

# 視覚障害者の移動特性を考慮した位置推定手法

山本 晃平<sup>1</sup> 村田 将之<sup>2</sup> 佐藤 大介<sup>2</sup>

**概要：**視覚障害者の移動支援において市販のデバイスのみを使った正確な位置推定手法が望まれている。スマートフォンの位置推定は Wi-Fi や Bluetooth の電波等による大域的な位置を推定する手法と、歩行者自律航法 (PDR) による相対的な移動量の推定を組み合わせることで精度向上を図っている。しかし、視覚障害者の移動は晴眼者のそれと比べて特徴的な動きが多くなるため、特定の条件において PDR の精度が低下する。本報告では、我々の過去の視覚障害者のナビゲーション実験における特徴的な動きを分析することで、視覚障害者の移動特性を定義する。さらに、それらの動作があった場合でも測位精度が低下しない手法を提案し、晴眼者が視覚障害者の移動特性を再現した評価データを用いて測位精度の評価を行なった結果を報告する。

**キーワード：**屋内測位, 視覚障害者, Bluetooth LE, 歩行者自律航法 (PDR), Visual Inertial Odometry

## 1. はじめに

現在、全世界に全盲の人は 4000 万人近くいると言われており、高齢化の進行も影響して、その数は 2050 年には 3 倍になるとも推測されている [1]。何らかの視覚障害を持つ人の数は全盲のそれより多く、視覚障害者の自立および積極的な社会参画のための支援技術の重要性がより高まっている。特に、視覚からの情報入手が困難な視覚障害者に対して、聴覚や触覚を使った感覚代行による情報提供を可能にするナビゲーションシステムは、街歩きを行うために必要不可欠である。

ナビゲーションには、ユーザとなる視覚障害者の位置情報が必要になるが、視覚障害者の移動を支援するためには誤差 1 m 程度で測位することが望ましい [2]。これは視覚障害者が白杖を使って周囲を確認できる範囲とほぼ同じ距離である。我々は、Bluetooth Low Energy (BLE) 測位と歩行者自律航法 (Pedestrian Dead Reckoning, PDR) を組み合わせた大規模屋内測位システム (以下、BLE-PDR とよぶ) を開発しており [3]、誤差 1 m ~ 2 m の測位精度を確立している。この測位システムにより、21,000 m<sup>2</sup> の大規模な商業施設内で、視覚障害者 10 名のナビゲーションの評価実験を行った結果、被験者は多くの場合においてナビゲーションタスクを完了することができた [4]。しかし

ながら、視覚障害者の十分なナビゲーションには、より高精度な測位システムが望ましい。

この評価実験において、視覚障害者の歩行移動には、晴眼者のそれにはない行動が多く見られたため、それらの視覚障害者特有の動作が測位精度へ悪影響を与えているのではないかという仮説を立てた。我々の BLE-PDR 手法では測位向上のため 2 つの測位手法を統合したハイブリッド方式を採用している [5]。PDR は基本的に加速度センサーやジャイロセンサー、コンパスを用いた歩数と歩幅および移動方向の推定に基づいてユーザの移動量を推定するため、精度良い位置推定には一定の歩行が期待されている [6]。しかし、視覚障害者の場合には障害物に衝突したり、杖を振る動作などにより、歩数検出と方向検出が期待通りに機能しないという報告がある [7]。

本研究では、過去のナビゲーション実験 [4] における実験映像から視覚障害者の特徴的な動作を列挙し、これらの視覚障害者の移動特性を定義する。また、定義された移動特性に対してロバスト性を高めより高精度な測位を実現するため、BLE-PDR の手法に Visual Inertial Odometry を組み合わせた手法を提案する。さらに晴眼者が移動特性を再現した評価データを使って測位精度の評価実験を行い、その結果について考察する。

## 2. 関連研究

屋内測位には様々な手法が提案されているが、本稿ではスマートフォン用ナビゲーションアプリケーションへの適用を想定し、スマートフォン上の各種センサーで取得可能

<sup>1</sup> 立命館大学大学院情報理工学研究科  
Graduate School of Information Science and Engineering,  
Ritsumeikan University

