

安定歩行区間に基づく歩行軌跡推定手法

梶 克彦^{1,a)} 河口 信夫^{2,1}

概要:

複数の歩行センシングデータを用いて建物構造を生成するためには、歩行センシングデータから歩行軌跡を正確に推定できなければならない。本稿では、右左折や蛇行を伴わない歩行が一定時間以上安定してセンシングできている区間を安定歩行区間と定義し、それに基づいて歩行軌跡を推定する手法を提案する。一般的に人は合理的に行動するため、安定歩行時には直線的な軌跡をたどると考えられる。また屋内の通路の多くは直線的である。よって、混雑した通路や複雑な形状の建物の歩行を除けば、移動の大半は直線的な歩行とみなせる。安定歩行区間の検出には角速度を用いる。検出された安定歩行区間を直線的な歩行とみなし、角速度に乗っているオフセット値を求め、ドリフトを除去する。また、多くの通路の曲がり角の角度が90度であるという建物知識を導入し、安定歩行区間同士が平行または垂直になるように歩行軌跡を修正する。さらに、安定歩行区間が一定以上の割合となる歩行センシングデータを、高精度の歩行軌跡推定が期待できる信頼性の高いデータとみなす。屋内歩行センシングコーパス HASC-IPSC を用いて提案手法の評価実験を行い、歩行軌跡の推定手法と信頼性の高い歩行センシングデータの発見手法の双方で有効性を確認した。信頼性の高いデータに限定すれば、歩行軌跡末端における進行方向の誤差平均は約7度となり、90度以上の大きな誤差になる割合は約1%となった。

1. はじめに

位置推定技術の向上に伴い、ナビゲーションやチェックインサービスなど、様々な位置情報サービスが実用化されてきている。屋外では多くの場合、GPSや無線を用いた位置推定を利用可能である。一方屋内ではGPSが利用できない場合が多く、あらゆる建物で安定的に位置推定を行う手法が期待されている。有力な屋内位置推定手法の一つとして、Pedestrian Dead-Reckoning(PDR)が挙げられる。加速度センサや角速度センサなど、スマートフォンに搭載された様々なセンサ情報を用いて、スマートフォンを携帯している人の歩行や進行方向を求め、初期位置からの相対的な移動を推定する [1], [2], [3]。

建物構造情報は多くの屋内位置情報サービスにとって基盤となる情報である。しかし現在では、あらゆる建物について建物構造情報が利用可能にはなっていない。そこで、複数の人が建物内を様々な経路で歩行した歩行センシングデータを用いて建物構造を推定する研究が進められている [4], [5], [6], [7]。正確な建物構造情報を得るためには、ま

ず歩行センシングデータから高精度に歩行軌跡を推定できる必要がある。

本稿では特に進行方向を推定できる角速度センサに着目し、歩行センシングデータから歩行軌跡を推定する手法を提案する。右左折や蛇行を伴わない歩行が一定時間以上安定してセンシングできている区間を安定歩行区間と定める。また、検出された安定歩行区間の情報を用いてドリフトの除去や建物知識の適用を行い、高精度な歩行軌跡推定を実現する。

本稿の構成は以下のとおりである。まず2章では関連研究を挙げ、歩行軌跡推定に有効な知見や問題点を整理する。3章ではそれらの問題点を解決するための情報として安定歩行区間という概念を導入し、その検出手法を提案する。4章では安定歩行区間の情報に基づいて歩行軌跡を推定する手法を提案する。5章では、高精度の歩行軌跡推定が期待できる信頼性の高い歩行センシングデータの発見手法を提案する。これらの手法の評価実験を6章において述べ、7章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

