

同一経路歩行軌跡の統合と建物構造知識に基づく 高精度歩行軌跡推定

岩瀬 陽香¹ 四ツ谷 昂亮¹ 伊藤 信行² 内藤 克浩¹ 中條 直也¹ 水野 忠則¹ 梶 克彦¹

概要: 本研究の最終目標は、特定建物内の歩行センシングデータの複数ユーザからの収集と、推定された3次元歩行軌跡の統合による、歩行空間ネットワーク構造の自動生成である。歩行空間ネットワーク構造の生成のためには、個々の歩行軌跡の正確な推定が必要である。我々はこれまでに、歩行の合理性に加え、直線的な通路や直角の曲がり角といった建物知識に基づいた歩行軌跡推定手法を提案している。本稿では歩行軌跡推定のさらなる高精度化を目指す。はじめに複数の同一経路歩行軌跡を統合し、正確な歩行軌跡を推定する。安定して直線的に歩行している区間（安定歩行区間）を検出し、同一経路歩行軌跡において、それらの区間同士の対応関係を、進行方向や歩行距離を利用して発見する。複数の対応する安定歩行区間をマージして、より正確な歩行軌跡を求める。次に、建物の特徴的な構造のひとつである折り返し階段を検出し、それに基づき歩行軌跡を補正する。推定された3次元歩行軌跡からフロア間移動している区間を検出し、その区間内でさらに安定歩行区間を検出する。検出された安定歩行区間の進行方向の角度差がおおよそ180度になっているペアが検出されれば、それらは折り返し階段の踊り場を挟んだ前半と後半とみなす。折り返し階段の特徴として、階段の傾斜が等しい、複数階の階段がある場合階段同士の位置関係は垂直である、折り返し階段の踊り場を挟んだ前半と後半の長さは等しい、などが挙げられる。これらの折り返し階段の特徴を用いて歩行軌跡を補正する。

Estimation of Highly Accurate Walking Trajectory Based on Integration of Same Route Walking Trajectory and Knowledge of Building Structure

HARUKA IWASE¹ KOSUKE YOTSUYA¹ NOBUYUKI ITO² KATSUHIRO NAITO¹ NAOYA CHUJO¹
TADANORI MIZUNO¹ KATSUHIKO KAJI¹

1. はじめに

近年、機械化による利便性のために現代人の運動不足が蔓延している。デスクワークを主な業務としている人にとって、運動は必要と感じていながらも忙しいためにできないものといえる。運動不足は生活習慣病の原因となるため、ヘルスケアはオフィスワーカーの重要な課題である。

建物構造情報はヘルスケアをはじめとする屋内位置情報サービスにとって必要な情報である。より正確な建物構造

が求められると、自分の現在位置と目的地の位置関係が把握できる。それにより建物内の部署間や食堂への移動を行うとき、階段などを使った経路を推奨し運動促進効果を期待できる。また、オフィスのレイアウト改善にも繋がる。

本研究では、特定建物内の歩行センシングデータの複数ユーザからの収集と、推定された3次元歩行軌跡の統合による、歩行空間ネットワーク構造（図1）の自動生成を最終目標とする。歩行空間ネットワーク構造の生成のためには、個々の歩行軌跡の正確な推定が必要である。我々はこれまでに、歩行の合理性に加え、直線的な通路や直角の曲がり角といった建物知識に基づいた歩行軌跡推定手法を提案している（図2）[1]。しかし現状では、推定した歩行軌

