

経路毎存在確率と移動特性付きパーティクルによる 端末型屋内測位手法

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

概要: 本稿では屋内環境においてスマートフォンが主体となって測位を行う端末型測位手法を提案する。具体的には、Wi-Fi アクセスポイントと端末間での RSSI(Received Signal Strength Indication)を用いてユーザーの測位エリア内での位置座標を、端末のセンサを用いた PDR(Pedestrian Dead Reckoning)によりユーザーの移動速度および進行方向変化を求める。これらの観測量をパーティクルフィルタにより統合することで最終的な測位結果を得る。提案手法では、パーティクルの生成時に、ユーザーが各経路に存在する確率（経路毎存在確率）を各 Wi-Fi アクセスポイントから受信した信号の RSSI により求める。各パーティクルの配置は、経路毎存在確率と Wi-Fi 信号の RSSI から求めた位置に従って行う。各パーティクルの進行方向はそれぞれが位置する経路の方向に基づいて設定しているため、地磁気センサに依存せず進行方向の推定を可能としている。本手法ではさらに、各パーティクルに移動特性係数を設定することでパーティクルの移動パターンを多様化し、PDR の計測誤差に対する耐性を持たせている。市販のスマートフォンにより評価実験を行った結果、誤差の平均値が 1.8m であり、推定結果の 90%が誤差 4m 以内となることが判明した。

キーワード: パーティクルフィルタ, 経路毎存在確率, 移動特性係数, 屋内測位, 端末型測位, PDR (Pedestrian Dead Reckoning)

Device-side indoor positioning method using Per-route existence probability and Particles with Movement Characteristic Coefficient

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

Abstract: This paper describes device-side indoor positioning method works on a smartphone. Signal strength between Wi-Fi access point and a device is used to estimate target user's position in a certain positioning area. PDR (Pedestrian Dead Reckoning) using sensors on a device is used to estimate velocity and orientation change of the user. Positioning result is obtained by inputting these values into a particle filter. Specifically, each particle is generated on the basis of the Per-Route Existing Probability and the position estimated using Wi-Fi signals. Going direction of each particle is defined by the orientation of the route on which the particle exists. Therefore, this method can estimate device going direction without using magnetometer. Each particle also has Movement Characteristic Coefficients that diversifies movement of particles, in order to make the proposed method robust to PDR estimation error. An experiment was conducted using a commercial smartphone, and experimental results revealed that the positioning accuracy of the proposed method was 1.8 meter in average, and 90% of the positioning results have the estimation error within 4.0 meter.

Keywords: Particle Filter, Per-Route Existing Probability, Movement Characteristic Coefficients, Indoor positioning, Device-side positioning, PDR (Pedestrian Dead Reckoning)

1. はじめに

近年、スマートフォン等の高機能な携帯情報端末の普及に伴い、これらの端末向けに多様なアプリケーション、サービスが提供されるようになってきている。こうしたサービスの中にはユーザーの位置情報を活用するものも多く存在していることから、ユーザーの位置を推定する測位技術に注目が集まっている。屋外における測位では GNSS (Global Navigation Satellite System)が高精度な測位を実現しており、標準的な技術として定着している。しかし、GNSS は測位を行うために衛星からの電波を利用するため、屋内での測位には不向きであることが従来より課題となってい

る。この課題に対し、携帯情報端末、特にスマートフォンに搭載された各種センサを活用し、ユーザーの位置を特定する技術の研究・開発が広く行われている。

本稿で提案する測位アルゴリズムはユーザーの保持するスマートフォンが主体となって測位を行う端末型測位手法である。具体的には、Wi-Fi アクセスポイント(AP)と端末間の信号強度(RSSI: Received Signal Strength Indication)を用いて端末の測位エリア内での位置座標を、端末のセンサを用いた PDR(Pedestrian Dead Reckoning)により端末の移動速度および方向変化を求める。これらの観測量をパーティクルフィルタの入力とし、測位結果を得る。提案手法では測位エリアを経路の集合として扱い、Wi-Fi 信号をもとに経路

^{†1} 九州大学大学院 システム情報科学研究院
Faculty 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

Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

毎の存在確率（経路毎存在確率）を求め、それに従って各パーティクルを配置する。各パーティクルには PDR により観測される移動速度、進行方向変化に対し、それぞれ異なる特性係数（移動特性係数）を付与し、移動特性を多様化することで PDR 誤差に対する耐性を向上している。こうした測位手法を、市販のスマートフォン上で利用可能とすることも本研究の目標である。

以降の本稿の構成は以下のとおりである。2 章にて提案手法の関連技術及び関連研究を俯瞰する。3 章にて提案手法の概略について述べた後、4 章にて提案手法の評価結果について述べる。5 章にて本稿の総括を行い、今後の展望について述べる。

2. 関連技術・研究

2.1 基礎的な測位計算手法

測位計算手法は Range-based 手法と Range-Free 手法の 2 通りに大別される。Range-based 手法は距離、角度などの情報を用い、測量的に対象の位置を求める手法である。代表的な手法としては、既知点の位置座標と既知点から未知点への距離を測定して未知点の位置を求める三点測量、既知点同士を結んだ線分の両端から未知点への角度を測定し、未知点の位置を求める三角測量などが挙げられる。Range-based 手法において、高い測位精度を実現するためには距離、角度などの正確な推定が必要である。推定精度は利用する機器の特性に依存しやすいため、機器ごとに計算パラメータの最適化が必要となる。

Range-Free 手法はこうした測量計算を行わないものである。代表的な手法としては Proximity-based 手法[1]、Weighted Centroid[2]が挙げられる。これらの手法では、既知点群の位置とメトリックを用いて未知点の位置を求めている。測位精度は Range-based 手法よりも低下するが、単純な観測量および計算式により対象の位置を推定できる利点がある。Location Fingerprinting [3]も Range-Free 手法の一種であり、測位エリアの数ヶ所で事前に計測した値と測位時に観測した値を照合することで位置を推定する。先に述べた Range-Free 手法では少ない計算量で対象の位置を推定できるのに対し、Location Fingerprinting では膨大な計算コストが必要となる。また、予め測位エリアの環境を測定することが必須であり、事前準備に要する手間も大きい。

2.2 屋内測位の関連研究

屋内測位において、測位エリア内での対象の位置座標を推定するために Wi-Fi[4][5]、BLE(Bluetooth Low Energy)[6][7]、地磁気[8]、高周波可聴音[9]等の機器を用いた手法が研究されている。このうち、Wi-Fi はショッピングモール、駅構内等において来訪者向け通信サービスを支えるインフラとして既に整備されていることから、他の機器と比較して導入の障壁が低いといえる。

