

Diseño de un bastón robotizado para asistencia a personas con discapacidades

Matías Monllor¹, Flavio Roberti^{1,2}, Anselmo Frizzera Neto³, Juan Marcos Toibero^{1,2}, Ricardo Carelli^{1,2}

¹Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan – CONICET, Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

³Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil
matias.monllor@outlook.com, {froberti,mtoibero,rcarelli}@inaut.unsj.edu.ar, anselmo@ele.ufes.br

Resumen-Actualmente se observa un incremento porcentual de la población con problemas de discapacidad motora además de sensorial y cognitiva debido a la existencia cada vez mayor de personas ancianas. Existen dispositivos mecánicos para su asistencia, siendo el más usado el bastón. En este trabajo se propone aplicar tecnologías del área de la robótica para desarrollar un bastón robotizado considerando la hipótesis que el mismo resulta más eficiente al facilitar e inducir una marcha más normal, y atender simultáneamente discapacidades sensoriales y cognitivas.

I. INTRODUCCIÓN

Debido a la existencia cada vez mayor de personas con discapacidades y personas ancianas [1], se incrementa la necesidad de sistemas de apoyo y de cuidado para estas personas. Considerando que el caminar es una de las actividades más importantes de la vida diaria del hombre, debe prestarse especial atención a este tipo de discapacidad, habiéndose desarrollado dispositivos para asistir a la marcha humana. De esta manera se puede proveer mayor autonomía a personas ancianas o con discapacidad mejorando de este modo su calidad de vida, o bien proveerles de un medio eficiente de rehabilitación. Las personas ancianas sufren de deficiencia motriz en las extremidades debido a razones neurológicas o a debilitamiento muscular. Como el número relativo de ancianos crece en la población actual, eso incrementa el número de personas que requieren de esta asistencia. Existen distintos tipos de dispositivos para la asistencia motora, dependiendo el nivel de asistencia requerida, pudiendo mencionarse muletas, andadores, bastones y sistemas *vestibles* (exoesqueletos). Los sistemas de asistencia a la marcha son usados para brindar equilibrio, apoyo, rehabilitación y entrenamiento. Los bastones son también usados para personas con discapacidad visual. El desarrollo reciente de las tecnologías robóticas ha permitido su aplicación a estos dispositivos para convertirlos en inteligentes o robotizados, lo que permite obtener ventajas en la asistencia o rehabilitación de las personas con discapacidad [2-6]. Estos sistemas inteligentes, aplicados a la asistencia o rehabilitación de la marcha, son capaces de brindar mejor desempeño, facilitar una marcha más natural y generar condiciones para la seguridad del paciente. Asimismo estos dispositivos robotizados pueden brindar asistencia personas con discapacidades sensoriales y cognitivas, además de motoras, situación que es común en las personas ancianas.

Se han desarrollado numerosos sistemas inteligentes de apoyo a la marcha. Los exoesqueletos [7-8] asisten a la marcha soportando parcialmente el peso y aumentando las capacidades motoras. Estos dispositivos están actualmente limitados al uso clínico. En cuanto a andadores inteligentes pueden mencionarse [9-11], donde se presentan desarrollos tecnológicos capaces de asistir a personas con dificultades motoras y colaborar también en su proceso de rehabilitación.

Los dispositivos más comúnmente usados como apoyo a la marcha, debido entre otras cosas a su mayor aceptación psicológica, son los bastones [12], y los mismos tienen aplicación para personas que requieren asistencia con un nivel bajo de cuidados, pero necesitan mejorar su calidad de vida o acelerar su rehabilitación. La bibliografía relativa a bastones robotizados es más escasa que la referida a otros dispositivos de asistencia. Sin embargo hay algunos desarrollos destacados orientados a la asistencia de personas con discapacidades motoras [13-14], incluyendo la detección y prevención de caídas, como así también orientados a la asistencia de personas ciegas [15-16]. En un trabajo reciente [17] se plantea la posibilidad de combinar ambos tipos de asistencia en un solo dispositivo, pero se presenta solo como una idea sin mostrar desarrollos concretos al respecto. Cabe destacar que los antecedentes encontrados en la literatura respecto de bastones robotizados muestran dispositivos de laboratorio sin validación experimental con personas con discapacidad.

