

# 屋内散策行動分析のための歩行者自律測位手法の提案と評価

梶 航士<sup>1,a)</sup> 岡田 将吾<sup>1</sup> 新田 克己<sup>1</sup>

## 概要：

各種センサの携帯端末への搭載により、歩行者自律測位法を用いることで GPS が使用できない屋内においても歩行者の動線の取得が容易となってきた。しかし、地下街や駅構内などでの散策行動では迷いや障害物回避などの歩幅の安定しない動作によって、歩幅のみによる動線推定手法を用いると誤差が生じる場合がある。本研究では、歩行状態に応じて移動距離の推定方式を切り替える手法を提案する。通常歩行では歩幅による推定を、歩行状態の変更時や走行など歩幅が安定しない場合には積分による推定を適用する。回帰分析を用いて歩幅を推定することで、歩幅の揺らぎによる誤差を減少させる。屋内での歩行データを用いて提案手法の有効性を評価する。

## 1. はじめに

近年、センサ技術の発達によって人物及び物体の測位方式が多様化し、測位対象の位置及び方位から移動軌跡（動線）を推定・分析をする研究が盛んに行われている。動線の取得はロボットや歩行者のナビゲーション、移動履歴からのライフログの分析、展示施設のガイドや Context Awareness などといった多くの応用への適用が期待されている [1]。屋外では GPS (Global Positioning System) を用いた推定が有効であるが、屋内では GPS 衛星の電波が届かないため、GPS の使用は困難である。

屋内での測位法として、環境側に測位機器を設置する環境測位法と携行するセンサの取得データから移動距離を推定する自律測位法 (Dead Reckoning) がある。環境測位は環境側に設置した機器が取得するデータより測位対象の位置を推定する。屋内測位の例としてカメラが取得する動画像や RFID, Wifi の電波強度を用いた位置推定が挙げられる [2]。絶対位置を推定することは可能であるが、環境側に機器を設置・維持するコストがかかるため、機器の設置されている範囲でしか測位ができないのと単体では方位を取得することができないという欠点がある [3]。

自律測位とは測位対象が携行する端末内蔵センサが取得するデータより連続的に位置を推定する自律航法の一種である。主に用いられるセンサは加速度・ジャイロ・地磁気センサである。センサの小型化によってスマートフォンな

どの携帯端末に搭載されるようになり、センサデータの取得の簡易化と内蔵アプリケーションとの連携が可能となり、屋内での位置情報サービスへの応用が期待されている。場所を問わない汎用的な測位が可能で上に環境側に機器を設置・維持するコストが発生しないという利点があるが、取得するセンサデータには様々な誤差が含まれているため、これらの誤差を除去しないと推定に大きな影響を与えるという欠点がある。また、自律測位は基準点からの積算ベースの手法であるため、時間経過による前状態からの累積誤差の影響をキャンセルする必要がある [4]。歩行者自律測位において、積分ベースの推定法と歩幅に歩数を乗算する手法があり、後者が主に使用されている。しかし、地下街や駅構内などでの散策行動では目的地に辿り着くまでに迷いや障害物を避けるといった動作が生じやすいため、歩幅が安定しない歩行となる。そのため、従来の歩幅のみによる推定手法を用いると推定に大きな影響を与える可能性がある。

本研究では、歩幅の安定しない歩行にも対応した精度の高い測位の実現を目的とした歩行状態に応じて移動距離の推定方式を切り替える手法を提案する。通常の歩行では歩幅法を、歩行状態の変更時など歩幅が安定しない場合には積分法による手法を適用する。歩行状態の識別には歩行データより作成した識別器で行い、回帰分析を用いて歩幅を推定することで、歩幅法で生じる誤差を減少させる。

## 2. 関連研究

歩行者自律測位 (Pedestrian Dead Reckoning) とは、既知の位置からの移動距離を測位対象が携行するセンサ (加

<sup>1</sup> 東京工業大学 総合理工学研究科  
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,  
Tokyo Institute of Technology

<sup>a)</sup> kkaaji@ntt.dis.titech.ac.jp

速度センサ、ジャイロセンサ、方位センサ) から得られるデータを用いて連続的に推定する測位方式であり、移動速度/距離を推定する技術と移動方向を推定する技術により構成される [5]。移動距離を推定する手法として、積分を用いた手法と歩幅を用いた手法がある。積分を用いた手法は身体加速度を2階積分することで移動距離を算出する。場所や歩行者の特徴に依存せずに推定することが可能であるが、センサ値の誤差の影響を大きく受ける上に、積分に伴う積分誤差の推定・除去が困難であるという欠点がある。佐川らは立脚相のセンサ姿勢と速度を用いて遊脚相のセンサ姿勢角と速度を修正することで誤差の低減を行った [6]。

歩数を用いた手法はセンサの取得値より1歩を検出し、歩数を乗算することで移動距離を算出する。センサ値を直接推定に使用しないため、積分による推定よりも雑音に対する考慮が少なく済む。しかし、歩幅は歩行者や歩行状態によって異なるため、キャリブレーションや歩幅を推定する関数の設計が必要となる [4]。足にセンサを装着すると足が地面に接地している時には身体加速度がゼロとなるため、ゼロ点補正 (Zero Velocity Update) を行うことが可能となる [7]。足にセンサを装着するため、専用の装着器具が必要であったり、歩行運動によるセンサの破損の危険性があるため、応用が限られるという欠点がある。この問題に対し、人の重心に近い腰部に装着することで、センサ本体の振動の低減と装着性及び整備性の向上を達成することができる [8]。

