

# 姿勢推定のためのセンサ・フュージョンに関する研究

## Research on sensor fusion for attitude estimation

芹澤輝<sup>1)</sup>

指導教員 齊藤亜由子<sup>1)</sup>, 研究協力者 木澤悟<sup>2)</sup>

1) 工学院大学 先進工学部 機械理工学科 システム設計研究室

2) 秋田工業高等専門学校 創造システム工学科 機械系

本研究ではジャイロ・加速度・地磁気センサを併用した姿勢推定のためのセンサ・フュージョンにおいてジャイロセンサのバイアス誤差を姿勢角と共に同時推定する。さらに推定したバイアス誤差を拡張カルマンフィルタのプロセスノイズ共分散に設定し、高精度な姿勢推定法を提案する。

キーワード：Bias correction, Gyro sensor, Kalman filter, Pose estimation, Sensor fusion

### 1. 緒言

センサ・フュージョンはロボティクス、自動運転、航空機制御などの分野において複数のセンサ情報を統合処理するために必須の技術となりつつある。センサ・フュージョンの実装に使用されるカルマンフィルタは、構築した状態方程式と観測方程式を用いて、一時刻前までの情報と現時刻において取得した情報をもとに最適なシステムの状態を推定するフィルタである。人間の姿勢推定においては、ジャイロセンサ・加速度センサ・地磁気センサを併用したセンサ・フュージョンが多く用いられているが、ジャイロセンサのバイアス誤差は姿勢推定の精度低下における最も大きな要因であり、加速度センサや地磁気センサの誤差要因を除去してもなお、ジャイロセンサのバイアス誤差による姿勢推定の低下を完全に防ぐことは困難である。そこで本研究では、ジャイロセンサ出力のバイアス誤差の変動を考慮したノイズ共分散の設計を行うことで、より精度よく姿勢推定を行うことができるカルマンフィルタアルゴリズムを構築する。具体的には、姿勢推定と同時にジャイロセンサのバイアス推定を行い、バイアス推定値の時系列データに基づいてプロセスノイズの共分散行列を調整する。

### 2. 9軸モーションセンサを用いたセンサ・フュージョン

9軸モーションセンサを用いた動作計測において、センサの姿勢はX軸回りの角度であるロール角( $\varphi$ )、Y軸回りの角度であるピッチ角( $\theta$ )、Z軸回りの角度であるヨー角( $\psi$ )を用いて表現する。基準座標系はZ軸方向を重力方向とした右手座標系で定義しており、各軸周りの回転は反時計回りを正方向とした。

ロール角とピッチ角の初期角度は、ジャイロセンサの出力からは得ることができないため、静止時に加速度センサから得られる重力加速度を用いて初期値を算出する。

### 3. 拡張カルマンフィルタによる姿勢推定とセンサ出力に連動するノイズ共分散行列の構築

センサの姿勢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ジャイロセンサ出力を用いてロール・ピッチ・ヨー角を算出する式とジャイロセンサ出力に含まれるバイアスのダイナミクスを表す式を用いて構成する。非線形観測方程式は、地磁気センサ出力を用いて算出した歩行中のヨー角と、加速度センサ出力を用いて構成する。構築した非線形状態方程式、非線形観測方程式を式(1)、(2)に示す。

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

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (2)$$

ただし,

$$x_t = \begin{bmatrix} \psi_{i,t} \\ \theta_{i,t} \\ \phi_{i,t} \\ bx_{i,t} \\ by_{i,t} \\ bz_{i,t} \end{bmatrix},$$

$F(x_t)$

$$= \begin{bmatrix} \psi_{i,t} + \sin \phi_{i,t} \sec \theta_{i,t} \omega_{y_{i,t}} \cdot Ts + \cos \phi_{i,t} \sec \theta_{i,t} \omega_{z_{i,t}} \cdot Ts \\ \theta_{i,t} + \cos \phi_{i,t} \omega_{y_{i,t}} \cdot Ts - \sin \phi_{i,t} \omega_{z_{i,t}} \cdot Ts \\ \phi_{i,t} + \omega_{x_{i,t}} \cdot Ts + \sin \phi_{i,t} \tan \theta_{i,t} \omega_{y_{i,t}} \cdot Ts + \cos \phi_{i,t} \tan \theta_{i,t} \omega_{z_{i,t}} \cdot Ts \\ bx_{i,t} - \beta_x \cdot bx_{i,t} \cdot Ts \\ by_{i,t} - \beta_y \cdot by_{i,t} \cdot Ts \\ bz_{i,t} - \beta_z \cdot bz_{i,t} \cdot Ts \end{bmatrix}$$

