

加速度積分による3次元歩行移動量の無拘束計測

Three-dimensional walking distance measurement by integration of body acceleration

佐川貢一* , 煤孫光俊** , 猪岡光**

Koichi Sagawa* , Mitsutoshi Susumago** , Hikaru Inooka**

*弘前大学, **東北大学

*Hirosaki University, **Tohoku University

キーワード：歩行 (human gait) , 3次元 (three-dimension) , 無拘束計測 (non-invasive measurement) , 加速度 (acceleration) , 積分 (integration)

連絡先：〒036-8561 青森県弘前市文京町3 弘前大学理工学部知能機械システム工学科
佐川貢一, Tel.: (0172)39-3691, Fax.: (0172)39-3691, E-mail: sagawa@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. 緒言

人間の歩行状態の無拘束推定は、運動負荷に対する心機能の評価¹⁾や痴呆老人の行動調査に基づく病状の診断などの医学的な利用、市街地での消費者の動向を考慮した快適な都市の計画など、幅広い分野での応用が期待されている。従来、このような行動推定を行うためには、

- 1) 身体加速度を利用する方法²⁾³⁾⁴⁾
- 2) Global Positioning Systemを利用した方法⁵⁾
- 3) 携帯電話の利用⁶⁾
- 4) 脚の角速度から歩行距離を推定する方法⁷⁾
- 5) 加速度及び気圧情報を併用した方法⁸⁾

など、多くの方法が提案されている。しかしこれらの方法は、場所に依存する、被験者の身体的特徴を予め計測する必要がある、一歩毎の細かい動作の計測が困難、上下方向移動量の計測が困難な

どの問題があった。場所や被験者の特徴に影響されずに3次元歩行経路を推定するためには、身体加速度の二階積分によって距離を求めるのが有効であると考えられる。その際、正確な移動距離を求めるためには、積分開始時の初期速度とセンサの姿勢を常に把握する必要があるが、身体に取りつけた加速度センサは歩行運動などによって絶えず振動、回転するため計測軸がずれ、水平方向の加速度成分に重力加速度が混入する等の原因によって、無視できない積分誤差を生じる結果となる。

そこで本研究では、身体加速度の積分による移動経路推定の際に問題となる誤差の蓄積を軽減することによって、3次元歩行経路を求める方法を提案する。まず、連続する2つの立脚相でのセンサの姿勢を重力加速度と地磁気を利用して計測することにより、遊脚相でのセンサの姿勢角の誤差を軽減する。また、足が地面に接地しているとき(立脚相)には足の速度がゼロであると仮定して、遊脚相

での速度を修正する。さらに、これらの2種類の誤差軽減法を併用することにより、移動経路の推定精度が向上することを実験により確認する。

2. 原理

2.1 固定座標系での加速度導出

本研究では、移動物体上で観測された加速度情報を積分して移動距離を求める。この際、移動物体の加速度は、基準となる固定座標系に変換する必要がある。床面に固定された座標系を Σ_0 、移動するセンサシステム上の座標系を Σ とする(Fig.1)。この時、 Σ 上で計測された加速度 a 及び角速度 ω は、次式のように Σ_0 座標系上の加速度 a_0 と角速度 ω_0 として表される。

$$a_0 = E_n a \quad (1)$$

$$\omega_0 = E_n \omega \quad (2)$$

$$E_n = \begin{bmatrix} i & j & k \end{bmatrix}$$

ここで、 E_n は Σ 座標系の基準単位ベクトル i, j, k を成分とするフレームマトリックス(FM)である。 E_n がベクトル ω の回りに角度 θ だけ回転するとき、新たなFMである E_{n+1} は回転マトリックス $R^{\omega\theta}$ によって次式のように表される。

