

近接度を用いたパーティクルフィルタによる 高精度屋内測位手法

百瀬 凌也^{1,a)} 新田 知之² 柳澤 政生¹ 戸川 望^{1,b)}

概要: 複雑な構造を有する建物や地下街が増え, 屋内空間で携帯端末を持つ歩行者向けの経路案内が注目されている. 屋外空間では GPS 衛星からの電波を受信し測位することで歩行者の現在位置を測位し経路案内を実現しているが, GPS 衛星の電波の届かない屋内空間では GPS 衛星による測位が不可能であり, GPS 衛星に代わる屋内での測位手法が必要となる. 本稿では, Bluetooth ビーコンの電波強度に安定した Proximity 方式を用い, 地磁気センサ・加速度センサを組み合わせた上, フロアマップを考慮したパーティクルフィルタにより高精度に位置推定する手法を提案する. 提案手法ではパーティクルフィルタの尤度関数を設計する際, (a) 測位点での各 Bluetooth ビーコンの近接度とその Bluetooth ビーコンと各パーティクルの距離に加え, (b) 障害物情報を基にしたフロアマップを用いることで, 単にセンサや Bluetooth ビーコン, フロアマップを組み合わせた手法と比較して歩行者の位置を高精度に推定することを可能とする. 12 個の Bluetooth ビーコンを設置したフロアにて歩行実験した結果, 平均誤差を 0.999m で測位することができ, 既存のいくつかの手法に比べ誤差を最大で 79%削減できることを確認した.

1. はじめに

複雑な構造を有する建物や地下街が増え, 屋内空間で携帯端末を持つ歩行者向けの経路案内が注目されている. 経路案内において最大の課題の 1 つに歩行者の位置推定がある. 一般に屋外空間の位置測位では, 主に GPS (Global Positioning System) が用いられ, GPS 衛星からの電波を受信し位置を測位することが可能である. 一方屋内空間の位置測位では, 条件が良い屋内空間で GPS を用いて測位した場合であっても最大数 m の誤差が生じる. 屋内空間では数 m の誤差があれば通路が 1 つ違う, 進行方向が異なる, などといった誤った案内になり得, また, 階層構造の施設であれば GPS を用いた測位だけでは何階にいるのかが判断できないなど, GPS を用いた測位だけでは位置測位が不十分である. そのため, GPS に代わる屋内位置測位手法として, 無線 LAN [8, 10, 13], Bluetooth [1, 12], IMES (Indoor MESSaging System) [9], 加速度センサ・地磁気センサ [5, 7], QR コード [4] を利用した測位手法などが研究されている.

中でも, 本稿では, Bluetooth ビーコンと加速度センサ・

地磁気センサを用いた屋内の位置測位に着目する. 一般に電波を用いる位置測位では, 取得した電波強度を用いることで現在位置を測位する. 電波強度を用いた位置測位手法として, Trilateration 方式, Proximity 方式, Fingerprinting 方式がある [3]. Trilateration 方式は, 電波が減衰しながら伝播する特性を活かして受信電波強度 (RSSI) から Bluetooth ビーコンと測位端末との距離を推定し, 三辺測量法などを用いて測位端末を位置測位する. Proximity 方式は, RSSI から Bluetooth ビーコンと測位端末との距離を測位するが, Trilateration ほど厳密ではなく測位端末のおおよその位置だけを位置測位する. Fingerprinting 方式は, 事前に受信電波強度のデータを記録しそれと照合することで位置測位する. Trilateration 方式は, 理想的な空間では正確な位置測位が可能であるが, 壁などに電波が反射するマルチパスや測位端末と Bluetooth ビーコンの位置関係が測位精度に大きく影響する. Proximity 方式は, 電波が届く範囲に測位端末が存在するかどうかを計測するため測位が安定するという利点はあるが, 厳密に位置を特定することが困難である. Fingerprinting 方式は, 事前に測位の対象空間で RSSI を測定し電波強度マップを作成することで, 構造による影響を把握できるため Trilateration よりも精度の高い測位が可能であるが, 事前にデータを測定するコストがかかることや電波強度マップを作成したときと測位の環境が異なれば誤差が大きくなる.

¹ 早稲田大学
Waseda University

² ゼンリンデータコム
ZENRIN DataCom

^{a)} ryoya.momose@togawa.cs.waseda.ac.jp

^{b)} togawa@togawa.cs.waseda.ac.jp

屋内空間において歩行者の経路案内を考えたとき、歩行者は常に自己位置を確かめながら目的地に向かって歩行することが多く、安定した測位を実現する必要がある。そこで Bluetooth ビーコンの電波強度として、Proximity 方式を利用することが最も良い。本稿では Bluetooth ビーコンを用いた位置測位手法として Proximity 方式を用いることにする。さらに加速度センサを用いて歩行者の歩行動作を検出し、地磁気センサを用いて歩行者の向きを検出する。Bluetooth ビーコンにより計測された絶対位置に対し、検出した歩行動作のベクトルを加えることで歩行者の動作に適合した測位を基本とする。

ところが上記の方法で位置測位すると、もともと Bluetooth ビーコンの電波強度に Proximity 方式を用いるため測位端末のおおよその位置しかわからない上、Bluetooth ビーコンと測位端末との間の壁による影響が留意されない、ならびに加速度センサ・地磁気センサによる位置の更新により誤差が累積していくという問題が生じる。そこで本稿では、パーティクルフィルタ [2] を導入することで Bluetooth ビーコンの電波強度として Proximity 方式を用いたとしても確率的に精度よく測位端末の位置を推定できるのと同時に、加速度センサ・地磁気センサの誤差の累積の抑止を図る。さらに、障害物データを基にしたフロアマップを導入することで Bluetooth ビーコンと測位端末との間の壁による影響の検討を図る。

