情報処理学会論文誌 Vol.57 No.1 25–33 (Jan. 2016)

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

星 尚志[1,a) 藤井 雅弘[1,b) 羽多野 裕之[1,c) 伊藤 篤[1,d) 渡辺 裕[1,e)

受付日 2015年4月7日, 採録日 2015年10月2日

概要：歩行者向けの位置情報システム基盤構築のために，その絶対位置を測位する必要がある．GPS や無線 LAN などによる絶対位置情報が部分的にしか得られないような場合，絶対位置推定値が得られた位置からの移動を追随して位置情報を提供し続けるためにセンサを用いた PDR（Pedestrian Dead Reckoning）技術の研究がさかんに行われている．これまでの多くの PDR では，センサ系を歩行者に固定設置することで検討されてきた．しかしながら，日常的なスマートフォンの利用シーンを想定するとき，その保持状態は様々である．本論文では，端末の様々な保持状態に対して頑強な PDR 実現のための歩行者の進行方向推定について報告する．端末の様々な保持状態に対応するために，端末の座標系で観測されるセンサ情報を歩行者の座標系に変換することで汎用な歩行者進行方向推定を実現する．本検討では，まず端末座標系で観測されるセンサ情報を世界座標系に変換するために IMU（Inertial Measurement Unit）フィルタを導入する．IMU フィルタで世界座標系に変換されたセンサ情報の歩行に基づく特徴に着目し，加速度 PCA（Principal Component Analysis）法と角速度 PCA 法と角速度累積法を検討する．歩行実験の結果，角速度累積法によって端末の様々な保持状態に対して頑強な歩行者進行方向推定が実現可能であることを示す．

キーワード：歩行者デッドレコニング，スマートフォン，センサ，進行方向推定

Traveling Direction Estimation for Pedestrian Dead Reckoning using Smartphone

Hisashi Hoshi[1,a) Masahiro Fujii[1,b) Hiroyuki Hatano[1,c) Atsushi Ito[1,d) Yu Watanabe[1,e)

Received: April 7, 2015, Accepted: October 2, 2015

Abstract: It is necessary to estimate an absolute position of a pedestrian for location information service systems. When we only partly obtain the absolute position, we can make use of Pedestrian Dead Reckoning (PDR) techniques by using sensors to keep on providing the location information by tracking the move from the position. The conventional PDR techniques require to become fixed the sensors to a part of body of the pedestrian. However, it is difficult to always fix the holding state of the smartphone. In this paper, we report on a traveling direction estimation method for the robust PDR in several holding states of the smartphone. For that purpose, we estimate the traveling direction by converting the sensor information on the device coordinate system to that on the pedestrian coordinate system. We introduce the inertial measurement unit filter for the transformation. Next, we investigate acceleration Principal Component Analysis (PCA) method, angular rate PCA method, and angular rate cumulative method by focusing on characteristics, related to behaviors of the pedestrian, of the sensor information on the world coordinate system. We show that the proposed angular rate cumulative method provides accurate estimate of the traveling direction by some walking experiments.

Keywords: pedestrian dead reckoning, Smartphone, sensors, traveling direction estimation

[1] 宇都宮大学大学院工学研究科情報システム科学専攻
Department of Information Systems Science, Utsunomiya University, Utsunomiya, Tochigi 321–8585, Japan
[a)] hoshi@degas.is.utsunomiya-u.ac.jp
[b)] fujii@is.utsunomiya-u.ac.jp
[c)] hatano@is.utsunomiya-u.ac.jp
[d)] at.ito@is.utsunomiya-u.ac.jp
[e)] yu@is.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

近年，スマートフォンの普及にともない，歩行者向けナビゲーションなどの位置情報を用いた様々なサービスが提供されている．絶対位置情報を取得する代表的な方法として，GPS（Global Positioning System）がある．GPS は地上における絶対位置を計測するための衛星測位システムであり，3 つ以上の衛星から送信された信号を受信して受信点までの距離を伝搬時間から算出することで測位を行う．GPS では，衛星から受信器までの見通しでの伝搬経路を想定してしているため，屋外においても都市部などでの高層建築物により見通し伝搬経路が遮断され見通し外の反射信号が受信されるような環境においては，測位精度に大きな劣化が発生することが知られている [1]．さらに，屋内においては GPS 信号そのものが観測出来ず測位不可能となる場合が多い．そこで，屋内環境において設置済の無線 LAN [2] や Bluetooth [3] などの信号を用いて絶対位置を推定する手法が様々に検討されている．GPS や無線 LAN などによる絶対位置推定は定常的に利用できるとは限らず，間欠測位となる場合がある．絶対位置推定値が得られない場合やその測位精度が不十分である場合，端末に搭載されているセンサを用いて相対移動量を推定し，絶対位置情報欠損区間での移動を補間する歩行者デッドレコニング（Pedestrian Dead Reckoning：PDR）技術が有効であり，様々な研究が行われている [4], [5]．さらに，PDR による相対移動量推定と GPS による絶対位置推定を有機的に結合した手法 [6], [7] や，PDR と映像情報を組み合わせた手法 [8] なども検討されている．

図 1 に想定する相対移動の構成要素を示す．ここでは簡単のために，2 次元空間での相対移動について説明する．$\boldsymbol{a}_i$ は時刻 i での移動体の 2 次元平面上での絶対位置座標を示し，d_i と θ_i は時刻 $i-1$ から i の間での移動距離と進行方向を示す．ただし，進行方向がその時間区間で一定とみなせる程度に時刻の間隔が十分に短いものと想定する．このとき，時刻 i での絶対位置 $\boldsymbol{a}_i$ は，時刻 $i-1$ での絶対位置 $\boldsymbol{a}_{i-1}$ と移動距離 d_i と進行方向 θ_i によって，$\boldsymbol{a}_i = \boldsymbol{a}_{i-1} + d_i[\cos\theta_i, \sin\theta_i]^T$ として与えられる．したがって，起点となる絶対位置 $\boldsymbol{a}_0$ が GPS や無線 LAN などによる絶対位置推定技術によって推定されたとき，PDR 技術によって移動距離 d_i と進行方向 θ_i を各時刻で推定することで移動にともなう絶対位置の変化を追随して推定することができる．PDR の目的は端末で観測できる各時刻でのセンサ情報を用いて移動距離と進行方向を精度良く推定することである．