¹ 愛知工業大学 情報科学部

Aichi Institute of Technology

² 三菱電機エンジニアリング株式会社

Mitsubishi Electric Engineering Company

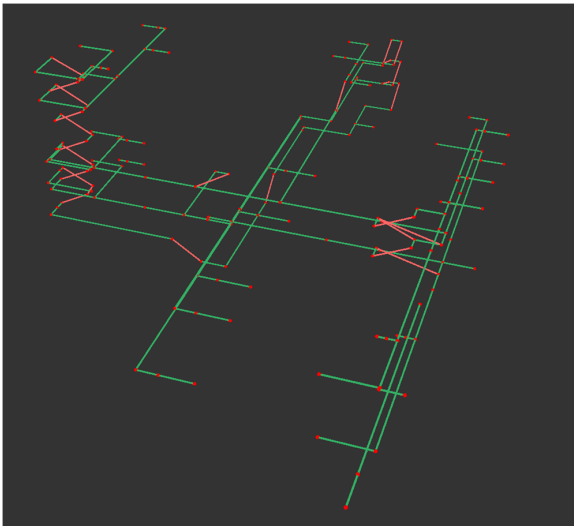


図 1 建物の歩行空間ネットワーク構造

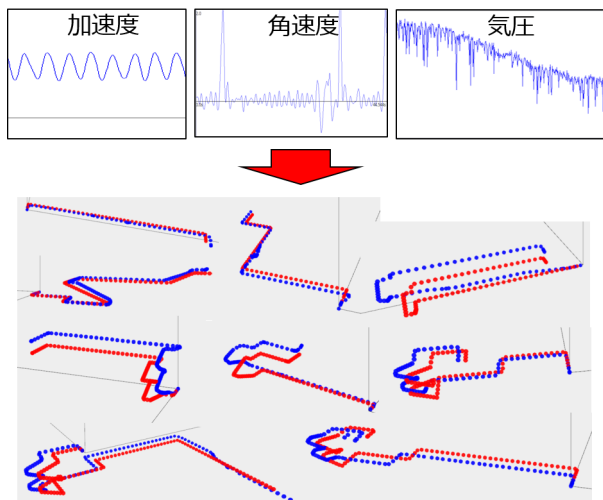


図 2 歩行軌跡推定の現状 (赤：正解軌跡，青：推定軌跡)

跡が実際歩いた歩行軌跡に沿っていない場合がある，推定軌跡に大きな誤差がのる場合があるなどの問題があるため，より正確な推定歩行軌跡を求める必要がある。

2. 関連研究

モバイル端末を対象とした屋内位置推定は，BLE ビーコンなどの電波発信機を用いるものと端末内の加速度や角速度，磁気センサを用いるものが提案されている．その中でもスマートフォンに内蔵されている各種センサ類を用いた歩行者自律航法（PDR）は GPS を使用せず，また省電力性に優れているため屋内位置推定の手法として研究が進められている．それらを利用して近年では，複数人が対象となる建物内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も進められている [2][3][4][5][6]．

正確な建物構造の推定を実現する為には，歩行軌跡の正確な推定が必要となる．一般的な PDR では加速度，角速

度，磁気データから歩数，歩幅，進行方向を推定する [7]．しかしこの手法では直前の位置からの値の変化によって位置推定を行うため，誤差が蓄積しやすい問題点が挙げられる．

誤差の蓄積を改善する手法としてマップマッチングや RFID の利用が提案されている．直進時や右左折時にマップマッチングを行い位置を補正する手法や，RFID 測位と階段やエスカレータの動作認識によるマップマッチングを組み合わせて誤差を低減する手法がある [8][9]．

本研究の最終目的は歩行空間ネットワーク構造の自動生成である．しかし先行研究であるマップマッチングを利用するには建物構造が必要なため本研究では利用できず，建物構造を求めたいと考えて RFID などのインフラを整備する手間をかけるならば，マップを作成したほうが手間とコストも抑えられる為，これも本研究の対象外となる．そのため特別な設備を必要とせず，経路を歩くだけで歩行軌跡推定を行い建物構造を求められる PDR の精度の向上が必要になる．

多くの建物は通路が直線的であり，多くの場合，人は合理的に行動するため，曲がり角や混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．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 [10][11]．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 3 は，通路を歩いていて前方から来る人を避ける動作を行っており，右左折推定 [11] 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左に小さく曲がって避け，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左曲がりや右曲がりやが 1 回ずつ検出されれば，最終的な歩行軌跡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 3 のように一方だけが右左折と判定されると，最終的な歩行軌跡は大きく異なってしまふ．

