

修士論文

装着した3次元磁気センサと姿勢センサを用いた  
ユーザの自己位置推定

濱口 明宏

2006年3月10日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
修士(工学)授与の要件として提出した修士論文である。

濱口 明宏

審査委員： 横矢 直和 教授 (主指導教員)

千原 國宏 教授 (副指導教員)

山澤 一誠 助教授 (副指導教員)

# 装着した3次元磁気センサと姿勢センサを用いた ユーザの自己位置推定\*

濱口 明宏

## 内容梗概

ユーザの現在位置に応じた情報提供を広域環境で実現するため、様々なユーザ位置推定法が従来から提案されてきた。特に屋内では、環境中に離散的に設置したインフラから取得した絶対位置と、ユーザの歩行動作を自律的に計測した相対移動量を組み合わせてユーザの位置を推定することが多い。しかし、環境インフラを利用する手法は利用可能範囲に比例して設置コストが増大するといった問題がある。また従来の自律計測手法は、ユーザの歩数計測に基づいて移動量を推定するため、歩行動作の誤検出や推定された歩幅と実際の歩幅の相違により誤差が蓄積しやすいといった問題がある。そのためこれらの手法を組み合わせる場合、自律計測の精度が向上すればインフラの設置密度を下げるのが可能となり、コストの削減が期待できる。

そこで本論文では、インフラの設置コストの削減を目的として、自律計測による位置推定の誤差要因の一つである歩幅の推定精度を向上させることで、相対移動量推定の高精度化を試みる。具体的には、ユーザが装着する3次元磁気センサで直接両足の相対位置姿勢を計測し、両足接地時の両足の踵の相対移動量を推定する。次に、腰に取り付けられた姿勢センサから得られる絶対姿勢を用いて、世界座標系におけるユーザの相対移動量を計算し、それらを逐次的に加算することで自己位置を推定する。その際、歩行動作の個人差による推定誤差を軽減するため、歩行計測のキャリブレーションを行う。提案手法の有効性を確認するため、推定精度の定量的評価及び広域環境における自己位置推定実験を行った。

---

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0451094, 2006年3月10日.

キーワード

自己位置推定, 3次元磁気センサ, 姿勢センサ, ウェアラブルコンピュータ

# **User Localization Using Wearable Electromagnetic Tracker and Orientation Sensor \***

Akihiro Hamaguchi

## **Abstract**

Many localization methods have been investigated to realize location-based services in wide indoor environments. The localization methods usually employ a hybrid approach in which user's position is estimated by using infrastructures and a pedometer. However, the installation cost of infrastructures increases when the area expands, and the error of the pedometer is frequently caused by failure in walking locomotion detection and the difference between ideal and estimated step lengths. If the step length is estimated accurately, the density and installation cost of infrastructures can be reduced.

This paper proposes a new localization method that improves the estimation accuracy of step length. The proposed method measures user's orientation and geometrical relationship between user's heel and waist with an orientation sensor and an electromagnetic tracker that are attached to user's body. When both feet come into contact with the ground, user's position is updated by adding the estimated step length which means the relationship between user's each heel and the position estimated in the previous step. The proposed localization method has been experimented using a prototype system to evaluate the accuracy of the proposed localization method.

## **Keywords:**

Localization, Electromagnetic tracker, Orientation sensor, Wearable computer

---

\*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0451094, March 10, 2006.

# 目 次

1. はじめに	1
2. 従来研究と本研究の位置付け	3
2.1 ユーザの自己位置推定に関する従来研究	3
2.1.1 環境インフラからの絶対位置同定手法	3
2.1.2 自律計測による相対移動量推定手法	7
2.1.3 環境インフラと自律計測を併用したハイブリッド手法	10
2.2 本研究の位置付けと方針	13
3. 3次元磁気センサと姿勢センサによる自己位置推定	15
3.1 計測対象と前提条件	15
3.2 提案システムの機器構成	16
3.2.1 3次元磁気センサ	16
3.2.2 姿勢センサ	18
3.2.3 押しボタンスイッチ	18
3.3 自己位置推定法	18
3.4 歩行動作計測のキャリブレーション手法	19
3.4.1 センサ取付位置の初期キャリブレーション	20
3.4.2 踵の浮き上がり量のキャリブレーション	20
4. 実 験	23
4.1 自己位置推定の評価実験	23
4.1.1 直線歩行	23
4.1.2 円状歩行	25
4.1.3 階段昇降	28
4.1.4 考 察	32
4.2 広域環境における自己位置推定実験	33
4.2.1 平面上の正方形経路	34
4.2.2 階段昇降(6階分)	34
4.2.3 平面上歩行と階段昇降を含む経路	35

4.2.4 考 察 .....	39
5. む す び	40
謝 辞	41
参考文献	42

## 目 次

1	市販されているウェアラブルコンピュータの例 . . . . .	2
2	SignPost ( Kalkusch ら ) . . . . .	4
3	VIS-Tracker ( Naimark ら ) . . . . .	4
4	フォトダイオードによる赤外線トラッカ・HiBall ( Welch ら ) . . . . .	5
5	赤外線ビーコンの複数捕捉による位置・姿勢計測システム ( Hallaway ら ) . . . . .	5
6	Cricket ( Priyantha ら ) . . . . .	6
7	自律計測による位置・姿勢推定システム ( Konishi ら ) . . . . .	8
8	自律計測による位置・姿勢推定システム ( Lee ら ) . . . . .	8
9	足爪先加速度積分による移動量推定システム ( 佐川ら ) . . . . .	9
10	移動量を推定可能な足装着型デバイスの例 . . . . .	10
11	ハイブリッド手法の概念 . . . . .	11
12	ARISE ( Tenmoku ら ) の位置推定手法 . . . . .	12
13	消防隊員位置特定システム ( 総務省消防庁 ) . . . . .	12
14	GETA sandals ( Okuda ら ) . . . . .	13
15	提案する自己位置推定方式の概要 . . . . .	13
16	歩行周期 . . . . .	15
17	提案システムの機器構成 . . . . .	17
18	センサ類の位置関係 . . . . .	17
19	3次元磁気センサのトランスミッタと姿勢センサの配置 . . . . .	18
20	両脚支持期におけるステップベクトル . . . . .	19
21	ステップベクトルの加算 . . . . .	20
22	歩行状態によるステップベクトルの向き . . . . .	21
23	平面歩行時の推定結果の例 . . . . .	22
24	ステップベクトルの分布の例 . . . . .	22
25	直線歩行時の移動軌跡 ( キャリブレーション前 ) . . . . .	24
26	直線歩行時の移動軌跡 ( キャリブレーション前・後 ) . . . . .	24
27	円状歩行時の歩行経路 . . . . .	26
28	円状歩行の移動軌跡 ( キャリブレーション前 ) . . . . .	26

29	円状歩行時の移動軌跡（キャリブレーション前・後）	27
30	水平方向のキャリブレーション適用例（円状歩行時）	28
31	階段昇段時の移動軌跡（1階分，キャリブレーション前）	29
32	階段昇段時の移動軌跡（1階分，キャリブレーション前・後）	30
33	階段昇段時の移動軌跡（1階分，キャリブレーション前・後） （つづき）	30
34	階段降段時の移動軌跡（1階分，キャリブレーション前）	31
35	階段降段時の移動軌跡（1階分，キャリブレーション前・後）	32
36	階段降段時の移動軌跡（1階分，キャリブレーション前・後） （つづき）	33
37	平面上の正方形経路	34
38	平面上の正方形経路歩行時の移動軌跡	35
39	階段昇段時の移動軌跡（6階分）	36
40	階段降段時の移動軌跡（6階分）	37
41	平面上歩行と階段昇降を含む経路	38
42	平面上歩行と階段昇降を含む経路の移動軌跡	38

## 表 目 次

1	自律計測による相対移動量推定手法の比較	14
2	直線歩行時の自己位置推定結果（キャリブレーション前）	25
3	直線歩行時の自己位置推定結果（キャリブレーション前・後）	25
4	円状歩行時の自己位置推定結果（キャリブレーション前）	27
5	円状歩行時の自己位置推定結果（キャリブレーション前・後）	28
6	階段昇段時の自己位置推定結果（キャリブレーション前）	29
7	階段昇段時の自己位置推定結果（キャリブレーション前・後）	29
8	階段降段時の自己位置推定結果（キャリブレーション前）	32
9	階段降段時の自己位置推定結果（キャリブレーション前・後）	32

## 1. はじめに

ユーザが装着可能な端末とセンサによってユーザの現在位置を取得し、ユーザの位置に応じてサービスの提供や情報提示を行うシステムが開発されている [1] . 近年では、図 1 に示すような小型で高性能のウェアラブルコンピュータが市販されており、医療や軍事の目的などで利用されている。また、現実環境に仮想物体を合成してユーザに提示する拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 技術をユーザのナビゲーションなどに利用することで、より直感的な情報提示を行うシステムの開発も行われている [2-5] . このようなシステムは屋内外を問わず広範囲で利用可能であることが望まれるため、利用範囲の拡大および推定精度向上の観点から、多数のユーザ位置推定法が従来から提案されてきた。

一般に、屋外環境におけるユーザの位置計測には、GPS が広く用いられている [6-8] . 一方、屋内環境では、(1) 環境中に設置した位置が既知の基準点 (インフラ) から絶対的な位置を取得する手法、(2) ユーザが装着したセンサによってユーザの動きを自律的に計測し計測開始地点からの相対的な移動量を推定する手法に大別される。環境中に設置したインフラを利用する代表的な手法には、幾何パターンを持つ画像マーカや、赤外線、超音波などを用いて位置を同定する手法がある。環境インフラを利用する手法は、ユーザの絶対位置を取得することが可能な反面、利用可能範囲と設置密度に比例して設置コストが増大するといった問題がある。一方、自律計測の代表的な手法として、ユーザの歩行動作から歩数を計測し、ユーザの進行方向に歩幅を加算していくことで移動量を推定する手法が提案されている。自律計測による手法はユーザが装着するセンサの導入コストのみで利用可能であるが、歩行動作の誤検出や推定された歩幅と実際の歩幅の相違により誤差が蓄積しやすいといった問題があるため、蓄積誤差を軽減する工夫が必要となる。また、ユーザの進行方向と腰の向きが一致していることを前提としているため、計測可能なユーザの動きに制限がある。

これら 2 つの手法の問題点を互いに補うためのアプローチとして、インフラによる絶対位置の取得と自律計測によるユーザの相対移動量の推定を併用することで位置推定誤差の蓄積を軽減し、広域環境で位置推定を行う試みが行われている [4,9] . これらのハイブリッド手法では、自律計測による位置推定精度が向上すればインフラの設置密度を下げるのが可能となり、コストの削減が期待できる。



(a) Mobile Assistant V (Xybernaut Corp.) [10]



(b) THERMITE (Quantum3D, Inc.) [11]

図 1: 市販されているウェアラブルコンピュータの例

そこで本研究では，インフラの設置コストの削減を目的として，自律計測による位置推定の誤差要因のひとつである歩幅の推定精度を向上させることで，相対移動量推定の高精度化を試みる．具体的には，ユーザが装着した3次元磁気センサで直接両足の相対位置・姿勢を計測し，姿勢センサで腰の絶対姿勢を連続的に計測することで，両足接地時の両足の踵<sup>かかと</sup>の相対移動量を推定する．その際，姿勢センサから得られる絶対姿勢を用いて，世界座標系におけるユーザの相対移動量を求め，それらを逐次的に加算することで自己位置を高精度に推定する手法を提案する．

以下，2章では関連研究および本研究の位置付けについて，3章では，提案するユーザの位置推定手法について説明する．4章では，提案手法を用いたプロトタイプシステムを構築し，定量的評価実験及び広範囲移動時における移動量推定を行った結果について述べ，5章でまとめと今後の課題について述べる．

## 2. 従来研究と本研究の位置付け

本章では、ユーザの自己位置推定に関する従来研究を概観し、本研究の位置付けについて述べる。2.1 節ではユーザの自己位置推定に関する従来研究として、環境インフラからの絶対位置同定手法と自律計測による相対移動量計測手法、およびそれらを組み合わせたハイブリッド手法について述べ、2.2 節で本研究の位置付けと方針について述べる。

### 2.1 ユーザの自己位置推定に関する従来研究

#### 2.1.1 環境インフラからの絶対位置同定手法

環境インフラとは、位置が既知の基準点をインフラとして環境中に離散的に設置し、ユーザが装着したセンサで基準点を認識することで絶対的な位置を取得する手法である。代表的な手法に、画像マーカや赤外線マーカ、超音波センサなどをインフラとして利用する手法が提案されている。以下に各アプローチについて概観する。

##### 画像マーカを利用した手法

画像マーカをインフラとして利用した手法は、環境中に位置・形状・色が既知の図形（画像マーカ）をインフラとして設置し、ユーザが装着したカメラで撮影した画像から画像処理によってマーカの ID を識別することでユーザの位置・姿勢を求める。一般に、画像マーカを用いる方法は ID 識別にマーカの内部パターンを利用するため、限られた領域で多数のパターンを表現する必要がある。

Kalkusch らは、図 2(a) のような正方形の画像マーカを図 2(b) のように環境中の壁に配置し、それらをユーザの頭部に装着したカメラで撮影することでユーザとマーカとの相対位置・姿勢を計測している [12]。この手法はマーカを階層的に配置することで同一 ID のマーカを再利用しているため、広範囲な環境での位置推定が可能であるが、配置位置の登録は全てのマーカについて行う必要があり、設置に手間がかかるといった問題がある。Naimark らは、数万種類の ID を生成可能な図 3(a) のような円形マーカを図 3(b) のように環境中の天井や壁に配置して利用している [13]。この手法で配置するマーカのうち、位置が既知であるマーカは



(a) 正方マーカ (b) 使用環境  
 図 2: SignPost ( Kalkusch ら [12] )



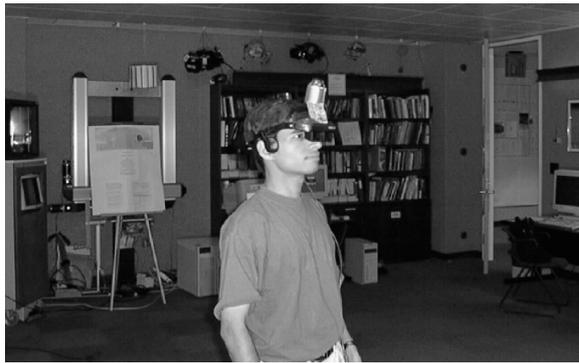
(a) 円形マーカ (b) 使用環境  
 図 3: VIS-Tracker ( Naimark ら [13] )

ごく少数であり，その他のマーカは周囲の位置情報を利用して検出するため，設置の手間は削減されているが，同一 ID のマーカを再利用できないといった問題がある．そこで羽原らは，天井に配置した正方形マーカのうち，少数のマーカの位置のみを計測し，かつ同一 ID のマーカを再利用できる位置検出機構を提案した [14]．しかし，マーカを密に配置する必要があるため，設置コストの問題が依然として残る．また，画像マーカを利用して位置を取得するためには，常に画像マーカが ID を認識できる程度の大きさで撮影されていること，撮影する画像にぶれが生じていないことが必要である．そのため天井が高いホールなどの環境での利用は困難であり，ユーザが激しく動き，画像マーカがぶれて撮影されるような場合には画像マーカから位置を取得することが困難である．

#### 赤外線マーカを利用した手法

赤外線マーカをインフラとした手法は，赤外線 LED や IrDA などの赤外線信号を送出する赤外線ビーコンと呼ばれる赤外線マーカを環境中に配置し，ユーザが装着した赤外線カメラや IrDA リーダでマーカ検出を行うことでユーザの位置を求める．

