

地磁気センサ補正における計測環境の影響

A study on effect of geomagnetic sensor correction in various environments

○学 後藤 健太郎^{*1}, 佐藤 颯^{*1}

齊藤 亜由子^{*1}, 木澤 悟^{*2}

Kentaro Goto^{*1}, Hayato Sato^{*1},

Ayuko Saito^{*1} and Satoru Kizawa^{*2}

^{*1} 工学院大学 Kogakuin University

^{*2} 秋田工業高等専門学校 National Institute of Technology (KOSEN), Akita College

MEMS sensors have come to be used for various functions of smartphones and automatic driving system. The 9-axis motion sensor, which is one of the sensor modules, includes a three-axis gyro sensor, a three-axis acceleration sensor, and a three-axis geomagnetic sensor. The geomagnetic sensors which enable to measure the absolute direction are often used to estimate human posture. However, since the magnetic field is easily affected by the outside, it's necessary to correct the sensor output. In this research, the geomagnetic sensor output is corrected using the gyro sensor output. The proposed method does not need complicated procedures. We verify the effectiveness of the proposed method even in environments where magnetic field disturbance generated, such as underground and high-rise buildings made of reinforced concrete. Furthermore, the knee joint angle during walking is estimated using the two 9-axis motion sensors by the proposed method.

Key Words : Measurement engineering, Sensor fusion, 9-axis motion sensor, Geomagnetic sensor, Posture estimation

1. 緒 言

近年、技術の進歩により日常生活で多くのセンサが使用されている。センサモジュールの1つである9軸モーションセンサは、3軸ジャイロセンサ、3軸加速度センサ、3軸地磁気センサが搭載されている。MEMS技術の進歩により、センサの小型化と軽量化が進んでいるため、9軸モーションセンサは人間の動作計測などさまざまな用途に使用されている。姿勢推定はジャイロセンサ出力を積分することで可能であるが、ジャイロセンサ特有のドリフト誤差により推定精度は低下する。そのため加速度センサと地磁気センサを併用したセンサフュージョン⁽¹⁾により、高精度な姿勢推定が達成されている。地磁気センサの出力は、方位角を測定するために使用されている。しかし、屋内など磁場が変動しやすい環境もあるため、地磁気センサの出力を補正することは重要である。これまで、磁場変動の影響を回避するためのセンシング技術が提案されてきた⁽²⁾。著者らは、外乱磁場がある計測環境での長時間計測における地磁気センサの出力補正方法を提案している⁽³⁾。本研究では、先行研究の補正アルゴリズムを簡易化するとともに、高層ビルや地下など外乱磁場がある様々な環境での本手法の有効性について検証する。

2. 動作計測法

ジャイロセンサから得られた角速度を使用し⁽³⁾、最適な地磁気パラメータを推定する。地磁気センサの出力と磁場の関係は、式(1)で表される。

$$M_t = Gm_t + B \quad (1)$$

ここで、

$$M_t = \begin{bmatrix} M_{xt} \\ M_{yt} \\ M_{zt} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} m_{xt} \\ m_{yt} \\ m_{zt} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} G_x & 0 & 0 \\ 0 & G_y & 0 \\ 0 & 0 & G_z \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

M_t は地磁気センサの出力, m_t は補正された磁場, G は感度, B はオフセットである.

磁場の総量が一定であると仮定して, パラメータを推定するためのアルゴリズムを構築する. 式 (3) は磁場の合計を表し, 式 (4) は, i リンク座標の磁場と基準座標系における磁場の関係を表す.

$$\sqrt{m_{xt}^2 + m_{yt}^2 + m_{zt}^2} = \text{const} \quad (3)$$

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

${}^0R_{i,t}$ は, i リンク座標から参照座標への回転行列である.

式 (5) は, 式 (4) の微分を示しており, 式 (6) は, 角速度を使用した回転行列の微分を示している.

