

動的な歩幅更新をベースとする マップマッチングによるPDR手法

西村 天晴^{1,a)} 高山 敏典^{2,b)} 柳澤 政生¹ 戸川 望^{1,c)}

概要: 近年の地図アプリケーションの普及により, 歩行者や自動車を対象としたナビゲーションが身近な機能となっている. しかし, こうしたナビゲーションは屋外のみを対象とする場合が多く, 屋内で使用する際には制限がある. 特に, 大型ショッピングモールや主要駅などの通路が複雑に入り組み, 混雑が多い屋内施設では道迷いが生じやすいため, 近年, 屋内用の測位技術が注目を浴びている. 既存の屋内用の測位技術に Wi-Fi や Bluetooth などの屋内インフラを利用する測位手法があるが, 精度やインフラ整備のコストの点から実用性に欠ける. 一方で, 外部インフラを必要としない PDR (Pedestrian Dead Reckoning) はスマートフォン等の端末のみで完結するうえ, 短期的な測位精度が高く, 連続的かつリアルタイムに測位ができる点から研究が盛んに行われている. しかし, PDR は自身で誤差を補正できず, 誤差が蓄積し, 長期的な測位に向かない点に課題がある. 本稿では, 動的に歩幅を更新して歩幅の誤差を低減し, さらにマップマッチングを適用して補正をする PDR 手法を提案する. 動的に歩幅を更新することで, 歩行者の歩幅の個人差や周囲の状況による歩幅の変化に依存しにくい測位を実現する. 加えて, マップマッチングによって位置と進行方向を補正することで, 長期間の測位でも高い精度での測位を実現する. 実験の結果, 提案手法では, 通常歩行や大股歩行などの歩幅の変化や長期的な測位に対応したうえで, 正しい現在地を測位し, 測位誤差は 1m 未満となった.

1. はじめに

地図アプリケーションの普及により, 歩行者や自動車などを対象としたナビゲーションが身近な機能となっている. しかし, こうしたナビゲーションは屋外のみを対象とする場合が多く, 屋内で使用する際には制限がある. 一般に, ナビゲーションでの測位には GPS (Global Positioning System) が広く用いられ, 屋外での測位精度は十分に高い. しかし, 遮蔽物によって GPS 電波が受信できないと, 測位精度は著しく悪くなるため, 屋内での使用は非常に困難となる. 一方で, 空港や駅, 地下街, ショッピングモールなどの主要な屋内施設では, 屋外と比べ, 細い通路や曲がり角が多く, 通路も複雑に入り組む構造が多い. 屋内では, 屋外よりも高い測位精度でリアルタイムに現在地を測位する必要があり, 近年, 屋内用の測位技術に注目が集まっている.

複雑な構造が多い屋内施設では正確かつリアルタイムに

位置を把握する必要があり, 測位の連続性と精度の 2 つが重要となる. 既存の屋内用の測位手法として超音波を利用し特定範囲内で高精度な測位をする手法 [1] があるが, 連続的な測位は困難である. Wi-Fi や Bluetooth などを利用し, 三辺測量や電界強度を用いて測位する手法 [2,3] もあるが, 遮蔽物によって測位精度が悪化したり, 事前に電界強度をデータベース化する必要がある. これらの外部インフラを利用する測位手法 [1-3] では, 高い精度で連続的に測位するには十分なインフラ整備が前提となり, 適用可能な場所は限られる.

外部インフラを利用しない測位手法に PDR (Pedestrian Dead Reckoning) [4-9] がある. PDR ではスマートフォンやタブレットなどの端末に標準搭載されている加速度センサや地磁気センサ, ジャイロセンサなどのセンサ群のみを利用する. 取得したセンサデータから歩幅や歩数, 進行方向を推定し軌跡を求め, 出発地点からの相対位置から現在地を測位する. 特別な機器や外部インフラを用いずに常に連続的な測位ができるうえ, 短期的には高精度な測位ができる. しかし, PDR は自身で誤差を低減できず, 誤差が蓄積する点に課題がある. 特に, 歩行の個人差や周囲の状況により, 歩幅と進行方向に誤差が生じやすい. そのため, 長期的な測位には外部インフラを利用する測位手法と併用

