

## 可動性を考慮したセンサ装着による歩行測位システムの開発

### Development of Autonomous Pedestrian Positioning System Considering Easy and Flexible Sensor Mounting

深井 裕二\* 河合 洋明\* 工藤 雅之\* 仲野 修\*

Yuji Fukai, Hiroaki Kawai, Masayuki Kudo and Osamu Nakano

#### Abstract

In a pedestrian positioning system with an acceleration and an angular velocity sensor, a higher accuracy positioning is possible by fixing multiple sensors to the human body. In contrast, a simple mounting position using a single sensor is more convenient. However, if the sensor is not fixed, the measured value is affected by shaking, bouncing, overturning, and shock. This reduction in processing precision makes it difficult to perform walking position estimation. The purpose of this study was to estimate the position of a walking pedestrian using a single sensor device considering a flexible sensor mounting and free direction of sensor axis. We attempted to develop an autonomous walking positioning system in easy mounting positions, such as in a pocket and a name tag. We improved the threshold of the determination of the sensor signal during vibration and even using a processing method that allows overturning of the sensor. This paper reports the results based on experiments on the effect and practicality in various mounting positions.

#### 1. はじめに

移動する人や物体の位置を測位するシステムには、GPS (Global Positioning System) の衛星信号など外部システムから得た情報を利用する方法の他にセンサを装着して自律的に測位する方法がある。地磁気や気圧センサを活用するものでは絶対的な方角と高度の推定ができるが、屋内では建物の鉄骨に帯びた残留磁場や設備が発する磁気による環境磁場の影響が大きい場合がある。

一方、加速度および角速度センサを用いた相対的な位置推定では、歩行測位に関し多数の研究報告がある。高精度を実現するための身体の複数箇所へのセンサ装着によるものとして、脚部へのセンサ固定による歩行解析手法<sup>(1)</sup>や、身体各部位へのセンサ固定による姿勢および歩行速度の高精度な計測システム<sup>(2)</sup>などが提案されている。また、センサを固定せずに衣服のポケットなどに所持した状態での行動認識<sup>(3)</sup>では、特徴量による歩行と非歩行の判別を試みている。

それらに対し本研究は単体センサ装置の容易な装着を対象とし加速度および角速度による歩行位

置推定を目的とし、センサの装着において可動性や自由なセンサ軸方向を考慮した。センサを体幹部に固定した状態ではある程度良好な推定精度が得られる。しかしセンサをしっかりと固定しない装着状態では、精度は大きく低下し歩行位置推定は難しくなる。これはセンサが体表面から離れて移動と回転の自由度が生じ、歩行運動に伴うセンサの揺れ、跳ね、転倒、衝撃などの動きが加速度と角速度に影響を及ぼすためである。この状況で精度を向上できれば、装着形態に柔軟性があり容易に利用できる測位システムとなる。

本研究では加速度および角速度情報をもとに容易なセンサの装着による歩行位置推定として、衣服のポケットや首から吊るすネームホルダーなど可動性のある装着形態による自律型歩行測位システムの開発を試みた。可動性対策として厳しい条件でのセンサ信号の閾値判定に対する改善法や、ポケット内でのセンサ転倒への対応法を検討し機能を実装した。そして本システムを用いた実験をもとに、可動性のある装着形態がどれだけ測位精度に影響するか調べ実用性を検討した。

\* 北海道科学大学高等教育支援センター学士課程教育支援部門

## 2. システムの概要

本システムは身体や衣服に装着できる小型センサから無線で送出された計測データをホストマシンで処理し歩行者の現在位置を推定する。センサには TSND121<sup>(4)</sup> (ATR-Promotions 社) を用い、3 軸加速度および 3 軸角速度を計測する (図 1)。TSND121 はシャツの胸ポケットやネームホルダーに装着できるサイズであり内蔵バッテリーで稼働する。計測データは Bluetooth による無線通信によって歩行者が携帯するホストマシンへ転送する。ホストマシンは Java が動作可能な小型タブレット PC など想定している。今回の動作実験ではモバイル型ノート PC を使用した (表 1)。

