

〔論文〕

# ウェアラブルセンサを用いた運動計測・解析における干渉・誤差補正モデルの推定に関する研究

近藤 亜希子<sup>\*1</sup>, 廣瀬 圭<sup>\*1</sup>, 古川周人<sup>\*2</sup>, 明平昂也<sup>\*2</sup>, 園部 元康<sup>\*3</sup>, 小池 関也<sup>\*4</sup>

## Estimation of a Crosstalk and Error Compensation Model in Motion Measurement and Analysis Using Wearable Sensors

Akiko KONDO<sup>\*1</sup>, Kiyoshi HIROSE<sup>\*1</sup>, Shuto FURUKAWA<sup>\*2</sup>, Takaya AKEHIRA<sup>\*2</sup>,  
Motomichi SONOBE<sup>\*3</sup> and Sekiya KOIKE<sup>\*4</sup>

### Abstract

To handle errors in motion measurement, we attached inertial sensor systems to the upper arm, forearm, and wrist segments of human participants and collected their measurement information for estimating the error model. The error estimation model was defined using pulse transfer functions and the rotational matrix. From the measurement information, we adjusted the numerator and denominator values in the pulse transfer functions. The parameters consist the nonlinear state equation and were estimated using the Extended Kalman filter. The nonlinear measurement equation consists of the pulse transfer function and the rotational matrix. The compensated 3-axis accelerations calculated by the estimation parameters confirmed the effectiveness of this model.

**Key Words** : Inertial sensor, Transfer function, Angular velocity, Acceleration, System Identification

## 1. 緒 言

近年の MEMS 技術の進歩により慣性センサの小型化・低価格化は著しいことから、慣性センサを身体や道具に取り付けて運動計測・解析を行う研究が行われている。慣性センサから得られる計測情報は角速度・加速度であるが、カルマンフィルタや相補フィルタを用いたセンサ・フュージョンアルゴリズムの適用により姿勢情報を得ることができ、地面反力情報を併用した逆動力学解析により関節トルクを得ることが可能である<sup>(1)(2)(3)</sup>。しかし慣性センサは、運動計測・解析に広く使用されている光学式モーションキャプチャにて使用される反射マーカとは異なり、軽量ながらも一定の質量を有すること、形状が装着に適していないことから取り付けることによる計測誤差が問題となる。これまでに筆者らは、身体にセンサを取り付けた場合の身体とセンサの間に生じる現象を、身体部位上のばねとダンパの上に質量（センサ）が接続されているモデルと仮定し、システム同定・逆解析を行うことにより、取り付けによって生じる誤差の低減を行い、低減効果があることを確認した<sup>(4)</sup>。一方で、システム同定を用いて複数の伝達関数を用いたモデルの構築・検証を行い、ばねとダンパだけでなく、直達項を考慮したモデルが必要であることが示されている<sup>(5)</sup>。そこで、身体運動を計測・解析するためにはさらに適切なモデルを用いた同定・解析が必要である。また、先行研究では、他軸間干渉を考慮していないことから、各セグメントの姿勢を考慮したモデルが必要となる。そこで本研究では、上腕部、前腕部に装着した慣性センサシステムに生じる装着誤差を対象とし、次元直達項を考慮しかつ他軸間干渉を想定したモデルを用いた同定・解析を行う。

## 2. 計測システム

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 であることから、身体部位に取りつけたことができる大きさ・質量であり、拘束感も比較的小さい。

<sup>\*1</sup> 久留米工業大学工学部機械システム工学科, <sup>\*2</sup> 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, <sup>\*3</sup> 高知工科大学, <sup>\*4</sup> 筑波大学  
令和 4 年 10 月 31 日受理



