

# Vi-MAP: Visual SLAM と振動子を用いた視覚障害者の歩行支援システム

坂本 祐輝\* 福田 大翔\* 内原 正一† 門本 淳一郎\* 入江 英嗣\* 坂井 修一\*

**概要.** 視覚障害者の安全かつ自由な歩行は重要な課題の一つであるが、視覚障害者が歩行の際に使用する白杖や盲導犬には、安全面やコストなどで問題がある。本研究では、コンピュータを用いた視覚障害者の歩行支援システムの提案を行う。システムは、モバイルデバイスの Visual SLAM を使った地図作成および自己位置推定と経路生成、および手持ちデバイスの振動による経路案内から構成される。システム要件は当事者へのインタビューをもとに歩行支援システムに求められる要素を整理した上で決定した。SLAM の精度を評価するための実験では、本システムの SLAM は屋内での経路案内に十分な測位精度があることがわかった。視覚障害者を対象とした歩行実験では、参加者全員が設定されたルートを歩くことが出来、本手法の有効性が確かめられた。また、伝達手法の使用感に関しても好意的な反応が得られ、経路伝達手法として有効であることがわかった。

## 1 はじめに

視覚障害者の安全かつ自由な歩行は多くの当事者が希望する重要な課題である。日本における視覚障害者数は約 31 万人であり、その中でも単独歩行が難しい 1-2 級の障害がある視覚障害者数は約 20 万人にのぼる [18]。日本では視覚障害者が外出する際に白杖または盲導犬を携帯することが義務付けられているが、これらの歩行支援にも課題が存在する。白杖は手軽に手に入る反面、探知範囲が狭く障害物や段差を察知できなかったことによる衝突事故、転落事故が数多く発生している [23]。また、盲導犬は育成に多大な費用と時間が必要とされ、視覚障害者数に対して盲導犬が不足している現状がある [24]。

コンピュータの小型化によって人が持ち運べる大きさのデバイス上で高度な計算が可能となった。特に 3 次元形状計測技術の進歩は目覚ましく、視覚障害者支援への応用として白杖や盲導犬などの既存支援に代わるもの、またそれらと組み合わせるものなど、様々なアプローチでの研究が行われている。

本研究では視覚障害者福祉協会および日本盲導犬協会と連携して歩行支援システムに求められる要素を整理した上で、視覚障害者の歩行支援システムの実装、評価を行った。システム全体として、周囲の環境からの地図作成および自己位置推定、目的地までの経路生成、生成した経路に沿った経路案内の 3 要素が整理された。また、経路伝達手法としては、聴覚に頼りすぎることなく、直感的に進行方向を提示する手法が望ましいこと、取り回しの面から小型軽量の機器を用いる手法が望ましいことが指摘された。これらを踏まえ、提案システムには、スマートフォンなどに搭載される RGB カメラ、方位センサと振動子を用い、

RGB カメラを用いた SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) での地図作成および自己位置推定と、方位センサと振動子を用いたデバイスを身体の前方で左右に振りながら歩き、デバイスを振動させることで進行方向へ誘導する経路案内を用いる手法を採用する。

提案手法の有効性を評価するために SLAM の精度を評価する実験と、視覚障害者を対象とした歩行実験を行った。SLAM の精度を評価するための実験では、本システムの SLAM は屋内での経路案内に十分な測位精度があることがわかった。視覚障害者を対象とした歩行実験では、参加者全員が設定されたルートを歩くことが出来、本システムの有効性が確かめられた。また、参加者のフィードバックでは好意的な反応が得られ、本システムの誘導手法は視覚障害者の歩行支援システムにおける経路伝達手法として有効であることがわかった。

## 2 視覚障害者の歩行の現状

### 2.1 人間の歩行の要素と視覚障害者の歩行の困難

人間は移動の際に、自分は地図上のどこにいるのか、目的地は地図上のどこにあるのか、どの経路で目的地に向かうのか、といった事柄を把握している。これらにはナビゲーション、オリエンテーション、モビリティの 3 要素が関係している [16]。

1 つ目のナビゲーションとは地図上の自分の現在位置を見つけ、目的地まで進む経路を決定する能力である。人間は頭の中にメンタルマップを作成し、それをもとにした移動を行うが、視覚障害者は音や匂いなどを用いてメンタルマップを生成するため、初めて訪れる場所へ独力で行くことは困難である。