<sup>2</sup> 日本アイ・ピー・エム株式会社東京基礎研究所  
IBM Research - Tokyo

な情報を用いて実現可能な手法に限定して関連研究を概観する。スマートフォンを用いた屋内測位手法として代表的なものには、Wi-Fi アクセスポイントから発信される電波の受信信号強度 (Received Signal Strength, RSS) を用いる手法がある [8,9]。近年では、BLE ビーコンの RSS を用いた手法も提案されている [10,11]。BLE ビーコンは小型、低消費電力、低価格のデバイスであり、Wi-Fi アクセスポイントと比較して設置に関する制約が少ないため、比較的 low コストで高密度に設置することが容易である。また、市販のスマートフォン OS の多くが BLE ビーコンの RSS 取得に対応しており、OS を選ばず利用可能である。RSS を用いる測位手法の中でも、RSS のフィンガープリント収集による手法は、他と比べて高い測位精度を達成可能である。この手法では、事前に複数の発信機が設置された環境中で RSS を実測し電波の反射等の影響が反映された電波強度マップを作成する。そして測位時には RSS と電波強度マップを比較することで位置を推定する。 [9]

これらの測位手法も単体では屋内ナビゲーションに必要な性能を達成することが困難であるため、高精度化のためにユーザの移動を推定する手法と組み合わせる用いることが一般的である [12]。スマートフォン上のセンサを用いてユーザの移動量を推定する手法として PDR がある。PDR では一般的に加速度センサーやジャイロセンサー等を用いて歩数と歩幅、移動方向を推定することでユーザの相対移動量を推定する。本研究でも、BLE ビーコンの RSS を用いた測位と PDR を組み合わせた測位システムを用いている [3]。

PDR の歩数や方向の推定はセンサー出力のパターンを認識することにより行われるため、視覚障害者が障害物に衝突したり、白杖を使って地面を探索するなど、ユーザの歩様が乱れると推定精度が低下する要因となる [7]。

この他にスマートフォンで取得可能な情報を用いる測位手法として、カメラ画像を用いる手法がある [13,14,15]。画像に基づく測位の基本技術は大きく二つに分けられる。一つ目は事前に正確な位置のラベルが付いた画像のデータベースを構築しておき、新たに撮影された画像をデータベースと照合することで位置を推定する手法である [13]。画像特徴量が十分に得られない場合や、類似した見た目の場所、照明条件の大きな変化による画像特徴量の不一致など様々な課題がある。二つ目は連続して得られる画像ストリームの対応付けによりカメラの相対移動量を推定する Visual Odometry と呼ばれる手法である [14]。これに加速度・ジャイロセンサー等の慣性センサーの情報を付け加えて高性能化を狙った手法が Visual Inertial Odometry (VIO) である [15]。

本研究では BLE-PDR の位置推定による大域的な位置と、VIO による局所的な位置の変化量を組み合わせることでより高精度な位置推定の実現を目指す。

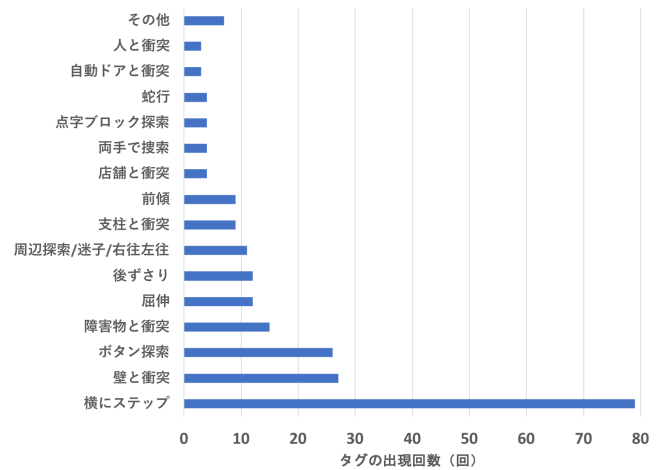


図 1: タグの出現回数

### 3. 視覚障害者の移動特性

#### 3.1 分析対象の映像

[4] のユーザ実験で記録した 360 度カメラの映像を用いて視覚障害者の移動特性について調査した。以下に詳細を記述する。

- 実験場所：ショッピングモール内部 (21,000 m<sup>2</sup>)
- 測位環境：BLE ビーコン 220 個
- 被験者：10 人 (全盲 6 人, 弱視 4 人)
- 映像時間：約 3 時間

#### 3.2 分析方法

BLE-PDR で用いられている PDR アルゴリズムは加速度センサーおよびジャイロセンサーの値を元にユーザの相対的な歩行軌跡を推定する。しかし、障害物への衝突や白杖を振って探索するなど、定常的な歩行ではない視覚障害者特有の動作は測位精度低下の大きな要因となる。

