

加速度平面成分を用いた1歩ごとの進行方向推定

清水 祥吾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：一般的な PDR では、進行方向を角速度センサの値から求めているため横歩きや後退などの角速度の値が変化しない行動の推定が困難である。そのため人通りが多いショッピングモールなどでの進行方向が頻繁に変化する場所での長期的な位置推定が行えない。そこで本研究では、歩行者自律航法 (PDR) を利用し屋内環境での加速度平面成分を用いて 1 歩ごとの進行方向推定を行う。進行方向推定には、人が歩行している際の加速度平面成分に着目した。歩行時の加速度平面成分は進行方向に対して加速と減速を繰り返すという性質がある。屋内で直進と横歩きを含むルートを歩いた被験者 10 人の加速度データを使用した評価実験の結果、進行方向の角度誤差の平均は 21° 程度であった。

Direction Estimation Method for Each Step By Using Plane Component of Accelerometer

Shogo Shimizu¹ Nobuyuki Ito² Katsuhiko Naito¹ Naoya Chujo¹ Tadanori Mizuno¹ Katsuhiko Kaji¹

1. はじめに

近年、スマートフォンなどの普及により、Google マップなどの端末に内蔵されているセンサを用いた位置情報を利用するナビゲーションサービスやアプリケーションが提供されている。これらのアプリケーションはスマートフォンなどに搭載されている GPS を用いて位置情報の取得を行っている。しかし地下街やショッピングモールなどの屋内での環境では電波が遮断されてしまい GPS を利用できないため高精度の位置推定は困難である。また GPS を使用するためスマートフォンの消費する電力が高くなるという問題点が挙げられる。このような屋内環境での位置推定を行う手法として、屋内に設置されている無線 LAN アクセスポイントを利用した手法やモバイル端末に内蔵されている角速度や加速度センサを利用した歩行者自律航法 (PDR : Pedestrian Dead Reckoning) がある [1][2][3][4]。

屋内位置推定手法は様々な研究が行われているが、その中でも有力な屋内位置推定として PDR が挙げられる。PDR は、外部からの情報を利用せず、スマートフォンに

内蔵されている加速度や角速度、気圧センサを用いて歩幅や進行方向、高さの変化を推定し、スタート地点からの相対位置を求める。近年爆発的に普及しているスマートフォンには PDR に必要なセンサ群が内蔵されているため、スマートフォンを用いた PDR は有用性が高いといえる。

既存の一般的な PDR は、進行方向推定について実環境でのロバスト性が低いという問題がある。混雑しているショッピングモールなどでは、横歩きや後退などが発生する。しかし、一般的な PDR では進行方向を角速度センサの値から求めているため角速度の値が変化しない歩行を全て直進と推定してしまう (図 1)。このような行動の歩行データが含まれていると正確な屋内位置推定を行えないため、横歩きや後退などへの対応により PDR の実環境でのロバスト性を向上させる必要がある。

そこで本研究では、横歩きや後退についても進行方向を推定可能な手法を提案する。進行方向推定の手がかりとして、加速度平面成分に着目する。歩行時の加速度平面成分は進行方向に対して加速と減速を繰り返すという性質があるため、この性質を捉えて 1 歩ごとの進行方向を推定する。

2. 関連研究

屋内位置推定の技術は様々な研究が進められている。GPS を利用できない屋内の位置推定手法には、屋内で設置

¹ 愛知工業大学

Aichi Institute of Technology

² 三菱電機エンジニアリング

Mitsubishi Electric Engineering

されている無線 LAN のアクセスポイントを利用した手法や、スマートフォンなどの端末を用いて、端末に内蔵されている加速度、角速度、気圧センサを用いる PDR などが提案されている [1][2][3][4][5].