Fig.1 DSP 9-axis Wireless motion sensor

### 3. 解析方法

本研究では、図2に示す2セグメントモデルを拡張する形で解析を行い、図3に示す直達項を考慮したモデル  $G'(s)$  を用いる。直達項を考慮したモデルを離散化すると、2次のパルス伝達関数で表現することができるため、式(1)に示すパルス伝達関数を解析モデルとして用いる。ここで、 $z$  は  $z$  演算子であり、 $a, b, c, d, e$  はシステム同定によって得られる係数である。

$$G'(z) = \frac{cz^{-2} + dz^{-1} + e}{z^{-2} + az^{-1} + b} \quad (1)$$

次に他軸間干渉を想定するために、ロール・ピッチ・ヨー角を用いた回転行列を用いる。回転行列  ${}^0R_i$  を式(2)に示す。ここで、 $\varphi$  はロール角、 $\theta$  はピッチ角、 $\psi$  はヨー角である。

$${}^0R_i = R(\psi) \cdot R(\theta) \cdot R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

振動等が生じていない部位に取り付けた慣性センサから振動等が生じる部位へのパルス伝達関数を各軸の要素を  $x$  軸については式(3)、 $y$  軸については式(4)、 $z$  軸については式(5)とする。回転行列を用いて全体の要素を表現すると、加速度の誤差モデルを式(6)として表すことができ、角速度についても同様の方法でモデル化することができる。

$$G'_x(z) = \frac{c_x z^{-2} + d_x z^{-1} + e_x}{z^{-2} + a_x z^{-1} + b_x} \quad (3)$$

$$G'_y(z) = \frac{c_y z^{-2} + d_y z^{-1} + e_y}{z^{-2} + a_y z^{-1} + b_y} \quad (4)$$

$$G'_z(z) = \frac{c_z z^{-2} + d_z z^{-1} + e_z}{z^{-2} + a_z z^{-1} + b_z} \quad (5)$$

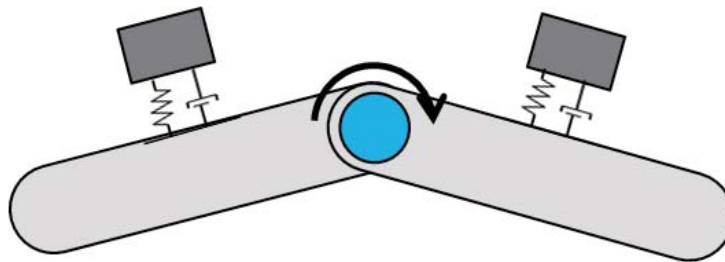


Fig. 2 Two segment model including spring and damping elements

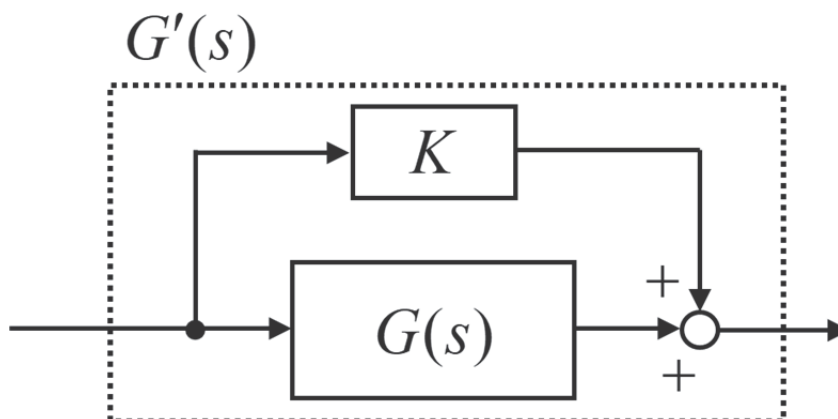


Fig. 3 Block diagram for transfer function of impedance and direct transfer factor

$$\begin{bmatrix} A_{x,estimaion}(t) \\ A_{y,estimaion}(t) \\ A_{z,estimaion}(t) \end{bmatrix} = {}^0R_i \begin{bmatrix} G'_x(z)A_x(t) \\ G'_y(z)A_y(t) \\ G'_z(z)A_z(t) \end{bmatrix} \tag{6}$$

