

修士論文

装着した3次元磁気センサを用いた
歩き・走り状態に対応したユーザの自己位置推定

山中 一樹

2007年3月9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。

山中 一樹

審査委員：

横矢 直和 教授 (主指導教員)

小笠原 司 教授 (副指導教員)

装着した3次元磁気センサを用いた 歩き・走り状態に対応したユーザの自己位置推定*

山中 一樹

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手法が提案されている。特に、屋内におけるユーザの自己位置推定においては、環境中のインフラを用いた絶対位置計測とユーザに装着されたセンサを用いた自律的な相対位置計測を組み合わせた手法が主流である。この場合、環境中のインフラは設置コストが利用範囲に比例して増大するため、自律計測の精度向上が望まれる。従来の自律計測手法は、一般にユーザの歩行動作を認識するため、移動動作が通常の歩行動作に限定されるといった制約があった。そこで本研究では、装着した3次元位置・姿勢センサ、絶対姿勢センサを用い、通常の歩行動作に限らず、両足が地面から離れる期間の存在する走り状態に対しても、自己位置が推定可能な手法を提案する。具体的には、両足が地面から離れる直前の腰の速度を初速度として放物運動していると仮定し、ユーザの両足が地面から離れる期間のユーザの腰部の移動量を推定する。提案手法の有効性を確認するため、走り状態を含む様々な移動時の自己位置推定実験により推定精度の定量的評価を行った。

キーワード

自己位置同定, ウェアラブルコンピュータ, 3次元磁気センサ, 姿勢センサ

* 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-MT0551129, 2007年3月9日.

Localization of Walking or Running User with Wearable 3D Position Sensor*

Kazuki Yamanaka

Abstract

This paper describes a new method of measuring user's position for location-based services in wide indoor environments. Conventional localization methods usually employ a hybrid approach in which user's position is estimated by combining positioning infrastructures and a pedometer. Since the installation cost of infrastructures increases when the area expands, the measurement of user's relative position with high accuracy is required. Although a number of methods using a pedometer have been developed to improve the estimation accuracy, these methods generally can handle only usual walking behavior of a user. This paper proposes a new localization method for both walking and running users by using a wearable electromagnetic tracker and an inertial sensor. The proposed localization method estimates a moving distance in the period when both legs do not ground by estimating a velocity of waist when user's leg grounds. Experiments have been carried out using a prototype system to evaluate the accuracy of user localization with the proposed method.

Keywords:

Localization, Wearable computer, Electromagnetic sensor, Inertial sensor

* Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0551129, March 9, 2007.

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 環境インフラによる絶対位置同定	3
2.1.2 自律計測による相対移動量計測	5
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	9
2.2 人間の動作計測に関する従来研究	10
2.3 本研究の位置付け	12
3. 3次元磁気センサと姿勢センサによる走り状態に対応した自己位置推定	15
3.1 計測対象とする動き	15
3.2 装着センサ系の機器構成	15
3.2.1 3次元磁気センサ	16
3.2.2 姿勢センサ	17
3.2.3 マイクロスイッチ	18
3.3 走り状態に対応した自己位置推定法	18
3.4 走り動作計測に対応したキャリブレーション	22
3.4.1 キャリブレーション実験時の計測対象	22
3.4.2 踵浮き上がり量の推定方法	23
3.4.3 腰の初速度 v の補正方法	24
4. 実験	28
4.1 自己位置推定の評価実験	28
4.1.1 キャリブレーション実験	28
4.1.2 直線走り	30
4.1.3 円状走り	30
4.1.4 考察	33
4.2 様々な動作・経路における自己位置推定実験	33

4.2.1	3 段跳び	33
4.2.2	反復横跳び	34
4.2.3	歩き・走り状態の混在した経路	34
4.2.4	考察	38
5.	むすび	39
	謝辞	40
	参考文献	41

目 次

1	Naimark らのマーカ [12]	4
2	石井らの屋外環境に適応したマーカ [13]	4
3	Hallaway らの赤外線センサによる位置・姿勢計測システム [7]	6
4	Konishi らの位置・姿勢計測システム [9]	7
5	Lee らの位置・姿勢計測システム [17]	7
6	Navshoe[20]	8
7	ARISE[10] の位置推定手法	10
8	鈴木らのモーションキャプチャの使用環境とユーザの概観 [23]	11
9	金杉らのモーションキャプチャのユーザの概観 [24]	11
10	従来研究の関係と本研究の位置付け	14
11	歩き状態と走り状態の相違点	16
12	装着センサ系の機器構成	17
13	提案手法の機器構成と座標系	18
14	歩き状態のステップベクトル	19
15	両足が地面から離れる期間の腰の移動量とステップベクトル	20
16	踵浮き上がり量と腰への影響	23
17	進行方向速度と誤差の関係	26
18	異なるユーザの進行方向速度と誤差の関係	27
19	キャリブレーション実験時の進行方向速度と誤差の関係	29
20	直線走り時における腰と足の移動推定結果	31
21	直線走り時の移動軌跡	31
22	円状走り時における腰と足の移動推定結果	32
23	円状走り時の移動軌跡	32
24	実際の3段跳びの様子	35
25	3段跳び時における腰と足の移動推定結果	35
26	3段跳び時の移動軌跡	35
27	反復横跳び時における腰と足の移動推定結果	36
28	実際の反復横跳びの様子	36

29	反復横跳び時の移動軌跡	36
30	歩き・走り状態の混在した移動時の経路	37
31	歩き・走り状態の混在した移動時の移動軌跡	37

表 目 次

1	従来研究と本研究との関係	14
2	直線走り時の自己位置推定結果	31
3	円状走り時の自己位置推定結果	32

1. はじめに

ユーザが装着可能な計算機とセンサによってユーザの現在位置を推定し，ユーザの位置に応じて情報提供を行うシステムが開発されている．このようなシステムの例として，拡張現実感技術を利用して現実の環境に仮想物体を重畳表示し，道案内や観光案内等に利用することで，より直感的な情報提示を行うシステムが挙げられる [1, 2, 3, 4]．これらの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の向上の観点から，多数の位置推定手法が従来から提案されてきた．特に，屋内におけるユーザの自己位置推定手法として，環境中のインフラを用いた絶対位置計測とユーザに装着されたセンサを用いた自律計測手法が提案されている [5]．

環境中に設置されるインフラには画像マーカ [6] や赤外線ビーコン [7] が用いられるが，これらの手法は，ユーザの絶対位置を取得可能な反面，設置コストが利用範囲と設置密度に比例して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 [8, 9] が提案されている．これら手法の多くは，ユーザの歩数検出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る．そのため，自律計測による手法はユーザの装着するセンサの導入コストのみで利用可能であるが，ユーザの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く，鉄筋構造の屋内では地磁気の影響を受けて進行方向に関する誤差も発生するといった問題がある．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ハイブリッド手法が提案されている [10]．ハイブリッド手法では，インフラの設置密度を下げることでコストの削減を図るために，自律計測の精度向上が望まれている．従来，自律計測手法は高精度にユーザの相対移動量を計測することが可能な手法が提案されているが，一般にユーザの歩行動作を認識するため，移動が歩行動作に限定されるといった制約があった．

そこで本研究では，装着した 3 次元位置・姿勢センサと絶対姿勢センサを用い，

通常の歩行動作に限らず，両足が地面から離れる期間の存在する走り状態に対しても，自己位置が推定可能な手法を提案する．具体的には，両足が地面から離れる期間では両足が宙に浮く直前の腰の速度を初速度として放物運動しているとし，腰の移動量を計算することで，両足が地面から離れる期間におけるユーザの腰部の移動量を両足遊脚期間の移動量として推定を行う．

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，走り状態における移動量の定量的評価および環境・状態を変化させた場合の移動量推定結果について述べ，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と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，環境中のインフラを用いた絶対位置計測とユーザに装着されたセンサを用いた自律計測手法，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 節ではユーザの自由な動きを計測する従来研究として，モーションキャプチャを利用した手法について述べる．最後に 2.3 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 環境インフラによる絶対位置同定

環境インフラとは，位置が既知な基準点として離散的に環境中に設置された特殊なマーカやセンサであり，ユーザが装着したセンサでこれらの基準点を認識することにより絶対的な位置を取得する．インフラを利用する代表的な手法としては，画像マーカや赤外線センサなどを利用する手法が提案されている．

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では，実環境に位置・形状・色が既知のマーカを多数配置し，ユーザが装着したカメラによる撮影画像からそれらを抽出し，ID を識別することでユーザの位置姿勢を求める．Baratoffらは正方形の画像マーカを実環境中に配置することによってユーザの位置推定を行っている [6]．この手法ではマーカの検出と同定に ARToolKit[11] を利用しており，画像マーカ固有のパターンを認識し，マーカが撮影された際の幾何学的な形状の変化から，カメラに対するマーカの相対的な位置を推定している．しかし，マーカの認識にパターンマッチングを行っているため，マーカの種類が増えるにつれて，処理時間とマッチングの失敗率が共に増加するといった問題がある．Naimarkらは，図 1 のように環境中に数万種類の ID が生成可能な円形マーカを設置する手法を提案している [12]．この手法では，ID が既知なマーカをごく少数に押さえ，その他のマーカは周囲のマーカの位置情報を利用してを検出するため，設置コストは削



図 1 Naimark らのマーカ [12]



図 2 石井らの屋外環境に適応したマーカ [13]

減されているが、環境内に同一の ID を有するマーカを配置できないといった問題がある。また石井ら [13] は広範囲で高性能な位置・姿勢を実現するために、カメラとの距離が非常に遠い場合においても高精度な位置推定が行なえる円形状のマーカを提案している。この手法は、図 2 のように屋外環境での広域な利用を想定しているが、マーカの大きさが数十 cm から数 m と非常に大きく、また建物の壁に設置することから設置コストが膨大になる。

一般的に、画像マーカを利用して位置を推定するためには、画像マーカが ID を認識できる程度の大きさで撮影されること、撮影された画像にぶれが生じないことが必要である。そのためマーカの設置が困難な場合や、ユーザの激しい動きにより、画像マーカがぶれにより正しく撮影することが困難な場合においては画像マーカによる位置の推定は困難である。

また、マーカを利用して実際に屋内の広い範囲でユーザの位置・姿勢を推定し続けるためには、数多くのマーカを環境中に設置する必要があるため、実環境の景観を損ねてしまうという問題もある。このような問題に対して中里ら [?] は、再帰性反射材でできた不可視マーカを環境に設置し、赤外線発光素子付きの赤外線カメラで撮影する手法を提案している。しかし、この手法に対しても設置コストが利用範囲に比例して増大するという問題が依然として残る。

赤外線センサを利用した手法

赤外線センサをインフラとして利用した手法は，赤外線 LED や IrDA などの赤外線ビーコンと呼ばれる赤外線送信機を環境中に設置し，ユーザが装着した赤外線カメラや IrDA リーダで信号を受信することで，ユーザの位置推定を行う．Hallaway らは，図 3 のように壁に配置された赤外線送信機から送信される赤外線信号を，同一平面上に配置された複数の赤外線受光体により受信し，装着したユーザの 2 次元位置と方位角の推定を行っている [7]．赤外線送信機の設置密度は 1 m^2 あたり一個で済むため設置コストは低減されている．前田らは実環境内に設置された赤外線ビーコンの固有の点滅パターンをステレオカメラで検出し距離を計算することにより，カメラに対する相対位置関係を求めることでユーザの位置・姿勢を推定する手法を提案している [14]．この手法では一部の赤外線ビーコンのみの位置が既知であり，その点で絶対位置計測を行い，その後は位置が未知の赤外線ビーコンを用いて相対的な移動量を推測し，継続して位置情報を取得する．絶対位置計測に用いない赤外線ビーコンは任意の位置に設置でき，位置の計測も不要なため，インフラ設置時の制約が軽減されており，利用環境の拡張性を示した．

