

リアルタイム経路生成と振動通知による視覚障害者の歩行支援システム

森 大輝* 入江 英嗣† 内原 正一‡ 荒川 明宏§ 坂井 修一¶

概要. 視覚障害者の安全かつ自由な外出は多くの当事者が切望する重要な課題である。広く使われている白杖には検知範囲の狭さによる安全性の問題があり、またより安全と思われる盲導犬には訓練にかかる費用や手間によって数が足りないという問題が存在する。これらの問題を解決するために、今まで多くの歩行補助デバイスが開発されてきた。一方、センサと計算機の小型化・高性能化により利用者周辺の3次元形状を対象とするコンピューティングは急速な進歩を遂げている。本研究ではこのようなコンピューティング技術を用いて当事者の自由な歩行を支援するモバイル・ウェアラブルシステムの実現を目指す。本論文では当事者ヒアリングによって得られた、求められている機能や仕様制約を議論した上で障害物検知・経路生成・振動通知により構成される歩行支援システムを提案する。このシステムを前段と後段にわけて実装をし、経路の伝達手法について実際に視覚障害者の方による使用感評価を行ったところ、安心感がある・自然に使えるという好意的な評価を得た。

1 はじめに

現在世界では約2億5300万人の視覚障害者が存在しており、その中でも約3600万人が全盲である[1]。また、日本における視覚障害者数は約31万人にのぼっており、その中でも約20万人は単独歩行が難しい1-2級の障害を持っている[12]。

視覚障害者の安全かつ自由な外出は多くの当事者が切実に希望する重要な課題である。道路交通法では視覚障害者が外出する際には白杖もしくは盲導犬の携帯が義務付けられているが、どちらにも課題が存在する。白杖は手軽で広く普及している反面、探知範囲の狭さのために木の枝や看板、トラックからはみ出た積荷といった頭上の障害物との衝突事故や駅のホームや下り段差での転落事故が数多く発生している。

一方、より安全な盲導犬は、育成のコストや労力のために需要に対して供給が追いついていないという問題がある。日本の盲導犬の需要は約4000頭と見積もられているが、実際に働いている盲導犬数は1000頭足らずである。また毎年新たに訓練されるのも100-150頭であり、さらにその一部は退役した盲導犬の代わりに既存の利用者へと供給される。盲導犬の育成には多大な費用と時間が必要とされるため、視覚障害者数に対して盲導犬が不足しているのが現状である。

視覚障害者の内の多くは事故や病気のために後天的に視覚障害を患った中途視覚障害者である。障害

のために突然移動や情報の入手が困難になり、家に引きこもりがちになる人も少なくない。高齢のために視覚障害になる人も多く、現在の超高齢社会において視覚障害者の支援は切実な課題である。

コンピュータの小型化やセンサの性能向上は、視覚障害者歩行支援のための様々なデバイスを可能としてきており、当事者の期待も高まっている。特に利用者周辺の3次元形状を対象としたコンピューティングは急速に進歩しており、従来では達成できなかったような高度な支援への応用が期待できる。一方で複雑な計算やシステムは運用や仕様の難しさにつながる恐れがあり、当事者に寄り添った開発が必要とされている。

そこで本研究では、視覚障害者へのヒアリングを通して歩行補助デバイスに求められる条件を整理した。方向が伝えられること・聴覚を塞がないこと・簡単かつ直感的に使えること、などが特に求められているとわかり、それらを踏まえたシステムを提案する。提案システムは3つの要素からなり、深度センサによる障害物検知・障害物情報を元にした経路生成・方位センサと振動子を備えたデバイスによる経路の伝達、という構成になっている。実際に視覚障害者の方を対象にシステムの使用感評価を行い、実験参加者全員が設定されたコースをスタートからゴールまで歩くことができた。伝達手法の使用感についても安心感がある・自然に使える、という好意的な評価を得た。

以降、第2章では視覚障害者の歩行に関わる困難および既存の支援技術について説明する。第3章ではヒアリングによって得た歩行補助デバイスに求められる要素についてまとめ、それを踏まえて第4章で本研究の提案をする。第5章でその実装・評価について説明する。そして最後に第6章でまとめとする。

Copyright is held by the author(s).

