

ROBOT DE REHABILITACIÓN CONFIGURABLE PARA TERAPIAS DEL MIEMBRO SUPERIOR

A. Mancisidor¹, I. Cabanes¹, A. Zubizarreta¹, E. Portillo¹, A. Rodríguez², A. Brull¹

¹Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Bilbao, España, {aitziber.mancisidor, itziar.cabanes, asier.zubizarreta, eva.portillo, asier.brull}@ehu.eus

²Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina y Enfermería, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Leioa, España, {ana.rodriguez}@ehu.eus

Resumen

La rehabilitación basada en dispositivos robóticos precisa de un robot capaz de adaptarse al estado de recuperación motora del paciente. En este trabajo se presenta un robot de rehabilitación reconfigurable denominado Universal Haptic Pantograph (UHP). Este dispositivo robótico, gracias a su estructura multiconfigurable, permite la rehabilitación del miembro superior (hombro, codo y muñeca) con un único dispositivo. Además, ha sido diseñado para trabajar con diferentes modalidades de interacción como son las asistidas, correctoras y opositoras, pudiendo así adaptarse al estado funcional progresivo del paciente durante el proceso de rehabilitación. Con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento de este sistema robótico se han realizado diferentes ensayos experimentales. Los resultados demuestran que el robot de rehabilitación UHP funciona correctamente con diferentes tareas de rehabilitación, realizando movimientos suaves que garantizan la seguridad del usuario en todo momento.

1. Introducción

Tras sufrir un ictus, es frecuente que el paciente pierda parte de su movilidad motora, siendo necesario realizar ejercicios de rehabilitación de los miembros superiores e inferiores [1]. Sin embargo, debido a limitaciones temporales, de personal y/o económicas, los programas de rehabilitación tradicionales priorizan la recuperación de las extremidades inferiores, dedicando muchos menos recursos a los miembros superiores.

Con el fin de paliar esta situación, en la que la rehabilitación se torna esencial para la recuperación de la movilidad motora, numerosos trabajos proponen el uso de dispositivos robóticos que permitan complementar la terapia de rehabilitación tradicional [2].

Los dispositivos robóticos de rehabilitación existentes, se clasifican en dos grandes grupos, los de contacto con el extremo y los exoesqueletos [3]. Los del primer tipo están basados en robots series industriales, por lo que son fáciles de diseñar y controlar. Sin embargo, al presentar un único punto de contacto, les imposibilita conocer y controlar la postura exacta de la extremidad. Esto dificulta determinar la fuerza realizada por cada articulación. Los exoesqueletos, en cambio, son mecanismos estructurales complejos cuyos segmentos y articulaciones se corresponden con las del miembro afectado, lo que les permite controlar con exactitud la postura y la fuerza ejecutada por cada parte de la extremidad. No obstante, dado que las longitudes y formas de los miembros

superiores varían de un usuario a otro, la adaptación al mismo es compleja, surgiendo problemas prácticos de implementación.

En este trabajo, se presenta un novedoso robot de rehabilitación que pretende adaptarse a las necesidades de los pacientes que requieran rehabilitación del miembro superior, el Universal Haptic Pantograph (UHP) [4]. La estructura multiconfigurable de este robot permite que un mismo dispositivo sirva para rehabilitar el hombro, el codo y la muñeca.

El resto del artículo se organiza como sigue: en la sección II, se detalla el robot de rehabilitación UHP; en la III, se proponen diferentes tareas de rehabilitación desarrolladas para el UHP; en la IV, se detalla el proceso de implementación del sistema de rehabilitación; en la V, se analizan los resultados de los ensayos experimentales; por último, resumirán las principales ideas.

2. Robot de rehabilitación reconfigurable

El UHP, Universal Haptic Pantograph, es un robot de rehabilitación para el entrenamiento de los miembros superiores [4]. Una de sus ventajas principales es la posibilidad de configurar su estructura mecánica mediante el uso de tres articulaciones bloqueables/desbloqueables (A, B y C) (Figura 1). Esta flexibilidad mecánica, le permite adaptarse a las necesidades del usuario y a la tarea a realizar, consiguiendo rehabilitar el hombro, el codo y la muñeca con un único dispositivo de estructura simple y de fácil uso.