En este trabajo se propone desarrollar un bastón robotizado que permita realizar un estudio de factibilidad o viabilidad, en condiciones de laboratorio, de aplicar este tipo de tecnología de asistencia a personas con discapacidades motoras, sensoriales y/o cognitivas. El dispositivo robotizado de apoyo a la marcha dispondrá de una base móvil, un sistema sensorial que permita interpretar las intenciones del usuario, y un sistema de control que regule la navegación del dispositivo en función de las intenciones interpretadas. Hay que destacar que el desarrollo presentado se corresponde con la primera etapa de un proyecto más ambicioso que apunta a la obtención de un prototipo de bastón robotizado que pueda ser efectivamente usado por personas con discapacidades motoras, sensoriales y/o cognitivas.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sección II se presenta la construcción del dispositivo de asistencia, mientras que en la Sección III se aborda la

definición de los modelos de interacción humano-robot. En la Sección IV se muestran los resultados experimentales, y finalmente, en la Sección V se comentan las conclusiones y trabajos futuros.

II. CONSTRUCCIÓN DEL BASTÓN ROBOTIZADO

En esta sección se presentarán las distintas partes que constituyen el bastón robotizado, y se detallará el modo de funcionamiento de cada una de ellas.

El bastón desarrollado puede dividirse en tres secciones principales. Una parte superior: que incluye la empuñadura y un sistema sensorial basado en sensores de fuerza; una parte media: que posee el sensor de posición angular, la etapa de adaptación de señal de los sensores de fuerzas y de posición angular, y el sensor laser; y por último una base que incluye a la plataforma móvil y un computador abordo.

A. Parte Superior

La parte superior es la encargada de interactuar con el usuario. A través de ella se comanda el bastón, y la persona obtiene el apoyo necesario para caminar y desplazarse. Se pueden identificar los siguientes elementos, tal como muestra la Fig. 1:

- 1) Empuñadura del bastón.
- 2) Divisor de fuerza vertical.
- 3) Sensor de fuerza vertical f_v .
- 4) Sensor de fuerza horizontal hacia adelante f_{h1} .
- 5) Sensor de fuerza horizontal hacia atrás f_{h2} .

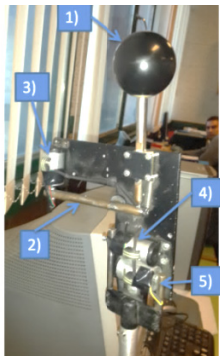


Figura 1. Parte superior del bastón robotizado.

Mediante la empuñadura el usuario dirige el bastón indicándole cuándo avanzar, cuándo frenar, la dirección en que quiere desplazarse. Además cumple con la función principal del bastón, es decir que es el punto de apoyo complementario cuando el usuario está desplazando su pierna sana.

El divisor de fuerza horizontal divide la fuerza aplicada en tres, esto permite ampliar la cota superior de fuerza máxima aplicada, pudiendo medir el triple de fuerzas aplicadas. Esto permite al momento de la toma de decisiones interpretar si la persona se está apoyando sobre el bastón o está teniendo un problema de equilibrio.

Los sensores de fuerza se encargan de medir la fuerza de referencia aplicada por el usuario. La fuerza de referencia es

utilizada para generar una acción de control de velocidad lineal para la plataforma móvil, lo que se explicará en detalle en la Sección III.

Los sensores elegidos para realizar las mediciones de las fuerzas aplicadas en las diferentes direcciones son los FlexiForce. Esto se debe a su gran linealidad, fácil acondicionamiento de señal y el bajo costo. El sensor FlexiForce es un circuito impreso ultra-delgado y flexible que se puede integrar fácilmente en la mayoría de las aplicaciones. Con su construcción fina como el papel, su flexibilidad y la capacidad de medición, el sensor de fuerza FlexiForce puede medir la fuerza entre casi cualquier par de superficies y es lo suficientemente resistente para soportar la mayoría de los entornos. El "área de detección activa" es un círculo de 0,375 pulgadas de diámetro en el extremo del sensor. A continuación se describirá el modo de funcionamiento del sistema sensorial de fuerzas (Fig. 2).

