ドローンのよりロバストな飛行制御の実現に関する研究

2018SC040 紀藤新太　2018SC042 小嶋正英

指導教員：坂本登　中島明

1　はじめに

近年ドローンは，災害発生時や建築物の老朽化具合の確認などで，人の立ち入る事の難しい場所のでの撮影に使用されたり，物の配達，また軍事産業など様々な用途使用されている．今後より多くの利用が想定されるドローンをより安定して飛行させる技術が必要不可欠である．本研究では，カルマンフィルタを使用することで正確な姿勢角の推定を行うことを目的として研究を行った．

2　カルマンフィルタ

カルマンフィルタとは，状態空間表現において内部の見えない状態を推定するための計算手法であり，複数の不確実な情報を用いてより正確な推定をすることを目的としている．また，新しい観測データが得られるたびに推定値を修正するという繰り返し計算である．

2.1　カルマンフィルタのドローンへの利用

ドローンを制御するには，正確な姿勢角を推定することが必要不可欠である．加速度センサは重力加速度から姿勢角を推定する為積分をしなくても良いが，重力加速度以外の加速度が加わると制度が落ちてしまう．一方ジャイロセンサは，重力加速度の加速度が加わっても問題ないが，角速度を積分する為，積分誤差が蓄積されてしまう．そこで加速度センサとジャイロセンサを組み合わせたカルマンフィルタを使用する．カルマンフィルタを使用する事で，より正確な姿勢角の推定を行う事ができる．本研究で作成したカルマンフィルタでは，前のステップの姿勢角の推定値とセンサから得られる観測値を用いて，次のステップの姿勢角を推定している．

2.2　パラメータの定義

拡張カルマンフィルタを用いて姿勢角を推定するために使用する物理パラメータを表 1 に示す．

2.3　クォータニオンを用いた拡張カルマンフィルタの 6 軸センサへの利用

拡張カルマンフィルタの 6 軸センサ (3 軸加速度センサ +3 軸ジャイロセンサ) への利用を以下に示す．

2.3.1　クォータニオンの回転行列

クォータニオンを用いた機体座標系から基準座標系への回転行列は

$$ {}^{w}R_b = \tag{2.1}$$

$$\begin{bmatrix} a_s^2 + a_{v1}^2 - a_{v2}^2 - a_{v3}^2 & 2\left(a_s a_{v3} + a_{v1} a_{v2}\right) & 2\left(a_{v1} a_{v3} - a_s a_{v2}\right) \\ 2\left(a_{v1} a_{v2} - a_s a_{v3}\right) & a_s^2 - a_{v1}^2 + a_{v2}^2 - a_{v3}^2 & 2\left(a_s a_{v1} + a_{v2} a_{v3}\right) \\ 2\left(a_s a_{v2} + a_{v1} a_{v3}\right) & 2\left(a_{v2} a_{v3} - a_s a_{v1}\right) & a_s^2 - a_{v1}^2 - a_{v2}^2 + a_{v3}^2 \end{bmatrix}$$

表 1　カルマンフィルタに関するパラメータ定義

記号	名称
P_x	機体座標系の x 軸の角速度
Q_y	機体座標系の y 軸の角速度
R_z	機体座標系の z 軸の角速度
α_x	機体座標系の x 軸の加速度
α_y	機体座標系の y 軸の加速度
α_z	機体座標系の z 軸の加速度
H_x	機体座標系 x 軸の地磁気観測データ
H_y	機体座標系 y 軸の地磁気観測データ
H_z	機体座標系 z 軸の地磁気観測データ
F_x	基準座標系 x 軸の地磁気
F_y	基準座標系 y 軸の地磁気
F_z	基準座標系 z 軸の地磁気
$\boldsymbol{y}$	観測データ
$\hat{\boldsymbol{x}}$	推定値
$\boldsymbol{K}$	カルマンゲイン
$\boldsymbol{P}$	推定誤差分散行列
$\boldsymbol{W_t}$	プロセスノイズ
$\boldsymbol{V_t}$	ノイズ
m_0	初期条件平均
Σ_0	初期条件分散