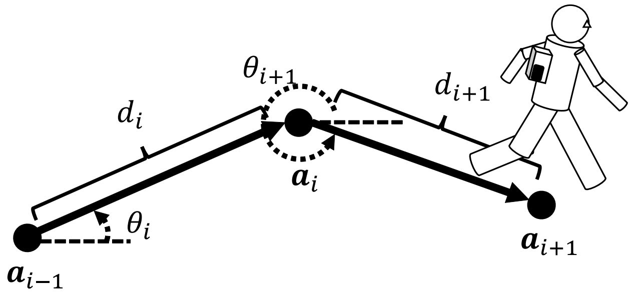

図 1 相対移動の構成要素
Fig. 1 Elements of relative move.

これまで特殊構成されたセンサ群を用いた PDR の研究も多く行われているが，この場合，サービスアプリケーションとしての実装の汎化が困難であるという問題がある．そこで本論文では，センサ端末として容易に入手可能で，歩行者ナビゲーションとして適用するために実用上最も有用と考えられるスマートフォン端末を用いた PDR について検討する．現在普及しているスマートフォンの多くには，加速度，角速度，地磁気センサが搭載されており，これらの観測値を取得できる標準 API を利用してアプリケーションとして実現する．

これまでの PDR の研究において，移動距離推定には万歩計方式が採用される場合が多い．この手法では加速度センサの観測値から歩行者の歩数を計測し，歩数とあらかじめ設定した歩幅を乗算することで移動距離を推定する．また，進行方向推定では端末保持状態に制約を課して地磁気センサを用いるものが多い．興梠らの研究では，センサ端末を腰に装着し，重力加速度を除いた加速度値に対して主成分分析（PCA：Principal Component Analysis）を行うことで進行方向を推定している [8]．重力加速度成分を除くことで，前進運動によって生じる加速度の変化に着目した手法である．佐川らの研究では，センサ端末を足の爪先に装着して 3 軸加速度を 2 回積分することで移動距離を推定している [9], [10]．歩行時の足の動作は比較的大きいため，歩行によって発生する加速度の影響を直接観測することができることに着目している．そのため，加速度を積分しても少ない誤差で移動距離推定が可能である．移動距離と進行方向は世界座標系で計測される必要があり，この端末保持状態の制約は世界座標系と端末座標系を直接対応させるためには有効である．また，センサ系が固定されている場合，方位推定に地磁気を利用することも容易である．ただし，周囲の構造物，特に屋内では鉄筋構造による地磁気の歪みや，エレベータなどの磁性体構造物の移動にともなう地磁気の擾乱が発生することに注意する必要がある．

しかしながら，歩行者ナビゲーションなどのアプリケーションを想定したスマートフォン端末の利用シーンにおいて，このような端末保持状態の制約は現実的ではない．たとえば，日常的なスマートフォンによるナビゲーションの利用シーンを考えるとき，つねに体躯のある位置にスマートフォンを固定していることは想定しにくく，手に保持してその手を振りながら歩行する場合なども考えられる．このような場合，端末座標系でのセンサ情報の変化は歩行者

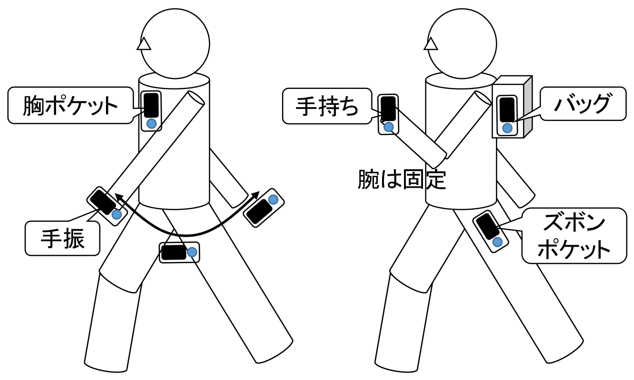

図 2　スマートフォンの保持状態
Fig. 2　Holding states of smartphone.

の移動の座標系での変化と異なり，端末座標系で観測されたセンサ情報は直接，歩行者の進行方向の推定に利用できない．そこで，本研究では，日常的な様々なスマートフォンの保持状態として**図 2** に示す「手持ち」,「ズボンポケット」,「手振」,「胸ポケット」,「バッグ」の 5 つの保持状態を想定し，歩行者の進行方向推定手法について検討する．保持状態に応じた PDR の研究 [11], [12] や，保持状態の判別に関する研究 [13] なども行われている．歩行者の進行方向を推定するためには，歩行者の移動に着目した座標系を規定する必要がある．しかしながら，図 2 に示すような様々な保持状態においては，2 章で詳説する端末座標系と歩行者座標系が必ずしも一致しない．したがって，端末座標系で得られたセンサ情報を歩行者座標系に変換する必要がある．しかし，端末座標系から歩行者座標系への直接的な変換は困難であるので，端末の姿勢推定に相当する端末座標系から世界座標系への変換を 3 章において検討する．次に，世界座標系に変換されたセンサ情報を歩行者座標系に変換する手法について 4 章で提案する．この変換は歩行者の進行方向を推定することに対応する．本論文では，世界座標系での加速度センサ情報を PCA 処理する手法 [8] と，角速度センサ情報を PCA 処理する手法と，角速度センサ情報の累積を用いた手法の 3 種の手法について検討する．5 章において，これらの手法を用いた歩行実験の結果について説明し，提案する角速度センサ情報の累積を用いた手法が様々な端末保持状態において最も頑強で良好な進行方向推定精度を提供可能であることを示す．最後に，6 章において，本論文のまとめを行う．

2.　座標系

本章では，想定する PDR 環境における座標系について説明する．本論文では，スマートフォン端末の座標系を端末座標系として D 座標系と名付ける．**図 3** に示す D 座標系は，スマートフォン OS によって規定される座標系に一致し，スクリーンに対して鉛直上方向を D_z 軸，スクリーンに正対して右方向を D_x 軸，上方向を D_y 軸とする座標系

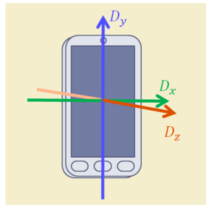

図 3　D 座標系
Fig. 3　D coordinate system.

