

# BLE ビーコンを用いた視覚障害者向け 高精度屋内外ナビゲーション

村田 将之<sup>1,a)</sup> 内藤 拓也<sup>2</sup> 佐藤 大介<sup>1</sup> 五十嵐 雄哉<sup>2</sup> 貞清 一浩<sup>2</sup> 高木 啓伸<sup>1</sup>

**概要:** 視覚障害者の単独歩行の支援を目的として、BLE ビーコンによる高精度な位置推定に基づき、音声による詳細な経路案内を行うスマートフォンアプリケーションを開発した。複数の BLE ビーコンの電波強度とスマートフォンの慣性センサーを組み合わせることで位置推定の精度を高め、また開発段階から視覚障害者ユーザおよび歩行訓練士のフィードバックを得て経路案内の内容やタイミング等のデザインを改良した。アプリケーションの有効性評価のため、ビーコンを設置した屋内実験環境での位置推定誤差の評価、および屋内外にビーコンを設置した実験環境での 12 名の視覚障害者を対象にしたユーザ実験を行った。

## Precise Indoor and Outdoor Navigation for the Blind by using BLE Beacons

MASAYUKI MURATA<sup>1,a)</sup> KAKUYA NAITO<sup>2</sup> DAISUKE SATO<sup>1</sup> YUYA IGARASHI<sup>2</sup> KAZUHIRO SADAKIYO<sup>2</sup>  
HIRONOBU TAKAGI<sup>1</sup>

**Keywords:** Assistive technology, Visually impaired, Independent mobility, Navigation, Localization

### 1. はじめに

歩行は日常生活において重要な要素であるが、視覚障害者にとって初めての場所や慣れない場所を一人で歩行することは困難な課題である。

これまで様々な位置の測位技術に基づき、音声や触覚を使って視覚障害者を目的の場所までナビゲーションするシステムが研究、開発されている。特に屋外では GPS 測位を利用したナビゲーション専用のデバイスやスマートフォンアプリケーションとして実用化されている。屋内やビルの谷間などの GPS 測位の精度が十分に得られない環境においても、GPS に代わる様々な測位技術の研究、開発がなされているが、このような環境において視覚障害者ナビゲーションを実用化するためにはいくつかの課題がある。

- (1) 測位をするために特別な機器を持つ必要がある
- (2) 環境中に特別な機械を設置する必要がある
- (3) 特別な機器を必要としないが精度が不十分

視覚障害者をナビゲーションするために必要な精度は白杖で周囲を確認できる約 1 m 程度であると言われている [1]。一方、一般に普及しているスマートフォンに広く搭載されているセンサを使い Wi-Fi の電波や地磁気を観測することで測位する手法は、実用化されているが、視覚障害者の定位を支援するのに十分な精度を得ることが難しい。特別な機器を利用すれば数 cm～数十 cm の超高精度で測位が可能な技術もあるが、今後一般に普及するかどうかは現時点では予測することは容易ではない。

そこで、本研究で注目しているのが、近年市販されるようになった、Bluetooth Low Energy (BLE) を利用したビーコンである。BLE ビーコンは小型、低価格、低消費電力のデバイスであり、長期間利用する用途で複数のビーコンを低コストで高密度に環境に設置することが容易である。また、多くのスマートフォンが BLE に対応しており、デバ

<sup>1</sup> 日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所  
IBM Research - Tokyo

<sup>2</sup> 清水建設株式会社技術研究所  
Institute of Technology, Shimizu Corporation

a) muratams@jp.ibm.com

イスが出力する電波強度を測定可能である。

このような背景のもと、BLE ビーコンを使った位置推定は高精度な測位を可能にする技術の候補として研究が進められており、約 1~2 m 程度の精度を実現可能である。[2]

本稿では、BLE ビーコンの電波強度および、スマートフォン内蔵のセンサによる Pedestrian Dead Reckoning (PDR, 歩行者自律航法) を組み合わせた測位手法と、本測位手法に基づく視覚障害者向けの音声によるナビゲーションシステムについて述べる。またナビゲーションシステムの有効性を検証するための、ビーコンを設置した複数の実験環境における、位置推定性能の評価および視覚障害者の被験者を対象としたユーザ評価実験について述べる。

## 2. 関連研究

視覚障害者のナビゲーションは GPS の運用開始に伴い屋外の研究開発からはじまった [3, 4]。当初は人為的に加えられた誤差が大きかったが、2000 年以降は民生用にも高精度の GPS が解放され見通しの良い場所では誤差 1~2 m 程度でのナビゲーションが可能になった [5]。その後、屋内や GPS の精度が期待できない環境における様々な視覚障害者ナビゲーション技術が研究されてきた [6-11]。

[6] は白杖に取り付けるデバイスで、Wi-Fi 位置推定、ステレオカメラ、超音波センサを組み合わせたシステムであり、ステレオカメラと超音波センサで事前に作られた 3D 空間の中の位置を同定することができる。[7] では視覚障害者の誘導ブロックにパターンを導入することでカメラを使ってナビゲーションを行うシステムを提案している。[8] はパッシブ RFID タグを環境中に設置し、RFID リーダーでそれを読み取ることでナビゲーションをするシステムである。[9] は携帯電話と Bluetooth 機器を使ってナビゲーションをするシステムであるが、同時に 1 台の Bluetooth 機器としか接続ができず、1 回の接続に 3 秒程度要するため、高い精度を得るのが難しい。[10] は PDR とユーザとのインタラクションを組み合わせ、途中のランドマークに到達したかどうかをユーザに確認し、PDR をリセットすることで精度向上を図るシステムである。[11] は赤外線を反射する 2 次元バーコードと赤外線カメラを使ってユーザの位置を同定するシステムである。

