

歩行者自律測位における行動センシング知識の利用

村田 雄哉¹ 梶 克彦¹ 廣井 慧² 河口 信夫^{1,2}

概要：

スマートフォンを利用した屋内位置情報サービスが普及しており、GPS 精度の不十分な屋内において位置を取得する様々な手法が提案されている。有効な位置推定手法のひとつに、加速度センサや角速度センサを利用した Pedestrian Dead-Reckoning(以下 PDR)がある。PDR では様々な手法が提案されているが、スマートフォンのセンサを用いた手法では十分な性能を得られていない。本研究では、行動センシング知識を定義し、それに基づく PDR の精度向上手法について提案する。本研究において行動センシング知識は、歩行者の身体情報や健康状態からなる歩行者情報、移動している環境や建物の概要からなる環境情報、行動の種類やその行動の特徴からなる行動情報、センシングに利用するセンサ端末の種類やその保持位置からなる端末情報の 4 つから構成される。これらの情報は、個別に利用する研究は行われているが、体系的に整理し、利用する研究は行われていない。この行動センシング知識を通路、階段での歩幅の調整、行動認識の認識誤りの修正に利用し、PDR の精度向上を試みる。提案手法の有効性の検証には、我々が構築した屋内歩行センシングコーパスである HASC-IPSC を利用した。検証の結果、行動センシング知識の利用により、行動認識では認識精度を 71.2%から 91.4%へ向上でき、移動距離推定では、経路の全長に対する誤差を約 27m から約 7m へ軽減できた。

Pedestrian Dead Reckoning based on Human Activity Sensing Knowledge

YUYA MURATA¹ KATSUHIKO KAJI¹ KEI HIROI² NOBUO KAWAGUCHI^{1,2}

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末には多彩なセンサが搭載されており、それらのセンサを利用した位置推定に関する研究がさかんに行われている。その中でも、GPS 精度の不十分な屋内におけるさまざまな位置推定手法が提案されており、屋内ナビゲーション等への利用が期待される。

有効な位置推定手法のひとつに、加速度センサや角速度センサを利用した Pedestrian Dead-Reckoning(以下 PDR)がある。センサデータから歩数、歩幅、進行方向を推定し、直前の位置からの変位により、現在の位置を求める手法である。PDR では様々な手法が提案されているが、誤差が累積するといった問題があり、スマートフォンのセンサを

用いた手法では十分な性能を得られていない。

本研究では行動センシング知識を定義し、それに基づく PDR の精度向上手法について提案する。本研究において行動センシング知識は、歩行者の身体情報や健康状態からなる歩行者情報、移動している環境や建物の概要からなる環境情報、行動の種類やその行動の特徴からなる行動情報、センシングに利用するセンサ端末の種類やその保持位置からなる端末情報の 4 つから構成される。これらの情報を個別に利用する研究は行われているが [1][2]、体系的に整理し、利用する研究は行われていない。この行動センシング知識を通路、階段での歩幅の調整、行動認識の認識誤りの修正に利用し、PDR の精度向上を試みる。

以下に本稿の構成を述べる。まず 2 章では PDR の関連研究について述べる。3 章では、行動センシング知識の定義と、行動センシング知識に含まれる各情報について説明する。4 章で行動センシング知識を利用した PDR の精度評価実験を行い、5 章でまとめと今後の課題について述べる。

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

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

2. PDR に関する研究

スマートフォンやタブレットなどのセンサ端末を用いた PDR では、搭載されるセンサを用いて様々な手法が検討されている。一般的な PDR では、加速度、角速度、地磁気データから歩数、歩幅、進行方向を推定する [1]。しかし、この手法では直前の位置からの変位によって位置を推定するため、誤差が累積するといった問題があげられる。

PDR による累積誤差を修正する手法として、RFID やマップマッチングを利用する手法が提案されている。安齋らの研究 [3] では、直線移動時と曲がり角においてマップマッチングを利用し、誤差を軽減する手法を提案している。地磁気センサや角速度センサから、進行方向を変更して歩行したと判断すると、事前に設定しておいた曲がり角座標にシフトし、位置を補正する。