PDR は外部の情報を利用せずセンサ等の値のみを利用して屋内位置推定を行う。加速度、角速度、気圧、磁気センサを用いて、歩行を開始した座標から歩幅、進行方向、階段の昇降などを計算しスタート地点からの相対的な位置推定を行う。現在、ほとんどのスマートフォンには PDR に必要なセンサが搭載されているため追加の投資を必要としない屋内位置推定手法として注目を集めている。

しかし、一般的な PDR のアルゴリズムでは、横歩きや後退などの進行方向の推定が困難という問題点が挙げられる。一般的な PDR では進行方向は角速度センサを用いて推定しているが、直進している途中で人や障害物を 1 歩横に回避する行動や後退した場合、角速度の値が変化しないため、推定した歩行軌跡では直進していると推定されてしまう。混雑しているショッピングモールやナビゲーション看板を見失い道に迷っているような際には横歩きや後退が頻繁に現れる。そのような場面でも全ての歩行が直進と判定され、その結果屋内位置推定精度が低下してしまう。

PDR において端末の向きと進行方向の関係を捉えるための手法として、複数歩分の加速度平面成分を用いる手法が存在する [7][8]。人が歩行している際の加速度平面成分は、進行方向に対して加速と減速を繰り返しているという特徴がある [7]。その特徴を利用して、歩行している時の複数歩ごとや指定した時間の加速度平面成分のデータから加速度ベクトルを求めて、加速度ベクトルと直進ベクトルのなす角度の平均を用いて端末の向きに対する進行方向を求める。例えば腰ポケット内で端末が斜めになっていても、その端末からみてどちらの方向に進んでいるかがわかる、というものである。しかし、これらの手法も他の PDR と同様、端末の姿勢は固定であり、人は体の正面に向けて歩くという仮定があり、PDR における進行方向推定は角速度センサに依存している。また、複数歩の長い時間の歩行データから平均の角度を進行方向として推定する手法である。そのため、複数歩の直進している歩行データの中に、人や障害物を回避するために 1 歩横に回避した等の直進していない歩行データが含まれていた場合でも進行方向推定には平均値を使用しているため、直進のデータに吸収されて回避した時の 1 歩の進行方向推定ができない。

横歩きや後退を含む 1 歩ごとの進行方向推定が実現されれば、PDR の実世界ロバスト性が向上するだけでなく、他の応用も可能になる。例えばリアルタイムで横歩きや後退している箇所を多数のユーザから収集し分析すれば、混雑状況を把握できたり、迷いやすい地点を発見したりといった応用につながると考える。

そこで本研究では、横歩きや後退にも対応可能な 1 歩毎

の進行方向推定を行う (図 1)。進行方向推定には、既存研究 [7] と同様に進行方向への変化がある加速度平面成分を用いる。

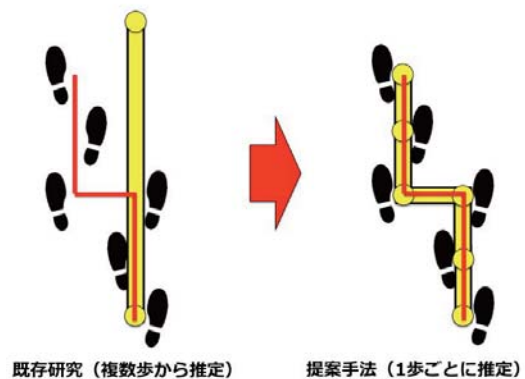


図 1 既存研究との比較 (黄色：推定歩行軌跡, 赤線：実際の歩行ルート)

3. 加速度平面成分を用いた 1 歩ごとの進行方向推定

提案手法では、歩行時の加速度平面成分のデータを用いて 1 歩ごとの進行方向推定を行う。人は歩行時に進行方向に対して加速と減速を繰り返しているため、加速度平面成分データの分布は進行方向を中心に分布する特徴がある。この特徴を利用して進行方向推定を行う。提案手法では加速度平面成分を用いて 1 歩ごとの進行方向推定を行うため、歩行中に人や障害物を回避するような少ない歩数の行動でも追従できる。また、提案手法では角速度センサを使用しないためドリフトの影響を受けないという特徴がある。本手法では、スマートフォンホルダのように固定された状態で装着されており、歩行時にその端末姿勢が大幅に変化することはない、という前提をおいている。

4. 進行方向推定アルゴリズム

加速度平面成分のデータを用いて 1 歩ごとの進行方向推定を行う。はじめに、端末姿勢推定によって加速度平面成分と垂直成分を求める [7]。次に、加速度垂直成分のデータから 1 歩ごとのデータを検出するステップ検出を行う。最後に 1 歩ごとの進行方向推定を行う。以下に各フェーズのアルゴリズムを示す。