Welch らは，図 4(a) のように天井に格子状に配置した赤外線 LED を 6 面のフォトダイオードを固定した小型のユニットで受光することでユーザの 3 次元的な位置・姿勢を推定可能な HiBall システムを提案した [15]．HiBall は位置精度 0.4 mm，方向精度 0.02° で推定可能であるが，使用環境 1 m<sup>2</sup> あたり約 64 個の LED を配置する必要があり，利用可能範囲に比例して設置コストが増大してしまう．また，Hallaway らは，図 5(a) のように壁に配置した赤外線ビーコンから送信される赤外



(a) 使用環境とユーザ



(b) 赤外線受光体

図 4: フォトダイオードによる赤外線トラッカ・HiBall (Welch ら [15])



(a) 使用環境とユーザ



(b) 赤外線受光体

図 5: 赤外線ビーコンの複数捕捉による位置・姿勢計測システム (Hallaway ら [16])

線信号を、頭部に放射状に装着した 8 台の IrDA リーダで複数受信し、ユーザの 2 次元的位置と 1 次元的位置を推定するシステムを提案している [16]。このシステムによる位置精度は 1 m 未満，方向精度は 5~10° であり，赤外線ビーコンの配置密度は 1 m<sup>2</sup> あたり 1 個で済むため設置コストは低減されているが，ユーザの高さ方向の位置と方位以外の姿勢については考慮されていない。

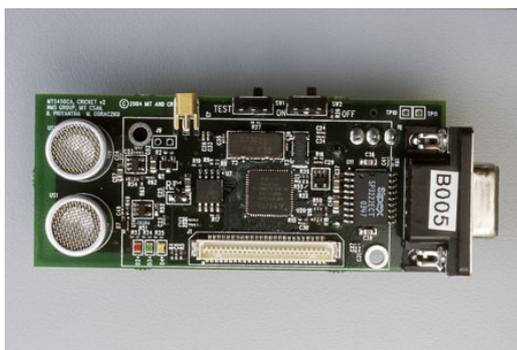
赤外線マーカを利用した手法は，照明条件の変化にロバストであるため安定した位置検出が行えるが，設置する全てのインフラに電源が必要であり，画像マーカに比べ設置コストが高いといった問題がある。そのため，研究室内などの限られた空間での位置・姿勢計測には適しているが，赤外線マーカで屋内全域の位置・姿勢計測を行うことは現実的でないと考えられる。

### 超音波センサを利用した手法

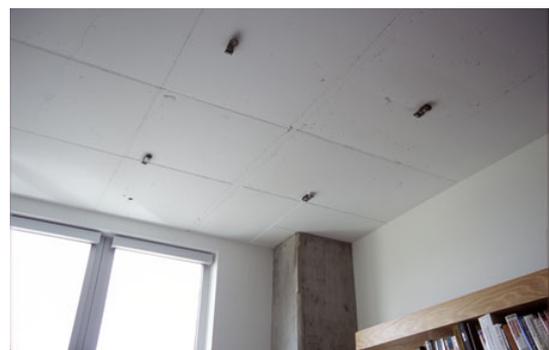
超音波センサを利用した手法では，ユーザが装着した端末と環境インフラ間で超音波の送受信を行い，距離時間を計測することでユーザの位置計測を行う．

InterSense の IS-900 は，使用環境の天井に超音波受信機を配置し，ユーザが装着した超音波ビーコンからの超音波の到達時間からユーザの位置を計測する [17]．IS-900 は位置精度 2.0~3.0 mm，方向精度 0.25° で推定可能であるが，フレームに固定されている超音波センサを天井に設置する必要があるため，設置に手間がかかるといった問題がある．Addlesee らの ActiveBat は，天井に格子状に設置した超音波受信機とユーザが携帯する超音波ビーコンで構成される [18]．ユーザが装着した超音波ビーコンから発する超音波が環境中の超音波センサのうち，3 台に到達するまでの時間を計測することで位置計測を行う．超音波ビーコンの配置密度を 1.24 m<sup>2</sup> あたり 1 個とした場合の位置精度は 3 cm であり，Hallaway ら [16] の手法と同様の密度で高精度な位置計測を可能にしている．Priyantha らの Cricket は，図 6(a) に示す RF 信号と超音波信号を送受信可能なセンサを図 6(b) のように天井に配置し，ユーザも同一のセンサを装着して利用するシステムである [19]．環境中のセンサから発信する電波と超音波信号をユーザが装着するセンサで受信し，2 つの信号の伝達時間差からユーザ位置を計測する．

このような超音波センサを利用した手法は，赤外線マーカと同様に設置するインフラに電源が必要であり，画像マーカに比べ設置コストが高いといった問題がある．



(a) 超音波センサ



(b) 使用環境

図 6: Cricket ( Priyantha ら ) [19]

このように、環境インフラを利用した手法は、ユーザが装着したセンサで基準点を認識することでユーザの絶対的な位置を取得可能であるが、取得位置精度はインフラの配置密度に依存している。そのため、利用範囲の拡大によって設置コストが増大してしまうといった問題がある。

### 2.1.2 自律計測による相対移動量推定手法

自律計測手法の多くは、ユーザの歩数計測に歩数計や加速度センサ、ユーザの進行方向の計測に地磁気センサを用いるのが一般的であり、ユーザが装着するセンサの導入コストのみで利用できる。

#### 歩数計測による手法

自律計測の代表的な手法として、装着した歩数計で歩数を計測し、ユーザの進行方向に移動量を加算する方法がある [20]。これらの手法では、ユーザ歩行時の歩幅は歩行周期と歩行速度の比例関係から推定することが多く、進行方向は腰に装着した地磁気センサの出力結果を利用することが多い。

李らは、歩行周期の計測に、振子に付いた磁石が歩行者の動きに合わせて動くことで歩数検出を行う歩数計を用いている [21]。このシステムでは、平面上の歩行を 3% 程度の誤差で位置推定可能である。しかし、ユーザは等速に移動していることが前提であるため、ユーザの歩行速度が変化した際には歩幅の推定精度が低下する。また、平地での利用を想定しているため、ユーザが移動できる範囲に限りがある。

ユーザの歩行速度変化に対応するため、歩幅の推定に歩行時の加速度のスペクトル強度から得られる歩行速度と歩行周期を利用する手法が提案されている。Konishi らは、図 7 のように腰にジャイロ、地磁気センサ、気圧計を装着して位置推定を行うシステムを提案した [22]。このシステムでは、通常の歩行速度（成人男性で 1.2~1.5 m/s 程度）で歩行した場合の移動量を 5~10% の誤差で推定でき、気圧計で計測される気圧から 10% 程度の誤差でユーザの相対的な高度を推定可能である。鵜沼らは、平地での利用に限定しているものの、0.8 m/s 程度のゆっくりとした歩行から 3.5 m/s 程度の駆け足までの歩行状態における歩幅の近似関数を被験者実験によって求め、直線的な経路上の歩行を 4% 程度の誤差で推定可能であることを示している [23]。しかし一方で、急激な方向転換など、左右の歩

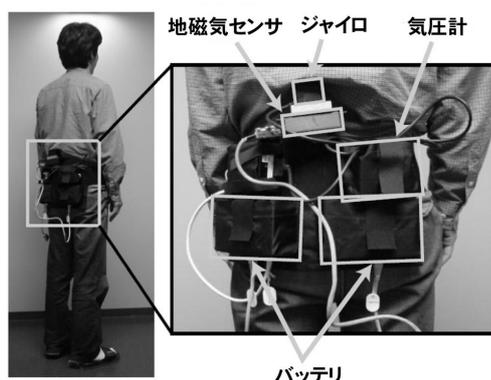


図 7: 自律計測による位置・姿勢推定システム (Konishi ら [22])



幅が異なるような歩行を行うと推定精度が低下するという報告もなされている。これは、方向転換によって水平方向の加速度に重力加速度が混入することが原因と考えられる。このように、腰部の加速度を利用して歩幅を推定する手法では、直線上の歩行以外を行っているユーザの正確な歩幅を求めることは困難である。Lee らは図 8 のように<sup>もも</sup>腿に装着した加速度センサとジャイロによって歩行速度と歩行周期を求め、歩幅を推定する手法を提案している [24]。このシステムは、平面上の歩行に限らず階段の昇降動作といった歩行状態についても 94~97% 程度の精度で認識することが可能であるが、利用する環境の経路情報が事前に必要となる。Kourogiri らが提案した Weavy は、カルマンフィルタで重力加速度の影響を取り除くことで歩幅の推定精度を向上させている [25]。さらに、平面上の歩行と階段昇降の認識は 85~95% で行え、移動量に対する位置推定誤差は平面上で 6~8% である。

しかしながら、これらの手法は歩行動作の誤検出や推定された歩幅と実際の歩幅に相違によって誤差が蓄積しやすいといった問題がある。さらに、地磁気センサを鉄筋コンクリート構造の屋内環境で用いる場合には、局所的に地磁気の乱れが発生するため、ユーザの位置と姿勢に関する蓄積誤差を軽減する工夫が不可欠である。また、ユーザの進行方向と腰の向きが一致していることを前提としているため、ユーザの動きに制限があるといった問題がある。

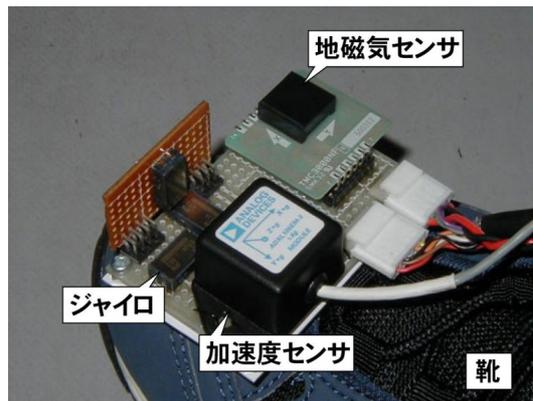


図 9: 足爪先加速度積分による移動量推定システム (佐川ら [27])

#### 足の加速度計測による手法

移動量の推定精度を向上させる試みとして、足の爪先の加速度を計測することで歩行時の初速度を正確に求め、積分演算による蓄積誤差を軽減する手法が提案されている。Stirlingらは加速度センサと地磁気センサを足に装着するシステムFootpodを提案し、屋外環境の平面上経路を移動量に対して約4%の誤差で位置推定可能なことを示している [26]。

また、両足が接地するタイミングで歩行時の姿勢と移動速度を補正することで歩幅の推定精度を向上する試みもなされている。佐川らは、図9のようなユーザの靴に装着した地磁気センサとジャイロ、加速度センサによってユーザの3次元の移動量を約10%の誤差で推定する手法を提案している [27]。Foxlinらは、両足に絶対姿勢を計測可能な姿勢センサを装着し、0.3%の誤差で移動量を推定可能なNavShoeを提案している [28]。これらの手法では、定期的にユーザが静止して速度ゼロの状態を作り、速度値と加速度値の補正を行う必要があるため、ユーザの動作が限定されるといった問題がある。一方、スポーツなどの目的で、図10のようなユーザの足に装着し、走行距離を推定可能な足装着型デバイスも市販されている。いずれのデバイスもキャリブレーションを行うことによって98%程度の精度で移動量を推定可能である。

#### 足裏の圧力分布計測による手法

村瀬らは、足裏の垂直方向の圧力分布をマトリックス状に配置した圧力センサによって計測し、歩行時に生じる床反力に基づいた歩行状態と歩行速度を推定す



(a) S625X(Polar Electro Inc.) [29]

(b) Triax Elite HRM/SDM(Nike Inc.) [30]

図 10: 移動量を推定可能な足装着型デバイスの例

る手法を提案した [31]。歩幅は、被験者実験によって求めた歩幅と、歩行時の踵が地面に着地する際の踵部分の床反力の最大値の関係から推定している。また、足の前端と後端の床反力差によって平面歩行と階段昇降の状態を判別することが可能である。ユーザの進行方向は、床反力の作用点から得られる体の重心方向の変化を利用している。約 10% の誤差で歩幅を推定することが可能である。

このように、自律計測手法は、ユーザが装着したセンサでユーザの動きを計測することでユーザの相対的な移動量を推定可能な手法である。環境インフラを用いた手法と比較すると、導入コストはユーザが装着するセンサのみで済むが、絶対的な位置を取得することができないため、推定する移動量に対する誤差がユーザの歩数に応じて蓄積するといった問題がある。

### 2.1.3 環境インフラと自律計測を併用したハイブリッド手法

環境インフラで生じる設置コストの問題と自律計測で生じる蓄積誤差の問題を解決するため、図 11 のようにこれらの手法を組み合わせたハイブリッド手法が提案されている。

ハイブリッド手法では、ユーザの初期位置をインフラから取得し、インフラが利用できない場所では自律計測による相対移動量の推定を行うことでユーザの位置を推定する。しかし、自律計測による手法はユーザの歩数に応じて誤差が蓄積するため、実際の位置とは異なる位置に推定される。ユーザがインフラを利用できる場所に移動した時点でインフラで取得した絶対位置をユーザの現在位置とし、蓄積誤差を補正する。以下に代表的なハイブリッド手法について説明する。

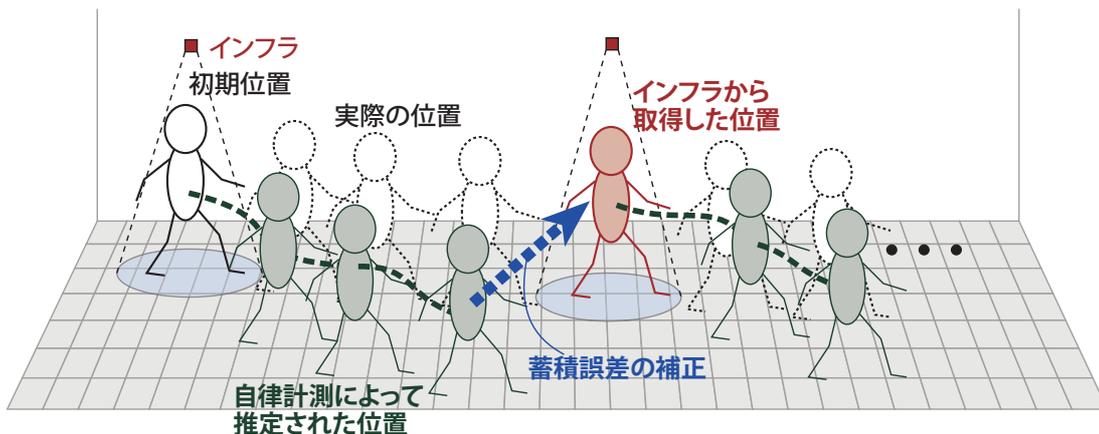


図 11: ハイブリッド手法の概念

#### 赤外線マーカ,RFID+歩数計測

Tenmoku らは、環境インフラとして赤外線と RFID を用い、補完的に歩数計測を用いるシステム ARISE を提案した [4]。図 12 のように、環境中に設置した赤外線ビーコンからの信号あるいは RFID タグをユーザが装着した IrDA リーダと RFID リーダで識別することでユーザ位置の同定を行う。ユーザがインフラ設置位置から離れた場合は、歩行方向と歩数を計測しユーザ位置の推定を行う。

#### RFID+慣性航法

総務省消防庁では、図 13 に示すように環境中の非常誘導灯に配置した RFID タグをインフラとすることで絶対位置を取得し、自律計測に慣性航法装置を用いる消防隊員のための位置特定システムを開発した [32]。定期的にユーザが静止することで速度ゼロの状態を作り、慣性航法装置の調整を行うことによって自律計測時の蓄積誤差を低減している。絶対位置の取得は非常誘導灯付近で RFID タグの ID を受信することで行っている。