¹ 早稲田大学
Waseda University

² ゼンリンデータコム
ZENRIN DataCom

a) tensei.nishimura@togawa.cs.waseda.ac.jp

b) takayama@zenrin-datacom.net

c) togawa@togawa.cs.waseda.ac.jp

したり，屋内構造を利用するマップマッチングで位置を補正したりする必要がある。

PDR と外部インフラを利用する測位手法とを併用する手法 [6, 7] では，適切な位置に外部インフラを設置することで，PDR でも長期的な測位が可能となる。しかし，インフラの整備が必須となり，端末のみで測位は完結しなくなり，測位を適用できる場所は限定される。一方で，PDR にマップマッチングを適用する手法 [8, 9] では，屋内地図を利用し，現在地が通路上にあることを利用して位置を補正する。屋内地図は比較的簡単に用意できるうえ，ナビゲーションでの用途を考えると既知とみなせ，すべての場所で測位できる点に大きな特徴がある。

従来のカーナビゲーションのマップマッチングやマップマッチングによる PDR では，曲がり角にノードを設置する手法 [8] や通路中央に仮想的なリンクを設置し，そのリンク上に現在地を補正する手法 [9, 10] などがある。しかし，道幅の広い通路では通路を仮想的なリンクに近似すると大きな誤差が生じ，また，開けた場所では仮想的なリンクの設置が困難で，歩行者の自由な動きに対応できないことが指摘されている [5]。

マップマッチングによる PDR では歩幅が重要であり，従来手法 [8, 9] では静的もしくは動的に歩幅を変化させている。静的に歩幅を変化させる手法 [9] では階段などの場所に応じて，歩幅を特定の固定値に変化させる。動的に歩幅を変化させる手法 [8] でも，事前に設定した固定値に基づいて，現在の 1 歩の加速度データから 1 歩ごとの歩幅を定めている。しかしながら，歩幅に固定値を適用したり，事前に設定した固定値を用いて歩幅を推定すると，歩行者の周囲の状況による歩幅の変化に対応できないことが指摘されている [11]。

本稿では，動的に歩幅を更新し，さらにマップマッチングを適用することで測位誤差を低減する PDR 手法を提案する。提案手法は，まず PDR で一歩分の軌跡を求める。次に，現在地と通路の位置関係，軌跡と通路との衝突に応じてマップマッチングを行う。屋内構造を利用するマップマッチングを適用することで PDR での長期的な測位を可能とする。このとき，通路に仮想的なリンクは設置せず，屋内地図と軌跡情報に応じて位置と進行方向を補正することで，歩行者の自由な動きや道幅の広い通路でも，正しい現在地に位置を補正する。加えて，曲進時に軌跡と通路が衝突して曲がり角へ位置が補正されたとき，マップマッチング前後での軌跡の縮尺から歩幅を動的に更新することで，歩幅推定の誤差を低減する。その結果，提案手法は長期的な測位と歩幅の変化に依存しにくい測位を実現し，高い精度での測位を実現する。

本稿の貢献は以下の通りである。

- (1) 屋内構造を利用するマップマッチングを利用して PDR の軌跡をリアルタイムに補正することで，長期的な測

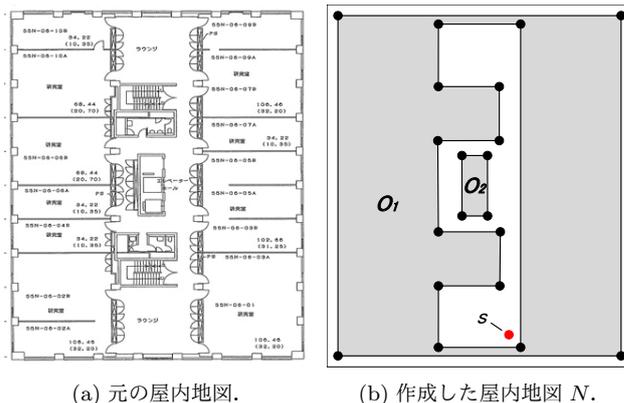


図 1 屋内地図の作成例。

- 位を実現する。また，マップマッチング前後での軌跡の縮尺を利用し，歩幅を動的に更新することで，歩幅の変化に依存しにくい測位を実現する。
- (2) 一般的な端末に標準搭載されている加速度，地磁気，ジャイロセンサと，製図などの屋内地図を利用することで，インフラの有無を問わず，ほぼすべての屋内での測位を実現する。また，端末側でリアルタイムに処理をして測位するため，端末のみで完結した測位ができる。
- (3) 長期的な測位と歩幅の変化に対応したうえで，最終地点での測位精度を 1m 未満にした。その結果，屋内でのナビゲーションに十分に対応する測位技術を実現した。

