

MOVILIDAD PARA INVIDENTES UTILIZANDO EL GPS DEL TELÉFONO INTELIGENTE Y UN DISPOSITIVO TÁCTIL VESTIBLE

Ramiro Velázquez-Guerrero¹, Edwige Pissaloux², Carolina Del-Valle-Soto³, Miguel-Ángel Carrasco-Zambrano⁴, Abraham Mendoza-Andrade³, Jorge Varona-Salazar¹

¹ Universidad Panamericana. Facultad de Ingeniería, Aguascalientes, Ags., 20290, México.

² Université de Rouen Normandie. Laboratoire LITIS, 76800 Saint-Étienne-du-Rouvray, France.

³ Universidad Panamericana. Facultad de Ingeniería, Zapopan, Jal., 45010, México.

⁴ Universidad Adolfo Ibáñez. Facultad de Ingeniería y Ciencias, Peñalolén, Santiago 7941169, Chile.

Tfno: +52 449 9106200. rvelazquez@up.edu.mx

Recibido: DD/MM/AA – Revisado: DD/MM/AA -- Aceptado: DD/MM/AA - DOI: <https://dx.doi.org/10.6036>(A cumplimentar por el Editor)

MOBILITY OF BLIND PEOPLE USING THE SMARTPHONE'S GPS AND A WEARABLE TACTILE DISPLAY

ABSTRACT:

This paper presents a novel wearable system devoted to assist the mobility of blind and visually impaired people in urban environments with the simple use of a smartphone and tactile feedback. The system exploits the positioning data provided by the smartphone's GPS sensor to locate in real-time the user in the environment and to determine the directions to a destination. The resulting navigational directions are encoded as vibrations and conveyed to the user via an on-shoe tactile display. To validate the pertinence of the proposed system, two experiments were conducted. The first one involved a group of 20 voluntary normally sighted subjects that were requested to recognize the navigational instructions displayed by the tactile-foot device. The results show high recognition rates for the task. The second experiment consisted of guiding two blind voluntary subjects along public urban spaces to target destinations. Results show that the task was successfully accomplished and suggest that the system enhances independent safe navigation of people with visual impairments. Moreover, results show the potentials of smartphones and tactile-foot devices in assistive technology.

Keywords: assistive technology, GPS localization, mobility of blind people, tactile-foot stimulation, vibrotactile display, wearable system.

RESUMEN:

Este artículo presenta un novedoso sistema vestible destinado a asistir la movilidad de personas invidentes y débiles visuales en entornos urbanos mediante el simple uso de un teléfono inteligente y retroalimentación táctil. El sistema utiliza los datos de posicionamiento provistos por el sensor GPS del teléfono inteligente para localizar en tiempo real al usuario en el espacio y determinar las direcciones hacia un destino. Las instrucciones de navegación resultantes se codifican como patrones de vibración y se despliegan al usuario a través de una interfaz táctil integrada al zapato. Para validar la pertinencia del sistema propuesto, se realizaron dos experimentos. El primero involucró la participación de un grupo de 20 sujetos voluntarios visualmente sanos a los que se les pidió reconocer las instrucciones de navegación desplegadas mediante el dispositivo de estimulación podotáctil. Los resultados muestran altas tasas de reconocimiento. El segundo experimento consistió en conducir a dos sujetos voluntarios invidentes a lo largo de espacios públicos urbanos hacia destinos previamente establecidos. Los resultados fueron exitosos y sugieren que el sistema incrementa la navegación independiente y de forma segura de personas con discapacidad visual. A su vez, se muestra el potencial de los teléfonos inteligentes y los dispositivos podotáctiles en las tecnologías de asistencia.

Palabras clave: tecnologías de asistencia, localización GPS, movilidad de personas invidentes, estimulación podotáctil, interfaz vibrotáctil, sistema vestible.

1.- INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de asistencia a la navegación de personas con discapacidad visual han sido tema de estudio por décadas.

La movilidad humana presenta dos procesos distintos que son fundamentales para el diseño de sistemas de asistencia a la navegación de invidentes: la captación del entorno próximo y la orientación durante el desplazamiento [1]. Mientras que el primero se refiere a la recopilación de información espacial para la detección de obstáculos, el segundo involucra la localización de la persona en la ruta y la asistencia continua para llegar a un destino.

Sistemas que abordan los dos procesos han sido recogidos en la literatura.

Los primeros ejemplos de sistemas de detección de obstáculos se pueden encontrar en la década de los 70s cuando la tecnología sonar estaba en auge [2]. Poco después, los sistemas basados en sonares evolucionaron a emplear sensores ultrasónicos para mejorar la precisión de medición de la distancia a la que se localiza un obstáculo [3]. Los telémetros láser también han sido utilizados para detectar obstáculos enfrente del usuario [4]. Recientemente, las cámaras de video conjuntamente con técnicas de visión por computadora se han empleado para encontrar obstáculos y espacios libres de obstáculos en el entorno próximo [5].

Por su parte, los sistemas de localización y orientación se pueden clasificar en dos categorías: para ambientes interiores y para exteriores. Actualmente no existe ninguna tecnología que por sí sola pueda ofrecer una solución para ambos. La mayoría de los sistemas de asistencia a la navegación de exteriores utilizan GPS (Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés) y han facilitado la movilidad de personas invidentes en ambientes exteriores. La principal desventaja del GPS es que las señales satelitales se debilitan significativamente en ambientes interiores debido a que los edificios o sus estructuras bloquean la línea de vista entre el satélite y el receptor. Todas las soluciones propuestas para ambientes interiores están basadas en radiofaros (beacons) que emiten señales de baja potencia y de alcance limitado. Etiquetas RFID [6], sensores infrarrojos [7], dispositivos de comunicación inalámbrica (ZigBee, Bluetooth, WiFi, etc.) [8], entre otros, han sido explorados para implementar una red de radiofaros que cubra eficientemente la totalidad de una ruta de viaje.

