

# 姿勢推定のための相補フィルタとカルマンフィルタの 精度に関する比較考察

舩屋 賢<sup>\*1</sup>, 杉原 知道<sup>\*2</sup>, 山本 元司<sup>\*1</sup>

## A Comparative Discussion about Accuracy of Complementary Filter and Kalman Filter for the Attitude Estimation

Ken MASUYA<sup>\*1</sup>, Tomomichi SUGIHARA<sup>\*2</sup> and Motoji YAMAMOTO<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University  
Motooka 744, Fukuoka, Fukuoka 819-0395, Japan

<sup>\*2</sup> Department of Adaptive Machine Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University  
Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka 565-0871, Japan

In this paper, we discuss the characteristics of the proposed complementary filter by comparison with a nonlinear Kalman filter. The sensor model is decoupled into the dynamics compensation part approximated by a linear transfer function and the strictly nonlinear coordinate transformation part in the former filter. Band-pass filters which are designed complementarily and inserted before the coordinate transformation guarantee that the total transfer function becomes proper and stable. The latter deals with each sensor as the model with error and without dynamics. From the experiment, we validate the effect from the difference of model, particularly that of inclinometer. Also, the accuracy variation of the latter shows excessive error in the initial stage of the estimation.

**Key Words** : Sensor fusion, Complementary filter, Kalman filter

### 1. は じ め に

不規則かつ高速な運動を行うロボットの制御において、高精度な姿勢計測技術は重要である。特に移動ロボットは慣性系に固定された計測基準点を身体上に持たないため、傾斜計や角速度センサなどのいわゆる慣性センサが用いられる。傾斜計ではセンサダイナミクスによる遅れ、角速度センサは積分誤差の累積が特に問題となり、一種類のセンサのみによる姿勢推定は難しい。このため、異種のセンサを組み合わせる推定精度の向上を図る方法が多く提案されてきた<sup>(1)~(9)</sup>。

このような姿勢推定技術としてカルマンフィルタ<sup>(1)(2)(3)</sup>が広く用いられている。これは時間領域で表現されたセンサモデルに基づいて状態量の推定を行う技術である。しかし、センサのノイズ特性は白色雑音とされ、運動が与える影響が考慮されていない。加えて、パラメータ調整が容易でないという問題がある。一方、センサの周波数特性に基づいて抽出した信号を相補的に統合する、相補フィルタ<sup>(4)(5)(6)</sup>も多く提案されている。しかし、各センサの有効周波数領域が相補

的とは限らず、全出力の信頼性が低い周波数領域では推定精度が劣化する。Baerveldt と Klang<sup>(7)</sup>, Hadri と Benallegue<sup>(8)</sup>はセンサダイナミクス補償による有効周波数領域の拡大方法を提案したが、非線形なセンサ特性の同定が困難である、逆モデルが不安定または非プロパとなる等の問題があった。この問題に対し、筆者ら<sup>(9)</sup>は、センサ特性を、非線形座標変換と線形伝達関数で近似された動的特性に陽に分離し、逆伝達関数と挿入された周波数フィルタを一体化して全体がプロパかつ安定となることを保証する方法を提案した。

本稿では、筆者らが提案した相補フィルタと、カルマンフィルタとの推定精度に関する比較を行い、原因を考察する。カルマンフィルタの実装例としては、単位四元数を用いて比較的高速で大きな姿勢変化を推定できる、Yun ら<sup>(3)</sup>の方法を用いる。提案方法においてセンサ特性は動的特性と非線形特性に分離できると仮定され、カルマンフィルタでは動的特性は恒等変換であると仮定している。これらの取り扱いの違い、特にセンサ動的特性の影響は、推定精度に大きな影響を与えたと考えられる。不規則な運動に対する実験により、動的特性の影響が大きい傾斜計出力に相当する姿勢成分において、カルマンフィルタでは推定精度、特に平均の精度低下が見られた。また、カルマンフィルタで

<sup>\*1</sup> 九州大学大学院工学府機械工学専攻 (〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 masuya@ctrl.mech.kyushu-u.ac.jp, yama@mech.kyushu-u.ac.jp)

