

ASIBOT: ROBOT PORTÁTIL DE ASISTENCIA A DISCAPACITADOS. CONCEPTO, ARQUITECTURA DE CONTROL Y EVALUACIÓN CLÍNICA

Alberto Jardón ^{*,1} Antonio Giménez ^{*,1}
Raúl Correal ^{*,1} Santiago Martínez ^{*,1}
Carlos Balaguer ^{*,1}

^{*} *RoboticsLab, Universidad Carlos III de Madrid - España*²

Resumen: Hasta ahora la tecnología usada en los hogares se ha caracterizado por basarse en elementos estáticos, es decir, electrodomésticos tradicionales tales como lavavajillas, lavadoras, hornos, etc. fijos en un determinado lugar del entorno durante todo su periodo de funcionamiento. Recientemente se han añadido los entornos domóticos, que introducen control por computador de determinados servicios, como luces, alarmas, climatización. Es este artículo se presenta el siguiente paso en la introducción de nuevas tecnologías en una vivienda. El concepto fundamental es introducir “electrodomésticos móviles” en las casas, es decir, robots. El robot ASIBOT es un “electrodoméstico” móvil, diferente a los robots móviles tradicionales, que puede moverse a través de conectores situados en cualquier punto de la casa, desarrollando diferentes tareas cotidianas de asistencia a personas discapacitadas, como ayuda a comer, beber, aseo personal, manipulación de objetos, etc. Además, en este artículo se presentan los resultados de los ensayos clínicos efectuados con pacientes reales en la realización de AVDs (Actividades de la Vida Diaria) en el Hospital Nacional de Paraplégicos de Toledo. *Copyright © 2008 CEA.*

Palabras Clave: Robots de asistencia, robótica de rehabilitation, discapacidad, ensayos clínicos

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente la tecnología utilizada en el hogar ha venido en los electrodomésticos de la gama blanca o gris, equipos eléctricos como los lavavajillas, hornos, etc. Más tarde se introdujeron

sensores y actuadores, permitiendo cierta automatización en el hogar para el control de la iluminación, el control de la temperatura, detección de intrusos, alarmas contra el fuego, etc. Pero todos estos elementos tradicionales son estáticos, es decir, están instalados en la casa y permanecen en ella durante la vida de la vivienda sus vidas útiles, realizando siempre la misma tarea. Actualmente se están introduciendo cada vez más equipos en el hogar para hacer más confortable la vida. La inteligencia ambiental, basada en las nuevas tecnologías de la información, permite introducir microprocesadores de bajo coste en los electrodomésticos tradicionales y de línea blanca,

¹ A. Jardón, A. Giménez, R. Correal, S. Martínez y C. Balaguer pertenecen al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Madrid, España. (alberto.jardon, carlos.balaguer, antonio.gimenez, raul.correal, scasa)@uc3m.es

² Este trabajo está financiado por el RoboticsLab - UC3M - España y el IMSERSO (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales) - España

así como en muebles, ropas, paredes, etc. Todos estos microprocesadores pueden comunicarse unos con otros utilizando interfaces inteligentes, que permiten a los habitantes de la casa estar integrados en un entorno inalámbrico de comunicación. Las tecnologías que soportan la Inteligencia Ambiental ofrecen una oportunidad excelente, no sólo para la mejora del entorno doméstico, si se aplican bajo las premisas del "Diseño para todos mejorarán el nivel de vida de sus habitantes e incluso les dotará de mayor independencia (Aarts *et al.*, 2002; Buss and Schmidt, 1999).

Desde sus inicios el diseño de Robots asistenciales (RA) arrastra un problema: que es que los desarrollos actuales presentan un ratio beneficio-coste muy bajo. Esto es debido a un determinado número de factores:

- a) Las tecnologías empleadas en los RA son intrínsecamente caras.
- b) Los productos relacionados con la discapacidad se centran en cubrir nichos de mercado, al plantear soluciones muy específicas llegan a pocos individuos, siendo necesario un diseño a medida o bien una adaptación compleja y cara.
- c) La funcionalidad de los dispositivos existentes no satisface las expectativas ni las necesidades de los usuarios.

Es necesario aumentar este ratio, identificando correctamente las necesidades de los usuarios, considerando desde el diseño la funcionalidad y usabilidad de la solución, para aumentar el beneficio y maximizar el número de personas al que se dirige la ayuda, repartiendo costes. Por ello surgen los sistemas integrales de asistencia, compuestos por soluciones multiagente donde más de un robot doméstico se encuentra integrado con otros dispositivos domésticos que ejecutan determinadas acciones muy específicas (climatización, TV y video, control de iluminación, etc), como un módulo más. El concepto domótico de casa inteligente o "Smart Home" aplicado a personas con discapacidades, incluirá dispositivos para la asistencia de los inquilinos y dispositivos para la continua monitorización y supervisión de su salud. El objetivo es diseñar módulos de asistencia, basados en otros dispositivos más baratos que puedan ser combinados para ser usados por un gran colectivo aunque de distintas formas, para alcanzar la satisfacción de las necesidades individuales.

Este artículo presenta el siguiente paso en la introducción de nuevas tecnologías en el entorno doméstico, de acuerdo con el concepto de "autonomía modular" introducido por P. Dario (Guglielmelli E., 1997). El concepto principal es introducir elementos "inteligentes" y móviles en la casa, es decir, robots. El paso adelante supone

extrapolar este enfoque a otros entornos fuera del hogar, la oficina, el supermercado, etc, de forma que el usuario disponga de las ayudas modulares también fuera de su hogar adaptado.

2. ROBOTS ASISTENCIALES E INTELIGENCIA AMBIENTAL

Las tecnologías que soportan la Inteligencia Ambiental, (Aarts *et al.*, 2002), al estar esencialmente diseñadas para todos, permitirán dotar de una forma barata y efectiva a los robots asistenciales mecanismos que los hagan más fiables, útiles y realmente autónomos en su interacción no sólo con el entorno sino también con el usuario, (Crisman, 1996).

Existen diversas propuestas para el desarrollo de sistemas de asistencia modulares para personas mayores y discapacitadas, en los entornos de trabajo y hogar. Consisten fundamentalmente en integrar bajo una red de comunicaciones domótica, tres tipos de módulos, compartiendo soporte físico y protocolo:

- Dispositivos domóticos estándar, que implementan control de iluminación, ventanas, persianas, puertas, climatización y calefacción, seguridad frente a fuego e intrusión, etc.
- Electrodomésticos de gama blanca y marrón³, dotados de conectividad. Se incluyen en estos sistemas las funcionalidades que permiten la introducción de las TICs⁴ en el hogar (ADSL, banda ancha): sistemas de teleasistencia médica, tele-conferencia, TV a la carta interactiva, etc.
- Ayudas técnicas basadas en RA, como sillas de ruedas autónomas, sistemas de teleasistencia, RA sobre plataforma móvil, etc.