### 3. 屋内散策行動に対応した歩行者自律測位

#### 3.1 提案する歩行者自律測位の概要

本研究にて想定する屋内での散策行動は、明確な目的をもたずに屋内を歩行することを示す。迷って同じ場所の周辺を歩行したり、周囲を見回しながら歩く、興味を持ったオブジェクトの前をゆっくりと歩行する、あるいは立ち止まるといった動作が該当する。これらの歩行には、通常歩行から走行や静止状態への変化や障害物の回避といった歩幅が安定しない動作が発生しやすい。該当区間には積分法を適用することによって歩幅法で対応が困難な歩行の推定を行いつつ、短時間での適用を抑えることで積分による累積誤差を最小限にする。

提案手法は加速度・ジャイロ・地磁気センサより歩行によるセンサ値 (3軸) を取得する。取得したセンサ値に含まれる様々な誤差を除去し、歩行運動にのみ由来するセンサ値を取得する。進行方向の加速度及びヨー軸の角速度のセンサ値より歩行状態を識別し、歩幅法と積分法の切替を行いながら移動距離と方位を推定する。推定した相対位置にマップデータを用いたマッチング処理を行うことで最終的な絶対位置を推定する。提案手法の流れを図1に示す。

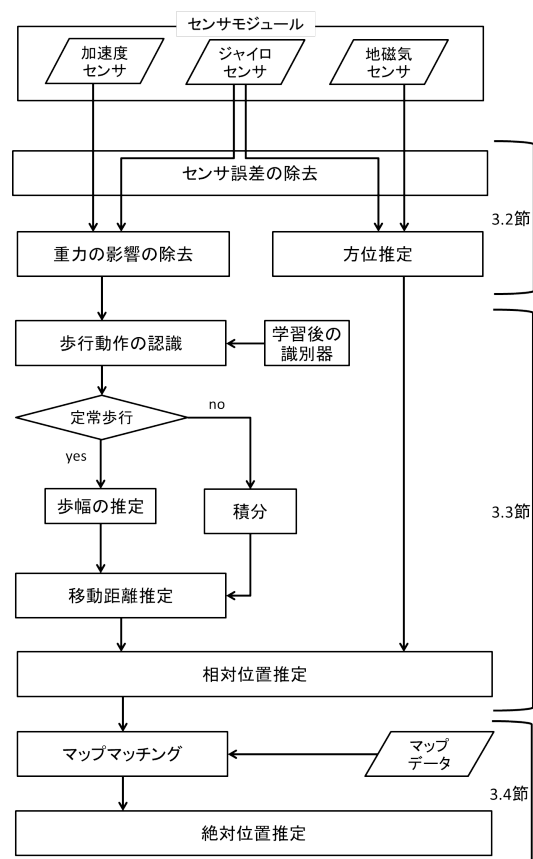


図1 提案する歩行者自律測位

#### 3.2 センサ値の取得と誤差の除去

歩行者の位置と方位を取得する手法として、歩行者に装着したセンサモジュール (加速度、ジャイロ、地磁気センサ各3軸) から取得したセンサ値を入力とした歩行者自律測位を行う。取得したセンサ値には様々な誤差が含まれているため、適切な除去を行わないと誤差が累積し、推定に大きな影響を与える。本研究では、オフセット値・微振動・重力の影響を誤差として推定・除去する。センサのオフセット値は同じ静止状態でもセンサ本体の運動や稼働時間による内部温度の変化によって刻々と変化する。そのため、測位開始時と終了時ではオフセット値が異なるため、オフセット値の変化を追従することができれば、測位開始・終了時のオフセット値を減算するよりも精度が向上できると考えられる。本研究では、センサ値より静止状態を検出し、オフセット値を更新する手法を用いる。ジャイロセンサのヨー軸の移動平均の絶対値の前後一定区間の和が閾値以下の場合に静止状態であると認識する。

オフセット値の減算は一定区間から一定値を減算するだけであるため、センサ本体の細かい振動を除去することはできない。そのため、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform) を用いて高周波成分を除去することで微振動を除去する。FFTの時間窓は1.28秒 (サンプリングレート: 100Hz, 128点) で処理を行った。進行方向と水平方向のセンサ値には歩行によって絶えずセンサ本体が回転・振

動するため、本来鉛直方向の成分である重力の影響が含まれている。角速度を観測値としたカルマンフィルタを構成することで、重力の影響を推定・除去することでセンサ座標系から絶対座標系に修正する。

本研究にて構成するカルマンフィルタはジャイロセンサの入力を観測値とし、各センサの取得値に含まれるセンサ振動に由来する重力成分を推定する。推定値を取得値から減算することで、センサ座標系から絶対座標系への補正を行い、歩行運動のみに由来するセンサ値を取得する。システムノイズはセンサ値から測位時間全体の平均値との差分をとった行列の共分散を用いた。共分散行列は測位時間全体のセンサ取得値の共分散を用いた。構成したカルマンフィルタの状態更新式を式 (1) に示す。

$$\begin{pmatrix} \bar{g}_x \\ \bar{g}_y \\ \bar{g}_z \\ \bar{\omega}_x \\ \bar{\omega}_y \\ \bar{\omega}_z \\ \bar{m}_x \\ \bar{m}_y \\ \bar{m}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{g}_x - (\omega_y \hat{g}_z - \omega_z \hat{g}_y) dt \\ \hat{g}_y - (\omega_z \hat{g}_x - \omega_x \hat{g}_z) dt \\ \hat{g}_z - (\omega_x \hat{g}_y - \omega_y \hat{g}_x) dt \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \hat{m}_x - (\omega_y \hat{m}_z - \omega_z \hat{m}_y) dt \\ \hat{m}_y - (\omega_z \hat{m}_x - \omega_x \hat{m}_z) dt \\ \hat{m}_z - (\omega_x \hat{m}_y - \omega_y \hat{m}_x) dt \end{pmatrix} \quad (1)$$