2 つ目のオリエンテーションとは周囲の環境から現在の自分の位置を把握し、目的地に向かって次に進む方向を見つける能力である。視覚障害者は現状

\* 東京大学

† 新産業創造研究機構 (現在, JSU 支援技術研究所)

白杖または盲導犬を携帯することによってオリエンテーション達成の補助をしているが、障害物や段差を察知できなかったことによる衝突や転落事故が絶えない現状がある [23]. またそれ以外に、人間が視覚に頼らず歩行する際に意図しない方向へ曲がってしまう特性である偏軌傾向特性が挙げられる。視覚障害者は壁や点字ブロックなどの手がかりがないところでは意図しない方向へ曲がってしまう可能性があり、オリエンテーションの達成が困難である [5] [22].

3つ目のモビリティとは障害物などを避けながら姿勢を保ったまま歩行する能力である。障害物や段差、歩行路面などの歩行中の周囲の状態によって歩行中の安全性や効率性は変化するため、環境に合わせた適切な行動を取ることが安全かつ効率的な歩行には求められる。しかし視覚に障害があるとそれらを一定の水準に保つことが難しくなり、モビリティの達成が困難である [21].

## 2.2 視覚障害者の歩行支援に求められる要素

視覚障害者福祉協会および日本盲導犬協会の協力のもと、視覚障害のある当事者および職員を対象に視覚障害者の歩行での困難についてインタビューを行ったところ、障害物がない場所でまっすぐ歩くことが難しい、初めて行く場所の周辺地図がわからない、自分がどこにいるのか突然見失うことがある、といった声が挙がった。

障害物がない場所でまっすぐ歩くことが難しいという問題は、オリエンテーション達成の困難として分類できる。当事者からは周囲に壁などの手がかりがないとまっすぐ歩くことが難しいとの声や、公園や駐車場などの広く手がかりに乏しい場所では、本当に目的地の方向に歩いているのか不安になるといった声が挙がった。

また、初めて行く場所の周辺地図がわからない、自分がどこにいるのか突然見失うことがあるという問題は、ナビゲーション達成の困難として分類できる。当事者からは既存の解決策として、人に案内してもらおう、スマートフォンの地図アプリや施設の案内板などを利用するといったものが挙げられたが、人に案内してもらおうといった解決策に関しては、特にホテルの自室やトイレへの案内などは、人に行き先を聞かれない、知らない人に案内してもらおうのは不安だといった声が挙がった。また、GPSの活用が難しい屋内では既存の地図アプリの使用が難しく、視覚障害者が利用可能な形での案内システムが整っていない施設も多い問題が指摘された。

## 3 関連研究

### 3.1 視覚障害者の歩行支援技術

コンピュータを用いた視覚障害者の歩行支援に関連する技術の構成要素は以下の3つに整理される。

1. 周囲の環境のセンシング
2. 目的地までの経路生成
3. 視覚によらない情報伝達

Joao らは自立走行型ロボットを用いた歩行支援システムを提案した。ハンドル付きの自立走行型ロボットにステレオカメラ、および LiDAR を搭載し、周囲のセンシングを行い、ハンドルに取り付けられた複数の振動子の振動とともにロボットが目的地まで移動する形での経路の案内を行う。[4]. また森らは手持ちデバイスを用いた歩行支援システムを提案した。RGB、深度カメラを搭載したスマートフォンによって周囲のセンシングを行い、利用者は方位センサと振動子を搭載した携帯デバイスを身体の前方で左右に振りながら歩き、デバイスの指す方向が進む方向と一致した瞬間にデバイスが振動することにより目的地までの経路を伝達する。利用者は自由に歩きながら必要に応じてシステムの誘導を利用することができる [20]. 同様に手持ちデバイスを用いた歩行支援システムとして、栗林らの研究が挙げられる。LiDAR を搭載したスマートフォンによって周囲のセンシングを行い、主に骨伝導イヤホンからの音声により目的地までの経路を伝達する [17].

### 3.2 周囲の環境のセンシング手法

周囲の環境のセンシング手法として、主にカメラを用いるもの、LiDAR を用いるもの、深度カメラを用いるものが挙げられる。

カメラを用いるものとして、山崎らはカメラを用いた SLAM である Visual SLAM を、類似画像検索と並行に用いることで視覚障害者ナビゲーションを研究している [19]. また Mocanu らは、RGB カメラより取得した画像のフレーム間の関係から障害物を検知する手法を研究している [10].

