

Este documento está publicado en:

*Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* (2015). 12(1), 99-110.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.09.007>

© 2014 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L.U.

# Asistente Robótico Socialmente Interactivo para Terapias de Rehabilitación Motriz con Pacientes de Pediatría

L.V. Calderita<sup>a,\*</sup>, P. Bustos<sup>a</sup>, C. Suárez Mejías<sup>b</sup>, F. Fernández<sup>c</sup>, R. Viciano<sup>d</sup>, A. Bandera<sup>e</sup>

<sup>a</sup>*RoboLab, Universidad de Extremadura, Cáceres, España.*

<sup>b</sup>*Grupo de Innovación Tecnológica, UCAi, Hospital Universitario Virgen del Rocío, Sevilla, España.*

<sup>c</sup>*Planning and Learning Group, Universidad Carlos III de Madrid, España.*

<sup>d</sup>*Grupo M2P, Universidad de Jaén, Linares, España.*

<sup>e</sup>*Grupo ISIS, Universidad de Málaga, Málaga, España.*

\* Autor en correspondencia. e-mail: lvcaldерita@unex.es (L.V. Calderita), pbustos@unex.es (P. Bustos), cristina.suarez.exts@juntadeandalucia.es (C. Suárez Mejías), ffernandez@uc3m.es (F. Fernández), rviciano@ujaen.es (R. Viciano), ajbandera@uma.es (A. Bandera)

**Resumen:** El objetivo de las terapias de rehabilitación motriz es la recuperación de zonas dañadas mediante la repetición de ciertas actividades motrices. En este esquema, la recuperación del paciente depende directamente de su adherencia al tratamiento, por lo que las terapias convencionales, con sus intensivas sesiones de rehabilitación que se prolongan en el tiempo, provocan en numerosas ocasiones su desmotivación, haciendo que no se consiga siempre que éste cumpla con los objetivos fijados. Por otra parte, la correcta ejecución de estas terapias en hospitales y otros centros médicos requieren una dedicación y esfuerzo importante y continuado por parte de los profesionales médicos, lo que supone a su vez un coste importante para las instituciones sanitarias. En este ámbito de aplicación, este artículo describe el desarrollo de una terapia de rehabilitación motriz novedosa, centrada en un robot socialmente interactivo, que se convierte en fuente de motivación pero también en un asistente para llevar a cabo terapias rehabilitadoras personalizadas. La experiencia ha sido también el germen del diseño e implementación de una arquitectura de control novedosa, RoboCog, que ha dotado al robot de las capacidades perceptivas y cognitivas que le permiten exhibir un comportamiento socialmente desarrollado y pro-activo. Las pruebas de verificación llevadas a cabo sobre los distintos elementos de la arquitectura muestran el correcto funcionamiento de éstos y de su integración con el resto de la arquitectura. Además, dicha terapia ha sido evaluada satisfactoriamente en sesiones individuales con pacientes de pediatría con parálisis braquial obstétrica (PBO), una patología producida por un daño adquirido en el momento del nacimiento y que afecta a la movilidad motriz de las extremidades superiores, pero no a sus capacidades intelectuales y comunicativas.

**Palabras Clave:** Rehabilitation therapies, Socially assistant robotics, Human-Robot Interaction

## 1. Introducción

Con el objetivo de ayudar a pacientes cuyo sistema neuromuscular presenta algún tipo de déficit, los tratamientos de rehabilitación motriz explotan la plasticidad que presenta dicho sistema para, con la repetición de ciertos ejercicios físicos o cognitivos, forzar el establecimiento de un nuevo patrón de conexiones (neuroplasticidad inducida (Dobkin, 2004)) y, gracias a ello, recuperar su funcionalidad (Leocani and Comi, 2006). En este esquema, la recuperación del paciente depende directamente de su adherencia al tratamiento, por lo que las terapias convencionales, con sus intensivas sesiones de rehabilitación que se prolongan en el tiempo, provocan en numerosas ocasiones

su desmotivación, haciendo que no se consiga siempre que éste cumpla con los objetivos fijados (Díaz et al., 2011). Por otra parte, la correcta ejecución de estas terapias en hospitales y otros centros médicos requieren una dedicación y esfuerzo importante y continuado por parte de los profesionales médicos, lo que supone a su vez un coste importante para las instituciones sanitarias (Díaz et al., 2011). Entre otras alternativas, la Robótica ha empezado a destacar recientemente como una herramienta útil a la hora de paliar estos inconvenientes. Uno de los campos de investigación más activos en este sentido, especialmente para el caso de pacientes de pediatría, es el del diseño e implementa-

ción de asistentes robóticos con capacidades sociales (*socially assistive robots*, SAR) (Mataric, 2006), utilizados por el terapeuta como fuentes de motivación y entrenamiento personalizadas y que no llegan, sin embargo, a entrar en contacto físico con el paciente para ayudarles a hacer los movimientos. Para conseguir esta adherencia al tratamiento, estos robots ofrecen canales naturales de interacción (gestos, expresiones faciales o diálogo), y adaptan la terapia al estado del paciente. Las ventajas de estos robots sociales, capaces de participar en la terapia sin verse afectados por el cansancio, monitorizando, al mismo tiempo, el progreso del paciente durante la terapia, los hace aparecer como soluciones económicamente viables a la necesidad tanto de mantener la adherencia del paciente a un proceso de rehabilitación extenso y particularizado como de apoyar la labor del terapeuta.

En este ámbito de aplicación, este artículo describe nuestra experiencia en el desarrollo y evaluación de un robot socialmente interactivo adaptado a la conducción y monitorización de terapias de rehabilitación motriz. En coordinación con el Grupo de Innovación Tecnológica y la Unidad de Gestión Clínica de Rehabilitación del Hospital Universitario Virgen del Rocío (Sevilla), se ha trabajado en un caso de uso clínico concreto: pacientes pediátricos, de entre cuatro y siete años, afectados de déficit motor en alguno de sus miembros superiores debido a parálisis braquial obstétrica (PBO), pero sin afectación de sus capacidades intelectuales. Esta es una de las patologías más prevalentes relacionadas con los déficits motores y cognitivos. Los pacientes pediátricos, además, son uno de los colectivos más interesantes de cara a aplicar este tipo de sistemas robóticos ya que muestran un alto grado de interés y colaboración en escenarios de interacción con robots sociales.

Partiendo de la hipótesis de que todo el contexto (tipo de paciente y sesión, tareas a realizar...) influye en la satisfactoria resolución del problema, se ha diseñado un robot cuyo aspecto externo se adapta al entorno de trabajo, cuya estructura hardware permite, a un coste relativamente bajo, soportar las numerosas sesiones terapéuticas y cuya arquitectura software proporciona al robot las capacidades perceptivas y cognitivas necesarias para interactuar con el paciente, adaptarse a un escenario siempre cambiante y proporcionar apoyo al paciente. Con este fin, esta arquitectura incluye, aparte de las funcionalidades robóticas básicas (por ejemplo, control de movimiento o de sensores), componentes y funcionalidades más avanzadas, que permiten al robot detectar y monitorizar personas usando información proveniente de distintas fuentes (visión o profundidad) e interactuar con ello usando canales de comunicación natural, como el diálogo, la expresión facial o la adopción de determinadas posturas con su cuerpo. Con el propósito de dotar al robot de una mayor seguridad en sus respuestas motrices, pero sin que ello implique un retardo en las mismas, la arquitectura de control ha evolucionado desde las primeras pruebas hasta organizarse en torno a una representación interna que incluye al robot, el paciente y los objetos que los rodeen. Al contar con una descripción o modelo interno y un motor de simulación, esta novedosa arquitectura, RoboCog, permite al robot predecir el resultado de las acciones de los actores en escena, y así exhibir un comportamiento pro-activo, que le permite anticiparse a

las necesidades del paciente y al resultado de sus propias acciones. Esta representación interna se realimenta con percepciones y acciones que deben modelar la escena sin excesivo detalle, pues el coste de su mantenimiento la haría inviable, y con incertidumbre, pues lo percibido está sujeto a numerosas fuentes de error.

