## 論文

# INS/GPS를 위한 다중 필터 융합 기법

조성윤\*, 김병두\*, 조영수\*, 최완식\*

## Multi-Filter Fusion Technique for INS/GPS

Seong Yun Cho\*, Byung Doo Kim\*, Young Su Cho\* and Wan Sik Choi\*

## **ABSTRACT**

A multi-filter fusion technique is proposed and this technique is applied to the INS/GPS integrated system. IIR-type EKF and FIR-type RHKF filter are fused to provide the advantages of these filters based on the adaptive mixing probability calculated by the residuals and the residual covariance matrices of the filters. In the INS/GPS, this fusion filter can provide more robust navigation information than the conventional stand-alone filter.

#### 초 록

본 논문에서는 다중 필터 융합을 위한 기법을 제안하고 이를 INS/GPS 결합항법장치에 적용한다. IIR 형태의 EKF와 FIR 형태의 RHKF 필터를 각 필터의 잉여값(residual)을 이용한 적응형 융합 확률을 계산하여 융합함으로써 두 필터의 장점을 갖도록 한다. 이 융합기법을 적용한 INS/GPS 결합항법장치는 기존의 단독 필터를 사용하는 것보다 강인한 특성을 갖는 항법정보를 제공한다.

**Key Words**: 다중 필터 융합, EKF(확장칼만필터), RHKF Filter(이동구간 칼만 FIR 필터), INS(관성항법시스템), GPS(위성측위시스템)

## I. 서 론

INS/GPS는 연속적인(seamless) 항법정보를 제공할 수 있는 가장 일반적인 항법장치로 현재까지도 성능향상을 위한 많은 연구가 되어오고 있다. 특히, 결합 필터에 대한 연구는 가장 중요한연구 테마 중 하나이며, 비선형성을 갖는 INS 구조에 의해 EKF가 많이 사용되어 왔으나 이 필터가 갖는 단점 보완을 위해 다양한 형태의 필터가연구되고 있다. EKF는 초기 추정오차와 외란 잡음(disturbing noise)이 충분히 작아야만 필터의추정 오차가 bound된다[1]. 또한 필터 설계 시

**†** 2006년 6월 16일 접수 ~ 2006년 9월 18일 심사완료

연락저자, E-mail : sycho@etri.re.kr 대전시 유성구 어은동 52

모델링 오차가 없어야 한다. IIR 필터의 특성상 모델 불확실성이나 일시적으로 나타나는 외란오차 등에 의한 큰 추정오차가 유발될 수 있다[2,3]. 이런 단점은 FIR 특성을 갖는 RHKF (Receding Horizon Kalman FIR) 필터, UT(Unscented Transformation) 개념을 이용한 SPKF(Sigma Point Kalman Filter) 등에 의하여 부분적으로 해 결될 수 있다[2~5]. 특히 RHKF 필터는 외란 잡 음 및 모델 불확실성에 강인한 특성을 갖는다. 그러나 FIR 필터는 IIR 필터에 비해 수렴 특성이 나쁘므로 실제 환경에서 사용하는 경우 필터 튜 닝에 어려움을 갖는다. 본 논문에서는 이런 여러 필터의 특징 중 장점만을 융합하기 위해 적응형 (adaptive) 필터의 개념을 사용한다. 적응필터에는 필터의 잉여값(residual)을 사용하여 Frobenius norm을 최소화 하는 방법으로 필터의 공정잡음 분산을 추정하는 방법[6], MMAE(Multiple Model

<sup>\*</sup> 정회원, 한국전자통신연구원 텔레매틱스 · USN연구단, 측위시스템연구팀

Adaptive Estimation)를 이용하여 공정잡음 분산을 추정하는 방법[7], 여러 모델을 사용하여 융합함으로써 다양한 환경 하에서 좋은 특성이 나타나도록 하는 IMM (Interacting Multiple Model)기법[8] 등이 있다.