LiDAR を用いるものとして、Kayukawa らは LiDAR による 2次元マップ生成と、ステレオカメラによる障害物検知を並行に用いる歩行支援システムを研究している [6].

深度カメラを用いるものとして、Zhang は深度カメラを用いて障害物回避のためのローカルマップを生成する手法を研究している [15]. また Brock らは、深度センサを用いて前方の障害物を検知する手法を研究している [1].

上述の各センシング手法についてセンサごとの特徴とその比較を表 1 に記した [25].

表 1. 各センシング手法の比較

センサの種類	距離精度	解像度	照明条件	価格
カメラ	△	○	△	○
LiDAR	◎	△	○	×
深度カメラ	○	○	×	△

### 3.3 利用者への情報の伝達手法

利用者への情報の伝達手法は、主にモバイル・ウェアラブルデバイスで触覚提示するもの、モバイル・ウェアラブルデバイスで聴覚提示するもの、ロボットやドローンで情報提示するものに分類できる。

モバイル・ウェアラブルデバイスで触覚提示するものとして、Spiers らは利用者の手に変形する直方体型のデバイスを持たせ、その回転、伸縮などにより経路を伝える手法を提案した [9]。また Tsukada らや Cosgun らは、ベルトの周上に等間隔で取り付けられた振動子を用いて、振動子を振動させる位置やパターンを変化させることによって情報を伝える手法を提案した [12] [2]。

モバイル・ウェアラブルデバイスで聴覚提示するものとして、Brock らはヘッドフォンから 3 次元的な音を生成することで障害物の情報を伝える手法を提案した [1]。

ロボットやドローンで情報提示するものものとして、Wachaja らは様々なセンサを搭載した手押し車のハンドルに振動子を取り付け、その振動により障害物の情報を伝える手法を提案した [13]。また Wei らは、盲導犬を模したロボットを用いて誘導する手法を研究している [14]。

## 4 提案手法

### 4.1 手法の概要

森らの研究における視覚障害者への事前インタビューでは、聴覚に頼りすぎることなく、直感的に進行方向を提示する手法が望ましいこと、取り回しの面から小型軽量の機器を用いる手法が望ましいことが指摘された。また森らの評価実験における実験参加者からのフィードバックによれば、安心感がある、自然な動作で利用できる、白杖で点字ブロックをなぞって歩いているような感覚が得られたという声があり、白杖を用いた普通の歩行の動作と親和性の高い動きが当事者からの好意的な評価につながったと分析されている。またリアルタイム経路生成により利用者が自由に歩く方向を決めることができ、必要ときにはすぐに経路案内を直感的に受けられることも当事者から高く評価されていた [20]。一方、森らの経路案内手法の実用化における課題として、細かな方位提示が可能なことに見合った高精度の定位技術が必要であり、従来の精度では開けた公園などでの適用にとどまっていたことが挙げられる。

本研究では、ウェアラブルデバイスでの Visual SLAM 導入により当事者が自由な歩行を行うことが可能なまま、小型軽量な情報機器を用いた屋内での高精度定位の実現が可能となった。SLAM により利用者の歩行に応じた動的な地図の修正が可能となる。カメラは安価で一般に普及していること、画像は多くの情報を含み解像度が高く、特に起伏がなく

テクスチャの特徴がある箇所での使用に適していることから、建物内の屋内の定位に適していると考え、センサとしてはカメラを用いる。

また定位の高精度化に応じ、森らの手法に振動による複数の通知パターンを状況に応じて変化させる改良を行った、振動を用いる直感的インタフェースによる経路伝達手法を導入する。視覚障害者を対象としたものではないが、類似の通知手法は Pielot らの研究で”Magic wand metaphor”としてまとめられている [8]。本手法は白杖を左右に振る動きを模し、視覚障害者の経路案内に最適化したものと位置付けられる。これにより入り組んだ屋内での適切な経路案内を可能とし、視覚障害者の自力での安全かつ自由な歩行をサポートするシステムが実現した。

### 4.2 システムの構成

#### 4.2.1 全体の構成

提案システムの機器は、RGB カメラを搭載した地図作成、自己位置推定用のスマートフォン A、方位センサと振動子を搭載した経路伝達用のスマートフォン B と、地図の作成、経路の計算等の処理を行う PC によって構成される。システム全体としては図 1 のように、まずスマートフォン A の内蔵 RGB カメラを用いた Visual SLAM による地図の作成、自己位置の推定を行う。次にそれを元に PC 上で目的地に向かう経路生成を行う。最後に生成された経路情報をスマートフォン B の方位センサと振動子により利用者に伝達する。システムの外観は図 2 である。