建物構造情報は、屋外における地図のように、多くの屋内位置情報サービスが基盤データとして必要な情報である。しかし、建物構造情報は必ずしもすべての建物で利用可能

¹ 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603, Japan

² 名古屋大学 未来社会創造機構
Institute of Innovation for Future Society, Nagoya University

^{a)} kaji@nuee.nagoya-u.ac.jp

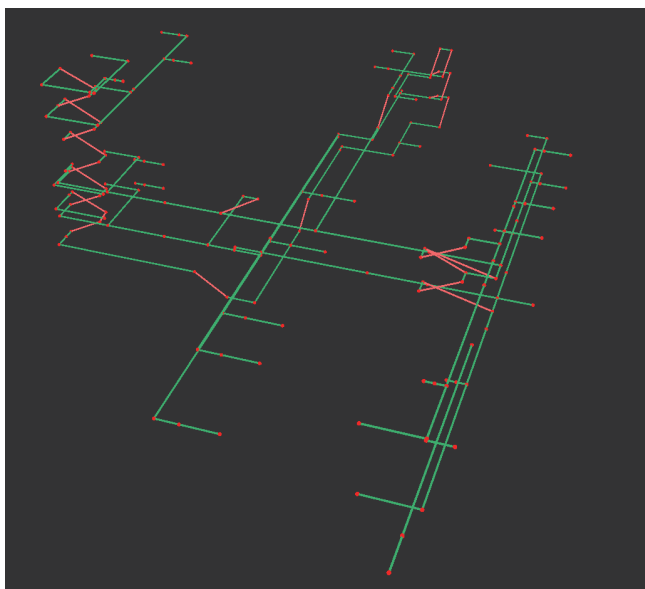


図 1 建物の歩行空間ネットワーク構造

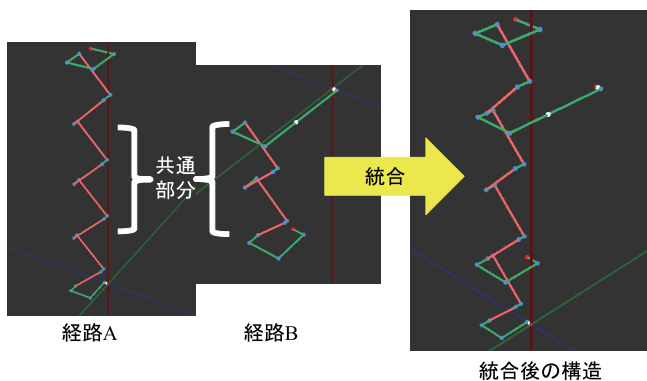


図 2 歩行軌跡の部分一致に基づく統合

なわけではない．すべての建物の管理者が建物構造情報を屋内位置情報サービスに対してオープンにすれば問題は解決されるが，コスト等の問題のため現実的ではない．そこで近年では，複数人が対象となる建物の中を様々な経路で歩行し，その歩行センシングデータを統合して，歩行空間ネットワーク構造（図 1）や部屋と通路の構成といった建物構造情報を生成する研究が進められている [4], [5], [6]．我々も建物構造推定研究に取り組んでおり，歩行軌跡同士の部分一致を推定して，それを手がかりとして歩行空間ネットワーク構造をボトムアップに生成する手法を提案している（図 2） [7]．

正確な建物構造の推定を実現するためには，歩行軌跡の正確な推定が必要となる．加速度や角速度センサに基づいて初期位置からの相対的な移動を推定する Pedestrian Dead-Reckoning (PDR) では，ドリフトの影響が歩行軌跡推定に大きな悪影響を及ぼす．多くの PDR では，加速度から歩数や歩幅を推定して単位時間あたりの移動距離を算出し，さらに角速度の情報から各時刻における進行方向を求め，それらの情報を用いて歩行軌跡が求められ

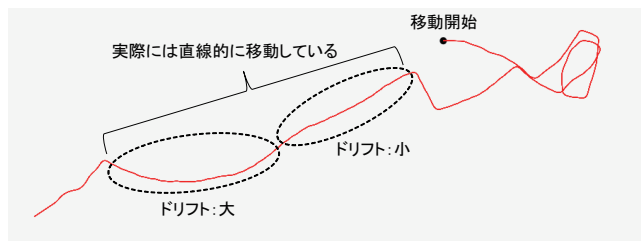


図 3 Pedestrian Dead-Reckoning に基づく歩行軌跡推定

る [1], [2], [3]．図 3 は一般的な PDR によって描画された歩行軌跡の例である．直線的な移動であっても，角速度にわずかなオフセット値が乗ってれば，その軌跡は曲線になってしまう．一般的なドリフト除去の方法では，移動の前後において静止時間を設けて角速度のオフセット値を求め，その値を各時刻の角速度の値から減算する．しかし，実環境における位置推定アプリケーションでは，必ずしもユーザに静止してもらえとは限らない．また図 3 からわかるように，オフセット値は移動に伴い動的に変化することがある．そのため，動的なオフセット値の変化を考慮したドリフト除去手法が必要である．

多くの場合，人は合理的に行動するため，曲がり角や複雑した通路の歩行などを除けばその歩行軌跡のほとんどは直線的になると考えられる．また多くの建物は通路が直線的である．これらの知識の導入は，歩行軌跡推定の大きな手がかりとなる．歩行センシングデータから右左折の瞬間を検出し，右左折以外の区間は直線移動をしているとみなす歩行軌跡推定手法が複数提案されている [8], [9]．それらの手法では，右左折地点をノードとし，ノード間を直線で結び歩行軌跡を推定する．

右左折の変化の瞬間を検出する手法は実環境における動作に対するロバスト性に欠けると考えられる．渡辺らの手法では角速度センサを用い，2 つの連続するゼロ交叉点間の積分値（図 4 上側）が閾値以上であれば右左折とみなす [9]（図 4 下側）．この手法では，例えば曲がり角を曲がる途中で人とぶつかりそうになって立ち止まってしまった場合，その時点で角速度の値は 0 に戻ってしまう．そのため積分区間が分断されて短くなり閾値を超えず，右左折とは推定されなくなることがある．また森らの手法では地磁気センサを用い，地磁気の変化量が閾値を超えた箇所を右左折とみなし [8]，右左折から得られるノードリンク構造を用いて環境内の歩行空間ネットワーク構造を検索して歩行軌跡形状を推定する [10]．しかし，高齢者のような移動速度の遅い人の場合は，曲がり角での右左折動作も遅いため変化量が閾値を超えないこともありうる．

右左折推定の失敗は歩行軌跡推定に大きな悪影響をおよぼす．図 5 は，通路を歩いていて対面する人を避ける動作を行っており，右左折推定 [9] に失敗している例である．この例では，直線の廊下を移動中に右に小さく曲がって避け，

