

屋内環境における高精度な測位手法の検討

石丸智也^{†1} 宮村紅葉^{†1} 富樫宏謙^{†2} 古川浩^{†2}

概要：屋内環境における測位は、測位エリアに多数設置された発信機を利用して行うことが一般的である。端末側測位は、端末が発信機からの信号などを利用して自身の位置を推定する手法で、端末に搭載されたセンサを用いて測位精度の向上を支援できる。端末に内蔵されたセンサを活用した歩行者自律航法（PDR：Pedestrian Dead Reckoning）が検討されているが、PDRは時間とともに誤差が蓄積するという課題がある。発表者はこれまで端末側測位に注目し、BLE（Bluetooth Low Energy）発信機による測位とPDRを組み合わせた測位手法を検討してきた。PDRの蓄積誤差低減のため、測位エリアの地図情報から推定位置や方位を修正するマップマッチングに注目し、従来手法の改善を検討している。具体的には、ロバスト性の高い推定手法であるパーティクルフィルタにマップマッチング処理を適用することにより、パーティクルフィルタのみの場合と比較して平均の測位精度が22.5%向上した。

キーワード：屋内測位, BLE, PDR, マップマッチング, パーティクルフィルタ

Study of High Accuracy Indoor Positioning System

ISHIMARU TOMOYA^{†1} MIYAMURA KOYO^{†1}
TOGASHI HIROAKI^{†2} FURUKAWA HIROSHI^{†2}

Abstract: Indoor positioning is generally performed by using transmitters installed in a positioning area, in order to estimate mobile device's absolute position. The device side positioning is a method in which a device estimates its own position using signals from the transmitter. The sensors equipped on the device can assist in improving positioning accuracy. We focused on the device-side positioning and proposes a positioning method combining PDR (Pedestrian Dead Reckoning) and positioning method using BLE (Bluetooth Low Energy) transmitter. However, PDR utilizes sensors equipped on a device, and is suffering from a problem such that estimation error of PDR accumulates according to the elapsed time. In order to overcome this problem we focused on the map matching to correct the estimated position and direction from the map information of the positioning area. We also introduced particle filter which is a highly robust estimation framework into our positioning method, in order to improve the conventional method utilizes map matching. By combining map matching and particle filter, our method has improved the average positioning accuracy by 22.5%.

Keywords: Indoor positioning, BLE, PDR, Map matching, Particle filter

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット端末などの情報通信端末（スマートデバイス）が急速に普及している。これらのスマートデバイスは高い処理能力や通信能力を備えており、その特徴を活かして数多くのアプリケーションが開発されている。多くのこれらのアプリケーションでは、位置情報が積極的に活用されており、高精度な端末測位はITの重要な基盤技術であると言える。標準的手法はGPS（Global Positioning System）であるが、衛星からの信号を利用して測位を行うため、屋内環境での高精度な測位は難しい。屋内環境における測位では、測位対象エリアに多数設置された発信機を利用して測位を行うことが一般的である（インフラ測位）。発信機の高密度な設置により、高精度な測位が実現できると期待されているが、敷設コストや維持コストが増大する課題がある。端末側測位は、スマートデバイスが発信機からの信号などを利用して自身の位置を推定する

手法である。端末側測位の利点は、デバイスに搭載されたセンサを用いて測位精度の向上を支援できる点である。

筆者らは、屋内環境における高精度な測位手法の検討を行っており、端末側測位に注目している。本稿にて述べる手法では、高精度化のために端末に備わった種々のセンサを活用した歩行者自律航法（PDR：Pedestrian Dead Reckoning）とインフラ測位を併用している。PDRとインフラ測位の測位結果の統合には、ロバスト性の高い推定手法であるパーティクルフィルタを用いている。しかし、PDRによる測位は時間とともに誤差が蓄積するという課題があり、蓄積誤差を低減する工夫が必要であった[1]。そこで、測位エリアの地図情報から推定位置や方位を修正するマップマッチングに注目した。

以降では、パーティクルフィルタ及びマップマッチングの説明を行った後、実装した測位システムの紹介を行う。その後、測位システムの評価実験の報告を行い、評価実験の結果を踏まえ、今後の研究方針について述べる。