El carácter tan heterogéneo de las habilidades y capacidades, tanto físicas como cognitivas, del conjunto de usuarios, hace necesario implementar sistemas de RA cuya arquitectura pueda atender a las necesidades de todos ellos sin perder eficiencia. Se va a considerar la introducción de inteligencia en los actuales entornos domóticos estáticos, que evolucionan hacia el denominado "hogar inteligente". Este entorno de Inteligencia Ambiental, facilita la inclusión de ayudas técnicas, lo que permite que el RA se integre de forma natural y se aproveche de los servicios que este entorno ofrece. En este contexto, se propone la estructura denominada "**Núcleo Asistencial Portátil**" que permite diversas formas de controlar los sistemas, desde el punto de vista de la iteración con el usuario y el entorno, variando el nivel de autonomía o

³ imagen y sonido

⁴ acrónimo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

asistencia según las necesidades y que permitirá personalizar el sistema robótico asistencial a las necesidades específicas, con un esfuerzo y coste mínimos.

Si bien la introducción de determinados elementos "inteligentes" permite incrementar la funcionalidad de las asistencias robóticas, es preciso identificar de qué forma podrá el sistema en su conjunto cubrir las necesidades de los usuarios sin olvidar que siempre serán precisas ciertas adaptaciones del entorno. Esto, lejos de ser un inconveniente puede ser una ventaja. Por ejemplo, la acción de abrir y cerrar un grifo, que supone un complejo problema de navegación, localización y manipulación en los RA basados en plataforma móvil, puede ser resuelta fácilmente instalando grifos dotados de células fotoeléctricas que controlan la electroválvula de apertura de forma automática.

Todos estos dispositivos se ponen a disposición del usuario para que los use como mejor satisfaga sus necesidades particulares. En este sistema modular, la inclusión de asistentes robóticos se justifica para la realización de tareas asistenciales que precisen manipulación. El usuario realiza la interacción a través de distintos módulos adaptados con HMIs personalizados. La ayuda presente en cada hogar, dependerá del tipo y grado de discapacidad del usuario, pudiendo coexistir varias de estas ayudas, por ejemplo silla de ruedas, manipuladores móviles y ayudas automatizadas para la asistencia a la transferencia del usuario. Cada módulo puede ser fácilmente añadido o desconectado del entorno, de forma transparente al usuario, utilizando el sistema de comunicaciones sin necesidad de reconfigurarlo, de forma similar a como lo realizan los dispositivos con tecnologías Bluetooth, (*"hot plugging/unplugging"*). Cada dispositivo presente proporciona su funcionalidad a los demás dispositivos. El sistema de control y supervisión se encuentra distribuido entre todos los dispositivos, de forma que cada uno de ellos trabaja de forma coordinada con el resto y se comporta respondiendo a otros componentes o a los usuarios.

3. EL CONCEPTO DE ROBOT PORTÁTIL

La característica fundamental que debe asegurar un robot asistencial es que posibilite al usuario obtener *capacidades aumentadas*, gracias a la utilización del sistema sensorial (que cubrirá las deficiencias perceptivas del usuario) y al sistema locomotor que ejecutará las acciones deseadas sobre el entorno, (cubriendo así sus deficiencias motoras). Si todo este sistema se puede desplazar allá donde vaya el usuario, se puede considerar que el sistema es portátil. Para que se pueda desplazar el robot

tendrá su propio sistema locomotor o usará el medio de locomoción que el usuario, generalmente la silla de ruedas. En la siguiente sección se revisarán las características que hacen al ASIBOT el primer sistema asistencial portátil.

3.1 Arquitectura del sistema asistencial portátil

Desde el punto de vista del usuario, el tipo y grado de discapacidad obliga a elegir una interfase adecuada con el RA. Es imposible, por motivos de coste y complejidad, atender de forma personalizada, a las necesidades de cada usuario. Es preciso plantear estrategias para poder llegar a todos los usuarios de la forma adecuada. La solución que se ha adoptado para el ASIBOT se basa en una configuración modular basada en silla de ruedas, interfase y manipulador portátiles, con el objetivo de restaurar la movilidad y la capacidad de manipulación, no sólo en el entorno doméstico sino en cualquier lugar. Se utiliza el mismo sistema base, fácilmente personalizable y capaz de atender múltiples necesidades (Jardón, 2006), para ser utilizado por todas las personas con dificultades en la manipulación.

El sistema asistencial propuesto en la figura 1 es modular y capaz de operar en cualquier entorno adaptado. Esto significa que todo el control se ubica a bordo del robot. El único elemento necesario para utilizar el robot sería una interfase basada en PDA para la ejecución de las distintas tareas asistenciales. Estos dispositivos resultan muy adecuados dadas las grandes capacidades de comunicación y computo que poseen, bajo coste, mínimo peso, gran portabilidad, versatilidad de control y flexibilidad de desarrollo e integración con paquetes software y otros dispositivos hardware.

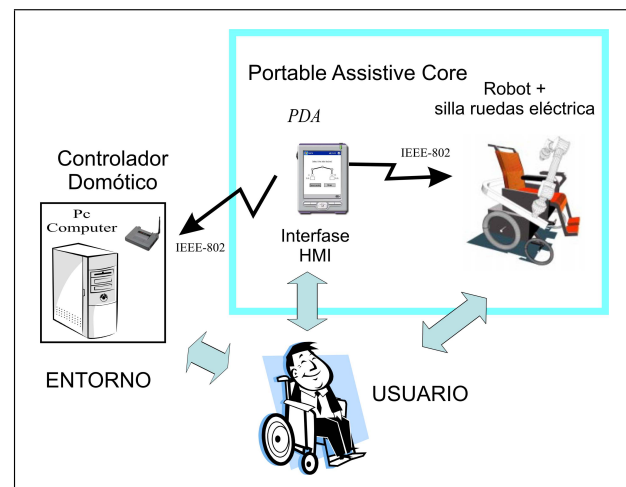


Figura 1. Arquitectura del sistema asistencial, ASIBOT.

El esquema de la figura 1 presenta una arquitectura centrada en el usuario y en su interacción

con el entorno, Implica la adopción de un núcleo básico asistencial, que se denominará **Núcleo Asistencial Portátil**, formado por el robot portátil ASIBOT, que se define como un manipulador autocontenido y ligero con capacidad de manipular y desplazarse entre conectores y la interfase de usuario, basado en *PDA*, que el usuario lleva siempre consigo y que le proporciona fácil acceso a las capacidades del sistema. Para poder integrar el robot y la interfase en el ambiente inteligente, formado por el resto de dispositivos domóticos, controlados mediante una red propia, debe utilizarse una arquitectura de comunicaciones versátil y compatible con los protocolos de comunicaciones que emplean los hogares inteligentes. En este aspecto, la posibilidad de acceder a los servicios presentes en cada escenario (laboral, supermercado, automóvil, etc.) dependerá de dicha compatibilidad y se realizará de forma transparente al usuario.