<sup>\*2</sup> 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1) zhidaio@ieee.org

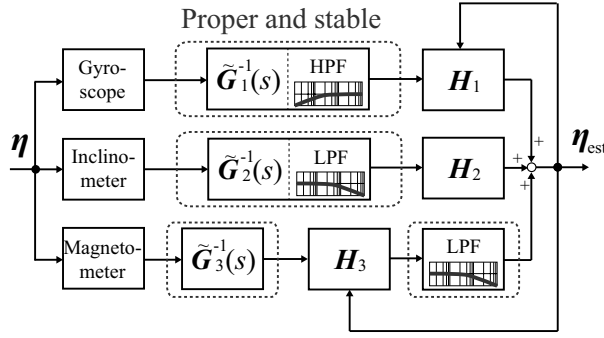


Fig. 1 Proposed complementary filter

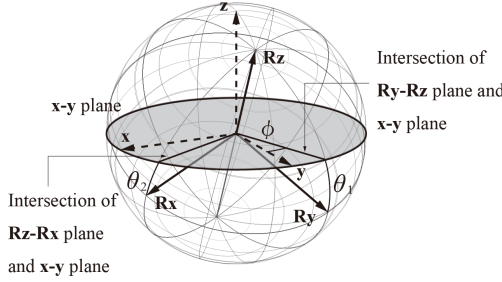


Fig. 2 The attitude representation

は初期推定において過大な誤差が生じていることも確認された。

## 2. センサの線形・非線形特性分離に基づいた相補フィルタ<sup>(9)</sup>

相補フィルタ<sup>(4)</sup>は、相補条件に基づいて設計された周波数フィルタにより  $n$  個のセンサ出力を統合し、推定精度を向上させる技術である。しかし、センサの有効周波数領域は必ずしも相補的でない。そこで、センサダイナミクスを補償することを考えよう。センサの非線形特性や不安定または非プロパとなる逆モデルにより、これはそれほど容易ではない。

上記の問題に対し、筆者らは次の方法を提案した。まず、センサ特性を非線形な座標変換と線形伝達関数で近似した動的特性に陽に分離できると仮定する。さらに、座標変換演算と周波数フィルタの順序を交換しても深刻な影響はないと仮定する。このことにより、逆伝達関数が不安定または非プロパであっても、全体の伝達関数をプロパかつ安定にできる。

$\eta_{\text{est}}$  を姿勢  $\eta$  の推定値、 $i$  番目センサのノミナル伝達関数を  $\tilde{G}_i(s)$ 、 $i$  番目センサ座標系からの座標変換を  $H_i(\cdot)$ 、 $i$  番目センサ出力を  $X_i(s)$  とすると、提案手法は次式で表され、ブロック線図は図 1 のようになる。

$$\eta_{\text{est}} = \sum_{i=1}^n H_i \left( F_i(s) \tilde{G}_i^{-1}(s) X_i(s) \right) \quad (1)$$

ここで、 $F_i(s)$  は  $i$  番目センサの有効周波数領域に適

合するように設計された周波数フィルタであり、次の相補条件を満たす。

$$\sum_{i=1}^n F_i(s) = 1 \quad (2)$$

実際に、図で定義した傾斜角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  と旋回角  $\phi$  による姿勢  $\eta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \phi]^T$  を用いて実装を行った。ここで、姿勢行列は次式で表される。

$$R = R_\phi R_\theta \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\kappa C_\phi}{C_1} & -C_1 S_\phi + \kappa C_\phi S_1 T_2 & S_\phi S_1 + \kappa C_\phi C_1 T_2 \\ \frac{\kappa S_\phi}{C_1} & C_\phi C_1 + \kappa S_\phi S_1 T_2 & -C_\phi S_1 + \kappa C_1 S_\phi T_2 \\ -\kappa T_2 & \kappa T_1 & \kappa \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし添字 1, 2,  $\phi$  はそれぞれ  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\phi$  を表し、 $C_i$ 、 $S_i$ 、 $T_i$  ( $i = 1, 2, \phi$ ) は添字が表す角に対する余弦値、正弦値、正接値をそれぞれ表す。また、