その他にも屋内における位置推定には多様な手法が提案されている [12-15]。超音波による距離計測を利用する方法 [12] や Ultra-wideband (UWB) 無線による距離計測を用いる方法 [13] は誤差数十 cm の高い精度で位置を推定することができるが、環境に設置する送信機の整備や受信機のコストが高く、ナビゲーションのために広範囲に設置することが難しい。また、IMES (Indoor Messaging System) による送信機の位置情報の配信に基づく屋内測位技術 [16] も開発されているが、これも送信機の設置コストや受信機器側の対応が課題である。環境への機器設置が不要な位置

推定手法には、レーザー距離計測による自己位置推定 [14] などがあるが、歩行支援に利用するには装置が大きく高額である。慣性計測装置 (IMU) を足に取り付け、計測値の積分により移動量を推定する方法 [15] も提案されているが、高精度な IMU が要求される。以上の技術は屋内での位置推定に利用できるが、特殊な装置を必要とする。

入手が容易な機器を使用した屋内測位手法には、スマートフォンを利用するものが各種提案されている [2, 17-19]。スマートフォンに搭載されたセンサーにより周辺環境の情報を取得し大域的な位置を推定する方法には、無線 LAN の電波強度を利用する手法 [17, 18] や、無線 LAN の電波強度と PDR を組み合わせる手法 [19]、近年では BLE ビーコンの電波強度を用いる手法 [2] が提案されている。本研究での位置推定は BLE ビーコンによる大域的な位置推定と視覚障害者ナビゲーション対応に調整した PDR を組み合わせた構成をとっている。

## 3. BLE ビーコンによる位置推定

BLE ビーコンには iBeacon, \*1Eddystone\*<sup>2</sup> など様々な規格が提案されているものの、共通してビーコンを特定する ID と、Received Signal Strength Indicator (RSSI) すなわちビーコン電波の受信強度を得ることができる。BLE ビーコンの RSSI はビーコンとの距離による減衰や環境での反射や回折によって変化する。したがって、複数のビーコンの RSSI 観測値から、受信機の現在位置を推定することが可能である。

本研究では BLE ビーコンの RSSI に加えて、スマートフォンのセンサにより歩行者の移動量を推定する PDR を組み合わせて位置推定精度を向上する手法を採用し、視覚障害者向けに調整を行った。以下では、RSSI 観測モデルと歩行者の移動を予測するモデルについて説明し、最後にこれらを組み合わせて位置を追跡する手法について述べる。

### 3.1 BLE ビーコンの RSSI の観測モデル

ビーコンの RSSI の観測からスマートフォンの位置を推定することは、ある位置においてはある RSSI の値が観測されるという因果関係を逆にたどる問題である。そのため、時刻  $t$  における位置  $\mathbf{x}_t$  において RSSI の組  $\mathbf{z}_t = (z_{t[1]}, \dots, z_{t[M]})^T$  が観測される関係を表現するモデルすなわち観測モデルを得ることが重要である。電波の受信強度は位置に対して様々な要因によってゆらぎのある値が観測されるため、観測モデルは条件付き確率  $p(\mathbf{z}_t|\mathbf{x}_t)$  で表すことが適当である。この条件付き確率が得られれば、RSSI が観測された下での位置の確率  $p(\mathbf{x}_t|\mathbf{z}_t)$  として位置を推定することができる。本研究ではビーコンの配置や周辺の影響を反映した観測モデルを得るため、位置と RSSI の組を計測し、

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

\*2 <https://developers.google.com/beacons/>

教師あり学習によって  $p(\mathbf{z}_t|\mathbf{x}_t)$  を推定する.

まず、一つのビーコンについて位置と RSSI を関連付ける観測モデルについて説明する. BLE ビーコンの RSSI は平均  $\mu(\mathbf{x}_t)$ , 標準偏差  $\sigma(\mathbf{x}_t)$  の正規分布  $N(z; \mu(\mathbf{x}_t), \sigma(\mathbf{x}_t)^2)$  に従うと仮定する. さらに, 位置  $\mathbf{x}_t$  における RSSI の平均値  $\mu(\mathbf{x}_t)$  は, 平均関数  $m(\mathbf{x}_t)$  とカーネルリッジ回帰 [20] を組み合わせた関数で近似する. このとき, 電波強度の訓練データの集合を  $D = \{(\mathbf{x}^{(1)}, z^{(1)}), \dots, (\mathbf{x}^{(N)}, z^{(N)})\}$ , 二つの入力  $\mathbf{x}, \mathbf{x}'$  に対するカーネル関数を  $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  とするとき, 新しい入力  $\mathbf{x}_*$  に対する出力の予測値  $\mu(\mathbf{x}_*)$  は次のように表される.

$$\mu(\mathbf{x}_*) = m(\mathbf{x}_*) + \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{z} - m(\mathbf{X})) \quad (1)$$

ここで  $\mathbf{k}_*$  は入力  $\mathbf{x}_*$  と各訓練データ間のカーネル関数の値を並べたベクトル,  $\mathbf{K}$  は各訓練データ間のカーネル関数の値を並べた行列,  $\sigma_n$  は正則化パラメータ,  $\mathbf{z} = (z^{(1)}, \dots, z^{(N)})^T$ ,  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(N)})^T$  である. 平均関数  $m(\mathbf{x})$  は電波強度の減衰を近似するモデルの一つである対数距離減衰モデルによってモデル化する.

$$m(\mathbf{x}) = -10n \log(d_b(\mathbf{x})) + A \quad (2)$$

$d_b(\mathbf{x})$  は位置  $\mathbf{x}$  と BLE ビーコン間の物理的な距離,  $n$  は減衰係数,  $A$  はビーコンから 1m の距離における RSSI である. このように平均関数を導入することで, 訓練データ数が限定される場合でも, そうでない場合と比べて適当な予測値が得られる. また, 2 点  $\mathbf{x}, \mathbf{x}'$  間のカーネル関数としてはガウスクーネルを用いた.