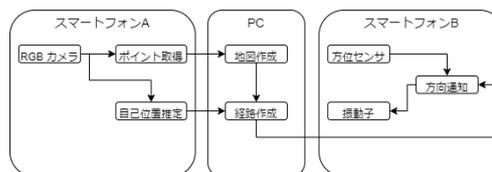


図 1. 提案システムの処理の流れ

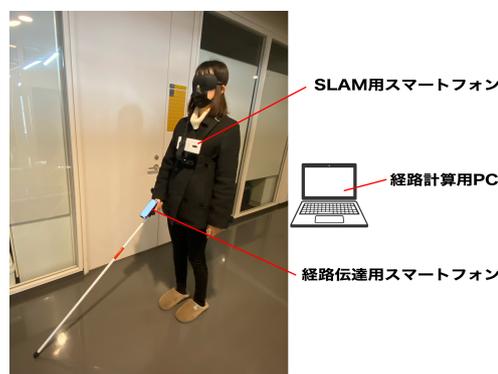


図 2. システムの外観

#### 4.2.2 地図作成および自己位置推定

目的地を把握し、現在地から目的地に進む経路を作成するために地図作成および自己位置推定を行う。まず Visual SLAM を用いて周辺のマッピングを行う。Visual SLAM としては特徴点ベースの Visual SLAM の一種である ORB-SLAM2 を用いる [7]。図 3 にスマートフォンの画面上での特徴点検出の様子を示す。スマートフォンの画面上にカメラからの画像が映し出されており、緑色の点でその特徴点として検出された点が描画されている。

次に、目的地に進む経路を作成するために 2 次元占有格子地図を作成する [11]。占有格子地図とは空間を格子状に分割し、各格子ごとの障害物の存在確率を格納することで表される地図である。図 4 に作成された 2 次元占有格子地図を示す。

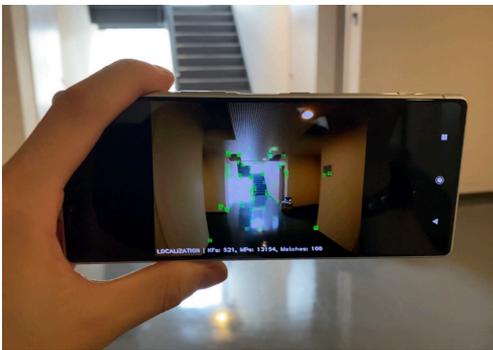


図 3. 屋内での障害物の特徴点検出の例

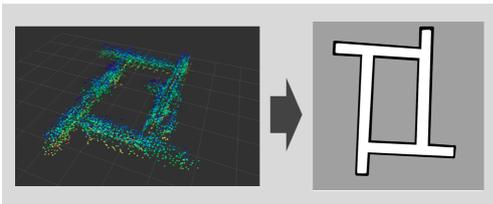


図 4. ポイントクラウド地図から作成された 2 次元占有格子地図

#### 4.2.3 経路生成

経路生成モジュールでは作成されたマップを利用して PC 上で現在地から目的地に進む経路を作成する。ウェイポイントはゴールおよびゴールへとたどり着くまでの中継地点を指定するものであり、作成されたマップ中に指定する。図 5 に生成された直近ウェイポイントまでの経路を示す。緑色の丸で表された現在位置から、赤色の矢印で表されたウェイポイントへ緑色の経路が生成されている。

