

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

上坂大輔^{†1} 村松茂樹^{†1}
岩本健嗣^{†2} 横山浩之^{†1}

複合商業施設や駅などの公共空間における歩行者向けナビゲーションサービスを実現するためには、GPSの精度が十分でない場合においても有効な測位手法が必要である。こうした測位手法の1つである歩行者向けデッドレコニングは、加速度センサや地磁気センサを用いて、歩行者の歩数、歩幅、進行方向を推定し、累積的に現在位置を求める手法である。本論文では、実用性を大幅に改善した、新たな歩行者向けデッドレコニング手法を提案する。昨今、デッドレコニングに利用可能なセンサを内蔵した携帯電話が広く普及しつつあることから、こうした携帯電話を利用した歩行者ナビゲーションを想定する。従来のデッドレコニング手法の多くは、センサを人体の特定部位に固定することを前提としているため、携帯電話を人体に固定することによる利便性の低下が問題となる。そこで本論文では、センサを内蔵した携帯電話を手に持ち腕を振って歩いている場合でも歩行者の位置を特定できる手法を提案する。さらに、実環境における有効性を実証実験によって検証する。

Dead Reckoning Method by Hand for Pedestrian Navigation System

DAISUKE KAMISAKA,^{†1} SHIGEKI MURAMATSU,^{†1}
TAKESHI IWAMOTO^{†2} and HIROYUKI YOKOYAMA^{†1}

The pedestrian navigation system is required to locate the position of users within GPS-denied indoor environments such as commercial complexes or stations. Pedestrian dead reckoning is promising solution, which can independently determine the relative position of the user by estimating number of steps, step length, and heading direction using motion sensors such as accelerometer and magnetometer. In this paper we propose a new pedestrian dead reckoning method using widely-spreading mobile phones with self-contained sensors. Most existing methods are not suitable for those mobile phones because they force the user to fix sensors in a specific position of the body. The new pedestrian

dead reckoning method we propose can locate the position of the user even if the mobile phone is swung by user's arm while walking. Detailed algorithm and evaluation results are presented in this paper.

1. はじめに

携帯端末に搭載された測位機能は、歩行者ナビゲーションシステム (PNS; Pedestrian Navigation System) だけでなく、Flickr¹⁾ や foursquare²⁾ などのコミュニケーションサービス、セカイカメラ ZOOM³⁾ などの拡張現実サービスを利用するうえでも、重要な基本的機能となっている。位置情報を得るには GPS を利用するのが一般的であるが、GPS 衛星からの電波は高層ビルなどによって容易に遮蔽されてしまうため、都市部では精度が低下し、屋内では利用することができない。

我々は、携帯電話を用いた屋内でも利用可能な PNS を実現するための測位手法の研究を行っている。本研究では、複合商業施設や都市部の駅などの公共空間における PNS をターゲットアプリケーションとして想定している。

屋内で位置を取得する手法については、これまでに様々な研究が行われてきた。たとえば、環境に設置された無線 LAN 基地局などのインフラを利用した手法^{4)–12)} には、すでに実用化されているものもある^{7),12)}。しかし、インフラの設計・導入・維持にコストがかかるため、従業員管理など限定的用途で利用されることが多く、PNS への適用例は少ない。これに対し、インフラが不要な測位手法として、歩行者向けデッドレコニング (Dead Reckoning; DR) が研究されている^{13)–20)}。これは、移動体に内蔵された加速度センサなどを利用して、歩数、歩幅、進行方向を推定し、直前の位置からの変位に基づき現在位置を求める手法である。近年、加速度センサや地磁気センサを内蔵した携帯端末 (iPhone²⁷⁾, G-1²⁸⁾ など) が広まりつつある。こうした携帯電話を利用できれば、専用のセンサデバイスを持ち歩くことなく歩行者向け DR が実現する。しかしながら、従来の歩行者向け DR 手法の多くは、センサを人体の安定した部位 (腰など) や、歩行の特徴が得られやすい部位 (踝など) に固定する必要があった。

^{†1} 株式会社 KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories Inc.

^{†2} 富山県立大学
Toyama Prefectural University

GPS による PNS を利用する場合でも、目的地へ到着するまでの歩行は、画面の地図を見ながら歩行すること、地図で把握した次の目印の地点まで携帯電話を手に保持したまま歩行することの繰返しであることが多い。そのため、携帯電話を用いた PNS を実現するためには、それらの所持方法であっても測位可能な歩行者向け DR を確立する必要がある。センサを固定せずに自然な持ち方で利用できる歩行者向け DR 手法も提案され始めている^{25),26)}ものの、その検討・評価は十分であるとはいえない。そこで本論文では、センサがこれら 2 種類の方法で所持されている場合でも測位可能な DR 手法を提案し、16 名の被験者を用いた、延べ 100 km 以上の歩行データを用いた評価結果について述べる。

2. 関連研究

測位手法には大別して絶対測位と相対測位の 2 種類がある。

絶対測位は、移動体の外部環境に測位を行う系が存在し、その系内における絶対座標を求める手法である。基準局からの電波の受信強度や到来時間差から、三角測量や三辺測量の原理で現在位置を推定するものが多い。その誤差は数 cm ~ 数十 m であり、WiFi を用いる手法には、すでに製品・サービス化されているものもある。インフラの導入・維持にコストがかかるのに加え、十分な精度を得るためには、基地局の配置などについて、事前に入念な調査・設計が必要な場合もある。そのため、たとえばオフィス内での従業員管理や、倉庫内での物品管理などのような、限定的な場所・用途で運用されることが多い。RFID や Bluetooth, UWB, 赤外線や超音波を用いた方式もあるが⁸⁾⁻¹²⁾、絶対測位としてかかえるこの問題点は基本的に同様である。

一方、相対測位は、測位対象がセンサを保持し、直前の位置からどの方向にどれくらいの距離を移動したかを求めることで、現在位置を累積的に求める方法であり、DR と呼ばれる。この手法はインフラを必要としないため、利用可能な場所が限定されないのが特徴である。慣性航法は DR の一種であり、加速度を二重積分すると位置の変位が得られるという原理を用いている。しかし、慣性航法は外乱の影響を受けやすく、自動車や航空機、船舶など、比較的運動が単純な移動体への適用に限られており、複雑な運動をともなう歩行者の測位には適用できない。

歩行者向けの DR 手法も提案されている¹³⁾⁻²⁶⁾。これは、センサから、歩数、歩幅、進行方向を特徴量として求めるものである。しかしながら、従来法の多くは、センサを人体の決まった部位に固定することが必須である。たとえば、興相らは、加速度と角速度および地磁気データから、進行方向と歩行速度、歩幅を推定する手法を提案しているが¹³⁾、センサ群は歩行者の腰部に固定されることを前提としている。Beauregard は、GPS と IMU (Inertial

Measurement Unit; 慣性計測装置) を組み合わせた DR 手法を提案しているが¹⁴⁾、これは、警察、消防、救急救助や軍用といった用途を想定しており、歩行者はセンサが搭載されたヘッドギアを装着する必要がある。ほかに、歩行者の靴にセンサを固定し、歩数、歩幅、進行方向を推定する DR 手法もある^{15),16)}。

こうした従来の DR 手法をセンサ内蔵携帯電話に適用する場合、携帯電話を人体に装着するか、または別途外部センサを用いることになる。どちらもスポーツ支援アプリケーションにおいては実例があるが(靴にセンサを取り付けて歩数を計数する Nike+iPod Sport Kit²⁹⁾や、腰に携帯電話を固定して身体の動きを測定する ETGA スウィングレッシン³⁰⁾など)、携帯電話の日常的な所持方法としては一般的でない³¹⁾。

センサを人体に固定しない歩行者向け DR 手法についての研究も始まっている。Randell らは、GPS と加速度、地磁気センサをバックパックに収納して歩行した際の DR 手法を評価し、その精度は芳しくなかったと報告している¹⁷⁾。Schiele らは、ポケットに収納した IMU を用いた DR 手法を提案しているが^{25),26)}、ポケットへの収納は、ナビゲーション機能を利用中の携帯電話の所持方法としては、十分ではない。我々は、センサ内蔵携帯電話を手に持って歩行しても利用可能な DR 手法を提案する。