パーティクルフィルタを用いた屋内測位手法として、加速度センサ・地磁気センサとフロアマップを用いる手法 [11]、Wi-fi と加速度センサ・地磁気センサとフロアマップを用いる手法 [8, 10, 13] などが提案されている。Andrew らの手法 [10] は、Wi-fi の電波を Trilateration 方式を用いて測位する。測位対象の空間に最適な補正係数を算出し、Trilateration 方式で安定した測位を実現している。しかし、事前に最適な補正係数を算出する必要があり広範囲に普及することが困難である。Feng らの手法 [8] は、Wi-fi の電波を用い、アクセスポイントの RSSI の変化に注目する Proximity 方式で測位する。注目するアクセスポイントと測位端末の距離の変化を測定し、歩行者の動作の検出や誤差補正をする。RSSI の動的な変化を常時測位する必要があるため、建物の構造や測位端末の姿勢の影響により測位に大きな誤差が起きる。Wu らの手法 [13] は、測位対象の空間の RSSI を事前に測定する Fingerprinting 方式を用いて測位する。電波の伝搬の空間による影響を吸収するため高い精度を実現するが、事前に測位対象の空間の RSSI を測位するコストがかかる。いずれの手法も事前測位せずに安定した測位を実現しているとは言い難い。

以上の背景から本稿では、Bluetooth ビーコンの電波強度に安定した Proximity 方式を用い、地磁気センサ・加速度センサを組み合わせた上、フロアマップを考慮したパーティクルフィルタにより高精度に位置推定する手法を提案

する。パーティクルフィルタ [2] を用いるにあたり、いかに尤度関数を設計するかが鍵となる。提案手法では (a) 測位点での各 Bluetooth ビーコンの近接度とその Bluetooth ビーコンと各パーティクルの距離に加え、(b) 障害物情報を基にしたフロアマップを用いて尤度関数を設計することで、単にセンサや Bluetooth ビーコン、フロアマップを組み合わせた手法に比較して歩行者の位置を高精度に推定することを可能とする。12 個の Bluetooth ビーコンを設置したフロアで行った歩行実験では、平均誤差を 0.999m で測位することができ、既存のいくつかの手法に比べ誤差を最大で 79%削減できることを確認した。

本稿の貢献は以下の通りである。

- (1) パーティクルの尤度を設計するにあたり、Bluetooth ビーコンの近接度を用いた尤度関数を設計することで電波の伝達が不安定である屋内空間でも安定した位置測位を実現する。
- (2) (1)に加えて障害物情報を基にしたフロアマップを用いることで加速度センサ・地磁気センサの累積誤差の抑制や Bluetooth ビーコンの壁による影響を極小化する。
- (3) その結果、屋内空間で 70m の歩行コースを測位する歩行実験では、測位点での平均誤差が 0.999m となった。既存のいくつかの手法に比べ誤差を最大で 79%削減できることを確認した。

2. Bluetooth ビーコンを用いた屋内測位問題

本章では、Bluetooth ビーコン、フロアマップ、加速度センサ・地磁気センサを説明する。その後、本稿で扱う屋内測位問題を定義する。

2.1 Bluetooth ビーコン

本稿では Bluetooth ビーコンと測位端末との相対位置を取得する方法として Proximity 方式を用いる。Proximity 方式とは、測位端末が受信した Bluetooth ビーコンからの電波の情報を用いて測位端末のおおよその位置を測るものであり、測位端末のおおよその位置を近接度によって与える。近接度の値は (i) Immediate, (ii) Near, (iii) Far, (iv) Unknown の 4 つがある。

Bluetooth ビーコン集合 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ を考え、測位端末は常に各 Bluetooth ビーコンからの電波を受信するものとする。受信した電波をもとに各ビーコン b_j に対する近接度を得る。Bluetooth ビーコン b_j と測位端末の距離を $d_j[m]$ とする。近接度が Immediate のとき、おおよそ $d_j \leq 1 [m]$ を、Near のとき、おおよそ $1 \leq d_j \leq 3 [m]$ を、Far のとき、おおよそ $3 \leq d_j [m]$ を示す。Unknown のとき、測位端末が Bluetooth ビーコンから電波を受信できず距離を判定できない状態にあることを示す。

なお、3.2.1 項で示すように、我々の予備実験で使用した Bluetooth ビーコンでは、設置された Bluetooth ビーコン

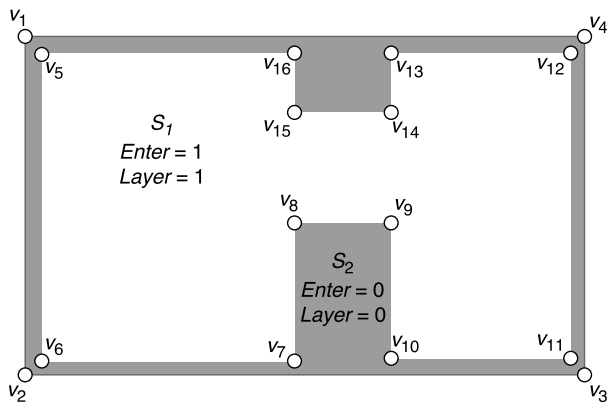


図 1: フロアマップの例.

に対して測位端末を手に持ちながら測位しても Immediate を示すことはなかった.

2.2 フロアマップ

フロアマップは構造物の集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$ によって構成される. 各構造物 s_k はノードの集合 V , エッジの集合 E と領域情報 $enter$ と重なり情報 $layer$ を持つ. 領域情報 $enter$ は通行可能かどうかを表現する. $enter = 0$ は壁や障害物など通行不可能であることを表し, $enter = 1$ は通行可能であることを表す. $layer$ は各フロアにおいて構造物の重なりを表し, $layer = 0$ は, フロアの最下層を表し, $layer = 1, 2, \dots$ の順に構造物を重ねる.

図 1 にフロアマップの例を示す. 図 1 のフロアマップは, s_1, s_2 の 2 つの構造物による. s_1 はノード集合 $\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ から構成され通行不可能な構造物を表す. s_2 はノード集合 $\{v_5, v_6, \dots, v_{16}\}$ から構成され通行可能な構造物を表す. 白の部分は通行可能 ($enter = 1$) であることを表す. 灰色の部分は通行不可能 ($enter = 0$) であることを表す. 2 つの構造物の情報により図 1 は H 型に歩行可能なフロアマップであることがわかる. 早稲田大学 55 号館 N 棟 6F のフロアマップを図 2 に示す.

