

적응필터를 사용한 수직상태 SDINS 전달정렬

SDINS Transfer Alignment using Adaptive Filter for Vertical Launcher

박 찬 주* **이 상 정****
Park, Chan-Ju Lee, Sang-Jeong

ABSTRACT

This paper proposes SDINS(strapdown inertial navigation system) transfer alignment method for vertical launcher using an adaptive filter in the ship. First, the velocity and attitude matching transfer alignment method is designed to align SDINS for vertical launcher. Second, the adaptive filter is employed to estimate measurement noise variance in real time using the residual of measurements. Because it is difficult to decide measurement noise variance when noise properties of the ship SDINS are changed. To verify its performance, it is compared with the EKF(Extended Kalman filter) using uncorrect measurement variance. The monte carlo simulation results show that proposed method is more effective in estimating attitude angle than EKF.

주요기술용어(주제어) : INS(관성항법장치), Vertical Launcher(수직발사대), Transfer Alignment(전달정렬), Adaptive Filter(적응필터)

1. 머리말

스트랩다운 관성항법장치(SDINS : Strapdown Inertial Navigation System)의 초기정렬 방법에는 자체 정렬과 전달정렬이 있다^[1]. SDINS의 정밀도가 중급 이하인 경우 자체정렬이 어렵고, 중급 이상의 SDINS라도 빠른 시간내에 초기정렬을 수행해야 할 경우에는 전달정렬을 사용하여 초기정렬을 하여야 한다. 초기정렬의 방법으로는 one-shot 전달정렬

방법과 연속적인 정보를 이용한 전달정렬 방법이 있다. 연속적인 정보를 이용한 전달정렬 방법에는 적용 대상 및 정합방법에 따라 여러 방법이 있다. 배에 적용될 경우 배에서 사용하는 정밀급 SDINS인 MINS (Master Inertial Navigation System)에서 제공하는 위치, 속도, 자세를 전달정렬의 추정치로 사용하여 세축의 장착 비정렬각을 추정하며, 가관측성을 높이기 위해서 속도 및 자세를 이용한 속도 및 자세정합 전달정렬을 사용한다^[2~5]. 속도 및 자세정합 전달정렬 방법은 MINS와 SINS(Slave Inertial Navigation System)의 속도 및 자세 정보를 이용하여 MINS와 SINS 사이의 장착 비정렬각을 추정함으로써 SINS의 초기자세를 추정하는 방법이다. 속도 및 자세정합 전달정렬 방법에서 추정기로는 일반적으로 확장형

† 2006년 9월 7일 접수~2007년 1월 12일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(CNU)

주저자 이메일 : nayana@add.re.kr

칼만필터를 사용한다^[6~8]. 속도 및 자세정합 방법에서 속도정합으로는 수평축 자세를 추정할 수 있고, 자세정합으로 방위각 자세를 추정할 수 있다. 일반적으로 전달정렬은 SINS가 수평상태일 때 이루어지며, 이때 수평상태 자세정렬 방식으로는 DCM(Direction Cosine Matrix) 자세정합 방식이 주로 사용된다. SINS의 롤축이 수직으로 세워져 있는 수직상태 SDINS 전달정렬에 대한 연구는 MINS와 SINS의 운동이 없는 지상에서의 방위각 광학정렬에 대한 연구만이 발표되어 있다^[9]. 본 논문에서는 속도 및 자세정합 전달정렬 방법을 사용하여 수직상태 SDINS 전달정렬 방법을 제시한다. 또한 속도 및 자세정합 전달정렬 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 자세운동으로 주어진 시간 내에 원하는 전달정렬 성능을 만족하기 위해서는 일정 크기 이상의 배 자세운동이 요구된다. 그러나, 일정 크기의 배 자세운동이 있어도 그 크기가 작으면 추정기로 사용하는 확장형 칼만필터의 정확한 측정잡음 공분산값을 모를 때는 전달정렬의 수렴 성능이 저하되어 주어진 시간내에 전달정렬을 완료할 수 없게 된다^[6]. 그러므로 정확한 측정잡음을 결정해야하지만, 이를 위해서는 많은 실험 데이터들이 필요하므로 현실적으로 힘들다. 또한 SINS가 장착되는 MINS의 속도 및 자세의 잡음 특성은 배마다 다를 수 있으며, 측정 방정식의 모델링에서 MINS의 속도 및 자세 잡음 특성 외에 바이어스, lever-arm에 의한 오차 등이 백색잡음으로 모델링되어 정확한 측정잡음의 분산값을 결정하기가 어렵다. 그래서 본 논문에서는 속도 및 자세정합 전달정렬을 위해 수렴성능을 높이고, 주어진 시간에 전달정렬을 완료할 수 있도록 측정잡음의 분산값을 실시간으로 추정하는 적응필터를 적용하였다^[10,11]. 사용된 적응 필터는 기존의 확장형 칼만필터와 비교하여 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다.