3. システム要件

測位システムが満たすべき要件を次のとおり定義する。

- 公共空間での PNS をターゲットアプリケーションとする。
- 外部のインフラを用いない (DR である)。
- 一般の個人向け携帯電話の内蔵センサを用い、外部のセンサを用いない。
- 携帯電話を利用者の人体に固定せず、自然な持ち方で測位する。

携帯電話の持ち方に関しては、Cui らが、靴やズボンのポケットに収納されることが多いという調査結果を報告している³¹⁾。しかし、ナビゲーション機能を起動し目的地へ向かって歩行している間の携帯電話の所持方法はこれとは異なり、携帯電話の画面がすぐに見られるような所持方法が多いと考えられる。そこで、GPS を用いた既存のナビゲーション機能を利用する際の携帯電話の所持方法について、アンケート調査を実施した。回答者には、携帯電話を手に持ち画面を見ながら歩行する「手持ち」、携帯電話を手に持ち腕を振りながら歩行する「手振り」、靴への収納、腰への固定、ズボンのポケットへの収納、胸ポケットへの収納、ネックストラップ(首かけ)から、複数選択させた。回答者は男女計 25 名である。図 1 に示した集計結果によれば、手持ちと手振りが支配的であった。靴やポケットに収納

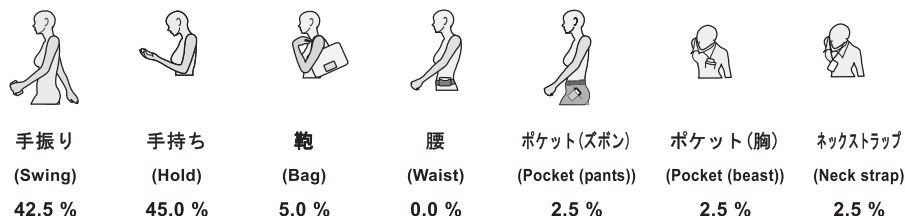


図 1 ナビゲーション機能利用中の携帯電話の所持方法

Fig.1 Variation in ways of carrying mobile phone when walking while using PNS.

する回答者はほとんどいなかった。この結果から、PNS を実現するためには、手持ちと手振りに対応した DR 手法が必要不可欠であるということが分かった。

これまでの歩行者向け DR 手法は、センサが人体に固定されることを前提としており、手持ちや手振りを扱った手法は、ほとんど提案されていない。これには主に、2つの理由がある。

- 計測値の安定性：加速度のピーク検出によって比較的容易に歩数を計数でき、また、歩数電子コンパスと同様の方法³²⁾で、センサ自身の姿勢(向いている方位)を特定できる。もしセンサを固定しない場合、観測される加速度には重力加速度以外の成分が合成され、さらにその方向は時々刻々変化するため、加速度のピークが潰れて歩数の検出漏れが発生し、端末姿勢も特定できない。
- 進行方向推定の容易性：センサがどのような向きで固定されるかがあらかじめ決められているため、センサの姿勢から歩行者の進行方向が分かる。もしセンサを固定しない場合、端末がどのような向きで所持されているかが不明であるため、センサの姿勢が特定できたととしても、歩行者の進行方向を特定することができない。

我々はこれらの問題を、加速度・地磁気ベクトルの動きに着目することで解決した。次章で詳細について説明する。

4. 提案手法

4.1 構成と処理フロー

位置の絶対座標を $p = (x, y)$ 、直近の位置からの変位を d 、進行方向の方位角を θ 、歩幅を l とすると、 $n + 1$ 歩目の位置 p_{n+1} は以下の式で求めることができる。

$$\begin{aligned}
 p_n &= (x_n, y_n) \\
 p_{n+1} &= p_n + d_{n+1} \\
 d_{n+1} &= (l_{n+1} \sin \theta_{n+1}, l_{n+1} \cos \theta_{n+1})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

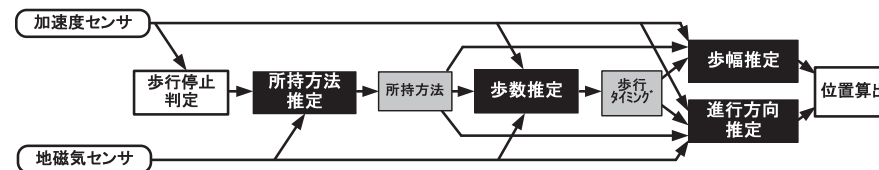


図 2 処理フロー
Fig.2 Process flow.

すなわち、位置 p を得るためには、歩数 n 、歩幅 l 、進行方向 θ を推定すればよい。そこで、位置を特定するための処理フローを、主に所持方法推定、歩数推定、歩幅推定、進行方向推定の、4つの推定ブロックから構成した。図2に処理フローを示す。

最初に、歩行停止判定ブロックが、利用者が歩行しているか停止しているかを判断する。これには鉛直成分加速度の分散による一般的な手法³³⁾が利用可能である。以降の処理は、歩行と判断されている間のみ動作する。歩行と判断された場合、所持方法推定ブロックが、端末の所持方法が手持ちと手振りどちらであるかを推定する。これは、歩数推定、歩幅推定、進行方向推定は、手持ちか手振りかによってその最適なパラメータやアルゴリズムそのものが異なるためである。所持方法が判断された後、歩数推定、歩幅推定、進行方向推定が行われる。歩幅と進行方向は歩行者の位置の変位ベクトルを示す特徴量である。また、歩数は、移動距離を決める最も重要な特徴量である。歩幅推定と進行方向推定はそれぞれ歩数推定とは独立して動作し、つねに最新の推定結果を更新しているが、歩数推定ブロックにより歩数がカウントされない限り、変位ベクトルは出力されない(移動していない)。なお、初期位置である p_0 の与え方については、屋内に入る直前の GPS による位置など、様々な手法が考えられるが、本論文では既知であるものとする。

4.2 所持方法推定

所持方法推定ブロックは、携帯電話が手振りの状態で所持されているか、あるいは手持ちの状態でも所持されているかを判定する。腕振り運動は、歩行者の肩を中心とし、腕を半径とした、2歩で1往復する振り子運動であると見なすことができる。センサが手に持たれ振り子状に運動するとき、地磁気ベクトルもまた、振り子状に運動しているように観測される。そこで、地磁気ベクトルの振れ幅を求め、一定以上の幅で変動している場合に手振りと判断する。具体的な計算手順を以下に示す。

- (1) 地磁気ベクトルの、1サンプル前からの変動角を求める。時刻 $i (0 \dots n)$ に観測された、大きさを1に正規化した地磁気ベクトルを m_i とすると、 m_i の1サンプル前

からの変動角 (余弦) ψ_i は m_i と m_{i-1} の内積, $\psi_i = m_i \cdot m_{i-1}$ で求めることができる.

- (2) 変動角の高周波成分を抑制するため, 変動角に対して単純移動平均による平滑化を行う. i 番目の変動角 ψ_i に対する直近 q サンプルの平滑化後の変動角 ψ'_i は, $\psi'_i = (\psi_{i-q+1} + \psi_{i-q+2} + \dots + \psi_i)/q$ で求められる.
- (3) 平滑化後の変動角 ψ'_i を閾値 Ψ_T と比較し, 時刻 i における持ち方 w_i が手振りか手持ちかを判定する.

$$w_i = \begin{cases} \text{Hold} & (\psi'_i > \Psi_T) \\ \text{Swing} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

ベクトルの運動を検出するために加速度ベクトルではなく地磁気ベクトルを用いるのは, 加速度ベクトルが, 腕振り運動による運動加速度や振り子運動による遠心力などといった様々な要因によってその向きが変わってしまうのに対し, 地磁気ベクトルは, 短期的には, 安定した向きを示すためである (ここでは, 地磁気ベクトルが正確な磁北を示す必要はない). 図 3 に, 男女各 6 名, 合計 12 名の被験者の, 手振りと手持ちそれぞれにおける, 正規化後の地磁気ベクトルの変動角の分布を示す. 各被験者は, 約 40 m の直線 (約 50 歩に相当) を, 手持ちと手振りそれぞれにおいて, 16 回ずつ歩行した. この 2 つの分布から, マハラノビス距離が等しくなる点を求め, 閾値 Ψ_T を決定することができる. 閾値 Ψ_T は,

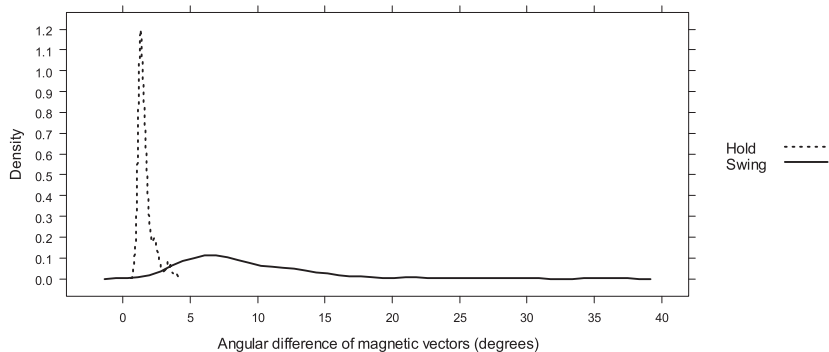
$$\{(\Psi_T - \mu_H)/\sigma_H^2\}^2 - \{(\Psi_T - \mu_S)/\sigma_S^2\}^2 = 0 \quad (3)$$


図 3 地磁気ベクトルの変動角の分布

Fig. 3 Distribution of the angular difference of magnetic vectors.