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|^2}{2l^2}\right) \quad (3)$$

ここで  $\sigma_f^2$  と  $l$  はパラメータである.

対数減衰モデル (式 (2)) とカーネル関数 (式 (3)) のパラメータは, 訓練データに対する一つ抜き交差検証 (Leave-one-out cross validation) 誤差を小さくするものを選択する. また, RSSI の予測値の標準偏差  $\sigma(\mathbf{x}_t)$  は位置に依存しない一定値とみなし, 各ビーコンについて訓練データから推定する.

複数のビーコンの RSSI の組  $\mathbf{z}_t = (z_{t[1]}, \dots, z_{t[M]})^T$  の確率密度関数は, 各ビーコンの  $p(z_{t[i]}|\mathbf{x}_t) = N(z_{t[i]}; \mu_{[i]}(\mathbf{x}_t), \sigma_{[i]}^2)$  の積として表される.

$$p(\mathbf{z}_t|\mathbf{x}_t) = \prod_{i=1}^M p(z_{t[i]}|\mathbf{x}_t)^\alpha \quad (4)$$

ここで  $[i]$  は各ビーコンを示し,  $M$  は観測されたビーコンの総数である. また, ここで導入された  $\alpha$  は各ビーコンの  $z_{t[i]}$  間の独立性の仮定を緩和し確率密度を滑らかにする役割を持つパラメータである [21].

### 3.2 歩行者の移動モデル

スマートフォンの慣性センサーを使用した PDR と移動

可能範囲を表す地図  $m$  によってユーザの位置を予測する手順について説明する. ただし, センサーには誤差が存在するため, 予測に含まれる誤差を確率変数としてモデル化し, 時刻  $t-1$  の位置  $\mathbf{x}_{t-1}$  とセンサー測定値の組み合わせから次の時刻  $t$  において生じる可能性がある位置  $\mathbf{x}_t$  の候補を生成する. この手順は後述する PDR と RSSI モデルの組み合わせによる位置追跡において必要な手順である.

慣性センサーはユーザの移動状態  $s_t$  (移動:  $s_t = 1$ , 停止:  $s_t = 0$ ) の検出, および移動方向の検出にのみ利用する. PDR で一般的なアプローチでは, 加速度のピーク検出に基づいて歩数や歩幅を推定し移動量を推定する [22] が, 視覚障害者の歩行では足の接地と同期しない杖の振りが加速度に含まれることや, 逆に慎重にすり足で歩くと足の接地を十分に検出できないことがあることを考慮し, 加速度はユーザの移動状態の判定のみに使用し, 歩行速度は RSSI との組み合わせによって推定するようにした. ユーザの移動状態は, 加速度の大きさについて短区間の標準偏差を計算し, 一定の閾値を超えるものを移動として判定した [23].

また, ユーザがスマートフォンを概ね一定の向きに保持していることを期待し, ユーザの進行方向を  $\theta_t$  としたとき, 入力  $\mathbf{u}_t = (s_t, \theta_t)^T$  に伴うユーザの位置  $\mathbf{x}_t$  の変化は以下のように表される.

$$\hat{\theta}_t = \theta_t + s_t \delta \theta \Delta t \quad (5)$$

$$\hat{v}_t = v_t + s_t \delta v \Delta t \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_{t-1} + s_t \hat{v}_t \mathbf{n}_{\hat{\theta}_t} \Delta t \quad (7)$$

ここで  $\Delta t$  は  $t-1$  と  $t$  の間の時間ステップ幅,  $v_t$  はユーザの移動速度の大きさ,  $\mathbf{n}_\theta$  は  $\mathbf{n}_\theta = (\cos \theta, \sin \theta)^T$  として定義される移動方向ベクトルである. 歩行者が移動可能な範囲の地図  $m$  が与えられているときは,  $\mathbf{x}_t$  は移動可能範囲内に入るように生成される. また, 実際のユーザ移動方向および速度の不確実性を考慮するために, 方向  $\theta_t$  と速度の大きさ  $v_t$  に対して, それぞれノイズ  $\delta \theta$  と  $\delta v$  が加えられている.

### 3.3 位置推定アルゴリズム

BLE ビーコンの RSSI 観測モデルと PDR を再帰ベイズ推定によって組み合わせ位置を推定する. 時刻  $t$  における状態ベクトルを  $\tilde{\mathbf{x}}_t = (\mathbf{x}_t^T, \theta_t, v_t)^T$  とし, 過去の RSSI 観測値の履歴  $\mathbf{z}_{1:t} = \{\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_t\}$  および入力の履歴  $\mathbf{u}_{1:t} = \{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_t\}$  の下での  $\tilde{\mathbf{x}}_t$  の事後分布  $bel(\tilde{\mathbf{x}}_t)$  を推定する. ここで  $bel(\tilde{\mathbf{x}}_t) = p(\tilde{\mathbf{x}}_t|\mathbf{z}_{1:t}, \mathbf{u}_{1:t})$  である. 事後分布は次式を再帰的に更新することによって推定する [21].

