

〔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 誤差補正モデルの構築に関する研究

廣瀬 圭^{*1}・近藤亜希子^{*1}・白石 元^{*1}・小池 関也^{*2}

Developing an error compensation model for motion measurement
and analysis using wearable sensors

Kiyoshi HIROSE^{*1}, Akiko KONDO^{*1}, Hajime SHIRAIISHI^{*1} and Sekiya KOIKE^{*2}

Abstract

This study aims to reduce errors in joint torque estimation using a wearable sensor system. The wearable sensor system comprises a wearable motion sensor with inertial and magnetic field sensors. The wearable motion sensor outputs the 3-axis angular velocity, 3-axis acceleration, and 3-axis magnetic field. By attaching an inertial sensor system, we conducted error modeling and model identification. Measurement information of inertial sensor systems attached to the wrist and forearm segments was used. This method considered the error elements effect using the spring and damping elements, and an additional model was developed. The transfer functions defined as the error compensation model were identified using the measurement information, and the degree of the numerator and denominator in the transfer functions were modified. The 3-axis angular velocity and 3-axis acceleration were compensated, and the results showed the model's effectiveness.

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

1. 緒 言

近年のMEMS技術の進歩による慣性センサの急速な小型化・低価格化が著しいことから、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を適用することにより姿勢情報を得ることができ、地面反力情報を併用することによる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^{(1),(2),(3)}。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ールとは異なり、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⁽⁴⁾。さらに正確に身体運動を計測・解析するためには適切なモデルを用いた同定・解析が必要である。

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、複数のパターンを想定したモデルを用いた同定・解析を行い、必要なモデルの特定を行う。

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DSP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。

^{*1} 久留米工業大学工学部機械システム工学科、^{*2} 筑波大学
令和3年11月4日受理



Fig. 1 DSP Wireless motion sensor

3. 解析方法

本研究では、各身体部位に取り付けられた慣性センサと皮膚・衣服の間に生じる動特性をばねとダンパを用いて近似した、図2に示すセグメントモデルを拡張する形で解析を行う。慣性センサの質量を m 、ばね定数を k 、減衰係数を c とすると、関節に生じる力を入力とした時の各センサの加速度の関係を伝達関数で表すと、式(1)となる。

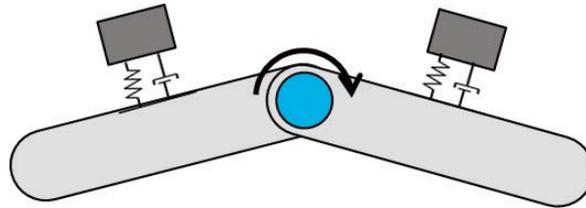


Fig. 2 Two segment model including spring and damping elements

$$G(s) = \frac{\frac{k}{m}s + \frac{k}{m}}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (1)$$

また、減衰係数/質量を a_1 , a_2 、ばね定数/質量を b_1 , b_2 としてそれぞれまとめると、 $G(s)$ 式(2)で表される。

$$G(s) = \frac{as + b}{s^2 + as + b} \quad (2)$$

上記モデルより、ばねとダンパを用いて仮定した場合、では、分子と分母の係数が同じになるが、本研究では最も高い精度となる係数を調べるため、それぞれの係数を別々として次数のみを固定した式(3)を用いる。

$$G(s) = \frac{as + b}{s^2 + cs + d} \quad (3)$$

さらに本研究では、ばねとダンパのみだけでなく、加速度が直接伝達されることを想定したモデルについても仮定する。仮定したモデルのブロック線図を図3に示し、伝達関数 $G'(s)$ を式(4)に示す。