から求めることができる. ここで, μ_H および μ_S はそれぞれ手持ちと手振りの分布の平均, σ_H^2 および σ_S^2 はそれぞれ手持ちと手振りの分散を示す. 図 3 に示した例の場合, $\Psi_T = 0.9982$ となる.

4.3 歩数推定

歩数とは, 歩行時における足の踵の接地回数である. 歩数推定ブロックでは, 歩数の増加を検出する. 図 4 (左) に, 加速度センサを腰に装着した場合と手持ちの場合, および, 手振りの場合の, 加速度の大きさの典型的な例を示す. 加速度センサを腰に装着した場合は, 加速度の大きさは安定した正弦波を示す (a-1). そのため, ピーク (極大点または極小点) を検出・計数することにより, 比較的容易に歩数を推定できる. 実際に, 腰に装着することを前提とした歩数計には, この原理を用いるものも多い. 手持ちの場合にも, 若干の波形の乱れはあるものの, 同様の手法で十分にピーク検出が可能である (b-1). 一方, 手振り時における加速度には, 歩行周期の倍周期を持つ腕振りによる加速度成分が合成されるため, ピークの一部が潰れてしまう現象が発生する (c-1). このため, 従来の加速度のピーク検出では, 手振り時の歩数を正確に計数することができない. 我々はこれまでに, この潰れてしまったピークを補完する手法を提案したが²⁴⁾, 精度良く歩数を検出するには, 複数の閾値を事前に最適に設定しなければならないという問題点があった. そこで, 本論文では, 地磁

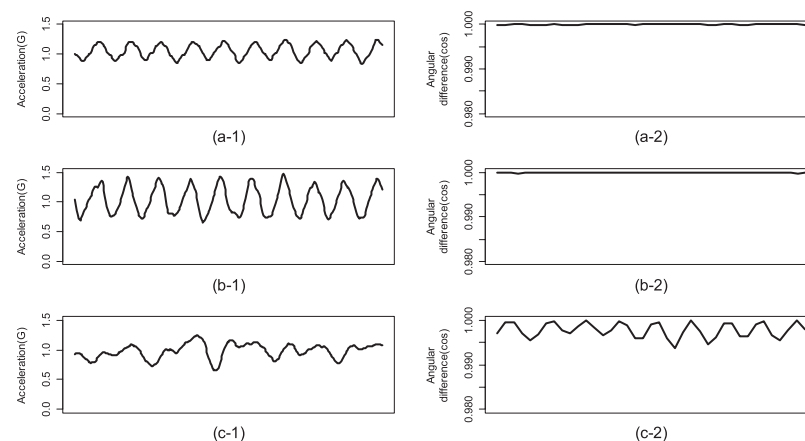


図 4 歩行時の加速度変動 (左) と地磁気ベクトル変動角 (右) (上: 腰, 中: 手持ち, 下: 手振り)

Fig. 4 Acceleration amplitude (left) and angular difference of magnetic vectors (right) while walking (upper: Waist, middle: Hold, lower: Swing).

気ベクトルの運動回数を数えることで歩数を計数する手法を提案する。

前記のとおり、手振り時には、地磁気ベクトルは腕の動きに連動して振り子状に2歩で1往復する。この振り子の運動回数を計数することで、歩数を計数する。地磁気ベクトルの変動角は、振りの両端に近づくほど小さくなるため、振りの回数は、地磁気ベクトル変動角の極小点(余弦の極大点)を検出することで計数できる。図4(右)に実際の地磁気ベクトル変動角の例を示す。手振りによって加速度の波形が乱れている場合であっても、地磁気ベクトルの変動角は安定した正弦波を示すことが分かる(c-2)。地磁気ベクトルの変動角の余弦は、前述の所持方法推定と同様の手順によって求められる。地磁気ベクトル変動角の変化 $\Delta\psi'_i$ は、 $\Delta\psi'_i = \psi'_i - \psi'_{i-1}$ となる。 $\Delta\psi'_i$ が正から負に反転するタイミングを検出することでピーク検出が可能である。

4.4 進行方向推定

静止時には、加速度センサは重力加速度の向き、すなわち鉛直下向きを示し、また、地磁気センサは地球の磁場の向き、すなわち偏角・伏角をともなった北(磁北)を示す。これらから、加速度センサと地磁気センサを内蔵した携帯端末は、自らの姿勢を一意に求めることができる。電子コンパスはこの原理を利用している。端末が歩行者の身体に対し決められた姿勢で固定されていれば、端末姿勢から歩行者の進行方向も自動的に決定される。これに対し、手持ちや手振りの場合、端末姿勢は一定ではないため、加速度ベクトルの示す向きは時刻によって異なる。また、ある時刻に観測された加速度ベクトルを見ても、腕による加速度や遠心力などが合成されるため、その向きは鉛直下向きとは異なる。さらに、端末がどのような向きで保持されるかが不定であるため、仮に端末姿勢が与えられたとしても、歩行者の進行方向を求めることはできない。これが、従来手法の多くにおいて、センサを歩行者の身体に対し決まった向きで固定しなければならない理由である。

我々は、加速度ベクトルの振り子運動に着目した。重力ベクトルのみを考えた場合、加速度ベクトルは扇形の平面(加速度面)を掃引するように観測される。腕振り運動の方向が進行方向に対して平行であるとするならば、加速度面もまた進行方向に対して平行である。また、体幹そのものも、歩行中は周期的に上下動と進行方向の加速・減速を繰り返している³⁴⁾。そのため、手持ちの場合でも、手振りと同様に、加速度ベクトルは進行方向に平行な平面状に分布する。

そのため、加速度面を検出し、北方向に対する角度を求めることで、進行方向を得ることが可能である。北方向は、地磁気ベクトルと重力ベクトルからなる平面(方位基準面)で表すことができる。図5に加速度面と方位基準面の関係を示す。重力以外に生じる主な加速

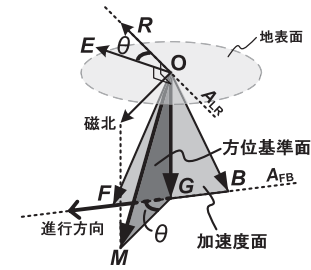


図5 加速度面と方位基準面
Fig. 5 Acceleration plane and base plane.