* 東京大学

† 東京大学

‡ 新産業創造研究機構

§ 株式会社 ラビット

¶ 東京大学

2 歩行の際の困難と既存の支援技術

2.1 視覚障害者の歩行の際の困難

人間が移動をするときにはナビゲーション、オリエンテーション、モビリティと呼ばれる3つの要素が必要となる [13]. 1つ目のナビゲーションとは地図上の現在位置を見つけ、目的地までの道順を決定するという能力である. 2つ目のオリエンテーションとは環境内において自分と物体の位置関係を把握し次に歩くべき方向を見つけるという能力である. 3つ目のモビリティとはつまづかずに歩行姿勢を保ってリズムカルに歩くという能力である. 視覚障害者の歩行では特にナビゲーションとオリエンテーションが困難となる.

まずナビゲーションを達成するには、視覚障害者は頭の中に自分の行動範囲を記憶したメンタルマップを作成し、それを頼りにして移動をする. そのため自分がかつて訪れたことのない場所へ行くのは大変困難である.

オリエンテーションを達成するには、障害物はどこにあるか、目的地はどちらの方向か、などを把握する必要がある. 視覚障害者は白杖などを利用することでこれらの情報を得ているが、白杖では足元の情報しか得られない. また、人間が視覚に頼らずに歩行するとまっすぐ歩いているつもりでも左右のどちらかに曲がってってしまう偏軌傾向という特性も歩行を困難にする要因の一つである [4]. 壁や点字ブロックのあるところではそれらに沿って歩くことでまっすぐ進むことができるが、横断歩道など、周囲に手がかりとなるものがないところを歩く際は知らず知らずのうちに意図しない方向へ進んでいってしまう可能性がある.

2.2 既存の歩行支援技術

視覚障害者の歩行の困難を解決するため、いままで様々な歩行補助デバイスが研究・開発されてきた.

多くの研究者が白杖に超音波センサを組み合わせて障害物の検知をしようと試みている [6] [7]. 超音波センサを用いることで通常の白杖では検知できない高い位置にある障害物を検知することができ、また正面の障害物もより早く察知することができる. すでに実用化され、販売されているものもある. 通常の白杖と同様に使えるので非常に手軽に使用することができる.

Weiらは、盲導犬を模したロボットで視覚障害者を誘導することを試みている [11]. ロボットにセンサを取り付けて障害物などを検知し、それを回避しながら移動させる. ロボットには盲導犬のハーネスを模したロープが繋がれており、利用者はこのロープを握ることでロボットの動きを感じ取り、その後ろをついて歩く. この手法では盲導犬と同じように物理的に力を与えて引っ張って誘導するため、直感

的な情報の伝達が可能になる.

Wachajaらは手押し車に様々なセンサを搭載し、ハンドルに取り付けた振動子で情報を伝達することで、障害物を避けながら歩行させることを試みている [10]. 手押し車を使うことでセンサやコンピュータの大きさ・重量の制限がゆるくなり、豊かな情報や計算資源が使えるようになる.

SpiersらはThe Animotusと名付けられた、変形する直方体型のデバイスによって利用者に経路を伝える研究をしている [8]. これは直方体型のバックが2つ重なったような構造をしており、上部が下部に対して前方に移動したり回転したりすることで利用者に目的地の方向を伝える. 形状の変化で情報を伝達するため、多くの訓練を必要としない.

Cosgunらはベルトに円を描くように等間隔で振動子を取り付け、それらを振動させる位置や順番によって経路の伝達をしようとしている [2]. これは手をふさぐことなく使用できることが利点と言える.

