

経路の複雑さによらないPDR評価指標と経路可視化ツールの提案

安部 真晃¹ 梶 克彦² 廣井 慧³ 河口 信夫³

概要：屋内位置測位のひとつとして、携帯端末に搭載された加速度センサや角速度センサの示す値から歩行者の移動量を算出し、位置を推定する手法が存在する。この手法は歩行者デッドレコニング（以下PDR）と呼ばれ、これに関する研究は複数存在する。誤差が蓄積するという問題点があり、この誤差は歩いた経路長が長いほど大きくなる。しかしながらこれまでのPDRの精度評価は、経路の最終地点における正解座標と推定座標の距離をその精度とするにとどまっていて経路の複雑さを考慮していないものが多い。本研究では、それぞれのPDRを比較することのできる評価指標を提案する。PDRが距離推定、進行方向推定、高度推定の3つの要素から構成され、これらを合成して位置推定を実現していることに着目する。総合評価である位置推定を1秒あたりに生じる座標誤差で評価し、これに加えて、3つの経路長推定、進行方向推定、高度推定の各要素を指標により評価する。累積角度変化や経路長、高度の値を使い指標を算出することで経路の複雑さを指標に取り込み、異なる経路を用いて評価したときの指標の値のばらつきを抑えることを試みた。上記で述べた構成要素毎の比較検討手法を用いて、実際の経路データを分析し、指標のばらつき具合を確認したところ、提案評価指標のばらつき具合は既存の指標のばらつき具合よりも小さいことが確認できた。また、数値だけではわからない推定経路と正解経路の違いを視覚で確認するための位置推定情報の可視化ツールを作成した。このツールでは単純に2つの経路を比較するだけでなく、歩行時間ごとの動きを確認できるようにした。また、推定経路を自由に動かすことで、どの部分で誤差が大きいのか視覚で理解できるようにした。加えて、推定精度の低い経路データを任意で抽出を可能にすることを目的としてデータの一部を切り取る機能を実装し、推定手法の新たな改善点の考察を可能にする。

A proposal of PDR evaluation index regardless of route complexity and visualization tool to compare routes.

MASAAKI ABE¹ KATSUHIKO KAJI² KEI HIROI³ NOBUO KAWAGUCHI³

1. はじめに

ライフログアプリやナビゲーションアプリの普及により、位置推定の需要が近年高まっている。屋内ではGPS精度が不十分であるため、これをふまえた屋内位置推定手法が数多く存在している。その中の有効な位置推定手法のひとつに、加速度、角速度等のセンサ値から相対的な位置変化量を求める歩行者デッドレコニング（PDR）がある。それらの誤差の平均、分散、二乗平均平方根を評価値としているものが存在する [1][2]。しかし、PDRは位置変化量

を積算するという特性上、誤差が累積するため、評価に利用した経路長に依存して評価値が変化してしまうという問題がある。また、曲がり角の数や曲線の道の存在など、評価対象となる経路自体の複雑さがPDRの精度に影響を与える場合がある。しかし、研究ごとに歩行する経路は異なり、オフィスを想定し、曲がり角を複数含んだ60m程度の経路 [3] であったり、歩行経路が階段のみ [5] である場合もある。そのためPDRの精度を単純に比較できないという問題が存在する。

一般的にPDRは、経路長推定、角度推定、高度推定の3つの要素を合成して位置推定を実現する。経路長推定では、歩数を検出し、歩幅をかけあわせ経路長を推定する。角度推定には角速度や加速度などが用いられる。高度推定

¹ 名古屋大学大学院工学研究科
² 愛知工業大学情報科学部情報科学科
³ 名古屋大学未来創造機構

には、加速度センサなどを用いた機械学習や気圧センサが用いられる。よって、総合的な位置推定精度の評価に加え、各要素ごとの評価を可能にすれば、PDR手法のボトルネックの発見や手法の構成要素ごとの比較検討が可能になると考えられる。