$$E_{n+1} = R^{\omega\theta} E_n \quad (3)$$

ただし、

$$R^{\omega\theta} = \begin{bmatrix} C_\theta + \lambda^2 v_\theta & \lambda \mu v_\theta - \nu S_\theta & \nu \lambda v_\theta + \mu S_\theta \\ \lambda \mu v_\theta + \nu S_\theta & C_\theta + \mu^2 v_\theta & \mu \nu v_\theta - \lambda S_\theta \\ \nu \lambda v_\theta - \mu S_\theta & \mu \nu v_\theta + \lambda S_\theta & C_\theta + \nu^2 v_\theta \end{bmatrix}$$

$$S_\theta = \sin \theta, \quad C_\theta = \cos \theta, \quad v_\theta = 1 - \cos \theta$$

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix} = \frac{1}{\|\omega_0\|} \omega_0$$

である。歩行中のFMの更新は、サンプリング周期毎に上記の回転変換によって行われ、これにより固定座標系での加速度を求めることが可能となる。

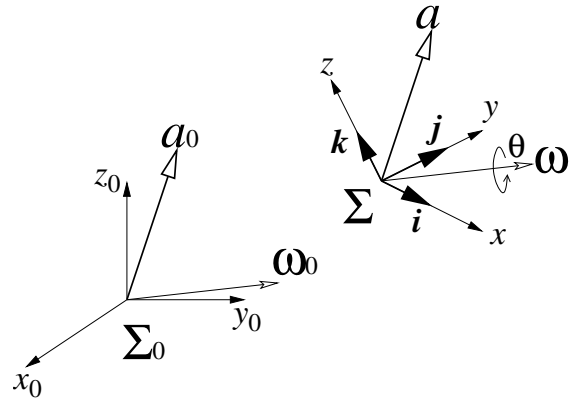


Fig. 1 Coordinate system Σ_0 fixed on the floor and moving system of coordinate Σ (a : acceleration, ω : angular velocity)

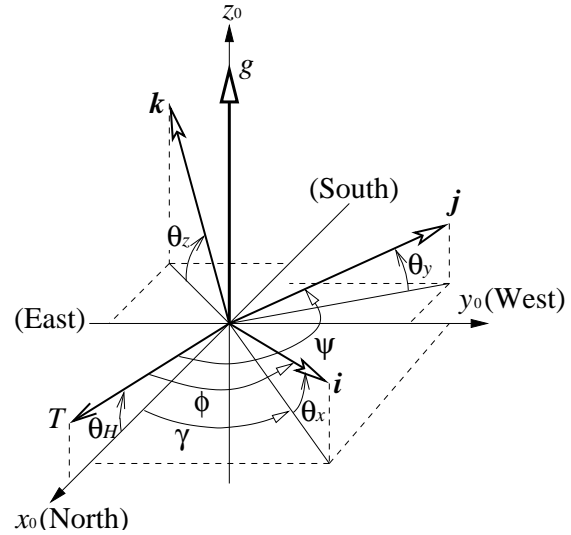


Fig. 2 Derivation of moving system of coordinate Σ' during stance phase

2.2 立脚相でのフレームマトリックス

遊脚相での角速度を積分する際、推定したFMは実際のフレームと異なる可能性がある。そこで、立脚相では足が動かないと仮定して立脚相でのFMの姿勢を求め、誤差の蓄積を除去する。Fig.2に、立脚相でのFMの導出法を示す。固定座標系の x_0 および y_0 軸はそれぞれ、北及び西を向くように設定する。 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ はそれぞれ、 i, j, k と地面とのなす角である。また、 T は地磁気を表すベクトル、 θ_H