度成分である、腕の運動による加速度と、振り子運動による遠心力はそれぞれ、振り子運動の軌跡の接線方向と法線方向の加速度であり、加速度面の向きには影響を与えないため、無視することができる。

次に、具体的な計算手順について説明する。

(1) 方位基準面の導出

方位基準面はその法線ベクトルのうち東側のベクトル(東ベクトル)で表す。東ベクトル E は、鉛直下向きを示す重力ベクトル G と、地磁気ベクトル M の双方に垂直であるため、それらの外積 $E = G \times M$ で求める。 G と M はそれぞれ、手振り周期(歩行周期の2倍)に対して十分長い期間に観測された、加速度ベクトル群、地磁気ベクトル群の単純平均によって近似することができる。人間の歩行周期はおよそ0.5秒であるため³⁴⁾、2秒分のサンプル数($2f_s$)があれば十分である。

$$G = \sum_n a_i, \quad M = \sum_n m_i \quad (n \geq 2f_s) \quad (4)$$

(2) 加速度面の検出

加速度面は加速度ベクトル群から最小二乗法で求め、その法線ベクトルのうち右側のベクトル(右ベクトル)で表す。最小二乗法にあたっては、3軸のうち最も歩行者の左右軸に近い軸(暫定左右軸)を求め、この軸の残差を最小にする必要がある。手持ちの場合は、分散が最も小さな軸が暫定左右軸となる。手振りの場合は、この性質が成り立たない場合もあるため、加速度ベクトルの振り子運動の両端を検出し、その外積ベクトル(歩行者の右または左)に最も近い軸を、暫定左右軸とする。端点では加速度の大きさは極小値をとるため、これを検出すればよい。

暫定左右軸が z 軸であった場合の最小二乗法の計算例を示す (x 軸や y 軸の場合は、その成分が z 軸にくるよう 3 成分を循環シフトしてから以降の計算を行う). 加速度面の法線ベクトル $A_{LR} = (\alpha, \beta, -1)$ とすると, A_{LR} は原点を通るので, $z = \alpha x + \beta y$ である. n 個の加速度ベクトル群 $a_i = (x_i, y_i, z_i)$ が与えられたとき, 誤差の二乗和を ε とすると,

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (z_i - \alpha x_i - \beta y_i)^2 \tag{5}$$

となり, これが最小となる α と β を求める. ここで,

$$X = \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad Y = \sum_{i=1}^n y_i^2, \tag{6}$$

$$S = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \quad T = \sum_{i=1}^n x_i z_i, \quad U = \sum_{i=1}^n y_i z_i$$

とし, 式 (6) を α と β について偏微分すると,

$$\alpha = (YT - SU)/(XY - S^2) \tag{7}$$

$$\beta = (XU - ST)/(XY - S^2)$$

となる.

A_{LR} が歩行者に対して右か左かはこの時点では不定であり, 右ベクトルを得るには, 左右の判別が必要である. 判別にあたっては, 左右それ自体ではなく, より性質の違いが顕著な前後を識別することが有効である. 手持ちの場合, 前後軸のうち, 加速度の重力方向成分に対して位相が遅れる向きが前方である. まず, 前後軸 A_{FB} を, 加速度面の法線 A_{LR} と重力ベクトル G の外積, $A_{FB} = A_{LR} \times G$ により求める. 重力ベクトル G と前後軸 A_{FB} の大きさを 1 とすると, 加速度 a の重力方向成分 a_G および歩行者に対する前後成分 a_{FB} はそれぞれ, 内積 $a_G = a \cdot G$, $a_{FB} = a \cdot A_{FB}$ となる. 図 6 に, a_G と a_{FB} の波形の典型的な例を示す. 遅延の向きは, ピークの時差から判定可能である. 前方に基づき, A_{LR} が歩行者に対して右方となるよう変換し, 右ベクトルとする.

手振りの場合は, 振り子運動の端点間の所要時間の差によって, 前後を区別することができる. 具体的には, 加速度ベクトルは, 腕振り運動の前後非対称性を反映し, 前方から後方へ運動するのに要する時間の方が, 後方から前方へ運動するのに要する時間よりも短い. 図 7 に, 腕振り運動と加速度面および加速度の大きさの関係を示す. 腕の前後と加速度面の前後が逆転する点に注意されたい. いま, i 番目の端点における加速度ベクトルを a_i , 検出された時刻を t_i とすると, 連続する端点間の所要時間は $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, 所要時間の直近からの増減は $\Delta \Delta t_i = \Delta t_i - \Delta t_{i-1}$ となる. このとき, 端点の加速度ベクトルのうち歩

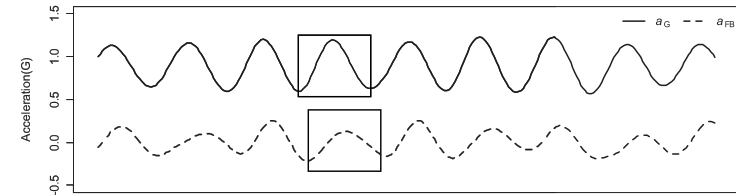


図 6 加速度の鉛直成分 a_G と前後成分 a_{FB}
Fig. 6 Vertical (a_G) and progressional (a_{FB}) components of acceleration.

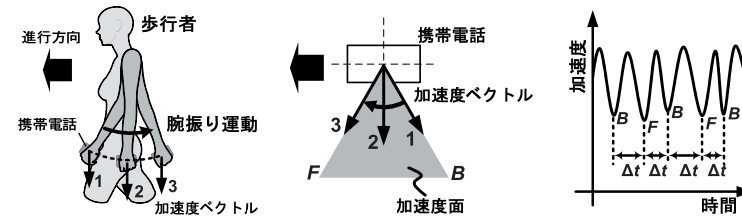


図 7 腕振り運動と加速度面および加速度の大きさ
Fig. 7 Arm swing motion, acceleration plane and acceleration amplitude.

行者の前方に位置する方を F , 後方に位置する方を B とすると,

$$F, B = \begin{cases} a_i, a_{i-1} & (\Delta \Delta t_i > 0) \\ a_{i-1}, a_i & (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{8}$$

である. ベクトル F および B の外積 $B \times F$ に基づき, A_{LR} が歩行者に対して右方となるよう変換し, 右ベクトルとする ($B \times F$ そのものも歩行者に対し右側を示すが, 加速度面の法線ベクトルに対し精度が劣る).

(3) 方位角の算出

右ベクトルの東ベクトルからの時計回りの角度が, 進行方向の方位角である. 右ベクトル R と東ベクトル E のなす角を φ [rad] とすると, $\varphi = \arccos(R \cdot E / |R| |E|)$ である. このとき方位角 θ [rad] は, 外積 $E \times R$ と G の内積から次のように求まる.

$$\theta = \begin{cases} \varphi & ((E \times R) \cdot G \approx 1) \\ 2\pi - \varphi & (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{9}$$

4.5 歩幅推定

歩幅は歩行距離を決定する重要な要素の1つであり、同じ歩行者であってもその長さは固定的ではなく、歩行速度のほかに、年齢、性別、身長、地面の勾配、靴の種類、心理状態など、様々な要因に影響を受けて変化する^{26),38)}。本論文では、手持ちと手振りについて、従来の様々な歩幅推定方式の適用可能性を評価する。

まず、最も原始的な歩幅推定手法の1つに、歩幅と身長の関係を利用するものがある。歩幅を l [m]、身長を h [m] としたとき、

$$l \approx h - 1 \quad (10)$$

あるいは、 r_h を定数として、

$$l \approx r_h h \quad (11)$$

によって近似する方法がよく知られており、あまり精度を要求されない消費カロリー計算などに用いられることもある。ただし、理学的にはこれらを強く支持する定量的データはないとされる³⁴⁾。歩幅 l がケーデンス c (歩調、1分間の歩数) に比例するとし、 r_c を定数として、次式のように近似する方法もある³⁶⁾⁻³⁸⁾。

$$l \approx r_c c \quad (12)$$

ほかに、従来のDR手法においては、経験則に基づく次式を利用している例も多い¹⁸⁾⁻²⁰⁾。 $\max(a_v)$ 、 $\min(a_v)$ はそれぞれ単位時間中の鉛直成分加速度 a_v の最大値と最小値、 r_f は定数である。

$$l \approx \sqrt[4]{\max(a_v) - \min(a_v)} \times r_f \quad (13)$$

我々はこれまでに、機械学習を用いて、いくつかの離散的な歩幅クラス(たとえば普通、大股、小股の3種類など)を推定する手法を提案した²⁴⁾。しかし、実際に移動距離を求めるときには、各クラスの歩幅の数値を事前に与える必要があった。

