

慣性センサを用いた身体運動計測における地磁気センサ校正法に関する研究

近藤 亜希子^{*1}, 土岐 仁^{*1}, 廣瀬 圭^{*1}

A Study on calibration method of magnetic field sensor for body motion measurement using inertial sensor

Akiko KONDO^{*1}, Hitoshi DOKI and Kiyoshi HIROSE

^{*1} Aktia Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Gakuenmachi Tegata 1-1, Akita city, Akita, 010-8502 Japan

This paper proposes the calibration method of magnetic field sensor using inertial sensor. The calibration of magnetic field sensor is effectiveness as the compensation method of static magnetic disturbance. In the previous studies, the calibration methods using the special devices have been proposed. On the other hand, the magnetic field sensor is attached to the body segment in body motion measurement. It is necessary to develop the calibration method for body motion measurement. In this study, we developed the calibration method of magnetic field sensor for body motion measurement. This method can estimate the calibration parameter of magnetic field sensor by applying the inertial sensor output to Extended Kalman filter. Furthermore, This method was extended to the method considering the alignment error between the inertial and magnetic field sensors.

Key Words : Sports Engineering, Human Dynamics, Sensor, Measurement, Sensor fusion

1. 緒 言

近年, MEMS 技術の進歩により, 慣性センサ (ジャイロセンサ・加速度センサ) の小型化が進み, スポーツ・医療分野等の運動計測に利用されており, 様々な運動計測・解析法が提案されている. 慣性センサは, 主に運動計測として使用されている映像情報等を用いた DLT 法と比較して低コストかつ簡易な運動計測が可能であることから, 様々な分野への応用が期待されている. しかし, 慣性センサから得られる計測情報は, 角速度・加速度であるため, 運動解析において重要な運動情報である, 姿勢情報を直接推定することができない. 慣性センサからの計測情報を用いて姿勢情報を計算するためには, ジャイロセンサから得られる角速度からの変換・積分を行う必要がある. しかし, ジャイロセンサの出力には, ドリフトによる誤差が含まれているため, 積分演算を行うとその誤差が蓄積する. そこで, ドリフトによる誤差を補正する方法として, 他のセンサ情報を統合することによって誤差を補正するセンサ・フュージョンが提案されており, これまで筆者らもジャイロセンサのドリフト誤差を加速度センサと地磁気センサの出力を用いて補正するセンサ・フュージョン^{1),2),3)}を提案している. しかし, 地磁気センサが計測する磁場には, 他の磁場発生源や金属による影響が含まれるため, 屋内環境や他のセンサを併用した場合, 精度が低下する可能性がある. そこで, 相対座標系に着目することによって, 地磁気センサを用いず, かつ動的加速度による誤差の影響にも対応したセンサ・フュージョンを提案している. しかし, 本方法によって得られる運動情報は, 相対座標系の情報に限定されるため, 絶対座標系の情報を得ることができない. ドリフトによる誤差を補正した絶対座標系の姿勢情報を得るためには, 地磁気センサを用いた方位計測が必要であるため, 磁場外乱の発生する環境下において慣性センサを用いた姿勢計測を行うためには, 磁場外乱による影響を補正可能な方法を開発する必要がある. 磁場外乱に対応した方法として, 局所的に磁場外乱が発生した場合,

^{*1} 正員, 秋田大学大学院工学資源学研究所 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)
E-mail: kondou@mech.akita-u.ac.jp

その影響を回避可能なセンサ・フュージョン⁴⁾も提案されているが、定常的に磁場外乱が発生する環境では使用できない。定常的な磁場外乱に対応するためには、地磁気センサをその環境に応じて校正する必要がある。