### 1.1. Contribuciones

Desde un punto de vista global, la principal contribución de este trabajo es la incorporación de tecnología robótica actual a la realidad de las terapias de rehabilitación motriz, formulada desde un punto de vista muy práctico. Las razones que subyacen tras este esfuerzo son varias. Por una parte, dado que la rehabilitación médica es una terapia de conducta, en la que los ejercicios físicos deben ser aplicados con la frecuencia e intensidad adecuadas, los robots sociales, con una gran capacidad para percibir a la persona, pueden ser un monitor muy seguro que permite además el registro preciso de los movimientos del paciente. En este sentido, los avances experimentados con la incorporación de las cámaras RGBD (Red-Green-Blue y profundidad (Depth)) se han combinado con modelos para robustecer y mejorar la captura de movimiento (Calderita et al., 2013a). Por otra parte, el robot consigue, en su interacción con el niño, una cercanía que lo convierte más en un compañero o elemento del juego que en un monitor citepcalderita:2013a.

Desde un punto de vista técnico, este trabajo aporta en la terapia de rehabilitación motriz sin contacto físico el empleo de un robot que, en su diseño final, presenta las siguientes contribuciones:

- Emplear una arquitectura cognitiva novedosa, RoboCog, que cubre todo lo requerido por la plataforma: planificación de alto nivel, razonamiento y percepción a bajo nivel, y modelado de entornos dinámicos. Los módulos de esta arquitectura están fuertemente ligados con el resto de contribuciones citadas en esta lista.
- Modelar las terapias de rehabilitación motriz como tareas de planificación automática. Esto requiere el modelado de todos los aspectos que aparecen en un proceso de interacción persona-robot desde la perspectiva de la planificación automática, así como la formalización de las sesiones teniendo en cuenta la incertidumbre del problema a abordar. La arquitectura a alto nivel también integrará capacidades de replanificación y aprendizaje.
- Representar internamente tanto su propio cuerpo (robot) como el resto del entorno externo. Este modelo interno permite al robot ser pro-activo, esto es, interpretar la información sensorial para predecir lo relevante del futuro inmediato. El modelo interno tendrá capacidades de emulación, de forma que las acciones ejecutadas serán inicialmente procesadas como acciones virtuales, y producirán percepciones virtuales en tiempo real. Para evitar el desacoplamiento entre el modelo interno y la realidad (*grounding problem*), la arquitectura cuenta con comportamientos específicos que permiten actualizar selectivamente este modelo interno, así como dirigir los recursos

computacionales hacia aquellas partes del entorno donde se han predicho posibles cambios. El planificador de alto nivel empleará esta representación completa como un filtro para percibir la realidad, de manera que siempre dispondrá de toda la información que requiera (actualizada a la mejor de las tasas que ofrece el robot).

- Disponer de un conjunto especializado de comportamientos dirigidos a resolver la interacción persona-robot, tanto a nivel verbal (lenguaje natural) como no-verbal (gestos, expresiones o control de la mirada). Este conjunto de comportamientos serán necesarios para que el robot empatee con el paciente durante la sesión de rehabilitación.

### 1.2. Estructura del artículo

El resto del artículo se organiza como sigue: tras analizar los antecedentes generales de la presente línea de trabajo en el apartado 2, en el apartado 3 se describe el desarrollo de una arquitectura cognitiva novedosa, que constituirá el núcleo de THERAPIST, nuestra propuesta de robot socialmente interactivo. Las pruebas de verificación de los módulos de la arquitectura, así como los resultados previos obtenidos con la misma se detallan en el apartado 4. Finalmente, las conclusiones y líneas futuras de trabajo se presentan en el apartado 5.

## 2. Antecedentes

Como se ha comentado, la terapia de neurorehabilitación exigirá una atención constante del paciente, y la adherencia personal de éste a un tratamiento intenso que se prolongará, además, en el tiempo. Para ser efectiva, el paciente aquejado de uno de estos problemas debería empezar su terapia lo más pronto posible, además de seguir un tratamiento personalizado que esté adaptado a su dolencia y evolución. Ambas cuestiones no son siempre fáciles de satisfacer, dada la limitada disponibilidad de profesionales y la falta de tiempo para monitorizar la evolución de cada caso. Con el objetivo de contribuir a la mejora en la aplicación de tratamientos de este tipo, la robótica de rehabilitación persigue la introducción de tecnología robótica en este proceso terapéutico. Como en otros campos de aplicación, la robótica ofrece interesantes ventajas, como pueden ser la posibilidad de realizar tratamientos personalizados sin cansancio o su capacidad para integrar sensores que proporcionen una estimación cuantitativa de la recuperación. Además, aparte de ofrecer asistencia mecánica o física, los robots pueden ofrecer asistencia social e integradora, con el fin de mejorar la implicación y motivación del paciente. Dado que la repetición de los ejercicios por parte del paciente es la base de la recuperación (Okamura et al., 2010), esta segunda aportación de los robots como entrenadores personales (*socially assistive robots*, SAR) no debe ser despreciada y, de hecho, son numerosos los autores que la consideran como uno de los retos más ambiciosos de la actual robótica de rehabilitación (Mataric, 2006; Fong et al., 2003).

La experimentación clínica demuestra que la motivación del paciente constituye un factor fundamental para encarar satisfactoriamente una terapia de neurorehabilitación (Colombo et al.,

2007), que se suele identificar con la capacidad para enganchar al paciente con el tratamiento neurorehabilitador. La necesidad por mantener este nivel de motivación en el paciente, esa implicación o adherencia al tratamiento, hace que sean diversas las herramientas que conviven para facilitar la rehabilitación, como puede verse en varios de los proyectos que en la actualidad se están realizando en el MIT<sup>1</sup> para niños con parálisis cerebral, o en sistemas comerciales, como el ArmeoSpring Pediatric© de Hocoma<sup>2</sup>, una herramienta robótica para rehabilitación en la que la motivación se consigue a través de videojuegos específicos (Rego et al., 2010). Existen distintas opciones para crear actividades amenas que proporcionen al niño los esquemas funcionales que le ayudarán, posteriormente, a adquirir la capacidad motriz para llevar a cabo tareas de la vida diaria (videojuegos (*serious games*), realidad virtual, etc.). Sin embargo, existen trabajos que demuestran las ventajas que la interacción física con un robot presenta como forma de enriquecer las habilidades de interacción del niño e incrementar sus respuestas emocionales positivas (Libin and Libin, 2004; Robins et al., 2010; Calderita et al., 2013b). En la actualidad se han realizado evaluaciones sobre la incorporación de robots en las terapias con niños, donde no solo se realizan ejercicios físicos, sino también cognitivos. Dentro del proyecto europeo IROMECS<sup>3</sup>, se han evaluado distintos escenarios de juego con niños con autismo, retraso mental no severo y discapacidad motriz severa (Robins et al., 2010). En particular con niños con autismo se utilizó el robot animado KASPAR<sup>4</sup> (un robot con forma de muñeco y capacidad de realizar expresiones faciales) controlado remotamente y un LEGOROBOT, no animado. Como parte del proyecto AURORA<sup>5</sup>, se ha evaluado también las capacidades de integración social que un robot como KASPAR puede tener en niños con autismo a través de la interacción con el tacto. Pese a que en la actualidad se están dando los primeros pasos en la evaluación de la integración de robots en terapias con niños, los primeros casos de estudio muestran sus ventajas. Dado que son sistemas programables, permiten generar distintos estímulos para promover la interacción con el niño de distintas formas. Además, se les pueden incorporar habilidades para modificar sus respuestas en función de cómo reacciona el niño, y mediante la repetición de esta respuesta modificada, pueden crear un ciclo de acciones y refuerzo predecible y ordenado (Robins et al., 2010). Por otro lado, en el ámbito de la enseñanza, sí se ha analizado el grado de aceptación que tendría un robot que actuara como tutor entre estudiantes de una clase (Shin and Kim, 2007). En estos estudios se concluye que la aceptación es mayor entre niños más pequeños, que llegaban a preferir a estos robots tutores. Shim y Kim (2007) también destacaron el importante papel que los aspectos emocionales tienen en dicha aceptación. Similares conclusiones fueron obtenidas en estudios realizados en 2010 sobre aprendizaje de lengua en niños usando robots, co-

<sup>1</sup><http://web.mit.edu/newsoffice/2009/robotherapy-0519.html>

<sup>2</sup><http://www.hocoma.com>

<sup>3</sup><http://www.iromec.org/>

<sup>4</sup><http://kaspar.feis.herts.ac.uk/>

<sup>5</sup><http://www.aurora-project.com/>

mo el Nabaztag<sup>6</sup> (Eimler et al., 2010) o el iCat<sup>7</sup> (Saerbeck et al., 2010). La experiencia fue considerada por los niños más como un juego que un ejercicio de clase.