^{†1} 九州大学大学院システム情報科学府
Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

^{†2} 九州大学大学院システム情報科学府
Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

2. 関連研究

2.1 パーティクルフィルタ

多数のパーティクル（粒子，サンプル）を空間上に配置し，各パーティクルがモデルに従ってどのように変化するかをシミュレートし，予測分布の変化を計算するアルゴリズムである[2]．現在の時刻の観測値を用いてパーティクルの消滅と生成を行う．観測値を基にパーティクルの生成，移動，消滅を繰り返して複数の推定結果の候補を生成し，その候補を用いてそれらしい結果を推定する（最尤推定）．十分な数のパーティクルが存在すれば，高精度な推定結果が得られる．図1に，パーティクルフィルタの測位システムへの応用イメージを示す．

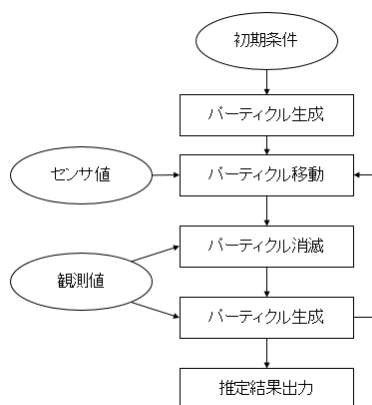


図1 パーティクルフィルタの処理フロー

2.2 マップマッチング

マップマッチングは，測位エリアの既知の情報を用いて測位結果を補正する技術である．一般的にカーナビゲーションシステムで用いられるマップマッチングでは，推定された測位点や移動方向とマップ情報を照らし合わせ，自動車は道路上を自然に走行するであろうという条件を基に測位点や移動方向の補正が行われている[3]．このような手法は，道路や廊下のような，測位対象の移動方向や移動経路があらかじめ予測できる場合には十分な効果が得られるが，複雑な室内のように測位対象の移動方向や移動経路を予測しにくい場合には適用が難しい．そこで，移動の自由度の高い測位対象の動線推定を行うために，ロバスト性の高い推定手法であるパーティクルフィルタにマップマッチングを適用することが検討されている[4]．マップマッチングを適用したパーティクルフィルタによって，より正確な動線推定を可能にしているが，ショッピングセンターでの人の動線推定を目的としており，測位モジュールを載せたショッピングカートを使用するため，利用シーンが限定される．本研究では，これをスマートデバイスに応用し，利用シーンにこだわらない測位システムを検討することを目的としている．

3. 測位システム紹介

3.1 システム構成

本システムでは，測位のためのインフラとして，省電力で使用可能で高密度に設置可能な BLE（Bluetooth Low Energy）タグを使用した．自身の ID を含むビーコン信号（以下，BLE 信号と表記する）を発信する BLE タグを，4 m 間隔で測位エリアに設置した．測位端末は 5 秒に 1 回の間隔で BLE 信号のスキャンを行い，受信した BLE 信号の強度（RSSI : Received Signal Strength Indicator）を基に，多点重み付け手法により自身の位置を推定する（BLE 測位）．一方で，端末に内蔵された加速度センサ，ジャイロセンサ，地磁気センサから得られたデータを用いて端末の移動速度，方向を推定し，PDR により自身の位置の変位を推定する（PDR 測位）．これら BLE 測位と PDR 測位の結果をパーティクルフィルタにより統合処理することで最終的な測位結果を計算する．本システムは，Android 端末上で動作するアプリケーションとして実装しており，測位結果は，端末の画面上に表示される．測位システムの構成を図2に示す．