#### RFID+超音波

Okuda らは、環境の床に配置した RFID タグをインフラとし、ユーザが超音波発信機と受信機、姿勢センサ、圧力センサが取り付けられた下駄を装着して歩行することで自律計測を行う図 14 のようなシステムを提案した [33]。両足が床面に接地している状態を圧力センサで判定し、左右の足にそれぞれ装着した超音波受信機と超音波送信機によって超音波の到達時間を計測することで歩幅を計測す

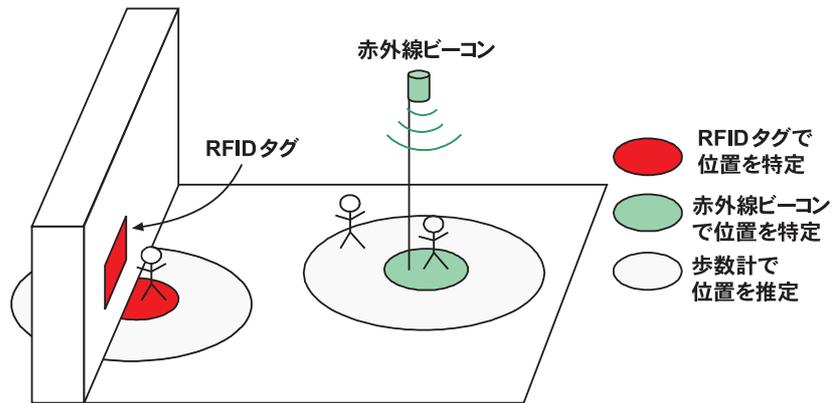


図 12: ARISE ( Tenmoku ら [4] ) の位置推定手法

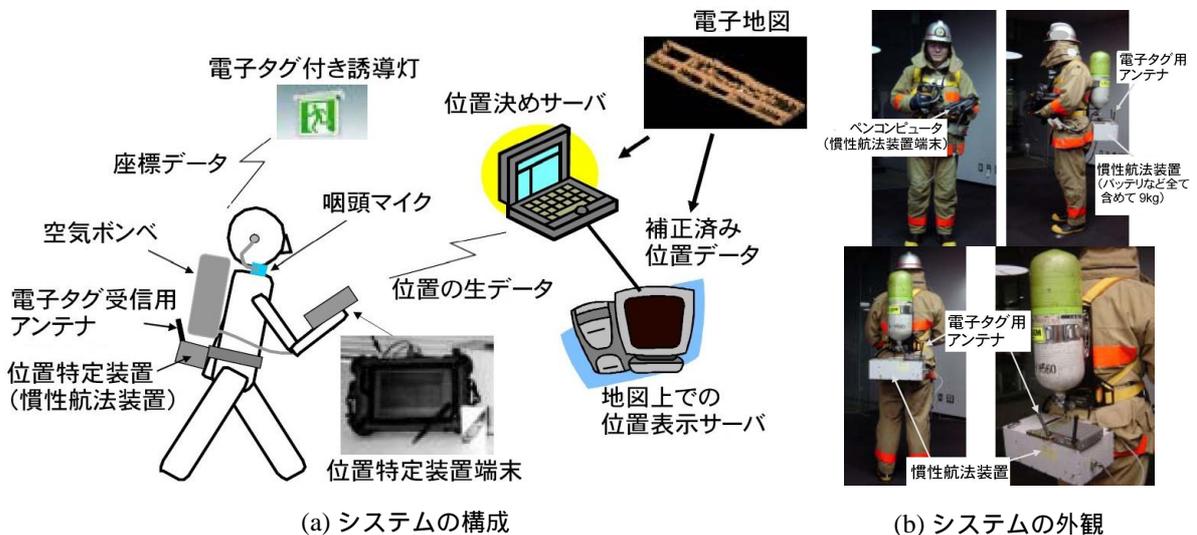


図 13: 消防隊員位置特定システム ( 総務省消防庁 [32] )

る．この手法では，平面上の歩行に限らず階段の昇降動作を行った場合の位置推定が可能であるが，左右の足の間に遮蔽物があると超音波の正確な到達時間計測が行えず，推定精度が低下するといった問題がある．

このように，絶対位置を取得可能な環境インフラを利用する手法と相対移動量を推定可能な自律計測手法を併用したハイブリッド手法により，広域環境でユーザに位置依存情報を提供することが可能になる．

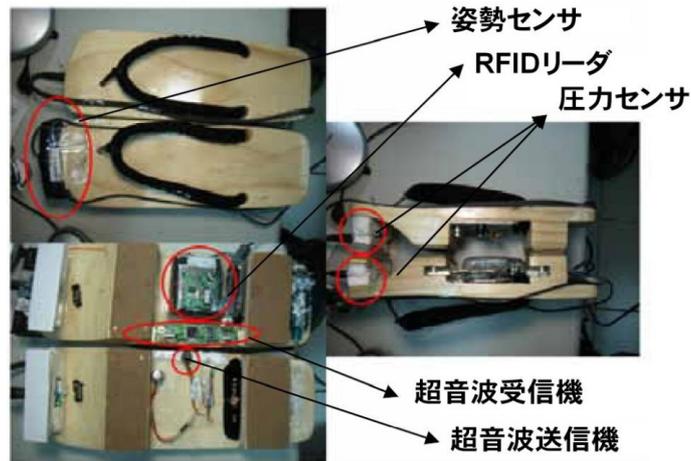


図 14: GETA sandals (Okuda ら [33])

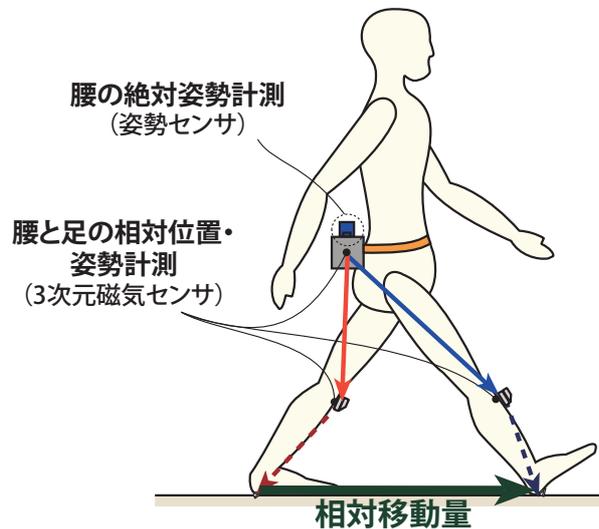


図 15: 提案する自己位置推定方式の概要

## 2.2 本研究の位置付けと方針

ユーザへの位置依存情報の提供を広域な環境で実現するために、環境中に配置したインフラからの絶対位置を同定する手法と自律計測によってユーザの相対移動量を推定する手法が従来から提案されてきた。これらの手法を組み合わせる場合、自律計測の推定精度が向上すれば環境インフラの利用可能範囲に対する設置コストの問題を軽減することが可能である。

そこで本研究では、自律計測による位置推定の誤差要因のひとつであるユーザ

表 1: 自律計測による相対移動量推定手法の比較

名称	移動量の推定方法	対象とするユーザの動作					推定精度 [%]	
		利用可能範囲 <sup>*2</sup>		制約 <sup>*3</sup>			通常歩行	階段
		通常歩行	階段	W	S	O		
ARISE <sup>*1</sup> [4]	歩行速度		×	✓	-	-	10	-
李ら [21]	歩行速度		×	✓	-	-	3	-
Konishi ら [22]	歩行速度		×	✓	-	-	5~10	-
鶴沼ら [23]	歩行速度		×	✓	-	-	~4	-
Footpod [26]	歩行速度		×	✓	-	-	4	-
消防庁 <sup>*1</sup> [32]	慣性航法, 速度ゼロ補正		×	-	✓	-	~0.2	-
Lee ら [24]	歩行速度			✓	-	-	~3	~5
Weavy [25]	歩行速度			✓	-	-	6~8	-
佐川ら [27]	歩行速度, 速度ゼロ補正			-	✓	-	10	
NavShoe [28]	歩行速度, 速度ゼロ補正			-	✓	-	0.3	
GETA sandals <sup>*1</sup> [33]	超音波の 距離時間計測			-	-	✓	5	6.8
提案手法	両足の相対 位置計測			-	-	-	~5	~5

\*1 ハイブリッド手法のうち、自律計測の部分を抜き出したもの

\*2 利用可: , 利用不可: ×

\*3 制約あり: ✓, 制約なし: -

W: ユーザの腰の向きと進行方向が一致している,

S: 定期的に静止して速度・姿勢を補正,

O: 左右の足の間に遮蔽物が存在しない

の推定移動量の高精度化を目的とする。ユーザの歩幅は、図 15 のようにユーザが装着する 3 次元磁気センサで直接両足の相対位置を計測し、絶対姿勢を計測可能な姿勢センサで腰の姿勢を連続的に計測することで世界座標系におけるユーザの相対移動量を推定する。この相対移動量を逐次的に加算することで自己位置を精度良く推定する手法を提案する。表 1 に自律計測による相対移動量推定手法における本研究の位置付けを示す。ユーザ歩行時の歩行速度から移動量を推定する手法 [4, 21–25] では、ユーザの腰の向きと進行方向が一致している必要があり、慣性航法を用いた手法 [32] および足の加速度から移動量を推定する方法 [26–28] はユーザが定期的に静止して速度と姿勢を補正する必要がある。提案方式では、両足の相対位置を直接計測することで高精度に歩幅を推定することが可能である。

### 3. 3次元磁気センサと姿勢センサによる自己位置推定

本章では、提案する3次元磁気センサと姿勢センサを用いた自己位置推定手法について述べる。3.1節では、本手法で計測する対象と前提条件、3.2節ではプロトタイプシステムの構成について述べる。3.3節で自己位置推定手法の詳細について説明し、3.4節で推定移動量のキャリブレーション手法について述べる。

#### 3.1 計測対象と前提条件

ユーザ歩行時の足の状態は、図16のように踵が地面に接地してから爪先が離れるまでの期間（足が接地している期間）と爪先が離れてから踵が接地するまでの期間（足が接地していない期間）に区別することができる。足が接地していない期間を遊脚期、接地している期間を立脚期という[34]。また、立脚期は片足のみで体重を支える単脚支持期と両足で体重を支える両脚支持期に分けられる。

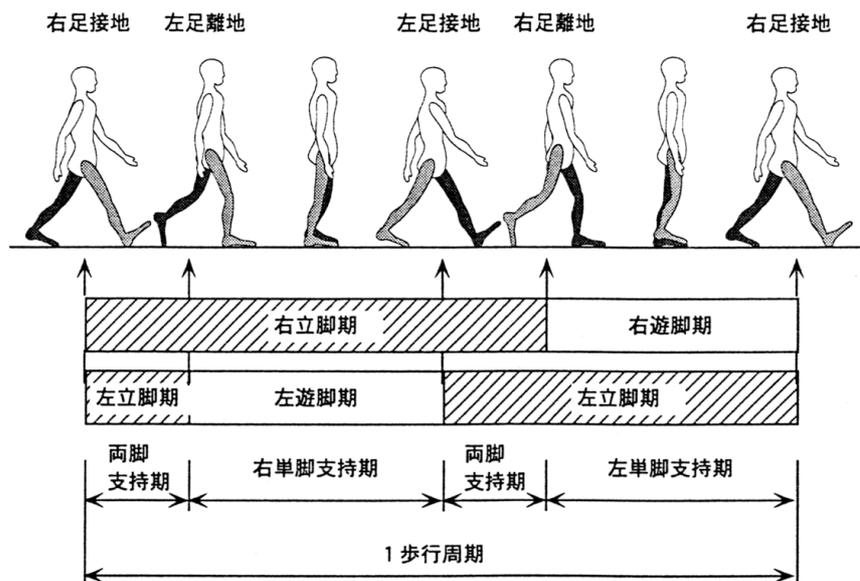


図 16: 歩行周期 [34]

提案手法では、歩行動作計測としてユーザ歩行時の立脚の踵と遊脚の踵の相対移動量、歩数計測として単脚支持期と両脚支持期が切り替わるタイミングをそれぞれ計測する。そのため、次の3項目を前提条件とする。

条件1 常にいずれかの足が接地している

条件2 足の接地面は水平面である

条件3 接地している足はスリップしない

対象とするユーザの動作として、これらの条件を満たす平面上歩行および階段昇降が例として挙げられる。

## 3.2 提案システムの機器構成

図 17 に示すように、提案システムはユーザの両足と腰部の相対位置姿勢を計測する 3 次元磁気センサ (Polhemus, Inc.: 3SPACE FASTRAK) と腰部の絶対姿勢を計測するための姿勢センサ (Intersense, Inc.: InertiaCube<sup>2</sup>)、および遊脚期から立脚期への切り替わりを検知するための押しボタンスイッチで構成される。本システムは、ユーザの腰に 3 次元磁気センサのトランスミッタ、各足の脛にレシーバを装着することで、それらの相対位置を連続的に計測すると同時に、姿勢センサによって腰部の絶対姿勢を計測することでユーザの相対移動量の推定を行う。腰部に装着する 3 次元磁気センサのトランスミッタと姿勢センサの位置関係を図 19 に示す。

### 3.2.1 3次元磁気センサ

3次元磁気センサは、3軸方向の磁界を発生するトランスミッタと磁界を検出するレシーバ、およびそれらの制御・信号処理を行う SEU(System Electronics Unit) で構成される。トランスミッタとレシーバ間の 3次元位置とオイラー角を最大 60 Hz (レシーバ 2 個の場合) で取得可能である。また、静的精度は位置が 0.8 mm、方向が 0.15° である。3次元磁気センサは、原理上トランスミッタとレシーバ間に磁場が歪むような金属の塊や、鉄筋コンクリート構造物の壁、床などが介在すると計測精度が大幅に低下するといった問題がある。そのため、図 18 のように、トランスミッタを腰部、各レシーバを踵からの距離が変化せず床面から最も離れた位置である脛の最上部に取り付ける。

