

# キャリブレーション歩行を用いた屋内測位技術に関する検討

小川 純平<sup>†</sup> 廣橋 義寛<sup>‡</sup> 飯田 康隆<sup>‡</sup> 和田 卓久<sup>‡</sup> 鮫田 芳富<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> <sup>‡</sup> 株式会社東芝 〒183-8511 東京都府中市東芝町1番地

E-mail: <sup>†</sup> jumpei.ogawa@toshiba.co.jp,

<sup>‡</sup> { yoshihiro1.hirohashi, yasutaka.iida, taka.wada, yo.sameda }@toshiba.co.jp

**あらまし** オフィス作業員やプラント作業員の勤務管理を行うために、作業員の位置情報を把握することが期待されている。GPSの使用できない屋内における測位技術として、歩行者が携行した端末のセンシングデータから測位を行う自律航法が存在するが、測位精度向上が課題となっている。本稿では、所定の経路を歩行したキャリブレーション歩行を用いて個人ごとの誤差を軽減し、測位精度を向上する方法について検討・評価した内容について報告する。

**キーワード** 屋内測位, キャリブレーション用歩行, 自律航法

## A Study on Indoor Positioning System Using Walking Data for Calibration

Jumpei OGAWA<sup>†</sup> Yoshihiro HIROHASHI<sup>‡</sup> Yasutaka IIDA<sup>‡</sup>

Takahisa WADA<sup>‡</sup> and Yoshito SAMEDA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> <sup>‡</sup> Toshiba Corporation 1 Toshibacho, Fuchu-si, Tokyo, 183-0043 Japan

E-mail: <sup>†</sup> jumpei.ogawa@toshiba.co.jp,

<sup>‡</sup> { yoshihiro1.hirohashi, yasutaka.iida, taka.wada, yo.sameda }@toshiba.co.jp

**Abstract** Location management service is required for improving work efficiency of indoor worker. In location management service, it has problem that positioning accuracy is not enough. In this paper, we propose the indoor positioning method using walking data for calibration and improve the positioning accuracy.

**Keywords** Indoor Positioning, Walking Data for Calibration, Dead Reckoning

### 1. はじめに

近年、位置情報を活用したサービスが注目されている。オフィスやプラントにおける複数の作業員の勤務管理を行うために、作業員の位置情報と行動を記録するロケーション管理サービスの実現が期待されている。このようなロケーション管理サービスでは、対象者の移動経路や行動を把握するために、対象者の通過エリアの正確な把握と、複数の対象者を同時に管理する必要がある。

一般に屋外でのロケーション管理サービスには、GPS信号を測位用の端末で受信して位置推定するGPS方式が用いられており、デファクトスタンダードとなっている[1]。一方、GPS信号を受信できない屋内では、デファクトスタンダードとなる方式がなく、端末で取得したセンシングデータから位置推定するPDR(Pedestrian Dead Reckoning)方式などが知られている[2]。

しかしながら、PDR方式はセンシングデータから移

動量を推定する際に誤差が発生するため、測位の基準位置となる、基準点を通過してからの移動距離が増加するほど、位置推定精度が低下するという課題がある。

本稿では、このような課題を解決するために立案した、位置推定方法について述べ、その評価結果を報告する。また、個人ごとの歩容の違いによる位置推定誤差を低減するために立案した、キャリブレーション歩行を用いた誤差低減方法について述べ、その評価結果を報告する。

### 2. 屋内測位技術

従来の屋内測位技術として、端末で取得したセンシングデータから位置推定するPDR方式が存在する。PDR方式は、歩行者が携行した端末の加速度や角速度などのセンシングデータから歩行者の移動量を推定し、設定した基準位置から歩行者がどのくらい移動したか(相対移動量)を推定することにより測位を行う。

端末から受信したセンシングデータを基に、歩数と

歩幅と方向の推定を行い、1歩ごとに歩幅と方向を積算することで相対移動量を推定する。地面と平行した平面において、式(1)により相対移動量が推定できる。

$$\Delta p_i = (L_i \cos(\theta_i), L_i \sin(\theta_i))^T \quad (1)$$

$\Delta p_i$ は、 $i$ 歩目の推定した1歩のベクトル、 $L_i$ は $i$ 歩目の推定した歩幅、 $\theta_i$ は $i$ 歩目の推定した方向を表す。図1に相対移動量推定の概略図を示す。