これらの機器を用いて推定した測位対象の位置座標と、

PDR 等により観測した測位対象の変位（位置変化）の双方を観測し、より精度の高い測位結果を得るための手法がハイブリッド測位である。ハイブリッド測位において重要となるのが、性質の異なる複数の観測量を統合する際に用いるフィルタ手法である。代表的な手法として、カルマンフィルタによる手法[10][11]、パーティクルフィルタによる手法[12][13]が挙げられる。後述するマップマッチングと組み合わせることを考えると、パーティクルフィルタはマッチング処理を尤度計算およびリサンプルに組み込むことで実現可能である。一方、カルマンフィルタは遷移モデルに従った予測と観測値による誤差モデルの修正を行行列計算を中心に実現しているため、マップマッチング処理を直接カルマンフィルタに組み込むことは困難である。

2.3 PDR (Pedestrian Dead Reckoning)

PDR は、ユーザーが保持する端末に搭載された各種のセンサを用い、ユーザーの変位を観測する手法である。基本的な PDR では加速度の積分により変位量を、角速度の積分により進行方向の変化を推定する。近年のスマートフォンのほとんどは加速度センサと地磁気センサを搭載しており、さらに一部の機種ではジャイロセンサを搭載している。こうしたことから、スマートフォンを用いた PDR が研究の対象となってきた[14][15]。

2.4 マップマッチング

マップマッチングは、測位により得られた位置情報を、測位エリアのマップ上に投影することで測位精度の向上を図る手法である[16][17]。基本的なマップマッチングは幅を持たない経路ネットワーク上で対象の位置を推定する手法であるが、経路に幅を持たせることで対象の移動軌跡をより詳細に推定する手法[18]も存在している。

2.5 パーティクルフィルタ

パーティクルフィルタ[19][20]はモンテカルロシミュレーションの一種であり、多数の粒子（パーティクル）を用いて各種状態量の推定を行う手法である。具体的には、初期の観測値を用いて状態空間に多数のパーティクルを散布する（初期生成）。各パーティクルは遷移モデルを有し、時刻ごとにモデルに従って状態量が増減する（予測）。予測とは独立して、定期的に状態量の観測を行う（観測）。観測結果を基に、各パーティクルの状態量がどの程度実際の状態量に近いかを尤度として求める（尤度計算）。求めた尤度によりパーティクルを消滅させ、パーティクルの総数が減少した場合には再生成を行う（リサンプル）。予測および観測⇒尤度計算⇒リサンプルのステップを反復することで実際の挙動に近い遷移モデルを持つパーティクルが残り、時間経過とともに予測精度が向上する手法とされている。

パーティクルフィルタを用いた屋内測位手法も既に存在している。[21]ではユーザーの保持するセンサを用い、Wi-Fi による Fingerprint 測位と PDR による測位を組み合わせユーザーの位置座標を求めている。この手法では専用

のハードウェアを用いているため、汎用性に欠ける点が課題である。[22]ではスマートフォンに搭載されたセンサを用いているが、PDRによる測位結果と測位エリアの地図情報のみを用いており、絶対的な位置座標の計算は組み込まれていない。[23]はスマートフォンを用い、PDRによる測位結果とWi-Fiによる測位結果を、マップマッチングを組みこんだパーティクルフィルタにより統合している。しかし、この手法は計測したデータを事後解析することで測位精度を向上しているため、アルゴリズム全体のリアルタイム測位への応用は困難である。

3. 提案手法

提案する測位手法はユーザーの所持するスマートフォンを用いて実現する。具体的には、測位エリア内に設置されたWi-Fi APの信号を端末で観測し、ユーザーの位置座標を推定する。同時に、端末に搭載されたセンサ（加速度センサ、ジャイロセンサ）を利用したPDRにより、ユーザーの移動速度および進行方向の変化を推定する。これらの推定量をパーティクルフィルタに入力することで、最終的な測位結果を得る。つまり、提案する測位アルゴリズムは以下の3部分に大別できる。1) Wi-Fi 測位計算部、2) PDR 計算部、3) パーティクルフィルタ計算部。以降では、1)～3)の各部についてアルゴリズムの詳細を述べる。

3.1 Wi-Fi 測位計算部

測位エリアにおける位置座標の推定には、端末で観測したWi-Fi 信号のMACアドレスとRSSIを利用する。各MACアドレスは測位エリア内に設置されたWi-Fi APと1対1で対応しているため、あらかじめ各APの位置座標を登録しておくことでMACアドレスから各APの位置座標を求めることができる。APの位置座標とRSSIを用いて対象の位置を推定する手法は複数あるが、提案アルゴリズムは一般的なスマートフォン上で動作することを目標としているため、機種に依存する要素を極力取り除くことが必要である。また、パーティクルフィルタを用いた測位ではユーザーの位置をある程度の範囲に絞りこめればよいから、推定精度は比較的低くても問題ないと考えられる。これらの理由から、提案手法ではWeighted Centroidによりユーザーの位置座標を推定している。

Weighted Centroidによる位置座標の推定は、測位計算時に受信した電波の発信元AP($AP_1, AP_2, \dots, AP_i$)の位置を $pos_{AP_1}, pos_{AP_2}, \dots, pos_{AP_i}$ 、端末で観測したRSSIを $RSSI_1, RSSI_2, \dots, RSSI_i$ 、およびその最小値を $\min(RSSI)$ 、RSSIにより求めた重みづけ係数 $w_{AP_1}, w_{AP_2}, \dots, w_{AP_i}$ をとすることで以下のように定式化できる。結果として得られる pos_{w,t_n} がWi-Fiによる推定位置である。

$$w_{AP_n} = 10^{(RSSI_n - \min(RSSI)) / (10 \cdot coef_{prop})} \quad (1)$$

$$pos_{w,t_n} = \sum_{AP_i} (w_{AP_n})^2 pos_{AP_i} / \sum_{AP_i} (w_{AP_n})^2 \quad (2)$$

一般的に、観測したRSSIが大きいほど信号の発信元APとユーザーの距離は近いと予想できる。このため、よりRSSIの大きいAPの位置座標の重みが大きくなるように重みづけ係数の計算式を設計している。 $coef_{prop}$ は電波伝搬係数を示し、自由空間での値2.0を用いている。

3.2 PDR 計算部

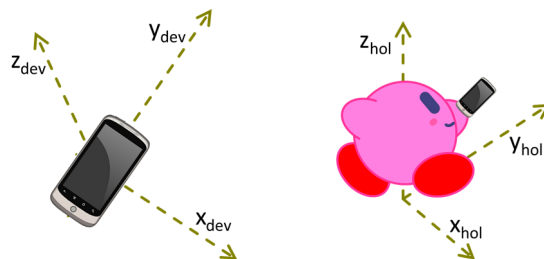


図1 PDR 計算に用いる座標系の定義
(左：端末座標系、右：水平座標系)

Figure 1 Definition of the coordinate systems used in PDR
(left : device coordinate system, right : horizontal coordinate system).