2. 屋内測位問題

本章ではまず，屋内測位問題を定義する。

屋内地図 N は長方形で与えられる。障害物は N の中に多角形領域 O_i の集合として与えられる。多角形領域 O_i は障害物の外周のリンク集合 E とそのノード集合 V からなり，領域 O_i 内の領域は歩行不可能な場所とする。障害物には部屋や壁も含み，外周が曲線の場合は複数の線分で近似する。屋内地図 N において，障害物以外の場所を歩行可能な場所とする。出発地点 s は常に障害物領域外の，歩行可能な場所とする。

例 1 図 1 に屋内地図の例を示す。図 1(a) が元の屋内地図，図 1(b) がマップマッチングで使用する作成した屋内地図 N を表す。図 1(b) では，点がノード，線がエッジ，灰色の多角形領域が歩行不可能領域，白色の領域が歩行可能領域，赤色の点が出発地点 s を表す。 □

このとき屋内測位問題を次のように定義する。

定義 1 (屋内測位問題) 屋内測位問題とは屋内地図 N ，出発地点 s が与えられたとき，端末のみを利用して連続的かつリアルタイムに現在地を測位する問題である。このとき，正しく歩行した経路を表示したうえで，高い精度で現在地を測位する。 □

3. 動的な歩幅更新をベースとするマップマッチングによるPDR手法

3.1 方針

1章で議論したように、屋内は屋外と比べて通路が入り組み複雑な構造が多いため、屋内測位では正確かつリアルタイムに位置を把握する必要がある。また、外部インフラを利用すると、コストと精度面で適用できる屋内施設は限定されるため、外部インフラを用いない手法が望ましい。加えて、高精度な測位を実現するには、歩行者の個人差や自由な動きに対応し、歩幅などの変化をリアルタイムに反映する必要もある。

以上から、スマートフォンやタブレットなどの端末のみを用いたPDR測位を提案する。長期的な測位での誤差の蓄積による測位精度の悪化を防ぐため、屋内地図を利用するマップマッチングを適用する。屋内地図は比較的簡単に用意できるため、ほぼすべての屋内施設で適用できる。また、歩行者の自由な動きに対応するため、マップマッチングでは仮想的なリンクで通路を近似せず、リアルタイムに位置と進行方向を補正する。加えて、個人差や周囲の状況による歩幅の変化に対応するため、動的に歩幅を更新する。

3.2 提案手法の流れ

提案手法は屋内測位問題を解くため、歩行軌跡の進行状態と障害物との衝突を考え、進行状態と衝突状況に応じたマップマッチングをすることで、進行方向と位置を補正する。さらに、マップマッチング前後の位置と直前に曲進した位置との距離から、軌跡の縮尺を考え、歩幅を動的に補正する。

以下に提案手法の流れを示す。現在の歩数を n 、 i 歩目の歩幅と進行方向、位置を l_i 、 d_i 、 p_i とする。進行状態は直近5歩分の進行方向の最大の差と閾値 Φ との比較から、衝突判定は軌跡と障害物リンクとの交差から判定する*1。

Step 1 PDRで移動が推定されたら、歩数 n を $n \leftarrow n+1$ とし、進行方向 d_n を推定する。現在地 p_{n-1} から進行方向 d_n に歩幅 l_n 分だけ移動し、次の現在地 p_n とする。

Step 2 進行状態と衝突判定、通路とのなす角度に基づいて場合分けをする。それぞれの場合でマップマッチングを適用して補正を行い、現在地 p_n と進行方向 d_n を更新する。

Step 3 Step 2で曲進時に分岐経路へ位置が補正されたとき、補正前後での縮尺に応じて歩幅 l_{n+1} を更新する。その他の場合、 $l_{n+1}=l_n$ とする。

