

LA SILLA ROBÓTICA SENA. UN ENFOQUE BASADO EN LA INTERACCIÓN HOMBRE-MÁQUINA

J. González, C. Galindo, J.A. Fernández,
J.L. Blanco, A. Muñoz, V. Arévalo

*Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad
de Málaga, Campus de Teatinos, 29071 Málaga (España)*

Resumen: El número de personas con problemas de movilidad está creciendo en los últimos años en los países desarrollados, como consecuencia de una mayor esperanza de vida y del gran número de accidentes de tráfico. La posibilidad de transferir y adaptar resultados del campo de la robótica a este colectivo resultaría de enorme interés toda vez que repercuta en una mejor calidad de vida y una mayor integración social. En este artículo presentamos la silla de ruedas robotizada SENA, que es el resultado de un proyecto de investigación desarrollado en el Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga (España). SENA se basa en una silla eléctrica comercial a la que se ha integrado una serie de sensores y dispositivos que son gestionados mediante un ordenador portátil. Este prototipo se caracteriza por su capacidad para la navegación autónoma en espacios interiores, así como por su facilidad para interactuar y cooperar con el usuario o personas del entorno gracias, entre otros, a una arquitectura software desarrollada específicamente para robots asistentes. En este artículo se describen los principales elementos hardware y software de SENA, se ilustra su funcionamiento y se exponen algunas de las reflexiones y conclusiones derivadas del desarrollo de este prototipo. *Copyright © 2008 CEA-IFAC*

Palabras Clave: Robots móviles, Robots asistentes, Integración Humano-Robot.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad más de 45 millones de personas en Europa sufren algún tipo de incapacidad física que limita su movilidad. Esta elevada cifra incluye, además de las personas afectadas por lesiones producidas en accidentes de tráfico o laborales, a personas de edad avanzada con algún tipo de deficiencia motriz. El número de personas de la tercera edad en Europa asciende a 80 millones y la tendencia es claramente alcista, de forma que los expertos vaticinan que este número crecerá probablemente en torno al 1 % al año durante las dos próximas décadas.

Considerando esta situación, cualquier esfuerzo dirigido a facilitar la movilidad de este colectivo de personas en su vida diaria es del máximo interés. Desde hace bastantes años se vienen empleando *sillas de ruedas eléctricas* como solución a este problema. Sin embargo, los usuarios de estas sillas aún deben controlar manualmente su movimiento, lo que puede convertir su uso cotidiano en una tarea pesada en determinados escenarios, tales como pasillos estrechos, áreas con obstáculos, trayectos largos, etc.

Por otra parte, los últimos años han sido testigos de esperanzadores avances en la robótica de servicios (Aracil *et al.*, 2008; Ceres *et al.*, 2008;

Domínguez *et al.*, 2008) y, especialmente, en el desarrollo de robots para la asistencia a personas con problemas de movilidad, desarrollándose prototipos de sillas eléctricas que incluyen mecanismos para la evitación automática de obstáculos y navegación semi-autónoma (Bailey *et al.*, 2007; Ballcells and Abascal, 1998; Chow and Xu, 2006; Fioretti *et al.*, 2000; Hoyer *et al.*, 1995; Kuruparan *et al.*, 2006; Levine *et al.*, 1999; Mazo and the Research Group of the SIAMO Project, 2001; Prassler *et al.*, 2001). Estos mecanismos requieren que la silla esté dotada de sensores avanzados, gestionados y controlados mediante un ordenador a bordo. No obstante, y al margen de los problemas intrínsecos a la robótica móvil (percepción, toma de decisiones, manejo de incertidumbre, etc.), el uso real de este tipo de robots asistenciales no está ampliamente extendido debido a varias razones. Por un lado, la operación de la mayoría de las sillas robóticas actuales está sujeta a continua supervisión humana, lo cual puede absorber completamente la atención del usuario. Esta situación empeora cuando tiene que operar en entornos complejos y muy cambiantes. Por otro lado, la mayoría de los usuarios desconfían de las actuales sillas robóticas ya que normalmente se sienten como meros observadores que, aun pudiendo dirigir el vehículo indicando dónde ir, no disponen de mecanismos para sugerir cómo hacerlo o cómo solventar situaciones imprevistas o fallos. Basándonos en estas consideraciones, creemos que aún queda por hacer un gran esfuerzo en el desarrollo de robots de asistencia con interfaces amigables y que confieran confianza al usuario.

Estas características (confiabilidad y disponer de una interfaz amigable) son precisamente los principales requerimientos considerados en el paradigma de la *Robótica Centrada en el Humano* o HCR (del término inglés *Human Centered Robotics*) (Dorais *et al.*, 1998; Khatib, 2002; Morioka *et al.*, 2002). Según este enfoque, la *confiabilidad* involucra dos aspectos: la seguridad física tanto de las personas como del robot, y la robustez operativa y tolerancia a fallos. Por otro lado, la *interacción amigable con el humano* implica la capacidad de controlar fácilmente el robot así como proporcionar información al usuario de un modo simple y fácilmente entendible por éste.

Siguiendo estas ideas, nuestro grupo de investigación viene trabajando durante los últimos años en el desarrollo de una silla robótica robusta y fiable con capacidad para la comunicación de alto nivel, persiguiendo el máximo grado de aceptación del usuario. Como resultado de este proyecto se ha construido el robot de asistencia SENA, ideado para mejorar la movilidad de personas con problemas motrices. SENA (ver imagen en la figura 1) está basada en una silla de ruedas eléctrica convencional a la que se le han integrado múltiples

sensores y dispositivos gestionados por un simple ordenador portátil.



Figura 1. La silla eléctrica de navegación autónoma SENA.

Aún siendo conscientes de que los resultados alcanzados son mejorables en diversos aspectos, destacamos las siguientes cualidades de SENA:

Características HCR. SENA alcanza un alto grado de confiabilidad e interacción con el humano mediante el uso de una arquitectura de control denominada ACHRIN (Galindo *et al.*, 2007). Una característica especial de ACHRIN es que permite la participación activa del usuario a todos los niveles (desde el nivel deliberativo hasta el nivel de actuación física) lo que exige unos requerimientos de comunicación también a varios niveles. En la sección 3 se proporcionan detalles sobre la arquitectura de control de SENA.

