

Sistema robótico multimodal de miembro superior para interacción con entornos físicos

Jorge A. Díez, Andrea Blanco, Luis D. Lledó,
José M. Catalán, Francisco J. Badesa, Nicolas Garcia-Aracil

Neuroingeneiría Biomédica, Universidad Miguel Hernández de Elche
{jdiez, ablanco, llledo, jose.catalan, fbadesa, nicolas.garcia}@umh.es

Resumen

Este artículo describe el diseño de un sistema robótico multimodal enfocado a proporcionar a personas con movilidad reducida, la capacidades de interaccionar con objetos reales. Con este sistema se pretende cubrir todo el proceso de interacción, desde la selección del objeto con el que se quiere interactuar, pasando por alcanzar y agarrarlo, hasta volver a dejar el objeto. El sistema se compone de un robot diseñado para rehabilitación de miembro superior, de un exoesqueleto de mano, un sistema de seguimiento de mirada, un dispositivo de seguimiento de objetos, y un sistema de detección de intención de movimiento. Con este propósito, en este artículo se presenta la arquitectura del sistema, especificando los elementos particulares que serán utilizados en un escenario experimental para comprobar la viabilidad del sistema.

Palabras clave: Multimodal; robótica de rehabilitación; exoesqueleto.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la robótica se ha convertido en un campo de estudio ampliamente utilizado con el fin de mejorar la vida de las personas con discapacidad, tanto desde el punto de vista de la rehabilitación [1] como desde el punto de vista de la asistencia en actividades de la vida diaria (AVD) [2].

Respecto a robótica aplicada a la rehabilitación, en los últimos años se han ido desarrollando una gran variedad de dispositivos robóticos para la rehabilitación de miembro superior [3]. La gran mayoría de estos dispositivos utiliza sistemas de realidad virtual para establecer el entorno de rehabilitación; y tan solo se han realizado unos pocos sistemas en los que haya una interacción con objetos reales [4, 5]. Debido a la seguridad y flexibilidad que proporcionan los sistemas de realidad virtual, éstos son especialmente adecuados para las primeras etapas de la enfermedad [6]. Sin embargo, para obtener una interacción realista con sistemas de realidad virtual, es necesario el uso de

dispositivos hápticos, lo que hace más costoso y complejo el sistema. Por el contrario, entornos en los que se interacciona con objetos podrían suponer una buena y barata alternativa para llevar a cabo tareas de rehabilitación más complejas que se realizarían en etapas posteriores de la enfermedad, cuando el paciente ha recuperado parte del control motor de su extremidad superior.

Respecto a la robótica aplicada a la asistencia, la tendencia principal consiste en robots manipuladores, tales como como Jaco Kinova, Raptor cite Alqasemi2005, o MANUS cite Rosier1991, montados en sillas de ruedas o plataformas móviles y destinados a proporcionar asistencia externa en las AVD.

El objetivo de este trabajo es establecer e implementar una arquitectura adecuada de un sistema que permita al usuario realizar acciones de manejo de objetos por sí mismo indistintamente del contexto (rehabilitación o asistencia), y que cubra todo el proceso desde la selección del objetivo hasta volver a liberarlo.

2 ARQUITECTURA MULTIMODAL

Para poder completar todas las metas propuestas se ha decidido utilizar una arquitectura multimodal, de manera que el usuario pueda usar una combinación de sus capacidades residuales para completar la acción deseada. Entre estas capacidades residuales, el movimiento del ojo y la señal de electromiografía (EMG) se han considerado como las más potenciales. Aunque no se han estudiado otras alternativas como la señal de electroencefalografía (EEG) o el reconocimiento de rostros, no se descarta su uso en futuras aplicaciones de esta arquitectura.

El sistema diseñado se compone de los siguientes elementos:

- Un sistema de seguimiento de objetos, que devuelve la posición del objeto con el que se va a interactuar.
- Un sistema de seguimiento de mirada, que de-

termina que objeto está mirando el usuario.

