



Informe Técnico ICC 2006-10-02

Neuro-Robótica

Zoe Falomir Llansola

Octubre de 2006

Departamento de Ingeniería y Ciencia de Computadores

Correo electrónico: zfalomir@icc.uji.es

Universitat Jaume I
Campus de Riu Sec
12.071 - CASTELLÓN

Neuro-Robotics

Zoe Falomir Llansola

Abstract:

This technical report presents a state of the art in neuro-robotics based on well-known European researchers' lectures which took place at *5th International UJI Robotics School (IURS'2005) on Robotics and Neuroscience*. Some of the most important topics are: brain-machine interfaces, exoskeletons and prosthesis in neuro-robotics studies, manipulation, vision and movement location in the brain and models for understanding human-motor development and the acquisition of speechreading.

Keywords:

Robotics, neuroscience, exoskeletons, vision, manipulation, brain-machine interfaces.

Neuro-Robótica

Zoe Falomir Llansola

Resumen:

Este informe técnico presenta un estado del arte en neuro-robótica basado en las opiniones dadas por importantes investigadores europeos en las conferencias realizadas en la *5th International UJI Robotics School (IURS'2005) on Robotics and Neuroscience*. Algunos de los temas destacados son: interfaces cerebro-máquina, exoesqueletos y prótesis en estudios neuro-robóticos, manipulación, localización de la visión y el movimiento en el cerebro y modelos para la comprensión de funciones humanas, como el desarrollo humano-motor y el discurso hablado.

Palabras Clave:

Robótica, neurociencia, exoesqueletos, visión, manipulación, interfaces cerebro-máquina.

1. Introducción

Este informe técnico presenta un estado del arte en robots humanoides basado en las conferencias realizadas en la *5th International UJI Robotics School (IURS'2005) on Robotics and Neuroscience* por los profesores: Melvyn A. Goodale, Paolo Dario, Luciano Fadiga, Joseph McIntyre, Andrew H. Fagg, Luc Berthouze, Roland Johansson, Maria Chiara Carrozza, Yiannis Demiris y Jose Carmena. Algunos de los temas destacados son: interfaces cerebro-máquina, exoesqueletos y prótesis en estudios neuro-robóticos, manipulación, localización de la visión y el movimiento en el cerebro y modelos para la comprensión de funciones humanas, como el desarrollo humano-motor y el discurso hablado.

2. Fusión de la Neurociencia y la Robótica¹

La neurociencia y la robótica han encontrado una línea de colaboración mutua. La comunidad de científicos que se dedican a la robótica puede implementar los modelos de neurociencia en nuevas plataformas de sistemas híbridos biónicos (HBS), mientras que la comunidad de neurocientíficos puede utilizar las tecnologías robóticas para validar los modelos de neurociencia.

Un posible esquema del procedimiento a seguir por las líneas de investigación en neuro-robótica es el que se muestra en la Figura 2.1. En principio, se observa y estudia un sistema biológico para definir un modelo computacional de éste. Dicho modelo es simulado o implementado físicamente en un robot, para luego compararlo con el sistema biológico real por medio de tests experimentales, que permiten perfeccionar el modelo propuesto.

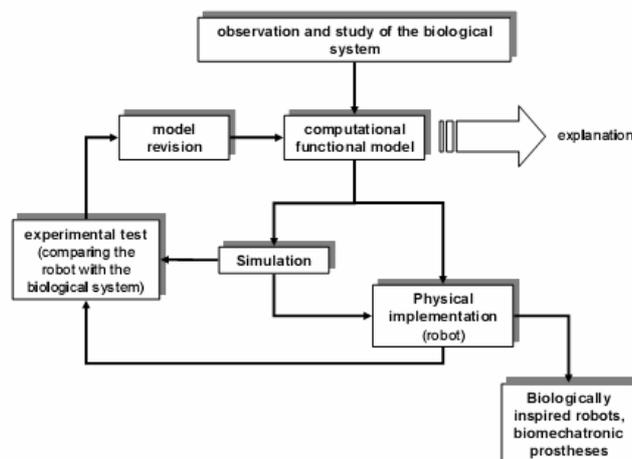


Figura 2.1. Procedimiento de investigación en neuro-robótica.

Además, a partir de dichos modelos computacionales se pueden generar plataformas de sistemas híbridos biónicos (HBS) que son aplicados en:

- Tele-operación, donde se utilizan instrumentos robóticos para exploraciones en medios remotos o difíciles de acceder, como por ejemplo, la exploración intestinal mediante cápsulas endoscópicas tele-operadas (Figura 2.2. (a)).
- Ortesis, donde se puede utilizar un esqueleto inteligente para mejorar la precisión, resistencia y fuerza del brazo humano y de los movimientos de la mano (Figura 2.2. (b)).
- Prótesis, donde se puede utilizar una sistema de brazo/mano antropomórfica para la sustitución o la adición de miembros (Figura 2.2. (c)).

¹ Prof. Paolo Dario, Advanced Robotics Technology and Systems Laboratory, Scuola Superiore Sant'Anna, dario@arts.sssup.it, <http://www-arts.sssup.it/people/prof/pdario/pdario.htm>

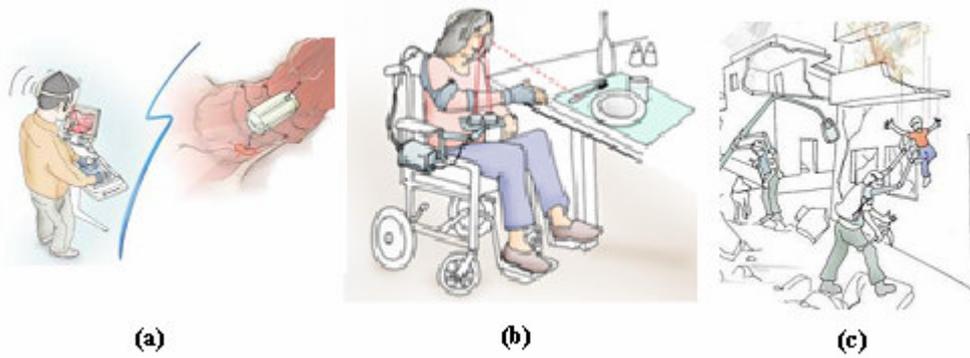


Figura 2.2. Procedimiento de investigación en neuro-robótica.

Finalmente, las principales **líneas de futuro** en Neuro-Robótica que define Paolo Dario son:

- Entender el cerebro humano por medio de la implementación de modelos artificiales en plataformas robóticas.
- Crear nuevos modelos de percepción, aprendizaje, control, etc. inspirados en el comportamiento humano y que se puedan integrar en dichas plataformas robóticas.
- Crear nuevas interfaces humano/robot inteligentes.

3. Interfaces Cerebro-Máquina²

Las interfaces cerebro-máquina presentan dos objetivos principales. Por un lado, estudiar el control motor, el aprendizaje y la adaptación en el cerebro (**Sistemas de Neurociencia**); y por otro, desarrollar neuroprótesis para reestablecer la función motora en los minusválidos (**Ingeniería Neural**).

Las interfaces cerebro-máquina que persiguen el segundo objetivo, pretenden conseguir que un ser humano pueda percibir información sensorial y representar intenciones motoras voluntarias a través de una interfaz directa entre su cerebro y un actuador artificial de la misma manera que los humanos ven, caminan o cogen un objeto con la mano. Para conseguir un fuerte acoplamiento entre las intenciones del usuario y las acciones de la máquina, se debe llevar a cabo un entrenamiento con alguna combinación de feedback visual, táctil o auditivo.

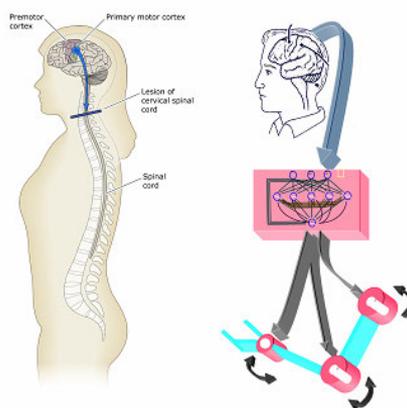


Figura 3.1. Diseño esquemático de una interfaz cerebro-máquina.