Confort del usuario. Desafortunadamente una persona discapacitada pasa casi todo el día en su silla, así que cualquier elemento adicional en el vehículo se puede convertir en una molestia en su quehacer diario. En nuestro diseño hemos puesto especial atención a este aspecto situando todos los componentes de SENA fuera del espacio del trabajo del usuario. Además, la navegación autónoma de la silla se controla mediante un ordenador portátil con conexión a internet que puede ser utilizado para otros fines.

Modularidad. El diseño de un sistema robótico debe considerar futuras extensiones y actualiza-

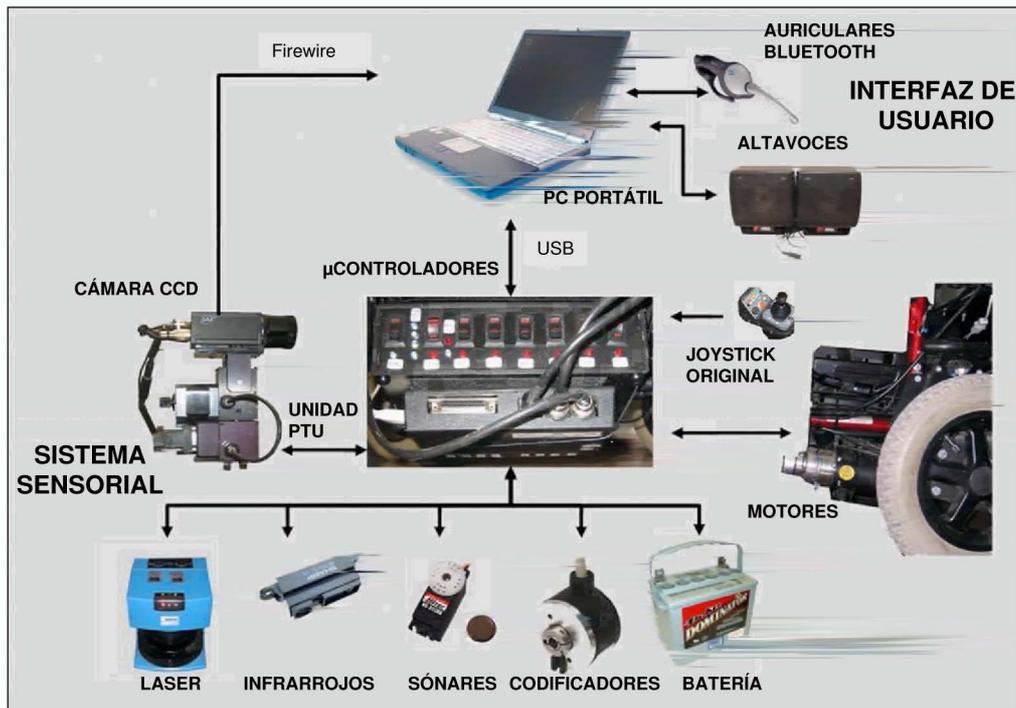


Figura 2. Esquema del hardware de SENA. El control de bajo nivel de los sensores y los motores se realiza mediante varios microcontroladores que se comunican con el software que se ejecuta en el portátil.

ciones. Por esta razón, tanto el software como el hardware de SENA usan productos comerciales estandarizados: conexiones genéricas (USB, firewire), *middleware* estándar de comunicaciones (CORBA), y sistema operativo Windows. Esto facilita la actualización y extensión de los componentes. Particularmente, los módulos de software han sido implementados bajo un sistema de desarrollo denominado BABEL, el cual ha demostrado su idoneidad para diseñar aplicaciones robóticas distribuidas y modulares de alta calidad (Babel, 2006; Fernández-Madrigal *et al.*, 2007).

Las siguientes dos secciones describen los componentes de hardware y software de SENA. La sección 4 relata nuestra experiencia en el uso del robot, así como nuestras reflexiones sobre la aplicabilidad de nuestro prototipo en la vida real, proponiendo, finalmente, algunas mejoras y líneas futuras de investigación.

2. EL HARDWARE DE SENA

La silla robótica SENA (ver figura 1) se ha construido a partir de una silla eléctrica comercial (Sunrise Powertec F40) en la cual se han integrado diversos dispositivos y sensores controlados por un ordenador portátil.

Los componentes hardware de SENA se muestran en el esquema de la figura 2. Es importante señalar que la silla original ha sufrido mínimas modificaciones: se han instalado dos codificadores de posición en los ejes de los motores para estimar la odometría y un conmutador que se activa manualmente o mediante software para seleccionar la entrada al sistema motor del vehículo, pudiendo ser ésta la señal del joystick (operación manual de la silla) o la del ordenador (control autónomo del vehículo). Este conmutador permite al usuario desconectar la navegación autónoma de SENA cuando lo desee para su guiado manual.

El sistema basado en microcontroladores a bordo de SENA opera como gestor de todos los sensores y dispositivos, a la vez que implementa el control de bajo nivel del vehículo. Por otro lado, los algoritmos de alto nivel tales como planificación de tareas, localización, síntesis y reconocimiento de voz, etc., se ejecutan en el ordenador portátil del usuario, conectado a la caja de los microcontroladores a través de USB (ver figura 2).

A continuación se describe con detalle el aparato sensorial de SENA:

- Una cámara CCD montada sobre una unidad motorizada con dos grados de libertad, utilizada para localizar el robot. La cámara CCD se sitúa en una posición elevada, apro-

ximadamente a 1.70 m., desde donde percibe elementos del entorno.