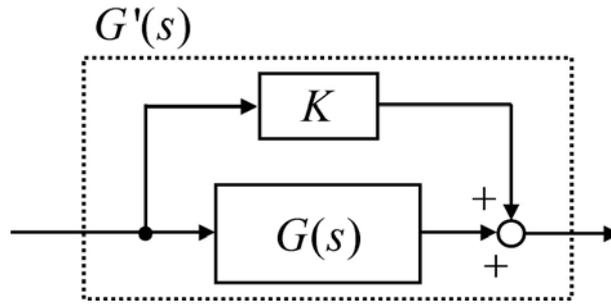


Fig. 3 Block diagram for transfer function of impedance and direct transfer factor

$$G'(s) = K + \frac{as + b}{s^2 + cs + d} = \frac{es^2 + fs + g}{s^2 + hs + kd} \quad (4)$$

本研究では、振動が生じにくい部位である手首の角速度、加速度から振動が生じやすい前腕部の角速度、加速度を推定することにより、モデルの同定を行う。そこで、得られる計測情報に複数の伝達関数を適用し、一致度を比較する。本システム同定には、MATLAB の System Identification Toolbox を使用した。

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に取り付け、任意の運動を行った際に得られる計測情報を用いて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。手首に取り付けたセンサから得られる計測情報から前腕部に取り付けたセンサの計測情報を推定するための伝達関数（モデル1）を推定した結果を式(5)～式(10)に、推定値の比較を図5、図6に示し、平均偏差を表1に示す。ここで、 $\Omega(s)$ 、 $A(s)$ は角速度、加速度のラプラス変換であり、Y軸が腕の長軸方向である。

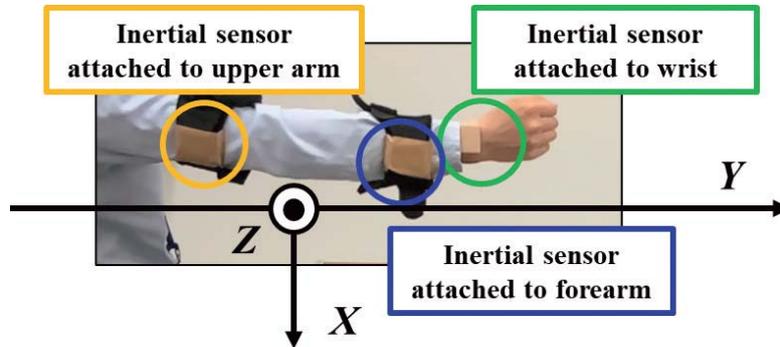


Fig. 4 Setting position of inertial sensor and definition of coordinate system

$$\Omega_x(s) = \frac{7.279 \cdot 10^{-4}s - 9.814 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 1.038 \cdot 10^{-5}s + 1.07 \cdot 10^{-6}} \Omega_{0x}(s) \quad (5)$$

$$\Omega_y(s) = \frac{237s + 2.496 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.4051s + 2.723 \cdot 10^{-5}} \Omega_{0y}(s) \quad (6)$$

$$\Omega_z(s) = \frac{118.6s + 1.176 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 7.262 \cdot 10^{-7}s + 1.196 \cdot 10^{-5}} \Omega_{0z}(s) \quad (7)$$

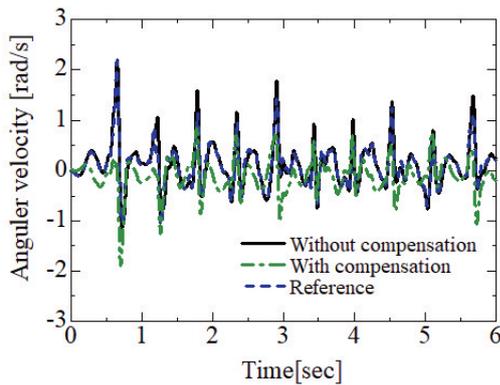
$$A_x(s) = \frac{18.2s + 1562}{s^2 + 16.72s + 1486} A_{\alpha_x}(s) \tag{8}$$