本研究では、総合評価として位置推定を評価し、これに加えて、経路長推定、経路長推定、角度推定、高度推定を評価する。こうした構成要素毎の比較検討手法を用いて、実際の経路データを分析し、指標のばらつき具合の考察する。また、数値だけではわからない推定経路と正解経路の違いを視覚で確認するために位置推定情報の可視化ツールを作成した。

以下に本稿の構成を述べる。2章ではPDRの評価に関する研究について述べる。3章では提案評価手法について述べ、4章で検証実験を行う。5章では位置推定情報の可視化ツールについて述べる。6章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

PDR手法の提案を村田らの研究[4]では行っている。歩行終了時における正解座標と推定座標の直線距離や、0.1秒ごとに正解位置と比較した際の平均誤差を手法の評価として用いている。

PDR手法の評価の研究として興梠らの研究[6]がある。この研究では、PDRの各離散時刻における出力が位置座標と方位角であることに着目し、この2つの要素それぞれに対して評価を行う。歩行移動距離に比例して増加する測位誤差の比率と、1秒あたりに累積する方位角誤差の増加の割合をそれぞれの指標としている。この手法では位置座標を2次元で表現しているために、高度に関する評価が行われていない。

小西らの研究[7]では、一步ごとの測位誤差を考慮したPDRの定量的精度評価手法の検討を行っている。1歩ごとに測位誤差を算出し、原点を真の位置、y軸正の方向を進行方向成分の誤差、x軸正の方向を右方向成分の誤差としてプロットする。プロットされた図からプロットの偏りや数を見て、予測されるPDRの対策項目を決定する。こちらも平面に限定されているために高度に関する評価を行っていない。また、歩行者の歩く経路の長さが興梠らの研究では歩行移動距離が指標に組み込まれており、小西らの研究では1歩ごとに測位誤差を算出しているために経路の長さが指標に大きな影響は与えない。しかし、経路に含まれる曲がり角の数といった情報は指標に反映されていない。

3. PDRに基づく経路推定の評価手法

PDRの総合的な精度を示す位置推定精度に加え、PDRを実現するための各構成要素である経路長推定、角度推定、高度推定についても精度評価を行う。各構成要素ごとの指

標により、要素毎の比較検討を可能にし、他のPDR手法と比べた時にボトルネックの発見を容易にする。また、PDRは相対的な位置を推定する手法であり、推定位置、推定距離、推定角度、推定高度の誤差が累積するという特徴を持つ。そこで、評価に利用した経路に依存して評価値が変化しないようにするため、各誤差の累積度合いを算出し、評価指標とする。

3.1 位置推定精度

位置推定精度については歩行時間1秒あたりの座標誤差を評価指標とする。最終地点だけの座標誤差を用いると、道中で誤差がどれだけ大きくてもその誤差が指標に反映されない。

まず、1秒ごとの座標誤差を算出する(図1)。横軸が時間、縦軸が座標誤差の散布図を作成する(図2)。この散布図に、それぞれのデータとの差の2乗和が最少となる直線(回帰直線)を引くと、直線の傾きが歩行時間1秒あたりに座標誤差となり、これを評価指標として用いる。図2のオレンジ色の点線が回帰直線である。散布されているデータが N 個存在し、その一つを (x_i, y_i) とする。原点を通る回帰直線の傾きを a とすると以下の式で a は与えられる。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i x_i)}{\sum_{i=1}^N (x_i)^2}$$