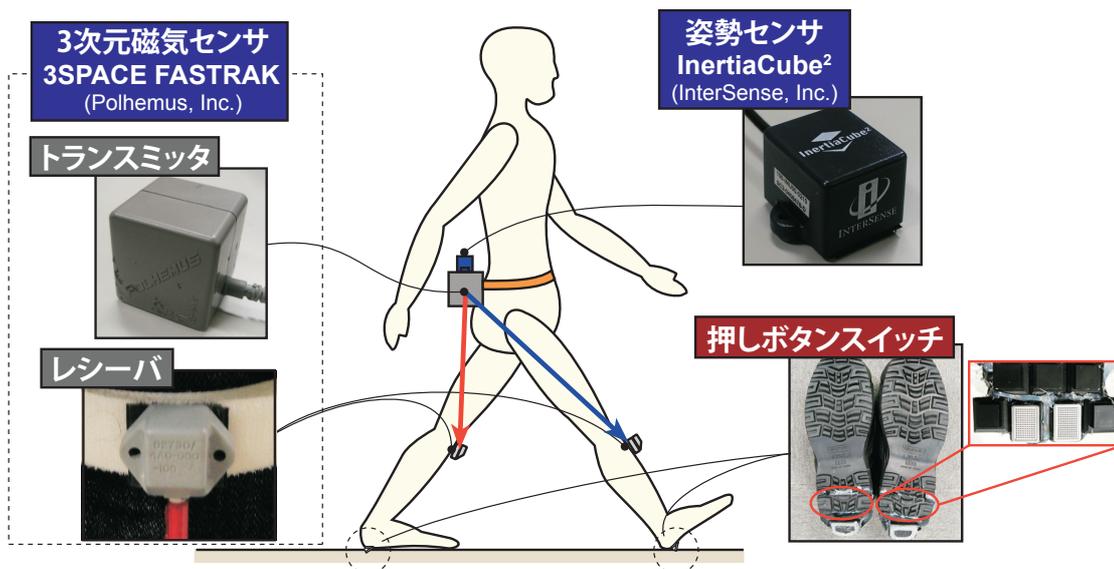


図 17: 提案システムの機器構成

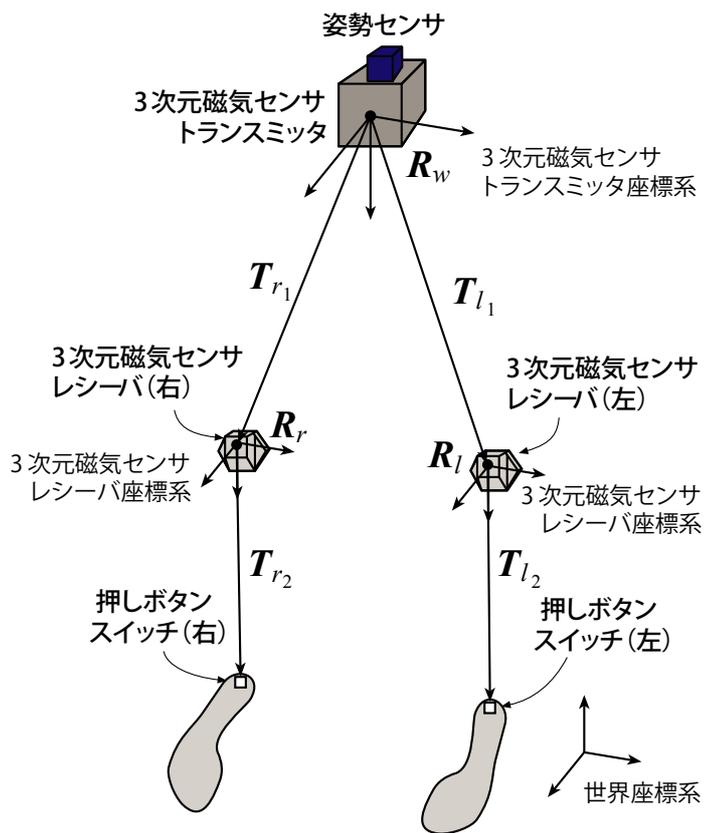


図 18: センサ類の位置関係



図 19: 3次元磁気センサのトランスミッタと姿勢センサの配置

### 3.2.2 姿勢センサ

本手法で用いる姿勢センサは、ジャイロから得られる各軸の回転角速度、加速度センサから得られる加速度および地磁気センサから得られる地磁気を統合して3軸周りの絶対的な回転角を出力する。そのため、蓄積的な誤差は発生せず、サンプリングレートは最大180 Hzで、静的精度1.0°で計測することが可能である。姿勢センサは、腰部に装着した3次元磁気センサのトランスミッタの上部に固定して利用する。

### 3.2.3 押しボタンスイッチ

立脚の判定を行うため、踵に押しボタンスイッチをマトリックス状に配置して埋め込んだ靴を使用する。スイッチが押された場合に足が地面に接地しているとして立脚と判定する。

## 3.3 自己位置推定法

本手法では、加算する移動量として立脚の踵から遊脚の踵までの相対移動量を用いる。このベクトルをステップベクトルと定義する。姿勢センサから得られる絶対姿勢情報を利用して、3次元磁気センサ座標系の相対移動量を世界座標系に変換する。ステップベクトルは、式(1)のように表すことができる。

$$p_{heel} = R_w \left( (T_{f1} + R_f T_{f2}) - (T_{b1} + R_b T_{b2}) \right) \quad (1)$$

ここで、図20に示すように、

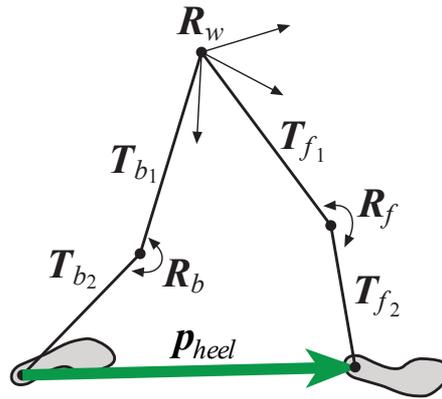


図 20: 両脚支持期におけるステップベクトル

$p_{heel}$ : ステップベクトル [世界座標系]

$R_w$ : 腰の絶対姿勢 [世界座標系]

$T_{f1}, T_{b1}$ : 脛の位置 (3次元磁気センサ・レーザー位置) [3次元磁気センサ座標系]

$R_f, R_b$ : 脛の姿勢 (3次元磁気センサ・レーザー姿勢) [3次元磁気センサ座標系]

$T_{f2}, T_{b2}$ : 脛から踵までの距離 (定数) [3次元磁気センサ・レーザー座標系]

であり, 各変数の添字  $f, b$  はそれぞれ両脚支持期で前にある足, 後ろにある足を示している. 右足が立脚の場合は  $f$  は  $l$ ,  $b$  は  $r$  に相当する. 添字 1, 2 はそれぞれ腰から脛までの距離と脛から踵までの距離を示す.

現在の立脚の位置は, 立脚が切り替わる両脚支持期ごとにステップベクトルを加算していくことで求める. 図 21 にステップベクトルの加算の様子を示す. この加算により, 初期位置から  $n$  歩分歩行した際の推定移動量は, 式 (2) で表すことができる.

$$D_i = \sum_{i=1}^n p_{heel_i} \quad (2)$$

ここで,  $i$  は歩数であり,  $D_i$  は  $i$  歩目の踵の相対移動量である.

### 3.4 歩行動作計測のキャリブレーション手法

センサの取付位置と歩行動作の個人差に起因する推定誤差を軽減するために, 2種のキャリブレーションを行う. 1つ目はセンサの取付位置の誤差を吸収するた

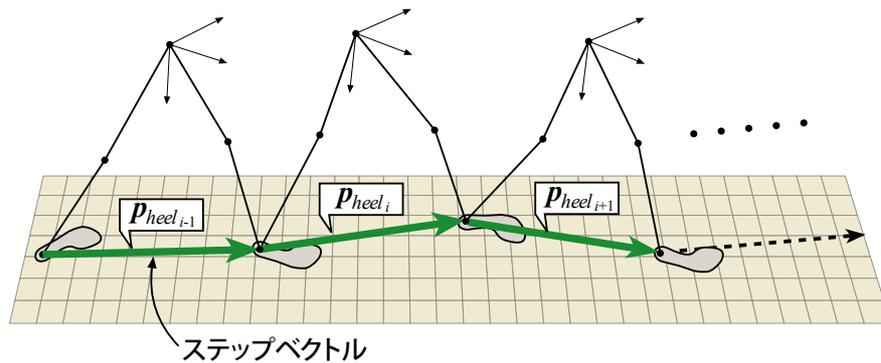


図 21: ステップベクトルの加算

めのキャリブレーション，2つ目は歩行動作の個人差を吸収するためのキャリブレーションである．以下にそれぞれのキャリブレーション方法について述べる．

### 3.4.1 センサ取付位置の初期キャリブレーション

3次元磁気センサのレシーバは各足の脛に着脱式のテープで固定するため，取付位置・向きに関する誤差が生じる．これらの補正を行うために，踵と取付位置の位置関係は歩行前に実測しておき， $T_{l_2}$ ,  $T_{r_2}$  として扱う．

### 3.4.2 踵の浮き上がり量のキャリブレーション

提案手法では左右の踵の相対位置を移動量として加算するため，両足の踵は図 22(a) のように歩行する平面に接地していることが望まれる．しかし，実際には遊脚の踵が接地した瞬間に立脚の踵が地面から浮いてしまうため，図 22(b) のように歩行平面に対して下向きのステップベクトルが得られる．

このステップベクトルを式 (1) に基づいて加算すると，相対移動量は平面上を歩行した場合でも図 23(a) のような結果となる．また踵の浮き上がり量は，平面上の歩行や階段昇降などの歩行状態や，歩幅の差異などの個人差によって異なるため，同じ経路を歩行した場合でも推定される位置が異なる可能性がある．

この推定移動量を補正するために，立脚の踵と地面の距離である後側の踵の浮き上がり量  $h_{heel}$  を推定する．キャリブレーションによってステップベクトルは式 (3) のように修正され，図 23(a) のような推定結果を得る．

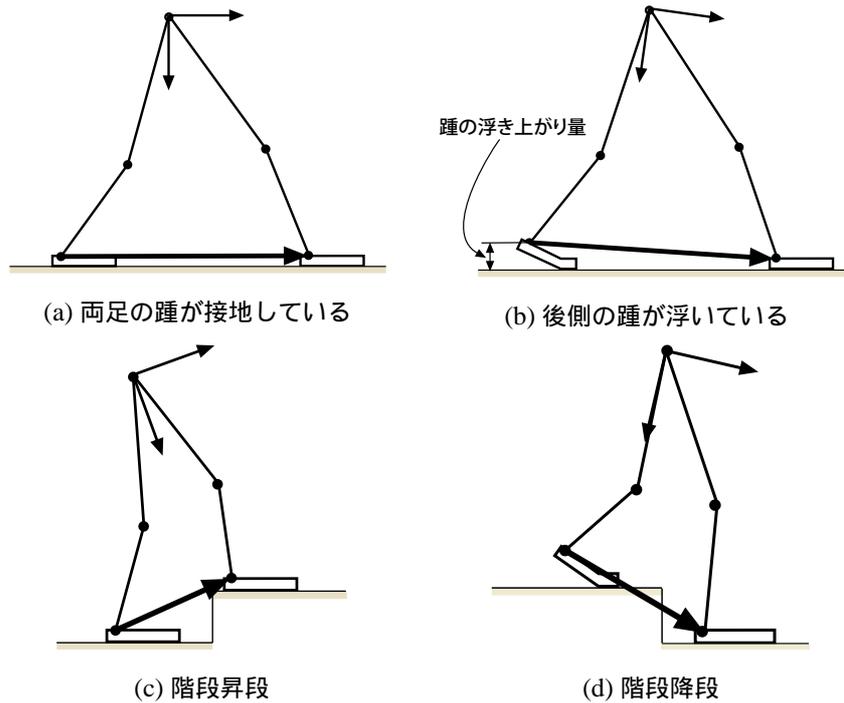


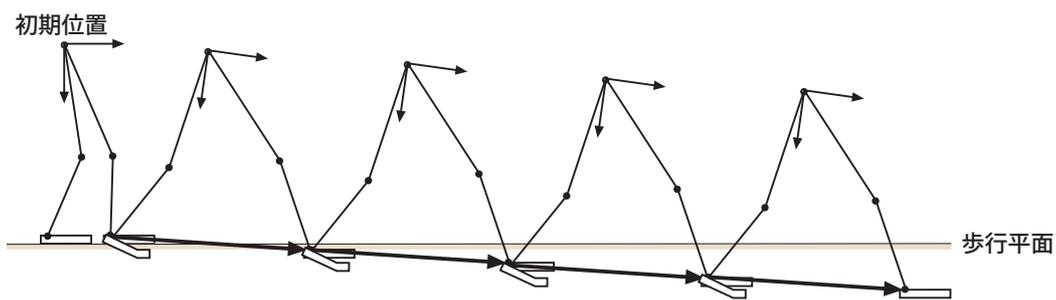
図 22: 歩行状態によるステップベクトルの向き

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}_{heel}' &= \mathbf{p}_{heel} + \mathbf{d}_{heel} \\
 &= \mathbf{R}_w \left( (\mathbf{T}_{f_1} + \mathbf{R}_f \mathbf{T}_{f_2}) - (\mathbf{T}_{b_1} + \mathbf{R}_b \mathbf{T}_{b_2}) \right) + \mathbf{d}_{heel} \quad (3)
 \end{aligned}$$

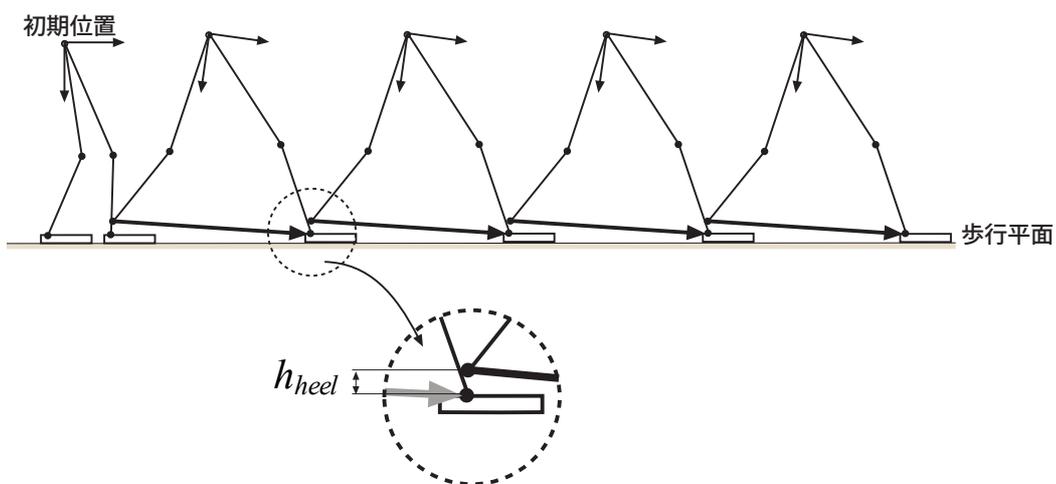
ここで、 $\mathbf{d}_{heel} = [0, 0, h_{heel}]$  である。

一方、階段を昇降した場合は図 22(c)(d) のように平面歩行時とは異なるステップベクトルが得られる。後側の踵の浮き上がり量は、階段昇段時には図 22(c) のように平面歩行時よりも小さく、階段降段時には図 22(d) のように平面歩行時よりも大きくなるのが予想される。そのため、本研究では歩行状態をステップベクトルの高さ方向成分から (1) 平面上の歩行、(2) 階段の昇段、(3) 階段の降段の 3 つに分類する。実際にこれらの歩行をそれぞれ行った際のステップベクトルの分布の例を図 24 に示す。これは、後足の踵位置を原点として前足の踵位置がどのような位置にあるかを横方向から示したものである。ステップベクトルの高さ成分によって 3 つの歩行状態を分類可能であることが確認できる。

各歩行状態の踵の浮き上がり量  $h_{heel}$  は、距離が既知の経路と昇降する階段の高さが既知の階段をユーザが数回歩行し、その誤差から推定する。



(a) キャリブレーション前



(b) 踵の浮き上がり量のキャリブレーション後

図 23: 平面歩行時の推定結果の例

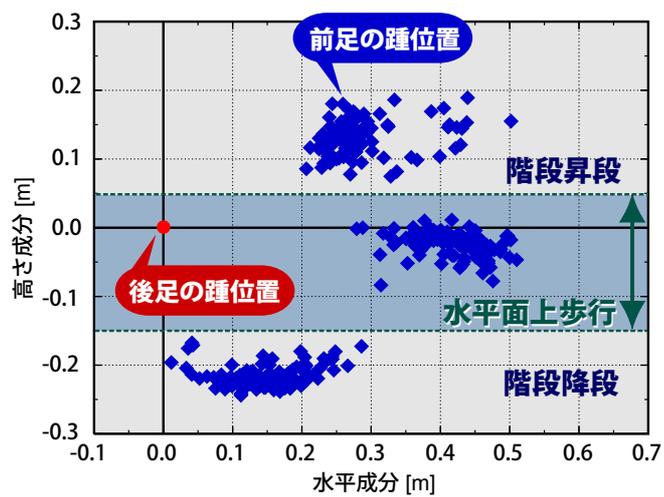


図 24: ステップベクトルの分布の例

## 4. 実 験

本章では，4.1 節で各歩行状態における踵の浮き上がり量  $h_{heel}$  推定のためのキャリブレーション実験，および推定結果の定量的評価について述べる．4.2 節では，得られたパラメータを用いて広域な環境で自己位置推定を行った結果を示す．