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \frac{\kappa}{\cos \theta_1} & \kappa \sin \theta_1 \tan \theta_2 & \kappa \tan \theta_2 \cos \theta_1 \\ 0 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ -\kappa \tan \theta_2 & \kappa \tan \theta_1 & \kappa \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\kappa \equiv \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1 + \tan^2 \theta_2}} \quad (6)$$

$$R_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

である。各センサの伝達関数は次のように同定した。

$$\tilde{G}_1(s) = s \begin{bmatrix} \frac{1.036}{1+0.004112s} & \frac{-0.02589}{1+0.004112s} & \frac{0.005136}{1+0.004112s} \\ 0.03436 & 1.070 & -0.009853 \\ \frac{1}{1+0.004177s} & \frac{1}{1+0.004177s} & \frac{1}{1+0.004177s} \\ \frac{-0.03828}{1+0.004858s} & \frac{0.02950}{1+0.004858s} & \frac{1.075}{1+0.004858s} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\tilde{G}_2(s) = \frac{1}{D(s)} \begin{bmatrix} 1.0 & 0.01431 \\ 0.01904 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$D(s) = 1 + 0.1788s + 0.0113609s^2 \quad (10)$$

$$\tilde{G}_3(s) = \text{diag}\{1.0, 1.048, 0.980\} \quad (11)$$

ここで、 $\tilde{G}_1(s)$ 、 $\tilde{G}_2(s)$ 、 $\tilde{G}_3(s)$  はそれぞれ角速度センサ、傾斜計、磁気センサの伝達関数を表す。また、座標変換関数は次のようになる。

$$H_1({}^b\omega) \equiv \frac{d\eta}{dt} \simeq \frac{\Delta\eta}{\Delta t} \quad (12)$$

$$d\eta = \begin{bmatrix} \text{atan2}(dr_{32}, dr_{33}) \\ -\text{atan2}(dr_{31}, dr_{33}) \\ \text{atan2}(dr_{21}, dr_{22}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$dR = \mathbf{1} - \frac{\omega \times}{\|\omega\|} \sin(\|\omega\| dt) + \frac{(\omega \times)^2}{\|\omega\|^2} (1 - \cos(\|\omega\| dt)) \quad (14)$$

$$H_2(\xi_1, \xi_2) \equiv [\xi_1 \ \xi_2 \ 0]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{H}_3(\mathbf{m}) \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \text{atan2}(x_m y_{m0} - y_m x_{m0}, x_m x_{m0} + y_m y_{m0}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3$  は、それぞれ角速度センサ、傾斜計、磁気センサの座標変換関数を表す。また、 $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{R}^b \boldsymbol{\omega}$  は慣性座標系に対するセンサ座標系の角速度、 $\boldsymbol{\omega}_\times$  はベクトル  $\boldsymbol{\omega}$  との外積を表す歪対称行列、 $\mathbf{1}$  は  $3 \times 3$  の単位行列である。式 (16) において、 $\mathbf{R}_\theta^T \mathbf{m} = [x_m \ y_m \ z_m]^T$  であり、 $\mathbf{m}_0 = [x_{m0} \ y_{m0} \ z_{m0}]^T$  である。最後に、相補フィルタは次のように設計した。

$$\mathbf{F}_1(s) = \frac{(1/3)s(1 + (1/12)s)}{(1 + (1/6)s)^2} \mathbf{1} \quad (17)$$

$$\mathbf{F}_2(s) = \frac{1}{(1 + (1/6)s)^2} \text{diag}\{1.0, 1.0, 0.0\} \quad (18)$$

$$\mathbf{F}_3(s) = \frac{1}{(1 + (1/6)s)^2} \text{diag}\{0.0, 0.0, 1.0\} \quad (19)$$

座標変換と周波数フィルタの順序交換を許容する根拠は定義した座標変換により異なる。詳細は先行研究<sup>(9)</sup>を参照されたい。

### 3. 非線形カルマンフィルタ<sup>(3)</sup>

この章では、比較のために用いる Yun らのカルマンフィルタ<sup>(3)</sup>について説明する。このフィルタでは、姿勢表現として単位クォータニオン  $\mathbf{q}$  を用い、状態量を  $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\omega}^T \ \mathbf{q}^T]^T$  としている。実際の状態量を  $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}} + \Delta \mathbf{x}$  とすると、各時間における  $\Delta \mathbf{x}$  は次式で計算される。