赤外線センサを利用した手法は，赤外線信号を受信するため安定した位置検出が行えるが，設置するすべてのインフラに電源が必要であり，設置コストが高いといった特徴がある．そのため赤外線センサのみを用いて屋内広域環境において密に位置・姿勢計測を行うことは現実的ではないと考えられる．

以上のように，環境インフラを利用した手法では，位置が既知の基準点をセンサで認識することによってユーザの絶対位置計測が可能であるが，利用範囲に比例して設置コストが増大してしまうという問題点がある．

2.1.2 自律計測による相対移動量計測

自律計測手法は，ユーザの歩数や進行方向の計測をユーザが装着したセンサを用いて行うため，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といった特徴がある．以下に代表的なアプローチについて述べる．



図 3 Hallaway らの赤外線センサによる位置・姿勢計測システム [7]

歩数計測による手法

自律計測手法の代表的な手法として、ユーザが装着した歩数計で歩数を計測し、歩行時の歩幅を歩行周期と歩行速度の比例関係から推定し、この移動量を、腰につけた地磁気センサなどによって計測された進行方向に加算する方法が提案されている。李らは、振り子の付いた磁石がユーザの歩行に合わせて上下に動くことで、歩行周期が計測可能な歩数計を用いている [8]。この手法では、ユーザは等速に移動することや、平地での利用を前提としているため、ユーザの動作や利用環境に制限がある。

ユーザの歩行速度に対する歩幅の変化に対応するため、歩行時の加速度のパワースペクトルから得られる歩調の周波数を利用する手法が提案されている。Konishiらは、図 4 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 [9]。このシステムではジャイロで計測される鉛直方向の加速度からパワースペクトルを求め、そのパワースペクトルと歩行周波数、歩幅との関係から歩行速度を推定している。また気圧計によって 10% 程度の誤差で相対的な高度を推定可能である。鶴沼ら [15] は、歩調スペクトル強度を利用して、0.8m/s ほどのゆっくりした歩きから、3.5m/s 程度の駆け足までの歩行状態の認識を行っており、被験者実験によって、歩幅と歩調スペクトル強度の関係を求め、

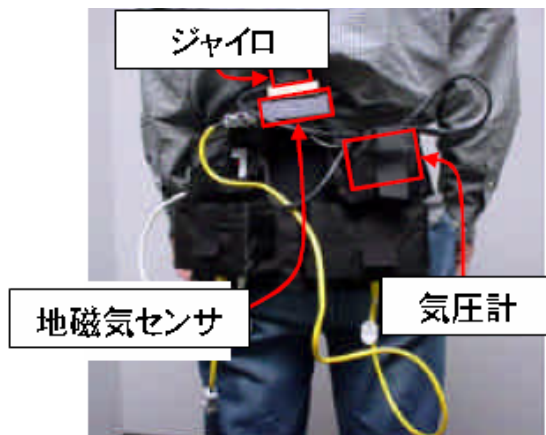


図 4 Konishi らの位置・姿勢計測システム [9]



図 5 Lee らの位置・姿勢計測システム [17]

歩行速度の推定を行っている．この手法では，直線経路に関しては，歩行状態に応じて正しく位置推定が行えるが，急な方向転換や左右の歩幅が異なるような歩行動作を行った場合は，位置推定の精度が損なわれてしまう．また，Lee らは図 5 に示すような加速度センサとジャイロを腿に装着すること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 [16]．この手法は利用環境の経路情報を事前に必要とするが，平面上の歩行だけでなく，階段の昇降動作といった歩行状態を認識し，位置推定が可能である．

ユーザの歩行時の歩幅を直接両足の相対位置を計測することによって求める方法も提案されている．濱口らは装着した 3 次元磁気センサと姿勢センサでユーザの両足の動きと腰の姿勢を連続的に計測し，ユーザの自己位置を推定する手法を提案した [17]．この手法は，足と腰の相対位置関係や姿勢を常に把握することで，歩幅を直接算出するので，横歩きなどといった多彩な動作に対応可能であるが，常にいずれかの足が接地していなければならないという制約がある．

以上，歩数計測を用いた手法では，ユーザの歩行動作を認識することを前提としているため，移動が歩行動作に限定されてしまい，ユーザの動きに制限がある．



図 6 Navshoe[20]

足の加速度を計測する手法

身体加速度の積分演算によって移動距離を推定する方法があり、足の爪先の加速度を計測することにより、歩行時の初速度を正確に求め、積分誤差を軽減する手法が提案されている。佐川らは、足の爪先に装着した加速度センサ、ジャイロ、地磁気センサを用いて、3次元加速度を積分することによって、3次元的な移動量を推定する手法を提案している [18]。Foxlin らは、図 6 のように両足に絶対姿勢を計測可能な姿勢センサを装着することにより移動量を推定する Navshoe を提案している [19]。これらの手法では、歩行時に軸足となっている足の速度がゼロであると仮定し、加速度積分による速度誤差を除去することにより、移動量の推定精度を向上を試みているが、対象とする移動動作が歩行動作に限定されており、ユーザの動きに制限がある。

このように自律計測手法は、ユーザの装着したセンサによりユーザの動きを計測することによって、相対的な移動量を推定する手法である。ユーザの装着するセンサの導入コストのみで利用可能であるが、ユーザの歩数に応じて推定移動量に対する誤差が蓄積する。

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

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位置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ハイブリッド手法が提案されている。ハイブリッド手法とは、インフラにより初期位置を取得し、インフラが利用不可能な場所では、自律計測によって相対移動量の計測を行う。自律計測による移動量の推定では、蓄積誤差によって実際とは異なる位置に推定されてしまうため、再びインフラを利用可能な場所に到達した時点でインフラにより絶対位置を取得することにより、自律計測による蓄積誤差を補正する。

赤外線センサ，RFID+歩数計測

Tenmokuらは、環境インフラとして赤外線センサとRFID、自律計測に歩数計測を用いるARISEというシステムを提案した[10]。図7に示すように環境中に赤外線ビーコンとRFIDタグを設置し、それらのセンサに位置情報を記憶させ、ユーザが装着する赤外線ビーコン受信機とRFIDタグリーダを用いてIDを識別することでユーザの位置の特定を行う。自律計測では、コンパスを用いてユーザの歩行方向を計測し、加速度センサを用いてユーザの歩行動作の検出を行っている。

RFID+超音波

Okudaらは、環境中にRFIDタグをインフラとして設置することで絶対位置を取得し、ユーザが超音波送受信機と圧力センサ、姿勢センサを搭載した下駄を装着して歩行することで自律計測を行うシステムを提案した[20]。足の接地判定を圧力センサにより行い、歩幅を超音波の送信から受信までの到達時間を計測することによって推定している。

マップマッチング+歩数計測

Kourogilらが提案したWeavyは、利用環境の一部をあらかじめ撮影した画像データベースを構築し、ユーザの装着したカメラの映像との位置合わせを行うマップマッチングによって、絶対位置・姿勢を取得する[21]。またマップマッチングが利用できない場所では、歩数計と方位磁気センサを用いて相対的な移動量の推

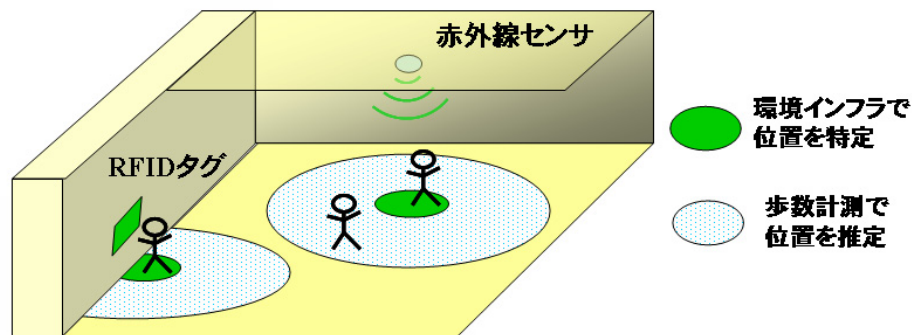


図 7 ARISE[10] の位置推定手法

定を行っている。

このような環境インフラによる絶対位置の取得と自律計測による相対移動量の推定を組み合わせたハイブリッド手法により，広域環境でのユーザの位置推定が可能となる。

2.2 人間の動作計測に関する従来研究

自律計測手法は，ユーザの装着したセンサによりユーザの動きを計測することによって移動量を推定する手法であるが，計測対象とするユーザの動きに制限がある。一方，同じくセンサを体に身につけることにより，人間の動きを計測し，3次元的な自由な動作を計測するシステムとしてモーションキャプチャが利用されている。モーションキャプチャシステムは主に，全身に取付けた計測点の3次元座標と姿勢を計測を目的としたものである。最終的な計測データの出力としては，被験者をリンク機構でモデル化して各リンクの3次元的な位置・姿勢データに変換するのが一般的である。

鈴木らは，図8(a)のような高解像度カメラ10台からなる光学式モーションキャプチャスタジオ内で，図8(b)に示すような位置・姿勢を計測したい部位にマーカの付いたスーツを着用することにより動作の計測を行う手法を提案している [22]。



(a) motion capture studio



(b) motion capture suit

図 8 鈴木らのモーショキャプチャの使用環境とユーザの概観 [23]

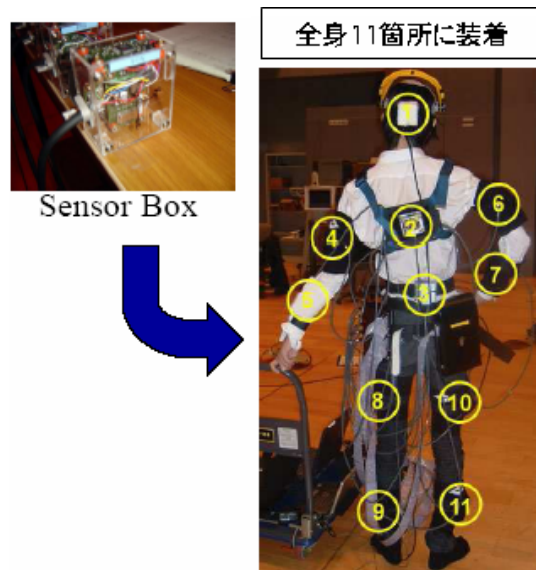


図 9 金杉らのモーショキャプチャのユーザの概観 [24]

この手法は、運動学モデルとマーカ取付け数・位置が互いを限定することのない汎用的なモーションキャプチャシステムとなっており、マーカの数を増やすにしたがって、より精度高く位置・姿勢の推定が可能となり、豊かな表現の認識が可能となっている。しかし、利用環境がモーションキャプチャスタジオ内に制限されてしまう。金杉らは、小型センサを人体に取り付け、ウェアラブルセンサとして自律的に計測を行うモーションキャプチャシステムを提案している [23]。このシステムでは、図 9 のように加速度センサとジャイロセンサからなるセンサボックスをユーザの体に装着することにより、歩行動作を計測している。しかし、人体の姿勢の推定を目的としている。