- Un *escáner láser radial de 180°* montado sobre un mecanismo retráctil situado delante de la silla, entre las piernas del usuario. Este sensor tiene una visión frontal del entorno completa (ver figura 3). El empleo de este tipo de sensor está ampliamente extendido en robots móviles ya que proporciona alta precisión y velocidad de muestreo. En nuestra aplicación, los datos que adquiere el escáner láser se emplean para detectar obstáculos, para la construcción del mapa del entorno, y para localización (Blanco *et al.*, 2008a; Blanco *et al.*, 2008c).
- Un *anillo de trece sensores infrarrojos* que se sitúan alrededor de SENA para detectar obstáculos cercanos cuando la silla esta maniobrando (ver figura 4). Los infrarrojos son sensores pequeños y baratos que proporcionan un rango operacional de 10 a 60 cm., permitiendo a la silla aproximarse de un modo seguro a objetos y muebles. Dos de ellos están situados en la parte inferior de la silla para detectar baches, bordillos, huecos de escalera, etc. Otros dos están situados en la parte trasera para detectar situaciones peligrosas cuando la silla maniobra marcha atrás.

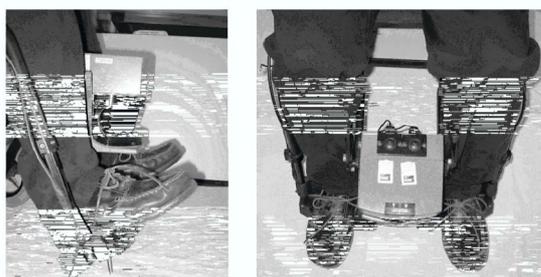


Figura 3. El escáner láser radial proporciona información precisa del entorno que es empleada para la evitación de obstáculos y localización de SENA.

- Dos *sensores de ultrasonidos rotatorios* situados en los flancos de SENA para detectar obstáculos próximos cuando la silla está maniobrando. Cada uno de ellos está situado sobre un servo que le permite escanear con un ángulo de visión de 180°. Los sensores ultrasónicos son propensos a errores y presentan un tiempo de muestreo considerablemente alto, sin embargo proporcionan información del entorno a una altura distinta del láser e infrarrojos, además de poder detectar objetos transparentes que no pueden ser detectados por sensores basados en emisión de luz.

Como se ha comentado anteriormente, la selección y emplazamiento de los sensores de SENA

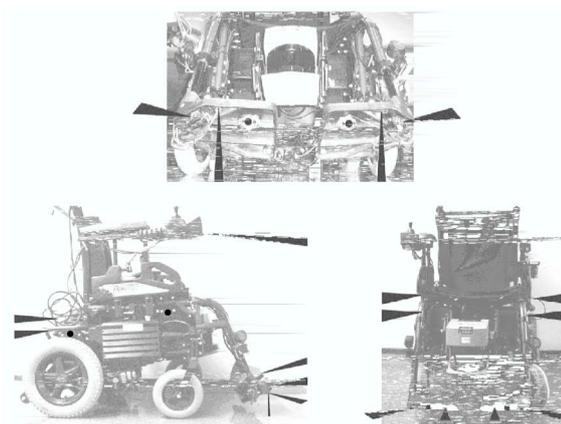


Figura 4. Espacio abarcado por el anillo de sensores infrarrojos. Los sensores están situados en posiciones que complementan el espacio muestreado por el escáner laser radial.

está pensada para proporcionar tolerancia a fallos y operación robusta. Algunas tareas críticas como la evitación de obstáculos o la localización hacen uso de información redundante y complementaria proporcionada por varios de ellos.

El vehículo también cuenta con dos pequeños altavoces y un set auricular-micrófono bluetooth para la comunicación verbal con el usuario a través de un software comercial de síntesis y reconocimiento de voz. Esta comunicación verbal utiliza información simbólica del entorno (Fernández-Madrigal *et al.*, 2004), tal y como se comentará en la siguiente sección, posibilitando una comunicación de alto nivel similar a la humana (Fernández-Madrigal and González, 2001).

Finalmente es importante destacar que todos los componentes hardware considerados para SENA usan conexiones estándares que facilitan la actualización, extensión, o modificación de la configuración de la silla con nuevos dispositivos cuando sea necesario.

3. EL SOFTWARE DE SENA

Además del conjunto de sensores comentados en la sección anterior es necesaria una arquitectura software de control para orquestar estos dispositivos, interpretar la información que proveen y planificar y ejecutar acciones. Gran parte del software utilizado en SENA puede consultarse y descargarse en <http://babel.isa.uma.es/mrpt>

Un aspecto relevante de la arquitectura de control de SENA es que incluye al usuario de la silla de ruedas como un componente adicional que puede ayudar al sistema cuando sea necesario. De este modo, si el usuario tiene suficientes habilidades cognitivas (por ejemplo para corregir la posición del vehículo) y físicas (para, por ejemplo, manipular objetos, abrir una puerta o llamar a un ascen-

sor), su participación puede mejorar y/o ampliar las capacidades del sistema robótico.

Esta participación del humano en el sistema exige una estrecha interacción humano-robot en la que la comunicación de alto nivel toma especial relevancia, ya que las personas que pueden influir en la autonomía del robot (típicamente el usuario o una persona de los alrededores) prefieren comunicarse con la máquina del mismo modo que lo hacen con otras personas. Por ejemplo, cuando los sensores de la silla de ruedas detectan una puerta cerrada, el robot debería poder solicitar ayuda de un modo entendible por los humanos, esto es, “por favor, ¿me abre alguien la puerta que está delante?”. Es importante remarcar que la ayuda del humano es solicitada sólo cuando es realmente imprescindible, sin incomodar continuamente al usuario, que debe sentir que la silla opera de un modo autónomo la mayoría del tiempo.

Con este objetivo se ha diseñado e implementado la arquitectura software denominada Arquitectura para la Integración Cognitiva Humano-Robot ACHRIN (de los términos ingleses, *Architecture for Cognitive Human-Robot Integration*) (Galindo *et al.*, 2006), que integra al humano dentro del sistema robótico para que pueda aportar habilidades no soportadas por la silla (por ejemplo, llamar un ascensor) o soportadas por SENA pero de un modo diferente y (probablemente) más seguro (por ejemplo, maniobrar en situaciones complejas).