2.3 加速度センサ・地磁気センサ

加速度センサ・地磁気センサを用いて歩行動作, 進行方向を検出し, 測位端末の現在位置からの相対位置を測位するものとする [6].

歩行動作推定

加速度センサを用いて歩行動作を検出する. 加速度センサで測位端末の 3 軸の加速度を取得する. この 3 軸の加速度の合成値を $accel$ とする. 測位端末を持った歩行者が歩行すると, 体が上下に動くため測位端末の加速度に変化が現れる. 歩行者が歩行すると, 測位端末の加速度センサの合成値 $accel$ は極大値と極小値を取る. 極大値と極小値にそれぞれ閾値を設け, 閾値を超える極大値と極小値のセットを 1 歩と検出する.

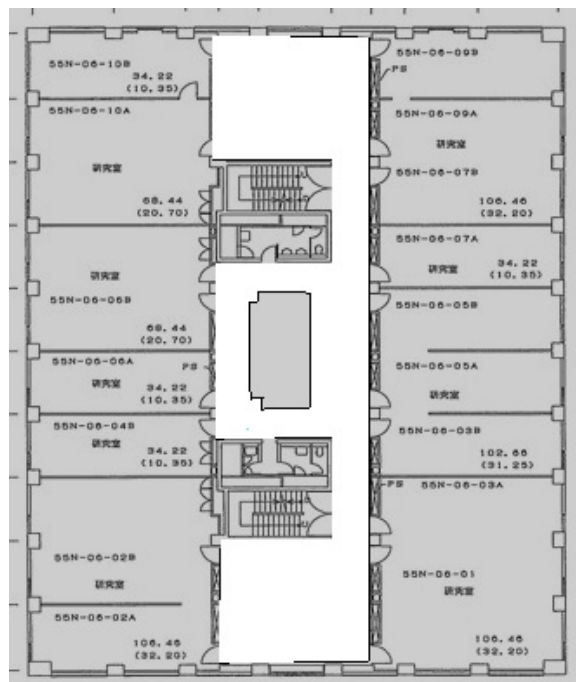


図 2: 早稲田大学 55 号館 N 棟 6F のフロアマップ.

進行方向推定

地磁気センサを用いて測位端末がどの方位を向いているかを検出する. 地球は磁力線が南から北に向いている. この性質を使って測位端末の向きを検出する.

2.4 屋内位置測位問題

歩行者は Bluetooth ビーコンの受信機能, 加速度センサ, 地磁気センサの測位機能を搭載した測位端末を所持し, Bluetooth ビーコンの設置された屋内のフロアを歩く. 屋内のフロアマップは事前に与えられるとする.

このとき, 本稿の屋内位置測位問題とは加速度センサの測位値, 地磁気センサの測位値, 各 Bluetooth ビーコンの近接度, フロアマップを入力とし, 測位端末の現在位置の座標を出力するものである.

3. パーティクルフィルタを用いた屋内測位

本章では, Bluetooth ビーコンの近接度と地磁気センサ・加速度センサを組み合わせた上, フロアマップを考慮したパーティクルフィルタを用いて高精度に位置推定する手法を提案する.

まず, n 個のパーティクル集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ と m 個の Bluetooth ビーコン集合 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ を考える. 各パーティクル p_i は時刻 t で位置座標 $(x_p^i(t), y_p^i(t))$ と尤度 $w_i(t)$ をもつ. 各パーティクル p_i の尤度は, 測位端末が p_i の位置に存在するらしさを表す指標である. 尤度の高いパーティクルの周辺に測位端末が存在すると推定する. 各 Bluetooth ビーコン b_j は設置した座標 (x_b^j, y_b^j) をもつ. 時刻 t で測位端末が測位した b_j の近接度を $prox_j(t)$

とする。

パーティクルフィルタによる現在位置推定のアルゴリズムを以下のように提案する。

Step 1 (初期化) $w_i(0) = 0$ とし, n 個のパーティクルから構成されるパーティクル集合 P を生成する. 各パーティクル p_i にランダムに $(x_p^i(0), y_p^i(0))$ を設定する. $t = 0$ とする.

Step 2 (移動予測) $t = t + t_s$ とし, すべてのパーティクル p_i を移動モデルを用いて移動する.

Step 3 (尤度推定) 各パーティクル $p_i \in P$ の尤度 $w_i(t)$ を, $w_i(t - t_s)$ と現在の状態から算出した変量 $\Delta w_i(t)$ を用いて式 (1) で計算する.

$$w_i(t) = \max\{w_i(t - t_s) + \Delta w_i(t), 0\} \quad (1)$$

Step 4 (位置推定) 時刻 t の各パーティクル $p_i \in P$ の位置の加重平均を用いて測位端末の推定位置 $(x_e(t), y_e(t))$ を得る.

$$x_e(t) = \frac{\sum_{i \in P} x_i(t) \cdot w_i(t)}{\sum_{i \in P} w_i(t)} \quad (2)$$

$$y_e(t) = \frac{\sum_{i \in P} y_i(t) \cdot w_i(t)}{\sum_{i \in P} w_i(t)} \quad (3)$$

Step 5 (リサンプリング) 尤度 $w_i(t) = 0$ のパーティクル p_i を **Step 4** で求めた推定位置 $(x_e(t), y_e(t))$ の周りにランダムにばらまく. このとき, これらのパーティクル p_i の尤度を $w_i(t) = 1$ とする. **Step 2** に戻る.

