

# 技術紹介

## UMVのためのカルマンフィルタを応用した姿勢センサー静定技術の紹介

Static Determinacy Technology for a Kalman Filter-fitted Attitude Sensor for UMVs

木戸 徹

### Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. is involved in the development of a small autonomous, unmanned electric-powered marine observation vehicle (UMV) for scientific measurement or surveillance purposes. One of the essential technologies for an autonomous vehicle or craft is sensing technology to determine the attitude angles of the vehicle/craft itself. Attitude sensing can be achieved by measuring attitude angle acceleration with a gyro-sensor and applying time integration to the resulting data. Due to the fact that integration alone produces an accumulation of deviation data, an attitude sensing system is normally augmented by means of an acceleration sensor and direction sensor to correct for integration error. However, the data output from a gyro-sensor contains a bias component that differs with each power-on operation, and if this bias component is allowed to accumulate without being compensated for, even augmenting the system with an acceleration sensor will not eliminate the element of error.

In this paper we report on the development of an attitude angle calculation method employing an extended Kalman filter (EKF) and simultaneously performing a gyro bias estimation function and the results of this method in application on a UMV.

### 1 はじめに

ヤマハ発動機では、計測・測量用途を目的とした自律型無人小型電動観測船(Unmanned Marine Vehicle 以下、UMV)(図1)を開発している。自律移動体にとって、自身の姿勢角をセンシングする技術は不可欠な要素技術のひとつである。姿勢角をセンシングするにはジャイロセンサーで角速度を計測し、それを時間積分することで求めることができる。積分のみでは誤差が蓄積されていくため、一般的には加速度センサーおよび方位センサーと複合化することで積分誤差を補正する。ジャイロセンサー出力には電源投入毎に異なる値のバイアス成分が含まれており、このバイアス分を除去しないまま積分すると、例え加速度センサーと複合化したとしても誤差を除去することができない。

本稿では、拡張型カルマンフィルタ(Extended Kalman Filter 以下、EKF)を適用したジャイロバイアス量推定も同時に使う姿勢角演算手法と、これをUMVに適用した結果を紹介する。



図1 自律型無人小型電動観測船の外観



## 2 UMVの概要

### ①主な用途

- 前方監視ソナーによる水中探査、捜査、観察
- ナローマルチビームによるダムの堆砂測量
- 海底藻場の観察や調査
- ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler: 音響ドップラー流速計)による河川の流速分布調査

### ②主要諸元

全長	2.85 m (防舷材を含まず)
全幅	0.98 m
主機	DCモータ×2機
満載排水量	200 kg
最大速力	4 knot(巡航速力 3 knot)
航続距離	20km

### ③動作モード

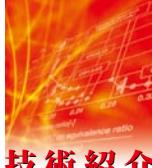
- 自律制御モード
- 無線操縦モード

### ④通信機能

- 無線LAN IEEE802.11b または 3G携帯電話

## 3 EKFを適用した姿勢角推定システム開発のねらい

地上で電源投入できる移動体であれば、起動後に静止状態を保つことで、その状態でのジャイロセンサー出力値をバイアス値として検出する手法が使える。しかしながら揺れる水上で起動するUMVではその適用が難しく、小型なUMVは小さな波にも揺られやすい。そこで、EKFを適用し、姿勢角推定とともにジャイロバイアス推定も同時に行う姿勢角演算手法をUMVに適用した。使用したジャイロセンサーのバイアスの大きさは、仕様では±1deg/sec未満である。バイアス推定の誤差目標は、各軸で±0.05deg/sec以下とした。



## 4 姿勢角推定システム概要

### 4.1 システム構成要素

姿勢角推定システムの構成要素を図2に示す。センサー部と姿勢演算部に大別される。センサー部は、船体軸のロール、ピッチ、ヨー方向の3軸の角速度を検出するジャイロセンサーと船体軸のX、Y、Z方向の加速度を検出する加速度センサーから成る慣性センサユニット(ストラップダウン方式)と、UMVの船首向きを絶対方位で検出する磁気方位センサーから構成される。3軸加速度センサーから求まる傾斜角は、角速度積分によるロール/ピッチ角の蓄積誤差を補正、同様に磁気方位センサーからの絶対方位はヨー角の蓄積誤差を補正する役割を持つ。