と表すことができる．

2.3.2　状態方程式

固定座標系で表した角速度を

$$\boldsymbol{\omega}^b = \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

とすると，次のように書ける．

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} a_s \\ a_{v1} \\ a_{v2} \\ a_{v3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 0 & -P & -Q & -R \\ P & 0 & R & -Q \\ Q & -R & 0 & P \\ R & Q & -P & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_s \\ a_{v1} \\ a_{v2} \\ a_{v3} \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

$\frac{dy}{dt} \sim \frac{y_{t+1}-y_t}{T}$ によって離散化すると次のようになる．

$$\begin{bmatrix} a_s \\ a_{v1} \\ a_{v2} \\ a_{v3} \end{bmatrix}_{t+1} = \begin{bmatrix} a_s \\ a_{v1} \\ a_{v2} \\ a_{v3} \end{bmatrix}_t + \frac{T}{2}\begin{bmatrix} 0 & -P & -Q & -R \\ P & 0 & R & -Q \\ Q & -R & 0 & P \\ R & Q & -P & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_s \\ a_{v1} \\ a_{v2} \\ a_{v3} \end{bmatrix}_t \tag{2.4}$$

2.3.3　状態方程式のヤコビアン

式 (2.4) を $a_s, a_{v1}, a_{v2}, a_{v3}$ にて偏微分すると次の式を得られる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A_t} &= \frac{\partial f_t}{\partial x}\left(\hat{x}\left(t|t\right)\right) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T}{2}P & -\frac{T}{2}Q & -\frac{T}{2}R \\ \frac{T}{2}P & 1 & \frac{T}{2}R & -\frac{T}{2}Q \\ \frac{T}{2}Q & -\frac{T}{2}R & 1 & \frac{T}{2}P \\ \frac{T}{2}R & \frac{T}{2}Q & -\frac{T}{2}P & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.5}$$

2.3.4　加速度の観測方程式

加速度センサから得られる加速度は次のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} = {}^{w}R_b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

よって次のように書くことができる．

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{y}\left(t\right) = \boldsymbol{h}\left(\boldsymbol{x}\left(t\right)\right) \\ &\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\left(a_{v1}a_{v3} - a_s a_{v2}\right)g \\ 2\left(a_s a_{v1} + a_{v2}a_{v3}\right)g \\ \left(a_s^2 - a_{v1}^2 - a_{v2}^2 + a_{v3}^2\right)g \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.7}$$

2.3.5　観測方程式のヤコビアン

式 (2.7) を $a_s, a_{v1}, a_{v2}, a_{v3}$ にて偏微分すると次の式を得られる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{C_t} &= \frac{\partial \boldsymbol{h_t}}{\partial x}\left(\boldsymbol{x}\left(t|t-1\right)\right) \\ &= \begin{bmatrix} -2a_{v2}g & 2a_{v3}g & -2a_s g & 2a_{v1}g \\ 2a_{v1}g & 2a_s g & 2a_{v3}g & 2a_{v2}g \\ 2a_s g & -2a_{v1}g & -2a_{v2}g & 2a_{v3}g \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.8}$$

2.3.6　分散

行列 $\boldsymbol{R_t}$ の 1 行 1 列を $R_{t_{11}}$ のように表現すると次のように書くことができる．

$$\boldsymbol{R_t} = \begin{bmatrix} R_{t_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & R_{t_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & R_{t_{33}} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

また同じように $\boldsymbol{Q_t}$ は次のように書くことができる．

$$\boldsymbol{Q_t} = \begin{bmatrix} Q_{t_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{t_{22}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{t_{33}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{t_{44}} \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

2.4　クォータニオンを用いた拡張カルマンフィルタの 9 軸センサへの利用

拡張カルマンフィルタの 9 軸センサ (3 軸加速度センサ +3 軸ジャイロセンサ +3 軸地磁気センサ) への利用を以下に示す．

2.4.1　状態方程式と状態方程式のヤコビアン

9 軸センサの状態方程式は 6 軸センサの状態方程式と同一であるので式 (2.4) のようになり，また状態方程式のヤコビアン A_t も同じように式 (2.5) となる．

2.4.2　加速度と地磁気の観測方程式

加速度センサから得られる加速度は次のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} = {}^{w}R_b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

地磁気センサから得られる値は次のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = {}^{w}R_b \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