例 1 図 3 に歩行者が測位端末を持ち四角の枠の中を歩くときの提案手法の動作例を示す. $t_s = 1$ 秒とする. 図 3(a) に **Step 1** 初期化 ($t = 0$) を示す. 四角の枠の中にランダムにパーティクルをばらまく. 図 3(b) に **Step 2** 移動予測 ($t = 1$) を示す. 歩行者が右下に移動したことを検出したためすべてのパーティクルを右下に移動する. 図 3(c) は **Step 3** 尤度推定 ($t = 1$) を表す. 周囲の状況からパーティクルの尤度を計算する. 図 3(d) に **Step 4** 位置推定 ($t = 1$) を示す. パーティクルの尤度から現在位置を推定する. 図 3(e) に **Step 5** リサンプリング ($t = 1$) を示す. 尤度が 0 のパーティクルを **Step 4** で推定した測位端末の位置の周辺にパーティクルをばらまく. 同様に $t = 2$ のときの様子を図 3(f), 図 3(g), 図 3(h), 図 3(i) に示す. ■

提案手法では **Step 2** の移動モデルと **Step 3** の尤度関数をいかに設計するかが鍵となる. 提案手法では加速度センサ・地磁気センサを用いて移動モデルを設計し, 式 (1) に対して, (a) 各ビーコン b_j の近接度 $prox_j(t)$ と各パーティクル p_i と b_j の距離 $d_{ij}(t)$ を用いた尤度変量 $\Delta w_b(t)$, (b) フロアマップを用いた尤度変量 $\Delta w_f(t)$ の 2 つの要素から尤度関数の変量を式 (4) で設計する.

表 1: MyBeacon TM Pro (MB004) [14] の仕様

Bluetooth	Bluetooth® 4.0
LED	2 個 (赤, 緑)
動作環境	温度 $-10 \sim 60^\circ\text{C}$ 湿度 $20 \sim 80\%$
電源	単 3 乾電池 2 本
外形寸法 ($W \times D \times H$)	$50 \times 70 \times 27.5[\text{mm}]$
重量	約 50g(電池除く)

$$\Delta w_i(t) = \Delta w_b^i(t) + \Delta w_f^i(t) \quad (4)$$

また, **Step 1** の初期化, **Step 5** のリサンプリングでもフロアマップを用いて適当な位置にパーティクルを配置する.

以下, 本章では **Step 2**, **Step 3**, **Step 5** について提案する.

3.1 加速度センサ・地磁気センサを用いた移動モデル (Step 2)

Step 2 では, 手法 [6] をもとに, 加速度センサ・地磁気センサを用いて測位端末の歩行動作と進行方向を検出する. 加速度センサ・地磁気センサの値から測位端末の動作を検出する. 検出した動作に基づいて各パーティクル $p_i \in P$ を移動させる.

t_s [秒] ごとに加速度センサによって歩行動作を検出した際, 地磁気センサによって取得した進行方向を $dist$ [度] とする. このとき各パーティクル p_i を進行方向に対し, $dist$ [度] に向けて, 歩幅分 65cm 移動する. この際, パーティクル p_i の進行方向はランダムで $\pm 15^\circ$ の範囲でノイズを与える. 歩幅はランダムで $\pm 0.1\text{m}$ の範囲でノイズを与える.

3.2 Bluetooth ビーコンを用いた尤度推定 (Step 3)

時刻 t において測位端末が測位した Bluetooth ビーコン $b_j \in B$ に対する近接度 $prox_j(t)$ と, 各パーティクル p_i と各 Bluetooth ビーコン b_j の距離 $d_{ij}(t)$ を用いて Bluetooth ビーコンを用いた尤度変量 $\Delta w_b^i(t)$ を導出する.

3.2.1 予備実験

時刻 t において測位端末が Bluetooth ビーコン b_j から得た近接度 $prox_j(t)$ によって b_j と測位端末の距離を近似するため, 実際の距離と近接度の関係性を評価する予備実験を行った. 予備実験では, 測位端末として Nexus 9 [15] 及び Bluetooth ビーコンとして MyBeacon TM Pro (MB004) [14] を用いた. 表 1 に実験に使用する MyBeacon TM Pro (MB004) の仕様を示す. 単 3 乾電池 2 本で動作し, 軽量で小型であるため手間がかからずあらゆる場所に設置可能である.