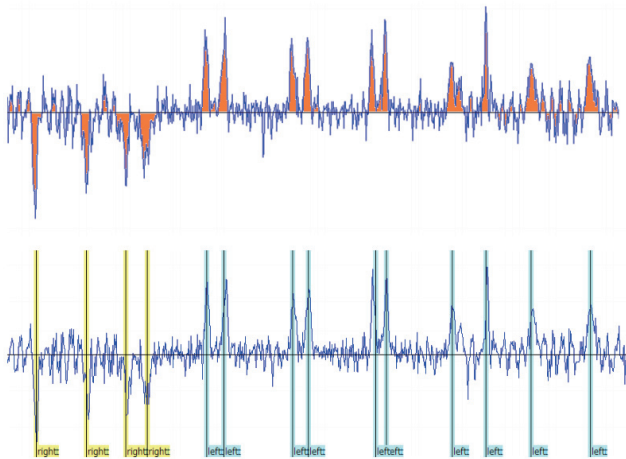


図 4 2つのゼロ交叉点間の角速度積分に基づく右左折推定

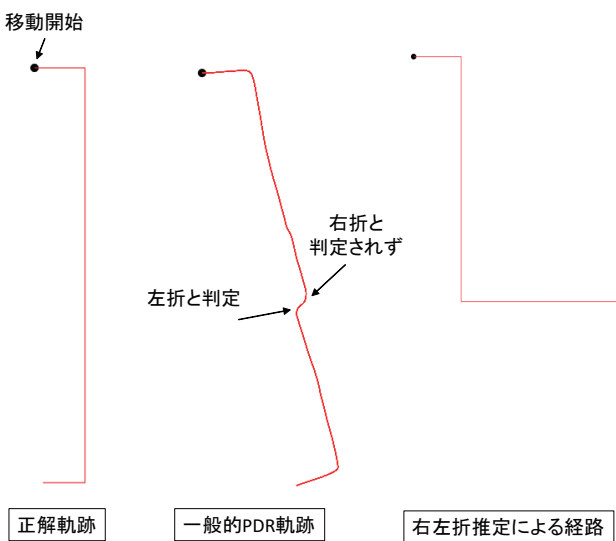


図 5 右左折推定に失敗した例

その後体勢を直して直線移動に復帰している。右左折推定によって右曲がりや左曲がりやが1回ずつ検出されれば、歩行軌跡末端の進行方向も正解と一致し大きな誤りには繋がらないが、図5のように一方だけが右左折と判定されると、最終的なトポロジは大きく異なってしまふ。

3. 安定歩行区間の導入

前章で述べた歩行軌跡推定の問題点を解決するため、安定歩行区間という概念を導入する。安定歩行区間とは、右左折や蛇行を伴わない歩行が一定時間以上安定してセンシングできている区間を指す。人の移動はフロア間移動を除けば地面に平行な移動がほとんどである。よって本稿では、推定する移動軌跡を地面に水平な面に限定し、高さの変化は考慮しない。3次元的な歩行軌跡を得るためには、本稿で得られた歩行軌跡に対して、さらに階段昇降やエレベータ推定などの行動認識結果を適用し、高さ方向の移動を歩行軌跡に反映させる必要がある。

安定方向区間の検出には角速度センサの値を用いる。図

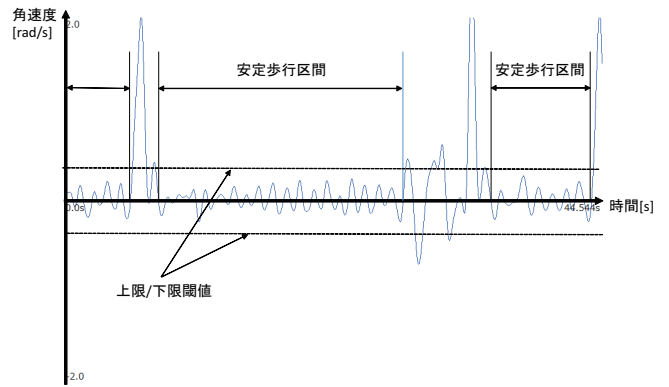


図 6 角速度に基づく安定歩行区間検出

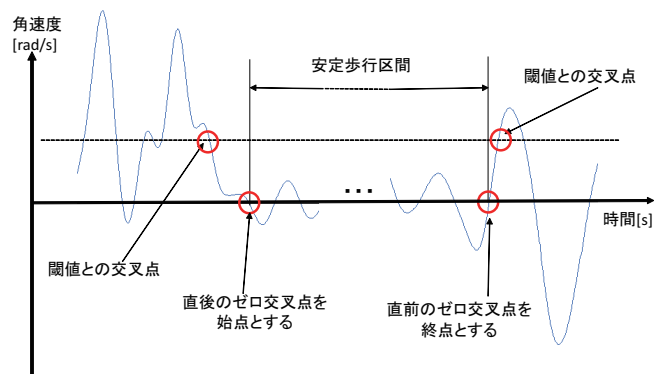


図 7 安定歩行区間の端点の決定方法

6は、角速度センサ値にローパスフィルタをかけてノイズを除去したものである。ローパスフィルタによる時間遅延と振幅の減衰は補正済みである。センサ端末を腰中央付近に装着している場合、歩行に伴って腰が周期的に10度から20度程度回るため、その範囲内で周期的な波形が現れる。よって右左折や蛇行を伴っていないければ、ある一定範囲以内に角速度のセンサ値が収まる。そこで、安定歩行区間検出のための上限・下限閾値を設け、その範囲に収まっている区間を求める。さらに、その状態が一定時間以上継続している場合、その区間を安定歩行区間とみなす。本稿では経験的に、上限・下限閾値を ± 20 度、継続時間の閾値を3秒と定めた。

