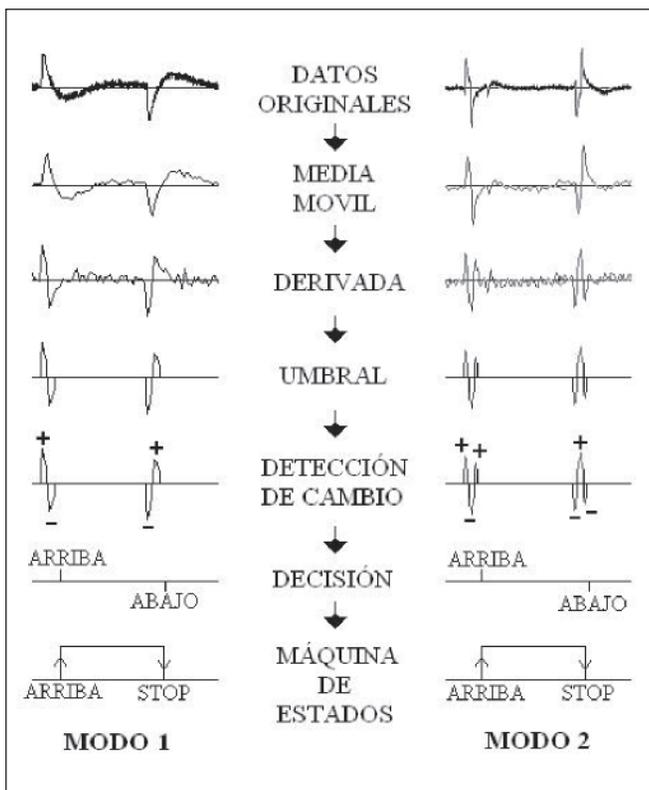


Figura 7: Secuencia de procesamiento software. Se observa la evolución de las señales según se van procesando en los dos modos de funcionamiento para un canal. Las señales son análogas para ambos canales (arriba/abajo e izquierda/derecha) excepto por el valor de los umbrales.

En la Fig. 7 se muestra el proceso que siguen las señales según se van procesando desde la señal original hasta tomar una decisión de hacia dónde se ha mirado. Sólo se ha puesto un canal, pues el otro canal es análogo. Únicamente cambiarían los umbrales de detección para separar ruido y mirada fija de un movimiento ocular. Estos umbrales son distintos para cada persona, así como diferentes para el desplazamiento horizontal y vertical, por lo tanto se requiere un calibrado para cada persona. Por este motivo se ha desarrollado un programa de calibración automático que es utilizado inicialmente por la persona cuando se pone los electrodos. Este programa indica a la persona que mire en determinadas direcciones, y a partir de los datos recogidos, calcula los umbrales en modo offline.

El procesamiento mostrado en la Fig. 6 ha sido implementado mediante una función de *Matlab*. La función permite, pasándole como parámetros los datos registrados para los canales horizontal y vertical, obtener como salida la dirección del movimiento de los ojos realizada en dicho momento y el movimiento a efectuar en función de la máquina de estados en tiempo real. El procesamiento se ha realizado en *Matlab* ya que permite una conexión simple con la tarjeta de *National Instruments* encargada del muestreo y digitalización de los datos y debido a que *Matlab* dispone de multitud de funciones para procesamiento de señales.

4.2. PROTOCOLO DE CONTROL DEL ROBOT REMOTO

Una vez que se ha detectado mediante el procesamiento el movimiento ocular realizado por la persona, es necesario enviar el comando de movimiento al robot. Para generar el comando de control del robot se utiliza la máquina de estados que se muestra en la Fig. 8, que permite generar movimientos en 8 direcciones. En la figura los círculos indican el movimiento que realiza el robot y las flechas indican el movimiento detectado en el procesamiento.