Este modelo atiende, tanto al requisito de portabilidad del sistema asistencial como al requisito de modularidad de la interfase e integración con diversos entornos, (doméstico, laboral, etc.). La portabilidad del modelo presentado supone una innovación importante con respecto a otras propuestas en el campo de la robótica asistencial.

Para poder implementar las capacidades de movilidad extendida y poder considerar el sistema de asistencia con el calificativo de **portátil**, se han definido los siguientes puntos:

1. Sistema locomotor-manipulador

Se basa en la aplicación de un robot escalador, de reducido peso, autocontenido, manejable por una sola persona y con capacidad de transferirse de forma autónoma de la silla de ruedas al entorno y viceversa.
2. Sistema de interfase con el usuario

Se basa en un dispositivo portátil, *PDA*, sobre el cual se ejecuta el programa de comunicaciones con el robot y el entorno y se conectan los distintos dispositivos de interfase personalizados. La *PDA* además incorpora los elementos de control necesarios para el manejo del robot.
3. Sistema de procesamiento distribuido

Todos los dispositivos de control a bajo nivel se encuentran físicamente ubicados a bordo del robot. Los comandos son recibidos desde la *PDA* y procesados en la unidad central de proceso, que los interpreta y los convierte en referencias de posición para el controlador de cada eje. El control del sistema asistencial está distribuido físicamente. El robot y la interfase de usuario completan los módulos de procesamiento necesarios para proporcionar las funcionalidades de manipulación necesarias. El entorno aportará fun-

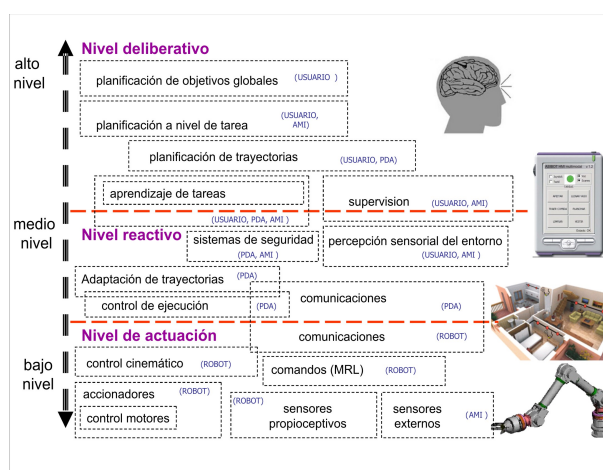


Figura 2. Arquitectura propuesta de control de RA.

cionalidad adicional al sistema cuando sea posible.

4. Sistema de comunicaciones

Para establecer conexión permanente entre el robot y la *PDA* y entre ésta y el entorno, debiendo soportar varios protocolos inalámbricos (WIFI, *Bluetooth*, etc.). Es fundamental que la aplicación de control del sistema establezca los mecanismos adecuados de descubrimiento de servicios presentes en el entorno.

5. Sistema sensorial

Para mantener el requisito de bajo peso, imprescindible para conseguir portabilidad, se ha reducido al mínimo la sensorización a bordo, si bien la arquitectura de control tiene prevista la incorporación de módulos sensoriales, ubicados en el propio robot, en la silla de ruedas o en el entorno, cuando estén disponibles.

En la figura 2, se plantea la arquitectura modular de control parcialmente implementada en el ASIBOT. Se presentan tres niveles de control, desde el más básico el de actuación, propio del control de los accionadores a bordo, manejo de entradas y salidas, generación de trayectorias, supervisión de las comunicaciones y sensores propioceptivos; el nivel reactivo, que maneja la información procedente de sensores externos, permite la ejecución condicional de estas, reaccionar adecuadamente ante situaciones peligrosas o la planificación de movimientos relacionados con las tareas o la movilidad del robot por el entorno, entre otras funcionalidades; y por último en el nivel superior, donde se ejecutarían tareas de planificación global, la programación de las tareas a realizar a lo largo del día, y que facilita que el usuario grabe nuevas tareas.

La característica fundamental en este esquema, es que la ubicación física de cada módulo puede defi-

nirse de forma flexible. Esto permite el reparto de funciones entre la interfase de usuario, el entorno y el propio robot. La distribución de módulos de procesamiento entre robot, la interfase, el entorno y el propio usuario, podrá ser cambiada de modo dinámico, según se encuentren presentes o no los servicios allá donde se mueva el usuario. En cada uno de estos niveles, se implementarán unos módulos o agentes según las funcionalidades que se quieran implementar. Esto permite reducir drásticamente las necesidades de cómputo a bordo del robot, de forma que este obedece al control a más alto nivel, implementado en la interfase de usuario y/o en el entorno. Los módulos de percepción exteroceptivos, basados en cámaras, ultrasonidos, etc., debido a los elevados requisitos de potencia de cómputo deberán ser implementados en el controlador del entorno, que tendrá una topología de computación distribuida.

La planificación de tareas a alto nivel la realizará normalmente el usuario, que decide que hacer y cuando. Tras comunicar esta decisión al sistema asistencial, mediante el HMI, ésta se comunica con el entorno inteligente, (controlador domótico en la figura 1), que genera la planificación de movimientos adecuada para el robot, sobre la base de datos definida previamente y los transfiere a la HMI que a su vez los comunica al robot o al propio robot. En entorno tendrá la capacidad de supervisar los movimientos del robot en base a la información procesada y sintetizada adecuadamente, con el objeto de evitar colisiones o fallos en el guiado.

La arquitectura propuesta, tiene la capacidad de integrarse en el espacio flexible que proporciona la Inteligencia ambiental, transformando la domótica tradicional en “domótica proactiva”, facilitando el funcionamiento autónomo de RA con escasa inteligencia a bordo.

3.2 El robot ASIBOT

El robot ASIBOT presenta una configuración cinemática abierta de 5 GDL simétrica, ya que tiene la posibilidad anclarse por ambos extremos, (Giménez *et al.*, 2005). Cada extremo tienen un mecanismo de anclaje para conectarse a la pared o a la silla de ruedas, y una pinza. La estructura es de aluminio en sus diferentes articulaciones y sus eslabones son de fibra de carbono. Estos contienen los equipos electrónicos y computador a bordo.