A pesar de los esfuerzos realizados en investigación y de la variedad de planteamientos tecnológicos existentes, los dispositivos de asistencia a la navegación no se han popularizado y su uso es de hecho bastante bajo. Varias desventajas se pueden encontrar tanto en los sistemas de detección de obstáculos como en los de localización [9]:

- (1) Las tecnologías para la detección de obstáculos involucran operaciones complejas, continuas y que consumen tiempo: la exploración del ambiente requiere de un escaneo activo con el dispositivo por parte del usuario. La información recopilada debe ser analizada antes de tomar una decisión: actividad física y esfuerzo cognitivo constante que reducen la velocidad al caminar y fatigan rápidamente al usuario.
- (2) La retroalimentación acústica de estos sistemas interfiere con la habilidad natural que la persona invidente tiene de recopilar señales sonoras del ambiente. Mientras que los sistemas de detección de obstáculos emiten típicamente diferentes tonos de frecuencia para indicar la distancia a un obstáculo, los sistemas de localización proveen instrucciones de voz para guiar al usuario a lo largo de un trayecto.
- (3) Los tiempos de aprendizaje y entrenamiento para dominar la mayoría de estos sistemas son considerables. Las personas invidentes invierten tiempos significativos para acostumbrarse al dispositivo y entender totalmente la retroalimentación que se les provee, lo cual es ciertamente frustrante y desalentador.
- (4) Siguen siendo voluminosos y visibles. El uso de dispositivos portátiles o vestibles (wearables) es una necesidad esencial para las personas invidentes.

Estas desventajas sin duda limitan la obtención de mejores resultados en comparación con las ayudas primarias (bastón y perro guía).

Décadas de investigación y la gran variedad de prototipos académicos y productos comerciales han demostrado que cualquier intento de reemplazar las ayudas primarias ha fracasado. Uno debería cuestionarse si no es más pertinente diseñar sistemas complementarios a las ayudas primarias que seguir intentando reemplazarlas.

Este artículo presenta un sistema de asistencia a la navegación en ambientes exteriores que se complementa con las ayudas primarias al confiarles la captación del entorno próximo al usuario. La localización se lleva a cabo mediante datos GPS provistos por un teléfono inteligente (Smartphone), los cuales se procesan en bases de datos espaciales para el cómputo de rutas óptimas de viaje. La conducción o guía del usuario se logra mediante sensaciones mecanotáctiles que el sistema entrega al pie para indicar la dirección a seguir. Este sistema aborda los cuatro retos principales antes mencionados: (1) el proceso de detección de obstáculos se realiza mediante la tradicional y muy eficaz retroalimentación háptica del bastón y el perro guía, (2) se utiliza retroalimentación táctil para evitar la distracción del usuario de su ambiente, (3) dicha retroalimentación es simple, fácil de entender y provee solo información esencial y cuando se requiere, lo que reduce los tiempos de aprendizaje y entrenamiento, (4) el dispositivo es totalmente vestible.

La idea de utilizar tecnología GPS para asistir la navegación de personas invidentes se introdujo por primera vez a mediados de la década de los 80s. Loomis propuso en [1] el primer diseño funcional con tres módulos principales: un receptor GPS que calcula la posición del usuario (longitud/latitud/altitud), un Sistema Geográfico de Información (GIS, por sus siglas en inglés) que comprende el programa que recibe, analiza, manipula y almacena las coordenadas GPS y una interfaz para presentar la información al usuario.

La retroalimentación acústica ha sido ampliamente explorada en las interfaces de usuario. Productos comerciales que emplean GPS e instrucciones verbales a través de sintetizadores de voz aparecieron con el desarrollo del GPS. Dispositivos como el Strider (1994), el Atlas (1995), el GPS-talk (2000) y el BrailleNote (2001), todos productos de la compañía Sendero Group, incluían en su GIS mapas detallados de ciudades de EEUU con calles y puntos de interés y proveían instrucciones verbales para llegar al destino deseado [10]. El producto más reciente de Sendero Group es el Seeing Eye GPS (2013), una aplicación GPS/GIS para teléfonos inteligentes. Un producto similar de la compañía Humanware es el Trekker Breeze [11], un dispositivo portátil con GPS/GIS e instrucciones verbales que incluye información urbana como nombres de calles, puntos de interés y servicios públicos alrededor de la ubicación del usuario. Varios proyectos de investigación empleando diferentes arquitecturas electrónicas y conceptos de GIS también han recurrido a las instrucciones verbales para asistir la navegación de invidentes [12-14].

La asistencia a la navegación basada en retroalimentación háptica es menos común. Rodríguez presentó en [15] un prototipo de perro guía basado en un dispositivo háptico kinestésico y háptica pasiva. Pielot introdujo en [16] el PocketNavigator, una aplicación para teléfonos inteligentes con sistema operativo Android que emplea retroalimentación vibrotáctil para proveer información útil para la navegación. Similarmente, Jacob diseñó una aplicación Android que utiliza algoritmos y servicios web que calculan la ruta entre dos puntos para proporcionar información de navegación a través de las vibraciones del teléfono inteligente [17]. Un segundo prototipo de Pielot, el Tactile Wayfinder, consiste de una interfaz en forma de cinturón que se ajusta a la cintura del usuario para proveer direcciones a través de vibraciones [18]. Spiers comparó en [19] la navegación GPS bajo dos modalidades hápticas: vibrotáctil y forma dinámica con dos interfaces novedosas, el Cricket y el Animotus, para guiar a participantes voluntarios a su destino.