$$y_t = \begin{bmatrix} \psi_{m_{i,t}} \\ A_{x,s_i} \\ A_{y,s_i} \\ A_{z,s_i} \end{bmatrix}, \quad H(x_t) = \begin{bmatrix} \psi_{i,t} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} {}^0R_i \end{bmatrix} \\ g \end{bmatrix}$$

ここで,  $\phi_{i,t}$ ,  $\theta_{i,t}$ ,  $\psi_{i,t}$ は, 拡張カルマンフィルタを用いて推定したセンサ  $i$  座標系におけるセンサ  $i$  の三次元姿勢角 (ロール・ピッチ・ヨー角) である.  $\omega_i$  はセンサ  $i$  のジャイロ出力,  $\psi_{m_i}$  はセンサ  $i$  の地磁気出力を用いて算出したヨー角,  $A_{S_i}$  はセンサ  $i$  の加速度センサ出力,  ${}^0R_i$  は基準座標系からセンサ  $i$  座標系への回転行列,  $g$  は重力加速度,  $w_t$  と  $v_t$  は白色雑音である.

本研究においては, ジャイロセンサ出力に含まれるバイアスが状態方程式における主な誤差要因と仮定し, バイアス推定値の時系列データに基づいてプロセスノイズの共分散行列を調整する. 構築したプロセスノイズの共分散行列を式(3)に示す.

$$Q_t = \begin{bmatrix} \Omega_{\omega,t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_{\omega,t} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_{\omega,t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00001 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし,  $\Omega_{b,t} = a\sqrt{b^2_{x,t} + b^2_{y,t} + b^2_{z,t}} + b$

ここで,  $b_{x,t}$ ,  $b_{y,t}$ ,  $b_{z,t}$  は各軸のバイアス誤差の推定値であり,  $a$ ,  $b$  は調整用パラメータである. 本

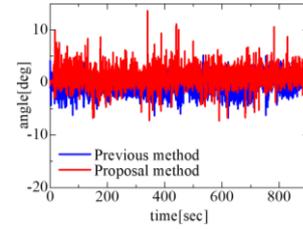


Fig.1 Roll

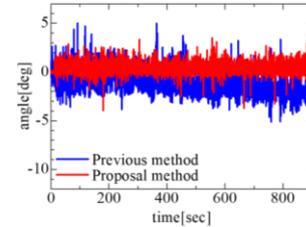


Fig.2 Pitch

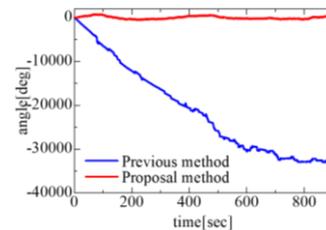


Fig.3 Yaw

研究においては,  $a = 0.1$ ,  $b = 0$  とした.

#### 4. 実験

提案手法の精度を検証するため, 9軸モーションセンサ (スポーツセンシング社製, SS-WS1792) を用いた計測を行う. Z 軸を鉛直下向きとした右手座標系において, センサ Z 軸周りに約 15 分間断続的に約  $\pm 90$  度回転させた. 回転速度については, メトロノーム 60bpm に合わせて 1 秒間に 120 度回転するようセンサを回転させる. 9軸モーションセンサのサンプリング周波数は 100 Hz である.

#### 5. 結果

図 1 にロール角, 図 2 にピッチ角, 図 3 にヨー角を示す. 青の実線は先行研究の結果であり, 赤の実線は本研究の結果である.

図 1, 図 2 のロール角, ピッチ角においては先行研究と本研究の結果が共に 0 付近で誤差が生じているが, 本研究の結果はより振れ幅が小さい結果であった. 図 3 のヨー角においては, 先行研究が顕著にドリフトしている. 一方で, 本研究では概ね  $\pm 90$  度を変動している.