

修士論文

方位センサと振動子を用いた  
視覚障害者の歩行支援システム

Walking Support System for The Visually Impaired  
using an Electronic Compass and a Vibrator

平成 31 年 1 月 31 日提出

指導教員

坂井 修一 教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科  
電子情報学専攻

48-176432 森 大輝

# 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。また、視覚に頼らず歩いていると知らないうちに意図しない方向へ曲がってしまうという偏軌傾向と呼ばれる特性のために、方向の定位が単独歩行の際のストレスになっており、方向を見失ったために発生した事故も多い。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地図の作成・自己位置推定・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。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。またシステム全体の動作の評価のために目隠しをした晴眼者を対象とした歩行実験を行ったところ、磁気干渉による方位センサのずれへの対策が安定した動作のために必要であるとわかった。

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	視覚障害者の歩行の困難と現状	3
2.1	視覚障害者の歩行の困難	3
2.2	現在用いられている支援機器	5
第3章	コンピュータを利用した既存の歩行支援技術	7
3.1	障害物の検知	7
3.2	利用者への情報の伝達	8
第4章	歩行補助デバイスに求められる要件	11
第5章	提案手法	13
5.1	システム全体の構成	13
5.2	地図の作成	16
5.3	自己位置の推定	18
5.4	障害物の検知	20
5.5	経路の計算	22
5.6	利用者への経路の伝達	26
第6章	評価実験	27
6.1	視覚障害者を対象とする屋内歩行実験	27
6.2	目隠しをした晴眼者による屋内歩行実験	30
6.3	考察	32
第7章	おわりに	33

7.1	本論文のまとめ . . . . .	33
7.2	今後の展望 . . . . .	34
	参考文献	35

# 目次

5.1	方位センサと振動子を用いた経路伝達手法 . . . . .	14
5.2	提案システムの機器構成 . . . . .	15
5.3	提案システムの処理の流れ . . . . .	15
5.4	屋内の占有格子地図 . . . . .	16
5.5	ドローンにより撮影された写真より構築された芹沢公園の3次元データ . . . . .	17
5.6	3次元データを利用して作成された芹沢公園の占有格子地図 . . . . .	17
5.7	Loop Closing . . . . .	19
5.8	障害物検知の様子 . . . . .	21
5.9	人工ポテンシャル法におけるポテンシャル場 . . . . .	23
5.10	人工ポテンシャル法により作成された経路 . . . . .	23
5.11	A*アルゴリズムで障害物により作られるコスト関数 [1] . . . . .	24
5.12	A*アルゴリズムにより作成された経路 . . . . .	25
5.13	A*アルゴリズムのコスト関数 . . . . .	25
6.1	視覚障害者を対象とした歩行実験の様子 . . . . .	28
6.2	視覚障害者を対象とした歩行実験で用いた機器の構成 . . . . .	28
6.3	視覚障害者を対象とした歩行実験における実験参加者の歩行の軌跡 . . . . .	29
6.4	目隠しをした晴眼者を対象とした歩行実験のコース . . . . .	30
6.5	目隠しをした晴眼者を対象とした歩行実験で用いた機器の構成 . . . . .	31

# 表目次

2.1	始点からの距離 $d$ における被験者と中心線からの二乗平均 [2] . . . . .	4
2.2	始点からの距離 $d$ における被験者と中心線からの二乗平均 [2] . . . . .	4
2.3	長方形の角部における被験者の誤差 [2] . . . . .	4

# 第 1 章

## 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 [3]．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 [4]．

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み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．

また，人間が視覚に頼らず歩行すると知らないうちに意図しない方向へ曲がってしまう偏軌傾向という特性のために，方向の定位が視覚障害者の歩行の際のストレスとなっている [5] [2]．また，方向を見失って意図しない方向に歩いた結果発生した事故も数多く認められている [6]．

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要件を整理した上で、それらを踏まえたシステムの提案を行い、視覚障害者を対象とした実験による使用感評価と目隠しをした晴眼者を対象としたシステムの動作に関する評価を行った。提案システム全体としては、地図の作成・画像と慣性計測装置による自己位置の推定・深度センサによる障害物検知・現在地から目的地に向かう経路生成・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。経路の伝達手法について評価するために実際に視覚障害者を対象に使用感評価を行い、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。システム全体の動作について評価するために目隠しをした晴眼者を対象に屋内における歩行実験を行ったところ、磁気干渉による方位センサのずれへの対策が安定した動作のために必要であるとわかった。

以降、第2章では視覚障害者の歩行に関わる困難および現在用いられている支援技術について説明する。第3章ではコンピュータを用いた既存の歩行支援技術の研究についてまとめる。次に第4章ではヒアリングによって得られた歩行補助デバイスに求められる要件についてまとめ、それを踏まえて第5章で本研究の提案をし、6章で評価について説明する。そして最後に第7章でまとめとする。



## 第2章

# 視覚障害者の歩行の困難と現状

### 2.1 視覚障害者の歩行の困難

人間が移動する際には、自分が今どこにいるのか、目的地はどこか、それはどの方向にあるのか、そしてどのように目的地に向かうのか、などといった事柄を把握しながら進んでいく。これには、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つの要素が関わってくる [7].

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。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、それを頼りとして移動をする。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。

2つ目のオリエンテーションとは自分と周囲の環境の位置関係を把握し、目的地の方向を認識して次に歩くべき方向を見つけるという能力である。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、といったことを把握する必要がある。視覚を用いることができれば、周りを見渡すことで周囲の環境と自分の位置関係は瞬時に把握することができる。しかし、視覚を用いることができない場合、手の届く範囲のものや周りから聞こえる音でしか情報を得ることができなくなる。そのため、視覚障害者が環境を認識するには移動しながら集めた情報を頭の中で整理し、以前の体験をつなげ合わせなければならない。

3つ目のモビリティとは障害物の位置を把握し、それを避けながら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ず、頭上の障害物に衝突するような事故も起きている。

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 [5] [2]. 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しまう可能性がある。偏軌傾向に関し、Sekita らは視覚情報が得られないときの歩行特性を調べるために、5人の視覚障害者を対象に2種類の実験を行った [2]. 1つ目の実験では、被験者は体育館の中央から約11m先の壁に向かってまっすぐ歩き、その軌跡を記録した。表2.1が始点からの距離  $d$  における被験者と中心線からの距離の二乗平均である。さらに、偏軌傾向として得られた二乗平均を指数関数で近似したところ、 $v = 0.003015 \times d^{3.0184}$  という結果が得られた。これより、ほぼ3次式で近似できることがわかり、そしてこのモデルが正しいと仮定した時の20m先までの二乗平均を推定した結果を表2.2に示す。2つ目の実験では、被験者は縦9m、横3mの長方形の線上を左回りに歩き、実験1と同様にその軌跡を記録した。表2.3が長方形の角における被験者の位置の誤差である。これらの実験から、出発点からの歩行距離が長くなればなるほど、また角を曲がるほど、偏軌傾向の影響は大きくなることがわかった。

このような偏軌傾向の影響のために、視覚障害者にとって方向の定位が大きなストレスになっている。Ohkura らは二次課題法によってそれを検証した [8]. 二次課題法とは、人間の情報処理能力に限界があることを根拠に、対象とする作業（一次課題）のパフォーマ

d(m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
v(m <sup>2</sup> )	0.008	0.019	0.047	0.098	0.199	0.362	0.667	1.097	1.595

表 2.1 始点からの距離  $d$  における被験者と中心線からの二乗平均 [2]

d(m)	4	6	8	10	12	14	16	18	20
v(m <sup>2</sup> )	0.193	0.651	1.544	3.015	5.210	8.271	12.349	17.583	24.120

表 2.2 始点からの距離  $d$  における被験者と中心線からの二乗平均 [2]

1 番目の角	2 番目の角	3 番目の角	4 番目の角
0.808	1.218	1.421	2.122

表 2.3 長方形の角部における被験者の誤差 [2]

ンスが直接測定することが難しい場合に、パフォーマンスの測定の容易な別の作業（二次課題）を同時に行わせることで、二次課題の結果から一次課題の負荷を測定しようというものである。

この実験ではテストルートにおける歩行が一次課題として設定され、被験者が白杖を用いて単独で歩行するケースと、単独歩行と同じ速さで歩行訓練士に誘導されて歩行するケースの2通りが用意された。誘導歩行は単独歩行に対するリファレンスとして行われ、身体的な負荷は単独歩行と同じで方向定位を行う負荷が低く抑えられた状態とみなすことができる。二次課題には振動刺激に対する反応が用いられ、振動への反応の精度と反応までの時間によってそのパフォーマンスが計測された。被験者は手首背面に振動子を装着し、2種類の周波数の異なる振動が与えられ、その一方に対して手持ち型押しボタンスイッチで応答させた。

この実験により、単独歩行時は誘導歩行時と比較し、振動への反応時間は増大し、反応の精度は低下したという結果が得られた。これは、単独歩行時は誘導歩行時よりも多くのリソースを割く必要があり、視覚障害者の負担も大きいということがわかる。

## 2.2 現在用いられている支援機器

### 2.2.1 白杖の役割

白杖は視覚障害者が歩行するときに携帯することが義務付けられている白い杖である。身長より40～50cm短い程度長さの杖で、身体の前を左右に振りながら使用する。白杖には主に以下の3つの役割がある。

- 周囲の状況や路面の変化などの情報を入手する
- 障害物との間の緩衝器となり安全を確保する
- 視覚障害者であることを周囲に知らせる

視覚障害者がいきなり白杖を持って外を単独行動するのは難しく、正しく利用できないと安全を確保することができないため、歩行訓練士の指導を受けることが望ましい。

### 2.2.2 盲導犬の役割

盲導犬は視覚障害者の安全かつ快適な歩行の手伝いをする犬である。具体的に盲導犬の役割は主に以下の5つである。

- 道の左側に寄って歩く
- 障害物を避ける
- 段差の手前や道の角で止まって教える
- ドア，エスカレーター，改札などの目標物を探す
- 人の指示した方向に進む