Esta breve revisión de la literatura muestra que la combinación de sistemas GPS y dispositivos hápticos ha sido considerada para asistir la navegación de personas invidentes. Sin embargo, la mayoría de las interfaces hápticas requieren de una interacción constante con las manos ya sea para recibir la retroalimentación o para transportar el dispositivo. Esto tiene dos limitantes: los usuarios se fatigan rápidamente de cargar o llevar el dispositivo con las manos y el tener las manos ocupadas limita sin duda el uso de las ayudas primarias. En este artículo, se propone una nueva interfaz de usuario para el pie totalmente vestible y que aborda este problema al proveer una interacción que no necesita de las manos.

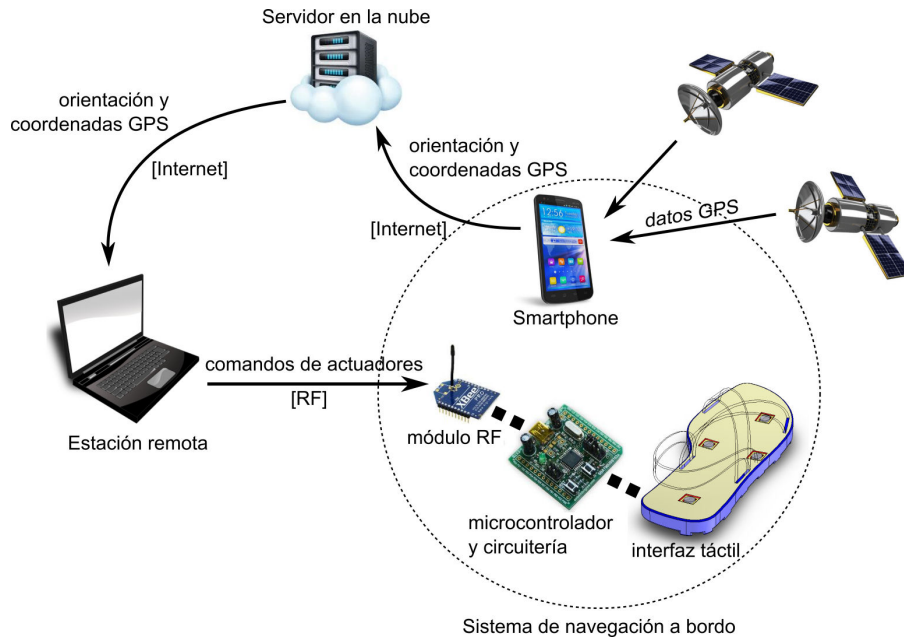
2.- MATERIALES Y METODOS

El sistema presentado en este trabajo fue diseñado para satisfacer las necesidades de navegación de personas invidentes en ambientes exteriores y está basado en el diseño modular de Loomis [1]. La implementación de un primer prototipo totalmente operacional involucró el uso tanto de componentes electrónicos como de programas comerciales.

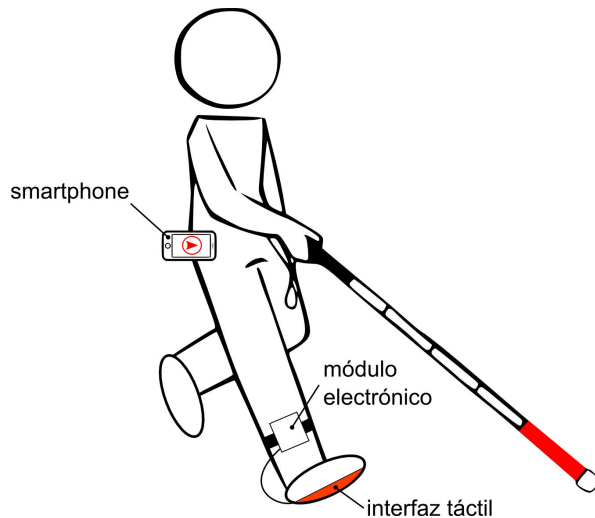
2.1.- LOCALIZACIÓN Y ORIENTACIÓN

El principio de operación y los principales componentes del sistema se muestran en la fig. 1(a).

Los teléfonos inteligentes que contienen GPS, compás digital, acelerómetros, sensores inerciales y capacidades de conectividad se han convertido en candidatos ideales para aplicaciones de cómputo portátiles. Son ahora la solución más común y sencilla de módulos de recepción GPS. En este prototipo se emplea un teléfono inteligente (Samsung Galaxy S5 con sistema operativo Android 4.4.2) para la adquisición de las coordenadas GPS y la orientación del usuario. Aprovechando la conectividad a Internet del teléfono inteligente, la información geoespacial del usuario se transmite a un servidor en la nube. Al recibir los datos, el servidor construye un archivo de texto que contiene la longitud, latitud y orientación del usuario y descarta el resto de la información recibida (como tiempo, altitud, número de satélites, etc.). El teléfono inteligente actualiza la información al servidor a una tasa de 5 Hz, la cual cubre sobradamente cualquier velocidad de caminata.



(a)



(b)

Fig. 1. Sistema de navegación propuesto: (a) componentes principales y principio de operación. (b) Ilustración conceptual de un usuario con el sistema. Tanto el bastón como el perro guía pueden ser usados en conjunto con el sistema.

Vía Internet, una estación remota accede al archivo de texto en el servidor y ubica al usuario en un GIS que se ejecuta localmente. El GIS empleado es OpenStreetMap [20]. Un código dedicado conecta el GIS con la interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) YOURS, una plataforma de código abierto que permite calcular la ruta peatonal más corta entre dos ubicaciones [21]. Los puntos más importantes del trayecto se recuperan de YOURS y se ubican y almacenan en el GIS. Las direcciones para llegar al destino seleccionado se procesan localmente; el GIS no necesita volverse a comunicar con la API de YOURS a menos que se requiera recalcularse la ruta.