$$A_y(s) = \frac{65.68s + 3.088}{s^2 + 51.5s + 0.4531} A_{\alpha_y}(s) \tag{9}$$

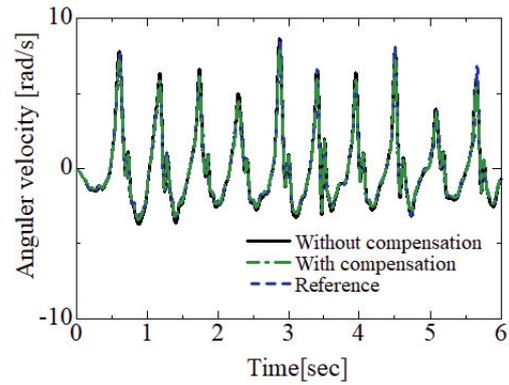
$$A_z(s) = \frac{932.4s + 7.658 \cdot 10^{-4}}{s^2 + 2007s + 7.648 \cdot 10^{-4}} A_{\alpha_z}(s) \tag{10}$$

Table 1 Mean deviation for indicating effectiveness of the compensation model 1

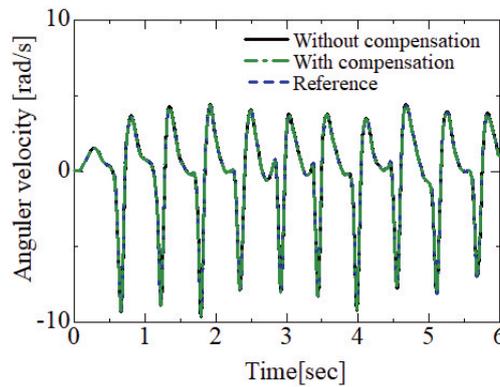
	With compensation model 1 (Mean deviation)	Without compensation model 1 (Mean deviation)
X-axis Angular velocity	0.0536 rad/sec	0.0449 rad/sec
Y-axis Angular velocity	0.1354 rad/sec	0.1652 rad/sec
Z-axis Angular velocity	0.0437 rad/sec	0.0494 rad/sec
X-axis Acceleration	0.1607 m/s ²	0.3478 m/s ²
Y-axis Acceleration	0.1160 m/s ²	0.0871 m/s ²
Z-axis Acceleration	0.0601 m/s ²	0.0665 m/s ²