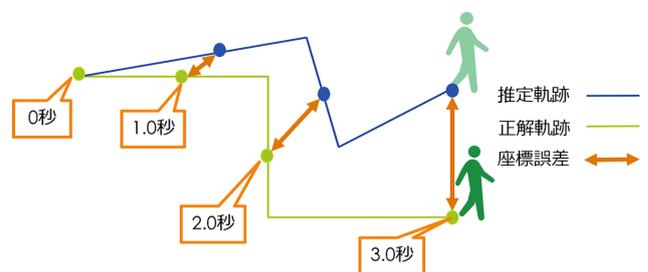


図1 位置推定精度の評価指標に用いる誤差部分

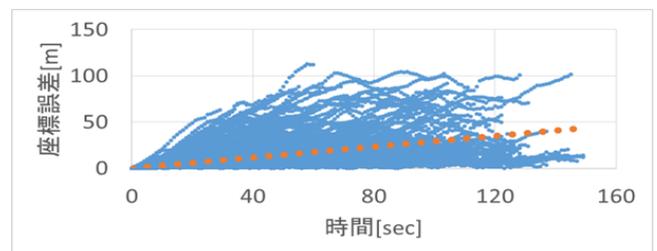


図2 時間-座標誤差の散布図

経路長推定、角度推定、高度推定の誤差累積度合いを算出する際には、必ずしも単位秒あたりの誤差累積度合いを求めるのはふさわしくない。なぜなら、曲がり角の数や曲線の道の存在、高度変化の大きさなど、評価対象となる経路自体の複雑さがPDRの精度に影響を与える場合がある

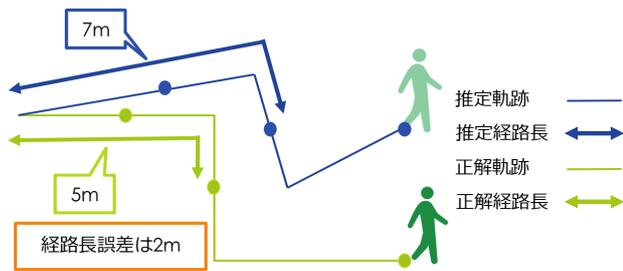


図 3 経路長推定精度の評価指標に用いる誤差部分

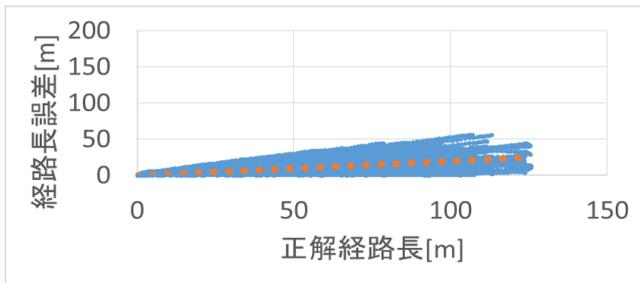


図 4 正解経路長-経路長誤差の散布図

からである。長い直線ばかりの経路とそれより短い何度でも曲がり、複数回階段を利用する経路では後の方が推定が難しく、精度は悪くなるだろう。よって、経路の複雑さを取り込みこれらの評価指標を求めることで、複雑な経路と簡単な経路を入力にしたときに出力されるそれぞれの値のばらつきをおさえる。

3.2 経路長推定精度

経路長推定精度の評価指標では経路の複雑さの中でも経路長を指標に取り込む。距離推定については、経路長 1m あたりに生じる経路長誤差を評価指標とする。まず、1 秒ごとの推定経路長、正解経路長を算出する (図 3)。横軸が正解経路長、縦軸を正解経路長と推定経路長の差として散布図を作成する (図 4)。ここで回帰直線を引くと、回帰直線の傾きが 1m あたりに生じる経路長誤差となる。これを評価指標とする。こうして求められた評価指標は経路長の影響を考慮した値である。

3.3 角度推定精度

角度推定については、総角度変化 1° あたりに生じる進行方向の誤差を評価指標とする。まず、1 秒ごとの正解経路の累積角度変化、正解進行方向、推定進行方向を算出し、それぞれの進行方向から進行方向の誤差を算出する (図 5)。誤差が 360° となると進行方向と推定方向は同じ方向を指していることになるが、このときの誤差は 0° ではなく 360° とする。横軸が正解経路の累積角度変化、縦軸を進行方向の誤差として散布図を作成する (図 6)。ここで回帰直線を引くと、回帰直線の傾きが総角度変化 1° あたりに生じる進行方向誤差となる。これを評価指標とする。こ

