

ZAPATO CON GPS PARA APOYAR LA AUTONOMÍA DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL

GPS SHOE TO SUPPORT THE AUTONOMY OF PEOPLE WITH VISUAL DISABILITIES

Ramiro Velázquez Guerrero

Universidad Panamericana, Facultad de Ingeniería, México
rvelazquez@up.edu.mx

Ricardo Tachiquin Gutiérrez

Universidad Panamericana, Facultad de Ingeniería, México
rtachiquin@up.edu.mx

Carolina Del Valle Soto

Universidad Panamericana, Facultad de Ingeniería, México
cvalle@up.edu.mx

Recepción: 24/noviembre/2023

Aceptación: 26/diciembre/2023

Resumen

Este trabajo presenta un dispositivo electrónico diseñado para asistir la movilidad de personas invidentes y con discapacidad visual en entornos urbanos. Nuestra propuesta aprovecha las capacidades de computo ubicuo de los teléfonos inteligentes con GPS para posicionar y guiar a los usuarios a lo largo de espacios públicos. Las instrucciones de navegación necesarias para llegar a un destino se codifican como patrones de vibración que se transmiten al usuario a través de una interfaz táctil que se coloca en el zapato. Para evaluar su desempeño, se realizaron dos experimentos. En el primero se solicitó a un grupo de 20 participantes visualmente sanos que reconocieran y retroalimentaran sobre la información proporcionada por la interfaz táctil. Los resultados muestran tasas de reconocimiento por encima del 93%. En el segundo, el dispositivo fue evaluado por un usuario invidente. Los resultados sugieren que el dispositivo es capaz de incrementar la autonomía de los usuarios mismos que encuentran en este dispositivo una herramienta útil y fácil de utilizar.

Palabras Clave: Dispositivo usable, Herramienta para la movilidad, Interfaz táctil, Navegación GPS, Tecnologías de apoyo.

Abstract

This paper presents an electronic device conceived to assist the mobility of blind and visually impaired people in urban environments. Our proposal exploits the ubiquitous computing capabilities of GPS smartphones to position and guide users along public spaces. The instructions for space navigation are coded as vibrating patterns, which are tactually felt underfoot via an interface placed inside the shoe. To assess the performance of our device, two experiments were conducted. The first involved a group of 20 normally sighted participants, which were requested to report on the information provided by the tactile display. Success rates over 93% were obtained. For the second, a blind participant was requested to evaluate the device. Results suggest that the proposal can effectively increase the autonomy of users, which also find in the device a useful and easy to use tool.

Keywords: Assistive technology, GPS-based navigation, Mobility tool, Tactile display, Wearable device.

1. Introducción

El desarrollo de dispositivos que asisten a la comunidad de personas invidentes y con discapacidad visual se ha incrementado durante las últimas décadas para convertirse en un campo importante de estudio dentro de las tecnologías de apoyo (TA). Esta respuesta es proporcional a la dimensión del problema: según el Informe Mundial sobre Visión de la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicado en 2019 [OMS, 2019], existen en el mundo alrededor de 235 millones de personas con discapacidad visual severa para las cuales la cirugía ocular o el uso de lentes graduados no son suficientes para corregir la visión.

Las TA para personas invidentes o con discapacidad visual se pueden clasificar en tres: TA para la lectura, TA para el acceso a la información digital y TA para la movilidad (Tabla 1).

La lectura es un componente fundamental de la cultura humana. Las personas con baja visión exhiben naturalmente capacidades de lectura reducidas que los privan en varios aspectos de la vida cotidiana como el empleo, la educación y la interacción social.

Tabla 1 Tecnologías de apoyo (TA) existentes para invidentes y débiles visuales.

TA para invidentes y débiles visuales	1. Lectura	1.1 Libros en Braille	
		1.2 Audiolibros	
	2. Acceso a información digital	2.1 Sintetizadores de voz	
		2.2 Magnificadores de pantalla	
		2.3 Terminales Braille	
	3. Movilidad	3.1 Detección de obstáculos	
		3.2 Orientación	3.2.1 Ambientes interiores
			3.2.2 Ambientes exteriores

Las soluciones de lectura focalizadas en TA tienen como objetivo realizar las adaptaciones necesarias para permitir el acceso a material impreso como libros, periódicos y revistas. Dos enfoques de TA para la lectura se pueden encontrar en la literatura: libros en Braille y audiolibros. Ambos permiten la lectura a través del uso de otros sentidos: el tacto y la audición.

La tecnología juega un papel central en todas las facetas de la vida moderna: acceso instantáneo a la información, comunicación, educación, trabajo y colaboración con otras personas, entre muchos otros. Las tecnologías digitales han sido reconocidas como una herramienta esencial para el progreso humano hasta el punto de que varios países de todo el mundo han incorporado leyes a su base legal con respecto a los derechos digitales de sus ciudadanos. Tales leyes contemplan el derecho a usar computadoras y el derecho a acceder a Internet [Lucchi, 2011].