TamiyaらはStravigationという名前で、方位センサと振動子を備えたデバイスを用いて、観光案内を目的とした情報の伝達手法を提案している [9]. デバイスを手に持ち、そのデバイスの指す方位と目標方向のずれによって振動の強度を変化させることで目的地の方向を示している. これにより、利用者は手を身体の周りでスイングさせることで目的地の方向を探索できるようになる. これは視覚障害者を対象とした研究ではないが、方向を伝えるという点で有用であると考えられる.

3 歩行補助デバイスに求められる要素

携帯可能な3次元センサおよびコンピューティングプラットフォームの性能向上により、利用者周辺形状を対象としたコンピューティングは急速に多様化しようとしている. この技術を視覚障害者の歩行支援に活用するために、我々は当事者ヒアリングを行い、真に技術に求められていることは何なのかを議論した. 株式会社ラビットおよび日本盲導犬協会神奈川訓練センターの協力を得て、複数の当事者および支援者の方と議論を行った.

議論では、まず方向通知の要望が多く挙げられた. 従来の支援器具で障害物の存在を警報するような技術が提案されているが、障害物は自分の居場所を知る手がかりでもあるので、近くに障害物があることに逐一反応しては過剰警報となってしまう. 逆に、障害物が無く方向感覚を失ってしまった時にどの方向に歩き出せば良いか分からない時は怖い、という話が聞かれた. 方向感覚の喪失は駅のホームからの転落の大きい原因の一つとなっているとのことであった. 方向定位が視覚障害者の歩行中のストレスとなる、という点はOhkuraらの報告 [14] とも一致している.

次に音声を使わないことの重要性、情報を絞るこ

との重要性が挙げられた。タブレットやスマートフォンによる従来支援技術では、音声がよく用いられており、細かい情報を伝えるために効果を発揮している。一方で、音声は視覚障害者にとって自分がどこにいるか、周囲がどうなっているかの情報を得るための貴重なチャンネルであり、ガイド音声を絶えず聞かないといけなような手法は却って危険となる。

また、簡単に使うことができ、習熟がいらないことの重要性が挙げられた。使用する上での煩わしさのために使われなくなってしまう歩行補助デバイスが多く、装着や取り回し、収納が難しいものは適さない。また周辺状況を詳細に知ることのできる超音波デバイスが存在するが高度な訓練が必要であり、使いこなせる人は一握りとのことであり、高度なコンピューティングによるシステムであっても、インタラクションは直観的かつ簡潔であることが必要である。

この他、精度の正確性よりも不安を取り除く対話の方が必要性が高いこと、ミニバンの後部ドアが上がっている時に頭をぶつける頻度が高いことなど、当事者視点の要望を得て、これらを元に、当事者フィードバックを重ねながら次章以降の提案・設計を行った。

4 提案手法

4.1 提案システムの構成

提案手法は障害物検知・経路生成・振動通知により構成され、リアルタイムに動作する。障害物検知では利用者に装着した深度センサなどを用いて利用者進行方向の3次元形状を取得し、ブロック単位で歩行可能領域と障害物領域へ分類する。経路計算では得られている障害物マップを利用して、目的地（あるいはラリーポイント）の方向へ歩くための経路を算出する。振動通知では振動機器を用いて利用者に歩くべき方向を通知する。また、危険な場合に警報を通知する。

本手法では、利用者は白杖を振るときの要領で手を左右に振り、断続的な振動が与えられた時の手の向きにより進むべき方向を感じることができる。算出された経路通りにぴったり合わせて歩く必要はなく、常に現在位置に合わせてルートが更新されるため、概ねの方向が合っていれば気軽に歩くことができる。障害物に衝突しそうな場合には連続的な振動によって警報が通知され、この場合は歩みを止めて手を動かして行くべき方向を感じることによって安全な歩行を続けることができる。