Aunque la colaboración del humano en tareas realizadas por robots es un campo ampliamente estudiado (Fong and Thorpe, 2001; Fong and Thorpe, 2002; Goetz and Kiesler, 2002; Scholtz, 2003; Tahboub, 2001), nuestra solución proporciona una integración especial entre el humano y el robot asistente a la que denominamos *integración cognitiva* (Fernández-Madriral *et al.*, 2004). La integración cognitiva permite la comunicación robot-humano a alto nivel mediante el uso de *abstracción*. La abstracción es un mecanismo empleado por el ser humano (Harnand, 1987; Hirtle and Jonides, 1985; DeLoache, 2004), con objeto de reducir la cantidad de información necesaria para operar en un mundo complejo y con gran cantidad de detalles: los conceptos son agrupados en otros más generales los cuales son considerados como nuevos conceptos que pueden ser abstraídos de nuevo. El resultado es una jerarquía de abstracciones o una jerarquía de conceptos que finaliza cuando toda la información es reducida a un único concepto universal (ver figura 5). Esto permite a la silla robótica establecer un interfaz más natural entre el vehículo y la forma en la que el humano representa mentalmente su entorno, lo

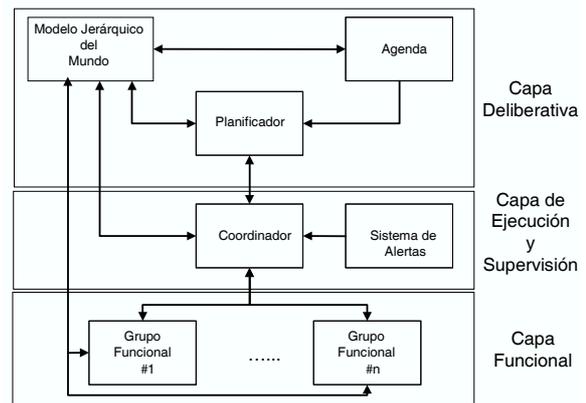


Figura 6. Visión general de ACHRIN, la arquitectura de software implementada en SENA.

que es llamado en el ámbito de la robótica un mapa cognitivo¹ (Kuipers, 1983).

Las características principales proporcionadas por ACHRIN (ver figura 6) son las siguientes:

- *El humano y la silla se comunican mediante un lenguaje común.* A través de la integración cognitiva, el robot puede compartir parte del modelo simbólico que tiene el humano de su entorno. Así, SENA y el usuario pueden referirse a los mismos conceptos espaciales (objetos, lugares, etc.) de forma inequívoca, usando sus nombres en un lenguaje común. Dicha integración cognitiva se logra a través del uso de un modelo matemático jerárquico y simbólico (Galindo *et al.*, 2007).
- *El humano puede extender las habilidades de la silla.* Estas habilidades van desde complejos movimientos de bajo nivel a toma de decisiones de alto nivel, como abrir una puerta, advertir al sistema de situaciones de riesgo indetectables por los sensores del robot, planificar el camino más conveniente para llegar al destino, etc. Es destacable que no sólo el usuario de la silla puede ampliar las habilidades del sistema, sino cualquier persona de su entorno.
- *El humano puede mejorar algunas habilidades de la silla.* El humano puede realizar las acciones asignadas inicialmente a la silla, por ejemplo el guiado hasta un lugar determinado. De la misma forma, el usuario o cualquier persona del entorno puede completar acciones encomendadas a la silla que ocasionalmente hayan fallado. Por ejemplo, el usuario puede recuperar al vehículo de un fallo de navegación guiándolo manualmente hacia localizaciones bien conocidas donde éste podría reanudar la navegación.

¹ El mapa cognitivo se puede definir como la representación del espacio en la mente de un ser humano.