### 4.1 自己位置推定の評価実験

提案手法による自己位置の推定精度の定量的評価を行うために，次のような 3 つの異なる環境でそれぞれ 5 回歩行し，自己位置推定を行った．

- 水平面上の直線歩行 (9 m)
- 水平面上の曲線歩行 (直径約 3 m の円状)
- 階段昇降 (1 階分)

これらの歩行それぞれについて，踵の浮き上がり量のキャリブレーションにより高さ方向の移動量が補正されることを確認するため，各 5 回計測したうち 3 試行の結果を利用してパラメータ  $h_{heel}$  を求める．求めたパラメータを用いて残り 2 試行の推定移動量を補正し評価を行う．評価指標として，次の値を使用する．

位置推定誤差 (水平方向・高さ方向)

$$\text{終点の推定位置} - \text{終点の真値 [m]}$$

総移動量に対する位置推定誤差率

$$\frac{\text{終点の位置推定誤差}}{\text{総移動量}} [\%]$$

#### 4.1.1 直線歩行

直線上を 9 m 歩行した場合の移動軌跡を図 25，自己位置推定結果を表 2 に示す．踵の浮き上がり量は，データ No.1 ~ 3 の 1 歩あたりの高さ方向の平均誤差から決定し，3.38 cm とする．このパラメータを用いて自己位置推定を行った結果を表 3，データ No.4 の補正前後の移動軌跡を図 26 に示す．

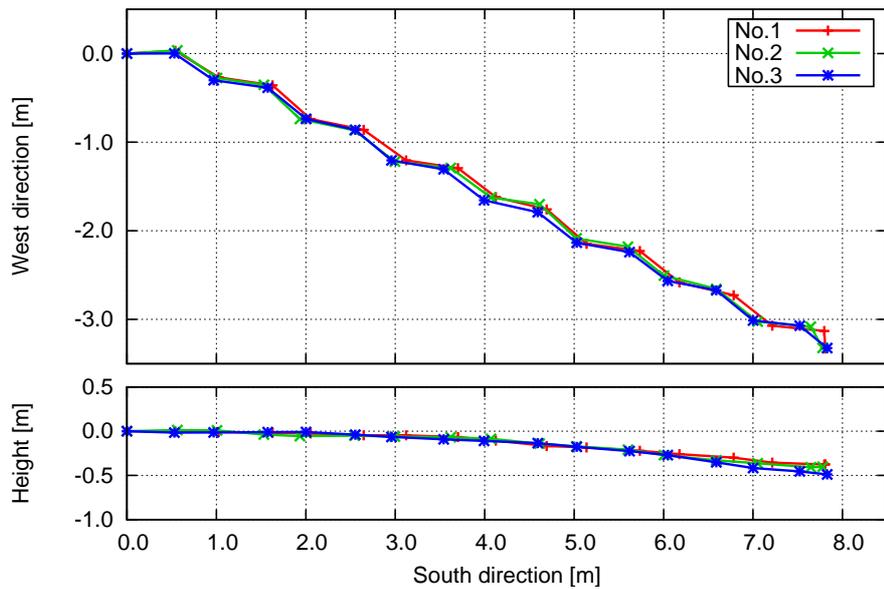


図 25: 直線歩行時の移動軌跡 (キャリブレーション前)

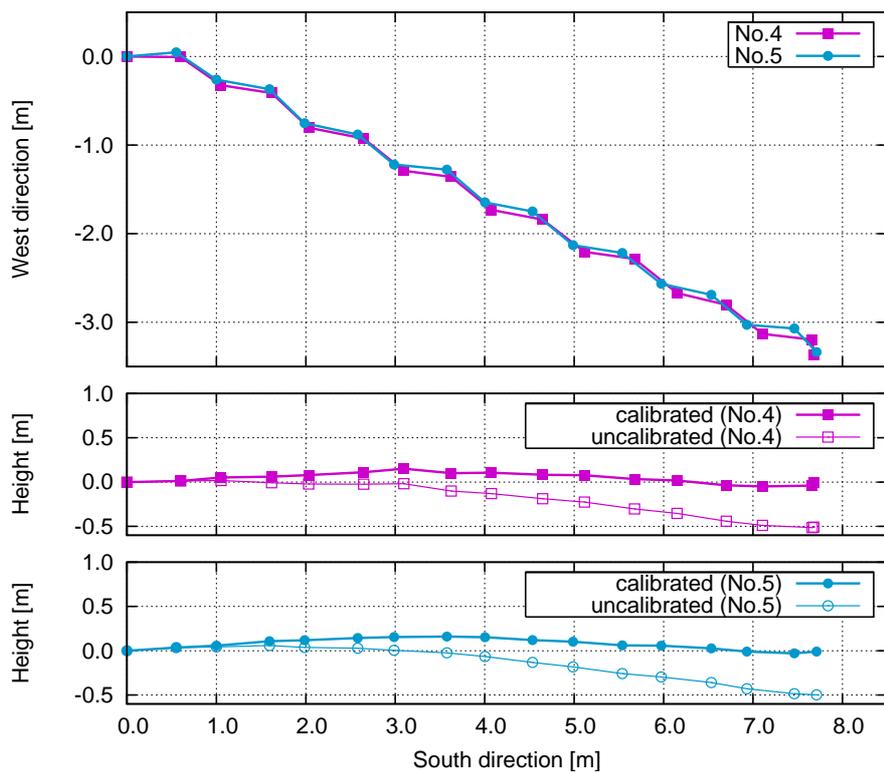


図 26: 直線歩行時の移動軌跡 (キャリブレーション前・後)

表 2: 直線歩行時の自己位置推定結果 (キャリブレーション前)

No.	南北方向 [m]	東西方向 [m]	高さ方向 [m]	距離 [m]	歩数	高さ方向誤差 [m/歩]
1	-7.862	-3.241	-0.458	8.516	16	-0.0286
2	-7.855	-3.244	-0.491	8.513	16	-0.0307
3	-7.868	-3.223	-0.572	8.522	16	-0.0358

表 3: 直線歩行時の自己位置推定結果 (キャリブレーション前・後)

No.	南北方向 [m]	東西方向 [m]	高さ方向 [m]	
			補正前	補正後
4	-7.742	-3.247	-0.595	-0.054
5	-7.774	-3.243	-0.578	-0.038

終点の位置推定誤差は、水平方向でそれぞれ 60.5 cm, 57.7 cm 発生している。高さ方向の位置推定誤差は補正前でそれぞれ -59.5 cm, -57.8 cm 発生していたが、補正によって終点の高さ方向の推定誤差はそれぞれ 5.4 cm, 3.8 cm となり、キャリブレーションによって高さ方向の推定誤差を十分に補正できていることが分かる。提案手法では高さ方向のみの補正を行っているが、水平方向に関しても同様の補正を行うことで位置推定誤差の軽減が期待できる。

また、始点から終点までの総移動量はそれぞれ 8.35 m, 8.56 m であり、直線歩行時の総移動量に対する位置推定誤差はそれぞれ 7.2%, 6.7% であった。従来手法の位置推定結果が 5~10% であることから、比較的良好な精度で位置推定が行えているといえる。

#### 4.1.2 円状歩行

直径 3 m の円状経路を図 27 のように始点と終点が一致するように歩行した場合の移動軌跡を図 28, 自己位置推定結果を表 4 に示す。踵の浮き上がり量は、データ No.1 ~ 3 の 1 歩あたりの高さ方向の平均誤差から 0.78 cm とする。このパラメータを用いて自己位置推定を行った結果を表 5, データ No.4 の補正前後の移動軌跡を図 29 に示す。

終点の位置推定誤差は、水平方向でそれぞれ 60.6 cm, 58.2 cm と、直線歩行時と同程度の大きさで発生している。高さ方向の位置推定誤差は、補正前でそれぞれ -13.0 cm, -11.0 cm 発生していたが、補正によって終点の高さ方向の推定誤差

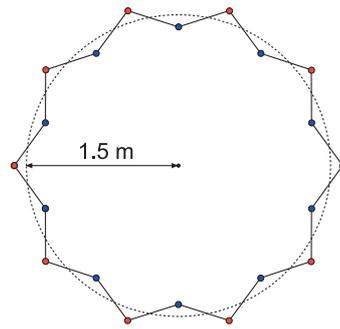


図 27: 円状歩行時の歩行経路

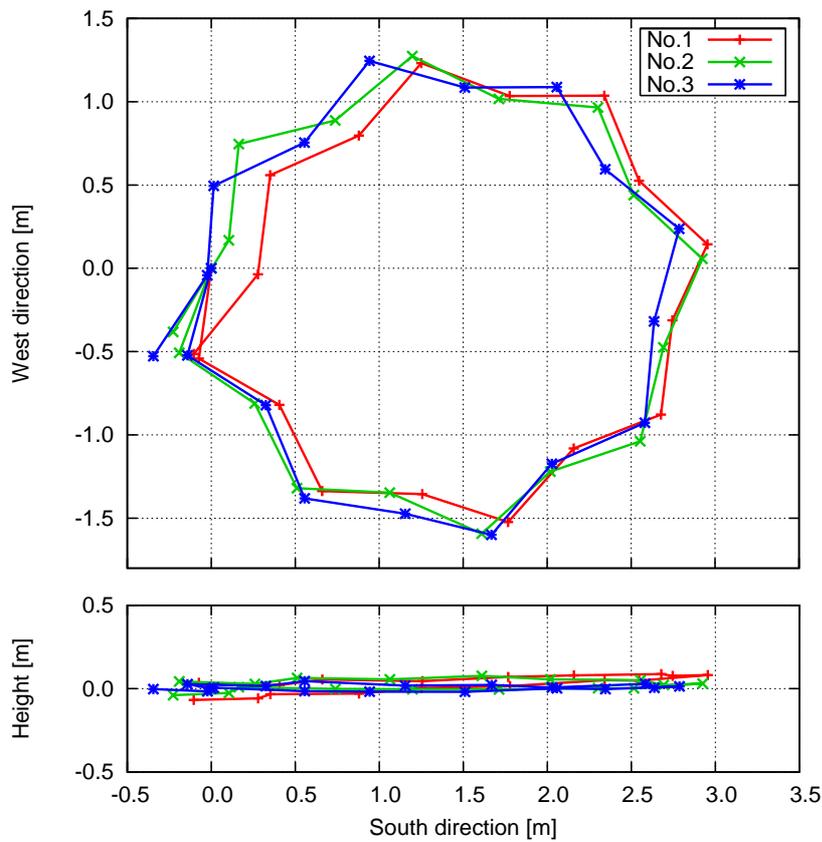


図 28: 円状歩行の移動軌跡 (キャリブレーション前)

がそれぞれ 1.1 cm, 2.3 cm となり, 高さ方向の移動量がある程度補正できていることが分かる. また, 始点から終点までの総移動量はそれぞれ 9.92 m, 9.89 m であった. 歩行する円の円周 (9.42 m) を真値とすると, 円状歩行時の総移動量に対する位置推定誤差はそれぞれ 5.2%, 5.0% であった.

表 4: 円状歩行時の自己位置推定結果 (キャリブレーション前)

No.	南北方向 [m]	東西方向 [m]	高さ方向 [m]	距離 [m]	歩数	高さ方向誤差 [m/歩]
1	0.104	-0.514	-0.163	0.549	17	-0.0061
2	0.227	-0.382	-0.142	0.467	17	-0.0134
3	0.345	-0.527	-0.093	0.637	17	-0.0203

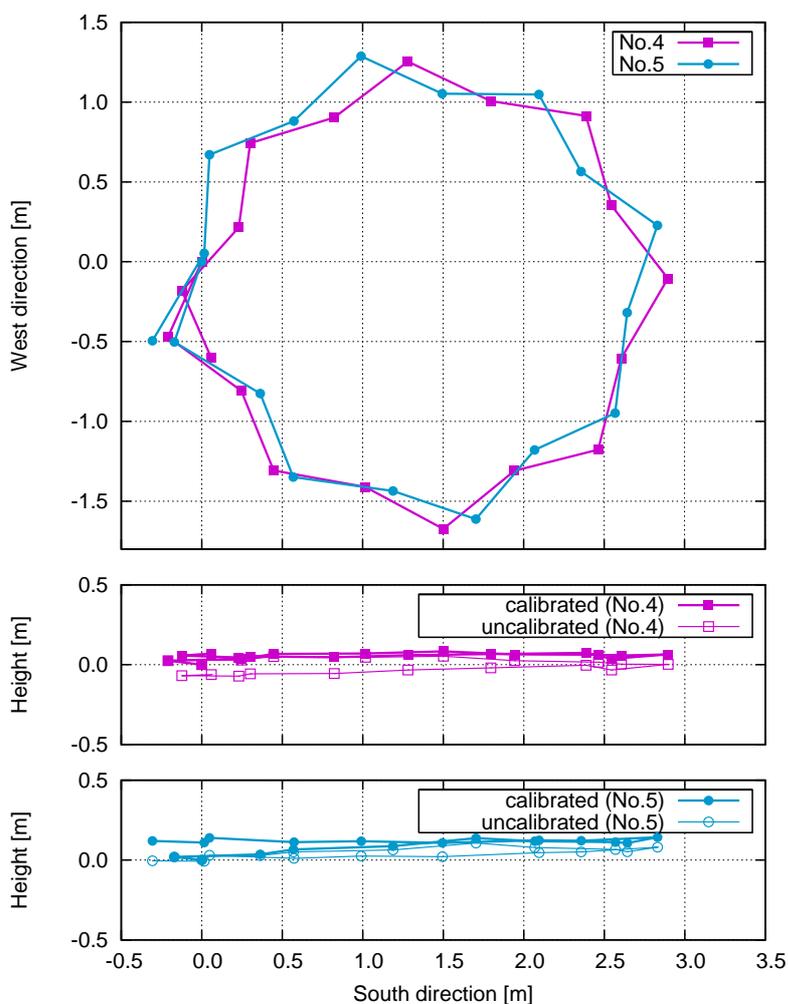


図 29: 円状歩行時の移動軌跡 (キャリブレーション前・後)

水平面上の移動軌跡は、実際歩行した経路の半径よりも小さい回転半径で歩行したように推定されている。これは、後足の踵が浮き上がる際の接地面位置からの変位が水平方向にも発生していることと、腰の絶対姿勢と踵間のステップベクトルの相違により発生していることが原因と考えられる。提案手法では水平方向

表 5: 円状歩行時の自己位置推定結果（キャリブレーション前・後）

No.	南北方向 [m]	東西方向 [m]	高さ方向 [m]	
			補正前	補正後
4	-0.060	-0.603	-0.130	0.011
5	0.307	-0.495	-0.110	0.023