相対移動量のみでは、地図上の位置との対応付けができないため、基準となる位置情報が必要となる。基準位置の取得方法としては、初期位置を予め設定しておく方法や、スイッチやBLE(Bluetooth Low Energy)などの基準位置送信装置から受信する方法、他端末とすれ違った際に他端末の推定した位置を基準位置として使用する方法等がある。基準位置に対して、1歩ごとの相対移動量を加算することで歩行者の位置を推定する。

相対移動量算出時の、歩数や歩幅の推定誤差により、基準位置からの移動距離の増加に伴い、位置推定誤差が増加するという課題が存在する。また、個人ごとの歩容の違いにより、位置推定誤差が増加するという課題も存在する。

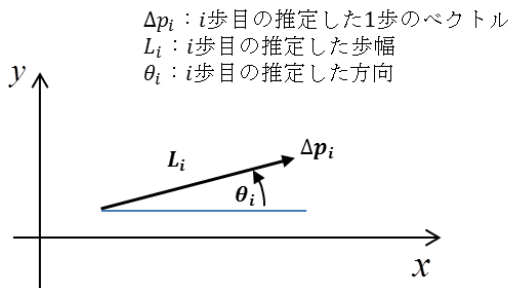


図1 相対移動量の推定

### 3. 提案方法

歩数と歩幅の推定誤差を低減するために、歩数推定方法と、歩幅推定方法を提案する。また、個人ごとの歩容の違いに対応するために、所定の経路を歩行したキャリブレーション用歩行を用いた誤差低減方法を立案する。

#### 3.1. 歩数推定方法

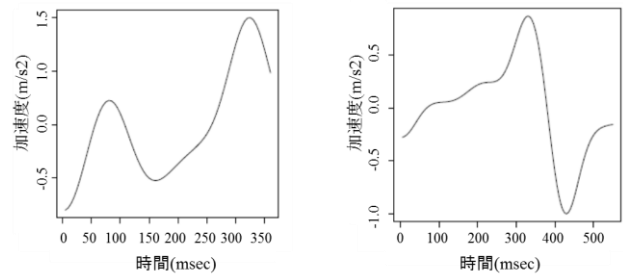
##### (i) 従来法の課題

歩数推定方法として、歩行時に加速度の3軸合成値が減少した後に大きく増加する傾向を用いて推定する方法が存在する[3]。従来の歩数推定方法では、加速度の3軸合成値だけで歩数を推定しているため、加速度変化が大きい歩行停止時の足を揃える動作も1歩として誤検出する問題がある。この問題を解決するために、加速度パターンから歩行動作と足揃え動作を識別し、

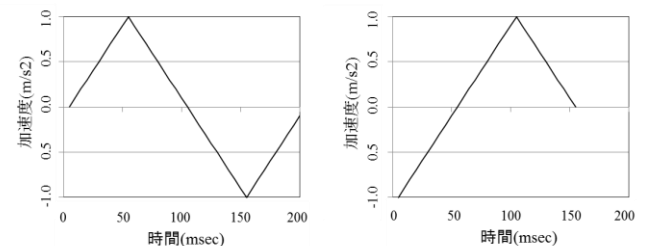
歩数推定精度を向上する。

##### (ii) 提案方法

歩行動作と足揃え動作を識別するために、歩行者の進行方向の加速度を使用する。歩行動作と足揃え動作の加速度を図2に示す。足揃え動作では、加速度が上昇傾向であるのに対し、歩行動作では上昇傾向の後に大きく下降する。これは、足揃え動作は片足を揃えて停止するのに対し、歩行動作ではもう片方の足を出すために負の加速度が発生したと考えられる。歩行動作と足揃え動作の傾向をもとに識別用テンプレートを作成した。識別用テンプレートを図3に示す。3軸合成値から歩数として検出した結果に対して、識別用テンプレートとの類似度を算出して動作を識別し、足揃え動作は1歩と検出しないことで、歩数推定精度を向上する。



(a) 歩行動作 (b) 足揃え動作  
図2 進行方向の加速度



(a) 歩行動作 (b) 足揃え動作  
図3 識別用テンプレート

識別用テンプレートとの類似度の算出には、時間長さの異なる波形の類似度推定に有効な動的時間伸縮法(Dynamic Time Warping)を用いる。長さ $n$ の波形 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ と長さ $m$ の波形 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ の2つの波形が存在する場合、式(2)~(5)より2つの波形の類似度を表すDTW距離 $D(X, Y)$ を算出できる。

$$D(X, Y) = f(n, m) \quad (2)$$

$$f(t, i) = \|x_i - y_i\| + \min \begin{cases} f(t, i-1) \\ f(t-1, i) \\ f(t-1, i-1) \end{cases} \quad (3)$$

$$f(0, 0) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f(t, 0) = f(0, i) = \infty \\ (t = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m) \end{aligned} \quad (5)$$