予備実験は以下のように行った. 7.5m 四方の部屋を

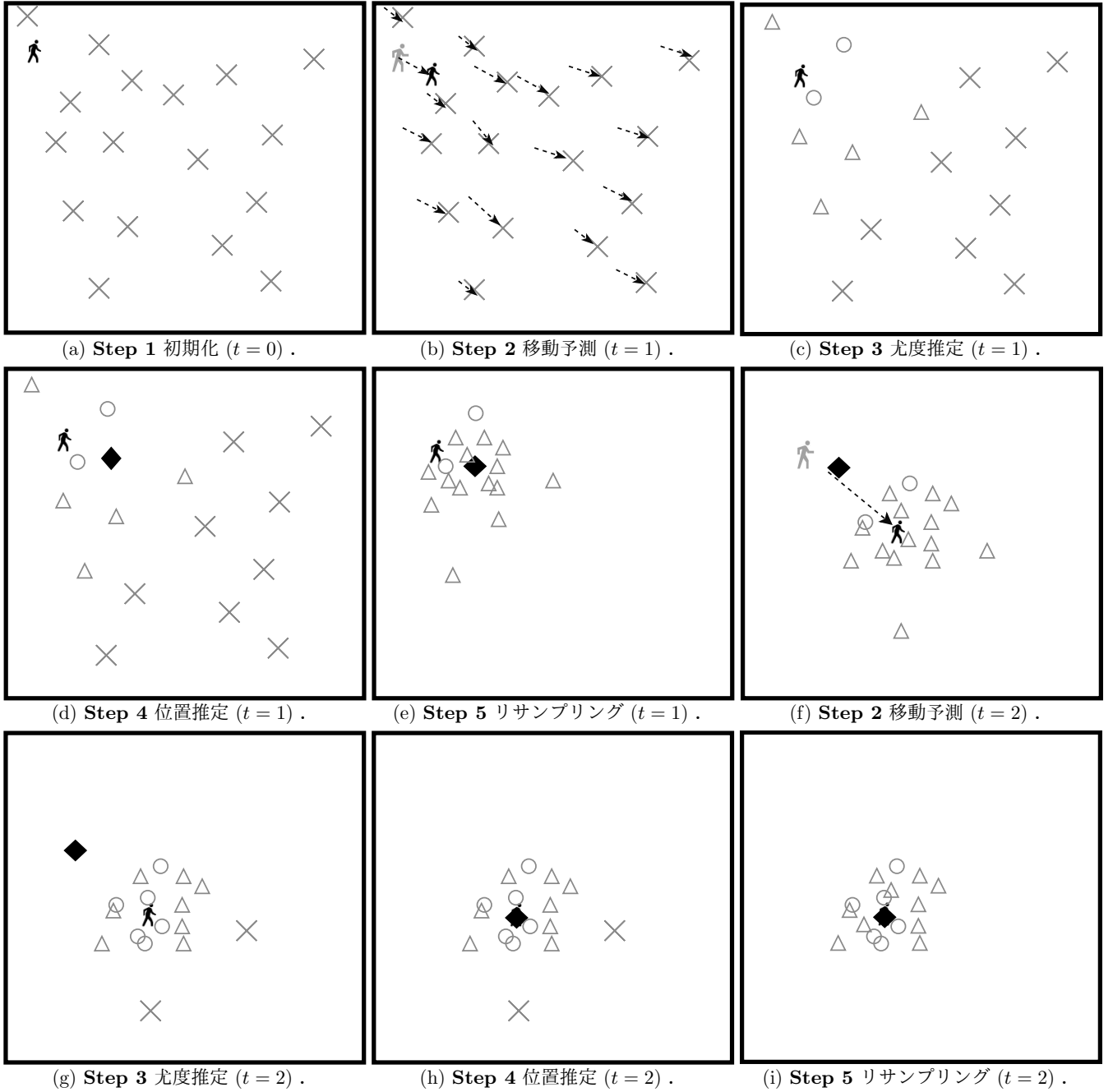


図 3: 提案手法の動作の様子 (◆: 推定位置, ○: 尤度大, △: 尤度中, ×: 尤度 0 のパーティクルを表す).

30cm 四方のセルで分割し, 中央のセルの床面に Bluetooth ビーコンを置く. 周囲のセルに対して測位端末 Nexus 9 を用いて近接度を測定する. Bluetooth ビーコンは西向きに設置する. 測位端末は通常の歩行動作を想定し胸の高さ (約 1.0m) で左手で持って北向きで測位した.

実験結果を図 4 に示す. 中央の黒で示した部分に Bluetooth ビーコンが設置されている. 図で黄で示したセルは測位端末が Near と測位したセル, 白で示したセルは Far を測位したセルである. Immediate と測位したセルは存在しなかった.

図 4 より, Bluetooth ビーコンの近接度は, Bluetooth ビーコンの向きや測位端末と Bluetooth ビーコンの相対的な向きに影響されることがわかる. 近接度が Near の範囲は同心円状に広がっているとは限らないことに注意する.

3.2.2 近接度による尤度変量の設計

今, ビーコン b_j とパーティクル p_i に注目する. 測位端末は時刻 t においてビーコン b_j の近接度を $prox_j(t) = Near$ と測位したとする. 測位端末は b_j に近い位置に存在すると考えられるが, このとき, 各パーティクル p_i とビーコン b_j の距離から各パーティクル p_i がどの程度測位端末に近

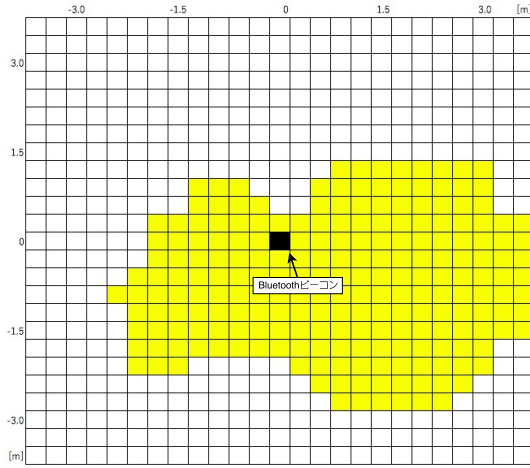


図 4: 予備実験の結果 (黄 : Near, 白 : Far)。

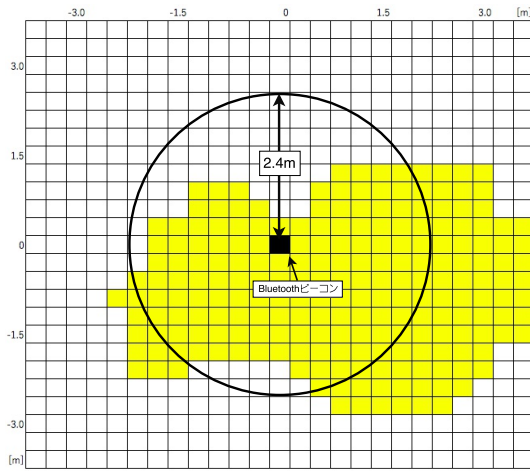


図 5: 半径 2.4m の円。

い位置に存在するかを尤度変量 $\Delta w_{b_j}^i$ によって表す。

予備実験の結果をもとに測位端末が測位した各ビーコン b_j の近接度 $prox_j(t)$ から各パーティクル p_i の尤度を設計する。Bluetooth ビーコンと測位端末は常に一定の方向を向かず、相対的な向きを推定することは難しい。そこで、以下のような整合率を導入することで近接度を用いた尤度変量 $\Delta w_{b_j}^i$ を導出する。