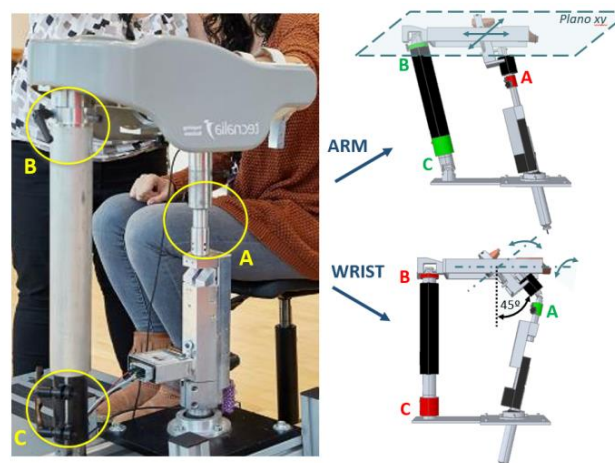


Figura 1: El robot de rehabilitación UHP.

Entre las ocho posibles configuraciones que posee, en este artículo se analizarán las dos más usadas, ARM y WRIST, las cuales se detallan en trabajos previos de los autores [5]. La configuración ARM (A bloqueada, B y C desbloqueadas) posibilita al robot realizar movimientos planares que se traducen en ejercicios de flexión/extensión del brazo. Esto permite realizar ejercicios asociados a los tres movimientos del hombro (rotación interna/externa, flexión/extensión y abducción/aducción) y el movimiento flexión/extensión del codo. En cambio, la WRIST (A desbloqueada, B y C bloqueadas), permite realizar ejercicios asociados a los movimientos de la muñeca (abducción/aducción y flexión/extensión) y el movimiento supinación/pronación del antebrazo.

3. Tareas de rehabilitación

En el apartado anterior se ha descrito la estructura del robot UHP y sus funcionalidades ARM y WRIST. Sin embargo, para que el dispositivo pueda ser utilizado con una finalidad terapéutica, es imprescindible diseñar y programar las tareas de rehabilitación que debe ejecutar.

Dichas tareas se asemejan a los ejercicios ejecutados durante las sesiones de tratamiento convencional, las cuales se basan en la movilización guiada del miembro afectado, y en desplazamientos similares a los que el paciente afrontará en las actividades de la vida cotidiana.

Al mismo tiempo, se debe considerar que la rehabilitación es un proceso largo que se suele iniciar en los primeros días de estancia en el hospital, cuya duración puede variar desde meses hasta años. En los primeros días después del ictus, donde el paciente puede no poseer ninguna capacidad de reclutamiento motor, el robot debe asistir al usuario para que éste pueda ejecutar los movimientos. Pero cuando el paciente ya cuente con la capacidad de activar reclutamientos musculares, el robot debe dificultar la ejecución del movimiento, de forma que el usuario aprenda a reaccionar ante perturbaciones externas del entorno.

Por ello, se ha dotado al UHP la capacidad de adaptarse al nivel de recuperación del paciente, permitiendo ejecutar tareas asistidas, correctoras u opositoras [6].

3.1. Tareas Asistidas

Las Tareas Asistidas aplican asistencia en la dirección del movimiento a realizar, ayudando al usuario a ejecutar el ejercicio. Por tanto son las apropiadas para cuando el usuario no es capaz de activar reclutamientos musculares, es decir, generar movimiento por sí mismo.

Dependiendo del nivel de intensidad de la asistencia, se implementan tres modos: el pasivo, el asistido y el activo. En el modo *pasivo*, el robot ejecuta completamente los movimientos, ya que el paciente no es capaz de realizar reclutamientos musculares. En el modo *asistido*, el robot ayuda al paciente en aquella parte del recorrido que no puede realizar aplicando una fuerza asistida. En el modo *activo*, el usuario realiza el movimiento solicitado.