提案手法では処理を1歩ずつ端末内で実行し、次の1歩までに処理を完了する。Step 1では移動を推定したとき、1

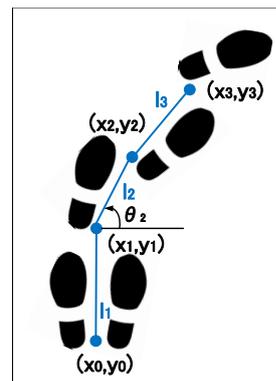


図2 PDRの模式。

歩分の軌跡を歩幅 l_n と進行方向 d_n から求め、現在地 p_{n-1} と軌跡から次の現在地 p_n を得る。Step 2ではマップマッチングで位置と進行方向の補正を行う。このとき、進行状態や障害物リンクとの衝突の有無、衝突角度あるいは進行方向と通路のなす角度に基づき、マップマッチングを適用する。屋内地図と軌跡に基づいて、現在地 p_n と進行方向 d_n を常に補正することで、誤差の蓄積を防ぐ。Step 3では歩幅を動的に更新し、歩幅推定の誤差を低減する。曲進時にStep 2で分岐経路へ位置が補正されたとき、補正前後の位置と1つ前の曲がった位置との距離の比から歩幅を更新する。それ以外の場合は歩幅は変更しない。動的に歩幅を更新することで、歩幅の個人差や周囲の状況による歩幅の変化に対応する。

3.3 PDRによる軌跡の算出 (Step 1)

図2にPDRの模式を示す。PDRでは移動が推定されるたびに歩数 n を1ずつ増加し、進行方向と歩幅を推定し、進行方向と歩幅から1歩分の軌跡をベクトルとして求める。移動分の軌跡を足し合わせることで出発地点との相対位置が求まり、現在地が求まる。出発地点 s が (x_0, y_0) で、 i 歩目の歩幅が l_i 、進行方向が d_i のとき、 n 歩目の位置 $p_n = (x_n, y_n)$ は式(1)で得る。

$$(x_n, y_n) = (x_0 + \sum_{i=1}^n l_i \cos d_i, y_0 + \sum_{i=1}^n l_i \sin d_i) \quad (1)$$

3.3.1 移動推定

提案手法では加速度データを利用して移動を推定する方法を利用する。図3に歩行時の加速度データの例を示す。加速度センサのノイズを除去するため、ローパスフィルタ処理を施している。歩行周期に応じて加速度にピークが周期的に生じており、極大点と極小点を検出することで、容易に歩数が得られる。最初の1歩や停止直前の1歩は加速度が小さくなり、歩数として検出されない場合が生じる場合があるが、その他では歩数をほぼ正確に検出できる。

3.3.2 進行方向 d_i の推定

進行方向の推定には地磁気と角速度が利用される。地磁気センサから得られる地磁気によって磁北が求まるが、建

*1 Φ の値は予備実験を踏まえて $\Phi = 20^\circ$ としている。

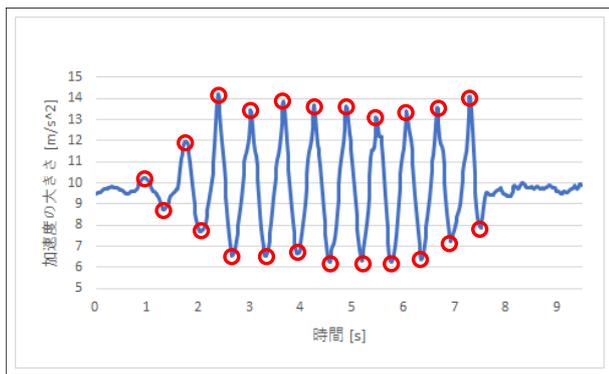


図 3 歩行時の加速度データの例.

物内の地磁気の乱れによって誤差が生じる．角速度はジャイロセンサから得られ，一階積分することで角度変化量が求まる．ジャイロセンサから取得できる角速度データは端末基準であるため，実際の進行方向の水平角度変化量は，地磁気と加速度から定まる端末姿勢を利用する．ジャイロセンサにはドリフト誤差があり，誤差の蓄積が生じやすく，長期的な計測に向かない．

提案手法では初期角度の算出に地磁気を利用し，その後の進行方向の算出に角速度を利用する．角速度から進行方向を算出し続けると，誤差が蓄積するため，Step 2 のマップマッチングで進行方向を補正することで，誤差の蓄積を防ぐ．