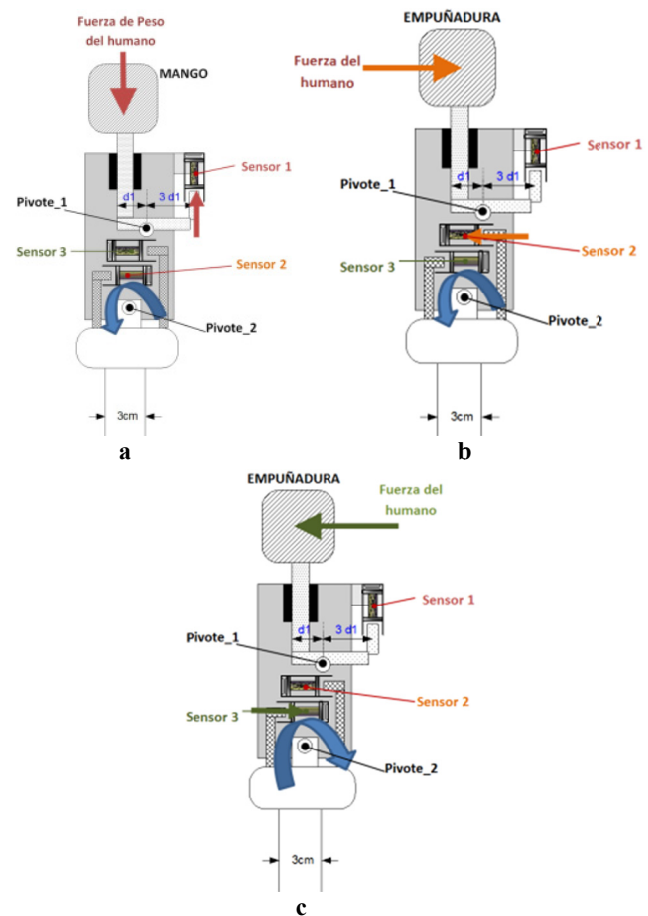


Figura 2. Esquema de funcionamiento del sistema sensorial de fuerzas.

Sensor de fuerza vertical (Fig. 2.a): Cuando el usuario apoya el peso de su cuerpo sobre el mango, produce una fuerza hacia abajo, la cual mediante el Pivote 1 genera una fuerza hacia arriba en el otro extremo de la barra que presiona el sensor 1.

El mango tiene una guía que solo le permite desplazarse verticalmente.

Sensor de fuerza horizontal hacia adelante (Fig. 2.b): Cuando el usuario empuja el mango se produce una fuerza hacia adelante, la cual mediante el Pivote 2 genera un movimiento de giro (sentido anti horario) que presiona el sensor 2.

Sensor de fuerza horizontal hacia atrás (Fig. 2.c): Cuando el usuario jala el mango se produce una fuerza hacia atrás, la cual mediante el Pivote 2 genera un movimiento de giro (horario) que presiona el sensor 3.

B. Parte Central

Sobre la plataforma móvil se encuentra la base del bastón, que incluye el sensor de posición angular y la etapa de adaptación de señales, y el sensor láser, los que pueden ser apreciados en la Fig. 3:

- 6) Sensor de posición angular θ .
- 7) Etapa de adaptación de señal de los sensores de fuerzas y de posición angular.
- 8) Conexión de los sensores de fuerza a la base.
- 9) Sensor Laser.

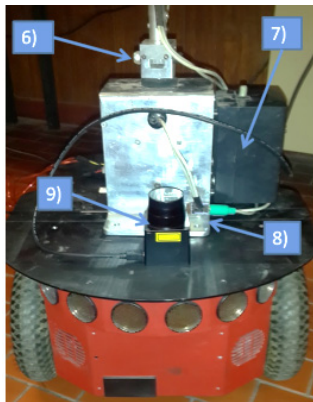


Figura 3. Parte central del bastón robotizado.

El sensor de posición angular es el encargado de medir el giro que el usuario desea respecto a su desplazamiento actual, como así también el estado del giro, esto permite que el desplazamiento sea fluido. Este sensor se implementó con un potenciómetro lineal de 270° colocado al final del bastón. Está montado sobre una estructura metálica, la cual lo soporta en la posición correcta. Posee una vara que une el potenciómetro con el soporte donde se coloca la parte superior y además posee dos topes para marcar el final de carrera del potenciómetro (Fig. 4).