$[g_x, g_y, g_z]$  は重力加速度ベクトル,  $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]$  は角速度ベクトル,  $[m_x, m_y, m_z]$  は地磁気ベクトルを表す。dt は単位ステップ時間であり、サンプリング周波数によって変化する。次状態  $\bar{x}$  を前状態  $\hat{x}$  と観測値  $\omega$  を用いて推定する。

### 3.3 相対位置の推定

前節の処理を行ったセンサ値を用いて歩数と歩行の周期を検出する。検出には進行方向の加速度とヨー軸の角速度の正負のピーク間の値及び周期を用いる。鉛直方向及び水平方向と進行方向の加速度のピークの間にはずれがあり、速度を算出する際に誤差が生じるため、進行方向の加速度を用いる。1歩間の進行方向の加速度とヨー軸の角速度の平均値より歩行状態の識別を行う。加速度が一定値以上の場合には角速度に関係なく走行状態であると認識する。角速度が一定値以上の場合には加速度に関係なく曲折あるいは障害物回避状態であると認識する。また、階段昇降において階段の踏面の幅が既知であれば歩幅をある程度推定可能であるが、事前に測位環境の全ての階段の段数及び踏面の幅を測定することは困難であるため、階段昇降における移動距離推定は積分を用いて行う。サポートベクターマシンを用いて階段昇降の動作を検出する。識別器の学習には階段昇降歩行における1歩間の鉛直方向の加速度のピークと周期を用いる。

#### 3.3.1 歩幅を用いた推定

速度・角度変化がほとんど見られない安定した通常歩行

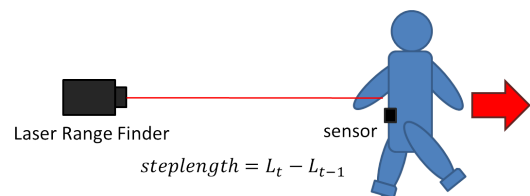


図 2 歩幅の測定

では、歩幅と歩数を用いて移動距離を推定する。通常歩行においても歩幅は常に一定ではなく揺らぎが存在するため、長時間の歩行での測位においては推定に影響を与える可能性がある。本研究では、回帰分析を用いて歩幅の推定を行うことで揺らぎによる影響を低減する。入力変数に1歩ごとの加速度・周期を、出力変数に歩幅とした重回帰分析によって推定する。正確な歩幅を取得するために、レーザー距離計を用いて測定する。歩幅測定の様子を図 2 に示す。センサモジュールを装着した測位対象の後方にレーザー距離計を設置し、測位対象の背部にレーザーを照射する。取得したセンサ波形とレーザー距離計の出力値を同期させることで1歩を識別し、現在のレーザー距離計の測定値  $l_t$  から前の1歩の時刻での測定位置  $l_{t-1}$  を減算することで歩幅を算出する。レーザー距離計は Leica 社の LeicaDISTO™D3aBT (測距範囲: 0.05~100m, 測距精度: ±1.0mm) を使用する。歩行開始の1歩に関しては歩幅の推定は困難であったため、歩幅を 0.4 として推定を行う。方位はジャイロセンサのヨー軸を積算したものを利用する。

#### 3.3.2 積分を用いた推定

走行状態や曲折状態といった加速度あるいは角速度が短時間で著しく変化した歩行を検出した際には積分を用いて移動距離を推定する。加速度の二重積分を行うことで距離を算出する。距離と方位は進行方向の加速度とジャイロセンサのヨー軸の値をそれぞれ積算することで推定する。積分における移動距離の算出式を式 (2) から式 (5) に示す。

$$V_t = V_{t-1} + \frac{1}{2} \times (a_{xt} + a_{xt-1}) dt \quad (2)$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} + \frac{1}{2} \times (\omega_t + \omega_{t-1}) dt \quad (3)$$

$$x_t = x_{t-1} + \frac{1}{2} \times (V_t + V_{t-1}) \cos \theta_t dt \quad (4)$$

$$y_t = y_{t-1} + \frac{1}{2} \times (V_t + V_{t-1}) \sin \theta_t dt \quad (5)$$

センサ誤差の除去を行っても完全な除去は困難であるため、自律測位を行う際に補正を行う必要がある。この影響はジャイロセンサにおいて最も大きく現れるため、ジャイロセンサの積算結果に対して補正を行う。後述のマップマッチング処理でも補正は行うが、自律測位結果の角度誤差が大きくなりすぎるとマップマッチング処理でも補正が間に合わなくなる可能性があるため、相対位置推定の段階でも必要であると考えられる。角度変化があまり見られない直進歩行に対してのみ補正を行う。1歩間の角度変化が

閾値以下の区間を直進歩行と認識し、その区間の角度を直進歩行開始時の角度に修正する。地磁気センサを用いることで絶対方位を出力することが可能であるが、屋内環境では電磁波を発する機器や建築物の鉄筋の残留磁気などによって、外乱や歪みが存在する場合がある。そこで、地磁気センサの出力の信頼性を確認するために地磁気ベクトルと水平面との角である伏角を計算することで検証する。伏角は広範囲にわたって一定であることが知られており、伏角が一致しない出力は除外することが可能である。伏角が一定範囲内に入っている時の方位出力を使用する。