본 논문에서는 필터의 잉여값을 사용하는 IMM 기법의 구조를 수정하여 다중 필터를 융합 하는 방법을 제안한다. 앞에서 언급한 FIR 필터 의 장점을 가지며 단점을 보완하기 위해 IIR 필 터와 같이 융합한다. 각 필터의 잉여값을 사용하 여 필터 융합에 필요한 이득값을 계산하며 이를 기반으로 각 INS의 결과를 융합하여 되먹임 (feedback)하고 각 필터의 추정오차 공분산 행렬 을 융합한 후 각 필터로 되먹임 하여 필터들을 갱신한다. 또한 계산된 이득값을 사용하여 INS의 해를 융합함으로써 최종 항법해를 계산한다. 이 기법을 통해 설계된 INS/GPS는 최근에 많이 연 구되는 MEMS기반의 INS를 사용하는 경우에 발 생하기 쉬운 모델링 오차에 강인한 특성을 갖는 다. 저가형 INS/GPS는 최근 텔레매틱스용 항법 장치, UAV 등에 많이 사용되고 있다. MEMS 기 반의 관성센서는 정확한 온도제어를 통해 오차를 보상해야 한다. 그러나 저가형 MEMS 센서의 오 차 특성을 정확하게 모델링 하는 것이 어렵다. 특히 센서 오차의 drift가 심한 경우에 모델링 오 차에 의한 영향이 EKF의 경우 크게 나타나지만 제안된 필터에서는 줄어든다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 다중 필터 융합 기법을 소개하고 3장에서는 이 기법을 사용하여 INS/GPS를 구현하기 위한 INS 계산식과 오차모델을 정리하였다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 INS/GPS의 성능이우수함을 보인다. 그리고 마지막 장에서 결론을 맺는다.

#### Ⅱ. 다중 필터 융합

EKF는 비선형 시스템에서 오차추정 및 센서 융합에 가장 많이 사용되는 필터로 비선형 시스템을 선형화하여 사용하므로 필터 수렴조건[1]을 만족하여야 한다. 그러나 필터 설계시에 발생하는 모델 불확실성 및 사용되는 센서에서 발생하는 일시적인 바이어스 등과 같은 경우에 큰 오차를 발생하게 되는 단점이 있다. 이를 보완하기위하여 연구된 필터가 RHKF 필터이다. RHKF 필터는 완전 가관측성이 항상 만족하는 경우FIR 특성에 의하여 빠른 추정 성능을 가지며 모델 불확실성, 일시적인 시변 바이어스 등과 같은

오차에 제한적으로 영향을 받는 특성을 갖는다. 그리고 선형 시스템에서는 이동구간 초기 상태변수에 대한 정보가 없어도 특이성 문제(singular problem) 없이 사용할 수 있다. 그러나 RHKF 필터 구동에서 가장 중요한 선행 조건인 완전 가관측성은 응용 모델에 따라 부분적으로 만족되지 않을 수 있으며 이에 의해 필터 안전성 문제에 의한 전체 시스템의 불안전성을 야기할 수 있다.이에 반해 EKF는 IIR 필터로 가관측하지 않는 상태변수가 존재하는 시간구간에서도 이전의 완전 가관측한 구간에서 획득한 안전성을 유지할수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 이 두 필터의 장점을 융합하는 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 필터는 INS/GPS 약결합 시스템에 적용하는 것을 목적으로 그림 1과 같이 설계하였다.

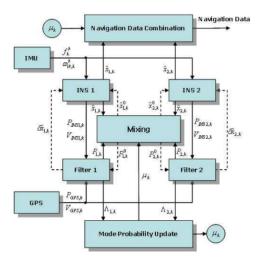


그림 1. INS/GPS용 다중 필터 융합 구성도

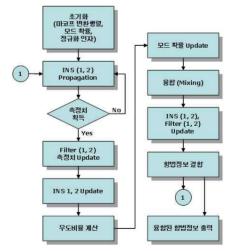


그림 2. 다중 필터 융합 흐름도

본 논문에서 제안하는 다중 필터 융합기법은 선형필터의 다수 모델을 결합하기 위한 IMM 기 법으로부터 비선형 다중 필터 결합을 위한 형태 로 수정하여 설계하였다.