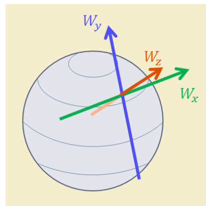

図 4　W 座標系
Fig. 4　W coordinate system.

図 5　P 座標系
Fig. 5　P coordinate system.

とする．一般的なスマートフォンの API を用いて計測できるセンサ情報はこの D 座標系において出力される．次に，D 座標系の回転のみによって表現され，端末原点から眺めた東西南北に相当する座標系である世界座標系を W 座標系と名付ける．**図 4** に示す W 座標系は，地表に対して水平東方向を W_x 軸，地表に対して水平北方向を W_y 軸，重力加速度逆方向の地表に対して鉛直上空方向を W_z 軸とした座標系である．この W 座標系は測地系での方位に一致するが，緯度経度高度によって規定される座標系の概念とは異なることに注意する．D 座標系と W 座標系との関係は，W 座標系における端末姿勢に相当する．次に，W 座標系の回転のみによって表現され，歩行者の進行方向を規定する座標系を歩行者座標系として P 座標系と名付ける．**図 5** に示す P 座標系は，地表に対して水平方向に移動する歩行者の進行方向右手方向を P_x 軸，進行方向を P_y 軸，地表鉛直上空方向を P_z 軸とした座標系である．W 座標系と P 座標系は，W_z 軸と P_z 軸が等しい制約の下で，W 座標系における歩行者の進行方向によって対応付けられる．当然，これらの 3 つの座標系はそれぞれ，座標系の回転のみによって可換である．

3.　D 座標系から W 座標系への変換

本論文での目的は，歩行者が保持しているスマートフォ

ンにおける D 座標系で観測されるセンサ情報を用いて，P 座標系における P_y 軸の向きを W 座標系に対応させることで歩行者の進行方向を推定することである．ただし，図 2 に示すように歩行者の歩行中での端末の保持状態は様々であり，端末姿勢が時間とともに変化するような場合，D 座標系でのセンサ情報を用いて P 座標系へ直接変換を行うことは困難である．そこで，まず D 座標系から W 座標系に変換することで，端末姿勢を推定することから始める．本節では D 座標系でのセンサ情報を用いて，それを W 座標系に変換するいくつかの手法について説明する．この変換は W 座標系における端末姿勢を推定することと等価である．

3.1　加速度と地磁気を用いた変換

センサ系が静止していることが仮定できるとき，計測された 3 軸加速度センサ情報によって構成されるベクトルは重力加速度逆方向の地表鉛直方向を指す．また，地磁気の歪みがないと仮定できるとき，計測された 3 軸地磁気センサ情報によって構成されるベクトルは磁北を指す．これらの加速度と地磁気の性質に基づいて D 座標系で観測されたセンサ情報を用いて W 座標系での各軸の単位ベクトルが算出可能である [9]．これは D 座標系から W 座標系への回転を表す回転行列を算出することに相当する．静止を仮定しているので，W_z 軸の方向は D 座標系で指し示される加速度ベクトルの方向と一致し，W_x 軸の方向は地磁気ベクトルと加速度ベクトルの外積で与えられ，W_y 軸の方向は W_z 軸を指すベクトルと W_x 軸を指すベクトルの外積で与えられることになる．この手法はセンサ系の静止，もしくは重力加速度の大きさに対して移動にともなう加速度の大きさが十分小さいことが仮定されているので，センサ系に大きな加速度が発生する運動状態では適用が困難である．また，地磁気の正確性も仮定しているので，周囲に地磁気の擾乱を引き起こすような構造物などが存在する場合，その精度が劣化する．

3.2　角速度を用いた変換

3.1 節の手法と異なり，初期のセンサ系の姿勢，すなわち D 座標系から W 座標系への回転行列が与えられていることが想定できるとき，角速度センサ情報を用いて逐次的に回転行列を算出する変換手法がある [14]．角速度センサでは D 座標系の各軸での単位時間あたりの回転角が計測されるので，計測された角速度センサ情報を時間積分することで回転角を得ることができる．角速度センサ情報を各軸で時間積分することで差分回転角が定まるので，初期姿勢，すなわち初期回転角が得られていれば，センサ系の姿勢変化を追随して計測可能である．ただし，角速度センサではドリフトが生じることが知られており，このドリフトにより，たとえセンサ系が静止していたとしても回転が生じていると計測してしまう問題がある．

3.3　IMU フィルタを用いた変換

IMU（Inertial Measurement Unit）フィルタは，航空機や車両などの姿勢制御などにも用いられており，加速度と角速度センサ情報を用いて座標系変換を行う手法である [15]．これは，3.2 節で示した角速度センサ情報による回転角の推定において，加速度センサ情報を用いて補正する手法である．この手法は 3.1 節で示した手法と異なり，地磁気センサ情報を用いないので，周辺環境に依存しない．

3.4　MARG フィルタを用いた変換

MARG（Magnetic, Angular Rate, and Gravity）フィルタでは，加速度と角速度センサ情報に加えて地磁気センサ情報を用いて座標変換を行う手法である．MARG フィルタは地磁気センサ情報を用いるため地磁気の擾乱の影響を受ける問題があるが，この擾乱と角速度センサのドリフトを抑圧するためのアルゴリズムも検討されている [15]．