### 3.4 絶対位置への補正

自律測位手法は基準位置からの積算ベースの推定手法であるため、時間経過に伴う累積誤差を無視することはできない。そのため、累積誤差を低減するためには外部情報との統合が必要となり、こうした問題の解決にはパーティクルフィルタが広く用いられている [9][10]。本研究では、自律測位によって推定した移動距離と方位を観測値とするパーティクルフィルタを構成することでマップデータとのマッチング処理を行う。マップマッチングは壁やオブジェクトなど、測位対象が通過することができない領域を環境マップに予め保持し、これらの領域内に存在する移動ベクトルを除外することでマップに対して整合性のとれる移動ベクトルのみを残すことが可能となる手法である。本研究では、環境マップを行列で表現する。通過可能領域を 0、オブジェクト領域を 1 とした。

パーティクルフィルタは状態空間中の多数の粒子により状態の分布を近似し、粒子の値の数値計算により状態分布を時間更新する。非線形を有する確率分布にも適用が可能であり、導入が容易であることからロボットの自己位置推定にも一般的に利用される [11]。パーティクルフィルタのアルゴリズムはパーティクルを状態方程式に基づいて移動させ、観測値とパーティクルの状態を基に尤度を計算し、重み付けを行う。本研究にて構成するパーティクルフィルタでは各パーティクルは状態  $p_n = [p_x, p_y, p_\theta]$  を持ち、前節にて推定した速度  $V$  とヨー軸方向の角速度  $\omega$  を観測とした状態方程式に基づいてサンプリングされる。ステップごとのパーティクルの状態方程式を式 (6) から (8) に示す。

$$p_x = p_x + V \times \sin(\theta_p + \sigma_\theta)dt + \sigma_s \quad (6)$$

$$p_y = p_y + V \times \cos(\theta_p + \sigma_\theta)dt + \sigma_s \quad (7)$$

$$p_\theta = p_\theta + \omega dt + \sigma_\theta \quad (8)$$

$\sigma_s$ ,  $\sigma_\theta$  は移動距離と方位に関するガウシアンノイズであり、雑音を付加することで各パーティクルの運動に無作為性を持たせる。

#### 尤度関数の設計

各パーティクルの重みは前節にて推定した観測値 (xy 座標, 角度) との距離より算出する。重みは式 (9) より算出

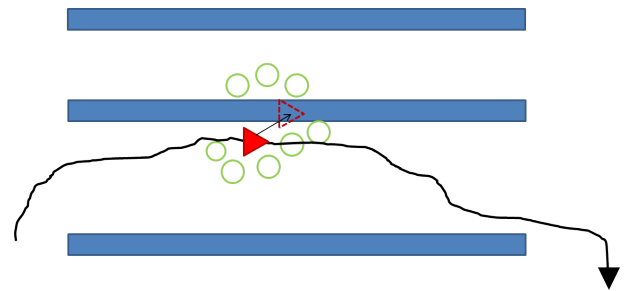


図 3 パーティクルが入り込む場合 (青: オブジェクト, 黒線: 歩行経路, 赤矢印: 現状の位置, 赤点線矢印: 次状態の推定位置)

する。

$$w_p = w_p \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(p_x - z_x)^2}{2\sigma^2}} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(p_y - z_y)^2}{2\sigma^2}} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(p_\theta - z_\theta)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

$z = [x, y, \theta]$  は歩行者自律測位によって推定した座標と角度である。環境マップ内のオブジェクト領域に存在するパーティクルは重みを小さくすることで、推定結果がオブジェクト領域内に侵入するのを防ぐ。オブジェクト内のパーティクルには 0.0001 を、オブジェクト外のパーティクルには 0.9999 を重みに乗算する。図書館の本棚やポスターセッションの会場といった細い通路がオブジェクトを挟んで複数連なる場所では、本来通行している通路に隣接する通路にパーティクルが入り込む可能性がある。これらのパーティクルはオブジェクト領域の判別のみでは尤度が小さくならず、リサンプリング処理を行った後も淘汰されずに残留するため、推定位置が通路間のオブジェクト内部の方へ誘導してしまう可能性がある。そのため、これらのパーティクルを淘汰するような尤度関数の設計が必要となる。そこで、前状態の推定値より半径 0.60m 以上離れたパーティクルの重みを小さくすることで問題の解決を試みる。離れたパーティクルには 0.0001 を、それ以外のパーティクルには 0.9999 を重みに乗算する。パーティクルの尤度を正規化を行い、ルーレット選択によってパーティクルごとに残留・淘汰を決定し、淘汰されたパーティクルは最大重みのパーティクルに置換する。各パーティクルの座標の重み付き平均を現状態として推定する。本構成したパーティクルフィルタのアルゴリズムは図 4 より、初期値を与えた後は既定ステップに達するまでパーティクルのサンプリングと尤度関数・障害物・前状態からの距離の順に重みづけを行い、パーティクルのリサンプリングをするという処理を繰り返す。

## 4. 実験

本章では、提案手法の有効性を確認するための実験と考察について述べる。センサモジュールを腰部に装着し、屋内での歩行を行いセンサデータ (加速度, 角速度, 地磁気各 3 軸) を取得した。予備実験として、通常歩行のみで単