4.1 端末姿勢推定

加速度の平面成分と垂直成分を分離するために端末姿勢推定を行う。端末を装着した際、必ず端末の加速度センサのどれか 1 つの軸が重力ベクトルと完全に一致するように装着するのは困難である。また、端末の軸が進行方向に対して一致していないと、進行方向とする軸以外に加速度値が分散してしまい正確な加速度平面成分のデータの取得が

困難になる。

スマートフォンに内蔵されている3軸加速度センサの軸を図2に示す。スマートフォンの加速度センサの平面成分とする2つの軸が地面と水平でない、進行方向への歩行に伴う平面成分の加速度が他の軸に分散してしまい正確な歩行データの収集が困難である。今回は、歩行に伴う加速度の値がセンサに乗ってしまうと端末姿勢推定が困難になるため、重力加速度以外の影響が極めて小さい、歩行を開始する前の静止している加速度データを利用した。端末姿勢推定には重力1[G]を利用して推定を行う。加速度センサには常時、重力の値が乗っかっている。そのため、端末の軸が傾いていると加速度センサのX、Y、Z値に重力が分散する。X、Y、Z軸の値を用いて、各値と重力方向ベクトルとのなす角を求める。x軸中心とした回転角度の α° 、y軸中心とした回転角度の β° 、z軸中心とした回転角度の γ° を各軸中心とした回転角度を求め、その結果を端末の初期姿勢とする(図3)。

次に、 α 、 β 、 γ の角度を用いて座標系変換を行う。加速度センサの値は端末の軸を基準とした座標系で取得されるため、端末の垂直成分とする軸を重力方向のベクトルと一致するように 3×3 の回転行列を用いて、端末座標系の値から重力成分ベクトルを垂直成分とする世界座標系への座標系変換を行う。座標系変換を行うと端末が傾いていた場合の歩行時の加速度の値が3軸それぞれに分散してしまう問題点を改善できる。

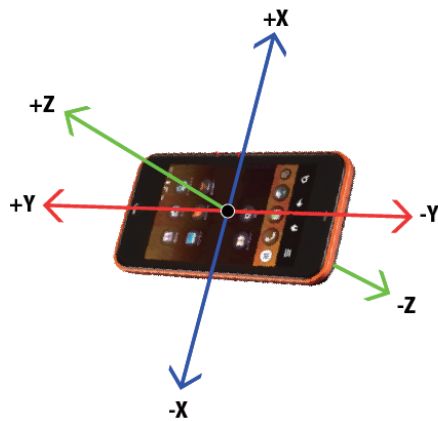


図2 3軸加速度センサの軸

4.2 ステップ検出

次にステップ検出を行い、1歩ごとの加速度平面成分データを抽出する。ステップ検出には、姿勢推定を行った歩行データの垂直成分であるZ軸の値を用いる。1歩の判定は足が地面に着いた瞬間を1歩と判定するため、Z値に閾値を設定する。1歩ごとのZ値の極小値は微小に変化するため、閾値を最小値にすると1歩の判定が困難になる。そのため、閾値の値はZ値の最小値のわずかに小さい値を閾値と設定する。1歩の判定は閾値を2回超えた瞬間を1歩と