予備実験において Bluetooth ビーコンから距離 d にあるセルの集合の中で Near となったセルの割合を整合率 $Acc(d)$ とする。図 6 に $d = 0$ から $d = 2.4$ までの整合率 $Acc(d)$ を表す。図 5 に半径を 2.4m としたときの円を示す。 $d = 0.3$ のとき整合率 $Acc(0.3) = 1.0$ であるが、 $d = 0.6$ のとき整合率 $Acc(0.6) = 0.875$ となる。 $d = 2.4$ のとき整合率 $Acc(2.4) = 0.355$ となる。整合率 Acc は Bluetooth ビーコンと各セルの距離 d が長くなるにつれ線形に減少している。この近似線は式 (5) で示すことができる。

$$Acc(d) = 1.1 - 0.088d \quad (5)$$

整合率 $Acc(d)$ により尤度変量を導出する。時刻 t にお

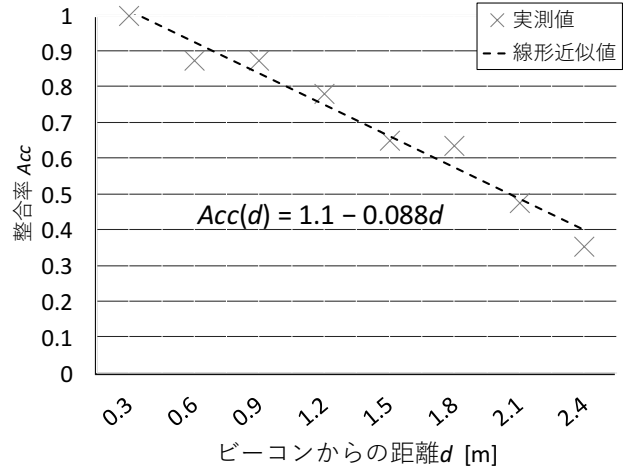


図 6: Bluetooth ビーコンからセルの距離 d と整合率 Acc の関係。

るある Bluetooth ビーコン b_j からパーティクル p_i までの距離を $d_{ij}(t) = \sqrt{(x_p^i(t) - x_b^j)^2 + (y_p^i(t) - y_b^j)^2}$ とすると、Bluetooth ビーコン b_j の近接度 $prox_j(t)$ を用いて、Bluetooth ビーコン b_j に対する近接度による尤度変量 $\Delta w_{b_j}^i$ を式 (6) で与える。

$$\Delta w_{b_j}^i(t) = \begin{cases} 1.1 - 0.088d_{ij}(t) & (prox_j(t) = \text{Near}) \\ 0 & (prox_j(t) \neq \text{Near}) \end{cases} \quad (6)$$

時刻 t における各パーティクル p_i の近接度による尤度変量 $\Delta w_b^i(t)$ は、各ビーコン $b_j \in B$ による尤度変量 $\Delta w_{b_j}^i(t)$ を Bluetooth ビーコン集合 B の各要素について和を取り式 (7) で与える。

$$\Delta w_b^i(t) = \sum_{b_j \in B} w_{b_j}^i(t) \quad (7)$$

3.3 フロアマップを用いたマップマッチングによる尤度推定 (Step 3)

フロアマップをもとにしたマップマッチングにより、時刻 t における各パーティクル p_i のフロアマップを用いた尤度変量 $\Delta w_f^i(t)$ を導出する。提案手法では、内在判定と交差判定の 2 つの判定手法を用いる。

3.3.1 内在判定を用いた尤度推定

時刻 t においてパーティクル p_i が Step 2 によって移動した先が、 $enter = 0$ の構造物の中だと仮定する。しかし、測位端末は通行不可能な構造物の中に入ることは不可能である。このような動作をしたパーティクル p_i は誤った予測と判断し、パーティクル p_i を壁に通行する直前の通行可能領域までの移動とし、パーティクル p_i の尤度変量 $\Delta w_f^i(t)$ に式 (8) によってペナルティを与える。

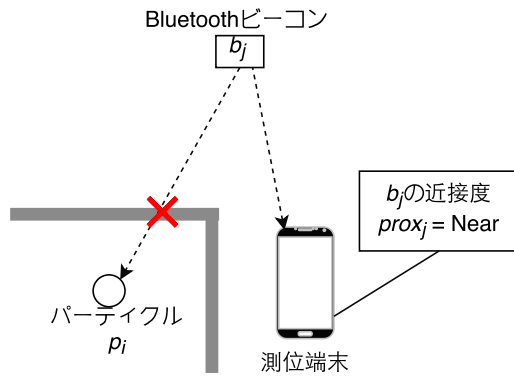


図 7: b_j と p_i の間に壁がある様子.

$$\Delta w_f^i(t) = \begin{cases} -0.5 & (p_i \text{ が通行不可能な構造物内に移動した場合}) \\ 0 & (\text{other}) \end{cases} \quad (8)$$

3.3.2 交差判定を用いた尤度推定

Bluetooth ビーコンと測位端末とが壁に遮られていると、両者の距離が近くても Bluetooth ビーコンの電波は壁に遮られ届かない。

時刻 t において測位端末が Bluetooth ビーコン b_j から近接度 $prox_j(t) = Near$ を測位したとする。このとき、図 7 のようにパーティクル p_i と b_j の距離は近くてもその間に壁が存在するとき、 p_i の近接度による尤度変量 $\Delta w_b^i(t)$ は式 (7) で算出されるべきではない。Bluetooth ビーコン b_j とパーティクル p_i の間に壁があるとき、測位端末がパーティクル p_i の位置に存在する可能性は低いいため $prox_j(t)$ に関わらず $w_b^i(t) = 0$ とする。

3.4 内在判定を用いたリサンプリング (Step 5)

Step 3 の結果、尤度 $w_i(t)$ が 0 となったパーティクル p_i は Step 5 において測位端末の推定位置の周りにランダムにばらまかれる (リサンプリング)。enter = 0 の構造物の中を測位端末は通行しないと考えられるため、 p_i をばらまく必要はない。そのため、リサンプリングの際、 p_i は通行可能な領域にばらまくことにする。