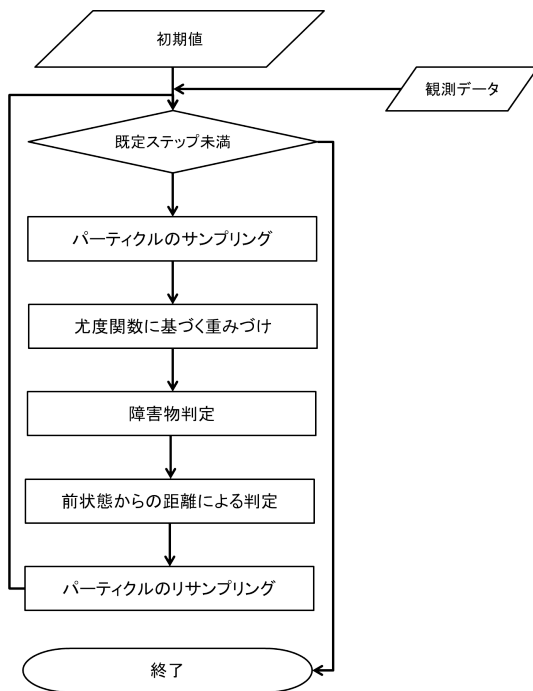


図 4 構成したパーティクルフィルタのアルゴリズム

純な経路を歩行し、手法ごとの相対位置推定の誤差を比較した。東京工業大学附属図書館すずかけ台分館にて被験者4名が歩行を行い、推定した動線と実際の歩行経路との誤差を算出した。被験者4名が行った歩行は、決まった経路を歩行し、本棚の前で任意の時間立ち止まるという制約を与えた(歩行距離:約52.0m)。最後に、始点と終点と同じ地点であるという制約以外は自由に歩行してもらい、より現実的な歩行(歩行距離:約125m)での手法ごとの絶対位置推定の誤差を比較した。自由歩行の絶対位置補正において、パーティクルフィルタの尤度補正に制約を追加した。各パーティクルにおける位置と観測値を端点としたマップデータの対角行列を作成し、対角要素の和が一定値以上の場合には重みに0.0001を、それ以外の場合には0.9999を乗算した。また、サンプリングペースを単位ステップ時間(10ms)の3倍(30ms)とした。

実験にて使用したセンサはZMP社のIMU-Z2(加速度センサ, ジャイロセンサ, 地磁気センサ各3軸)であり、サンプリングレート100Hzにて測位を行った。センサの詳細を表4に示す。実際の歩行経路の確認を行うため、ウェアラブルカメラGoPro HERO3を用いて歩行時の動画を記録し、その移動軌跡より歩行経路を導出した。センサモジュール装着及びウェアラブルカメラを図5のように装着し測位を行った。地図情報はCAD図面と現地での測定によって生成した。測位を行った環境のマップデータを図6に示す。赤線で囲まれた部分はオブジェクト領域であり、行列の値は1で与えられる。実験で仮定する歩行は直立状態のみで本棚の前を歩行する状況であるため、椅子やテーブルもオブジェクトとして通過できないものとした。本実

	詳細
加速度センサ	± 16[G], 12[bit]
ジャイロセンサ	± 200[deg/s], 16[bit]
地磁気センサ	± 8.1[gauass], 12[bit]
通信方式	Bluetooth Ver2.0
寸法	28[mm] × 43[mm] × 10[mm]

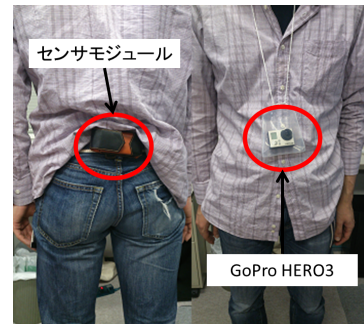


図 5 測位装備 (左: センサモジュール, 右: ウェアラブルカメラ)

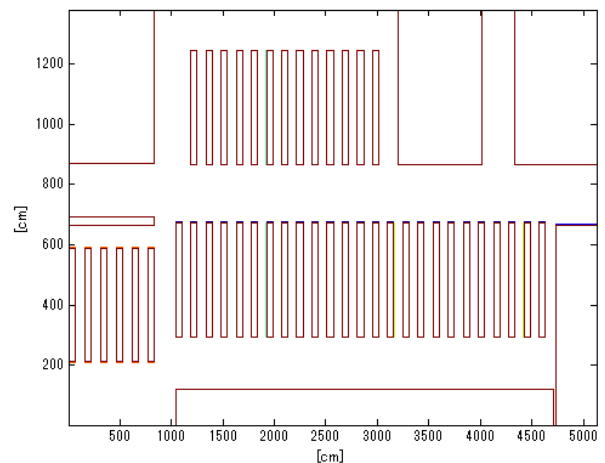


図 6 マップデータ (赤線で囲まれた領域: オブジェクト)

験において、地磁気センサの出力伏角がいずれも測位環境の伏角(神奈川県横浜市緑区:49.1°)の一定範囲内に収まらなかったため、地磁気センサによる方位の補正は行わなかった。

### 誤差の算出

推定誤差の算出は、図7に示すように、歩行経路の曲がり角ごとをチェックポイントとし、観測値と推定位置との距離を計算する。しかし、歩行経路も実際の位置からある程度のずれが存在するため、チェックポイントを起点とする一定半径の円の内部をチェックポイントの誤差の範囲とした。誤差半径の内でも最大誤差と最小誤差を求め、推定誤差の範囲とした。誤差半径は0.1[m]とした。図7の青線は実際の歩行経路であり、黒丸が曲がり角でありチェックポイントである。チェックポイントを中心とした半径の円内が歩行経路がとりうる誤差の範囲である。

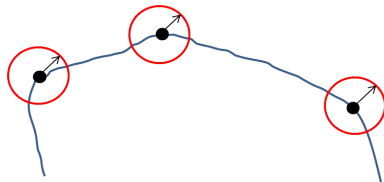


図 7 誤差の推定 (黒丸: チェックポイント, 赤円: 誤差半径, 青線: 歩行経路)