システムの動作は歩行開始点を基準とする相対位置をリアルタイムに画面表示および記録するものである。プログラムは、通信処理、センサ値の温度および電源電圧ドリフト補正処理、信号加工処理、歩行測位処理、3D 状態表示処理、2D 軌跡表示処理、センサ値グラフ表示処理、およびファイル記録処理で構成される。

歩行測位処理では足の接地判定を行う歩行認識

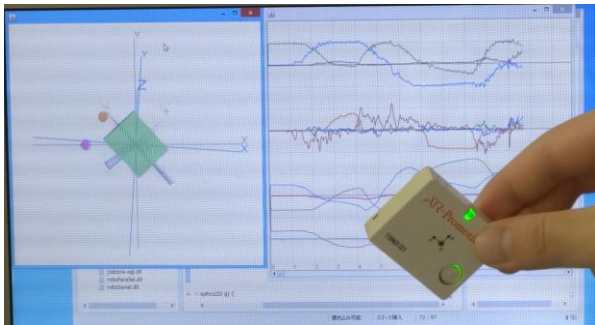


図 1 センサと歩行測位システム

表 1 システムの構成と開発環境

開発言語・ツール	Java7, Eclipse4.4, 通信ライブラリ: RXTX2.1, グラフィックスライブラリ: Java3D1.5
開発マシン	Windows8(64bit), Core i7 3.4GHz, 4GB
ホストマシン	Windows8(64bit), Core i5 1.7GHz, 4GB (ノート型PC)
センサ	ATR-Promotions TSND121
センサ規格・動作設定	37mm(W) x 46mm(H) x 12mm(D), 22g, Bluetooth Ver2.0 無線シリアル通信, 3軸加速度: 範囲±8G, 0.1mG単位, 3軸角速度: 範囲±500dps, 0.01dps単位, サンプリング: 1ms×5回平均

とセンサの姿勢計算による進行方向の推定によって現在位置を測位する。なお方向は歩行開始時を基準とする相対角度とし、歩幅を一定値 (700mm) と仮定して計算している。以降の計測実験は大学校舎 (RC 造) 内の段差のない通路上で実施した。

## 3. センサの装着形態と座標軸変換

センサの装着形態としてシャツの胸ポケット、ズボンポケット、図 2 のようなネームホルダー (首下 20cm, 40cm) を対象とした。これらの装着は以下の(1)~(3)を前提とする。なお比較のために胸中央にしっかりと固定した装着形態も計測している。

- (1) 衣服のポケット、ネームホルダーに自然に収納しそれ以上の固定はしない。
- (2) 装着時のセンサの向きは無作為としセンサ軸の垂直性は考慮しない。
- (3) 歩行中にポケット内でのセンサの転倒(回転)も想定する。

センサ装着時の自由な向きに対応するために、図 3 のように物理センサ座標系  $(x, y, z)$  から仮想センサ座標系  $(x', y', z')$  へクォータニオン  $q_{axis}$  による座標軸変換を行う。 $q_{axis}$  は歩行開始時点における 3 軸加速度から得られる垂直ベクトルより求める。 $y'$  軸は地面に対する垂直方向であり、 $z'$  軸は進行方向である。歩行認識は  $y'$  軸の加速度変動から足の接地を判定する。また歩行方向は 3 軸角速度から 3 次元の姿勢クォータニオンを求め、基準ベクトルとの角変位として得る。