La etapa de adaptación de señales se encarga de medir y acondicionar la señal analógica producida por los sensores, convirtiéndola en una señal digital, la cual responde de forma lineal a las fuerzas aplicadas y el giro deseado. La conversión es realizada por un micro-controlador PIC de la familia 18F, con una resolución de 8 bits, suficiente para poder discernir de forma efectiva la fuerza ejercida por el usuario y el ángulo del

giro. La señal es convertida en el momento en que es requerida y es enviada a la computadora a través de una conexión USB.

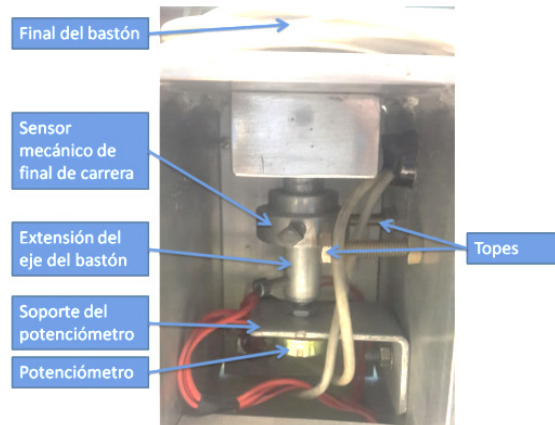


Figura 4. Construcción del sensor de posición angular.

En cuanto al sensor de distancia laser, se seleccionó el Hokuyo URG-04lx-UG01, por ser pequeño, de bajo consumo y alcance máximo de medición de 4 metros, lo que lo hace ideal para su aplicación en el bastón robotizado. El objetivo del láser es proporcionar información sobre el entorno, lo que permite poder generar ayuda a las personas con discapacidades sensoriales o disminuciones de sus capacidades cognitivas. Este sensor laser realiza un barrido de 240° sobre un plano paralelo al suelo, ubicando los cero grados en el frente del robot y un desplazamiento de 120° hacia cada lado, midiendo la distancia que existe hasta un posible obstáculo. Esto permite identificar el entorno, pudiendo tomar decisiones sobre la marcha del robot y las correspondientes acciones de control. La medición se realiza de forma radial con centro en el láser, la genera un par de vectores de distancia y posición angular.

Cabe destacar que si bien el sensor laser ha sido adecuadamente integrado al dispositivo de asistencia, aun no se han implementado los algoritmos correspondientes que permitan al bastón robotizado tomar acciones en función de la información recolectada.

C. Parte Inferior

La plataforma móvil El Robot es la encargada de realizar el movimiento en función de las acciones de control provistas por la computadora.

La computadora es donde se recopila a información de todos los sensores utilizados: sensores de fuerza y de posición angular, el sensor láser y todos los datos que provee la plataforma móvil. Con toda esta información se realiza cálculo de las acciones de control, y se genera un archivo con todos los datos obtenidos. Los cuales se utilizan para analizar el funcionamiento del bastón con un grado de exactitud más elevado.

- 10) Computador abordo.
- 11) Plataforma móvil.

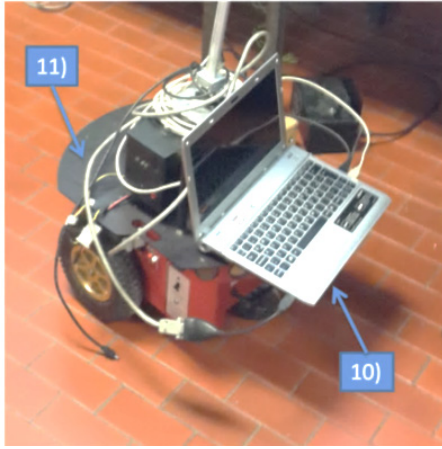


Figura 5. Parte inferior del bastón robotizado.