そこで本論文では、式(10)に基づき歩行者の身長から1mを減じる方法(H-1)、式(11)に基づき歩行者の身長に定数を乗じる方法(Hr)、式(13)に基づき4乗根を用いて求める方法(FourthR)、また、機械学習として、頻度学習(ZeroR)、単回帰(S.Reg)、重回帰(M.Reg)、ニューラルネットワーク(Neural)、ガウシアンプロセス(GP)、k近傍法(kNN)について、歩幅推定精度を比較した。機械学習に使用した属性は、身長、ケーデンス、加速度の分散、加速度の最大最小差、前後成分加速度の最大最小差、鉛直成分加速度の最大最小差のほか、手振りのみについて、手振り角速度、加速度ベクトルの変動角、地磁気ベクトルの変動角を加えた。以下の2パターンの学習データで比較を行った(学習プロセスがないH-1法は除く)。

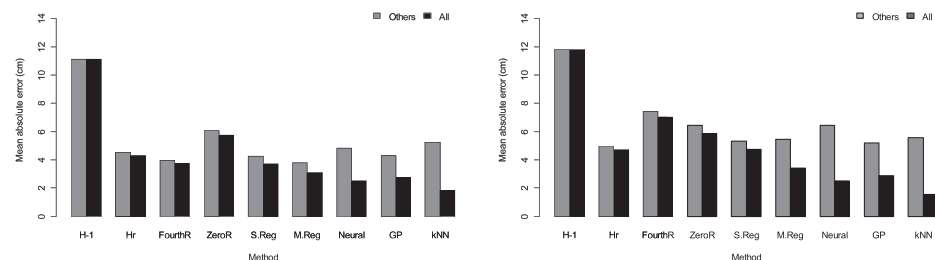


図8 歩幅推定誤差の比較(左:手持ち,右:手振り)
Fig.8 Mean absolute error of estimated step length (left: Hold, right: Swing).

- 本人データあり (All): 評価対象者を含む全被験者データで10分割交差検定を行う。
- 本人データなし (Others): 評価対象者を除く全被験者データで学習を行う。

各方式による歩幅推定の、平均絶対誤差を評価した。図8にその結果を示す。なお、正しい歩幅は、歩行距離を歩数で割って求めた。

手持ち手振りともに、H-1法は最も精度が悪く、平均絶対誤差は10cmを超えていた。歩行者本人のデータを学習データに含める場合は、k近傍法が最も良好で、平均絶対誤差は1cm台となった。しかし、歩行者本人のデータを学習データに含めない場合は、k近傍法の平均絶対誤差は5cm前後まで悪化した。持ち方別では、手持ちでは重回帰が最も良いが、手振りでは、全体的に誤差が増加し、Hr法が最も良い結果となった。なお、手持ち時の重回帰では、身長、ケーデンス、鉛直成分加速度の最大最小差が属性としてよく使われていた。鉛直成分加速度の最大最小差を Δa_v とすると、たとえば、次のような式である。

$$l = 0.3818h + 0.0017c + 0.21\Delta a_v - 0.2047 \quad (14)$$

また、Hr法において学習された定数 r_h は、おおむね0.46前後であった。

5. 評価

5.1 評価条件

歩行時における加速度と地磁気データを収集し、提案方式の評価を行った。被験者は、加速度センサおよび地磁気センサ(AK8976A,旭化成マイクロシステム製)を搭載したセンサアタッチメントと携帯電話(W62CA,カシオ計算機製)から構成される計測システムを所持し、実験ごとに決められた経路を自身にとっての自然な速度(customary walking speed³⁴⁾)で歩行する。加速度センサと地磁気センサのサンプリング周波数はそれぞれ64Hz、16Hzである。センサアタッチメントで計測されたセンサデータは逐次携帯電話に転送され、携帯

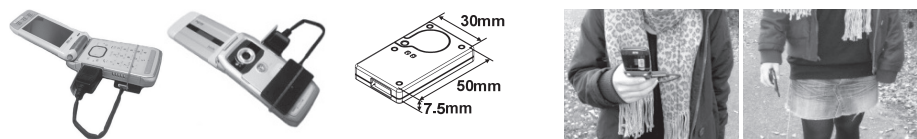


図 9 計測システム
Fig. 9 Measurement system.

表 1 所持方法推定の再現率
Table 1 Arm swing detection recall.

	平均再現率
手持ち	99.3%
手振り	97.4%

電話上の記録用アプリケーションにより保存される。図 9 に、センサアタッチメントを接続した携帯電話の様子を示す。外部のセンサを用いるのは、センサの細かな設定・調整などのためであり、論理的には 1 台のセンサ内蔵携帯電話と見なすことができる。被験者数は、男女各 8 名、合計 16 名である。評価は、各推定ブロックの個別評価と、統合評価から構成され、センサデータ収集後、PC 上で行った。

5.2 所持方法推定の評価

手持ちと手振りそれぞれにおいて、約 40 m の直線を歩行した際の全被験者のデータを用いて、所持方法推定方式を評価した。全データの地磁気ベクトル変動角の順番をランダム化し、そのうち 90% を閾値 Ψ_T 決定のための学習データ、10% を評価データとした評価を、10 回繰り返した (10 分割交差検定)。ある所持方法での再現率は、その所持方法における判定回数を n_e 、正しく所持方法を推定できた数を n_c とすると、 n_c/n_e で与えられる。表 1 に 10 回の平均再現率を示す。

提案方式によって、高い精度で手持ちと手振りを判別することができた。誤差は、手持ちの際に腕が大きく動く被験者や、手振りの際に腕の振りが小さな被験者がいたため発生したものと考えられる。

5.3 歩数推定の評価

手持ちと手振りそれぞれにおいて、約 40 m の直線を被験者 1 人あたり 16~26 回歩行した際のデータを用いて、歩数推定方式を評価した。推定歩数を s_e 、正しい歩数を s_a とすると、精度は、 $1 - |s_e - s_a|/s_a$ で与えられる。手振りについては、加速度のピークを検出する

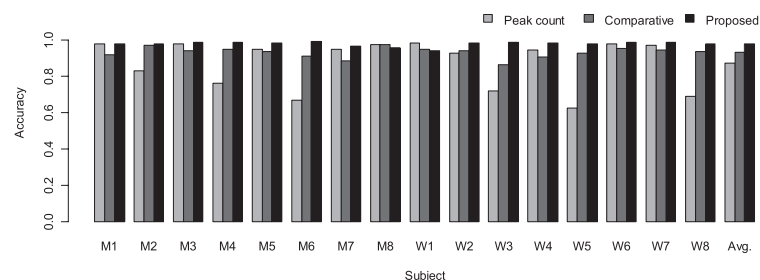
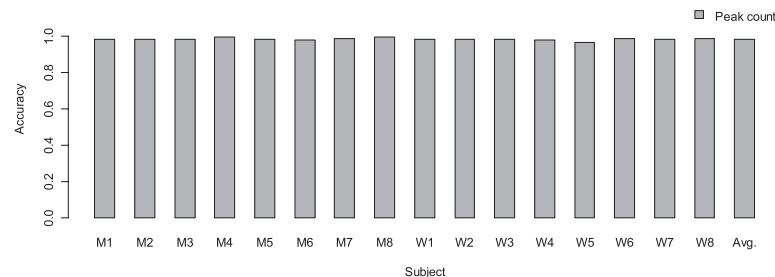


図 10 歩数推定精度 (上: 手持ち, 下: 手振り)
Fig. 10 Step detection accuracy (upper: Hold, lower: Swing).