図2 システム構成

### 4.2 フィルタ演算部

姿勢演算部では、EKFによる姿勢角推定演算を行う。図3はEKFで解く状態方程式と観測方程式である。状態変数 $x$ の $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$ が求めたい船体の姿勢角であり、 $br$ 、 $bp$ 、 $by$ が姿勢角とともに推定されるジャイロバイアス値である。座標系は、原点が船体中心で原点を含む地球局所水平面をxy平面、鉛直下方向をz軸とした。状態方程式は、船体軸での真の角速度 $\omega$ がオイラー変換されて姿勢角の時間微分となる関係を示している。真の角速度 $\omega$ は、ジャイロセンサーからの観測角速度 $\omega_m$ から直接は観測できないバイアス分 $b$ と観測ノイズ分 $w$ を補正した値としてモデル化している。また、推定バイアス $b$ については、使用した光ファイバージャイロの安定性からバイアス時間変化は0として扱った。観測値は、3軸加速度の観測値 $a$ と方位 $h$ である。観測方程式は、重力方向を鉛直方向として、姿勢角により成分分解される重力と加速度観測値 $a$ との関係、および、方位=ヨー角が成り立つ式とした。



状態変数

$$\mathbf{x} = (\varphi \ \ \theta \ \ \psi \ \ b_r \ \ b_p \ \ b_y)^T \quad \text{状態の中にバイアス値を盛り込み、姿勢角の推定と同時にバイアス値も推定する}$$

状態方程式

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{b}_r \\ \dot{b}_p \\ \dot{b}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi \sec \theta & \cos \varphi \sec \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{mr} - b_r + w_r \\ \omega_{mp} - b_p + w_p \\ \omega_{my} - b_y + w_y \\ b_r \\ b_p \\ b_y \end{pmatrix} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{w}(t))$$

$\varphi$ : ロール角  
 $\theta$ : ピッチ角  
 $\psi$ : ヨー角  
 $b_r$ : 船体ロール軸ジャイロ推定バイアス  
 $b_p$ : 船体ピッチ軸ジャイロ推定バイアス  
 $b_y$ : 船体ヨー軸ジャイロ推定バイアス  
 $\omega_{mr}$ : 船体ロールレート(ジャイロ観測値)  
 $\omega_{mp}$ : 船体ピッチレート(ジャイロ観測値)  
 $\omega_{my}$ : 船体ヨーレート(ジャイロ観測値)  
 $w_r$ : 観測ノイズ  
 $w_p$ : 観測ノイズ  
 $w_y$ : 観測ノイズ

観測値

$$\mathbf{y} = (a_x \ \ a_y \ \ a_z \ \ h)^T$$

観測方程式

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} g * \sin \theta \\ -g * \sin \theta \cos \theta \\ -g * \cos \varphi \cos \theta \\ \psi \end{pmatrix} + \mathbf{v} = h(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{v}$$

$a_x$ : 車体軸x軸加速度  
 $a_y$ : 車体軸y軸加速度  
 $a_z$ : 車体軸z軸加速度  
 $h$ : 方位  
 $g$ : 重力加速度  
 $\mathbf{v}$ : 観測ノイズ

図3 状態モデルと観測モデル

## 5

## 搭載結果

本システムをUMVに搭載し航行させた時の計測結果を示す。表1は、評価を行った時の水面の揺れの程度を示すために掲載した。表1の環境下で本システムを水上で起動し、図4に示す軌跡でUMVを航行させた時のバイアス推定精度を評価した。評価にあたり、バイアス推定が正しく行われているか否かを確認できるように、あらかじめ地上にてジャイロバイアス検出を行い、バイアス値を0近傍に校正した上で、故意に一定値のバイアス値をジャイロ出力に加算した。加算したバイアス値は、ロール軸0.5deg/sec、ピッチ軸-0.7deg/sec、ヨー軸+0.9deg/secである。

図5は、こうして取得した起動から航行終了までの本システムでのバイアス推定結果(横軸は起動からの経過時間(sec))である。300sec経過時のバイアス推定結果として、それぞれの軸において加算したバイアス値を真値と見た時の推定バイアスの誤差が0.05deg/sec以下となっており、目標を達成する結果を得ることができた。