まず、3.1 節の映像の中で、PDR に用いられるセンサに影響を与えるような視覚障害者特有の動作や事象にタグ付けを行い、共通のタグを抽出する。出現回数が一定より多いタグのみを抽出した後、一連の動作に含まれるタグの共起性により分類する。最後に分類されたタグの集合を視覚障害者の移動特性として定義し、それぞれに名前をつける。

#### 3.3 分析結果

分析によって抽出されたタグの出現回数を図 1 に示す。ここでは、抽出するタグの最低出現回数を 3 回とした。

表 1 に分類した視覚障害者の移動特性とそれらに含まれるタグを示す。これら 4 つの移動特性の典型的な動作の具体例を以下に示す。

- (a) 通路探索：通路の手前で方向転換の指示が要因で、壁に衝突し、横にステップおよび後ずさりをしながら、本来の通路を探す。

表 1: PDR の精度に影響する視覚障害者の移動特性

移動特性	タグ
(a) 通路探索	壁と衝突
	支柱と衝突
	店舗と衝突
	自動ドアと衝突
	横にステップ
(b) 障害物回避	後ずさり
	障害物と衝突
	人と衝突
(c) 壁面探索	横にステップ
	後ずさり
	ボタン探索
(d) 地面探索	両手で探索
	横にステップ
	屈伸
	前傾
	点字ブロック探索
	蛇行
	周辺探索/迷う/右往左往

- (b) 障害物回避: 歩行中に障害物に衝突し、横にステップおよび後ずさりをして障害物を避けて進む。
- (c) 壁面探索: エレベータの横にボタンがあることが知らされ、その付近で、横にステップ、前屈、そして、屈伸を伴いながら対象物を手探りで探す。
- (d) 地面探索: 床の点字ブロックを探すために、直進方向に対して斜め方向に白杖を差し出して歩く。

## 4. 位置推定手法

### 4.1 概要

BLE-PDR は大域的な測位が可能であるが、移動特性の影響を受けて局所的に測位精度が低下する問題がある。本研究では、スマートフォンのカメラ画像と慣性センサを用いて数センチメートル単位の高精度で相対的な移動量を推定可能な Visual Inertial Odometry (VIO) を用いて、移動特性に対してロバストな位置推定手法を検討する。VIO は短い距離の局所的な移動の推定については精度が高いが、長距離の移動時には小さな誤差が累積し、移動量の推定誤差が大きくなる。そこで、大域的な推定が可能な BLE-PDR を局所的な移動量推定精度が高い VIO で補完することで、移動特性に対してロバストな測位システムを実現する。

### 4.2 VIO による BLE-PDR の補完

VIO の相対移動軌跡を BLE-PDR の測位軌跡に重ね合わせ、VIO の座標を大域的な位置座標に変換することで位置を推定する。具体的には、時刻  $t$  における過去  $T$  秒間の VIO の座標履歴  $X = \{\mathbf{x}_i\}_{i=t-T+1}^t$  と BLE-PDR の座標履歴  $Y = \{\mathbf{y}_i\}_{i=t-T+1}^t$  に関して、これら 2 つの点集合の位置合わせを行った。各集合  $X, Y$  の対応する 2 点  $\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i$  の関