(a) X-axis component



(b) Y-axis component



(c) Z-axis component

Fig. 5 Result for error compensation of angular velocity using model 1

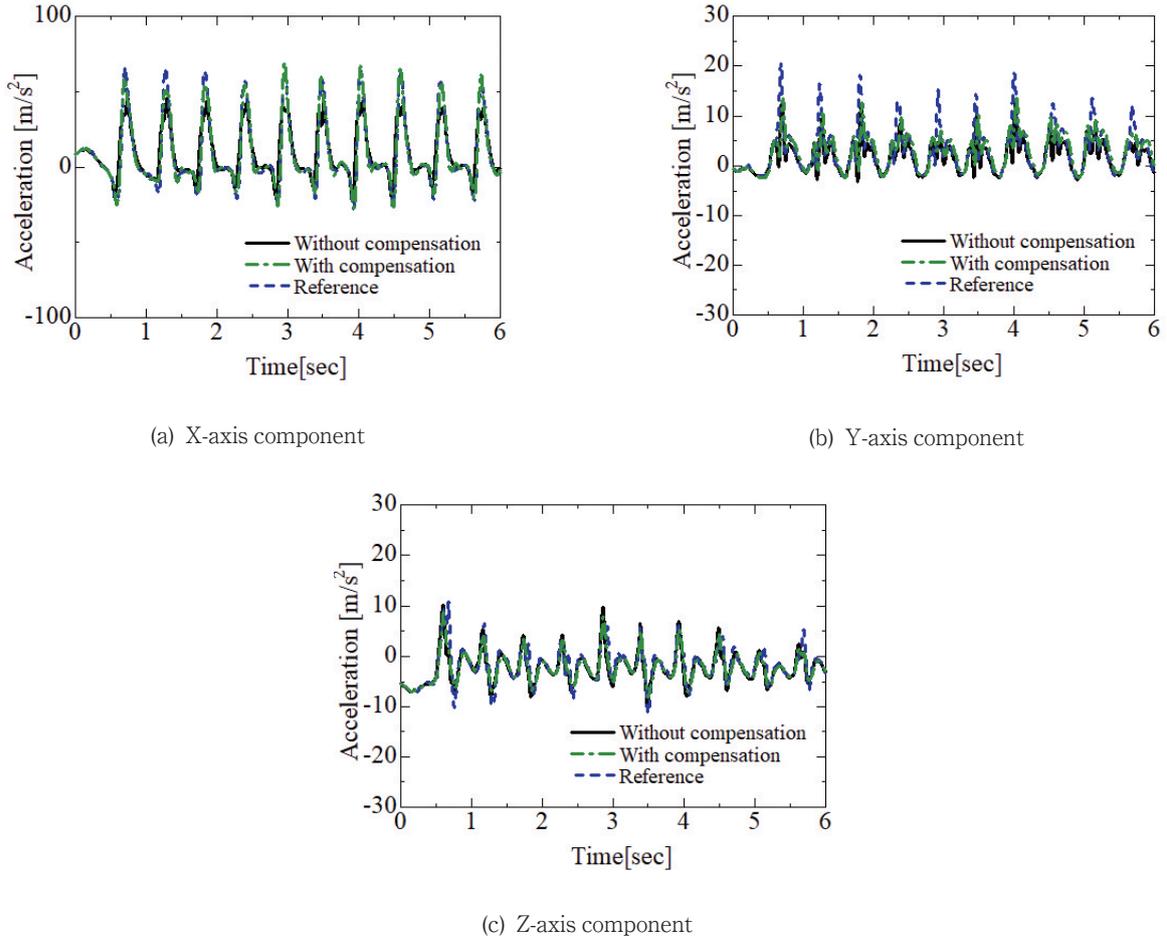


Fig. 6 Result for error compensation of acceleration using model 1

平均偏差の結果より、Y軸角速度、Z軸角速度、X軸加速度、Z軸加速度については誤差が低減した結果が得られているが、X軸角速度、Y軸加速度については誤差が増大している。本結果は、ばねとダンパを用いたモデルのみでは不十分であることを示している。そこで、加速度が直接伝達される場合を想定したモデル（式(4)）を用いて推定した伝達関数（モデル2）の結果を式(11)～式(16)に、推定値の比較を図7、図8に示し、平均偏差とモデル1を基準としたモデル2の改善率を表2に示す。Y軸加速度については、本モデルを用いても不十分であると考えられたため、伝達関数を連結させた4次モデルを使用している。

$$\Omega'_x(s) = \frac{0.8772s^2 + 1.916s + 1111}{s^2 + 1.522s + 1295} \Omega_{0x}(s) \quad (11)$$

$$\Omega'_y(s) = \frac{1.891s^2 + 221.5s + 15790}{s^2 + 272.2s + 16570} \Omega_{0y}(s) \quad (12)$$

$$\Omega'_z(s) = \frac{0.9907s^2 + 17.3s + 3504}{s^2 + 16s + 3555} \Omega_{0z}(s) \quad (13)$$

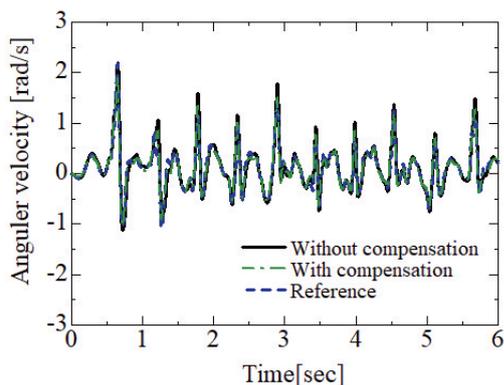
$$A'_x(s) = \frac{0.09329s^2 + 16.49s + 1580}{s^2 + 15.4s + 1483} A_{0x}(s) \quad (14)$$

$$A'_y(s) = \frac{1.518s^4 + 8.324s^3 + 1525s^2 + 8955s + 59920}{s^4 + 39.5s^3 + 949.4s^2 + 10210s + 37780} A_{0y}(s) \quad (15)$$