ここで、 $A_{x,estimaion}(t)$ ,  $A_{y,estimaion}(t)$ ,  $A_{z,estimaion}(t)$  は誤差が生じている状態の加速度を表す。式(6)を用いてパルス伝達関数および回転行列におけるパラメータを推定することによって誤差モデルを推定する。推定には拡張カルマンフィルタを用いており、式(6)を非線形観測方程式とすることにより推定を行った。

カルマンフィルタは、状態方程式、観測方程式を用いてリアルタイムに状態量を推定することが可能な状態推定フィルタであり、白色雑音を考慮していることから実信号を用いた状態推定において有効なフィルタである。しかし、線形カルマンフィルタでは、係数行列×状態量からなる方程式を用いる必要があるため、非線形関数等に適用することができなかった。そこで本研究では非線形カルマンフィルタである拡張カルマンフィルタを用いている。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る。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。また、カルマンフィルタは、状態量に未知の定数を指定することにより、パラメータ推定としても使用することができ、拡張カルマンフィルタを用いることにより、複雑な方程式に含まれるパラメータの推定を行うことができる。

拡張カルマンフィルタを用いてパラメータ推定を行うために構成した非線形状態方程式、非線形観測方程式を式(7)、式(8)にそれぞれ示す。

$$x(t+1) = F(x(t)) + w(t) \tag{7}$$

$$y(t) = H(x(t)) + v(t) \quad (8)$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} \psi(t) \\ \theta(t) \\ \varphi(t) \\ a_x(t) \\ b_x(t) \\ c_x(t) \\ \vdots \\ e_z(t) \end{bmatrix}, \quad F(x(t)) = \begin{bmatrix} \psi(t) \\ \theta(t) \\ \varphi(t) \\ a_x(t) \\ b_x(t) \\ c_x(t) \\ \vdots \\ e_z(t) \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} A_{x,estimaion}(t) \\ A_{y,estimaion}(t) \\ A_{z,estimaion}(t) \end{bmatrix}, \quad H(x(t)) = {}^0R_i(t) \begin{bmatrix} G'_x(z)A_x(t) \\ G'_y(z)A_y(t) \\ G'_z(z)A_z(t) \end{bmatrix}$$

以上より構成した非線形状態方程式，非線形観測方程式について式(9)，式(10)に示す偏微分を行い，式(11)～式(15)に示す拡張カルマンフィルタアルゴリズムをパラメータが収束するまで繰り返し適用することによって推定を行う．ここで， $I$ は単位行列， $P$ は誤差共分散行列， $K$ はカルマンフィルタゲイン， $Q$ はプロセスノイズに関する共分散行列， $R$ は観測ノイズに関する共分散行列である．

$$f(x(t)) = \frac{\partial F(x(t))}{\partial x(t)} \quad (9)$$

$$h(x(t)) = \frac{\partial H(x(t))}{\partial x(t)} \quad (10)$$

$$x^-(t) = F(x(t)) \quad (11)$$

$$P^-(t) = f(t-1)P(t-1)f^T(t-1) + Q \quad (12)$$

$$K(t) = P^-(t)h^T(t)(h(t)P^-(t)h^T(t) + R)^{-1} \quad (13)$$

$$P(t) = (I - K(t)h(t))P^-(t) \quad (14)$$

$$x(t) = x^-(t) + K(t)(y(t) - H(t)x^-(t)) \quad (15)$$

#### 4. 解析結果

本方法の有効性を示すために、慣性センサシステムを手首と前腕部、上腕部に取り付け、任意の運動を行った。手首に取り付けた慣性センサシステムに生じる振動は少なく、前腕部に取り付けた慣性センサシステムには振動が生じているものとした。運動によって得られる計測情報を用いて前腕部に取り付けた慣性センサに生じる振動を推定、補正するためのシステム同定を行った。慣性センサの取り付け位置を図4に示す。計測時間は10秒、サンプリング周波数は1000Hzである。補正する必要がある信号は角速度と加速度であるが、それぞれ誤差の特性が異なることが考えられるため、本研究では誤差による影響が大きいことが想定される加速度についての推定・解析を行った。