よって次のように書くことができる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{y}\left(t\right) &= \boldsymbol{h}\left(\boldsymbol{x}\left(t\right)\right) \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \\ H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.13}$$

2.4.3　観測方程式のヤコビアン

式 (2.13) を $a_s, a_{v1}, a_{v2}, a_{v3}$ にて偏微分すると次の式を得られる．

$$\boldsymbol{C_t} = \frac{\partial \boldsymbol{h_t}}{\partial x}\left(\boldsymbol{x}\left(t|t-1\right)\right) \tag{2.14}$$

2.4.4　分散

行列 $\boldsymbol{R_t}$ の 1 行 1 列を $R_{t_{11}}$ のように表現すると次のように書くことができる．

$$\boldsymbol{R_t} = \begin{bmatrix} R_{t_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{t_{22}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{t_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{t_{44}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{t_{55}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{t_{66}} \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

また $\boldsymbol{Q_t}$ は式 (2.10) と同じように書くことができる．

2.5　カルマンフィルタのアルゴリズム

2.3 と 2.4 で導出した式を使用し，以下の拡張カルマンフィルタを計算することで，$a_s, a_{v1}, a_{v2}, a_{v3}$ を推定するこ

とができる．

$$\boldsymbol{K}(t) = \boldsymbol{P}(t|t-1)\,\boldsymbol{C_t}^T\left[\boldsymbol{C_t}\boldsymbol{P}(t|t-1)\,\boldsymbol{C_t}^T + \boldsymbol{R_t}\right]^{-1} \tag{2.16}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(t|t) = \hat{\boldsymbol{x}}(t|t-1) + \boldsymbol{K_t}\left[\boldsymbol{y}(t) - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}(t|t-1))\right] \tag{2.17}$$

$$\boldsymbol{P}(t|t) = \boldsymbol{P}(t|t-1) - \boldsymbol{K}(t)\,\boldsymbol{C_t}\boldsymbol{P}(t|t-1) \tag{2.18}$$

$$\boldsymbol{P}(t+1|t) = \boldsymbol{A_t}\boldsymbol{P}(t|t)\,\boldsymbol{A_t}^T + \boldsymbol{Q_t}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(0|-1) = m_0 \tag{2.19}$$

$$\boldsymbol{P}(0|-1) = \Sigma_0 \tag{2.20}$$

3 実験

3.1 使用機材

本実験では，InvenSense 社の 9 軸センサ MPU-9250 を搭載した IMU 及び Arduino Uno Rev.3 を使用した．IMU の加速度センサの Sensitivity Scale Factor は 16384 LSB/g, ジャイロセンサの Sensitivity Scale Factor は 131 LSB/$(°/s)$ に設定した．IMU，Arduino Uno，PC を図 1 のように接続し，IMU から Arduino UNO に I^{2}C 通信にてデータの読み込みを行い，そのデータをシリアル通信にて PC へ送信を行い，これを使用しカルマンフィルタなどの計算を行った．カルマンフィルタの計算を行うプログラムには 2.3，2.4 で導出した式を使用した．

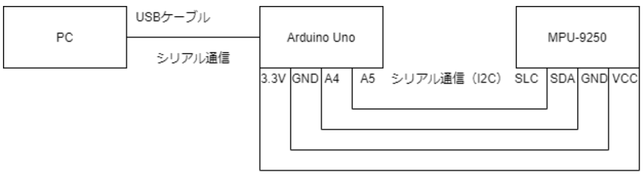

図 1 接続図

3.2 実験方法

角度と角速度を指定して動かすことができるターンテーブルに図 2 のように IMU を固定し，roll 方向 pitch 方向 yaw 方向それぞれに角速度 $\frac{\pi}{10}$rad/s で 10 秒おきに 45° 回転させる実験を行った．金属や電子機器による地磁気センサのノイズを抑えるために実験は屋外で行った．また初期値は表 2 のようにした．地磁気の初期設定は，x 軸が磁北を向いている姿勢とし，F_x F_y F_z に使用する値は開始 10 秒間に得られた地磁気の値の平均を使用した．また地磁気センサから得られる値の中心が $(H_x, H_y, H_z) = (0, 0, 0)$ になるように調整を行った．