3.3.3 歩幅 l_i の推定

歩幅推定では身長との相関を利用する方法が多く用いられる [12]．また，事前のキャリブレーションで歩幅を推定する方法 [13] や，身長や歩調，加速度を特徴量として機械学習を利用して歩幅を推定する方法 [4] もある．しかし，歩幅は個人差が大きいうえ，周囲の状況にも依存する．歩幅は身長や年齢，性別などの歩行者の様々な属性と相関があるうえ，同一歩行者でも，屋内外や道幅，同伴者の有無，周囲の混雑状況によって歩幅は変化する [9]．そのため，静的に歩幅を定めると誤差が生じ，誤差の蓄積の原因となる．

提案手法では，初期値として歩幅 l_1 に 60cm を与える．その後は屋内構造と軌跡から動的に歩幅を更新することで，個人差による歩幅の違いと周囲の状況による歩幅の変化に対応する．歩幅の動的な更新方法は 3.5 節に示す．

3.4 マップマッチングによる補正 (Step 2)

提案手法では，進行状態や障害物リンクとの衝突の有無，衝突角度あるいは進行方向と通路のなす角度に基づき，マップマッチングで位置と進行方向を補正する．

以下に Step 2 の流れを示す．ただし，現在の歩数を n ， i 歩目の歩幅と進行方向，位置を l_i ， d_i ， p_i とする．直近で歩行者が曲がった位置を p_c とし，初期値に出発地点を与える．また，図 4 のように歩行中の通路を R ，現在地に最も近い分岐経路を R_b とし， R の向きを d_R で表す．ま

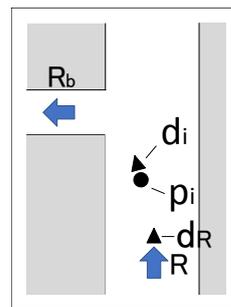
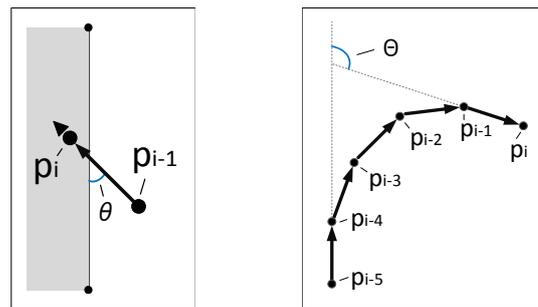


図 4 進行中の通路 R と分岐通路 R_b の例.



(a) 衝突の判定例. (b) 進行状態の判定例.

図 5 衝突と進行状態の判定例.

た，衝突の判定は図 5(a) のように軌跡と障害物リンクとの交差から判定し，衝突角度を θ とする．進行状態の判定は図 5(b) のように直近 5 歩分の進行方向の最大の差 Θ を求め，閾値 Φ との比較から判定を行う．

Step 2 Step 1 で求めた現在地 p_n に対して，マップマッチングで補正する．

Step 2.1 進行状態が直進状態で，衝突がなく通路 R と直近 5 歩の平均進行方向のなす角が ϕ_1 以上の場合はマップマッチングせずに終了し， R と ϕ_2 以上で衝突する場合は Step 2.2，それ以外は Step 2.3 に進む．進行状態が曲進状態で，衝突がない場合はマップマッチングせずに終了し， ϕ_3 以下の衝突の場合は Step 2.4，それ以外は Step 2.5 に進む*2．

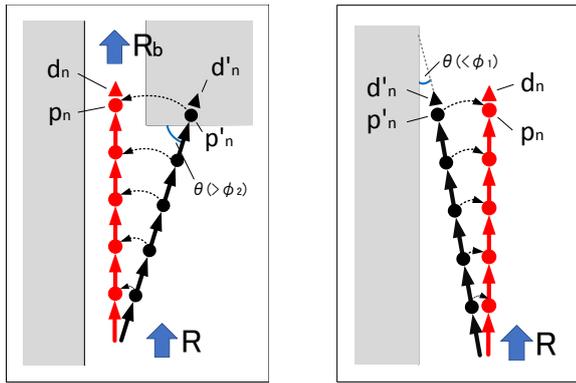
Step 2.2 衝突地点付近に分岐経路 R_b がある場合，現在地 p_n を R_b 上に補正して直近 5 歩の軌跡を補正し， $d_n = d_{R_b}$ とする． R_b がない場合は $p_n = p_{n-1}$ とする．例えば，図 6(a) のように直進時に通路と ϕ_2 以上で衝突しているとき，最も近い分岐経路 R_b 上に位置を補正して直近 5 歩を補正し，進行方向を d_{R_b} とする．

Step 2.3 直近 5 歩の軌跡を R に沿って補正する．

例えば，図 6(b) のように現在歩行中の通路 R に沿った歩行のとき，通路に沿って直進補正を行う．このとき，直近 5 歩の軌跡を通路に沿って補正し，進行方向を d_R とする．

Step 2.4 現在の 1 歩の位置を R に沿うように補正する．

*2 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 の値は予備実験を踏まえて $\phi_1 = 20^\circ, \phi_2 = \phi_3 = 40^\circ$ としている．



(a) Step 2.2 の例.