Debido a que los movimientos detectados en los ojos pueden ser arriba/abajo y derecha/izquierda (y la combinación de éstos para conseguir desplazamientos diagonales), sólo podrán controlarse 2 grados de libertad de los 6 que tiene el robot. Para controlar el movimiento del robot se han considerado dos opciones: controlar el robot en coordenadas articulares (opción 1) y controlar el extremo del robot en coordenadas cartesianas (opción 2).

- Opción 1: Control de coordenadas articulares. En este caso, mediante la mirada se controlan los ejes J1 y J3 del robot, que son los encargados de que el extremo del robot realice los movimientos arriba/abajo y derecha/izquierda. El resto de ejes del robot no se moverán. Por seguridad se ha limitado por software a 30° el máximo desplazamiento de cada eje en las pruebas experimentales. El movimiento de estos ejes se realiza a incrementos de 3 grados.
- Opción 2: Control de coordenadas cartesianas. En este caso, mediante la mirada se controla el

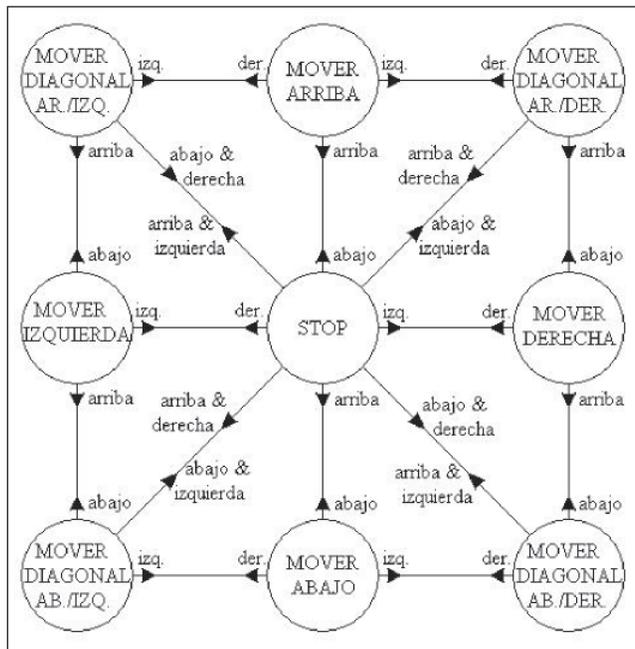


Figura 8: Máquina de estados para controlar el robot dependiendo del movimiento ocular efectuado. En los círculos se indica el movimiento que realiza el robot y sobre las flechas el movimiento detectado (AR.: Arriba, AB.: Abajo, IZQ.: Izquierda y DER.: Derecha).

movimiento del extremo del robot en el plano YZ, permaneciendo el plano X constante. El movimiento por el plano se realiza con incrementos de 25 mm, siendo este parámetro variable.

5. RESULTADOS

Se han realizado diferentes pruebas experimentales para verificar el funcionamiento del sistema utilizando los dos modos de generar el comando de movimiento del robot a partir del movimiento ocular (modo 1: movimiento sin retorno al centro; modo 2: movimiento con retorno al centro) y considerando las dos opciones de control del robot (control de coordenadas articulares y cartesianas).

Previamente a que la persona controle el robot a partir de los movimientos oculares es necesario que la persona complete dos fases:

- En la primera fase la persona debe utilizar el programa de calibrado automático desarrollado con la finalidad de determinar los umbrales que permitan detectar los movimientos verticales y horizontales de los ojos. Los valores típicos para el umbral vertical y horizontal son de ± 0.07 . Una vez situados los electrodos, se ejecuta una función que indica al usuario que realice ciertos movimientos. En función de dichos movimientos el programa calcula de forma automática los umbrales para el usuario en particular. Se requiere menos de un minuto para realizar este test y posteriormente se verifica con las aplicaciones desarrolladas que los umbrales son correctos y el sistema funciona correctamente.
- En la segunda fase la persona realiza un breve entrenamiento para familiarizarse con el funcionamiento del sistema. Para esta fase de entrenamiento se han desarrollado dos aplicaciones. La primera aplicación se ha desarrollado en *Matlab* y permite verificar sobre una gráfica los movimientos realizados de los ojos, de forma que la persona puede comprobar el funcionamiento y si los umbrales calculados son correctos. La segunda aplicación se ha desarrollado en *C++* y permite controlar el ratón del ordenador. En general el tiempo de entrenamiento requerido por una persona para aprender a utilizar el sistema es inferior a 10 minutos.