表1 評価時におけるUMVの揺れの程度

	角速度 (deg/sec)		最大傾斜角 (deg)
	平均 (絶対値)	最大	
ロール軸	15.0	± 60	± 10
ピッチ軸	7.1	± 30	± 6~7

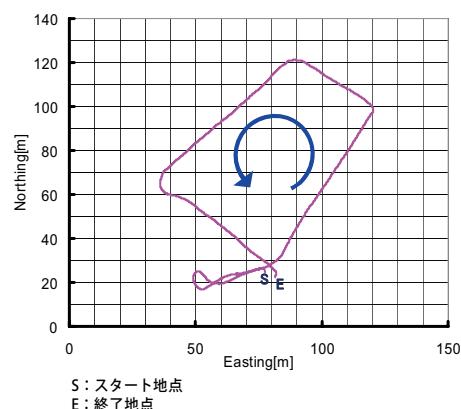
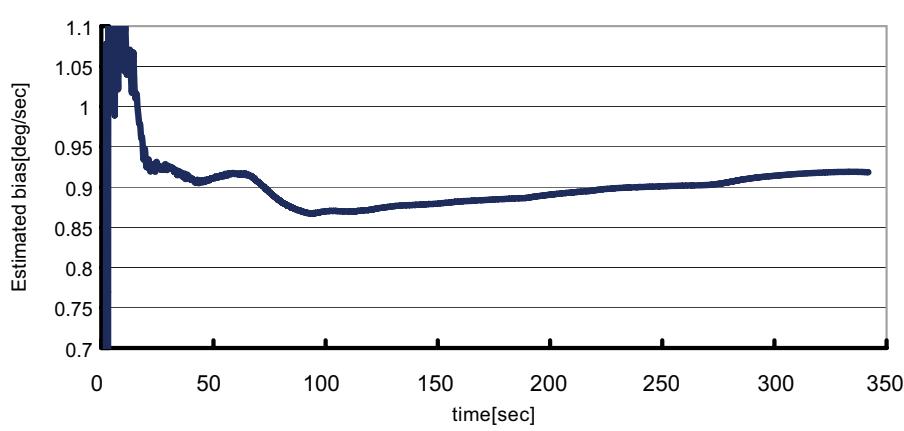
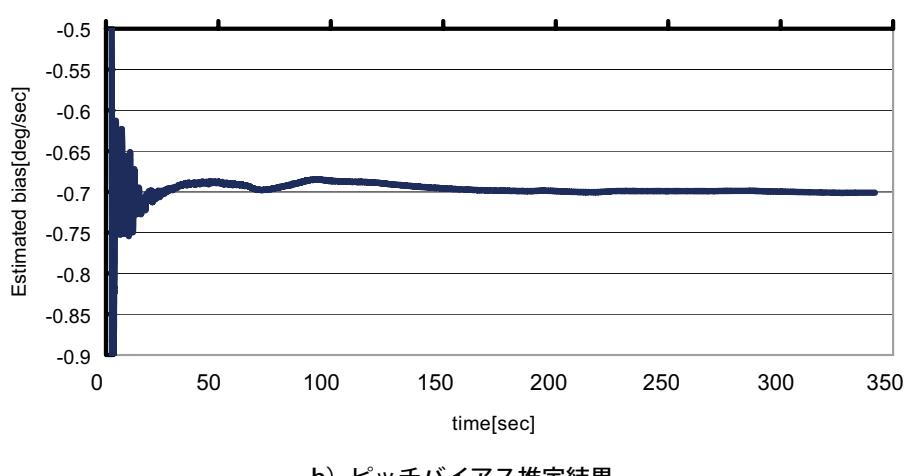
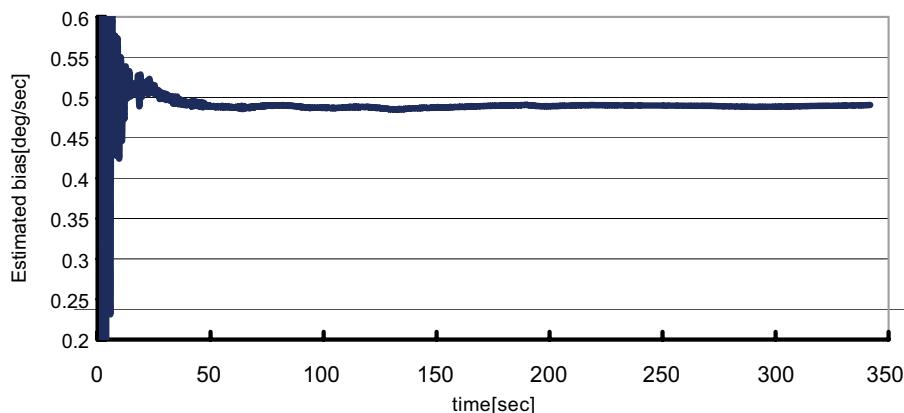


図4 UMV航行軌跡



	ロール	ピッチ	ヨー
平均推定誤差(deg/sec)	0.014	0.0023	0.022
標準偏差(deg/sec)	0.015	0.0034	0.023

d) 起動から 300sec 経過時点の推定精度  
(4 回試行時の平均値(絶対値)と標準偏差)

図 5 バイアス推定結果



## 6 おわりに

EKFを用いたジャイロバイアス推定を行う姿勢角演算手法と、これをUMVに適用した結果を紹介し、揺れのある中で起動してもバイアス推定が有効に機能することが確認できた。

ビーケルロボット化により、移動体の姿勢や位置の検出は、より重要な技術となると考えられる。今後は、小型／低価格ではあるがバイアス安定性の低いMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 振動ジャイロの採用や、GPSを構成に加えたGPS-INS (Inertial Navigation Systems)への拡張を図る予定である。

### ■著者



木戸 徹

Toru Kido

コーポレートR&D統括部  
システム技術研究部