本方法を用いて推定することによって得られた回転行列を式(16)に、パルス伝達関数を式(17)、式(18)、式(19)にそれぞれ示し、推定した加速度と計測された加速度との比較を図5、図6、図7に示す。本研究で推定したパラメータは、センサの取り付け方法や位置等によって異なるため、実験条件に合わせて適切なパラメータを推定する必要がある。本結果より、推定した加速度はすべての軸において計測された加速度と一致しており、本モデルは誤差の特性を表すことができていることを示した。

$${}^0R_i = \begin{bmatrix} \cos(0.717) & -\sin(0.717) & 0 \\ \sin(0.717) & \cos(0.717) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(0.702) & 0 & \sin(0.702) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(0.702) & 0 & \cos(0.702) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(0.424) & -\sin(0.424) \\ 0 & \sin(0.424) & \cos(0.424) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$G'_x(z) = \frac{0.326z^{-2} - 0.339z^{-1} + 0.013}{z^{-2} - 1.695z^{-1} + 0.696} \quad (17)$$

$$G'_y(z) = \frac{0.527z^{-2} - 0.314z^{-1} - 0.174}{z^{-2} - 0.805z^{-1} - 0.168} \quad (18)$$

$$G'_z(z) = \frac{0.759z^{-2} - 0.335z^{-1} - 0.422}{z^{-2} - 0.863z^{-1} - 0.135} \quad (19)$$