Como plataforma móvil se utilizó el robot Pioneer 3DX de MobileRobots. Éste es un robot pequeño de arquitectura diferencial, ideal para laboratorios y espacios cerrados. El robot está provisto de un sonar delante (el que no ha sido utilizado en este trabajo), tres baterías, encoders en ambas rueda, un microcontrolador con ARCOS firmware y el avanzado paquete de desarrollo de software de robótica móvil ARIA. Cabe destacar que el robot móvil Pioneer cuenta con lazos de control internos tipo PID, por lo que acepta entradas de referencia en términos de velocidades lineales y angulares.

III. MODELO DE INTERACCIÓN

El objetivo de modelar la interacción entre el humano y el bastón robotizado es que la persona se sienta confortable y le resulte fácil acostumbrarse al dispositivo de asistencia. Además permitirá que la persona pueda sentir la dinámica del sistema cuando interactúe con él. Para ello se propone modelar las velocidades inducidas por el humano empleando un control de impedancia mecánica emulando la dinámica del sistema con una masa m y amortiguamiento d . La intención de movimiento del usuario se estima en función de las fuerzas $f_v, f_h = f_{h1} - f_{h2}$ y del ángulo de orientación θ :

$$\dot{v}(t) m_l + v(t) d_l = g_l(f_h, f_v) \quad (1)$$

$$\dot{\omega}(t) m_r + \omega(t) d_r = \phi_r(\theta, f_v) \quad (2)$$

siendo v y ω las velocidades lineal y angular de la plataforma móvil respectivamente. Por lo tanto, las acciones de control de velocidades lineal y angular que se obtiene despejando v y ω de (1) y (2) respectivamente:

$$v = \frac{g_l(f_h, f_v) - \dot{v} m_l}{d_l} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{\phi_r(\theta, f_v) - \dot{\omega} m_r}{d_r} \quad (4)$$

Entonces, solo resta que el dispositivo de asistencia sea capaz de interpretar adecuadamente las intenciones del usuario, es decir, definir la estructura de las funciones g_l y ϕ_r . Para ellos se proponen dos pares de funciones:

Propuesta 1:

$$g_l(f_h, f_v) = \frac{f_h(t)}{k_v f_v(t) + a_v} \quad (6)$$

$$\phi_r(\theta, f_v) = \frac{-k \theta(t)}{k_v f_v(t) + a_v}$$

Propuesta 2:

$$g_l(f_h, f_v) = f_h(t) \left(1 - \frac{f_v(t)}{f_{vmax}} \right) \quad (7)$$

$$\phi_r(\theta, f_v) = -k \theta(t) \left(1 - \frac{f_v(t)}{f_{vmax}} \right)$$

siendo k_v, a_v, k constantes positivas y f_{vmax} la máxima fuerza vertical para la que el dispositivo de asistencia fue diseñado.

De las expresiones propuestas se observa que el usuario gobernará la velocidad lineal del dispositivo principalmente con la fuerza ejercida en la dirección horizontal f_h , pero esta velocidad estará también afectada (inversamente) por la fuerza ejercida en la dirección vertical f_v . De esta forma, el bastón robotizado tenderá a disminuir su velocidad cuando el usuario ejerza una mayor fuerza vertical, es decir, cuando el usuario necesite un punto de apoyo que le brinde una sensación de seguridad.

Por otro lado, la velocidad angular del dispositivo estará gobernada principalmente por el ángulo θ definido por el usuario. Pero, al igual que en el caso de la velocidad lineal, la velocidad ω estará también afectada (inversamente) por la fuerza ejercida en la dirección vertical f_v , logrando el mismo efecto que el mencionado anteriormente.

IV. EXPERIMENTACIÓN

En esta primera etapa, orientada al estudio de factibilidad de este tipo de dispositivos de asistencia, se probó el bastón robotizado con usuarios que no presentan ningún tipo de discapacidad. Para ello se asignó a las constantes de los modelos de interacción mecánica:

$m_l = 4, d_l = 25, m_r = 3, d_r = 45;$

y a las constantes de las funciones (6) y (7) se les asignó:

$k_v = 2, a_v = 1, k = 1, f_{vmax} = 30 N.$

Se realizaron dos experimentos distintos. Para el primero se adoptó el par de funciones (6) para definir la forma en que el dispositivo de asistencia interpreta la intención del usuario, y los resultados obtenidos se observan en las Fig. 6-8. Por otro lado para el segundo experimento se adoptó el par de funciones (7) y los resultados se muestran en las Fig. 9-11.