3.3 pitch 回転時の実験結果

6 軸センサを用いたカルマンフィルタで pitch 回転を行った際の a_s，a_{v1}，a_{v2}，a_{v3} の推定値と，これらから導出した ϕ，θ，ψ はそれぞれ図 3，図 4 のように，9 軸センサを用いた際はそれぞれ図 5，図 6 のようになった．

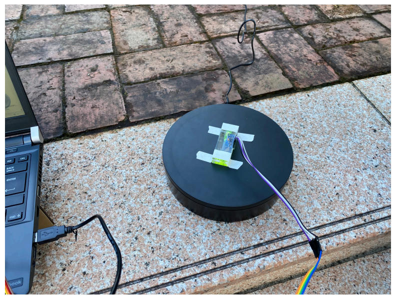

図 2 実際の実験の様子 (yaw 回転)

表 2 実験に使用した初期値

記号	初期値	記号	初期値	記号	初期値
$\hat{\boldsymbol{a}}_s$	1	$R_{t_{11}}$	0.001	$Q_{t_{11}}$	0.007
$\hat{\boldsymbol{a}}_{v1}$	0	$R_{t_{22}}$	0.001	$Q_{t_{22}}$	0.0005
$\hat{\boldsymbol{a}}_{v2}$	0	$R_{t_{33}}$	0.001	$Q_{t_{33}}$	0.0006
$\hat{\boldsymbol{a}}_{v3}$	0	$R_{t_{44}}$	50	$Q_{t_{44}}$	0.007
$\boldsymbol{P}$	10	$R_{t_{55}}$	50		
		$R_{t_{66}}$	50		

3.4 考察

6 軸センサを用いたカルマンフィルタでは，yaw 角の推定値が正確に出ていないことがわかる．6 軸センサではジャイロセンサからでしか yaw 角の値が取れないため yaw 角の推定値の精度があまり良くないのは予想通りであった．一方，地磁気センサを追加した 9 軸センサを用いたカルマンフィルタでは，多少のずれはあるが roll 回転，pitch 回転，yaw 回転で真値と近い値を推定することができ，6 軸センサを用いたカルマンフィルタと比較をしても，yaw 角の推定値が正確に出ていることがわかる．これは，6 軸センサに地磁気センサを追加することで，ジャイロセンサと地磁気センサの 2 つから yaw 角の値を取れるようになり，より正確に yaw 角を推定することができたということが考えられる．また，ターンテーブルを使用せずに roll 角を約 45 度回転させた所，図 7 のような結果を得る事ができた．このためターンテーブル使用時に 5 度程度推定値がずれてしまった原因としては，実験時に使用したターンテーブルから生じる磁気により地磁気センサにノイズがのってしまった事やカルマンフィルタの調整不足という可能性が考えられる．

4 おわりに

本研究では，ドローンの安定化制御に必要不可欠となる正確な姿勢角の推定するために，6 軸センサを用いたカルマンフィルタと 9 軸センサを用いたカルマンフィルタの設計を行った．また，作成したカルマンフィルタを用いた姿勢角推定実験を行った．実験の結果から，地磁気センサを追加した 9 軸センサを用いることでより正確に姿勢角を推定値ができるとわかった．しかし，9 軸センサを用いたカ

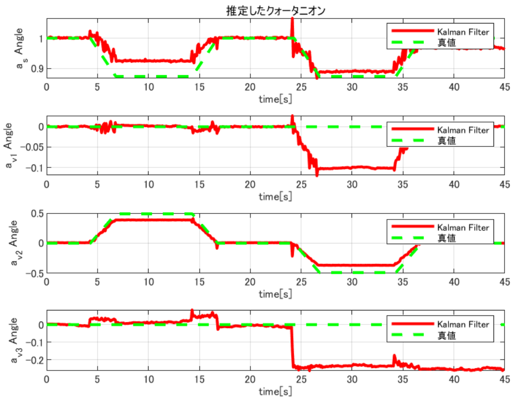

図 3　6 軸センサを用いたカルマンフィルタで推定したクォータニオン (pitch 回転)