Se ha desarrollado una interfaz en el ordenador para que el usuario pueda tener una realimentación visual del movimiento del robot en el entorno remoto (Fig. 9). Esta interfaz muestra las imágenes captadas en el entorno remoto mediante dos cámaras (una situada en el extremo del robot y otra externa que permite visualizar el robot). Además, la interfaz muestra el movimiento ocular detectado y el comando de control enviado al robot. Esta interfaz es utilizada durante las pruebas experimentales en desarrollo para visualizar globalmente el movimiento del robot así como los movimientos detectados

y los comandos enviados. En cambio en la aplicación final, que se explica a continuación, el usuario únicamente ve la imagen de la cámara situada en el extremo del brazo robot.

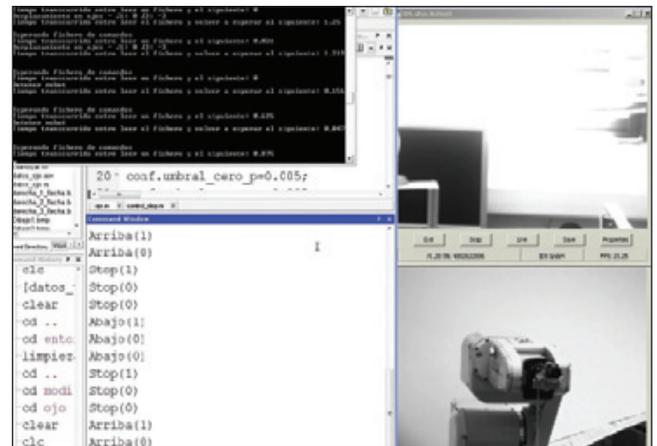


Figura 9: Interfaz del usuario donde se muestran las imágenes del entorno remoto

Para comprobar el funcionamiento del sistema se han situado diferentes objetos en el entorno remoto donde se encuentra el robot con la finalidad de que la persona genere los movimientos oportunos para que la cámara situada en el extremo del robot muestre la imagen de los objetos. En la Fig. 10 se puede observar una secuencia de un experimento realizado. En esta figura se muestran imágenes del movimiento de los ojos, imágenes captadas por la cámara situada en el extremo del robot e imágenes del robot captadas por la cámara externa. Asimismo se muestran las señales de EOG, los movimientos detectados tras el procesamiento y los comandos de control del robot generados.

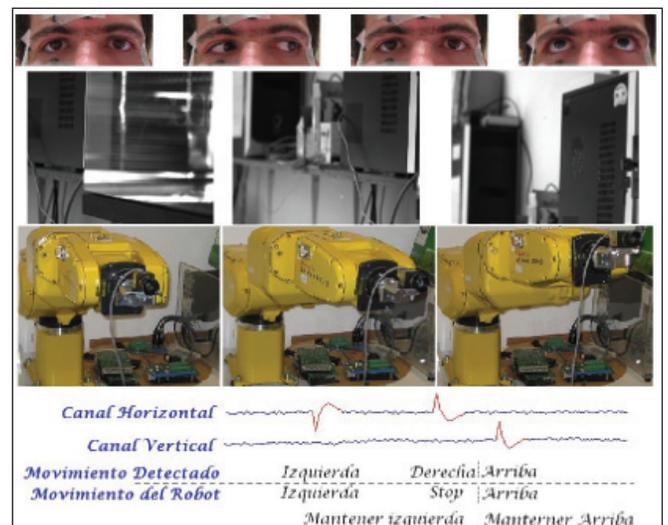


Figura 10: Secuencia de imágenes de un experimento utilizando la interfaz EOG

Con las pruebas experimentales efectuadas se ha comprobado que el modo 2 (movimiento con retorno al