方式、および、ピークの消失点を補完する方式²⁴⁾と比較した。図 10 に、被験者別の評価結果を示す。手持ちに関しては、精度は安定して高く、すべての被験者で 95% 以上を示し、平均精度は 98.3% であった。また、手振りに関しては、平均精度で、ピークを検出する方式が 87.0%、消失点を補完する方式が 93.1% であるのに対し、提案方式が 97.8% であった。これは、JIS 規格の歩数計精度基準である誤差 $\pm 3\%$ 以内³⁹⁾ を満たす。個別の被験者を見ても、手振りにおいては、ピークを検出する方式は 60% 台、消失点を補完する方式は 80% 台に低下するケースが見られたが、提案手法では、90% を下回ることはなかった。

5.4 進行方向推定の評価

手持ちと手振りそれぞれにおいて、方位角 0 度 (磁北) から 45 度刻み 8 方位の直線経路 (それぞれ約 40 m) を歩行した際の全被験者のデータを用いて、進行方向推定方式を評価した。推定方位を θ_e 、正しい方位を θ_a とすると、絶対誤差 ε_θ は両者のなす角、 $\varepsilon_\theta = \arccos(\cos \theta_e \cos \theta_a + \sin \theta_e \sin \theta_a) \times 180/\pi$ により求められる。図 11 に、被験者別に

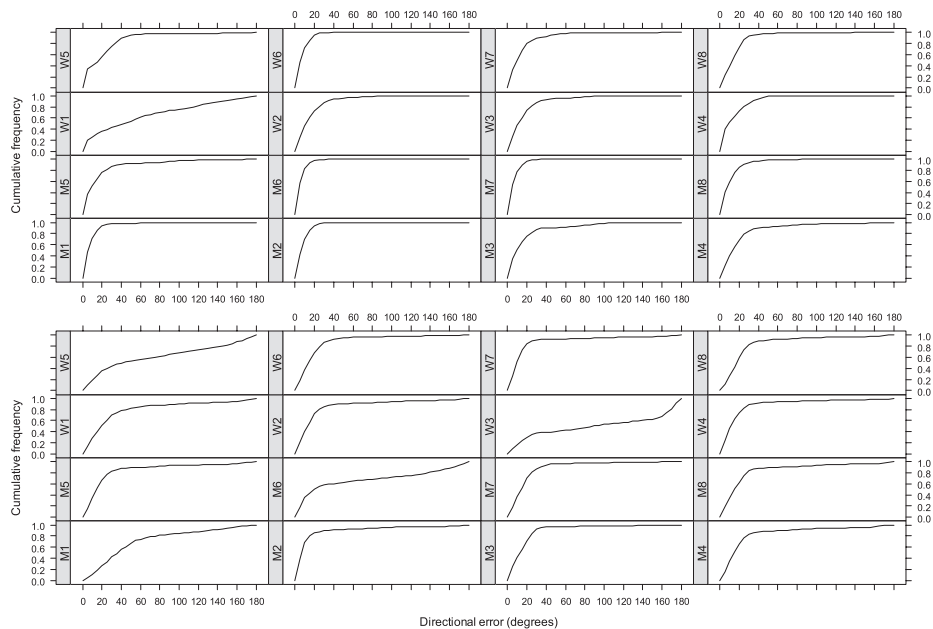


図 11 進行方向推定誤差 (上: 手持ち, 下: 手振り)

Fig. 11 Cumulative distribution function of directional error (upper: Hold, lower: Swing).

平均した絶対誤差の累積度数分布を示す。手持ち, 手振りともに, おおむね, 80~90%が誤差 20 度以内に収まっていた。手振りにおいて, 累積度数に傾きが急峻な箇所が誤差 30 度以下と 150 度以上の 2 カ所に存在しているもの (特に被験者 W3 が顕著) については, 前後判定の誤りが多く含まれていることを意味する。これは, 腕の振り方の個人差から生じるものと考えられる。

5.5 統合評価

測位システム全体としての評価を行うため, 比較用の GPS が利用可能な屋外に, 1 周約 1,500 m の周回コースを設定し, センサデータを収集した。場所は新宿御苑である。収集されたセンサデータについて, 所持方法推定, 歩数推定, 歩幅推定, 進行方向推定を行い, 推定歩行軌跡を求めた。歩幅推定的方式については, 前述の比較評価結果に基づき, 手持ち時は重回帰, 手振り時は身長ベースの Hr 法を採用し, それらの学習データとしては, 歩行者本人のデータは除いたものを使用した。軌跡表示にあたっては, 国土地理院による磁気偏角

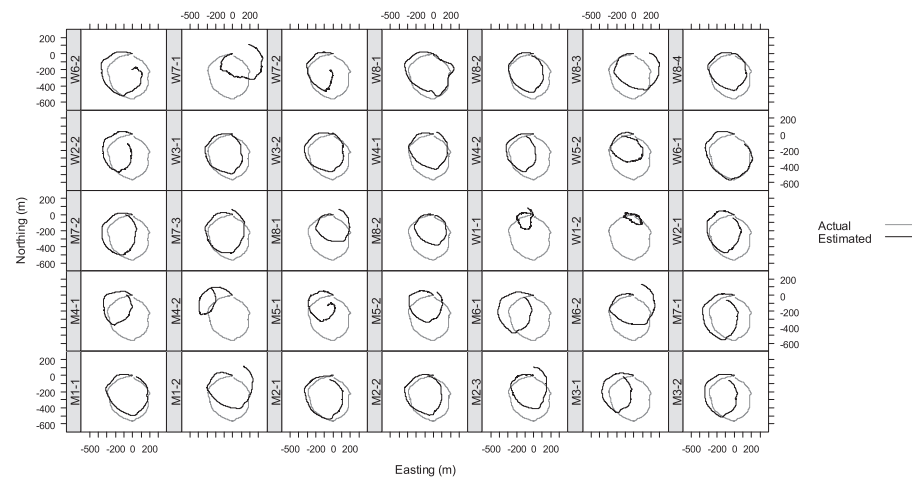


図 12 推定歩行軌跡 (手持ち)

Fig. 12 Estimated trajectories (Hold).

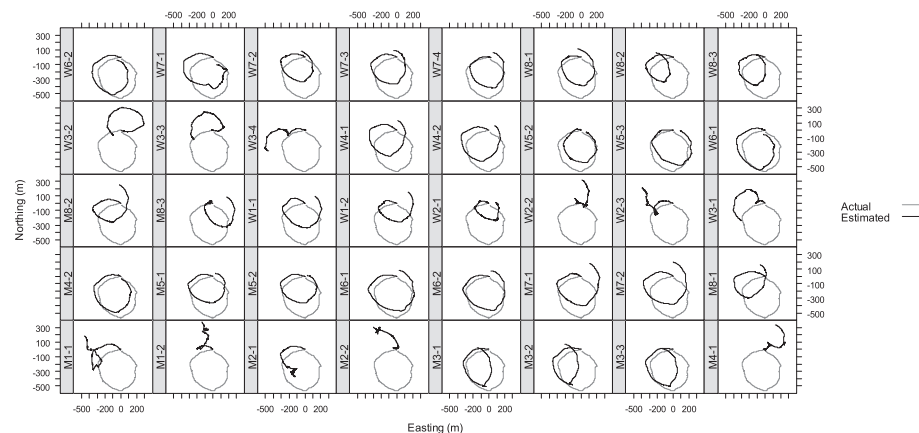


図 13 推定歩行軌跡 (手振り)

Fig. 13 Estimated trajectories (Swing).

一覧図⁴⁰⁾に基づき, 偏角を補正している。

図 12, 図 13 に手持ち, 手振りそれぞれにおける, 全被験者の歩行軌跡を示す。各被験

表 2 評価結果詳細 (手持ち)

Table 2 Detail of the evaluation result (Hold).

被験者	所持方法 推定精度 (%)	推定歩数 (歩)	推定 歩行距離 (m)	推定 歩幅 (m)	正解 歩幅 (m)	推定 歩幅 (%)	前後判定 精度 (%)	平均絶対 方位誤差 (度)	平均位置 誤差率 (%)
M1	100.0	2127.0	1522.8	0.72	0.81	88.6	99.2	20.0	16.4
M2	99.9	2447.0	1619.9	0.66	0.72	92.5	96.9	24.6	16.6
M3	100.0	2079.0	1460.4	0.70	0.78	90.4	99.3	29.2	25.9
M4	99.9	1898.5	1278.9	0.67	0.84	80.2	96.5	47.2	44.1
M5	91.0	1782.0	1362.4	0.76	0.92	82.8	88.4	30.0	31.6
M6	99.9	2274.5	1514.5	0.67	0.66	100.8	97.8	28.2	25.5
M7	100.0	2229.3	1615.4	0.72	0.68	106.5	97.3	21.5	18.8
M8	100.0	2038.5	1175.5	0.58	0.79	73.1	99.9	18.6	18.7
W1	71.1	2148.0	1478.4	0.69	0.72	96.3	44.2	37.0	38.7
W2	99.7	2528.5	1634.6	0.65	0.68	95.7	68.7	32.0	26.1
W3	99.8	2161.0	1521.9	0.70	0.80	87.9	99.8	21.1	14.9
W4	100.0	2222.5	1391.3	0.63	0.74	84.2	99.5	22.8	17.9
W5	99.8	2254.0	1614.1	0.72	0.68	105.3	84.7	23.4	18.6
W6	94.4	2179.0	1621.1	0.74	0.76	97.6	99.8	27.7	21.7
W7	94.1	2272.0	1494.6	0.66	0.70	94.7	79.3	30.5	24.8
W8	99.1	2211.5	1538.5	0.70	0.76	91.2	98.7	21.8	13.2
Avg.	96.8	2178.3	1490.3	0.69	0.75	91.7	90.6	27.2	23.3

表 3 評価結果詳細 (手振り)

Table 3 Detail of the evaluation result (Swing).