먼저 INS/GPS 결합시스템을 위해 INS와 INS/GPS 필터를 설계하며(Ⅲ장에서 다룸) 본 논문에서는 Filter 1을 EKF, Filter 2를 RHKF 필터로 한다. 필터 융합 흐름도는 그림 2와 같다. 다중 필터 융합을 위한 초기화는 다음과 같이 마코프 천이행렬(Markov Transition Matrix)과 초기모드 확률(Mode Probability), 그리고 정규화 인자(Normalization Factor)를 설정한다.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} \, m_{12} \\ m_{21} \, m_{22} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\mu = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\overline{c_j} = \sum_{i=1}^2 M_{ij} \mu_i \tag{3}$$

여기서 M은 마코프 천이행렬로 필터간의 천이 확률을 나타낸 것이며 각 열벡터의 합은 1로 설정된다 $(m_{1i}+m_{2i}=1,i=1,2)$ . 이 행렬은 필터의 특성 및 응용 모델에 따라 조정해야 할 중요 파라미터이다.  $\mu$ 는 모드 확률로 두 필터의 결합을 위한 필터 신뢰성 비율을 의미한다. 그리고  $\overline{c}$ 는 정규화 인자이다.

일반적인 INS/GPS 약결합 시스템에서 IMU의 출력 주기로 항법정보를 계산하며 GPS 출력에 따른 측정치 획득 주기로 필터를 갱신(update) 한다. 필터 갱신에 의해 추정된 INS의 오차상태 변수는 각 필터에 연결된 각 INS로 되먹임 되어 INS 오차를 보상한다. 그 다음 각 필터에 의하여 오차 보상된 INS의 출력과 필터의 공분산값을 융합한다. 이를 위해 먼저 모드 확률을 갱신한다. 이 과정은 두 필터의 잉여값과 잉여값 공분산을 사용하여 적응형 융합 이득을 갱신하는 것이다. 이를 위해 우도비율(likelihood ratio)을 다음과 같이 계산한다.

$$A_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \|S_{j,k}\|}} exp\left\{-\frac{1}{2}A_{j,k}\right\}$$
 (4)

여기사

$$A_{j,k} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} r_{j,i}^{T} S_{j,i}^{-1} r_{j,i}$$
 (5)

여기서 k는 현 시점으로 우도비율은 처음시점부터 계속 증가된 수의 평균을 통해 구해진다. 그

이유는 측정치의 순간적인 fault가 발생할 때, 잉 여값의 순간적인 큰 변화에 의해 필터의 오동작을 방지하기 위한 것이다.  $r_{j,i}$ 는 i 시간 j필터의 잉여값,  $S_{i,i}$ 는 잉여값 공분산으로 다음과 같다.

$$r_{i,i} = \hat{z}_{i,i} - z_i \tag{6}$$

$$S_{j,i} = H_{j,i} P_{j,i}^{-} H_{j,i}^{T} + R_{j}$$
 (7)

여기서  $z_i$ 는 i 시간에서 획득된 측정치이며  $\hat{z}_{j,i}$ 는 j필터의 측정치에 해당하는 추정치이다. 이때 우도비율을 사용하는 것은 필터의 잉여값의 수열 이 백색잡음이라고 가정한 것이다. 여기서 우도비율은 각 필터의 잉여값과 잉여값 공분산을 통해 각 필터의 신뢰성 정도를 확률인자로 나타낸 것이다.

우도 비율을 사용하여 다음과 같이 모드 확률 을 갱신한다.

$$\mu_{j,k} = \frac{1}{c} \Lambda_{j,k} \bar{c}_j \tag{8}$$

여기서 정규화 인자는 다음과 같다.

$$c = \sum_{i=1}^{2} \Lambda_{j,i} \bar{c}_{i} \tag{9}$$

필터와 모드 확률이 갱신되면 융합(Mixing) 부분에서 다음과 같이 INS의 항법정보와 필터의 공분산 행렬을 융합한다.