Dada la natural tendencia de las personas para relacionarse con toda forma animada a través de patrones sociales, la efectividad de esta interacción persona-robot social dependerá en gran medida del grado de aceptabilidad con el que el paciente adopte al robot como ente animado activo, la cual emanará, en gran medida, de la apariencia física del robot pero también del comportamiento de éste. Esta tendencia, que se manifiesta en nuestra capacidad para dotar de personalidad o intención incluso a los robots más simples, se utilizarían en la robótica de rehabilitación para crear robots socialmente interactivos, capaces de monitorizar, motivar y alentar las actividades propias de la terapia, mejorando la calidad final de la misma. Esta es la motivación que subyace en proyectos como FLORENCE<sup>8</sup> o KSERA<sup>9</sup>, recientemente subvencionados por el 7 Programa Marco de la Unión Europea. También en el proyecto ACROSS<sup>10</sup>, un proyecto financiado por el plan Avanza, en el que se desarrolló el robot Ursus (Mejías et al., 2013), un robot semi-autónomo equipado con sensores RGBD para monitorizar los movimientos de los pacientes y con la capacidad de analizar éstos y generar un discurso de refuerzo en tiempo real desde texto escrito (Figura 1). Al igual que el ya citado KASPAR, Ursus permitió comprobar que en ocasiones la existencia de un repertorio reducido de expresiones y emociones, como con las que suele contar un robot, puede convertirse en un aspecto positivo de cara a la terapia con niños, siendo su empatía mayor que con el contacto directo con personas.

### 3. Therapist: un nuevo robot para rehabilitación

Como se concluye en el apartado anterior, la utilidad del robot asistente vendrá condicionada por su capacidad para operar con cierto nivel de autonomía. Solo así podrá convertirse en un auténtico compañero de juegos del niño (Calderita et al., 2013b), pues lo contrario implica un nivel de supervisión constante y, hasta cierto punto, estresante. En nuestro caso, esta experiencia se constató en el trabajo desarrollado con el robot Ursus: aunque los resultados obtenidos fueron plenamente satisfactorios en cuanto a la mejora en la adherencia al tratamiento rehabilitador (Mejías et al., 2013), esto se consiguió incrementando los recursos humanos respecto a la terapia tradicional y, también, el nivel de estrés, asociada a la continua supervisión, a todos los niveles, del comportamiento del robot.

El problema de Ursus se debe, fundamentalmente, a las limitaciones de su arquitectura de control, que está basada en una máquina de estados, y a una capacidad de modelado del entorno y del paciente muy simplificada. Estas condiciones dan lugar a comportamientos que únicamente funcionan bien si el contexto es el adecuado. Cualquier alejamiento de la situación para

la que fue diseñado conduce a un desacople inmediato con el paciente, por ejemplo en el caso típico de un niño dejando de prestar atención al robot, o al contrario, levantándose de la silla y acercándose a abrazarlo. La cuestión que se plantea, por tanto, es ¿cómo tener en cuenta conjuntos de situaciones o contextos cada vez más amplios sin que la complejidad de la arquitectura de control sea tan compleja que la haga inviable? Esta cuestión ha sido abordada desde la estrategia de dotar al robot de una arquitectura cognitiva más ágil y flexible, capaz de adaptar los recursos a la evolución de la propia sesión de forma dinámica (*task-oriented*). Este apartado presentará nuestra propuesta ante este desafío en forma de una nueva arquitectura cognitiva que denominamos RoboCog y que se está implementada sobre un nuevo robot asistente para terapias de rehabilitación con niños llamado THERAPIST.

Para mejorar el grado de autonomía en todos los niveles de actuación del robot, la arquitectura interna de Ursus debía ser redefinida en sus distintos niveles de abstracción. Así, en el nivel más alto, la sesión terapéutica era codificada en Ursus usando una máquina de estados, no existiendo forma de replanificar o aprender nuevas posibilidades de actuación. Esto obligaba a Ursus a trabajar bajo una fuerte supervisión humana, ya que, en este escenario, la aparición de situaciones nuevas es continua. Además, no existe una forma fácil de aprender de estas situaciones. Por otro lado, a niveles medios de abstracción, en el que se definen comportamientos de percepción o actuación, las habilidades sociales de Ursus solo contaban con mensajes de voz o movimientos de brazos, todo ello además resultado de la supervisión directa por parte de los técnicos. Esto podría provocar la aparición de cierto nivel de decepción inherente a la personificación del robot por parte de los pacientes y, también, de los propios cuidadores (Feil-Seifer and Mataric, 2011). La nueva arquitectura, que pretende solventar estos problemas se aleja de la estructura clásica de tres niveles (Gat et al., 1998), construyéndose entorno a un módulo que engloba la representación simbólica y geométrica del robot mismo y de su entorno, denominado 'Modelo interno' tal y como se muestra en la Figura 2. El objetivo es que THERAPIST pueda llegar a establecer una relación suficientemente estrecha con el paciente, como para que le permita mantener una sesión terapéutica de veinte minutos dirigida hacia los hitos marcados por el profesional médico. El objetivo es el desarrollo de un auténtico robot social asistente (Feil-Seifer and Mataric, 2011).

En la Figura 2 se aprecian que los módulos de la arquitectura se reparten en tres zonas distintas. La zona superior identifica componentes de bajo nivel, encargadas de llevar a cabo determinadas acciones (mover la plataforma o mover un brazo, por ejemplo). En la inferior los componentes son perceptivos. Entre éstos destaca el denominado WinKinectComp (Figura 2), un componente que extrae del sensor Kinect de Microsoft información sobre presencia de personas, postura o la malla 3D de la cara, así como una transcripción desde el ASR (*Automatic Speech Recognition*) que ésta implementa. La zona central recoge, por tanto, los principales componentes de la arquitectura. El estado del sistema se almacena en el 'Modelo interno', una representación jerárquica de la realidad que combina aspectos geométricos y simbólicos. Esta representación incluye tanto al

<sup>6</sup><http://www.nabaztag.com/es/index.html>

<sup>7</sup><http://www.research.philips.com/technologies/projects/robotics/index.html>

<sup>8</sup><http://www.florence-project.eu/>

<sup>9</sup><http://ksera.ieis.tue.nl/>

<sup>10</sup><http://www.acrosspse.com/across/servlet/Portada>



Figura 1: El robot Ursus en una sesión de neurorehabilitación en el Hospital Universitario Virgen del Rocío de Sevilla. El robot exhibe un comportamiento muy supervisado tanto a alto nivel, la terapia se organiza como una rígida secuencia de estados, en la que cualquier evento no tenido en cuenta obliga al técnico a decidir manualmente el estado en la misma, como a medio o bajo nivel, por ejemplo a la hora de construir las frases de refuerzo o decidir cuando emplearlas, pero también para decidir cuando aumentar el ritmo de las repeticiones, o su amplitud. Esto justifica la presencia de dos técnicos en la sesión (sentados junto a Ursus).

paciente y su entorno como al propio robot, y puede verse como una representación tridimensional geométrica de todo el escenario. En esta representación, los elementos se abstraen usando modelos, codificados como árboles cinemáticos. Los nodos de estos árboles pueden albergar atributos simbólicos. Estos atributos se recogen en un grafo AGM (*Active Grammar-based Modeling*)<sup>11</sup> en la Figura 2. La acción en curso en el momento actual la gestiona el 'Ejecutivo'. La identificación de estado con acción convierte a este componente en clave en la arquitectura, convirtiéndose también en la 'llave' que da acceso al conocimiento sobre el mundo. Alrededor de estos módulos se distribuyen las denominadas compoNets, conjuntos de componentes que llevan a cabo determinadas tareas.

La arquitectura se ha diseñado como un sistema distribuido en el que los módulos se implementan como componentes software, empleándose RoboComp (Manso et al., 2010) como entorno de trabajo. RoboComp es un entorno de trabajo multi-plataforma, que proporciona un diseño orientado a componentes, herramientas gráficas para la monitorización y despliegue de componentes, lenguaje de descripción adaptado al trabajo con robots, servicios de comunicación entre componentes que permite trabajar con distintos middlewares y un simulador de robots tridimensional propio. Además, RoboComp es uno de los pocos entornos de trabajo para robótica que también proporciona el conjunto de herramientas de edición necesarias para cubrir el ciclo de vida en el desarrollo de componentes (Romero-Garcés et al., 2011). A continuación se ofrecen detalles de los distintos elementos que aparecen en la zona central de la Figura 2. Las pruebas de verificación de estos elementos se proporcionan en el apartado 4.