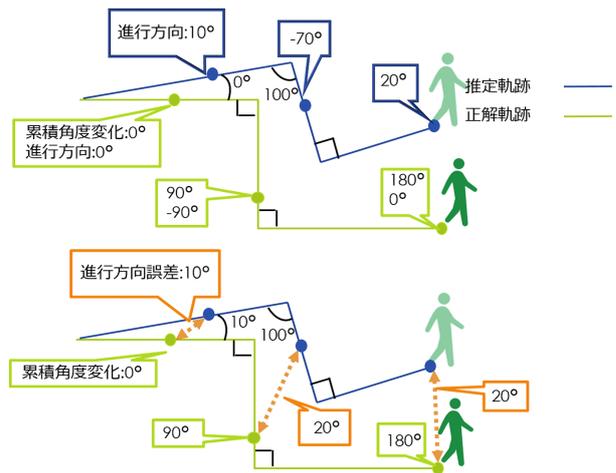


図 5 角度推定精度の評価指標に用いる誤差部分の算出

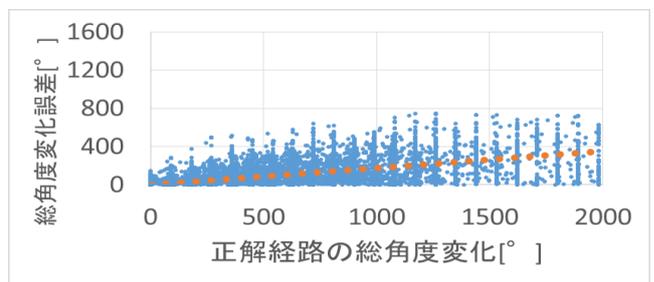


図 6 総角度変化-進行方向誤差の散布図

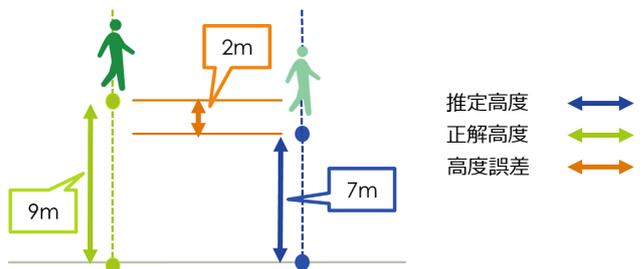


図 7 高度推定精度の評価指標に用いる誤差部分

の評価指標は経路の累積角度変化の大きさを考慮した値となっている。

3.4 高度推定精度

高度推定については、高度変化 1m あたりに生じる高度誤差を評価指標とする。まず、1 秒ごとの推定高度、正解高度を算出する (図 7)。横軸が正解高度、縦軸を正解高度と推定高度の差として散布図を作成する。ここで回帰直線を引くと、回帰直線の傾きが高度 1m あたりに生じる高度誤差となる。これを評価指標とする。この評価指標は経路の総高度変化の大きさを考慮した値となっている。

4. 検証実験

提案評価手法における指標が経路長、総角度変化、高度変化といった経路の複雑さの影響を受けにくい指標の提案

ができていないかの検証を行った。手順としては1つのPDR手法に対し、2つのデータセットを入力し、推定結果を得る。それぞれの推定結果から提案した評価指標と既存研究の評価指標を出力し、その指標のばらつきを比較した。

今回の検証では村田らの研究のPDR手法を用意した。入力する2つのデータセットは屋内歩行センシングコーパスであるHASC-IPSC[8]を2つに分割して用意した。建物内の歩行経路に比べ建物間の歩行経路が複雑だと考え、建物内の歩行経路をデータセット1、建物間の歩行経路をデータセット2とした。それぞれのデータセットの特徴量を表1に記述する。