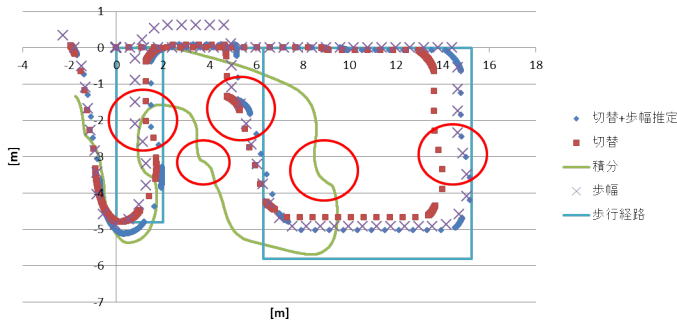


図 8 相対位置推定: 被験者 A

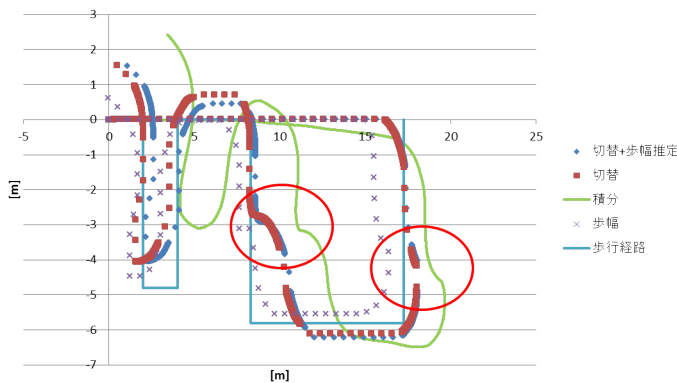


図 9 相対位置推定: 被験者 B

#### 4.1 実験結果

相対位置推定における従来手法と提案手法との比較を行った。従来手法は積分のみで推定を行う手法と歩幅を用いて推定を行う手法を用いた。また、歩幅の推定による有意性を確認するため、歩幅による推定は歩幅を 0.6m に固定した場合と推定した場合を用いた。歩幅推定は被験者 B の立ち止まりを含む歩行の被験者ごとの推定動線を図 8 から図 11, 推定誤差を表 2 から表 5 に示す。

マップマッチング処理後を行った最終的な動線の評価を行った。被験者ごとの提案手法(切替+歩幅推定)の推定動線にパーティクルフィルタによるマップマッチング処理を行った結果を図 12, マップマッチング前と推定誤差を比較したものを図 13 に示す。パーティクル数は 50 でサンプリングペースは 10ms で行った。

始点と終点と同じ地点であるという制約を与え、被験者に自由に歩行を行ってもらった。動線を手法ごとに推定した結果を図 14, 推定誤差を表 6 に示す。

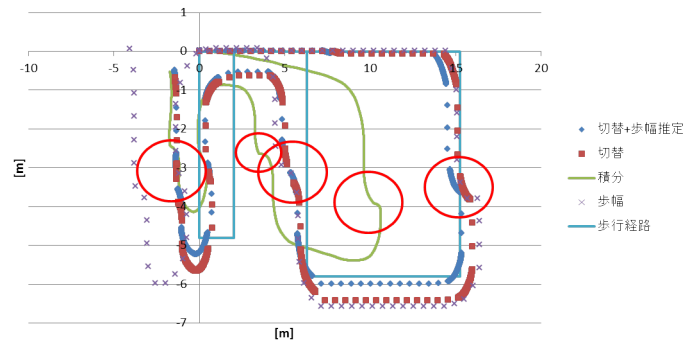


図 10 相対位置推定: 被験者 C

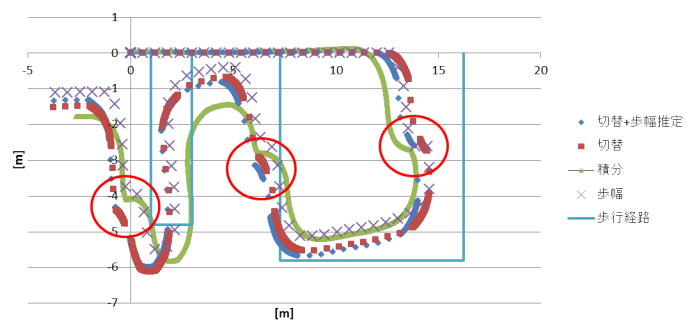


図 11 相対位置推定: 被験者 D

表 2 推定誤差の比較: 被験者 A

手法/誤差 [m]	最大誤差	最小誤差	平均
切替+歩幅推定	1.875	0.008	1.037
切替	2.232	0.228	1.357
積分法	7.233	0.234	2.845
歩幅法	2.409	0.703	1.503

表 3 推定誤差の比較: 被験者 B

手法/誤差 [m]	最大誤差	最小誤差	平均
切替+歩幅推定	2.830	0.105	1.034
切替	3.255	0.014	1.137
積分法	5.509	0.767	3.164
歩幅法	2.020	0.490	1.211

表 4 推定誤差の比較: 被験者 C

手法/誤差 [m]	最大誤差	最小誤差	平均
切替+歩幅推定	1.947	0.300	1.151
切替	2.021	0.179	1.182
積分法	6.460	1.301	2.983
歩幅法	4.190	0.533	2.102

表 5 推定誤差の比較: 被験者 D

手法/誤差 [m]	最大誤差	最小誤差	平均
切替+歩幅推定	4.055	0.308	2.359
切替	4.158	0.603	2.211
積分法	4.938	0.410	2.334
歩幅法	3.925	0.188	1.951