興枘らの研究 [4] では、位置の補正手段として RFID 測位システムと、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導入している。移動経路中に設置された RFID リーダが特定の ID を持つタグを検知したとき、その ID に対応する利用者に対して、その RFID リーダの設置位置情報とその検知時刻をネットワーク経由で通知し、位置を補正する。また、屋内環境におけるフロア間の移動は、階段とエレベータ、エスカレータに限られる。そのため、エレベータ、エスカレータの乗降を検知し、事前に与えられた環境マップ情報と照合して、検知されたエレベータ、エスカレータの位置へ推定結果を補正する。

先行研究では、PDR に RFID やマップマッチングを併用し、高い精度での位置推定を実現している。これらの手法ではインフラの維持、管理や、事前の入念な調査、設計が必要といったコストがかかる。このコストは、PDR の推定精度が高ければ、インフラ設置個数の削減や事前調査の手間を減らすなどにより削減できる、可能な限りコストを低くし、かつ高い精度での位置推定の実現のためには、PDR の精度向上が必要となる。

3. 行動センシング知識の定義

人の歩行には、歩行者や移動環境だけでなく、心理状態や着装条件、気象条件などの様々な要因が影響を及ぼしている [5]。これらの要因のうち、簡単に利用でき、かつ PDR の精度向上に利用できると想定される情報に、歩行者に関する情報、移動環境に関する情報、歩行者がとっている行動に関する情報が挙げられる。また、歩行の観測に利用しているセンサ端末に関する情報も、これらの情報と同様に利用できると想定される。そこで本研究では、これらの情報をそれぞれ歩行者情報、環境情報、行動情報、端末情報として整理し、この4つの情報からなる行動センシング知識を定義する。この行動センシング知識を PDR での歩幅の調整や行動認識に利用し、移動距離推定や行動認識の精

度向上を試みる。

これらの情報を入手する方法は、ユーザの入力によって得られる方法と、システムによって推定される方法の2つが考えられる。ユーザの入力によって得られる方法は、地図などの資料を必要とせず、ユーザの認識によって簡単に得られるものとし、システムによって推定される方法では、センサデータを用いた機械学習によって推定されるものとする。

3.1 歩行者情報

歩行者の身体情報や健康状態を、歩行者情報として定義する。歩数や歩幅は、年齢や性別、身長や身体の状態や心理状態など、歩行者に関する多くの要因に影響を受けるとされる。PDR における歩幅の設定には、多くの場合身長を利用している。歩幅=身長× m [m:定数] や歩幅=身長-1[m](歩幅, 身長:[m]) など、さまざまな手法が用いられているが [1]、性別や年代は考慮されていない。しかし、歩幅には身長の他にも性別や年代によって異なるとされている [5]。性別による歩幅の違いは、男性は大きく、女性は小さい。通常の歩行では、身長に対する歩幅の性差はあまり見られないが [6]、高速度になるほど身長の影響が大きくなる傾向があるとされ、130m/分を超える速い歩行では、身長差の影響が認められる [5]。

また、年齢による歩幅の違いも認められる。年齢によって身長に対する歩幅の割合が変化し、50代から歩行パターンの変化が現れ始め、60代後半から高齢者特有の、歩幅が短く、歩調は短いといった歩行パターンになると考えられている。65歳以下での歩幅は身長の45%であるのに対し、67歳以上では身長の40%だとされており [5]、歩行速度が速くなるほど年齢の影響が顕著に現れるとされる。性別や年齢に関する情報は、PDR においてあまり利用されていないが、精度向上に有用であると考えられる。そのため、歩行者の身体情報や健康状態を歩行者情報として定義し、PDR に利用する。

3.2 環境情報

移動している環境や建物の概要を、環境情報として定義する。人の歩行は、歩行路状況や群衆密度にも影響される [5]。階段や坂道での歩幅は、通路での歩幅と異なると考えられる。フロアマップといった歩行環境の詳細な情報があれば、マップマッチングにより誤差を修正できる。マップマッチングはフロアマップを画像として利用すれば、低コストで利用できる [7]。環境についても同様に、混雑度、障害物の有無などの情報は、簡単に入手でき、PDR 精度向上に有用であると考えられる。これらの歩行者が簡単に入手できるような情報は、更新に手間がかからないため、低コストで利用できる。本研究で定義する環境情報は、天井の高さや階段1段の幅など、同じ建物内において異なる