本検討では主に屋内での PDR を想定している．これまで示したとおり，D 座標系から W 座標系に変換する手法として地磁気センサ情報を用いるものがあるが，これらの手法は地磁気の擾乱の影響を強く受ける．鉄筋構造物構内での事前調査においても屋内では地磁気の乱れが大きく，特にエレベータのような磁性を有する大型物体の移動が原因と見られる地磁気擾乱が発生した．そこで本検討では地磁気センサを用いないことを条件として課す．このとき，角速度を用いた変換，IMU フィルタを用いた変換が選択肢となる．角速度のみを用いた変換より，加速度を付加的に利用した変換である IMU フィルタを用いた変換の方が当然，変換誤差が少なくて済む．そこで，本検討では文献 [15] で示される IMU アルゴリズムを実装し D 座標系から W 座標系への変換を行う．ただし，地磁気センサ情報を用いないために W 座標系での絶対方位が不定であるので，初期状態では D 座標系と W 座標系が一致するように端末が設置されることを条件として課すものとする．この初期制約条件は，PDR 計測の自由度を損なう恐れがあるので今後改善の必要がある．

4.　進行方向推定

本章では，3 章で述べた D 座標系で観測された加速度と角速度のセンサ情報が IMU フィルタアルゴリズムによって W 座標系に変換された後のセンサ情報を用いた歩行者の進行方向の推定手法について説明する．W 座標系でのセンサ情報は単に端末姿勢を表現しているので，このままでは歩行者の進行方向に対応しない．図 2 に示すような端末保持状態を仮定するとき，歩行者の移動にともないそれぞれの保持状態に応じた W 座標系における特徴的なセンサ情報の変化が現れると考えられる．本節では歩行にともな

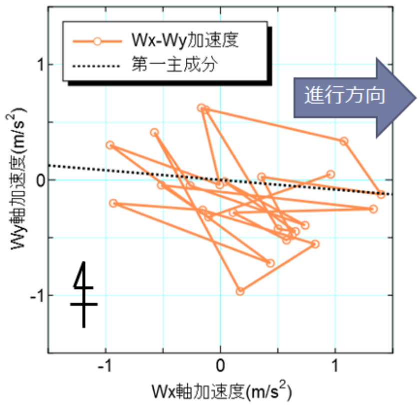

図 6 「手持ち」歩行時の加速度変化

Fig. 6 Acceleration variation in case of walking with smartphone.

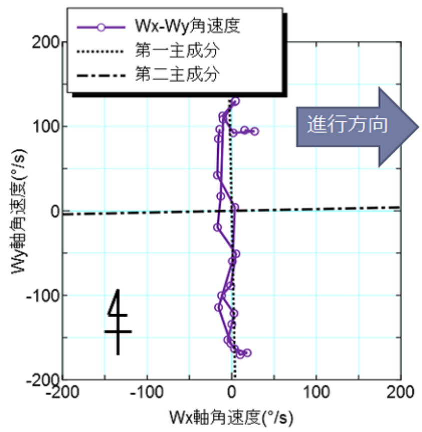

図 7 「手振」歩行時の角速度変化

Fig. 7 Angular rate variation in case of walk swinging one's arms.

うセンサ情報の変化の特徴に基づいて歩行者の進行方向を推定する手法について提案する．図 5 に示す P 座標系における P_z 軸は歩行者の重心ベクトルの逆向きで定義されているため，図 4 に示す W 座標系における重力加速度の逆向きとして定義されている W_z 軸に当然一致する．本手法はこの P_z 軸と W_z 軸の一致の普遍性を利用する．このとき，歩行者の進行方向である P_y 軸の決定は W 座標系における W_z 軸周りの回転を決定することと等価となる．本論文では，歩行者の移動にともなう W 座標系でのセンサ情報の時系列変化の特徴に着目し，以下の 3 種類の歩行者の進行方向推定手法を検討する．

- 加速度 PCA 法（加速度の主成分分析による推定）
- 角速度 PCA 法（角速度の主成分分析による推定）
- 角速度累積法（W_z 軸角速度の累積による推定）

4.1 加速度 PCA 法

歩行者の移動にともない，W 座標系での加速度センサ情報には時系列での変化が表れるものと考えられる．図 2 に示す「手持ち」歩行時での W 座標系での 3 軸加速度センサ情報のうち，W_x 軸と W_y 軸の値を $W_x - W_y$ 平面上にプロットした例を**図 6** に示す．図 6 は，歩行者が紙面右方向に対応する東方向に等速で歩行した場合での例である．「手持ち」の場合，端末は歩行者に対して正対して安定して保持されているので，歩行にともなう前後運動に起因する加速度の時間変化は歩行者の進行方向と相関が高いと考えられる [8]．そこで，時刻 i において，時刻 $i - N + 1$ から時刻 i までの N 個の W 座標系での 3 軸加速度センサ情報に 3 次元 PCA を適用し，その第 1 主成分によって形成される軸を歩行者の進行方向軸，すなわち P_y 軸とする．図 6 中の点線は，この例での第 1 主成分を示す．これは加速度センサ情報が得られる標本時刻ごとに算出され，これを時刻 i での歩行者の進行方向 θ_i の推定値 $\hat{\theta}_i$ とする．しかしながら，この手法では P_y 軸の向きが不定であり，180 [°] の方向不確定性が生じる．本検討では，初期状態において D 座標系と W 座標系が一致するように端末が設置されている条件から制約される方向に基づいて，時刻 0 での歩行者の進行方向 θ_0 の推定値 $\hat{\theta}_0$ を与える．時刻 $i > 0$ においては，加速度センサ情報の標本間隔内で進行方向変化の絶対値が 90 [°] 未満であると仮定し，時刻 i での進行方向推定値 $\hat{\theta}_i$ は時刻 $i - 1$ での推定値 $\hat{\theta}_{i-1}$ に近い方向を進行方向として与えることとする．加速度センサ情報の標本間隔を 100 [ms] 以下程度することで，この仮定は通常の歩行状況において成立するものと考えられる．これにより，P_y 軸が定まるので，$P_z = W_z$ より，各時刻での W 座標系から P 座標系への変換が完了する．本論文では基礎的な検討のために，重力加速度方向に直交する平面での歩行を想定しているが，3 次元 PCA を利用しているので斜度のあるスロープや階段などでも適用可能であると考えられる．ただし，本手法は N 個の標本区間において同一進行方向を仮定しているので，この標本区間内で大きな進行方向の変化が生じた場合，適切に動作しないという問題がある．同一方向に進行している場合は N を大きくするほど平滑化効果のおかげで，より精度良く進行方向推定が可能であるが，大きな N は進行方向変化時に追随できないという問題があり，適切な N の設定は困難であると考えられる．