- Un sistema de detección de la intención de movimiento, para controlar el comienzo de cada acción que va a realizar el usuario.
- Un dispositivo robótico diseñado para la rehabilitación de extremidad superior, que asistirá al usuario a realizar los movimientos para alcanzar los objetos.
- Un exoesqueleto de mano para agarrar los objetos.
- Un ordenador en el que se implementa un controlador de alto nivel (HLC), que procesa y coordina las señales de cada dispositivo y determina las acciones de control.

En la Figura 1 se muestran las relaciones y comunicaciones entre cada uno de los elementos del sistema.

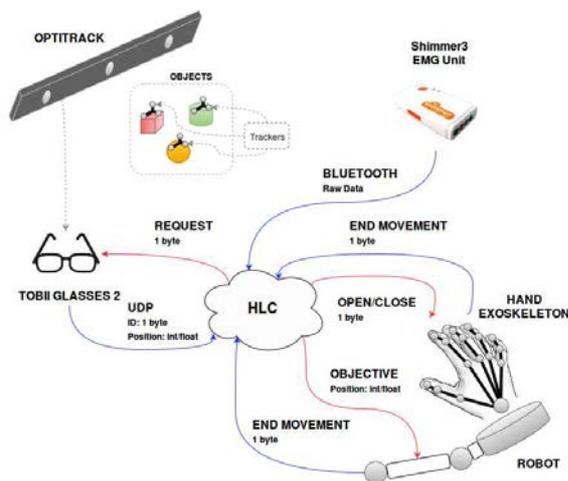


Figura 1: Arquitectura del Sistema y comunicaciones entre elementos

2.1 Robot de extremidad superior

Para el objetivo del sistema estudiado, y para la movilización de la extremidad superior en las acciones de alcance de objetos, se han considerado diferentes arquitecturas de dispositivo robótico, de las cuales las más adecuadas son las siguientes:

- Robots de efector final diseñados para tareas de rehabilitación. Estos dispositivos se pueden colocar fácilmente al paciente, y suponen una opción más segura en las primeras etapas debido al hecho de que no se fuerzan las articulaciones para realizar un patrón de movimiento específico.
- Exoesqueleto de brazo. Este tipo de robot puede ser más adecuado para la asistencia

en actividades de la vida diaria debido a un mejor control de la posición de cada articulación del brazo, pero el proceso de colocación al usuario es más compleja y puede suponer un trabajo extra e innecesario para terapias de rehabilitación.

Para la implementación presentada se ha optado por el uso de un robot de rehabilitación neumático de arquitectura de efector final [9] (Figura 6). Cuenta con tres grados de libertad activos (GDL), accionados por actuadores neumáticos, que son capaces de posicionar el efector final en cualquier punto dentro del área de trabajo del robot. Además, el efector final tiene tres GDL pasivos que permiten al usuario orientar libremente su brazo. Estos GDL pasivos están sensados, de manera que se puede obtener una reconstrucción del brazo del usuario [10].

2.2 Exoesqueleto de mano

Para poder interactuar con objetos reales, se hace necesario el uso de un dispositivo que permita asistir a los movimientos de la mano. La manera más adecuada de alcanzar este objetivo es utilizar un dispositivo de arquitectura exoesqueleto de mano.

Este exoesqueleto que se va a utilizar en las experimentaciones de este artículo se basa en un dispositivo neumático [11], que fue concebido específicamente para tareas de rehabilitación. Para el diseño actual se ha modificado este dispositivo mediante el uso de cinco motores lineales eléctricos para actuar cada uno de los dedos de forma independiente, de tal manera que el exoesqueleto pueda ser utilizado para tareas tanto de rehabilitación como de asistencia al movimiento en tareas de la vida diaria (Figura 2). El recorrido de cada motor está sensado de tal manera que la posición de la mano en cada momento se puede estimar mediante la cinemática directa del dispositivo.