地磁気センサの校正法として、プリズムミラーを搭載した装置を用いた校正法⁵⁾や非磁性体によって構成された装置を用いた校正法⁶⁾が提案されているが、身体運動計測の場合、地磁気センサは計測時には身体部位に取り付けられており、身体による外乱の影響も含めた校正を行う必要があるため、専用の装置を用いた校正法を適用することは難しい。そこで、本研究では、地磁気センサを校正するために、ジャイロセンサから得られる角速度を用いて補正する方法を提案する。さらに、ジャイロセンサと地磁気センサの間に若干発生する配置誤差を考慮した方法へ展開し、さらなる精度向上を目指す。

2. 計測システム

本研究では、慣性センサ・地磁気センサを搭載した図1に示す計測システムを用いる。本システムには、ジャイロセンサ(InvenSense, ITG-3200)、加速度センサ(Analog Devices, ADXL345)、地磁気センサ(愛知製鋼, AMI304)とそれらの計測情報を収集し、PCへ送信するためのマイコン(Microchip, PIC16F88)が搭載されている。

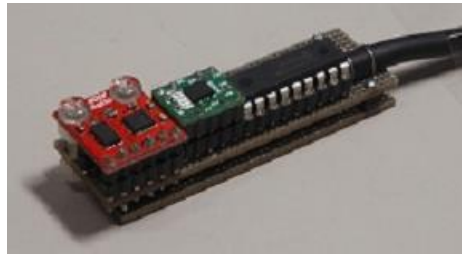


Fig. 1 Measurement system

3. 地磁気センサ校正法

本研究では、ジャイロセンサから得られる角速度情報を用いて地磁気センサの校正を行う。地磁気センサの出力モデルを式(1)に示す。ここで、 $M_{(t)}$ がセンサ出力、 $m_{(t)}$ が磁場、 G が感度、 B_i がオフセットである。磁場外乱が発生すると、感度とオフセットが変動するため、環境に応じて校正する必要がある。

$$M_{(t)} = Gm_{(t)} + B_i \quad (1)$$

$$M_{(t)} = \begin{bmatrix} M_{x(t)} \\ M_{y(t)} \\ M_{z(t)} \end{bmatrix}, m_{(t)} = \begin{bmatrix} m_{x(t)} \\ m_{y(t)} \\ m_{z(t)} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} G_x & 0 & 0 \\ 0 & G_y & 0 \\ 0 & 0 & G_z \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

実験環境において、磁場の総量が一定であると仮定すると、磁場の和は式(3)で表され、地磁気センサ出力と絶対座標系における磁場との関係は式(4)で表される。ここで、 ${}^0R_{i(t)}$ は*i*リンク座標系から絶対座標系への回転行列である。

$$\sqrt{m_{x(t)}^2 + m_{y(t)}^2 + m_{z(t)}^2} = const. \quad (3)$$

$${}^0R_{i(t)}m_{(t)} = {}^0R_{i(t-1)}m_{(t-1)} = {}^0m = const. \quad (4)$$

式(4)を微分すると式(5)が得られ、回転行列の微分値は、角速度を用いて式(6)で表すことができる。

$$\frac{d}{dt}({}^0R_{i(t-1)}m_{(t-1)}) = {}^0\dot{R}_{i(t-1)}m_{(t-1)} + {}^0R_{i(t-1)}\dot{m}_{(t-1)} = 0 \quad (5)$$

$${}^0\dot{R}_{i(t-1)} = {}^0R_{i(t-1)}[\omega_{(t)} \times] \quad (6)$$

式(6)を式(5)へ代入し、差分法を用いて離散化すると式(7)が得られ、最終的に磁場と角速度の関係式(8)が得られる。ここで、Tsはサンプリング周期である。

$${}^0R_{i(t-1)}m_{(t)} = {}^0R_{i(t-1)}(m_{(t-1)} - Ts[\omega_{(t)} \times]m_{(t-1)}) \quad (7)$$