は T の仰角、 ϕ 及び ψ は地磁気 T と i および j 軸とのなす角である。さらに γ は、 x_0 軸と、 i 軸を x_0y_0 平面に投影したベクトルとのなす角である。この時、

$$\theta_x = \sin^{-1} \frac{\alpha_x}{g} \quad (4)$$

$$\theta_y = \sin^{-1} \frac{\alpha_y}{g} \quad (5)$$

$$\theta_z = \sin^{-1} \frac{\alpha_z}{g} \quad (6)$$

となる。また、地磁気 T の i 及び j 方向成分を t_x, t_y とすると、

$$\cos \phi = \frac{t_x}{T} \quad (7)$$

$$\cos \psi = \frac{t_y}{T} \quad (8)$$

となる。さらに、

$$\begin{aligned} C_\gamma &= \cos \gamma \\ &= \frac{\cos \phi - \sin \theta_x \sin \theta_H}{\cos \theta_x \cos \theta_H} \\ S_\gamma &= \sin \gamma \\ &= \frac{\cos \theta_x (\sin \theta_y \sin \theta_H - \cos \psi)}{\sin \theta_z \cos \theta_H} \\ &\quad + \frac{\tan \theta_x \sin \theta_y (\sin \theta_x \sin \theta_H - \cos \phi)}{\sin \theta_z \cos \theta_H} \end{aligned}$$

である。結局、立脚相でのFMの成分 $[i, j, k]$ は次式のようになる。

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} C_\gamma \cos \theta_x \\ S_\gamma \cos \theta_x \\ \sin \theta_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{j} = \begin{bmatrix} -C_\gamma \tan \theta_x \sin \theta_y - S_\gamma \frac{\sin \theta_z}{\cos \theta_x} \\ -S_\gamma \tan \theta_x \sin \theta_y + C_\gamma \frac{\sin \theta_z}{\cos \theta_x} \\ \sin \theta_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{i} \times \mathbf{j} \quad (11)$$

2.3 遊脚相でのフレームマトリックスの修正

遊脚相でのFMの誤差は、ジャイロによる角速度積分によって引き起こされ、固定座標系から見た加速度を推定する際、重大な影響をもたらす。一方、遊脚相が終了して立脚相に移相したときに

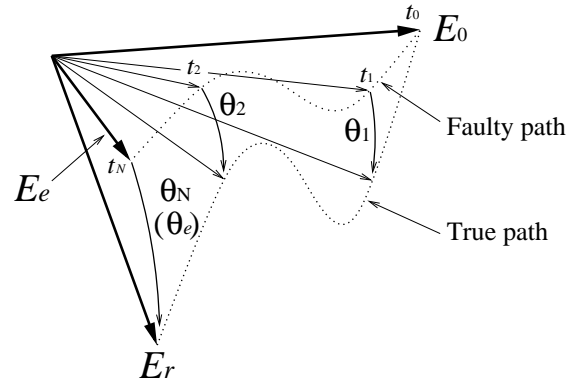


Fig. 3 FM with integral error and it's modification (E_0 : FM at the beginning of swing phase, E_e : FM with error, E_r : actual FM)

は、重力加速度及び地磁気を利用することによって、正確なFMを推定することが可能である。そこで、立脚相でのFMと遊脚相のFMが連続的につながるように、遊脚相で蓄積したFMの誤差を除去する。Fig.3は、遊脚相開始時のFMである E_0 の1つの軸が、ジャイロによる計測誤差によって遊脚相終了時に誤差を含んだ E_e に移動する過程を明示したものである。 E_r は、遊脚相終了時の正確なFMである。この時、 E_e と E_r は次式のように表すことができる。

$$E_r = R^{\omega_e \theta_e} E_e \quad (12)$$

ここで $R^{\omega_e \theta_e}$ は、 E_e から E_r への等価回転マトリックスであり、次式のように表される。

$$\begin{aligned} R^{\omega_e \theta_e} &= E_r E_e^T \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

$\omega_e(\lambda_e, \mu_e, \nu_e)$ と θ_e は次式のようになる。

$$\lambda_e = \frac{r_{32} - r_{23}}{2 \sin \theta_e} \quad (14)$$

$$\mu_e = \frac{r_{13} - r_{31}}{2 \sin \theta_e} \quad (15)$$

$$\nu_e = \frac{r_{21} - r_{12}}{2 \sin \theta_e} \quad (16)$$

$$\theta_e = \text{atan2}(\sin \theta_e, \cos \theta_e) \quad (17)$$

ただし、

$$\cos \theta_e = \frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2}$$

$$\sin \theta_e = \frac{\sqrt{(r_{32} - r_{23})^2 + (r_{13} - r_{31})^2 + (r_{21} - r_{12})^2}}{2}$$