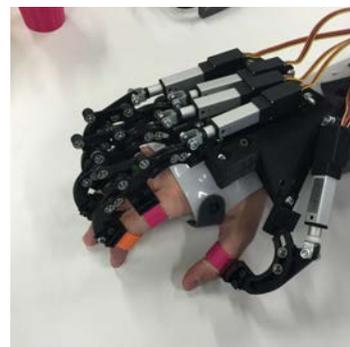


Figura 2: Vista detallada del exoesqueleto de mano

2.3 Sistema de *Eye Tracking*

Este subsistema debe ser capaz de analizar, desde una base de datos previamente construida, los objetos que está mirando el usuario de tal manera que el resto del sistema pueda determinar su posición. En esta etapa de la investigación se utiliza un simple algoritmo de reconocimiento por coincidencia de color: se analiza el color predominante presente alrededor del punto en que se centra la mirada del sujeto (Figura 3).

Como cada objeto de la base de datos está asociado a un color concreto, si el porcentaje de uno de estos colores supera un umbral durante una cierta cantidad de tiempo, se detecta el objeto correspondiente.

En esta implementación, las Tobii Pro Glasses 2 se emplean como el hardware que determina la posición de la mirada. Este dispositivo está equipado con una cámara de a bordo que captura la mirada del usuario y calcula qué punto respecto a la imagen se está enfocando.

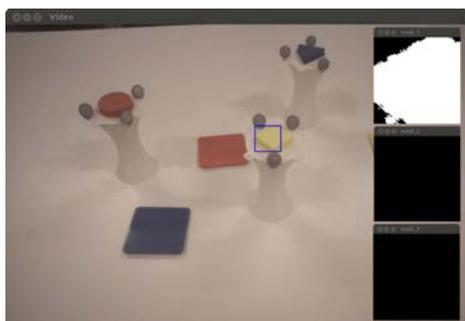


Figura 3: Detalle del resultado del algoritmo de reconocimiento por coincidencia de color

2.4 Sistema de seguimiento de objetos

Puesto que los entornos físicos son propensos a los cambios y la imprecisión, es necesario disponer de un sistema capaz de detectar dichos cambios, en este caso la variabilidad de la posición de los objetos con los que se quiera interactuar.

Con este propósito se ha elegido un sistema de seguimiento mediante cámaras y marcas infrarrojas, concretamente el sistema de cámara Trio OptiTrack (Figura 6). Este dispositivo se compone de tres cámaras de infrarrojos precalibradas capaces de realizar el seguimiento de la posición de varios marcadores reflectantes (esferas grises en la Figura 3). Cada objeto tiene una distribución característica de los marcadores, por lo que el sistema de seguimiento puede discernir claramente cada uno de ellos, y realizar un seguimiento de su posición en tiempo real.

2.5 Sistema de detección de intención de movimiento

Dado que no se desea que el sistema esté totalmente automatizado, se necesita una interfaz para usuario que sea sencilla, para desempeñar diferentes acciones tales como la apertura o cierre del exoesqueleto de mano.

En este caso, el método de activación elegido se en la información de las señales EMG del antebrazo. Para ello, se aplica un filtro de paso alto con una frecuencia de corte de 5 Hz a la señal EMG adquirida sin procesar, de tal manera que se minimizan los posibles problemas de deriva que se pueden producir. Al resultado de este filtrado se rectifica aplicando el valor absoluto, y la señal obtenida es filtrada con un filtro paso bajo de 5 Hz para obtener la envolvente (Figura 7). El umbral de activación varía significativamente entre los usuarios y las condiciones, por lo que este valor debe ser calibrado antes de realizar la actividad.

Para realizar la medición, se ha seleccionado la unidad Shimmer3-EMG, que proporciona dos canales diferenciales para la adquisición de EMG que serán utilizadas para la detección de la intención de los movimientos de los músculos de flexión y extensión del antebrazo, tal como se muestra en la Figura 4.