Las TA que abordan este tema tienen como objetivo garantizar estos derechos para las personas con discapacidad visual al facilitar el uso de dispositivos electrónicos y el acceso a contenido digital. En la literatura se pueden distinguir tres enfoques de TA principales: sintetizadores de voz, magnificadores de pantalla y terminales Braille. Los sintetizadores de voz se basan en software especializado que literalmente lee en voz alta el texto que se muestra en un monitor [Andraszewicz, 2011]. Los magnificadores amplían el contenido de la pantalla y están pensados para aquellos que todavía tienen algún grado de visión remanente [Hirayama, 2018]. Las terminales Braille son interfaces electrónicas que suben y bajan pines mecánicos y que permiten la salida de contenido en código Braille desde otro dispositivo electrónico, generalmente una computadora [Velázquez, 2008].

La movilidad, tema central de este trabajo y entendida en este contexto como la acción de caminar, es esencial en la naturaleza humana pues proporciona los medios para interactuar con el espacio y es un elemento clave en nuestra calidad de vida. La pérdida de movilidad resulta en una disminución sustancial de nuestro bienestar. Las personas con discapacidad visual se enfrentan cotidianamente a dificultades para moverse, específicamente en espacios desconocidos y entornos dinámicos. Además, experimentan miedo por su seguridad personal (perderse o lastimarse), ansiedad y falta de confianza para salir por sí solos. Las TA que abordan este tema tienen como objetivo proporcionar las herramientas necesarias para que las personas con discapacidad visual sean capaces de moverse en una variedad de entornos (estáticos o dinámicos y familiares o desconocidos) de una manera segura, independiente y eficiente [Pissaloux, 2018].

Existen dos procesos involucrados en la movilidad humana: el sensado del espacio circundante y la orientación a lo largo del trayecto. El primero se refiere a la capacidad de detectar obstáculos inminentes a lo largo del camino y elaborar una estrategia para superarlos. El segundo se refiere al conocimiento de la ubicación personal en el espacio y a la capacidad de llegar a un destino [Goldschmidt, 2018]. Los sistemas que asisten con la detección de obstáculos se pueden encontrar en la literatura desde 1970. Sonares [Kay, 1974], sensores ultrasónicos [Borenstein, 1988], láseres [Farcy, 1997] y cámaras RGB [Velázquez, 2005] se han explorado para sensar el espacio circundante.

Los sistemas que asisten con el proceso de orientación se pueden clasificar en dos: para ambientes interiores y para ambientes exteriores.

La orientación en interiores se ha abordado principalmente con enfoques basados en beacons, es decir, dispositivos electrónicos que transmiten señales de baja potencia a receptores cercanos. El uso de etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) [Ando, 2019], sensores infrarrojos [Hesch, 2007] y diversas tecnologías de sensores inalámbricos (como ZigBee, Bluetooth, WiFi, etc.) [Del Valle Soto, 2019] han sido evaluados para esta tarea.

Por su parte, la orientación en exteriores tiene como objetivo facilitar la movilidad urbana de personas con discapacidad visual. La mayoría de estos dispositivos se

basan en la tecnología GPS (Sistema de Posicionamiento Global por sus siglas en inglés) para posicionar al usuario en el espacio y guiarlo en él.

Algunos ejemplos de sistemas que explotan el GPS para la movilidad en ambientes exteriores de personas invidentes y con discapacidad visual se pueden encontrar tanto comercialmente como en la academia. Ejemplos comerciales son los dispositivos de Sendero [Sendero, 2022] que ofrecen soluciones para llegar a destinos previamente establecidos junto con una descripción de las rutas de navegación (nombres de calles, intersecciones, puntos de interés, etc.). En la literatura académica, se pueden encontrar diferentes trabajos que exploran una gran variedad de arquitecturas de hardware [Gaunet, 2006], [Guerrero, 2011], [Calabrese, 2020]. Una característica común en estos dispositivos es la retroalimentación acústica transmitida al usuario: la orientación se logra a través de instrucciones verbales proporcionadas a lo largo de todo el trayecto.

La retroalimentación acústica presenta un gran inconveniente para la movilidad [Tachiquin, 2021]: en ausencia de la visión, las personas con discapacidad visual dependen totalmente de escuchar las señales ambientales para detectar vehículos, otras personas, situaciones y peligros potenciales aproximándose. La retroalimentación acústica puede interferir y distraerlos comprometiendo su orientación, su percepción del espacio y su seguridad.

La retroalimentación háptica, es decir, la información desplegada al sentido del tacto, también se ha explorado en dispositivos de TA de orientación para ambientes exteriores, aunque en menor medida. Las investigaciones presentadas en [Pielot, 2012], [Spiers, 2016], [Rodríguez, 2019] evalúan la retroalimentación háptica de diversas interfaces con buenos resultados. Una característica común a dichas interfaces hápticas es que exigen una interacción constante con la mano del usuario para transmitir eficazmente su retroalimentación y para transportar el dispositivo. Sin embargo, la interacción manual a largo plazo tiene dos limitaciones: las manos ocupadas interfieren con la manipulación cómoda de los objetos y los usuarios se fatigan rápidamente de sostener y llevar dicho dispositivo.