### 3.1. Modelo interno para predecir, evaluar y seleccionar

Para conseguir implicar al paciente en una interacción socialmente aceptada, THERAPIST debe generar respuestas a una

velocidad similar a la de las personas, así como exhibir un comportamiento pro-activo (Fong et al., 2003). Esta pro-actividad obliga que la arquitectura interna de THERAPIST no solo sea capaz de percibir y actuar, sino que también debe ser capaz de evaluar la situación de manera *off-line*. La capacidad que permite a las personas tratar internamente con la información del entorno es denominada conocimiento y, por tanto, esta capacidad está sujeta a la existencia de una representación interna de la información. Aunque los modelos internos y las representaciones del estado del mundo externo fueron tradicionalmente rechazadas por los paradigmas reactivos (Brooks, 1991), con el tiempo se ha impuesto la idea de que las arquitecturas de control en robótica deben tener un carácter híbrido, de tal forma que los elementos deliberativos coexisten con los reactivos, siendo su interacción el aspecto más conflictivo del diseño. Como se comentó anteriormente, el modelo interno en THERAPIST se estructura en dos niveles: uno geométrico, organizado como un árbol cinemático, y otro simbólico, estructurado como un grafo.

En el esquema de la Figura 2 se aprecia que el 'Modelo Interno' se ubica dentro del 'Ejecutivo'. Con esto se quiere transmitir que todas las comunicaciones que se lleven a cabo con este modelo pasan necesariamente por el 'Ejecutivo', que se convierte así en la interfaz de dicho modelo. El 'Ejecutivo' recibe las Acciones del Plan y se encarga de activar los módulos encargados de llevarlas a cabo. Es, por tanto, el lugar donde se realiza la transformación de Acciones de alto nivel a Comportamientos de bajo nivel. La transformación no implica una relación 1-a-1, sino que es más ágil, implicando el trabajo de una o varias redes de módulos de medio o bajo nivel. Son las mencionadas compoNets de la Figura 2. La razón de no permitir que todas las compoNets puedan acceder directamente al conocimiento radica inicialmente en la necesidad de evitar problemas de sincronización o falsas lecturas, pero también en que, de esta forma, el 'Ejecutivo' puede filtrar qué información se almacena en el 'Modelo interno'. A nivel geométrico, por ejemplo, esto

<sup>11</sup><http://ljmanso.com/agm/>

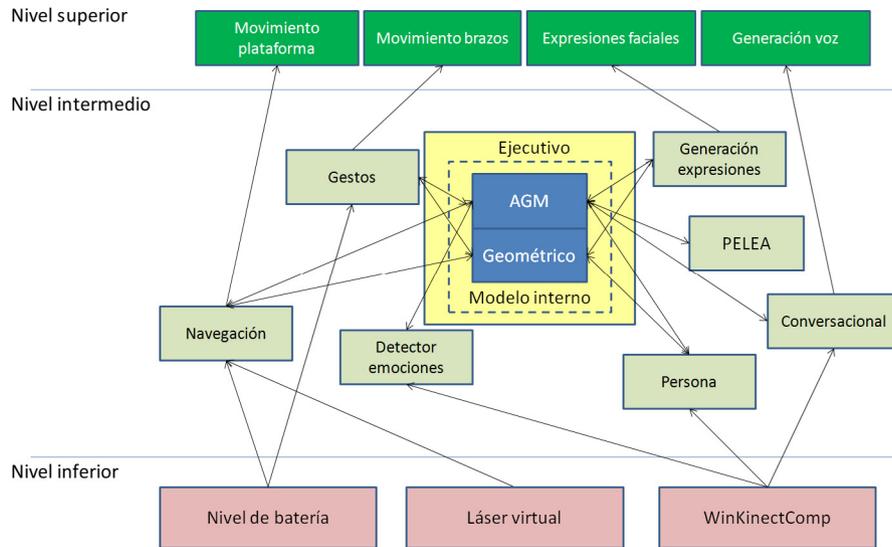


Figura 2: Representación esquemática de la nueva arquitectura cognitiva de THERAPIST. En el esquema se aprecian tres niveles: los niveles inferior y superior agrupan, respectivamente, componentes perceptivos o de actuación, íntimamente ligados a sensores o motores. En el nivel intermedio se representan los componentes principales de la arquitectura, organizados en torno a la representación interna del estado ('Modelo interno') y a su gestor, el 'Ejecutivo', que no solo supervisa la evolución de este estado sino también la correcta ejecución de la tarea (*Acción*) en curso. La funcionalidad la proporcionan redes de componentes (*compoNets*), encargados de la correcta ejecución de los *Comportamientos* asociadas a cada acción del plan. Estas compoNets se enlazan a la representación interna de conocimiento a través del propio 'Ejecutivo' y a los componentes de percepción y actuación.

permite incluir mecanismos que eviten localizaciones o posturas imposibles en el paciente.

La necesidad de representaciones de algún tipo que almacenen el estado del mundo y permitan usar ese estado en la toma ulterior de decisiones, es comúnmente aceptada. Algo menos habitual es que estas representaciones se usen esencialmente para predecir el futuro. Este futuro puede ser la trayectoria inmediata que seguirá una manzana al caer o el curso de una secuencia de acciones hipotéticas realizadas por el mismo robot. Estas predicciones sobre el robot y sobre el estado del entorno exterior pueden ser usadas para dirigir de forma activa los recursos a la información relevante de forma *top-down*, permitiendo que la interpretación de este entorno sea eficiente y acertada (Clark, 1999; Holland, 2004). Si no se cuenta con esta capacidad para predecir, las respuestas del robot no podrán ser generadas a la velocidad requerida y con la destreza necesaria para que las personas mantengan una adherencia suficientemente fuerte, produciendo al final la decepción de pacientes y cuidadores (Feil-Seifer and Mataric, 2011).

Se puede asegurar que la arquitectura propuesta constituye un buen ejemplo de la situación postulada por Holland (Holland, 2004): *en el corazón de la arquitectura no es solo el cuerpo en el entorno, sino un modelo del cuerpo en un modelo del entorno*. Este esquema permite predecir la evolución del modelo, lo que podrá ser correlado con la información percibida del mundo real para dirigir la atención del robot, incrementando la eficiencia y filtrando percepciones ruidosas, mientras el contenido del modelo mental es también actualizado por la propia experiencia.

### 3.2. El módulo 'Ejecutivo'

El elemento central de la arquitectura, junto al 'Modelo interno', es el 'Ejecutivo'. Básicamente, este módulo constituye una interfaz entre el alto y el bajo nivel de la arquitectura, encargándose de la transformación de las Acciones del plan en Comportamientos o tareas concretas. El funcionamiento del 'Ejecutivo' se puede resumir en el siguiente algoritmo:

1. Pide la primera acción  $A$  del plan al planificador a nivel de tarea (en este caso, PELEA (*Planning, Execution and Learning Architecture*) (Alcázar et al., 2010))
2. Obtiene las compoNets  $\{C\}$  que resuelven  $A$ , así como los parámetros  $\{\lambda\}$  para cada  $c \in \{C\}$  dado  $A$ . Activa estas compoNets y les pide resolver un determinado comportamiento
3. Se suscribe a los datos que los compoNets generen para, con ellos, actualizar el 'Modelo interno'. Esta actualización no es inmediata, y el 'Ejecutivo' comprueba determinadas reglas antes de dar por válida una actualización
4. Pide nuevas acciones a PELEA hasta que esta informa de que el objetivo señalado ha sido alcanzado

Este algoritmo precisa la especificación del conjunto de compoNets a activar para cada acción del plan, y de los parámetros (o comportamientos) que condicionan la actuación de estas compoNets. Por ejemplo, la compoNet Conversacional incluye, en nuestro caso, toda la funcionalidad relacionada con la comunicación verbal. Puede ser activada para conversar o, simplemente, para decir una frase. También es necesario especificar cuando el 'Ejecutivo' debe pedir al planificador una nueva acción, esto es, cuando una acción lanzada ha terminado. Esto no implica que la acción haya sido correctamente realizada. PELEA

chequeará posteriormente, a través de los atributos o predicados simbólicos del modelo el éxito o fracaso en la ejecución de la acción y tomará las decisiones de alto nivel adecuadas. El esquema de funcionamiento del 'Ejecutivo' se complementa con la descripción de la integración de PELEA en RoboCog que se analizará en el siguiente apartado.