$\|x_i - y_i\|$  は 2 点間の距離を表す。DTW 距離が短いほど、2つの波形が類似していることを表す。1 歩ごとに歩行動作と足揃え動作の 2 種類のテンプレートに対して DTW 距離を算出し、距離が短いテンプレートの動作を識別結果とする。足揃え動作と識別された場合には、歩数を加算しないことで歩数誤差を低減する。

### 3.2. 歩幅推定方法

#### (i) 従来法の課題

歩幅推定方法として、歩行者の身長情報から下記式を用いて歩幅を推定する方法が存在する[4]。

$$L = 0.26h + 0.31 \quad (6)$$

$L$  は歩幅、 $h$  は身長を表す。上記式では歩幅が固定長のため、歩行速度や歩容の変化により歩幅が変化した場合に誤差が増加するという問題がある。この問題を解決するために、端末のセンシングデータに基づき歩幅を推定する歩幅推定モデルを構築し、センシングデータから歩幅を推定することで歩幅推定誤差を低減する。

#### (ii) 提案方法

歩幅推定モデルは、複数の歩幅に関する特徴量(歩幅特徴量)からモデルを構築する。歩幅特徴量として、身長、性別、加速度差、加速度時間差、3 軸合成値のパワースペクトルを抽出した。身長と性別は事前取得して、モデルに入力する。加速度差、加速度時間差、3 軸合成値は、端末のセンシングデータから 1 歩ごとに算出する。

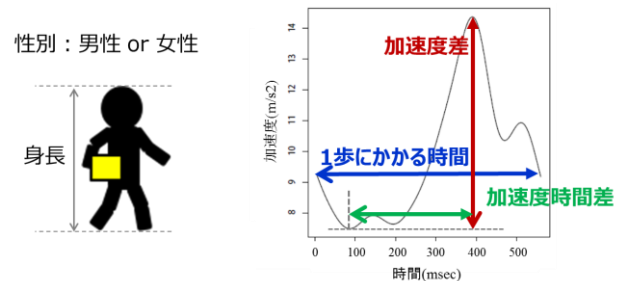
図 4 に抽出した歩幅特徴量を示す。身体的な特徴として、身長と性別が歩幅に影響すると考え、歩幅特徴量として抽出した。また、移動距離と関係がある加速度差を歩幅特徴量として抽出した。移動速度が歩幅に影響すると考え、1 歩にかかる時間を歩幅特徴量として抽出した。また、足をあげてから着地するまでの時間が歩幅に関係があると考え、足をあげてから着地

するまでの加速度差時間も歩幅特徴量として抽出した。人間の歩行は 0~5Hz までの周波数に主要成分が存在するため、歩行の主要成分として 3 軸合成値のパワースペクトルの 0~5Hz までの値を歩幅特徴量として抽出した。

抽出した歩幅特徴量に対して、Lasso[5]により各特徴量が歩幅に与える影響を分析し、歩幅推定モデルを構築した。構築した歩幅推定モデルを下記に示す。

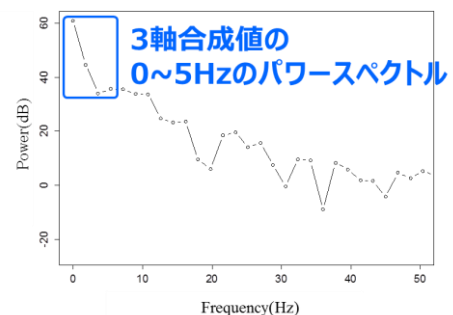
$$L = K_0 h + T + K_1 P_0 + K_2 P_1 + K_3 P_2 + K_4 P_3 \quad (7)$$

$T$  は加速度時間差、 $P_0 \sim P_3$  は 3 軸合成値の 0~5Hz のパワースペクトル、 $K_0 \sim K_4$  は重み係数を表す。構築した歩幅推定モデルに端末で取得したセンシングデータを適用して、歩幅を推定する。