Este trabajo presenta un novedoso dispositivo de TA que proporciona orientación al usuario en ambientes exteriores. El dispositivo consta de un smartphone y una

interfaz táctil usable (wearable). El primero comprende un sensor GPS que garantiza la ubicación, seguimiento y guía del usuario. El segundo consiste en un dispositivo háptico que se inserta en el zapato y que no requiere de la interacción con la mano. La propuesta pretende complementarse con el bastón o perro guía, ofreciendo así una solución completa de movilidad para personas invidentes y con discapacidad visual en entornos urbanos.

2. Métodos

Pensada para la movilidad en ambientes exteriores, nuestra propuesta involucra dos componentes principales: un smartphone y una interfaz táctil que se usa en el zapato.

La razón para usar un smartphone se debe principalmente a la posibilidad de explotar su sensor GPS, conectividad a Internet y capacidades de cómputo. Al utilizar una interfaz táctil en el zapato 1) se opta por la retroalimentación táctil en lugar de la modalidad acústica para evitar distracciones de los sonidos ambientales y 2) se garantiza una interacción “manos libres” que permite a los usuarios sostener y manipular un perro guía o un bastón, así como otros objetos.

La figura 1a ilustra cómo un usuario invidente o con baja visión usaría nuestro dispositivo TA. El smartphone es responsable de la adquisición de coordenadas GPS del usuario, así como de ejecutar el software de navegación que genera las instrucciones para llegar a un destino. Las instrucciones de navegación se transmiten a un módulo electrónico que el usuario lleva sujeto en el tobillo. Dicho módulo traduce las instrucciones a comandos de actuadores y controla la interfaz táctil. En otras palabras, el usuario siente vibraciones en la planta del pie que le indican la dirección a seguir. El principio de operación del dispositivo propuesto se muestra en la figura 1b.

Hoy en día, los smartphones modernos se han convertido en los receptores GPS más populares. A pesar de los 31 satélites en órbita de la red GNSS (Sistema Mundial de Navegación por Satélite por sus siglas en inglés), la precisión del GPS depende en gran medida de factores ambientales. Para aumentar la precisión del posicionamiento, se suele conectar el smartphone a una red de Internet.

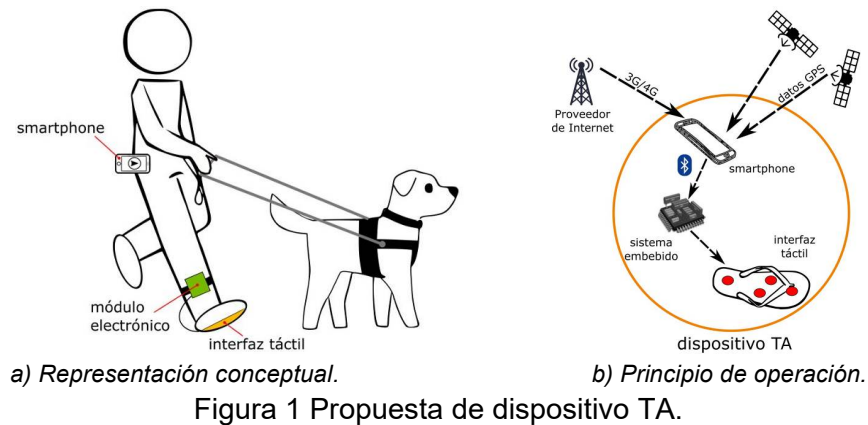


Figura 1 Propuesta de dispositivo TA.

Nuestro prototipo utiliza un smartphone Samsung Galaxy S9 con Android 8.0 para la adquisición de coordenadas GPS. Aprovechando sus capacidades de conectividad, el smartphone se conecta a las redes 3G o 4G para aumentar la precisión del GPS (A-GPS: augmented-GPS).

En este trabajo se desarrolló una aplicación (app) en Android para vincular todo el software de navegación del dispositivo TA. Dicha aplicación abarca tres elementos principales (Figura 2): 1) La API (interfaz de programación de aplicaciones) de OpenStreetMap (OSM) [OpenStreetMap, 2023], 2) la API de Graphhopper (GH) [Graphhopper, 2023] y 3) un script de desarrollo propio.

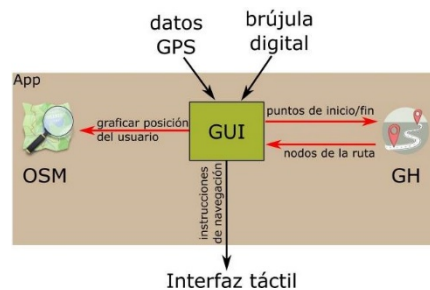


Figura 2 Software de navegación del dispositivo TA (aplicación móvil).

OSM es un proyecto colaborativo que tiene por objetivo crear mapas del mundo para uso gratuito. Graphhopper es un planificador de rutas de código abierto que permite calcular la ruta peatonal más corta entre dos puntos. El script sirve como interfaz gráfica de usuario (GUI), vincula las dos API anteriores y genera las instrucciones para la interfaz táctil.

