

A-017

スマートフォンとカルマンフィルタによる  
3D 姿勢情報のセンシングに関する研究  
Estimation of moving object's attitude  
using Kalman Filter and smartphone sensors

村上 智哉\*†  
Tomoya Murakami

横田 孝義\*‡  
Takayoshi Yokota

## 1 はじめに

スマートフォンには3軸のジャイロセンサや加速度センサ, GPS などの高性能の MEMS センサが内蔵されている。これらのセンサ情報を融合する事で, 互いの誤差を補い合いながら移動体の姿勢を高精度に推定する 3D プローブを開発する。今回は GPS, ジャイロセンサ, 加速度センサによるロール, ピッチ, ヨーの姿勢情報のセンシングを目指す為の定式化を行った。また, センサフュージョンを行うにあたって拡張カルマンフィルタの考えを導入する。

## 2 原理

### 2.1 状態方程式

ロール, ピッチ, ヨーのオイラー角をカルマンフィルタで直接扱うのは大きな角度変化域を伴う飛翔体までを想定すると困難である。そこで, 4 元数 (quaternion) の考え方を採用し, この問題を解決する。スマートフォンの 3 次元姿勢を quaternion として状態表現し, 状態方程式及び観測方程式を定義する。また, MEMS センサにはバイアスやドリフトによる誤差があるが, これらも状態変数として加える。これにより, quaternion に加え, バイアスも推定及び補正することが出来る。つまり, 状態変数は quaternion の各要素  $q_s, q_x, q_y, q_z$  及び 3D ジャイロセンサの各方向の出力値のバイアス成分  $b_x, b_y, b_z$  の計 7 つからなる。(1) 式に状態方程式を示す。ここで,  $\mathbf{I}_7$  は  $7 \times 7$  の単位行列であり,  $\Delta t$  はサンプリング時間である。 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  はジャイロセンサの各方向の出力値である。

$$\begin{pmatrix} q_s \\ q_x \\ q_y \\ q_z \\ b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}_{k+1} = \left( \mathbf{I}_7 + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{T}_k \right) \begin{pmatrix} q_s \\ q_x \\ q_y \\ q_z \\ b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}_k \quad (1)$$

$$\mathbf{T}_k = \begin{pmatrix} 0 & -(\omega_x - b_x) & -(\omega_y - b_y) & -(\omega_z - b_z) & 0 & 0 & 0 \\ \omega_x - b_x & 0 & \omega_z - b_z & -(\omega_y - b_y) & 0 & 0 & 0 \\ \omega_y - b_y & -(\omega_z - b_z) & 0 & \omega_x - b_x & 0 & 0 & 0 \\ \omega_z - b_z & \omega_y - b_y & -(\omega_x - b_x) & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_k \quad (2)$$

### 2.2 拡張カルマンフィルタ

前節で述べた状態変数をカルマンフィルタによって補正を行う。なお, 今回非線形の関数を取り扱うため, 拡張カルマンフィルタを用いる。(3) 式が線形近似を行った観測方程式で, ロール, ピッチ, ヨーがそれぞれ  $\phi, \theta, \psi$  である。また, (6) 式のように, 実測値として GPS 及び加速度センサを用いる。ロール及びピッチは加速度センサから求められ, ヨーは GPS によって得る事が出来る。

(3) 式における  $\mathbf{H}_k$  の偏微分値は quaternion の各値から成る式で表されるので, 推定値を実際に計算することができる。そして, 求めた観測値の推定値と (6) 式から求めた実測値との差分を用い, 状態ベクトルにフィードバックを行うことで, 各状態変数を補正していく。(7) 式) ここで,  $\mathbf{K}_k$  はカルマンゲインであり, (7) 式の左辺は, 状態変数の事後推定値である。また, カルマンゲインの詳細についてはここでは省略するが,  $\mathbf{Q}_k$  は推定値の誤差の共分散行列であり,  $\mathbf{R}_k$  は観測誤差の共分散行列である。

$$\mathbf{1}_k = \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{pmatrix}_k = \mathbf{H}_k \begin{pmatrix} q_s \\ q_x \\ q_y \\ q_z \\ b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}_k \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_k & \frac{\partial \phi}{\partial b_x} & \frac{\partial \phi}{\partial b_y} & \frac{\partial \phi}{\partial b_z} \\ \frac{\partial \theta}{\partial q_s} & \frac{\partial \theta}{\partial q_x} & \frac{\partial \theta}{\partial q_y} & \frac{\partial \theta}{\partial q_z} \\ \frac{\partial \psi}{\partial q_s} & \frac{\partial \psi}{\partial q_x} & \frac{\partial \psi}{\partial q_y} & \frac{\partial \psi}{\partial q_z} \end{pmatrix}_k \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_k = \begin{pmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial q_s} & \frac{\partial \phi}{\partial q_x} & \frac{\partial \phi}{\partial q_y} & \frac{\partial \phi}{\partial q_z} \\ \frac{\partial \theta}{\partial q_s} & \frac{\partial \theta}{\partial q_x} & \frac{\partial \theta}{\partial q_y} & \frac{\partial \theta}{\partial q_z} \\ \frac{\partial \psi}{\partial q_s} & \frac{\partial \psi}{\partial q_x} & \frac{\partial \psi}{\partial q_y} & \frac{\partial \psi}{\partial q_z} \end{pmatrix}_k \quad (5)$$