Aunque estos modos han sido ampliamente utilizados, todavía hay algunas limitaciones no resueltas. En el modo pasivo, teniendo en cuenta que es el robot quien ejecuta

repetitivamente los movimientos, puede suceder que el usuario pierda interés en la terapia robótica. Por lo que es aconsejable que el paciente comience a generar el movimiento del miembro afectado tan pronto como sea posible, implementando los modos asistido y activo. Sin embargo, en las primeras etapas de rehabilitación, el paciente no tiene capacidad suficiente para completar el ejercicio en el modo asistido o activo, lo que puede conducir a la frustración y al rechazo.

Ante esta situación, en este trabajo se propone el modo *activo-asistido-pasivo* descrito al detalle en [7]. En este modo, al principio se deja que el usuario realice el ejercicio sin ninguna ayuda (modo activo). Si pasado un tiempo no ha conseguido ejecutar la trayectoria deseada, se activa el modo asistido para que el UHP le ayude a finalizar la tarea. Si pasado otro rango de tiempo, el paciente no ha conseguido finalizar el ejercicio, se activa el pasivo donde el robot termina la tarea. Estos límites de tiempo son programables, por lo que el terapeuta puede ajustarlos a las necesidades de cada usuario.

3.2. Tareas Correctoras

Las tareas asistidas se centran en la ejecución del ejercicio, pero puede ocurrir que el paciente tenga capacidad para realizar los reclutamientos musculares solicitados, es decir, para generar fuerza y movimiento, pero que no controle la dirección de los mismos. En estos casos se implementan las tareas correctoras.

En el modo *corrector* propuesto en este trabajo, el usuario tiene que comportarse de una forma activa y generar movimiento, mientras que el UHP le ayuda a seguir la trayectoria deseada. Su funcionamiento es el siguiente: cuando está dentro de una región predefinida, al alejarse de la trayectoria deseada, el robot le aplica una fuerza en dirección a dicha trayectoria, obligando a que sea el sujeto el que realice el movimiento. Pero si sale de la región, el UHP aumenta la asistencia obligando a volver a la región.

3.3. Tareas Opositoras

Con las tareas asistidas y correctoras, el paciente realiza ejercicios apropiados para las primeras fases del tratamiento en los que debe aprender a organizar y generar el movimiento del miembro afectado. No obstante, con el objetivo de conseguir la capacidad de enfrentarse a tareas cotidianas como mover elementos de poco peso o abrir cajoneras, se debe mejorar su destreza. Para ello, en las últimas fases, se deben emplear tareas que dificulten la ejecución del ejercicio, es decir, las tareas opositoras.

Para el robot UHP, se han diseñado tres modos basados en la oposición: el resistido, la introducción de fuerzas externas y la amplificación del error.

En el modo *resistido*, el UHP realiza una fuerza en la dirección opuesta a la trayectoria de movimiento, reproduciendo la sensación de estar empujando un elemento. Esta fuerza varía dependiendo del estado de recuperación del usuario y del ejercicio a realizar. De esta forma, el paciente consigue aumentar y controlar la fuerza realizada con el miembro afectado.

Con el modo resistido, el usuario aprende a hacer frente a una fuerza de una dirección concreta, pero en la vida cotidiana, una fuerza exterior puede tener distintas direcciones y puede aparecer o desaparecer sin previo aviso. Con el fin de preparar al paciente para interactuar con perturbaciones desconocidas, en el *modo introducción de fuerzas externas*, el UHP aplica fuerzas aleatorias que van variando de módulo y de dirección.

La tarea correctora propuesta ayuda a mejorar la dirección del movimiento aplicando una fuerza asistida hacia la trayectoria deseada. Esta asistencia está bien para las fases iniciales en los que el paciente no tiene capacidad de corregir el error por sí mismo, pero en la vida real, debe ser el propio usuario el que actúe. Sin embargo, algunas veces, les cuesta reaccionar, es por ello por lo que se implementa el modo *amplificación del error*. En este modo, con la intención de que el paciente reaccione, el robot aumenta el error cometido por el usuario.