そこで我々は安定歩行区間という概念を導入し，歩行軌跡の高精度化に取り組んでいる．安定歩行区間とは一定時間以上安定して直線的に歩行している区間を指す．先に述べた通り歩行軌跡推定の際，短時間の動作である右左折の推定ではセンサのノイズや実際に測定を行うときのイレギュラな動作の影響を大きく受けるため，実際に右左折した箇所を検出できなかつたり，曲がり角でない所を右左折と検出してしまう場合がある．一方で，安定歩行区間は角速度センサの値の変化量が少ないため検出精度が高い．この特徴を利用して安定歩行区間の検出を行い利用したところ，一般的な PDR のように大きな値の変化量を直接推定する手法と比べて，歩行軌跡の推定精度が向上した [1]．

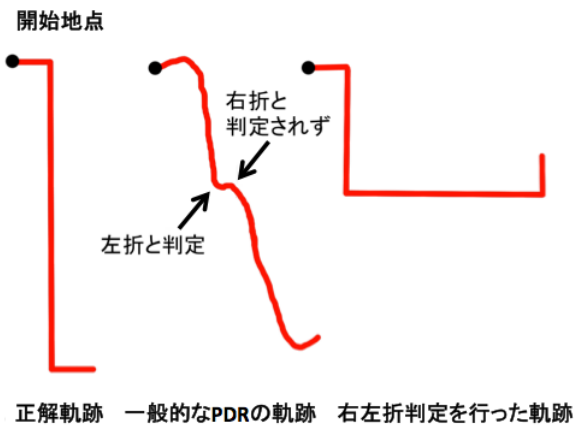


図 3 右左折判定の失敗例

しかし、建物構造推定のための軌跡としてはまだ不十分な精度である、という問題点が挙げられる。各経路に含まれる安定歩行区間の割合から、その歩行センシングデータの信頼性が高いか確認できる [1]。現状の手法ではデータの信頼性にばらつきが見られており、ほとんどの歩行センシングデータが建物構造情報に利用できないとみなされてしまう。そこで我々は、複数の同一経路歩行軌跡の中で対応関係にある安定歩行区間を比較し、歩行軌跡の統合を行って誤差の少ない歩行軌跡を求め、また、建物の特徴的な構造のひとつである折り返し階段を検出し、それに基づいて歩行軌跡の修正を行う。これらの手法を用いて問題点の解決を行う。

3. 複数の同一経路歩行軌跡統合による歩行軌跡推定

建物内では何人もの人が様々な経路を歩いているため複数の経路歩行軌跡が求められる。その中でも複数の同一経路歩行軌跡を統合すると、より高精度な歩行軌跡が求められるのではないかと考えた (図 4)。同一経路歩行軌跡統合を実現するため、安定歩行区間を利用する。また本章では推定する進行方向を地面に対して水平な面に限定し、高さ方向に関しては考慮しない。これは地面に対して水平な方向での歩行軌跡推定を行い、各フロアごとに高精度な歩行軌跡を推定するためである。また、高さ方向の情報を含めた高精度な歩行軌跡の推定は 4 章で行う。

3.1 安定歩行区間の検出方法

安定歩行区間の検出には、歩行している進行方向ベクトルとセンシングした時間を利用する。センシングを行った時間から次にセンシングを行った時間までの進行方向を 3 次元座標の地面に対して水平な成分からベクトルで求める。進行方向のベクトル同士のなす角を求めて進行方向の変化量を見る。この進行方向の変化量に閾値を設け、その範囲に収まっている区間を検出する。さらに、その状態が

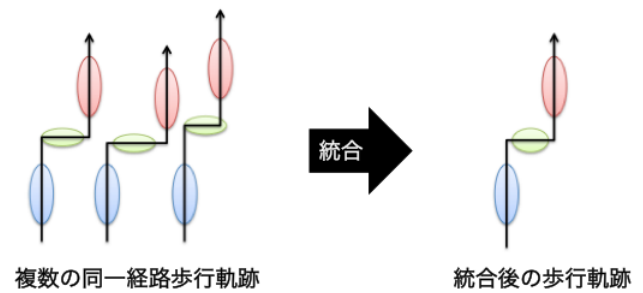


図 4 複数の安定歩行区間の統合

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。本稿では試験的に、進行方向の変化量の閾値を 60 度、継続時間の閾値を 3 秒と定めた。