Una vez que se han adquirido las coordenadas A-GPS, éstas se despliegan en el mapa de OSM junto con la señal de orientación del usuario proveniente de la brújula digital del smartphone. El usuario puede entonces especificar un destino o seleccionarlo de un menú de destinos pre-guardados. Cuando se establece el destino, la aplicación se vincula a la API de Graphhopper, que devuelve los puntos (nodos) de referencia de la ruta. La aplicación procesa estos puntos y determina las instrucciones de navegación hacia el destino. La aplicación ya no necesita comunicarse con la API de Graphhopper a menos que, por alguna razón, sea necesario recalcular la ruta.

Posteriormente, las instrucciones se transmiten desde el smartphone al módulo electrónico en el tobillo a través de Bluetooth. El módulo electrónico consiste de un sistema embebido con un microcontrolador ATMEL ATtiny2313 encargado de traducir las instrucciones a comandos de los actuadores y de transmitir dicha información a la interfaz de usuario.

La aplicación actualiza las coordenadas A-GPS cada 3 segundos o cada 2 metros (lo que suceda primero) y actualiza la posición del usuario en el mapa de OSM.

La aplicación fue cuidadosamente diseñada buscando garantizar la accesibilidad del usuario. Para los usuarios con visión remanente, el contenido de la pantalla se puede ampliar con las funciones de zoom integradas de la aplicación. Para los usuarios invidentes, la aplicación puede usarse con el lector de pantalla TalkBack de Android. Naturalmente, la aplicación también puede ser operada por un miembro de la familia, personal de cuidado o amigo.

Una interfaz vibrotáctil usable (wearable) proporciona al usuario las instrucciones de navegación necesarias para llegar al destino seleccionado. La novedad de este concepto de interfaz es que proporciona retroalimentación háptica al pie.

La interfaz táctil fue concebida para estimular las aferencias de adaptación rápida tipo I (FAI) de la planta del pie. Cuatro actuadores proporcionan vibraciones a las áreas tibial, lateral y medial de la planta del pie, que, de acuerdo con la fisiología del pie [Kennedy, 2002], son las más sensibles a los estímulos vibratorios de baja frecuencia. Los cuatro actuadores vibratorios se integraron en una plantilla de espuma disponible comercialmente. La caracterización experimental de los

actuadores realizada en un trabajo previo [Magaña, 2008] confirmó que éstos son capaces de producir fuerzas axiales de hasta 13 mN y frecuencias de vibración de 10 a 55 Hz, demandando un máximo de 400 mW a la fuente de alimentación.

Unos puntos de contacto fabricados con pasta epóxica recubren las superficies superiores de los actuadores asegurando un área de contacto de 133 mm² con la planta del pie. Las vibraciones de los actuadores se transmiten a través de estos puntos de pasta epóxica. Las propiedades naturales de absorción de la espuma evitan que las vibraciones se expandan por toda la plantilla mientras protegen a los actuadores del peso del usuario.

El módulo electrónico consiste en un sistema embebido que comprende un receptor Bluetooth, el microcontrolador Atmel y los circuitos de potencia para la operación de los actuadores. El módulo electrónico también incluye un banco de baterías recargables de níquel-hidruro metálico que proporciona 6 V y 1500 mAh. Esta batería permite un funcionamiento continuo de 6 h de la interfaz de usuario. El receptor Bluetooth garantiza una distancia de comunicación de hasta 10 m con el smartphone, que cubre ampliamente la distancia entre la cintura y el tobillo del usuario (Figura 1a). La figura 3 muestra el prototipo de dispositivo TA desarrollado. La interfaz táctil está destinada a ser utilizada en el pie derecho y es totalmente usable. La interfaz es visualmente imperceptible: se inserta en el zapato y la ropa del usuario puede cubrir el módulo electrónico.

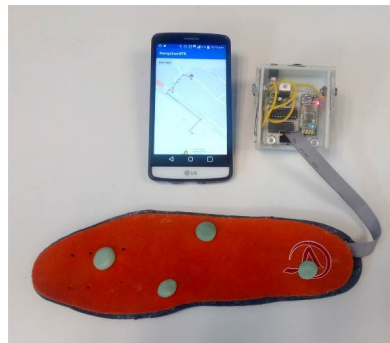


Figura 3 Dispositivo TA desarrollado.

El costo de laboratorio aproximado tanto del módulo electrónico como de la interfaz táctil es de 5,000 MX (250 USD). Este dispositivo es la cuarta versión de interfaces

táctiles electrónicas usables para el zapato que se ha implementado en la Universidad Panamericana e incorpora las mejoras tecnológicas de los tres desarrollos anteriores [Magaña, 2008], [Velázquez, 2011], [Velázquez, 2013].

3. Resultados

Se realizaron dos experimentos con usuarios para evaluar el desempeño del dispositivo propuesto: reconocimiento de instrucciones de navegación y movilidad urbana.