3.4. Diseño del controlador

Las tareas de rehabilitación propuestas definen el comportamiento deseado del robot, es decir generan una referencia de fuerza o de posición. Pero para que el dispositivo robótico pueda seguir estas consignas, es necesario un controlador de bajo nivel apropiado, robusto y seguro.

Con este propósito, se ha diseñado un algoritmo de control avanzado formado por un controlador de impedancia adaptativo, un controlador de fuerza basado en el comportamiento dinámico del robot y un controlador de posición [8]. Además, con el objetivo de garantizar una transición suave y segura entre diferentes algoritmos de control, se ha implementado un controlador de seguimiento.

Para el diseño y uso del algoritmo de control propuesto es necesario conocer la fuerza y el movimiento de interacción entre el paciente y el robot. Estos valores se pueden medir directamente a través de los sensores. Pero estos sensores, además de ser costosos, suelen añadir dificultades mecánicas y electrónicas. Por ello, en este trabajo la fuerza y el movimiento de contacto se estiman del modelo cinemático y dinámico del dispositivo UHP, así como de mediciones de sensores de bajo coste [5].

4. Implementación tiempo real

Con la intención de ejecutarlos en tiempo real, las tareas de rehabilitación y el algoritmo de control se han implementado en la plataforma CompactRIO de National Instruments (Figura 2).

Con el apoyo del interfaz gráfico de rehabilitación desarrollado, el terapeuta selecciona de forma fácil e intuitiva el ejercicio a ejecutar, la configuración mecánica adecuada (ARM o WRIST), la tarea deseada (asistido, corrector, resistido, etc.) y los parámetros de rehabilitación (tiempo del ejercicio, fuerza máxima, etc.). A partir de estos, el interfaz gráfico genera la posición deseada. Esta posición deseada, junto al resto de las variables, se transmite a la plataforma CompactRIO.

Al mismo tiempo, CompactRIO lee las mediciones de los sensores. Y después de filtrar y preprocesar las

mediciones, junto a los datos transmitidos por el interfaz gráfico, los introduce en las tareas de rehabilitación. A partir de estos datos, las tareas generan una consigna de fuerza/posición que transmiten al controlador que calcula el par que deben de realizar los motores.

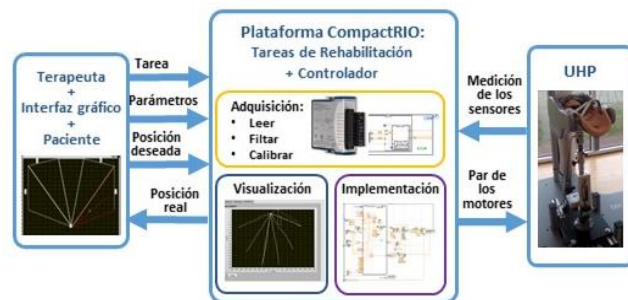


Figura 2: Diagrama de ejecución del robot UHP.

Además, gracias al modelo del robot, se estiman la posición y la fuerza de contacto entre el paciente y el dispositivo. Estos valores se visualizan en pantalla y se guardan en memoria. De esta forma, al finalizar el ejercicio, el terapeuta puede analizar el estado del paciente observando los valores almacenados. Al mismo tiempo, con la intención de facilitar la interacción con el usuario, la posición real se transmite al interfaz gráfico para que lo muestre en pantalla junto al movimiento deseado. De esta forma, el paciente puede observar en pantalla su posición actual y la deseada (Figura 2).

5. Experimentos de validación

Para demostrar el correcto funcionamiento del robot UHP, se han ejecutado más de 200 pruebas experimentales en las configuraciones ARM y WRIST. En este artículo se muestran los dos más significativas. Como el objetivo es validar el correcto funcionamiento y verificar que no realiza movimientos bruscos que puedan lesionar al usuario, las pruebas se han realizado con 30 personas sanas que han intentado reproducir diferentes estados de recuperación de enfermos con déficit motor.