### 3.3. Planificación, monitorización y aprendizaje de alto nivel

Este módulo es responsable de la aplicación de técnicas de planificación automática que, junto a algoritmos de aprendizaje artificial, permiten el trabajo a alto nivel de THERAPIST. Partiendo de la arquitectura interna de PELEA, este módulo se estructura en un conjunto de componentes cuya finalidad es monitorizar el correcto desarrollo de la sesión terapéutica. Este módulo de planificación se comunica con el resto de la arquitectura a través del 'Ejecutivo' y del 'Modelo interno'. Con el primero de estos módulos, la comunicación consiste en el envío de peticiones o Acciones (unidades en las que se estructura el Plan) cuya finalización será, a su vez, certificada al módulo de planificación por el 'Ejecutivo'. Las condiciones de finalización no tienen por qué coincidir con las de consecución exitosa de la Acción pero, en cualquier caso, el cambio de Acción será solicitado siempre por el 'Ejecutivo'. Eso sí, para determinar el curso de la acción, el planificador chequea siempre el grafo AGM que modela el mundo.

La Figura 3 muestra el esquema interno de la compoNet PELEA. La descripción de cada componente se puede enlazar con la del flujo de control general de funcionamiento, que será el siguiente:

1. Inicialmente, el componente 'Ejecutivo' comunica a PELEA las metas a alcanzar (*Objetivo H* en la Figura 3). Esta comunicación se realiza a través de la interfaz que ofrece PELEA. La invocación de este método genera la siguiente secuencia de pasos:
  - PELEA lee la información del estado (*Estado L*) del nivel simbólico del 'Modelo interno'. Esto es, PELEA no recibe la información directamente de los sensores sino de una forma más elaborada.
  - Opcionalmente PELEA envía la información del estado recibida al módulo 'LowToHigh' para realizar alguna transformación si fuera necesario.
  - PELEA utiliza la información del estado devuelta por el módulo 'LowToHigh' y las metas a alcanzar para componer el problema. Mediante los módulos 'Toma de decisiones' y 'Planificador de alto nivel' se genera un plan. PELEA devuelve la primera acción de este plan al 'Ejecutivo'.
2. De esta forma se comienza el bucle de ejecución:
  - El 'Ejecutivo' ejecuta la acción recibida de PELEA. Una vez finalizada, solicita una nueva acción a PELEA. Esta petición genera la siguiente secuencia de pasos:
    - PELEA lee nuevamente la información del estado.

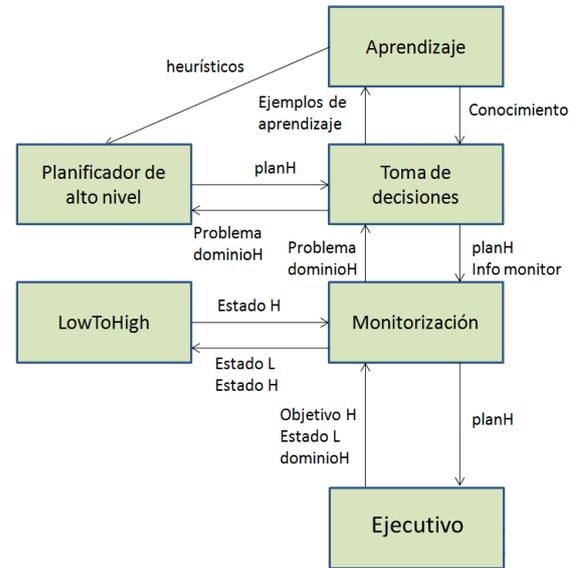


Figura 3: Estructura interna de PELEA en RoboCog

- PELEA envía esta información de estado al componente 'LowToHigh' que realiza las transformaciones necesarias. Si se comprueba que se han alcanzado las metas se finaliza.
- Si no se han alcanzado las metas y se comprueba que el estado recibido del componente 'LowToHigh' es un estado válido, es decir, la acción previa ha tenido los efectos deseados sobre el entorno (por ejemplo, se pidió mover el robot y ahora éste está en la posición esperada) se devuelve al 'Ejecutivo' la siguiente acción del plan.
- Si el estado percibido del entorno es un estado inválido (la acción previa no ha producido los efectos deseados sobre el entorno) PELEA replanifica. Para ello, utiliza la información del estado recibida del módulo 'LowToHigh' y las metas a alcanzar para construir un nuevo problema. Se obtiene el plan correspondiente a este nuevo problema, y se devuelve la primera acción del mismo. Se vuelve al paso 2.

Durante este proceso, el módulo de 'Aprendizaje' puede ser empleado para aprender conocimiento adicional que posteriormente pueda ser utilizado para guiar o mejorar el proceso de planificación (por ejemplo, almacenar planes concluidos con éxito).

De esta forma, PELEA gestiona una definición de alto nivel de la terapia, en la que se describen sus diferentes fases, ejercicios y metas. A continuación se describe un ejemplo de caso de uso (ver Figura 4). Inicialmente el robot está esperando en la entrada de la sala de rehabilitación, preparado para recibir a los pacientes. Cuando el paciente entra en la sala, el robot le detecta, le identifica y carga los datos de su perfil personal.

Después le da la bienvenida adecuada, preguntando al paciente cómo se encuentra y le recuerda algunos hechos relevantes si procede (como su cumpleaños). Tras esto, el robot lleva al paciente al puesto donde deberá realizar los ejercicios. Una vez que el paciente está preparado en su puesto, el robot se dirige al área donde realizará la demostración de los ejercicios. Cuando llegue, comunica al paciente que va a mostrarle los vídeos con los ejercicios de la sesión y se los muestra en la pantalla. Terminada la reproducción de los vídeos, el robot le dice al paciente que se prepare para empezar a ejercitarse. El robot inicia el videojuego de realidad aumentada, mostrando en la pantalla la imagen del paciente capturada en tiempo real con elementos virtuales superpuestos (Calderita et al., 2013b). A continuación el robot realiza los ejercicios para que el paciente lo imite. El robot comprueba que el paciente está realizando correctamente los ejercicios, capturando las variables del proceso terapéutico y comparándolas con las variables esperadas. En caso de que no lo haga bien, le animará, le sugerirá cómo debe corregirlo y se continuará con el ejercicio.

Cuando el ejercicio se dé por terminado, el robot felicitará al paciente y le presentará el siguiente ejercicio del grupo. Una vez que se hayan realizado todos los ejercicios del grupo, el robot dará por terminado el entrenamiento y presentará al paciente los juegos correspondientes a la fase 3 con los que practicará los movimientos que acaba de entrenar durante la fase anterior. El paciente jugará con los juegos hasta que se termine la sesión de entrenamiento programada, obteniendo puntuaciones dependiendo de lo bien que lo haga. Finalmente el robot almacena todos los datos referentes a los juegos interactivos en el perfil del paciente y se despide de él.

### 3.4. CompoNets

Una de las principales novedades de la arquitectura propuesta es que los comportamientos responsables de resolver las tareas a medio o bajo nivel se organizan como redes autónomas, en las que se dispone de un módulo principal, denominado *agente*, que será el conectado con el 'Ejecutivo', usando para ello una interfaz de publicación/subscription genérica. El esquema permite distribuir el control, ya que cada compoNet trabaja sobre sensores y actuadores para resolver una determinada tarea sin necesidad de recurrir al resto de módulos de la arquitectura. El agente de la compoNet asume el rol de 'Ejecutivo' en la red, y se encarga de gestionar al resto de componentes.