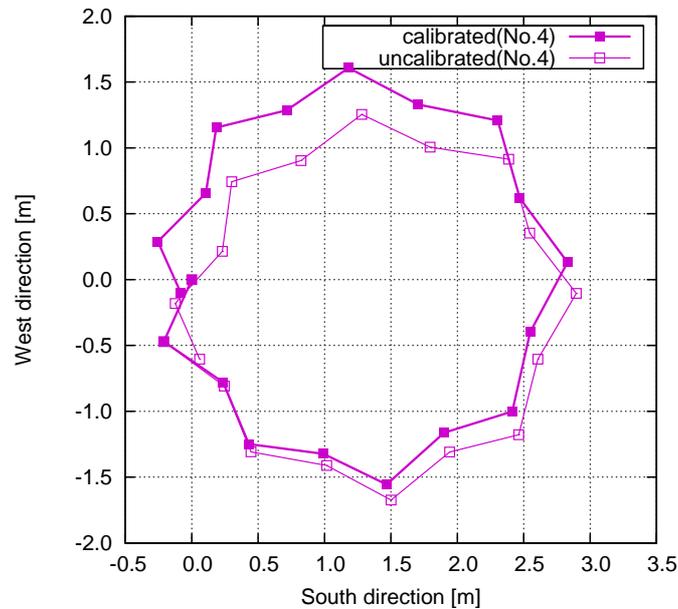


図 30: 水平方向のキャリブレーション適用例（円状歩行時）

の推定位置についてはキャリブレーションを検討していないが，高さ方向と同様に補正するために今後は水平方向の推定誤差も補正する必要がある．

水平方向のキャリブレーションを試行して補正した移動軌跡を図 30 に示す．補正により，終点の位置推定誤差は水平方向で 60.6 cm から 13.1 cm まで軽減することができた．従って，今後は水平方向のキャリブレーションについても検討することで位置推定精度の向上が期待できる．

#### 4.1.3 階段昇降

##### 階段昇段

階段を昇段して 1 階分移動した場合の移動軌跡を図 31，自己位置推定結果を表 6 に示す．実験を行った階段の高度は，トータルステーションで計測した結果

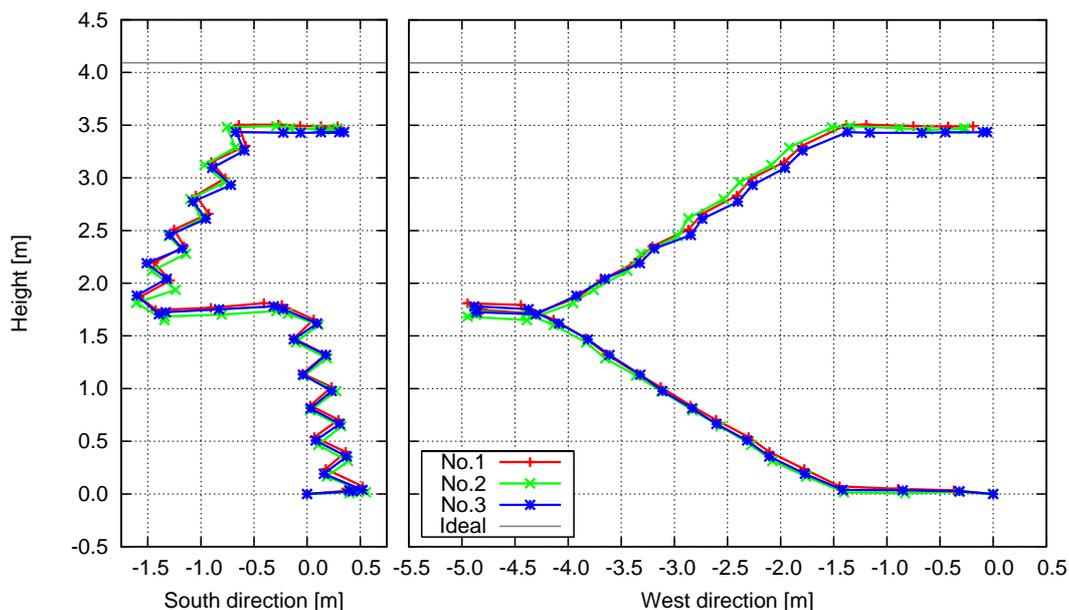


図 31: 階段昇段時の移動軌跡 (1 階分, キャリブレーション前)

表 6: 階段昇段時の自己位置推定結果 (キャリブレーション前)

No.	南北方向 [m]	東西方向 [m]	高さ方向 [m]	距離 [m]	歩数		高さ方向誤差 [m/歩]	
					平面歩行	階段昇段	平面歩行	階段昇段
1	0.177	-0.153	3.406	3.414	10	22	-0.0338	-0.0158
2	-0.391	-0.301	3.385	3.421	11	22	-0.0338	-0.0152
3	-0.468	-0.104	3.352	3.386	11	22	-0.0338	-0.0167

表 7: 階段昇段時の自己位置推定結果 (キャリブレーション前・後)

No.	南北方向 [m]	東西方向 [m]	高さ方向 [m]	
			補正前	補正後
4	-0.539	-0.310	3.328	4.000
5	0.219	0.132	3.446	4.082

1 階分で 4.092 m である。以下の実験では、この高度を真値として利用する。また、1 階分の段数は 22 段であった。踵の浮き上がり量は、平面歩行時には直線歩行のパラメータを使用し、階段昇段時はデータ No.1 ~ 3 の 1 歩あたりの高さ方向の平均誤差から 1.59 cm とする。

このパラメータを用いて自己位置推定を行った結果を表 7、補正前後の移動軌跡を図 32 に示す。始点と終点の位置が水平面上で一致しているとすると、終点の水平面上における推定誤差は、それぞれ 62.1 m, 42.4 cm であった。高さ方向

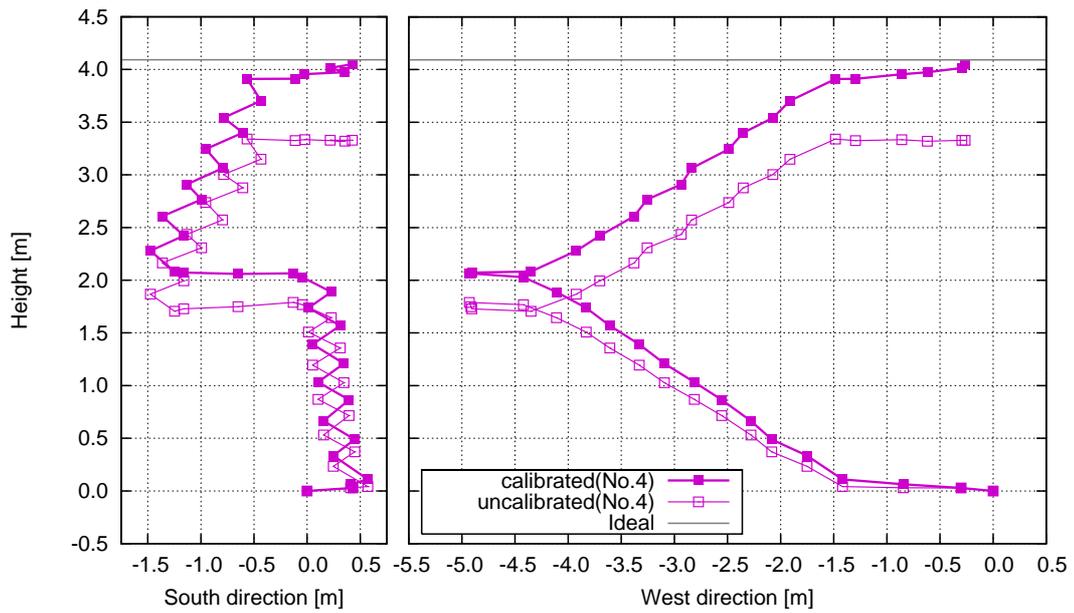


図 32: 階段昇段時の移動軌跡 (1 階分, キャリブレーション前・後)

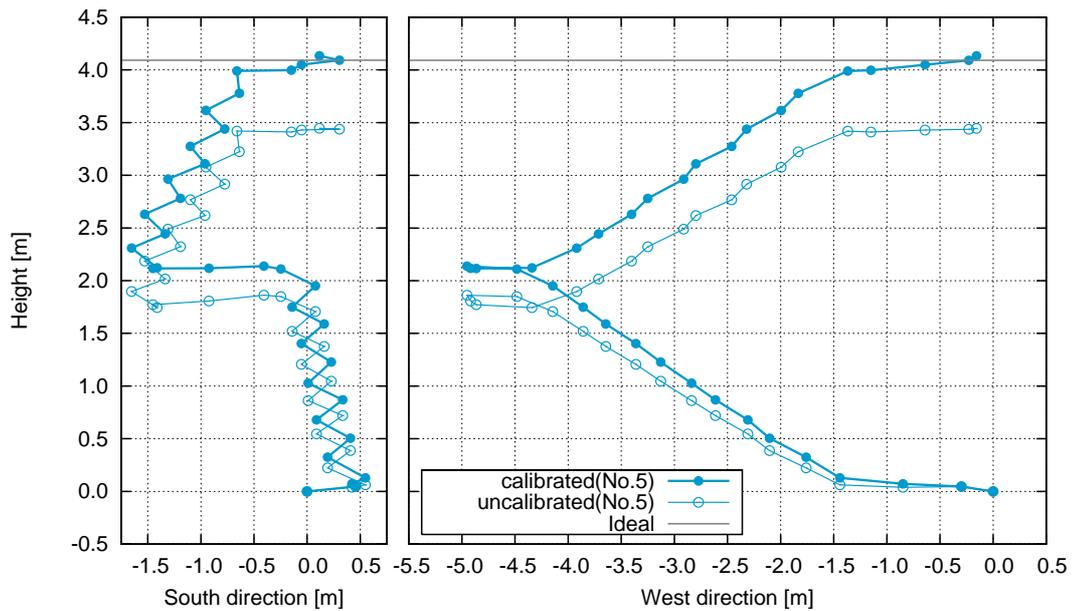


図 33: 階段昇段時の移動軌跡 (1 階分, キャリブレーション前・後)(つづき)

の推定誤差は補正前でそれぞれ 76.4 cm, 64.6 cm 発生していたが, 補正によってそれぞれ 9.2 cm, 1 cm まで誤差が軽減されていることが確認できる.

始点から終点までの総移動量はそれぞれ 14.87 m, 14.85 m であった. 始点と終

点の位置が水平面上で一致し，高さ方向のみに変位があるとすると，終点の3次元的位置推定誤差はそれぞれ 62.9 m，25.6 cm である．したがって，階段昇段時の総移動量に対する位置推定誤差はそれぞれ 4.2 %，1.7 % である．

#### 階段降段

次に，階段を降段して1階分移動した場合の移動軌跡を図 34，自己位置推定結果を表 8 に示す．踵の浮き上がり量は，データ No.1～3 の1歩あたりの高さ方向の平均誤差から 0.048 cm とする．このパラメータを用いて自己位置推定を行った結果を表 9，補正前後の移動軌跡を図 35 に示す．

始点と終点間の水平面上における推定誤差は，それぞれ 84.3 cm，60.0 cm であった．高さ方向の推定誤差は補正前でそれぞれ 32.2 cm，37.6 cm 発生していたが，補正によってそれぞれ 12.8 cm，0.074 cm まで低減している．

また，始点から終点までの総移動量はそれぞれ 14.13 m，14.27 m であった．始点と終点の位置が水平面上で一致し，高さ方向のみに変位があるとすると，終点の3次元的位置推定誤差はそれぞれ 85.3 m，60.5 cm である．したがって，階段降段時の総移動量に対する位置推定誤差はそれぞれ 6.0 %，4.2 % である．

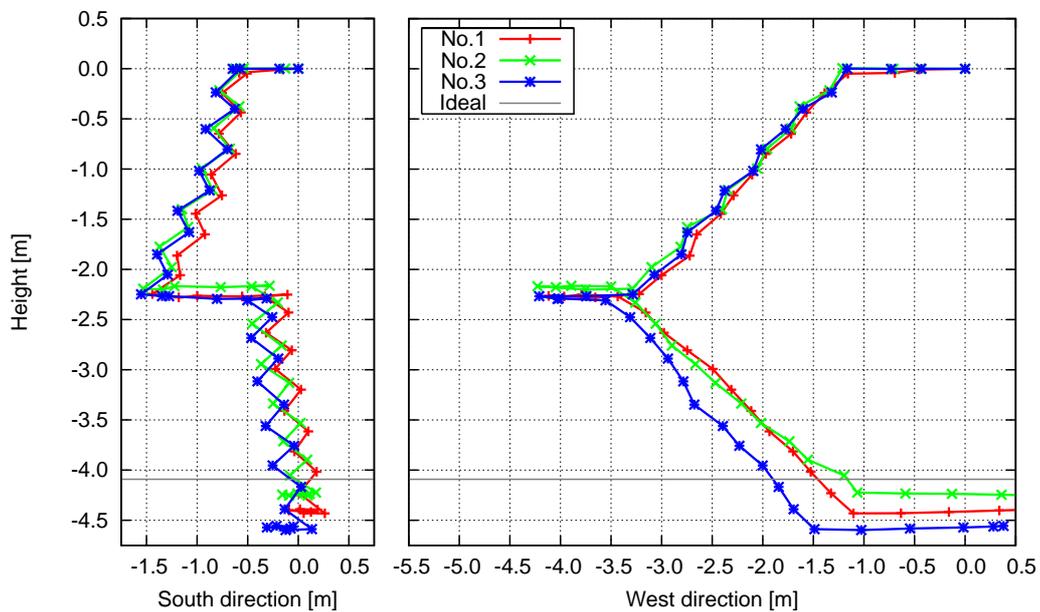


図 34: 階段降段時の移動軌跡 (1階分，キャリブレーション前)

表 8: 階段降段時の自己位置推定結果 (キャリブレーション前)

No.	南北方向 [m]	東西方向 [m]	高さ方向 [m]	距離 [m]	歩数		高さ方向誤差 [cm/歩]	
					平面歩行	階段降段	平面歩行	階段降段
1	0.289	0.762	-4.480	4.554	12	22	-3.38	-0.080
2	0.459	0.822	-4.339	4.440	12	22	-3.38	-0.721
3	0.556	0.31	-4.642	4.685	12	22	-3.38	0.656

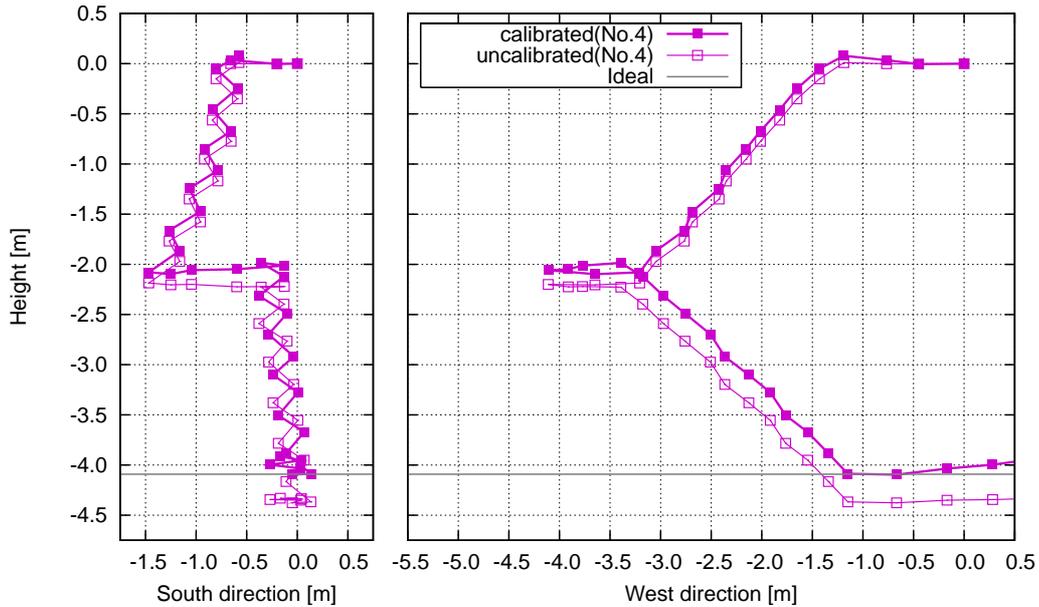


図 35: 階段降段時の移動軌跡 (1 階分, キャリブレーション前・後)

表 9: 階段降段時の自己位置推定結果 (キャリブレーション前・後)

No.	南北方向 [m]	東西方向 [m]	高さ方向 [m]	
			補正前	補正後
4	0.191	-0.343	-3.759	-3.968
5	0.089	-0.493	-3.779	-3.989

#### 4.1.4 考 察

提案手法によって自己位置を推定した結果, 直線歩行では実距離に対して 5% の位置推定誤差が発生した. 曲線状の歩行では約 60 cm の位置誤差を生じたが, 高さ方向の誤差に関しては, 踵の浮き上がり量から補正することにより 2 cm 程度まで低減することを確認した. 従来手法の位置精度と比較すると, 著しい精度向上は確認できなかったが, 実用的な精度で自己位置推定が行えているといえる.