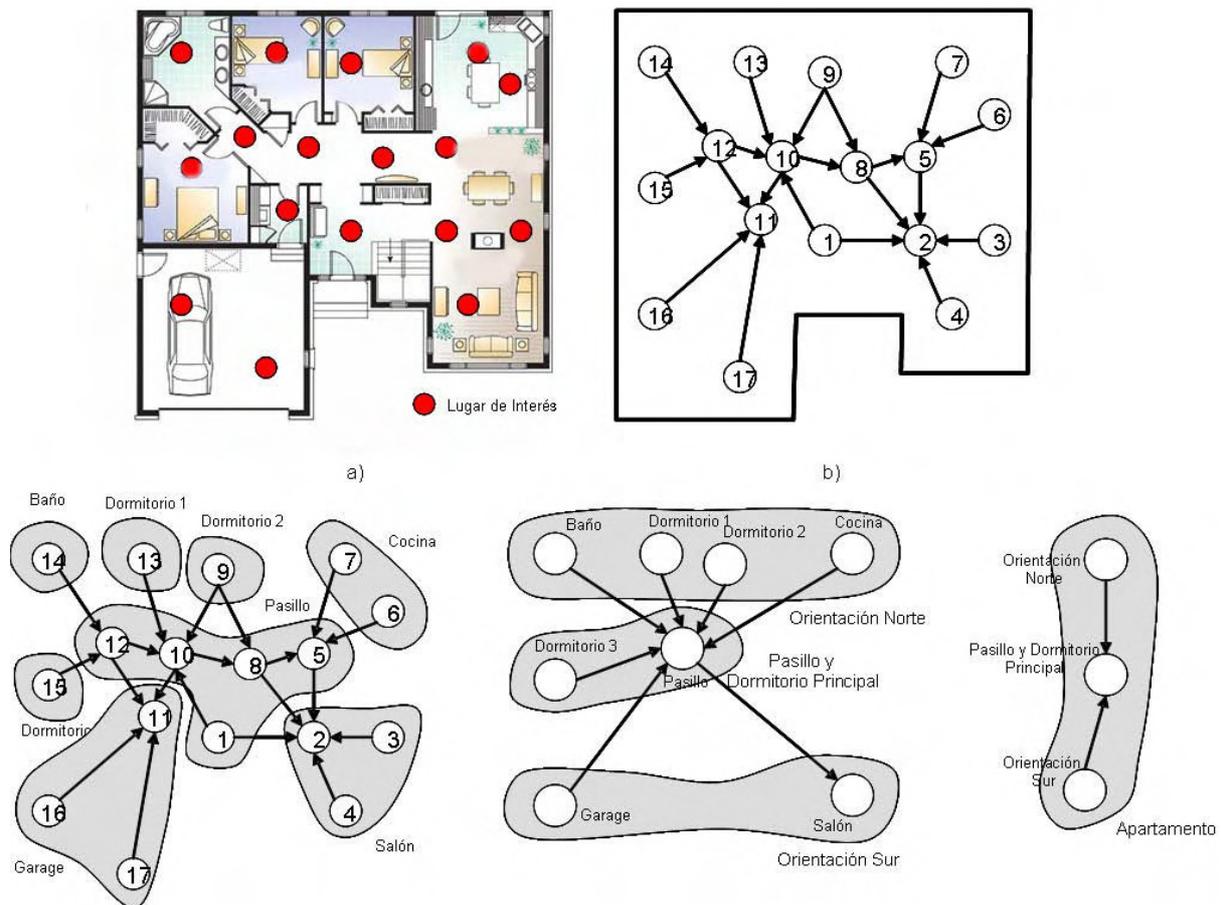


Figura 5. Ejemplo de una jerarquía de abstracciones para modelar el espacio. (a) Plan esquemático de un apartamento. (b) Nivel básico de la jerarquía: mapa topológico de los lugares de interés. (c) Niveles superiores de la jerarquía. Las regiones grises contienen los nodos abstraídos a un mismo concepto espacial en el nivel superior. Cada concepto, por ejemplo una habitación, puede llevar asociado una o varias etiquetas lingüísticas para mejorar la comunicación humano-robot.

ACHRIN puede considerarse como una arquitectura robótica híbrida, aunque no presenta la disposición típica de éstas, ya que el modelo del mundo es accesible por la mayoría de componentes (ver figura 6). A continuación se comenta brevemente la funcionalidad de cada una de sus capas:

- *La capa deliberativa* mantiene una representación interna del mundo y produce planes para alcanzar los objetivos del robot (Galindo *et al.*, 2004). La planificación de tareas se realiza en base a planificadores de propósito general como Metric-FF (Jörg and Bernhard, 2001) en cuyos dominios de planificación contempla las acciones que el usuario de la silla puede realizar.
- *La capa de ejecución y supervisión* controla la ejecución de los planes producidos por la capa deliberativa, gestionando la información recopilada por la capa funcional y los sensores del vehículo. También ajusta el comportamiento del vehículo teniendo en cuenta la peligrosidad de las situaciones detectadas por los sensores, por ejemplo el riesgo de colisión.

- *La capa funcional* se compone de diversos módulos que realizan físicamente las acciones disponibles en el sistema. Principalmente navegación, manipulación (realizada por el usuario), comunicación, y actuaciones (por ejemplo domótica). Estos módulos se organizan en grupos de acuerdo con su funcionalidad, conteniendo, en algunos casos, diferentes mecanismos para abordar la misma situación. Por ejemplo, SENA puede desplazarse de un punto a otro con un algoritmo reactivo, siguiendo un camino grabado previamente, o siendo guiada por el usuario.

ACHRIN habilita al humano para interactuar en todos los niveles de la arquitectura con objeto de extender y/o mejorar la funcionalidad proporcionada por cualquier módulo. Los módulos de ACHRIN tienen en cuenta las capacidades humanas a través de las llamadas *unidad de habilidad*. Cada módulo de la arquitectura se puede componer de diversas unidades de habilidad que ejecutan una cierta acción, como producir un plan, comprobar situaciones arriesgadas, moverse entre

dos localizaciones, etc. Tales acciones pueden ser resueltas bien por el humano o por el vehículo, seleccionando la correspondiente unidad de habilidad. En el caso del robot, las unidades de habilidad son implementadas mediante algoritmos software, mientras que en el caso del humano se permiten realizar y comunicar acciones a través de los interfaces adecuados, por ejemplo mediante comandos de voz (Galindo *et al.*, 2006).

4. EXPERIENCIAS, REFLEXIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La silla robotizada SENA ha sido probada en multitud de situaciones por diferentes usuarios (ver figura 7) poniendo de manifiesto su versatilidad y utilidad para que una persona con discapacidad motora pueda desenvolverse en su entorno de trabajo. Como ejemplo de escenario típico de interacción y comunicación podemos considerar el siguiente ejemplo: el usuario de SENA envía, desde su puesto de trabajo, un documento a una impresora remota y quiere ir a la habitación donde la impresora está situada para recoger su copia. Este simple ejemplo, además de presentar las dificultades típicas de la robótica móvil (evitación de obstáculos, localización, construcción de mapas, etc.), se pueden presentar dificultades tales como qué hacer si se encuentra con alguna puerta cerrada o si el sistema de navegación falla en las maniobras de entrada/salida o de evitación de algún obstáculo.

Para el primer problema, la ayuda del humano es inevitable ya que SENA no es capaz de abrir puertas. En este caso, el sistema de planificación de ACHRIN advierte de la necesidad de participación del humano en el plan, que es solicitada a través de los comandos verbales mostrados en la tabla de la figura 8. También se puede considerar la participación del usuario cuando el sistema de navegación de SENA falla. Los algoritmos de navegación reactiva y evitación de obstáculos implementados en SENA (ver (Blanco *et al.*, 2008b)) solventan la mayoría de situaciones de riesgo en escenarios complejos y dinámicos (ver figura 9). Sin embargo, en casos extremos el algoritmo de navegación puede fallar o simplemente no cumplir los requerimientos del usuario, por ejemplo en cuanto a velocidad o suavidad de movimientos. En estos casos el usuario puede notificar a SENA que desea tomar el control para guiar el vehículo de forma manual.