4.2 角速度 PCA 法

4.1 節で示した加速度 PCA による歩行者の進行方向推定は，「手持ち」のような歩行者の移動にともなう加速度センサ情報の時間変化が歩行に直接的に作用する場合には有効であると考えられるが，図 2 での「手振」のような場合は適切でない可能性がある．そこで，もう 1 つのセンサ情報である角速度に着目する．**図 7** に「手振」歩行時での W 座標系での 3 軸角速度センサ情報のうち，W_x 軸と W_y 軸の値を $W_x - W_y$ 平面上にプロットした例を示す．これは図 6 の例と同様に，歩行者が紙面右方向に対応する東方向に等速で歩行している例である．この例から，角速度セ

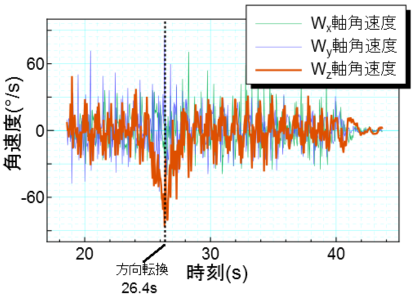

図 8 角速度時系列の例
Fig. 8 An example of time series of angular rate.

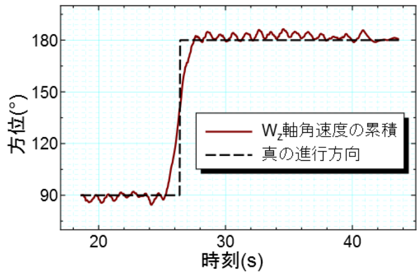

図 9 W_z 軸角速度の累積による方向推定
Fig. 9 Direction Estimation by cumulating W_z angular rate.

ンサ情報の時間変化は進行方向と直交した方向と相関が高いことが分かる．これは，図 2 に示すような「手振」歩行時に観測できる特徴であるが，歩行時の腕の動作による端末の P_x 軸周りでの回転に起因する現象であると考えられる．このような現象は図 2 における「胸ポケット」では肩などの上半身の回転,「ズボンポケット」では股などの下半身の回転でも観測できる．そこで，3.1 節と同様に，角速度センサ情報の各標本時刻において，3 軸角速度センサ情報の過去 N 時刻の標本に 3 次元 PCA を適用し，その第二主成分を歩行者の進行方向軸 P_y とする．図 7 の点線は第一主成分，一点鎖線は第二主成分を示す．第一主成分は歩行者の進行方向に直交すると想定されるので，第一主成分と直交する第二主成分を用いて歩行者の進行方向とする．ただし，この手法も，4.1 節での加速度 PCA の場合と同様に毎標本時刻での 180 [°] の方向不確定性問題が発生するので，4.1 節と同一の規範に基いて各時刻での歩行者の進行方向の推定値を決定する．さらに，標本数 N の適切な設定の問題もあり，かつ，角速度センサ情報に依存してるので，角速度センサのドリフトの影響を受ける可能性があることに注意する．

4.3 角速度累積法

前述のとおり，歩行者の進行方向の変化は W 座標系での W_z 軸周りの回転と等価である．すなわち，回転を表す角速度センサ情報の W 座標系での時系列観測によって歩行者の進行方向の変化が観測できると考えられる．**図 8** に「手持ち」歩行時での W 座標系での 3 軸角速度センサ情報のそれぞれの時系列例を示す．この試行例では，歩行者が「手持ち」状態で等速歩行し，計測開始から 26.4 [s] までは西方向に移動し，それ以降は北方向に移動した．この試行において，計測の様子をビデオカメラで撮影し，動画の時刻情報と計測に用いたスマートフォンの内部時計をオフラインで同期することによって方向変化のタイミングを整合させている．図 8 中に示す方向転換時刻 26.4 [s] 付近で W_z 軸角速度に大きな変化が現れていることが観測された．したがって仮説どおり，W 座標系での W_z 軸での角速度センサ情報を用いることで進行方向の変化を捕えることが可能であると考えられる．角速度は単位時間あたりの回転角であるので，時刻 $i-1$ から時刻 i までの時間を ΔT_i [s] とし，時刻 i での W_z 軸での角速度センサ情報を $\omega_{z,i}$ [°/s] とすると，時刻 i での回転角は $\omega_{z,i}\Delta T_i$ [°] で与えられる．これは，時刻 $i-1$ から時刻 i までの移動にともなう進行方向の変化に相当するので，時刻 i での進行方向 θ_i の推定値は

$$\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + \omega_{z,i}\Delta T_i \qquad (1)$$