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

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

ここで, ω_t はジャイロセンサ出力であり, $[\omega_t \times]$ は外積である. 式 (6) に式 (5) を代入して差分法により離散化すると式 (7) が得られる. さらに式の両辺から回転行列を消去すると, 磁場と各速度の関連式 (8) が得られる.

$${}^0R_{i,t-1}m_t = {}^0R_{i,t-1}(m_{t-1} - T_s[\omega_t \times]m_{t-1}) \quad (7)$$

$$m_t = m_{t-1} - T_s[\omega_t \times]m_{t-1} \quad (8)$$

ここで, T_s はサンプリング周期である.

式 (8) を満たす地磁気パラメータを推定することによって地磁気センサ出力の補正を行う. パラメータ推定のための拡張カルマンフィルタを構成するために非線形離散時間システムを構築する. 非線形状態方程式は, 磁場と各速度の関係を示す式 (8) を用いて構成する. 非線形観測方程式は, 地磁気センサ出力と磁場の関係を示す式 (1) と磁場の和を示す式 (2) を用いて構成する. 非線形状態方程式, 非線形観測方程式をそれぞれ式 (9), (10) に示す.

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

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (10)$$

ここで,

$$x_t = \begin{bmatrix} m_{xt} \\ m_{yt} \\ m_{zt} \\ G_x \\ G_y \\ G_z \\ B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}, \quad F(x_t) = \begin{bmatrix} m_{xt} \\ m_{yt} \\ m_{zt} \\ G_x \\ G_y \\ G_z \\ B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} - T_s \begin{bmatrix} \omega_{yt}m_{zt} - \omega_{zt}m_{yt} \\ \omega_{zt}m_{xt} - \omega_{xt}m_{zt} \\ \omega_{xt}m_{yt} - \omega_{yt}m_{xt} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$y_t = \begin{bmatrix} M_{xt} \\ M_{yt} \\ M_{zt} \\ 1 \end{bmatrix}, H(x_t) = \begin{bmatrix} G_x m_{xt} + G_x m_{yt} + G_x m_{zt} \\ G_y m_{xt} + G_y m_{yt} + G_y m_{zt} \\ G_z m_{xt} + G_z m_{yt} + G_z m_{zt} \\ m_{xt}^2 + m_{yt}^2 + m_{zt}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

w_t , v_t は白色雑音である.

以上の非線形状態空間モデルを用いて拡張カルマンフィルタを解く. 先行研究においては, 状態値 x_t の初期値として, m_{xt} , m_{yt} , m_{zt} には地磁気計測データの一時刻目のデータ, G_x , G_y , G_z , B_x , B_y , B_z には事前に得た地磁気補正用パラメータを挿入していたが, 事前の計測が必要なことから動作計測の作業が煩雑となっていた. そのため, 本研究においては状態値 x_t の初期値に任意定数を挿入し, 動作計測時の取得データのみから適切な地磁気センサ補正用のパラメータを得る.

3. 実験

新宿区立新宿中央公園, 工学院大学新宿キャンパス地下1階, 同地上28階の3か所にて, 2種類の実験を行った. 実験1においては, 9軸モーションセンサ(スポーツセンシング社製, SS-WS1792)のXYZ各軸正方向を鉛直向きにして図1および図2に示す回転治具上へ固定し, 治具を回転させることでXY平面, YZ平面, ZX平面の磁場を計測した. 実験2においては, 実験協力者1名の歩行中における矢状面の膝関節角度を計測した. 歩行計測においては, 協力者右脚大腿部・下腿部へセンサを1つずつ固定した.

3・1 磁場の計測実験(実験1)

実験1においては, 1つのセンサのみを用いて, センサの三平面における磁場を計測した. その後, 三種類の方法で地磁気センサ出力を補正するためのパラメータ推定を行った. 方法1では計測結果を散布図で描き, グラフの外見を真円に近づけるように手動でパラメータの数値を調整した. 方法2(先行研究の手法)では非線形状態・観測方程式(式(9), (10))を使用し, 状態値の初期値に磁場の計測結果初期値および方法1で得られた補正パラメータを挿入して補正パラメータを推定した. 方法3(提案手法)では非線形状態・観測方程式(式(9), (10))を使用し, 状態値の初期値に適当な数値を挿入して補正パラメータを推定した. 三つの方法によって得られた補正パラメータを用いて, 補正したYZ平面の磁場の結果を図3, 図4に示す.