$$m_{(t)} = m_{(t-1)} - Ts[\omega_{(t)} \times]m_{(t-1)} \quad (8)$$

式(8)を満たす感度とオフセットを推定することによって地磁気センサの校正を行う。本研究では、校正を行うために拡張カルマンフィルタ⁷⁾を用いる。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状態値で偏微分を行うことによって部分的に線形化し、最適値推定を可能とした非線形フィルタである。構築した非線形状態方程式、非線形観測方程式を式(9)、式(10)に示す。

$$x_{(t+1)} = F(x_{(t)}) + w_{(t)} \quad (9)$$

$$y_{(t)} = H(x_{(t)}) + v_{(t)} \quad (10)$$

$$x_{(t)} = \begin{bmatrix} m_{x(t)} \\ m_{y(t)} \\ m_{z(t)} \\ G_x \\ G_y \\ G_z \\ B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{bmatrix}, \quad F(x_{(t)}) = \begin{bmatrix} m_{x(t)} \\ m_{y(t)} \\ m_{z(t)} \\ G_x \\ G_y \\ G_z \\ B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{bmatrix} - Ts \begin{bmatrix} \omega_{y(t)}m_{z(t)} - \omega_{z(t)}m_{y(t)} \\ \omega_{z(t)}m_{x(t)} - \omega_{x(t)}m_{z(t)} \\ \omega_{x(t)}m_{y(t)} - \omega_{y(t)}m_{x(t)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$y_{(t)} = \begin{bmatrix} M_{x(t)} \\ M_{y(t)} \\ M_{z(t)} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad H(x_{(t)}) = \begin{bmatrix} G_x m_{x(t)} + G_x m_{y(t)} + G_x m_{z(t)} \\ G_y m_{x(t)} + G_y m_{y(t)} + G_y m_{z(t)} \\ G_z m_{x(t)} + G_z m_{y(t)} + G_z m_{z(t)} \\ m_{x(t)}^2 + m_{y(t)}^2 + m_{z(t)}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \\ 0 \end{bmatrix}$$

構築した非線形状態方程式、非線形観測方程式を拡張カルマンフィルタアルゴリズムに適用し、繰り返し計算を行うことによりパラメータ推定を行う。

さらに、精度向上を行うために、ジャイロセンサと地磁気センサの間に生じる配置誤差を考慮した校正法を構築する。ジャイロセンサと地磁気センサの間に3次的に配置誤差が生じていると仮定すると、配置誤差の関係は、回転行列を用いて次式で表わされる。ここで、 φ 、 θ 、 ψ はジャイロセンサと地磁気センサの間の傾きを表すロール角、ピッチ角、ヨー角を示しており、 i はジャイロセンサ、 j は地磁気センサの座標系を示している。

$${}^j m_{(t)} = {}^j m_{(t-1)} - Ts \cdot {}^j R_i \cdot {}^i \omega_{(t)} \times {}^j m_{(t-1)} \quad (11)$$

$${}^i R_j = \begin{bmatrix} C\psi C\theta C\varphi - S\psi S\varphi & -C\psi C\theta S\varphi - S\psi C\varphi & C\psi S\theta \\ S\psi C\theta C\varphi + C\psi S\varphi & -S\psi C\theta S\varphi + C\psi C\varphi & S\psi S\theta \\ -S\theta C\varphi & S\theta S\varphi & C\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