$$bel(\tilde{\mathbf{x}}_t) \propto p(\mathbf{z}_t|\mathbf{x}_t) \int p(\tilde{\mathbf{x}}_t|\tilde{\mathbf{x}}_{t-1}, \mathbf{u}_t, m) bel(\tilde{\mathbf{x}}_{t-1}) d\tilde{\mathbf{x}}_{t-1} \quad (8)$$

ここで  $p(\tilde{\mathbf{x}}_t|\tilde{\mathbf{x}}_{t-1}, \mathbf{u}_t, m)$  は入力  $\mathbf{u}_t$  および移動可能範囲の地図  $m$  が与えられた時に, 状態  $\tilde{\mathbf{x}}_{t-1}$  が状態  $\tilde{\mathbf{x}}_t$  に遷移す

る確率を表しており、PDRによる移動の予測に相当する。 $p(\mathbf{z}_t|\mathbf{x}_t)$ は位置 $\mathbf{x}_t$ におけるRSSI観測値 $\mathbf{z}_t$ の確率密度関数である。

一つ前の時間ステップ $t-1$ における事後分布 $bel(\tilde{\mathbf{x}}_{t-1})$ を利用しない場合、これを一様分布とみなし、 $p(\mathbf{x}_t|\mathbf{z}_t) \propto p(\mathbf{z}_t|\mathbf{x}_t)$ の関係のみを用いて位置を推定する。 $p(\mathbf{x}_t|\mathbf{z}_t)$ の形は解析的に定まらないため、前述の関係を用いて $\mathbf{x}_t$ のサンプルを生成し $p(\mathbf{x}_t|\mathbf{z}_t)$ を近似する。サンプルの生成はマルコフ連鎖モンテカルロ(Markov Chain Monte Carlo: MCMC)法のアルゴリズムの一つであるMetropolis-Hastingsアルゴリズムを使用し、サンプルの平均値を位置推定の代表値とした。この場合のように、ある時刻 $t$ のRSSI観測値 $\mathbf{z}_t$ のみを用いて位置を推定する場合を以下では単に位置推定あるいは位置推定(追跡無し)などと表記する。

前の時間ステップの事後分布 $bel(\tilde{\mathbf{x}}_{t-1})$ を利用する場合は、式(8)に基づいて事後分布 $bel(\tilde{\mathbf{x}}_t)$ を推定する。式(8)は一般には解析的に計算することは困難であるため、事後分布 $bel(\tilde{\mathbf{x}}_t)$ を有限のサンプルの集合 $\{\tilde{\mathbf{x}}_{t|t}^i\}_{i=1}^L$ で近似して計算する粒子フィルタを用いて位置を追跡する。ここで $L$ はサンプルの総数である。粒子フィルタでは以下のステップを反復することによって各時刻において事後分布を推定する。

(1) 移動モデルに基づいて各粒子について状態を予測する。

$$\tilde{\mathbf{x}}_{t|t-1}^i \sim p(\tilde{\mathbf{x}}_t^i | \tilde{\mathbf{x}}_{t-1|t-1}^i, \mathbf{u}_t, m) \quad (9)$$

(2) 観測モデルに基づいて粒子の重み $w_t^i$ を計算する。

$$w_t^i = \frac{p(\mathbf{z}_t | \tilde{\mathbf{x}}_{t|t-1}^i)}{\sum_{j=1}^L p(\mathbf{z}_t | \tilde{\mathbf{x}}_{t|t-1}^j)} \quad (10)$$

(3) 粒子の集合 $\{\tilde{\mathbf{x}}_{t|t-1}^i\}_{i=1}^L$ から、各粒子の数が重み $w_t^i$ に比例するようにリサンプリングし、事後分布の近似 $\{\tilde{\mathbf{x}}_{t|t}^i\}_{i=1}^L$ を得る。

$$\tilde{\mathbf{x}}_{t|t}^i \sim w_t^i \quad (11)$$

このようにしてPDRとRSSIの時系列を用いて位置を連続的に推定することを以下では位置追跡と呼ぶ。

## 4. 音声ナビゲーションシステム

視覚障害者の歩行は定位(orientation)と移動(mobility)によって構成される。定位とは「環境内の自分のいる位置や目的の位置を残された残存器官を用いて認知すること」、移動とは「身体機能や歩行技術を総合した歩行能力」をそれぞれ意味し、これらが同時に成立することで歩行が達成される[24]。

音声ナビゲーションシステムの役割は視覚障害者の定位を位置情報によって直接支援することと同時に、視覚障害者自身が手がかりやランドマークを使って定位することを支援することである。このことを踏まえ、BLEビーコンを

利用した位置情報に基づく視覚障害者向けのナビゲーションアプリケーションをデザイン、実装した。システムはスマートフォンから得られるBLEおよび各種センサの情報を位置推定サーバに送信して位置情報を取得し、音声案内を生成する。

### 4.1 音声案内のデザイン

既存のナビゲーションシステム、関連研究等を参考にナビゲーションをプロトタイプし、視覚障害者ユーザや歩行訓練士のフィードバックを元にアナウンスのデザインを修正した。

ナビゲーションは以下の要素からなる。

- (1) 直進指示: 次の曲がり角までの距離と曲がる方向
- (2) 距離確認: 距離が長い場合に、途中での残り距離
- (3) 方向指示: 曲がる方向の指示
- (4) 周辺情報: 定位を支援するための周辺情報

(1)直進指示および(2)距離確認は一般的なナビゲーションと同様である。次の曲がり角までの情報に加えて、さらにその先の曲がり角までの情報を提供する方法もある。視覚障害者ナビゲーションにおいては次の曲がり角に移動することに多くの注意が払われるため、敢えて一つ先の情報だけを提供するデザインとした。