Los canales de comunicación entre el 'Ejecutivo' y cada compoNet serán las órdenes de activación/desactivación emitidas por el primero, en las que se especifica en cierta forma, en los parámetros empleados (ver apartado 3.2), la tarea a realizar, y el resultado de la tarea, publicado por el compoNet y al que debe subscribirse el 'Ejecutivo'. Ambos canales requieren poco control por parte de las dos partes. Concretamente, las compoNets contempladas en la versión actual de RoboCog incluyen una de detección y seguimiento de persona, una orientada a la comunicación verbal, incluida la capacidad de dialogar, una de movimiento y expresión corporal y una de navegación. A continuación se proporcionan algunos detalles sobre ellas:

- *Navegación*. La compoNet de Navegación consta de un agente, encargado de la comunicación con el 'Ejecutivo', de un componente que implementa un navegador reactivo local y un componente que, tomando medidas de los sensores sobre el robot, genera un formato de medida tipo láser. El objetivo final es usar los dispositivos disponibles a bordo del robot abaratando su coste total, evitando el uso de un láser convencional para navegar.
- *Gestos*. Encargado del movimiento de los brazos del robot, la compoNet funciona ejecutando sesiones establecidas de movimientos. El ritmo y la amplitud del movimiento se pueden controlar desde el 'Ejecutivo'. En su versión actual el robot puede ejecutar algunos movimientos predefinidos asociados a una determinada acción verbal, como por ejemplo, saludar o despedirse.
- *Detección emociones*. Esta compoNet detecta el estado emocional del paciente usando información facial. Su funcionamiento se basa en emplear información proporcionada por el WinKinectComp (Figura 2) sobre la malla 3D de la cara y la posición de la cabeza. De esta información se extraen un conjunto de invariantes que serán clasificados, para obtener la estimación de emoción, usando una red Bayesiana dinámica de dos niveles.
- *Generación expresiones*. El robot THERAPIST es capaz de generar expresiones faciales, con los cuales acompañar la conversación y aumentar la empatía con el paciente (por ejemplo, mostrando alegría cuando, tras ser felicitado, el paciente la muestra). El esquema para generar estas expresiones, o para sincronizar la voz con el movimiento de los labios se basa en trabajos previos (Cid et al., 2012).
- *Conversacional*. La compoNet consta de componentes encargados de la síntesis de voz y de la gestión de la conversación. En lo que respecta al reconocimiento de voz, esta información será proporcionada por el WinKinectComp (Figura 2). La síntesis de voz se obtiene usando el sistema Verbio TTS (*Text to Speech*)<sup>12</sup>. Por su parte, la gestión de la conversación se lanzará siempre con un objetivo específico (por ejemplo, saludar al paciente, animarlo o felicitarlo). Para ello, la conversación se modela como un diagrama de estados simple, donde cada estado representa el conocimiento que el robot tiene en un determinado punto de la conversación. Los estados, a su vez, se enlazan mediante transiciones que muestran como el estado actual puede evolucionar de acuerdo a la entrada recibida del paciente. Estos estados serán también empleados para definir qué frases generar, esto es, qué decir al paciente. La Figura 5 muestra un ejemplo de modelo de conversación (saludo y pedir al paciente que ocupe su lugar en la sala).
- *Persona*. La compoNet Persona se compone de dos componentes. El componente PersonPerception toma los da-

<sup>12</sup><http://www.verbio.com>

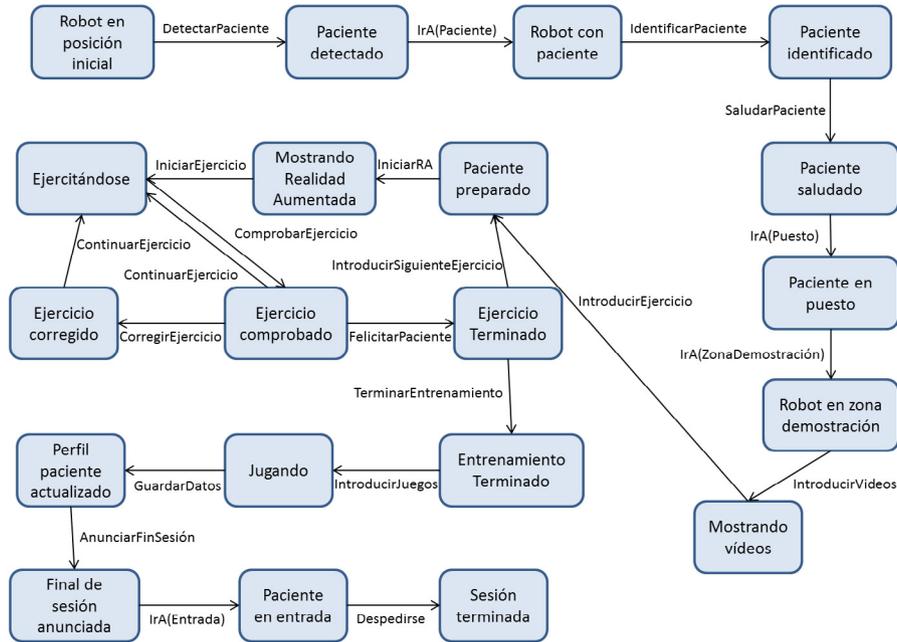


Figura 4: Ejemplo de caso de uso (ver texto)

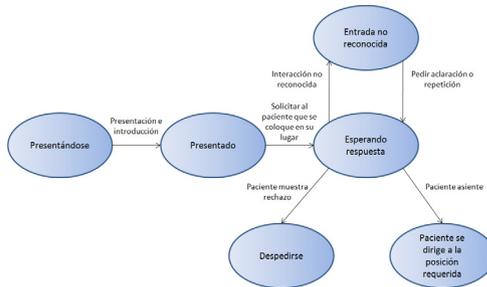


Figura 5: Ejemplo de modelo de conversación

tos del WinKinectComp (Figura 2) e implementa un sensor virtual detector de personas capaz de seguir el movimiento del cuerpo y la cara. El agente recibe los datos de este sensor virtual y gestiona la comunicación con el 'Ejecutivo'. En el esquema general del trabajo en rehabilitación, esta compoNet resulta especialmente importante pues es la encargada de monitorizar cómo realiza el paciente los ejercicios. Así, estos datos se almacenan para que el profesional médico pueda evaluarlos posteriormente y tomar decisiones sobre la siguiente sesión. La gestión de esta información se hace a través de una herramienta especialmente diseñada.

## 4. Escenario y pruebas de evaluación

### 4.1. Pruebas de verificación de módulos del sistema

Los distintos módulos de la arquitectura han sido verificados individualmente antes de su integración. En este apartado se recogen las pruebas de verificación que se consideran más significativas.

#### *PELEA y el aprendizaje a alto nivel*

Para verificar el comportamiento de PELEA aisladamente se empleó el entorno MDPSim (*Markov Decision Processes Simulator*)<sup>13</sup>, en el que se eliminan el resto de componentes involucrados en la arquitectura con los que PELEA se comunica, puesto que dicho entorno es capaz de recibir las acciones de PELEA y simular su ejecución en el mundo. Para la validación del proceso de aprendizaje utilizando el entorno MDPSim se han establecido probabilidades para los diferentes sucesos que podrían ocurrir en el mundo real. De esta forma, no solamente se pretendía aprender una política de comportamiento a partir de la experiencia generada por el planificador y MDPSim, sino validar que el sistema de planificación de alto nivel era capaz de replanificar de forma adecuada cuando se dan todas estas situaciones.

Con respecto a lo primero, la Figura 6 muestra el tiempo medio de respuesta de PELEA con aprendizaje y de PELEA sin aprendizaje ante situaciones que requieren replanificación. Se ha considerado un proceso de planificación en el que el robot parte de la posición de inicio y ejecuta todo el caso de uso (Figura 4). Cuando lo consigue, se da por finalizado el proceso de

<sup>13</sup><http://www.tempastic.org/mdpsim/>

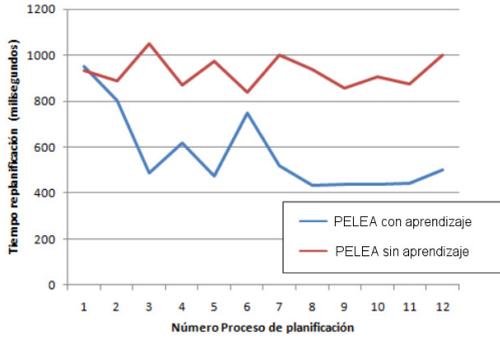


Figura 6: Resultados de tiempos de planificación de alto nivel con o sin aprendizaje

planificación y se comienza uno nuevo. Así, la Figura 6 muestra doce de estos procesos. Durante cada uno de estos procesos de planificación, si ocurre una situación en la que el estado percibido no es el estado esperado:

- PELEA sin aprendizaje invoca al planificador para obtener un nuevo plan (replanifica).
- PELEA con aprendizaje busca en la base de casos para recuperar la acción correspondiente a esta situación. En el caso de no encontrar un caso lo suficientemente similar, invoca al planificador para que le diga cómo actuar.