PDR 計算部では、端末に搭載された加速度センサ・ジャイロセンサを用い、ユーザーの移動速度と進行方向の変化を推定する。歩行時に観測される鉛直方向の加速度の振幅と歩行速度には相関があることから[24]、移動速度の推定には重力方向の加速度を用いる。端末に搭載されたセンサの計測値は、端末を基準とした端末座標系(図1左側)での値として出力されるため、この値を、重力方向とz軸が一致する水平座標系(図1右側)での値に変換することが必要である。このため、端末のx軸回り、y軸回りの姿勢角(それぞれ θ_x 、 θ_y とする)を加速度センサ・ジャイロセンサの計測値により推定する。PDRの開始時に、加速度センサの計測値 $a_{x_{dev}}, a_{y_{dev}}, a_{z_{dev}}$ を用いて θ_x, θ_y の初期値 $\theta_{x,t_0}, \theta_{y,t_0}$ を以下のように推定する。

$$\theta_{x,t_0} = \tan^{-1} \left(\frac{a_{y_{dev}}}{a_{z_{dev}}} \right) \quad (3)$$

$$\theta_{y,t_0} = \tan^{-1} \left(\frac{-a_{x_{dev}}}{\sqrt{(a_{y_{dev}})^2 + (a_{z_{dev}})^2}} \right) \quad (4)$$

姿勢角の初期値を推定した後は、クォータニオンを利用して姿勢角を逐次更新する。初期のクォータニオン q_{t_0} は $\theta_{x,t_0}, \theta_{y,t_0}$ から以下のように求める。

$$q_{t_0} = \begin{bmatrix} \cos(0.5 \theta_{x,t_0}) \cdot \cos(0.5 \theta_{y,t_0}) \\ \sin(0.5 \theta_{x,t_0}) \cdot \cos(0.5 \theta_{y,t_0}) \\ \cos(0.5 \theta_{x,t_0}) \cdot \sin(0.5 \theta_{y,t_0}) \\ -\sin(0.5 \theta_{x,t_0}) \cdot \sin(0.5 \theta_{y,t_0}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

クォータニオンの更新は、ジャイロセンサの観測値を用いて行う。時刻 t_n におけるクォータニオン q_{t_n} は、ジャイロセンサの観測値 $\omega_{x_{dev},t_n}, \omega_{y_{dev},t_n}, \omega_{z_{dev},t_n}$ を用いて以下のよ

うに求められる．ここで， $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ とする．

$$q_{t_n} = \begin{bmatrix} q_{t_n,0} \\ q_{t_n,1} \\ q_{t_n,2} \\ q_{t_n,3} \end{bmatrix} = q_{t_{n-1}} + 0.5\Delta t q_{t_{n-1}} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{x_{dev},t_n} & -\omega_{y_{dev},t_n} & -\omega_{z_{dev},t_n} \\ \omega_{x_{dev},t_n} & 0 & \omega_{z_{dev},t_n} & -\omega_{y_{dev},t_n} \\ \omega_{y_{dev},t_n} & -\omega_{z_{dev},t_n} & 0 & \omega_{x_{dev},t_n} \\ \omega_{z_{dev},t_n} & \omega_{y_{dev},t_n} & -\omega_{x_{dev},t_n} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

センサ計測値の座標変換にはクォータニオン q_{t_n} から式(7)のように得られる回転行列 $R_{dev \rightarrow hol, t_n}$ を用いる．

$$R_{dev \rightarrow hol, t_n} = \begin{bmatrix} (q_{t_n,0})^2 + (q_{t_n,1})^2 - (q_{t_n,2})^2 - (q_{t_n,3})^2 & 2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & -2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & (q_{t_n,0})^2 - (q_{t_n,1})^2 - (q_{t_n,2})^2 + (q_{t_n,3})^2 \\ -2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & (q_{t_n,0})^2 - (q_{t_n,1})^2 - (q_{t_n,2})^2 + (q_{t_n,3})^2 & 2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & -2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} \\ 2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & -2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & (q_{t_n,0})^2 - (q_{t_n,1})^2 - (q_{t_n,2})^2 + (q_{t_n,3})^2 & 2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} \\ -2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & 2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & 2q_{t_n,0}q_{t_n,3} + 2q_{t_n,1}q_{t_n,2} & (q_{t_n,0})^2 - (q_{t_n,1})^2 - (q_{t_n,2})^2 + (q_{t_n,3})^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

回転行列 $R_{dev \rightarrow hol, t_n}$ を端末座標系での加速度 $\vec{a}_{dev, t_n} = (a_{x_{dev}, t_n} \ a_{y_{dev}, t_n} \ a_{z_{dev}, t_n})^T$ に掛けることで，水平座標系での加速度 $\vec{a}_{hol, t_n} = (a_{x_{hol}, t_n} \ a_{y_{hol}, t_n} \ a_{z_{hol}, t_n})^T$ が以下のよう求められる．

$$\vec{a}_{hol, t_n} = \begin{bmatrix} a_{x_{hol}, t_n} \\ a_{y_{hol}, t_n} \\ a_{z_{hol}, t_n} \end{bmatrix} = \vec{a}_{dev, t_n} R_{dev \rightarrow hol, t_n} \quad (8)$$

水平座標系での加速度のz軸方向(鉛直方向)成分 a_{z_{hol}, t_n} により，移動速度 v_{PDR, t_n} を求める．具体的には，過去25サンプルの値を用い，重力加速度(9.8m/s²)を基準とした二乗和が一定以上あり，かつ一定以上の振幅を持つ(最大値と最小値の差が一定以上ある)場合には，ユーザーが移動状態にあると判定し0より大きい移動速度を出力する．判定条件および速度の計算式は以下の通りである．

$$v_{PDR, t_n} = \begin{cases} 1.25 & \sum (a_{z_{hol}, t_n} - 9.8)^2 > thr_{ene} \ \wedge \\ & \max(a_{z_{hol}}) - \min(a_{z_{hol}}) > thr_{amp} \\ 0.0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