で与えられる．これは，結果的に角速度センサ情報から求めた回転角を累積しているので，角速度累積法と呼ぶことにする．しかしながら，この手法では初期方向 θ_0 の推定値 $\hat{\theta}_0$ の情報が必要である．この条件は，4.1，4.2 節で示した加速度 PCA と角速度 PCA における初期方向条件の制約と同一である．これは D 座標系と W 座標系の初期姿勢一致条件から同様に解決される．図 8 の試行データに対応して，**図 9** 中の鎖線は真の進行方向，実線は式 (1) に基づく角速度累積法を用いた場合での歩行者の進行方向の推定値を示す．1 時刻前との進行方向差 $\theta_i - \theta_{i-1}$ が角速度とその標本間隔の積 $\omega_{z,i}\Delta T_i$ に一致するという恒等関係から導ける提案手法により良好な進行方向推定が可能であることが示せた．本提案手法は観測時刻ごとに進行方向が推定できるので，PCA を用いた手法での適切な標本数 N の設定問題から解放される．しかしながら，この手法は 4.2 節での角速度 PCA と同様に，角速度センサ情報のドリフトの累積の影響を受ける可能性があることに注意する．

5. 評価実験

本章では，提案する 3 種の進行方向推定手法の性能を歩行実験を通じて評価する．端末の保持状態として，図 2 に示す「手持ち」,「手振」,「ズボンポケット」,「胸ポケット」,「バッグ」で実験を行った．実験環境は宇都宮大学工学部情報棟 2 階廊下で，**図 10** に示すように L 字のルートである．被験者は 10 名で試行ごとに設定した端末保持状態で歩行実験を行い，計 62 試行を行った．また，センサ端末の個体依存性を排除するために，すべての試行で同一の端末を用いた．センサのサンプリングレートは 25 [Hz]，端末は初期姿勢として D 座標系=W 座標系の状態とした．また方向転換時刻とセンサ情報取得時刻の同期はビデオカメ

情報処理学会論文誌　Vol.57　No.1　25–33 (Jan. 2016)

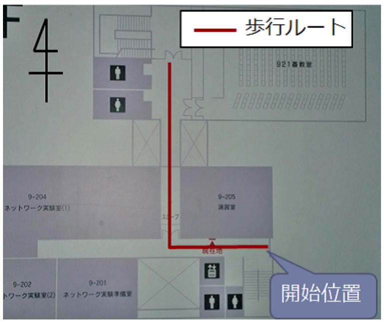

図 10　実験環境
Fig. 10　Experiment environment.

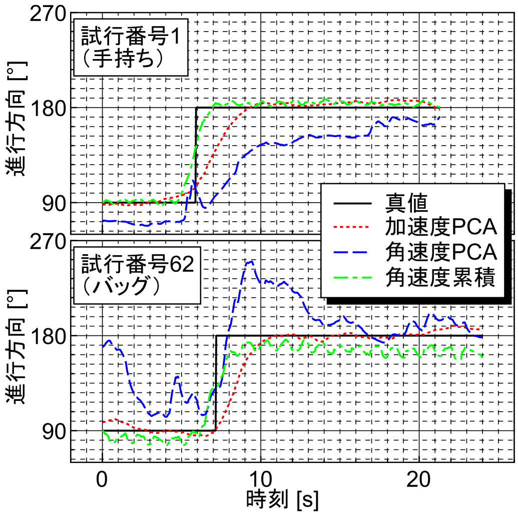

図 11　試行番号 1 と 62 での進行方向の推定値の時系列変化
Fig. 11　Time series of estimate of traveling direction (trial number 1 and 62).

ラでの撮影に基づいて行った．第 k 番目の試行での時刻 i での真の進行方向を $\theta_{k,i}$，その推定値を $\hat{\theta}_{k,i}$ とするとき，Root Mean Square（RMS）誤差 ε_k を

$$\varepsilon_k = \sqrt{\frac{1}{L_k}\sum_{i=0}^{L_k-1}(\hat{\theta}_{k,i}-\theta_{k,i})^2} \tag{2}$$

と定義し評価を行う．ここで，L_k は第 k 試行での標本数である．L_k は試行ごとに異なることに注意する．本評価実験では，端末の初期姿勢として，D 座標系から W 座標系が一致するように端末を設置し，計測を開始している．これは，D 座標系から W 座標系への変換を IMU を用いて行うための制約である．また，W 座標系から P 座標系への加速度 PCA 法と角速度 PCA 法と角速度累積法の 3 種類の変換手法において，進行方向の初期推定値 $\hat{\theta}_0$ が必要であるので，これを理想的に真値として与え，すべての手法において同一の条件の下で計測が行われている．

5.1　実験結果

図 11 に試行番号 1（手持ち）と試行番号 62（バッグ）での真の進行方向と 3 種類の進行方向推定の計測時刻に対する変化を示す．**図 12**，**図 13** に式 (1) で定義した試行ごとの RMS 誤差と，各試行での瞬時誤差の絶対値 $|\hat{\theta}_{k,i}-\theta_{k,i}|$ のその試行内での最大値 $\max_{i=0,\cdots,L_k-1}|\hat{\theta}_{k,i}-\theta_{k,i}|$ と最小値 $\min_{i=0,\cdots,L_k-1}|\hat{\theta}_{k,i}-\theta_{k,i}|$ を示す．また，**表 1** に保持状態別の RMS 誤差の平均を示す．4.1 節，4.2 節で示した加速度と角速度 PCA における標本区間は両者の平均で RMS 誤差が最も小さくなった $N = 65$ を採用した．しかしながら，これは本実験における結果から調整されたパラメータであり，歩行経路が異なれば適切な N もまた異なることに注意する．PCA を用いた手法は，前述のように同一方向に歩行者が進行していることを仮定しているので，その仮定が維持できない経路での歩行においては最適な適用が不可能であるという本質的な問題がある．

図 11 から，PCA を用いた 2 つの手法は過去の N 個の観

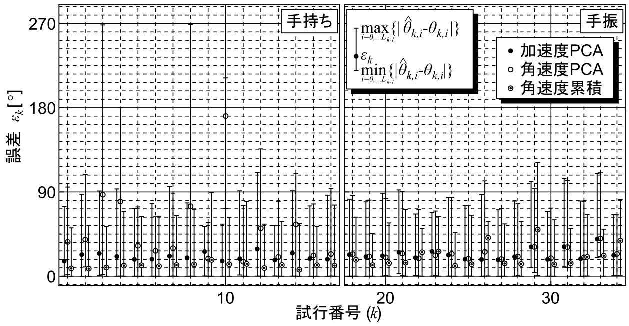

図 12　試行番号 k ごとの RMS 誤差 ε_k（左：手持ち，右：手振）
Fig. 12　RMS error ε_k v.s. trial number k (left: in hand, right: swinging).