#### 4.2.4 経路伝達

経路伝達モジュールでは生成された目的地までの経路を利用者に伝達する。方位センサと振動子を搭

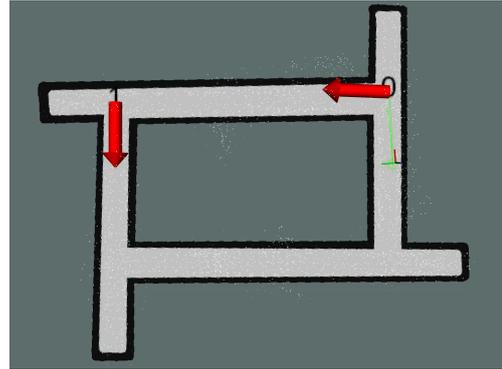


図 5. 地図から生成された直近ウェイポイントまでの経路

載した経路伝達用のスマートフォン B を手に持ち、身体の前方で左右に振りながら歩く。スマートフォン B の指す方位が進む方向と一致したときに振動させることで利用者に歩くべき方向を通知する。また障害物に衝突する危険性がある場合は利用者に警告音を出すことで停止を促す。進む方向と一致した瞬間に振動させる命令を送った場合、命令から実際に振動するまでの遅延のため進むべき方向と利用者が感じる振動した方向との間に角度のずれが生じる。これを解消するため、利用者がスマートフォン B を左右に振る際の角速度を計算し補正を行う。

また、経路上での各ウェイポイントとの距離に応じて振動の周期を 2 段階に変化させることにより、利用者に次のウェイポイントまでの距離を合わせて通知する。ウェイポイントとの距離が十分ある場合は長い振動を用いて経路の伝達を行う。ウェイポイントとの距離が近づいた場合は短い振動を用いて経路の伝達を行い、方向転換点が近いことを知らせる。ウェイポイントを通過し、次のウェイポイントへと経路が生成された際には、連続的に振動し、進行方向が変わったことを伝達する。最後のウェイポイントへと到達した際には、連続的振動が 5 回繰り返され、ゴールへと到達したことを伝達する。

図 6 に経路伝達手法の概念図を示す。また伝達する情報と通知パターンの対応について表 2 に記した。

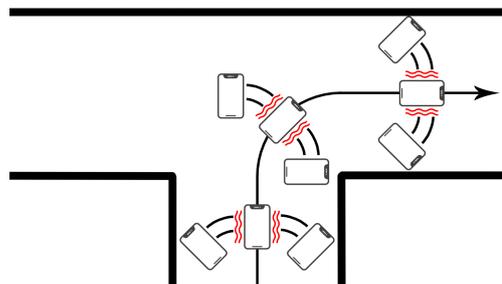


図 6. 経路伝達手法の概念図

表 2. 伝達する情報と通知パターンの対応

伝達する情報	通知パターン
進行方向通知 (通常)	長い振動 1 回 (0.5 秒程度)
進行方向通知 (方向転換点に近い)	短い振動 1 回 (0.2 秒程度)
ウェイポイント通過	連続で振動 (0.2 秒と 0.5 秒程度)
ゴールに到着	連続で振動 (0.2 秒と 0.5 秒程度) 5 回
衝突する危険性がある場合	警告音

## 5 評価実験

### 5.1 晴眼者を対象とした歩行実験

#### 5.1.1 実験方法

本システムで用いた SLAM の測位精度を評価する実験を行った。ある一般的な建物内の廊下の床面に目印となるマーカーを設置して晴眼者 1 名が本システムとともにそのマーカーの地点まで歩行し、マーカーの地点で停止した状態での座標データを取得する。これを同じ地点で 10 回行い精度を評価する。

#### 5.1.2 実験結果

図 7 に SLAM によって取得した 10 回分の歩行経路の全データについて重ねて示す。また、この全体の歩行のデータのうちマーカーの地点で停止している状態 30 フレームを切り出し、マーカーの地点で停止した状態での座標データとした。図 8 にマーカーの地点で停止した状態の座標データを示す。本システムは単眼 SLAM であるため、3 次元情報は相対的にしか計算できず、絶対的な距離情報を得ることができないが、参考として建物の廊下の横幅は 213 cm でありその距離は SLAM により作成した地図上では 0.424 であった。このことから、SLAM の座標データ上での距離 1 は 502 cm に相当する。

停止した状態での座標データについて各歩行ごとの平均値を取り、x, y 方向それぞれに対しデータの範囲と分散を計算したところ、x 方向のデータの範囲は 0.00977 (4.90 cm に相当)、標準偏差は 0.00344、y 方向のデータの範囲は 0.00928 (4.66 cm に相当)、標準偏差は 0.00270 であった。