ここで、安定歩行区間の始点・終点は、閾値との交叉点ではなく、その前後のゼロ交叉点とする(図7)。閾値以内に収まった瞬間から、次に閾値を超える瞬間までを安定歩行区間と定めると、右左折動作の最後の部分や次の右左折の最初の部分が安定歩行区間に含まれてしまう。そこで、回転が終了した後から、次の回転が開始する前までを安定歩行区間とするために、ゼロ交叉点を端点とする。

安定歩行区間の検出手法は右左折推定と比較して高い適合率が期待できる。短時間の動作である右左折やその回転量の推定では、センサノイズや実環境におけるイレギュラな動作の影響を大きく受けるため、実際には右左折した箇所を検出できなかったり、曲がり角でない箇所を右左折と

検出してしまふことがある．一方安定歩行区間検出では，角速度の変化が少ない状態の継続を検出するため，センサノイズが一時的に大きくなっている場合や対向者を回避するなど歩様が一時的に乱れる場合などは，安定歩行区間とはみなされない．

ここでは，常に一定速度で歩行しているという前提に基づいて安定歩行区間を検出した．もし歩行センシングデータの中に立ち止まるような動作が含まれている場合，本手法をそのまま適用すると静止区間も安定歩行区間とみなされてしまう．また走る動作が含まれている場合，歩行よりも角速度の変化が大きいため直線的に走っていたとしても安定歩行区間と検出されないことがある．その場合は，まず加速度や角速度等を用いた機械学習によって行動認識を行い [11]，歩行や階段昇降など移動している区間に限定したり，加速度を用いた歩幅推定や移動速度推定 [12] によって安定歩行区間とみなす角速度閾値を適切に設定する必要がある．

また，本稿で定めた角速度の閾値は，センサ端末の装着位置に応じて適切に設定する必要がある．本稿ではセンサ端末が腰の中央後ろに装着している状態を想定しているため，左右の回転に閾値は0度を中心として設定した．しかし，たとえば右側の腰ポケットにセンサ端末を入れている場合は，右足ステップの際に生じる回転速度は左足ステップの時よりも大きくなるため，角速度の上限・下限閾値もそれに合わせ，右回りの回転速度の閾値（本稿では上限閾値）を大きめに，左回りの回転速度の閾値（下限閾値）を小さめに設定する必要がある．

4. 安定歩行区間に基づく歩行軌跡推定

人は合理的に行動するため，曲がり角や混雑した道などを除けばほとんどの歩行軌跡は直線的になる，という知識を導入する．この知識に基づき，安定歩行区間では直線的に移動しているとみなす．安定歩行区間の情報に基づき，ドリフトの除去と，建物知識の導入によって歩行軌跡を修正していく．

図8に，正解の歩行軌跡と歩行センシングデータから段階的に歩行軌跡推定を適用していく様子を示す．正解軌跡（図8上）は，右左折の正解ラベルから各時刻における正解進行方向を求め，歩行速度が一定であると仮定して軌跡を生成している，歩行速度を一定としているのは，角速度による進行方向推定のみに着目するためである．

一般的 PDR 軌跡（図8上から2番目）は，角速度センサ値にローパスフィルタをかけてノイズを除去し，角速度の積分によって各時刻の進行方向を求め，歩行速度が一定であるとみなして歩行軌跡を描画している．実際の歩行では90度単位の右左折と直進しかしていないにもかかわらず，PDRによる歩行軌跡は直線歩行部分がドリフトして曲線的な軌跡になっている部分がある．また複数階の折り返し