提案手法では，後述のように各パーティクルに移動特性係数を設定するため，推定した移動速度と同じ値が全パーティクルの移動速度として設定されることはない．よって，移動状態にあると判定した場合には，式(9)のように一定の速度(本手法では1.25m/sとしている)を出力している．また，条件判定に用いる閾値は， thr_{ene} を25(m/s²・m/s²)， thr_{amp} を0.1(m/s²)としている．

進行方向の変化は式(5),(6)にて求めたクォータニオンの変化から求める．時刻 t_{n-1} から t_n の間のクォータニオンの差分 Δq_{t_n} は以下のように求められる．

$$\Delta q_{t_n} = \begin{bmatrix} \Delta q_{t_n,0} \\ \Delta q_{t_n,1} \\ \Delta q_{t_n,2} \\ \Delta q_{t_n,3} \end{bmatrix} = q_{t_{n-1}}^{-1} \cdot q_{t_n} \quad (10)$$

Δq_{t_n} よりz軸回りの姿勢角の変化 $\Delta \theta_{z, PDR, t_n}$ ，すなわち進行方向の変化が以下のように求まる．

$$\Delta \theta_{z, PDR, t_n} = \tan^{-1} \left(\frac{2\Delta q_{t_n,0}\Delta q_{t_n,3} + 2\Delta q_{t_n,1}\Delta q_{t_n,2}}{(\Delta q_{t_n,0})^2 + (\Delta q_{t_n,1})^2 - (\Delta q_{t_n,2})^2 - (\Delta q_{t_n,3})^2} \right) \quad (11)$$

3.3 パーティクルフィルタ

前節までで求めた Wi-Fi 測位結果，移動速度および進行方向の変化をパーティクルフィルタの入力とすることで端末の位置を推定する．ここでは，2.5 節で述べたパーティクルフィルタの処理ステップに従ってアルゴリズムを説明する．その後，パーティクルを用いた測位結果の導出について述べる．

3.3.1 パーティクルフィルタの処理ステップ

(1) パーティクルの初期生成

パーティクルの初期生成において，パーティクルの位置，速度，進行方向，および後述する移動特性係数をパーティクルごとに独立して設定する．各パーティクルの生成位置は，以下の2ステップにより決定する．

1. パーティクルを生成する経路の決定
2. 経路上でのパーティクルの位置の決定

提案手法では，測位エリアを経路の集合 $\{RT_0, RT_1, \dots, RT_j\}$ として扱う．測位エリアの経路集合としての表現例を図2に示す．

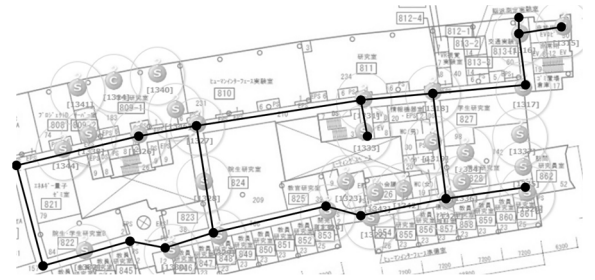


図2 測位エリアの経路集合による表現例
(実線は経路を示す)

Figure 2 Representation of positioning area by route set.
(Each solid line indicates route)

パーティクルを生成する経路の決定は，測位時に観測した Wi-Fi 信号に基づいて行う．ある AP からの信号が観測されたとき，その AP と測位エリア内の各経路との位置関係により，ユーザーがどの経路に位置するかの候補を列挙することができる．つまり，表1のように各 AP，各経路の組み合わせについて，経路存在確率表 REPT が定義できる．本表より， AP_i から受信した信号の RSSI $RSSI_i$ によって，以下のように存在確率 rep_{AP_i, RT_j} を出力する．

$$rep_{AP_i, RT_j} = \begin{cases} REPT_{AP_i, RT_j} & RSSI_i > thr_{RSSI} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

ここで， thr_{RSSI} は -70dBm に設定した．従って，-70dBm 以下の信号は受信しなかったものとして扱われる．

式(12)で求めた確率の確からしさは，受信した信号の RSSI と相関があると考えられる．つまり，強い信号の発信元 AP に対し，高い経路存在確率を持つ経路にユーザーが位置する可能性が高い，と推測できる．よって本手法では， AP_i の信号による判定の確からしさ prb_{AP_i} を式(13)のように定義する．

表 1 経路存在確率表REPTの例

Table 1 An example of Route Existence Probability Table

	AP_1	AP_2	...	AP_i
RT_0	0	0	...	1
RT_1	1	0	...	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$
RT_j	0	1	...	1

$$prb_{AP_i} = 10^{(RSSI_n - \min(RSSI)) / (10 \cdot coef_{prop})} \quad (13)$$

rep_{AP_i, RT_j} と prb_{AP_i} を用い、 AP_i の信号に基づく、ユーザーが経路 RT_m 上に存在する確率 prb_{AP_i, RT_j} を下式のように得る。

$$prb_{AP_i, RT_j} = rep_{AP_i, RT_j} \cdot prb_{AP_i} \quad (14)$$

測位時に信号を観測した全ての AP について式(14)により確率値を求め、これらの和によりユーザーが経路 RT_j 上に存在する確率（経路毎存在確率） prb_{RT_j} を得る。

$$prb_{RT_j}' = \sum_{AP_i} prb_{AP_i, RT_j} \quad (15)$$

$$prb_{RT_j} = prb_{RT_j}' / \sum_{prb_{RT_j}'} \quad (16)$$

パーティクルを生成する経路は、経路毎存在確率の累積分布 $CDF_{prb_{RT}}$ に従って決定する。具体的には、各パーティクル $ptc_1, ptc_2, \dots, ptc_k$ に対し、 $(0, 1)$ の値をとる一様乱数 $UR(0, 1)$ により値を生成する。生成した値を累積分布の逆関数 $CDF_{prb_{RT}}^{-1}$ に代入することで、パーティクルを生成する経路 RT_{ptc_k} を決定する。