De esta forma, el robot con tan sólo 12 kg, es completamente autónomo, salvo la conexión externa para su alimentación, que la toma del conector eléctrico ubicado en el centro del anclaje mecánico (DS) de la pared. Los actuadores se han diseñado de forma que servomotor, freno y reductor quedan integrados formando cada eje

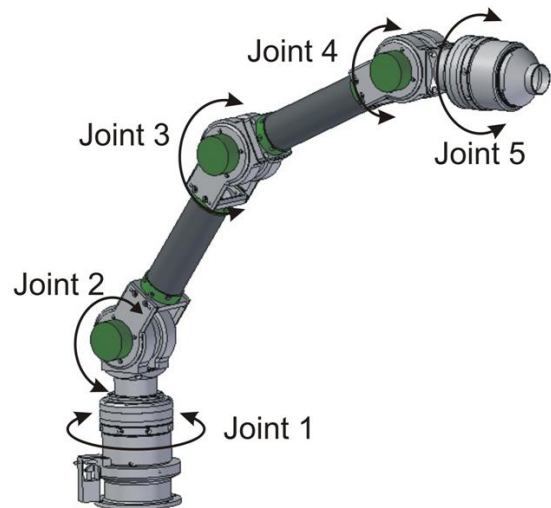


Figura 3. Cadena cinemática del robot ASIBOT.

motriz extremadamente compacto y ligero. La cadena cinemática abierta y los sentidos de giro del robot se pueden apreciar en la figura 3.

El robot ASIBOT está diseñado para reptar con gran precisión y fiabilidad entre los conectores de anclaje de forma autónoma. Este utilizaría su extremo libre para anclarse en un conector libre y así poder soltar el extremo anteriormente anclado. De este modo quedaría sujeto por este nuevo extremo dejando el anterior para manipular. Así sucesivamente el robot se desplaza por el entorno. Estos conectores pueden ser instalados fijos en la pared o bien sobre un rail móvil en determinadas localizaciones con el objetivo de prolongar el rango de acción del manipulador. Lógicamente para que el sistema ASIBOT sea totalmente operativo en un entorno, se precisa cierta adaptación consistente en la instalación de conectores de anclaje en determinados lugares de paso y trabajo haciendo posible la transición de un lugar a otro de la casa o desde una pared a una silla de ruedas o viceversa. Este alto grado de flexibilidad tiene una gran implicación en el cuidado de personas discapacitadas o ancianos con problemas de movilidad en las extremidades superiores. La modularidad del sistema robótico hace posible que éste crezca tanto como sea el nivel de discapacidad de la persona que lo vaya a utilizar. Los conectores permitirán al robot desplazarse de un lugar de trabajo a otro de forma autónoma siguiendo directivas de movimientos preprogramados según las necesidades de cada usuario. Se concibieron tres clases distintas de anclajes o DS: fijas; a la pared, techo, suelo, muebles u otros lugares de la casa donde sean necesarios para la tarea que se vaya a realizar tales como colocar platos en una mesa o ayudar a comer a una persona. Los

anclajes móviles sobre un rail, permiten al robot desplazarse distancias largas a mayor velocidad. Si se coloca un DS en un rail montado en la silla de ruedas, el usuario podrá usar el robot como los clásicos RA MANUS, (Kwee, 1993) y RAPTOR, (Mahoney, 1993). Habrá una DS especial en un lugar de la casa para permitir la transición del robot desde la silla de ruedas a la red de DS fijas y viceversa. Una vez transferido al hogar, el robot se trasladará por el entorno autónomamente usando dicha red de conectores instalados.

El robot ASIBOT se podría clasificar como escalador, ya que está diseñado para trabajar desde diferentes posiciones, allá donde tenga una DS, y poder moverse de una a otra y de un plano a otro, incluso a través de esquinas convexas. También podría ser clasificado como manipulador, porque una vez anclado, sus operaciones principales son coger y mover o posicionar objetos y herramientas. Cada extremo del robot aloja el sistema de anclaje y una "garra" para poder manipular objetos. La solución adoptada consistió en una garra formada por tres dedos retractiles, que emergen para manipular objetos y se esconden cuando se va a realizar el anclaje en un conector (Jardón *et al.*, 2006). En su posición de trabajo, permite manipular herramientas acopladas a su extremo libre, dotadas de actuadores bajo el control del sistema y/o del propio usuario. El dispositivo de agarre no está ubicado en el robot sino que está colocado en la superficie, y lo que hace el robot es ir desplazándose de un anclaje a otro. Sin embargo, dado su carácter autocontenido, su bajo peso y su capacidad de anclarse al DS de la silla del usuario, lo denominaremos RA portátil.

3.3 Modos de operación

El robot tiene tres modos principales de funcionamiento. Para que este realice sus desplazamientos entre conectores de la casa puede funcionar 1) en modo autónomo, donde el robot se mueve por sí mismo, aunque el usuario podrá retomar el control en todo momento; 2) el funcionamiento por control directo, donde el usuario teledirige al robot según sus necesidades, bien usando la PDA, un joystick o mediante órdenes de voz. Este es el más apropiado para realizar tareas únicas o esporádicas en cualquier entorno. Por ejemplo, para alcanzar un objeto que cayó al suelo o jugar una partida de damas, el usuario moverá el extremo del robot de acuerdo a su destreza; 3) para tareas de alto nivel que el usuario repite con frecuencia y ejecuta en el mismo entorno, por ejemplo, la cocina, el funcionamiento será semiautónomo. Así el usuario dispone de una serie de tareas sencillas pre-grabadas por él mismo. Una secuencia de estas pequeñas tareas compone una tarea de alto nivel,

como "ir al cuarto de baño desde la cocina y coger el cepillo de dientes". Cada uno de estos pequeños pasos de nivel inferior de la tarea a desarrollar, están compuestos por un fichero de comandos de movimientos, y un conjunto de reglas de ejecución, que permiten habilitar o no cada paso en función de la evolución anterior del robot y el estado actual. Así, el robot funciona de forma autónoma en ocasiones en las que no deberá esperar una respuesta por parte del usuario. La lógica de alto nivel asociada a esta evolución de pasos de tarea está registrada en forma de diagrama de estados (red de petri. Se ejecuta en un módulo de control ubicado en la PDA, y es fácilmente reconfigurable por un asistente. Si el usuario invoca una tarea errónea el módulo secuenciador (que forma parte del denominado módulo de control de ejecución de la tarea, figura 2) deshabilitaría su ejecución y generaría un mensaje para que la interfase informe al usuario del error y las alternativas a seguir.

3.4 Interfases de control

El objetivo de una interfase de usuario se define como el de establecer un mecanismo de comunicación usuario-máquina y la generación de realimentación sensorial del proceso. Para que el sistema asistencial sea útil para todos los usuarios es necesaria una adecuada personalización de la interfase y no del RA, que será el mismo, aunque usado de distintas formas. La personalización de RA resulta en la práctica una tarea cara y compleja. Las soluciones a las necesidades concretas de cada individuo implicarían tantos robots distintos como individuos.

La interfase de usuario esta basada en una PDA, que actúa de intermediario entre el completo y complejo sistema asistencial y el usuario, presentando a este una sencilla selección de opciones. Para una persona con movilidad solo en el cuello se añade un accionador o pulsador que recoja las selecciones del usuario acerca de las opciones que la PDA presenta por pantalla. El núcleo de la interfase consta de la PDA ejecutando el programa adecuado, el dispositivo de entrada, que es el licornio o pulsador, y el de salida, la propia pantalla de la PDA.