図3は方法1の結果, 図4は方法2の結果, 図5は方法3の結果であり, それぞれの(a)は新宿中央公園の結果, (b)は地下1階の結果, (c)は地上28階の結果を示す. 本結果より, いずれの方法においても地磁気センサ出力を補正するための適切なパラメータ推定が行われたことが示された.

3・2 歩行計測(実験2)

実験2においては, 2つのセンサを用いて, 図6, 図7に示すように実験協力者の右脚大腿部・下腿部へセンサを1つずつ固定し, 歩行計測を行った. その後, 三種類の方法で地磁気センサ出力を補正し, さらに先行研究のセンサ・フュージョン⁽⁴⁾を用いて, 矢状面における膝関節角度を推定した.

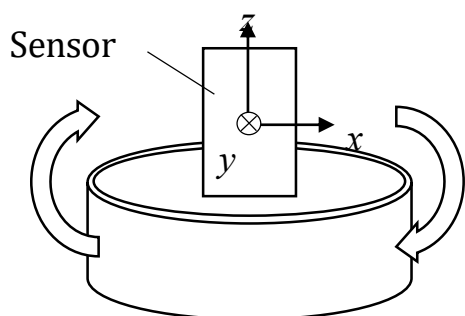


図1 Frontal schematic view of the device

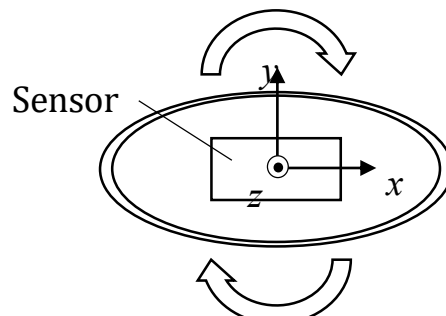


図2 Plane schematic view of the device

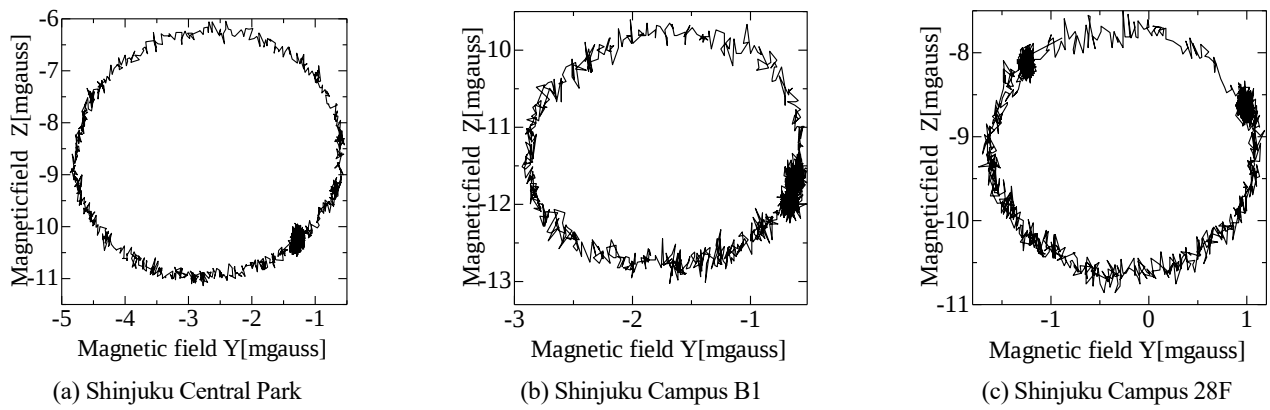


図 3 Results of manual adjustment (method 1)