En cada ensayo (Figuras 3 y 4), en la gráfica superior se detalla el punto deseado (\mathbf{x}_{Des}) y el movimiento real (\mathbf{x}_{Cn}) del robot. Y en la inferior se muestra la fuerza de interacción real (\mathbf{F}_{Cn}) y deseada (\mathbf{F}_{Des}) en la dirección de la trayectoria.

5.1. Tareas Asistidas. Configuración ARM.

En la Figura 3 se observan los resultados obtenidos de un ensayo en el modo *activo-asistido-pasivo* en la configuración ARM. El ensayo se ha programado de tal forma que se active el modo activo durante 7s (fondo azul), el asistido durante 4s (fondo morado) y el pasivo durante 3s (fondo verde). Además, se ha seleccionado que el movimiento de flexión (el de vuelta) se realice en modo *pasivo* (fondo blanco) con un periodo de 3s.

Como se puede ver, en los dos primeros movimientos de extensión el usuario ha finalizado el ejercicio sin asistencia externa (en modo activo, fondo azul). En los dos siguientes ha necesitado asistencia del robot (modo asistido, fondo morado). En las dos sucesivas, la asistencia no ha sido suficiente, y el robot ha tenido que finalizar el movimiento (modo pasivo, fondo verde).

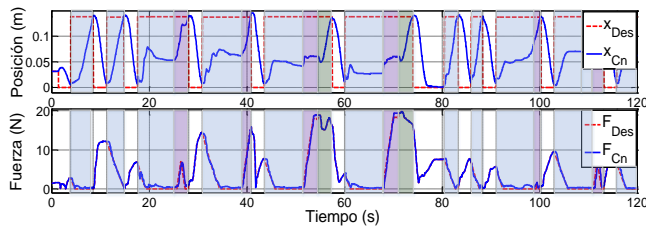


Figura 3: Ensayo en modo activo-asistido-pasivo en la configuración ARM. Con el fondo azul, morado y verde se destacan los modos activo, asistido y pasivo, respectivamente. El movimiento de flexión se observa en blanco.

5.2. Tareas Opositoras. Configuración WRIST.

En la Figura 4 se pueden ver los resultados obtenidos en un ensayo en modo *resistido* en la configuración WRIST. Como antes, se ha seleccionado que el movimiento de flexión se realice en modo *pasivo* (fondo blanco).

En el movimiento de extensión (modo resistido, fondo azul) el robot UHP ha presentado oposición a la finalización del ejercicio. La fuerza aplicada por el robot, es cero al inicio del movimiento ($x_{Cn}=0m$) y va aumentando hasta llegar a la posición deseada ($x_{Cn}=\pm 0.06m$).

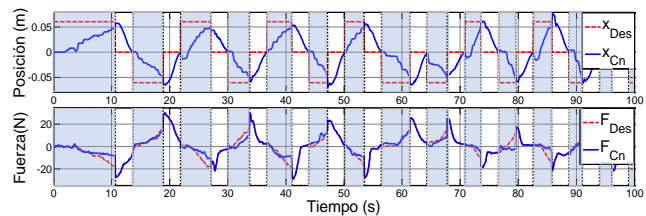


Figura 4: Ensayo en modo resistido en la configuración WRIST. Con el fondo azul se resalta el movimiento de extensión en modo resistido. El movimiento de flexión se observa en fondo blanco.

Después de ejecutar diferentes ensayos, los resultados muestran que el robot de rehabilitación UHP es capaz de generar los movimientos deseados siguiendo las consignas de fuerza definidos para cada ejercicio. Además, se ha observado que el UHP en ningún momento realiza ni sobreimpulsos ni movimientos bruscos. Por lo tanto, se concluye que el sistema de control desarrollado para la plataforma de rehabilitación basada en el robot UHP funciona correctamente en los diferentes modos necesarios para una terapia de rehabilitación óptima.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado el robot UHP (Universal Haptic Pantograph) para la rehabilitación de los miembros superiores. Este robot, gracias a su estructura configurable, permite rehabilitar las articulaciones del miembro superior utilizando diferentes configuraciones mecánicas. En este trabajo se han analizado dos de los más demandados, ARM y WRIST.