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = \Phi_k \Delta \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (20)$$

ここで、添字  $k$  は時間  $k\Delta t$ 、 $\mathbf{w}_k$  はプロセスノイズをそれぞれ表し、 $\Phi_k$  は

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau_2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau_3}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\hat{x}_5 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_6 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_7 \Delta t}{2} & 1 & -\frac{\hat{x}_1 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_2 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_3 \Delta t}{2} \\ \frac{\hat{x}_4 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_7 \Delta t}{2} & \frac{\hat{x}_6 \Delta t}{2} & \frac{\hat{x}_1 \Delta t}{2} & 1 & \frac{\hat{x}_3 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_2 \Delta t}{2} \\ \frac{\hat{x}_7 \Delta t}{2} & \frac{\hat{x}_4 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_5 \Delta t}{2} & \frac{\hat{x}_2 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_3 \Delta t}{2} & 1 & \frac{\hat{x}_1 \Delta t}{2} \\ -\frac{\hat{x}_6 \Delta t}{2} & \frac{\hat{x}_5 \Delta t}{2} & \frac{\hat{x}_4 \Delta t}{2} & \frac{\hat{x}_3 \Delta t}{2} & \frac{\hat{x}_2 \Delta t}{2} & -\frac{\hat{x}_1 \Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

となり、 $\tau_i$  は時定数である。また、観測方程式は次式のようになる。

$$\mathbf{Z}_{\text{mes},k} = \mathbf{1}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (22)$$

ここで、 $\mathbf{Z}_{\text{mes},k}$  は観測量、 $\mathbf{1}_k$  は  $7 \times 7$  の単位行列、 $\mathbf{v}_k$  は観測ノイズである。これらの方程式において、 $\mathbf{w}_k$  と  $\mathbf{v}_k$  における誤差共分散行列をそれぞれ  $\mathbf{W}_k, \mathbf{V}_k$  とする

Table 1 The parameter of Kalman filter

	After tuning	Before tuning
$\tau_i (i=1,2,3)$	0.5	0.5
$D_i (i=1,2,3)$	0.1	50
$r_{11}$	0.000225	0.01
$r_{22}$	0.002595	0.01
$r_{33}$	0.0036	0.01
$r_{44}$	0.00005	0.0001
$r_{55}$	0.000375	0.0001
$r_{66}$	0.000375	0.0001
$r_{77}$	0.00005	0.0001

と、次式で表される。

$$\mathbf{W}_k = \text{diag}\{w_{11}, w_{22}, w_{33}, 0, 0, 0, 0\} \quad (23)$$

$$w_{ii} = (D_i/2\tau_i)(1 - e^{-\Delta t/\tau_i}) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (24)$$

$$\mathbf{V}_k = \text{diag}\{v_{11}, v_{22}, v_{33}, v_{44}, v_{55}, v_{66}, v_{77}\} \quad (25)$$

したがって、調整すべきパラメータは  $\tau_i, D_i (i = 1, 2, 3)$  と  $\mathbf{V}_k$  の対角成分である。本研究では、上述の相補フィルタと RMSE が同じ程度になるまで約 80 回の試行を行い、各パラメータを調整した。調整後のパラメータと文献で設定されていたパラメータを表 1 に示す。

### 4. 提案手法とカルマンフィルタにおけるモデル特性

4.1 各センサのモデル特性 この章では、各センサのモデル特性を示し、それぞれのフィルタにおける取り扱いについて述べる。

はじめに、角速度センサは、角速度の真値  $\boldsymbol{\omega}_t$  だけでなく、角度を求める際に誤差累積を招くバイアス  $\mathbf{b}_\omega$  を出力に含む。また、実際には  $\boldsymbol{\omega}_t$  は姿勢  $\boldsymbol{\eta}$  をセンサモデル  $\mathbf{G}_1$  に通した出力であるため、出力  $\boldsymbol{\omega}$  は以下のようにモデル化される。