Como ya se ha comentado, el software de SENA permite al usuario interactuar y participar a todos los niveles de la arquitectura de control. En el escenario descrito, el usuario de SENA participa en el nivel funcional, realizando tareas de manipulación y navegación, y en el nivel de supervisión,

detectando cuándo la navegación autónoma no se está ejecutando de la forma deseada. De igual forma, podría participar en el nivel deliberativo proponiendo rutas alternativas para alcanzar el destino deseado. Un vídeo de este (y otros) experimento(s) puede ser descargado desde <http://es.youtube.com/watch?v=D2oLBz1EEWA>.

Los más de diez años de investigación en el campo de la robótica de asistencia nos permiten reflexionar sobre la utilidad y aplicabilidad de SENA en la vida real. Por una parte, y como ya se ha comentado, es requisito imprescindible que el usuario no presente ningún tipo de discapacidad mental severa, ya que, aun siendo el sistema autónomo, es el usuario quien toma muchas de las decisiones en última instancia. Las aplicaciones más directas de SENA se enmarcan en los siguientes escenarios:

1. El usuario, persona anciana o con algún tipo de discapacidad motriz, se desenvuelve por un entorno desconocido. Algunos ejemplos pueden ser un aeropuerto, trasladando de forma autónoma a pasajeros con problemas de movilidad a sus respectivas puertas de embarque, o en un centro hospitalario trasladando enfermos que requieren una atención específica a las diferentes áreas donde se prestan.
2. Aun siendo el escenario conocido, se requieren desplazamientos largos, tediosos o repetitivos. Dichos desplazamientos, si se realizan de forma automática, permitirían al usuario realizar otras tareas a la vez que se dirige a su destino.

Comandos emitidos por el Humano	
(0)	Añade este lugar llamado <nombre de lugar> al modelo
(1)	Agrupar los lugares anteriores en una habitación llamada <nombre de habitación>
(2)	Abre la puerta que conecta <lugar 1> y <lugar 2>
(3)	Cierra la puerta que conecta <lugar 1> y <lugar 2>
(4)	Detente
(5)	Cancela la última orden
(6)	Continúa
(7)	Llévame a <nombre de lugar>
(11)	Quiero guiarte
(12)	Selecciona otro método de navegación
(13)	Quiero llamar por teléfono a <entrada en agenda>
(14)	Por favor pon música de ambiente
(15)	Por favor apaga la música de ambiente
(16)	Por favor consulta el tiempo para hoy/mañana
Comandos emitidos por el Robot	
(17)	Por favor, ¿me puedes guiar hasta <nombre de lugar>?
(18)	Por favor ¿puedes abrir la puerta que está delante?
Comunicación de los resultados de las acciones realizadas por el usuario	
(19)	Te he guiado hasta <nombre de lugar>
(20)	No pude guiarte hasta <nombre de lugar>
(21)	He abierto la puerta
(22)	No pude abrir la puerta

Figura 8. Comunicación verbal entre el usuario y el robot asistente SENA. Con el objetivo de mejorar la comunicación, esta gramática se ha extendido con variaciones de los comandos. Así por ejemplo, “Vamos a <nombre de lugar>” es reconocido como una variante del comando (7).

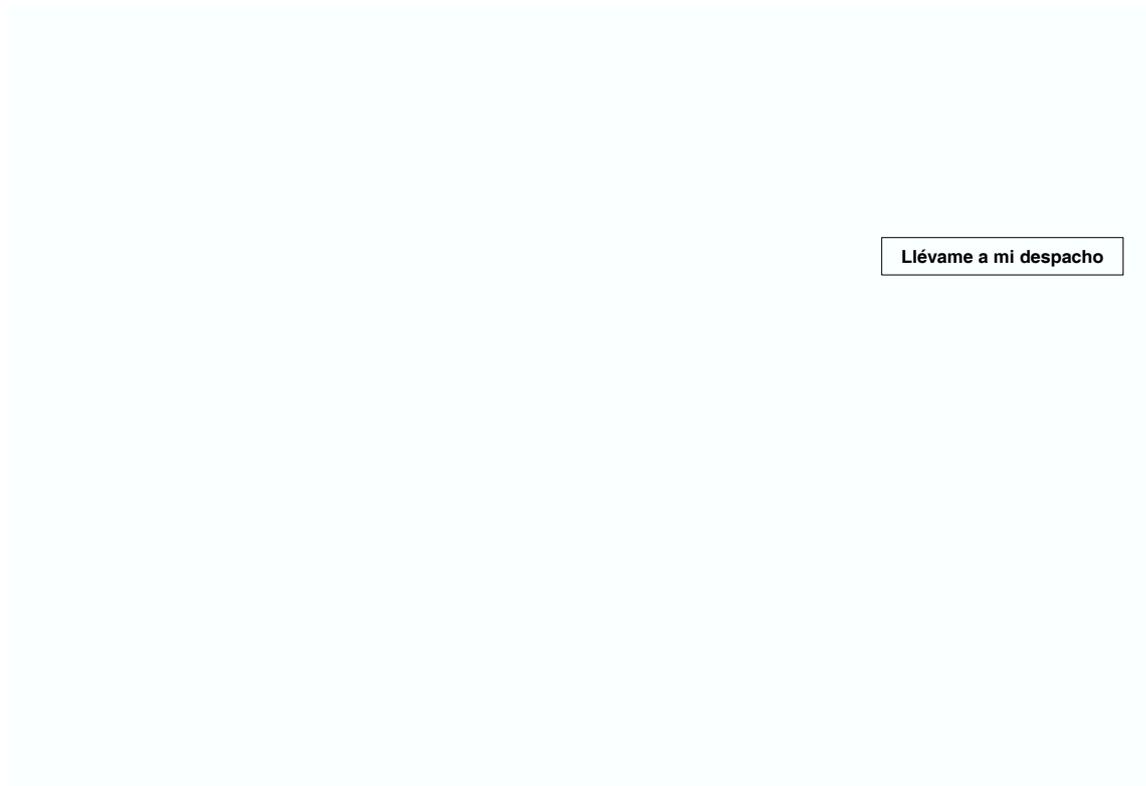


Figura 7. Algunas experiencias con SENA. Nuestra silla de ruedas ha sido utilizada por diferentes personas y en una variedad de situaciones (algunas de ellas emitidas en directo por televisión).