被験者	所持方法 推定精度 (%)	推定歩数 (歩)	推定 歩行距離 (m)	推定 歩幅 (m)	正解 歩幅 (m)	推定 歩幅 (%)	前後判定 精度 (%)	平均絶対 方位誤差 (度)	平均位置 誤差率 (%)
M1	63.9	2126.5	1668.1	0.78	0.81	97.1	85.7	55.5	53.3
M2	99.9	2338.5	1720.4	0.74	0.72	102.8	54.9	89.4	53.8
M3	96.0	2035.3	1607.7	0.79	0.78	101.7	100.0	24.2	18.3
M4	100.0	2027.0	1575.3	0.78	0.84	92.5	85.1	54.1	41.1
M5	99.6	1751.0	1437.3	0.82	0.92	88.9	98.0	23.0	21.9
M6	99.3	2286.0	1726.3	0.76	0.66	114.2	99.4	19.4	13.7
M7	96.6	2216.0	1735.2	0.78	0.68	115.2	99.5	22.8	27.7
M8	100.0	2194.7	1690.9	0.77	0.79	97.6	92.4	37.3	37.0
W1	99.4	2224.5	1493.9	0.67	0.72	93.9	95.5	25.7	29.7
W2	90.3	2537.7	1780.0	0.70	0.68	103.9	74.6	45.7	43.3
W3	100.0	2151.0	1602.6	0.75	0.80	93.0	20.9	134.5	71.3
W4	100.0	2088.5	1507.1	0.72	0.74	97.0	99.9	28.9	30.3
W5	97.9	2235.5	1731.3	0.77	0.68	113.9	93.6	24.4	14.9
W6	99.8	2234.0	1680.1	0.75	0.76	98.7	98.8	27.9	21.3
W7	98.5	2377.8	1658.8	0.70	0.70	100.4	95.1	22.9	25.4
W8	98.8	2078.3	1543.7	0.74	0.76	97.4	96.4	24.4	26.0
Avg.	96.2	2181.4	1634.9	0.75	0.75	100.5	86.8	41.2	33.0

者は、図中の中央上部から反時計回りに1~4回、周回した。被験者記号の後の数字は試行回数である。正解歩行軌跡は、GPSで取得したものである。また、表2、表3には、被験者別に平均した、各推定ブロックの評価結果を記載した。なお、平均位置誤差率は、歩行距離に対する推定位置の誤差の割合を経路上の20カ所で求め、平均したものである。

手持ちについては、過半数のデータで歩行経路形状が判別できる程度に周回できていた。被験者M1, M2, M7, M8, W3, W4, W5, W8は、平均位置誤差率が10%台に抑えられていた。評価結果詳細を見ると、W1をのぞき、所持方法推定は高い精度で手持ちと判定しており、進行方向の平均絶対誤差も20度台であった。歩幅については、全体的に正解よりもやや小さく推定する傾向が見られた。W1は、軌跡全体が正解経路よりも大幅に縮退しているが、表2によれば、歩数推定と歩幅推定の精度は比較的良く、歩行距離自体が原因ではなかった。これは、前述の単体評価で示した、進行方向推定精度のほか、所持方法推定で3割程度が手振りと判定されていたことが原因であると考えられる。実際にこの被験者については、歩行時に携帯電話を保持する腕が大きく動いていることが確認されている。連続して誤判定された時間の長さは、平均で約1.8秒間程度であったため、たとえば、現状の1歩ごとの判定に代わり、直近一定時間内の判定結果から多数決によって最終的な所持方法を決定するなどの方法によって、精度の改善が可能であると考えられる。同じく軌跡がひ

と回り小さくなっているM8については逆に、実際よりも歩幅を小さく推定していたためであり、所持方法推定や進行方向推定の精度は高かった。M4は、軌跡全体が時計回りに回転している。これは、加速度面の発生する方向(すなわち、腕が揺れる方向)が進行方向に対しオフセットしているためと考えられる。

手振りについては、正しく推定できなかった場合の軌跡への影響が劇的ではあるが、やはり半数以上は、比較的正しく周回できていた。特に、M3, M6, W5, W6は良好な結果を示した。所持方法は、M1をのぞき90%以上の精度で推定できていた。M1の誤判定が連続して発生した長さは平均で約5.1秒間であり、前述した多数決の方法によって、ある程度は改善の可能性があると考えられる。歩幅推定は被験者ごとに固定の値を推定するHr法であるため、歩行距離には歩数推定の精度が大きく影響することになるが、大幅な誤差は見受けられなかった。W3の軌跡が南北反転しているのは、加速度面の前後判定に失敗しているためであり、すでに述べた単体評価の結果とも一致する。また、M7, M8, W1で顕著な、おおむね周回できているものの停止位置が東北方向へずれてしまう現象は、重力ベクトル推定の誤りと考えられる。実際に、理想的な重力ベクトルに対して意図的に10度の回転誤差を与える簡単なシミュレーションを行ってみると、その推定歩行軌跡は、実験結果に酷似した形状を示した(図14)。いずれのエラーも、手振り運動の個人差を反映したものと考えら

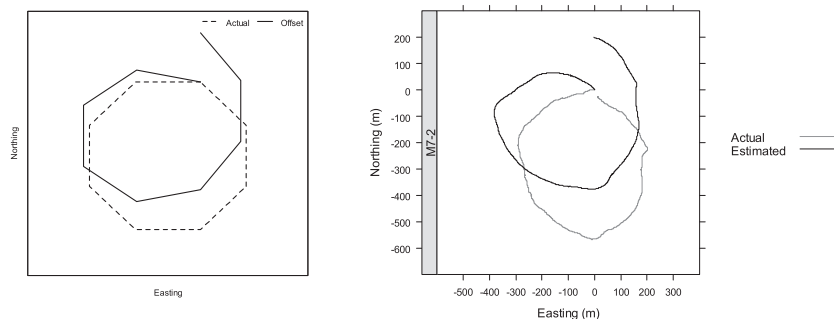


図 14 重力推定誤差と推定軌跡への影響 (左: シミュレーション, 右: 被験者 M7)

Fig. 14 Gravity estimation error and its impact on estimated trajectory (left: simulation, right: subject M7).

れ, 今後, たとえば GPS による位置情報と組み合わせた補正などの技術を検討することによって, 改善可能であると考えられる.

6. おわりに

本論文では, 公共空間における携帯電話単体での PNS を想定した, 手持ちと手振りの 2 種類の所持方法に対応した歩行者向け DR 手法を提案した. 16 名分のセンサデータを用いた評価の結果, センサを人体に決められた姿勢で固定していなくても, 一定の精度で測位が可能であることが確認できた. 具体的には, 所持方法推定方式は 90% 以上の精度で手持ちと手振りを識別でき, 歩数推定方式は, 加速度の大きさが乱れる手振りであっても, JIS の歩数計の基準である誤差 $\pm 3\%$ を満たし, また, 進行方向推定の誤差は, おおむね 20 度以内に収まっていた. ただし一部では, 腕が大きく動く手持ちや, あまり腕を振らない手振りのような, 歩き方の個人差による精度劣化も見られた. キャリブレーションとしては, 「真北へ 100 m 歩かせ, そのときの歩数を入力させる」などは現実的ではないが, たとえば, 「円を描くように歩行させ, その際の推定位置のずれから重力推定誤差を補正する」といった手法は許容できると考えられる. 今後は, そのような補正手法のほか, 歩行開始点の座標を与える手法などについても検討を進め, より多くの被験者のセンサデータで評価を行う予定である.