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{G}_1 \boldsymbol{\eta} + \mathbf{b}_\omega \quad (26)$$

$\mathbf{G}_1$  は微分要素を含むプロパーかつ安定な関数である。このバイアスは正規分布に基づくとし、また主に低周波数成分から成り立つとする。

傾斜計は、2 つの傾斜角を測定するものであるが、センサダイナミクスによる遅れの影響を受ける。傾斜計出力  $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1 \ \xi_2]^T$  は次式のように表される。

$$\boldsymbol{\xi} = \mathbf{G}_2 \boldsymbol{\eta} + \mathbf{e}_{\text{inc}} \quad (27)$$

傾斜計出力に含まれる誤差  $\mathbf{e}_{\text{inc}}$  は、零点におけるオフセットや設置の際のアライメント誤差によるものである。しかし、これらは調整が可能であるため、遅れに比べて、大きな問題ではない。

磁気センサの出力  $\mathbf{m}$  は、姿勢行列  $\mathbf{R}$  により初期値  $\mathbf{m}_0$  を回転させた値を出力する。出力には、周囲の磁

気が外乱として影響するため、磁気センサは次のようにモデル化される。

$$m = G_3 R m_0 + e_{\text{mag}} \quad (28)$$

ここで、 $e_{\text{mag}}$  は正規分布に基づく磁気外乱であるとする。また、磁気センサは傾斜計などに比べ、応答が速いため、 $G_3$  は定数行列とみなせる。

4.2 各フィルタのモデル特性 上述したカルマンフィルタは、現在の姿勢から観測量への変換において恒等変換を用いている。このことは、センサダイナミクスを考慮していないことを表し、式(26)から式(28)におけるモデルにおける $G_i$ の伝達関数部分を単位行列にしていることに等しい。このため、誤差に比べてダイナミクスによる遅れが問題となる傾斜計出力が関連する成分に影響が出ると考えられる。また、一定精度を得るまでにはフィードバックゲインの収束を待たなければならない。

一方で、提案した相補フィルタは式(1)のようにセンサモデルを考慮した形式となっている。それぞれのセンサにおける誤差は、次の仮定により影響を無視できるとしている。角速度センサにおけるバイアスは低周波成分を主に含むためにHPFにより、傾斜計における誤差は初期の調整や伝達関数の非対角成分により軽減できるとしている。また、カルマンフィルタと異なり、決定されたパラメータを用いているために、フィードバックゲインは一定であるとみなせる。

## 5. 姿勢推定実験と性能評価

5.1 実験環境 ジンバル機構によって $z-y-x$ オイラー角を独立に制御できる3軸姿勢制御装置を製作し実験を行った。センサには、3個の1軸角速度センサCRS07-11S(SSSJ社製)、1個の2軸傾斜計X3M(US Digital社製)、1個の3軸磁気センサAMI304(AMI社製)を用いた。原点姿勢において、それぞれのCRS07-11Sの軸、AMI304の各軸は実験機の各軸と、X3Mの2軸は実験機の水平2軸と、それぞれ一致するようにジンバルの中心部に治具で固定した。サンプリング周期は3[ms]とした。

5.2 実験結果および比較考察 実験機の各軸に次式で表される0.4~5[Hz]の調和振動を乱数的に重ね合わせた運動を入力した。比較のために姿勢表現は提案方法における姿勢を用いた。推定結果を図3に、推定誤差を図4にそれぞれ示す。また、カルマンフィルタの調整時に用いたデータとあわせて、相補フィルタ、カルマンフィルタそれぞれの統計誤差を表2に示す。