Como podemos ver en la Figura 3.1, como resultado de la utilización de la interfaz cerebro-máquina, el cerebro se adaptaría al actuador artificial incorporando su dinámica y propiedades físicas en una representación somatosensorial.

² Prof. José Carmena, Assistant Professor, Dept. of Electrical Engineering & Computer Sciences, Helen Wills Neuroscience Institute, University of California, Berkeley, carmena@eecs.berkeley.edu, <http://www.eecs.berkeley.edu/~carmena>

Según el tipo de aproximación utilizada, las interfaces cerebro-máquina se pueden clasificar en:

- No invasivas:
 - Electroencefalograma (EEG), que busca las señales eléctricas procedentes del cerebro, las cuales son grabadas en el cuero cabelludo por varios electrodos (de 16 a 256). Este método se ha utilizado en estudios para controlar el cursor de un ratón o una silla de ruedas.
 - Tomografía por emisión de positrones (PET), resonancia magnética funcional (fMRI), encefalografía magnética (MEG), que son muy caras y no portables.

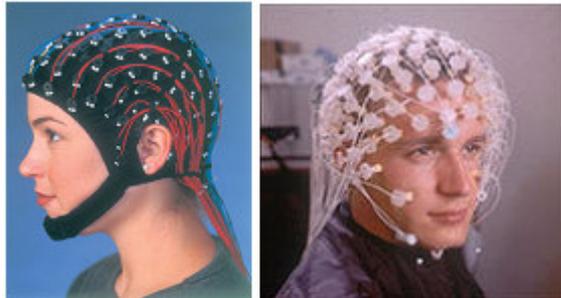


Figura 3.2. Gorros de electrodos utilizados en la EEG.

- Invasivas:
 - Arrays crónicos de microelectrodos, que se instalan en la corteza cerebral para captar los campos de potencia locales que emiten las señales del cerebro.

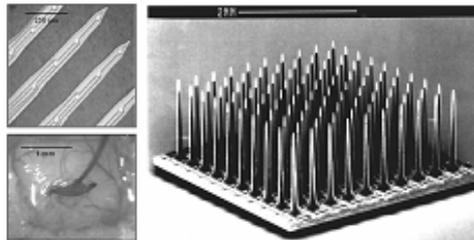


Figura 3.3. Arrays de microelectrodos.

Además, según el tipo de flujo de información que manejan, las interfaces cerebro-máquina también se pueden clasificar en codificables (prótesis sensoriales, que recogen información) y decodificables (prótesis motoras, que realizan acciones como controlar un cursor, realizar agarres, etc.).

Como **resultados más relevantes**, podemos destacar que, en los estudios de [Wolpaw et al., 2004a, 2004b]³ personas humanas han conseguido controlar un cursor mediante una interfaz cerebro-máquina, la BCI2000, basada en electroencefalogramas (EEG). A través de un gorro de electrodos, se graban las ondas cerebrales del cuero cabelludo. Este gorro se encuentra conectado a un ordenador personal, dónde se incluye un programa que puede analizar el electroencefalograma (EEG) del paciente (una grabación del voltaje de la cabeza generado por las corrientes eléctricas que emiten las células nerviosas en el cerebro). Para seleccionar una onda cerebral con el fin de aprender cómo usar el sistema, el usuario debe imaginar una actividad (mover una mano, un pie, etc.). El ordenador selecciona la onda cerebral que el paciente controla mejor y la enlaza al movimiento de un cursor en la pantalla del ordenador. El paciente gradualmente aprende a controlar la amplitud de esa onda cerebral en particular para controlar el movimiento del cursor (Figura 3.4.).

³ <http://www.nibib.nih.gov/EnEspanol/eAvances/21Oct04>



Figura 3.4. Interfaz utilizada en la comunicación cerebro-máquina para el manejo del cursor de la pantalla.

En los estudios de [Millan et al., 2003] personas humanas han conseguido controlar una silla de ruedas con movimientos del tipo “avanzar”, “girar a la derecha” y “girar a la izquierda”. La interfaz cerebro-máquina analiza las órdenes del electroencefalograma (EEG) del usuario y las envía a la silla de ruedas, vía wireless. Una de las principales **líneas de futuro** del trabajo de [Millan et al., 2003] es ampliar el tipo de movimientos que puede detectar la interfaz cerebro-máquina.

En los estudios de [Carmena et al., 2003] se ha conseguido que dos primates aprendan a alcanzar y agarrar objetos visuales (que aparecen en una pantalla de ordenador y se parecen a su propia comida) controlando un brazo manipulador robótico a través de una interfaz cerebro-máquina. Dicha interfaz utiliza arrays de multielectrodos para captar los campos de potencia local que emiten las señales de la parte frontal cerebro y, por medio de múltiples modelos matemáticos, extrae de dichas señales, los parámetros motores necesarios para el funcionamiento del manipulador (como por ejemplo, posición de la mano, velocidad, fuerza de agarre, etc.) (Figura 3.5). Una de las **líneas de trabajo futuro** del trabajo de [Carmena et al., 2003] consiste en replicar el experimento descrito en humanos, con la consiguiente dificultad de encontrar un usuario que desee implantarse un array de multielectrodos en el cerebro de forma crónica. Además, también pretenden introducir un feedback somatosensorial, de forma que no sólo el humano/primate pueda transmitir información a la interfaz cerebro-máquina, sino que ésta pueda transmitirle al humano/primate información sobre su objetivo, como por ejemplo la posición de su comida. Finalmente, otra línea de futuro consistiría en integrar señales procedentes del cerebro con señales artificiales para mejorar la precisión del manejo del brazo manipulador.

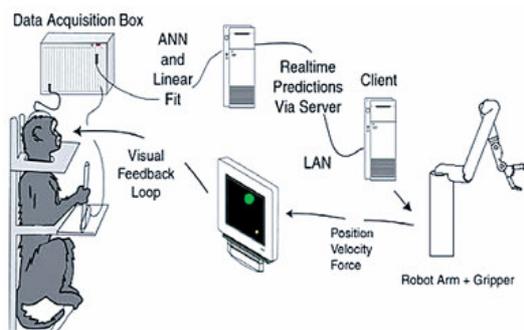


Figura 3.5. Esquema del experimento realizado por [Carmena et al., 2003].

4. Exoesqueletos y prótesis en estudios neuro-robóticos

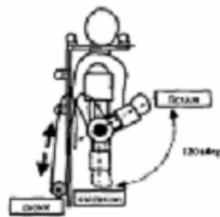
4.1. Exoesqueletos en Neuro-Robótica⁴

“Un exoesqueleto es una estructura exterior y dura, como el caparazón de un insecto o un crustáceo, que proporciona protección o soporte a un organismo” (The American Heritage Dictionary of the English Language).

En la literatura robótica se pueden encontrar diversos desarrollos de exoesqueletos. En [Cavallaro et al., 2005], Universidad de Washington, se estudia la integración de un brazo humano con una articulación motorizada controlada por una persona humana de forma natural (Figura 4.1.1(a)). En [Kiguchi et al., 2005], Saga University, se presenta un exoesqueleto para asistir a las extremidades humanas superiores en la rehabilitación diaria: flexión/extensión del hombro, codo, etc. (Figura 4.1.1(b)). En [Darwin et al., 2003], Universidad de Salford, se presenta un exoesqueleto para reducir la carga de las tareas requeridas en tratamientos psicoterapéuticos para la rehabilitación de pacientes (Figura 4.1.1(c)). En [Kobayashi et al., 2003], Universidad de Tokio, se proporciona soporte muscular tanto para trabajadores manuales, como para aquellas personas que son incapaces de moverse sin ayuda (Figura 4.1.1(d)). En [Kazerooni, 1993], Universidad de California en Berkeley, se presenta un extendedor hidráulico que determina las reglas para el control de un sistema robótico cargado por humanos, especificando la relación entre la fuerza humana y la fuerza de carga (Figura 4.1.1(e)). En [Rocon et al., 2005], Instituto de Automática Industrial-CSIC, se presenta WOTAS, un exoesqueleto activo para las extremidades superiores de las personas, basado en tecnologías robóticas capaces de aplicar fuerzas para cancelar el temblor de dichas extremidades (Figura 4.1.1(f)). En [Sasaki et al., 2005], Universidad de Okayama, se presenta ASSIST, un soporte activo conducido por actuadores neumáticos ligeros para asistir al movimiento de doblar la muñeca (Figura 4.1.1(g)). En [Marcheschi et al., 2005] se presenta PERCRO Light Exoskeleton (LEXOS), un brazo exoesqueleto con cuatro grados de libertad para la retroalimentación de fuerza en el brazo humano (Figura 4.1.1(h)). En [Chu et al., 2005], se presenta BLEEX, un exoesqueleto para las extremidades inferiores de los humanos, el cual puede ayudar a los soldados, bomberos, personal de rescate u otro personal de emergencias a cargar con mayor peso del que pueden transportar de forma natural (Figura 4.1.1(i)).