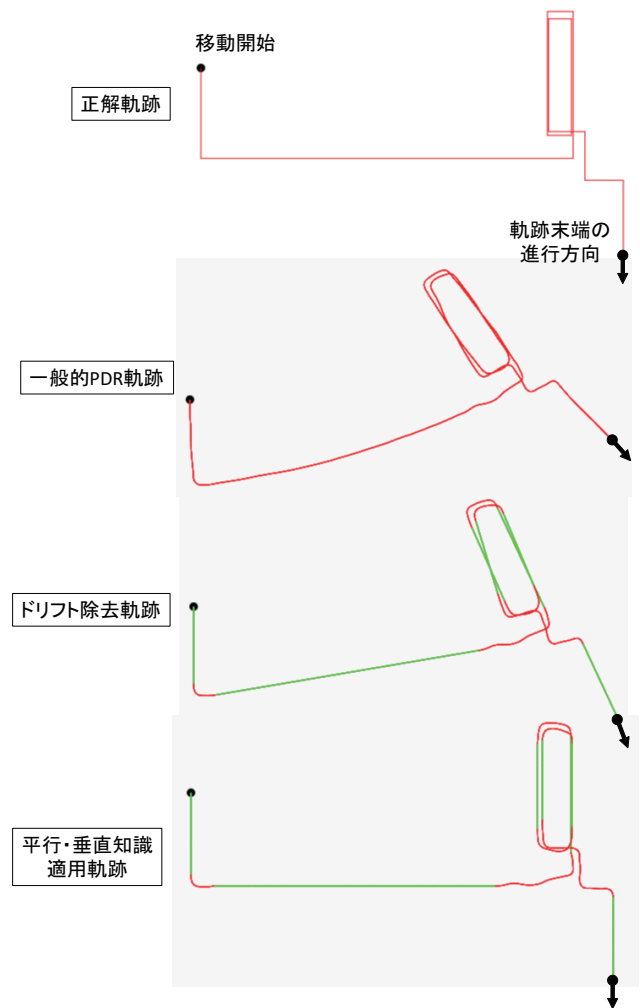


図8 安定歩行区間に基づく歩行軌跡推定の例

階段を歩行している部分（ループ箇所）では，上下の階で階段部分の軌跡が平行にはなっていないところがあり，90度の右左折が正確に捉えられていないのがわかる．

まず，安定歩行区間の情報を用いてドリフトの除去を行う．直線的に歩行した場合でも，僅かにオフセット値が乗り，歩行軌跡がドリフトする場合がある．また，歩行データ内でそのオフセット値は一定ではなく，動的に変化する．そこで，検出されたそれぞれの安定歩行区間 S_i の情報を用いて，各時刻 t における推定オフセット値 o_t を以下の式で求める．

$$o_t = \begin{cases} d_t & (t_{S_i}^b \leq t \leq t_{S_i}^e) \\ d_{S_i} \times \frac{t - t_{S_i}^e}{t_{S_{i+1}}^b - t_{S_i}^e} + d_{S_{i+1}} \times \frac{t_{S_{i+1}}^b - t}{t_{S_{i+1}}^b - t_{S_i}^e} & (t_{S_i}^e < t < t_{S_{i+1}}^b) \end{cases}$$

ここで， $t_{S_i}^b$ は安定歩行区間 S_i の開始時刻， $t_{S_i}^e$ は終了時刻を表す．また， d_{S_i} は，安定歩行区間 S_i の区間における角速度 d_t の平均値であり，以下の式で求める．

$$d_{S_i} = \frac{\int_{t_{S_i}^b}^{t_{S_i}^e} d_t dt}{t_{S_i}^e - t_{S_i}^b}$$

時刻 t が安定歩行区間 S_i の範囲に存在している場合（時刻 t が安定歩行区間 S_i の開始時刻 $t_{s_i}^b$ から終了時刻 $t_{s_i}^e$ の間にある場合）、オフセット値 o_t を時刻 t における角速度 d_t とみなす。また時刻 t が安定歩行区間 S_i と、その次の安定歩行区間 S_{i+1} の間に存在している場合、時刻 t が近い側の安定歩行区間から算出されたオフセット値を重視するよう、 S_i の終了時点 $t_{s_i}^e$ と、 S_{i+1} の開始時刻 $t_{s_{i+1}}^b$ を用いて、各オフセット値の重み付き平均として求める。

最後に、各時刻についてオフセット値 o_t を角速度 d_i から減算し、それをドリフト除去済みの角速度 d'_t とする。

$$d'_t = d_t - o_t$$

時刻 t が安定歩行区間 S_i の範囲に存在している場合に、オフセット値 o_t を d_{S_i} としない理由は、安定歩行区間におけるドリフト除去済み角速度 d'_t を 0 にして、歩行軌跡を完全な直線にするためである。もし o_t を d_{S_i} とすれば、安定歩行区間の開始時刻と終了時刻における進行方向は等しくなるが、その間の角速度は 0 にならず、歩行軌跡がわずかに蛇行してしまう。

図 8 の上から 3 番目は、ドリフト除去済みの角速度 d'_t を用いて歩行速度を一定とみなして歩行軌跡推定を行った結果である。軌跡が緑色になっている部分は安定歩行区間であり、その区間はすべて完全な直線軌跡となっているのがわかる。また、軌跡末端における最終的な進行方向を一般的な PDR 軌跡と比べると、ドリフト除去によって進行方向が正解に近づいているのがわかる。

曲がり角の角度など、建物全体に共通する知識が利用できる場合は、その知識を用いてさらに歩行軌跡を修正できる。本稿では、建物の曲がり角が 90 度であるような建物を想定し、安定歩行区間同士が垂直に交差するか、または平行な関係になるという制約をかける。図 8 の一番下は、ドリフト除去済みの歩行軌跡に対して、安定歩行区間同士が平行・垂直関係になる知識を適用した結果である。一般的な PDR の軌跡やドリフトを除去した軌跡よりも、歩行軌跡全体の形状や最終的な進行方向が正解経路に近づいていることがわかる。

ここで適用した曲がり角が 90 度であるという建物知識は、2 章で述べた渡辺らの右左折推定に基づく経路軌跡推定 [9] と同等の知識である。従来右左折推定では短時間の回転とその回転量に基づき右左折を推定している。そのため実環境での右左折時におけるイレギュラな動作を行った場合や瞬間的にセンサ誤差が大きくなった場合などに、検出漏れや誤検出を起こす可能性がある。誤検出が起きた場合、建物知識の適用によって逆に歩行軌跡を大きく誤ってしまう。一方ここで提案した建物知識適用では、高精度な検出が期待できる安定歩行区間同士を比較して建物知識を適用しているため、建物知識の適用による誤差の増大は