(b) Step 2.3 の例.

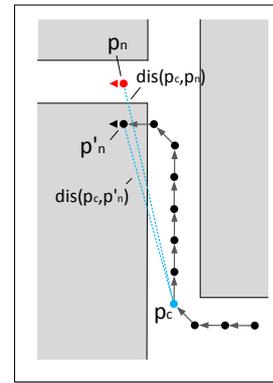
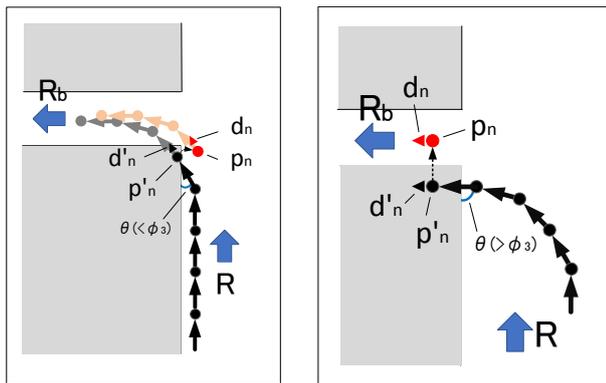


図 7 Step 3 の例.



(c) Step 2.4 の例.

(d) Step 2.5 の例.

図 6 Step 2.2–Step 2.5 の流れ.

例えば、図 6(c) のように曲進の開始時に通路と衝突するとき、通路に沿った位置に現在地 p_n を補正する。

Step 2.5 歩行中の通路 R に分岐経路 R_b がある場合、 R_b 上に位置を補正し、 $d_n = d_{R_b}$ とする。それ以外の場合、 $p_n = p_{n-1}$ とする。

例えば、図 6(d) のように分岐経路と異なる位置で曲進が生じたとき、最も近い分岐経路 R_b 上に位置を補正し、進行方向を d_{R_b} とする。

3.5 歩幅の動的な更新 (Step 3)

Step 3 では軌跡と地図情報を用いて歩幅を更新する。Step 2.2 と Step 2.3 による補正は進行方向の誤差に大きな原因があると考えられる。一方で、Step 2.4 と Step 2.5 による補正は進行方向に加え、歩幅の誤差にも原因がある。特に、Step 2.5 のように大きい衝突角度で衝突が生じているときは、歩幅の誤差が大きいためと考えられる。そのため、Step 2.5 で分岐経路に位置が補正されたとき、歩幅を更新し、歩幅の誤差を低減する。それ以外の場合は歩幅は更新せず、 $l_{n+1} = l_n$ とする。

図 7 に Step 3 での歩幅の更新の例を示す。Step 2 の補正前の現在地を p'_n 、直近の曲進位置を p_c 、2 点 a, b 間の距離を $dis(a, b)$ で表す。ただし、 p_c は初期値として出発地点 s を与え、Step 3 終了時に 1 歩前の進行状態が曲進

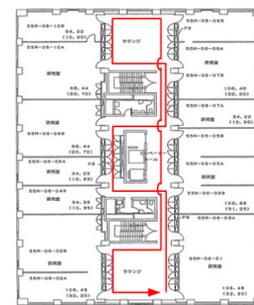


図 8 歩行ルート.