centro) es más fiable y preferible de usar que el modo 1 (movimiento sin retorno al centro). En el modo 2, puesto que se debe realizar un movimiento rápido de los ojos volviendo al centro, la persona siempre tiene la mirada enfocada en la interfaz gráfica, por lo que visualiza mejor el estado del robot que si se mantiene la mirada en una dirección diferente a la de reposo. Por otra parte, si en el modo 2 no se detecta que se ha realizado un movimiento correctamente, puesto que la mirada retorna al centro, solo habrá que repetir el movimiento del ojo, no generándose un movimiento diferente. Sin embargo, en el modo 1, si no se detecta, por ejemplo, que se ha vuelto al centro, se podrá generar un movimiento erróneo, siendo más complicado retomar el control del robot.

La Tabla 1 muestra el porcentaje de errores en la detección del movimiento ocular en 10 usuarios que han realizado 3 sesiones de entrenamiento de 5 minutos cada una, con un intervalo de tiempo entre sesiones de 15 minutos. Como se puede observar, después de 2 sesiones de entrenamiento, es decir, después de 10 minutos de entrenamiento, el porcentaje de error se reduce al 4%. Por tanto, se logra un funcionamiento altamente satisfactorio del sistema con un mínimo tiempo de entrenamiento.

Usuario	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3
Usuario 1	9%	5%	3%
Usuario 2	12%	9%	7%
Usuario 3	10%	7%	4%
Usuario 4	4%	3%	4%
Usuario 5	9%	7%	2%
Usuario 6	9%	6%	4%
Usuario 7	12%	7%	5%
Usuario 8	11%	10%	4%
Usuario 9	10%	6%	5%
Usuario 10	8%	4%	2%
Media ± Desviación Estándar	9.4±2.3%	6.4±2.1%	4±1.5%

Tabla 1: Porcentaje de error en la detección del movimiento ocular durante las tres sesiones realizadas por los usuarios.

6. DISCUSIÓN

En este artículo se ha presentado un sistema que permitirá a personas con un alto grado de discapacidad controlar de forma remota un brazo robot mediante la técnica de electro-oculografía.

En el artículo se ha presentado un algoritmo capaz de detectar los movimientos oculares realizados por una persona. Este algoritmo ha sido utilizado para controlar un brazo robot. Se han descrito dos modos de generar el comando de movimiento del robot a partir del movimiento ocular: movimiento ocular sin retorno al centro (modo 1) y movimiento ocular con retorno al centro (modo 2). Asimismo se han presentado dos opciones para controlar el

... En el futuro se pretende mejorar la detección del movimiento ocular realizado, de forma que sea posible cuantificar cuanto se ha mirado.