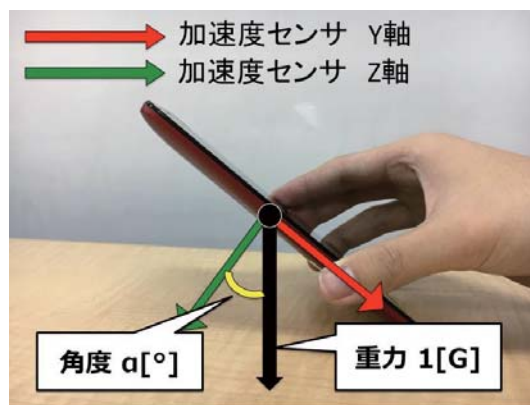


図3 X軸を中心とした回転角度 α の検出手法

した。1歩ごとに切り出した連続した加速度平面成分を図4に示す。

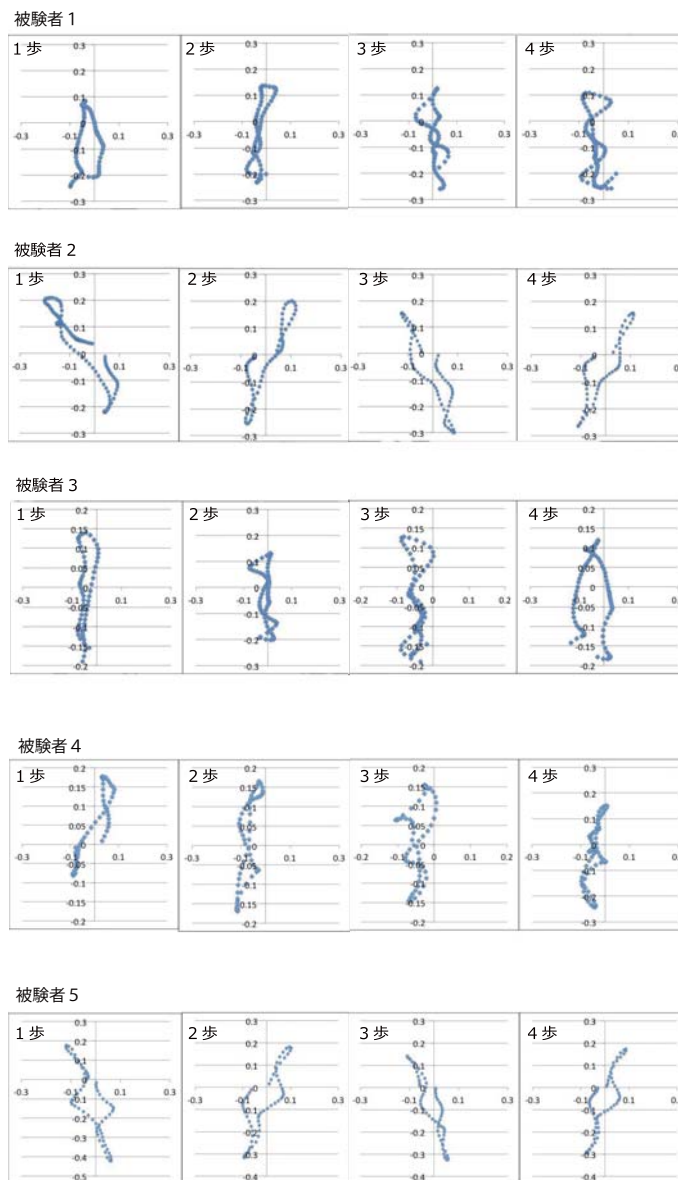


図4 連続した加速度平面成分(直進)

4.3 進行方向推定

進行方向を推定するために、1歩の加速度平面成分の極大値を利用する。1歩分の加速度平面成分に着目した場合、その1歩のなかで進行方向に対して加速し、進行方向の逆方向へ減速しているという特徴がみられる。そのため、1歩分の加速度平面成分のノルムをとると極大値が2つ存在することになる。その極大値を利用して、加速度平面成分の散布図において極大値を結ぶ線分を求める(図5)。

以下、進行方向推定手法として2種類の手法を提案する。どちらも極大値を結んだ線分を用いて進行方向推定を行う。2つの手法の違いは、線分からの進行方向の求め方にある。

手法1は、線分の向きを2つの極大値のうち、時間的に早い方の極大値の方向を進行方向とする手法である。歩行する時は最初に加速し、次に減速するため、前半の極大値の方向に加速して進んでいると考え、進行方向とする。今回は、直進ベクトルを基準の 0° として推定方向とのベクトルのなす角 θ を進行方向とする(図6左)。ステップ検出の結果から直進時は加速度平面成分の下向きに分布が偏る傾向があるとわかったため、直進ベクトルは加速度平面成分の下向きのベクトルとする。

手法2は、線分の向きを2つの極大値を比べて大きい方を進行方向とする手法である。歩行時の加速度平面成分の特徴として、進行方向に大きく加速する特徴があるため、線分の向きは極大値を比較し、極大値の大きい方に進んでいるとして線分の向きを求める。推定方向の角度を求める手法は手法1と同様に直進ベクトルを基準として推定方向とのなす角 θ を進行方向とする(図6右)。