(3)方向指示とそのタイミングは特に視覚障害者に重要である。一般的なナビゲーションでは視覚から得られる情報を前提にナビゲーションをする。例えば曲がり角の案内は実際に曲がるよりも少し手前で提供されるが、ユーザは周囲の状況を見て前方にある曲がり角を認識して移動する。しかし視覚障害者のナビゲーションの場合には、実際に曲がるタイミングで案内するのが望ましい。曲がる方向の指示は「右9時」のようなクロックポジションとした。

(3)方向指示のタイミングには誤差が含まれるため、ユーザ自身が定位をして誤差を吸収できるように、(3)周辺のランドマークの情報を付加して提供するようにした。例えば「壁の切れ目を左9時」のように、曲がる位置を定位しやすいようにする情報である。表1のような情報をナビゲーション中に提供が可能なようにデザインに組み込んだ。

(4)周辺情報は単体で提供される場合と、(1,3)の案内と合わせて提供される場合がある。情報を組み合わせる場合

表1 主なランドマーク

Table 1 Major landmarks

壁	壁の有無, 壁の開始・終了, 壁の材質
扉	扉の有無, 扉の種類 (両開き, 自動扉等)
床	床の材質, フロアカーペット等
建具	手すり, 家具等
階段	形状, 段数, 踊り場の数
経路	経路の形状, 行止まり, 道幅, 段差等
空間	音の広がり, 狭さ, 広さ, 高さ等
環境音	水の音, 機械の音等

には音声認知の特性に合わせた順序で案内を提供する。

(3) 方向指示はユーザが歩いている時に出されるので、方向指示を先にして、「左9時、壁の終わりの角です」のような案内をする。(1) 直進指示と組み合わせる場合には、ランドマークの重要度に応じて処理する必要がある。直進指示するタイミングでは多くの場合ユーザは立ち止まって次の指示を待っている。直進指示を先にすると周辺情報を聞く前に歩き出してしまうため、段差や勾配など注意すべきランドマークがある場合には先に提供する必要がある。逆に付加的なランドマーク情報については後からでも良い。

## 5. 位置推定精度評価実験

BLE ビーコンを利用した位置推定の性能を調べるため、1) 屋内オフィスと2) 屋内外混在の2つの実験環境で位置推定精度の評価を行った。環境1, 2のそれぞれで追跡無しの位置推定精度を評価し、より現実に近い環境2においては追跡有りの位置推定精度の評価を行った。

### 5.1 実験データ

実験に用いたスマートフォンは Apple 社の iPhone 6 で、ビーコンの RSSI を 1Hz で測定した。

#### 5.1.1 環境 1：屋内オフィス

約 1,200 m<sup>2</sup> のオフィス環境の OA フロアの床下に、BLE ビーコンを約 4~5 m の間隔で合計 68 個配置した。電波強度の測定は 1 地点につき 15 秒間隔で実施した。

#### 5.1.2 環境 2：屋内・屋外混在

屋内と屋外に約 4~8 m の間隔で BLE ビーコンを約 150 個設置した。BLE ビーコンは床面や天井、壁面などの様々な位置に設置した。天井の高さは最大 4.5 m であった。評価の対象とした範囲は、後述するユーザ実験を実施する経路を含む範囲とした。電波強度の測定は 1 地点につき 30 秒間隔で場所により 1~2 m の間隔で実施した。

### 5.2 追跡無しの位置推定精度評価

収集した位置と電波強度のデータを使用して、交差検証によって位置推定精度を評価した。交差検証ではデータセットを  $K$  個に分割し、 $K-1$  個のデータセットを使って学習した電波強度モデル (3.1 節) を使って、残りの 1 個について電波強度から位置推定を行い、推定された位置と正解位置の誤差を計算する。この操作を  $K$  個のデータセットについて繰り返し、位置推定誤差を評価する。分割数  $K$  は 10 とした。

図 1 に環境 1 と環境 2 での位置推定誤差の累積分布を示す。横軸は誤差 [m] で、縦軸は累積分布である。環境 1 での誤差の平均値は 1.6 m、中央値は 1.3 m、95%分位点は 3.5 m、環境 2 での誤差の平均値は 2.1 m、中央値は 1.6 m、95%分位点は 5.1 m であった。環境 1 の屋内のオフィス環境ではビーコンの取り付け位置や間隔が均一に近く、

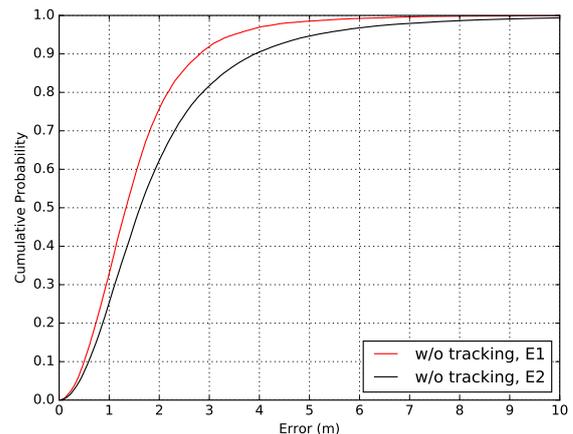


図 1 環境 1 と環境 2 での位置推定誤差の累積分布  
Fig. 1 Cumulative distribution of one-shot localization error for the environment 1 and the environment 2.