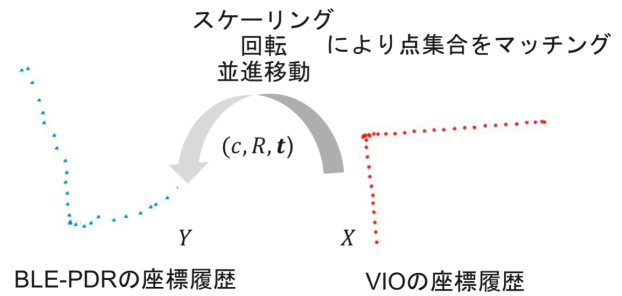


図 2: VIO の相対移動軌跡と PDR-BLE の測位軌跡のマッチング

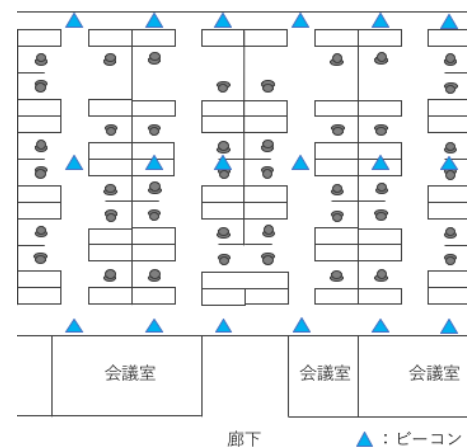


図 3: 実験で使用した屋内オフィスの見取り図および BLE ビーコンの配置

係を相似変換  $(R, t, c)$  を用いて式 (1) の用に表す。

$$\mathbf{y}_i = cR\mathbf{x}_i + \mathbf{t} \quad (1)$$

$R$  は回転行列、 $\mathbf{t}$  は並進移動、 $c$  はスケーリングである。図 2 に概念図を示す。パラメータ  $(R, \mathbf{t}, c)$  は、式 (2) に示す目的関数の最小化によって推定した [16]。回転行列  $R$  の計算は特異値分解を使用して行った。

$$\min_{(R, \mathbf{t}, c)} \sum_{i=t-T+1}^t \|\mathbf{y}_i - cR\mathbf{x}_i + \mathbf{t}\|^2 \quad (2)$$

## 5. 評価

3.3 節の分析で得られた視覚障害者の移動特性を再現したデータセットにより、4 節で提案した位置推定手法によって測位精度と歩行軌跡がどのように変化するかの評価を行った。

### 5.1 実験環境

約 250 m<sup>2</sup> (13 m × 19 m) の屋内オフィス空間で実験を実施した。BLE ビーコンは図 3 に示すように、縦方向と横方向それぞれ 6.5 m と 3 m の間隔で天井に設置した。

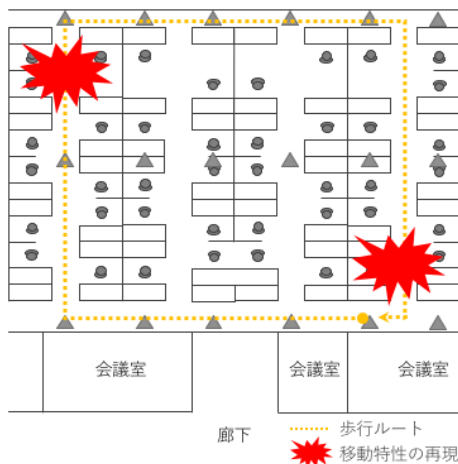


図 4: 実験に使用した歩行ルートおよび移動特性の再現位置

表 2: 平均測位誤差および 95 パーセンタイル測位誤差 [m]

移動特性	平均誤差		95 パーセンタイル誤差	
	BLE-PDR	BLE-PDR+VIO	BLE-PDR	BLE-PDR+VIO
(a)	1.00	0.51	1.85	1.76
(b)	0.96	0.53	1.74	1.29
(c)	0.89	0.46	1.72	1.02
(d)	0.87	0.48	2.04	0.85

## 5.2 実験機材

今回の実験データを取得するにあたって使用したスマートフォンは Apple 社の iPhone 8 Plus で、VIO の実装は同じく Apple 社が提供する AR フレームワークである ARKit<sup>\*1</sup>を用いた。正解座標の取得には Velodyne 社の VLP-16 LIDAR を使用した。BLE-PDR の測位は 1 Hz、VIO の座標推定は 10 Hz、また、正解座標の取得は 10 Hz で行なった。最終的に、BLE 測位の周波数 1 Hz に統一することで測位評価を行なった。

## 5.3 実験データ

表 1 において定義した、視覚障害者の移動特性を再現した実験データセットを作成した。オフィス環境に図 4 に示す歩行ルートを設定し、実験者はこの歩行ルートに沿ってオフィス空間を 6 周歩行した。移動特性は各周に 2 回ずつ再現し、1 で示した移動特性 4 つそれぞれで試行した。障害物としては椅子を用意し、エレベータのボタンを模した物を壁に配置した。

## 5.4 結果：測位精度

図 5 に再現した視覚障害者の移動特性 4 パターンにおける、BLE-PDR による測位誤差および提案手法 (BLE-PDR+VIO) による測位誤差の累積分布を示す。

<sup>\*1</sup> <https://developer.apple.com/arkit/>

表 2 に移動特性 4 パターンについての BLE-PDR および BLE-PDR+VIO の平均測位誤差、95 パーセンタイル測位誤差を示す。平均誤差は 4 つの移動特性の全ての再現パターンにおいて小さくなっており、BLE-PDR は平均で 0.93m、BLE-PDR+VIO は平均で 0.49m であった。