このようなモーションキャプチャを使った手法は、計測目的に応じてユーザが運動学モデルやマーカ配置を決定し、ユーザの位置・姿勢を計測する。ユーザの装着するマーカの数を増やすことにより、精度よく位置・姿勢を計測することが可能となるが、一般的に複数のカメラで撮影した画像を用いてマーカの 3 次元位置を計算するため、利用環境がスタジオのような限られた空間に限定される。

2.3 本研究の位置付け

図 10 はユーザの動作の自由度、広域環境への適用のしやすさ、計測精度の 3 つの特徴に注目し、位置・姿勢推定手法の関係を示しており、表 1 に従来研究の特徴とそれに対する本研究の位置付けを示す。モーションキャプチャを利用した手法では、関節等に多数のセンサを付けることによりユーザの全身の動きを正確に把握できるため人間が可能な動作はほぼ全て行なえるということから、ユーザの動作に対する制限が非常に少ない。しかし、利用環境がセンサを捕らえる複数のカメラで囲まれたスタジオ内という狭い空間に限られる。環境インフラを用いた手法では、モーションキャプチャほどの精度は無いが、絶対的な位置・姿勢が取得できるということから精度は高いといえる。ユーザの動作に関しては、画像マーカを利用する場合は、ユーザの激しい動きにより、マーカがぶれにより正しく撮影することが困難な場合には、マーカの ID の認識が困難であるため、ユーザの動作は歩き状態に限られる。一方、赤外線センサを利用する場合は、赤外線の送受信が可能な移動であれば絶対位置の取得が可能であることから、走り状

態にも対応可能であると考えられる。しかし、環境インフラのみでユーザの自己位置を密に推定する場合には、利用環境の範囲の密度が設置コストに比例して増大してしまうといったことから、広域環境への適応には不向きである。

自律計測による手法は、体に身につけたセンサによりユーザの動きを計測することによって相対的な位置を推定する手法であり、ユーザの歩数に応じて推定移動量に対する誤差が蓄積するといったことから、モーションキャプチャや環境インフラと比べて精度は劣る。また多くの手法は、計測対象とする動作を歩行動作のみに限定していることから、ユーザの動作には制限がある。しかし、センサにより前提とする動作を計測可能な限りユーザの自己位置推定が可能であると考えられ、広域環境への適応力は高い。現在、広域環境でユーザの自己位置推定を行う試みとして、インフラによる絶対位置取得と自律計測によるユーザの相対位置の推定を併用することで位置推定誤差の蓄積を軽減するハイブリッド手法を用いることが現実的であると考えられる。ハイブリッド手法を用いる場合には、広域環境への適応力の高い自律計測の精度が向上すれば、誤差を補正する環境インフラの設置間隔を広くすることが可能であり、環境インフラの問題である設置コストの問題も解決できる。しかし、ハイブリッド手法に従来の自律計測手法を用いる限りユーザの移動動作は歩行動作のみに限定されてしまう。

そこで本研究では、ユーザの動きに制限のない自律計測手法の確立を目指し、歩き状態だけでなく、走り状態にも対応可能な自律計測による自己位置推定手法を提案する。提案手法を用いることにより、図 10 に示すように、自律計測におけるユーザの自由度は広がり、それに伴いハイブリッド手法を用いる際のユーザの自由度も広がることを期待できる。具体的には、従来の自律計測手法の中でも多彩な動作を計測可能な文献 [17] の手法を拡張することによって実現する。ユーザが装着した 3 次元位置・姿勢センサで直接両足の相対位置を計測し、絶対姿勢センサで腰の姿勢を連続的に計測することにより世界座標系におけるユーザの相対移動量を計測する。走り状態において、両足が地面から離れる期間では両脚が宙に浮く直前の腰の速度を初速度として放物運動しているとし、腰の移動量を計算することで、両足が地面から離れる期間におけるユーザの腰部の移動量を両足が地面から離れる期間の移動量として推定を行う。

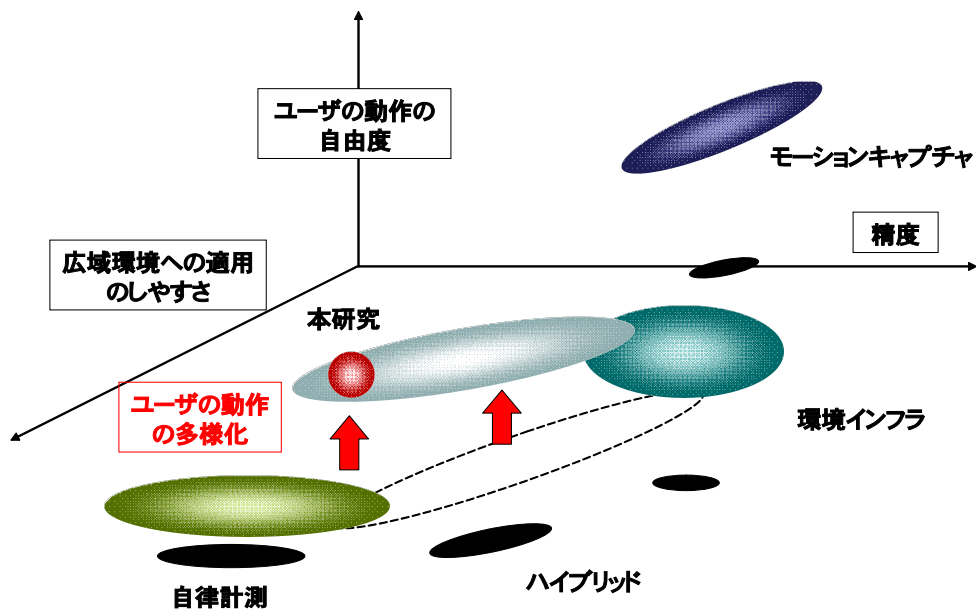


図 10 従来研究の関係と本研究の位置付け

表 1 従来研究と本研究との関係

分類	名称	ユーザーの動作	広域への適応のし易さ	精度
環境インフラ	画像マーカ	歩き状態	利用環境に比例してコストが増大するため不向き	絶対位置取得可能
	赤外線センサ			
自律計測	李ら	歩き状態	センサで前提とするユーザーの動作を計測できる限り適用可能	3[%]
	Konishiら			5~10[%]
	鵜沼ら			~4[%]
	Leeら			~3[%]
	濱口ら			~5[%]
	佐川ら			10[%]
	Navshoe			0.3[%]
ハイブリッド	ARISE	歩き状態	自律計測と同等	10[%]
	Okudaら			5[%]
	Weavy			6~8[%]
モーションキャプチャ	鈴木ら	ほぼ全ての運動	限定された空間でのみ使用可能なため不向き	絶対位置取得可能
自律計測	提案手法	歩き状態および走り状態	センサで前提とするユーザーの動作を計測できる限り適用可能	~8[%]

3. 3次元磁気センサと姿勢センサによる走り状態に対応した自己位置推定

本章では、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[17]の走り状態への拡張について述べる。3.1節では、本手法での計測対象について、3.2節では装着センサの構成について述べる。3.3節では走り状態に対応した自己位置推定手法について詳述し、3.4節で走り状態における推定移動量のためのキャリアレーション手法について述べる。

3.1 計測対象とする動き

本手法で計測の対象とするユーザの移動動作は歩き状態と走り状態である。本手法では、歩き状態と走り状態の動作計測として、軸足の踵と踏み出した足の踵の相対移動量、歩数計測として軸足が切り替わるタイミングをそれぞれ計測する。ここで歩き状態と走り状態の動作中における相違点を図11に示す。歩き状態と走り状態において異なる点は、両足が地面から離れる期間の有無である。提案手法では、両足が地面から離れる期間のユーザの動きを推定することで移動量を推定する。そのため、走り状態に限らず両足が同時に地面から離れる動作において計測が可能である。以下に本手法での前提条件を示す。

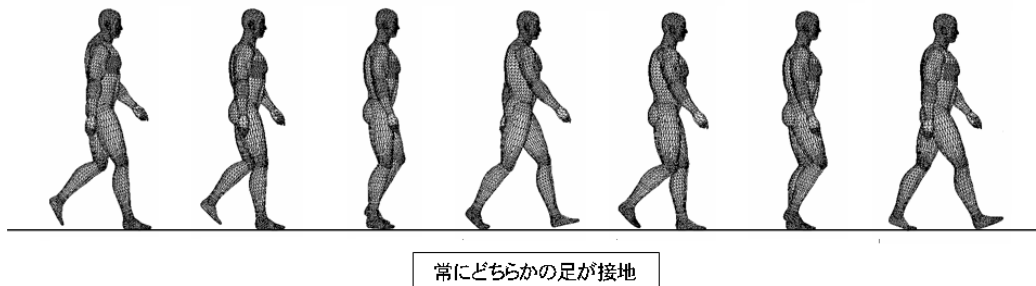
条件1 両足が地面から離れる期間では外力を受けない

条件2 足の接地面は水平面である

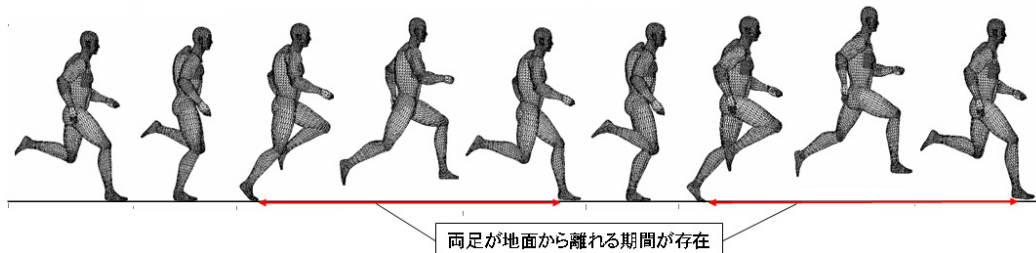
条件3 接地している足はスリップしない

3.2 装着センサ系の機器構成

提案システムは図12に示すとおり、文献[17]と同様に、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.: PATRIOT)と腰部の絶対姿勢を計測するためのセンサ(Intersense, Inc.: InertiaCube²)、および脚の



(a) 歩き状態の1周期



(b) 走り状態の1周期

図 11 歩き状態と走り状態の相違点

接地のタイミングを検知するためのマイクロスイッチで構成される。本システムは、ユーザの腰部に3次元磁気センサのトランスミッタ、両足の脛部にレシーバを装着することにより、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。以下にユーザが装着する機器について詳述する。

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。トランスミッタ座標系におけるレシーバの3次元位置とオイラー角を最大30Hz(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



図 12 装着センサ系の機器構成

が 2.54mm，方向が 0.75° である．図 12 のように，トランスミッタを腰部，各レシーバは床面によってトランスミッタが発生する磁場が歪むことを回避するため，踵からの距離が変化せず，床面からもっとも離れた位置である脛の最上部に取り付ける．

3.2.2 姿勢センサ

本研究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磁力計から得られる地磁気を統合して世界座標系における 3 軸周りの回転角を出力する．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 180Hz で，静的精度 1.0° で計測することが可能である．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本センサを固定する．