図 2 ネームホルダー (左) 20cm (右) 40cm

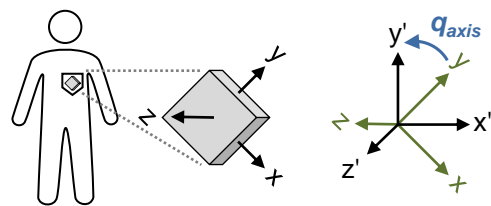


図 3 センサの自由角度に対応する座標軸変換

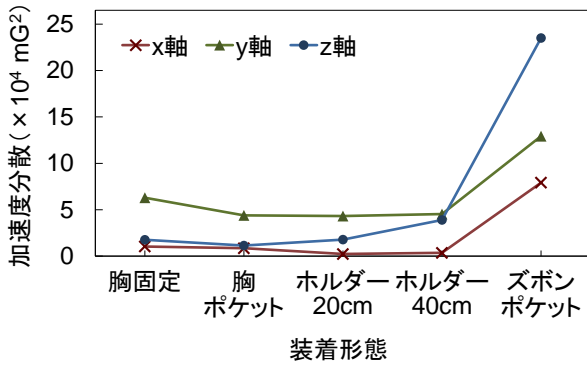


図 4 加速度の分散

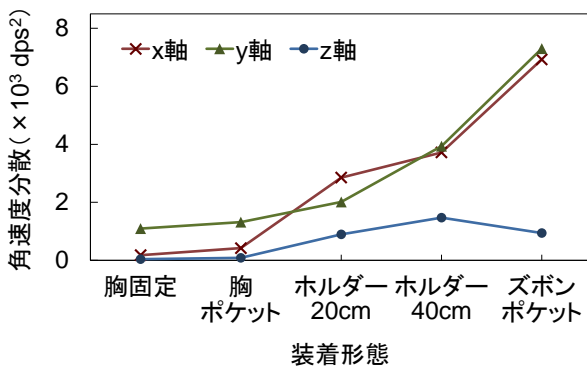


図 5 角速度の分散

各装着形態において可動性による計測値への影響を調べた。図 4 および図 5 は y 軸を垂直にしてセンサを装着し、L 字ルートを往復歩行 (36 歩) した際の各計測値の分散 (2 人×2 回計測の平均) である。特にズボンポケットでの大腿部の動きやネームホルダーが体から離れる動きなどのセンサの揺れによる大きな影響が認められた。

#### 4. 信号処理と歩行位置の計算

##### 4.1 センサ信号の加工と歩行認識

ホストマシンはセンサの 3 軸の加速度および角速度信号を 5ms 間隔で受信する。このとき加速度信号に対しセンサの揺れの影響による歩行動作の誤認識を低減させるために、式(1)の低域通過フィルタ<sup>(5)</sup>(LPF: Low Pass Filter)を Java で実装した。

$$k = \frac{1}{1 + 2\pi f \Delta t}$$

$$a'_t = k a'_{t-1} + (1 - k) a_t \quad (1)$$

$a_t$ ,  $a'_t$  は時間  $t$  におけるフィルタリング前後の加速度データであり、サンプリング周期  $\Delta t = 5\text{ms}$ 、カットオフ周波数  $f = 5\text{Hz}$  とした。

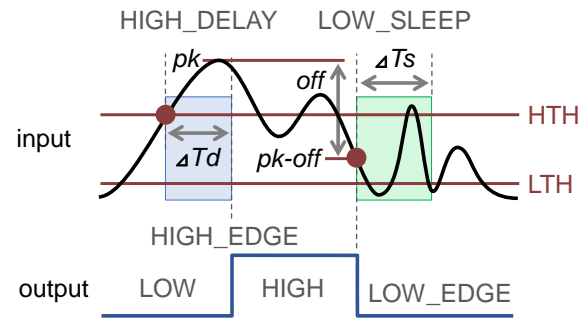


図 6 改良型トリガの入出力

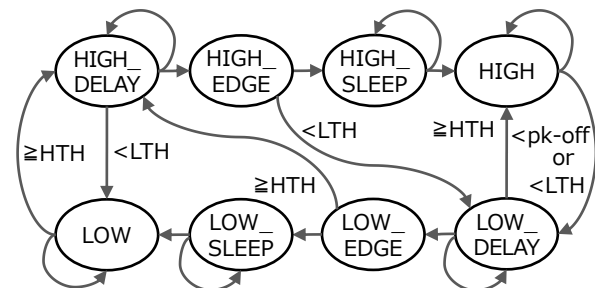


図 7 トリガの状態遷移

歩行認識では座標軸変換で得た垂直方向の y 軸加速度の変動に対しシュミットトリガ方式<sup>(6)</sup>で閾値判定する。この際、加速度のピーク値はセンサの可動性により影響される。さらに LPF によって信号レベル幅が縮小されているため、閾値幅が狭いと確実な認識ができなくなり、広いとセンサの揺れを誤認識し閾値の設定が難しい。