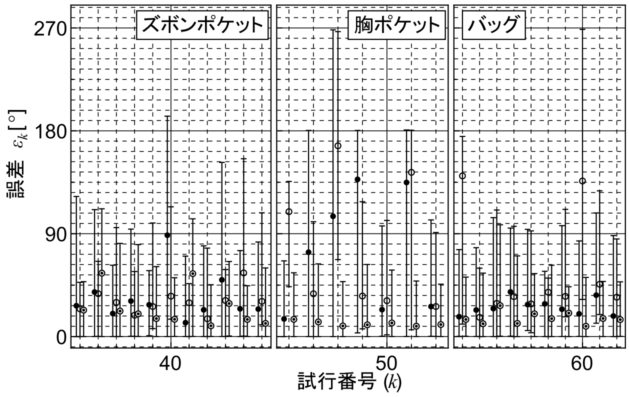

図 13　試行番号 k ごとの RMS 誤差 ε_k（左：ズボンポケット，中：胸ポケット，右：バッグ）
Fig. 13　RMS error ε_k v.s. trial number k (left: pants pocket, center: breast pocket, right: bag).

表 1　保持状態ごとの進行方向推定誤差の平均 [°]
Table 1　Average RMS error in each holding state [°].

	手持ち	手振	ズボンポケット	胸ポケット	バッグ
加速度 PCA	20.3	21.3	29.0	44.6	26.4
角速度 PCA	55.7	21.7	27.3	73.3	50.0
角速度累積法	11.8	18.2	24.9	15.0	15.4

測データを用いて進行方向を推定するため，方向変化が生じた時刻より遅れて推定値の方向変化が生じていることが分かる．それに対して，角速度累積法では 1 時刻前の推定方向との差分から現在の進行方向を推定するため，進行方向変化への追随性が良い．しかしながら，歩行にともなう角速度の変化に敏感であるため，歩調に合わせて推定方向が振動していることが確認できる．加速度 PCA を用いた手法は「手持ち」を想定した手法であるので,「手持ち」の場合での RMS 誤差が最も小さくなった．ただし,「手振」においても良好な RMS 誤差特性を示しており,「手振」歩行時でも W 座標系での加速度の変化と進行方向の相関が高く現れたためであると考えられる．角速度 PCA を用いた手法は「手振」を想定した手法であるので,「手振」の場合での RMS 誤差が最も小さくなった．「スボンポケット」においても良好な RMS 誤差特性が示されたが,「胸ポケット」では期待された結果とならなかった．PCA を用いた手法では，毎標本時での方向不確定性の解消のために，時刻 $i-1$ での推定方向 $\hat{\theta}_{i-1}$ に近い方向を時刻 i での推定方向 $\hat{\theta}_i$ とするため，一度推定方向が 180 [°] 反転してしまうと，進行方向と逆方向に推定し続けてしまう．図 12 と図 13 に示すように，瞬時誤差の絶対値の最大値が 180 [°] を超える現象が生じており，この場合，引き続く推定が正確に行われても 180 [°] の誤差がつねに発生してしまい，RMS 誤差を引き上げる要因になる．また，方向不確定性の問題が発生しなくても，標本区間を適切に設定する明確な規範が存在せず N を固定せざるを得ないため，PCA を用いた手法は進行方向に急激な変化が発生したときの追随性が悪く RMS 誤差の増大を引き起こす．PCA を用いた手法に対して，角速度累積法はすべての保持状態において安定して最も小さい RMS 誤差特性を示した．「バッグ」のような歩行にともなう端末姿勢の変化が予測不能なような保持状態においても良好な RMS 誤差特性を示した．PCA のように N 時刻前までの観測値に依存する手法と比べて，提案する角速度累積法は 1 時刻前の進行方向推定値にのみ依存するので，方向転換に対して頑強な手法である．ただし，今回の試行実験においては大きな影響は現れなかったが，角速度センサのドリフトの影響の懸念がある．今後のセンサ技術の進展によるセンサ内部でのドリフト補償や補正アルゴリズムの発展により，この問題は軽減可能であると考えられる．

6. まとめ

本論文では，スマートフォンを用いた PDR のための歩行者の進行方向の推定手法について検討を行った．これまでの PDR でのセンサ系を体に固定設置する条件を緩和し，端末の様々な保持状態における進行方向推定について検証を行った．まず，歩行時の端末の様々な保持状態に対応するために，D 座標系でのセンサ情報を W 座標系に変換するために IMU フィルタを導入した．IMU フィルタにより W 座標系に変換されたセンサ情報の歩行時での特徴に着目し，加速度 PCA 法と角速度 PCA 法と角速度累積法の 3 種の進行方向推定アルゴリズムについて検討した．歩行実験の結果，角速度累積法が様々な保持状態に対して最も頑強な手法であることが示された．

本論文では初期状態において D 座標系と W 座標系が一致することを制約条件として課しているが，その緩和について検討する必要がある．また，PDR を実現するための 2 要素は移動距離と進行方向であるので，本検討で得られた知見を活用して端末の保持状態に依存しない移動距離推定の高度化のための検討を行う予定である．さらに，本論文で検証した 5 種類の保持状態以外での保持状態での提案手法の有効性の評価を行う予定である．

参考文献

[1] 安田明生：GPS 技術の展望，電子情報通信学会論文誌，Vol.J84-B, No.12, pp.2082–2091 (2001).

[2] 石倉純次，相川　聡：無線 LAN 端末測距精度を相互利用した重み付け位置推定手法に関する一検討，電子情報通信学会技術報告，Vol.110, No.324, pp.23–28 (2010).