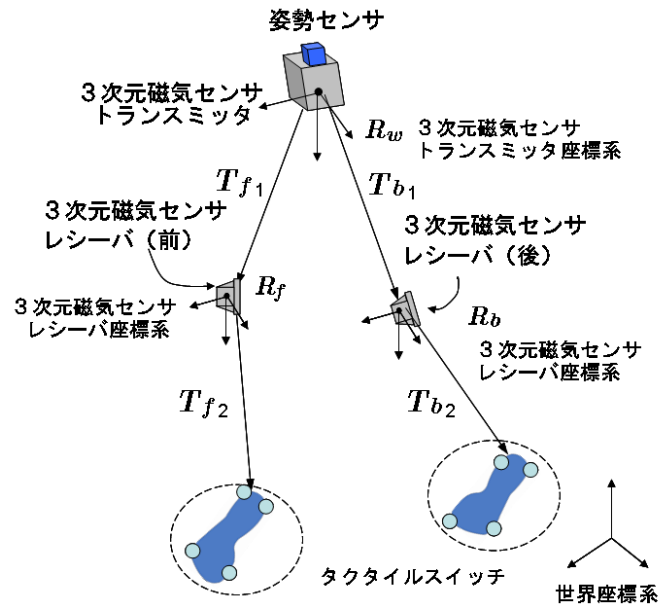


図 13 提案手法の機器構成と座標系

3.2.3 マイクロスイッチ

立脚の判定を行うため、靴の踵と爪先の側面にマイクロスイッチを取り付け、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される。本システムでは踵と爪先にそれぞれスイッチが取り付けられているので、踵と爪先の接地判定を独立に計測することが可能である。

各センサは、姿勢センサ、3次元磁気センサの本体とトランスミッタ、計算機をウエストバッグに入れ、腰部に装着する。重さは1.8 kgである。また3次元磁気センサのレシーバを脛部に固定する。

3.3 走り状態に対応した自己位置推定法

本研究では、文献 [17] の手法を両足が地面から同時に離れる動作にも対応可能な自己位置推定手法に拡張する。

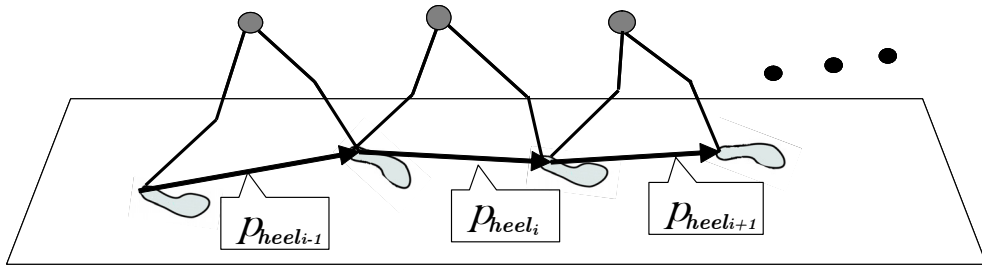


図 14 歩き状態のステップベクトル

図 13 中の各記号は

- 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 (磁気トラッカ・レシーバ位置)
(磁気トラッカ座標系)
- R_f, R_b :脛の姿勢 (磁気トラッカ・レシーバ姿勢)
(磁気トラッカ座標系)
- T_{f2}, T_{b2} :脛から踵までの距離 (定数)
(磁気トラッカ・レシーバ座標系)

を表し、各変数の添字 f, b は着地足、踏み切り足をそれぞれ示している。また、添え字 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。

文献 [17] の手法でのステップベクトルは図 14 のように示され、以下のように定義されている。

$$\begin{aligned}
 p_{heel} &= p_f - p_b \\
 &= \left(R_w(T_{f1} + R_f T_{f2}) - R_w(T_{b1} + R_b T_{b2}) \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

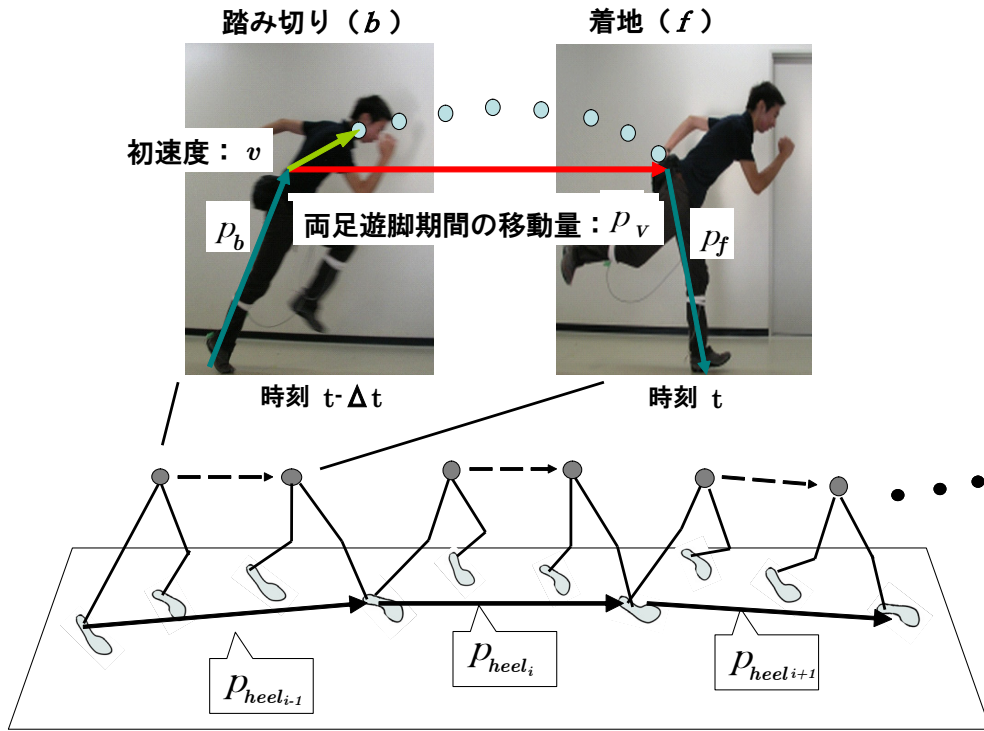


図 15 両足が地面から離れる期間の腰の移動量とステップベクトル

これに対し，本研究では，式 (1) を拡張する際に，加算する移動量として両足が地面から離れる期間に入る直前の踏み切り足の踵から両足が地面から離れる期間を経て着地した足の踵までの相対移動量を推定する．ステップベクトルは図 15 に示すように，踏み切る直前の踵から腰までのベクトル p_b ，着地した直後の腰から踵までのベクトル p_f ，両足が地面から離れる期間の腰の移動量を表すベクトル p_v を用いて，以下のように定義する．

$$\begin{aligned}
 p_{heel} &= (p_f - p_b) + p_v \\
 &= \left(R_{wt}(T_{f1} + R_f T_{f2})_t - R_{w(t-\Delta t)}(T_{b1} + R_b T_{b2})_{t-\Delta t} \right) + p_v \quad (2)
 \end{aligned}$$

文献 [17] の手法から本手法への拡張において最も大きな変化は、踏み切る瞬間と着地する瞬間の時刻とその間の時間を考慮する点である。文献 [17] の手法では両足が地面から離れる期間が存在せず、ステップベクトルの計算を行なうのは着地する瞬間の時刻である。ここでは比較のために、歩き状態における軸足を両足が地面から離れる状態と同様に踏み切り足、歩き状態において踏み出した足を着地足としている。これは式 (2) において、両足が地面から離れる期間の時間を表す Δt を 0 とすることで式 (1) と同様の意味を持つことから分かる。式 (2) は Δt が存在するなら両足が地面から離れている期間が存在するステップベクトルを、 Δt が 0 ならば文献 [17] の手法によるステップベクトルを表すことが可能であり、文献 [17] の手法を生かしつつ拡張しているといえる。ここで、図 15 の記号の意味は以下の通りである。

Δt : 両足が地面から離れる期間の時間

p_V : 両足が地面から離れる期間の腰の移動量

・地面に対して水平方向 $p_V = v\Delta t$

・地面に対して垂直方向 $p_V = v\Delta t - 1/2g\Delta t^2$

両足が地面から離れる期間の腰の移動量 p_V は、両足が宙に浮く瞬間から次の足が接地するまで、速度 v を初速度として放物運動していると仮定し、腰の移動量を速度の積分により計算する。腰の初速度 v は、両足が地面から離れる期間に切り替わる直前の単位時間当たりの世界座標系の腰の移動量により推定する。具体的に v は、

W_i : 計測周期 i 番目の腰の位置

dt : 計測周期

腰の初速度 $v = (W_i - W_{i-1})/dt$

として表され、両足が地面から離れる期間は地面に対して水平方向へは v の水平成分で並進し、垂直方向へは v の垂直成分に重力加速度を考慮し、放物運動を行

う．なお，初速度の向きと大きさを滑らかに推定するために，両足が地面から離れる期間に入る直前の速度だけを用いるのではなく，それ以前の数周期の速度を平均化し，両足が地面から離れる期間の初速度とする．このようにして得られた両足が地面から離れる期間の移動量を従来手法でのステップベクトルに加えることにより，式 (2) に示すように拡張し，両足が地面から離れる期間が存在する移動動作にも対応した位置の推定を試みる．

3.4 走り動作計測に対応したキャリブレーション

本手法で想定している足の動きモデルでは，後ろ足が踏み切る際，踵が接地していることが前提である．しかし実際には，図 16(a) に示す通り踏み切り時に踵の浮き上がりが発生する．これは図 16(b) に示すように，踵の浮き上がり量と同じだけ腰も移動しているため，両足が地面から離れる期間の移動量を推定するための腰の初速度に影響する．また踵浮き上がり量は，走り状態における速度や，歩幅の差異などの個人差によって異なるため，同じ経路を走った場合でも推定される位置がユーザによって異なる可能性がある．そこで，両足が地面から離れる直前の速度 v を正確に求め，推定移動量を補正するために踵に取り付けたマイクロスイッチが OFF になってから，爪先のマイクロスイッチが OFF になるまでの踵の浮き上がり量のキャリブレーションを行う．走り状態における踵の浮き上がり量は事前のキャリブレーション実験における，進行方向の平均速度と誤差の関係から推定を行う．以下にキャリブレーション方法について詳述する．

3.4.1 キャリブレーション実験時の計測対象

キャリブレーション実験の際，ユーザは距離が既知な経路を一定の速度で複数回走り，各回ごとの速度を変化させて走る必要がある．その際に以下のようなデータを走った回数分計測する．