場所でも同じと想定されるものとし、通路の距離などの場所によって異なるものは含まないとする。

3.3 行動情報

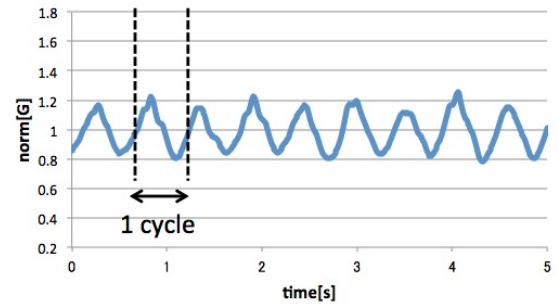
歩行者が移動する際にとっている行動の種類やその特徴を、行動知識として定義する。歩行者は移動する際、停止、歩行、階段昇降など様々な行動をとっている。これらの行動にはそれぞれ特徴があり、その特徴の抽出、利用により、どの動作をしているかを判断できる。歩行と走行、階段昇降の動作には、周波数に違いが見られ、これらの動作におけるパワースペクトル値のピーク値の大きさやピーク出現周波数帯の違いから、動作を判断する手法が提案されている [2]。また、階段と平坦なフロアでの歩行動作の違いは、階段昇り動作では角速度のパターンに現れ、階段降り動作では、鉛直加速度成分のピーク値の差分と進行方向成分のピーク値の差分となって現れるとされる [7]。気圧センサを使い、階数推定、階段昇降を検知する研究も行われており [8]、高い精度での検知を可能にしているが、気圧センサを搭載したスマートフォンはまだ数が少ない。これらの識別によって得られる情報は精度が重要である。行動を正しく識別できれば、その動作時の情報を利用し、PDRの精度を向上できると考えられる。しかし、認識を誤った場合、誤差の増大につながると想定される。

また、歩行者は移動する際、障害物がない限り経路を直進すると考えられる。また経路移動中は、通路から階段やエスカレータなど、途中で歩行環境が変わらない限り、同じ行動をとっていると考えられる [9]。このような情報も、行動に関する情報として PDR の精度向上に利用できる。

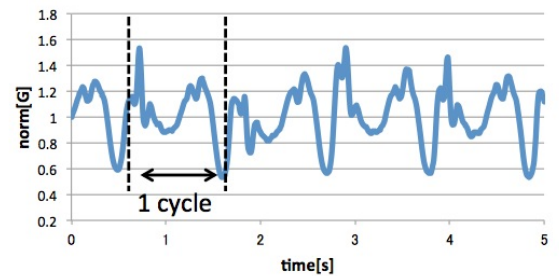
3.4 端末情報

センシングに利用するセンサ端末の種類や保持位置を端末情報として定義する。PDR に利用されるセンサ端末は、PDR 専用が開発されたものからスマートフォンまで様々な種類が存在する。これらの端末はそれぞれ異なるベンダーのセンサを搭載していると考えられるため、利用する端末によってセンサ精度が異なると想定される。五百蔵らの研究 [8] の中で、同一機種種の端末を用いた場合においても、Android の OS バージョンの違いや個体差により、加速度センサのサンプリング間隔が異なると指摘されている。また、中らの研究 [10] では、無線 LAN 電波情報を取得時の遅延時間の存在を確認し、その遅延時間は機種によって異なると指摘している。これらの先行研究から、センサ端末の種類は、PDR の精度に影響を与えていると考えられるため、PDR を行う際にセンサ端末の種類を考慮に入れる必要があるといえる。