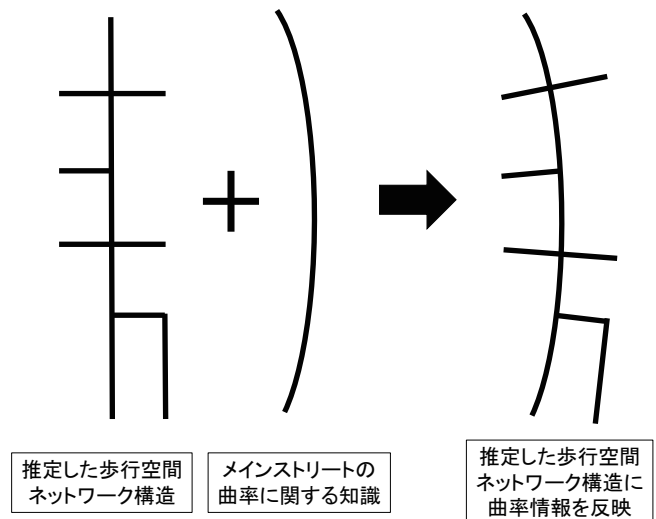


図 9 メインストリートの曲率の知識を適用した歩行空間ネットワーク構造の変形

少ないと考えられる。

ここで提案した歩行軌跡推定手法は通路が直線的であるという前提に基づいているが、一部の大型ショッピングモールや地下街など、メインストリートが緩やかな曲線になっている建物も珍しくない。そのような通路を歩行している間も、通路の曲率が大きくなれば安定歩行区間と判定されることがある。提案手法はその部分を直線であるとみなすため、実際の通路の形状とは異なった歩行軌跡が推定される。また、それらの統合によって得られる歩行空間ネットワーク構造も同様に、メイン通路が直線的となる。このままの歩行空間ネットワーク構造であっても、サービスによっては適用可能であろう。しかし、曲線的な通路の情報が必要なサービスも存在する。例えば、視認可能なランドマーク情報に基づいたナビゲーションシステム [13] では、ユーザの現在地点から視認可能なランドマークを、接近や右左折の目印として利用する。曲線的なメイン通路が直線的であると推定されてしまっている場合、曲線的な通路の先にある、実際には視認できないランドマークをユーザに提示してしまう可能性がある。

メインストリートが緩やかな曲線になっている建物については、その通路の曲率が獲得できれば、推定された歩行軌跡や建物構造にメインストリートの曲線情報を適用して、実環境に近い構造に変形させられるだろう（図 9）。

5. 信頼性の高い歩行センシングデータの発見

建物構造推定のような一部の応用では、特に高い精度での歩行軌跡推定が求められる。そこで、安定歩行区間の情報に基づいて、正確な歩行軌跡推定が期待できるような、信頼性の高い歩行センシングデータを発見する手法を提案する。

いくつかの歩行センシングデータを調査していく過程で、正確な歩行軌跡の推定が困難と思われる歩行センシ

グデータの存在が明らかになった。2章において動的にドリフト量が変化する例として挙げた図3は、信頼性の低いセンサデータの一つといえる。直線経路を歩行中であっても、その軌跡の一部が極端にドリフトしたり、蛇行したりする。また右左折の際の角度が実際よりも極端に小さくなったり大きくなったりする。その原因としては、センサデバイスが一時的に不安定になったなどのデバイスに起因する問題、混雑した通路を歩行する際に人を避けて歩行したなどの行動に起因する問題が考えられる。このような歩行センシングデータからは従来手法や本稿の提案手法を適用しても正確な歩行軌跡を推定しきれないと考えられる。回転角度に基づいて右左折推定を行う場合、センシングされた回転角度が実際の回転角度に満たなければ、右左折と判定されない。また前章で提案した歩行軌跡推定手法を適用しても、ドリフトが大きすぎたり頻繁に蛇行する軌跡は安定歩行区間として検出されない。そのため各時刻における正確なオフセット値を推定できなかったり、平行・垂直関係などの建物知識が適用できなかつたりする。

信頼性の高い歩行センシングデータは、安定歩行区間の割合によって検出できると考える。合理的に移動できており、かつセンサの動作も安定している場合、移動のうちの多くが安定歩行として検出される。そこで、歩行センシングデータの時間長のうち、安定歩行区間と検出された時間長の割合がある閾値を上回っている場合、そのデータを正確な歩行軌跡推定が期待できる信頼性の高いデータとみなす。本稿では経験的に、安定歩行区間割合の閾値を6割と定める。

6. 評価実験

安定歩行区間に基づく歩行軌跡推定と、信頼性の高い歩行センシングデータの発見について、有効性を確認するための評価実験を行った。評価には屋内歩行センシングコーパス HASC-IPSC[14]を使用した。評価に用いたデータの統計情報を表1に示す。今回の評価実験では、腰後ろ中央部のスマートフォンホルダに装着した Nexus4 (Android 4.2.1) によって獲得された角速度センサデータを用いた。また、3軸角速度センサのうち被験者の進行方向である Y 軸の値のみを使用した。本コーパスに収録されている歩行経路は、すべての曲がり角の角度が 90 度であり、それ以外の通路は直線である。