- 腰の絶対姿勢，足と腰の相対位置関係（姿勢センサ，3次元磁気センサにより計測）

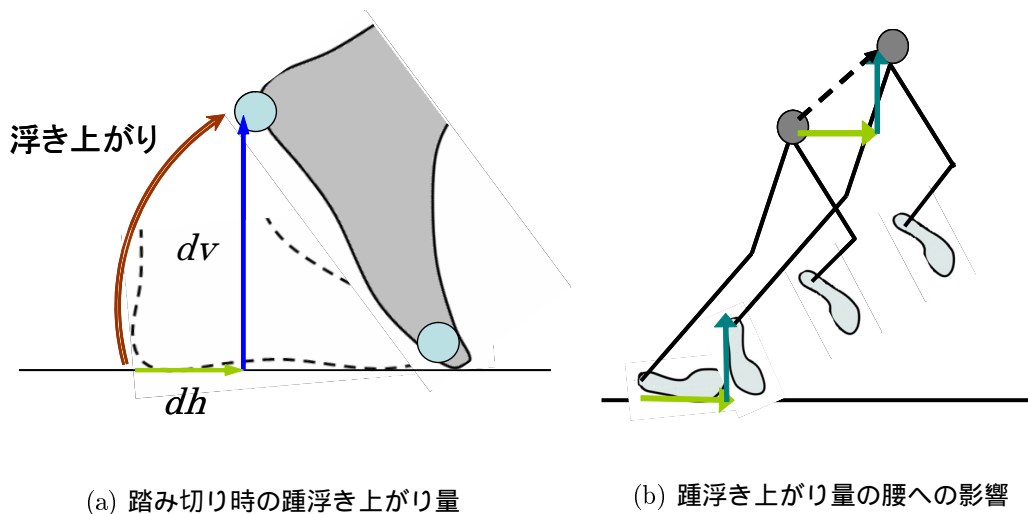


図 16 踵浮き上がり量と腰への影響

- 経路を走るのに要した時間（ストップウォッチにより計測）
- 歩数（マイクロスイッチにより計測）

これらの計測データから，キャリブレーション前の進行方向速度および推定移動量，実際の進行方向速度を算出する．これらの関係を利用することにより踵浮き上がり量を推定する．

3.4.2 踵浮き上がり量の推定方法

進行方向速度と推定移動量の誤差の間に相関が存在すれば，その関係を利用して踵の浮き上がり量の推定が可能であるという仮定に基づき，30 m の直線経路を走行した結果（データ）の進行方向速度と実際の速度，進行方向誤差，鉛直方向誤差の関係を図 17 に示す．図 17(a) において，キャリブレーション前の進行方向速度は踵浮き上がり量を考慮していないので実際の進行方向速度とは異なるが，

キャリブレーション前の進行方向速度と実際の進行方向速度の間には一定の相関があり，安定して推定可能であることが分かる．また図 17(b)，図 17(c) からキャリブレーション前の進行方向速度と進行方向の誤差，鉛直方向の誤差の間には比例関係があることが分かる．この関係から，進行方向速度に対し，誤差は線形に変化すると仮定し，図 16(a) に示す踵浮き上がり量 dh ， dv を，以下の様に定義することにより，

$$dh = \text{進行方向の誤差} / \text{歩数}$$

$$dv = \text{鉛直方向の誤差} / \text{歩数}$$

あらかじめ各個人において実際の走りと踵浮き上がり量の関係を求めておき，キャリブレーション前の進行方向速度に応じた一步あたりの踵浮き上がり量の推定を行なう．

図 18 に異なるユーザで 30 m の直線経路を利用してキャリブレーション実験を行った際の進行方向速度と誤差の関係を示す．走り方，体格の異なるユーザに対しても同様に，キャリブレーション前の進行方向速度と進行方向の誤差，鉛直方向の誤差の間には比例関係があることが分かる．ユーザに応じて比例の傾きが変化することが推測されるので，この比例関係を利用することにより，実際にユーザごとにキャリブレーション前の進行方向速度に応じた一步あたりの踵浮き上がり量の推定を行なうことが可能である．

3.4.3 腰の初速度 v の補正方法

図 16(b) に示すように，踵の浮き上がり量と同じだけ腰も移動しているため， dh ， dv を腰部の移動量に加算することでより正確に腰の初速度を推定する．踵浮き上がり量によるキャリブレーションを適用する際は，両足が地面から離れる直前の数周期のキャリブレーション前の進行方向速度を平均化し，その速度に応じた踵浮き上がり量を内挿することによって両足が地面から離れる直前の速度を

補正する．具体的には，

v_x, v_y : v の水平成分

v_h : v の水平成分の大きさ

θ : v_h と v_x の成す角

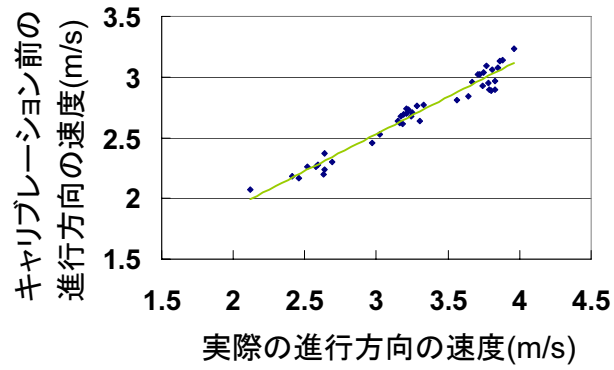
とすると，踵浮き上がり量 d_{heel} は，

$$\mathbf{d}_{heel} = [dh \cos \theta, dh \sin \theta, dv]$$

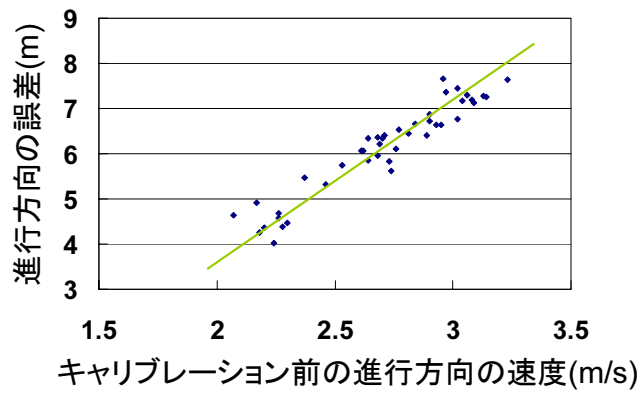
と表せるので，補正後の速度 v' は

$$\mathbf{v}' = \frac{(\mathbf{W}_i - \mathbf{W}_{i-1}) + \mathbf{d}_{heel}}{dt}$$

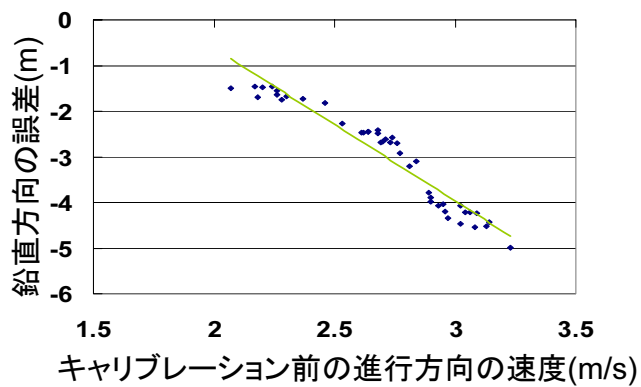
として求めることができる．



(a) キャリブレーション前の進行方向速度と実際の進行方向速度の関係

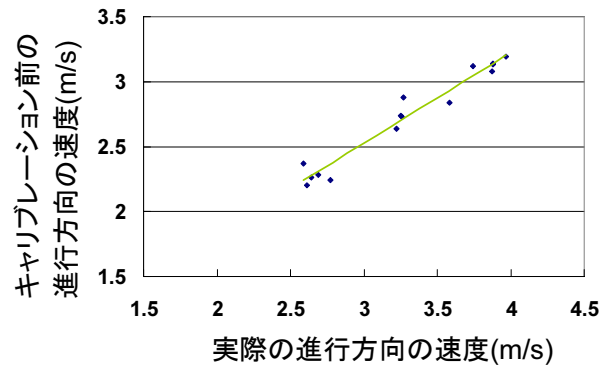


(b) キャリブレーション前の進行方向速度と進行方向の誤差の関係

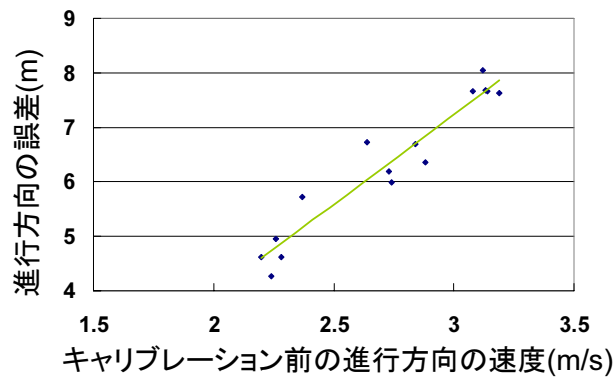


(c) キャリブレーション前の進行方向速度と鉛直方向の誤差の関係

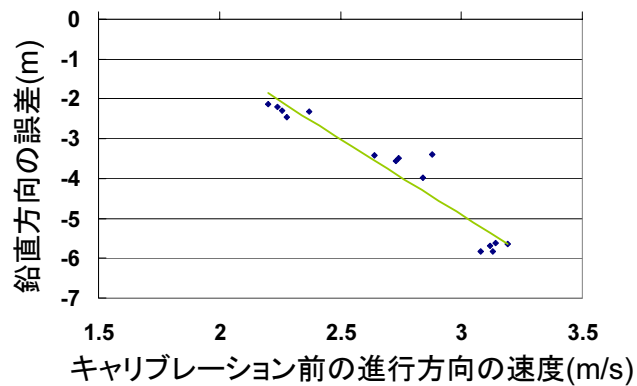
図 17 進行方向速度と誤差の関係



(a) キャリブレーション前の進行方向速度と実際の進行方向速度の関係



(b) キャリブレーション前の進行方向速度と進行方向の誤差の関係



(c) キャリブレーション前の進行方向速度と鉛直方向の誤差の関係

図 18 異なるユーザの進行方向速度と誤差の関係

4. 実験

本章では，4.1 節で踵の浮き上がり量の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2つの異なる環境で自己位置推定を行った．

- 水平面上の直線走り (30 m)
- 水平面上の曲線走り (直径約 6 m の円状)

これらの走り状態それぞれについて，踵の浮き上がり量のキャリブレーションにより水平方向，高さ方向の移動量が補正されることを確認するため，速度を変えて一定の速度で9回試行した結果を利用してパラメータ dh ， dv と進行方向速度との関係を求める．次に，求めた関数を用いて各実験を2回試行し，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)

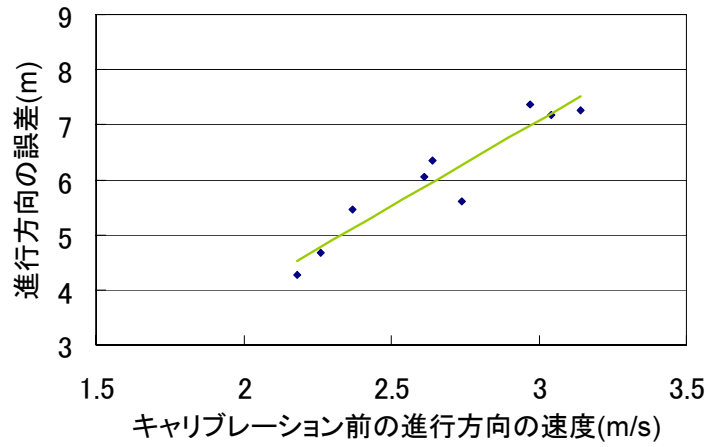
$$\text{終点の推定位置} - \text{終点の真値} [\text{m}]$$