配置誤差を同時に推定するように、式(9)、式(10)を拡張すると次式が得られる。

$$x_{(t+1)} = F(x_{(t)}) + w_{(t)} \quad (13)$$

$$y_{(t)} = H(x_{(t)}) + v_{(t)} \quad (14)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} m_{x,y,z(t)} \\ G_{x,y,z} \\ B_{ix,y,z} \\ \psi, \theta, \varphi \end{bmatrix}, \quad y_{(t)} = \begin{bmatrix} M_{x(t)} \\ M_{y(t)} \\ M_{z(t)} \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$F(x_t) = \begin{bmatrix} m_{x(t-1)} \\ m_{y(t-1)} \\ m_{z(t-1)} \\ G_x \\ G_y \\ G_z \\ B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \\ \psi, \theta, \varphi \end{bmatrix} - \text{Ts} \begin{bmatrix} C\psi C\theta C\varphi - S\psi S\varphi & -C\psi C\theta S\varphi - S\psi C\varphi & C\psi S\theta \\ S\psi C\theta C\varphi + C\psi S\varphi & -S\psi C\theta S\varphi + C\psi C\varphi & S\psi S\theta \\ -S\theta C\varphi & S\theta S\varphi & C\theta \\ 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{y(t)} m_{z(t-1)} - \omega_{z(t)} m_{y(t-1)} \\ \omega_{z(t)} m_{x(t-1)} - \omega_{x(t)} m_{z(t-1)} \\ \omega_{x(t)} m_{y(t-1)} - \omega_{y(t)} m_{x(t-1)} \end{bmatrix}$$

$$H(x_t) = \begin{bmatrix} G_x m_{x(t)} + G_x m_{y(t)} + G_x m_{z(t)} \\ G_y m_{x(t)} + G_y m_{y(t)} + G_y m_{z(t)} \\ G_z m_{x(t)} + G_z m_{y(t)} + G_z m_{z(t)} \\ m_{x(t)}^2 + m_{y(t)}^2 + m_{z(t)}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \\ 0 \end{bmatrix}$$

以上より構築した、非線形状態方程式、非線形観測方程式を拡張カルマンフィルタに適用することによってパラメータ推定を行う。

4. 実 験

本研究では、提案した校正法を用いて推定したパラメータの精度を検証するために、パラメータを用いた3次元姿勢計測を行い、図2に示すロータリーエンコーダを搭載した実験装置から得られる結果との比較を行う。実験装置に計測システムを取り付け、手動で3次的に往復角運動をさせ、配置誤差を考慮しない校正法（方法1）と配置誤差を考慮した校正法（方法2）をそれぞれ適用し、パラメータ推定を行った後に、再度、往復角運動を行い、得られた計測情報に校正したパラメータと先行研究において開発した遠心・接線加速度の影響を考慮したセンサ・フュージョン²⁾を適用し、3次元姿勢情報を推定した。

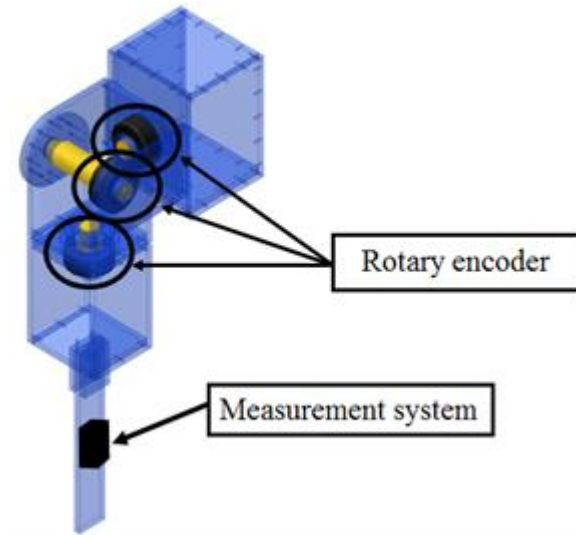
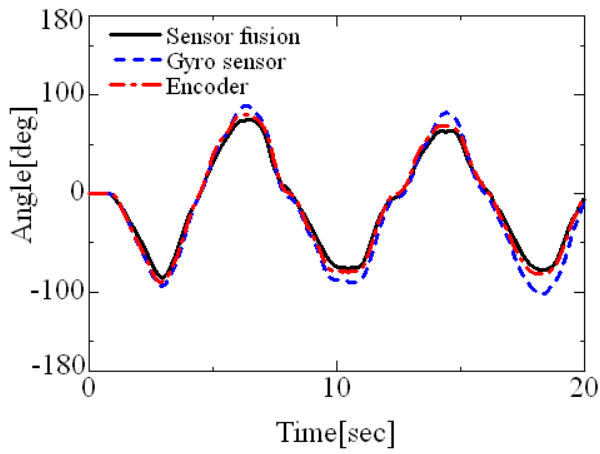
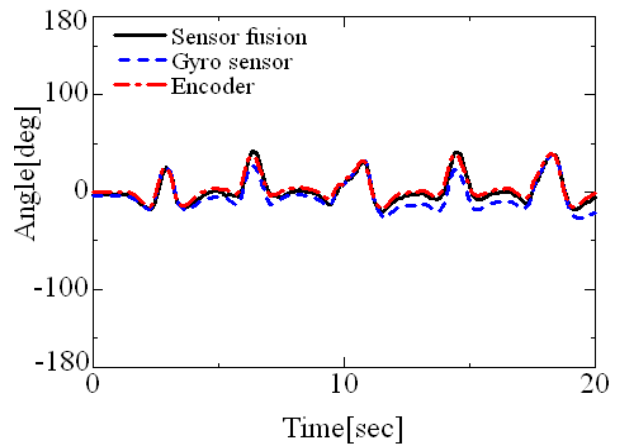