対応策として図 6 の改良型トリガ機能を用いる。これは変動するピーク値 (pk) からのオフセット値 (off) を閾値として併用する (PeekOffset) 機能により、変化に適合した閾値判定を行う。高閾値 (HTH) 到達後に低閾値 (LTH) に到達するか、高ピーク値からのオフセット値 (pk-off) を下回ると足の接地とみなす。さらに歩行動作の誤認識のうち LPF で対応できないものに対し、閾値到達後の一定時間の判定休止 (Sleep) 機能で足接地後のセンサの揺れによる加速度の乱れを無視する。

本トリガ機能は図 7 の状態遷移マシンを Java で実装した。歩行認識処理では PeekOffset 機能および Sleep 機能 (HTH = 1100mG, LTH = 900mG, off = 400mG,  $\Delta Ts = 300\text{ms}$ ) を用いて誤認識を低減させた。また一定時間のレベル維持を判定する遅延判定 (Delay) 機能は開始時の停止状態の判定に用い、座標軸変換の初期化に使用している。

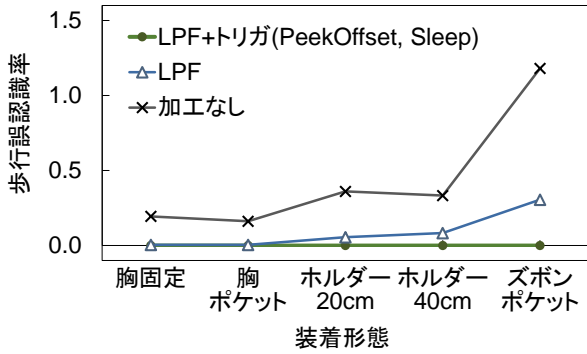


図 8 信号処理による歩行誤認識の改善

図 8 は L 字ルートの往復歩行での歩行誤認識率であり、これは足接地数の  $|\text{認識数} - \text{真値}| \div \text{真値}$  で求めている。LPF は歩行リズムよりも高周波成分の振動が除去でき全般的に効果がある。トリガは特に揺れと衝撃が大きいズボンポケットへの効果が大きい。LPF とトリガ (PeekOffset, Sleep) の併用で歩行認識率はほぼ 1.0 に改善した。

#### 4.2 クォータニオンによる姿勢計算

歩行方向を求めるために回転および座標変換にクォータニオンを用いた。これは、任意の軸に対する回転が容易であり、オイラー角による表現に対し特定の回転角度 (特異点) で計算不能になるジンバルロックがない<sup>(7)</sup>。さらに  $4 \times 4$  のアフィン変換行列による演算に比べ回転合成や逆回転における演算高速化の利点がある。

式(2)は、 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  を軸に回転角  $\theta$  の回転を表すクォータニオンである。位置ベクトル  $v$  を  $q$  で回転するには式(3)を用いる。 $q^*$  は  $q_1, q_2, q_3$  の符号を反転した共役クォータニオンであり、逆回転を意味する。また  $q_1, q_2$  の順序による位置ベクトルの回転合成には式(4)を用いる。

$$q = (q_1, q_2, q_3, q_4) = \left( \lambda_1 \sin \frac{\theta}{2}, \lambda_2 \sin \frac{\theta}{2}, \lambda_3 \sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (2)$$

$$v' = qvq^* \quad (3)$$

$$q_3 = q_2q_1 \quad (4)$$

歩行方向は角速度をもとに方向余弦行列(DCM: Direction Cosine Matrix)および運動微分方程式から導かれるクォータニオンの時間微分<sup>(8)</sup>によって得る。まずセンサ座標系から慣性座標系への座標系変換である DCM は式(5)で表される。物理セン