Las posibilidades de conexión de las actuales PDA las hacen idóneas para su utilización junto con adaptaciones de bajo coste personalizadas para cada usuario. En la figura 4 se muestran esta PDA y algunas de las adaptaciones precisas para la evaluación del ASIBOT por pacientes del Hospital.

3.5 Aplicaciones del robot ASIBOT

Las principales tareas del robot ASIBOT están relacionadas con el entorno doméstico. No se re-



Figura 4. Interfase de control del ASIBOT basada en PDA y varias adaptaciones.



Figura 5. ASIBOT asistiendo en AVDs

quiere un alto grado de precisión durante estos movimientos, excepto en el caso de que el robot se mueva entre dos DS. Durante el proceso de diseño se decidió que mientras se realizan tareas como dar de comer o afeitado, el objetivo del robot será presentar la cuchara, la maquina de afeitado o el cepillo de dientes al usuario, y será este el que realice el último pequeño movimiento. La figura 5, muestra diferentes entornos de trabajo donde el robot ASIBOT coopera en el desarrollo de diferentes tareas, tales como beber, dar de comer o utilizar un cepillo de dientes eléctrico. Durante estas tareas es muy importante el control de las distintas trayectorias del brazo y sus perfiles de velocidad y aceleración, ya que el robot se moverá muy cerca del usuario. Si el robot se mueve con la cuchara llena de comida, será crucial el control de la orientación del extremo para evitar que ésta se caiga de la cuchara.

Así el robot permite acercar objetos, coger y mover utensilios usados para las actividades de la vida diaria hasta un plano de trabajo próximo al usuario. Por ejemplo, el robot sitúa la cuchara cerca de la boca del usuario y este, con la movilidad residual del cuello, puede introducirse la comida en la boca. Este mecanismo se utiliza en el RA de mayor éxito comercial el HANDY 1 (Topping, 2002). De esta forma la seguridad no se ve comprometida al recaer en la voluntad de la persona los movimientos finales necesarios para contactar con el robot o utensilios que maneja. En definitiva se ha logrado integrar en un diseño

innovador y portátil las funcionalidades de robot escaladores y brazos manipuladores con un propósito asistencial para personas discapacitadas, y anclando el robot en la silla de ruedas del usuario el ámbito de operación no se limita al entorno doméstico.

3.6 Adaptaciones precisas para el ASIBOT

A pesar de que en cada extremo del robot se dispone de una garra con tres dedos, la forma de ciertos útiles dificulta enormemente que el robot los pueda manipular correctamente, como por ejemplo un cepillo de dientes. Para solventar esta dificultad se utilizan adaptadores de herramientas, que son piezas diseñadas exclusivamente para que el robot las manipule con su extremo libre, asiéndolas con el mismo mecanismo de tipo bayoneta que usa para su propio anclaje en los conectores. De esta forma, se han podido adaptar para que sean manejables por el robot una maquinilla de afeitado eléctrica, un cepillo de dientes eléctrico, una esponja, una brocha de maquillaje, un vaso y una botella. En la figura 6 se aprecian algunos de estos útiles adaptados.



Figura 6. Diversos portaherramientas.

Para adaptar estas herramientas se han utilizado técnicas de prototipado rápido y material polimérico que aporta rigidez limitada y bajo peso, lo cual en caso de colisión fortuita con el entorno o el propio usuario resultará en que la pieza se rompa sin causar lesiones al usuario. Estas técnicas de prototipado 3D evitan el complejo y costoso mecanizado de las formas redondeadas y choffanes redondeados adoptados para minimizar el daño en caso de colisión.

4. EVALUACIÓN Y ESTUDIO DE USABILIDAD

La utilidad de cualquier ayuda, sea robótica o no, está estrechamente relacionada con su facilidad de uso. La usabilidad vendrá determinada en gran medida por la complejidad del sistema y el interfase de usuario. No siempre la solución más compleja es la mejor, la aproximación más realista deberá tener un elevado ratio beneficio-coste.

Mediante la evaluación basada en ensayos clínicos, se pretende obtener la realimentación necesaria



Figura 7. ASIBOT en el baño adaptado del hospital.

para personalizar y adecuar los interfases y el sistema de control a las necesidades de cada usuario, pero manteniendo el mismo sistema básico y acortando los costes del sistema en su conjunto. El proyecto denominado ASIBOT, “Desarrollo y experimentación de un robot personal portátil de ayuda a personas discapacitadas y mayores en actividades de la vida diaria”, fue aprobado por el IMSERSO en su línea de Investigación Científica de Desarrollo e Innovación de Tecnología de Apoyo a las personas con discapacidad y personas mayores en el año 2005. La entidad coordinadora ha sido el RoboticsLab, del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid y como entidad participante figura la Fundación Hospital Nacional de Paraplégicos de Toledo para la Investigación y la Integración (FUHNPAIN). Su principal objetivo fue experimentar y valorar el robot ASIBOT sobre una muestra de pacientes lesionados medulares en un entorno intra hospitalario, simulando un ambiente cotidiano para determinadas actividades de la vida diaria básicas. De la experimentación se deberían recoger de forma estructurada las impresiones del uso del robot y generar nuevas ideas u opiniones de los usuarios no contempladas a priori en el proyecto, con el fin de servir de base para mejorar el diseño de un nuevo prototipo.

4.1 Material y Método

Se pretende evaluar la usabilidad del robot ASIBOT, cuando se utiliza para asistir a los usuarios en AVDs en el contexto del aseo, mostrado en la figura 8, ubicado en las instalaciones de la Unidad de Terapia Ocupacional del Hospital que forma parte de un uso cotidiano doméstico. Para ello se llevaron a cabo ciertas adaptaciones, del aseo y de ciertos útiles a usar por el robot. En la figura 7 se muestra el escenario elegido para los ensayos antes y después de las adaptaciones. Una etapa fundamental del trabajo fue el desarrollo de un formato de ensayos. Para la realización del presente estudio se valoraron diversas pruebas de Valoración Funcional (López Mongil *et al.*, 2000) de AVDs. Se entiende por por Actividades de la Vida



Figura 8. ASIBOT ayuda a cepillarse los dientes.

Diaria Básicas (AVDBs) las principales tareas del autocuidado personal, siendo su análisis uno de los factores básicos para la planificación de los cuidados y los recursos socio-sanitarios necesarios para personas discapacitadas y ancianos.