結果から、提案方法とカルマンフィルタは同程度の精度を示しているが、 $\theta_{1,\text{est}}$ においてカルマンフィルタ

Table 2 The estimate error

	Angle	RMSE	SD	Mean
Proposed filter (Experiment)	$\theta_{1,\text{est}}$	1.79	1.72	-0.50
	$\theta_{2,\text{est}}$	1.72	1.59	-0.65
	$\phi_{\text{est}}$	3.81	3.64	1.13
Yun et al.'s KF (Experiment)	$\theta_{1,\text{est}}$	4.06	2.32	-3.34
	$\theta_{2,\text{est}}$	2.09	2.07	-0.35
	$\phi_{\text{est}}$	3.50	3.28	-1.23
Proposed filter (Tuning)	$\theta_{1,\text{est}}$	2.18	2.18	0.04
	$\theta_{2,\text{est}}$	2.01	1.89	-0.70
	$\phi_{\text{est}}$	2.65	2.64	-0.24
Yun et al.'s KF (Tuning)	$\theta_{1,\text{est}}$	2.00	1.99	-0.22
	$\theta_{2,\text{est}}$	2.40	2.16	-1.06
	$\phi_{\text{est}}$	2.44	2.05	-1.33

RMSE ... root-mean-square error

SD ... Standard Deviation

Table 3 The estimate error of inclinometer

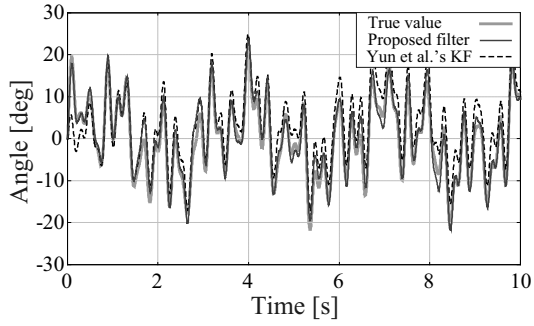
	Angle	RMSE	SD	Mean
Data of tuning	$\xi_1$	9.48	9.48	0.40
	$\xi_2$	8.66	8.66	-0.25
Data of experiment	$\xi_1$	7.89	7.89	0.05
	$\xi_2$	8.04	8.03	-0.38

は精度、特に平均とRMSEの精度低下が見られる。これは、観測方程式において、センサの信頼性を表す誤差共分散行列は運動により変化すると考えられるが、カルマンフィルタでは一定としているために角速度センサの影響が除去できていないためだと考えられる。表3は、調整用のデータと実験データにおける傾斜計の統計誤差を計算したものである。傾斜計の平均誤差は小さいため、推定値の平均誤差は角速度によるものであることが確認できる。また、 $\theta_{1,\text{est}}$ に相当する $\xi_1$ ではRMSEが減少していることが見られた。このことから、傾斜計の信頼性が向上したために信号の使用率は本来高いが、誤差特性を変えていないために角速度センサをより信頼して平均誤差が低下したと考えられる。

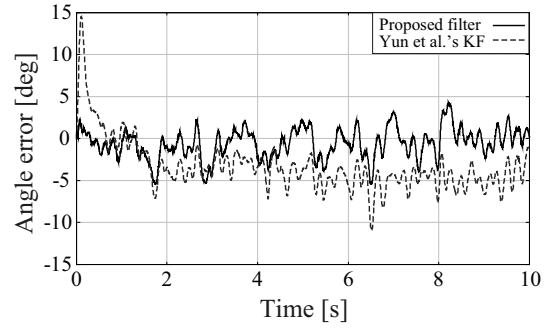
また、それぞれの統計誤差の時間変化を図5と図6に示す。特に推定初期から、提案方法の方が誤差を小さく抑えられていることが分かる。これは、提案する姿勢推定器の設計がよりシステムティックで、最初から固定的パラメータを使用できるためである。

## 6. 結論

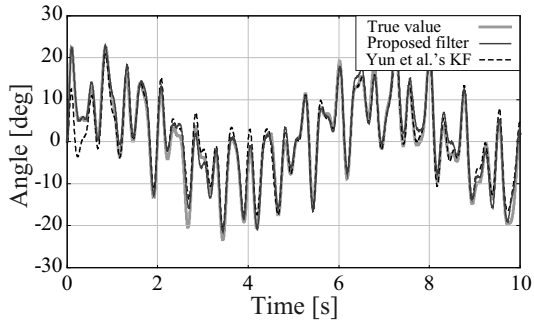
不規則で3次元的な姿勢変化の高精度推定を目的として提案した、慣性センサの逆モデルにより動的特性を補償する方法を、非線形なカルマンフィルタと比較した。傾斜計のようなダイナミクスが大きく影響するセンサがあるとき、入力信号の変化に対して、提案方法は精度にあまり変化が見られなかったが、カルマンフィルタは精度に大きな変化が見られた。また、RMSEの時間変化により、カルマンフィルタで推定初期にお



