

〔論文〕

慣性センサと速度・位置補正型カルマンフィルタを用いた 中間セグメントの状態推定に関する研究

廣瀬 圭^{*1}, 近藤 亜希子^{*1}, 古川周人^{*2}, 明平昂也^{*2}

A Study on Estimation of Crosstalk and Error Compensation Model in Motion Measurement and Analysis Using Wearable Sensors

Kiyoshi HIROSE^{*1}, Akiko KONDO^{*1}, Shuto FURUKAWA^{*2} and Takaya AKEHIRA^{*2}

Abstract

This paper proposes a posture estimation method for central body segment using inertial sensors and a Kalman filter for compensating for velocity and position. The posture information obtained using the inertial sensors were estimated by the extended Kalman filter. The nonlinear state equation and nonlinear measurement equation for the extended Kalman filter consists of the relational expression comprising the differential of the roll and pitch angles and angular velocity (gyro sensor output) and that comprising the acceleration sensor output and gravity acceleration. The posture information of the central body segment was estimated from the position of the joint estimated from the outputs of the inertial sensors attached to adjacent segments and the adaptive Kalman filter. We conducted the measurement experiment using three DSP wireless motion sensors, and the posture of the central body segment was estimated. The results indicated a trend similar to that of the estimation results obtained using the attached inertial sensor outputs. Hence, the posture estimation method can be used for motion measurement and analysis using inertial and magnetic field sensor systems.

Key Words : Inertial sensor, Posture, Extended Kalman filter, Adaptive Kalman filter

1. 緒 言

慣性センサは小型であることから、身体部位や道具に取り付けることにより運動計測が可能であり、スポーツの運動解析等に主に使用されている光学式モーションキャプチャと比べて、事前準備が少なく、簡易な計測が可能であるため、様々な分野での利用が期待できる。身体運動解析を行うために複数の慣性センサを身体部位に取り付けて計測・解析を行う研究が複数行われており、筆者らもスポーツの運動解析としてスキー・スノーボードの運動解析¹⁾²⁾を行ってきた。

慣性センサと地面反力を計測するフォースプレート等を用いて関節トルクを計算するためには、すべての身体部位に慣性センサを取り付ける必要がある。しかし、慣性センサは小型ではあるが一定の質量を有していることから、取り付け部位によっては安定して取り付けることができないため、振動等による計測誤差が生じる場合³⁾があり、複数装着することによる拘束感が増大するため、安定して取り付けが可能な部位にのみ慣性センサを取り付け、計測・解析を行うことができれば、取り付け誤差による影響を低減することができ、簡易に身体運動解析が可能となる。

先行研究にて、野球・バッティングにおける速度・軌道推定として、速度補正型カルマンフィルタを用いることにより、加速度積分による誤差を低減する方法⁴⁾を提案している。この方法は、計測開始位置と終了位置における速度がゼロとなる場合に加速度を時間について順方向と逆方向に積分して得られた速度を融合することによって加速度積分誤差を低減させることができる方法である。本方法を応用することにより、各関節の変位を得ることができ、逆運動学を適用することにより慣性センサが取り付けられていない部位の姿勢推定が期待できる。そこで本研究では周期的な身体運動に着目し、速度補正型カルマンフィルタを周期的な運動における位置補正にも拡張し、姿勢推定のための拡張カルマンフィルタ、速度・位置補正のための適応カルマンフィルタアルゴリズムを組み合わせることにより、慣性センサを用いた運動計測・解析において中間セグメントの状態推定を行う方法について提案する。

2. 計測システム

^{*1} 久留米工業大学工学部機械システム工学科, ^{*2} 久留米工業大学大学院工学研究科エネルギーシステム工学専攻
令和4年10月31日受理

本研究では、慣性センサを搭載しているシステムとして図 1 に示す DSP9 軸ワイヤレスモーションセンサ（スポーツセンシング社）を 3 台使用する。使用したシステムの計測レンジは角速度が 1500deg/sec，加速度が 16G であり，最大 1000Hz のサンプリング周波数で計測が可能である。本センサシステムの大きさは 38mm×53mm×11mm，重量は 24g である。