## 5.5 結果：測位軌跡

図 6 に再現した視覚障害者の移動特性 4 パターンにおける、BLE-PDR による測位軌跡と提案手法 (BLE-PDR+VIO) による測位軌跡、正解座標の軌跡を示す。

### 5.5.1 移動特性 (a) 通路探索の測位軌跡

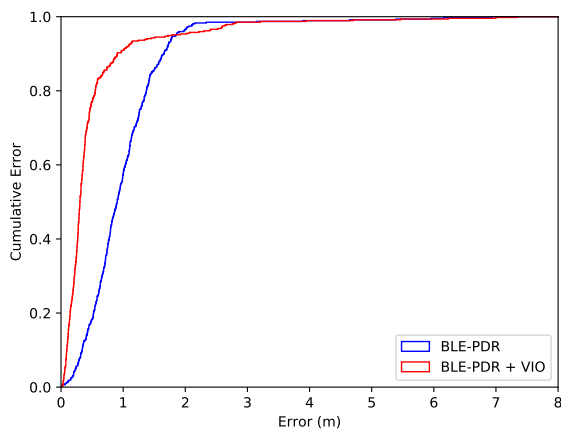
本パターンでは歩行ルートの 2 箇所壁への衝突を行ったが、歩行軌跡の左上箇所における衝突動作は図中上方向、右下箇所における衝突動作は図中左方向に向かって実施した。左上箇所において壁に衝突した後、BLE-PDR の測位軌跡は正解座標から一度上方向に逸脱した後下方向に継続的に逸脱しているが、これは衝突、横方向ステップ、また、後ろずさりの動作が加速度に反映されるためであると考えられる。右下箇所での衝突では、進行方向と衝突方向が一致していたため、左右方向での逸脱は少ないものの、上下方向での逸脱はみられる。一方で、衝突した後の BLE-PDR+VIO の測位軌跡は、どちらの衝突箇所においても正解座標にとっても近いものになっており、移動特性の影響に対してロバスト性を示している。他の 3 つの再現パターンについても同じく、1 周目の歩行については、BLE-PDR の測位結果が安定しないため、BLE-PDR+VIO の測位軌跡も影響を受けて逸脱する傾向があるが、歩行軌跡が長くなるにつれて BLE-PDR+VIO の測位軌跡は正解座標に近い安定したものになっている。

### 5.5.2 移動特性 (b) 障害物回避の測位軌跡

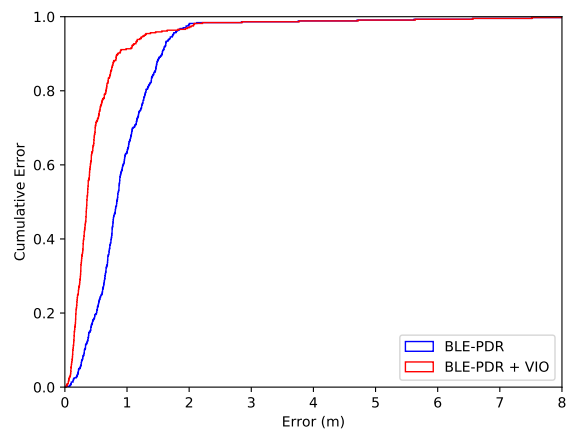
本パターンでは歩行ルートの 2 箇所椅子への衝突を行ったが、歩行軌跡の左上箇所における衝突動作は図中上方向、右下箇所における衝突動作は図中下方向に向かって実施した。どちらの衝突箇所においても、進行方向と衝突方向が一致していたため、BLE-PDR でもあまり顕著な軌跡の逸脱はみられなかった。一方で、BLE-PDR+VIO の測位軌跡は、どちらの衝突箇所においても、また、衝突実施箇所以外においても正解座標にとっても近いものになっており、移動特性に対するロバスト性および BLE-PDR の測位軌跡に比べて安定性を示している。