また障害物による電波への影響も少ないため、平均値が 1 m から 2 m の範囲に収まる精度で位置を推定することができた。しかし、視覚障害者ナビゲーション実験の対象とした環境 2 の屋内と屋外が混在する空間では、ビーコンの取り付け高さや環境が様々で、環境 1 と比べて全体的に誤差が大きくなっており、平均値も 2 m を超えた。

### 5.3 追跡有りの位置推定精度評価

環境 2 のユーザ実験の対象とする経路について、粒子フィルタによる位置追跡の精度を評価した。ここで使用した経路の詳細については、ユーザ実験の節 (6 節) で述べる。追跡無しの位置推定の評価に使用した電波強度のデータを使用してモデルを作成し、各経路について 3 回測定したテストデータについて実際の位置と推定された位置の誤差を計算した。テストデータは、データ収集者がスマートフォンで経路上に設定された通過点に到達した時刻を記録しながら移動し、RSSI を 1Hz、加速度や姿勢を 100Hz で測定することで作成した。粒子フィルタの粒子数は 1,000 とし、初期状態は明示的に与えるものとした。

図 2 に環境 2 における位置推定誤差 (追跡無し) および粒子フィルタによる位置追跡誤差の累積分布を示す。横軸は誤差 [m]、縦軸は累積分布で、追跡無しの位置推定誤差は図 1 と同一であり、位置追跡誤差は被験者実験の対象とする経路 1 と経路 2 について示している。経路 1, 2 それぞれの位置追跡誤差の平均値は 1.4 m と 1.3 m、中央値は 1.3 m と 1.1 m、95%分位点は 2.5 m と 2.8 m であった。位置情報の履歴を引き継ぐため、追跡無しの位置推定に比べて性能が改善されており、2 m 以上の誤差が生じる割合が大きく減っている。この予備実験により、BLE ビーコンとスマートフォンを利用した位置推定によって、視覚障害者ナビゲーションに耐え得る精度で位置を推定可能であることを確認した。

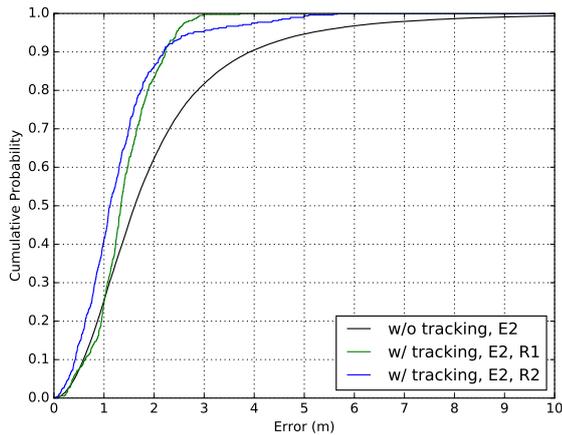


図 2 環境 2 での位置推定誤差および位置追跡誤差の累積分布  
Fig. 2 Cumulative distribution of one-shot and tracking error for the environment 2.

## 6. ユーザ評価実験

本ナビゲーションシステムの有効性を検証するため、ユーザ実験を行った。被験者は全盲 6 名、弱視 6 名の視覚障害者 12 名で、歩行訓練を受けた経験がある被験者は全盲 6 名、弱視 3 名であった (表 2 参照)。

### 6.1 実験方法

実験経路は (1) 屋外の建物前から 2 回曲がり湾曲する通路を通過して目的地まで移動する 55 m の経路、および (2) 1F ピロティから建物内に入り右折し、ロビーから階段を登り、建物 2F の目的地まで 2 回曲がる 70 m の経路である。実験開始地点までは別の経路を通り、被験者は実験前に上記経路に関する情報を一切知らない状態であった。ユーザが経路を外れた場合、一旦中止し再度開始地点からやり直すこととした。

ナビゲーションのためのスマートフォンは被験者の安全のためウェストポーチでユーザの腰に固定し、骨伝導ヘッドフォンを使って環境音とナビゲーションの音声案内が同時に聞こえるようにした。また歩行実験終了後にアンケートとインタビューを実施した。さらに実験終了後に記録映像とシステムのログから実際の位置と推定された位置を記録し、ナビゲーションシステム使用時の位置推定誤差を評価した。

### 6.2 結果

被験者 P02 の経路 1、被験者 P08 の経路 2 において 1 回ずつ経路からはずれず、いずれも開始まもなくの曲がり角を通り過ぎたことが原因であった。またシステム不具合のため、被験者 P06 の経路 2、被験者 P07 の経路 1 が実施できず、P07 の経路 2、P10 の経路 1 の前半にそれぞれ 1 回ずつやり直しがあった。移動の所要時間は失敗、不具合の

表 2 被験者の基本属性

Table 2 Profiles of subjects

	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12
性別	女	男	男	男	男	男	男	女	男	女	女	男
年齢	38	22	22	53	31	36	44	53	29	46	44	33
視力	盲	.1	.03	盲	盲	.2	盲	光	指	盲	.04	盲
歩行訓練	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
視野狭窄	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
羞明/夜盲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表 3 アンケート結果

Table 3 Results of questionnaire

- Q1 情報提供のタイミングは適切でしたか
- Q2 情報の量は適切でしたか
- Q3 情報の内容は適切でしたか
- Q4 提供情報の内容は自分の位置を把握するのに役立ちましたか
- Q5 提供情報の内容は経路をイメージするのに役立ちましたか
- Q6 今回の音声案内は全体的に見て役に立ちましたか
- Q7 初めて訪れる場所では音声案内が必要だ

	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	平均	SD
Q1	2	1	-2	-3	2	-2	2	3	0	2	1	-2	0.3	2.0
Q2	3	2	2	1	3	0	3	2	1	3	2	-1	1.8	1.2
Q3	1	3	1	0	3	3	3	3	1	3	2	2	2.1	1.0
Q4	0	2	1	-1	2	0	3	3	0	2	0	-2	0.8	1.5
Q5	-3	3	-1	-2	2	1	3	1	2	2	1	2	0.9	1.8
Q6	2	3	2	3	3	1	3	3	2	3	2	1	2.3	0.7
Q7	2	3	3	3	3	-3	3	3	3	2	1	1	2.0	1.7