基本的にこの5つの組み合わせで盲導犬は視覚障害者の補助をしている。そのため、目的地まで盲導犬が連れていってくれるわけではなく、利用者が頭の中に道順を描いて右折や左折，直進などの指示を出しながら歩いていくことになる。また，犬は信号の色を判別できないため利用者が人の流れや車の音から横断歩道を渡ってよいか判断し，渡れという指示を出す。基本的に盲導犬は利用者の指示に従うが，その指示に従った結果危険があると判断した場合には指示には従わず停止する。

## 第 3 章

# コンピュータを利用した既存の歩行支援技術

### 3.1 障害物の検知

#### 3.1.1 超音波を用いるもの

いままでに多くの研究者が白杖に超音波センサを取り付けることで、障害物の検知をしようと試みている [9] [10] [11]. 超音波センサを用いることで通常の白杖では検知することの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早く察知することができる。すでに実用化され、市販されているものもある。

#### 3.1.2 カメラを用いるもの

Pundlic らはカメラより取得した RGB 画像のフレーム間の関係より障害物を検知しようとしている [12]. 処理の流れとして、まず SIFT [13] や SURF [14] を利用して画像中の特徴点を抽出する。次に前のフレームと比較して各特徴点の移動ベクトルを計算する。そして RANSAC [15] を用いて変化の少ない背景を除き、残った特徴点を近隣の特徴点との関係を元にクラスタリングする。そして各オブジェクトについて移動方向を求めてカメラに接近しているようであれば警告を行う。以上の流れで障害物の検知を行う。

Kang らはフレーム間の関係を利用し、さらに deformable grid という概念を用いて障害物との衝突リスクを図ろうとしている [16]. deformable grid とは画像上に重なるように張られた格子であり、画像中の特徴点の移動に合わせて対応する格子の交点が移動することで変形するよう。画像内の特徴点の移動が大きい場所ほど格子の変形が大きくなり、そ

の変形の大きさを衝突のリスクを算出している。この研究では目隠しをした晴眼者を対象に障害物を設置したコースを歩行する実験を行っている。障害物の存在はイヤホンから通知され、ほとんどの被験者が障害物と衝突することなくゴールにたどり着けたという結果が得られている。

### 3.1.3 深度センサを用いるもの

Brock らは深度センサを用いることで前方の障害物を検知しようとしている [17]。深度センサによって正面の深度画像を取得し、それをいくつかの長方形によって区切り、その領域内のもっともセンサから近い点を代表点とする。その中から衝突の可能性がある点を障害物として通知する。

Wang らも同様に深度センサを用いて障害物の検知を行っている [18]。深度センサを首から提げて前方の3次元情報を取得し、それを元に歩行可能領域と障害物領域を識別することで、障害物を回避しながら歩くことを実現しようとしている。

## 3.2 利用者への情報の伝達

### 3.2.1 触覚を用いるもの

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を利用者の手に持たせて経路を伝える研究をしている [19]。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、上部のバックが下部のバック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情報の伝達を行う。回転によって目的地の方向を、伸縮によって目的地までの距離を表している。人間の指先は敏感にできており、形状の変化による情報の伝達は感じ取りやすく、多くの訓練を必要とせず使うことができる。

触覚ディスプレイによって障害物の位置を伝えようとする研究もある [20] [21]。触覚ディスプレイとは平面上に上下に動くピンが並べられており、ピンの ON/OFF によって生まれる凹凸によって情報を伝えるものである。深度センサによって利用者前方の障害物の様子を取得し、障害物に対応する位置のピンを上げ、それを手で触って感じることで利用者に前方の様子を把握させる。

Tsukada らや Cosgun らはベルトの周上に等間隔で振動子を取り付け、それらの振動させる位置や順番によって情報の伝達をしようとしている [22] [23]。振動させる位置やパターンを変えることで様々な情報が与えられるようになっている。目的地までのナビゲー

ションをする場合は目的地の方向の振動子を振動させる。距離に応じて振動の間隔を変えることで目的地までの距離も伝えられるようになっている。また、Cosgunらは直線移動と回転移動の指示のために、様々な振動パターンを用意し、実験により方向定位の精度評価を行った。

Xuらは、靴の底に複数の振動子を取り付け、それらを振動させることによって進路の指示をしようとしている [24]。指示に用いる振動の要素としては、振動させる位置・1命令あたりの振動の数・振動する時間の長さ・振動と振動の間隔、の4つを用いている。これらの要素の組み合わせによって左・右・前方・後方・停止の5種類の動作の指示をしている。4種類の振動のパターンによる指示の方法を用意して60人の被験者による方向定位の精度評価を行った。

Amemiyaらは非対称な振動を与えることで生まれる擬似的な牽引力で視覚障害者の誘導をしようと試みている [25]。人間の皮膚の刺激に対する知覚は非線形であり、速い動きは感じやすい一方で遅い動きには反応が鈍いという特性を利用している。振動子を一方向へは短時間かつ大きな加速度で動かし、もう一方には長時間かつ小さな加速度で動かすことで、実際には2方向の力が与えられているにも関わらず、錯覚により一方向の力として感じとられる。これを用いることで手を引くような誘導をしようと試みている。この研究で用いられたデバイスは8方向に擬似的な牽引力が与えられ、片手にこの触覚デバイス、もう一方の手に白杖を持って歩いて誘導を行った。

### 3.2.2 音声を用いるもの

音声を用いる手法としては、Brockらの提案している手法が挙げられる [17]。この手法は深度センサによって障害物の情報を取得し、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位置や高さ・距離などを伝えるものである。処理の流れとして、まず深度センサにより正面の深度画像を取得し、その深度画像から衝突の可能性のある障害物を検知し、その障害物の情報を3次元的な音声によって利用者に伝える。音量によって利用者と障害物の距離を、音のピッチによって障害物の高さを、ヘッドフォンのパンニングによって障害物の左右の位置を表現している。例えば、利用者の目の前の足元にある障害物は大きな音量・低いピッチで両耳から聞こえる。右前方遠くにある高い位置の障害物は小さな音量・高いピッチで右のヘッドフォンから聞こえる。

### 3.2.3 ロボットやドローンを用いるもの

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 [26]。ロボットにセンサを取り付けて、障害物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とができる。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ーを搭載し、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 [27]。手押し車を使うことでセンサーやコンピュータの大きさ・重量の制限が緩和され、豊かな情報や計算資源が使えるようになる。

Zayer らや Avila らはドローンの駆動音を用いて視覚障害者を誘導しようと試みている [28] [29] [30]。まず、Zayer らの研究は視覚障害者が競技場のトラックにおいて走る際に伴走者の代わりにドローンを用いようとするものである。その中の実験において、視覚障害者はドローンの駆動音によってその位置を正確に当てることができるのかということが検証された。そこで、被験者の前方の円周上にドローンを停止させ、ヘルメットに固定したカメラで向いている方向を推定したところ、画角の中心で捕らえ続けることができ、駆動音から位置を特定することができるということがわかった。

また、Avila らの研究では運動に限らず、一般的な歩行の支援をしようと試みている。小型のドローンを利用者の前方に飛ばし、その後ろをついて歩かせるというものである。この研究では、30人ほどの人がいる混雑した部屋の中で、20m先にあるゴールまでたどり着くことができるかという実験が行われた。騒がしい環境であったにも関わらず、正確にドローンの後ろをついて歩くことができ、壁や人と衝突することなくゴールまでたどり着けたという結果が得られている。



## 第4章

# 歩行補助デバイスに求められる要件

第3章で見たようにコンピュータやセンサの高性能化・小型化によって、視覚障害者の歩行支援をするために様々な技術が考案されてきた。しかしその中で実用に至り広く使われているものは少ない。そこで真に技術に求められていることは何なのかを把握するために、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。議論の中で挙げられた要望や知見を以下に示す。

まず方向通知の要望が多く挙げられた。これは歩行の要素の中でもオリエンテーションの機能の補助である。周りに手がかりになるものがなく、方向感覚を失ってしまった時に自分がどこにいるのか、どの方向に歩き出せば良いか分からなくなってしまうときに恐怖を感じる、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な原因の一つにもなっており、大きな問題である。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 らの報告とも一致しており、次に進むべき方向を伝えることができると、視覚障害者の歩行の助けになると考えられる。

高い位置にある障害物を検知できると嬉しいという点が挙げられた。白杖では足元の様子しかわからないために高い位置にある木の枝や開いた車の後部ドアに衝突してしまうことがある。そのような事故を防ぐために高所の障害物の検知が求められる。

次に、極力音声を使わない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の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は効果を発揮している。一方で、聴覚は視覚障害者にとって周囲の環境についての情報を得るための貴重なチャンネルになっており、ガイドを絶えず聞かなければならないような手法はかえって危険となる。そのため、音声を使用する場合は必要な場面で適切に使うことが求められる。

また、情報を絞ることの重要性が挙げられた。できるだけ脳のリソースを割かずに使えることが望ましく、必要以上に情報を与えることはむしろ煩わしさを感じる事となる。障害物はもちろん衝突しないように避けなければいけないものであるが、自分の居場所を知るための手がかりにもなるものである。近くに障害物があることに逐一反応しては情報が過剰になってしまう。そのため、必要な情報のみを適切なタイミングで伝えられることが望ましい。

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多大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。

他にもあくまで主体は利用者であり、自分が機械を支配しているという感覚が欲しいという話も挙げられた。そのため、利用者の歩行を強制するような方法は好ましくなく、自分の意思で歩けるような方法が求められている。

以上のような当事者視点の要望を得て、これらを元にフィードバックをしながら次章以降の提案・設計を行った。

## 第5章

# 提案手法

### 5.1 システム全体の構成

第4章でまとめた当事者からのヒアリングを踏まえて、進むべき方向をわかりやすく伝えられるシステムの構築を行った。

まず、当事者からの意見でも出たように聴覚を塞ぐような手法は安全上の理由から望ましくないため、音声を主として利用する手法は避けたほうがよい。そして、簡単に使うことができ、取り回しが良いという点を考慮し、ロボットやドローンなどを用いて誘導する手法も選択肢から除き、身につけられるデバイスでの誘導を行うのがよいと判断した。また、振動のパターンを用いるものはその解釈に時間がかかるとともに使い慣れるまでにも労力が必要と考え、位置や方位に基づいた直感的な伝達手法が望ましい。