なお、Step 1 初期化の際も同様に通行可能な領域にのみパーティクルをばらまく。

4. 実装と評価

屋内位置測位アプリケーションとして提案手法を Nexus 9 [15] 上に実装した。早稲田大学西早稲田キャンパスの建物内で約 70m の歩行コースを歩き最終地点での測位誤差を求める実験を行った。実験に用いたフロアマップと Bluetooth ビーコンの設置場所を図 8 に示す。実験ではパーティクル数 $n = 500$ 、Bluetooth ビーコン数 $m = 12$ 、位置測位の間隔 $t_s = 0.2$ 秒とした。実験の歩行コースを図 9 に示す。Nexus 9 を手に持ちながら歩行コースを歩

き、測位点 1、測位点 2 での測位端末の推定位置座標を記録する。それぞれの測位点での測位端末の推定位置座標と実際の座標との誤差を評価指標とする。

比較のため、次の 4 種類の手法を用いて実験した。

[手法 1 (距離推定)] Bluetooth ビーコン、加速度センサ・地磁気センサを用いパーティクルフィルタにより位置測位する。ただし、Bluetooth の電波強度として Trilateration 方式を用いる。加速度センサ・地磁気センサの値は 2.3 節と同じものを用い、3.1 節のように移動モデルを設計した。Bluetooth ビーコン b_j から受信した電波の受信電波強度 $RSSI_j$ [dBm] を用いて Bluetooth ビーコンから測位端末までの距離 $dist_j$ は式 (9) と表せる [10]。

$$dist_j = 10^{\frac{-76 - RSSI_j}{20.0}} \quad (9)$$

式 (9) を用いて各ビーコン b_j と測位端末との距離 $dist_j$ を推定し、各ビーコン b_j から $dist_j - 1 \leq x_{ij} \leq dist_j + 1$ [m] の範囲にあるパーティクル p_i を尤度変量 $\Delta w_b^i = 1$ とし、範囲外にあるパーティクル p_i を尤度変量 $\Delta w_b^i = -1$ として歩行実験した。

[手法 2 [10] (距離推定 + MAP)] Bluetooth ビーコン、加速度センサ・地磁気センサ、フロアマップを用いパーティクルフィルタにより位置測位する。加速度センサ・地磁気センサの値は 3.1 節と同じものを用いる。フロアマップは 2.2 節と同じものを用い、3.3 節のように尤度推定する。Bluetooth の電波強度として上記で示した Trilateration 方式を用いて歩行実験した。

[手法 3 (近接度推定)] Bluetooth ビーコン、加速度センサ・地磁気センサを用いる手法である。加速度センサ・地磁気センサの値は 3.1 節と同じものを用いパーティクルフィルタにより位置測位する。Bluetooth の電波強度として本稿で提案した 3.2 節を用いて歩行実験した。

[提案手法 (近接度推定 + MAP)] Bluetooth ビーコン、加速度センサ・地磁気センサ、フロアマップを用いパーティクルフィルタにより位置測位する。提案手法により歩行実験した。

4 つの手法をそれぞれ 5 回歩行実験を行った結果を表 2 に示す。手法 1 の平均誤差は、4.921m である。手法 1 は、Bluetooth ビーコンの受信電波強度から Bluetooth ビーコンと測位端末との距離を推定するため、マルチパスによる影響が大きい屋内空間では受信電波強度が安定せず誤差が大きくなったと考えられる。手法 2 の平均誤差は、4.72m である。手法 2 は、手法 1 にフロアマップを用いたマップマッチングを適用した手法である。マップマッチングにより受信電波強度による誤差が削減されたことが確認できる。しかし、距離測位による位置測位では最大で 7m の測位誤差が生じている。手法 3 の平均誤差は、2.711m であ

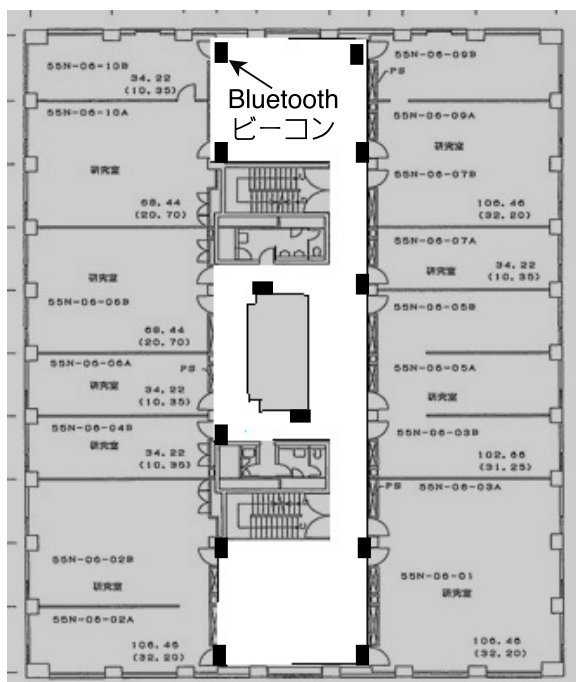


図 8: Bluetooth ビーコンの設置場所.

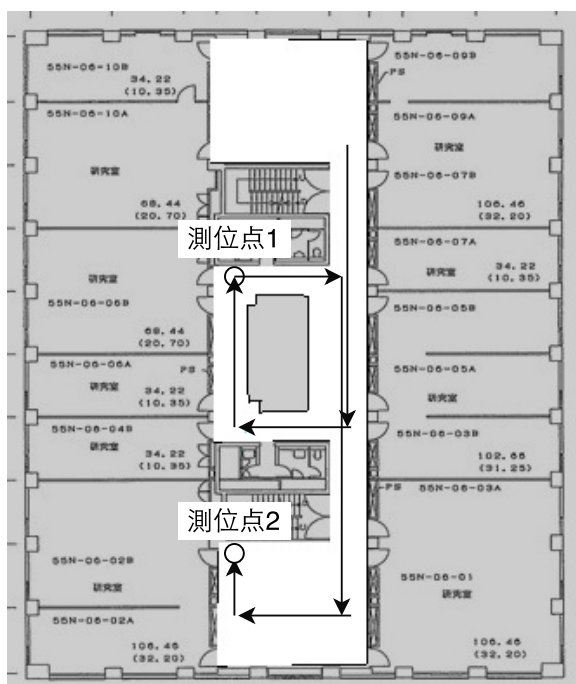


図 9: 実験に用いた歩行コース.