各パーティクルを生成する経路を決定した後で、実際にパーティクルを生成する位置を求める。まず Wi-Fi による推定位置 pos_w の、経路 RT_{ptc_k} と最も近い位置（経路上最近点） $pos_{w, RT_{ptc_k}}$ を求める。定義域を経路 RT_{ptc_k} の両端、経路上最近点 $pos_{w, RT_{ptc_k}}$ を μ_{dist} 、標準偏差 σ_{dist} とする切断正規分布 $f_{ptc_k}(x; \mu_{dist}, \sigma_{dist}, RT_{ptc_k})$ を生成し、その累積分布関数を $F_{ptc_k}(x; \mu_{dist}, \sigma_{dist}, RT_{ptc_k})$ とする。本手法では Wi-Fi 測位の精度を考慮し、 σ_{dist} を 5.0m とした。パーティクルの生成位置 pos_{ptc_k} は、 $F_{ptc_k}(x; \mu_{dist}, \sigma_{dist}, RT_{ptc_k})$ と一様乱数 $UR(0, 1)$ を用いて式(17)のように示される（図 3）。

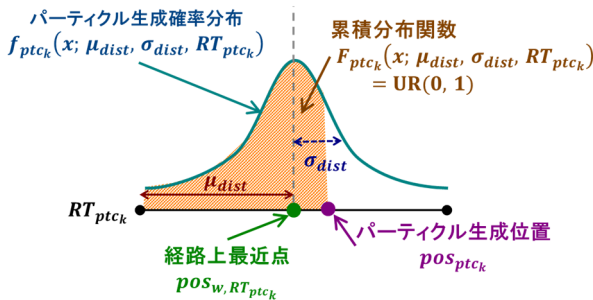


図 3 経路上最近点によるパーティクルの生成

Figure 3 Particle generation on the basis of the most proximate position on route RT_{ptc_k} .

$$F_{ptc_k}(pos_{ptc_k}; \mu_{dist}, \sigma_{dist}, RT_{ptc_k}) = UR(0, 1) \quad (17)$$

本手法ではパーティクルの動きを多様化し、PDR の観測誤差に対する耐性を持たせるため、移動に関する特性をパーティクルごとに設定している。具体的には、PDR により推定した速度、進行方向の変化に対し、パーティクル、観測値ごとに異なる係数（移動特性係数）を設定する。あるパーティクル ptc_h に対して、速度に対する係数 $coef_{v, ptc_k}$ と方向変化に対する係数 $coef_{\Delta\theta_z, ptc_k}$ は $(0.5, 1.5)$ の値をとる一様乱数 $UR(0.5, 1.5)$ を用い、進行方向誤差に対する係数 $coef_{\varepsilon\theta_z, ptc_k}$ は $(-1.0, 1.0)$ の値をとる一様乱数 $UR(-1.0, 1.0)$ を用い、以下のように設定する。

$$coef_{v, ptc_k} = UR(0.5, 1.5) \quad (18)$$

$$coef_{\Delta\theta_z, ptc_k} = UR(0.5, 1.5) \quad (19)$$

$$coef_{\varepsilon\theta_z, ptc_k} = UR(-1.0, 1.0) \quad (20)$$

各パーティクルの特性係数を決定した後で、各パーティクルに速度、進行方向の初期値を与える。速度 v_{ptc_k} は PDR により推定した速度 v_{PDR, t_n} を用い、下式のように与える。

$$v_{ptc_k} = \begin{cases} 0(m/s) & v_{PDR, t_n} = 0 \\ coef_{v, ptc_k} \cdot v_{PDR, t_n} & otherwise \end{cases} \quad (21)$$

各パーティクルの進行方向は、東方向を 0 度、反時計回りを正とする値で表現する。進行方向 θ_{ptc_k} は、 v_{ptc_k} が 0 より大きい場合には経路 RT_{ptc_k} の順方向($\theta_{RT_{ptc_k}}$)、逆方向($\theta_{RT_{ptc_k}} + \pi$)のいずれかに誤差 $\varepsilon\theta_z$ を加えて設定し、 v_{ptc_k} が 0 の場合には $(-\pi, \pi)$ の値をとる一様乱数 $UR(-\pi, \pi)$ により設定する。本手法では $\varepsilon\theta_z$ を 10 度としている。

$$\theta_{ptc_k} = \begin{cases} UR(-\pi, \pi) & v_{ptc_k} = 0 \\ \theta_{RT_{ptc_k}} + coef_{\varepsilon\theta_z, ptc_k} \cdot \varepsilon\theta_z & UR(0, 1) > 0.5 \\ \theta_{RT_{ptc_k}} + \pi + coef_{\varepsilon\theta_z, ptc_k} \cdot \varepsilon\theta_z & otherwise \end{cases} \quad (22)$$

(2) パーティクルの移動(予測)

パーティクルの生成後は、一定時間(100ms)おきに各パーティクルを移動する。各パーティクルの速度 v_{ptc_k, t_n} と進行方向 θ_{ptc_k, t_n} は、PDR により観測した速度 v_{t_n} 、進行方向の変化 $\Delta\theta_{z, t_n}$ および各パーティクルの移動特性係数を用い、以下のように更新される。

$$v_{ptc_k, t_n} = coef_{v, ptc_k} v_{PDR, t_n} \quad (23)$$

$$\theta_{ptc_k, t_n} = \theta_{ptc_k, t_{n-1}} + coef_{\Delta\theta_z, ptc_k} \Delta\theta_{z, PDR, t_n} \quad (24)$$

よって、パーティクルの位置 pos_{ptc_k} はパーティクルの移動時間間隔 Δt_{ptc} として、以下のように更新される。

$$pos_{ptc_k, t_n} = \begin{bmatrix} pos_{x, ptc_k, t_n} \\ pos_{y, ptc_k, t_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pos_{x, ptc_k, t_{n-1}} \\ pos_{y, ptc_k, t_{n-1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_{ptc_k, t_n}) \\ \sin(\theta_{ptc_k, t_n}) \end{bmatrix} v_{ptc_k, t_n} \Delta t_{ptc} \quad (25)$$

(3) パーティクルの消滅

パーティクルの消滅は定期的(1s 毎)に、移動とは独立して行う。この過程では、以下の 2 つの条件のいずれかに該当するパーティクルを除去する（図 4）。

(C-1) 基準として定めた点とパーティクルとの間の距離が一定値より大きい

(C-2) パーティクルの位置から一定距離以内に存在する経路が無い

条件(C-1)について、リサンプルの基準点 pos_{rsp,t_n} は Wi-Fi による測位結果 pos_{w,t_n} とその変位量 $|\Delta pos_{w,t_n}|$ 、後述の通りに求めるパーティクルの平均位置 pos_{t_n} により下式のよう求める。

pos_{rsp,t_n}

$$= \begin{cases} \alpha pos_{w,t_n} + (1-\alpha)pos_{t_n} & |\Delta pos_{w,t_n}| > 0.25 \cdot \Delta t_w \\ (1-\alpha)pos_{w,t_n} + \alpha pos_{t_n} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