$$\hat{x}_{j,k}^0 = \sum_{i=1}^{2} \hat{x}_{i,k} \mu_{i|j,k}$$
 (10)

$$P_{j,k}^{0} = \sum_{i=1}^{2} \left\{ P_{i,k} + \left[ \hat{x}_{i,k} - \hat{x}_{j,k}^{0} \right] \left[ \hat{x}_{i,k} - \hat{x}_{j,k}^{0} \right]^{T} \right\} \mu_{i|j,k}$$
(11)

여기서 융합 확률은 다음과 같이 앞에서 갱신된 모드 확률과 처음에 설정된 마코프 천이행렬을 사용하여 계산하며 식 (10), (11)과 같이 각 필터 의 상태변수와 공분산 행렬을 융합하여 새로운 상태변수와 공분산 행렬을 계산하는데 사용된다.

$$\mu_{i|j,k} = \frac{1}{c_j} M_{ij} \mu_{i,k} \tag{12}$$

여기서 정규화 인자는 다음과 같으며 다음 단계 의 모드 확률 갱신에서 사용된다.

$$\bar{c}_j = \sum_{i=1}^2 M_{ij} \mu_{i,k} \tag{13}$$

식 (12)와 같이 융합 확률을 계산함으로써 융합필터가 정상상태로 가는 경우 융합 확률은 처음에 설정된 마코프 천이행렬의 값으로 수렴하게된다.

이렇게 융합된 항법정보는 각 INS로 되먹임되어 사용되며 갱신된 공분산 행렬은 각 필터로되먹임되어 그 다음 필터 구동시 전파(propagation)된다. 식 (4)~(13)은 필터 구동에 따라 반복된다.

마지막으로 오차 보상된 항법정보는 항법 정보 결합(Navigation Data Combination) 부분에서 다음과 같이 모드 확률을 사용하여 계산된다.

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^2 \hat{x}_{i,k} \mu_{i,k} \tag{14}$$

두 필터의 측정치 갱신 후 잉여값과 잉여값 공분산은 현 시점의 측정치에 대한 필터의 상태를 대변한다. 두 필터가 비슷한 특성을 가지는 경우 우도비율은 비슷한 값을 갖게 되고 두 필터는 비슷한 비율로 융합하게 된다. 그러나 하나의 필터가 다른 필터보다 성능이 좋은 경우 우도비율은 차이를 보이게 되며 융합에서 성능이 좋은 필터가 다른 필터에 비해 큰 이득을 갖고 결합하게 된다. 따라서 본 논문에서 제안된 필터융합기법은 환경에 따라 다른 특성을 나타내는 두 필터의 적응형(adaptive) 융합에 의해 좋은 특성을 가진 필터의 특성이 채택될 확률이 높아지게 됨으로써 전체적인 필터의 성능이 단독 필터에 비해좋게 된다.

## Ⅲ. INS/GPS 결합시스템

#### 3.1 INS 계산식 및 오차모델

INS의 계산식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q^* \left\{ \omega_{ib}^b - C_b^n \left( \omega_{ie}^n - \omega_{en}^n \right) \right\} \tag{15}$$

$$\dot{V}^n = C_b^n f^b - \left(2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n\right) \times V^n + g^n \quad (16)$$

$$\dot{L} = \frac{V_N}{R_m + h}, \ \dot{l} = \frac{V_E}{(R_t + h)\cos L}, \ \dot{h} = -V_D$$
 (17)

여기서 q는 동체 좌표계에서 항법 좌표계로의 변환을 위한 회전 벡터로 정의되는 쿼터니언이 며,  $V^n$ 은 속도벡터, 그리고 L, l, h는 위도, 경고, 고도를 나타낸 것이다. 그리고  $\omega^n_{ie}$ 은 지구자전 각속도를 항법좌표계 상으로 나타낸 것이며  $\omega^n_{op}$ 은 항체의 속도에 의해 나타나는 지구고정좌

표계에 대한 항법좌표계의 회전각속도를 항법좌 표계 상으로 나타낸 것이다. 지구 반경은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_m = \frac{R_0(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 L)^{3/2}}, \ R_t = \frac{R_0}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 L}}$$
 (18)

여기서  $R_0=6,378,137[m]$ 는 지구 타원체의 적도 반경이며 e=0.0818191908426는 이심률이다.