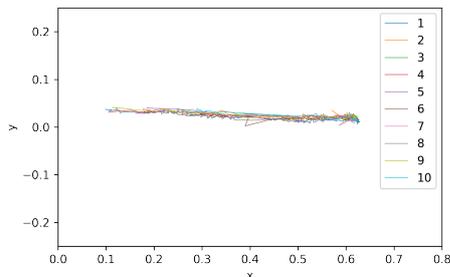


図 7. SLAM の測位精度を評価する実験における 10 回分の歩行経路の全データ

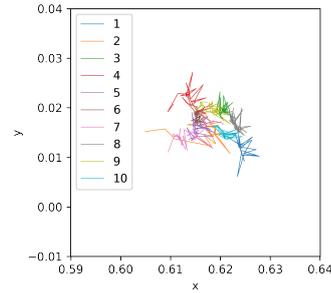


図 8. 停止した状態 30 フレームの座標データ (座標軸の長さ 0.05 は 25.1 cm に相当)

### 5.2 視覚障害者を対象とした歩行実験

#### 5.2.1 実験方法

日本盲導犬協会神奈川訓練センターにて視覚障害者 6 名を対象に屋内における歩行実験を行った。実験の参加者は盲導犬や白杖を利用した単独歩行の経験がある。参加者の属性の内訳は、年齢: 32-65 (平均 51) 歳, 男性 4 名, 女性 2 名, うち盲導犬使用者 1 名, 白杖使用者 5 名である。

当事者を含めた打ち合わせにより、初めて訪れる建物のエレベーターホールから目的地の部屋まで歩行するというシチュエーションを模して、訓練センター 2 階のエレベーターホールのエレベーター前から目的地となる部屋の入り口まで、3 つのウェイポイントを設けたコースを作成した。屋内施設管理者が作成した地図を利用者が用いる状況を考え、地図は事前に用意されたものを用いた。

本システムの概要とインターフェースの動作について口頭で説明した後、システムの使い方を説明しながら実際のシステムと共にコースを歩行してもらい、動作の理解が確認できた段階で実験に移った。説明に際しては最大 2 回コースを歩行してもらった。その後エレベーターホールから設定したウェイポイントを順にたどり、目的地となる部屋まで本システムと白杖を用いて歩行してもらった。実験後、経路伝達手法に関して実験参加者からのフィードバックをもらった。システムが誤作動し予定の経路から外れた場合や障害物に衝突する可能性を考え、経路外の安全の確保や、参加者 1 名につき支援者 1 名以上を確保し、安全面での指導と管理を行うなど安全性には十分注意して行った。図 9 が歩行実験の様子である。

#### 5.2.2 実験結果

実験参加者全員が振動のある方向を維持し、体を回転させることにより探りながら歩くことができた。特に白杖を用いた参加者は、白杖を用いた普通の歩行の動作を通じて進行方向を把握し、歩行すること

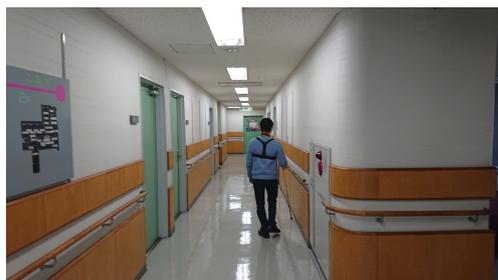


図 9. 視覚障害者を対象とした歩行実験の様子

ができた。また、実験本番では実験参加者全員が設定されたルート歩き、目的地で停止することが出来た。

実験参加者からのフィードバックでは、前方で左右に手を振りながら歩き進行方向へ誘導する手法に関して、進むべき方向が直感的にわかった、曲がり角をどちらに曲がるべきかがよくわかった、といった好意的な声があった一方、進行方向を振動で伝える手法はそのまま音を併用したほうがわかりやすいといった声もあった。また、振動の周期を変化させることで目的地までの距離を伝達する手法に関しては、直進中にそろそろ曲がるということがわかり身構えることができた、といった好意的な声があった一方で、振動の使い分けが難しいといった否定的な声もあった。アンケート結果としては、好意的な評価が多く、使いたい、使うのが簡単、すぐに使えるようになるという項目が高い一方で、否定的な評価としては事前に多くのことを学ぶ必要があるという項目が高かった。

### 5.3 考察

図 5.4 より、停止した状態 30 フレームの座標データはいずれも  $x, y$  方向ともに 15 cm 相当の範囲に収まっている。また、停止した状態での座標データの各歩行ごとの平均値の範囲は、 $x, y$  方向ともに 5 cm 弱に相当する。視覚障害者の歩行支援においては、視覚障害者が白杖で確認できる範囲が半径 1m ほどであることから、自己位置推定の際には誤差 1m ほどで測位する事が望ましい [3]。よって本システムの SLAM は屋内での経路案内に十分な測位精度があると考えられる。