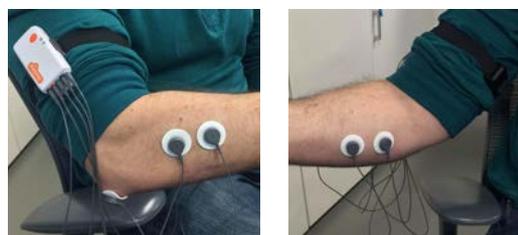


Figura 4: Usuario con la unidad de EMG y electrodos situados sobre el músculo extensor común de los dedos (izquierda) y sobre el músculo flexor común de los dedos (derecha)

2.6 Controlador de alto nivel

Todos los elementos mencionados anteriormente son coordinados por un controlador de alto nivel que implementa una máquina de estados, como el mostrado en la Figura 5, que será utilizado en la experimentación.

Este subsistema controla la transición entre estados y actúa como intermediario en el flujo de comunicación, adaptándolo al formato que necesite cada dispositivo.

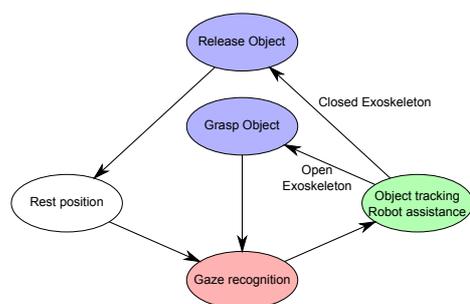


Figura 5: Diagrama de bloques de la máquina de estados implementada en el HLC

3 VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para comprobar la viabilidad, estabilidad y seguridad del sistema, se efectúa un ensayo preliminar con sujetos sanos.

3.1 Montaje Experimental

El ensayo preliminar consiste en la ejecución de una tarea simplificada en un entorno de rehabilitación. El sujeto realizará una actividad, en posición de sedestación, en la que debe mirar, alcanzar y agarrar un objeto situado sobre una mesa en frente de este; para a continuación soltarlo encima de un objetivo marcado en la misma superficie. Los objetos utilizados en esta prueba están diseñados específicamente para la situación, y consisten en tres vasos blancos con unas tapas coloreadas de forma unívoca para ser segmentadas fácilmente. A su vez, los objetivos sobre la superficie de trabajo están marcados por unos posavasos cuyo color corresponde a cada una de los objetos. La Figura 6 muestra de forma detallada el montaje descrito.

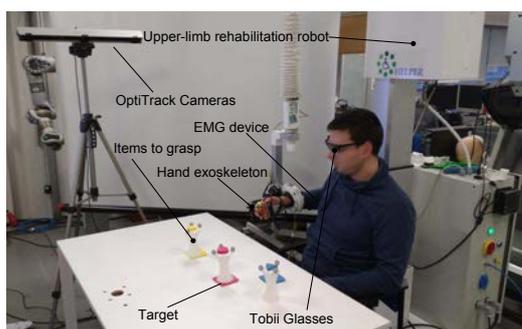


Figura 6: Montaje experimental para la validación del sistema

3.2 Calibración de Sistemas de Coordenadas

Puesto que las posiciones calculadas por el sistema de seguimiento de objetos y el robot de rehabilitación

están referidas a sistemas de coordenadas distintos, es necesario calcular la transformación de coordenadas T entre ambos. Ya que que las posiciones tanto de las cámaras como del robot son arbitrarias y difíciles de medir con precisión, se ha optado por utilizar un método de calibración utilizando matrices de transformación.

El método para llevar a cabo este cálculo se basa en ubicar uno de los objetos en cuatro posiciones diferentes, en las que se mide tanto la posición estimada por la cámara p_{camera}^i como la calculada por el robot al alcanzar esa posición de forma manual p_{robot}^i . Donde p^i es un vector expresado en coordenadas tridimensionales homogéneas. Para cada una de las cuatro posiciones, p_{camera}^i y p_{robot}^i se encuentran relacionadas por la matriz de transformación T según la ecuación 1. Por lo que es posible plantear un sistema de cuatro ecuaciones matriciales, que resulta en un sistema de 12 ecuaciones lineales con doce incógnitas (9 variables de la componente de rotación de T y 3 de la componente de traslación), fácilmente resoluble si se escogen puntos suficientemente alejados.