\*鳥取大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻

†E-mail: s082060@ike.tottori-u.ac.jp

‡E-mail: yokota@ike.tottori-u.ac.jp

$$\hat{\mathbf{l}}_k = \begin{pmatrix} \hat{\phi} \\ \hat{\theta} \\ \hat{\psi} \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} \arctan \frac{-a_y}{a_z} \\ \arcsin \frac{-a_x}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \\ \text{GPS heading} \end{pmatrix}_k \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{q}_x \\ \tilde{q}_y \\ \tilde{q}_z \\ \tilde{b}_x \\ \tilde{b}_y \\ \tilde{b}_z \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \\ b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}_k + \mathbf{K}_k (\hat{\mathbf{l}}_k - \mathbf{l}_k) \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{Q}_k \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (8)$$

### 3 実験

#### 3.1 実験方法

スマートフォンを車内に搭載し、走行実験を行った。今回用いたスマートフォンは au の ARROWS Z ISW11F である。搭載したスマートフォンの向き及びジャイロセンサから得られる角速度は図1のように定めた。経路は図2、つまり白浜宿舎から AEON 鳥取北店へ向かい片道約 6km のコースで、その屋上を 5 周したのち、同じ道を使い白浜宿舎へ帰るといふ経路で実験を行った。また、サンプリング時間は 0.02s である。

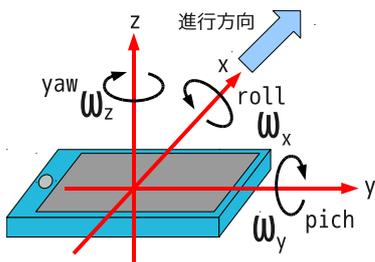


図1 スマートフォンの向きと角速度の設定



図2 走行経路

#### 3.2 実験結果

実験結果を下図に示す。図3は、カルマンフィルタのフィードバック処理((7)式)の適応前の結果であり、固定的に推定したジャイロのバイアス値を用いている。図において、quaternionによって推定したヨー角とGPSのヨー角がほぼ一致している。なお、このグラフは累積の角度を示しているため、グラフ中央で約1800°角度が

増加していることから、確かに車が5周回転していると言える。また、往路と復路では同じ経路を走行したが、グラフを見ると右辺と左辺で同じ形状になっている。よって、ヨー角については正確な値が測れる事が分かる。

しかし、ロール、ピッチ角については不安定に振動しており、バイアス及びドリフト成分が大きく影響している事が予想され、本研究で提案しているカルマンフィルタのフィードバック処理をする必要があることが分かる。

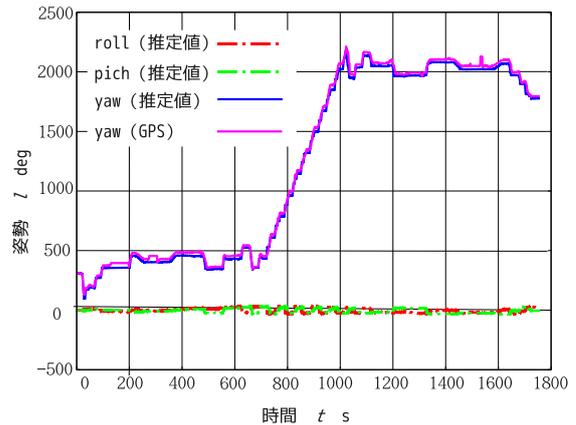


図3 クォータニオンによって求めた3D姿勢角

### 4 おわりに

今回移動体の3次元姿勢を推定するカルマンフィルタの定式化を行った。ヨー角については動的な補正なしで比較的正確に推定することが出来た。しかし、ロール、ピッチ角においてはカルマンフィルタによる動的な補正が必要であることが分かった。また、正確に推定するためには、まず実測値として用いる加速度センサが信頼できる値であるかどうかを検査する必要がある。加速度センサの値は、振動する場合が多く、移動体が動いている間は正確な値を期待出来ない可能性がある。カルマンフィルタの実装と共に今後の課題とする。

### 参考文献

- 1) Mathier Marmion: *Airborne attitude estimation using Kalman filter*, (2006)
- 2) 横田 孝義: スマートフォンのセンサ情報を融合した道路形状プローブ方式の開発～スマートフォンセンサへのカルマンフィルタの応用～, 電子情報通信学会 ITS 研究会, (5月31日)
- 3) Roni Yadlin: *Attitude Determination and Bias Estimation Using Kalman Filtering*, <http://www.usafa.edu/df/dfas/Papers/20082009/Attitude>