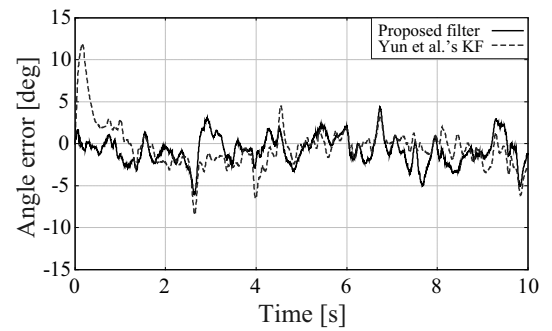
(a) The estimate  $\theta_{1,est}$



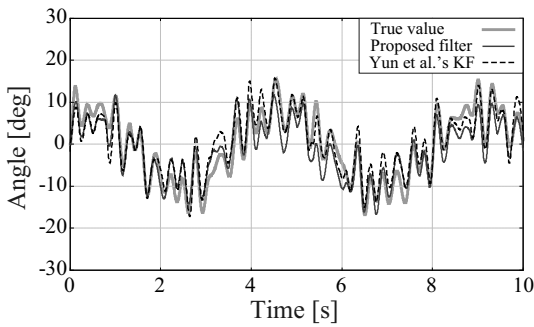
(a) The error of  $\theta_{1,est}$



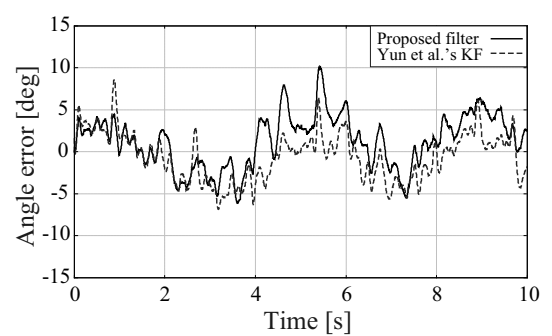
(b) The estimate  $\theta_{2,est}$



(b) The error of  $\theta_{2,est}$



(c) The estimate  $\phi_{est}$



(c) The error of  $\phi_{est}$

Fig. 3 The estimation result of proposed filter and Kalman filter

いて確認された過大な誤差が、提案方法では見られなかった。これらは、提案方法における姿勢推定器がシステムティックに設計され、試行錯誤に頼る部分は少ないためである。これはカルマンフィルタと比べ、大きな利点と言える。

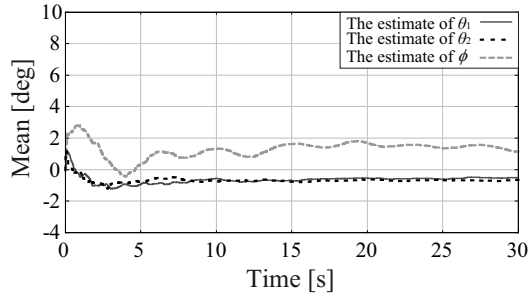
#### 謝 辞

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (A)(課題番号:22680018) の支援を受けた。

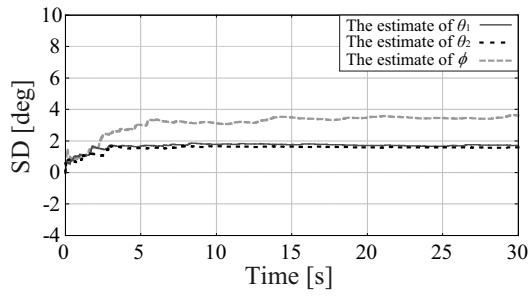
Fig. 4 The error result of proposed filter and Kalman filter