마지막으로 항법 좌표계에서의 중력 가속도  $q^n$ 는 다음과 같이 구한다.

$$g^n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & g_e \end{bmatrix}^T \tag{19}$$

여기서

$$g_{e} = \begin{cases} \frac{g_{0}}{\left(1 + h / \sqrt{R_{m}R_{t}}\right)^{2}}, & h \ge 0\\ g_{0}\left(1 + h / \sqrt{R_{m}R_{t}}\right), & h < 0 \end{cases}$$
 (20)

여기서

$$g_0 = 9.780318 \begin{pmatrix} 1 + 0.0053024 \sin^2\!L \\ -0.0000059 \sin^2\!2L \end{pmatrix} \tag{21}$$

INS/GPS용 EKF 및 RHKF 필터를 위해 비선형 INS 계산식을 선형섭동법(linear perturbation method)을 사용하여 오차에 대하여 선형화 하여식 (20)과 같이 시스템 및 측정치 모델을 정리할수 있다. 이때 오차상태변수는 다음과 같이 위치오차(3), 속도오차(3), 자세오차(3), 가속도계 오차(3), 그리고 자이로 오차(3)로 15차로 구성하였다.

$$\delta x = \begin{bmatrix} \delta L & \delta l & \delta h & \delta V_N & \delta V_E & \delta V_D \\ \phi_N & \phi_E & \phi_D & \nabla_x & \nabla_y & \nabla_z & \epsilon_x & \epsilon_y & \epsilon_z \end{bmatrix}^T$$
(22)

$$\delta \dot{x}_{k} = F_{k} \delta x_{k} + G_{k} w_{k} \tag{23}$$

$$= \begin{bmatrix}
F_{pp} F_{pv} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\
F_{vp} F_{vv} & F_{va} & C_{b}^{n} & 0_{3 \times 3} \\
F_{ap} F_{av} & F_{aa} & 0_{3 \times 3} - C_{c}^{n}
\end{bmatrix} \delta x_{k}$$

$$+ \begin{bmatrix}
0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\
C_{b}^{n} & 0_{3 \times 3} \\
O_{b} & 0_{3 \times 3} & C_{b}^{n}
\end{bmatrix} w_{k}$$

$$0_{6 \times 3} & 0_{6 \times 3} & 0_{6 \times 3}$$

$$\begin{split} \boldsymbol{z}_k &= \begin{bmatrix} I_{6\times 6} & \boldsymbol{0}_{6\times 9} \end{bmatrix} \delta \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{v}_k \\ &= \begin{bmatrix} P_{INS} \\ V_{INS} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{GPS} \\ V_{GPS} \end{bmatrix} \end{split}$$

여기서 시스템 식을 구성하는 세부사항은 참고문 헌 [9]에서 참고하여 구성할 수 있다.

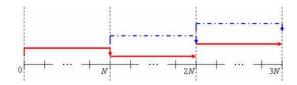


그림 3. Modified RHKF 필터의 구성도

#### 3.2 Modified RHKF 필터

그림 1에서 Filter 1은 EKF로 구성하고 Filter 2는 RHKF 필터로 구성한다. EKF는 IIR 필터로 시간 k에서 구간  $[0\ k]$ 의 모든 측정치를 사용하 여 오차 상태변수를 추정하고 RHKF 필터는 FIR 필터로 시간 k에서 구간  $[k-N \ k]$ 의 한정된 측 정치만 사용하여 오차 상태변수를 추정한다. 여 기서 N은 FIR의 구간의 크기이다. 본 논문에서 사용된 RHKF 필터는 그림 3과 같이 구성된다. 일점쇄선으로 나타낸 것은 hidden section이며, 실선으로 나타낸 것은 active section으로 그 결 과를 필터 출력으로 사용한다. 기존의 RHKF 필 터는 구간 간격을 1로 함으로써 측정치를 N번 사용한다. 이로 인해 계산량이 EKF에 비해 N배 증가한다. 그러나 본 논문에서 사용한 수정된 RHKF 필터는 구간 간격을 구간 크기만큼 확대 함으로써 계산량이 EKF보다 2배만 증가하게 된 다. 또한 active section에서 측정치 갱신마다 결 과를 필터로 되먹임 할 수 있으므로 선형화 기준 점 오차를 줄일 수 있으며 이 구간에서 수렴 특 성이 기존의 RHKF 보다 향상되게 된다.