視覚障害者を対象とした歩行実験では、目的地まで決められたルートに従い歩行し、最終目的地で停止できた点で、本手法のガイダンス精度は十分高く、有効であることが分かった。

練習の際うまく目的地にたどり着けない原因として利用者のシステム理解が口頭の説明だけでは不十分であったことが挙げられる。練習の際に場所によって SLAM が機能しにくい点があること、必ずしも振動の方向通りに歩かなくてもシステムがリアルタイ

ムで経路作成し案内してくれることを説明し、利用者のシステム理解を深めることで、本番では全員が設定されたルート歩き、目的地で停止することが出来た。

また、前方で左右に手を振りながら歩き進行方向へ誘導する手法と、その振動の周期を変化させることで目的地までの距離を伝達する手法、どちらに対しても好意的な反応が得られ、視覚障害者の歩行支援システムにおける経路伝達手法として今後も発展が期待される。一方、フィードバックには振動の使い分けが難しいといった声や、振動と音を併用したほうがわかりやすいといった声があり、振動パターンの違いだけで情報を伝達することの難しさも明らかになった。聴覚により情報提示する場合は、人の声よりは短い音による伝達が望ましいとの声もあり、今後の改良として現状のシステムに曲がり角に来た、方向が間違ったといった際に音で通知する機能を追加することが考えられる。

## 6 まとめ

本論文では、まず視覚障害者の安全かつ自由な歩行のためにはいまだに多くの課題があることに注目し、既存の白杖や盲導犬による視覚障害者の歩行支援の現状についてと、その問題点について述べた。次に、人間が歩行する際の要素や視覚障害者およびその支援者を対象としたインタビューから視覚障害者の歩行支援に求められる要素について整理した。また、コンピュータを用いた歩行支援技術に関する先行研究について、地図作成および障害物検知手法と利用者への情報の伝達手法 2 つの視点から分類し、それらの手法の特徴と長短について比較して論じた。これらを踏まえて、地図作成および自己位置推定手法として Visual SLAM を用いて、経路案内手法として方位センサと振動子を内蔵した手持ちデバイスを用いた森らの手法に、方向転換点との距離に応じて振動周期を変化させ、進路変更のタイミングを事前に通知する手法を組み合わせたシステムを実装して、その評価を行った。SLAM の精度を評価するための実験では、本システムとともに床上に設置したマーカーまで歩行する試行を複数回行い、その誤差から本システムの SLAM は屋内での経路案内に十分な測位精度があることがわかった。視覚障害者を対象とした歩行実験では、参加者全員が設定されたルートを歩くことが出来、本システムの有効性が確かめられた。また、伝達手法の使用感に関しても参加者のフィードバックから好意的な反応が得られ、本システムの誘導手法は視覚障害者の歩行支援システムにおける経路伝達手法として有効であることがわかった。

今後、より利用者が簡単に使えるシステムとするために、振動パターンの違いで情報を伝達するだけでなく、音声等の併用も行っていく。

## 謝辞

本論文の研究は一部、三菱財団社会福祉事業・研究助成「ウェアラブルカメラによる 3D スペースセンシングと触覚通知による、視覚障害者のための屋内ナビゲーションシステムの開発」によるものです。支援者・当事者による評価では、神奈川県視覚障害者福祉協会の鈴木孝幸様、日本盲導犬協会神奈川訓練センターの山口義之様、多和田悟様にご協力いただきました。VSLAM システムの Android 実装につき、株式会社デジタルハンズの清水敏雄様にサポートいただきました。