4.2 深度センサによる障害物の検知

深度センサにより距離情報を含んだ深度画像を取得する。得られた距離情報を3次元実空間上における位置に変換し、点群データを構成する。各画素の3次元空間における位置は距離情報および深度セン

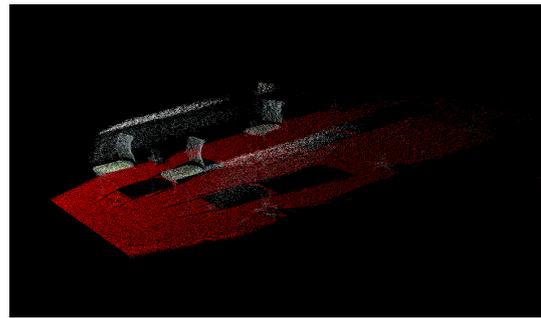


図 1. 検出された平面。赤く塗られている点が平面として検出された領域である。

サの画角から計算して求められる。距離画像の中の画素 (x, y) の3次元空間における位置 (X, Y, Z) は以下の式によって計算できる。

$$\begin{aligned} X &= \tan\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \frac{x}{w} d \\ Y &= \tan\left(\frac{\theta_v}{2}\right) \frac{y}{h} d \\ Z &= d \end{aligned}$$

ここで θ_h は水平画角、 θ_v は垂直画角、 w は水平方向の画素数、 h は垂直方向の画素数、 d は距離の値である。

点群処理には Point Cloud Library (PCL) という2次元および3次元の点群を扱うことができるオープンソースフレームワークを用いる。3次元実空間をいくつかの直方体に分割してその中に含まれる複数の点の重心を計算し、その1点に置き換えることによってダウンサンプリングをする。扱う点の数を減らし、処理の負荷を減らす。後述する実験では一辺が10 cmの立方体によって分割した。

障害物領域と歩行可能領域をわけるため、床となる平面を検出する。ここではRANSACを用いて平面検出を行なった。RANSACとはRandom sample consensusの略で、誤差を含んだ観測値から直線や平面のような数学的なモデルのパラメータを求めるロバスト推定に使われる手法である。

これにより検出された平面を図1に示す。赤く塗られている点が平面として検出された部分である。これにより検出された床面より-5 cmから5 cmの範囲の外にある点をすべて障害物とみなす。障害物領域を床面に水平な2次元平面に射影して占有格子地図を作り、残った領域を歩行可能領域とする。

4.3 経路の計算

次に4.2で算出した歩行可能領域を用いて目的地までの経路を計算する。ここでは自律走行ロボットの経路作成で使われるポテンシャル法というアルゴリズムを利用する [5][3]。ポテンシャル法ではまず

障害物からは斥力，目標位置からは引力が発生する滑らかな関数（ポテンシャル関数）を定義し，その関数を重ね合わせたポテンシャル場を作る．ポテンシャル場の勾配は障害物から離れ，目標位置へ接近する方向となる．よって，この勾配をその時点での進むべき方向とすればよい．この手法ではその時点での情報に従って経路を求めるので事前に地形マップなどの作成の必要がなく，障害物を発見した時点でポテンシャル場が変化するのでリアルタイムで経路を変更することができる．後述の実験ではポテンシャル関数として Kim らが提案したものを用いた [3]．

4.4 利用者への経路の伝達

振動通知では，4.3 で算出した経路を利用者に伝える．方位センサと振動子を備えたデバイスを手または腕に装着し，機器の方向に応じて振動を発生させる．機器方向と振動によるナビゲーション通知は Tamiya らの Stravigation と同様の手法であるが，本手法では障害物回避を含んだ経路指示であること，視覚障害者の歩行支援に用いること，という性格の違いから，以下のような手法となっている．