(a)



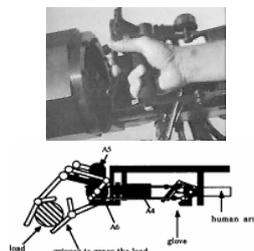
(b)



(c)



(d)

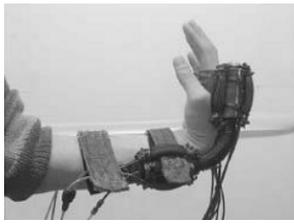


(e)

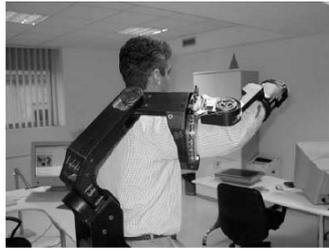


(f)

⁴Prof. Maria Chiara Carrozza, Scuola Superiore Sant'Anna de Pisa, Italia, chiara@arts.sssup.it.



(g)



(h)



(i)

Figura 4.1.1. Imágenes de exosqueletos en la literatura.

Además, Maria Chiara Carrozza y su grupo están desarrollando NeuroExos, un exoesqueleto diseñado para ayudar al brazo humano a agarrar un objeto que se mueve en 2D, es decir, el objeto y el brazo están en el mismo plano. Se supone que el brazo humano es débil y que el exoesqueleto debe medir y encontrar la impedancia más adecuada para mejorar la fuerza y la ejecución del movimiento a llevar a cabo. Sus objetivos principales no son puramente tecnológicos ni orientados a la aplicación práctica inmediata, sino que se pretende:

- Investigar cómo los humanos pueden controlar un sistema robótico a través de una interfaz no invasiva y un simple y rápido decodificador de intenciones.
- Investigar cómo se puede acoplar un manipulador externo al brazo humano (manipulador interno) por monitorización de la interfaz mecánica entre ellos.
- Controlar el actuador externo artificial en paralelo con el sistema musculoesquelético humano.

El experimento que se ha llevado a cabo es el siguiente. A partir de la posición de partida mostrada en la Figura 4.1.2, una persona humana sentada a la mesa tiene que agarrar un cilindro que se mueve a distintas velocidades en una sola dirección a lo largo de dicha mesa y pararlo. El movimiento del brazo está en el mismo plano que la mesa y el cilindro. Los sensores colocados a lo largo de la superficie del brazo humano registran las señales que emiten los músculos (EMG) y obtienen la información de movimiento del brazo, que luego es transformada en un modelo cinemático inverso que es aplicado al simulador de la Figura 4.1.3.(a), donde se compara el movimiento simulado con el real. A partir de dicha simulación, como **línea de futuro**, se pretende construir un brazo robótico bioinspirado (Figura 4.1.3. (b)) que permitirá:

- Imitar el brazo humano en aspectos como: parámetros físicos (rangos de movimiento, masa, inercia, rigidez, etc.), sistema de actuación, impedancia y control de las articulaciones, etc.
- Implementar y verificar los modelos de neurociencia en coordinación visuo-motora, equilibrio de la teoría de puntos, etc.
- Medir las fuerzas de reacción proporcionadas desde el exoesqueleto colocado en el brazo robótico.

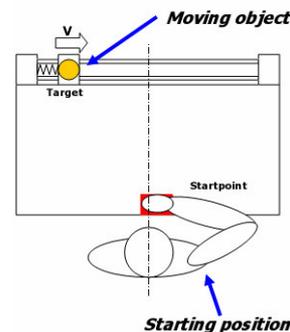


Figura 4.1.2. Experimento de NeuroExos

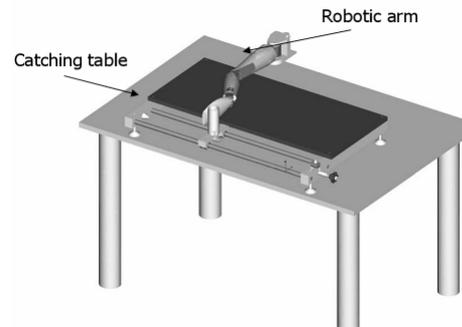
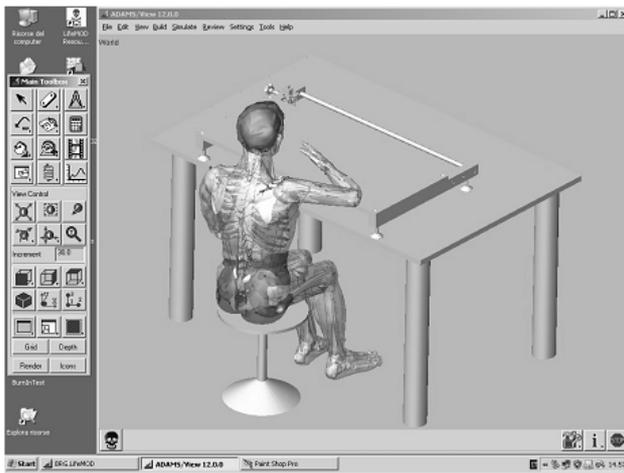


Figura 4.1.3. Simulador de NeuroExos

4.2. La mano cibernética⁵

La mayoría de las prótesis de mano actuales son pasivas, puramente estéticas, que no realizan ninguna función para el usuario. Las prótesis activas mioeléctricas (que captan las señales eléctricas de los músculos) son las menos utilizadas debido a su alto coste. Aunque éstas permiten realizar algunas funciones a su usuario, tienen sólo un grado de libertad, no tienen retroalimentación sensorial y no son percibidas por el usuario como parte de su cuerpo.

El proyecto EU-FET *CIBERHAND*, coordinado por el profesor Paolo Dario, pretende desarrollar una prótesis cibernética de la mano, que sea controlada por el cerebro. El esquema de dicha mano se puede observar en la Figura 4.2.1, dónde podemos ver que se compone de: una interfaz cerebro-máquina, un receptor/transmisor de las señales enviadas por/a la interfaz y biosensores.

El algoritmo de control de la mano cibernética consiste en obtener las señales que emiten los músculos (EMG), mediante electrodos LIFE y *sieve*, y utilizarlas como entradas a una máquina de estados finitos, la cual determinará las acciones a realizar. Esta mano también incorpora sensores de fuerza para realizar tareas como coger y levantar objetos y, además, la máquina de estados finitos puede ser modificada para controlar la fuerza de agarre, modificando la duración de la contracción muscular.

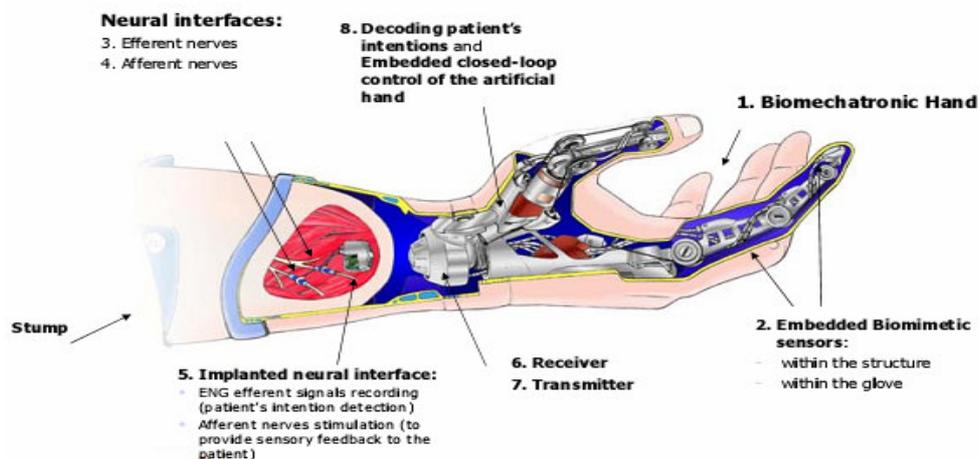


Figura 4.2.1. Mano cibernética.