#### 参 考 文 献

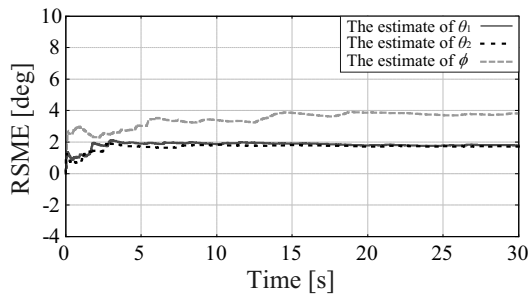
- (1) E. J. Lefferts, F. L. Markley and M. D. Shuster: "Kalman Filtering for Spacecraft Attitude Estimation", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol.5, No.5(1982), pp.417-429.
- (2) G. Creamer, "Spacecraft Attitude Determination Using Gyros and Quaternion Measurements", *The Journal of the Astronautical Sciences*, vol.44, No.3(1996), pp.357-371.
- (3) X. Yun, C. Aparicio, E. R. Bachmann and R. B. McGhee: "Implementation and Experimental Results of a



(a) The mean



(b) The standard deviation

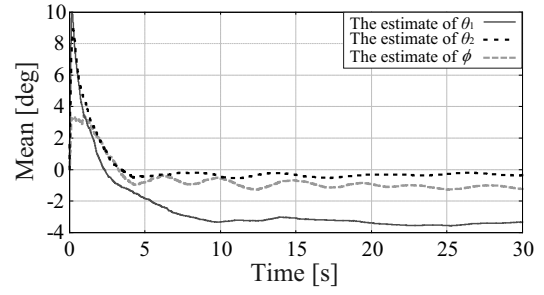


(c) The root square mean error

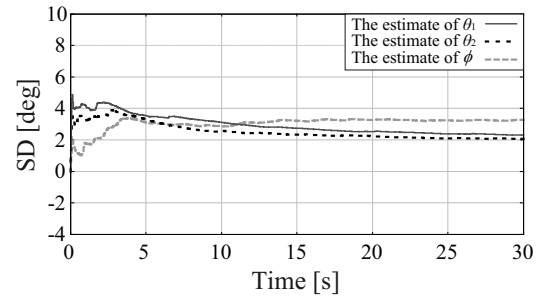
Fig. 5 The error result of proposed filter

Quaternion-Based Kalman Filter for Human Body Motion Tracking”, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2005), pp.317–322.

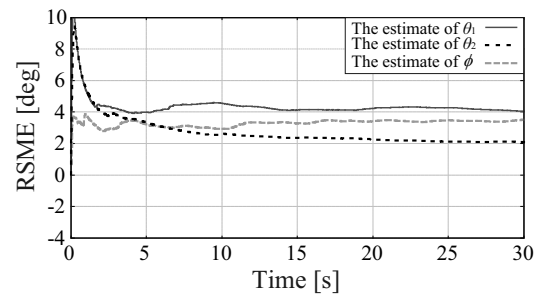
- (4) W. H. Wrikler: "Aircraft Course Stabilizing Means", U. S. Patent 2,548,278, 1951-04-10.
- (5) M. Euston, P.Coote, R.Mahony, J. Kim, and T. Hamel, "A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV", *Proceedings of 2008 IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems*, (2008), pp.340-345.
- (6) R. Mahony, T. Hamel and J. M. Pflimlin: "Nonlinear Complementary filter on the Special Orthogonal Group", *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol.53, No.5(2008), pp.1203–1218.



(a) The mean



(b) The standard deviation



(c) The root square mean error

Fig. 6 The error result of Kalman filter

- (7) A. J. Baerveldt and R. Klang: "A Low-cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter", *Intelligent Engineer Systems*, (1997), pp.391–395.
- (8) A. El Hadri, and A. Benallegue: "Attitude estimation with gyros-bias compensation using low-cost sensors", *Proceeding of the 48th Conference on Decision and Control*, (2009), pp.8077–8082.
- (9) Ken Masuya , Tomomichi Sugihara , Motoji Yamamoto: "A High-fidelity Attitude Estimation by Complementary Use of Inertial Sensor with Dynamics Compensation and Magnetometer (in Japanese)", *Proceedings of the 29th Annual Conference of the Robotics Society of Japan* , 2L1-6 , (2011).