表1 分割したデータセットの特徴

	データセット1	データセット2
平均歩行時間 [s]	88.5	130
平均経路長 [m]	81.9	130
平均総角度変化 [°]	962	1240
平均高度変化 [m]	7.43	9.65

データセット1のそれぞれの要素の値はデータセット2のそれぞれ要素の値に対して1.5倍ほどの大きさであり、データセット2の方が複雑な経路が多いことが確認できる。比較対象として既存研究の評価指標としてよく用いられている。経路長1mあたりに累積する位置座標、経路長、角度、高度誤差の量と、歩行時間1秒あたりに累積する位置座標、経路長、角度、高度誤差の量を用いる。n本の経路を用意し、ある経路の最終地点における誤差を e_n 、経路長を r_n [m]、歩行時間を t_n [s]とすると、経路長1mあたりに累積する誤差の量 e_l は以下の式で与えられる。

$$e_l = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{e_n}{r_n}}{N}$$

また、歩行時間1秒あたりに累積する誤差の量 e_t は以下の式で与えられる。

$$e_t = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{e_n}{t_n}}{N}$$

PDRに適用する経路の複雑さの違いによる指標のばらつきを確認するためにデータセット1から得られた指標をデータセット2の指標の分散 α を出す。分散 α が0に近いほど指標のばらつきが少ないと言える。

4.1 検証結果

提案評価指標、経路長1mあたりに累積する誤差の量、歩行時間1秒あたりに累積する誤差の量を表2から表4に示す。提案した評価指標において、全ての推定指標のばらつきが経路長1mあたりに累積する誤差の量におけるばらつき、歩行時間1秒あたりに累積する誤差の量におけるばらつきより小さい。表2から4より、角度推定評価指標において、提案評価指標における α が経路長1mあたりに累積する誤差の量、歩行時間1秒あたりに累積する誤差の量

における α の 10^{-6} 乗ほどの値と算出できる。提案評価指標での角度推定では、総角度変化という経路の複雑さを取り込んでいるため総角度変化について考慮されていない2つの指標に比べてばらつきが小さい結果になったと考えられる。提案評価指標の位置推定と経路長推定における α は、比較対象となる経路長1mあたりに累積する誤差の量、歩行時間1秒あたりに累積する誤差の量における α の 10^{-1} 乗ほどの値と算出できる。角度推定でのばらつきより差が現れなかった要因として、経路長1mあたりに累積する誤差の量、歩行時間1秒あたりに累積する誤差の量を算出するとき、それぞれ指標に経路長、歩行時間が指標に取り込まれているからだと考えられる。

表2 提案評価指標

	データセット1	データセット2	α
位置推定	0.69	0.48	$1.2 * 10^{-4}$
経路長推定	0.142	0.151	$4.1 * 10^{-10}$
角度推定	0.181	0.163	$6.5 * 10^{-9}$
高度推定	0.64	0.67	$5.0 * 10^{-8}$

表3 経路長1mあたりに生じる誤差の量

	データセット1	データセット2	α
位置推定	0.83	0.55	$3.8 * 10^{-4}$
経路長推定	0.184	0.2	$2.4 * 10^{-9}$
角度推定	2.35	0.175	$6.5 * 10^{-3}$
高度推定	0.281	0.341	$5.5 * 10^{-6}$

表4 歩行時間1秒あたりに生じる誤差の量

	データセット1	データセット2	α
位置推定	0.68	0.42	$3.8 * 10^{-4}$
経路長推定	0.156	0.142	$4.1 * 10^{-9}$
角度推定	1.91	1.34	$8.1 * 10^{-3}$
高度推定	0.346	0.443	$8.1 * 10^{-7}$