#### Ⅳ. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서 제안된 다중 필터 융합기법의 성능을 검증하기 위하여 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 시험 궤적은 표 1과 같은 차량 운동시나리오에 의하여 그림 4와 같이 설정하였다. 시뮬레이션 환경을 달리하여 각각 100회씩 시뮬레이션을 수행하여 결과를 정리하였다. 본 논문의시뮬레이션에서 사용된 GPS 데이터는 MATLAB Toolbox를 사용하여 생성하였으며 GPS 오차는열잡음(thermal noise)만 있다고 가정하였다. RHKF 필터의 구간 N은 15초로 설정하였다. 시뮬레이션에서 사용된 관성센서의 사양은 표 2와같이 하였다. 표 2에서 랜덤워크 성분은 시뮬레이션 Case 2에서 사용된 수치이다.

몬테칼로 시뮬레이션은 다음과 같이 100회의 시뮬레이션 후 평균을 계산하여 그 결과를 비교 하다.

표 1. 차량 운동 시나리오

시간(초)	운동	속도	각속도	가속도
0 ~ 10	가속	증가	_	3 m/s <sup>2</sup>
~ 15	등속	30 m/s	-	-
~ 20	회전	_	18 °/s	_
~ 25	등속	30 m/s	-	-
~ 30	감속	감소	-	-6 m/s <sup>2</sup>
~ 40	가속	증가	ı	3 m/s <sup>2</sup>
~ 45	회전	_	18 °/s	_
~ 50	등속	30 m/s	-	-
~ 55	회전	_	18 °/s	_
~ 60	감속	감소	-	$-6 \text{ m/s}^2$

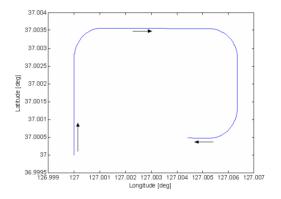


그림 4. 시뮬레이션 궤적

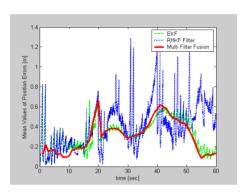
$$m_{k} = \frac{1}{99} \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^{100} (\hat{x}_{i,k} - x_{k}) \right\}^{2} + \left\{ \sum_{i=1}^{100} (\hat{y}_{i,k} - y_{k}) \right\}^{2} + \left\{ \sum_{i=1}^{100} (\hat{z}_{i,k} - z_{k}) \right\}^{2}}$$
(24)

여기서  $[\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z}]$ 는 추정치로 세 축의 위치, 속 도, 자세, 가속도계 오차 및 자이로 오차를 나타 낸 것이며  $[x \ y \ z]$ 는 참값을 나타낸 것이다.

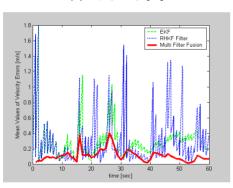
#### 4.1 Case 1: normal case

센서 오차는 랜덤 상수로 모델링, 필터에서 사용되는 센서 오차의 모델은 랜덤 상수로 한다. Case 1은 모델링 불확실성이 없이 잘 설계된 경우로 시뮬레이션의 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 결과를 통해 제안된 다중 필터 융합기법은 기존의 EKF와 RHKF 필터의 결과를 smoothing하는 효과를 나타내는 것을 볼 수 있다.