以上のことを踏まえ、進むべき方向をわかりやすく伝える方法として、方位センサと振動子を用いる手法を提案する。図5.1に示すように、利用者は方位センサと振動子を備えたデバイスを手に持ち、それを身体の前方で左右に振りながら歩く。そしてデバイスの指す方位が進むべき方向と一致した瞬間にデバイスを短く振動をさせることで経路の伝達をする。

身体の前方で左右に手を振りながら歩くという動きは、視覚障害者が白杖を用いて前方を探りながら歩く動作と親和性が高く、この機能を白杖と組み合わせて使うことができる。そのため、普段の歩行と同じように自然に使うことができると期待できる。そして他の手法では進路の伝達のためのデバイスを手に持ったり身体に装着したりする必要があるが、白杖に組み込むことができれば利用の際の煩わしさを軽減できると考えられる。

提案するシステム全体としては地図の作成・自己位置推定・障害物検知・経路生成・経路通知により構成されている。機器の構成は、利用者の胸元に装着された深度センサ・

RGB カメラ・慣性計測装置を備えたデバイス、利用者が手に持つ方位センサと振動子を備えたデバイス、経路の計算を行う PC から成る。まず、現在地から目的地に進む経路を作成するためには地図が必要となるため、地図の作成を行う。地図は占有格子地図により表現されたものを用いる [31]。自己位置推定では利用者に装着したデバイスの RGB カメラと慣性計測装置を用いて行う。障害物検知では利用者に装着したデバイスの深度センサを用いて進行方向の 3 次元形状を取得し、障害物を検出する。障害物検知のための手法として他に RGB カメラや超音波センサの利用が考えられたが、絶対的な距離が測定できてかつ空間解像度が高いという点、そして深度センサの小型化は急速に進んでおり、身につけられる程度の大きさになってきているという点から深度センサを利用することに決定した。経路生成ではあらかじめ作成しておいたマップを利用して、現在地から目的地（あるいはウェイポイント）の方向へ歩くための経路を算出する。経路通知では先述の方位センサと振動子を備えたデバイスを用いて利用者に歩くべき方向を通知する。提案システムの機器構成としては図 5.2、処理の流れは図 5.3 のようになる。

以下の節で、システムの各部の詳細について述べる。

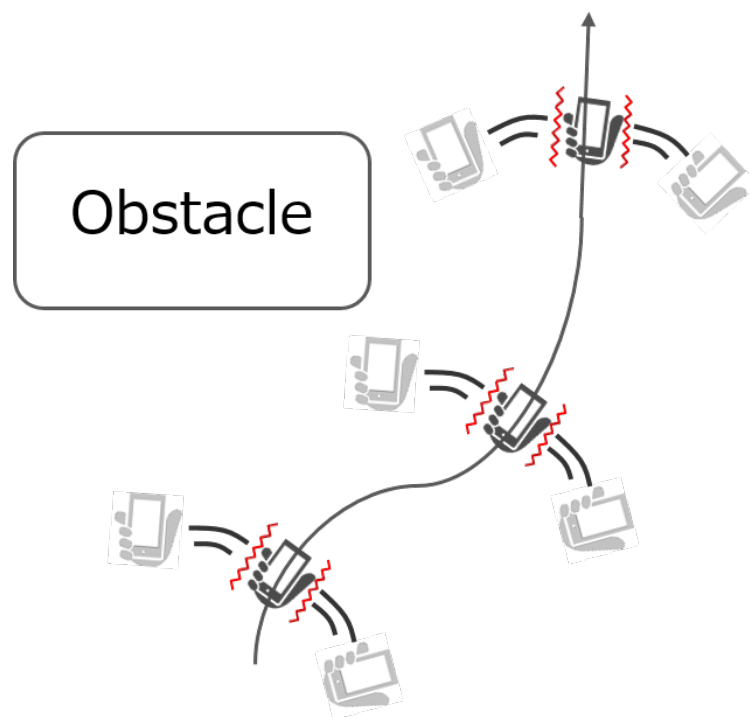


図 5.1 方位センサと振動子を用いた経路伝達手法

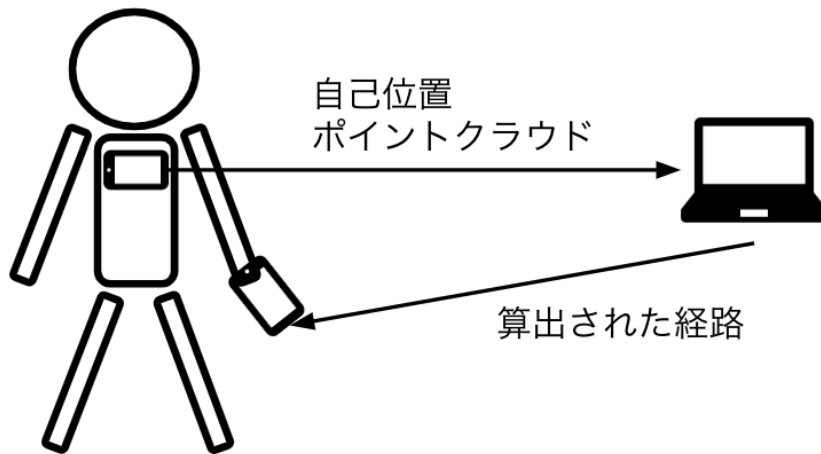


図 5.2 提案システムの機器構成

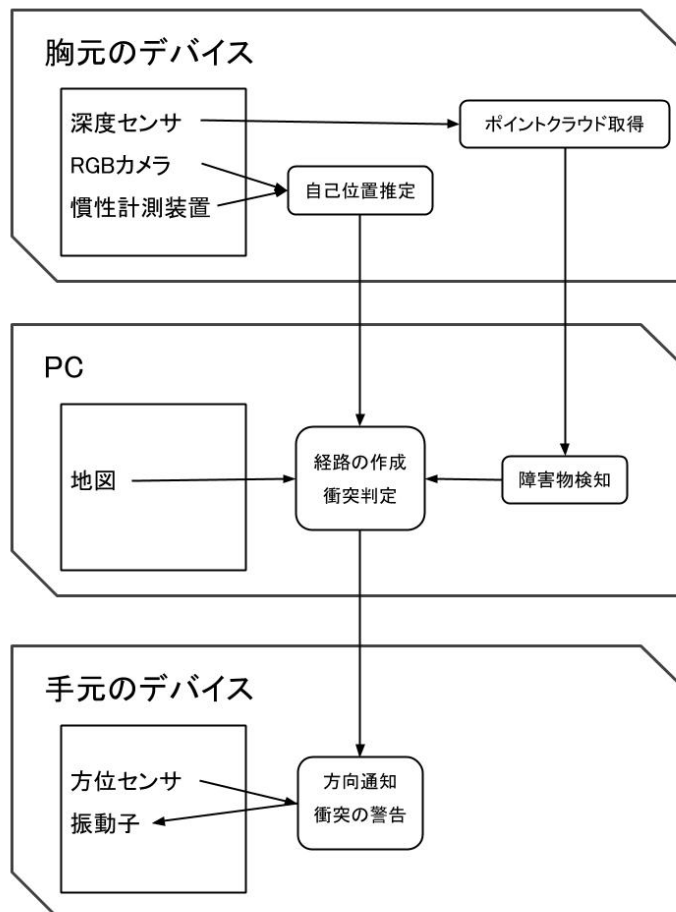


図 5.3 提案システムの処理の流れ

## 5.2 地図の作成

まず、目的地の方向を把握し、どのように目的地に向かうかということを決定するためには地図が必要になる。この地図は占有格子地図で表現したものをを用いる [31]。占有格子地図とは空間を格子状に区切り、各格子に障害物の占有確率を格納することで表される地図である。図 5.4 は Google Tango を用いて作成した屋内の地図である [32]。白い領域が歩行可能領域、黒い領域が障害物領域、灰色の領域が不明な領域を表している。

また、屋外の広範囲な地図の作成のために、ドローンの空撮画像から 3 次元データを作成した。ドローンを用いて神奈川県座間市にある芹沢公園を上空から撮影し、Pix4Dmapper というクラウドサービスを用いて 3 次元再構成を行った [33]。図 5.5 に得られた 3 次元データを示す。そして、その 3 次元データから作成した占有格子地図を図 5.6 に示す。