$$p_{camera}^i = T p_{robot}^i \quad (1)$$

3.3 Results

La Figura 7 muestra el estado y evolución de los distintos subsistemas durante el desarrollo de un ciclo de la actividad para un sujeto sano. De esta, se pueden extraer varios resultados preliminares:

- El gráfico de la posición del robot muestra que el dispositivo tiene una precisión adecuada para alcanzar de forma estable los puntos objetivo, en un periodo de tiempo suficientemente corto.
- De las gráficas EMG se puede concluir que el movimiento del brazo en la fase de alcance no influye en la señal electromiográfica de los músculos elegidos.
- Finalmente, la gráfica relacionada con la detección de color muestra que los tonos elegidos son apropiados para las pruebas, ya que no existe solapamiento entre ellos y otros colores presentes en el entorno. Este hecho ayudará a reducir la probabilidad de falsas detecciones en futuras pruebas.

4 CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos el sistema ha probado ser suficientemente seguro, ya que no se ha encontrado inestabilidades en el control. Mediante la elección de una estrategia de

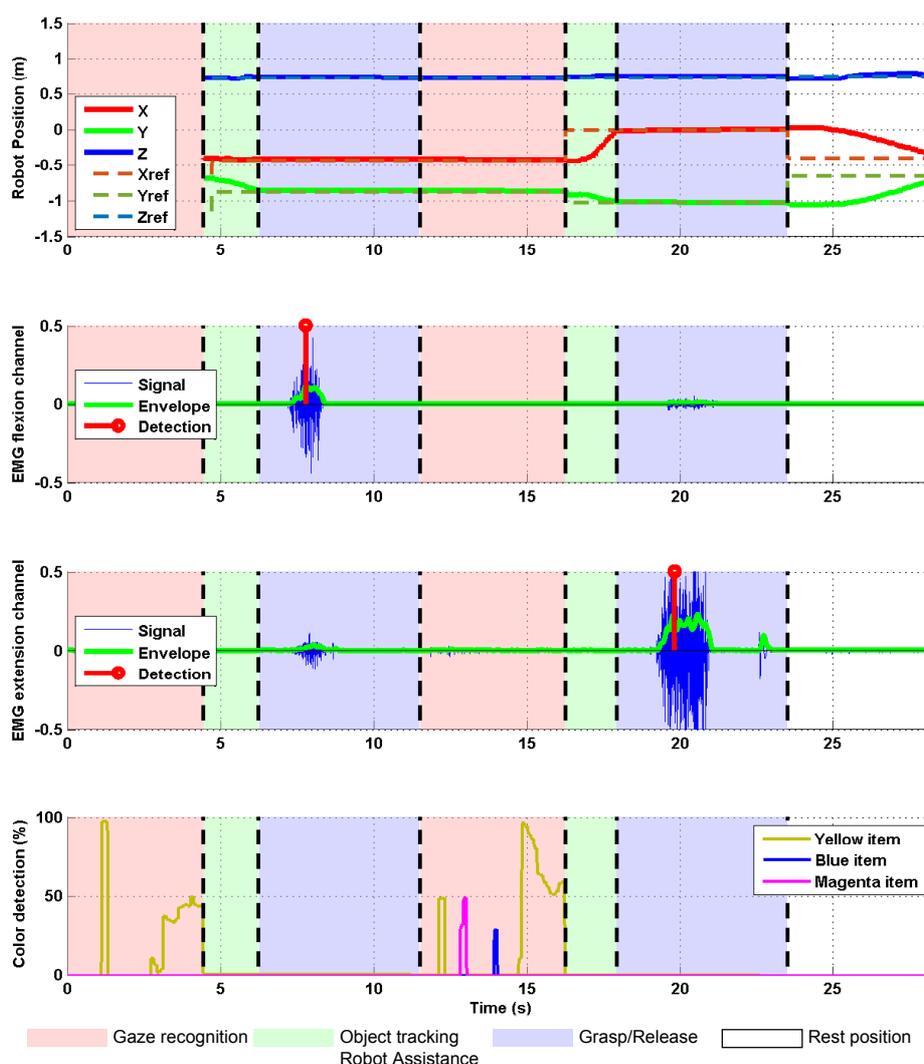


Figura 7: Resultados experimentales para un ciclo de actividad

procesamiento adecuada y el uso de una máquina de estados, se ha minimizado la probabilidad de falsos positivos en la detección de objetos e intención. Por tanto, es posible avanzar en el desarrollo de una experimentación más exhaustiva con una muestra estadísticamente representativa de usuario sanos; con el fin de construir una base de datos de referencia para una evaluación futura del sistema con usuarios discapacitados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea (ICT-22-2014: Multimodal and Natural computer interaction) a través del proyecto AIDE: "Adaptive Multimodal Interfaces to Assist Disabled People in Daily Activities" (Grant agreement no: 645322); y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2015-70415-C2-2-R.

Referencias

- [1] Krebs H.L., Hogan N., Aisen M.L. and Volpe B.T. Robot-aided neurorehabilitation. *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 75-87, Mar. 1998.
- [2] Marion Hersh. Overcoming Barriers and Increasing Independence? Service Robots for Elderly and Disabled People. *Int J Adv Robot Syst*, 2015, 12:114. doi: 10.5772/59230