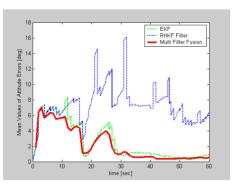
위치오차(a)와 속도오차(b)의 경우 EKF 보다 RHKF 필터의 오차가 다소 크게 나오는 것은 RHKF 필터가 FIR 구조로 되어 있으므로 수렴 특성이 구간 내에서 다소 제한적이기 때문이다. 다중 필터 융합의 결과는 두 필터보다 오차가 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 자세 오차(c)의 경우, EKF는 시간에 따라 점점 작아지는 반면 RHKF 필터는 제한된 크기 안에서 수렴하지는 않는 것을 볼 수 있다. 다중 필터 융합은 두 필터의 장점을 융합함으로 EKF의 특성을 반영하여시간에 따라 수렴하는 경향을 보인다. 센서 오차의 경우(d, e) 또한 다중 필터 융합은 EKF의 장점에 의하여 수렴하는 특성을 보인다. 모드 확률(f)를 분석해 보면 RHKF 필터의 두 배 구간까지는 EKF와 동일한 결과를 나타내므로 모드 확률



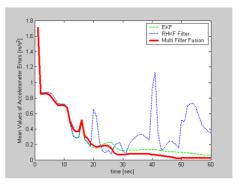
(a) 위치오차 [m]



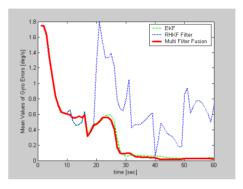
(b) 속도오차 [m/s]



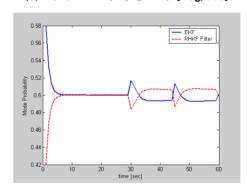
(c) 자세 오차 [deg]



(d) 가속도계 오차 추정오차 [m/s²]



(e) 자이로 오차 추정오차 [deg/sec]



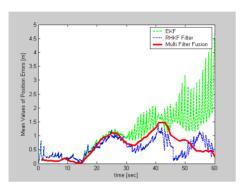
(f) 모드 확률 그림 5. Case 1 시뮬레이션 결과

이 0.5로 수렴하는 특성을 보인다. 이것은 필터 융합에 의해 두 필터가 정상상태로 접근하는 것을 의미한다. 이후 RHKF 필터의 구간 초기에는 RHKF 필터의 공분산이 초기화 되므로 잉여값 공분산이 EKF 보다 커지게 되므로 우도비율이 작게 계산되고 따라서 모드 확률이 작게 계산되기 때문이다. 그러나 구간이 진행됨에 따라 RHKF 필터가 EKF보다 조금 크게 계산되는 것은 필터 융합에 의해 RHKF 필터의 잉여값 및 잉여값 공분산이 EKF보다 작게 되어가기 때문이

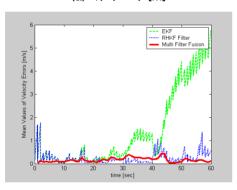
다. 이런 현상은 RHKF 필터의 구간 주기로 반복한다. 따라서 일반적으로 필터를 잘 설계한 경우에는 RHKF 필터보다 EKF의 수렴 특성이 좋으므로 좋은 성능을 보이며 다중 필터 융합기법 또한 EKF의 수렴 특성을 반영하므로 좋은 항법 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 Case 2: model uncertainty

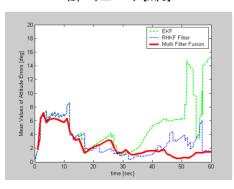
센서 오차는 랜덤 워크로 모델링, 필터에서 사용되는 센서 오차의 모델은 랜덤 상수로 한다. Case 2는 모델링 불확실성이 있는 경우로 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다. 이 경우 EKF는 IIR



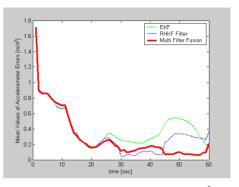
(a) 위치오차 [m]



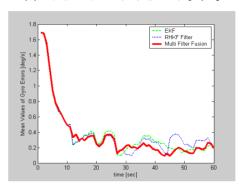
(b) 속도오차 [m/s]



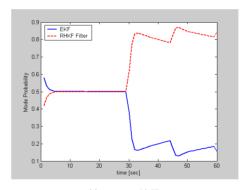
(c) 방위각 오차 [deg]



(d) 가속도계 오차 추정오차 [m/s²]