総移動量に対する位置推定誤差率

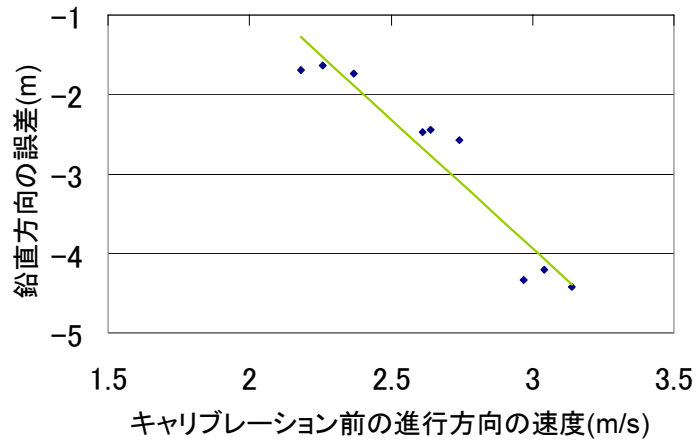
$$\frac{\text{終点の位置推定誤差}}{\text{総移動量}} [\%]$$

4.1.1 キャリブレーション実験

30 m の直線経路を9回走った場合の進行方向速度と進行方向誤差の関係を図19(a)に，進行方向速度と鉛直方向の誤差の関係を図19(b)に示す．これらの関係から推定される踵浮き上がり量 dh ， dv と進行方向速度との関係を導き，以下に行う自己位置推定実験に適用することにより推定移動量の補正を試みる．



(a) キャリブレーション前の進行方向速度と進行方向誤差の関係



(b) キャリブレーション前の進行方向速度と鉛直方向の誤差の関係

図 19 キャリブレーション実験時の進行方向速度と誤差の関係

4.1.2 直線走り

30 m の直線経路に対し自己位置推定を行った結果を表 2，各試行に対する補正前後の移動軌跡を図 21 に示す。

試行 1 の進行方向の平均速度は 2.23 m/s であり，終点の位置推定誤差は水平方向で 4.40 m，鉛直方向の位置推定誤差は 1.56 m 発生しているが，補正によって終点の水平方向の位置推定誤差は 0.43 m，鉛直方向の位置推定誤差は 0.04 m となった。また試行 2 の進行方向の平均速度は 2.90 m/s であり，終点の位置推定誤差は水平方向で 6.16 m，鉛直方向の位置推定誤差は 3.84 m 発生しているが，補正によって終点の水平方向の位置推定誤差は 1.63 m，鉛直方向の位置推定誤差は 0.41 m となった。両試行において，速度が変わった走りに対して水平方向，鉛直方向ともに十分に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 29.57 m，31.64 m であり，直線走り時の総移動量に対する位置推定誤差はそれぞれ 1.4%，5.4%であった。従来手法と比較しても良好な精度で位置推定が行えている。

4.1.3 円状走り

直径 6 m の円状経路を図 22 のように始点と終点が一一致するように走った。踵浮き上がり量は，図 19 の関係を用いて推定を行う。自己位置推定を行った結果を表 22 に，補正前後の移動軌跡を図 23 に示す。

試行 1 の進行方向の平均速度は 2.14 m/s であり，終点の位置推定誤差は水平方向で 0.92 m，鉛直方向の位置推定誤差は 0.89 m 発生しているが，補正によって終点の水平方向の位置推定誤差は 0.75 m，鉛直方向の位置推定誤差は 0.41 m となった。また試行 2 の進行方向の平均速度は 2.52 m/s であり，終点の位置推定誤差は水平方向で 0.74 m，鉛直方向の位置推定誤差は 1.34 m 発生しているが，補正によって終点の水平方向の位置推定誤差は 0.99 m，鉛直方向の位置推定誤差は 0.11 m となった。走った円の円周 (18.84 m) を真値とすると，円状走り時の総移動量に対する位置推定誤差はそれぞれ 4.6%，5.3%であった。両試行において，直線走りと同様に速度が変わった走りに対して水平方向，鉛直方向ともに十分に補正できていることが分かる。また直線走り時のキャリブレーションから得られる

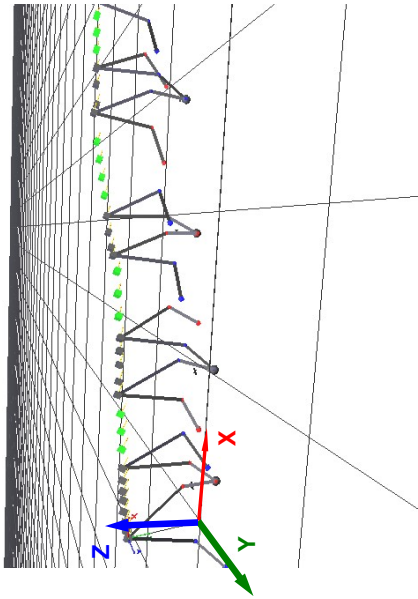


表 2 直線走り時の自己位置推定結果

	x方向		y方向		z方向	
	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後
試行 1	24.57361	28.6304	-7.19921	-7.43091	-1.56184	0.041321
試行 2	22.73468	30.4234	-7.51377	-8.67425	-3.8473	-0.40871

図 20 直線走り時における腰と足の移動推定結果

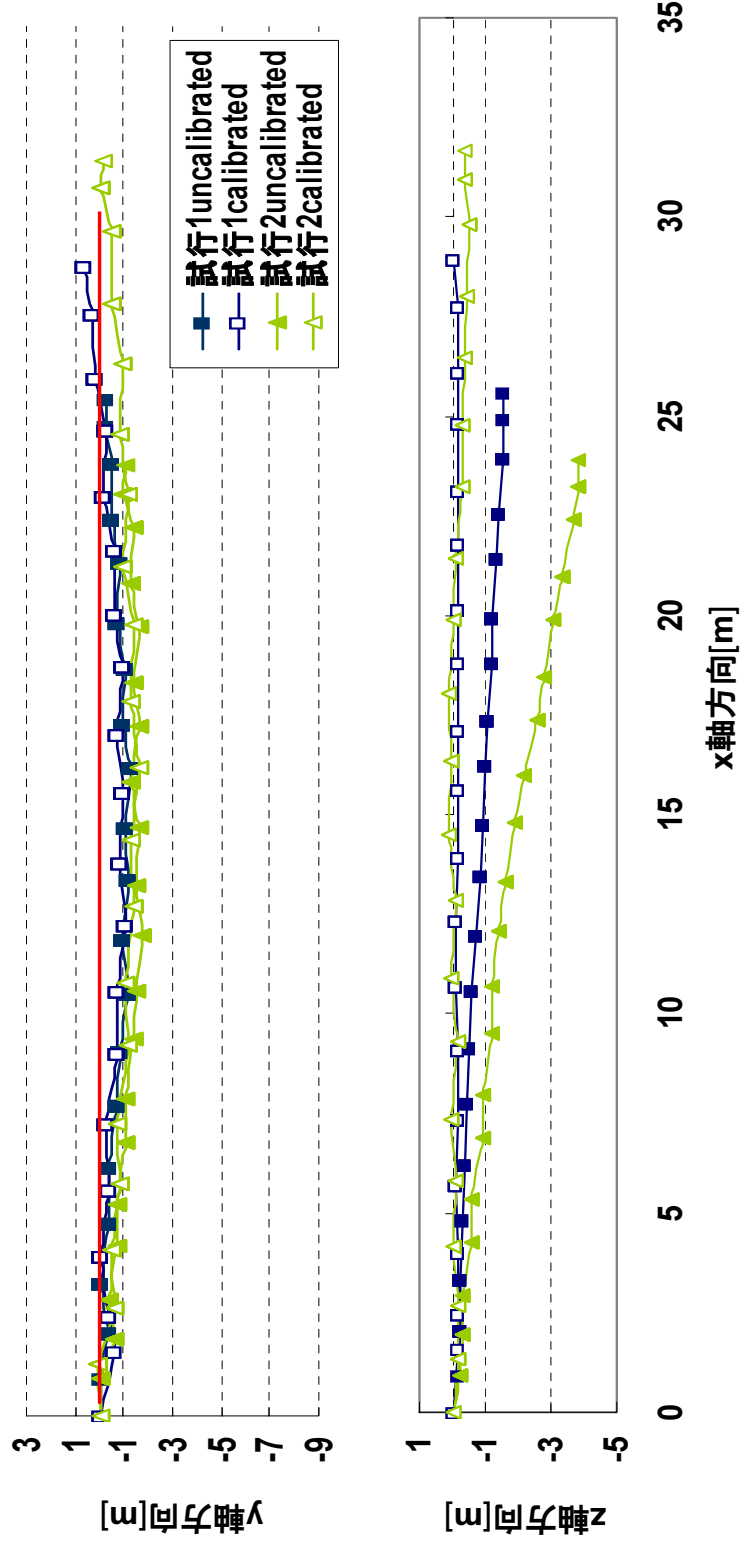


図 21 直線走り時の移動軌跡

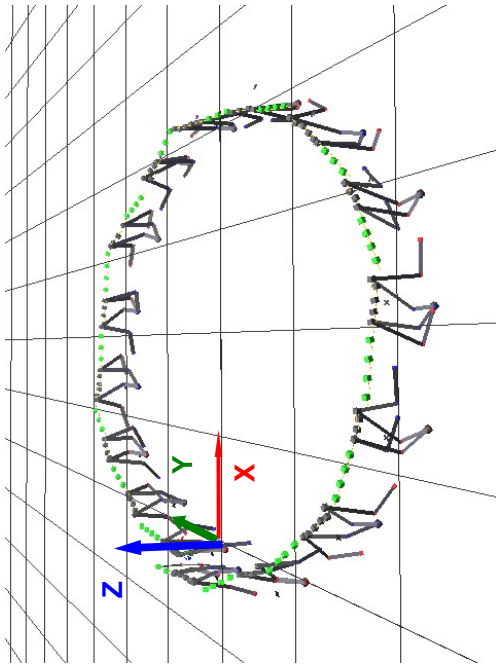


図 22 円状歩き時における腰と足の移動推定結果

表 3 円状歩き時の自己位置推定結果

	x方向		y方向		z方向	
	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後
試行 1	-0.75156	-0.74465	-0.53204	-0.58805	-0.89078	-0.41681
試行 2	-0.74234	-0.99457	-0.00446	-0.01106	-1.1623	-0.11715

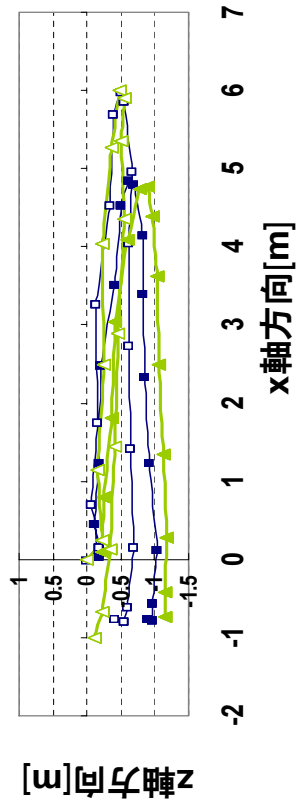
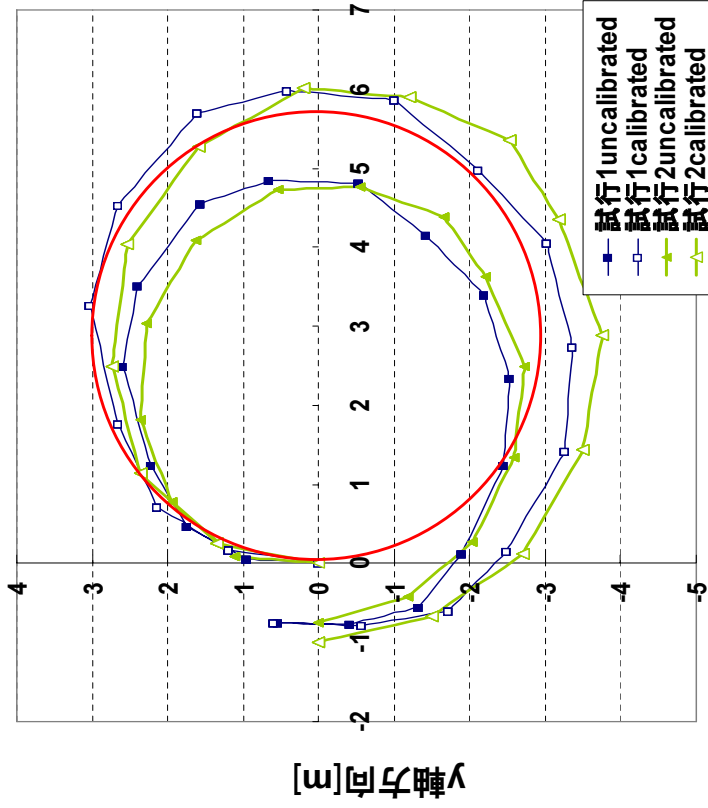