である。次に、Fig.3に示すように、遊脚相の開始時刻からのサンプリング数を n 、遊脚相でのデータのサンプリング総数を N とすると、 n サンプリング時の修正されたFMは次式のように表される。

$$E_r(n) = R^{\omega_e \theta_n} E_e(n) \quad (18)$$

$$\theta_n = \frac{n \theta_e}{N}$$

このような方法により、遊脚相でのFMの誤差は軽減可能である。ただし、 E_e と E_r の差が大きい場合には、実際と異なる経路を通るような等価回転マトリックスが得られる可能性がある。

2.4 速度と位置の修正

前節では、遊脚相で発生するFMの誤差を軽減する方法を述べた。しかし、移動距離推定のためには、加速度を積分することによって発生する速度および位置の誤差も除去する必要がある。本研究では、立脚相での足の速度がゼロになると仮定して、加速度積分による速度誤差を除去する。さらに、予備実験から求めた推定位置と実際の歩行距離とを比較して補正値を求め、速度を積分して得られる位置の誤差を除去する方法を提案する。以上の方法を計測データに適用することにより、精度の高い移動距離推定が期待される。

加速度センサによって計測される加速度 $a_m(t)$ と真の加速度 $a_r(t)$ との関係が、次式のように表されると仮定する。

$$a_m(t) = A a_r(t) + a_e \quad (19)$$

ここで、 A は加速度ゲイン、 a_e はオフセットである。Fig.4のように、遊脚相の継続時間を T 、積分によって得られる遊脚相終了時の速度を v_e とする

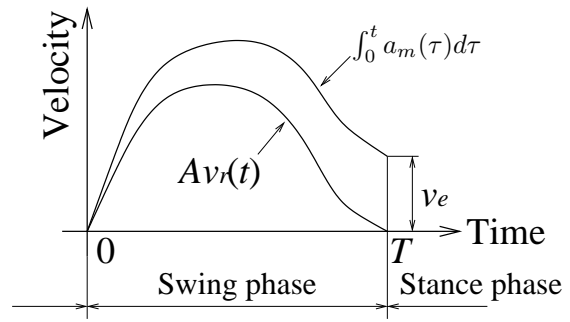


Fig. 4 Modification of velocity

と、真の速度 $v_r(t)$ と加速度積分によって求めた速度との関係は以下ようになる。

$$A v_r(t) = \int_0^t a_m(\tau) d\tau - a_e t$$

$$= \int_0^t a_m(\tau) d\tau - \frac{v_e}{T} t$$

$$= v_m(t) \quad (20)$$

ここで $v_m(t)$ は、遊脚相終了時の積分誤差 v_e を利用して補正した速度情報である。さらに実際の移動距離を $x_r(t)$ 、速度 $v_m(t)$ を積分して求めた移動距離を $x_m(t)$ とすると、

$$x_r(t) = \frac{1}{A} \int_0^t v_m(\tau) d\tau$$

$$= \frac{x_m(t)}{A} \quad (21)$$

となる。 A は、予備実験から得られた推定移動距離と実際の歩行距離とを比較して求める。

3. 実験方法

はじめに、(21)式の加速度ゲイン A を求めるため予備実験を行い、その後平地歩行と階段昇降を一連の動作で行う本実験を行って提案した方法の有効性を確認する。

予備実験では、東西方向、南北方向、階段昇り、階段下りの4つのパターンに歩行形態を分け、それぞれのパターンでの移動距離を推定し、実際の移動距離と比較して係数 A を求める。予備実験の実験条件は以下の通りである。