(e) 자이로 오차 추정오차 [deg/sec]



(f) 모드 확률

그림 6. Case 2 시뮬레이션 결과

필터의 특성에 의하여 위치, 속도 및 자세 오차가 시간이 지남에 따라 점점 발산하는 특성을 보인다. 그러나 RHKF 필터는 일정한 크기 안에서 오차가 bound되는 것을 볼 수 있다. 이것은 FIR 특성에 의한 RHKF 필터의 장점이다. 다중 필터융합에 의한 필터는 필터의 장점을 융합하므로두 필터보다 오차가 다소 작으며 smoothing되는 특성까지 보이는 것을 알 수 있다. 센서 오차는두 필터가 비슷한 성능을 보였다. RHKF 필터의두 배구간 이후에는 RHKF 필터의 잉여값이 EKF

보다 작아지므로 우도비율이 크게 계산되고 따라서 RHKF 필터를 위한 모드확률이 EKF 보다 크게 계산되는 것을 알 수 있다.

MEMS-INS/GPS에서 센서 오차의 모델을 랜 덤상수로 하는 경우 EKF에서는 Case 2와 같은 결과를 보이기 쉬우며 랜덤워크로 모델링 하는 경우 추정치가 진동하는 경향을 보일 수 있다. 따라서 제안한 다중 필터 융합기법은 센서의 오차 특성을 정확하게 파악하기 어려운 경우에 더좋은 결과를 보인다.

### V. 결 론

본 논문에서는 EKF와 RHKF 필터의 결합을 위한 다중 필터 융합기법을 제안하고 INS/GPS 결합장치에 응용할 수 있는 필터 구조를 제안하 였다.

제안된 다중 필터 융합기법은 비선형 필터의 융합과 IIR 필터/FIR 필터 융합이라는 의미를 갖는다. 다중 필터의 잉여값을 사용하여 적응형 융합 확률을 계산하고 이를 기반으로 필터의 결과를 융합한다. 이 기법에 의하여 설계된 필터는 모델 불확실성 존재 유무에 관계없이 기존의 단독 필터를 사용하는 경우보다 좋은 추정 결과를 제공하는 것을 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 보였다.

#### 참고문헌

- 1) K. Reif, S. Gunther, and E. Yaz, "Stochastic Stability of the Discrete-Time Extended Kalman Filter", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 44, No. 4, Apr., 1999, pp. 714~728.
  - 2) W. H. Kwon, P. S. Kim, and P. G. Park,

- "A Receding Horizon Kalman FIR Filter for Discrete Time-Invariant Systems", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 44, No. 9, Sep. 1999, pp. 1787~1791.
- 3) S. Y. Cho, and W. S. Choi, "A Robust Positioning Technique in Low-cost DR/GPS for Land Navigation", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol. 55, No. 4, Aug., 2006.
- 4) S. Julier, J. Uhlmann, and H. Durrant-Whyte, "A New Method for Nonlinear Transformation of Means and Covariances in Filters and Estimators", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 45, No. 3, Mar. 2000, pp. 477~482.
- 5) S. Y. Cho, and W. S. Choi, "Performance Enhancement of Low-Cost Land Navigation System for Location-Based Service", *ETRI Journal*, Vol. 28, No. 2, Apr., 2006, pp. 131~144.
- 6) 유명종, "INS/GPS를 위한 적응필터 구성", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 11권, 제 8 호, 2005년 8월, pp. 717~725.
- 7) C. Hihe, T. Moore, and M. Smith, "Adaptive Kalman filtering for low cost INS/GPS", *Proceedings of the Institute of Navigation GPS-2002*, pp. 1143-1147.
- 8) H. A. P. Blom, and Y. Bar-Shalom, "The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 33, No. 8, Aug., 1988, pp. 780~783.
- 9) Jaewon Seo, Hyung Heun Lee, Jang Gyu Lee, and Chan Gook Park, "Lever Arm Compensation for GPS/INS/Odometer Integrated System", IJCAS, Vol. 4, No. 2, Apr., 2006, pp. 247-254.