#### 4.2 考察

##### 4.2.1 相対位置推定精度の比較

表 2 から表 5 より、いずれの被験者の歩行においても、

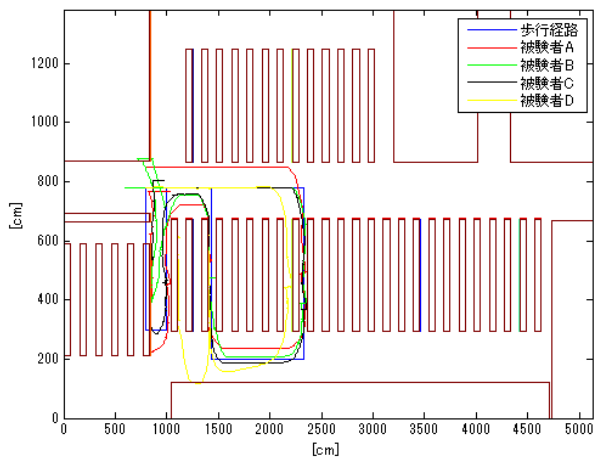


図 12 絶対位置推定

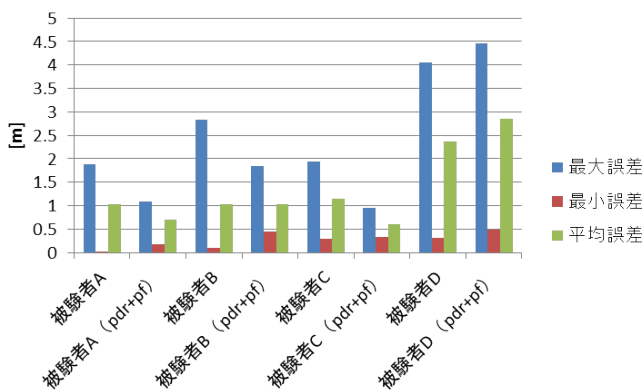


図 13 相対/絶対位置推定の推定誤差の比較

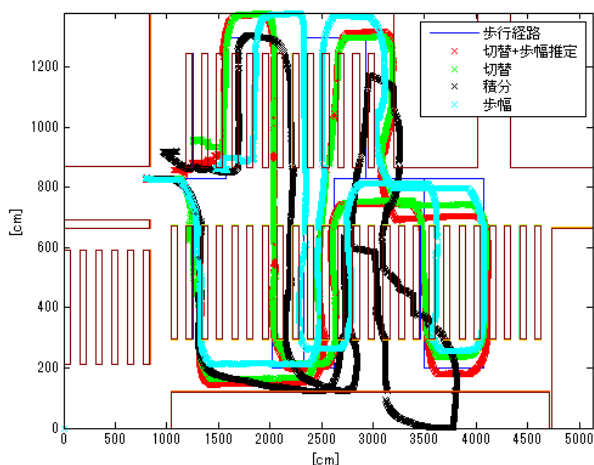


図 14 自由歩行の推定動線

積分法単体による推定は最大誤差及び平均誤差が他の手法と比較して大きいという結果が得られた。積分法を長時間用いることで積分による累積誤差の影響が無視できなくなっているからであると考えられる。図 8 から図 11 より、提案手法は曲折時と立ち止まりの導入と復帰時に積分

表 6 自由歩行の推定誤差

手法/誤差 [m]	最大誤差	最小誤差	平均
切替+歩幅推定	3.747	0.357	1.372
切替	4.678	0.556	1.571
積分法	6.562	0.522	2.841
歩幅法	6.7727	0.754	2.073

法に切替がされていることが確認できた。曲折時の切替によって、歩幅法単体で推定した場合と比較して膨らみが低減されている。被験者 A, B, C においては推定方式の切替と歩幅の推定の両方を用いた場合が最も平均誤差が小さいという結果が得られた。被験者 A が 1.037m, 被験者 B が 1.034m, 被験者 C が 1.151m の平均誤差と曲折と静止状態を多く含む歩行においても最大 1.2m 程度誤差に収めることができた。図書館での歩行において、本を探したり他の利用者に迷惑をかけないように歩行するため、通常歩行よりも歩幅が短くなると考えられる。そのため、通常歩行での歩幅に固定した場合は推定した場合よりも長い距離を歩行したと推定する。被験者 D の推定誤差が他の被験者と比較して大きいのは、歩行中のセンサ固定の不安定化による振動・回転が考えられる。センサ値の誤差を除去したあとでも、計測軸のずれが他よりも大きく残り、積分において大きな影響を与えられたからであると考えられる。提案手法では積分法を一部の区間で使用するため、歩幅法単体で使用する場合よりも影響を大きく受ける。そのため、センサ値を直接移動距離推定に用いない歩幅法の推定誤差が最も小さくなったと考えられる。

#### 4.2.2 絶対位置推定精度の比較

図 12 より、被験者 A, B, C においてマップマッチング処理を行うことで、歩行者自律測位にて推定した動線の概形を保持しつつ、オブジェクトを歩行しないような動線を取得することができた。また、図 13 より、パーティクルフィルタによるマッチング処理を行うことで最大・最小及び平均誤差の低減が行われていることを確認した。被験者 A, C においては平均誤差を約半分にまで低減したことが確認できた。被験者 D の推定動線は、本来の通路の 1 つ手前の通路に入り、終点座標も大きくずれているという結果になった。パーティクルフィルタはあくまで元の歩行者自律測位のデータを基に推定しているため、歩行者自律測位に大きな誤差が含まれているとマップマッチングによる補正が間に合わずに推定動線がさらに歪められる。被験者 B の終点がオブジェクト領域内に推定されているが、設計した尤度関数において尤度はゼロにならないため、パーティクル全てがオブジェクト領域内に移動した場合、推定位置がオブジェクト内に決定されてしまったと考えられる。この問題は比較的巨大的なオブジェクトに向かい合うような方位の際に発生しやすい。問題の解決策として、尤度の補正にさらなる要素あるいは、代表点がオブジェクト領域内に決定した際に修正を加える必要がある。