ここで、 Δt_w は Wi-Fi の計測間隔を示す。 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ は重みづけ係数を示し、本手法では下式により求めている。

$$\alpha = 10.0 / (10.0 + \Delta t_w) \quad (27)$$

本手法では、基準点は Wi-Fi 測位結果の移動量が一定の範囲内にあれば Wi-Fi 測位結果に重みを置いて求める。反対に、Wi-Fi 測位結果がほとんど移動しないか、 Δt_w の間に移動する量としては大きすぎる変化を示した時にはパーティクルの平均位置の重みを大きくしている。この基準点を用い、条件(C-1)を閾値 trh_{pdist} により下式のように定義する。本手法では、 trh_{pdist} を 10.0m に設定した。

$$\sqrt{(pos_{x,rsp,t_n} - pos_{x,ptc_k,t_n})^2 + (pos_{y,rsp,t_n} - pos_{y,ptc_k,t_n})^2} > trh_{pdist} \quad (28)$$

条件(C-2)は、パーティクル ptc_k と経路 RT_j の距離を $ld(ptc_k, RT_j)$ 、閾値を trh_{rdist} とすることで、下式のように定義される。ここで、 trh_{rdist} は 2.5m とした。

$$\forall RT \quad ld(pos_{ptc_k,t_n}, RT_j) > trh_{rdist} \quad (29)$$

条件(C-1)に該当せず(C-2)のみに該当するパーティクルのうち、 $ld(ptc_k, RT_j) > trh_{pdist}$ となる経路 RT_j が一つだけ存在する場合には、 RT_j の向き $\theta_{RT_{ptc_k}}$ と ptc_k の進行方向 θ_{ptc,t_n} の内積値 $\dot{(\theta_{ptc,t_n}, \theta_{RT_{ptc_k}})}$ を参照する。

$$\dot{(\theta_{ptc,t_n}, \theta_{RT_{ptc_k}})} = \cos \theta_{ptc,t_n} \cos \theta_{RT_{ptc_k}} + \sin \theta_{ptc,t_n} \sin \theta_{RT_{ptc_k}} \quad (30)$$

内積値の絶対値が trh_{dot} (本稿では 0.5 とした) より大きい ptc_k は除去せず、その位置 pos_{ptc_k,t_n} を RT_j の経路上最近点

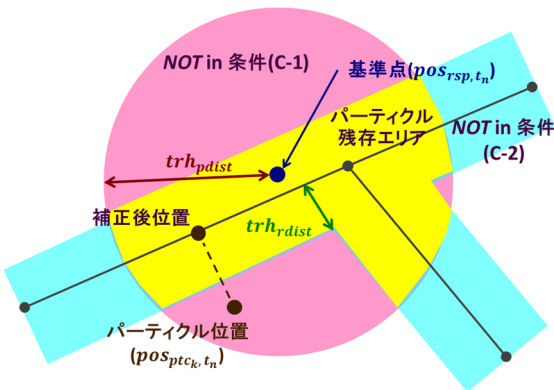


図 4 パーティクルの消滅条件

Figure 4 Conditions of particle elimination.

に、進行方向 θ_{ptc,t_n} を下式に従ってそれぞれ修正する。

$$\theta_{ptc,t_n} = \begin{cases} \theta_{RT_{ptc_k}} + coef_{\varepsilon\theta_z,ptc_k} \cdot \varepsilon\theta_z & \dot{(\theta_{ptc,t_n}, \theta_{RT_{ptc_k}})} > trh_{dot} \\ \theta_{RT_{ptc_k}} + \pi + coef_{\varepsilon\theta_z,ptc_k} \cdot \varepsilon\theta_z & \dot{(\theta_{ptc,t_n}, \theta_{RT_{ptc_k}})} < -trh_{dot} \end{cases} \quad (31)$$

(4) パーティクルの再生成

パーティクルの消滅によりパーティクルの総数が減少した場合には、再生成を行いパーティクルの数を一定に維持する。再生成において、生成するパーティクルの位置は初期生成と同様に設定する。パーティクルの移動特性係数は、残存しているパーティクルの平均値 $\text{avg}(coef_{v,ptc_k})$ 、 $\text{avg}(coef_{\Delta\theta_z,ptc_k})$ 、 $\text{avg}(coef_{\varepsilon\theta_z,ptc_k})$ 、および $(-0.25, 0.25)$ の値をとる一様乱数 $UR(-0.25, 0.25)$ により下式のように設定する。

$$coef_{v,ptc_k} = \text{avg}(coef_{v,ptc_k}) + UR(-0.25, 0.25) \quad (32)$$

$$coef_{\Delta\theta_z,ptc_k} = \text{avg}(coef_{\Delta\theta_z,ptc_k}) + UR(-0.25, 0.25) \quad (33)$$

$$coef_{\varepsilon\theta_z,ptc_k} = \text{avg}(coef_{\varepsilon\theta_z,ptc_k}) + UR(-0.25, 0.25) \quad (34)$$

パーティクルの速度 v_{ptc_k} は、残存しているパーティクルの平均速度 $\text{avg}(v_{ptc,t_n})$ と式(32)で求めた移動特性係数 $coef_{v,ptc_k}$ により求める。

$$v_{ptc_k} = \begin{cases} 0(m/s) & \text{avg}(v_{ptc,t_n}) = 0 \\ coef_{v,ptc_k} \cdot \text{avg}(v_{ptc,t_n}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

進行方向はパーティクルを配置する経路の進行方向に従って求めるが、再生成時には残存しているパーティクルの平均進行方向 $\text{avg}(\theta_{ptc,t_n})$ も利用する。本手法において、平均進行方向 $\text{avg}(\theta_{ptc,t_n})$ と経路 RT_{ptc_k} の向き $\theta_{RT_{ptc_k}}$ の角度の差は、内積値 $\dot{(\text{avg}(\theta_{ptc,t_n}), \theta_{RT_{ptc_k}})}$ により表現する。この内積値を用い、経路の順方向($\theta_{RT_{ptc_k}}$)、逆方向($\theta_{RT_{ptc_k}} + \pi$)を設定するための境界条件 trh_{rnd} を、下式のシグモイド関数により設定する。

$$trh_{rnd} = 0.5 + 0.4 \tanh(0.25\pi \cdot \dot{(\text{avg}(\theta_{ptc,t_n}), \theta_{RT_{ptc_k}})}) \quad (36)$$