⁵ Prof. Paolo Dario, Advanced Robotics Technology and Systems Laboratory, Scuola Superiore Sant'Anna, dario@arts.sssup.it, <http://www-arts.sssup.it/people/prof/pdario/pdario.htm>

Cómo **líneas de futuro** a corto plazo, destacar que los investigadores del proyecto están trabajando actualmente con neuropsicólogos y neurocirujanos para implantar electrodos LIFE en humanos. Otras líneas de futuro más largo plazo es el transplante de la mano cibernética y la introducción de una interfaz cerebro-máquina más precisa (posiblemente invasiva) para el control de ésta.

4.3. Predicción del movimiento de la mano a partir de la actividad motocortical⁶

Andrew H. Fagg y su equipo investigan cómo controlar una prótesis robótica de un brazo utilizando el nivel de activación de un conjunto de neuronas del cerebro.

Su investigación se basa en la observación de los movimientos naturales del brazo y su correspondiente actividad neuronal y su objetivo es construir un modelo que prediga el movimiento del brazo (localización cartesiana, giro de las articulaciones, etc.) correspondiente a una determinada actividad neuronal. Dicho modelo se construye a partir de un conjunto de observaciones realizadas (pares de entrada neuronal/salida motora), que a su vez, sirven de conjunto de entrenamiento. Sin embargo, como todos los casos no se encuentran reflejados en dicho conjunto de observaciones, se determina una función matemática explícita que describa todos los casos posibles (como por ejemplo, una regresión lineal de dichas observaciones).

Para llevar a la práctica su investigación, han realizado experimentos con monos, colocándoles un exoesqueleto que es capaz de decodificar los movimientos de su brazo y, además, se han registrado las neuronas activadas al realizar dichos movimientos, determinando una detección simultánea de 50 a 100 neuronas.

Como **resultados**, se comenta que un conjunto de 50-100 neuronas es capaz de predecir movimientos del brazo con un grado de aceptación bueno, pero como **línea de futuro**, se establece la mejora de dicha predicción. También, se sugiere que la información que almacena la corteza motora primaria del cerebro es información intrínseca y dinámica, como por ejemplo giro de articulaciones, etc. Finalmente, como **línea de futuro** a largo plazo, se establece que las predicciones establecidas por el modelo de la actividad neuronal puedan conducir los movimientos de un brazo robótico.

⁶ Prof. Andrew H. Fagg, Symbiotic Computing Laboratory, School of Computer Science, University of Oklahoma, fagg@ou.edu, <http://www.cs.ou.edu/~fagg/>

5. Manipulación

5.1. Manipulación de un brazo robot por imitación del movimiento humano⁷

Una forma de obtener movimiento flexible y adaptativo en un robot es estudiar cómo los humanos producen ese tipo de movimiento. La neurociencia computacional proporciona una serie de teorías y modelos que pretenden explicar las características comunes que caracterizan el movimiento de un brazo humano. Muchos modelos generan trayectorias por medio de la optimización de algún aspecto de dicho movimiento, como la velocidad de la mano o su articulación. En [Simmons & Demiris, 2005] se implementa el modelo de mínima varianza para producir movimiento similar al de los humanos en un brazo robótico, concretamente se aplica a movimientos de alcance punto a punto y a otras trayectorias más complejas.

Debido al creciente interés que han despertado los mecanismos que dotan a los robots con la capacidad de imitar acciones humanas, se han propuesto varias arquitecturas computacionales para establecer una correspondencia de la información visual proporcionada por el *demonstrador* (el que realiza la tarea) con las acciones motoras que deberá realizar el imitador. En [Demiris & Khadhour, 2006] se propone la arquitectura HAMMER (*Hierarchical Attentive Multiple Models for Execution and Recognition*) para reconocer y ejecutar acciones, la cual se basa en jerarquías de modelos futuros (*Forward Models*) y modelos inversos (*Inverse Models*). Como se describe en la Figura 5.1.1, los modelos inversos reciben como entrada el estado actual y el objetivo y generan la acción a realizar; mientras que, los modelos futuros reciben como entrada el estado actual y la acción a realizar y predicen el estado futuro. Así pues, combinando dichos modelos, podemos representar cómo un robot podría reconocer una acción y cómo podría planificar la suya propia, imitando a la primera, tal y como se puede observar en los grafos de la Figura 5.1.2.

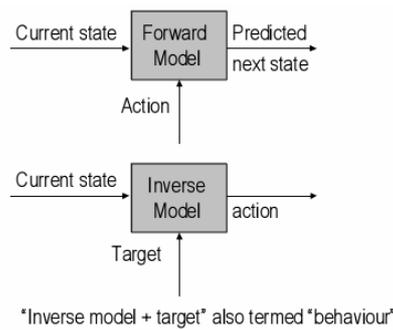


Figura 5.1.1. Esquema de los modelos inversos y futuros propuestos.

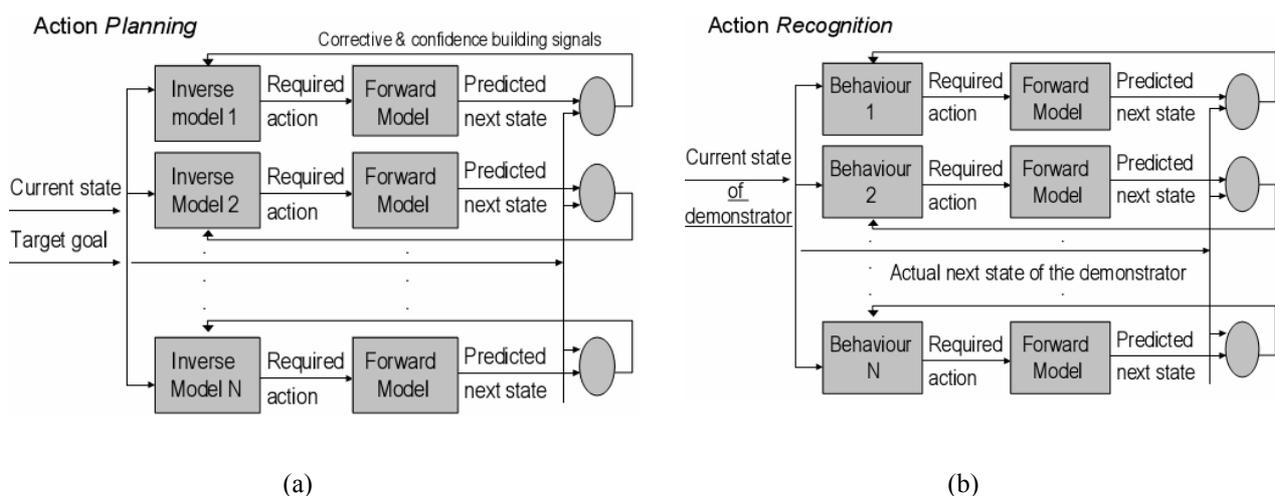


Figura 5.1.2. Esquema para la realización de acciones de planificación y reconocimiento.

⁷ Prof. Yiannis Demiris, Intelligent and Interactive Systems Group, Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, y.demiris@imperial.ac.uk, <http://www.iis.ee.ic.ac.uk/yiannis/>

En el modelo de planificación de la acción (Figura 5.1.2. (a)), a partir de un estado inicial y un objetivo, se generan las acciones requeridas para alcanzar dicho objetivo y se predicen los estados a los que nos llevarán dichas acciones. Si dicho estado no se alcanza, entonces se envía una señal correctiva al modelo que genera la acción; mientras que, si se alcanza, se envía una señal de confirmación.