Las direcciones se traducen a instrucciones de actuadores, las cuales se transmiten vía RF (radio frecuencia) a un módulo electrónico que el usuario lleva consigo. Las señales finalmente se interpretan por un microcontrolador quien es responsable de encender y apagar los actuadores en la interfaz del usuario. La fig. 1(b) ilustra conceptualmente el uso del sistema por un usuario invidente.

2.2.- INTERFAZ DEL USUARIO

Una interfaz vibrotáctil despliega al usuario las instrucciones de navegación para llegar a su destino. La principal novedad de este concepto es que dichas instrucciones se proporcionan vía estimulación podotáctil.

Basándose en la fisiología de la planta del pie [22], una interfaz táctil que consiste de cuatro actuadores fue diseñada para estimular los mecanorreceptores sensibles a vibraciones en las áreas medial, lateral y tibial de la planta del pie (Fig. 2(a)).

La Fig. 2(b) muestra el prototipo desarrollado. Este dispositivo integra cuatro actuadores vibradores en una plantilla de espuma disponible comercialmente a un bajo coste. Los actuadores proveen fuerzas axiales de hasta 13 mN y frecuencias de vibración entre 10 y 55 Hz. Cada actuador puede ser controlado en frecuencia de manera independiente.

La superficie de los actuadores ha sido cubierta por una pasta epóxica. Cada punto asegura una superficie de contacto de 133 mm² con la planta del pie. Las vibraciones de los actuadores se transmiten correctamente a través de esta pasta mientras que las características naturales de absorción de la espuma previenen de tener un efecto expansivo de las vibraciones a lo largo de la plantilla.

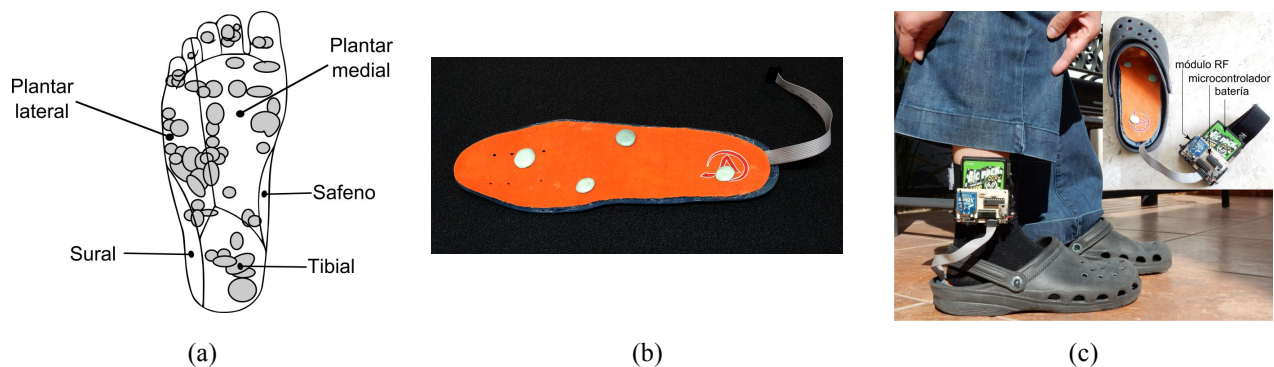


Fig. 2. Interfaz del usuario: (a) Distribución de los mecanorreceptores sensibles a la estimulación vibrotáctil en la planta del pie [22]. (b) Prototipo. (c) Dispositivo vestible con conexión inalámbrica.

La interfaz está destinada para usarse en el pie derecho y es completamente vestible (Fig. 3(c)). Todos los componentes de la interfaz como la batería, el módulo de transmisión RF y la circuitería de control están incluidos en un módulo electrónico que el usuario lleva confortablemente en su tobillo. El banco de baterías recargables de níquel-metal hidruro (Radio Shack 23-338) es capaz de proveer 6 V y 1500 mAh. Pruebas experimentales revelan que, a carga completa, permite una autonomía de 6 h. Por su parte la transmisión RF se asegura con un módulo X-Bee (Digi WRL-12571) de 2.4 GHz que permite una distancia de comunicación en línea de vista de hasta 200 m con la estación remota. Note que la plantilla se puede insertar dentro del zapato y el módulo electrónico se puede cubrir con la ropa del usuario volviéndose así un dispositivo discreto y visualmente imperceptible. El coste aproximado de este prototipo de laboratorio es de tan solo 200 €.

Este dispositivo es la tercera versión de interfaces táctiles para el pie que se ha desarrollado e incorpora las mejoras tecnológicas y de representación táctil de los dos prototipos previos [23, 24].

3.- RESULTADOS

Con el fin de evaluar el desempeño del sistema, se realizaron dos experimentos con participantes voluntarios. Ambos se describen a continuación.

3.1.- EXPERIMENTO I: RECONOCIMIENTO DE DIRECCIONES

El propósito del primer experimento fue determinar si el grupo de participantes era capaz de discernir las instrucciones de navegación desplegadas en sus pies.

3.1.1.- Participantes y procedimiento experimental

Veinte estudiantes de pregrado (15 hombres y 5 mujeres) de la Universidad Panamericana (México) participaron voluntariamente en este experimento. Todos dieron su consentimiento de acuerdo a los lineamientos éticos de la universidad. Ningún criterio en particular fue empleado para seleccionarlos salvo su disponibilidad. Todos los participantes eran personas visualmente sanas y no manifestaron tener alguna discapacidad (conocida) en su sentido del tacto, en sus pies, o en sus funciones cognitivas. Sus edades oscilaban entre los 18 y 24 años con una edad promedio de 20.5.