#### 4.2.3 自由歩行における推定精度の比較

図 14 より、いずれの手法においても、通路が 1 つあるいは 2 つずれるなどして実際の歩行経路と完全に一致する動線を得ることはできなかった。積分法の途中及び終点において、オブジェクト領域内への動線の侵入が多くみられた。本研究で構成したパーティクルフィルタはオブジェクト領域内に侵入しても尤度が完全にゼロにならないため、サンプリングにおいて全てのパーティクルがオブジェクト領域内に運動するとサンプリングを行っても淘汰されずに残留してしまう。比較的巨大なオブジェクトに対して真正面から移動すると全てのパーティクルがオブジェクト内に移動しやすいと考えられる。付加雑音を大きくすることでオブジェクト内への侵入をある程度避けることは可能であるが、推定結果の不安定化を誘発する可能性がある。表 6 より、切替+歩幅推定の手法は他の手法よりも最大・最小誤差及び平均誤差のすべてにおいて小さい値で推定することができ、立ち止まりや曲折を多く含む歩行でもマップ情報のみで提案手法は平均誤差約 1.4m の平均誤差で推定することができた。提案手法は 1 歩ごとに歩行状態を判別した歩幅法をベースに位置推定を行っているのに対し、パーティクルフィルタでのマッチング処理はステップ時間ごとに積算ベースで推定を行っているため、長時間の歩行においては累積誤差の発生が考えられる。自由歩行の絶対位置推定においてはサンプリングベースを単位ステップ時間の 3 倍で行ったが、サンプリングベースを積分法適用区間では単位ステップ時間の数倍程度、歩幅法適用区間は 1 歩ごとに切り替えることによって歩行者自律測位とパーティクルフィルタとの間でタイムスケールを合わせることによる推定精度向上が期待できる。また、ドアの開閉・階段昇降などの場所にひもづいた行動を用いた位置補正も有効であると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、屋内散策行動分析のための歩行者自律測位手法の提案と実験による従来手法との比較と評価を行った。歩行状態に応じて移動距離の推定方式を切り替えることで、立ち止まりと曲折を含む歩行において歩幅法を単体で用いる場合よりも 0.2~1.0m 程度の平均誤差の低減を行うことができた。マップマッチング処理を行うことで、オブジェクト内をほとんど通過することなく 0.6~1.0m 程度の平均誤差で歩行者の動線推定を行うことができた。自由歩行に関しては、完全な経路推定は達成できなかったものの、提案手法は他の手法よりも約 0.2~1.5m 程度の平均誤差を低減することができた提案手法の有効性を確認することができた。

今後の課題として、実験にて行った歩行には通常歩行・鈍行・曲折・静止状態を含む歩行であり、走行や階段昇降が含まれていなかったため、これらの歩行状態を含む測位に

よる検証も必要である。構成したパーティクルフィルタは比較的巨大なオブジェクトの前に向かう場合では、全てのパーティクルがオブジェクト内に運動しパーティクルフィルタによるマップマッチング処理後の推定位置がオブジェクト領域内に存在するという問題もみられた。パーティクルの尤度関数にさらに制約を加えるか、位置推定を行ったあとにオブジェクト内から通過可能領域に強制的に引き戻す補正をかける必要がある。測位にはセンサモジュールを使用したため、スマートフォンやタブレット PC などの一般的な端末での測位を行い、提案手法の有効性を検証する。

## 参考文献

- [1] Krzysztof W.Kolodziej, Johan Hjelm: Local Positioning Systems:LBS Applications and Services(2006) .
- [2] Michael Gunawan, Binghao Li, Thomas Gallagher, "A new method to generate and maintain a Wifi fingerprinting database automatically by using RFID", International Conference on Indoor Positioning Indoor Navigation (IPIN), 2012
- [3] 興梠正克, 大隈隆史, 蔵田武志, "歩行者ナビのための自蔵センサモジュールを用いた屋内測位システムとその評価", シンポジウム「モバイル 08」pp.151-156, 2008
- [4] 秋山高行, 鴨志田亮太, 林秀樹, 佐藤暁子, "歩行の始点終点座標と建物外形を利用した屋内歩行器駅推定方式の提案と評価", FIT2012 (第 11 回情報科学技術フォーラム)
- [5] Cliff Randell, Chris Djiallis, Henk Muller, "Personal Position Measurement Using Dead Reckoning", Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2003, pp.166-173
- [6] 佐川貢一, 煤孫光俊, 猪岡光, "加速度積分による 3 次元歩行移動量の無拘束計測", 計測自動制御学会東北支部 第 202 回研究会集, 2002
- [7] Xi Chen, Sheng Hu, Zhenzhou Shao, Jindong Tan, "Pedestrian Positioning with Physical Activity Classification for Indoors", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, pp.1311-1316
- [8] Alper Kose, Andrea Cereatti, Ugo Della Croce, "Estimation of traversed distance in level walking using a single Inertial Measurement Unit attached to the waist", Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011, pp.1125-1128
- [9] C.Ascher, C.Kessler, M.Wankerl and G.F.Trommer, "Dual IMU Indoor Navigation with Particle Filter based Map-Matching on a SmartPhone", International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010
- [10] 秋山高行, 中原豪, 山崎勝也, 大橋洋輝, 佐藤暁子, "移動状態に応じたパーティクルフィルタによる歩行者自律測位方式の提案と評価", FIT2013 (第 12 回情報科学技術フォーラム)
- [11] C.Kwok, D.Fox, M.Melia, "Adaptive real-time particle filters for robot localization", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2003, pp.2836-2841 vol.2
- [12] Moustafa Alzantot, Moustafa Youssef, "UP-TIME: Ubiquitous pedestrian Tracking using Mobile Phones", International Conference on Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012, pp.3204-3209