Fig.1 DSP 9-axis Wireless motion sensor

3. 解析方法

本研究では、図 2 に示す 3 リンク構造を想定し、両端の部位には慣性センサが取り付けられており、姿勢情報が得られる場合において、中間部位の姿勢情報を得る方法を構築する。

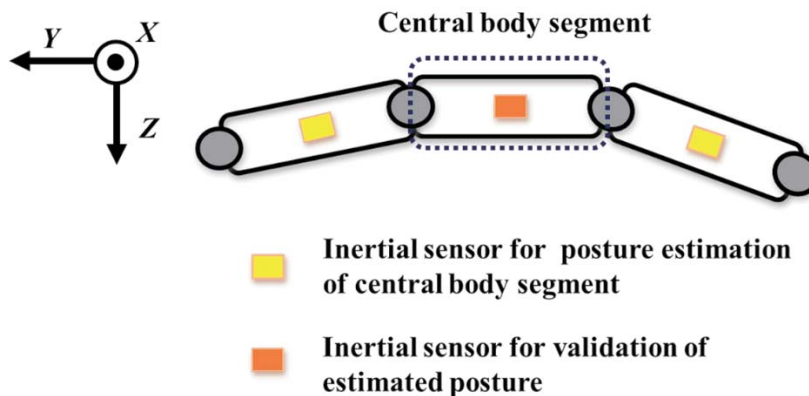


Fig.2 Definition of three segment model and coordinate system

中間部位の姿勢推定を行う前に、両端部位の姿勢を慣性センサ情報から推定する。姿勢推定には、先行研究にて用いているロール角・ピッチ角を推定する拡張カルマンフィルタアルゴリズムを使用する。拡張カルマンフィルタは、非線形状態方程式、非線形観測方程式を偏微分することによって部分的に線形化し、偏微分を用いることによって部分的に線形化することにより、状態量を推定することができるカルマンフィルタであり、線形カルマンフィルタと比べて多くの推定問題に対応することができる。拡張カルマンフィルタアルゴリズムにおける非線形状態方程式、非線形観測方程式を式(1)、式(2)にそれぞれ示す。

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t \tag{1}$$

$$y_t = H(x_t) + v_t \tag{2}$$

$$x_t = \begin{bmatrix} \theta_t \\ \varphi_t \end{bmatrix}, \quad F(x_t) = \begin{bmatrix} \theta_t + (\cos \varphi_t \cdot \omega_{y,t} - \sin \varphi_t \cdot \omega_{z,t}) \cdot Ts \\ \varphi_t + (\omega_{x,t} + \sin \varphi_t \tan \theta_t \cdot \omega_{y,t} + \cos \varphi_t \tan \theta_t \cdot \omega_{z,t}) \cdot Ts \end{bmatrix}$$

$$y_t = \begin{bmatrix} a_{x,t} \\ a_{y,t} \\ a_{z,t} \end{bmatrix}, \quad H(x_t) = {}^0R_t^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

ここで、 φ はロール角、 θ はピッチ角であり、 0R_t はセンサ座標系から絶対座標系に変換するロール角、ピッチ角からなる回転行列 (式(3))、 a は加速度センサ出力、 ω は角速度 (ジャイロセンサ出力)、 g は重力加速度、 T_s はサンプリング周期である。

$${}^0R_t = R(\theta) \cdot R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