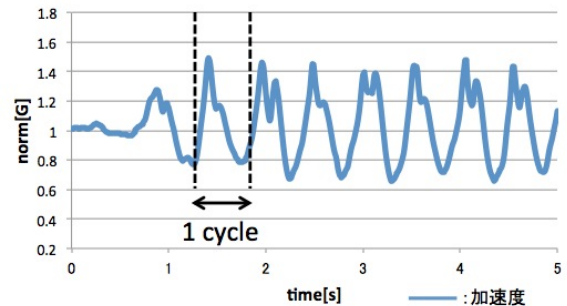
また、センサ端末の保持位置によりセンサ値は大きく異なる [11]。図 1 にセンサ端末を、手 (図 1(a))、パンツのポケット (図 1(b))、腰後方中央 (図 1(c)) に保持し、歩行し



(a) 手



(b) パンツのポケット



(c) 腰後方中央

図 1 保持場所によるセンサデータ

た場合の加速度ノルムにローパスフィルタを適用した波形を示す。

手、腰後方中央の場合は、1 波長毎に周期性が見られるが、パンツのポケットの場合、センサ端末を入れている側の足の動きの影響をうけるため、周期性は 2 波長毎に見られる [11]。歩数推定では、多くの場合加速度ノルムが利用される。そのため、手、腰後方中央の場合は 1 波長毎に、パンツのポケットの場合は 2 波長毎、または 1 波長間隔で特徴をとるなど、センサ端末の保持位置毎に検出方法を設定する必要があると考えられる。センサデータを利用し、センサ端末の保持位置を推定するさまざまな研究が行われている [12]。正しく推定できれば精度向上に利用できると考えられるが、行動情報と同様に、推定を誤ると誤差の増大につながると考えられる。

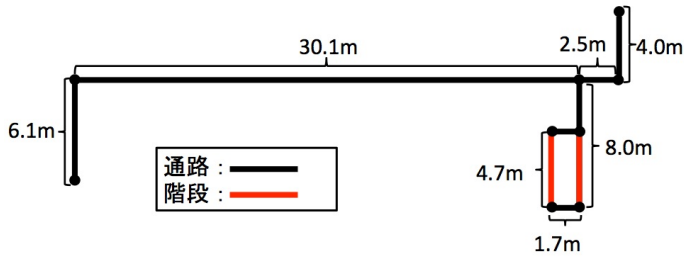


図 2 移動経路 (2 次元)

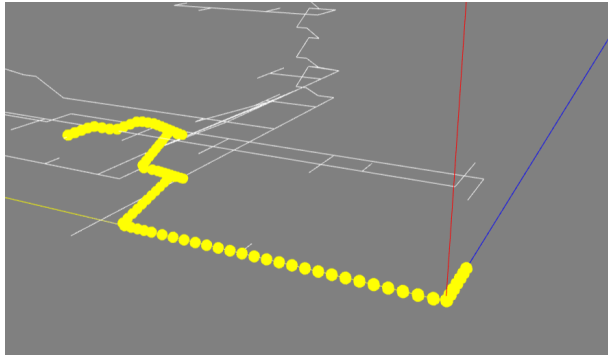


図 3 移動経路 (3 次元)

4. 評価実験

3章で定義した行動センシング知識を利用し、移動距離推定と行動認識の精度評価実験を行った。提案手法の有効性の検証には、我々が構築した屋内歩行センシングコーパスである HASC-IPSC を利用する。HASC-IPSC には 20 代から 60 代までの男女 107 名の歩行、階段昇降などの基本行動データと建物内の経路移動データが収録されている。このコーパスに含まれる一部の経路移動データを用いて、評価実験を行った。

4.1 実験内容

HASC-IPSC で収集された経路移動データを用いて、行動認識、移動距離推定を行った。行動認識は、すべての歩行者の移動経路データを用いて行い、移動距離推定は同じ経路を通った 5 人の歩行者のデータを用いて移動距離推定を行った。本実験では、端末の保持位置、曲がり角については正解情報を与えている。行動認識、移動距離推定には、HASC Tool[13] を利用した。

4.2 利用する行動センシング知識

本実験では、以下の行動センシング知識を利用する。

歩行者情報

歩行者の身長、年齢から歩幅の調整を行う。本実験では、歩幅を身長 $\times m$ とし、 m を 60 歳以下では 0.45、60 歳以上では 0.40 とした。