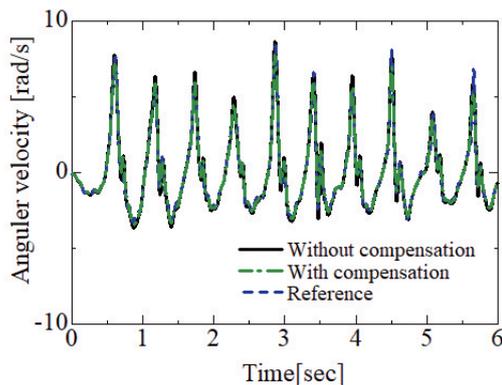
$$A'_z(s) = \frac{0.9908s^2 - 5.14s + 1888}{s^2 + 10.92s + 1913} A_{0z}(s) \quad (16)$$

Table 2 Mean deviation for indicating effectiveness of the compensation model 2

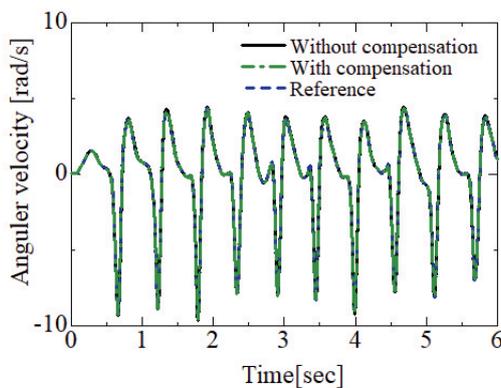
	With compensation Model 2 (Mean deviation)	Improvement rate of Model 2 based on Model 1
X-axis Angular velocity	0.0391 rad/sec	27.05%
Y-axis Angular velocity	0.1238 rad/sec	8.57%
Z-axis Angular velocity	0.0401 rad/sec	8.24%
X-axis Acceleration	0.1581 m/s ²	1.62%
Y-axis Acceleration	0.0834 m/s ²	28.10%
Z-axis Acceleration	0.0554 m/s ²	7.82%