る. 手法 3 は, 近接度推定を用いた位置測位であるが, 手法 1 の距離推定に比べ約 45%削減できた. また, 最大測位誤差も 4m と約 43%削減でき, 安定した測位を実現できた.

提案手法の平均誤差は, 0.999m である. フロアマップを用いたマップマッチングをしたため, Proximity 方式によって安定した測位を実現した手法 3 よりさらに誤差を削減することができた. フロアマップを用いない手法 3 に対し平均誤差を約 63%削減することに成功した. Bluetooth ビーコンの電波強度として, 不安定な場所でも有利となる

Proximity 方式を用いることで, 距離推定による位置測位をした手法 2 に対し平均誤差を約 79%削減することに成功した.

5. おわりに

本稿では, 近接度を用いたパーティクルフィルタによる高精度屋内測位手法を提案した. 提案手法では, (a) 測位点での各 Bluetooth ビーコンの近接度とその Bluetooth ビーコンと各パーティクルの距離に加え, (b) 障害物情報に基づいたフロアマップを用いて尤度関数を設計することで, 単にセンサや Bluetooth ビーコン, フロアマップを組み合わせただけの手法に比較して歩行者の位置を高精度に推定することを可能とした. 12 個の Bluetooth ビーコンを設置したフロアにて歩行実験した結果, 平均誤差を 0.999m で測位することができ, 既存のいくつかの手法に比べ誤差を最大で 79%削減できることを確認した.

今後は, GPS を用いた屋外位置測位と提案手法を用いた屋内位置測位を接続し, シームレスな位置測位を実現する予定である.

参考文献

- [1] 堀川三好, 古館達也, 工藤大希, 岡本東, “BLE 位置測位および PDR を用いたハイブリッド型屋内位置測位手法の提案,” 研究報告コンシューマ・デバイス & システム (CDS).
- [2] 北川源四郎, “モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について,” 統計数理, vol. 44, no. 1, pp. 31–48, 1996.
- [3] 伊藤誠悟 河川信夫, “アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による無線 LAN ハイブリッド位置推定手法とその応用,” 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), vol. 126, no. 10, pp. 1212–1220, 2006.
- [4] 小林誠, 黒沼紀彦, 五百蔵重典, “QR コードによるナビゲーションシステムのスマートフォンを用いた実装,” 研究報告 モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), vol. 2012, no. 9, pp. 1–8, 2012.
- [5] 村田雄哉, 梶克彦, 廣井慧, 河川信夫, “歩行者自律測位における行動センシング知識の利用,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム, 2014.
- [6] 岩名地良太, 新田知之, 石川和明, 柳澤政生, 戸川望, “歩行者の視点情報に基づく屋内経路案内,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016) シンポジウム, vol. 2016, pp. 1748–1756, 2016.
- [7] C. Ascher, C. Kessler, M. Wanklerl, and G. Trommer, “Dual IMU indoor navigation with particle filter based map-matching on a smartphone,” in *Proc. 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–5, 2010.
- [8] F. Hong, Y. Zhang, Z. Zhang, M. Wei, Y. Feng, and Z. Guo, “WaP: Indoor localization and tracking using WiFi-Assisted particle filter,” in *Proc. 2014 IEEE 39th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pp. 210–217, 2014.
- [9] N. Kohtake, S. Morimoto, S. Kogure, and D. Manandhar, “Indoor and outdoor seamless positioning using indoor messaging system and GPS,” in *Proc. 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 21–23, 2011.

表 2: 歩行実験の結果.

	測位誤差 [m].							
	手法 1 距離推定		手法 2 [10] 距離推定 + MAP		手法 3 近接度推定		提案手法 近接度推定 + MAP	
	測位点 1	測位点 2	測位点 1	測位点 2	測位点 1	測位点 2	測位点 1	測位点 2
1 回目	4.573	3.029	4.397	6.094	3.300	3.605	0.427	0.806
2 回目	3.528	5.361	3.845	5.430	1.643	1.326	1.377	0.940
3 回目	5.059	5.585	1.951	5.960	2.188	0.085	1.307	0.974
4 回目	6.952	2.965	5.467	4.355	4.058	3.762	0.667	1.000
5 回目	5.730	6.427	4.047	5.656	3.845	3.297	1.840	0.650
平均誤差	4.921		4.72		2.711		0.999	
最小誤差	2.965		1.951		0.085		0.427	
最大誤差	6.952		6.094		4.058		1.840	

- [10] A. Y. Lee, A. Kumar, P. Wilk, W. Chmielowiec, W. Jaworski, M. Skorupa, and P. Zborowski, "High accuracy indoor localization with low cost based on wireless LAN, mobile sensors and floor layout," in *Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*, pp. 1–6, 2016.
- [11] F. Li, C. Zhao, G. Ding, J. Gong, C. Liu, and F. Zhao, "A reliable and accurate indoor localization method using phone inertial sensors," in *Proc. 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 421–430, 2012.
- [12] S. P. Subramanian, J. Sommer, F.-P. Zeh, S. Schmitt, and W. Rosenstiel, "PBIL PDR for scalable bluetooth indoor localization," in *Proc. Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, pp. 170–175, 2009.
- [13] Z. Wu, E. Jedari, R. Muscedere, and R. Rashidzadeh, "Improved particle filter based on WLAN RSSI fingerprinting and smart sensors for indoor localization," *Computer Communications*, vol. 83, pp. 64–71, 2016.
- [14] "Aplix 社 – MyBeaconPro (MB004)," <http://business.aplix.co.jp/product/mybeacon/mb004ac/>.
- [15] "HTC 社 – Nexus 9," <http://www.htc.com/jp/tablets/nexus-9/>.