サ座標系での角速度  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  に対し、DCM の時間微分は式(6)の運動微分方程式で表される。これらから式(7)のクォータニオンの時間微分が導かれる。この回転変動量をリアルタイムで逐次加算して 3 次元の姿勢  $q_{att}$  を更新し、基準ベクトルを  $q_{att}$  で回転させ、その  $x, z$  成分から歩行方向を得る。

$$C = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_1q_2 + q_3q_4) & 2(q_3q_1 - q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 - q_3q_4) & q_2^2 - q_3^2 - q_1^2 + q_4^2 & 2(q_2q_3 + q_1q_4) \\ 2(q_3q_1 + q_2q_4) & 2(q_2q_3 - q_1q_4) & q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_4^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}C = - \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} C \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 & \omega_1 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 & \omega_2 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 & \omega_3 \\ -\omega_1 & -\omega_2 & -\omega_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

#### 4.3 足接地位置の算出

逐次得られる歩行方向の単位ベクトルを  $\Delta d$  として足接地位置を求める際、一步の前進運動中では速度変動があるため、 $\Delta d$  の単純な合算から得た足接地位置は誤差が大きい。また加速度の積分による歩行速度の算出は、センサの可動性による衝撃が影響しているため適さない。

歩行周期<sup>(9)</sup>における足の接地は、踵接地 (HC: heel contact), 足底面接地 (FF: foot flat), 踵離地 (HO: heel off), 爪先離地 (TO: toe off) の状態を繰り返す。前進運動は前半の HC-FF 間で減速し、後半の HO-TO 間で加速する。そこで最大加速点である HC の手前付近を頂点とする式(8)のガウス関数を用いた重み  $w_i$  および水平成分を正規化した方向ベクトル  $\Delta d_i$  から式(9)によって足接地移動量ベクトル近似値  $\Delta p$  を求め、足接地位置を推定する。なお、一步あたりの距離定数およびデータ計測数を  $L, n$  とし、 $L = 700\text{mm}$ ,  $\sigma = 1.0$ ,  $\mu = 0.8$ ,  $r = 20$  としている。

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(ri/n - r\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (8)$$

$$\Delta p = \frac{rL}{n} \sum_{i=1}^n \Delta d_i w_i \quad (9)$$



#### 4.4 センサ転倒と座標軸変換の逐次自動修正

ポケットなどへの装着形態では図9のように歩行中にセンサがポケット内で転倒し、歩行認識の基準となる座標軸  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  が回転する場合がある。図10はセンサ転倒時の波形である。座標軸変換  $q_{axis}$  は歩行開始時に求めているが、歩行中にセンサが転倒すると角速度の大きな変動と共に軸に回転が生じ、 $y'$  軸の加速度  $ay'$  による歩行認識（図の黒点）が機能しなくなる。

この状況に対し、姿勢  $q_{att}$  を  $q_{axis}$  に回転合成することで座標軸変換を常時更新すれば、特に転倒を検出するしきみを必要とせずに  $y'$  軸が垂直を保つように働く。図11は図10と同じ信号データに対し座標軸変換の逐次自動修正を行っており、転倒後も歩行認識が機能しているのがわかる。