Con el fin de adaptarse al estado de recuperación del paciente, se han definido diferentes tareas asistidas, correctoras y opositora. Además, con el objetivo de seguir las referencias generadas por las tareas de rehabilitación, se ha implementado un algoritmo de control avanzado que incluye tres controladores diferentes: el de impedancia, el de fuerza y el de posición.

Con el fin de validar el sistema de rehabilitación basado en el robot UHP, se han realizado diferentes ensayos experimentales. Los resultados han verificado que el sistema propuesto funciona correctamente con diferentes tareas de rehabilitación en las configuraciones ARM y WRIST. Por lo que se concluye que el UHP es un sistema de rehabilitación óptimo con capacidad de adaptarse al estado de recuperación de cada paciente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad MINECO & FEDER en el marco del proyecto DPI-2012-32882, así como por la beca PRE-2014-1-152 y el proyecto IT914-16 del Gobierno Vasco, el proyecto PPG17/56 de la UPV/EHU y por Euskampus Fundazioa.

Además, los autores desean expresar su agradecimiento al centro de investigación Tecnalia por su colaboración y por prestar su robot de rehabilitación UHP.

Referencias

- [1] Molinari M, Esquenazi, Anastasi AA, Nielsen RK, Stoller O, D'Andrea A, Calatayud MB. Rehabilitation Technologies Application in Stroke and Traumatic Brain Injury Patients. *Biosystems & Biorobotics*. vol 10, pp 29-64, 2016 (ISBN: 978-3-319-24899-8).
- [2] Brackenridge J, Lynley VB, Lennon S, Costi JJ, Hobbs DA. A Review of Rehabilitation Devices to Promote Upper Limb Function Following Stroke. *Neuroscience and Biomedical Engineering*. vol 4, pp 25-42, 2016 (ISSN: 2213-3852).
- [3] Babaiasl M, Mahdioun SH, Jaryani P, Yazdani M, A review of technological and clinical aspects of robot-aided rehabilitation of upper-extremity after stroke. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. vol 11 (4), pp 263-280, 2016 (ISSN: 1748-3107).
- [4] Perry JC, Oblak J, Jung JH, Cikajlo I, Veneman JF, Goljar N, Bizoviar N, Matjai Z, Keller T. Variable structure pantograph mechanism with spring suspension system for comprehensive upper-limb haptic movement training. *Rehabilitation Research and Development*. vol 48(4), pp 317-334, 2011 (ISBN: 3494646090, ISSN: 0748-7711).
- [5] Mancisidor A, Zubizarreta A, Cabanes I, Bengoa P, Jung JH. Kinematical and dynamical modeling of a multipurpose upper limbs rehabilitation robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. vol 49, pp 374-387, 2018 (ISSN: 0736-5845).
- [6] Proietti T, Crocher V, Roby-Brami A, Jarrasse N, Upper-Limb Robotic Exoskeletons for Neurorehabilitation: A Review on Control Strategies. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. vol 9, pp 4-14, 2016 (ISSN: 1937-3333).
- [7] Mancisidor A, Zubizarreta A, Cabanes I, Bengoa P, Jung JH. A Comprehensive Training Mode for Robot-Mediated Upper Limb Rehabilitation. *Converging clinical & engineering research on Neurorehabilitation II*. vol 15, pp 1169-1173, 2017 (ISBN: 978-3-319-46668-2).
- [8] Mancisidor A, Zubizarreta A, Cabanes I, Bengoa P, Jung JH. Interaction force and motion estimators facilitating impedance control of the upper limb rehabilitation robot. *International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. pp 561-566, 2017 (ISBN: 978-1-5386-2296-4).