### 5.5.3 移動特性 (c) 壁面探索の測位軌跡

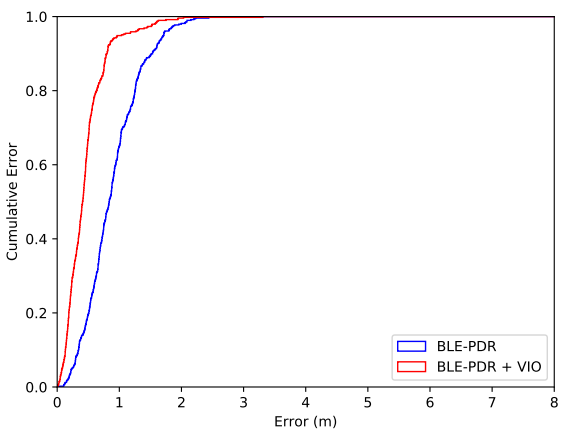
本パターンでは歩行ルートの 2 箇所エレベータのボタン探索を行ったが、歩行軌跡の左上箇所における衝突動作は図中右方向、右下箇所におけるエレベータのボタン探索は図中左方向に向かって実施した。どちらの探索においても、BLE-PDR の測位軌跡は、正解座標に対して左右方向での顕著な軌跡の逸脱が見られた。これはエレベータのボ



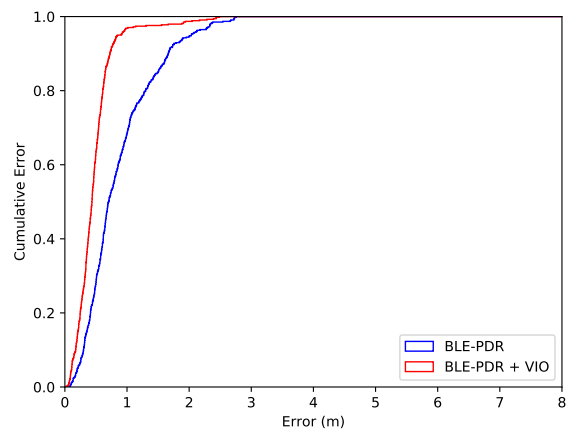
(a) 通路探索



(b) 障害物回避



(c) 壁面探索



(d) 地面探索

図 5: BLE と PDR のハイブリッド測位と VIO による補正後の測位誤差累積分布

タン探索中に、横方向ステップおよび屈伸動作が加速度センサに記録され、測位システム的に前進していると判断されたためであると考えられる。一方で、BLE-PDR+VIO の測位軌跡は、どちらの探索箇所においても、また、探索実施箇所以外においても正解座標に非常に近く、移動特性に対するロバスト性および BLE-PDR の測位軌跡に比べて安定性を示している。

#### 5.5.4 移動特性 (d) 地面探索の測位軌跡

本パターンでは歩行ルートの 2 箇所 で地面探索を行ったが、歩行軌跡の左上箇所における衝突動作は図中左方向、右下箇所における地面探索は図中右方向に体を向けたまま、上下に 1 往復移動した。エレベータのボタン探索と同様に、どちらの地面探索においても、BLE-PDR の測位軌跡は、正解座標に対して左右方向での顕著な軌跡の逸脱が見られた。これは地面探索中に、これまでの移動方向に対して複数の斜め移動や横方向の歩行が行われたため、間違った方向に進行していること推測されたためであると考

えられる。一方で、BLE-PDR+VIO の測位軌跡は、どちらの地面探索箇所においても、また、地面探索実施箇所以外においても正解座標に非常に近く、移動特性に対するロバスト性および BLE-PDR の測位軌跡に比べて安定性を示している。

## 6. 考察

### 6.1 移動特性の再現

本研究の提案手法の評価を行うために用意した実験データセットは、定義した視覚障害者の移動特性 (3.3 節) を晴眼者が再現したものである。映像を分析した実験者が試験的に再現することで、評価実験において、BLE-PDR ハイブリッド測位の描く軌跡への移動特性の影響を確認している。しかしながら、実際の視覚障害者の動きには映像からだけでは再現しづらい動き、例えば、重心の細かな移動などが存在すると考えられ、視覚障害者を募ってユーザ実験を行う必要がある。