- [3] Loureiro, R. C., Harwin, W. S., Nagai, K., and Johnson, M. (2011). Advances in upper limb stroke rehabilitation: a technology push. *Medical & biological engineering & computing*, 49(10), 1103-1118.
- [4] Ho, N. S. K., Tong, K. Y., Hu, X. L., Fung, K. L., Wei, X. J., Rong, W., and Suinto, E. A. (2011, June). An EMG-driven exoskeleton hand robotic training device on

- chronic stroke subjects: task training system for stroke rehabilitation. In *Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2011 IEEE International Conference on (pp. 1-5). IEEE.
- [5] Frisoli, A., Loconsole, C., Leonardis, D., Banno, F., Barsotti, M., Chisari, C., and Bergamasco, M. (2012). A new gaze-BCI-driven control of an upper limb exoskeleton for rehabilitation in real-world tasks. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, IEEE Transactions on, 42(6), 1169-1179.
- [6] Subramanian, S., Knaut, L. A., Beaudoin, C., and Levin, M. F. (2007, September). Enhanced feedback during training in virtual versus real world environments. In *Virtual Rehabilitation*, 2007 (pp. 8-13). IEEE.
- [7] Alqasemi, R. M., McCaffrey, E. J., Edwards, K. D., and Dubey, R. V. (2005, June). Analysis, evaluation and development of wheelchair-mounted robotic arms. In *Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on* (pp. 469-472). IEEE.
- [8] Rosier, J. C., Van Woerden, J. A., Van der Kolk, L. W., Driessen, B. J. F., Kwee, H. H., Duimel, J. J. and Bruyn, P. M. (1991, June). Rehabilitation robotics: The MANUS concept. In *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on* (pp. 893-898). IEEE. ISO 690
- [9] Diez J.A., Badesa F.J., Lledo L.D., Sabater J.M., Garcia-Aracil N., Beltran I., Bernabeu A. Design and Development of a Pneumatic Robot for Neurorehabilitation Therapies. In: *Robots'2015 Second Iberian Robotics Conference*, Lisboa, Portugal, 19 November-21 November 2015, paper no. 43
- [10] Bertomeu-Motos, A., Lledo, L. D., Diez, J. A., Catalan, J. M., Ezquerro, S., Badesa, F. J., and Garcia-Aracil, N. (2015). Estimation of Human Arm Joints Using Two Wireless Sensors in Robotic Rehabilitation Tasks. *Sensors*, 15(12), 30571-30583.
- [11] Enriquez, S. C., Narváez, Y., Vivas, O. A., Diez, J., Badesa, F. J., Sabater, J. M., SISTEMA ROBOTICO DE TIPO EXOESQUELETO PARA REHABILITACION DE LA MANO. XXXV Jornadas Automática, Valencia, 2014, paper no.44