(a) X-axis component



(b) Y-axis component



(c) Z-axis component

Fig. 7 Result for error compensation of angular velocity using model 2

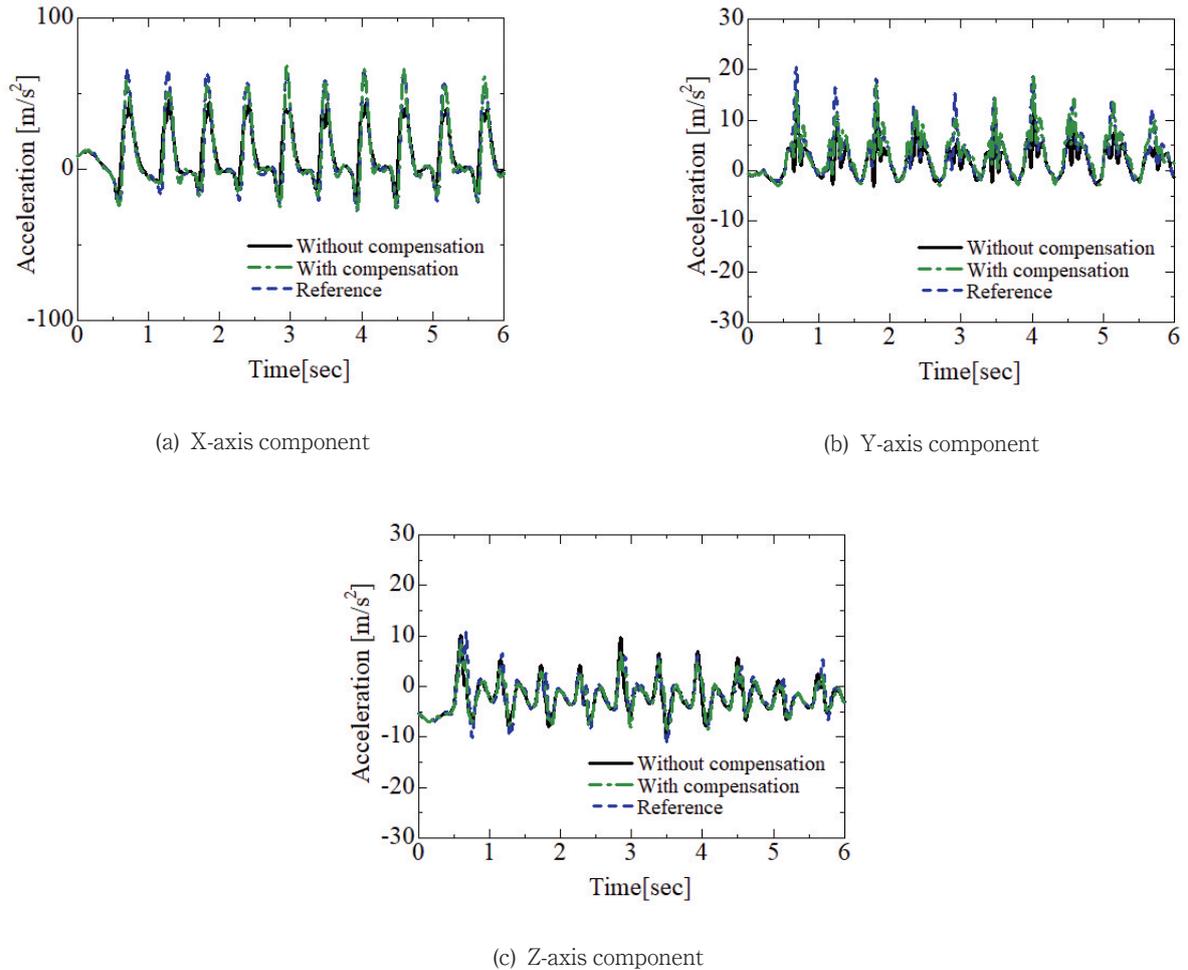


Fig. 8 Result for error compensation of acceleration using model 2

5. 考 察

角速度における振動等の影響は、加速度と比べて生じにくいことから、補正による効果は低くなっており、各軸ともに同じ次数の伝達関数を用いた推定により一定の精度を実現することができた。加速度における振動等の影響は角速度よりも大いため、各軸ともに誤差が表れているが、推定した伝達関数を用いることにより、補正後の加速度を規範となる加速度に近づけることができた。慣性センサを腕に巻くバンドを用いて固定していることから、長軸方向である Y 軸の差が最も大きく、他の軸と同じ次数で同定を行った場合、十分な補正効果が得られなかったため、次数を高く設定することによる同定を行い、差を減少させることができた。本結果は、バンド等を用いてセンサを固定した場合、長軸方向の拘束が他の軸と比べて緩くなるために差が生じやすくなっていること、生じている特性が高次であることを示しているが、特性を考慮した次数設定を行った伝達関数を用いることにより、補正を行うことが可能である。

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、特性を伝達関数によってモデル化し、システム同定による伝達関数の係数推定を行った。衣服・皮膚のセンサの間をばねとダンパを用いて表現したモデルを用いて特性推定を行ったが、精度が低下した結果が複数生じたため、モデルとして不十分であること、より高次のモデルが必要であることが示された。そこで、直接伝達される要素を考慮したモデルを使用した結果、有効な結果が得られた。さらに、長軸方向の加速度については拘束によって生じる特性が異なることから、より高い次数のモデルが必要であることが明らかとなった。本論文では、2つの隣り合うセグメントに取り付けられている慣性センサの座標系が同一であることを前提として解析を行ったが、座標系が異なる場合にも対応した方法に拡張することにより実用性を向上することができるため、今後の課題としてセグメント間の座標系の

ずれを考慮した方法の構築を検討する。

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, pp. 255-262 (2012).
- (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, pp. 2351-2361 (2013).
- (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, 431, (2020).