ここでは、常に歩いて移動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している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 [12]、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 [8] 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。

3.2 安定歩行区間の対応付けと統合方法

安定歩行区間を検出後、それらの進行方向や歩行距離を利用し、同一経路上の対応している区間同士を発見する。区間同士の対応付けを行うと同一経路歩行軌跡の統合ができ、誤差の少ない歩行軌跡が求まると期待できる。

統合の際には、対応させた安定歩行区間の歩行距離や位置関係を比較し平均化する。区間比較の際、明らかに歩行距離や位置関係がズレているものは比較から除外し、誤差の多い歩行軌跡の統合による精度低下を抑制する。

3.3 歩行軌跡と安定歩行区間の可視化ラベリングツールの作成

安定歩行区間の対応付けを自動的に行うアルゴリズムを作成する足がかりとして、複数の同一経路歩行軌跡に対するラベリングを手動で行うツールを作成する (図 5)。ラベリングとは対応関係にある安定歩行区間にラベルを付与し、経路ごとに区分けを行う作業を指す。対応関係とは複数の同一経路歩行軌跡中で同じ直線経路を歩行している安定歩行区間同士の関係を指す。ラベリングツールに必要な機能として、歩行軌跡や安定歩行区間を複数並べて可視化する機能、歩行センシング時間を利用した任意の時間内の軌

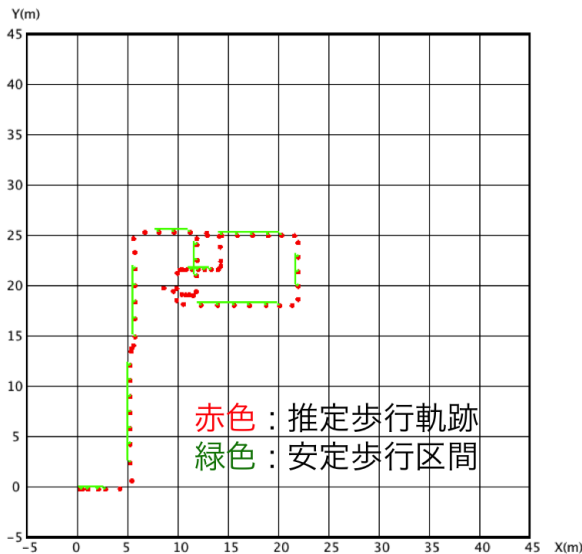


図 5 可視化ラベリングツールの現状

跡を表示するスライダーの機能、複数の同一経路歩行軌跡に対するラベリングを手動で行う機能が考えられる。ラベリングツールを用いて、複数の安定歩行区間同士の対応付けを自動的に行うアルゴリズムの精度評価に利用する正解データを作成する。

歩行軌跡の中で安定歩行区間がどの直線経路と対応関係にあるのか確認するために、同一経路の正解座標と複数の推定座標、その安定歩行区間を並べて可視化する。経路歩行時のセンシングした時間と座標情報を利用して歩行軌跡の可視化を行う。センシングした時間ごとの座標を表示すると時間ごとの進行方向が分かり歩行軌跡が表現される。

歩行軌跡の中から余分な情報を減らし注目して表示したい部分だけを確認するために、任意の開始時間から終了時間までの歩行軌跡を可視化する。例えば図 6 のように 1 階の経路から階段を使って 2 階へ昇った時に、1 階ではどのように歩いたか、階段ではどのように歩いたかを個別に確認できる。

経路の正解データ内にある直線経路と、直線経路と対応関係にある複数の安定歩行区間の選択を手動で行い、選択した経路ごとにラベルを付与する (図 7)。経路の正解データ内のノード情報を利用して直線経路の選択を行う。その後対応関係にある複数の安定歩行区間を選択し、ひとつの直線経路に対するラベルを付与する。この作業を正解データ内にあるすべての直線経路に対して行い、そのラベルを利用して対応付けの正解データを作成する。