図 23 円状歩き時の移動軌跡

進行方向速度と誤差との関係を円状走りに適用することにより補正可能であることも分かった。

4.1.4 考察

提案手法によって自己位置推定を行った結果、直線走り時では実距離に対して4%程度の誤差で推定が行うことができた。円状走り時では、鉛直方向の誤差に関しては踵浮き上がり量を利用した補正によって、0.1mまで誤差を低減できたが、水平方向の誤差に関しては補正によって誤差が大きくなったという結果が得られた。しかし、終点での位置推定誤差は大きくなったが、途中経路での位置推定は踵浮き上がり量を考慮することにより正しく推定できていると考えられる。従来手法の歩き状態における位置推定精度と比較すると、実用的な精度で自己位置推定が行えているといえる。

4.2 様々な動作・経路における自己位置推定実験

4.1節で得られた速度と誤差の関係をを用いた踵浮き上がり量のキャリブレーションを利用して、以下のような状態で自己位置推定実験を行った。

- 3段跳び
- 反復横跳び
- 歩き・走り状態の混在した経路

4.2.1 3段跳び

助走を10mとして3段跳びの計測を行った。実験環境の座標系は図25のようになり、移動軌跡を図26に示す。踏み切りまでの水平方向の誤差は0.05m、鉛直方向の誤差は0.55mとなっており、直線走り時と同様な精度で位置推定が行なっている。計測された跳躍距離の真値は6.5mであるので総移動量は16.5mとすると、総移動量に対する位置推定誤差は1.2%であった。踏み切った直後の進

行方向速度はキャリブレーション時の速度にはない 3.6 m/s であったが、速度と誤差の関数を当てはめることにより比較的精度良く推定が行なわれている。

4.2.2 反復横跳び

腰の向きが進行方向と一致せず、両足が地面から離れる期間が存在する運動として図 27 に示すような幅 1 m 間隔で始点と終点が一致する反復横跳びを行なった。キャリブレーション時の進行方向速度および誤差を図 28 における y 軸方向の速度と誤差に置き換えて踵浮き上がり量を利用した移動軌跡を図 29 に示す。水平方向の誤差は 0.31 m、鉛直方向の誤差は 0.20 m であった。また総移動量は 10 m であり、総移動量に対する位置推定誤差は 3.6 % であった。図 29 を見ると鉛直方向の誤差が均等に増えていくのがわかる。これは反復横跳びを行なっている間の速度と鉛直方向誤差の関係が、キャリブレーション時の関係とは異なっていたためと考えられる。

4.2.3 歩き・走り状態の混在した経路

歩き状態と走り状態の混在した移動を行なった場合の経路を図 30 に示す。始点を本学情報科学研究科のエントランスとし、大講義室前の廊下を通過して B 棟のエレベータホールまで 70 m 移動した後、始点に戻るよう移動している。また移動軌跡を図 31 に示しており、図中の 3 箇所走り状態での移動を行なった。走り状態経路 1 では 25 m の走りに対して推定移動量は 22.98 m であり、走り状態経路 2 では 21 m の走りに対して推定移動量は 19.68 m、走り状態経路 3 では 40 m 走りに対して推定移動量は 37.56 m となり、それぞれの経路の移動距離に関して、2.0 %、6.7 %、6.1 % の誤差が発生している。推定された移動経路に関して、廊下からエレベータホールに左折する際の経路が直角になっていないのは、付近に発電室があり、局所的に磁場がゆがむことによって姿勢センサの絶対方位に影響を与えていることが原因と考えられる。始点と終点間の距離は水平方向に関して 6.18 m、鉛直方向に関して 0.29 m であり、始点から終点までの総移動量は 124.1 m であったので、総移動量に対する位置推定誤差は 4.9 % であった。