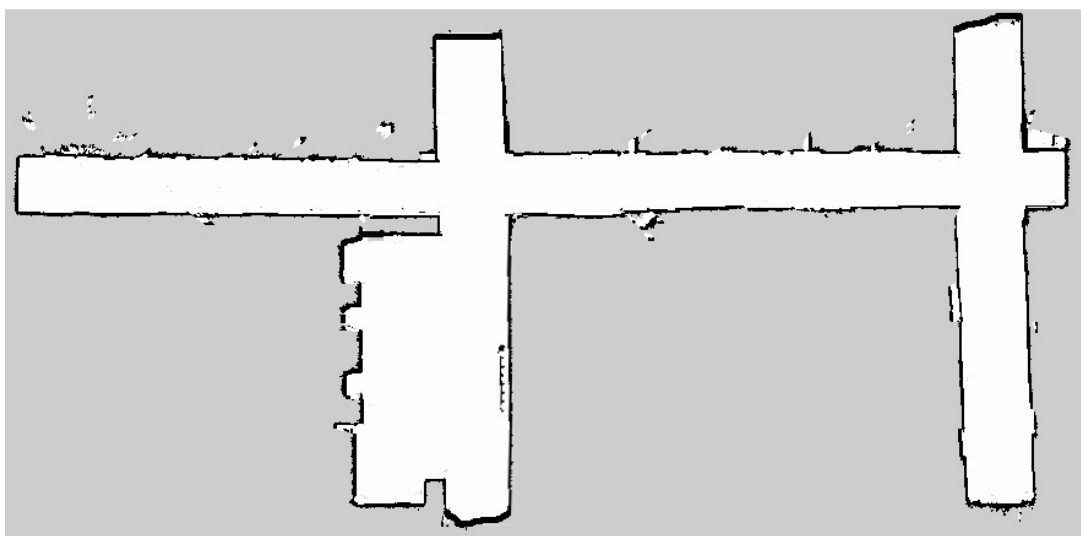


図 5.4 屋内の占有格子地図

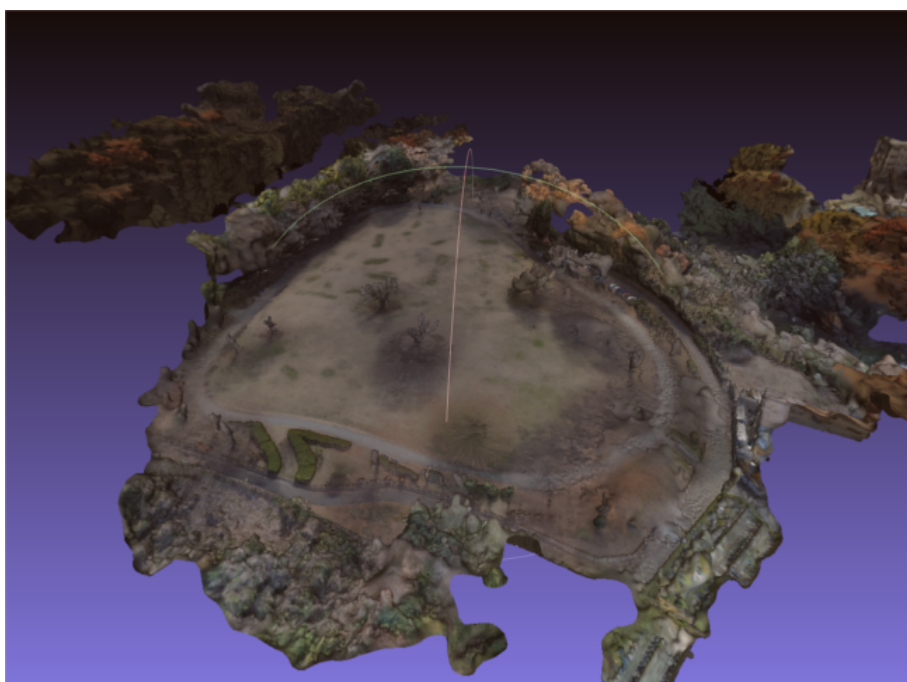


図 5.5 ドローンにより撮影された写真より構築された芹沢公園の3次元データ

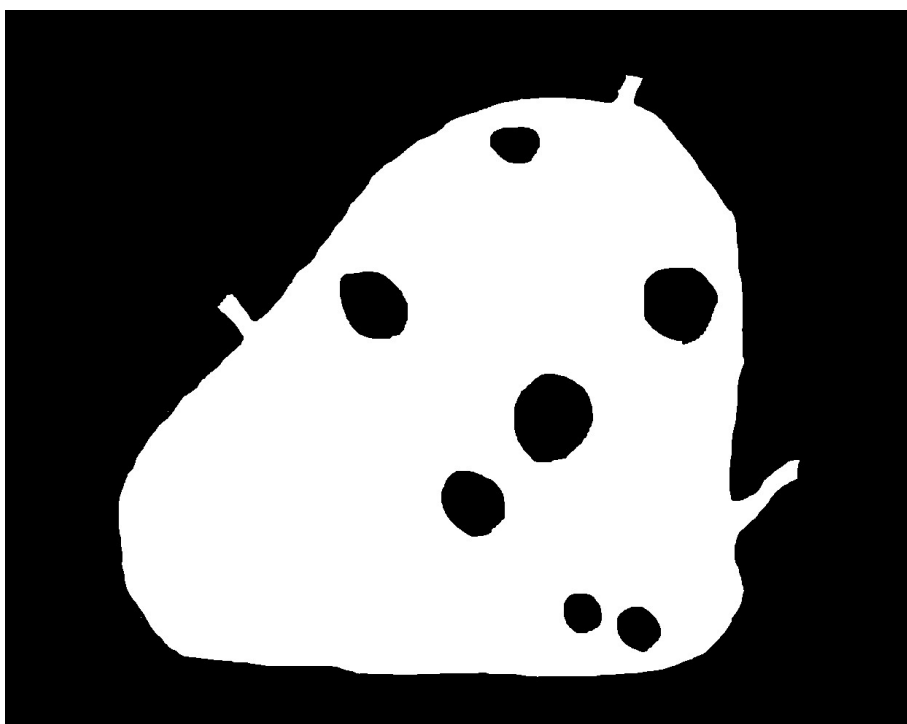


図 5.6 3次元データを利用して作成された芹沢公園の占有格子地図

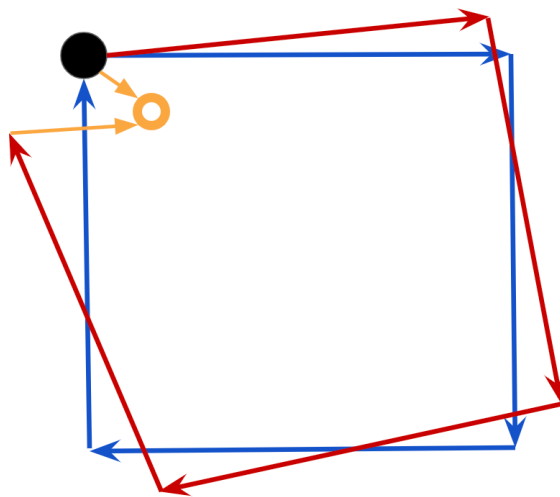
## 5.3 自己位置の推定

目的地へたどり着く経路を作成するためには、まず自分の位置を把握しなければならない。そのために、胸元に装着したデバイスを用いた Visual Inertial Odometry と Loop Closing によって自己位置の推定を行う。

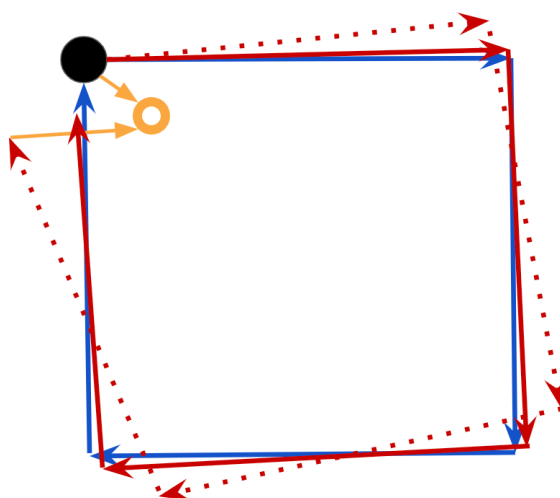
Visual Inertial Odometry とは慣性計測装置と画像を用いて自己位置の変位を推定する技術である [34]。慣性計測装置は加速度センサとジャイロセンサから成り、バイアス誤差を除くために地磁気センサなどを含む場合もある。慣性計測装置から得られた加速度と角速度を用いることでデバイスの移動・位置を推定する。画像を用いる自己位置推定は、フレーム同士の関係を用いて行われる。異なるフレーム間の対応する点から3次元の形状を構築し、構築された3次元形状とまた別の画像を照らし合わせることでその画像の視点を求める。このように3次元形状の構築と画像の視点の推定を繰り返すことで、自己位置の推定が行われる。Visual Inertial Odometry では慣性計測装置と画像を組み合わせて自己位置推定を行っている。

Loop Closing とは移動中に観測した情報を記録しておき、現在の情報と照らし合わせて以前通った点に再度訪れたことを検出することで移動の軌跡および自己位置の補正を行う技術である。Visual Inertial Odometry 単体で用いると、移動距離が長くなるにつれて自己位置推定の誤差が蓄積し、増加し続けてしまう。その誤差を過去の情報を用いて補正することで自己位置推定の精度を上げることができる。図 5.3 は Loop Closing の様子を示した図である。図 5.3(a) の青い実線が実際の軌跡で赤い実線が推定された軌跡である。この状態では蓄積した誤差のために一周して元の位置に戻ってきたにも関わらず、離れた位置にいると推定されている。ここで図中で橙色の円として描かれているランドマークを認識して元の位置に戻ってきたと判断できると、図 5.3(b) のように軌跡を補正して推定の精度を上げることができる。





(a)



(b)

図 5.7 Loop Closing

## 5.4 障害物の検知

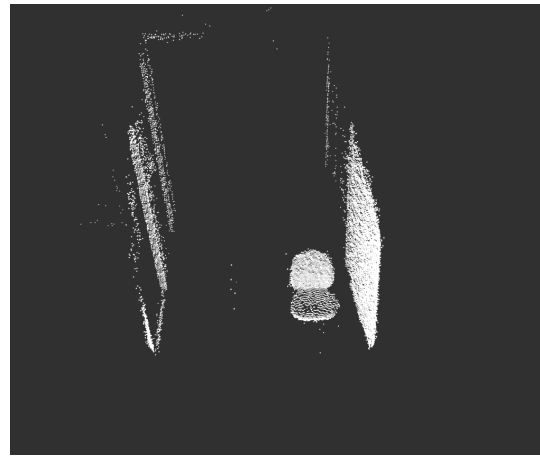
障害物との衝突を回避するために、深度センサからの情報を用いて障害物の検知を行う。深度センサからは3次元の位置座標が格納された点の集合が取得できる。これをポイントクラウドと呼ぶ。以下のようにして、深度センサの情報から障害物を検知する。

1. 生のデータは点が多すぎるために計算負荷が大きく、処理量を減らすためにポイントクラウドのダウンサンプリングを行う。3次元空間を直方体に分割し、各直方体内の点の重心をその直方体の代表点とすることで扱う点の数を減らす。
2. ノイズフィルタをかけることで外れ値を除く。深度センサからのデータはノイズが乗っていることが多く、そのままではその後の処理に悪影響を与える。各点の近傍に統計的分析を行うことで、基準を満たさないものを除去する。入力データ内の各点について近傍点との平均距離を計算し、その平均距離の分布がガウス分布であると仮定し、近傍点との平均距離が全体の平均距離と標準偏差によって定義される閾値の外にある点を異常値として除く。
3. 深度センサから取得されたデータはセンサ座標系で表現されており、これをワールド座標系で扱うためにポイントクラウドの座標変換を行う。深度センサが載っている機器の姿勢を取得し、ピッチ方向の傾きを打ち消すようにアフィン変換をすることで、ポイントクラウドをセンサ座標系からワールド座標系に変換することができる。以前はより正確な障害物検知のために RANSAC によりセンサ座標系における床面検出をし、その法線ベクトルを用いることでセンサ座標系の床面とワールド座標系の床面を合わせて座標変換を行っていたが、計算の負荷が大きいため、足元の障害物の検知は白杖に任せ、ある程度より高い位置にある障害物の検知を担うためにこの手法を採った。
4. 有効な範囲内の点のみを扱うためにレンジフィルタをかける。例えば、2m 以上の高さにあるような物体は歩行する上での障害とはならないので除外する。
5. 3次元のポイントクラウドを2次元平面に射影し、障害物領域とする。