Al igual que en el modelo anterior, en el modelo de reconocimiento de la acción (Figura 5.1.2. (b)), a partir de un estado inicial del demostrador, se reconocen unos comportamientos que requieren unas acciones determinadas que conllevarán una predicción de los estados siguientes. A partir de dicha predicción se corregirán también las acciones a realizar.

Estos modelos se han llevado a la práctica por medio de simulación de robots (Figura 5.1.3). Como **resultados** principales, se comenta que los comportamientos obtenidos se mapean correctamente si son conocidos, mientras que no ocurre lo mismo con los comportamientos desconocidos. Dichos comportamientos desconocidos o nuevos se pueden aprender aplicando predicciones y ajustándolas para que se correspondan con el comportamiento original.

Como **trabajo futuro** se presenta la aplicación de este trabajo a robots humanoides reales.

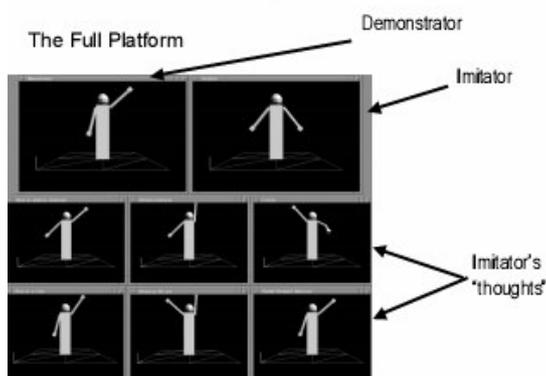


Figura 5.1.3. Simulación de los modelos de imitación de comportamiento.

5.2. Información sensorial táctil en manipulación⁸

La información que proporcionan los sensores táctiles es útil para:

- Controlar la estabilidad del agarre, procurando que la fuerza de agarre sea adecuada. Si es demasiado débil, podría provocar una caída del objeto agarrado, y si es demasiado intensa, podría deformar dicho objeto. Las fuerzas de agarre son adaptadas paraméricamente a las propiedades mecánicas de los objetos a agarrar. Se han realizado estudios sobre algunas de estas propiedades, como el peso [Gordon et al., 1993; Gordon et al., 1991], la distribución de masas [Johansson et al., 1999], la forma-curvatura [Goodwin et al., 1998], la forma-estrechamiento [Jenmaln & Johansson, 1997] y la fricción [Johansson & Westling, 1984].
- Planificar y controlar el movimiento de la mano para: agarrar objetos con la mano o con los dedos, seleccionar los lugares de agarre, transportar objetos, manejar herramientas, etc. La manipulación de objetos se organiza en fases de acción secuenciales delimitadas por subobjetivos de la tarea principal. A partir del estado inicial, se van consiguiendo los subobjetivos a partir de la realización de unos comandos motores (Mc) determinados. Dichos subobjetivos se contrastan con eventos sensoriales táctiles, visuales y auditivos, y en su caso, se adapta el siguiente comando motor a los cambios que se hayan podido detectar por dichos sensores (por ejemplo, deslizamiento accidental, etc.). Este proceso se repite hasta que se obtiene el objetivo final (Figura 5.2.1).

⁸ Prof. Roland S. Johansson, Physiology Section, Integrative Medical Biology, Umea University, Sweden.

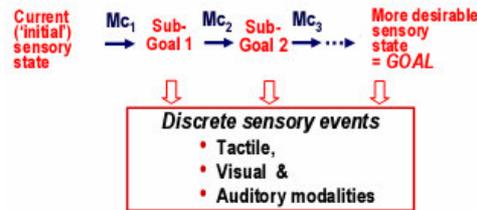


Figura 5.2.1. Manipulación de objetos contando con sensores táctiles, visuales y auditivos.

Dos tipos de sensores táctiles, los electromagnéticos y los electromiográficos, se presentan en la Figura 5.2.2.

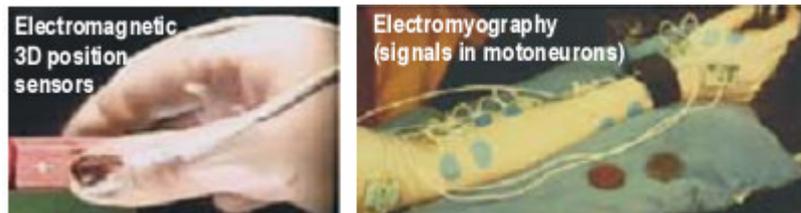


Figura 5.2.2. Sensores táctiles.

Finalmente, las conclusiones principales de la presentación de Johansson son las siguientes:

- La tecnología del tacto y la visión proporcionan el estado inicial de la información para la adaptación paramétrica de comandos motores para llevar a cabo la próxima acción.
- Los sensores de tacto monitorizan la progresión de la tarea para obtener los objetivos predichos. El desajuste entre los eventos sensoriales predichos y los actuales median el control de las acciones permitiendo la adaptación y el aprendizaje.
- Las señales emitidas por los sensores de tacto pueden activar acciones correctivas, como por ejemplo, respuestas a un deslizamiento accidental, etc.

5.3. Localización de sistemas de referencia en el agarre de objetos⁹

En [McIntyre et al., 1997] se plantea la siguiente situación: cuando un brazo humano pretende alcanzar un objeto, la localización de éste y la posición de la mano deben corresponderse. ¿Cómo resuelve el cerebro este problema de correspondencia? Cuando un objetivo fijo se presenta visualmente, su dirección se mapea topográficamente en la retina, mientras que su distancia relativa al observador se define tanto por colas monoculares (localización, tamaño relativo, intensidad, perspectiva, sombreado, etc.) como por colas binoculares (disparidad retinal y señales oculares). Los comandos motores que definen la postura del brazo se determinan respecto a sistemas de referencia de los músculos, articulaciones y receptores de la piel, mientras que la posición final de alcance del objetivo podría ser especificada por sistemas de referencia centrados en el hombro o en la mano.

Sin embargo, ¿qué ocurre cuando hemos de señalar un objeto visual basándonos en la memoria? En [McIntyre et al., 1998] se trata de identificar los sistemas de referencia utilizados para representar la posición de un objeto durante un periodo de memoria o recuerdo. Para ello se realizan experimentos que miden los errores de los participantes al señalar las posiciones tridimensionales que se les indican. Los participantes en los experimentos deben señalar los objetivos en distintas condiciones de: iluminación (luz tenue o completa oscuridad), periodo de descanso (0.5, 5.0 a 8.0 segundos), mano con la que se realiza la acción (derecha o izquierda) y localización del sitio de trabajo (Figura 5.3.1).

⁹ Prof. Joseph McIntyre, Senior Scientist (Chargé de Recherche), CNRS Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, Collège de France, joe.mcintyre@college-de-france.fr.

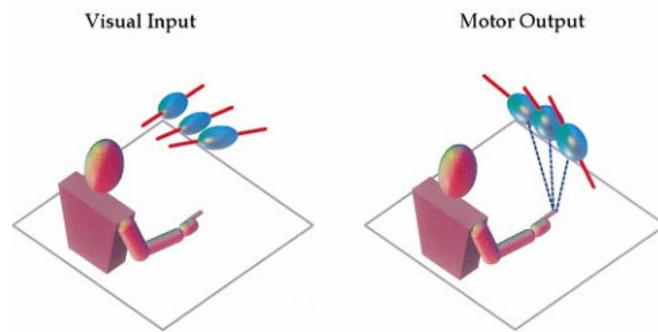


Figura 5.3.1. Gráfico del experimento realizado. Las elipses indican errores variables en el alcance del objetivo.

El modelo obtenido a partir de los experimentos anteriores se puede observar en la Figura 5.3.2. En primer lugar, recibe información visual como entrada que es transformada en información visual centrada en el sistema de referencia del observador. Seguidamente esta información es transformada en información motora basada en un sistema de referencia situado en el brazo que realiza la acción, con contracciones adicionales a lo largo de un eje centrado en el hombro. Finalmente, dicha información es transformada en información basada en el sistema de referencia centrado en la mano. Si las condiciones de iluminación permiten ver la mano durante el movimiento de señalización, la posición final de ésta es comparada con la memoria visual del objeto para reducir los errores de la salida final.