El primer experimento tuvo como objetivo determinar si un grupo de personas era capaz de reconocer las instrucciones de navegación desplegadas por la interfaz táctil.

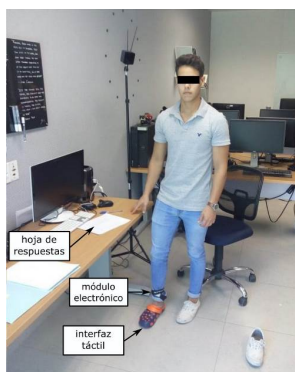
Veinte estudiantes con visión normal (2 mujeres y 18 hombres) de la Universidad Panamericana campus Guadalajara participaron voluntariamente en este experimento. Sus edades oscilaban entre los 18 y los 22 años con un promedio de 19. Ningún criterio fue utilizado para seleccionarlos más que su motivación y disponibilidad. Ninguno de ellos reportó discapacidad alguna (al menos no conocida) en su sentido del tacto, en sus pies o a nivel cognitivo.

La interfaz de usuario se insertó en una sandalia y el módulo electrónico se sujetó al tobillo de los participantes utilizando cintillo velcro. Se solicitó el uso de calcetines por cuestiones de higiene. Tanto la sandalia como la interfaz táctil se limpiaban con aerosol desinfectante después de la participación de cada persona.

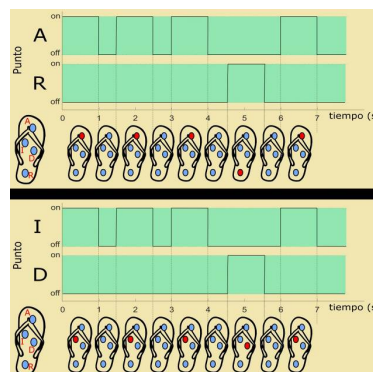
Antes del experimento, los participantes desconocían todos los aspectos relacionados con la prueba. Se les proporcionó un breve tiempo de familiarización con la interfaz táctil (aprox. 5 min). Durante este tiempo, las instrucciones de navegación se les mostraron y explicaron.

Los sujetos se mantuvieron de pie durante todo el experimento. Se les pidió que llenaran una hoja de respuestas reportando cada una de las instrucciones de navegación percibidas (Figura 4a). Un miembro del equipo de investigación fue el responsable de operar el smartphone y de enviar las instrucciones a la interfaz táctil. Cada uno de los cuatro puntos de la interfaz de usuario representa una instrucción: avanzar (A), retroceder (R), girar a la izquierda (I) y girar a la derecha (D). El método

para representar estas cuatro instrucciones es el siguiente: tres vibraciones cortas consecutivas en el punto correspondiente, una vibración corta en el punto opuesto y, de nuevo, una vibración corta en el punto correspondiente.



a) Método experimental.



b) Patrones vibratorios para las instrucciones A e I.

Figura 4 Experimento-I: Reconocimiento de instrucciones de navegación.

La figura 4b muestra, por ejemplo, los patrones vibratorios para avanzar y girar a la izquierda. Para el primero, observe que el punto A se acciona consecutivamente tres veces, luego el punto R una vez y, de nueva cuenta, el punto A. Para el segundo, el punto I vibra tres veces, luego el punto D y nuevamente el punto I.

Durante el experimento se desplegó un conjunto de 20 instrucciones que de manera aleatoria contenía cinco veces cada instrucción. En caso de necesitarlo, los sujetos podían solicitar desplegar nuevamente la instrucción en la interfaz táctil.

Los resultados obtenidos de los 20 sujetos se muestran en la matriz de confusión de la tabla 2. Las tasas promedio de reconocimiento fueron del 100% para A, 100% para R, 94.74% para I y 93% para D.

Tabla 2 Tasas de reconocimiento obtenidas.

		Contestado (%)			
		A	R	I	D
Presentado	A	100	0	0	0
	R	0	100	0	0
	I	0	0	94.74	5.26
	D	0	7	0	93

Estas altas tasas de reconocimiento se deben principalmente al método optimizado de representación táctil que se describe en la figura 4b en el que también se utiliza

el punto diametralmente opuesto para indicar una instrucción de navegación. En la segunda versión de interfaz táctil [Velázquez, 2011] se encontró que dicho método proporciona una referencia confiable para facilitar la identificación de puntos vibratorios cuando los usuarios no pueden discriminar con precisión el punto que está realmente vibrando. El mostrar tanto el punto correcto como el opuesto en el mismo patrón táctil no confunde a los usuarios y facilita el reconocimiento de las instrucciones de navegación transmitidas por la interfaz táctil.

El segundo experimento tuvo dos propósitos: 1) evaluar el desempeño del dispositivo TA en su conjunto y 2) determinar si realmente puede asistir la orientación en ambientes exteriores y la movilidad urbana de personas invidentes y con discapacidad visual.