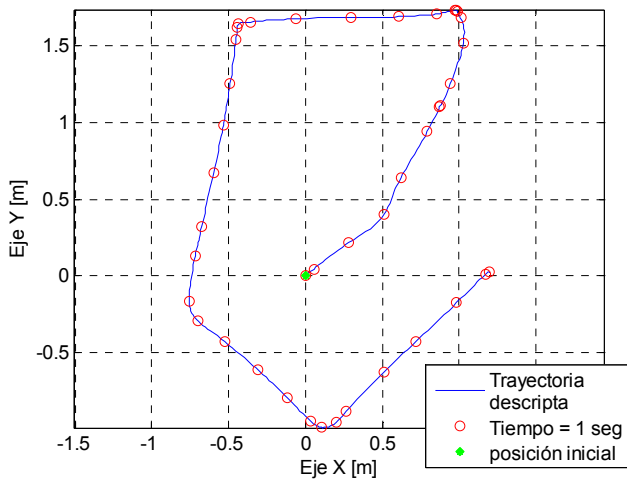


Figura 6. Trayectoria descrita por el bastón robotizado.

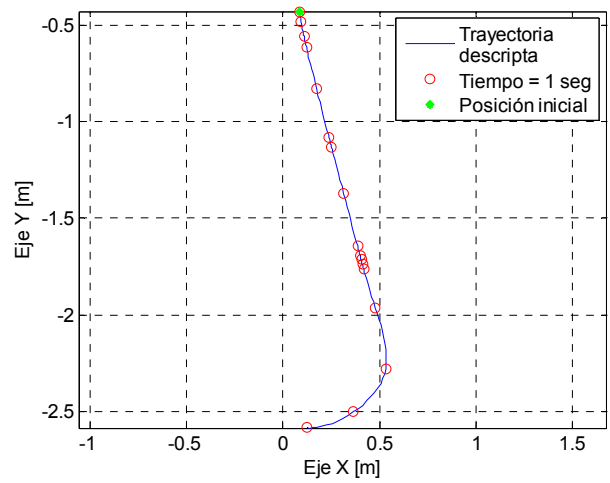


Figura 9. Trayectoria descrita por el bastón robotizado.

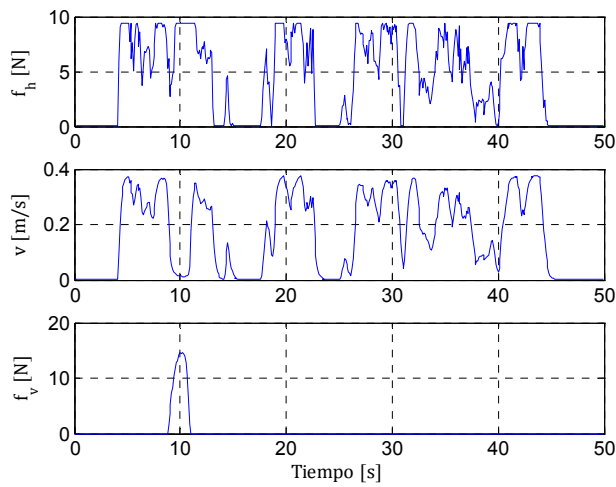


Figura 7. Acción de control para la velocidad lineal y señales intervinientes en el cálculo.

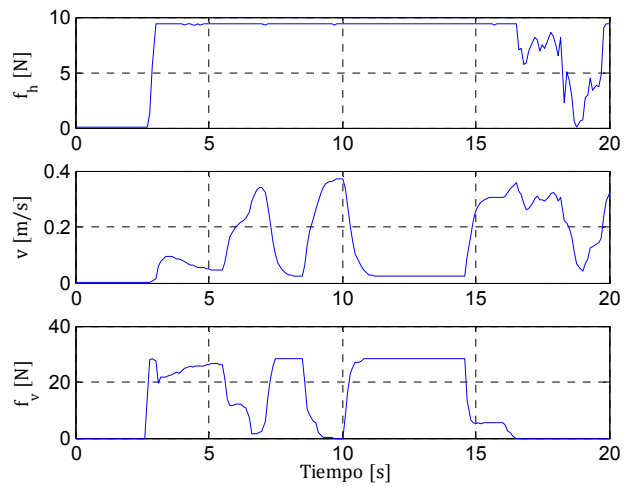


Figura 10. Acción de control para la velocidad lineal y señales intervinientes en el cálculo.