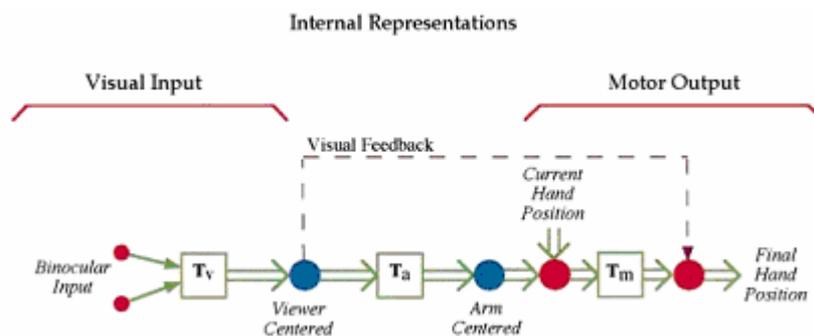


Figura 5.3.2. Modelo obtenido de los experimentos. Los círculos representan la información obtenida con respecto a un sistema de referencia específico, mientras que los cuadrados indican transformaciones entre sistemas coordinados.

Como **resultado principal**, se destaca que la orientación de errores variables difiere significativamente con las condiciones de luminosidad. Por lo tanto, aunque, después de analizar los errores que se producen al señalar los objetos memorizados, se han encontrado evidencias que apoyan las representaciones que centran el sistema de referencia en el observador, en su brazo o en su mano, en este artículo se defiende que la memoria a corto plazo almacena la posición final del objetivo en un sistema de referencia centrado en los ojos del observador y/o en su hombro, los cuales diferencian entre los parámetros de distancia y dirección.

Por último destacar que es importante averiguar dónde se centran los sistemas de referencia en los humanos cuando realizan movimientos de manipulación para poder mejorar la coordinación de las interfaces cerebro-máquina y los sistemas híbrido-biónicos (prótesis, exoesqueletos, etc.) con el movimiento natural de las personas.

6. Localización de la visión y el movimiento en el cerebro

6.1. Visión-acción vs. Visión-percepción¹⁰

Los sistemas de visión, en un principio, evolucionaron en los animales no para percibir el mundo, sino para obtener un control sensorial de sus movimientos. La visión como “vista” apareció posteriormente, permitiendo a los seres vivos realizar operaciones cognitivas complejas sobre representaciones mentales del mundo y perfeccionar su comportamiento adaptativo.

Así pues, según [Goodale & Milner, 2004] existen distintas corrientes visuales en la corteza cerebral de los primates. Aunque ambas procesan información acerca de la estructura y localización espacial de los objetos, las salidas que proporcionan son diferentes. La *corriente dorsal de acción*, responsable del control sobre acciones de movimiento, procesa medidas absolutas (euclídeas) de objetos dentro de un sistema de referencia centrado en los efectores. Por otro lado, la *corriente ventral de percepción*, que proporciona una representación rica y detallada del mundo para llevar a cabo operaciones cognitivas (reconocimiento, identificación, etc.), no necesita medidas absolutas, sino que utiliza sistemas perceptuales basados en la escena (no euclídeos). El reconocimiento de objetos depende de la habilidad de reconocer un objeto independientemente de su orientación y posición en un momento dado. Un cuadro resumen de las características de dichas corrientes se proporciona en la Tabla 6.1.1.

Corriente Ventral	Corriente Dorsal
Identificación de objetos	Control visual de movimientos
Sistema de referencia basado en la escena	Sistema de referencia basado en los efectores
Medidas relacionales	Medidas absolutas
Proposicional	Isomorfo
Representaciones a largo término	Procesamiento momento a momento
Contenidos de consciencia visual	Transformaciones visuomotoras para actos inconscientes

Tabla 6.1.1. Resumen de las características de las corrientes ventral y dorsal.

Existen enfermedades que confirman esta teoría, como por ejemplo, la “Optic Ataxia” y la “Visual Agnosia”, descritas a continuación:

- Pacientes con “Optic Ataxia” presentan problemas para agarrar directamente o dirigir movimientos hacia objetos, incluso cuando dichos pacientes pueden describir la orientación o posición relativa de esos objetos de forma precisa. Estos pacientes presentan daños en la corriente dorsal, que proporciona un control en tiempo real del sistema visuomotor.
- Pacientes con “Visual Agnosia” son incapaces de indicar el tamaño, la forma y la orientación de un objeto, ni verbalmente ni manualmente, aunque puede agarrar y dirigir su mano hacia dicho objeto. Estos pacientes presentan daños en la corriente ventral, que proporciona un control off-line de los mecanismos perceptuales.

	Percepción	Acción	Zona dañada
Visual Agnosia	✗	✓	Corriente Ventral
Optic Ataxia	✓	✗	Corriente Dorsal

Tabla 6.1.2. Resumen de enfermedades visuales relacionadas con la percepción y la acción.

¹⁰ Prof. Melvyn A. Goodale, Canada Research Professor in Visual Neuroscience, Department of Psychology and Physiology, University of Western Ontario, Canada, mgoodale@uwo.ca, <http://www.ssc.uwo.ca/psychology/faculty/goodale/>

Es importante destacar que ambas corrientes, encargadas de la acción y la percepción, interactúan y se complementan para producir un comportamiento adaptativo en los seres vivos. Por ejemplo, cuando queremos coger un libro interesante, no sólo lo agarramos de acuerdo a sus dimensiones y localización, sino que también hemos percibido que podría ser un libro que no hemos visto antes y que debemos cogerlo de forma que podamos utilizarlo adecuadamente.

En [Goodale & Humphrey, 1998] se relacionan estas dos vertientes sobre la percepción y la acción con la visión por computador, distinguiendo entre las líneas de investigación que se basan en el comportamiento (detección de obstáculos, agarre, guiado por visión, etc.) y las que se basan en la reconstrucción del mundo (creación de mapas, reconocimiento de objetos, realización de operaciones perceptuales y/o cognitivas, etc.). Las líneas de investigación basadas en el comportamiento estarían relacionadas con la corriente dorsal, mientras que las basadas en la reconstrucción del mundo estarían relacionadas con la corriente ventral.

Como **resultados más relevantes**, podemos destacar que, en [Goodale & Westwood, 2004], Mel Goodale ha utilizado la resonancia magnética funcional (fMRI) para analizar y localizar las corrientes ventrales y dorsales en el proceso de agarre y reconocimiento de objetos. Determinando que la zona “Sulcus Anterior Intraparietal” del cerebro procesa la forma de los objetos, su tamaño y orientación con el propósito de llevar a cabo acciones como el agarre. Mientras que la zona “Lateral Occipital” del cortex del cerebro procesa la forma, tamaño y orientación de los objetos con el propósito de su reconocimiento (Figura 6.1.1).

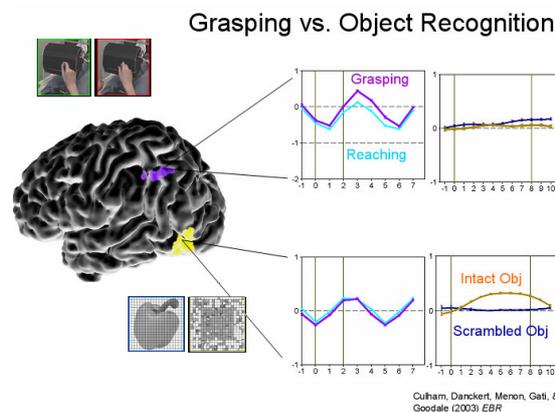


Figura 6.1.1. Localización del agarre y reconocimiento de objetos en el cerebro.

Además, Goodale también ha utilizado la fMRI para localizar las zonas del cerebro que se activan al detectar cambios de identidad y orientación de los objetos. En primer lugar, en la Figura 6.1.2, se pueden observar los objetos que se comparan en el experimento para detectar si entre ellos existen cambios de identidad o de orientación. Seguidamente, en la Figura 6.1.3, se pueden ver las zonas que se han detectado como activas en cada uno de los casos. Al detectarse un cambio de identidad del objeto, se ha activado una zona del cerebro relacionada con la corriente ventral, que se encarga del control de las acciones de percepción (reconocimiento de objetos); mientras que al detectar un cambio de orientación en el objeto, se ha activado una zona del cerebro relacionada con la corriente dorsal, que se encarga del control de las acciones de movimiento.