環境情報

表 1 歩行者に関する情報

	身長 [cm]	年齢 [代]	性別
person1207	178	20	男性
person1208	171	20	男性
person1217	168	30	男性
person1234	174	50	男性
person1296	147	60	女性

表 2 行動識別率 (%)

	歩行	階段昇り	階段降り
歩行	88.8(55.0)	4.6(22.3)	6.6(22.7)
階段昇り	1.6(7.6)	93.5(81.2)	4.9(11.2)
階段降り	7.4(15.2)	0.7(5.5)	91.9(79.3)

階段は 12 段あり、階段 1 段の幅を 0.3m、高さを 0.15m とする。階段には踊場が存在し、その距離は 1~2m ほどである。また、階段は入り口に垂直に設置されているため、進入する前に必ず曲がる。

行動情報

本実験の経路では、曲がり角によって階段、通路が区切られているため、曲がり角から次の曲がり角への行動は同一であるとする。また、その区間内は直線的に移動する。

端末情報

端末は LG 製の Nexus4(OS:Android4.2) を利用し、腰後方中央に装着している。そのため、歩数検出には 1 波長分を利用する。

また、本実験で利用した経路の歩行者の情報を表 1 に示す。

4.3 行動認識

経路移動中の行動について、行動認識を行う。気圧センサはまだ搭載されている端末が少ないため、加速度センサ、角速度センサを利用する。歩行、階段昇降の 3 種類の基本行動データの 3 軸角速度データと加速度データのノルムを利用し、特徴量を用いた機械学習により行動の種類を推定する。特徴量には平均、分散、最大値、最小値、エネルギーを利用し、機械学習には Weka の J48 決定木を利用した。行動認識にも、行動センシング知識を利用する。行動情報から、区間内の行動は単一の行動をしているものとみなし、区間内の各行動の合計時間を計算し、最も時間の長いものをその区間の行動と推定する。また環境情報から、実験で利用する建物の階段には踊場が存在するため、階段周りの短い区間は踊場だと推定できる。これらの行動センシング知識を利用し、行動認識の精度向上を試みる。学習データには、HASC-IPSC に含まれるすべての歩行者の基本行動データを利用している。

行動認識を行った結果を表 2 に示す。

表 2 の括弧内の数字は、行動センシング知識を利用しな

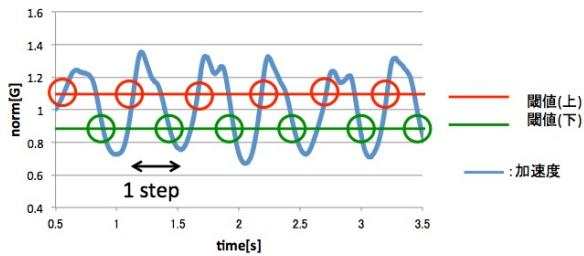


図 4 歩数検出

表 3 階段での距離推定精度

	平均誤差 [m]		改善率 [%]
	知識なし	知識あり	
person1207	6.1	0.8	86
person1208	6.2	0.9	86
person1217	4.9	0.8	84
person1234	4.0	1.5	63
person1296	4.4	0.5	87

かった場合の行動識別率を表す。行動センシング知識の利用により、認識精度の向上が確認できた。知識を利用しなかった場合には、歩行を階段昇りだと認識する結果が多く見られた。これは踊場は階段に挟まれており、踊場の長さが階段に比べて短かったため、階段での認識結果の影響を受けたと考えられる。

4.4 移動距離推定

行動認識の結果を用いて、移動距離推定を行う。経路を移動する際、歩行者は普段通りの歩行をしており、階段は1段ずつ昇り降りしている。移動経路を図2、図3に示す。黒線部は通路、赤線部は階段である。経路の全長は74.9m、階段部分は4箇所ある。この経路は1階から3階までの移動経路であり、歩行者は階段部分を2周している。