Un adulto varón invidente de nacimiento de 34 años aceptó participar en el experimento. No reportó discapacidad alguna (al menos no conocida) en su sentido del tacto, en sus pies o a nivel cognitivo. El participante manifestó tener más de 15 años de experiencia en el uso de las ayudas primarias, particularmente el bastón, por lo que fue considerado un usuario experto.

Dos entornos urbanos en la ciudad de Aguascalientes, México fueron seleccionados para el experimento.

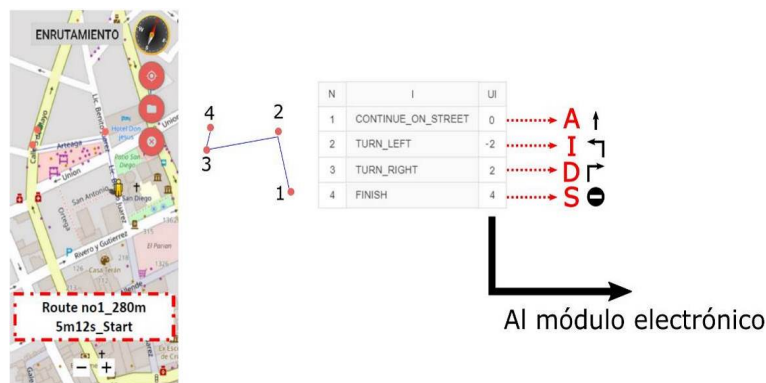
Se establecieron dos rutas peatonales que comprendían distancias de 280 y 600 m. A lo largo de estas rutas, había semáforos acústicos para facilitar el cruce peatonal de personas invidentes junto con obstáculos estáticos/dinámicos causados por objetos y otras personas.

Un miembro del equipo de investigación caminaba de 5 a 10 m por delante del participante para prevenir e intervenir en caso de una situación de riesgo.

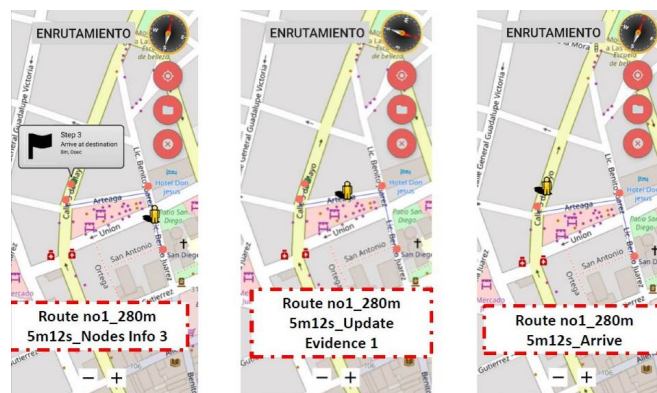
Antes de la prueba, el participante completó el Experimento I en su hogar para familiarizarse con las instrucciones proporcionadas por la interfaz táctil. Se agregó una quinta instrucción para indicar "Alto" (S). Ésta se codificó activando los cuatro puntos de vibración simultáneamente en dos secuencias cortas consecutivas, una pausa y nuevamente dos secuencias cortas (a semejanza del típico patrón de alerta SMS en los teléfonos). Se obtuvieron tasas de reconocimiento satisfactorias que permitieron continuar con el experimento.

El participante fue trasladado en automóvil a los entornos elegidos, los cuales le eran completamente desconocidos. El smartphone se insertó en una carcasa rígida que a su vez se sujetó al cinturón del participante. El smartphone se orientó apuntando hacia el frente del usuario (ver figura 1a) y se conectó a la red 4G (Movistar, Telefónica México). Se pidió al participante que se quitara ambos zapatos y usara las sandalias tipo Crocs. La derecha contenía la interfaz táctil. El módulo electrónico se sujetó al tobillo.

Se pidió al participante que caminara en la dirección indicada por la interfaz táctil. Se le pidió que usara su bastón como lo haría en cualquier otra caminata. El participante era consciente de que había un asistente cerca y que podía solicitarle ayuda si era necesario. La figura 5a muestra el primer entorno (E-1) propuesto. La tarea consistía en guiar al participante a lo largo de un trayecto de 280 m desde la explanada de una iglesia hasta una conocida tienda local. Esta ruta comprende cuatro nodos, es decir, cuatro ubicaciones donde se despliegan las instrucciones.



a) Primer entorno propuesto.



b) El participante en E-1.

Figura 5 Experimento-II. E-2 requiere cuatro nodos (puntos naranjas) para llegar al destino.

La aplicación crea una lista asignando una instrucción a cada nodo. Cada instrucción tiene un número de interfaz de usuario (IU) que se transmite al módulo electrónico al acercarse al nodo (de hecho 8 m antes de llegar a él). El microcontrolador interpreta el número de IU para desplegar el patrón táctil correspondiente. La figura 5b muestra, por ejemplo, el progreso del participante en el entorno. La tarea se completó satisfactoriamente sin errores.