Como una de las **líneas de futuro** más importantes, en [Goodale & Westwood, 2004] se menciona la utilización de la estimulación magnética transcranial (TMS) para avanzar en el entendimiento de las interacciones entre las corrientes dorsal y ventral en las personas humanas.

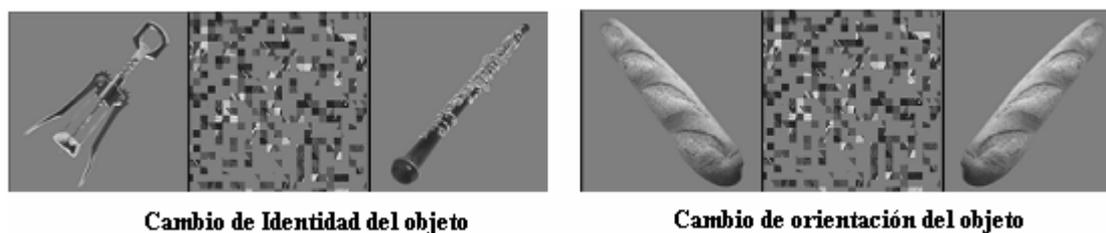


Figura 6.1.2. Situaciones presentadas para la detección de cambios.

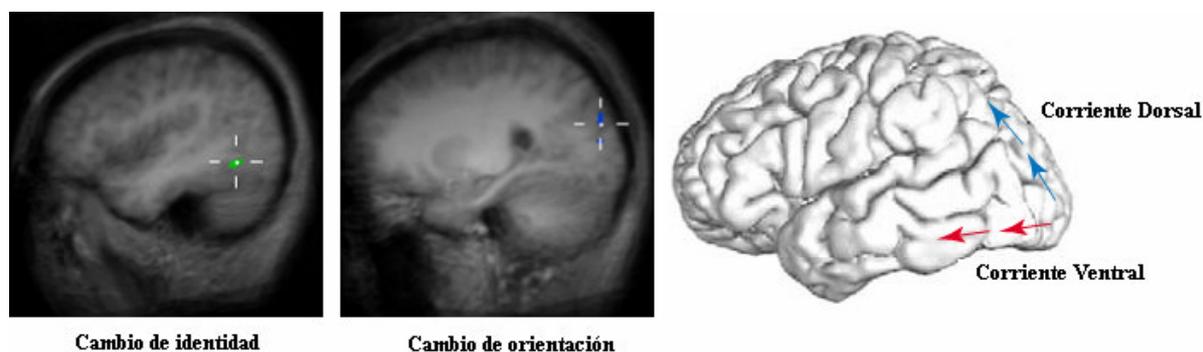


Figura 6.1.3. Zonas del cerebro activadas en cada tipo de cambio.

6.2. Neuronas motoras y visuomotoras¹¹

Uno de los descubrimientos más fascinantes en neuropsicología en las dos últimas décadas es que las neuronas localizadas en la región frontal del cerebro del mono (áreas F4 y F5, posiblemente homologables al área de Broca en el cerebro humano), clásicamente considerada como región motora, también responden a la presentación visual de estímulos [Fadiga et al., 2000].

En [Murata et al., 1997] se estudian las propiedades visuales y motoras de las neuronas del cortex ventral premotor del mono (área F5), a partir del comportamiento obtenido en cuatro situaciones: agarre de objetos con luz, agarre de objetos en la oscuridad, fijación de la vista en objetos y fijación de la vista en un punto de luz. Como **resultados principales** se obtienen los siguientes:

- las neuronas motoras se asocian con movimientos de agarre,
- diferentes objetos agarrados de forma similar, determinan respuestas motoras neuronales similares,
- las neuronas visuomotoras se activan durante la realización de movimientos, pero también en respuesta a la presentación de objetos 3D,
- la respuesta de las neuronas visuomotoras aparece tanto en el agarre de objetos con luz, como en la fijación de la vista en objetos;
- finalmente, la forma de un objeto se codifica en el cortex ventral premotor (F5) incluso cuando no se requiere la obtención de ninguna respuesta de un objeto.

Las neuronas visuomotoras responden tanto a estímulos motores como visuales. En [Fadiga et al., 2000] se plantea que la activación de este tipo de neuronas no es puramente visual, ni puramente motor, sino que simplemente significa que una acción particular se ha representado internamente en términos de “ideas motoras”, sin implicar que el cerebro la vaya a realizar o no. Estas ideas motoras podrían proporcionar la base neurobiológica para la representación del espacio, para la comprensión de acciones realizadas por los demás y, posiblemente, para la categorización semántica de objetos, ya que ésta, muchas veces no puede excluir la información de cómo interactuar con dichos objetos.

¹¹ Prof. Luciano Fadiga, Associate Professor of Human Physiology, Faculty of Medicine, Università di Ferrara, Italia, fdl@unife.it, <http://web.unife.it/progetti/neurolab/>

7. Modelos para la comprensión de funciones humanas¹²

7.1. Comprensión del desarrollo humano-motor

El desarrollo motor es el estudio de las acciones espontáneas de los niños en un ambiente determinado y en distintos campos sociales, las cuales hacen que los músculos interactúen para llevar a cabo diferentes tipos de tareas. Este desarrollo es importante, ya que la actividad motora es indispensable para el desarrollo de la cognición en los seres humanos. Como se muestra en la Figura 7.1.1, dada una tarea particular, patrones de movimiento organizados espacio-temporalmente surgen de interacciones explorativas dinámicas entre el sistema neural, el cuerpo y el entorno.

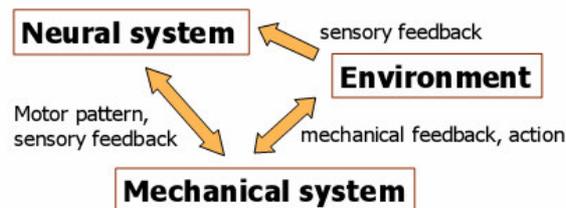


Figura 7.1.1. Interacciones en el desarrollo humano-motor.

Para estudiar el desarrollo humano-motor, Luc Berthouze toma como ejemplo a los recién nacidos, los cuales tienen una serie de limitaciones como que: no pueden ver los objetos a tamaño real, su memoria y campo de atención es reducido, su control del tronco, cabeza y brazos es limitado y sus movimientos son ineficientes y torpes. Como hipótesis, plantea que las limitaciones en los sistemas motores y sensoriales de los bebés podrían jugar un papel adaptativo en el desarrollo del organismo.

Extrapolando el estudio del desarrollo humano-motor a la robótica, Berthouze también define como hipótesis el hecho de que empezar a explorar con pocos grados de libertad, permite una exploración más eficiente del espacio sensoriomotor, el cual, a la vez, coordina la adición de nuevos grados de libertad. Para verificar dicha hipótesis realiza un análisis comparativo entre la exploración realizada por: un sistema de control con dos grados de libertad independientes, con un grado de libertad y con dos grados de libertad autosuficientes. Como **resultado** de este análisis destaca que una única forma de fijar y liberar grados de libertad no es suficientemente representativa cuando la complejidad de la tarea aumenta o cuando se introducen perturbaciones externas, sino que se necesitan múltiples formas de cambios de grados de libertad.

Finalmente, como **líneas de investigación futuras** respecto al desarrollo motor, queda por determinar qué es lo que optimizan los niños durante su etapa de exploración, cómo aprenden qué es lo que hay que explorar y cuáles son las transiciones que realizan entre la adquisición de cada una de sus habilidades.

7.2. Comprensión del discurso hablado

La comprensión del discurso hablado consiste en percibir y entender lo que nuestro interlocutor nos está diciendo por medio de la observación de los movimientos de la boca, expresión o gestos de la persona que habla, de la utilización del contexto del mensaje y de la situación, del conocimiento de la forma de articular de nuestro interlocutor, etc.