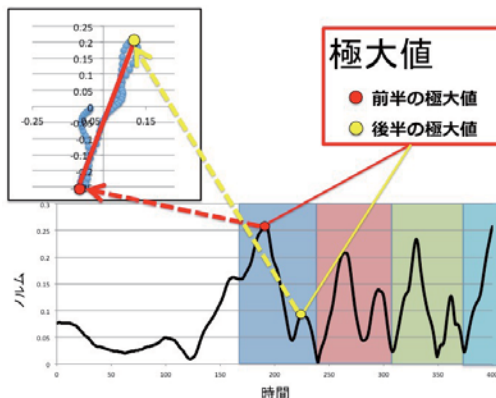


図5 加速度平面成分の散布図においてノルムが極大値となる点同士を線で結ぶ

5. 評価実験

提案手法の精度評価の手法として、正解方向と推定方向の角度差を算出し、1歩ごとの正解方向との角度差を算出、比較し精度評価を行う。

5.1 実験設定

実験設定を以下に示す。評価実験では、屋内で指定した

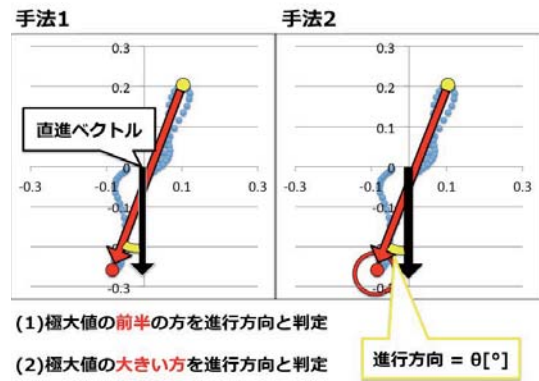


図6 推定した進行方向の検出手法

15歩程度で歩行できるルート歩行した10人の歩行データの収集を行う。評価には指定したルートを歩行したセンシングデータを使用する。端末姿勢推定にはセンシング開始5秒間の静止状態のデータを使用する。また本研究の提案手法として1歩ごとの進行方向推定を行うため、評価実験の際には1歩ごとの進行方向の正解データも同時に記録する。

今回の評価実験では腰後ろの中央部に、ランニングなどで使用されるゴムバンドを使用して体に固定する、スマートフォンホルダでスマートフォンを装着する(図7)。装着した際のスマートフォンの向きは、X軸のが重力方向と一致するように装着する。歩行データの指定したルートは全長約9mで歩行中に人や障害物の回避を想定し2つ障害物を設置した歩行ルートを作成した。また、障害物を回避する区間の距離は約60cmであり、1つ目の障害物は右に1歩で回避し、2つ目の障害物は左に1歩で回避するという条件を設けて実験を行う(図8)。



図7 スマートフォンホルダ装着図

5.2 進行方向推定の精度評価

収集した歩行データの進行方向推定の精度評価を行う。本研究では、横歩きや後退などの行動の推定が研究目的の対象となるため、直進方向を用いて推定方向と直進方向のなす角 θ から正解方向との角度差を求め精度評価を行う。

提案手法1つ目の最初の極大値を推定方向とした手法の

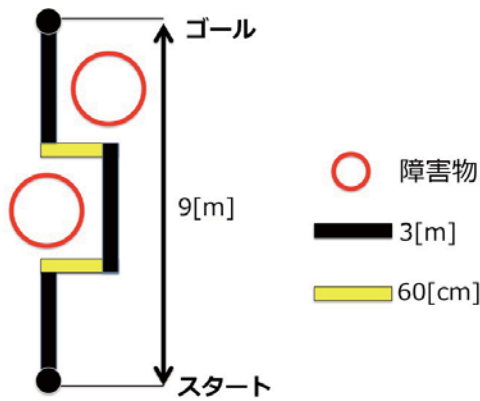


図 8 実験歩行ルート

精度評価を行った。歩行データの 10 人の推定歩行軌跡を図 9 に示す。結果、全体の平均角度差は 21° となった。また、推定方向が真逆となったデータの割合を求めた結果、約 3% という結果になった。

提案手法 2 つ目の極大値の大きい方を推定方向とした手法の精度評価を行った。歩行データの 10 人の推定歩行軌跡を図 10 に示す。結果、全体の平均角度差は 21° となった。また、推定方向が真逆となったデータの割合を求めた結果、約 6% という結果になった。