4. 建物知識の導入による歩行軌跡修正

歩行軌跡のさらなる高精度化を目指すため、一般的な建物知識を導入する。建物知識として、通路は直線的、曲がり角は直角、エレベータは垂直方向に直線的、などが挙げられる。本章では折り返し階段に着目し、折り返し階段の

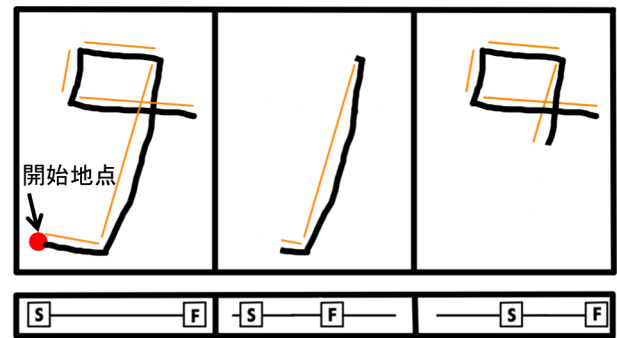


図 6 任意の時間中の歩行軌跡表現 (S : Start, F : Finish)

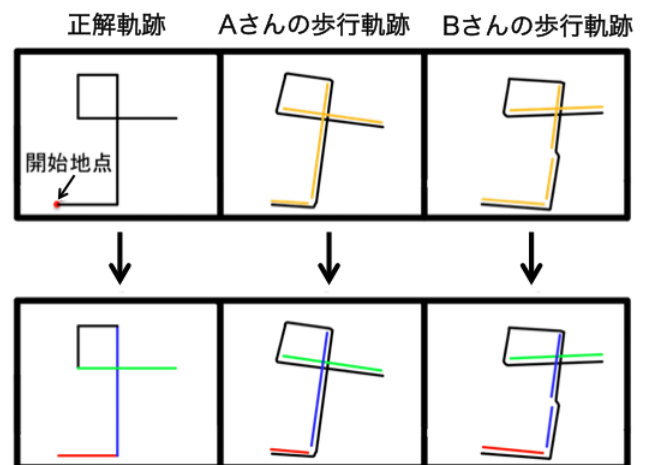


図 7 安定歩行区間のラベリング

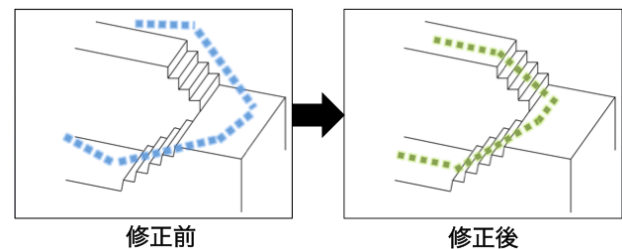


図 8 折り返し階段の建物構造に基づく歩行軌跡の修正

建物知識から歩行軌跡の修正を行いさらなる高精度化を目指す。

折り返し階段の特徴として、傾斜が等しい、踊り場を挟んだ前半と後半の長さは等しく水平成分は平行である、などが挙げられる。これらの折り返し階段の特徴を用いて歩行軌跡を折り返し階段の建物に沿うように修正を行う (図 8)。

4.1 折り返し階段の検出

折り返し階段の建物知識から歩行軌跡の修正を行うには、まず 3 次元座標の歩行軌跡から折り返し階段を歩行している区間の検出を行う必要がある。折り返し階段はフロア間移動の際に使用される建物構造物であるため、折り返し階段を検出するには、まず 3 次元歩行軌跡からフロア