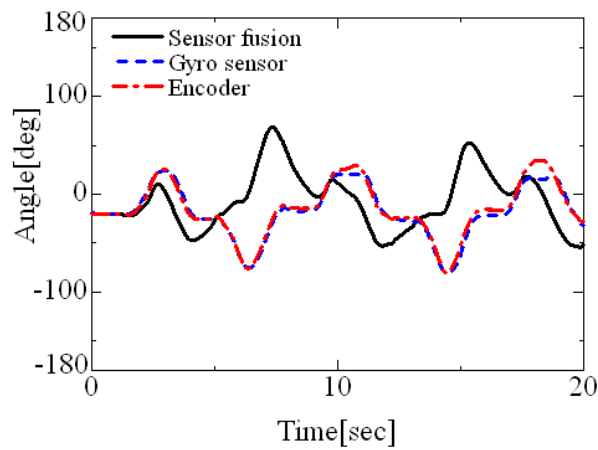
Fig.2 Experimental setup



(a) Roll angle



(b) Pitch angle



(c) Yaw angle

Fig.3 3D posture (No compensation of calibration parameter)

5. 実験結果

本校正法を用いずに推定した3次元姿勢推定情報（ロール・ピッチ・ヨー角）とジャイロセンサ出力を用いて計算した3次元姿勢情報の結果を図3に、配置誤差を考慮していない校正法より推定したパラメータを用いて推定したヨー角の結果を図4にそれぞれ示す。ジャイロセンサ出力を用いて計算した結果は、ロール角、ピッチ角、ヨー角のすべての結果においてドリフトによる誤差が発生し、時間の経過とともに誤差が増大しているが、3次元姿勢推定法を用いて推定したロール角とピッチ角においては、ドリフトによる誤差を補正した結果が得られている。しかし、ヨー角の結果においては、他の金属、磁場発生源や計測システムに搭載されている他のセンサや周辺機器による磁場外乱の影響を大きく受けているため、大きな誤差が発生している。本校正法を併用することによって推定したヨー角の結果は、エンコーダの結果と比較的一致しており、ジャイロセンサのドリフト誤差を補正した結果が得られた。しかし、地磁気センサと校正に使用したジャイロセンサとの間に生じている傾斜誤差の影響により、若干の誤差が発生している。

配置誤差を考慮した校正法を併用することによって推定したヨー角の結果を図5に、推定したパラメータの一覧を表1に、エンコーダの結果と推定したヨー角との二乗平均誤差の結果を表2にそれぞれ示す。配置誤差を考慮した校正法を併用することによって推定したヨー角の結果は、配置誤差を考慮していない場合と比較して、波形がエンコーダの結果とより一致しており、精度が向上した結果が得られた。また、二乗平均誤差の結果においても最も高精度な結果を示した。