Durante el experimento, los participantes permanecieron sentados usando la interfaz táctil en su pie derecho. Por higiene, se les pidió utilizar calcetines. Antes del experimento, los participantes no conocían ningún aspecto de la tarea encomendada, por lo que se les dieron instrucciones generales. Se les permitió un tiempo corto de familiarización con la interfaz antes de la prueba. Durante este tiempo, los participantes probaron distintas frecuencias de vibración y tuvieron la oportunidad de elegir la que preferían. Los 20 participantes optaron por 55 Hz, la frecuencia máxima de vibración de los actuadores.

Un asistente de investigación era responsable de manejar la estación remota y enviar las instrucciones a la interfaz del usuario. El teléfono inteligente, el servidor en la nube y el programa de navegación no fueron requeridos para esta prueba.

3.1.2.- Método

Cada uno de los cuatro puntos de contacto de la interfaz representaba una dirección de navegación: avanzar (**A**), retroceder (**R**), girar izquierda (**I**) y girar derecha (**D**). Para codificar las instrucciones de navegación se establecieron cinco secuencias (t1-t5): tres vibraciones consecutivas de corta duración del punto de contacto correspondiente, una vibración corta del punto de contacto diametralmente opuesto y de nuevo una vibración corta del punto de contacto correspondiente. La fig. 3 muestra, por ejemplo, la codificación para avanzar. Note que el punto de contacto **A** vibra tres veces, luego **R** y de nuevo **A**.

Una quinta instrucción para ‘detenerse’ (**S**) se codificó encendiendo los cuatro puntos de contacto simultáneamente en dos secuencias cortas de vibración consecutivas, una pausa y de nuevo dos secuencias cortas de vibración (reproduciendo el patrón típico de alerta SMS de los teléfonos móviles).

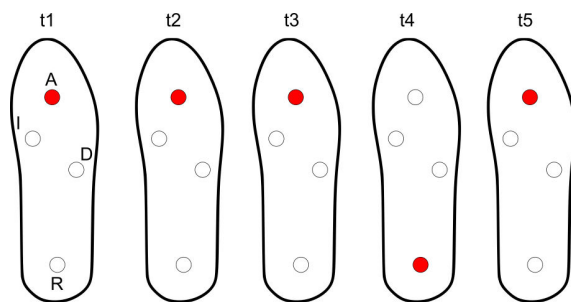


Fig. 3. Secuencia de activación de los puntos de vibración. Ejemplo para Avanzar (A).

Un conjunto de 17 direcciones fue presentado a los participantes durante la prueba: R-A-I-D-S-R-I-A-S-D-I-R-D-A-R-S-I. Se pidió a los participantes indicar verbalmente la dirección percibida. A petición, se podía desplegar de nuevo el patrón de vibración en la interfaz.

3.1.3.- Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en la matriz de confusión de la Tabla I. Las tasas de reconocimiento promedio fueron 100%, 97.78%, 88.89%, 90% y 100% para A, R, I, D y S, respectivamente.

Note las altas tasas de reconocimiento. Éstas se deben principalmente al método optimizado de la fig. 3 para presentar la información táctil en el que se despliega la dirección diametralmente opuesta para indicar una dirección. Al hacerlo, se provee una referencia confiable para facilitar la identificación de puntos de vibración cuando los usuarios no pueden distinguir con precisión cuál actuador está realmente vibrando. Lejos de confundir al usuario, el hecho de desplegar tanto la dirección correcta como la opuesta en el mismo patrón táctil facilita el reconocimiento [24].

		Reportado (%)				
		Avanzar	Retroceder	Izquierda	Derecha	Detenerse
Presentado	Avanzar	100	0	0	0	0
	Retroceder	2.22	97.78	0	0	0
	Izquierda	0	0	88.89	11.11	0
	Derecha	1.67	1.67	6.66	90	0
	Detenerse	0	0	0	0	100

Tabla 1: Tasas de reconocimiento con la interfaz del usuario y el método de representación táctil.

3.2.- EXPERIMENTO II: NAVEGACIÓN EN AMBIENTES EXTERIORES

Los dos objetivos principales de este experimento fueron evaluar el desempeño del prototipo con todos sus módulos y determinar si éste puede realmente asistir la navegación de invidentes en ambientes exteriores.

3.2.1.- Participantes y procedimiento experimental

Este experimento cumple con los criterios éticos de la Universidad Panamericana respecto a la participación de personas con alguna discapacidad física o cognitiva en pruebas científicas.

Dos personas invidentes aceptaron participar en el experimento. Ambos eran hombres adultos con edades de 31 y 35 años. El participante más joven (Participante A) es ciego de nacimiento mientras que el mayor (Participante B) desarrolló retinitis pigmentaria a edad temprana. Ninguno de los dos manifestó tener alguna discapacidad (conocida) en el sentido del tacto, en sus pies, o en sus funciones cognitivas. Ambos pueden considerarse usuarios expertos del bastón pues acreditaron más de 10 años de experiencia en su uso.

Se seleccionaron cuidadosamente dos entornos urbanos en la ciudad de Aguascalientes, México para este experimento. Por razones de seguridad, ambos fueron elegidos por presentar una baja afluencia vehicular. Ambos entornos presentaban tanto obstáculos estáticos como dinámicos causados por objetos y otras personas. Antes del experimento se fijaron puntos de partida y llegada que comprendían distancias de 380 y 420 m.

Durante el experimento, la estación remota fue colocada dentro de un vehículo de baja velocidad que mantenía una distancia adecuada del participante (<200 m) para asegurar la correcta comunicación RF con la interfaz del usuario. Un asistente de investigación procuraba caminar 10 m por delante del participante con el solo propósito de prevenir o intervenir en caso de situaciones de riesgo inesperadas.

Todos los componentes de la fig. 2(a) fueron probados en este experimento.

3.2.2.- Método

Antes de la prueba se aplicó el experimento I a los dos participantes con el fin de que conocieran y se habituaran a las instrucciones de navegación que provee la interfaz táctil.