得られたロール角・ピッチ角を用いて回転行列を計算し、加速度センサ出力に掛け、重力加速度を引くことにより、絶対座標系の加速度を算出する (式(4))。次に、絶対座標系における加速度を補正区間の始点から終点までの順方向と逆方向に積分することにより、2種類の速度を計算する (式(5)、式(6))。

$$A_t = {}^0R_t \begin{bmatrix} a_{x,t} \\ a_{y,t} \\ a_{z,t} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$V_{Forward,t} = V_{Forward,t-1} + A_t \cdot T_s \quad (5)$$

$$V_{Backward,t} = V_{Backward,t+1} - A_t \cdot T_s \quad (6)$$

上式を用いることによって得られた順方向、逆方向の速度にはそれぞれ積分誤差が含まれている。そこで、適応カルマンフィルタを用いて2つの速度情報を融合することにより、積分誤差を低減させる。適応カルマンフィルタは、入力信号が未知の場合においても観測値のみで状態量を推定可能なカルマンフィルタであり、観測値にそれぞれの速度情報を用い、共分散行列の調整によってそれぞれの観測値の使用量を調整することにより、積分誤差の低減を行う。また、本研究では、誤差を事前に低減させるための取り組みとして、速度の始点と終点の傾きを算出、一次関数に近似し、事前に減算しておくことにより、オフセット誤差の除去を行った。適応カルマンフィルタに使用する状態方程式、観測方程式を式(7)、式(8)にそれぞれ示す。

$$x_{t+1} = A_t x_t + B_t u_t + w_t \quad (7)$$

$$y_t = C_t x_t + v_t \quad (8)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} V_{x,t} \\ V_{y,t} \\ V_{z,t} \end{bmatrix}, \quad A_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_t = \begin{bmatrix} -T_s & 0 & 0 \\ 0 & -T_s & 0 \\ 0 & 0 & -T_s \end{bmatrix}, \quad u_t = \begin{bmatrix} A_{x,t} \\ A_{y,t} \\ A_{z,t} \end{bmatrix}$$

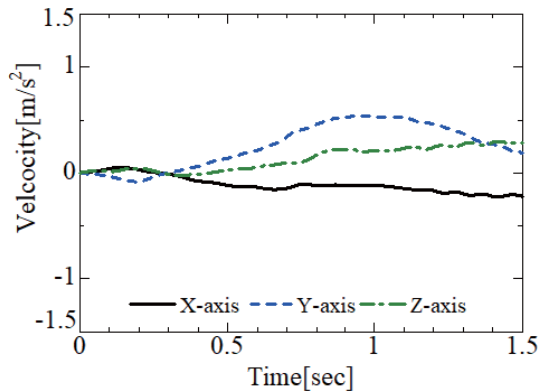
$$y_t = \begin{bmatrix} V_{Forward,x,t} \\ V_{Forward,y,t} \\ V_{Forward,z,t} \\ V_{Backward,x,t} \\ V_{Backward,y,t} \\ V_{Backward,z,t} \end{bmatrix}, C_{(t)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

さらに、得られた速度を積分することにより、位置情報を計算するが、同様に積分誤差が生じるため、本研究では、周期的な運動に限定し、位置情報についても同様の方法で補正を行っている。また、ヨー角の補正を行っていないため、ひねり運動を伴わない運動に制限している。

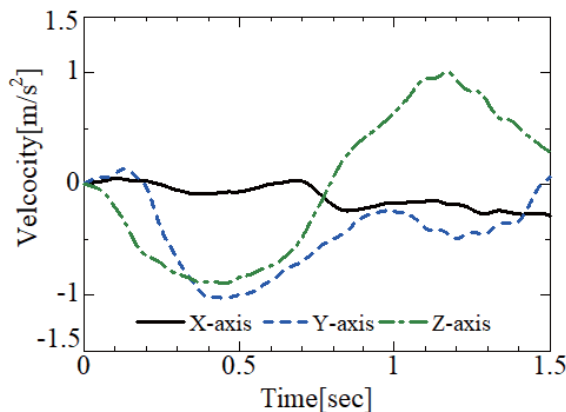
4. 実験条件・解析結果

本方法による有効性について検討するため、身体部位（腰部，大腿部，下腿部）に DSP ワイヤレスモーションセンサを取り付け、計測実験を行い、中間セグメントである大腿部の姿勢推定について、取り付けられた大腿部のセンサと腰部，下腿部に取り付けたセンサと本方法を用いた場合の両方から行った。計測実験においては、周期的な腿上げ運動を行い、地面からの離地から接地までの 1 区間を抽出し、推定に使用した。なお、本結果における座標系は X 軸が左右方向，Y 軸が前後方向，Z 軸が上下方向（重力方向）である。