移動距離は歩数×歩幅で算出する。歩数検出には、加速度のノルムに閾値を用いた手法を適用した。検出の様子を図に示す。

閾値(上)と閾値(下)を設定し、加速度のノルムが閾値(上)を超え、さらに一定時間内(約1秒)に閾値(下)を超えた場合に1歩としてカウントし、移動距離全体の歩数を求める。本実験では、閾値(上)を1.1G、閾値(下)を0.95Gと設定した。1Gは重力加速度の大きさを示す。

階段移動時の歩行において、環境情報を利用し移動距離推定を行った結果を表3に示す。階段部分4回の移動における平均誤差を示している。また、経路の全長に対する誤差を表4に示す。この誤差は水平方向の移動距離の誤差を表す。誤差の改善率は、(知識なしの誤差-知識ありの誤差)/知識なしの誤差、で算出した。

行動センシング知識の利用により、どの歩行者に対しても誤差の軽減を確認できた。またこの結果から、階段部分

表 4 全長に対する誤差

	誤差 [m]		改善率 [%]
	知識なし	知識あり	
person1207	28.4	4.3	85
person1208	42.0	19.5	54
person1217	22.6	0.7	97
person1234	16.7	5.6	66
person1296	23.0	4.6	80

表 5 位置推定精度

	平均誤差 [m]		改善率 [%]
	知識なし	知識あり	
person1207	3.9	3.8	3
person1208	4.9	5.5	-12
person1217	6.5	6.2	5
person1234	2.8	2.9	4
person1296	2.3	3.8	-65

での誤差が大きく、移動距離推定に影響していると確認できた。

この距離推定手法を用いて、経路移動中の歩行者の位置を座標に変換し、0.1秒ごとに正解位置と比較した際の平均誤差を表5に示す。正解座標は、HASC-IPSCに含まれる正解データから導出している。

先ほどの全長に対する誤差に比べ、行動センシング知識を利用した場合と利用しなかった場合の差があまり見られない。また、誤差が増加している歩行者も確認できる。これは、移動経路の階段が多段の折り返し階段であるためだと考えられる。知識の利用による階段部分での誤差の軽減が、階段の折り返しによって打ち消されてしまったものと考えられる。歩行者が経路を移動する際の、0.1秒ごとの正解座標との誤差を図5に示す。

グラフの色のついた部分が階段部分である。歩幅の調整を行った階段部分においても誤差の増加が見られるのは、直前までの累積誤差が影響しているものだと考えられる。また person1296 では、歩行開始時から誤差が大きくなっているこれは person1296 は歩行開始直後の区間で行動認識を誤っており、認識の違いが誤差の増加につながったと考えられる。

5. おわりに

5.1 今後の課題

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

- 行動センシング知識の充実
本稿では行動センシング知識を定義し、その利用法について提案した、しかし、今回検討した利用法以外にも、精度向上に有用な利用法があると考えられる、そのため、行動センシング知識の利用法についてさらなる検討が必要だと考えられる。
- 歩幅の調整