Los participantes fueron posteriormente transferidos en automóvil a los entornos elegidos, los cuales les eran completamente desconocidos. Se les pidió desplazarse de acuerdo al patrón percibido auxiliándose de su bastón como lo hacen cotidianamente. De igual forma, se les indicó levantar la mano en caso de sentirse perdidos o de necesitar la repetición de la instrucción de navegación. En tal caso, se recalcularía la ruta y se generarían nuevas instrucciones desde la estación remota en el vehículo. Ambos participantes eran conscientes de la presencia del asistente y se les indicó que podían terminar la prueba si en algún momento se sentían inseguros o incómodos.

Las coordenadas GPS y los tiempos de navegación se registraron en el GIS para ambos participantes.

3.2.3.- Resultados

La fig. 4 muestra los entornos urbanos propuestos, así como las trayectorias seguidas por los participantes. Ambos lograron completar correctamente la navegación de los entornos sin presentar errores.

La tarea en el entorno 1 (E-1) consistía en guiar a los participantes a lo largo de una ruta de 380 m desde un punto específico en una calle hasta el atrio de una iglesia (Fig. 4(a)). Un conjunto de 11 instrucciones se desplegó para este propósito. La tarea en el entorno 2 (E-2) comprendía un trayecto de 420 m desde un callejón hasta la esquina de un parque público (Fig. 4(b)). Diecisiete instrucciones se desplegaron a lo largo de la ruta.

La fig. 5 compara las velocidades promedio de caminata observadas en los participantes para cada uno de los entornos. Se registraron velocidades de 1.08 a 1.19 m/s. La velocidad promedio de una persona (visualmente sana) al caminar es de 1.4 m/s lo que sugiere que el dispositivo no reduce el ritmo de la caminata. La navegación de los participantes se llevó a cabo por las aceras excepto para el cruce de calles. A lo largo del trayecto los participantes se encontraron con obstáculos típicos urbanos como postes, árboles y otros peatones. Dichos obstáculos se detectaron y superaron fácilmente con la ayuda del bastón.

Durante el experimento se pudo observar una resolución aproximada de 2 a 5 m en las coordenadas de longitud/latitud GPS. El impacto de la resolución de los datos GPS proporcionados por el teléfono inteligente fue cuantificado mediante la eficiencia del viaje e para cada segmento del trayecto delimitado por instrucciones de navegación (ecuación (1)):

$$e = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{longitud del trayecto}} \quad (1)$$

Las figs. 4(c) y 4(d) muestran los segmentos considerados para ambos entornos E-1 y E-2 mientras que la Tabla 2 resume las eficiencias de viaje obtenidas. Note que los participantes obtuvieron altas tasas de eficiencia de viaje durante todos los segmentos de los trayectos.

E-1	s-p1	p1-p2	p2-p3	p3-f
Participante A	97.1 %	99.4 %	99.1 %	96.2 %
Participante B	96.2 %	98 %	99.5 %	97.5 %
Diferencia	+0.9% (A)	+1.4% (A)	+0.4% (B)	+1.3 (B)

E-2	s-p1	p1-p2	p2-p3	p3-p4	p4-p5	p5-f
Participante A	95.2 %	92.3 %	95.2 %	98.6 %	93.5 %	98 %
Participante B	94.7 %	96.7 %	95.4 %	99.8 %	98.7 %	98.3 %
Diferencia	+0.5% (A)	+4.4% (B)	+0.2% (B)	+1.2% (B)	+5.2% (B)	+0.3% (B)

Tabla 2: Eficiencias de viaje calculadas para cada segmento de las trayectorias de navegación.