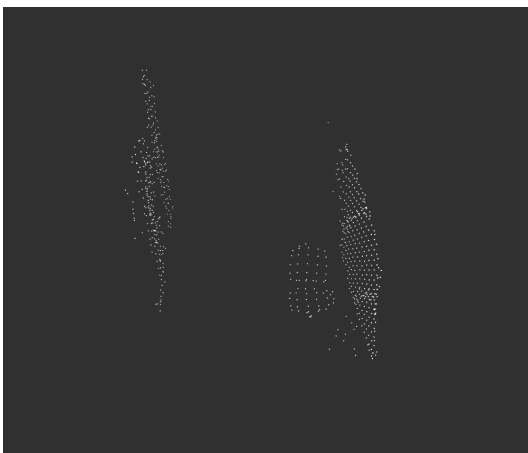
このような処理の流れで深度センサの情報から障害物を検知する。図 5.4 にその様子を示す。図 5.4(a) のような、左右に壁と右前方に障害物がある状況で取得されたポイントクラウドは図 5.4(b) のようになる。このポイントクラウドをダウンサンプリングしたものが図 5.4(c) のようになり、それを床面に射影することでできた障害物領域が図 5.4(d) の紫および水色で示されている部分である。



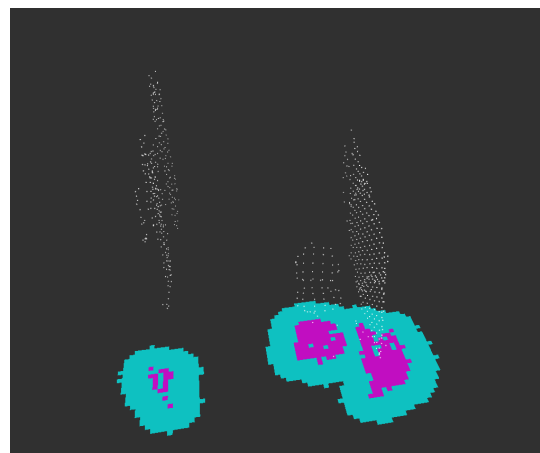
(a)



(b)



(c)



(d)

図 5.8 障害物検知の様子

## 5.5 経路の計算

地図の上で、現在地から目的地へ到達できるような経路を計算する。経路の計算手法は人工ポテンシャル法と A\*アルゴリズムの 2 種類を試した。

### 5.5.1 人工ポテンシャル法

経路の作成には人工ポテンシャル法というアルゴリズムを利用する [35]。人工ポテンシャル法では、障害物からは斥力、目的地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、目的地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。この手法ではその地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に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を用いた [36]。

ゴールを  $(x_g, y_g)$  とし、ゴールによるポテンシャル関数を以下の式で与える。ここで  $(x, y)$  は位置ベクトル、 $c_g, l_g$  はそれぞれゴールからの引力の強さと広がりに対応している。

$$U^g(x, y) = c_g \left( 1 - e^{-\frac{(x-x_g)^2+(y-y_g)^2}{l_g^2}} \right) \quad (5.1)$$

障害物の座標を  $(x_o, y_o)$  とし、障害物によるポテンシャル関数は以下の式で与える。ここで  $c_o, l_o$  はそれぞれ障害物からの斥力の強さと広がりに対応している。

$$U^o(x, y) = c_o e^{-\frac{(x-x_o)^2+(y-y_o)^2}{l_o^2}} \quad (5.2)$$

そして全体のポテンシャル関数は以下の式で表される。

$$U(x, y) = \left( \frac{1}{c_g} U^o(x, y) + 1 \right) U^g(x, y) \quad (5.3)$$

人工ポテンシャル法により作成されたポテンシャル場を図に示す。左下を原点とし、 $(1.0, 1.0)$  をスタート地点、 $(18.0, 14.0)$  をゴール地点と設定した。障害物は  $(9.0, 4.0)$ 、 $(13.0, 10.0)$  にある。障害物からは離れるように、障害物を中心とした山ができ、ゴールに

引き込まれるようにゴールを中心とした谷ができる。

図 5.9 のポテンシャル場により作成された経路を図 5.10 に示す。赤い線に沿って、障害物を避けながらゴールへ進む経路ができていることがわかる。しかし、障害物付近で急激に曲がる経路が作成されてしまうため、後述する A\* アルゴリズムを用いることにした。

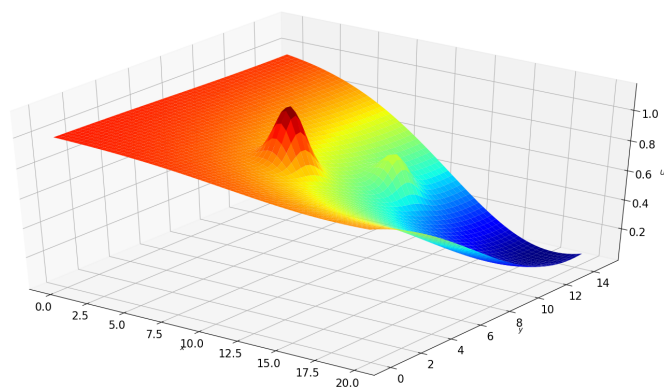


図 5.9 人工ポテンシャル法におけるポテンシャル場

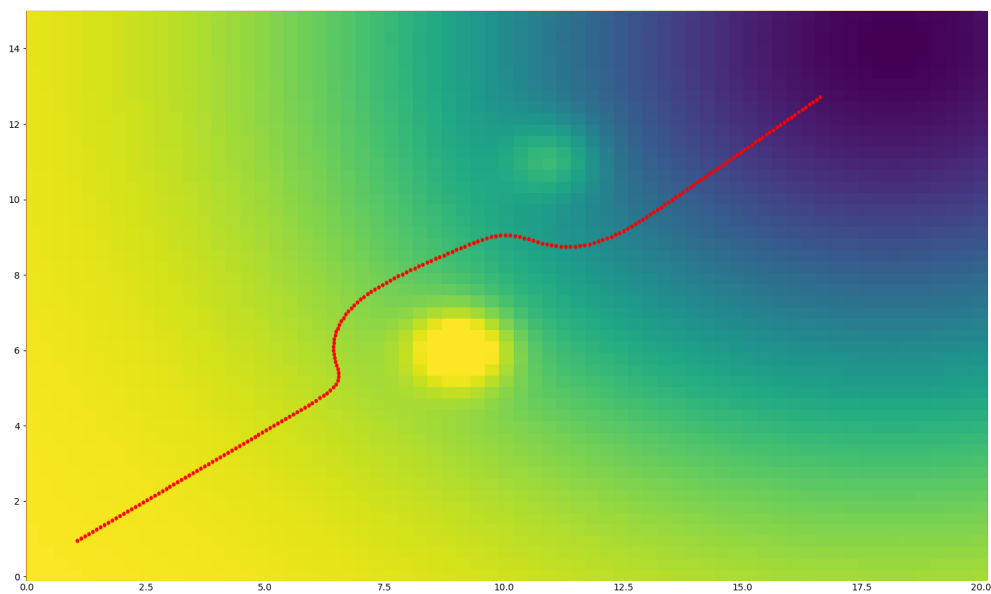


図 5.10 人工ポテンシャル法により作成された経路

### 5.5.2 A\*アルゴリズム

人工ポテンシャル法では急激に曲がる経路ができてしまうため、それを解決するためにA\*アルゴリズムを用いた [37]。A\*アルゴリズムはグラフ探索アルゴリズムの一つで、ヒューリスティック関数を用いてダイクストラ法を改良したものである。ダイクストラ法では探索ノード  $n$  に対して、スタート地点からの距離  $g(n)$  が近い点から順に経路を伸ばし、これをゴールにたどり着くまで繰り返す。A\*アルゴリズムではゴールまでの距離を推定するヒューリスティック関数  $h(n)$  を導入し、 $g(n)+h(n)$  が小さい点から順に経路を伸ばしていく。一般的なユークリッド距離を用いた地図では、ゴールまでの直線距離をヒューリスティック関数として利用することができる。このようにA\*アルゴリズムを利用すると最短経路が算出できるが、単純に利用すると障害物のすぐ近くを通るような経路が算出されるため、衝突の危険性がある。そこで障害物からの距離に反比例して小さくなる、図 5.11 [1] のようなコスト関数  $o(n)$  を導入し、 $g(n)+h(n)+o(n)$  が小さくなる点から順に経路を伸ばすことで障害物から離れつつ目的地に進んでいく経路が作成できる。図 5.12 にA\*アルゴリズムを用いて作成された経路を、図 5.13 に障害物のコスト関数を示す。人工ポテンシャル法と比べて急な変化が少ない経路ができていると見てとれる。

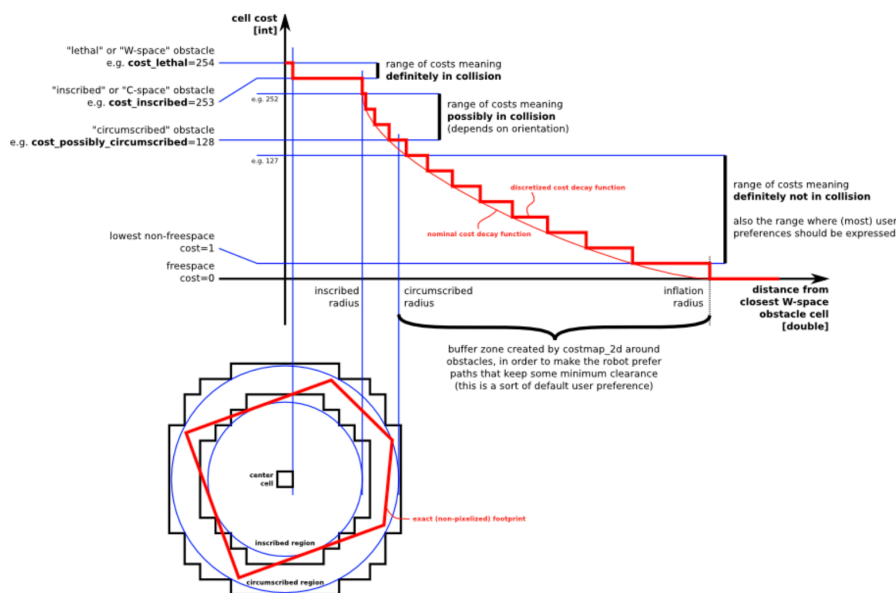


図 5.11 A\*アルゴリズムで障害物により作られるコスト関数 [1]