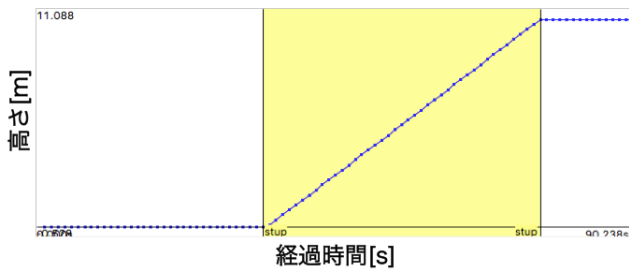


図 9 フロア間移動区間のラベル付け

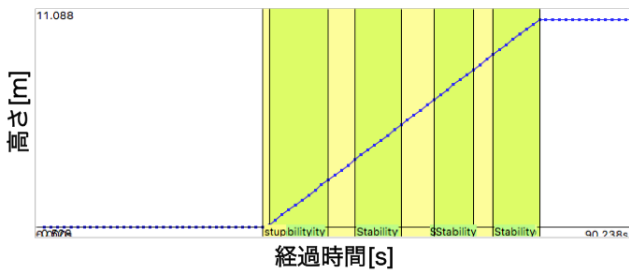


図 10 安定歩行区間のラベル付け

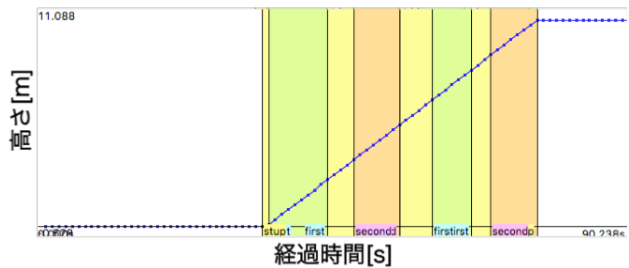


図 11 折り返し階段の前半と後半のラベル付け

間移動している区間を検出する。3次元座標データから垂直方向の変化がみられるのはZ軸であるので、Z軸の値が変化している区間はフロア間移動している区間であると、図9のようにラベル付けを行う。

次に、3次元座標データから1秒毎の進行方向ベクトルを生成する。折り返し階段の前半と後半は共に直線的な通路であるので、フロア間移動している区間内でさらに安定歩行区間を検出しラベル付けを行う(図10)。検出されたはじめの2つの安定歩行区間の進行方向の角度差がおおよそ180度で対になっていれば、それらは折り返し階段の踊り場を挟んだ前半と後半のペアであるとみなしラベル付けを行う(図11)。ただし、それら2つの安定歩行区間の進行方向の角度差がおおよそ180度で対であっても、間の時間が一般的な折り返し階段の踊り場を歩行する時間より長かった場合は折り返し階段ではないとみなす。踊り場とみなさない間の時間は、確実に踊り場を歩行する時間ではない10秒に設定する。

4.2 傾斜の統一

建物知識のひとつとして、折り返し階段の前半と後半の傾斜角度はどこも等しいという点が挙げられる。現状の推

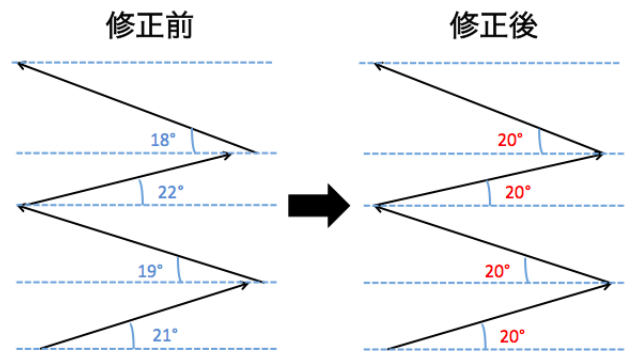


図 12 折り返し階段の傾斜角度の統一

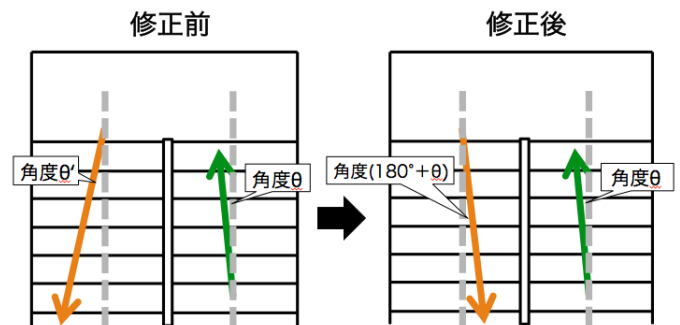


図 13 水平成分の平行化

定歩行軌跡は、折り返し階段の前半と後半の傾斜角度に微小なばらつきがみられる。折り返し階段の前半、後半それぞれの進行方向と、その水平成分の進行方向との角度差から傾斜角度をそれぞれ求め、それらから平均傾斜角度を求める。ばらつきのある折り返し階段の前半と後半の傾斜角度を、求めた平均傾斜角度に修正し、前半と後半がすべて同じ傾斜角度になるよう歩行軌跡を修正する(図12)。