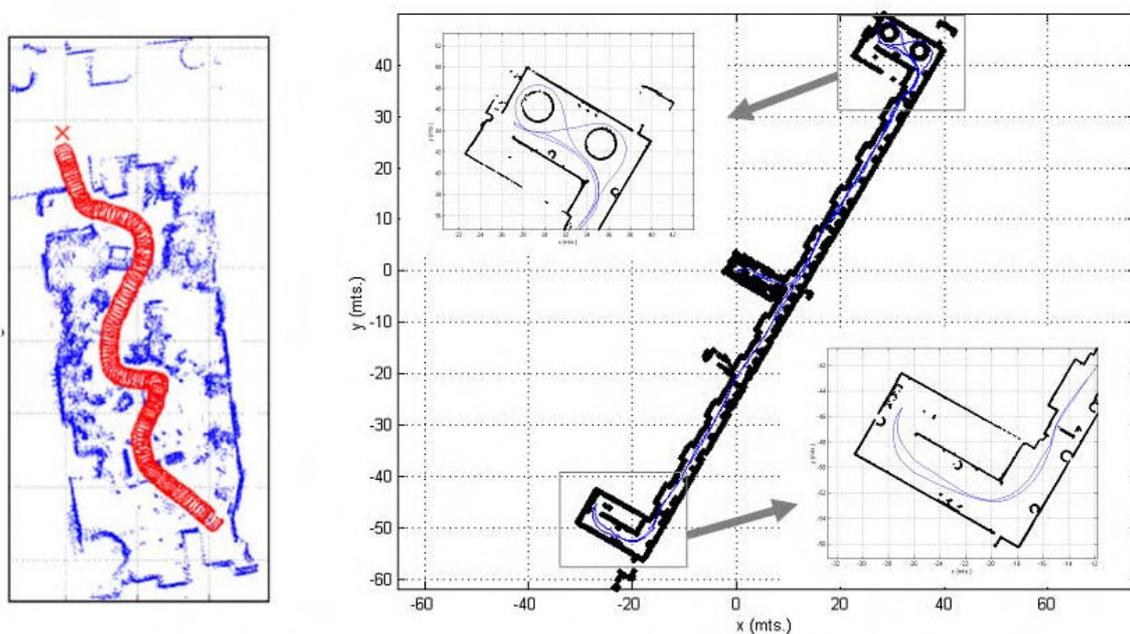


Figura 9. Mapas y trayectorias seguidas por SENA. a) Mapa de una habitación y la trayectoria seguida por SENA evitando obstáculos. b) Mapa de todo el entorno considerado en nuestras experiencias.

Es de interés comentar que la utilidad de SENA cobra mayor relevancia conforme más extenso es el entorno. De esta forma, el aprovechamiento de SENA en una vivienda convencional es complejo

y de dudoso interés para el usuario debido a la dificultad en la maniobrabilidad.

Lamentablemente, a lo largo del proyecto no hemos tenido la oportunidad de que personas discapacitadas realicen pruebas exhaustivas con SENA.

Sin embargo hemos contado con las sugerencias y apreciaciones tanto de usuarios particulares como de miembros de asociaciones como AMAPACE (Asociación Malagueña de Padres de Paralíticos cerebrales) y FAMA (Federación Andaluza de Minusválidos Asociados). Una recopilación de sus opiniones nos permite diferenciar dos grandes grupos, representados por los siguientes estereotipos:

1. Persona joven y activa que prefiere manejar el vehículo la mayor parte del tiempo y que no se siente cómoda con la navegación automática, especialmente cuando se realizan maniobras. Sin embargo, afirman que resulta muy útil en los casos en los que el desplazamiento resulta aburrido o cuando requieren prestar atención a otras tareas (por ejemplo hablar por el móvil).
2. Persona mayor o con problemas para controlar el mando del vehículo, que confirman la utilidad de SENA tanto para el desplazamiento por entornos grandes como para maniobrar en situaciones complicadas.

El futuro de nuestra investigación, que no puede considerarse concluida, va en la línea de mejorar y extender la funcionalidad tanto del hardware como del software de SENA. Concretamente, se estudiarán técnicas para mejorar la interfaz verbal con el usuario y la inclusión de servicios orientados a satisfacer y entretener a los usuarios, como por ejemplo desarrollo de algoritmos de Inteligencia Artificial para entablar diálogos sencillos, integración de domótica, acceso de forma verbal a información variada como noticias, previsión meteorológica, programación de televisión, etc. De igual forma y haciendo uso de nuestra experiencia en el desarrollo de SENA, estamos diseñando y construyendo otros robots de asistencia para aplicaciones en ferias, museos y exposiciones.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el inestimable esfuerzo y dedicación de un gran número de investigadores, alumnos y doctorandos que han trabajado en el desarrollo de SENA. Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Educación, mediante los proyectos de investigación CICYT-DPI2005-01391 y CICYT-DPI2002-01319.