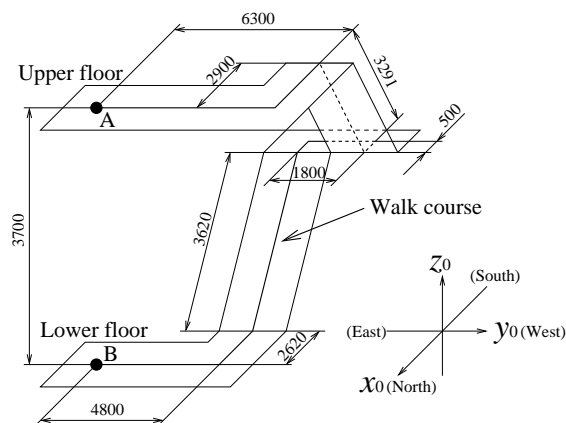


Fig. 5 Experimental Course

[平地歩行(南北、東西)]

- 歩行距離: 51.15 [m], 48.15 [m]
- 被験者: 3名

[上下方向 (階段昇降)]

- 上下方向歩行距離: 7.40 [m]
- 被験者: 3名

本実験では、身体加速度の二階積分による移動距離推定のための誤差軽減法の有効性を確認するため、ビル内での平地歩行と階段昇降時の加速度を計測して、移動経路を求める実験を行う。歩行経路の概略をFig.5に示す。階段昇りの場合、被験者はB点からA点に移動し、階段下りの場合はA点からB点に移動する。A点はB点の真上に位置し、高さは3.7[m]である。被験者は、普段使用している靴を履き、普通で速度で歩行を行った。

使用したセンサシステムは、3軸加速度センサ (Analog Devices, ADXL105EM-3)、ジャイロ (Murata, ENC03-J)、地磁気センサ (Tokin, TMC3000NF) をユニバーサル基盤上に配置したものである (Fig.6)。地磁気センサの計測軸は2つであるので、それぞれの感度方向が x 及び y 軸と一致するように装着した。使用時には、センサシステムは右足の甲の部にテープで固定される。その際、立脚相と遊脚相

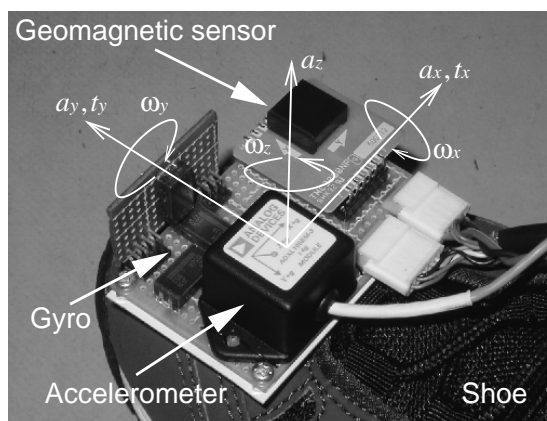


Fig. 6 Measurement system of 3D walking course and it's geometric coordinate

Table 1 Comparison between actual displacement and estimated one for the determination of acceleration gain A

Direction	Actual dist.	Estimated dist.	A
N-S	51.15	40.59 ± 3.88	0.79
E-W	48.15	37.57 ± 1.52	0.78
Up	7.40	11.68 ± 1.69	1.58
Down	7.40	3.80 ± 1.02	0.51

の判別を容易にするため、 x 軸が足首伸展時の角速度を検出できるように固定する。各センサからの出力は、ADコンバータカード (Adtek, AXP-AD02) を利用し、サンプリング周期10[ms]でコンピュータに記録する。実験終了後、3次元移動距離を求める。

4. 実験結果

4.1 予備実験

(21)式の振幅誤差 A を求めるため、南北方向、東西方向、上下方向に一定距離移動したときの移動距離を推定し、実際の移動距離と比較した。予備実験の結果をTable 1に示す。予備実験の結果より、水平移動および階段降りの場合には、推定移動距