本結果より、加速度の時間積分によって得られた速度にはドリフト誤差が生じており、短時間であるにも関わらず、大きな誤差が生じている。(図 3) しかし、速度補正型カルマンフィルタを用いることにより、ドリフト誤差を補正した速度が推定できている。(図 4) さらに、位置の推定においても同様の方法を用いることにより、ドリフト誤差を補正できている。(図 5) さらに、推定した位置情報と腰部，下腿部の姿勢情報，大腿部の長さを用いて推定した姿勢情報を図 6(a)に示し，大腿部に取り付けた慣性センサから推定した姿勢情報を図 6(b)に示す。本結果より推定した結果は、慣性センサから取得した結果と類似した結果が得られており、本方法を用いることにより、慣性センサを取り付けていない部位の推定を行える可能性を示した。

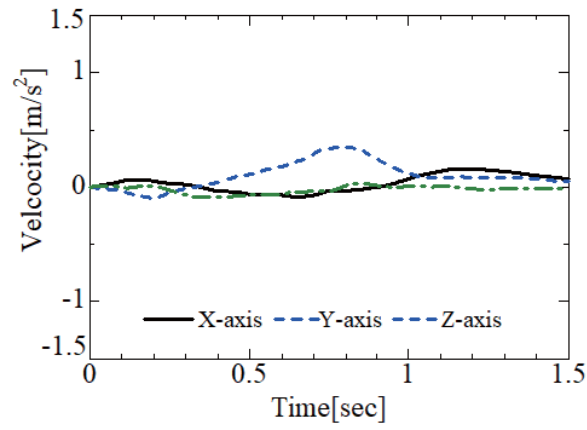


(a) Lumber

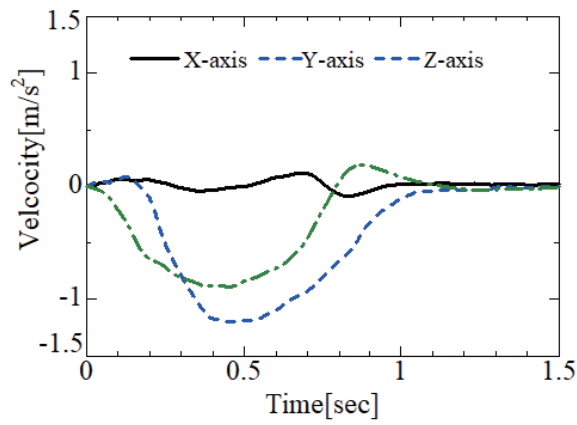


(b) Right lower thigh

Fig. 3 Results for velocity calculated by time integration of acceleration

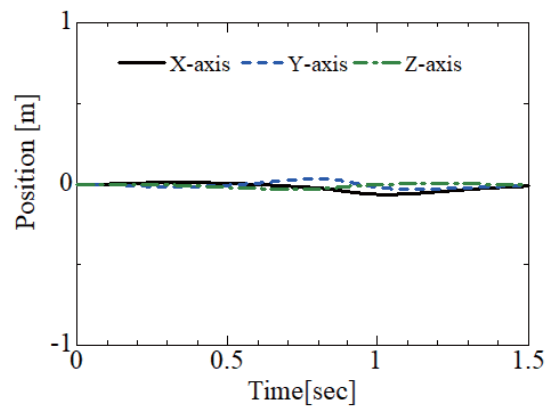


(a) Lumber

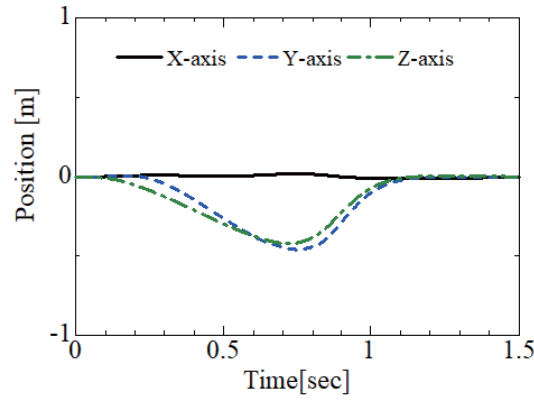


(b) Right lower thigh

Fig. 4 Results for velocity compensated by Adaptive Kalman filter

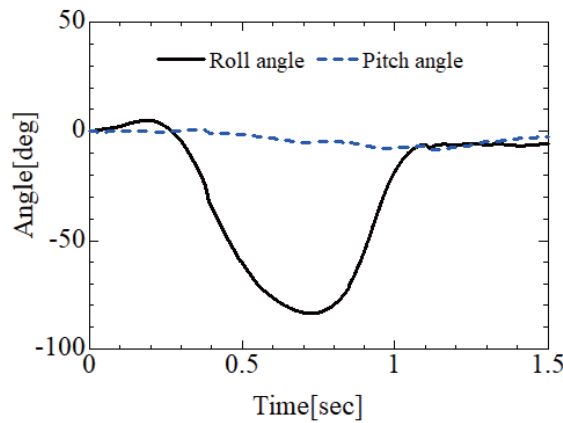


(a) Lumber

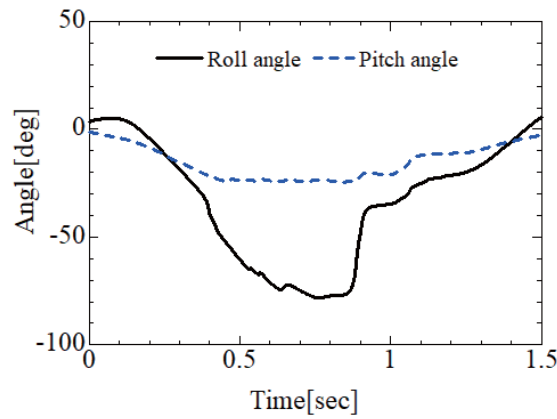


(b) Right lower thigh

Fig. 5 Results for position compensated by Adaptive Kalman filter



(a) Lumber



(b) Right lower thigh

Fig. 6 Results for posture estimated by the proposed method and estimated by inertial sensor output

5. 結 言

本研究では、複数の慣性センサを用いた運動解析において、使用する慣性センサの数を減らす、または取り付け誤差の生じやすい箇所の姿勢を前後の部位に取り付けた慣性センサの情報から推定する方法について提案を行った。速度補正型カルマンフィルタを応用することにより、補正した速度、位置および姿勢を推定することができ、慣性センサから算出した姿勢と同様の傾向を示す結果が得られた。今後の課題として、より高精度に推定するための方法の構築や推定時間が長くなると誤差が増大する可能性が高いこと、速度がゼロとなる点を適切に抽出できなければ誤差となることから、誤差の低減法と推定区間の抽出法の両方について検討を行う。

文 献

- (1) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清, “拡張カルマンフィルタを用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.774 (2011), pp.470-480.
- (2) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, “実滑走におけるスキーヤーの 3 次元姿勢計測とターンの運動解析に関する研究”, スキー研究, Vol.10, No.1 (2013), pp.19-26.
- (3) S. Shibata, K. Hirose, T. Naruo, Y. Shimizu, “Estimation of baseball bat trajectory during a practice swing using a Kalman filter for velocity compensation”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, 10.1177/1754337119, (2019).