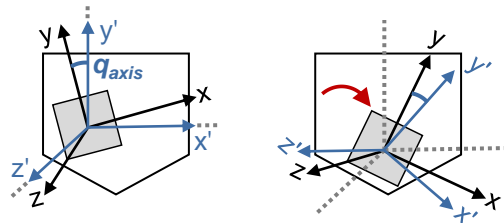


図9 センサ転倒時の座標軸の変化

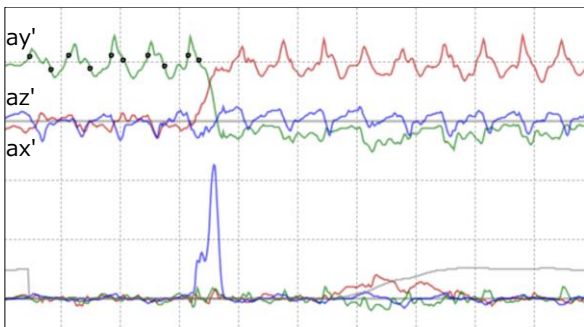


図10 転倒時の波形（上：加速度，下：角速度）

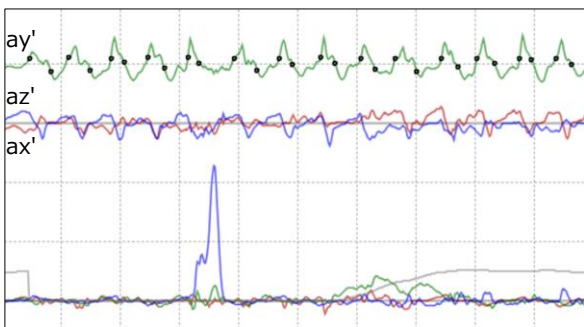


図11 座標軸変換の逐次自動修正

## 5. システムの測位実験と評価

### 5.1 歩行実験

本システムを用いて各装着形態の歩行測位実験を行った。これはL字ルートの往復歩行（36歩、約25m）で被験者2人×2回の計測を実施し、歩行方向推定に次の2種類の手法を用いて比較した。

(1) 積分方式：垂直軸の角速度の積分（台形公式）から角度を求め歩行方向を決定する。

(2) 姿勢方式：式(7)を用いて得られた3次元の姿勢クォータニオンから歩行方向を決定する。

図12は胸ポケット装着時の足接地位置の真値とシステムによる推定例である。なお計測では床に付けた足接地位置の印に合わせて歩行し、ルートの曲がり角では自然な歩行になるように一歩あたりの方向転換角度を  $45^\circ$  に抑えている。

各装着形態における足接地位置の平均誤差（|推定位置－真値|の平均値）は、積分方式の0.433mに対し、姿勢方式は0.265mであり1.64倍高い精度となった。装着形態別では、胸固定は積分0.23mに対し姿勢0.18m、ズボンポケットは積分0.82mに対し姿勢0.31mとセンサの揺れの大きさが両手法の誤差およびその差に影響していると思われる。

積分方式では軸の垂直性を前提とし1軸のみの角速度から計算するため、センサが揺れると座標軸の傾斜による角速度の誤差が方向計算に蓄積すると考えられる。一方、姿勢方式では3軸の角速度から計算した3次元回転から方向を求めるため積分方式のような性質の誤差は生じない。センサを固定しない装着形態では歩行中の座標軸のずれ

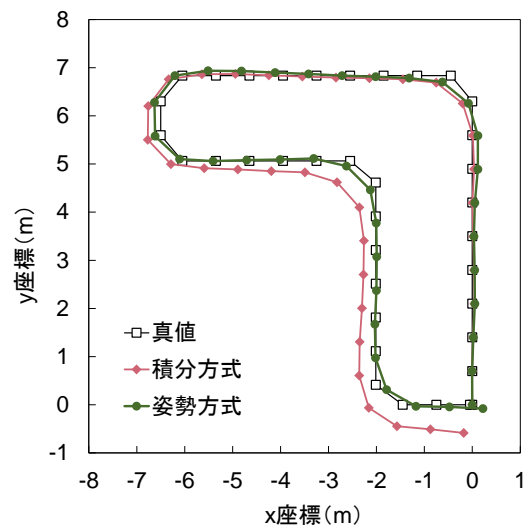


図12 推定歩行軌跡（胸ポケット，25m）

が生ずるため姿勢方式が向いている。

図 13 は姿勢方式を用いた場合の各装着形態による平均誤差であり、さらに胸ポケットにおいて歩行中にセンサが約 45° および 90° 転倒するケースを追加計測した（被験者 2 人×2 回）。結果はいずれも歩行認識率が 1.0 であり、誤差は主に角速度に起因するものと考えられる。大きな誤差の発生は曲がる部分でよく見られ、特にネームホルダー40cm は装着形態の中で可動性が高く、身体から離れた大きな揺れが影響していると思われる。

図 14 は長距離計測例として胸ポケット装着により、大学校舎の通路を歩行（161 歩、約 113m）したときの本システムによる軌跡表示画面の例である。これを 10 回計測したときの平均値を表 2 に示す。なお自然な歩行を意識し、床に足接地位置を誘導する印は付けていない。そのため歩数に誤差が生じている。