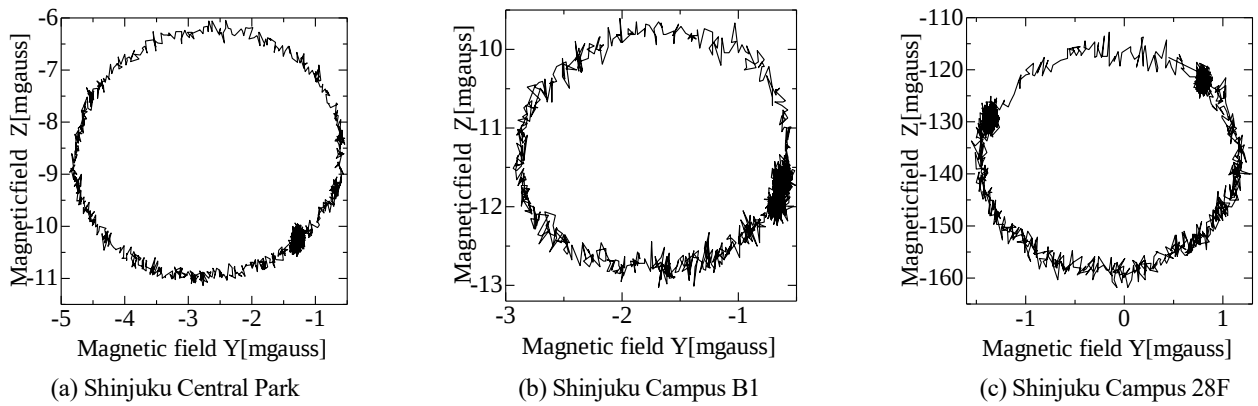


図 4 Results of automatically adjustment (method 2)

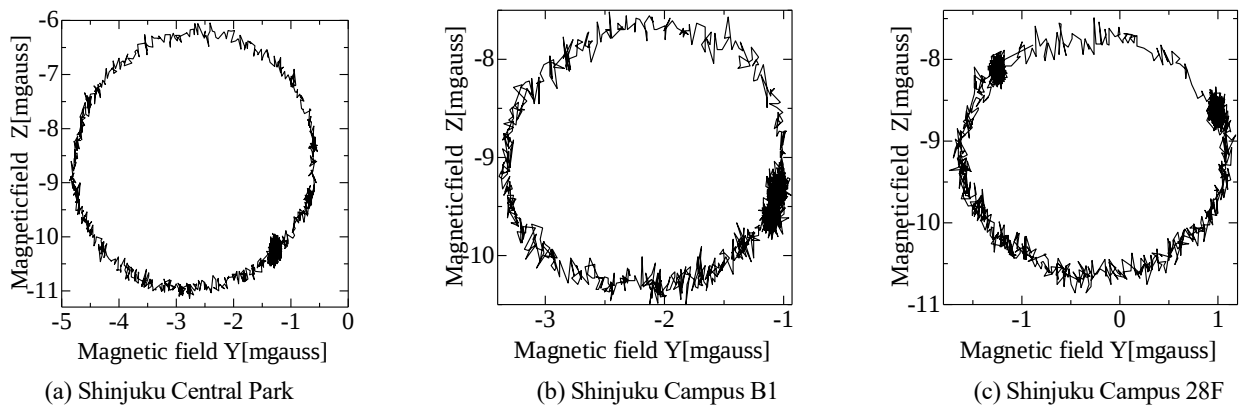


図 5 Results of automatically adjustment (method 3)

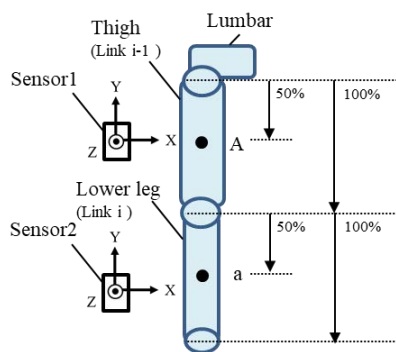


図 6 Setting of position sensors (front)

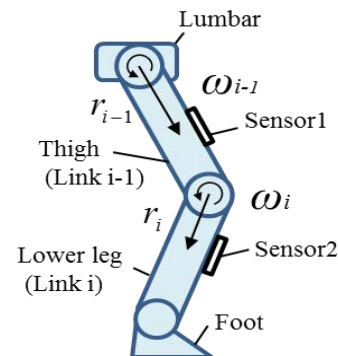


図 7 Setting of position sensors (side)