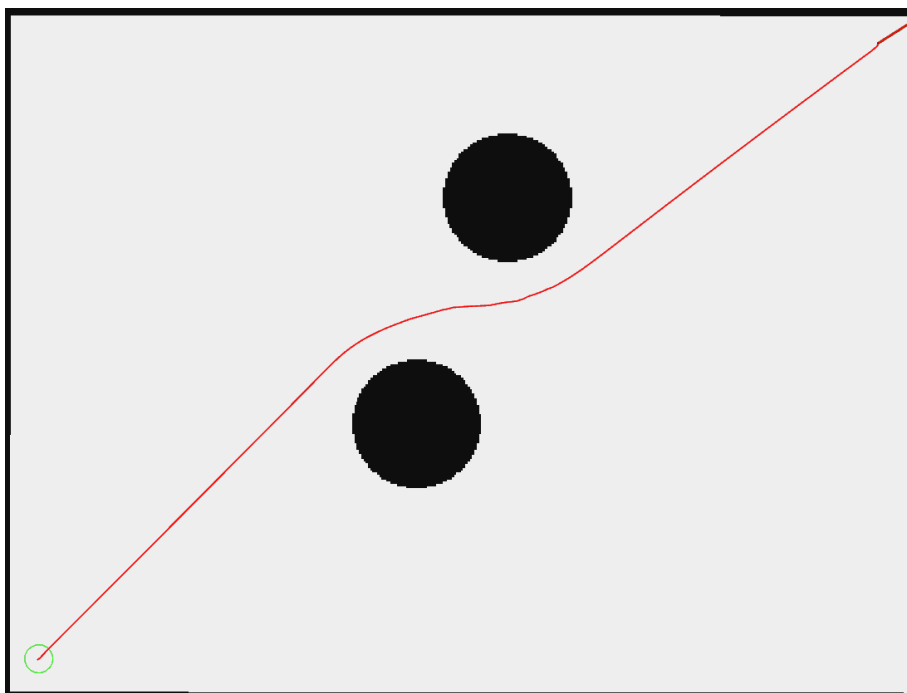


図 5.12 A\*アルゴリズムにより作成された経路

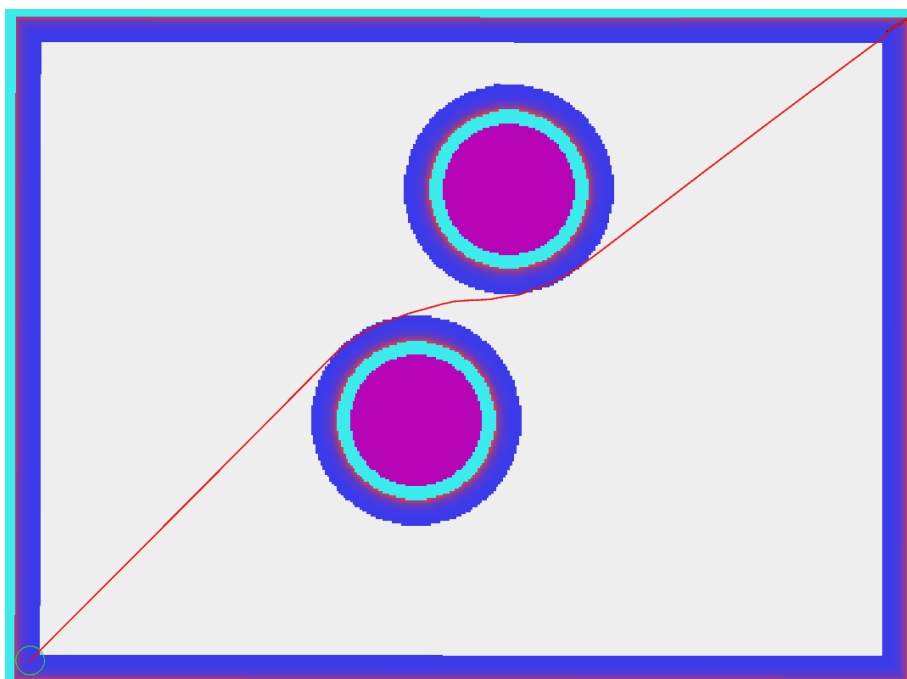


図 5.13 A\*アルゴリズムのコスト関数

## 5.6 利用者への経路の伝達

計算され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に持ち、身体の前方で左右に振りながら歩くように使用する。図 5.1 のように、デバイスの指す方位が現在地での経路と一致した瞬間に短く振動させることで経路を伝達する。

デバイスを振りながら歩くという使用法により、デバイスの方位が経路と一致した瞬間に振動を発生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に角度のずれが生じる。このずれを解消するために、デバイスの角速度を用いて補正を行った。

方位センサのサンプリング周波数を  $f_s$  とすると、サンプリング間隔  $\delta t = 1/f_s$  となる。現在の方位  $\theta_t$  と 1 時刻前の方位  $\theta_{t-1}$  を用いて、角速度  $\omega$  は以下のように表せる。

$$\omega = \frac{\theta_t - \theta_{t-1}}{\delta t} \quad (5.4)$$

振動発生命令から実際に振動するまでの遅延時間を  $\tau$ 、経路の方位を  $\phi$  とすると、先ほど算出した角速度を  $\omega$  を用いて、触覚デバイスの指す方位が以下の式で計算される  $\psi$  になった時に命令を出すことで遅延によるずれの補正ができる。

$$\psi = \phi - \omega\tau \quad (5.5)$$

また、現在の座標と一時刻前の座標より利用者の移動速度を算出することで、現在の運動を続けた場合の  $t$  秒後の位置の予測をする。そして、 $t$  秒後までに障害物に衝突する危険性がある場合は、利用者に警告を出すことで停止・回避を促す。

この手法では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のみ警告がなされ、この場合は歩みを止めて手を動かして進む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。このようにすることで、オリエンテーションの補助をしつつ、自由な歩行が実現できると期待できる。



## 第 6 章

# 評価実験

本研究で提案するシステムを評価するため、2つの実験を行った。1つ目は視覚障害者4人を対象に行った実験であり、これは主に方位センサと振動を用いた経路の伝達手法の評価を目的に行った。2つ目は目隠しをした晴眼者5人を対象に、屋内歩行を行った実験であり、システム全体の動作を評価するために行った。

### 6.1 視覚障害者を対象とする屋内歩行実験

#### 6.1.1 実験の概要とシステム構成

本研究で提案するシステムのうち主に方位と振動を用いた経路の伝達手法を評価するために、日本盲導犬協会神奈川訓練センターの協力を得て視覚障害者4人による使用試験を行った。この実験の参加者は普段盲導犬や白杖を利用して歩行をしている。訓練センターのプレイルーム内に3つのウェイポイントを設けたコースを作成し、それらのウェイポイントを順にたどるように、本研究の歩行支援システムを用いて歩行してもらった。あらかじめ作成したマップを用意し、安全のため障害物は仮想的なものとした。

この実験で用いたシステムは、図 6.2 のように、1台の PC と 2台のスマートフォンで構成されている。スマートフォン 1 は実験参加者の胸元に装着して Visual Inertial Odometry による自己位置推定のために用いた。ここではポイントクラウドの取得および障害物の検知は行っていない。スマートフォン 2 は実験参加者の手に持たせ、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 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。この実験では経路の算出に人工ポテンシャル法を用いた。スマートフォンは Apple iPhone 6s と Apple

iPhone SE, PCはVaio Z Canvasを用いた。それぞれの機器はソケット通信によって連携している。



図 6.1 視覚障害者を対象とした歩行実験の様子

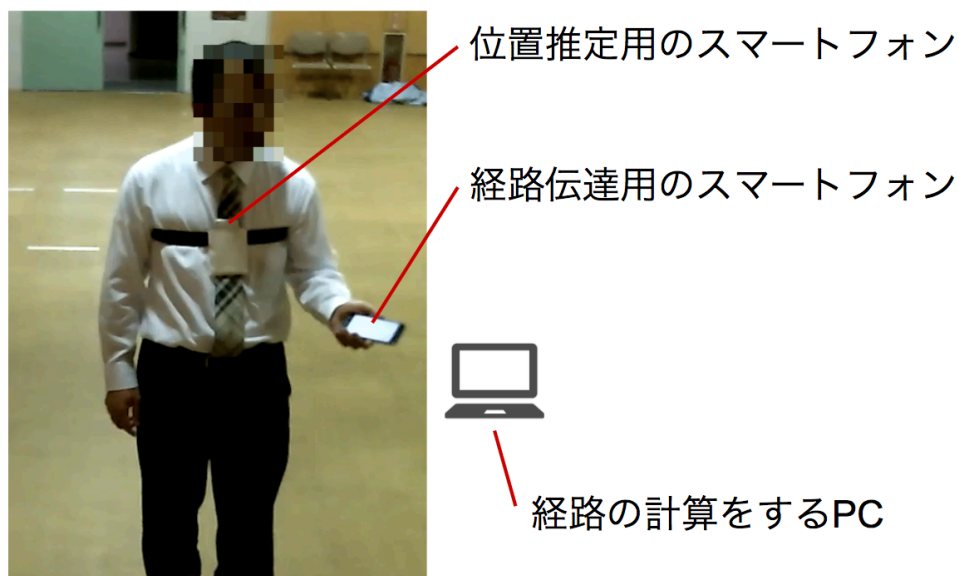


図 6.2 視覚障害者を対象とした歩行実験で用いた機器の構成

## 6.1.2 実験の結果

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 6.1.2 に示す。軸の目盛りの単位は mm である。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ウェイポイントを示している。どのコースも画像下部の (0, 0) の点がスタート位置であり、(a), (c), (d) では反時計回り、(b) では時計回りに歩いた。(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。歩行の軌跡は、実験の様子を動画として撮影し、座標が既知の点を用いて透視変換を行い、実験参加者の足と地面との接地点から座標を計算した。