[3] 田岡康裕，納谷　太，野間春生，小暮　潔，李　周浩：Bluetooth の電波強度を用いたユーザの位置推定手法，情報処理学会研究報告，Vol.2008-UBI-19, No.26, pp.147–152 (2008).

[4] 大竹久美子，蒔苗耕司：自律型測位を用いた歩行者経路案内システムの構築，地理情報システム学会講演論文集，Vol.13, pp.419–422 (2004).

[5] 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).

[6] 興梠正克，酒田信親，大隈隆史，蔵田武志：屋内外歩行者ナビのためのデッドレコニング/GPS/RFID を統合した組み込み型パーソナルポジショニングシステム，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.106, No.234, pp.109–114 (2006).

[7] 小河原亮，藤井雅弘，羽多野裕之，渡辺　裕：GPS 測位情報とセンサ情報に基づく位置推定システムに関する研究，情報処理学会論文誌，Vol.56, No.1, pp.2–12 (2015).

[8] 興梠正克，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，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.103, No.737, pp.25–30 (2004).

[9] 佐川貢一，煤孫光俊，猪岡　光：加速度積分による 3 次元歩行移動量の無拘束計測，計測自動制御学会東北支部第 202 回研究集会，No.202-10 (2002).

[10] 佐川貢一，煤孫光俊，大瀧保明，猪岡　光：足爪先加速度積分による歩行経路の 3 次元無拘束計測，計測自動制御学会論文集，Vol.40, No.6, pp.635–641 (2004).

[11] Kamisaka, D., Muramatsu, S., Iwamoto, T. and Yokoyama, H.: Design and Implementation of Pedestrian Dead Reckoning System on a Mobile Phone, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.94, No.6, pp.1137–1146 (2011).

[12] Steinhoff, U. and Schiele, B.: Dead Reckoning from the Pocket - An Experimental Study, *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, pp.162–170 (2010).

[13] Fujinami, K. and Kouchi, S.: Recognizing a Mobile

Phone's Storing Position as a Context of a Device and a User, Mobile and Ubiquitous Systems, Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services, Vol.120, pp.76–88 (2013).
[14] 廣田祐馬，藤井雅弘，渡辺　裕：慣性航法による携帯端末の相対移動推定に関する一検討，情報処理学会第 75 回全国大会，IW-5, pp.205–206 (2013).
[15] Madgwick, S.O.H.: An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays (online), available from ⟨https://www.samba.org/tridge/UAV/madgwick_internal_report.pdf⟩ (accessed 2015-03-20).

星 尚志 （学生会員）

1990 年生．2013 年宇都宮大学工学部情報工学科卒業．2015 年同大学大学院工学研究科修士課程修了．同年 KDDI 株式会社入社．現在に至る．歩行者位置推定システムの研究に従事．情報処理学会第 76，77 回全国大会学生奨励賞．

藤井 雅弘 （正会員）

1975 年生．1998 年東京理科大学基礎工学部電子応用工学科卒業．2000 年同大学大学院修士課程修了．2003 年同大学院博士後期課程修了．博士（工学）．2003 年同大基礎工学部助手．2006 年宇都宮大学工学部助手．2010 年宇都宮大学大学院工学研究科准教授．現在に至る．無線通信システム，ITS 等の研究に従事．電子情報通信学会 ITS 研究専門委員会副委員長，東京支部運営委員，基礎・境界ソサイエティ英文論文誌編集委員，同学会同ソサイエティ運営委員．IEEE ITS Society Tokyo Chapter Secretary．2002 年 IEEE VTS Japan Researcher's Encouragement Award．2005 年情報理論とその応用学会研究奨励賞．2009 年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ編集活動感謝状．2012 年同学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞．2014 年同学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞．2014 年同学会通信ソサイエティ活動功労賞．電子情報通信学会シニア会員．IEEE 会員．

羽多野 裕之 （正会員）

1980 年生．2003 年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業．2005 年同大学大学院博士課程前期課程修了．2008 年同大学院博士課程後期課程修了．博士（工学）．2008 年静岡大学大学院工学研究科助教．2013 年宇都宮大学大学院工学研究科助教．2015 年同大学大学院工学研究科准教授．現在に至る．無線通信・レーダ, GPS 測位等無線技術の応用に従事．電子情報通信学会 ITS 研究専門委員会幹事，通信ソサイエティマガジン編集委員．2004 年電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞．2011 年 IARIA International conference of networks Best Paper Award．2012 年 International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunication Best Paper Award．2014 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞．電子情報通信学会，IEEE，自動車技術会各会員．

伊藤 篤 （正会員）

1959 年生．1981 年名古屋大学工学部電子工学科卒業．1983 年同大大学院情報工学専攻修了．同年国際電信電話株式会社（現 KDDI）入社．1985 年～研究所にて仕様記述言語，IN，インターネット，アドホックネットワーク，Android 応用等の研究に従事．1991～1992 年スタンフォード大学 CSLI 客員研究員．2014 年宇都宮大学大学院工学研究科教授．現在に至る．博士（情報工学）（広島市立大学）．電子情報通信学会，ACM 各会員．

渡辺 裕

1950 年生．1973 年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業．1979 年同大学大学院理工学研究科物理および応答物理学専攻博士課程了．工学博士．同年国際電信電話株式会社（現 KDDI）入社．1979 年～研究所にて情報通信トラヒック，国際通信網の設計運用技術の研究に従事．1999 年 KDD 米国研究所所長・最高経営責任者．2001 年 KDDI 株式会社開発統括部長．2005 年宇都宮大学工学部教授．現在に至る．1986 年（社）電子通信学会論文賞受賞．1986 年（財）電気通信普及財団テレコム自然科学賞受賞．1998 年科学技術庁長官賞研究功績者表彰．2008 年情報化促進貢献個人表彰総務情報通信国際戦略局長表彰．電子情報通信学会会員．