4.3 折り返し階段の前半と後半の水平成分の平行化

建物知識のひとつとして、折り返し階段を上から見た場合、折り返し階段の前半と後半は平行であるという点が挙げられる。折り返し階段を昇降すると、特に複数階連続して続いている折り返し階段ほど、ドリフトが蓄積していくために徐々にドリフトが増え進行方向ベクトルの信頼性に欠けてくる。そのため、折り返し階段を昇降し始めた最初の折り返し階段の前半の進行方向ベクトルを基準とし、以降の折り返し階段の前半の進行方向ベクトルを基準に合わせて修正し、後半の進行方向ベクトルは基準と180度反対になるよう歩行軌跡を修正する(図13)。

4.4 折り返し階段の前半と後半の長さの統一

建物知識のひとつとして、折り返し階段の前半と後半の長さは等しいという点が挙げられる(図14)。折り返し階段の前半と後半を少しの誤差もなく同じ時間で歩行する人はいないと考えられる。そのため、前半と後半を同じ歩行時間になるよう修正を行っても、折り返し階段の前半と後

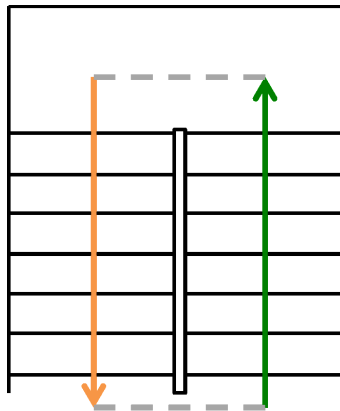


図 14 同一である折り返し階段の前半と後半の長さ

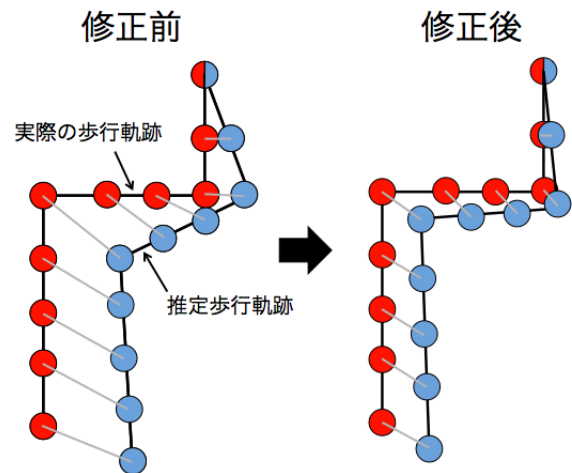


図 16 精度評価の手法

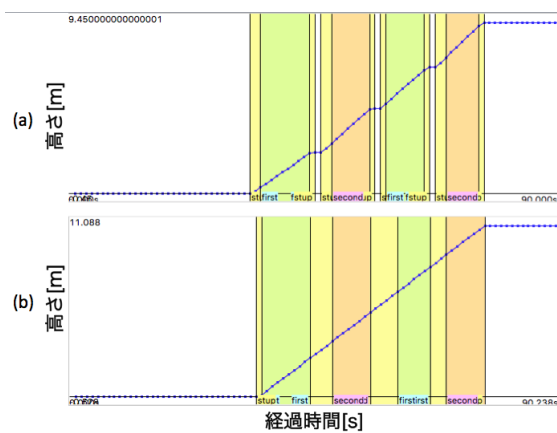


図 15 正解座標データとの比較

半の長さが統一されるとは言い難い。

そこで、折り返し階段の踊り場を手がかりとして利用する。踊り場の歩行には大きく時間はかからないと考えられるため、折り返し階段を検出する場合と同様に進行方向ベクトルから短い時間の安定歩行区間の検出を行う。踊り場が検出されたら、上下階の踊り場が垂直関係になるよう歩行軌跡を修正する。