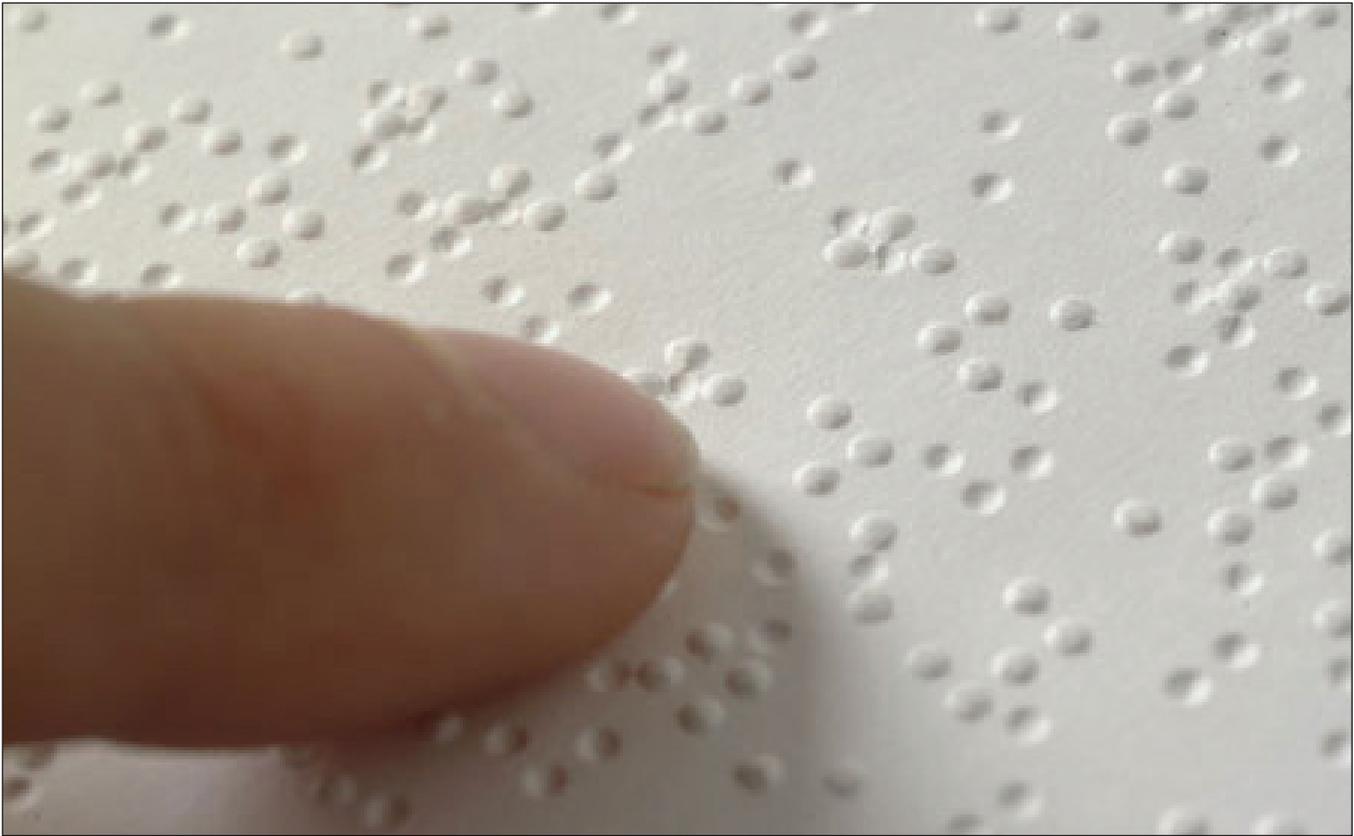
robot a partir del comando de movimiento generado (control de coordenadas articulares y cartesianas). Se ha verificado que la estrategia de control basada en realizar un movimiento rápido del ojo con retorno al centro (modo 2) es más fiable de utilizar que la estrategia de control basada en realizar movimientos de ojo sin retorno al centro (modo 1).

Para evaluar el algoritmo se ha desarrollado una aplicación donde el usuario debe buscar ciertos objetos en una habitación a través de la cámara situada en el extremo del brazo robot controlándolo con el movimiento de los ojos. Al realizar movimientos incrementales (de 3° o 25 mm según el modo) existe la problemática de que el robot no puede alcanzar todas las posiciones posibles, pero también, al ser incrementos pequeños, permite al usuario rectificar rápidamente ante un error del algoritmo sin mayores complicaciones.