-3: 全くそう思わない, 0: どちらでもない, 3: 全くそう思う

回の時間を含まず、経路 1 で平均 1 分 54 秒、標準偏差 24 秒、経路 2 で平均 3 分 12 秒、標準偏差 16 秒であった。

またアンケート結果は表 3 の通りである。

図 3 に事前実験 (5 節) とユーザ実験における位置推定誤差の累積分布を示す。横軸は誤差 [m]、縦軸は累積分布であり、事前実験を実線でユーザ実験を点線で示している。経路 1, 2 のそれぞれのユーザ位置追跡誤差の平均値は 1.4 m と 1.9 m、中央値は 1.1 m と 1.5 m、95%分位点は 3.5 m と 4.5 m であった。事前実験に対してユーザ実験では誤差が大きくなる割合が増加していることが確認できる。このような位置を適切に追跡できない状況の増加による全体的な精度の低下は、位置追跡アルゴリズムや事前実験で考慮できていないユーザの移動の多様性に起因している。

## 7. ディスカッション

### 7.1 実験の評価について

アンケート Q6 の総合評価では平均 2.3 と高い評価を得ることができ、ナビゲーションシステムとして歩行を支援することができるレベルにあることが確認できた。

しかしながら、Q1 の音声案内タイミングについてはユーザにより最も評価が分かれる結果となってしまった。評価

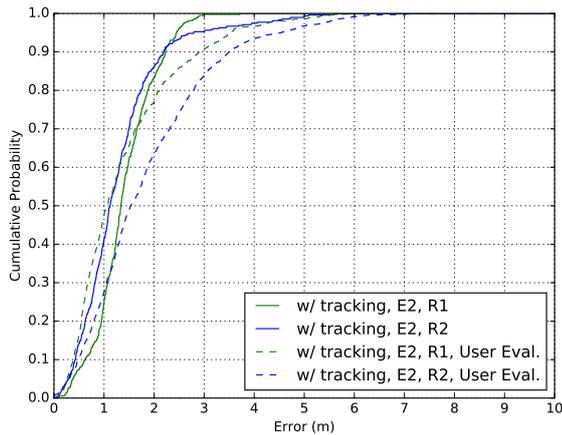


図 3 事前実験とユーザ実験での位置追跡誤差の累積分布  
Fig. 3 Cumulative distribution of tracking error in the preliminary experiments and the user experiments.

が悪かった理由は「歩く速度にリンクしていない感じがする」「ワンテンポ遅れる」のように案内のタイミングが遅れたことによるものであったが、分析すると原因が2種類あった。1つは想定外の動きで位置が追跡できず精度が低下してしまったことによる遅れであった。P04の経路2において、まっすぐ伸びた階段の途中の踊り場で、折り返しの階段だと思込み階段左端から右端に移動しぶつかるという動きがあった。その際追跡アルゴリズム中の移動可能な範囲の地図からはみ出してしまい、結果的に位置をロスし復帰するのに時間がかかってしまった。健常者の移動ではまず見られない動きであるが、実用時により正確に位置を推定するためには、位置推定システムをユーザの多様性に対して頑強にすることが重要である。

2つ目は音声の案内の誤差への考慮が足りなかったことによる。(3) 方向指示の直前の(2) 距離確認の案内のタイミングは、対象となる位置までが短いため、位置推定の誤差や読み上げと認知までの時間差などにより、実際とのずれが相対的に大きくなり、体感とずれた案内をしてしまっていた。そのため対象位置との相対距離が短くなった時には「もうそろそろです (approaching)」というような表現を使うことを検討する。

## 7.2 学習データの収集

BLE ビーコンによる位置推定では、電波環境の測定が欠かせない。また教師信号として位置を入力するため、電波環境測定のワークロードが非常に高い。実用化を目指す上でワークロード削減方法についても検討が必要である。教師なしの電波環境測定の方法も提案されており [25, 26], クラウドソーシングによって電波の観測データを収集し電波環境のモデルを作るのも一つの可能性ではあるが、様々なデバイスで観測されたデータから高精度の

位置推定を実現するのは難しい課題である。

## 8. おわりに

BLE ビーコンとスマートフォンに搭載されたセンサーを用いた位置推定に基づき、目的地への移動に必要な情報を音声で伝えるナビゲーションアプリケーションを開発した。視覚障害者ナビゲーションの研究は非常に長い歴史があり、音声ナビゲーションの提示方法など多くの研究があるが、特に都市部では屋内外において高精度の位置情報を取るのが難しくなっており、実用化に至っていない。

本研究では実用化を目指し、市販の BLE ビーコンとスマートフォンを使ったナビゲーションシステムの開発をし、実環境での位置精度評価とユーザ実験によりその実現性を検証した。

位置推定精度評価では、BLE ビーコンとスマートフォンのセンサーによる位置追跡で、実環境において視覚障害者ナビゲーションに耐えうる精度で位置を推定できることを確認した。そして、12名の視覚障害者の被験者を対象として、ナビゲーションアプリケーションの有効性を評価する実験を行い、初めて訪れる場所における歩行の支援が一定の範囲でできることを確認した。今後は位置推定精度の向上、位置推定環境構築のワークロード削減に加え、より広い範囲での実証実験と実用化を目指す。またプロジェクトの成果の普及のため、アプリケーションをオープンソースとして公開している。<sup>\*3</sup>