5. 位置推定情報の可視化ツール



図8 位置推定情報の可視化ツールの使用画面

数値だけではわからない推定経路と正解経路の違いを視

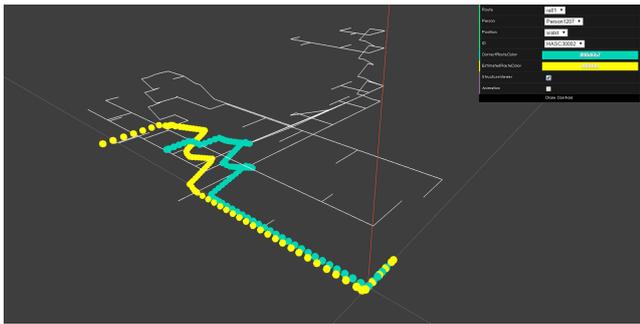


図 9 StructureViewer モード

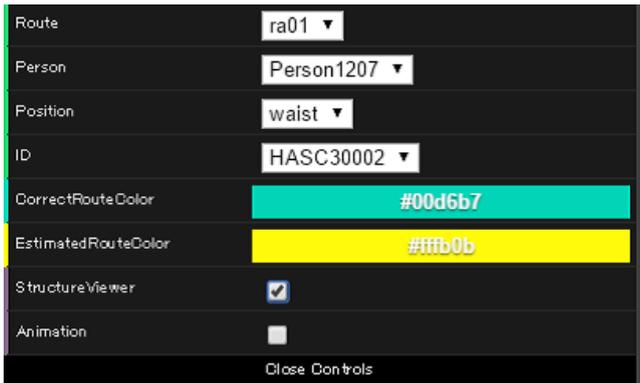


図 10 コントロールパネル

覚で確認するために位置推定情報の可視化ツールを作成した。ウェブブラウザを用いることで利用できるツールであり、特別な設定を必要としない。推定経路と正解経路をさまざまな角度から比較、確認するために視点をずらしたり、経路を回転することができる。

Wi-Fi の強度や地磁気といったセンサ値を利用する位置推定手法では経路の複雑さだけでなく建物構造に精度が依存する。そこで、建物構造データと経路のスタート地点が存在するときに建物構造を可視化し、歩行経路と建物構造を比較可能にした (図 9)。建物構造データは HASC-IPSC の建物構造データの記述に準拠する [8]。

また、コントロールパネル (図 10) を操作することにより、同じ経路を歩いたデータ全てを一括で表示が可能である (図 11)。複数の推定経路を表示させることにより、歩行者の個人差の発見を可能にする。

経路のすべてが可視化されていると推定手法のレイテンシを確認することができない。そこでアニメーションモードを実装した。これは、時間が経過するごとに推定座標と正解座標が 1 点ずつプロットされる仕組みとなっており (図 12)、離散時刻ごとの正解座標と推定座標の誤差を確認することができる。この機能により推定手法のレイテンシを把握するだけでなく、歩行者の速度の変化を視覚的に理解することが可能である。また、経路の点をクリックすることでもその座標が何秒の時点で推定された座標か確認可能であり、レイテンシや速度の変化の把握を助ける。