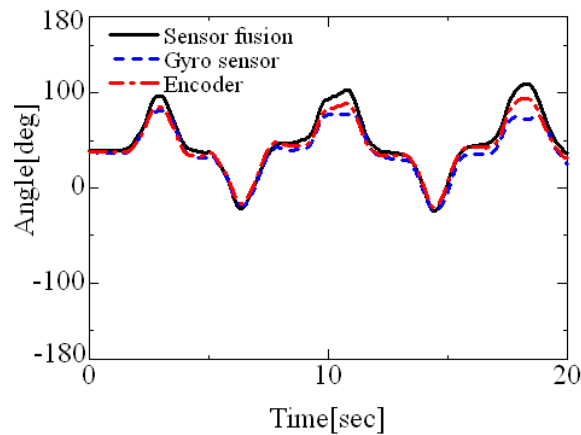


Fig.4 Yaw angle (With compensation of calibration parameter)

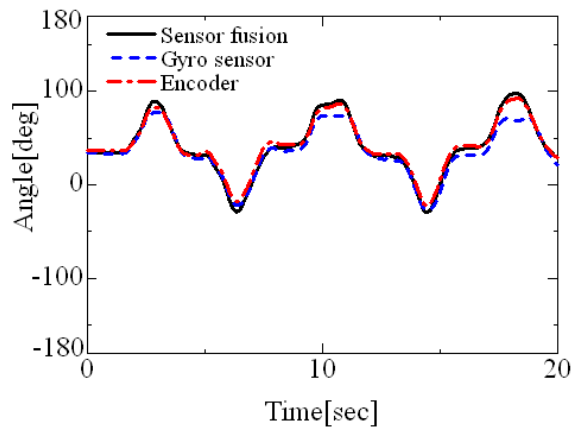


Fig.5 Yaw angle (With compensation of calibration parameter and alignment error)

Table 1 Calibration parameter

		Without compensation	With compensation of calibration parameter	With compensation of calibration parameter and alignment error
Sensitivity	G_x	559	249.84	250.37
	G_y	602	259.21	257.41
	G_z	603	231.09	209.91
Bias	B_{ix}	10	-868.76	-893.63
	B_{iy}	-9	-1096.6	-1095.1
	B_{iz}	104	-1100.0	-1079.9
Alignment error	φ			0.2349
	θ			-0.8308
	ψ			-1.5699

Table 2 Root mean square error

Method	RMSE [deg]
Gyro sensor	26.43
Sensor fusion (No compensation)	23.53
Sensor fusion (With compensation of calibration parameter)	3.96
Sensor fusion (With compensation of calibration parameter and alignment error)	3.52

6. 結 言

本研究では、定常的な磁場外乱が発生する屋内環境等において慣性センサ・地磁気センサを用いた運動計測法を使用するための方法として、地磁気センサの校正パラメータをジャイロセンサから得られる角速度を用いて推定する方法を提案した。さらに、本校正法をジャイロセンサと地磁気センサの間に生じている配置誤差を同時に推定可能な方法に拡張することによって、さらなる精度向上を行うことができた。本方法を用いることにより、屋内環境において慣性センサ・地磁気センサを使用した運動計測が可能になることから、屋内スポーツ等における運動計測への応用が期待できる。

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 (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) Angelo M. Sabatini, “Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 53, No.7 (2006), pp. 1348-1356.
- (5) Rong Zhu and Zhaoying Zhou, “Calibration of three-dimensional integrated sensors for improved system accuracy”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 127 (2006), pp. 340-344.
- (6) J. Vcelak, P. Ripka, J. Kubik, A. Platil and P. Kaspar, “AMR navigation systems and methods of their calibration”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 123-124 (2005), pp. 122-128.
- (7) 谷萩隆嗣, カルマンフィルタと適応信号処理, (2005), pp.47-59, コロナ社.