En el futuro se pretende mejorar la detección del movimiento ocular realizado, de forma que sea posible cuantificar cuanto se ha mirado. Se prevé cuantificar la mirada realizada a partir de la amplitud de los máximos y mínimos de la derivada de las señales de EOG. De este modo, se podría utilizar esta información para controlar la velocidad del movimiento del robot consiguiendo movimientos más fluidos y permitiendo realizar aplicaciones más complejas. Asimismo se programará un algoritmo que detecte el parpadeo de la persona con la finalidad de utilizarlo para abrir y cerrar la pinza del brazo robot. Por último, el control del brazo robot también será mejorado desarrollando estrategias de control más complejas. Para ello se pretende diseñar una nueva máquina de estados que permita el uso de los 6 grados de libertad del robot, realizando por ejemplo cambios de plano usando el parpadeo, con la finalidad de poder controlar el movimiento del robot por todo su espacio de trabajo.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto DPI2008-06875-C03-03.



8. BIBLIOGRAFÍA

- Baloian N, Breuer H, Luther W. "Algorithm visualization using concept keyboards". In *Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Software Visualization*. St. Louis, Missouri, 2005. p. 7-16.
- Barea R, Boquete L, Mazo M, López E. "Wheelchair guidance strategies using EOG". *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2002. Vol.34-3. p. 279-299.
- Chen YX, Newman WS. "A human-robot interface based on electrooculography". *Robotics and Automation, ICRA '04, IEEE International Conference*, 2004. Vol.1, p. 243-248.
- EyeLink II. <http://www.eyelinkinfo.com/index.php> (Consulta: 30 Junio 2010)
- González EL, García JC, Tulli JC. "Estudio de factibilidad de un Mouse controlado por señales Electrooculográficas". *XV Congreso Argentino de Bioingeniería*, Parana, Argentina, 2005.
- HMD Systems. <http://www.arringtonresearch.com/> (Consulta: 30 Junio 2010)
- Hutchinson TE, White KP, Martin WN, Reichert KC, Frey LA. "Human-computer interaction using eye-gaze input". *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions*, 1989. Vol. 19(6), p. 1527-1534.
- Jeong Y, Lee D, Kim K, Park J. "A wearable robotic arm with high force-reflection capability". In *Proceedings of the 2000 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Osaka, Japan, 2000, p. 411-416.
- Lo Castro FL. "Class I infrared eye blinking detector". *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008. Vol. 148(2), p.388-394.
- Millán JR, Renkensb F, Mouriñoc J, Gerstnerb W. "Brain-actuated interaction". *Artificial Intelligence*, 2004. Vol. 159, p. 241-259.
- Nicolau MC, Burcet J, Rial RV. *Manual de técnicas en Electrofisiología clínica*. Universidad de las Islas Baleares, Palma de Mallorca, España, 1995. p. 215. ISBN: 8476322321.
- Nisbet P. "Integrating assistive technologies: current practices and future possibilities". *Medical Engineering & Physics*, 1996. Vol. 18(3), p. 193-202.
- OpenBook. http://www.freedomscientific.com/fs_products/software_open.asp (Consulta: 30 Junio 2010)
- Oyekoya OK, Stentiford FWM. "Eye tracking - a new interface for visual exploration". *BT Technology Journal*, 2006. Vol. 24(3), p. 57-66.
- Pons JL. *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*. England, John Wiley & Sons, Ltd, 2008. ISBN: 978-0-470-51294-4.
- Úbeda A, Azorín JM, Iáñez E, Sabater JM. "Eye-Tracking Interface based on Artificial Vision for Robot Controlling". *Proceeding in Artificial Intelligence and Soft Computing*, 2009.
- Sankai Y. "Leading edge of cybernics: robot suit HAL". *SICE-ICASE International Joint Conference*, South Korea, 2006, p. 1-2.
- SmartEye. <http://www.smarteye.se/> (Consulta: 30 Junio 2010)
- TOBII. <http://www.tobii.com/> (Consulta: 30 Junio 2010)
- Wei XP, Zhou DS, Zhang Q, Xiao B. "Minimization of influence by the drooping eyelid in extracting pupil center for eye tracking systems". *Progress in Natural Science*, 2008. Vol. 18(9), p. 1155-1159.