図 6.1.2 を見ると、障害物を避けながら次のウェイ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ことがわかる。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、安心感がある、自然な動作で利用できる、というように高い評価を得ることができた。

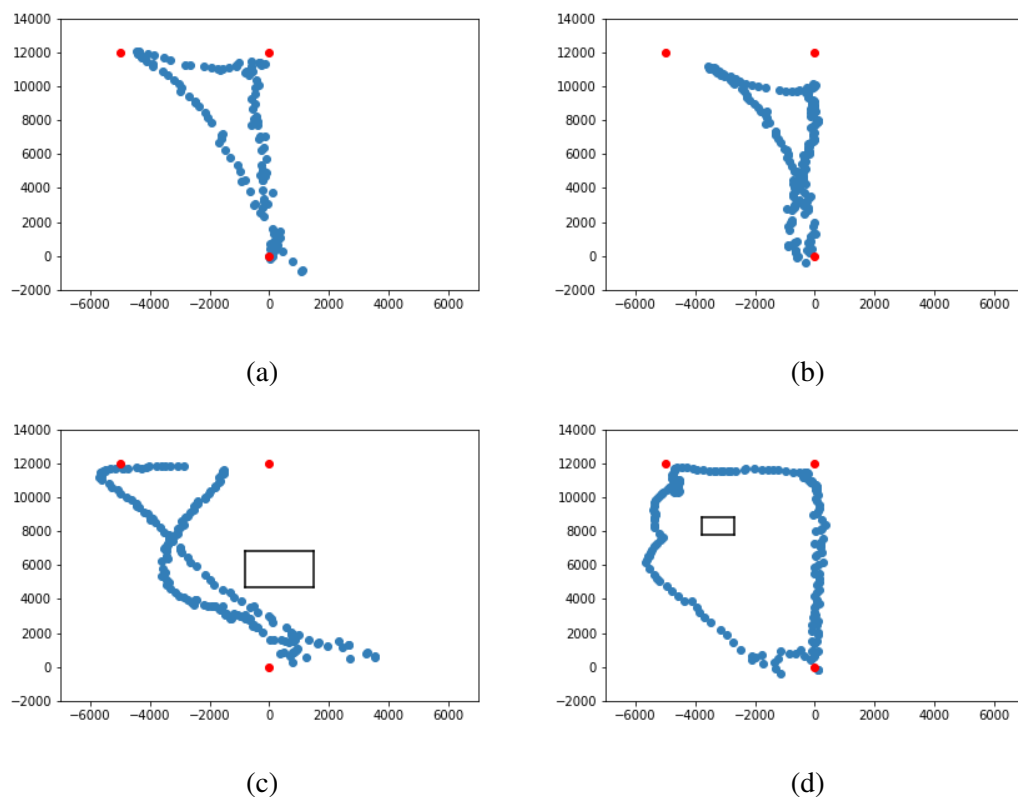


図 6.3 視覚障害者を対象とした歩行実験における実験参加者の歩行の軌跡

## 6.2 目隠しをした晴眼者による屋内歩行実験

### 6.2.1 実験の概要とシステム構成

システム全体の動作を評価するために目隠しをした晴眼者5人を対象に屋内歩行実験を行った。本システムを利用し、図6.5に示すように、ある建物内の廊下をウェイポイントをたどるように歩行してもらった。

この試験で用いたシステムは、図6.2のように、1台のPCと2台のスマートフォンで構成されている。スマートフォン1は実験参加者の胸元に装着して Visual Inertial Odometry と Loop Closing による自己位置推定のために用いた。またスマートフォン1は深度センサを搭載しており、障害物の検知に使用している。スマートフォン2は白杖に装着し、その白杖を実験参加者の手に持たせ、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および取得されたポイントクラウドは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。この実験では経路の算出にA\*アルゴリズムを用いた。スマートフォン1はLenovo Phab2Pro、スマートフォン2はApple iPhone 8、PCは富士通 LIFEBOOK WS1/Wを用いた。それぞれの機器はソケット通信によって連携している。

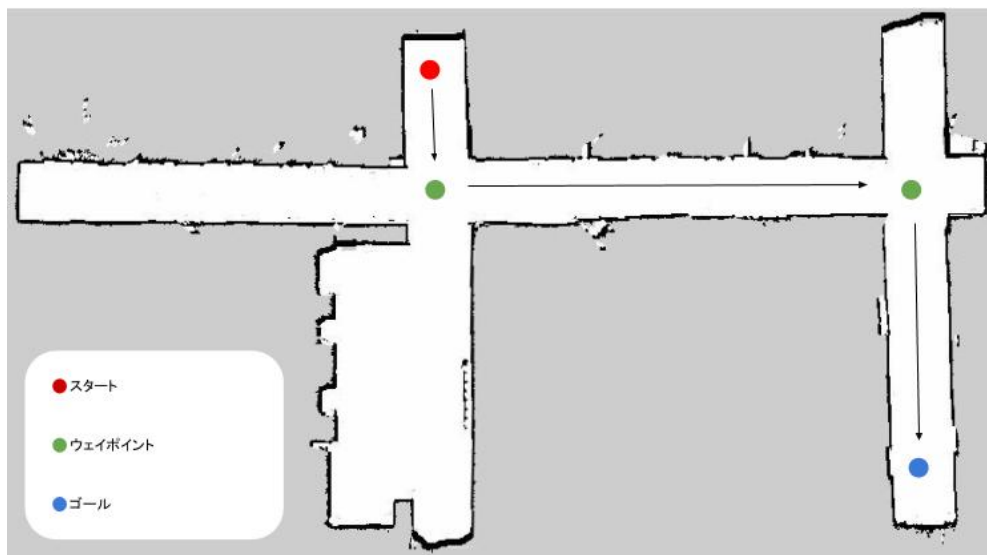


図6.4 目隠しをした晴眼者を対象とした歩行実験のコース

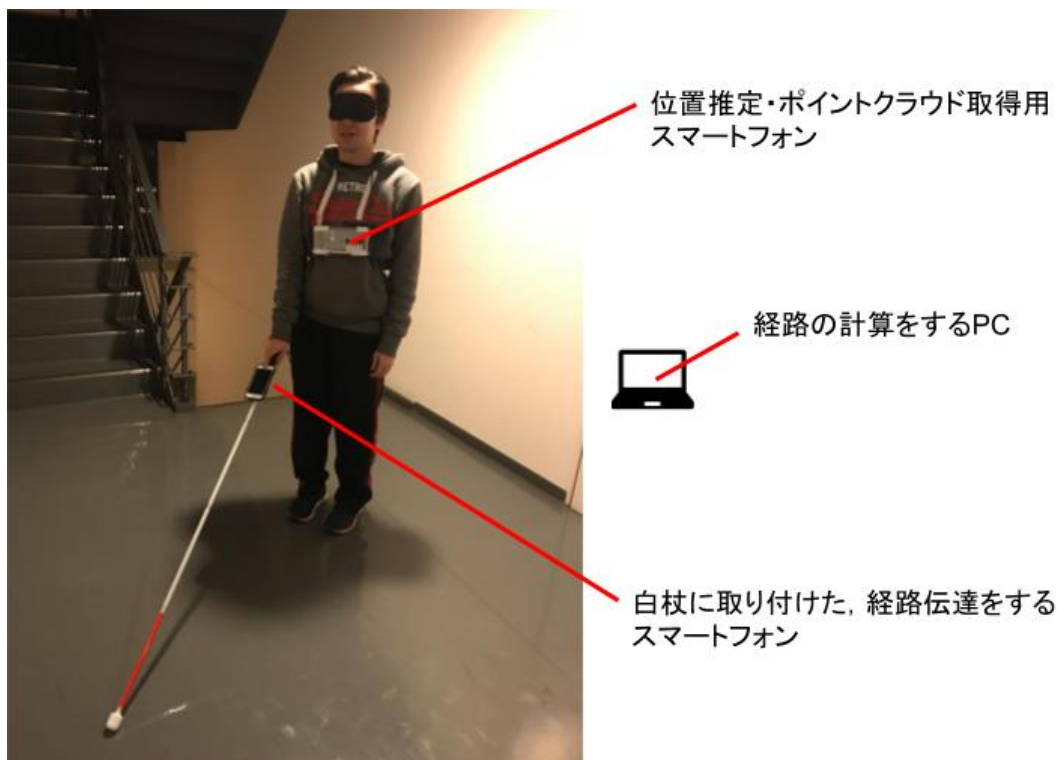


図 6.5 目隠しをした晴眼者を対象とした歩行実験で用いた機器の構成

### 6.2.2 実験の結果

評価試験においては、各実験参加者はシステムの概要と動作の説明がなされ、振動による指示の方法を理解した上で予定したコースを歩行した。結果として、実験参加者5人中3人は予定したコースをスタートからゴールまで歩けた一方、5人中2人は途中でスタックし、ゴールまでたどり着くことはできなかった。スタックした原因として、磁気の干渉による方位センサのずれが考えられる。方位センサがずれることにより、想定していた経路とは異なる方向に誘導するような指示が発生してしまう。ここで算出された経路と反して壁や障害物に向かうような指示が出た場合、そちらに歩くように指示が出ているにも関わらず、そのまま進むと衝突の危険性があるとして警告が発せられるため、どのように進むべきかわからなくなりスタックしてしまった。

## 6.3 考察

方位センサと振動子を用いた経路の伝達手法については視覚障害者を対象とした歩行実験で好意的な反応が得られ、進むべき方向をわかりやすく伝える手法として今後もこの方向での発展が期待される。実験参加者のフィードバックに、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、白杖を用いた普段の歩行の動作と親和性が高い動きを採用したことが好意的な評価に繋がったと考えられる。

一方、目隠しをした晴眼者の歩行実験では磁気の干渉による方位センサのずれのために誘導に失敗する事例があった。その原因として、実験を実施した環境に鉄でできた壁や扉が多く存在したことから、磁気の乱れの影響が大きくなった可能性がある。この問題への対策として、1つは加速度センサやジャイロセンサと組み合わせてフィルタ処理をすることでロバスト性を上げるという方法が挙げられる。他にも、胸元に装着して自己位置推定に用いているデバイスの姿勢は比較的正確に取得できることから、胸元のデバイスと手元のデバイスの位置関係から方位を推定する方法が挙げられる。