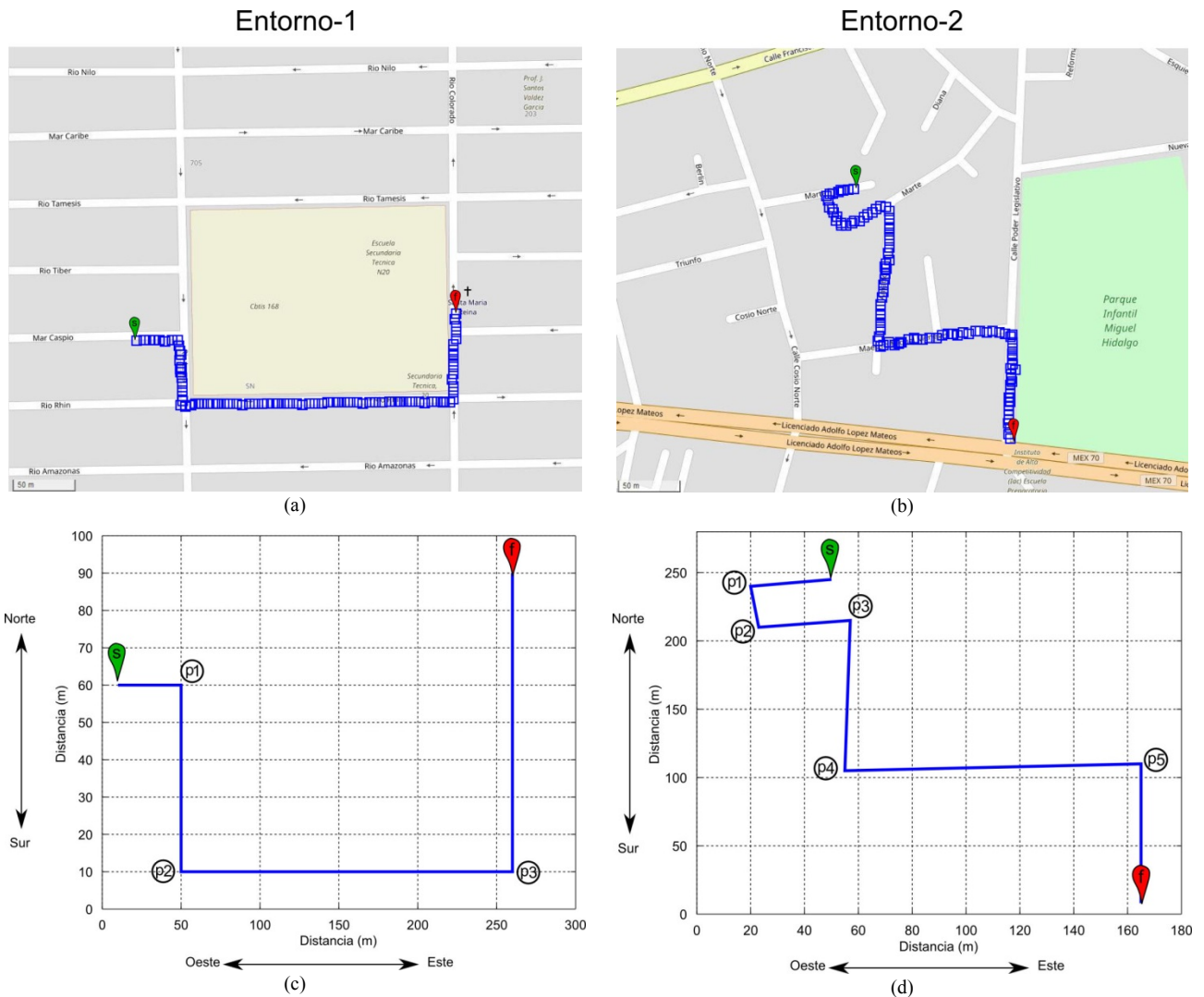


Fig. 4. Ejemplos de los desempeños de los participantes en el experimento II: (a) Participante A en E-1. (b) Participante B en E-2. Trayectorias y puntos de referencia (p_i) donde se despliegan las instrucciones: (c) E-1 y (d) E-2.

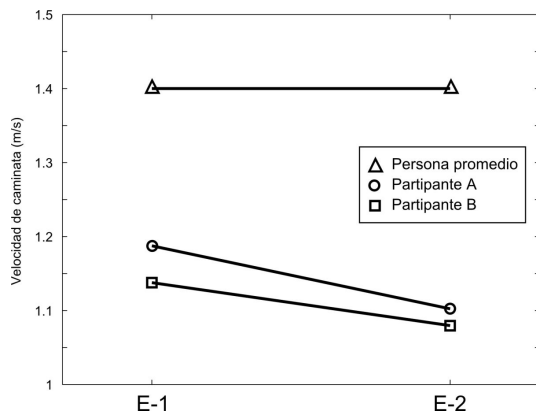


Fig. 5. Velocidad promedio de caminata observada para los dos entornos de navegación.

Al terminar el experimento, se pidió a los participantes proporcionar sus impresiones del prototipo. Ambos coincidieron en señalar que la información provista es fácil de entender, es intuitiva y demanda poca concentración (i.e. una baja carga cognitiva) pues las instrucciones solo se despliegan cuando se requiere un cambio de dirección. De igual forma, expresaron que no tenía sentido desplegar “girar izquierda o derecha” y posteriormente “avanzar” porque se puede deducir que después de girar uno continúa avanzando. Esto es cierto en todos los casos. Con esta observación, las instrucciones en E-1 se pueden reducir a 7 mientras que las necesarias para navegar E-2 a 12.

Estos resultados preliminares son sin duda alentadores: confirman que el prototipo es operacional y demuestran que es factible explotar el GPS de los teléfonos inteligentes y la estimulación podotáctil para asistir la navegación de personas invidentes en ambientes exteriores.

4.- CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el diseño y la evaluación de un novedoso sistema para la asistencia a la navegación en ambientes exteriores de personas invidentes basado en GPS y retroalimentación táctil.

El prototipo está destinado para utilizarse como sistema complementario a las ayudas primarias. Su principio de operación confía en la retroalimentación háptica del bastón y/o perro guía para detectar obstáculos a lo largo de un trayecto. Para la ubicación del usuario, se hace uso de las coordenadas GPS provistas por un teléfono inteligente. La orientación y guía a un destino se logran mediante un programa especializado de navegación que procesa los datos GPS y calcula la ruta óptima de viaje. Las direcciones del destino se despliegan al usuario a través de una interfaz podotáctil. El objetivo principal de este concepto es mejorar la navegación de personas invidentes con un dispositivo vestible, discreto, eficiente y de bajo coste.

El prototipo fue evaluado en dos etapas. La primera consistió en verificar la capacidad de la interfaz táctil para transmitir información y el nivel de comprensión del usuario a esta retroalimentación. Los resultados mostraron altas tasas de reconocimiento lo que sugiere que la información provista es intuitiva y rápida de entender. La segunda etapa evaluó el prototipo y el desempeño de participantes invidentes en ambientes exteriores reales. Los resultados demostraron que el sistema es capaz de guiar usuarios en entornos urbanos proveyendo instrucciones de navegación pertinentes.

Entre las perspectivas de trabajo futuro se encuentra la implementación de una aplicación Android que se ejecute en su totalidad en el teléfono inteligente y que integre el GIS y el planificador de ruta. Para incrementar la precisión de localización GPS del teléfono inteligente se evaluarán opciones como: 1) chips receptores externos GPS de alta sensibilidad y 2) el uso de redes WiFi dedicadas (como LoRaWAN). El modulo RF será remplazado por uno Bluetooth para que el teléfono inteligente pueda controlar directamente los actuadores de la interfaz táctil. Se planea que un sistema embebido reemplace al microcontrolador. El servidor en la nube y la estación remota no seguirán siendo módulos esenciales del sistema. Sin embargo, se espera que continúen operacionales pues pueden ser de utilidad para los familiares o cuidadores del usuario: el monitoreo remoto sin duda incrementa la seguridad del usuario y la tranquilidad de su familia. Finalmente se buscará robustecer el diseño de la interfaz cara a situaciones ambientales como la lluvia.