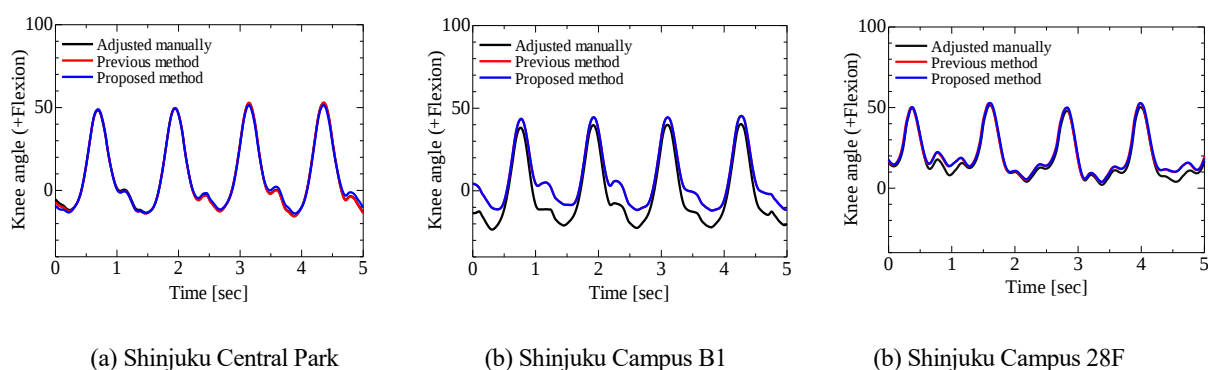


図 8 Extraction result for 5 seconds

方法Ⅰでは実験Ⅰの方法Ⅰによって手動調整で得られた補正パラメータを用い、補正を行った。方法Ⅱでは、実験Ⅰの方法Ⅱによって得られた補正パラメータを用い、補正に使用した。方法Ⅲ（提案手法）では、実験Ⅰの方法Ⅲによって得られた補正パラメータを用い、補正を行った。三つの方法によって得られた補正パラメータを用いて、センサ・フュージョンにより推定した膝関節角度の結果を図8に示す。図8は計測時間中の5秒間の結果であり、それぞれの(a)は新宿中央公園の結果、(b)は地下1階の結果、(c)は地上28階の結果を示す。本結果より、磁場外乱の影響が少ないと思われる屋外の公園では全ての方法で関節角度の結果が一致しており、いずれの補正方法においても適切に地磁気センサ出力を補正できていたことが考えられる。一方で、磁場外乱が大きいと思われる地下および高層階の結果では先行研究の手法、および提案手法の結果が一致しているが計測開始地点のみで地磁気パラメータを手動調整した方法Ⅰの結果が異なっており、全計測時間に対し適切な地磁気パラメータが得られていない可能性が考えられる。

4. 結 言

本研究では、地下、屋外、高層ビルにおける地磁気の計測結果を用いて、適切に地磁気センサ出力を補正する方法について検討した。その結果、ジャイロセンサから得られる角速度を使用した地磁気センサ補正法を用いて、初期値に任意の定数を挿入し測定を行うことにより、先行研究と比べ簡易かつ適切に地磁気補正パラメータを推定可能であることを確認した。今後は更に磁場変動が大きいと考えられる場所などでも提案手法を用いて測定回数を増やし、提案手法の場所依存性を確認する必要がある。

文 献

- (1) Jurman, D., Jankovec, M., Kamnik, R. and Topič, M., Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 138-2, 411–420 (2007).
- (2) Včelák, J., Ripka, P., Kubik, J., Platil, A. and Kašpar, P., AMR navigation systems and methods of their calibration, *Sensors and Actuators A: Physical*, 123-124, 122-128 (2005).
- (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地磁気センサ校正法に関する研究, スポーツ・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集 (2013), DOI: 10.1299/jsmeshd.2013._212-1_.
- (4) Saito, A., Kizawa, S., Kobayashi, Y., and Miyawaki, K., Pose estimation by extended Kalman filter using noise covariance matrices based on sensor output, *ROBOMECH Journal*, 7-36, 10.1186/s40648-020-00185-y (2020)