La figura 6 muestra el segundo entorno (E-2) propuesto, (izquierda) el trayecto contiene siete nodos más dos nodos denominados ruidosos que fueron descartados, (derecha) El participante en E-2. La tarea consistió en guiarlo a lo largo de un trayecto de 600 m desde un punto aleatorio en una calle hasta una lavandería. Nueve nodos fueron calculados inicialmente por el API de GH. Sin embargo, el software de navegación encontró que dos de ellos estaban en un radio de menos de 2 m y el no tomarlos en cuenta no tenía ningún impacto en la tarea. Por lo tanto, estos “nodos ruidosos” fueron eliminados de la lista final de instrucciones.

La misma figura 6 muestra el progreso del participante en el entorno. Al igual que en E-1, la tarea se completó con éxito y sin errores.

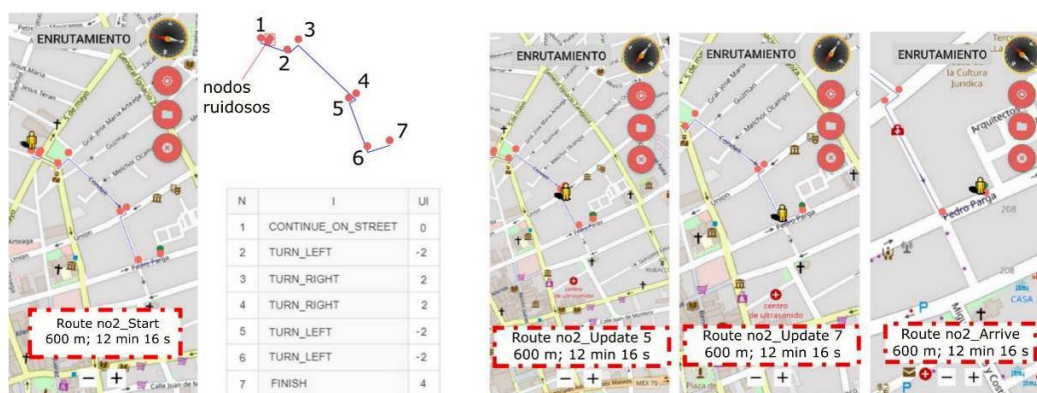


Figura 6 Experimento-II. Segundo entorno propuesto.

4. Discusión

Se realizaron dos experimentos para evaluar el dispositivo TA.

El primero comprobó la eficiencia de la interfaz táctil para transmitir instrucciones de navegación al usuario y el nivel de comprensión del usuario a esta retroalimentación. Los resultados mostraron tasas de reconocimiento muy altas. El

segundo experimento evaluó el funcionamiento del dispositivo TA en tareas de movilidad urbana real con una persona invidente. Los resultados mostraron que el dispositivo es capaz de guiar a usuarios a un destino proporcionando las instrucciones de navegación pertinentes.

Los resultados obtenidos, si bien preliminares, son sin duda alentadores. Confirman que los datos A-GPS son pertinentes para la tarea y que el software de navegación y la interfaz de usuario son operativos. Por lo tanto, se puede concluir que el dispositivo propuesto en este trabajo puede asistir la movilidad en ambientes urbanos de personas invidentes y con discapacidad visual.

5. Conclusiones

Este trabajo ha presentado el diseño, la implementación y la evaluación experimental de un nuevo dispositivo de tecnologías de apoyo (TA) dedicado a asistir la movilidad urbana de personas invidentes y con discapacidad visual.

Para ofrecer una solución de TA completa que responda adecuadamente a los desafíos de movilidad de las personas con discapacidad visual, la propuesta contempla el uso de las ayudas primarias para el proceso de detección de obstáculos y aborda el proceso de orientación con posicionamiento GPS aumentado (A-GPS) proporcionado por un smartphone.

La orientación del usuario en el entorno se logra mediante una aplicación propia desarrollada en Android que localiza al usuario en un mapa, calcula la ruta óptima de viaje y genera las instrucciones de navegación para llegar a un destino. Las instrucciones se transmiten al usuario a través de patrones vibrotáctiles que estimulan la planta del pie. El enfoque propuesto exhibe algunas características interesantes:

- Usabilidad (wearability)
- Operación silenciosa y manos libres
- Uso discreto e imperceptible
- Retroalimentación háptica intuitiva y rápida de entender
- Tiempos cortos de aprendizaje para dominar su operación
- Desempeño eficiente y confiable

- Bajo costo.