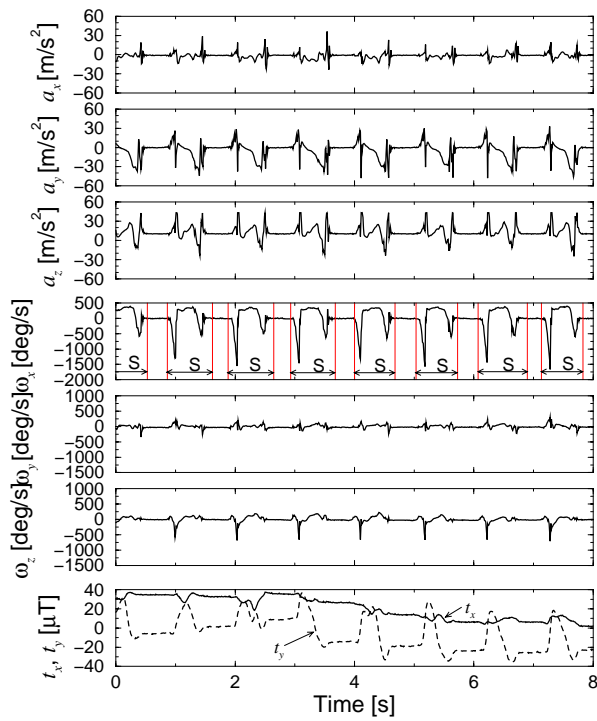


Fig. 7 Acceleration, angular velocity, terrestrial magnetism measured by a sensor system (S: Swing phase)

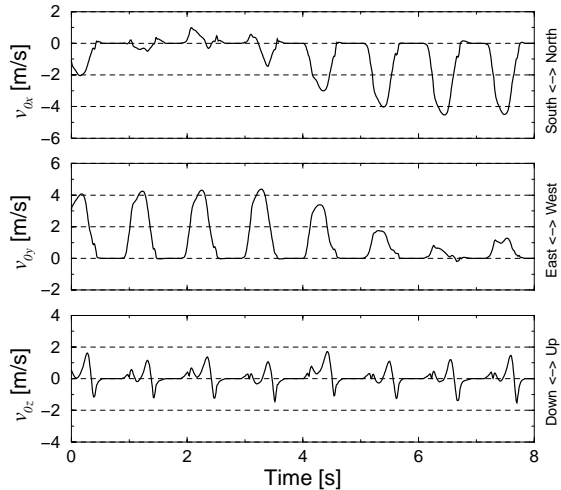


Fig. 8 3D velocity $v_0(v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})$ based on Σ

離は実際の移動距離よりも小さい値となり、階段昇りの場合には大きな値となることがわかる。

4.2 本実験

次に、予備実験で求めた係数を利用して、別のコースを歩行したときの推定移動距離および最終到達地点からのずれを求めて、提案した3次元移

動距離推定アルゴリズムの有効性を確認する。はじめに、被験者が西から南に方向を変えながら平地歩行を行ったときのセンサシステムの出力データの一例(加速度、角速度、地磁気)をFig.7に示す。方向変換は、時刻4秒付近で行われている。左右方向加速度 a_x は、進行方向から約90度ずれているので、加速度の変化は他の軸と比較して少ない。一方前後及び上下方向加速度 a_y, a_z は、遊脚相(図中S)での足の動作により、周期的な波形となっている。足首の伸展方向の角速度 ω_x は、遊脚相開始直後にマイナス側に増加する特徴的な波形となる。 ω_y および ω_z は、 ω_x ほどの変化は見られない。地磁気の x 方向成分 t_x は、足首の回転軸とほぼ一致しているので、直進歩行中はあまり変化しない。方向転換(4秒付近)を行うと、進行方向の変化にしたがって t_x の大きさが変化している。一方 t_y は爪先方向の y 軸と一致しており、歩行動作による足首角度の変化によって周期的に変化している。Fig.8は、Fig.7に示した計測データを本研究で提案する方法によって処理して求めた、固定座標系から見た速度である。被験者ははじめに西に向かって歩いているので、東西方向の速度 v_{0y} が周期的に大きく変動している。時刻4秒付近で進行方向を南に変えると、南北方向の速度 v_{0x} の成分が大きくなり v_{0y} は減少する。上下方向の速度 v_{0z} は、進行方向に依存せず同じような変化を繰り返している。