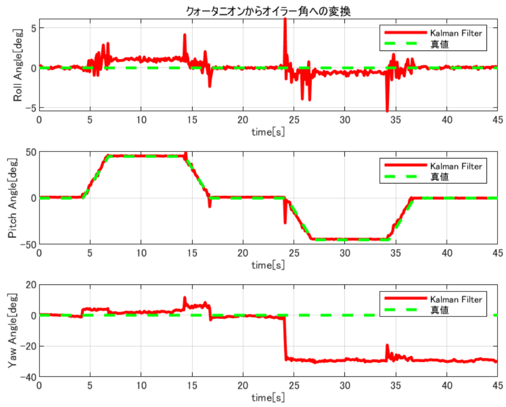

図 4　6 軸センサを用いたカルマンフィルタで推定したクォータニオンのオイラー角変換 (pitch 回転)

ルマンフィルタでも 5 度程度推定値が真値からずれているところが見受けられ，今後の課題としてカルマンフィルタの更なる調整が挙げられる．そのためには地磁気センサの扱い方やカルマンフィルタの調整方法などをさらに理解する必要がある．

参考文献

[1] invensense：『MPU-9250 Register Map and Descriptions Revision 1.6』．2015.

[2] AsahiKASEI：『AK8963 コンパスデータシート』．2013.

[3] 坂本登：『カルマンフィルタの基礎とその活用』，2017.

[4] 坂本登：『ビークル系のモデリングと制御』，2021.

[5] 片山徹：『非線形カルマンフィルタの基礎』，計測と制御　56 巻 (2017) 9 号，2017.

[6] 米川翔太：『ビジュアルフィードバックを用いたドローンの位置制御におけるリアルタイムシミュレーションと実機検証』．2020 年度修士論文，南山大学院理工学研究科機械電子制御工学専攻坂本・中島研究室，2021.

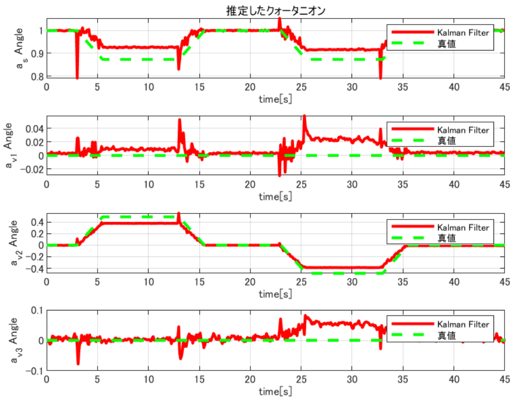

図 5　9 軸センサを用いたカルマンフィルタで推定したクォータニオン (pitch 回転)

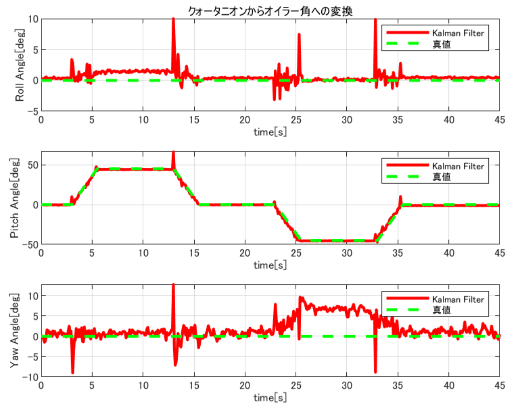

図 6　9 軸センサを用いたカルマンフィルタで推定したクォータニオンのオイラー角変換 (pitch 回転)

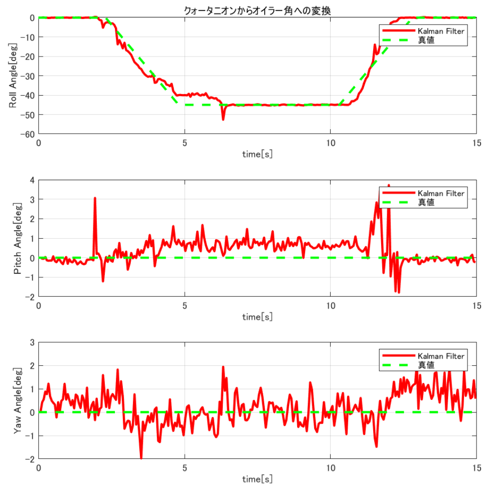

図 7　ターンテーブルを使用しない実験時の結果

[7] 国土地理院：『地磁気を知る｜国土地理院』．`https://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/menu01_index.html`，最終アクセス:2021-10-14.