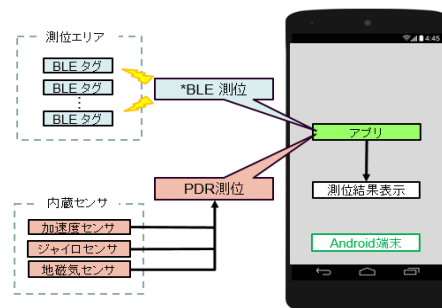


図2 システム構成図

3.2 BLE 測位

BLE 測位では，測位エリア内における端末の絶対位置の推定を行う．本システムでは，多点重み付け手法を用いた．測位端末は，BLE タグの ID と測位エリアにおける位置座標を既知としており，各 BLE タグから BLE 信号を受信する度に，観測した RSSI を基に各 BLE タグに重みを付ける． i 番目のタグについて，以下の式より重み w_i を決定する．

$$w_i = \left(\frac{1}{10^{[(RSSI_{Max} - RSSI_i)/10k]}} \right)^2$$

ここで， $RSSI_{Max}$ は観測した中で最も値の高かった RSSI の値， $RSSI_i$ は i 番目の BLE タグの RSSI の値， k は環境変数を示している．全タグの重みを決定した後， x 軸方向， y 軸方向のそれぞれについて各 BLE タグの位置座標 (x_i, y_i) の重み付け平均を全 BLE タグについて計算し，BLE 測位の推定結果とする．

$$x = \frac{\sum_i x_i \cdot w_i}{\sum_i w_i}$$

$$y = \frac{\sum_i y_i \cdot w_i}{\sum_i w_i}$$

3.3 PDR 測位

PDR 測位では、端末に内蔵された加速度センサ、地磁気センサ、ジャイロセンサを用いて、測位端末の移動速度、方向の推定を行う。端末に定義されている内蔵センサの座標軸を図3に示す。

測位端末の傾きを表す鉛直方向（x, y 軸まわりの回転）の姿勢推定には加速度センサを用いる。加速度センサの値を重力加速度成分と動作加速度成分に分離し、重力加速度成分の値を観測することで、鉛直方向の姿勢推定を行う。測位端末の移動方向を表す水平方向（z 軸まわりの回転）の姿勢推定には地磁気センサとジャイロセンサを用いる。地磁気センサにより得られた地磁気の値から、北を基準に何度回転しているかを算出し、絶対方位の推定を行う。その後、ジャイロセンサにより端末の姿勢の相対的な変化を観測し、水平方向の姿勢推定を行う。これらの結果から、測位端末の移動方向 θ を決定する。

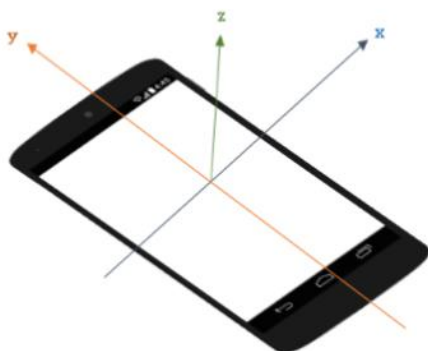


図3 端末の座標軸の定義

歩行者の鉛直方向の加速度成分の正負のピークの値の差と歩行速度には相関関係があることが知られている[5]。本システムでは、測位端末の鉛直方向の加速度を観測することで移動速度 v を決定する。

$$v = C_1 \cdot \frac{a_{max} - a_{min}}{g} + C_2$$

ここで、 a_{max} , a_{min} はそれぞれ観測された鉛直方向の加速度の正負のピーク値を、 g は重力加速度の値を表しており、 C_1 , C_2 はそれぞれ事前実験により求めた定数である。

3.4 マップマッチングを適用したパーティクルフィルタ

初期条件として、BLE 測位による推定位置を中心に、x 軸方向、y 軸方向それぞれの分散が 1.0m の正規分布に従ってパーティクルを 500 個配置する。なお、配置する範囲の限界は BLE の測位結果から半径 3.0m 以内とする。

その後、各パーティクルは PDR 測位により求めた移動速度 v と移動方向 θ を基に 1 秒に 1 回の間隔で移動する。時刻 t_n における、各パーティクルの位置は以下のように計算される。

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ y_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (v_{n-1} + \delta_{v,n}) \cdot \cos(\theta_{n-1} + \delta_{\theta,n}) \cdot \Delta t \\ (v_{n-1} + \delta_{v,n}) \cdot \sin(\theta_{n-1} + \delta_{\theta,n}) \cdot \Delta t \end{bmatrix}$$

ここで、 Δt は $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ により定義される時刻差分である。 $\delta_{v,n}$, $\delta_{\theta,n}$ は、それぞれ平均 0、分散 0.1 の正規分布に従って生成される乱数値であり、各時刻において、パーティクルごとに値を生成する。