(a) 身体的特徴

(b) 垂直方向の加速度



(c) 3 軸合成値のパワースペクトル

図 4 歩幅特徴量

### 3.3. 誤差低減方法

#### (i) 従来法の課題

移動距離の推定において、共通の歩幅推定モデルを用いているため、個人ごとの歩容の違いにより歩幅推定誤差が発生する。また、方向推定において、ジャイロセンサにより取得した各時刻の角速度の積分により方向を推定する。この方法では、個人ごとの歩容の違いによる方向転換時の誤差や、温度変化によるジャイロセンサの零点の変化の影響でオフセット誤差が発生するという課題が存在する。

これらの誤差を低減するために、移動経路が既知の歩行データを用いて各誤差の推定を行い、誤差に応じ

た補正係数を用いて位置推定することで、各誤差を低減する。

(ii) 提案方法

各誤差要因を図 5 に示す。移動距離の推定誤差である距離誤差、直進歩行時のオフセット誤差の直進角度誤差、方向転換時に発生する方向転換誤差の 3 種類の系統誤差を低減する。距離誤差と直進誤差は移動距離ごとに、方向転換誤差は方向転換ごとに一定の誤差が発生すると仮定し、1m あたりの距離誤差を距離補正係数 ( $E_{length}$ )、1m あたりの直進角度誤差を直進角度補正係数 ( $E_{straight}$ )、1 度あたりの方向転換誤差を転換角度補正係数 ( $E_{corner}$ ) と定義する。

3 種類の系統誤差を低減するために、移動経路が既知の学習用歩行データを用いて、各補正係数を推定する。学習用歩行データを計測する移動経路を図 6 に示す。左右両方向に対する方向転換と、直進歩行を含む 8 の字経路を移動経路とした。学習用の歩行データから推定した経路と、実際に移動した経路を比較し、推定経路と実際の移動経路との差が最少となるように、勾配法を用いて各補正係数を推定する。推定した補正係数から、下記の式により推定した歩幅と方向を補正する。

$$L'_i = L_i - E_{length}L_i \quad (8)$$

$$\theta'_i = \theta_i - E_{corner}(\theta_i - \theta_{i-1}) - E_{straight}L_i \quad (9)$$

$L'_i$  は補正後の歩幅、 $\theta'_i$  は補正後の方向を表す。学習用歩行データを用いて推定した補正係数により、歩幅と方向を補正することで位置推定誤差を低減する。

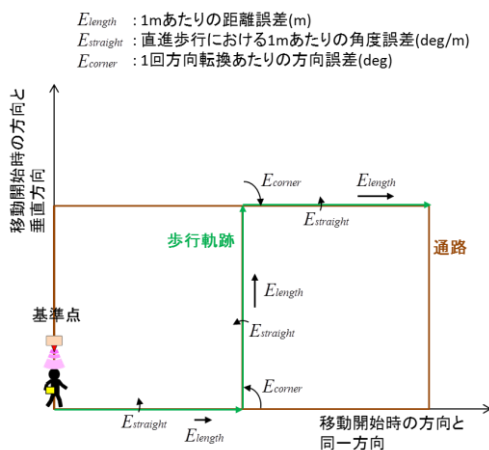


図 5 誤差要因

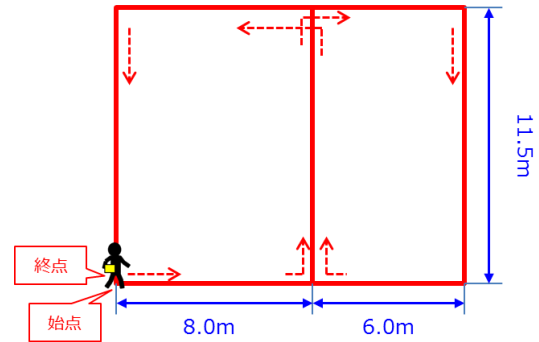


図 6 学習用歩行データの移動経路

4. 評価

4.1. 歩数推定方法

3.1 節にて立案した歩数推定方法を用いて、歩数推定精度を評価した。従来の歩数推定方法(従来法)と立案した歩数推定方法(提案法)を用いて計測した歩行データから歩数を推定した。歩行データは、直線経路で両足揃えたところから歩き出し 20 歩めで足を揃えて終わる歩行データを計測した。歩行データの計測には、3.2 節で構築した端末を使用した。歩行パターンは、歩き方に関して指示をせずに計測した普通歩行パターンに加えて、歩行速度を早くするように指示した早め歩行パターン、歩幅を狭めにするように指示した狭め歩行パターン、歩幅を広めにするように指示した広め歩行パターンの 4 パターンを計測した。歩行者は男性 3 名、女性 1 名の計 4 名を対象とした。4 名の歩行者において、4 種類の歩行パターンを 20 歩ずつ、全 320 歩の歩行データに対して歩数推定精度を評価した。表 1 に歩数推定結果を示す。