Fig.9、Fig.10は、階段昇りと階段下りを行ったときの移動経路の推定結果と実際の経路(太線)である。図中のS点とG点はそれぞれ、歩行の開始点及び終了点である。これらの結果から、階段昇りの場合には、移動経路が比較的良好に推定できていると言える。しかし階段下りについては、実際の経路と異なっているものが多くみられる。これは、階段下り時に発生する加速度が瞬間的にセンサの許容範囲を越えることが原因であると考えられる。

次に、提案した経路推定アルゴリズムの効果を

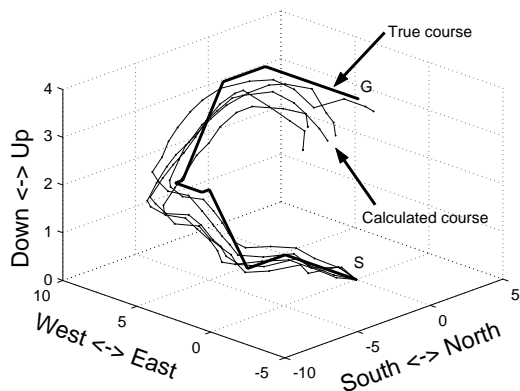


Fig. 9 Estimated course with ascending

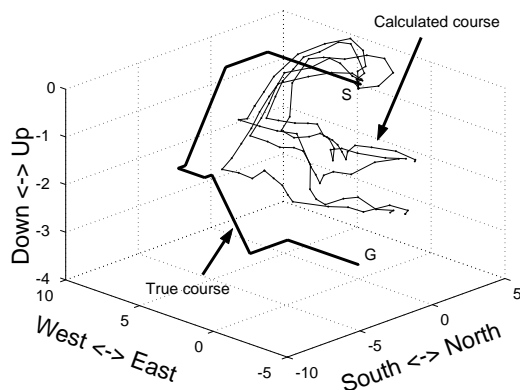


Fig. 10 Estimated course with descending

数値的に確認するため、階段昇りと階段下りのそれぞれについて、最終的に到達した実際の3次元位置と推定位置との距離(Offset)と、実際の歩行距離と推定歩行距離との差(Error of distance)を求める。その際、提案した積分誤差軽減のための2種類の方法をどちらも適用しなかった場合(1. No modifications)、速度のみ補正した場合(2. Velocity modified)、FMのみ修正した場合(3. FM modified)、両補正法を適用した場合(4. Proposed method)についての比較も行う。Table 2は階段昇り時の比較、Table 3は階段下り時の比較である。どちらの表についても、到達点からのずれ(Offset)と推定移動距離(Error of distance)のいずれも、提案した2種類の誤差修正法を適用した場合に最も誤差が小さくなるのがわかる。表の括弧内の数値は、実際の総移動量26.3[m]からの誤差[%]である。速度補正

Table 2 Average of disagreement between actual location and estimated one with ascending

Method	Distance [m] ([%])			
	1	2	3	4
Offset	4.1±1.5 (15.7)	3.9±1.0 (15.0)	5.5±1.6 (20.9)	2.3±0.8 (8.7)
Error of distance	50.1±1.9 (90.5)	29.2±0.2 (10.9)	51.5±1.1 (95.5)	28.4±0.3 (7.9)

1: No modifications 3: FM modified
2: Velocity modified 4: Proposed method

Table 3 Average of disagreement between actual location and estimated one with descending