かつ現在の進行状態が直進のとき、直近の曲進位置 p_c を $p_c = p_{n-5}$ とする。このとき、次の歩幅 l_n を式 (2) で歩幅を動的に更新することで、歩幅の個人差や周囲の状況による歩幅の変化に対応する。

$$l_{n+1} = \frac{dis(p_c, p_n)}{dis(p_c, p'_n)} \times l_n \quad (2)$$

4. 評価実験

4.1 実験条件

提案手法を Android アプリケーションとして実装し、Huawei 社の MediaPad M3 Lite 10 wp を実機として評価実験を行った。図 8 に示す早稲田大学西早稲田キャンパス 55 号館 6 階の 1 周約 100m のルートで、端末の画面を見ながら歩く手持ちの所持形態で歩行実験を行い、最終地点での測位結果の距離の差を測位誤差とした。また、歩幅の変化への対応を調べるため、通常歩行と大股歩行の 2 種類の歩行方法で歩行した。通常歩行では平均約 69.1cm の歩幅で、大股歩行では平均約 84.9cm の歩幅で、歩幅を常に保ちながら歩行した。

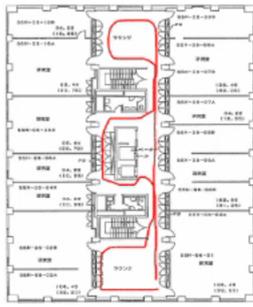
提案手法を評価するため、2 つの手法と比較した。

(1) PDR 測位 (比較手法 1)

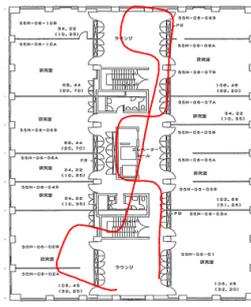
提案手法の Step 1 と同様にして、PDR で測位する。

(2) マップマッチングによる PDR 測位 (比較手法 2)

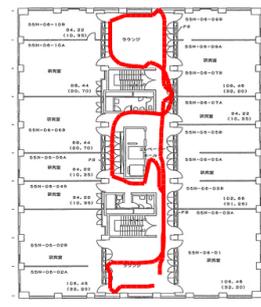
提案手法の Step 1 と Step 2 と同様にして、PDR の測位結果にマップマッチングで補正をして測位する。



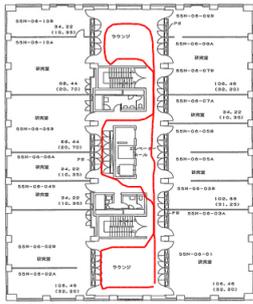
(a) 提案手法での通常歩行の測位結果.



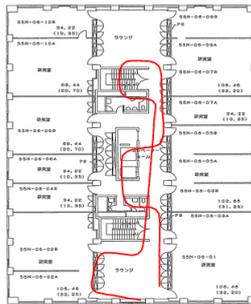
(b) 比較手法 1 での通常歩行の測位結果.



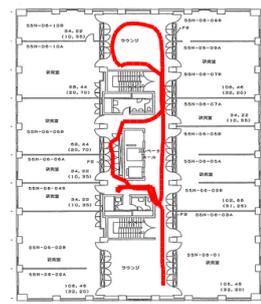
(c) 比較手法 2 での通常歩行の測位結果.



(d) 提案手法での大股歩行の測位結果.



(e) 比較手法 1 での大股歩行の測位結果.



(f) 比較手法 2 での大股歩行の測位結果.

図 9 提案手法と比較手法の測位結果の軌跡.

表 1 測位誤差の比較結果.

手法	通常歩行の測位誤差 [m]	大股歩行の測位誤差 [m]
提案手法	0.98	0.33
比較手法 1	4.52	1.58
比較手法 2	1.33	11.0

4.2 比較結果

提案手法と比較手法の測位誤差を表 1 に、軌跡の結果を図 9 に示す。

まず、通常歩行での提案手法と比較手法 1, 2 を比較する。表 1 に示すように、提案手法は比較手法 1 と比べて測位誤差を約 78%, 比較手法 2 と比べて測位誤差を約 26%削減した。比較手法 1 では、図 9(b) に示すように、時間経過で進行方向の誤差が大きくなり、誤差の蓄積で測位誤差が増加した。また、歩行者が歩行不可能な場所も現在地として測位している。比較手法 2 では、図 9(c) に示すように、マップマッチングによって位置と進行方向が補正され、正しい経路を表示している。しかし、実際の歩幅と推定値の誤差によって、提案手法より大きな測位誤差が生じている。提案手法ではマップマッチングに加え、動的に歩幅を更新するため、図 9(a) に示すように、歩幅推定での誤差を低減し、正しい経路を表示した上で、高い測位精度を得た。