2 つの方式の終点誤差率（終点誤差÷歩行距離

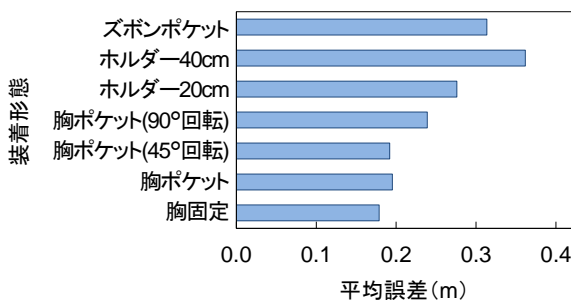


図 13 平均誤差（L 字ルート、姿勢方式）

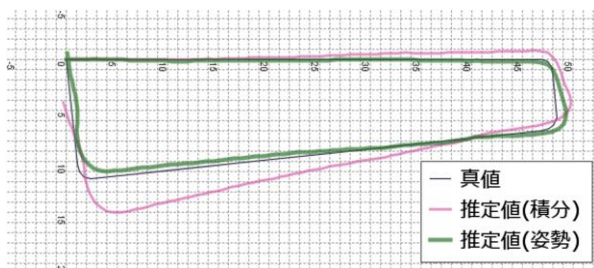


図 14 システムの軌跡表示（ルート距離 113m）

表 2 終点誤差の比較（ルート距離 113m）

	積分方式	姿勢方式
歩数	159.70 歩	159.80 歩
歩数誤差率	-0.81 %	-0.75 %
終点誤差	2.60 m	1.55 m
終点誤差率	2.31 %	1.38 %

真値)を比較すると、姿勢方式では誤差率が 1.38%（1.55m）となり、積分方式より 1.68 倍高い精度であった。L 字ルートの胸ポケット装着時の終点誤差率に対し、積分方式で 1.01 倍、姿勢方式で 1.09 倍と長距離でも誤差率はほぼ同じであった。

## 5.2 精度と実用性の評価

表 3 は図 13 における平均誤差率（平均誤差÷歩行距離真値）および、胸固定の平均誤差率を 1 とする誤差比を示したものである。

平均誤差率の 2 倍を終点誤差率とし実用性の程度を見てみると、仮に実用可能な終点誤差精度を 1m 以内とした場合、胸ポケットで 50m 程度、ネームホルダー20cm で 40m 程度が実用可能距離となる。また本システムを屋内での位置推定システムに応用する場合、建造物のどの部屋にいるか特定する精度を 5m とすると、胸ポケットで約 290m、ネームホルダー20cm で約 209m が最大距離となる、これらは 50m×50m のフロアの約 1.5 周～1 周の距離に相当する。

測位精度を低下させる要因として考えられるセンサの運動パターンを以下に挙げる。

- Rc 歩行運動で生ずる周期的回転
- Ri 空中における不規則回転
- Tp ポケット内における傾き・転がり
- Jp ポケット内における跳ね
- Bb 人体との衝突・反発

表 4 は装着形態における各要因の含有状況である。特に◎は運動の程度が大きいことを意味する。

表 3 装着形態の実用性評価

装着形態	平均誤差率(%)	誤差比
胸固定	0.71	1.00
胸ポケット	0.77	1.09
胸ポケット(転倒あり)	0.86	1.21
ネームホルダー20cm	1.10	1.54
ネームホルダー40cm	1.44	2.02
ズボンポケット	1.24	1.75

表 4 精度に影響する要因の含有状況

装着形態	誤差比	Rc	Ri	Tp	Jp	Bb
胸固定	1.00	○				
胸ポケット	1.09	○		○	○	
ネームホルダー20cm	1.54	○	○			○
ズボンポケット	1.75	◎		○	◎	
ネームホルダー40cm	2.02	○	◎			◎