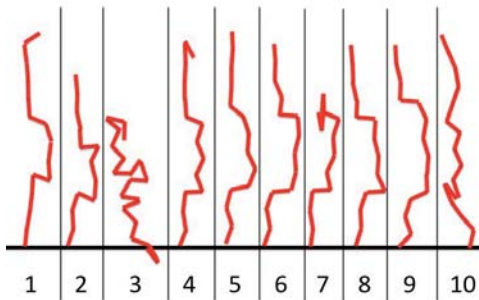


図 9 [手法 1] 推定した歩行軌跡 (赤色：推定歩行軌跡)

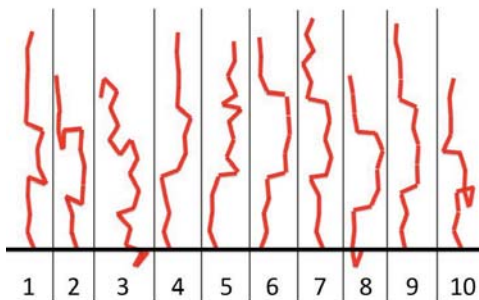


図 10 [手法 2] 推定した歩行軌跡 (赤色：推定歩行軌跡)

5.3 考察

手法 1 と手法 2 の精度評価を図 10 に示す。図 11 は正解方向と推定方向の角度差を比較した表である。平均角度差は、手法 1 は 23° 、手法 2 は 21° となった。

1 歩ごとの推定が高精度であれば、手法 1 が進行方向推定に適していると考えられる。しかし、1 歩の推定が失敗した際に精度が下がる。実際にステップ検出がうまくいかなかった結果例を図 12 に示す。ステップ検出に失敗して、1 歩前のノルムが含まれてしまっているのが確認できる。

この結果から以下の対処法が考えられる。進行方向の変化が頻繁にあっても 1 歩を正確に切り出せるアルゴリズムが実現できれば、進行方向は手法 1 を採用する。ステップ検出の高精度化が望めない場合、手法 2 を採用する。または、加速度や角速度等のセンサから歩行している場所の混雑度が取得できれば、頻繁に進行方向の変化があるかどうか判断できるので、混雑度によって手法を切り替えられる。

被験者 10 人の歩数ごとの角度差の散布図を図 13、図 14 に示す。この結果から手法 1 では約 3%、手法 2 では約 6% が進行方向が真逆と判定された。これら線分の推定までは成功しているが、進行方向推定の際に失敗しているものである。手法 1 の原因として、1 歩分の加速度平面成分がうまく切り出せておらず、1 歩前の極大値が含まれてしまい真逆と判定されたと考える。手法 2 の原因としては、減速した極大値の方が大きくなるデータがあるためと考える。また、手法 2 では加速した極大値と減速した極大値を比べると加速した際の極大値の値の方が大きくなる傾向があると考えていた。しかし、今回の端末姿勢推定は静止時の状態が対象であり、歩行時のスマートフォンの傾きの動的な変化を考慮できていないため、減速した方のノルムの極大値が加速の方のノルムの極大値よりも大きくなったのではないかと考える。

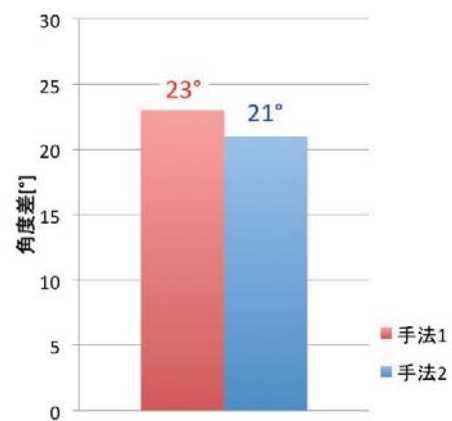


図 11 推定進行方向誤差の比較

6. おわりに

本研究では PDR の実世界ロバスト性向上を目指し、1 歩ごとの進行方向推定手法を提案した。端末姿勢推定、ステップ検出を行い、1 歩ごとの加速度平面成分データを抽出し、ノルムの極大値を用いて進行方向を推定する。評