移動した各パーティクルに対して、マップマッチング処理を行い、パーティクルの消滅を行う。本測位システムでは、あらかじめ測位エリアを進入可能エリアと不可侵エリアに分類したマップ情報を定義している。具体的には、進入可能エリアを人間が自然に歩行して到達できるエリア、不可侵エリアを机や壁などのオブジェクトがあり人間が自然に歩行して進入できないエリアとしている。各パーティクルは移動する度にマップ情報により存在判定を行い、不可侵エリアに存在しているパーティクルは消滅する。

その後、BLE による測位結果が取得されたタイミングで、パーティクルの総数が 500 個未満である場合、パーティクルの総数が 500 個となるように新たにパーティクルを生成する。パーティクルの生成は、BLE の測位結果を中心に 3.0 m 以内の範囲で、x 軸方向、y 軸方向それぞれの分散が 1.0m の正規分布に従って行われる。

パーティクルの生成、移動、消滅の一連の処理は、本システムが起動している期間中、繰り返し実行される。測位結果は、パーティクルの生成、移動、消滅のそれぞれの処理が行われる度に計算され、その時に残存する全パーティクルの平均座標を出力する。

4. 実験

4.1 実験内容

実装した測位システムを用いて、測位精度を評価する実験を行った。本実験において、被験者は測位端末を持って実験エリア内の既定のルートを歩行した。ルート内に設けられたチェックポイントの正解座標と、チェックポイントに被験者が到達した時点での推定座標の誤差を測位精度とし、評価尺度として用いた。測位精度は下式のように定義した。

$$\varepsilon = \sqrt{(x_{Estimated} - x_{True})^2 + (y_{Estimated} - y_{True})^2}$$

ここで、 $x_{Estimated}$, $y_{Estimated}$ は推定位置の座標を、 x_{True} , y_{True} はチェックポイントの正解座標をそれぞれ表している。本評価における比較のために、マップマッチング処理を行う場合と行わない場合の両方について同条件で実験を行った。今回使用したルート、チェックポイントを図4に示す。また、実験エリアに設置した BLE タグの位置及びマップマッチング処理で使用した不可侵エリアを、図5に示す。

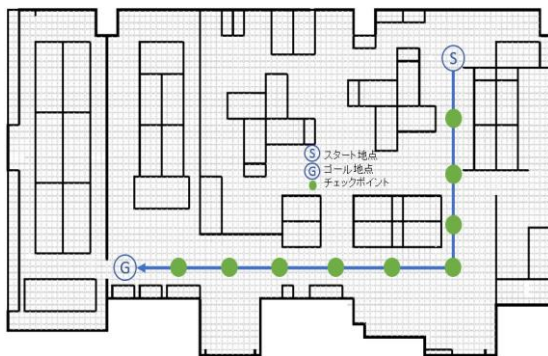


図4 実験ルート

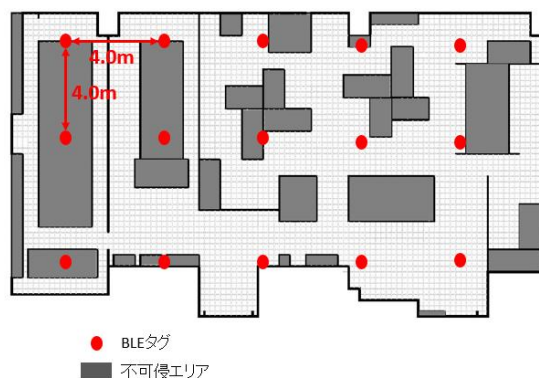


図5 BLE タグの位置と不可侵エリアの定義

4.2 実験結果

実験結果として、測位精度を表1に、測位精度の分布特性（CDF）を図6に示す。また、時間経過に伴う測位精度の変化を観測するため、各チェックポイントにおける測位精度を全試行の平均値から算出し、グラフ化したものが図7である。

表1 測位精度

	平均 誤差[m]	最大 誤差[m]	最小 誤差[m]	90%以内 誤差[m]	分散
マップマッチング あり	1.76	5.16	0.06	3.1	1.05
マップマッチング なし	2.27	6.79	0.23	4.0	1.62