REFERENCIAS

- [1] Loomis J, Golledge R, Klatzky R, et al. “Personal guidance system for the visually impaired”. En: Proceedings of Annual ACM Conference on Assistive Technologies (ASSETS94). (Marina Del Rey 1994), p. 85-91. DOI: <https://doi.org/10.1145/191028.191051>
- [2] Kay L. “A sonar aid to enhance spatial perception of the blind: engineering design and evaluation”. Radio and Electronic Engineer. November 1974. Vol. 44-11, p. 605-627. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ree.1974.0148>
- [3] Hoyle B, Waters D. “Mobility AT: The Batcane (UltraCane)”. En: Hersh M & Johnson M (eds.), Assistive Technology for Visually Impaired and Blind People, Springer, p. 209-229, 2008. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84628-867-8_6
- [4] Dang Q, Chee Y, Pham D, et al. “A virtual blind cane using a line laser-based vision system and an inertial measurement unit”. Sensors, January 2016, Vol. 16-1, p. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16010095>
- [5] Rodriguez A, Yebes J, Alcántarilla P, et al. “Assisting the visually impaired: obstacle detection and warning system by acoustic feedback”. Sensors. December 2012, Vol. 12, p.17476-17496. DOI: <https://doi.org/10.3390/s121217476>

- [6] Tsirmpas C, Rompas A, Fokou O, et al. "An indoor navigation system for visually impaired and elderly people based on Radio Frequency Identification (RFID)". *Information Sciences*, November 2015, Vol. 320, p. 288-305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.08.011>
- [7] Legge G, Beckmann P, Tjan B, et al. "Indoor navigation by people with visual impairment using a digital sign system". *PLoS ONE*. October 2013, Vol. 8, p. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076783>
- [8] Rojas-Rodríguez R, Aceves-Perez R, Cortes-Aburto O, et al. "Buses and communication protocols for home automation facilities". *DYNA*, July 2014, Vol. 89-4, p. 387-392. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7009>
- [9] Velazquez R, "Wearable assistive devices for the blind". In: Lay-Ekuakille A & Mukhopadhyay S.C. (eds.), *Wearable and Autonomous Biomedical Devices and Systems for Smart Environment: Issues and Characterization*, LNEE 75, Springer, p. 331-349, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-15687-8_17
- [10] Sendero Group LLC. Davis, CA, USA. Información disponible en: <http://www.senderogroup.com/> (último acceso marzo 2020).
- [11] Humanware Group. Drummondville, QC, Canada. Información disponible en: www.humanware.com/ (último acceso marzo 2020).
- [12] Havik E, Kooijman A, Steyvers F. "The effectiveness of verbal information provided by electronic travel aids for visually impaired persons". *Journal of Visual Impairment & Blindness*. October 2011, Vol. 105-10, p. 624-637. DOI: <https://doi.org/10.1177/0145482X1110501009>
- [13] Golledge R, Klatzky R, Loomis J, et al. "A geographical information system for a GPS based personal guidance system", *International Journal of Geographical Information Science*. August 2010, Vol. 12-7, p. 727-749. DOI: <https://doi.org/10.1080/136588198241635>
- [14] Mahmud N, Saha R, Zafar R, et al. "Vibration and voice operated navigation system for visually impaired person". En: *Proceedings of International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*. (Dhaka 2014), pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2014.6850740>
- [15] Rodríguez J.L., Velazquez R, Del-Valle-Soto C, et al. "Active and passive haptic perception of shape: passive haptics can support navigation". *Electronics*, March 2019, Vol. 8, 355. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8030355>
- [16] Pielot M, Poppinga B, Heuten W, et al. "PocketNavigator: studying tactile navigation systems in-situ". En: *Proceedings of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*. (Austin 2012), p. 3131-3140. DOI: <https://doi.org/10.1145/2207676.2208728>
- [17] Jacob R, Mooney P, Corcoran P, et al. "Integrating haptic feedback to pedestrian navigation applications", En: *Proceedings of GIS Research UK Annual Conference (GISRUK)*. (Portsmouth 2011), p. 205-210. http://mural.maynoothuniversity.ie/4929/1/AW_Haptic_Feedback.pdf
- [18] Pielot M, Boll S. "Tactile Wayfinder: comparison of tactile waypoint navigation with commercial pedestrian navigation systems". In: Floréen P, Krüger A, Spasojevic M (eds), *Pervasive Computing, LNCS 6030*, Springer, p. 76-93, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12654-3_5
- [19] Spiers A, Dollar A. "Outdoor pedestrian navigation assistance with a shape changing haptic interface and comparison with a vibrotactile device". En: *Proceedings of IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*. (Philadelphia 2016), p. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2016.7463152>
- [20] OpenStreetMap project. Información disponible en: www.openstreetmap.org/ (último acceso marzo 2020).
- [21] YOURS routing service. Información disponible en: <http://yournavigation.org/> (último acceso marzo 2020).
- [22] Kennedy P.M., Inglis J.T., "Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole". *Journal of Physiology*. February 2002, Vol. 538-3, p. 995-1002. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2001.013087>
- [23] Velazquez R, Bazan O, Varona J, et al. "Insights into the capabilities of tactile-foot perception". *International Journal of Advanced Robotic Systems*. August 2012, Vol. 9, p. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.5772/52653>
- [24] Velazquez R, Pissaloux E, Lay-Ekuakille A. "Tactile-foot stimulation can assist the navigation of people with visual impairment". *Applied Bionics and Biomechanics*, February 2015, Vol. 2015, p. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/798748>