まず，方向は振動の強弱ではなく，振動の有無で通知される．これは障害物回避を含む経路指示は常時 ON となっている必要があるが，常時振動を感じていると手が疲れてしまい，情報を明確に受け取れなくなるというフィードバックが予備実験で得られたためである．手が目的方向と一致した時のみ，パルス的な断続振動を発生させる．利用者は手を振って振動方向を探すこととなるが，これは白杖を振る時の手の動きと一致し，直観的である．

手を振りながら利用すると，振動を発生させる指示が送られてから実際に振動するまでの遅延により角度のズレが生じるため，デバイスの角速度を用いて補正を行なった．遅延時間を τ ，経路の方位を θ ，触覚デバイスの角速度を ω とすると，触覚デバイスの指す方位が以下の式で計算される ϕ になった時に振動発生を指示を出す．

$$\phi = \theta - \omega\tau \quad (1)$$

また，利用者が障害物領域に入りそうな場合，具体的には現在の移動を続けると 2 秒後に障害物領域に入ってしまう場合には連続的な振動を発生させて通知する．移動の方向によって警報がでるため，例えば障害物のそばであっても添った動きであれば警報は発生せず，過剰な警報は発生しない．この二段階の通知により，警報が発生するまでは利用者は比較的自由に素早い速度で歩くことができる．

5 実装・評価

提案システムについて 3 つの構成要素をそれぞれ実装し，視覚障害者による実証実験を行った．実験

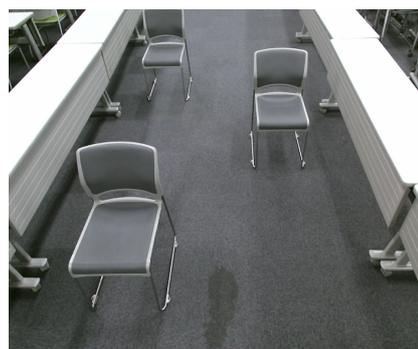


図 2. 障害物の配置.

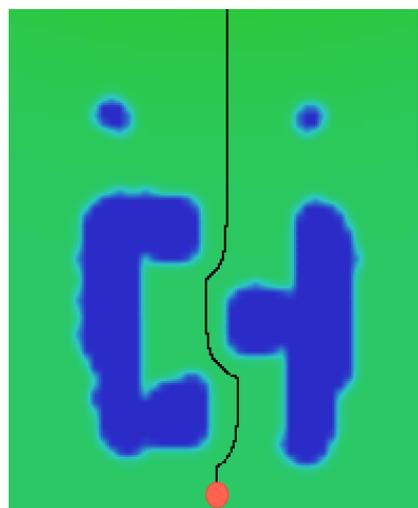


図 3. 検出された障害物（青い領域）と算出された経路（黒色の線）．下部の赤い円が現在位置，上部が目的地方向．

参加者の安全のため，今回の実験では障害物検知＋経路生成と経路生成＋振動通知に分けてそれぞれ実験を行った．

5.1 深度センサによる障害物の検知・経路の作成

障害物が並んでいる実験環境を室内上に構築し，その場所をセンサを持った被験者（晴眼者）が歩くことにより，障害物マップ生成および経路生成が行えるかを確認する実験を行った．深度センサとしては Microsoft 社の Kinect v2 を利用し，処理用の PC は Vaio Z Canvas を用いた．

障害物は図 2 のように並んでおり，それを元に作成された経路は図 3 のようになる．障害物を避けながら目的地方向へ進む経路が作成されていることがわかる．前方が見切れているが，リアルタイムに障害物の検知と経路の生成を行うため，経路に沿って進んでいくことで地図は更新されていく．

5.2 経路伝達手法の使用感評価

本研究で提案する経路伝達手法の評価をするため、日本盲導犬協会神奈川訓練センターの協力を得て、普段盲導犬や白杖を使用している当事者4名による使用感評価を行なった。図4のように訓練センター内のプレイルームにラリーポイントを3点設けたコースを作成し、本研究の歩行支援システムを用いて歩行してもらった。障害物情報等を含んだマップはあらかじめ用意し、安全のため障害物は仮想的なものとした。この実験では経路の作成と振動による経路の伝達を行う。