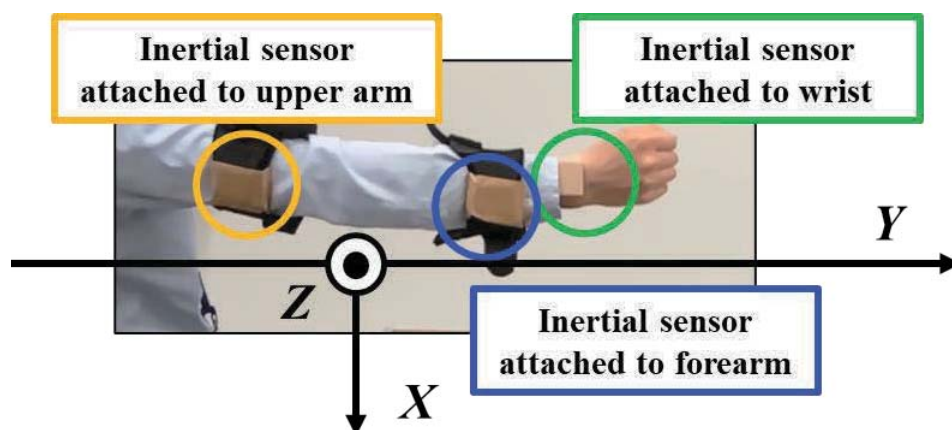


Fig. 4 Setting position of inertial sensor and definition of coordinate system

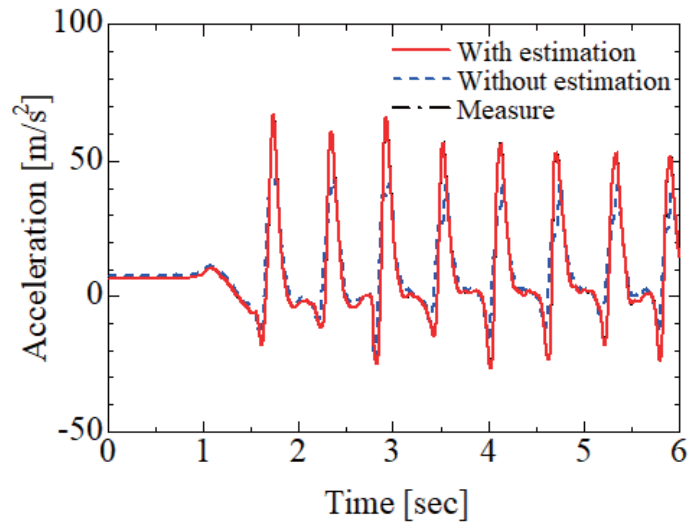


Fig. 5 Result for error estimation of x-axis acceleration using the model

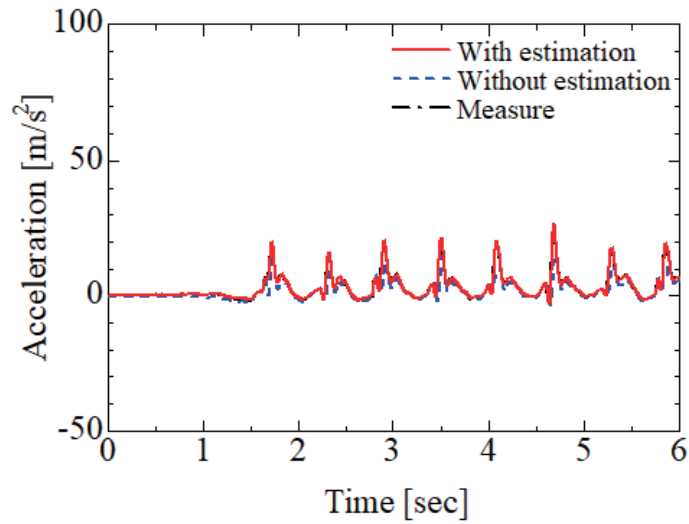


Fig. 6 Result for error estimation of y-axis acceleration using the model

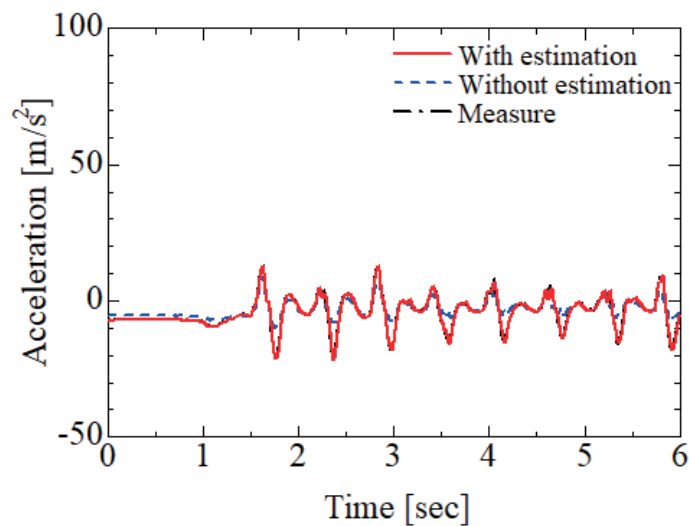


Fig. 7 Result for error estimation of z-axis acceleration using the model

## 6. 結 言

本研究では、身体部位に慣性センサシステムを取り付けた際に生じる誤差を除去・低減させるための方法について検討するために、伝達特性を表すパルス伝達関数と他軸間干渉を表す回転行列を用いてモデル化し、拡張カルマンフィルタを用いたパラメータ推定を行った。直接伝達される要素に加え、他軸間干渉を想定することにより、先行研究と比較して良く一致した加速度の推定結果が得られた。今後の課題として角速度における検証と本モデルは誤差要素を特定するためのモデルであることから、誤差補正を行うためのモデルについても検討を行う。さらに、センサを取り付けた部位間の関節運動を考慮したモデルについても検討を行う。

## 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) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, “慣性センサ・地磁気センサを用いたスポーツにおける姿勢計測に関する研究”, スポーツ産業学研究, Vol. 22, No. 2 (2012), pp. 255-262.
- (3) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, “慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.803 (2013), pp.2351-2361.
- (4) 廣瀬圭, 近藤亜希子, 辻内伸好, 伊藤彰人, “ウェアラブルセンサシステムを用いた関節トルク推定における誤差低減に関する研究”, Dynamic & Design Conference 2020 講演論文集, (2020), 431.
- (5) 廣瀬圭, 近藤亜希子, 白石元, 小池関也, “ウェアラブルセンサを用いた運動計測・解析における誤差補正モデルの構築に関する研究”, 久留米工業大学研究報告, No.44 (2021), pp.61-68.