La metodología de trabajo se basó en la recogida de información de forma estructurada sobre la interacción de los usuarios seleccionados con el robot. Para ello se elaboró un plan de ensayos en el que se concretaron los distintos escenarios y tareas a desarrollar. En las pruebas se contó con la presencia de los usuarios y de personal tanto técnico como sanitario. Se recogió información de cada uno de los usuarios que interactuaron con la ayuda técnica y posteriormente se llevó a cabo un análisis de dicha información. Para finalizar se elaboraron unas conclusiones finales derivadas de la información recogida.

Con el fin de asegurar en todo momento la seguridad del usuario, se han tomado otras medidas de seguridad como son la delimitación de zonas de paso prohibidas, y la limitación de la velocidad articular en cada eje. Para definir estas zonas prohibidas se modeló el entorno de trabajo del robot, el baño adaptado y el usuario y se utilizaron simulaciones en realidad virtual para definir estas restricciones. En la figura 9 se muestran las zonas delimitadas. Esta definición se incluyó en el sistema de control cinemático del robot para evitar contactos no deseados con el robot incluso en control directo. Además se utilizaron estas simulaciones para decidir el número de conectores necesarios para que el robot desarrolle sus tareas asistenciales con un nivel de destreza óptimo. El parámetro que determina la capacidad de manipular desde una determinada configuración viene dado por el Índice de Yoshikawa (Yoshikawa, 1985), que evalúa la capacidad de cambiar de forma arbitraria la posición y orientación del extremo. Este coeficiente es muy utilizado para la optimización de posturas en la realización de tareas, planificación de trayectorias, y para evitar puntos singulares al ejecutar trayectorias.

Mediante simulación, se decidió la mejor ubicación de los conectores para el robot, la posición de la estantería desde la cual el robot pudiera anclar por sí mismo cada herramienta, y la ubicación del dispensador automático de jabón que usa el robot al sostener la esponja. Así mismo, se sustituyó el grifo del lavabo por otro dotado de una electroválvula accionada por infrarrojos, ejemplo de producto accesible para todos. El robot no precisa accionar ninguna llave para abrir el grifo sino que acerca el cepillo tal y como lo haría el usuario si tuviera movilidad suficiente.

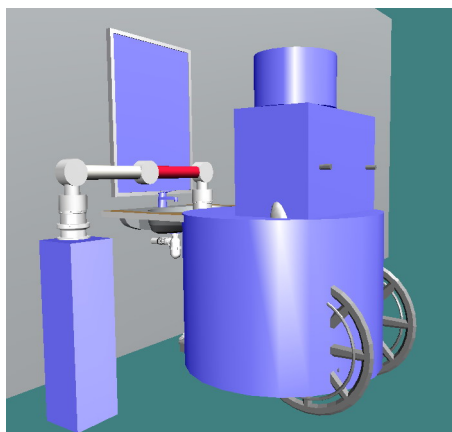


Figura 9. Escena simulada en el baño

Para cada escenario, se le debe preparar un menú de funciones que pueden ser ejecutadas por el robot en él, además de poder pasar a control directo en caso necesario. En la figura 4, se muestra el menú de funciones disponibles en el lavabo. La forma de activar las funciones es configurable y dependerá de los elementos que precise el usuario para actuar sobre la *PDA*, y que se detallan en la sección de resultados.

4.2 Descripción de los usuarios

Para los ensayos se seleccionó como muestra de población a personas con Lesión Medular Espinal con más de un año desde que se produjo la lesión. De este modo, no se consideraban aquellos casos con lesión aguda. Se trataba de identificar usuarios que tras superar la fase inicial hubieran experimentado estancias habituales en sus domicilios, dando lugar a la percepción de las principales dificultades con las que se encuentran en su vida diaria. De este modo serían capaces de valorar de forma más objetiva la funcionalidad de la ayuda técnica al encontrarse diariamente con numerosos problemas de dependencia. El robot se muestra especialmente útil para asistir a la persona con gran discapacidad. Por ello, se eligieron personas con afectación a nivel cervical, desde el nivel neurológico C4 hasta C8, por las consecuentes limitaciones a nivel de miembros superiores y la

posibilidad de realizar sin problemas de capacidad vital las distintas pruebas.

Los criterios de exclusión fueron: epilepsia, retraso mental, deficiencia visual no corregida o afectación psiquiátrica. Con estos criterios la población analizada en la prueba definitiva fue de cinco usuarios.

4.3 Metodología de recogida de información

Tras realizar una exhaustiva revisión bibliográfica, se procedió al diseño del estudio y se valoraron varios tests relacionados con el desarrollo de metodología para evaluar la satisfacción del usuario de dispositivos de ayuda al discapacitado (Jutai *et al.*, 2005; Demers *et al.*, 1996). Desde la concepción del sistema asistencial se incorporó el concepto de usabilidad, íntimamente relacionado con el grado de satisfacción de un producto. Se decidió que la técnica o herramienta empleada para realizar la evaluación del producto, debería proporcionar información acerca de la opinión de los usuarios representativos de forma individual mediante intervenciones consecutivas de varios de ellos. Estos usuarios serían beneficiarios directos de la ayuda y la recogida de la información sería ejecutada de forma presencial (Demers *et al.*, 1999; López *et al.*, 2001; Demers and Ska., 2000).

Finalmente, de entre todas las técnicas revisadas que hacen posible la participación del usuario y ante la inexistencia de un sistema adecuado a nuestras necesidades para evaluar la satisfacción de los usuarios, se tomó como base para el diseño la intervención a través de las siguientes técnicas: “Pruebas de usabilidad” apoyadas en la “creación de escenarios” y aplicando criterios de valoración definidos en el denominado “Test K.I.U.” (Poveda, 2003).

Los objetivos principales de estas técnicas hacen referencia a conocer problemas importantes y frecuentes, detectar fallos, necesidades o requisitos, generar criterios de diseño y requerimientos del usuario final así como la valoración global de la usabilidad (detectar carencias, posibles causas y proponer soluciones) del producto, que permitirá plantear qué aspectos son necesarios modificar en el nuevo diseño. Las principales carencias de usabilidad hacen referencia a criterios de facilidad de aprendizaje, utilidad y funcionalidad, facilidad de uso y satisfacción en el uso. Se han incorporado estas técnicas al diseño de un cuestionario propio elaborado por el personal de la Unidad de I+D+I de Biomecánica y Ayudas Técnicas del Hospital Nacional de Paraplégicos de Toledo. Previamente, mediante un estudio piloto se aseguró la validez de los datos y comprensión de las preguntas. Se analizó la adecuación de las preguntas a los objetivos y se comprobó que el tiempo de duración

total del test no fuera superior a los 30 minutos con el fin de evitar fatiga y distracción. Se evitaron preguntas que provocaran estímulos negativos en el usuario y se incluyeron explicaciones para completar el cuestionario. El usuario debería contestar de forma rápida y sin detenerse demasiado tiempo en reflexionar cada una de las respuestas. Los cuestionarios fueron anónimos. En caso necesario contaron con la ayuda del personal sanitario de la Unidad de Biomecánica para rellenarlo. No se recogió ningún dato personal que identificará a cada paciente a excepción del nivel de lesión medular. Este dato podría ser interesante para identificar las capacidades residuales del paciente y relacionarlas con las respuestas.