評価に用いた値は、歩行軌跡末端における推定進行方向の誤差である。進行方向は、初期方向を 0 度とした相対的な角度である。歩行センシングデータには折り返し階段によって複数階を移動するループ構造が多く含まれているため、進行方向は 360 度以上の値もとりうる。歩行終了時の進行方向の正解値は、HASC-IPSC に含まれる正解ラベルの右左折情報から求めた。比較対象として、以下の 4 種類の方法で歩行軌跡を推定し、正解の進行方向との差を求

表 1 評価データ HASC-IPSC の統計情報

被験者数	107 名 (男性 51 名, 女性 56 名)
被験者の年齢	20 歳 ~ 65 歳
経路の種類	114
延べ経路データ数	452
始点・終点の種類	32
経路ごとの被験者数	Avg: 3.92 SD: 1.33
1 経路に含まれる右左折数	Avg: 17.85 SD: 6.36
各経路データの時間長	Avg: 110.05 s SD: 35.97 s
各経路の長さ	Avg: 103.81 m SD: 32.52 m
1 リンクの時間	Avg: 6.53 s SD: 5.07 s
1 リンクの長さ	Avg: 6.16 m SD: 6.47 m

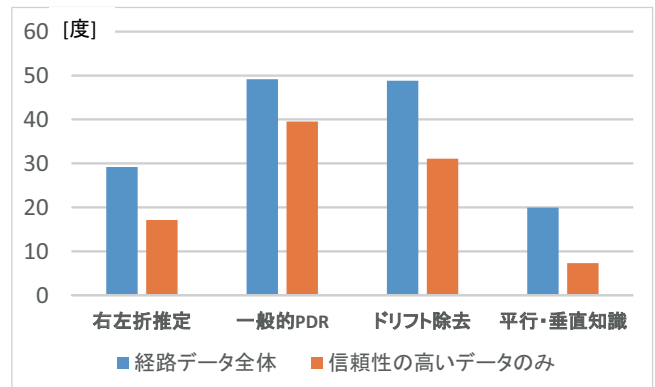


図 10 歩行軌跡末端における推定進行方向の平均誤差

めた。

- (1) 右左折推定によって得られる歩行軌跡
- (2) 一般的な PDR によって得られる歩行軌跡
- (3) ドリフト除去を行った歩行軌跡
- (4) 安定歩行区間同士が平行・垂直になるよう補正した歩行軌跡

右左折推定は渡辺らの手法を採用した。角速度の 2 つのゼロ交叉点間の積分値 (図 4 上側) が閾値 70 度以上であれば 90 度の右左折とみなし、閾値 150 度以上であれば 2 回の 90 度右左折を行ったとみなす [9] (図 4 下側)。また一般的な PDR による歩行軌跡推定では、角速度値にローパスフィルタをかけてノイズを除去し、各時刻における角度を積分によって求め、歩行軌跡を推定する。

評価に用いるデータセットは 2 種類用意した。一つすべての歩行センシングデータであり、もう一つは信頼性の高い歩行センシングデータのみ限定した場合のデータである。

歩行軌跡末端における推定進行方向の平均誤差を図 10

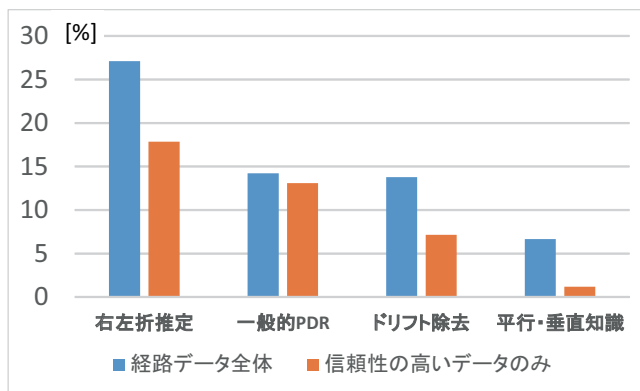


図 11 歩行軌跡末端における推定進行方向が 90 度以上の誤差になる割合

に示す。また、歩行軌跡末端における推定進行方向を大きく（ここでは 90 度以上）誤ってしまう割合を図 11 に示す。

まず右左折推定に着目する。右左折推定に基づく歩行軌跡推定は、ローパスのみを適用した場合やドリフト除去を行った場合に比べて平均誤差が小さいことがわかる。しかし、1 箇所でも右左折推定を誤ってしまうと、誤差は 90 度以上になってしまう。右左折推定の結果大きく進行方向を誤ってしまう割合は 27% となり、他の手法と比較して倍以上高い割合となっている。大きく歩行軌跡を誤る割合が高いため、高精度な建物構造の推定は困難と考えられる。

次に、一般的な PDR によって得られる歩行軌跡と、ドリフト除去を行った歩行軌跡の誤差平均を比較する。歩行センシングデータ全体に適用した場合はドリフト除去による誤差の改善が微小であったが、信頼性の高いデータに限定した場合は、ドリフト除去によって誤差が約 40 度から 30 度に低減できた。歩行センシングデータうち多くの箇所を安定歩行として検出できている場合は、ドリフト除去が有効に作用することがわかった。

平行・垂直知識の適用によって補正した歩行軌跡に着目すると、平均誤差と大きく誤る割合ともに最も小さくなった。特に、信頼性の高いデータに限定した場合は、誤差平均が約 7 度、大きく進行方向を誤る割合は約 1% となり、他の手法と比べて高い精度で歩行軌跡を推定できたといえる。