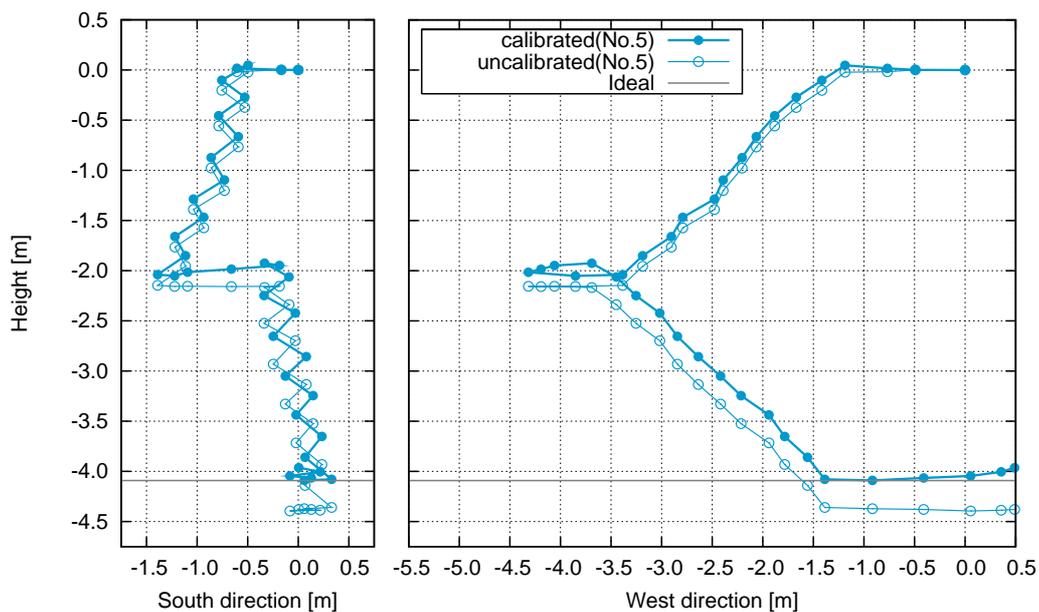


図 36: 階段昇段時の移動軌跡 (1 階分, キャリブレーション前・後)(つづき)

また, 階段を昇降した場合の自己位置推定結果は, 高さ方向の誤差が階段 1 階分 (18.6 cm) の半分程度程度の大きさで発生している。これは, 利用する階段 1 階分ごとにインフラを設置すれば誤差の蓄積を回避できるため, 実用的な推定精度が得られているといえる。

## 4.2 広域環境における自己位置推定実験

4.1 節で得られた平面歩行, 階段昇降における踵の浮き上がり量  $h_{heel}$  を用いて, 広域な環境で自己位置推定実験を行った。歩行した経路は次の 4 経路である。

- 平面上の正方形経路 (約 200 m)
- 階段昇段 (1 階から 7 階までの 6 階分)
- 階段降段 (7 階から 1 階までの 6 階分)
- 平面上歩行・階段昇降を含む経路

#### 4.2.1 平面上の正方形経路

直線歩行を行って推定した踵の浮き上がり量を評価するため、屋外で図 37 のような 1 辺 50 m の正方形の経路を周回した場合の移動軌跡を図 38 に示す。始点と終点間の距離は平面上で 7.20 m、高さ方向は 8.36 m であり、総移動量は 213.1 m であった。総移動量に対する位置推定誤差は 5.2% 発生している。このように、直線歩行の多い経路上の歩行では距離が既知の直線を数回歩行して求めた踵の浮き上がり量をそのまま適用しても良好な推定精度が得られることがわかる。

#### 4.2.2 階段昇降（6 階分）

階段を 1 階から 7 階まで昇段した場合の移動軌跡を図 39、7 階から 1 階まで降段した場合の移動軌跡を図 40 に示す。推定移動量は、各両脚支持期間でステップベクトルの高さ成分によって歩行状態を平面上歩行・階段昇降に判別した後、それぞれのパラメータによって高さ方向の補正を行った。今回の経路で想定される平面上の歩行は、階段の踊り場のように曲線で歩行することが多いため、曲線歩行で得られたパラメータを用いた。

実際の高度は 24.55 m で、始点の平面上の位置と終点の平面上の位置が一致しているとすると、平面上での距離は昇段時で 0.94 m、降段時で 2.90 m であった。階段 1 階分の昇降で発生していた平面上の距離と比較すると、降段時は移動する階数に比例した誤差が発生していると考えられる。また、高さ方向の距離は昇段時で 22.50 m、降段時で 26.10 m であった。始点から終点までの総移動量はそれぞれ

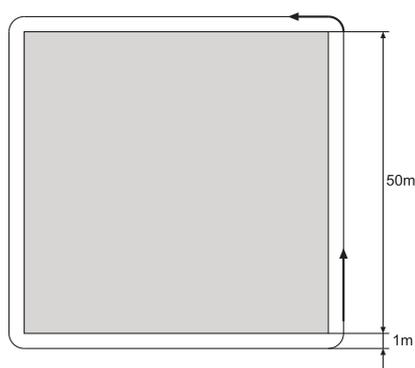


図 37: 平面上の正方形経路

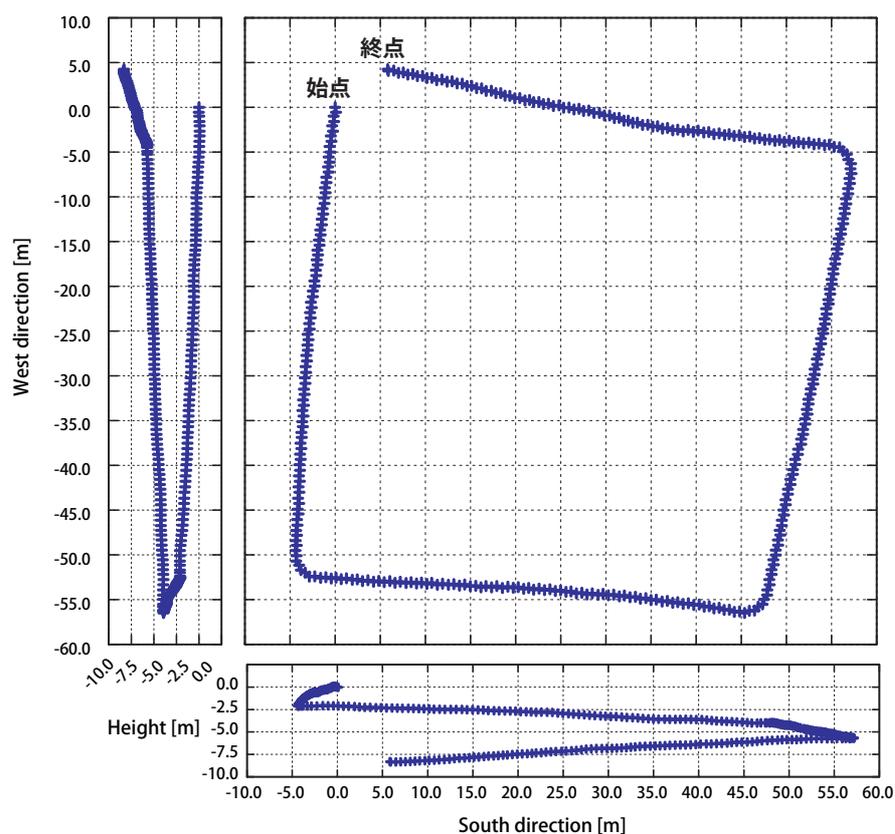


図 38: 平面上の正方形経路歩行時の移動軌跡

84.6 m , 74.7 m であったため , 総移動量に対する位置推定誤差はそれぞれ 2.6 % , 4.3 % 発生している .

#### 4.2.3 平面上歩行と階段昇降を含む経路

平面上歩行と階段昇降を含む経路を歩行した場合の移動軌跡を図 42 に示す . この経路では , 始点を情報科学研究科棟のエントランスとし , 大講義室前の廊下を通って B 棟の階段まで約 67.3 m 歩行したのち 3 階まで階段昇降を行い , 始点に戻るよう歩行している . 図 42 において , 始点から左折した後の長い直線状の軌跡が大講義室前の廊下に相当する . この直線上の歩行については , 実際の廊下の長さ 40.3 m に対して 37.3 m の推定移動量が得られていることから , この部分の移動距離に関して 7.4 % の誤差が発生していることになる . しかし , 廊下歩行時の経路と左折後の経路とのなす角が直角になっておらず , その後の推定位置に影響

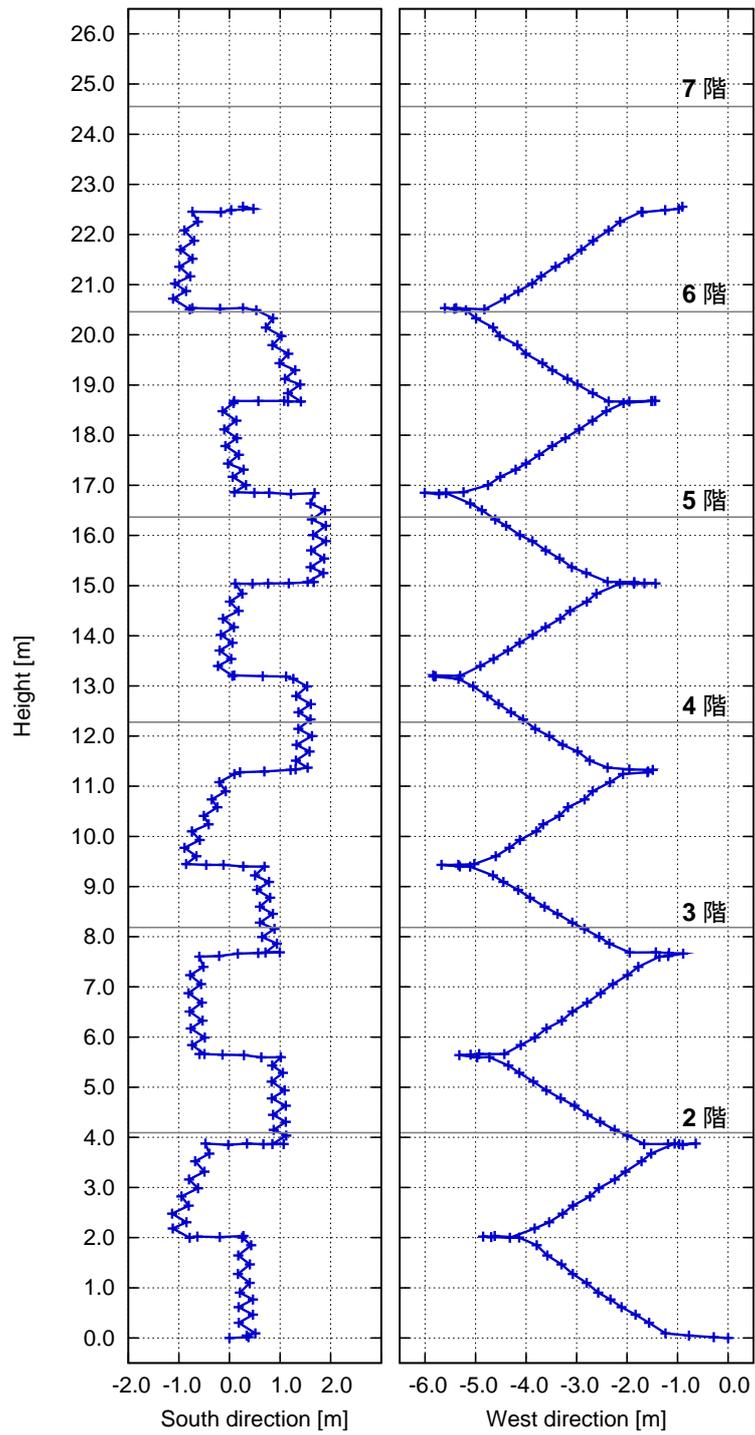


図 39: 階段昇段時の移動軌跡 (6 階分)

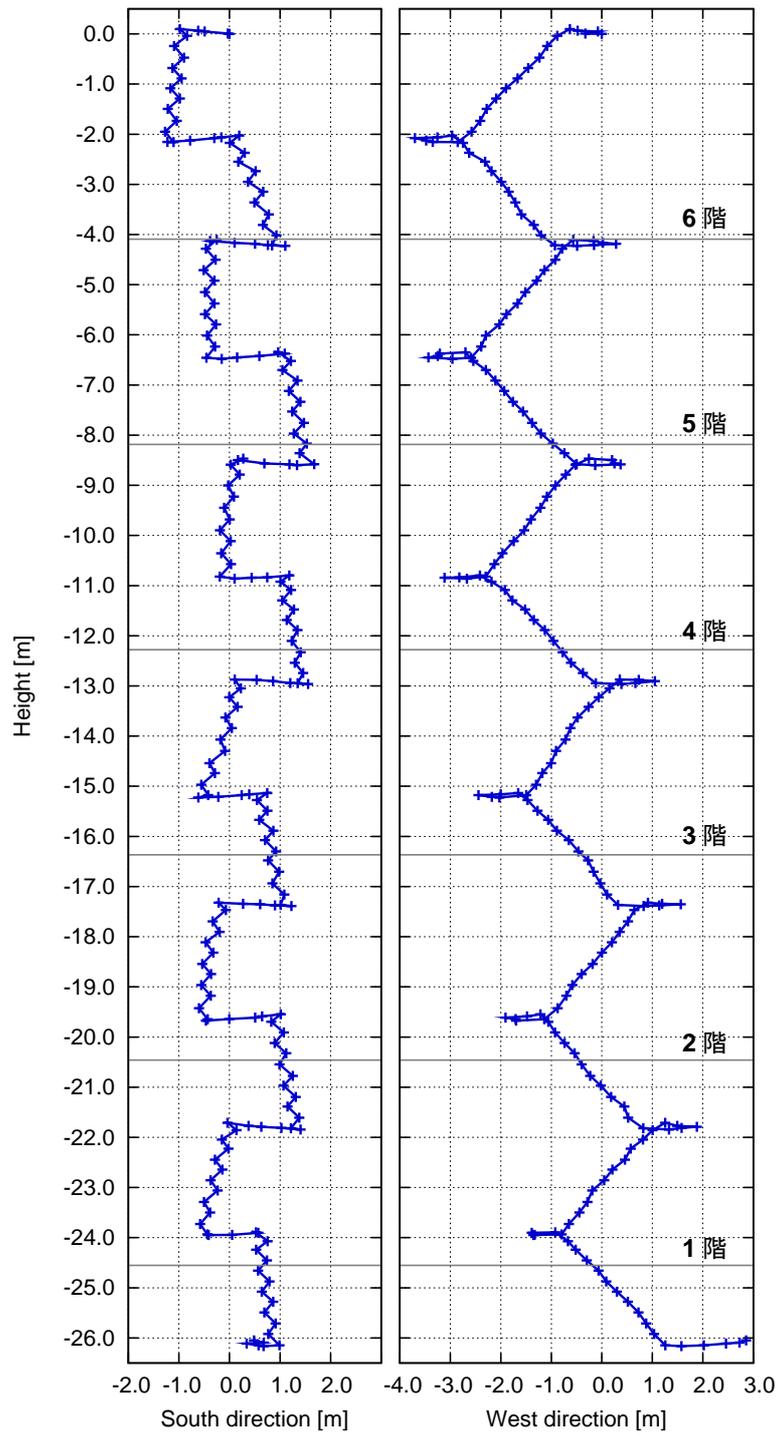


図 40: 階段降段時の移動軌跡 (6 階分)