Method	Distance [m] ([%])			
	1	2	3	4
Offset	9.1±3.3 (34.7)	5.9±1.2 (22.5)	9.0±4.5 (34.2)	4.5±1.0 (17.2)
Error of distance	49.8±5.3 (89.0)	31.2±1.0 (18.5)	48.6±4.9 (84.8)	30.0±1.4 (13.9)

1: No modifications 3: FM modified
2: Velocity modified 4: Proposed method

の効果とFM修正の効果を比較すると、速度補正の方が3次元位置推定および移動距離推定の精度向上に貢献していると考えられる。また、FM修正だけでは、3次元位置推定および移動距離推定には効果が少ないと考えられる。しかし、速度とFMの両者を修正することにより、3次元移動経路が効果的に推定されることが確認された。

5. 結言

本研究では、身体加速度の積分による移動距離導出の際の誤差軽減法を提案した。提案した方法は、遊脚相と立脚相でのフレームマトリックスおよび速度が連続的につながるように、遊脚相の加速度および角速度を修正する。これにより、特に階段昇りを含む場合には、室内での3次元歩行経路を平均10[%]以下の誤差で推定することが可能であることが確認された。一方、階段下りを含む場合は、センサレンジを越える加速度が発生していると予想されるため、昇りと比較するとあまり

精度は良くない。これについては、今後の課題とする。

本研究で提案した方法を歩行時の身体加速度データに適用することにより、被験者の身体的特徴や計測場所に依存せず、無拘束で歩行経路を推定することが可能であることが示唆された。今後は、より一層の推定精度の向上と、提案した方法の汎用性について調査する予定である。

参考文献

- 1) Eiji Ino-Oka, Kohichi Sagawa, Takayuki Takahashi, Hikaru Inooka, Yoshiharu Kutsuwa, Showko Umeda, “Efficacy of Anti-anginal Drugs in the Treatment of Angina Pectoris Associated with Silent Myocardial Ischemia: Importance of Quantitative Holter ECG Data for Patient Activity”, *Internal Medicine*, Vol.39, No.12, pp.1027-1037, 2000
- 2) Carlijn V. C. Bouten, Karel T. M. Koekkoek, Maarten Verduin, Rens Kodde, and Jan D. Janssen, “A Triaxial Accelerometer and Portable Data Processing Unit for the Assessment of Daily Physical Activity”, *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, Vol.44, No.3, pp.136-147, 1997
- 3) 高橋隆行, 大沢博文, 鈴木明宏, 猪岡光, “歩行形態分析アルゴリズムの開発と携帯型計測装置の試作”, *計測自動制御学会論文集*, Vol.32, No.7, pp.1057-1064, 1996
- 4) 佐川貢一, 佐藤豊, 猪岡光, “水平方向歩行距離の無拘束計測”, *計測自動制御学会論文集*, Vol.36, No.11, pp.909-915, 2000
- 5) O. Perrin, T. Terrier, Q. Ladetto, B. Merminod, and Y. Schutz, “Improvement of walking speed prediction by accelerometry and altimetry, validated by satellite positioning”, *Medical & Biological Engineering & Computing*, Voll.38, pp.164-168, 2000
- 6) 鶴沼宗利, 栗村浩二, 正嶋博, 宇佐見芳明, “加速度及び位置センサを用いた人間の遠隔行動検知システム”, *14th Symposium on Human Interface*, pp. 589-594, 1998
- 7) Shinji Miyazaki, “Long-Term Unrestrained Measurement of Stride Length and Walking Velocity Utilizing a Piezoelectric Gyroscope”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 44, No. 8, pp.753-759
- 8) 佐川貢一, 伊奈淳, 高橋隆行, 石原正, 猪岡光, “加速度および大気圧を利用した人間の移動形態の推定”, *計測自動制御学会論文集*, Vol.35, No.2, pp.184-190, 1999