Por otro lado, el tiempo de respuesta se mide desde que PELEA recibe el estado de MDPSim hasta que ésta le envía la acción a ejecutar para dicho estado.

#### Detección de la persona

La detección correcta de la postura de la persona y sus extremidades es muy importante, no sólo en su implicación en la interacción persona-robot (comunicación no-verbal), sino también en la parte relativa a la monitorización de la tarea de rehabilitación. Para conseguir datos fiables en las posiciones de las articulaciones se ha desarrollado un método que, usando el modelo cinemático de la persona, refina los datos obtenidos por un sistema HMC (*Human Motion Capture*) como el ubicado en el WinKinectComp (Figura 2). La visión general de dicho sistema se muestra en la Figura 7. Básicamente, la idea radica en garantizar la validez de las posiciones obtenidas. Este sistema está alojado en el núcleo del compoNet Persona.

El sistema trabaja en dos pasos. En el primero recoge los centroides 3D de las diferentes partes del cuerpo usando un algoritmo de HMC. En el segundo paso, el sistema utiliza un filtro basado en el modelo del cuerpo de la persona para estimar las poses válidas a partir de los datos intermedios. Estos datos de entrada también se utilizan para adaptar, de forma on-line, el modelo utilizado a las características propias del paciente que está siendo monitorizado. Ambos procedimientos (comprobación de postura correcta y adaptación) se ejecutan de hecho en paralelo, consiguiendo no reducir la velocidad del método HMC original.

Como ejemplo, los resultados de la tabla 1 muestran como el método propuesto mejora los resultados proporcionados por

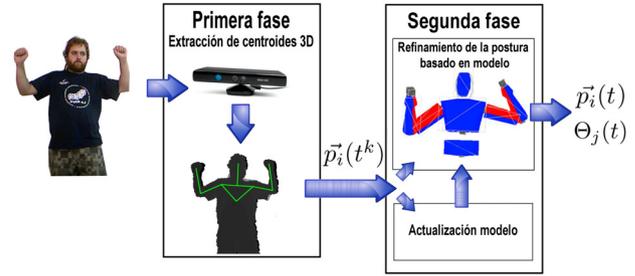


Figura 7: Visión general del método usado para detección de movimiento (Calderita et al., 2013a).

Tabla 1: Errores medios (ME) y desviaciones estándar (SD) de posiciones en brazo derecho, en centímetros (Calderita et al., 2013a).

	Mano		Codo		Hombro	
	ME	SD	ME	SD	ME	SD
OpenNI HMC	11.3	5.3	6.7	2.7	2.4	1.0
Método propuesto	11.7	5.0	4.9	1.7	2.5	1.0

el algoritmo HMC (en este caso basado en OpenNi<sup>14</sup>). La diferencia en la magnitud del error radica fundamentalmente en los valores asociados al codo. Para esta articulación, el algoritmo HMC no comprueba la longitud de la extremidad ni la coherencia de la posición obtenida. Así, la posición del codo oscila alrededor de la posición real, incrementándose el error cuando el brazo es flexionado. Sin embargo, el método propuesto evita esta situación adaptando su modelo a la anatomía de la persona y restringiendo los resultados a posiciones cinemáticamente coherentes.

#### Detección de emociones

En el marco de la interacción persona-robot la detección de emociones juega un papel crucial a la hora de conseguir aumentar la empatía del robot con la persona. La compoNet Emotions cuenta con la capacidad de detectar el estado de ánimo del paciente. Obviamente, del vasto conjunto de emociones humanas es capaz de reconocer un conjunto mínimo de emociones básicas: *neutro, tristeza, miedo, enfado, felicidad*. Además, los valores no tienen porqué ser totalmente fiables, por lo que salida será un vector cuyos valores tienen la forma de dupla (emoción, probabilidad). En concreto, el enfoque propuesto logra una extracción de características faciales robusta y en tiempo real, mediante la aplicación consecutiva de filtros a la imagen RGBD. El algoritmo base está descrito en (Cid et al., 2013), pero ha sido reforzado, añadiendo la malla facial tridimensional al conjunto de datos de entrada para procesar las deformaciones de la cara asociadas a cada expresión facial utilizando el sistema FACS (*Facial Action Coding System*)(Cid et al., 2014). Observamos el conjunto de emociones básicas en la Figura 8.

#### Expresividad

Además de detectar la emoción, el robot deberá ser capaz de expresarlas. Así, la expresividad es uno de los comportamientos empáticos por excelencia. La intención de nuestro mensaje

<sup>14</sup><http://www.openni.org/>



Figura 8: Conjunto de emociones básicas reconocibles.

suele ir acompañada con gestos conversacionales que lo refuerzan. Nuestra expresividad facial e incluso el tono de voz pueden significar más que el propio mensaje. En el robot THERAPIST, esta expresividad se consigue mediante motorización de la cara y gestos con los brazos. Por otra parte, esta motorización de la cara permite a THERAPIST sincronizar la voz con el movimiento labial. Para ello se ha empleado un algoritmo que estima la apertura adecuada de la boca, basándose en la entropía del flujo de audio sintético proporcionado por el sistema TTS seleccionado (Cid et al., 2012).

De esta forma, combinando las entradas del detector de emociones y el conversacional, el robot produce expresiones adaptadas al contexto, unas veces imitando la expresión reconocida y produciendo una frase acorde, otras creando un gesto facial distinto (Cid et al., 2013).

#### 4.2. Pruebas de validación cualitativa con niños

Las pruebas de validación del sistema completo contemplaban sesiones individuales realizadas en el Hospital Universitario Virgen del Rocío. El experimento tenía tres objetivos: validar elementos estéticos y funcionales de la plataforma robótica, analizar la respuesta de un grupo seleccionado de pacientes a los ejercicios diseñados por los especialistas, flexión y extensión de hombro, y validar los datos de las sesiones registrados por el robot que deben servir para análisis posteriores, mediante técnicas de balance articular, por parte de los facultativos. La sesión experimental contó con un grupo de 6 pacientes de edades comprendidas entre 5 y 9 años con parálisis braquial obstétrica leve. Cada sesión tuvo una duración de sesenta minutos y fueron grabadas parcialmente en vídeo, al mismo tiempo, que el robot registraba los datos relativos a las posiciones de las articulaciones. Los profesionales médicos contaron con una herramienta de monitorización específicamente diseñada para analizar los datos registrados de cada ejercicio sobre un avatar 3D que incluye la visualización de los valores angulares de cada articulación. Junto a las variables clínicas, la metodología de validación de un sistema de rehabilitación motora basado en un robot social debe tener en cuenta variables relacionadas con la interacción persona-robot. En una reunión posterior conjunta, a la que asistieron los padres, se analizaron aspectos del robot y sus movimientos, autonomía, calidad de voz y del videojuego de realidad aumentada, empatía y grado de satisfacción de la interacción persona-robot. Estas métricas deben evaluar el nivel de aceptación y la capacidad de captar la atención o, mejor dicho, de conseguir que el paciente se interese en interactuar con él. Esta cuestión se ha analizado mediante cuestionarios

pasados, antes y después de la sesión experimental, tanto a pacientes y padres como a los profesionales médicos y técnicos que supervisaron dichas sesiones. A modo de resumen, los resultados obtenidos de estos cuestionarios afirman que el aspecto físico del robot era bastante satisfactorio, que la nueva terapia de rehabilitación resultaba más divertida y atractiva que las sesiones tradicionales, y que el trabajo era muy bien valorado por los profesionales médicos, que consideran al robot como una excelente herramienta para mejorar la adherencia al tratamiento de rehabilitación de estos pacientes de pediatría.

Como aspecto a resolver, la duración de las sesiones ha obligado, posteriormente, a modificar la estructura hardware del robot. Así, en su versión anterior, los motores de los brazos se calentaban en exceso, lo que podría estropearlos si la sesión se prolongaba en exceso. Ahora, el robot cuenta con unos brazos más potentes, precisos y robustos, suficientes para un uso intensivo en entornos reales de rehabilitación.