この実験で用いたシステムは図5のように、2台のスマートフォンと1台のPCで構成されている。スマートフォン1は胸元に装着して自己位置推定のために用いた。スマートフォン2は実験参加者が手に持ち、振動による経路の指示のために用いた。スマートフォン1で推定された自己位置は遠隔PCに送信され、PC内で経路を算出し、それをスマートフォン2に送信することで経路の指示を行う。スマートフォンはiPhone 6sとiPhone SE、PCはVaio Z Canvasを用いた。

評価試験では何回かの試行を経て全員がインタフェースの動作に慣れ、予定したコースをスタートからゴールまで歩行した。今回の試験で用意したコースと、実際の実験参加者の歩行経路を図6に示す。青い点は実験参加者の軌跡を示し、赤い点は実験参加者が通過すべきラリーポイントを示している。下、右上、左上のラリーポイントをそれぞれ α, β, γ とすると、(a), (c), (d)では $\alpha, \beta, \gamma, \alpha$ の順で歩き、(b)では $\alpha, \gamma, \beta, \alpha$ の順で歩いた。(c), (d)に描かれている黒色の長方形は仮想的に用意した障害物を示している。障害物を避けながら次のチェックポイントに進む経路が生成され、実験参加者はそれに沿って歩くことができた。しかし、(c)の始点と終点が閉じていないところに見えるように、自己位置推定の誤差や方位センサの誤差が原因で意図しない方向へ進んでしまうこともあった。

伝達手法の使用感について実験参加者からフィードバックをもらったところ、以下のように非常に高い評価を得ることができた。

- 非常に安心感がある
- 点字ブロックをなぞるように自然に使える
- これなら手がかりのない広いところでも歩けそう

6 おわりに

本論文では視覚障害者の現状を述べ、歩行補助デバイスに求められる要素についてまとめた。特に重要な点として方向の提示、音声チャンネルの解放、習熟の容易さを挙げ、この議論の上に歩行支援システ



図4. 実験環境。安全のため障害物は仮想的なものとし、その位置はテープによって地面に目印がつけられている。



図5. 評価に使用した機材。実験参加者の胸元に自己位置推定用のスマートフォン、手に経路伝達用のスマートフォン、そして経路の計算は別のPCで行なった。

ムの提案をした。提案システムは3次元センサを用いて利用者前方の形状を計測し、そこから歩行すべき経路を算出する。算出された経路は振動デバイスによって利用者に通知される。通知法として白杖と親和性の高い腕の方向による通知手法を提案した。

盲導犬訓練施設において実際に視覚障害者を対象に使用感の評価を行った。情報の伝達手法の使用感について非常に高い評価、特に安心して歩ける、これで多くの人が外出したくなるのではないかという肯定的な評価を得ることができ、提案の方向性への期待がしめされた。

今後は自己位置推定のアルゴリズムを高性能化して精度を高め、全体を統合したシステムを作り評価をしていく。

実験では比較的大きなKinect v2を利用したが、深度センサについては身につけられるサイズのものが入手可能になってきているため、そのようなセンサに移行していく。また現在は外部のPCで経路の計算などを行なっているが、これを身につけられるサイズのコンピュータで処理できるようにしていく。