## 第7章

# おわりに

### 7.1 本論文のまとめ

本論文ではまず視覚障害者の現状を述べ、視覚障害者の歩行の際に困難となることについてまとめた。次にコンピュータを用いた既存の歩行支援技術について、障害物の検知手法と利用者への情報の伝達手法に焦点を合わせてまとめた。そして当事者・支援者を含めたヒアリングにより、歩行補助デバイスに求められる要件について行った調査について述べた。その結果得られた要望として、方向の定位ができると嬉しい、高所の障害物が検知できるとよい、音声による情報通知は極力避けたほうがよい、簡単に使うことができ訓練の必要性が少ないものが望ましい、といったものが挙げられる。この要望を踏まえて、進むべき方向をわかりやすく伝えられる誘導方法の実現を目指して歩行支援システムの構築を行った。障害物検知・経路の作成・方位センサと振動子を用いた経路伝達から構成される歩行支援システムの提案・実装・評価を行った。経路の伝達手法について視覚障害者を対象とした実験を行い、実験参加者は手元のデバイスからの指示に従って用意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。使用感についてのフィードバックでは、好意的な評価を得ることができた。経路の伝達手法については今後もこの方向での発展が期待される。システム全体の動作の評価のために行った目隠しをした晴眼者を対象とする実験では、磁気干渉の影響が大きな環境では方位センサのずれのために誘導に失敗する例が見られた。そのため、磁気干渉による方位センサのずれへの対策がシステムの安定動作のために必要だということがわかった。

## 7.2 今後の展望

今後の展望として、より広範囲な環境での使用を見据えて屋外での実験を予定している。その準備段階として、第5章の地図の作成の節で述べたように、ドローンより撮影した画像から屋外環境の3Dデータを作成し、それを地図の作成に利用する計画である。システム面では、広範囲な環境で動作するように安定性の向上に取り組む必要があり、先述した方位のずれへの対策や、移動距離が長くなるにつれて大きくなる自己位置推定の誤差への対処などを行っていきたい。また、実際の利用を想定し、アプリケーションとしてのインターフェースの開発を行いたい。本論文では、利用者に進むべき方向を伝えるための出力の部分に焦点を合わせてきたが、使いやすいシステムとするには利用者とのインタラクションが必要となり、わかりやすい入力手法についても考えていきたい。



## 参考文献

- [1] Kaiyu Zheng. Ros navigation tuning guide. 06 2017.
- [2] 巖関田, 洋卓仲西, 祐樹菌田, 和哉中島, 静香川野, 亨輔長井. Difficulties encountered by visually-impaired students while traveling. 筑波技術大学テクノレポート, Vol. 18, No. 1, pp. 74–79, dec 2010.
- [3] Rupert R A Bourne, Seth R Flaxman, Tasanee Braithwaite, Maria V Cicinelli, Aditi Das, Jost B Jonas, Jill Keeffe, John H Kempen, Janet Leasher, Hans Limburg, Kovin Naidoo, Konrad Pesudovs, Serge Resnikoff, Alex Silvester, Gretchen A Stevens, Nina Tahhan, Tien Y Wong, and Hugh 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*, Vol. 5, No. 9, pp. e888 – e897, 2017.
- [4] 厚生労働省. 平成18年身体障害児・者実態調査結果, 2008.
- [5] Legge GE Kallie CS, Schrater PR. Variability in stepping direction explains the veering behavior of blind walkers, June 2007.
- [6] 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ホームからの転落事故. 人間工学, Vol. 31, No. 1, pp. 1–8, 1995.
- [7] 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) , Vol. 2003, No. 2, pp. 59–66, jan 2003.
- [8] 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, Vol. 25, No. 4, pp. 233–241, 1989.
- [9] R. K. Megalingam, A. Nambissan, A. Thambi, A. Gopinath, and M. Nandakumar. Sound and touch based smart cane: Better walking experience for visually challenged. In *2014 IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference - (IHTC)*,

- pp. 1–4, June 2014.
- [10] M. F. Saaïd, A. M. Mohammad, and M. S. A. M. Ali. Smart cane with range notification for blind people. In *2016 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, pp. 225–229, Oct 2016.
- [11] Yunqing Wang and K. J. Kuchenbecker. Halo: Haptic alerts for low-hanging obstacles in white cane navigation. In *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 527–532, March 2012.
- [12] 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, Jan 2014.
- [13] David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110, Nov 2004.
- [14] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool. Surf: Speeded up robust features. In Aleš Leonardis, Horst Bischof, Axel Pinz (編), *Computer Vision – ECCV 2006*, pp. 404–417, Berlin, Heidelberg, 2006. Springer Berlin Heidelberg.
- [15] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool. Surf: Speeded up robust features. In Aleš Leonardis, Horst Bischof, Axel Pinz (編), *Computer Vision – ECCV 2006*, pp. 404–417, Berlin, Heidelberg, 2006. Springer Berlin Heidelberg.
- [16] M. Kang, S. Chae, J. Sun, S. Lee, and S. Ko. An enhanced obstacle avoidance method for the visually impaired using deformable grid. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 63, No. 2, pp. 169–177, May 2017.
- [17] Michael Brock and Per Ola 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, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [18] H. Wang, R. K. Katzschmann, S. Teng, B. Araki, L. Giarré, and D. Rus. Enabling independent navigation for visually impaired people through a wearable vision-based feedback system. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6533–6540, May 2017.
- [19] Adam J. Spiers and Aaron M. Dollar. Design and evaluation of shape-changing haptic interfaces for pedestrian navigation assistance. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 10,

- pp. 17–28, 2016.
- [20] R. Velazquez, E. E. Pissaloux, J. C. Guinot, and F. Maingreud. Walking using touch: Design and preliminary prototype of a non-invasive eta for the visually impaired. In *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, pp. 6821–6824, Jan 2005.
- [21] A. Adishesha and B. Desai. 3d imprinting of the environment for the visually impaired. In *2015 IEEE European Modelling Symposium (EMS)*, pp. 148–153, Oct 2015.
- [22] Koji Tsukada and Michiaki Yasumura. Activebelt: Belt-type wearable tactile display for directional navigation. Vol. 44, 10 2004.
- [23] Akansel Cosgun, Emrah Akin Sisbot, and Henrik I. Christensen. Guidance for human navigation using a vibro-tactile belt interface and robot-like motion planning. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6350–6355, 2014.
- [24] Q. Xu, T. Gan, S. C. Chia, L. Li, J. Lim, and P. K. Kyaw. Design and evaluation of vibrating footwear for navigation assistance to visually impaired people. In *2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, pp. 305–310, Dec 2016.
- [25] Tomohiro Amemiya and Hisashi Sugiyama. Orienting kinesthetically: A haptic hand-held wayfinder for people with visual impairments. *ACM Trans. Access. Comput.*, Vol. 3, No. 2, pp. 6:1–6:23, November 2010.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Majed Al Zayer, Sam Tregillus, Jiwan Bhandari, David Feil-Seifer, and Eelke Folmer. Exploring the use of a drone to guide blind runners. In *International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 263–264, Reno, NV, October 2016.
- [29] Mauro Avila, Markus Funk, and Niels Henze. Dronenavigator: Using drones for navi-

- gating visually impaired persons. In *Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers 38; Accessibility, ASSETS '15*, pp. 327–328, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [30] Mauro Avila Soto, Markus Funk, Matthias Hoppe, Robin Boldt, Katrin Wolf, and Niels Henze. Dronenavigator: Using leashed and free-floating quadcopters to navigate visually impaired travelers. In *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS '17*, pp. 300–304, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [31] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, 2005.
- [32] Eitan Marder-Eppstein. Project tango. In *ACM SIGGRAPH 2016 Real-Time Live!*, SIGGRAPH '16, pp. 40:25–40:25, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [33] Pix4dmapper. <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>. Accessed: 2019-1-30.
- [34] Simon Lynen, Torsten Sattler, Michael Bosse, Joel A. Hesch, Marc Pollefeys, and Roland Y. Siegwart. Get out of my lab: Large-scale, real-time visual-inertial localization. In Lydia E. Kavraki, David Hsu, and Jonas Buchli, editors, *Robotics: Science and Systems XI*, p. 37. RSS, 2015. Robotics. Science and Systems XI; Conference Location: Rome, Italy; Conference Date: July 13-17, 2015; .
- [35] 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.
- [36] KIM DONG HUN and SEIICHI 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*, Vol. 20, No. 1, pp. 115–135, jan 2006.
- [37] P. E. HART. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Trans. Syst. Science Cybern.*, Vol. 4, No. 2, pp. 100–107, 1968.

# 発表文献

## ■口頭発表（査読あり）

1. 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)

## 謝辞

指導教官の坂井修一教授には相談会やミーティングにおいて研究に関しての指導をいただき、また人間としての生き方についても貴重な教えをいただきました。入江英嗣准教授には、日頃の研究の方向性や論文・発表の添削といった研究内容についていつも優しく親身になって指導をいただいたほか、研究者としての研究への向き合い方などについても教えていただきました。研究室の秘書の八木原晴水様と赤羽彩子様には研究を行う上での事務や研究室の環境の整備など大変お世話になりました。坂井入江研究室の先輩・同期・後輩には日頃から仲良く接していただき、楽しく研究室生活を送ることができました。

荒川明宏様をはじめとする株式会社ラビットの方々には、視覚障害者の方として研究を進める上で非常に貴重な意見をいただきました。そして、新産業創造研究機構の内原正一様、日本盲導犬協会神奈川訓練センターの方々、神奈川県視覚障害者福祉協会の方々、ivz communication の大橋相政様には、実験の計画から実施に至るまで大変お世話になりました。皆様のご助力なしには研究を進めることはできませんでした。

私の学生生活を支えていただいた全ての方々のおかげで充実した研究生活を送ることができました。みなさまに心より感謝し、本論文の締めくくりといたします。

本論文の研究は、一部三菱財団社会福祉事業・研究助成「ドローンおよびモバイルコンピュータを用いた視覚障害者外出支援システムの研究」によるものです。