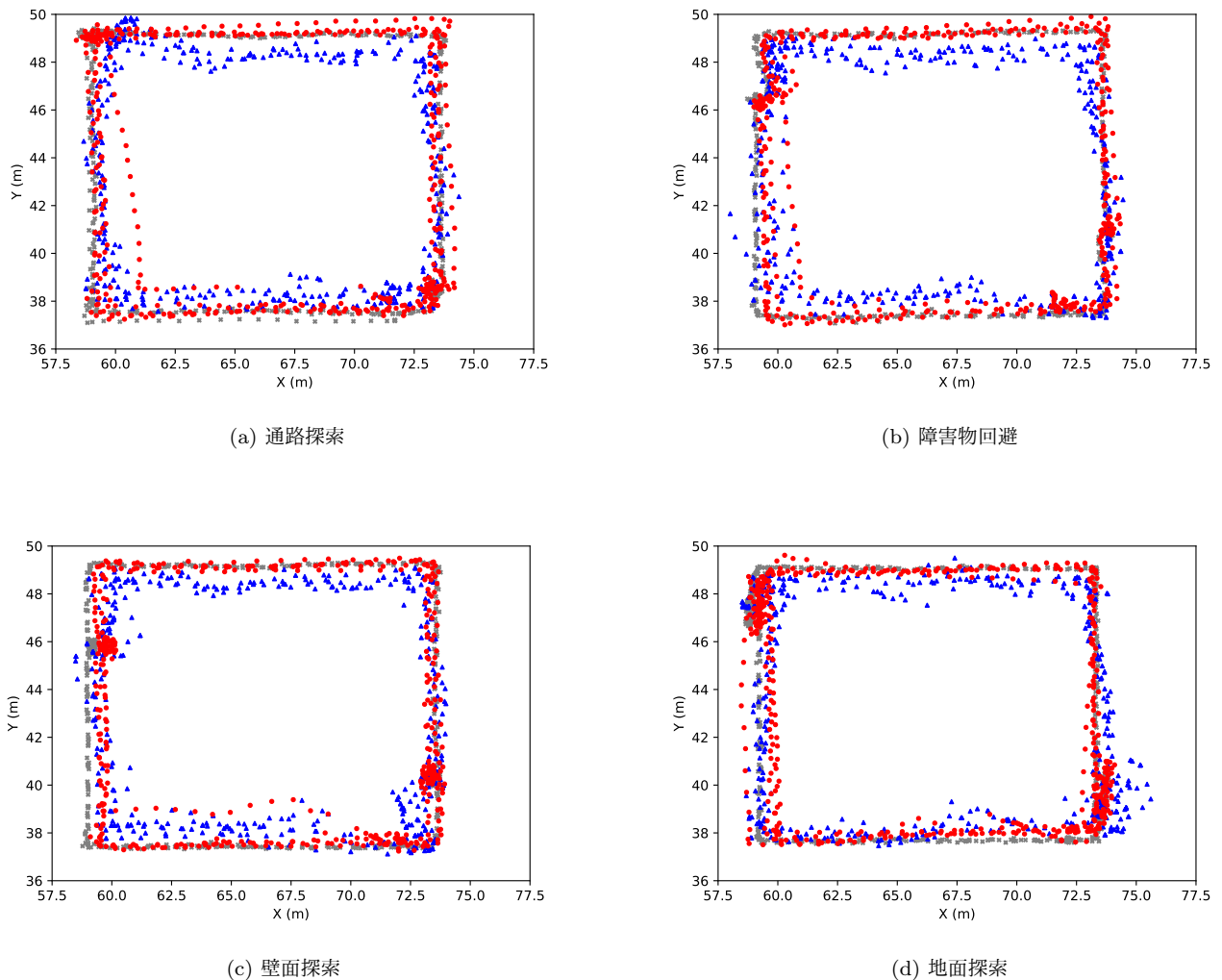


図 6: BLE と PDR のハイブリッド測位軌跡と VIO による補正後の軌跡の比較 (灰色の点列は正解軌跡、青色の点列は BLE-PDR の軌跡、赤色の点列は提案手法の軌跡である)

## 6.2 実験環境

提案手法により実験結果における測位精度を平均 0.5m 程度で測位することができた (5.4 節) が、本研究の評価において使用した実験環境は、約 250 m<sup>2</sup> のオフィス空間である。過去のナビゲーション実験にて使用された大規模商業施設に比べると小さく歩行ルートも短いため、VIO が推定する相対移動量の精度は極めて高い。より長い歩行ルートを設定すると、VIO の推定軌跡に誤差の蓄積が起きやすくなるため、そのような状況を実世界でのユーザ実験において確認する必要がある。また、BLE ビーコンをオフィス空間に密に配置しているため、BLE-PDR の測位精度が非常に高い環境で再現実験を行っているため、BLE-PDR の測位精度が低い場合に BLE-PDR+VIO がどのような挙動を示すのかを検証する必要がある。