現在、実際の遊歩道などを対象とした実証実験を準備しており、当事者にリーチする技術として改良を続けていく。

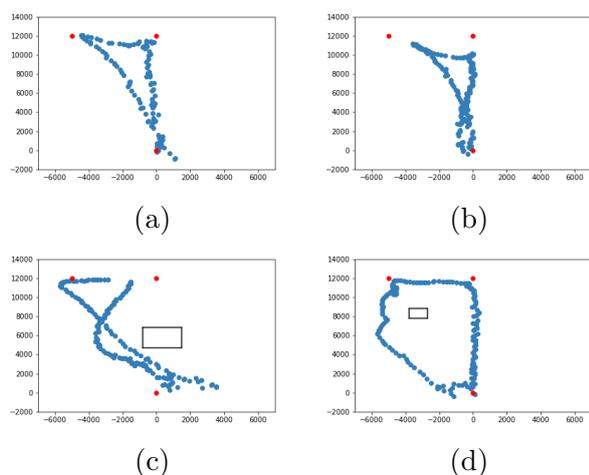


図 6. 実験参加者の歩行軌跡。赤い点は実験参加者が通過すべきラリーポイントを表している。(c), (d)の黒い長方形は仮想的な障害物を表している。

謝辞

本研究は三菱財団社会福祉事業・研究助成「視覚障害者の支援へのドローンの活用可能性に関する調査研究」の助成を受けたものです。また、機材を提供していただいた日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究所、実験に際して多大なご協力をいただいた日本盲導犬協会神奈川訓練センターの皆様へ感謝します。

参考文献

- [1] R. R. A. Bourne, S. R. Flaxman, T. Braithwaite, M. V. Cicinelli, A. Das, J. B. Jonas, J. Keefe, J. H. Kempen, J. Leasher, H. Limburg, K. Naidoo, K. Pesudovs, S. Resnikoff, A. Silvester, G. A. Stevens, N. Tahhan, T. Y. Wong, and H. R. Taylor. Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, 5(9):e888 – e897, 2017.
- [2] A. Cosgun, E. A. Sisbot, and H. I. Christensen. Guidance for human navigation using a vibrotactile belt interface and robot-like motion planning. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6350–6355, May 2014.
- [3] K. D. HUN and S. SHIN. Local path planning using a new artificial potential function composition and its analytical design guidelines. *Advanced robotics : the international journal of the Robotics Society of Japan*, 20(1):115–135, jan 2006.
- [4] L. G. Kallie CS, Schrater PR. Variability in Stepping Direction Explains the Veering Behavior of Blind Walkers, June 2007.

- [5] F. Matoui, B. Boussaid, and M. N. Abdelkrim. Local minimum solution for the potential field method in multiple robot motion planning task. In *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pp. 452–457, Dec 2015.
- [6] R. K. Megalingam, A. Nambissan, A. Thambi, A. Gopinath, and M. Nandakuma. Sound and touch based smart cane: Better walking experience for visually challenged. In *Humanitarian Technology Conference - (IHTC), 2014 IEEE Canada International*, June 2014.
- [7] M. Saaïd, A. M. Mohammad, and M. S. A. M. Ali. Smart cane with range notification for blind people. In *Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), IEEE International Conference on*, pp. 158–162, October 2016.
- [8] A. J. Spiers and A. M. Dollar. Design and Evaluation of Shape-Changing Haptic Interfaces for Pedestrian Navigation Assistance. *IEEE Transactions on Haptics*, 10:17–28, 2016.
- [9] Y. Tamiya and T. Nojima. A simplified vibrotactile navigation system for sightseeing. In *2011 IEEE International Symposium on VR Innovation*, pp. 33–36, March 2011.
- [10] A. Wachaja, P. Agarwal, M. Zink, M. R. Adame, K. Moeller, and W. Burgard. Navigating blind people with a smart walker. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6014–6019, Sept 2015.
- [11] Y. Wei and M. Lee. A guide-dog robot system research for the visually impaired. In *2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 800–805, Feb 2014.
- [12] 厚生労働省. 平成 18 年身体障害児・者実態調査結果, 2008.
- [13] 英雄 森. 歩行ガイドロボット実用化への道 視覚の役割. 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2003(2):59–66, jan 2003.
- [14] 元宏 大倉. 二次課題法による盲歩行者のメンタルワークロードに関する研究. 人間工学, 25(4):233–241, 1989.