経路の後半で出力される誤差を把握するために経路上の

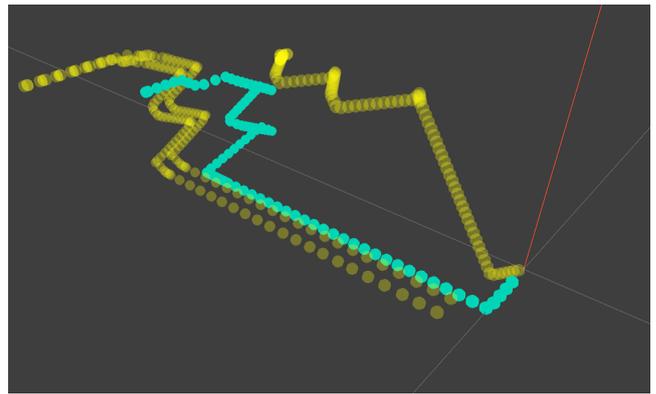


図 11 同一経路を歩いた位置推定結果の一括表示

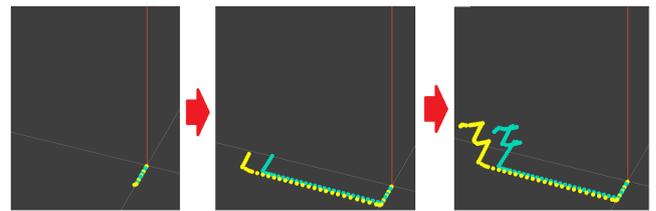


図 12 アニメーションモード

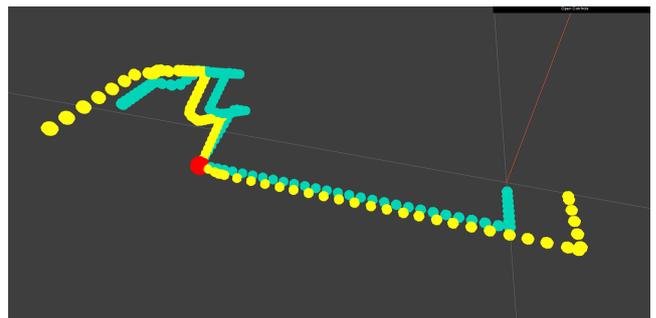


図 13 指定点の誤差をリセットする経路表示

指定した点の誤差をリセットし可視化する機能を実装した。図 13 の赤い点が誤差を 0 とした点である。

2 つの点をクリックして選択し、データのエキスポートを行うことで推定経路の気になる部分のデータを切り出して作ることができる。誤差の大きい部分と小さい部分を切り出し、それぞれデータの特徴を解析することで推定手法の新しい改善点の考察を助ける。

6. おわりに

今回の提案評価手法では経路長推定指標では経路長、角度推定指標では経路の総角度変化のように、それぞれの推定に対し 1 つの経路の複雑さを組み込むことで、経路推定評価指標のばらつき具合が既存研究の評価指標のばらつきと比べ、小さくなっていることを確認した。また、位置推定情報の可視化ツールではマウスやキーボードを操作して自由な視点から経路を比較できるようにした。今後の課題としては、今回は 1 つの PDR 手法に対して 2 つのデータセットを入力したが、他の PDR 手法にも適用しこの検証

の妥当性を確認したい。

参考文献

- [1] 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. 電子情報通信学会技術研究報告 ASN2013-122, pp.23-28, 2014
- [2] 吉見駿, 村尾和哉, 望月祐洋, 西尾信彦. マップマッチングを用いたPDR軌跡補正情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告 2014.20: pp.1-8,2014
- [3] 沢田健介, 花田雄一, 森信一郎. Wi-Fiビーコンと歩行者自律航法を使用する屋内歩行者測位技術. 情報処理学会研究報告. ITS,[高度交通システム] 2014.27, pp.1-10,2014
- [4] 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. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2014) シンポジウム, pp.1614-1619,2014
- [5] 五百蔵重典, 鈴木孝幸, 田中博. スマートフォン内蔵センサーを用いた複数フロアデッドレコニング. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2013) シンポジウム, 3E-5, pp.723-735,2013
- [6] 興梠正克, 蔵田武志. 歩行者自律航法 (PDR) ベンチマークの一手法とその評価 HHCG シンポジウム 2014-A-1-4,2014
- [7] 小西啓佑, 五十嵐規和, 松下祐介, 吉澤史男. 1歩毎の測位誤差を考慮したPDRの定量的精度評価手法の検討情報処理学会第77回全国大会 4D-03,2015
- [8] 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 Floor-plan Generation Researches. International Workshop on Human Activity Sensing Corpus and Its Application (HASCA2013), 2013
- [9] 石塚宏紀, 上坂大輔, 黒川茂莉, 渡邊孝文, 村松茂樹, 小野智弘. BLEシグナルとPDRによるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討～Open Beacon Field Trial参加における実験結果の共有～. マルチメディア通信と分散処理 (DPS) 研究報告,2014-DPS-159, pp.1-6,2014