Los procesos cognitivos y preceptuales que definen a un interlocutor que comprende adecuadamente el discurso hablado aún no han sido identificados. Esto es debido a que la comprensión del discurso hablado presenta algunas dificultades: una gran parte de fonemas son visualmente indistinguibles, no existe un método de enseñanza formal, es dependiente del contexto y de la persona que habla, etc.

El efecto McGurk demuestra que el discurso tiene una naturaleza bimodal, ya que los humanos percibimos una mezcla de los sonidos que oímos y de los movimientos de la boca que observamos del interlocutor. Como ejemplo de este efecto podemos considerar la situación siguiente: si oímos un video que dice “ba” y

¹² Prof. Luc Berthouze, Neuroscience Research Institute (AIST), Tsukuba Central 2, Japan, Luc.Berthouze@aist.go.jp, <http://staff.aist.go.jp/luc.berthouze/>

en dicho video aparece una persona articulando “ga”, lo que nosotros percibimos es el sonido “da”, es decir, una mezcla de ambos (Figura 7.2.1).

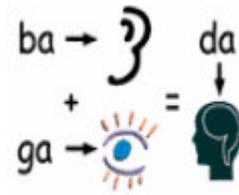


Figura 7.2.1. Efecto McGurk.

Luc Berthouze¹³ propone que, para comprender el discurso hablado se debe poder seleccionar y secuenciar las acciones que lo componen, las cuales son influidas por las asociaciones visual-motoras adquiridas previamente (niñez, etc.). Esto supone que la comprensión del discurso hablado debería activar las áreas promotoras del cerebro, implicadas en la respuesta motora, selección y secuenciación, en vez de activar el área de Broca, donde se localizan las neuronas espejo o que se activan por imitación. Como **resultado principal**, destacar que este aspecto se ha comprobado mediante una resonancia magnética funcional (fMRI) en sujetos con capacidad de oír, pero no entrenados en la comprensión de un discurso hablado en particular. Finalmente, como **principal línea de futuro**, se menciona la obtención de un modelo único de comprensión del discurso hablado tanto para sordos como para oyentes y el análisis de las diferencias existentes entre ellos, si es que tienen lugar.

¹³ Neuroscience Research Institute, AIST Tsukuba, Japan.

8. Bibliografía

- [Carmena et al., 2003] Jose M. Carmena, Mikhail A. Lebedev, Roy E. Crist, Joseph E. O'Doherty, David M. Santucci, Dragan F. Dimitrov, Parag G. Patil, Craig S. Henriquez, Miguel A. L. Nicolelis. Learning to Control a Brain-Machine Interface for Reaching and Grasping by Primates. *PLoS Biology*, Vol. 1, Issue 2, November 2003.
- [Cavallaro et al., 2005] Ettore Cavallaro, Jacob Rosen, Joel C. Perry, Stephen Burns, Blake Hannaford, *Hill-Based Model as a Myoprocessor for a Neural Controlled Powered Exoskeleton Arm – Parameters Optimization*, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005.
- [Chu et al., 2005] Andrew Chu, H. Kazerooni and Adam Zoss, *On the Biomimetic Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)*, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005.
- [Darwin et al., 2003] Caldwell G. Darwin, Tsagarakis G. Nikolaos, *Development and Control of a 'Soft-Actuated' Exoskeleton for Use in Physiotherapy and Training*, *Autonomous Robots*, vol. 15, n. 1, July 2003, pp. 21-23.
- [Demiris & Khadhoury, 2006] Demiris Y, Khadhoury B, Hierarchical attentive multiple models for execution and recognition of actions, *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, Vol.: 54, Pages: 361 - 369, ISSN: 0921-8890
- [Fadiga et al., 2000] Luciano Fadiga, Leonardo Fogassi, Vittorio Gallese, Giacomo Rizzolatti, *Visuomotor neurons: ambiguity of the discharge or 'motor' perception?* *International Journal of Psychophysiology*, n. 35, pp. 165-177, 2000.
- [Goodale & Humphrey, 1998] M. A. Goodale and G. K. Humphrey, *The objects of action and perception*, *Cognition*, vol. 67, 1998, pp. 181-207.
- [Goodale & Milner, 2004] Goodale MA, Milner AD: *Sight Unseen: An Exploration of Conscious and Unconscious Vision*. Oxford: Oxford University Press; 2004.
- [Goodale & Westwood, 2004] Goodale MA, Westwood DA., *An evolving view of duplex vision: separate but interacting cortical pathways for perception and action*. *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 14, pp. 203-211.
- [Goodwin et al., 1998] Goodwin, Jenmalm & Johansson, *The Journal of Neuroscience*, 1998.
- [Gordon et al., 1993] Gordon. *International Journal of Psychophysiology*.
- [Gordon et al., 1991] Gordon. *Exp. Brain Res.*
- [Jenmalm & Johansson, 1997] Jenmalm & Johansson, *The Journal of Neuroscience*, 1997.
- [Johansson et al., 1999] Johansson, Backlin & Burstedt. *Exp. Brain Res.*, 1999.
- [Johansson & Westling, 1984] Johansson & Westling, *Exp. Brain Res.*, 1984.
- [Kazerooni, 1993] Kazerooni H., *Extenders: A Case Study for Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals*, Plenary Speaker at the 2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, Tokyo, Japan, November 1993.
- [Kiguchi et al., 2005] Kazuo Kiguchi, Mohammad Habibur Rahman and Takefumi Yamaguchi, *Rehabilitation Robotics: Adaptation Strategy for the 3DOF Exoskeleton for Upper-Limb Motion Assist*, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005.
- [Kobayashi et al., 2003] Kobayashi, H.; Uchimura, A.; Shiiba, T.; *Development of muscle suit for upper body*, *Intelligent Robots and Systems, 2003 (IROS 2003)*. Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference, Vol. 4, Oct. 27-31, 2003, pp. 3624-3629.
- [Marcheschi et al., 2005] Simone Marcheschi, Antonio Frisoli, Carlo Alberto Avizzano and Massimo Bergamasco, *A Method for Modeling and Control Complex Tendon Trnasmissions in Haptic Interfaces*, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005.
- [McIntyre et al., 1997] J. McIntyre, F. Stratta, F. Lacquany, *Viewer-Centered Frame of Reference for Pointing to Memorized Targets in Three-Dimensional Space*, *International Journal of Psychophysiology*, 78(3):1601-18, September, 1997.
- [McIntyre et al., 1998] J. McIntyre, F. Stratta, F. Lacquany, *Short-Term Memory for Reaching to Visual Targets : Psychophysical Evidence for Body-Centered Reference Systems*, *The Journal of Neuroscience*, 18(20): 8423-8435, October, 1998.
- [Millan et al., 2003] Millan. *New Scientist print edition*, 24 July 2003
- [Murata et al, 1997] Akira Murata, Luciano Fadiga, Leonardo Fogassi, Vittorio Gallese, Vassilis Raos, and Giacomo Rizzolatti, *Object Representation in the Ventral Premotor Cortex (Area F5) of the Monkey*, *The Journal of Neurophysiology* Vol. 78 No. 4 October 1997, pp. 2226-2230.
- [Rocon et al., 2005] E. Rocon, A. F. Ruiz, J. L. Pons, J.M. Belda-Lois, J. J. Sánchez-Lacuesta: *Rehabilitation Robotics: A Wearable Exo-Skeleton for Tremor Assessment and Supresión*, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Abril 2005.

- [Sasaki et al., 2005] Daisuke Sasaki, Toshiro Noritsugu and Masahiro Takaiwa, *Rehabilitation Robotics: Development of Active Support Splint driven by Pneumatic Soft Actuator (ASSIST)*, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005.
- [Simmons & Demiris, 2005] Gavin Simmons and Yiannis Demiris, Optimal Robot Arm Control Using The Minimum Variance Model, *Journal of Robotic Systems*, November 2005.
- [Wolpaw et al., 2004a] Schalk G, McFarland DJ, Hinterberger T, Birbaumer N, Wolpaw JR. BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 51:1034-1043, 2004.
- [Wolpaw et al., 2004b] Leuthardt EC, Schalk G, Wolpaw JR, Ojemann JG, Moran DW. A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans. *Journal of Neural Engineering* 1:63-71, 2004.