REFERENCIAS

- Aracil, R., C. Balaguer and M. Armada (2008). Robots de servicio. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, (en este número).
- Babel (2006). Babel development system homepage. Acceso en Noviembre del 2006.
- Bailey, M., A. Chanler, B. Maxwell, M. Micire, K. Tsui and H. Yanco (2007). Development of vision-based navigation for a robotic wheelchair. In: *ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*.
- Balcells, A.C. and J. Abascal (1998). Tetranauta: A wheelchair controller for users with very severe mobility restrictions. In: *3rd European Conf. on Tech. for Inclusive Design and Equality*. Helsinki, Finland.
- Blanco, J.L., J. Gonzalez and J.A. Fernández-Madrigal (2008a). Extending obstacle avoidance methods through multiple parameter-space transformations. *Autonomous Robots* (1), 29–48.
- Blanco, J.L., J.A. Fernández-Madrigal and J. Gonzalez (2008b). A novel measure of uncertainty for mobile robot slam with rao-blackwellized particle filters. *The International Journal of Robotics Research (IJRR)* (1), 73–89.
- Blanco, J.L., J.A. Fernández-Madrigal and J. González (2008c). Towards a unified bayesian approach to hybrid metric-topological slam. *IEEE Transactions on Robotics (To appear in 2008)*.
- Ceres, R., J.L. Pons, L. Calderón and J.C. Moreno (2008). La robótica en la discapacidad. desarrollo de la prótesis diestra de extremidad inferior manus-hand. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, (en este número).
- Chow, H.N. and Y. Xu (2006). Learning human navigational skill for smart wheelchair in a static cluttered route. *IEEE Trans. on Industrial Electronics* (4), 1350–1361.
- DeLoache, J.S. (2004). Becoming symbol-minded. *TRENDS in Cognitive Sciences* 8(2), 66–70.
- Domínguez, S., E. Zalama and J.G. García-Bermejo (2008). *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, (en este número).
- Dorais, G., R.P. Bonasso, D. Kortenkamp, B. Pell and D. Schreckenghost (1998). Adjustable autonomy for human-centered autonomous systems on mars. In: *Proc. of the First International Conference of the Mars Society*. pp. 397–420.
- Fernández-Madrigal, J.A. and J. González (2001). *Multi-Hierarchical Representation of Large-Scale Space*. Int. Series on Microprocessor-based and Intell. Systems Eng., vol 24. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Fernández-Madrigal, J.A., C. Galindo and J. González (2004). Assistive navigation of a robotic wheelchair using a multihierarchical model of the environment. *Integrated Computer-Aided Eng.* 11, 309–322.
- Fernández-Madrigal, J.A., C. Galindo, J. González, E. Cruz and

- A. Cruz (2007). A software engineering approach for the development of heterogeneous robotic applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (4), 333–342.
- Fioretti, S., T. Leo and S. Longhi (2000). A navigation system for increasing the autonomy and the security of powered wheelchairs. *IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering*.
- Fong, T.W. and C. Thorpe (2001). Vehicle teleoperation interfaces. *Autonomous Robots* **11**(1), 09–18.
- Fong, T.W. and C. Thorpe (2002). Robot as partner: Vehicle teleoperation with collaborative control. In: *In Proceedings of the NRL Workshop on Multi-Robot Systems*. pp. 195–202.
- Galindo, C., J. Gonzalez and J.A. Fernández-Madrigal (2006). A control architecture for human-robot integration: Application to a robotic wheelchair. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B* (5), 1053–1067.
- Galindo, C., J.A. Fernández-Madrigal and J. González (2004). Hierarchical task planning through world abstraction. *IEEE Trans. on Robotics* **20**(4), 667–690.
- Galindo, C., J.A. Fernández-Madrigal and J. Gonzalez (2007). *Multiple Abstraction Hierarchies for Mobile Robot Operation in Large Environments*. Studies in Computational Intelligence, Vol. 68. Springer Verlag.
- Goetz, J. and S. Kiesler (2002). Cooperation with a robotic assistant. In: *CHI '02: Extended abstracts on Human factors in computing systems*. ACM Press. New York, NY, USA. pp. 578–579.
- Harnand, S. (1987). *Psychological and Cognitive Aspects of Categorical Perception: A Critical Overview*. Harnand S. (ed.), New York, Cambridge University Press, Chapter 1.
- Hirtle, S.C. and J. Jonides (1985). Evidence of hierarchies in cognitive maps. *Memory and Cognition* **13**(3), 208–217.
- Hoyer, H., R. Hoelper, U. Borgolte, C. Bühler, H. Heck, W. Humann, I. Craig, R. Valleggi and A.M. Sabatini (1995). The omni wheelchair with high manoeuvrability and navigational intelligence. In: *2nd TIDE Congress in Rehabilitation Technology*. Brussels, Belgium.
- Jörg, H. and N. Bernhard (2001). The ff planning system: Fast plan generation through heuristic search. *J. of Art. Intell. Research* **14**, 253–302.
- Khatib, O. (2002). Human-centered robotics and haptic interaction: From assistance to surgery, the emerging applications. In: *Third International Workshop on Robot Motion and Control*. pp. 137–139.
- Kuipers, B.J. (1983). *The Cognitive Map: Could it Have Been Any Other Way? Spatial Orientation: Theory, Research, and Applications*. Plicks H.L. and Acredolo L.P. and New York, Plenum Press.
- Kuruparan, J., T. Jayanthan, V. Ratheeskanth, S. Denixavier and S.R. Munasinghe (2006). Semiautonomous low cost wheelchair for elderly and disabled people. In: *ICIA 2006. International Conference on Information and Automation, 2006*.
- Levine, S., D. Bell, L. Jaros, R. Simpson, Y. Koren and J. Borenstein (1999). The navchair assistive wheelchair navigation system. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering* **7**(4), 443–451.
- Mazo, M. and the Research Group of the SIA-MO Project (2001). An integral system for assisted mobility. *IEEE Robotics and Automation Magazine*.
- Morioka, K., J.H. Lee and H. Hashimoto (2002). Human centered robotics in intelligent space. In: *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC*.
- Prassler, E., J. Scholz and P. Fiorini (2001). A robotic wheelchair for crowded public environments. *IEEE Robotics and Automation Magazine*.
- Scholtz, J. (2003). Theory and evaluation of human-robot interaction. 36th International Conference on System Sciences, Hawai. pp. 1–10.
- Tahboub, K.A. (2001). A semi-autonomous reactive control architecture. *Intelligent Robotics Systems* **32**(4), 445–459.