## 5. Conclusiones y trabajo futuro

Los robots sociales asistentes surgen como un nuevo campo de la robótica cuyo fin es el desarrollo de sistemas que asistan a los pacientes a través de una interacción más social que física. Dependiendo del grado de autonomía del robot, la ayuda proporcionada al profesional médico puede necesitar más o menos supervisión. Los robots teleoperados, que tienen su ámbito de trabajo en pacientes que están en su propio domicilio, pueden resultar muy poco prácticos en un entorno hospitalario, donde el esfuerzo necesario para controlar al robot podría emplearse en dirigir directamente las sesiones. En esa transición hacia un robot más autónomo, este artículo ha descrito los trabajos que, en esta área de investigación, ha llevado a cabo nuestro grupo. Es un trabajo que se prolonga ya durante años, y que tuvo un primer hito importante en el desarrollo de URSUS. Las pruebas y resultados obtenidos se documentan parcialmente en este artículo, y constituyen en parte la base del diseño de RoboCog, una arquitectura cognitiva novedosa, cuyas características cumplen con los requisitos que demanda el robot social propuesto como asistente en escenarios de rehabilitación, y que permite dotar al robot THERAPIST de un grado de autonomía que no tenían las versiones previas de URSUS.

Por otra parte, este artículo deja abiertas muchas líneas de trabajo que deberán ser abordadas en los próximos años. Así, será fundamental realizar nuevas pruebas en el Hospital Universitario Virgen del Rocío, pero antes se deberán definir las métricas que permitan evaluar correctamente tanto el grado de éxito de la nueva terapia de rehabilitación como el grado de interacción con el paciente a alcanzar por THERAPIST. Adicionalmente, si la rehabilitación motriz se quiere extender al área cognitiva y de esta forma extender el uso del asistente robótico para pacientes infantiles con otras patologías, como por ejemplo la parálisis cerebral, se deberán incorporar a la terapia ejercicios cognitivos. En este sentido, en el ámbito de la interacción persona-robot ya se han definido modelos multidimensionales que asocian los parámetros de la interacción con los efectos derivados de la misma, estableciendo ciertas métricas de medida

(por ejemplo, PRCIS, *Person-Robot Complex Interactive Scale*) (Libin and Libin, 2004).

## English Summary

### Socially Interactive Robot for Motor Rehabilitation Therapies with Paediatric Patients

#### Abstract

Motor rehabilitation therapy pursues the recovery of damaged areas from the repetitive practice of certain motor activities. The patient's recovery directly depends on the adherence to rehabilitation therapy. Conventional methods consisting of repetitions usually make the patient feel unmotivated and neglect complying with the appropriate treatments. In addition, the treatment of these motor deficits requires intensive and extended rehabilitation sessions that demand sustained dedication and effort by professionals and incur in accretive costs for the institutions. Within this framework, this paper describes the development and evaluation of a new neurorehabilitation therapy, whose core is a socially interactive robot. This robot is able to consistently engaged patients in the therapeutic interaction, providing tireless motivation, encouragement and guidance. The experience has also been the origin of the design and implementation of a novel control architecture, *RoboCog*, which has provided the robot perceptual and cognitive capabilities that allow a behavior more socially developed, proactive. Verification tests carried out on the various components of the architecture show us the proper working of these and its integration with the rest of the architecture. Furthermore, this therapy has been successfully with congenital brachial palsy (PBO), a disease caused by damage acquired at birth and affects motor mobility of the upper limbs, but not their intellectual and communicative abilities.

#### Keywords:

Rehabilitation therapies, Socially assistant robotics, Human-Robot Interaction.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y fondos FEDER bajo el proyecto coordinado TIN2012-38079, en el que participan las Universidades de Extremadura, Málaga, Jaén y Carlos III de Madrid, así como el Hospital Universitario Virgen del Rocío de Sevilla.

#### Referencias

Alcázar, V., Guzmán, C., Milla, G., Prior, D., Borrajo, D., Castillo, L., Onaindía, E., 2010. Pelea: Planning, learning and execution architecture. 28th Workshop UK Planning and Scheduling Special Interest Group.

- Brooks, R., 1991. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence* 47, 139–159.
- Calderita, L. V., Bandera, J. P., Bustos, P., Skiadopoulou, A., 2013a. Model-based reinforcement of Kinect depth data for human motion capture applications. *Sensors* 13 (7), 8835–8855.
- Calderita, L. V., Bustos, P., Suárez, C., Fernández, F., Bandera, A., 2013b. Therapist: towards an autonomous socially interactive robot for motor and neurorehabilitation therapies for children. *REHAB2013*.
- Cid, F., Manso, L. J., Calderita, L. V., Sánchez, A., Nuñez, P., 2012. Engaging human-to-robot attention using conversational gestures and lip-synchronization. *Journal of Physical Agents* 6.
- Cid, F., Moreno, J., Bustos, P., Nuñez, P., 2014. Muecas: A multi-sensor robotic head for affective human robot interaction and imitation. *Sensors* 14 (5), 7711–7737.
- Cid, F., Prado, J. A., Bustos, P., Nuñez, P., 2013. A real time and robust facial expression recognition and imitation approach for affective human-robot interaction using gabor filtering.
- Clark, A., 1999. An embodied cognitive science? *Trends in Cognitive Sciences* 3 (9).
- Colombo, R., Pisano, F., Mazzone, A., Delconte, C., Micera, S., Carrozza, N., Dario, P., Minuco, G., 2007. Design strategies to improve patient motivation during robot-aided rehabilitation. *Journal NeuroEng. Rehabilitation* 4 (3).
- Díaz, L., Pínel, A., Gueita, J., 2011. Terapia de movimiento inducido por restricción del lado sano. ¿alternativa en pacientes post-ictus? *Fisioterapia*, 271–277.
- Dobkin, D., 2004. Strategies for stroke rehabilitation. *Lancet. Neurol.* 3, 528–536.
- Eimler, S., Pütten, A., Schächtle, U., Carstens, L., Krämer, N., 2010. Following the white rabbit - a robot rabbit as vocabulary trainer for beginners of english. *Leitner, G. Hitz, M., y Holzinger, A., (Eds.): HCI in Work and Learning, Life and Leisure*, 322–339.
- Feil-Seifer, D., Mataric, M., 2011. Ethical principles for socially assistive robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 18 (1), 24–31.
- Fong, T., Nourbakhsh, I., Dautenhahn, K., 2003. A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems* 42 (3-4), 143–166.
- Gat, E., et al., 1998. On three-layer architectures. *Artificial intelligence and mobile robots*, 195–210.
- Holland, O., 2004. The future of embodied artificial intelligence: Machine consciousness? *Embodied Artificial Intelligence*, 37–53.
- Leocani, L., Comi, G., 2006. Electrophysiological studies of brain plasticity of the motor system. *Neurological Sciences* 27 (1), 27–29.
- Libin, A., Libin, E., 2004. Person-robot interactions from the robotics psychologists' point of view: the robotic psychology and robototherapy approach. *Proceedings of the IEEE* 92 (11), 1789–1803.
- Manso, L., Bachiller, P., Bustos, P., nez, P. N., Cintas, R., Calderita, L., 2010. Robocomp: a tool-based robotics framework. In: *SIMPAR2010*.
- Mataric, M., 2006. Socially assistive robotics. *IEEE Intell. Syst.* 21 (4), 81–83.
- Mejías, C. S., Echevarría, C., P. Nuñez, P. B., Manso, L., Calderita, L. V., Leal, S., Parra, C., 2013. Ursus: a robotic assistant for training of children with motor impairments. *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation Biosystems & Biorobotic* 1, 249–253.
- Okamura, A., Mataric, M., Christensen, H., 2010. Medical and health-care robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 26–37.
- Rego, P., Moreira, P. M., Reis, L. P., 2010. Serious games for rehabilitation: A survey and a classification towards a taxonomy. In: *Information Systems and Technologies (CISTI), 2010 5th Iberian Conference on. IEEE*, pp. 1–6.
- Robins, B., Ferrari, E., Dautenhahn, K., Kronreif, G., Prazak-Aram, B., Gelderblom, G., Bernd, T., Caprino, F., Laudanna, E., Marti, P., 2010. Human-centred design methods: Developing scenarios for robot assisted play informed by user panels and field trials. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 873–898.
- Romero-Garcés, A., Manso, L., Gutiérrez, M., Cintas, R., Bustos, P., 2011. Improving the lifecycle of robotics components using domain-specific languages. In: *DSLRob2011*.
- Saerbeck, M., Schut, T., Bartneck, C., Janse, M., 2010. Expressive robots in education- varying the degree of social supportive behavior of a robotic tutor. *CHI2010 Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems*, 1613–1622.
- Shin, N., Kim, S., 2007. Learning about, from, and with robots: Students' perspectives. *ROMAN2007*, 1040–1045.