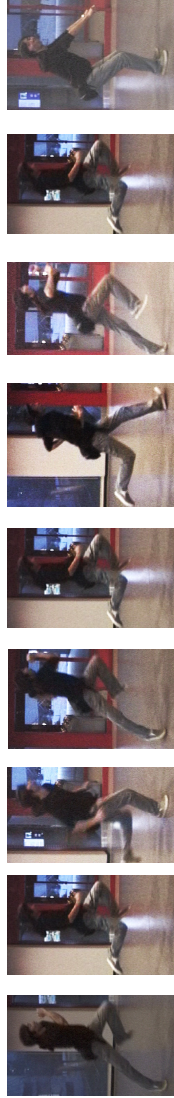


図 24 実際の 3 段跳びの様子

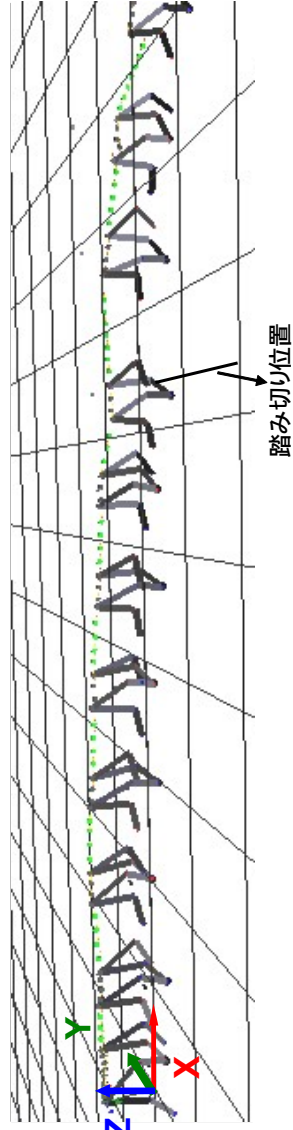


図 25 3 段跳び時における腰と足の移動推定結果

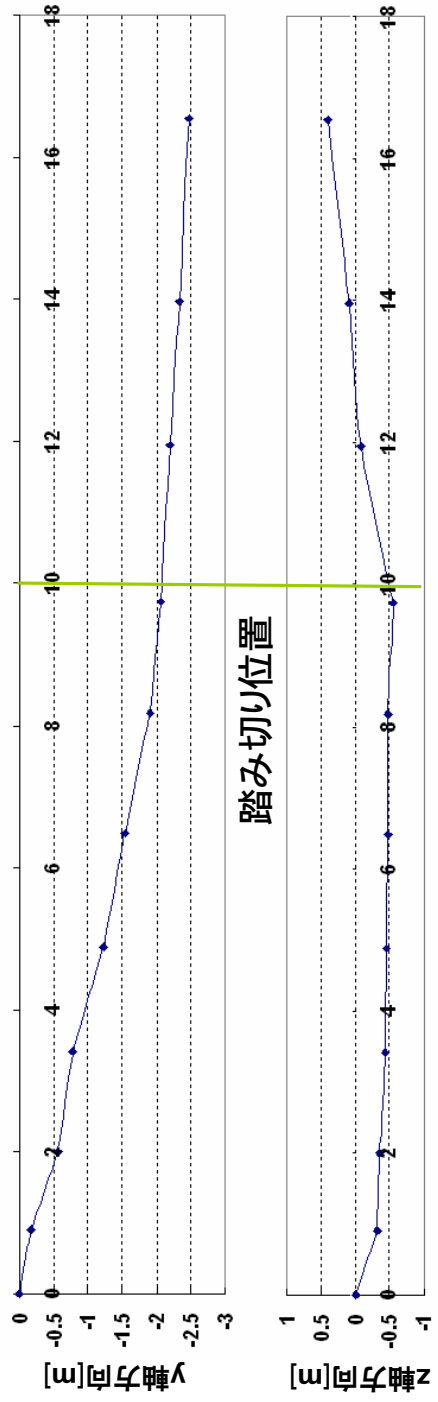


図 26 3 段跳び時の移動軌跡

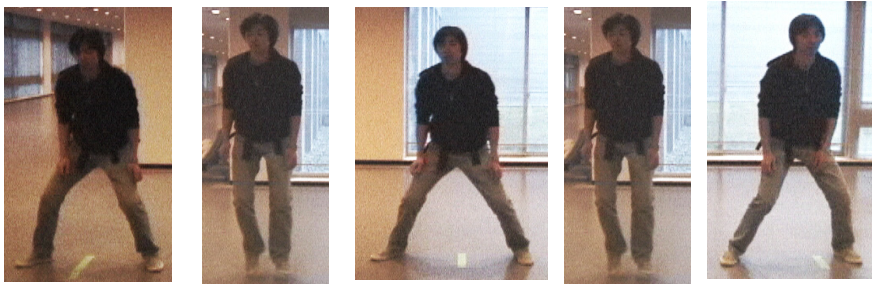


図 27 反復横跳び時における腰と足の移動推定結果

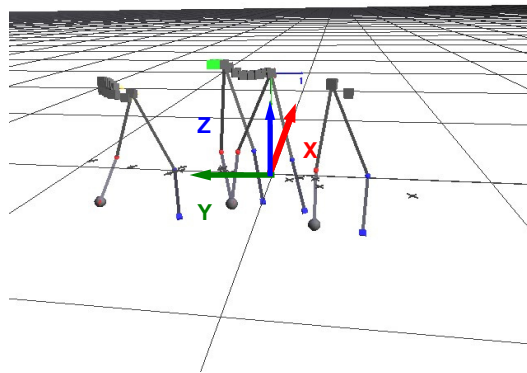


図 28 実際の反復横跳びの様子

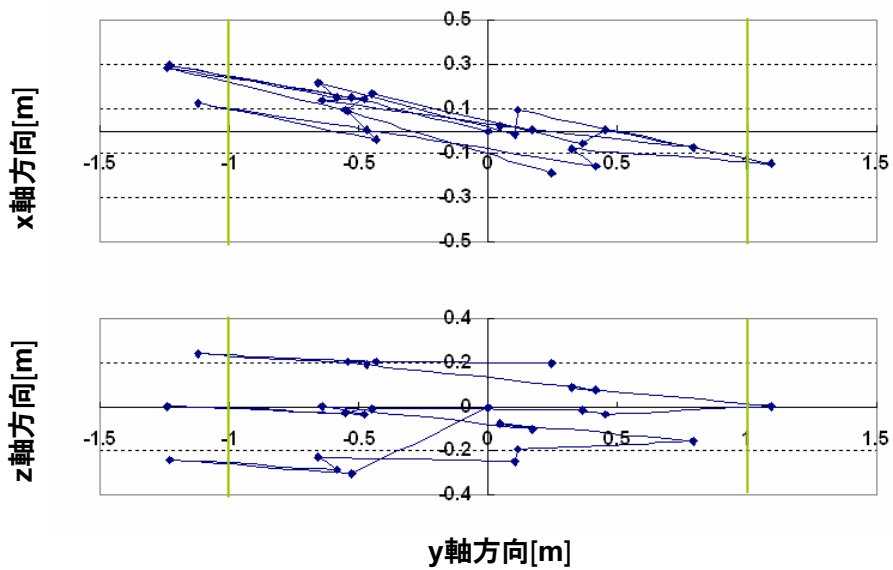


図 29 反復横跳び時の移動軌跡

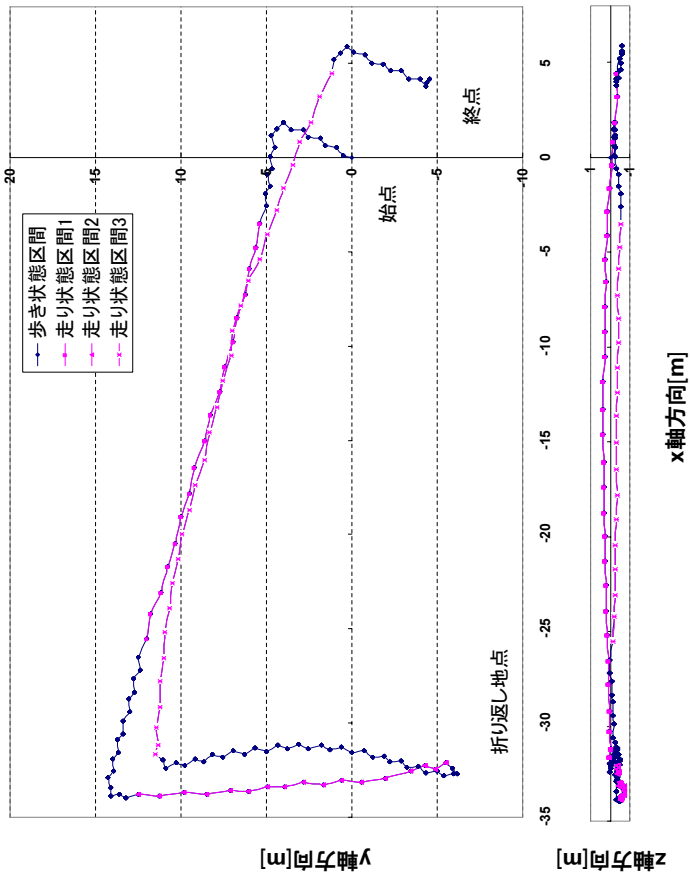


図 31 歩き・走り状態の混在した移動時の移動軌跡

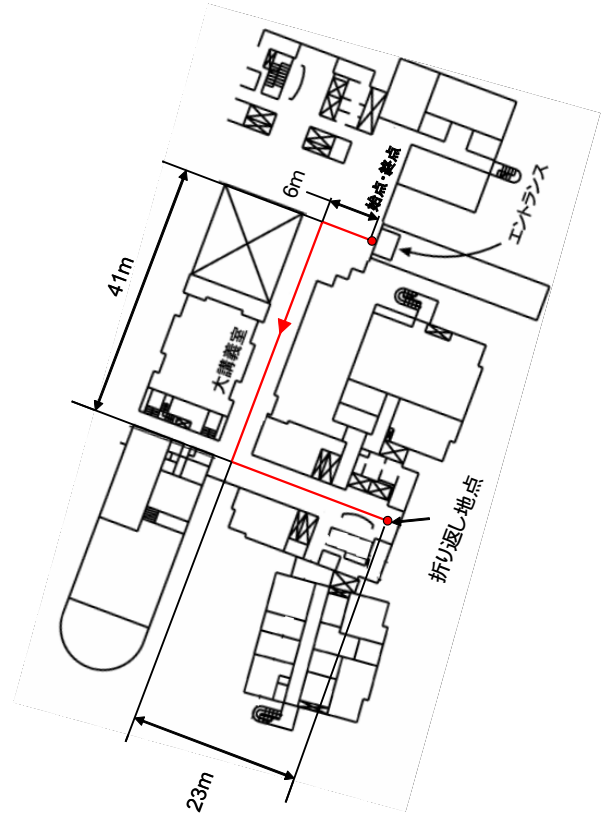


図 30 歩き・走り状態の混在した移動時の経路

4.2.4 考察

提案手法を用いて跳躍，進行方向が腰の向きと一致しない移動，歩き状態と走り状態を交えた長距離の移動の3種類の状態で実験を行なったところ，移動距離に対して数%程度の誤差で自己位置を推定することができた．本手法を用いることにより一般的な走り状態だけではなく，両足が地面から離れる期間の存在する変化のある動きにも対応可能であり，ユーザの自由な動きに対する制限を軽減することが期待できる．しかし，キャリブレーション時に求める速度と誤差の関数から大きく離れた誤差が生じると推定精度に悪影響をおよぼすことが問題点として挙げられる．進行方向の速度と踵浮き上がり量の関係を正確に導くことが必要であると考えられる．

また4.2.3の長い経路での実験で見られたように，磁場の変化による姿勢センサの誤差などにより局所的に精度が低下する場所などが見られた．今後，手法をインフラを利用した位置同定手法とハイブリッド化する際に，局所的な計測精度を指標とすることで効率的なインフラ設置法を検討する必要がある．

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，通常の歩行動作に限らず，両足が地面から離れる期間の存在する走り状態に対しても，自己位置が推定可能な手法を提案した．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，踵と爪先に装着したマイクロスイッチで軸足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．両足が地面から離れる期間の存在する移動に対しての相対移動量は，両足が地面から離れる期間では，両足が宙に浮く直前の腰の速度を初速度として放物運動していると仮定して計算された腰の移動量を，両足が地面から離れる期間におけるユーザの移動量として推定を行い，踏み切り足の踵から着地足の踵までの相対位置からユーザの歩幅を推定した．両足が宙に浮く直前に踏み切り足の踵が地面から浮き上がることによって発生する水平方向，鉛直方向の誤差を軽減するため速度と誤差との関係を用いた踵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なった．

総移動量に対する位置推定誤差は平面状の経路を走った場合で，4.2%であり，3段跳びでは1.2%，反復横跳びでは3.6%，歩き状態と走り状態が混在した移動では4.9%でユーザの位置が推定可能であることを示した．これらの推定結果から，本手法により，従来手法と同程度の精度で両足が地面から離れる期間の存在する様々な状態に対応が可能であり，ユーザの自由な動きに対する制限が軽減できる．

本研究では，移動量の補正を行なう際に，キャリブレーション時に進行方向速度と推定移動量の誤差から関数を導き，移動中の進行方向速度から踵浮き上がり量を推定し補正を行なっている．この関数から大きく離れた誤差が生じると推定精度に影響を与えるので，この関数を精度良く求めることが必要である．また，現在のキャリブレーション方法は水平面上での動きに限定して移動量の補正を行うため，様々な環境へ対応可能なキャリブレーション方法の検討を行うことや，今回示した移動状態以外にも，地面から両足が離れる期間の存在する様々な状態で実験を行な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，御助言を頂いたロボティクス学講座 小笠原司教授，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支えて頂いた北市泰寛氏には心より心より感謝致します．

実装に関する有益な助言を下された奥村文洋氏，牧田孝嗣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] T. Höllerer and S. Feiner and T. Terauchi and G. Rashid and D. Hallaway: “Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System,” *Computers and Graphics*, Vol. 23, No. 6, pp. 779–785, 1999.
- [2] 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, 2004.
- [3] R. Azuma, B. Hoff, H. N. Iii and R. Sarfaty: “A motion-stablized outdoor augmented reality system,” *Proc. IEEE Virtual Reality Conf. 1999(VR’99)*, pp. 252–259, 1999.
- [4] 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, 2002.
- [5] J. Hightower and G. Borriello: “Location systems for ubiquitous computing,” *IEEE Computer*, Vol.34, pp. 57–66, 2001.
- [6] G. Baratoff and A. Neubeck and H. Regenbrecht : “Interactive multi-marker calibration for augmented reality applications,” *Proc. 1st IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality(ISMAR)*, pp. 107–116, 2002.
- [7] D. Hallaway and T. Höllerer and S. Feiner: “Coarse, Inexpensive, Infrared Tracking for Wearable Computing,” *Proc. Int’l Symp. on Wearable Computers*, pp. 69–78, 2003.
- [8] 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, 2001.

- [9] Y. Konishi and R. Shibasaki: “Development of an Autonomous Personal Positioning System,” Asia GIS 2001 Conf, 2001.
- [10] R. Tenmoku and M. Kanbara and N. Yokoya: “A Wearable Augmented Reality System Using Positioning Infrastructures and a Pedometer,” Proc. Int’l Symp. on Wearable Computers, pp. 110–117, 2003.
- [11] H. Kato and H. Billinghurst: ““ marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system”, Proc. 2nd IEEE/ACM Int. Workshop on Augmented Reality (IWAR ’99), pp. 85–94, 1999.
- [12] 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, pp. 27–36, 2002.
- [13] 石井裕剛, 藤野秀則, 卞, 関山友輝, 中井俊憲, 下田宏: “拡張現実感用広域トラッキングシステムの開発”, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006, Vol.2, Paper No.2233, pp. 579–584, 2006.
- [14] 前田真紀, 小川剛史, 清川清, 竹村治雄: “ウェアラブル拡張現実感のための赤外マーカのステレオ計測と姿勢センサを用いた位置・姿勢推定”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 459–466, 2005.
- [15] 鶴沼宗利, 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, 2004.
- [16] S.-W. Lee and K. Mase: “Activity and Location Recognition Using Wearable Sensors,” IEEE Pervasive Computing, Vol. 1, No. 3, pp. 24–32, 2002.
- [17] A. Hamaguchi and M. Kanbara and N. Yokoya: “User localization using wearable electromagnetic tracker and orientation sensor,” Proc. IEEE Int. Sympo. on Wearable Computers, pp. 55–58, 2006.

- [18] 佐川貢一, 煤孫光俊, 大瀧保明, 猪岡光: “足爪先加速度積分による歩行経路の3次元無拘束計測”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 6, pp. 635–641, 2004.
- [19] E. Foxlin: “Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 38–46, 2005.
- [20] K. Okuda and S. Y. Yeh and C. I. Wu and K. H. Chang and H. H. Chu: “The GETA Sandals: A Footprint Location Tracking System,” Proc. Workshop on Localization- and Context-Awareness(LoCa 2005), pp. 120–131, 2005.
- [21] M. Kouroggi and T. Kurata: “Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera,” Proc. Int’l Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 103–112, 2003.
- [22] 鈴木一郎, 栗原一貴, 中村仁彦: “詳細な人体モデルのための表現豊かなモーションキャプチャシステム”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’03 講演論文集, pp. 2P2–3F–B4, 2003.
- [23] 金杉洋, 柴崎亮介: “ウェアラブルセンサによる人体動作の計測と解析”, 写真測量学会 平成 17 年度年次学術講演会論文集, pp. 199–202, 2005.