## 7. おわりに

本研究では、視覚障害者の移動特性に対するロバスト性を高めた位置推定手法を提案、評価した。まず視覚障害者の移動特性を定義するため、ショッピングモールで実施した過去の視覚障害者ナビゲーションの実験映像の分析を行い、4つの代表的な特性を抽出した。これらの移動特性に対応するため、既存の BLE ビーコンと PDR を組み合わせた位置推定手法に対して VIO の軌跡を統合する手法を提案し、定義した移動特性を再現した評価データにより提案手法の有効性を検証した。その結果、既存の測位システムの精度平均 0.93m に対して提案手法の測位精度は平均 0.49m に改善した。移動軌跡の評価においても、視覚障害者の移動特性を再現した箇所で正確な移動軌跡を再現することを可能にした。

本研究で提案する手法は本質的にはどのような大域的な

測位手法とも組み合わせることが可能である。今回使用した BLE-PDR の測位手法以外に GPS による測位手法との組み合わせ等も検討したい。

#### 参考文献

- [1] Bourne, R. R., Flaxman, S. R., Braithwaite, T., Cicinelli, M. V., Das, A., Jonas, J. B., Keeffe, J., Kempen, J. H., Leasher, J., Limburg, H. et al.: 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).
- [2] Fallah, N., Apostolopoulos, I., Bekris, K. and Folmer, E.: Indoor human navigation systems: A survey, *Interacting with Computers*, Vol. 25, No. 1, pp. 21–33 (2013).
- [3] Murata, M., Ahmetovic, D., Sato, D., Takagi, H., Kitani, K. M. and Asakawa, C.: Smartphone-based Indoor Localization for Blind Navigation across Building Complexes, *Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, IEEE, pp. 254–263 (2018).
- [4] Sato, D., Oh, U., Naito, K., Takagi, H., Asakawa, C. and Kitani, K.: NavCog3: An Evaluation of a Smartphone-Based Blind Indoor Navigation Assistant with Semantic Features in a Large-Scale Environment, *Proc. of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS)*, ACM, pp. 270–279 (2017).
- [5] Yassin, A., Nasser, Y., Awad, M., Al-Dubai, A., Liu, R., Yuen, C., Raulefs, R. and Aboutanios, E.: Recent advances in indoor localization: A survey on theoretical approaches and applications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 19, No. 2, pp. 1327–1346 (2016).
- [6] Judd, T. and Vu, T.: Use of a new pedometric dead reckoning module in GPS denied environments, *Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION*, IEEE, pp. 120–128 (2008).
- [7] Flores, G. H. and Manduchi, R.: WeAllWalk: An Annotated Dataset of Inertial Sensor Time Series from Blind Walkers, *ACM Transactions on Accessible Computing (TACCESS)*, Vol. 11, No. 1, p. 4 (2018).
- [8] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N.: RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, *Proc. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Vol. 2, IEEE, pp. 775–784 (2000).
- [9] He, S. and Chan, S.-H. G.: Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18, No. 1, pp. 466–490 (2016).
- [10] Zhao, X., Xiao, Z., Markham, A., Trigoni, N. and Ren, Y.: Does BTLE measure up against WiFi? A comparison of indoor location performance, *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference*, pp. 1–6 (2014).
- [11] Faragher, R. and Harle, R.: Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 33, No. 11, pp. 2418–2428 (2015).
- [12] Yang, Z., Wu, C., Zhou, Z., Zhang, X., Wang, X. and Liu, Y.: Mobility increases localizability: A survey on wireless indoor localization using inertial sensors, *ACM Computing Surveys*, Vol. 47, No. 3, pp. 54:1–54:34 (2015).
- [13] Liang, J. Z., Corso, N., Turner, E. and Zakhori, A.: Image based localization in indoor environments, *Computing for Geospatial Research and Application (COM. Geo), 2013 Fourth International Conference on*, IEEE, pp. 70–75 (2013).
- [14] Schöps, T., Engel, J. and Cremers, D.: Semi-dense visual odometry for AR on a smartphone, *Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2014 IEEE International Symposium on*, IEEE, pp. 145–150 (2014).
- [15] Tanskanen, P., Naegeli, T., Pollefeys, M. and Hilliges, O.: Semi-direct EKF-based monocular visual-inertial odometry, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, pp. 6073–6078 (2015).
- [16] Umeyama, S.: Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns, *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, No. 4, pp. 376–380 (1991).