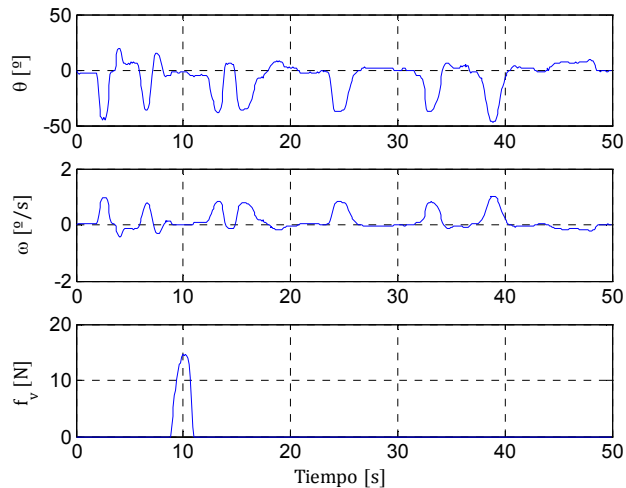


Figura 8. Acción de control para la velocidad angular y señales intervinientes en el cálculo.

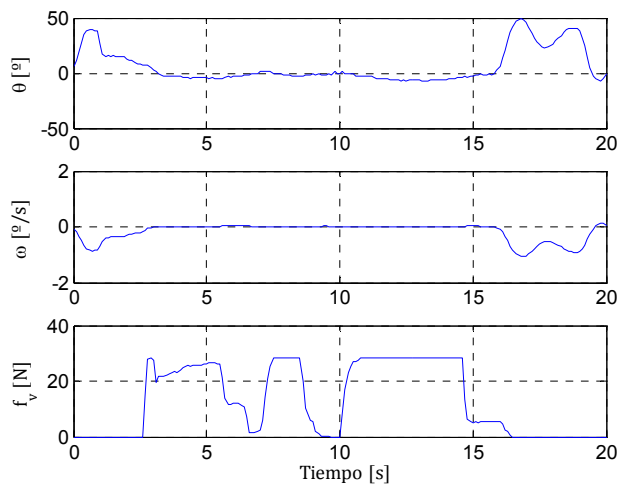


Figura 11. Acción de control para la velocidad angular y señales intervinientes en el cálculo.

En las Fig. 6 y 9 se muestran las trayectorias descritas por el dispositivo para cada uno de los experimentos. En las Fig. 7 y 10 se muestran las fuerzas, horizontal (f_h) y vertical (f_v), ejercidas por el usuario y el comando de velocidad lineal v para cada uno de los experimentos. Y finalmente, en las Fig. 8 y 11 se muestran el ángulo de referencia θ , el comando de velocidad angular ω y la fuerza vertical f_v .

En las gráficas mostradas se aprecia como el bastón robotizado responde a las intenciones del usuario tal como se esperaba. Resulta interesante apreciar que cuando existe una fuerza vertical, las acciones de control bajan su valor considerablemente a pesar de la existencia de fuerza en la dirección horizontal o ángulo de referencia $\theta > 0$.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se presentó el desarrollo preliminar de un bastón robotizado que permite el estudio de factibilidad de aplicar este tipo de tecnologías de asistencia a personas con discapacidades motoras, sensoriales y/o cognitivas. Los resultados de los primeros ensayos con personas sin alteraciones motoras fueron alentadores, mostrando un muy buen desempeño del dispositivo desarrollado.

La próxima etapa del presente trabajo será la construcción de un prototipo de bastón robotizado que incluya una plataforma móvil desarrollada ad-hoc que sea de dimensiones y peso más apropiados para la aplicación. Además incluirá un computador abordo y etapa de adecuación de señales de dimensiones reducidas. Este prototipo contará también con un sensor de fuerza comercial de 6 grados de libertad que permita una mejor identificación de las intenciones del usuario. Finalmente, se trabajará en los algoritmos relacionados al evitado de obstáculos basado en la información provista por el sensor laser y en los algoritmos de prevención de caídas.