条件 trh_{rnd} と一様乱数 $UR(0, 1)$ 、 $UR(-\pi, \pi)$ により、パーティクルの進行方向 θ_{ptc_k} は下式のように設定される。

$$\theta_{ptc_k} = \begin{cases} UR(-\pi, \pi) & v_{ptc_k} = 0 \\ \theta_{RT_{ptc_k}} + coef_{\varepsilon\theta_z,ptc_k} \cdot \varepsilon\theta_z & UR(0, 1) > trh_{rnd} \\ \theta_{RT_{ptc_k}} + \pi + coef_{\varepsilon\theta_z,ptc_k} \cdot \varepsilon\theta_z & \text{otherwise} \end{cases} \quad (37)$$

3.3.2 パーティクルを用いた測位結果の計算

提案手法において、最終的な測位結果はパーティクルの平均により求める。位置座標 pos_{t_n} 、速度 v_{t_n} 、進行方向 θ_{t_n} の計算式は以下の通りである。K はパーティクルの総数を示し、本稿での実装および評価では K=1000(個)としている。

$$pos_{t_n} = \begin{bmatrix} pos_{x,t_n} \\ pos_{y,t_n} \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} \sum_{ptc_k} pos_{x,ptc_k,t_n} \\ \sum_{ptc_k} pos_{y,ptc_k,t_n} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$v_{t_n} = \frac{1}{K} \sum_{ptc_k} |v_{ptc_k,t_n}| \quad (39)$$

$$\theta_{t_n} = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{ptc_k} \sin \theta_{ptc_k,t_n}}{\sum_{ptc_k} \cos \theta_{ptc_k,t_n}} \right) \quad (40)$$

歩行者ナビゲーションなどにおいては、測位結果を経路上に表示することが必要なケースも考えられる。その場合には、 pos_{t_n} から最も距離の近い経路 RT_m 上での経路上最近点を求め、経路上位置座標 pos_{route,t_n} として出力する。

4. 評価

4.1 実験概要

提案アルゴリズムを市販の Android 端末で動作するアプリケーションとして実装 (図 5) し、評価実験に用いた。本実験で用いた端末は Google Nexus 7 である。

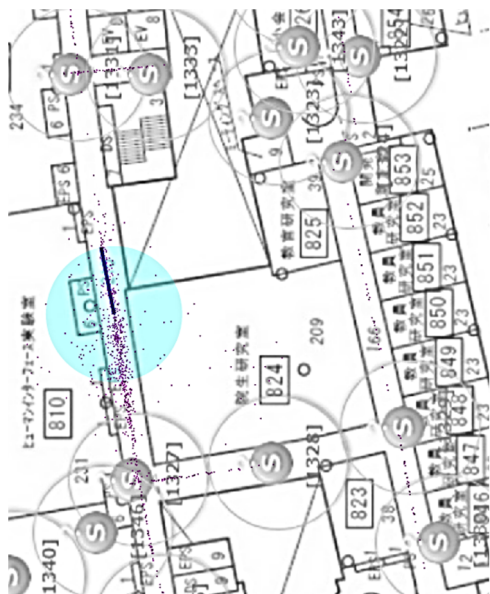


図 5 測位アプリケーションのスクリーンショット
(水色の円の中心が測位結果、青実線が進行方向、ピンクの点が各パーティクルの位置を示す)

Figure 5 Screenshot of the positioning application
(Center of the blue circle is the positioning result, blue line indicates going direction and pink dots indicate position of each particle)

実験の実施箇所は九州大学伊都キャンパス ウェスト 2 号館 8 階である。利用した Wi-Fi AP は図 6 のⓐの箇所に設置されている。各試行において、図 6 の矢印に示したルートを歩行した。本実験では 5 回の試行を行った。また、旗のマークの付いた計測点でアプリケーションを操作することで、各計測点の通過時刻を記録している。

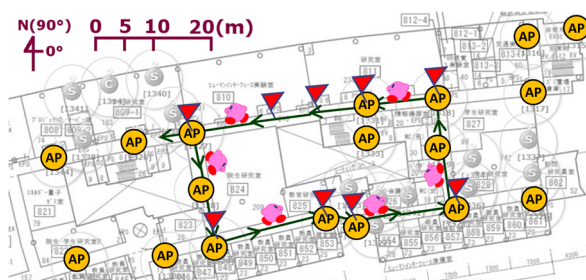


図 6 実験実施箇所概要
Figure 6 Location of the experiment.

測位精度は測位計算の実行時刻と推定位置、および計測点の通過時刻をもとに導出している。具体的には、測位計算の実行時刻における正解位置を、通過時刻を用いた計測点の位置座標の補間により求める。精度の評価指標には、推定位置と補間した正解位置とのユークリッド距離を用いる。進行方向の推定精度は、推定した進行方向と正解ルートの進行方向を時系列上で比較することで評価した。正解ルートの進行方向も各計測点の通過時刻から求めているが、交差点などでの右左折については考慮していない。

4.2 実験結果

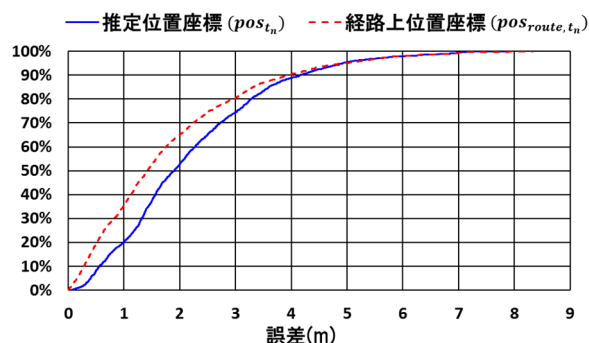


図 7 測位精度の CDF

Figure 7 CDF plot of the positioning accuracy.

本実験により得られた測位精度を累積分布関数 (CDF) として整理したものが図 7 である。本実験において、測位誤差の 90% が 4m 以内に収まっており、平均値としては推定位置座標が約 2.1m、経路上位置座標が約 1.8m であった。この数値は、提案手法は情報提供などのサービスに用いるためには十分な精度だといえる。

進行方向の推定について、実際に観測された数値例を図 8 に示す。測位開始時点ではユーザーが経路の順方向、逆方向のどちらに向かって移動しているかが確定しないため、推定した進行方向と正解ルートの進行方向との誤差が大きくなる傾向にある。時間経過によりこの誤差は次第に小さくなる。

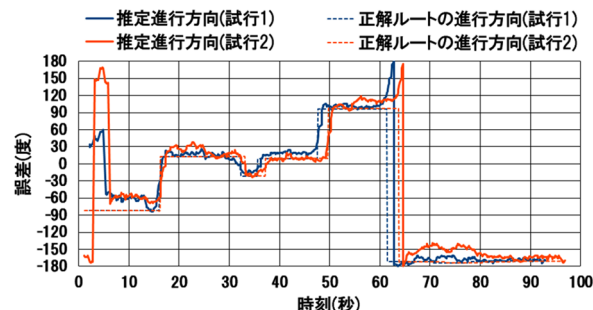


図 8 進行方向の時系列変化

Figure 8 Time series plot of the going directions
(solid line : estimated going direction, dotted line : going direction of actual route).