## 参考文献

- [1] M. Brock and P. O. Kristensson. Supporting blind navigation using depth sensing and sonification. In *Proceedings of the 2013 ACM Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing Adjunct Publication, UbiComp '13 Adjunct*, pp. 255–258, 2013.
- [2] A. Cosgun, E. A. Sisbot, and H. I. Christensen. Guidance for human navigation using a vibrotactile belt interface and robot-like motion planning. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6350–6355, 2014.
- [3] N. Fallah, I. Apostolopoulos, K. Bekris, and E. Folmer. Indoor human navigation systems: A survey. *Interacting with Computers*, 25(1):21–33, 2013.
- [4] J. Guerreiro, D. Sato, S. Asakawa, H. Dong, K. M. Kitani, and C. Asakawa. CaBot: Designing and Evaluating an Autonomous Navigation Robot for Blind People. *The 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 68–82, 2019.
- [5] C. S. Kallie, P. R. Schrater, and G. E. Legge. Variability in stepping direction explains the veering behavior of blind walkers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(1):183, 2007.
- [6] S. Kayukawa, T. Ishihara, H. Takagi, S. Morishima, and C. Asakawa. BlindPilot: A robotic local navigation system that leads blind people to a landmark object. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–9, 2020.
- [7] R. Mur-Artal and J. D. Tardós. ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras. *IEEE transactions on robotics*, 33(5):1255–1262, 2017.
- [8] M. Pielot, B. Poppinga, W. Heuten, and S. Boll. Pocketnavigator: Studying tactile navigation systems in-situ. pp. 3131–3140, 2012.
- [9] 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.
- [10] R. Tapu, B. Mocanu, and T. Zaharia. Real time static/dynamic obstacle detection for visually impaired persons. In *2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 394–395, 2014.
- [11] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents). *The MIT Press*, 2005.
- [12] K. Tsukada and M. Yasumura. Activebelt: Belt-type wearable tactile display for directional navigation. *Lecture Notes in Computer Science*, 44, 2004.
- [13] A. Wachaja, P. Agarwal, M. Zink, M. R. Adame, K. Möller, and W. Burgard. Navigating blind people with a smart walker. *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6014–6019, 2015.
- [14] 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, 2014.
- [15] H. Zhang and C. Ye. A Visual Positioning System for Indoor Blind Navigation. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 9079–9085, 2020.
- [16] 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, 2003.
- [17] 栗林 雅希, 粥川 青汰, J. Vongkulbhisal, 浅川 智恵子, 佐藤 大介, 高木 啓伸, 森島 繁生. Corridor-Walker: 視覚障害者が障害物を回避し交差点を認識するためのスマートフォン型屋内歩行支援システム. *The 29th Workshop on Interactive Systems and Software (WISS 2021)*, 2021.
- [18] 厚生労働省. 平成 28 年生活のしづらさなどに関する調査 (全国在宅障害児・者等実態調査) 結果, 2018.
- [19] 山崎康平, 穴戸英彦, 北原格, 亀田能成. 類似画像検索と SLAM による協調的位置推定システムの性能評価. 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報, 119(222):89–94, 2019.
- [20] 森 大輝, 入江 英嗣, 内原 正一, 荒川 明宏, 坂井 修一. 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. *The 26th Workshop on Interactive Systems and Software (WISS 2018)*, 2018.
- [21] 大倉元宏, 清水美知子, 田内雅規, 村上琢磨. 視覚障がい者の歩行の科学 - 安全で安心なひとり歩きをめざして -. 2014.
- [22] 大倉元宏, 村上琢磨, 清水学, 田内雅規. 視覚障害者の歩行特性と駅プラットフォームからの転落事故. *人間工学*, 31(1):1–8, 1995.

- [23] 嶋村幸仁, 山口通智, 片山博. リスク概念と視覚障害者のハザード要因に関する研究. 安全工学, 53(2):108-114, 2014.
- [24] 福井良太. 世界から見た日本の盲導犬育成事業. 日本補助犬科学研究, 2(1):22-25, 2008.
- [25] 友納正裕, 原祥堯. SLAM の現状と今後の展望. システム/制御/情報, 64(2):45-50, 2020.

### 未来ビジョン

本研究では RGB カメラを用いた Visual SLAM を用いたが LiDAR など別のセンサを使う, あるいは併用してのさらなる安定化と精度の向上が検討される. さらに実際に視覚障害者が単独で用いることを想定したインターフェースの開発なども挙げられる. 視覚障害者が手軽に使えるシステムとするために今後とも当事者を含めた議論を重ねていく. そして将来的にはホテル・病院など屋内施設内における

視覚障害者のナビゲーションシステムの実現を目指している. これにより屋内でのナビゲーションを可能とし, 視覚障害者の単独での外出を後押しする. 具体的には, ホテルなどが貸し出した端末や, 利用者のスマートフォンなどを利用者が身に着け, 目的の部屋などへのルートを自動で生成し, 案内を行う利用法が検討される. そして, どんな人であってもコンピュータ技術によって不便を克服し, 気軽に社会参画できる未来を見据えている.