従来法では、322 歩と推定していたのに対して、提案法では、320 歩と推定でき、提案法により歩数誤差が低減することから有効性を確認した。

表 1 歩数推定結果

	従来法	提案法
推定歩数[歩]	322	320
歩数誤差[歩]	2	0

4.2. 歩幅推定方法

3.2 節にて立案した歩幅推定方法を用いて、歩幅推定誤差を評価した。身長のみから歩幅を推定する方法(従来法)と、立案した歩幅推定方法(提案法)を用いて計測した歩行データから歩幅を推定した。歩行データは、25m の直進後 90 度の左折と、25m 直進後 90 度の右折を交互に繰り返した計 100m の歩行データとし、歩行者 16 名に対して各 1 試行計測した。歩行データを計測した歩行者の情報を表 2 に示す。計測した歩行データ

に対して、従来法と提案法を用いて、100m 歩行時の推定距離と実際の移動距離との距離誤差を算出した。表 3 に距離誤差を示す。

提案法により、従来法と比較して距離誤差が 0.66m 減少していることから、提案法の有効性を確認した。

表 2 歩行者情報

歩行者	性別	身長[m]
歩行者 A	男性	1.67
歩行者 B	男性	1.75
歩行者 C	男性	1.90
歩行者 D	女性	1.48
歩行者 E	女性	1.64
歩行者 F	男性	1.72
歩行者 G	男性	1.65
歩行者 H	男性	1.73
歩行者 I	男性	1.80
歩行者 J	男性	1.77
歩行者 K	男性	1.69
歩行者 L	男性	1.77
歩行者 M	男性	1.65
歩行者 N	男性	1.67
歩行者 O	男性	1.72
歩行者 P	男性	1.76

表 3 歩幅推定方式の評価結果

	従来法	提案法
距離誤差 (平均)[m]	3.97	3.31

#### 4.3. 誤差低減方法

3.3 節にて立案した誤差低減方法を使用し、位置推定誤差を評価した。4.2 節と同一の歩行データに対して、誤差低減方法を実施する場合(提案法)と、しない場合(従来法)で位置推定誤差を比較評価した。歩行者ごとに図 6 に示す経路で学習用歩行データの計測を行い、各補正係数を推定した。位置推定誤差の平均値を表 4 に示す。

提案法により、従来法と比較して位置推定誤差が 2.35m 減少していることから、提案法の有効性を確認した。

表 4 誤差低減方法の評価結果

	従来法	提案法
位置推定誤差 (平均)[m]	8.26	5.91

#### 4.4. 総合評価

立案した方法の有効性を確認するために、立案した歩数推定方法、方向推定方法、誤差低減方法を併用し、位置推定誤差を評価した。従来法として、歩数推定方法は足揃え動作の識別をしない、歩幅推定方法は身長のみからの歩幅推定、誤差低減方法は実施しない方法を採用して、比較評価した。歩行データは 4.2 節と同一の歩行データを使用した。

表 5 に位置推定誤差の評価結果を示す。評価結果より、従来法の誤差が 8.26m であるのに対して、提案法が 5.67m となり、2.59m 位置推定誤差が低減し、提案法の有効性を確認した。

表 5 従来法と提案法の比較評価結果

	従来法	提案法
位置推定誤差 (平均)[m]	8.26	5.67

#### 5. 考察

更なる位置推定誤差低減のために、提案法を用いた際の位置推定誤差の原因について考察する。16 名の歩行者の中で、位置推定誤差が小さい上位 4 名と、大きい下位 4 名の推定経路を図 7、図 8 に示す。横軸が東西方向の移動距離、縦軸が南北方向の移動距離を表し、原点は移動開始地点、赤色の線は正解の移動経路を示す。