REFERENCIAS

- [1] Informe Mundial sobre la Discapacidad, Organización Mundial de la Salud, 2011.
- [2] E. Bayro Kaiser and M. Lawo, "Wearable Navigation System for the Visually Impaired and Blind People", *IEEE/ACIS 11th International Conference on Computer and Information Science*, 2012.
- [3] S. Suzuki, Y. Hirata, K. Kosuge and H. Onodera, "Walking Support based on Cooperation between Wearable-Type and Cane-Type Walking Support Systems", *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Budapest, Hungary, July 3-7, 2011.
- [4] N. Roy, G. Baltus, D. Fox, F. Gemperle, J. Goetz, T. Hirsch, D. Margaritis, M. Montemerlo, J. Pineau, J. Schulte and S. Thrun, "Towards Personal Service Robots for the Elderly", *Workshop on Interactive Robots and Entertainment*, 2000.
- [5] S. Yokota, K. Nagai, K. Morishita, M. Mori, D. Chugo, and H. Hashimoto, "The Assistive Walker using Hand Haptics -The Design of the Prototype", *6th International Conference on Human System Interaction*, Gdansk, Poland, June, 2013.
- [6] M. Lan, A. Nahapetian, A. Vahdatpour, L. Au, W. Kaiser and M. Sarrafzadeh, "SmartFall: An Automatic Fall Detection System Based on Subsequence Matching for the SmartCane", *4th International Conference on Body Area Networks*, May, 2009.
- [7] K. Kyoungchul and J. Doyoung, "Design and control of an exoskeleton for the elderly and patients", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 11, pp. 428-432, 2006.
- [8] K. Yamawaki, R. Ariyasu, S. Kubota, H. Kawamoto, Y. Nakata, K. Kamibayashi, Y. Sankai, K. Eguchi and N. Ochiai, "Application of robot suit HAL to gait rehabilitation of stroke patients: a case study", *Lecture Notes in Computer Science: Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, A. Karshmer, P. Penaz and W. Zagler (Eds.), vol. 7383, pp. 184-187, 2012.
- [9] G-H. Yuk, H-S. Park, B-J. Dan, B-R. Jo and W-S. Chang, "Development of smart mobile walker for elderly and disabled", *22nd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Gyeongju, Korea, August 26-29, 2013.
- [10] S. L. Grondin and Q. Li, "Intelligent Control of a Smart Walker and its Performance Evaluation", *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, Seattle, Washington USA, June 24-26, 2013.
- [11] O-H. Kwon, J-Y. Yang and D-S. Kwon, "An Exercise Motivational System for Walking Rehabilitation using the Smart Walker", *22nd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Gyeongju, Korea, August 26-29, 2013.
- [12] Anuario Estadístico Nacional sobre Discapacidad, Servicio Nacional de Rehabilitación, Ministerio de Salud de la Nación Argentina, 2011.
- [13] S. Nakagawa, P. Di, J. Huang, K. Sekiyama and T. Fukuda, "Control of Intelligent Cane Robot Considering Usage of Ordinary Cane", *22nd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Gyeongju, Korea, August 26-29, 2013.
- [14] R. Ady, W. Bachtá and P. Bidaud, "Analysis of cane-assisted walking through nonlinear optimization", *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013.
- [15] R. Pyun, Y. Kim, P. Wespe, R. Gassert and S. Schneller, "Advanced Augmented White Cane with Obstacle Height and Distance Feedback", *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, Seattle, Washington USA, June 24-26, 2013.
- [16] I. Ulrich and J. Borenstein, "The GuideCane—Applying Mobile Robot Technologies to Assist the Visually Impaired", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, vol. 31, N° 2, 2001.
- [17] K. Wakita, J. Huang, P. Di, K. Sekiyama, and T. Fukuda, "Human-Walking-Intention-Based Motion Control of an Omnidirectional-Type Cane Robot", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, N° 1, 2013.