ただし、信頼性の高いデータとして検出されたのは全歩行センシングデータ 452 個のうち 84 個であり、全体の 19% 程度にとどまった。現状の手法では、ほとんどの歩行センシングデータが建物構造推定に利用できないとみなされてしまう。よって、ある建物の構造を推定するためには、少なくとも各通路をの歩行センシングデータが少なくとも 5 人分以上は必要といえる。クラウドセンシングなどによって十分な量の歩行センシングデータを獲得しなければならない。

7. おわりに

本稿では、右左折や蛇行を伴わない歩行が一定時間安定

してセンシングできている区間を安定歩行区間とみなし、その検出手法を提案した。また、安定歩行区間では直線的に歩行しているとみなして角速度のドリフトを除去し、さらに安定歩行区間同士が平行または垂直な関係にあるという建物知識に基づいて歩行軌跡を推定する手法を提案した。クラウドセンシングに基づき複数の歩行センシングデータから建物構造を生成するためには特に正確な歩行軌跡の推定が求められるが、センサの不具合や混雑した通路の歩行などの影響で正確な歩行軌跡の推定を期待できないデータが存在する。そこで、歩行センシングデータのうち安定歩行区間が一定の割合以上のものを、正確な歩行軌跡の推定が期待できる信頼性の高い歩行センシングデータとみなす手法を提案した。評価実験の結果、歩行軌跡修正手法と信頼性の高い歩行センシングデータの発見手法の双方について有効性が確認された。

今後は、階段や通路に関する建物構造の合理性を用いて、さらに歩行軌跡を高精度に推定する手法を検討する。また、気圧センサ等、他のセンサ信号に関しても、変化の瞬間を捉えるのではなく、変化の少ない安定した区間の検出やそれらの比較に基づいて行動認識や位置推定を行う手法を検討する。

謝辞 本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) 132306007, JSPS 科研費 25730056 の助成をうけて実施された。

参考文献

- [1] Kamisaka, D., Muramatsu, S., Iwamoto, T., Yokoyama, H. Design and Implementation of Pedestrian Dead Reckoning System on a Mobile Phone. *IEICE transactions on information and systems*, Vol. 94, No. 6, pp. 1137–1146, 2011.
- [2] Kouroggi, M., Sakata, N., Okuma, T., Kurata, T. Indoor/Outdoor Pedestrian Navigation with an Embedded GPS/Rfid/Self-Contained Sensor System. In *The 16th International Conference on Advances in Artificial Reality and Tele-Existence*, pp. 1310–1321, 2006.
- [3] 坂涼司, 梶克彦, 河口信夫. 磁気と WiFi 電波強度を含んだマップ情報に歩行者デッドレコニングを併用した屋内位置推定手法. *信学技報*, vol.113, no.399, ASN2013-122, pp. 23–28, 2014.
- [4] Gao, R., Zhao, M., Ye, T., et al. Jigsaw: Indoor Floor Plan Reconstruction via Mobile Crowdsensing. In *The 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2014)*, pp. 249–260, 2014.
- [5] Jiang, Y., Yun, X., Pan, X., et al. Hallway based Automatic Indoor Floorplan Construction using Room Fingerprints. In *The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2013)*, pp. 315–324, 2013.
- [6] Hardegger, M., Troster, G., Roggen D. Improved ActionSLAM for Long-term Indoor Tracking with Wearable Motion Sensors. In *International Semantic Web Conference (ISWC 2013)*, pp. 1–8, 2013.
- [7] 梶克彦, 河口信夫. 建物内移動情報の部分マッチングに基

- づく建物構造生成. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム, pp. 1413-1420, 2013.
- [8] 森信一郎, 肥田一生, 花田雄一, 峰野博史, 水野忠則. ばねモデルを用いた歩行軌跡補間技術. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2010) シンポジウム, pp. 953-960, 2010.
- [9] 渡辺穂高, 渡辺翔太, 梶克彦, 河口信夫. 特定の移動経路を対象とした行動イベント系列に基づく位置推定手法. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp. 1897-1903, 2012.
- [10] 沢田健介, 花田雄一, 森信一郎, 佐々木重信. 歩行軌跡形状を歩行者用道路トポロジ情報から検索する屋内歩行者位置推定法. 情報処理学会論文誌, Vol. 54, pp. 237-248, 2012.
- [11] Ogawa, N., Kaji, K., Kawaguchi, N. Effects of Number of Subjects on Activity Recognition- Findings from HASC2010corpus - . In *Proceedings of Workshop on Frontiers in Activity Recognition using Pervasive Sensing (IWFAR)*, pp. 48-51, 2011.
- [12] 安齋恵一, 岡島匠吾, 坪井宏. 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. 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2011) シンポジウム論文集, pp. 921-927, 2011.
- [13] 渡邊翔太, 梶克彦, 河口信夫. ランドマークの視認性に基づく歩行者向け音声ナビゲーションの提案. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp. 1897-1903, 2012.
- [14] 梶克彦, 渡辺穂高, 坂涼司, 河口信夫. HASC-IPSC: 屋内歩行センシングコーパス. 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-MBL-70, No.41, pp. 1-8, 2014.