次に大股歩行での提案手法と比較手法 1, 2 を比較する。表 1 に示すように、提案手法は比較手法 1 と比べて測位誤差を約 79%, 比較手法 2 と比べて測位誤差を約 97%削減し

た。図 9(e) に示すように、比較手法 1 では進行方向に加え、歩幅の推定でも大きな誤差が生じた。しかし、通常歩行時と比べて測位時間が短いため、最終的な測位誤差は小さくなった。図 9(f) に示すように、比較手法 2 では歩幅推定の誤差によってマップマッチングが正しく適用されず、誤った位置への補正が生じている。その結果、誤った経路を表示し、測位誤差が増加した。図 9(d) に示すように、提案手法では動的に歩幅を更新することで大股の歩行に対応し、正しい経路を表示した上で、高い測位精度を得た。

5. おわりに

本稿では、動的な歩幅更新をベースとするマップマッチングによる PDR 手法を提案した。提案手法では、歩幅の変化に対応し、長期的な測位も可能とする。提案手法では、従来手法と比較して、通常歩行に加え、大股歩行に対応したうえで、正しい経路を表示し、測位誤差を常に 26%以上削減した。加えて、提案手法は端末のみでリアルタイムに処理を行い、屋内地図のみで外部インフラを必要としないため、様々な屋内施設で適用できる。今後は、階段の昇り降りなどの階層の変化への対応や、手持ち以外の所持形態に対応する予定である。

参考文献

- [1] 松岡俊佑, 藤枝直輝, 市川周一, 川口秀樹, “超音波を用いたリアルタイム位置測位システムの開発,” 日本 AEM 学会誌, vol. 23, no. 2, pp. 380-385, 2015.

- [2] Kai Wendlandt, Marcus Berbig and Patrick Robertson, “Indoor localization with probability density functions based on Bluetooth,” in *Proc. IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, pp. 2040–2044, 2005.
- [3] Christof Rohrig and Frank Kunemund, “Estimation of position and orientation of mobile system in a wireless LAN,” in *Proc. 46th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4932–4937, 2007.
- [4] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之, “手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案,” *情報処理学会論文誌*, vol. 52, no. 2, pp. 558–570, 2011.
- [5] Shun Yoshimi, Kohei Kanagu, Masahiro Mochizuki, Kazuya Murao, and Nobuhiko Nishio, “PDR trajectory estimation using pedestrian-space constraints: real world evaluations,” in *Proc. 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 1499–1508, 2015.
- [6] Lyu-Han Chen, Eric Hsiao-Kuang Wu, Ming-Hui Jin, and Gen-Huey Chen, “Intelligent fusion of Wi-Fi and inertial sensor-based positioning systems for indoor pedestrian navigation,” in *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 11, pp. 4034–4042, 2014.
- [7] 工藤大希, 堀川三好, 古館達也, 岡本東, “BLE 測位および PDR を用いたハイブリッド型屋内測位手法の提案,” 第 79 回全国大会講演論文集, no. 1, pp. 325–326, 2017.
- [8] 安斎恵一, 岡島匠吾, 坪川宏, “スマートフォンを用いた屋内位置の推定と歩行ナビゲーションシステム,” *情報処理学会マルチメディア分散協調とモバイル (DICO 2011)*, pp. 921–927, 2011.
- [9] 村田雄哉, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, “歩行者自律測位における行動センシング知識の利用,” *情報処理学会マルチメディア分散協調とモバイル (DICO 2014)*, pp. 1614–1619, 2014.
- [10] Sotiris Brakasoulas, Dieter Pfoser, Randall Salas, and Carola Wenk, “On map-matching vehicle tracking data,” in *Proc. 31st International Conference on Very Large Data Bases*, pp. 853–864, 2005.
- [11] 三宅孝幸, 新井イスマイル, “時間帯と同行者の状況変化に追従した歩幅推定手法の提案と評価,” *研究報告ユビキタスコンピューティングシステム*, no. 32, pp. 1–7, 2013.
- [12] 翁長謙良, 吉永安俊, 趙廷寧, “身長と歩幅の相関に関する一考察: 学生の歩測の事例から,” *琉球大学農学部学術報告*, vol. 45, pp. 149–155, 1998.
- [13] 三宅孝幸, 新井イスマイル, “デッドレコニング開始前のセンサデータを自動学習に用いた屋内歩幅推定手法の検討,” 第 74 回全国大会講演論文集, no. 1, pp. 443–444, 2012.