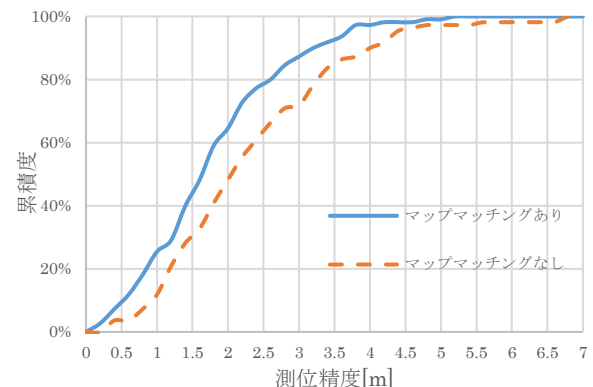


図6 測位精度の CDF

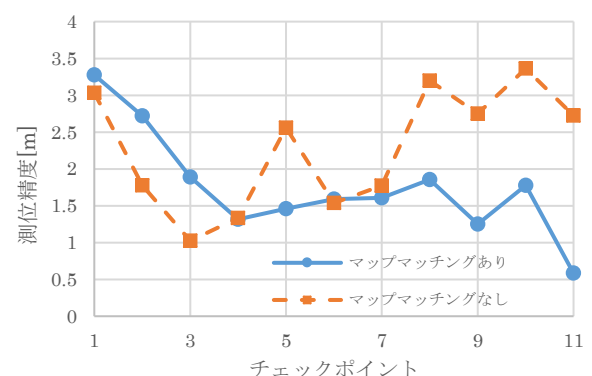


図7 時間経過に伴う測位精度の変化

4.3 考察

マップマッチングを適用することによって、パーティクルフィルタのみで測位を行った場合と比較して平均の測位精度が22.5%向上した。また、測位精度の分散及びCDFからも、マップマッチングの適用によって測位の精度と安定性が向上したことが見られた。

次に、時間経過に伴う測位精度の変化に注目してみると、スタート地点付近ではパーティクルが収束するまでに十分な時間が経過していないため、マップマッチングの適用の有無にかかわらず同程度の測位精度であった。測位精度と時間経過の関係性に着目すると、マップマッチングを適用していない場合では、時間が経過しても目立った測位精度の向上が見られないのに対し、マップマッチングを適用した場合は、時間経過に伴い測位精度が向上する様子が見られた。マップマッチングによって進入可能エリアから離れたパーティクルが消滅しやすく、結果としてパーティクルの収束性が高まり測位精度が向上したと考えられる。

また、ゴール地点付近の様に、不可侵エリアが周囲に多い場所において、特に精度が向上した様子が見られた。この結果から、マップマッチングを用いた測位では、マップの定義や測位場所によって測位精度に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

5. 終わりに

本稿では、マップマッチングを適用したパーティクルフィルタを用いた測位手法の精度評価を行い、マップマッチングを適用したパーティクルフィルタの有用性を示すことができた。今後は、マップの定義やフィルタアルゴリズムを改良することで、パーティクルの収束性の向上と、さらなる高精度な測位を実現する手法を検討する。

参考文献

- [1] Li, Xin, et al. "Integrated WiFi/PDR/Smartphone using an adaptive system noise extended Kalman filter algorithm for indoor localization." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5.2 (2016): 8.
- [2] Fox, V., et al. "Bayesian filtering for location estimation." *IEEE pervasive computing* 2.3 (2003): 24-33.
- [3] Jagadeesh, G. R., T. Srikanthan, and X. D. Zhang. "A map matching method for GPS based real-time vehicle location." *The Journal of Navigation* 57.3 (2004): 429-440.
- [4] 山田俊郎, 渡辺博己, and 棚橋英樹. "人の動線推定に関する研究開発 (第 2 報) パーティクルフィルタを用いたマップマッチング." 岐阜県情報技術研究所研究報告 14 (2012): 21-24.
- [5] M. Kourogi and T. Kurata: "Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera," In Proc. of ISMAR2003, pp. 103–112, (2003).