くなり、遅くとも 20 秒程度で進行方向の誤差が ± 20 度程度に収束している。その後複数回の右左折を行うが、誤差はおおよそ ± 20 度の範囲で推移している。この結果より、提案手法は地磁気センサに依存せず、進行方向の推定が一定程度の精度で可能であると結論付けられる。

5. おわりに

本稿では、パーティクルフィルタによる端末型屋内測位手法について述べた。本手法では、Wi-Fi の信号からユーザーがどの経路上に位置するかを推定し、これをパーティクルの生成に反映している。また、PDR の誤差に耐性を持たせるため、各パーティクルに異なる特性係数（移動特性係数）を付与し、移動特性を多様化している。市販のスマートフォンを用いて屋内環境で評価実験を行った結果、提案手法は平均で 1.8m の測位精度を持ち、測位結果の 90% が誤差 4m 以内に収まることが判明した。また、進行方向の推定については、測位開始から 20 秒程度経過することで、誤差が ± 20 度程度に収束している。このことより、本手法は地磁気センサに依存せず、進行方向の推定が一定程度の精度で可能だと判明した。

今後の展望として、センサデータ処理の精密化、Wi-Fi 測位の高度化などにより、得られる測位精度を改良する余地は存在すると考えている。しかし、本手法は市販のスマートフォン上での利用を想定しているため、改良の過程において機種依存となるパラメータを極力組み込まないようにすべきである。また、本手法では方位の推定に地磁気センサを利用しなかったが、屋内環境でも実際の方位と近い推定値が得られる可能性はある。地磁気の計測値に含まれるノイズの度合いが定量的に判断できれば、地磁気により推定した方位も利用したいと考えている。

参考文献

- [1] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices, IEEE Personal Communications. 2000, vol.7, issue5, p.28-34.
- [2] J. Blumenthal, R. Grossmann and F. Grolatowski. Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2007 (WISP 2007). Oct. 2007, Alcalá de Henares, Spain.
- [3] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy. Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004). Nov. 2004, Hong Kong, China, p.1012-1022
- [4] Y. Ren et al.. D-Log: A WiFi Log-based differential scheme for enhanced indoor localization with single RSSI source and infrequent sampling rate. Pervasive and Mobile Computing. 2017, vol.37, p.94-114.
- [5] N. Chang, R. Rashidzadeh and M. Ahmadi. Robust indoor positioning using differential wi-fi access points. IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2010, vol.56, no.3, p. 1860-1867.
- [6] Faragher and R. Harle. An Analysis of the Accuracy of Bluetooth Low Energy for Indoor Positioning Applications. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014). Sep. 2014, p. 201-210, Tampa, Florida
- [7] Ramsey Faragher and Robert Harle. Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2015, vol.33, issue 11, p. 2418-2428.
- [8] 森信一郎 他. 地磁気センサを使った高精度測位技術. 電子情報通信学会論文誌 D. 2010, vol.J93-D, no.10, p. 1894-1902.
- [9] 岩崎改, 五百蔵重典. 高周波可聴音を用いた屋内測位に関する検討. マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集. 2014, p. 575-580.
- [10] J.Yim et al.. Extended Kalman Filter for wireless LAN based indoor positioning. 2008, Decision Support Systems, vol.45, issue 4, p.960-971.
- [11] Z. Chen et al.. Fusion of WiFi, Smartphone Sensors and Landmarks Using the Kalman Filter for Indoor Localization. Sensors. 2015, vol.15, no. 1, p. 715-732.
- [12] F. Evennou and F. Marx. Advanced integration of WIFI and inertial navigation systems for indoor mobile positioning. EURASIP Journal on Applied Signal Processing archive. 2006, vol.2006, p. 1-1.
- [13] Md. S. R. Sakib et al.. Improving Wi-Fi based indoor positioning using Particle Filter based on signal strength. 2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP). Apr. 2014, p. 1-11, Singapore, Singapore.
- [14] G. Chen et al.. Integrated WiFi/PDR/Smartphone Using an Unscented Kalman Filter Algorithm for 3D Indoor Localization. Sensors. 2015, vol.15, no.9, p. 24595-24614.
- [15] A. R. Pratama, Widyawan and R. Hidayat. Smartphone-based Pedestrian Dead Reckoning as an indoor positioning system. 2012 International Conference on System Engineering and Technology. Sep.2012, Bandung, Indonesia.
- [16] C. E. White, D. Bernstein and A. L. Kornhauser. Some map matching algorithms for personal navigation assistants. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2000, vol.8, issues 1-6, p. 91-108.
- [17] M. A. Quddus, W. Y. Ochieng and R. B.Noland. Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2007, vol.15, issue 5, p. 312-328.
- [18] 吉見駿 他. マップマッチングを用いた PDR 軌跡補正. 情報処理学会 研究報告, ヒューマンコンピュータインタラクション(HCI). Oct. 2014, p. 1-8.
- [19] N. J. Gordon, D. J. Salmond, and A. F. M. Smith. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. IEEE Proceedings F (Radar and Signal Processing). 1993, vol.140, no.2, p. 107-113.
- [20] 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. 1996, vol.44, no.1, p. 31-48.
- [21] F. Evennou and F. Marx. Advanced Integration of WiFi and Inertial Navigation Systems for Indoor Mobile Positioning. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2006, p. 1-11.
- [22] F. Li et al.. A Reliable and Accurate Indoor Localization Method Using Phone Inertial Sensors. Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '12). Sep. 2012, p. 421-430, Pittsburgh, Pennsylvania.
- [23] S. Knauth and A. Koukafikis. Smartphone positioning in large environments by sensor data fusion, particle filter and FCWC. 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2016). Nov. 2016, Alcalá de Henares, Spain.
- [24] M. Kourogi and T. Kurata. Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera. The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003). Oct. 2003, p. 103-112, Tokyo, Japan.