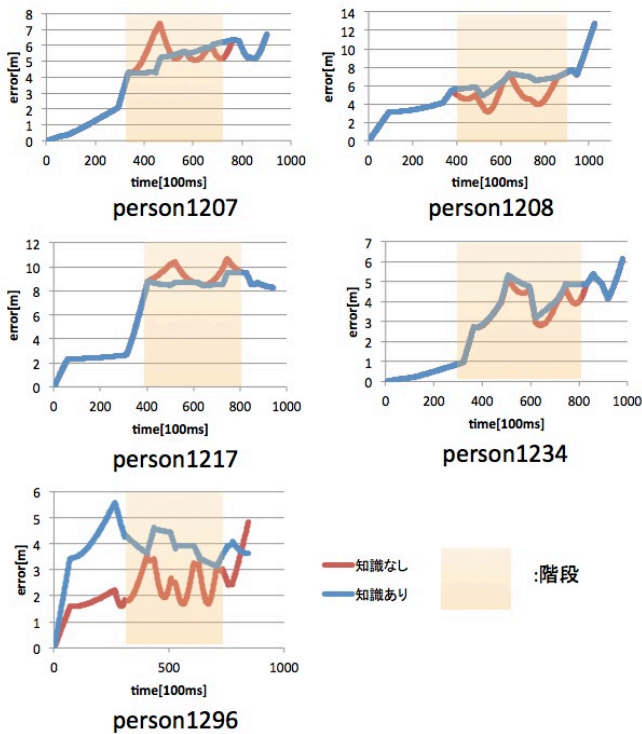


図5 経路移動中の誤差

歩幅の設定には身長，年齢を利用している。これらの情報によって推定される歩幅は，通常歩行時の歩幅である。しかし，歩幅は歩行速度や歩行環境によって変化するため，歩行速度や環境によって調整する必要があると考えられる。

- 曲がり角推定・端末の保持位置推定の導入
 評価実験の際，曲がり角と端末の保持位置には正解情報を利用している。しかし，実際に利用する際には，曲がり角方向の推定や端末の保持位置推定も必要であるため，これらの推定を含めた位置推定を行なう必要がある。

5.2 まとめ

本研究では，歩行者情報，環境情報，行動情報，端末情報の4つを行動センシング知識を定義し，それに基づく歩幅調整，行動認識によるPDR精度向上手法を提案した。HASC-IPSCに収録される経路移動データを用いて評価実験を行い，行動認識，移動距離推定に対して提案手法の有効性を確認した。行動センシング知識の利用により，行動認識では認識精度の向上，移動距離推定では経路の全長に対する誤差の軽減が確認できた。しかし，経路移動中の正解座標との距離の誤差は，あまり軽減されなかった。これは，本実験で利用した経路の階段が多段の折り返し階段であったため，行動センシング知識の利用による誤差の軽減があまり反映されなかったと推測される。また，階段部分

に差し掛かるまでの累積誤差が影響し，かえって精度を悪くしている可能性も考えられる。そのため，通路歩行時における位置推定精度の向上が必要である。今後の課題として，行動センシング知識の充実や歩幅の動的調整，曲がり角推定・端末の保持位置推定の導入が挙げられる。

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の助成をうけて実施された。

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, pp. 558-570, 2011.
- [2] 伊藤雅之, 馬建華. センサデータと状況検出を用いた室内位置推定. Technical Report 11, 法政大学情報科学研究科, 法政大学情報科学部, 2011.
- [3] 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.
- [4] 興裕正克, 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.
- [5] 山崎昌広, 佐藤陽彦. ヒトの歩行-歩幅, 歩調, 速度およびエネルギー代謝の観点から. 人類学雑誌, Vol. 98, No. 4, pp. p385-401, 1990.
- [6] 謙良翁長, 安俊吉永, 廷寧趙, Kenryo Onaga, Anshun Yoshinaga, Tingning Zhao. 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.
- [7] 興裕正克, 蔵田武志. 慣性センサ群とウェアラブルカメラを用いた歩行動作解析に基づくパーソナルポジショニング手法(テーマセッション(1))(ユビキタスコンピューティングのためのパターン認識・理解). 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 103, No. 737, pp. 25-30, 2004.
- [8] 五百蔵重典, 鈴木孝幸, 田中博. スマートフォン内蔵センサ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シンポジウム 2013 論文集, 第 2013 巻, pp. 723-735, 2013.
- [9] 渡辺穂高, 渡邊翔太, 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 (DICOMO) シンポジウム, 2013.
- [10] 巾達也, 梶克彦, 河口信夫. マルチセンサ位置推定手法における無線 LAN 受信遅延の影響. 情報処理学会全国大会講演論文集, 2014.
- [11] 上坂大輔, 村松茂樹. 実世界に広がる装着型センサを用いた行動センシングとその応用: 2. スマートフォンを用いた歩行者デッドレコニング-センサで人の位置が分かる仕組み-. 情報処理, Vol. 54, No. 6, pp. 570-573, 2013.
- [12] 河内智志, 藤波香織. 携帯電話の連続的な格納場所判定のための格納動作時および歩行中の判定処理併用手法. 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 2013, No. 1, pp. 149-151, 2013.
- [13] HASC Tool. <http://hasc.jp/tools/hasctool-en.html>.