参考文献

- 1) Yahoo! Inc.: flickr (online), available from (<http://www.flickr.com/>) (accessed 2010-05-21).
- 2) foursquare: foursquare (online), available from (<http://foursquare.com/>) (accessed 2010-05-21).
- 3) KDDI 株式会社: セカイカメラ ZOOM (オンライン), 入手先 <http://kazasu.mobi/> (参照 2010-05-21).
- 4) Iwasaki, Y., Kawaguchi, N. and Inagaki, Y.: Azim: Direction Based Service using Azimuth Based Position Estimation, *Proc. ICDCS 2004*, pp.700–709 (2004).
- 5) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, *Proc. INFOCOM 2000*, Vol.2, pp.775–784 (2000).
- 6) King, T., Kopf, S., Haenselmann, T., et al.: COMPASS: A probabilistic indoor positioning system based on 802.11 and digital compasses, *Proc. WiNTECH'06*, pp.34–40 (2006).
- 7) Koozyt, Inc.: PlaceEngine (online), available from (<http://www.placeengine.com/>) (accessed 2010-05-17).
- 8) Bekkali, A., Sanson, H. and Matsumoto, M.: RFID indoor positioning based on probabilistic RFID map and Kalman filtering, *Proc. WiMOB 2007*, p.21 (2007).
- 9) Chawathe, S.S.: Beacon Placement for Indoor Localization using Bluetooth, *Proc. ITSC 2008*, pp.980–985 (2008).
- 10) Gigl, T., Janssen, G.J.M., Dizdarevic, V., et al.: Analysis of a UWB Indoor Positioning System Based on Received Signal Strength, *Proc. WPNC'07*, pp.97–101 (2007).
- 11) Priyantha, N.B., Miu, A.K.L., Balakrishnan, H. and Teller, S.: The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications, *Proc. MOBICOM*, pp.1–14 (2001).
- 12) InterSense Inc.: IS-900 Motion Tracking System (online), available from (http://www.intersense.com/uploadedFiles/Products/White_Papers/IS900_Tech_Overview_Enhanced.pdf) (accessed 2010-05-17).
- 13) 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, 信学技報, PRMU2003-260, pp.25–30 (2004).
- 14) Beauregard, S.: A Helmet-Mounted Pedestrian Dead Reckoning System, *Proc. IFAWC 2006*, pp.15–16 (2006).
- 15) Stirling, R., Fyfe, K. and Lachapelle, G.: Evaluation of a New Method of Heading Estimation for Pedestrian Dead Reckoning Using Shoe Mounted Sensors, *J. Navigation*, Royal Society of Navigation, Vol.58, No.1, pp.31–45, Cambridge University Press (2005).
- 16) Kim, J.W., Jang, H.J., Hwang, D. and Park, C.: A Step, Stride and Heading Deter-

- mination for the Pedestrian Navigation System, *J. GPS*, Vol.3, No.1-2, pp.273-279 (2004).
- 17) Randell, C., Djalllis, C. and Muller, H.: Personal Position Measurement Using Dead Reckoning, *Proc. ISWC'03*, IEEE Computer Society, pp.166-173 (2003).
- 18) Weinberg, H.: Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications, *APPLICATION NOTE AN-602*, Analog Devices, Inc. (2002).
- 19) Fang, L., Antsaklis, P.J., Montestruque, L., et al.: Design of a Wireless Assisted Pedestrian Dead Reckoning System - The NavMote Experience, *IEEE Trans. IMS*, Vol.54, pp.2342-2358 (2005).
- 20) 大瀧保明, 胡丹, 猪岡光, 鈴木明宏: 携帯型装置による人間の移動行動の推定, 計測自動制御学会東北支部第222回研究集会, 資料番号220-10 (2005).
- 21) 上坂大輔, 岩本健嗣, 村松茂樹, 西山智: 携帯電話における加速度・地磁気センサを用いた位置取得システム, *DICOMO2008*, pp.761-767 (2008).
- 22) 上坂大輔, 岩本健嗣, 村松茂樹, 横山浩之: 手持ちの6軸センサを利用した屋内推定手法, *DPSWS2008*, pp.243-244 (2008).
- 23) 上坂大輔, 岩本健嗣, 村松茂樹, 横山浩之: センサを人体に固定しないデッドレコニング手法, 電子情報通信学会全国大会講演論文集, pp.3.59-3.60 (2009).
- 24) Kamisaka, D., Iwamoto, T., Muramatsu, S. and Yokoyama, H.: Pedestrian Dead Reckoning Method Suitable for Built-in Motion Sensors on Mobile Phones, *Proc. UCS'09*, pp.23-30 (2009).
- 25) Blanke, U. and Schiele, B.: Sensing Location in the Pocket, *UbiComp2008* (2008).
- 26) Steinhoff, U. and Schiele, B.: Dead Reckoning from the Pocket - An Experimental Study, *Proc. PerCom 2010* (2010).
- 27) Apple Inc.: iPhone (online), available from (<http://www.apple.com/iphone/>) (accessed 2010-05-17).
- 28) HTC Corp: T-mobile G-1 (online), available from (<http://www.htc.com/www/product/g1/overview.html>) (accessed 2010-05-17).
- 29) Apple: Nike + iPod (online), available from (<http://www.apple.com/jp/ipod/nike/>) (accessed 2010-05-17).
- 30) 富士通株式会社: 最新センシング技術によるゴルフスウィングチェックアプリを開発 (オンライン), 入手先 <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2009/09/28.html> (参照2010-05-17).
- 31) Cui, Y., Chipchase, J. and Ichikawa, F.: A Cross Culture Study on Phone Carrying and Physical Personalization, *Proc. HCI2007 International*, pp.483-492 (2007).
- 32) Caruso, M.J.: Application of magnetoresistive sensors in navigation systems, *Sensors and Actuators, SAE*, SP-1220, pp.15-21 (1997).
- 33) 千葉雄樹, 小西勇介, 中尾敏康: 加速度センサを用いた人物行動判定における時間応答性改善手法, 情報処理学会全国大会講演論文集, pp.3.61-3.62 (2009).
- 34) Perry, J.: *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*, SLACK Incorporated (1992).
- 35) 翁長謙良, 吉永安俊, 趙廷寧: 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45, pp.149-155 (1998).
- 36) Abdelkader, C.B.: Stride and Cadence as a Biometric in Automatic Person Identification and Verification, *Proc. FGR2002*, IEEE Computer Society, p.372 (2002).
- 37) Tanawongsuwan, R. and Bobick, A.: Performance Analysis of Time-Distance Gait Parameters under Different Speeds, *Proc. AVBPA2003*, pp.715-724 (2003).
- 38) 山崎昌廣, 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総説, *J. Anthropological Society of Nippon*, Vol.98, No.4, pp.385-401 (1990).
- 39) 日本工業標準調査会: JIS S7200 (オンライン), 入手先 <http://www.jisc.go.jp> (参照2011-01-07).
- 40) 国土地理院: 磁気偏角一覧図(2000.0年値)(オンライン), 入手先 http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/images/menu_03/henkakuitiran2000.pdf (参照2010-05-20).

(平成22年5月31日受付)

(平成22年10月4日採録)



上坂 大輔 (正会員)

2005年和歌山大学大学院システム工学研究科修了。同年KDDI株式会社入社。現在(株)KDDI研究所Webデータコンピューティンググループ研究員。コンテキストウェアネス, センサデータ解析等の研究に従事。2009年UCS'09にてBest Paper Award受賞。



村松 茂樹 (正会員)

1997年東京大学工学部電気工学科卒業, 1999年同大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了。同年KDDI株式会社(当時KDD)入社。現在(株)KDDI研究所Webデータコンピューティンググループ研究主査。センサデータ解析, XML, SVG, ウェブマッピング, ITS等の研究開発に従事。



岩本 健嗣 (正会員)

2000年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。2005年慶應義塾大学より博士(政策・メディア)。現在、富山県立大学工学部情報システム工学科講師。ユビキタスコンピューティング, 屋内位置情報, センサ応用アプリケーション等の研究に従事。電子情報通信学会会員。



横山 浩之 (正会員)

1992年京都大学工学部電子工学科卒業, 1994年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現, KDDI(株))入社。以来, 研究所にて, ATM網, 移動通信網, IP網, 光パケット網の性能評価・設計に関する研究に従事。2007年から携帯端末で観測可能な情報を活用したアプリケーションに関する研究に従事。2000年(社)電子通信学会学術奨励賞受賞。電子情報通信学会会員。博士(工学)。