El cuestionario de los ensayos constaba de tres partes: Una primera parte de preguntas cerradas, con respuestas graduadas en una escala satisfacción aditiva de Likert graduada en 5 puntos (de +2 a -2) y centrada en la valoración de las funciones o actividades propuestas a realizar por el robot durante los ensayos. La segunda parte consistió en preguntas con el formato anterior centradas en la valoración de las características del robot. En la tercera parte del cuestionario se formulaban cuatro preguntas abiertas sobre el uso, la utilidad y las necesidades asistenciales de cada individuo. Finalmente, se valoró de forma general la ayuda técnica a través de dos preguntas concretas con respuestas en un formato de escala ordinal.

4.4 Desarrollo de la Experimentación

Se realizaron pruebas piloto previas a los ensayos en escenarios reales con el objeto de valorar formas distintas de interacción con la interfase robot-usuario implementadas en una PDA. Este primer experimento constaba de una pantalla principal donde se presentaban grandes botones visuales-táctiles que representaban seis diferentes posibles tareas a realizar por el robot (por ejemplo comer, beber, etc). Se ofrecían los siguientes canales de interacción ordenados de mayor a menores requerimientos de movilidad para accionarlos: 1º) Táctil, usando un dedo del usuario o un lápiz. 2º) Joystick, para selección de opciones con un botón para validar. 3º) Reconocimiento de voz, 4º) Escaneo de opciones, todos compatibles entre sí, con distintas *opciones de activación y selección* con realimentación sonora: por voz, con reconocimiento continuo, palabra clave para obtener la atención de la interfaz, barrido de opciones más orden de "stop" o inicio de reconocimiento de voz mediante pulsación de licornio o bien pulsador del joystick previa a la pronunciación del comando de voz. En dicha prueba piloto se buscaba recoger la opinión a priori sobre las situaciones, actividades o tareas en las que el usuario piensa que podría

beneficiarse de la ayuda del robot. Se interrogó sobre la facilidad de uso, lo práctico, la adecuación a sus capacidades de cada una de las interfases y la capacidad de manejarlas sin ningún tipo de ayuda. Finalmente, en dos preguntas abiertas se animó a los usuarios a exponer cualquier tipo de sugerencia o idea para un control más sencillo. Durante esta jornada se mostró un video demostrativo del prototipo realizando una variedad de actuaciones de ayuda al usuario. Los resultados de esta primera fase indicaron el aseo personal como el considerado más apropiado para la realización de los ensayos con el robot. En jornadas previas a la segunda fase de las pruebas, se prepararon las adaptaciones de las herramientas para realizar AVDBs relacionadas con el entorno aseo, se incluyeron en el sistema un conjunto de primitivas de movimiento y se definieron las secuencias correctas de activación, dejando el sistema ASIBOT preparado para su uso por usuarios sin experiencia. Las funciones propuestas en este escenario fueron cuatro: beber agua (A), cepillarse los dientes (B), afeitado o maquillaje (C) y lavarse la cara (D).

4.5 Resultados

El sistema ha sido probado por usuarios para obtener su opinión acerca del empleo de los robots en sus casas, y obtener los puntos de vista, predisposiciones, ideas y expectativas basándose en demostraciones reales acerca de las capacidades del sistema.

En cuanto a los resultados, tras la evaluación de las diferentes interfases propuestas, se extrajeron las siguientes conclusiones de las respuestas de los usuarios: a excepción de una persona, todos manifestaron ser capaces de **manejar solos** las diferentes interfases propuestas: *reconocimiento de voz* (con distintas opciones), *Joystick*, *Táctil* y *Secuencia de encendido con pulsador de selección*. En cuanto a la **facilidad de uso** la mejor valorada fue la *opción Táctil* seguida del *reconocimiento de voz*, el *Joystick* y por último la *Secuencia de encendido*. La interfase más **práctica** resultó ser la *Táctil*, después *reconocimiento de voz* y por último la *Secuencia de Encendido*. Las interfases basadas en *reconocimiento de voz* y *joystick* fueron como las mejores valoradas en lo que respecta a la **adecuación** de la interfase a sus **capacidades de movimiento**. En la segunda fase de los ensayos, se dejó que el usuario manejase la interfase para ejecutar las secuencias de movimientos pregrabados del robot, es decir, que completasen la funcionalidad o tarea deseada.

Para cada una de las funciones se realizaron varias afirmaciones a las que se debía asignar una puntuación de respuesta graduada según escala Likert de valoración de la Satisfacción. En la tablas 1 y 2 se

muestran los resultados (media y moda) obtenidos tras el análisis de los datos recopilados.

Tarea	A	B	C	D
¿Te ha sido útil?	0,75/2	0,8/1	0,8/1	1,33/2
¿El HMI es práctico y fácil de usar?	1,2/2	0,6/1	0,7/1	0,66/2
¿Precisas de otra ayuda usando ASIBOT?	0,8/1	0,33/1	0/-1	0,14/1
¿Te permite incrementar tu autonomía?	1,4/1	0,5/0	0,2/-1	0,66/2
¿EL uso del ASIBOT te ha suouesto esfuerzo físico o mental?	1,4/2	0,66/1	0,33/1	0,33/1
¿has podido completar la tarea con éxito?	1,8/2	0,16/0	1,66/1	1,3/1
Te motiva el uso del robot?	1,2/1	0,8/0	0,7/1	0,6/1
¿Cual es tu impresión general?	2/2	1/0	1/1	1/2

Cuadro 1. Resultados del test tras los ensayos.

FACTORES	media/ moda
Estética	0,65/2
Tamaño, alcance	-0,25/0
Facilidad de uso	0,83/1
Velocidad de operación	1,54/2
Seguridad	0,82/1
Robustez	1,85/2
Facilidad de puesta en marcha	1,20/1
Impresión general	1,5/1

Cuadro 2. Principales aspectos evaluados

Los resultados globales en cada una de tres funciones fueron los siguientes: en la función de **beber** se obtuvo una puntuación media de 0,75. Una puntuación de 1 indicaría satisfecho y el 0 significaría indeciso. En la tarea de **cepillarse los dientes** se obtuvo una puntuación media de 0,46. En la función de **lavar la cara** se obtuvo una puntuación media de -0,36. Una puntuación de -1 indicaría insatisfecho y el 0 significaría indeciso por lo que el uso del robot para esta función se definió como mejorable.