**謝辞** 本研究に多大なご協力を頂きました日本点字図書館ならびに被験者の皆様に心から感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Fallah, N., Apostolopoulos, I., Bekris, K. and Folmer, E.: Indoor human navigation systems: A survey, *Interacting with Computers*, Vol. 25, pp. 21–33 (2013).
- [2] 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).
- [3] Loomis, J. M., Golledge, R. G., Klatzky, R. L., Speigle, J. M. and Tietz, J.: Personal guidance system for the visually impaired, *Proceedings of the first annual ACM conference on Assistive technologies*, ACM, pp. 85–91 (1994).
- [4] Makino, H., Ishii, I. and Nakashizuka, M.: Development of navigation system for the blind using GPS and mobile phone combination, *Engineering in Medicine and Biology Society, 1996. Bridging Disciplines for Biomedicine. Proceedings of the 18th Annual International Conference of the IEEE*, Vol. 2, IEEE, pp. 506–507 (1996).
- [5] Helal, A. S., Moore, S. E. and Ramachandran, B.: Drishti: An integrated navigation system for visually impaired and disabled, *Proceedings. Fifth International Symposium on Wearable Computers*, IEEE, pp. 149–156

<sup>\*3</sup> <http://hulop.mybluemix.net>

- (2001).
- [6] Hub, A., Diepstraten, J. and Ertl, T.: Design and development of an indoor navigation and object identification system for the blind, *ACM SIGACCESS Accessibility and Computing*, No. 77-78, ACM, pp. 147–152 (2004).
- [7] 山下清司, 長谷川孝明: 視覚障害者誘導用ブロックを用いた M-CubITS 歩行者ナビゲーションシステムについて, *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol. 88, No. 2, pp. 269–276 (2005).
- [8] Chumkamon, S., Tuvaphanthaphiphat, P. and Keeratiwintakorn, P.: A blind navigation system using RFID for indoor environments, *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on*, Vol. 2, IEEE, pp. 765–768 (2008).
- [9] 鈴木慶太, 中村有貴, 藤井雅弘, 渡辺裕, 伊藤篤: 携帯電話を用いた屋内環境向け視覚障害者歩行支援システムの開発 (ITS ポジショニングシステム, 一般), *電子情報通信学会技術研究報告. ITS*, Vol. 109, No. 128, pp. 7–12 (2009).
- [10] Fallah, N., Apostolopoulos, I., Bekris, K. and Folmer, E.: The user as a sensor: navigating users with visual impairments in indoor spaces using tactile landmarks, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 425–432 (2012).
- [11] Legge, G. E., Beckmann, P. J., Tjan, B. S., Havey, G., Kramer, K., Rolkosky, D., Gage, R., Chen, M., Puchakayala, S. and Rangarajan, A.: Indoor navigation by people with visual impairment using a digital sign system, *PloS one*, Vol. 8, No. 10, p. e76783 (2013).
- [12] Lazik, P., Rajagopal, N., Sinopoli, B. and Rowe, A.: Ultrasonic time synchronization and ranging on smartphones, *Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS), 2015 IEEE*, IEEE, pp. 108–118 (2015).
- [13] Gezici, S., Tian, Z., Giannakis, G. B., Kobayashi, H., Molisch, A. F., Poor, H. V. and Sahinoglu, Z.: Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks, *IEEE signal processing magazine*, Vol. 22, No. 4, pp. 70–84 (2005).
- [14] Zhang, J. and Singh, S.: Loam: Lidar odometry and mapping in real-time, *Robotics: Science and Systems Conference (RSS)*, pp. 109–111 (2014).
- [15] Woodman, O. and Harle, R.: Pedestrian localisation for indoor environments, *Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing*, ACM, pp. 114–123 (2008).
- [16] 村田正秋, 瀬川爾朗, 鳥本秀幸: IMES の技術動向: シームレス三次元測位・航法の新技术, *電子情報通信学会誌*, Vol. 95, No. 2, pp. 119–124 (2012).
- [17] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N.: RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, Vol. 2, IEEE, pp. 775–784 (2000).
- [18] Ferris, B., Haehnel, D. and Fox, D.: Gaussian processes for signal strength-based location estimation, *Robotics: Science and Systems Conference (RSS)* (2006).
- [19] Hilsenbeck, S., Bobkov, D., Schroth, G., Huitl, R. and Steinbach, E.: Graph-based data fusion of pedometer and WiFi measurements for mobile indoor positioning, *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, ACM, pp. 147–158 (2014).
- [20] Murphy, K. P.: *Machine learning: a probabilistic perspective*, MIT press (2012).
- [21] Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D.: *Probabilistic robotics*, MIT press (2005).
- [22] Li, F., Zhao, C., Ding, G., Gong, J., Liu, C. and Zhao, F.: A reliable and accurate indoor localization method using phone inertial sensors, *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, ACM, pp. 421–430 (2012).
- [23] Brajdic, A. and Harle, R.: Walk detection and step counting on unconstrained smartphones, *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing*, ACM, pp. 225–234 (2013).
- [24] Wiener, W. R., Welsh, R. L. and Blasch, B. B.: *Foundations of orientation and mobility*, Vol. 1, American Foundation for the Blind (2010).
- [25] Chintalapudi, K., Padmanabha Iyer, A. and Padmanabhan, V. N.: Indoor localization without the pain, *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, ACM, pp. 173–184 (2010).
- [26] Yang, Z., Wu, C. and Liu, Y.: Locating in fingerprint space: wireless indoor localization with little human intervention, *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*, ACM, pp. 269–280 (2012).