図 7 と図 8 より、上位 4 名と比較して、下位 4 名は方向誤差が大きい傾向が確認できる。表 6 に各方向転換時の回転角を示す。方向転換時の正解角度 90 度に対して、上位 4 名が、歩行者 I を除いて 2 度以内の誤差であるのに対して、下位 4 名は角度誤差が大きいことが確認できる。この原因として、誤差低減方式において、3 種類の補正係数を同時に推定したために、転換角度補正係数を正しく推定できなかったためと考えられる。

また、図 8 より下位 4 名に関しては初期方向の誤差が大きい傾向が確認できる。これは、計測開始から実際の歩行開始までの腰の回転による誤差が原因だと考えられる。この問題を解決する方法として、地磁気を使用する方法や 2 点以上の基準点の通過情報から初期方向の誤差を推定して低減する方法がある。

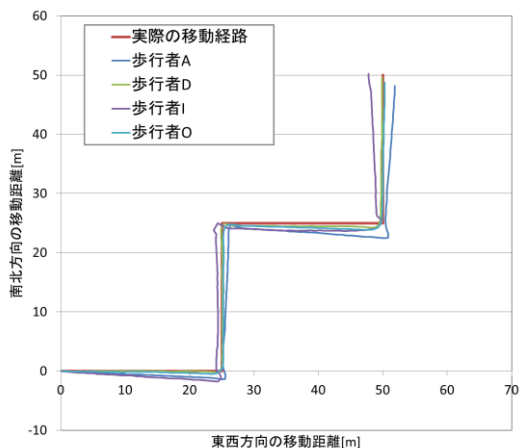


図 7 上位 4 名の推定経路

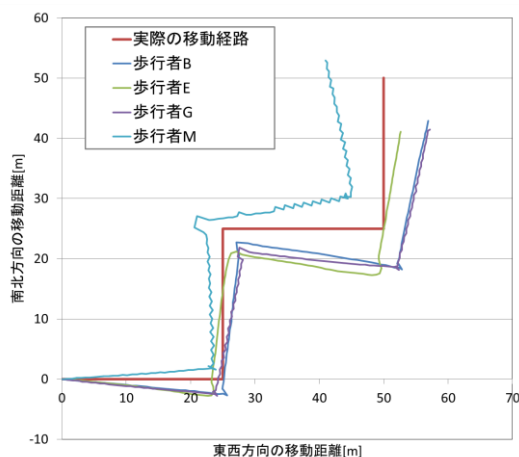


図 8 下位 4 名の推定経路

表 6 方向転換時の回転角

	歩行者	左折[1回目]	右折[1回目]	左折[2回目]
上位4名	歩行者A	89.86	88.45	89.90
	歩行者D	89.54	89.24	89.33
	歩行者I	84.95	87.67	86.28
	歩行者O	88.87	89.78	88.96
下位4名	歩行者B	88.87	87.75	87.78
	歩行者E	89.93	86.34	88.95
	歩行者G	84.30	84.92	83.66
	歩行者M	88.93	85.06	88.61

## 6. まとめ

本報告では、ロケーション管理サービスの提供を目的として、歩数推定方法と歩幅推定方法を立案し、推定精度を評価した。また、個人ごとの歩容の違いによる位置推定誤差を低減するために、キャリブレーション歩行を用いた誤差低減方法の立案を行い、その有効性を検証した。

評価により、各方法によりそれぞれ誤差が低減することを確認した。各方法を併用した位置推定方法を、従来法と比較評価して、約 2.5m 位置推定誤差が低減

可能であることを確認し、提案法の有効性を確認した。今後は、横歩きや後歩きなどの非正常歩行に関する評価を進める。

## 文 献

- [1] B. ホフマン-ウェレンホフ, H. リヒテネガー, J. コリンズ, “GPS 理論と応用”, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000.
- [2] 梶航士, 岡田将吾, 新田克己, “歩行者自律測位のための機械学習を用いた動線推定,” 人工知能学会全国大会論文集, vol.27, pp.1-4, 2013.
- [3] 北陸電気工業株式会社 「3軸加速度センサーアプリケーションノート」  
 “[http://www.hdk.co.jp/pdf/AP\\_Note/anhaam04\\_v1.01.pdf](http://www.hdk.co.jp/pdf/AP_Note/anhaam04_v1.01.pdf)”
- [4] “身長と歩幅の相関に関する一考察”, 翁長 謙良, 吉永 安俊, 趙 廷寧, 平成 10 年度琉球大学農学部学士学位論文, p.153
- [5] R. Tibshirani, Regression shrinkage and selection via the lasso. J. R. Soc. B58(1), 267-288 (1996)