De estos resultados se puede extraer las siguientes conclusiones: los usuarios consideraron el uso del robot para las funciones de beber y cepillado de los dientes como adecuado a estas tareas, sin embargo, no opinaron lo mismo para la tarea de lavarse la cara donde el desempeño del robot debía ser mejorable. Cabe resaltar las dificultades organizativas para disponer de estos usuarios en los días de los ensayos y agradecer su paciencia ante los diversos problemas que surgieron. Se ha constatado la necesidad de prolongar en el

tiempo la duración de los ensayos y aumentar considerablemente el tamaño de la muestra sobre la que realizar las valoraciones.

5. CONCLUSIONES

El sistema robótico ASIBOT, supone un avance significativo en el campo de los robots de servicio, ya que incorpora todos los sistemas electrónicos de accionamiento, control y comunicaciones a bordo del robot, lo que supone el primer robot manipulador escalador portátil. Es decir, no solo puede ser portado de un entorno a otro con facilidad, sino que escalando entre distintos conectores se puede desplazar por sí mismo e incluso acompañar al usuario montado a su silla de ruedas. El sistema de control funciona sobre una *PDA* y mediante sencillas adaptaciones se facilita al usuario una interfase multimodal, y proporciona un sistema de teleoperación asistido. Se plantean indiscutibles ventajas en la modularidad y la adaptabilidad de la arquitectura del sistema propuesto, así como la inclusión de elementos móviles y con capacidades de manipulación para llegar al mayor número posible de usuarios.

Se han estimado las siguientes necesidades de personal en instituciones geriátricas (López Mongil *et al.*, 2000): se precisa un cuidador para atender a 15 residentes cuando su situación funcional se ha definido como de autónomo o ligero. Se precisa un cuidador para atender las necesidades de 5 residentes cuya situación se ha definido como de moderado y severo. Se precisa 1 cuidador para atender a 3 residentes cuya situación sea de dependencia total.

Los gestores de las administraciones públicas deberán conocer que ventajas puede aportar el uso de las nuevas tecnologías para reducir los gastos en el cuidado personal, para poder satisfacer la creciente demanda social. Si con ayuda del robot se puede reducir el nivel de dependencia de los residentes al poder realizar actividades como asearse o alimentarse por sí mismos, se podrá aumentar el ratio de pacientes por cada cuidador, además de mejorar la calidad de la asistencia. Se puede deducir que las necesidades asistenciales tanto de personas mayores como discapacitados debidas a la pérdida de movilidad se reducirían utilizando una asistencia robótica como la evaluada. Además, su innovador carácter portátil permitirá a su vez ser compartida entre varios residentes.

Mediante los ensayos clínicos desarrollados se ha constatado que la respuesta del conjunto de los usuarios es positiva si bien es necesario que cada usuario disponga del robot durante más tiempo para que se habitue a su manejo y por otro lado, para que aprenda a hacer cosas apoyándose en él.

Este primer prototipo ha servido para validar la forma de desplazarse por el entorno y estudiar las posibles tareas y formas de control por parte de los usuarios. En base a la experiencia recopilada y con el objetivo de aumentar su usabilidad y versatilidad, el equipo de investigación está preparando nuevas versiones tanto del robot como de interfases de control y herramientas adaptadas.

6. AGRADECIMIENTOS

A la financiación obtenida para el proyecto de evaluación funcional de ASIBOT, concedida por el IMSERSO (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales) - España. Los autores agradecen especialmente el esfuerzo de los compañeros del equipo de trabajo.

REFERENCIAS

- Aarts, E., R. Harwig and M. Schuurmans (2002). The Invisible Future: The Seamless Integration of Technology in Everyday Life. In: *Vol. Ambient Intelligence of* . McGraw Hill. New York, NY, USA.
- Buss, M. and G. Schmidt (1999). Multi-modal telepresence. advances in control.. In: *Highlights of the 5th European Control Conference ECC*.
- Crisman, J. and G. Bekey (1996). Grand challenges for robotics and automation: the 1996 icra panel discussion. In: *IEEE Robotics and Automation Magazine* pp. 10–16.
- Demers, L. and B. Ska. (2000). Item analysis of the quebec user evaluation of satisfaction with assistive technology (quest). *Assistive Technology* 12, 12–96.
- Demers, L., M. Sc, Erg., R. Weiss-Lambrou and M. Sc y B. Ska (1996). Development of quebec user evaluation of satisfaction with assistive technology (quest). *Assistive Technology, Applied Research* 8, 3–13.
- Demers, L., M. Sc, Erg., R. Weiss-Lambrou and M. Sc y B. Ska (1999). An international content validation of the quebec user evaluation of satisfaction with assistive technology (quest). *Occupational Therapy International* 6(3), 159–175.
- Giménez, A., A.Jardón, R.Correal, R.Cabas and C.Balaguer. (2005). A portable light-weight climbing robot for personal assistance applications. Sept. In: *8th International Conference on Climbing and Walking Robots (Clawar'05)*. London. UK. Sep, 2005. "The Best Paper Award 2005".
- Guglielmelli E., Laschi C., Teti G. Fontanelli R. Dario P. (1997). A modular and distributed supervisory system for a semi-autonomous personal robot for household applications. In: *International Conference on Robotics and Automation*. ICRA.
- Jardón, A., Giménez A., Correal R., Cabas R., Martínez S. and Balaguer C.. (2006). A portable light-weight climbing robot for personal assistance applications. *Industrial Robot: An International Journal* 33(4), 303–307.
- Jardón, A. (2006). Metodología de Diseño de Robots Asistenciales. Aplicación al robot ASIBOT. Tesis Doctoral . Universidad Carlos III de Madrid.
- Jutai, J.W., M.J. Fuhrer, L.Demers, M.J Scherer and F. DeRuyter (2005). Toward a taxonomy of assistive technology device outcomes. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* (84), 294–302.
- Kwee, H., Stanger C. (1993). The manus robot arm. *Rehabilitation Robotics Newsletter*.
- López, M.A., R. Poveda, I. Andreu, R. Barberá and P. Ramiro et all. Datus. (2001). Guía práctica para fabricantes de productos de la vida diaria y ayudas técnicas. In: *Informe Cedat.IBV.Musa*
- López Mongil, R., Ortega Sandoval JM., Martínez Pastor MB and Castrodeza Sanz JJ. (2000). Nuevas aplicaciones de la valoración funcional en residencias de ancianos. *Revista electrónica de Geriatría*.
- Mahoney, R. (1993). The raptor wheelchair robot system. *Rehabilitation Robotics Newsletter*.
- Poveda, Rakel (2003). Método para la selección de ayudas técnicas bajo criterios de usabilidad. En: *Instituto de Biomecánica de Valencia*. Musa/IBV.
- Topping, Mike (2002). An overview of the development of handy 1, a rehabilitation robot to assist the severely disabled. *Journal of Intelligent and Robotic System* 34, 253–263.
- Yoshikawa, Tsuneo (1985). Dynamic manipulability of robot manipulators. *Journal of Robotic Systems* 2(1), 113–124.