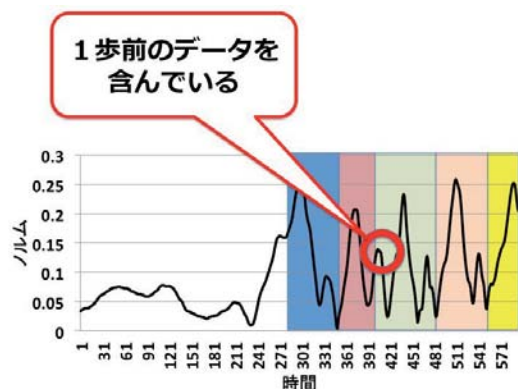


図 12 ステップ検出結果の失敗例

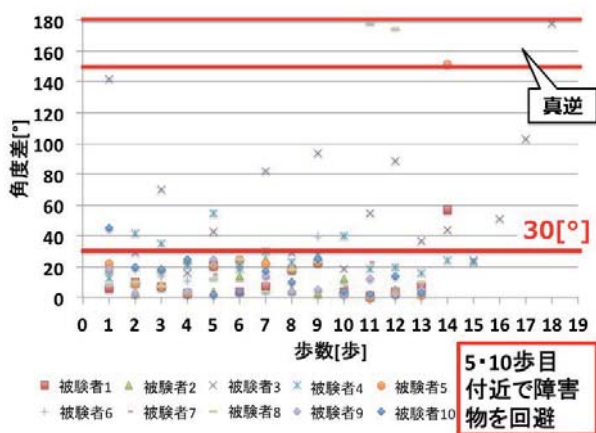


図 13 [手法 1] 歩数ごとの推定進行方向誤差の散布図

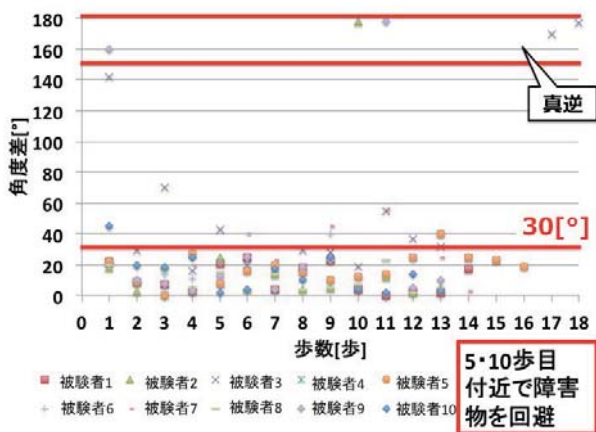


図 14 [手法 2] 歩数ごとの推定進行方向誤差の散布図

備実験の結果、進行方向の角度誤差の平均は 21° 程度であった。

今後の課題として端末姿勢推定とステップ検出の精度向上の 2 点が挙げられる。進行方向の精度としては十分な結果となったが、進行方向が反対に判定されてしまうデータが約 3% ある。その対処法として端末姿勢推定とステップ検出の高精度化が必要であるとわかった。この 2 つの問題点を改善すればより高精度に 1 歩ごとの加速度平面成分を

抽出でき、進行方向推定の精度も向上するのではないかと考える。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 藤田迪, 梶克彦, 河口信夫, “Gaussian Mixture Model を用いた無線 LAN 位置推定手法”, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No. 3, pp.1069-1181, 2011.
- [3] 興邦正克, 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論文集 2008, pp.151-156, 2008.
- [4] 遠藤巖, 藤田悟, “複数センサを組み合わせた屋内歩行者位置推定”, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2013 論文集, pp.188-195, 2013.
- [5] 北川拓, 新井イスマイル, “スマートフォン内蔵ジャイロセンサによる屋内方位推定精度向上”, 情報処理学会研究報告, 2013-UBI-37(11), pp.1-8, 2013.
- [6] 小西勇介, 柴崎亮介, “自律方式による歩行者ポジショニングシステムの開発”, 地理情報システム学会講演論文集, Vol.10, pp.389-392, 2001.
- [7] Ban, R., Kaji, K., Hiroi, K., and Kawaguchi, K.: Indoor Positioning Method Integrating Pedestrian Dead Reckoning with Magnetic Field and WiFi Fingerprints, In Proceedings of The Eighth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2015), pp.169-174, 2015.
- [8] 星尚志, 藤井雅弘, 羽多野裕之, 伊藤篤, 渡辺裕, “スマートフォンを用いた歩行者デッドレコニングのための進行方向推定に関する研究”, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No. 1, pp.25-33, 2016.