4.5 折り返し階段検出精度の検証

4.1章で提案した折り返し階段の検出精度の検証を行った。評価には屋内歩行センシングコーパスである HASC-IPSC[13]を用いて、推定された歩行軌跡 [1] を対象とした。

HASC-IPSCには、推定座標データの他に実際の歩行経路である3次元の正解座標データが含まれている。正解座標データからも同様に、4.1章で提案した手法で折り返し階段を検出した。図 15 の (a) が正解座標データから検出した折り返し階段である。正解座標データから検出した折り返し階段を正解として、図 15 の (b) である推定座標データから検出した折り返し階段と比較をして精度確認を行ったところ、精度は約 99% となった。

5. 評価実験

本稿で提案する歩行軌跡推定についての推定精度評価の手法を提案する。正解座標データと歩行軌跡を修正する前の推定座標データで、1秒毎のそれぞれ対応する時間ごとの誤差を算出し、誤差の平均値を求める。同様に、正解座標データと歩行軌跡を修正した後の推定座標データで、1秒毎のそれぞれ対応する時間ごとの誤差を算出し、誤差の平均値を求める。歩行軌跡を修正する前と後とで誤差の平均値の比較を行い、歩行軌跡を修正した後の方が誤差の平均値が小さくなっていれば、精度が向上したものとする (図 16)。

6. おわりに

本研究は歩行空間ネットワーク構造の自動生成を最終目標としている。その第一段階として、本稿では同一歩行軌跡の統合と建物知識から歩行軌跡を高精度化する手法を提案した。

今後の課題として以下の2点が挙げられる。はじめにアルゴリズムの未実装部分を完成させる。次に、HASC-IPSCにアルゴリズムを適用させ、修正した推定歩行軌跡の推定精度評価を適宜行い、精度向上の過程を詳細に検証する。

参考文献

- [1] 梶克彦, 河口信夫, 安定センシング区間検出に基づく3次元歩行軌跡推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.1, pp. 12-24 (2016).
- [2] 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).
- [3] Jiang, Y., Yun, X., Pan, X., et al.: Hallway based Automatic Indoor Floorplan Construction using Room Fingerprints, The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2013), pp. 315-324 (2013).

- [4] Hardegger, M., Troster, G., Roggen D.: Improved ActionSLAM for Long-term Indoor Tracking with Wearable Motion Sensors, International Semantic Web Conference (ISWC 2013), pp. 1-8 (2013)
- [5] Alzantot, M., Youssef, M.: CrowdInside: Automatic-Construction of Indoor Floorplans, the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL' 12), pp. 99-108 (2012).
- [6] Shin, H., Chon, Y., Cha, H.: Unsupervised Construction of an Indoor Floor Plan Using a Smartphone, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, PartC: Applications and Reviews, Vol. 42, Issue.6, pp. 889-898 (2012)
- [7] 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).
- [8] 安齋恵一, 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, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム, 2011 論文集, 第 2011 巻, pp. 921-927 (2011).
- [9] 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 (行動センシングと支援), シンポジウムモバイル研究論文集, Vol.2008, pp. 151-156 (2008).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Ogawa, N., Kaji, K., Kawaguchi, N.: Effects of Number of Subjects on Activity Recognition- Findings from HASC2010corpus - , Proceedings of Workshop on Frontiers in Activity Recognition using Pervasive Sensing (IWFAR), pp. 48-51 (2011).
- [13] Kaji, K., Watanabe, H., Ban, R., Kawaguchi, N.: HASC-IPSC: Indoor Pedestrian Sensing Corpus with a Balance of Gender and Age for Indoor Positioning and Floorplan Generation Researches, International Workshop on Human Activity Sensing Corpus and Its Application (HASCA2013), pp. 605-610 (2013).