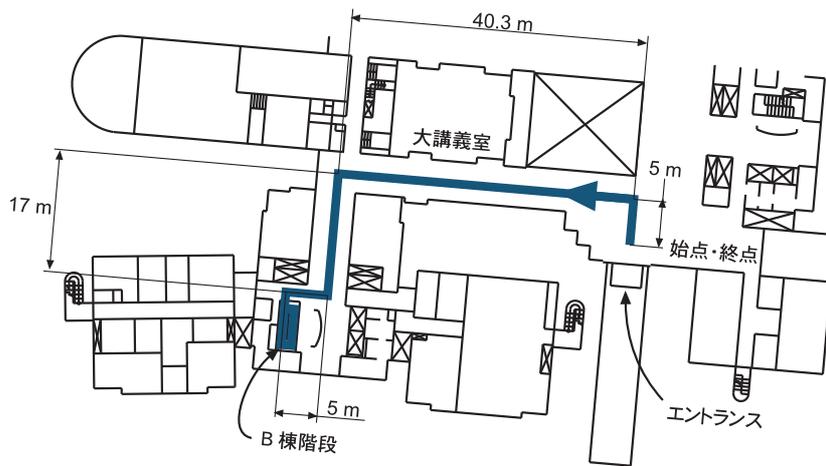


図 41: 平面上歩行と階段昇降を含む経路

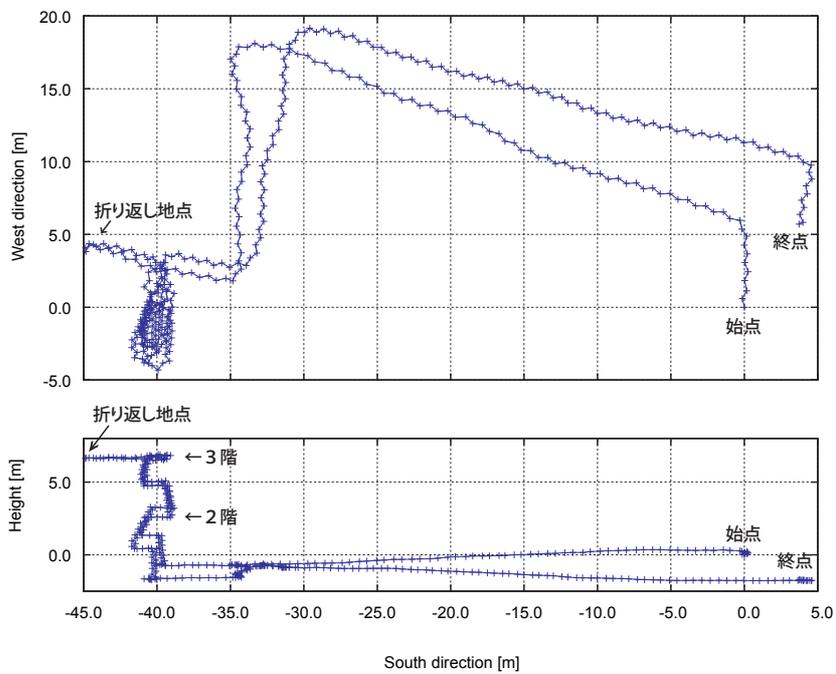


図 42: 平面上歩行と階段昇降を含む経路の移動軌跡

している．これは付近に発電室があり，局所的に地磁気が乱れることによって姿勢センサの出力する絶対方位に影響していることが原因と考えられる．

始点と終点間の距離は平面上で 6.88 m，高さ方向で 0.243 m であり，始点から終点までの総移動量は 223.67 m であったため，総移動量に対する位置推定誤差は 3.0% であった．

#### 4.2.4 考 察

提案手法によって、ユーザが広域な環境で平面上、階段昇降が複数存在する経路を歩行した場合でも移動距離によって数%程度の誤差で自己位置を推定することができた。これらの推定結果は、従来手法で行われることの少なかった階段昇降時の推定も含み、ユーザが定期的に静止するなどの制約が無い状態で達成した。したがって、本手法を用いる際に構築するインフラの密度は、従来提案されているハイブリッド手法よりも低い密度で同程度の利用範囲が得られることが期待できる。また、平面上の歩行や階段昇降などの動作を行った場合の移動軌跡を推定できるため、センサを切替えることなくシームレスな位置推定が行える。

## 5. むすび

本論文では、ユーザが装着するセンサによってユーザの動きを計測し、ユーザの相対移動量を高精度に推定する手法を提案した。ユーザ歩行時の腰と両足の相対位置姿勢計測に3次元磁気センサ、腰の絶対姿勢計測に姿勢センサを利用し、踵に装着した押しボタンスイッチで単脚支持期と両脚支持期が切り替わるタイミングを計測することで歩行動作と歩数の計測を行った。相対移動量は両足の踵の相対位置と腰の絶対姿勢から求め、両足が地面に接地するタイミングで加算することで歩幅を高精度に推定した。また、両足接地時に後側の踵が地面から浮き上がることによって発生する高さ方向の誤差を軽減するため、踵の浮き上がり量のキャリブレーション手法について検討し、補正後の推定結果の定量的な評価を行った。さらに、得られたパラメータを用いて複数の広域環境で自己位置推定を行い、総移動量に対する位置推定誤差は平面上の経路を歩行した場合で5.2%、階段を昇降した場合はそれぞれ2.6%、4.3%であり、それらが混在する経路を歩行した場合においても3.0%の精度でユーザの位置を推定可能であることを示した。これらの推定結果は、従来手法で行われることの少なかった階段昇降時の推定も含み、ユーザが定期的に静止するなどの制約が無い状態で達成したことから、提案手法によってユーザの利用可能範囲のさらなる拡大が期待できる。

本研究では踵の浮き上がり量を推定する際にユーザの歩行状態を判別することで同一のパラメータによって補正を行ったが、今後は立脚に対する遊脚の3次元的な相対位置に基づいて補正を行い、高精度に推定することが課題となる。そのためには後足の踵の浮き上がり量を高さ方向だけでなく、水平方向についてもキャリブレーションを行うことが不可欠である。また、今回示した平面上の歩行や階段昇降以外にも、坂道や不整地などの様々な環境で歩行実験を行うことも課題として挙げられる。

## 謝 辞

本研究の全過程を通して、懇切なる御指導、御鞭撻を賜った視覚情報メディア講座 横矢直和教授に心より深謝致します。本研究の遂行にあたり、有益なる御指摘、御助言を頂いた像情報処理学講座 千原國宏教授、ならびに視覚情報メディア講座 山澤一誠助教授に厚く御礼申し上げます。

また、視覚情報メディア講座 神原誠之助手には、研究の全過程を通じて直接懇切丁寧な御指導、御助言を賜りました。ここに心より深謝申し上げます。

本研究に関する貴重な御助言や御指摘を頂きました視覚情報メディア講座 佐藤智和助手に深く感謝致します。日頃から多岐にわたる御支援を頂いた視覚情報メディア講座の諸氏に感謝致します。特に、本研究の実験を幾度となくお手伝いしていただいた牧田孝嗣氏、伊東大輔氏、和田浩明氏、小谷享広氏、実装に関する有益な助言を下さった奥村文洋氏、中里祐介氏に深く感謝致します。最後に日々の研究活動を支えて頂いた、視覚情報メディア講座 守屋知代女史に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] J. Hightower and G. Borriello: “Location Systems for Ubiquitous Computing,” IEEE Computer, Vol. 34, pp. 57–66, Aug. 2001.
- [2] T. Höllerer, S. Feiner, T. Terauchi, G. Rashid and D. Hallaway: “Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System,” Computers & Graphics, Vol. 23, No. 6, pp. 779–785, Dec. 1999.
- [3] V. Vlahakis, N. Ioannidis, J. Karigiannis, M. Tsotros, M. Gounaris, D. Stricker, T. Gleue, P. Daehne and L. Almeida: “ARCHEOGUIDE: An Augmented Reality Guide for Archaeological Sites,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 22, No. 5, pp. 52–60, Sep.–Oct. 2002.
- [4] R. Tenmoku, M. Kanbara and N. Yokoya: “A Wearable Augmented Reality System Using Positioning Infrastructures and a Pedometer,” Proc. 7th IEEE Int’l Symp. on Wearable Computers (ISWC’03), pp. 110–117, Oct. 2003.
- [5] W. Piekarski, B. Avery, B. H. Thomas and P. Malbezin: “Integrated Head and Hand Tracking for Indoor and Outdoor Augmented Reality,” Proc. IEEE Virtual Reality Conf. 2004 (VR’04), pp. 11–18, Mar. 2004.
- [6] R. Azuma, B. Hoff, H. N. Iii and R. Sarfaty: “A Motion-Stabilized Outdoor Augmented Reality System,” Proc. IEEE Virtual Reality Conf. 1999 (VR’99), pp. 252–259, Mar. 1999.
- [7] A. D. Cheok, S. W. Fong, K. H. Goh, X. Yang, W. Liu and F. Farbiz: “Human Pacman: A Mobile Entertainment System with Ubiquitous Computing and Tangible Interaction over a Wide Outdoor Area,” Proc. 5th Int’l Symp. on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI2003), Sep. 2003.
- [8] 神原誠之, 横矢直和: “RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感システム”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005) 講演論文集, pp. 297–304, Jul. 2005.

- [9] D. Hallaway, T. Höllerer and S. Feiner: “Bridging the Gaps: Hybrid Tracking for Adaptive Mobile Augmented Reality,” *Applied Artificial Intelligence Journal*, Special Issue on AI in Mobile Systems, Vol. 18, No. 6, pp. 477–500, Jul. 2004.
- [10] Xybernaut Corp.: “Mobile Assistant<sup>®</sup> V,”  
<http://www.xybernaut.com/itemList.asp?categoryID=28>.
- [11] Quantum3D, Inc.: “THERMITE,”  
<http://www.quantum3d.com/products/Thermite/thermite.html>.
- [12] M. Kalkusch, T. Lidy, M. Knapp, G. Reitmayr, H. Kaufmann and D. Schmalstieg: “Structured Visual Markers for Indoor Pathfinding,” *Proc. IEEE Int’l Augmented Reality Toolkit Workshop (ART’02)*, Sep. 2002.
- [13] L. Naimark and E. Foxlin: “Circular Data Matrix Fiducial System and Robust Image Processing for a Wearable Vision-Inertial Self-Tracker,” *Proc. Int’l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR’02)*, pp. 27–36, Oct. 2002.
- [14] 羽原寿和, 町田貴史, 清川清, 竹村治雄: “ウェアラブルPCのための画像マーカーを用いた広域屋内位置検出機構”, *電子情報通信学会技術研究報告*, IE2003-211, 103, pp. 77–82, Feb. 2004.
- [15] G. Welch, G. Bishop, L. Vicci, S. Brumback, K. Keller and D. Colucci: “High-Performance Wide-Area Optical Tracking –The HiBall Tracking System,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 10, No. 1, pp. 1–21, Feb. 2001.
- [16] D. Hallaway, T. Höllerer and S. Feiner: “Coarse, Inexpensive, Infrared Tracking for Wearable Computing,” *Proc. 7th IEEE Int’l Symp. on Wearable Computers (ISWC’03)*, pp. 69–78, Oct. 2003.
- [17] InterSense, Inc.: “IS-900,” <http://www.isense.com/products/prec/is900/>.
- [18] M. Addlesee, R. Curwen, S. Hodges, J. Newman, P. Steggles, A. Ward and A. Hopper: “Implementing a Sentient Computing System,” *IEEE Computer*, Vol. 34, No. 8, pp. 50–56, Aug. 2001.

- [19] N. B. Priyantha, A. Chakraborty and H. Balakrishnan: “The Cricket Location-Support System,” Proc. 6th Annual ACM Int’l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), pp. 32–43, Aug. 2000.
- [20] C. Randell, C. Djalllis and H. Muller: “Personal Position Measurement Using Dead Reckoning,” Proc. 7th IEEE Int’l Symp. on Wearable Computers (ISWC’03), pp. 166–175, Oct. 2003.
- [21] 李欣洙, 間瀬憲一, 阿達透, 大沢達哉, 中野敬介, 仙石正和, 日高裕敏, 品川準輝, 小林岳彦: “GPS , 歩数計及び方位計を用いた歩行者移動経路追跡法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-B, No. 12, pp. 2254–2263, Dec. 2001.
- [22] Y. Konishi and R. Shibasaki: “Development of an Autonomous Personal Positioning System,” Asia GIS 2001 Conf., Jun. 2001.
- [23] 鵜沼宗利, 倉田謙一郎, 外山敦也, 堀江武: “人の歩行動作認識技術を応用した自律的位置検出手法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-A, No. 1, pp. 78–86, Jan. 2004.
- [24] S.-W. Lee and K. Mase: “Activity and Location Recognition Using Wearable Sensors,” IEEE Pervasive Computing, Vol. 1, No. 3, pp. 24–32, Jul.–Sep. 2002.
- [25] M. Kouroggi and T. Kurata: “Personal Positioning based on Walking Locomotion Analysis with Self-Contained Sensors and a Wearable Camera,” Proc. 2nd IEEE and ACM Int’l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR’03), pp. 103–112, Oct. 2003.
- [26] R. Stirling, K. Fyfe and G. Lachapelle: “Evaluation of a New Method of Heading Estimation for Pedestrian Dead Reckoning Using Shoe Mounted Sensors,” Journal of Navigation, Vol. 58, No. 1, pp. 31–45, Jan. 2005.
- [27] 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, Jun. 2004.

- [28] E. Foxlin: “Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 38–46, Nov.–Dec. 2005.
- [29] Polar Electro Inc.: “Polar S625X Running Computer,” <http://www.polar.fi/polar/channels/eng/segments/products/S625X.html>.
- [30] Nike, Inc.: “Triax Elite HRM/SDM,” [http://www.nike.com/timing/extranet/product/triax\\_elite/elite\\_manual\\_eng.pdf](http://www.nike.com/timing/extranet/product/triax_elite/elite_manual_eng.pdf).
- [31] 村瀬雅哉, 木島竜吾, 小鹿丈夫: “足装着型デバイスによる歩行情報システムの構築”, 第 14 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 131–136, Sep. 1998.
- [32] 消防活動が困難な空間における消防活動支援情報システムの開発検討会: “消防活動が困難な空間における消防活動支援情報システムの開発報告書”, 総務省消防庁, Mar. 2003.
- [33] K. Okuda, S. Y. Yeh, C. I. Wu, K. H. Chang and H. H. Chu: “The GETA Sandals: A Footprint Location Tracking System,” Proc. Workshop on Location- and Context-Awareness (LoCa 2005), pp. 120–131, May 2005.
- [34] 山崎信寿, 鈴木隆雄, 河内まき子, 楠本彩乃, 西沢哲: 足の事典, 朝倉書店, 東京, 1999. ISBN:425420096X.