ズボンポケットでは歩行運動における大腿部の大きな動きと足への衝撃が  $x'$  および  $y'$  軸まわりの周期的回転 ( $Rc$ ) とポケット内で  $y'$  軸をはじめ 3 軸の複合的な跳ね ( $Jp$ ) を強めており、歩行認識と歩行方向推定に影響を与えている。さらにポケット内の容量の大きさや深さはこれらに影響する要因となり、衝撃の強さの観点では靴底や床の素材も影響すると考えられる。

ネームホルダー40cm の計測では足接地と同じ周期で人体との衝突を繰り返す、人体から離れた空中で  $y'$  軸まわりの低速な不規則回転 ( $Ri$ ) が観測された。これは歩行速度や方向転換、衣服の形状などによる影響を受けると推察でき、まれにホルダーが裏返る状況も確認されている。このような  $y'$  軸まわりの回転は、歩行方向の推定に大きく影響を与え、低速回転 (数十 dps 程度) では人の曲がり歩行との区別がしにくく、どのように判定して影響を取り除くかが課題である。今回の計測ではネームホルダー40cm の動きは比較的穏やかであるが、裏返りなども起こり得るため実際の運用では精度の安定性が低いものと予想される。

## 6. まとめ

本研究では容易かつ可動性のある単体センサの装着において、加速度と角速度による自律歩行位置推定を試みた。結果として胸ポケットや短い長さで吊るすネームホルダーでは、センサを胸に固定した場合に近い精度が得られた。可動性のある装着形態に対し、トリガによる信号処理や 3 次元の姿勢計算を基本とする座標軸変換の逐次自動修正により歩行認識能力を高めた。

今回のようなモーションセンサによる位置推定において、積分方式と同様に姿勢方式でも時間微分の累積加算による誤差蓄積は避けられず、絶対位置を知るための環境情報を使用しない自律型測位の限界でもある。本システムは、比較的短い距離範囲での使用および相対位置推定の用途が妥当である。また GPS の受信感度が低下する鉄筋コンクリート構造の屋内などでの測位手段として有効であると考えられる。

今後の課題として実用性向上のためにセンサ値から正確な歩幅あるいは歩行速度を求めることが必要である。さらに、個人差による影響も重要であり、年齢や性別による差異を分析し検討することが挙げられる。

測位システムの実用性において「容易さ」は重要であるが、簡略性や自由度が増すと性能面の実用性が低下する。本研究で得られた手法の効果やセンサの可動性による特徴と問題についてさらなる検討を試みたい。測位機能としての本システムの高い実用性が得られれば、周辺情報や他のシステムと連携させた様々な応用ができると考えられる。

## 参考文献

- (1) 宮川寛亮, 武田量, 但野茂, “加速度・角速度センサによる三次元歩行解析,” 日本機械学会年次大会講演論文集, 2010, Vol.5, pp.63-64.
- (2) 本井幸介, 田中志信, 野川雅道, 山越憲一, “姿勢・歩行速度の無拘束同時計測法に関する基礎的検討,” 生体医工学: 日本エム・イー学会誌, 2003, Vol.41(4), pp.273-279.
- (3) 趙宣伊, 居川達也, 山田啓一, 武智和洋, “加速度・角速度センサを用いたセンサ保持状態に依存しない人物行動認識に関する検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 情報・システム(1), 2013, p.111.
- (4) ATR-Promotions, Inc., “小型無線多機能センサ TSND121 コマンドインタフェース仕様書,” 2012.
- (5) 三上直樹, “デジタル信号処理の基礎,” CQ 出版, 1998.
- (6) 猪飼國夫, 猪飼維斗, “デジタル・システムの設計,” CQ 出版, 2010.
- (7) 山口功, 木田隆, 岡本修, 狼嘉彰, “クォータニオンとオイラー角によるキネマティクス表現の比較について,” 航空宇宙技術研究所資料, TM-636, 1991.
- (8) 狼嘉彰, 中須賀真一, 富田信之, 松永三郎, “宇宙ステーション入門,” 東京大学出版会, 2008, pp.144-160.
- (9) 中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩, “基礎運動学 第 6 版,” 医歯薬出版, 2006, pp.380-392.