El trabajo de investigación a futuro continuará con pruebas de navegación en entornos urbanos involucrando a un número mayor de usuarios finales.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ando, B., Baglio, S., Marletta, V., Crispino, R. & Pistorio, A. A measurement strategy to assess the optimal design of an RFID-based navigation aid, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 68, No. 7, 2356–2362, 2019.
- [2] Andraszewicz, S., Yamagishi, J. & King, S. Vocal attractiveness of statistical speech synthesizers. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Prague, Czech Republic, 2011.
- [3] Borenstein, J. & Koren, Y. Obstacle avoidance with ultrasonic sensors, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 2, 213–218, 1988.
- [4] Calabrese, B., Velázquez, R., Del-Valle-Soto, C., de Fazio, R., Giannoccaro, N.I. & Visconti, P. Solar-powered deep learning-based recognition system of daily used objects and human faces for assistance of the visually impaired, *Energies*, Vol. 13, No. 22, 6104, 2020.
- [5] Del-Valle-Soto, C., Valdivia, L.J., Velázquez, R., Rizo-Domínguez, L. & López-Pimentel, J.C. Smart campus: an experimental performance comparison of collaborative and cooperative schemes for Wireless Sensor Network, *Energies*, Vol. 12, No. 16, 3135, 2019.
- [6] Farcy, R. & Damaschini, R. Triangulating laser profilometer as a threedimensional space perception system for the blind, *Applied Optics*, Vol. 36, No. 31, 8227–8232, 1997.
- [7] Gaunet, F. Verbal guidance rules for a localized wayfinding aid intended for blind-pedestrians in urban areas, *Universal Access in the Information Society*, Vol. 4, 338–353, 2006.
- [8] Goldschmidt, M. Orientation and mobility training to people with visual impairments. In: Pissaloux, E. & Velázquez, R. (Eds.), *Mobility of Visually*

- Impaired People: Fundamentals and ICT Assistive Technologies, Springer, 377–409, 2018.
- [9] GraphHopper Route Planning. Disponible en: <https://www.graphhopper.com> (*último acceso julio 2023*).
- [10] Guerrero, L.A., Vasquez, F. & Ochoa, S. An indoor navigation system for the visually impaired, *Sensors*, Vol. 12, No. 6, 8236–8258, 2012.
- [11] Hesch, J. & Roumeliotis, S. An indoor localization aid for the visually impaired. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, Italy, 2007.
- [12] Hirayama, M.J. A book reading magnifier for low vision persons on smartphones and tablets. International Workshop on Advanced Image Technology. Chiang Mai, Thailand, 2018.
- [13] Kay, L. A sonar aid to enhance spatial perception of the blind: Engineering design and evaluation, *Radio and Electronic Engineer*, Vol. 44, 605–627, 1974.
- [14] Kennedy, P.M. & Inglis, J.T. Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole, *Journal of Physiology*, Vol. 538, 995–1002, 2022.
- [15] Lucchi, N. Access to network services and protection of constitutional rights: Recognizing the essential role of internet access for the freedom of expression, *Cardozo Journal of International and Comparative Law*, Vol. 19, No. 3, 645–678, 2011.
- [16] Magaña, M. & Velázquez, R. On-shoe tactile display. IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games. Ottawa, Canada, 2008.
- [17] OMS – Organización Mundial de la Salud. 2019 World Report on Vision. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516570>.
- [18] OpenStreetMap Project: www.openstreetmap.org/ (*último acceso julio 2023*).
- [19] Pielot, M., Poppinga, B., Heuten, W. & Boll, S. PocketNavigator: Studying tactile navigation systems in-situ. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Austin, Texas, USA, 3131–3140, 2012.

- [20] Pissaloux, E. & Velázquez, R. *Mobility of Visually Impaired People: Fundamentals and ICT Assistive Technologies*, 1st Ed., Springer Switzerland, 2018.
- [21] Rodríguez, J.L., Velázquez, R., Del-Valle-Soto, C., Gutiérrez, S., Varona, J. & Enríquez-Zarate, J. Active and passive haptic perception of shape: Passive haptics can support navigation, *Electronics*, Vol. 8, No. 3, 355, 2019.
- [22] Sendero Group LLC. Davis, CA, USA. Disponible en: <http://www.senderogroup.com/> (*último acceso julio 2023*).
- [23] Spiers, A. & Dollar, A. Outdoor pedestrian navigation assistance with a shape changing haptic interface and comparison with a vibrotactile device. *IEEE Haptics Symposium*, Philadelphia, PA, USA, 2016.
- [24] Tachiquin, R., Velázquez, R., Del-Valle-Soto, C., Gutiérrez, C.A., Carrasco, M., De Fazio, R., Trujillo-León, A., Visconti, P. & Vidal-Verdú, F. Wearable urban mobility assistive device for visually impaired pedestrians using a smartphone and a tactile-foot interface, *Sensors*, Vol. 21, No. 16, 5274, 2021.
- [25] Velázquez, R., Pissaloux, E. Guinot, J.C. & Maingreud, F. Walking using touch: design and preliminary prototype of a non-invasive eta for the visually impaired. *27th Annual Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Shanghai, China, 2005.
- [26] Velázquez, R., Preza, E. & Hernández, H. Making eBooks accessible to blind braille readers. *IEEE International Workshop on Haptic Audio-Visual Environments and Games*, Ottawa, Canada, 2008.
- [27] Velázquez, R., Bazán, O., Alonso, C. & Delgado-Mata, C. Vibrating insoles for tactile communication with the feet. *15th International Conference on Advanced Robotics*, Tallin, Estonia, 2011.
- [28] Velázquez, R. & Bazán, O. Foot-based interfaces for navigational assistance of the visually impaired. *2013 Pan American Health Care Exchanges*, Panama city, Panama, 2013.