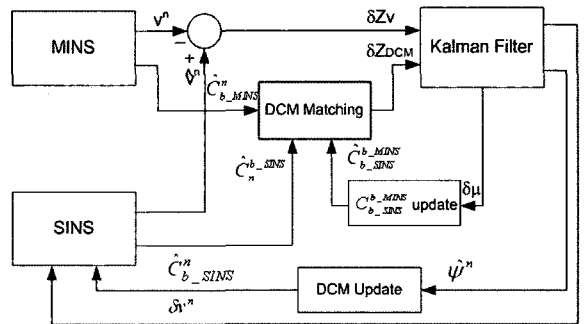
2. 수직상태 SDINS 속도 및 자세정합 전달정렬

전달정렬은 배에 장착된 MINS와 항체에 장착된 SINS 사이의 장착 비정렬각을 추정하여 SINS의 초기 자세를 결정하는 방법이다. 본 장에서는 수직상태

로 장착된 SINS의 속도 및 자세정합 전달정렬 방법을 유도하였다.

가. SDINS 속도 및 자세정합 전달정렬 구성

MINS에서 속도 및 자세를 전달정렬을 위해 제공하고, SINS에서 출력되는 속도 및 자세 정보를 이용하여 연속적인 속도 및 자세정합 전달정렬을 수행한다. 일반적으로 속도 및 자세정합 전달정렬 필터는 간접 되먹임 방식의 칼만필터를 사용한다^[7]. 속도 및 자세정합 전달정렬에 대한 자세한 내용은 관련 참고 문헌에 설명되어 있다^[2~5]. 속도 및 자세정합 전달정렬 구성도는 그림 1과 같다.



[그림 1] 속도 및 자세정합 전달정렬 구성도

나. 시스템 모델

사용되는 시스템 모델은 오차 모델로 SDINS의 속도 및 자세오차 모델과 장착 비정렬각 오차 모델을 사용한다. 이때 사용되는 SDINS 속도 및 자세오차 모델은 psi 오차 모델을 사용한다^[12]. 장착 비정렬각 오차는 상수로 가정하여 랜덤상수로 모델링하였다. 사용된 오차 모델은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{v}^n &= -(2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n)\delta v^n + F^n \psi^n + \delta \dot{f}^n \\ \dot{\psi}^n &= -(\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n)\psi^n + \delta \omega^n \\ \delta \dot{\mu} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 δv^n 은 속도오차를 ψ^n 은 자세오차를 $\delta \mu$ 는 장착 비정렬각 오차를 나타내며, $\delta \dot{f}^n$ 은 가속도 센서 오차를 $\delta \omega^n$ 은 자이로 센서 오차를 나타낸다.

그리고 Ω_{ie}^n 은 항법 좌표계에서 측정된 지구자전 각 속도를 Ω_{en}^n 은 transport rate를 나타내며 F^n 은 항법 좌표계에서 측정된 가속도를 나타내는 행렬이다.

다. 측정 모델 및 보정식

측정치로 사용되는 정보는 속도 및 자세로 속도 정합에 사용되는 속도는 항법 좌표계에서의 속도를 사용한다. 자세정합 방법에는 오일러각 자세정합, 쿼터니언 자세정합, DCM 자세정합 방법이 있으나, 수렴 성능이 상대적으로 좋은 DCM 자세정합 방법을 사용하였다. 속도에 대한 측정식은 식 (2)와 같고, 자세에 대한 측정치와 측정식은 식 (3)과 같다. 식 (3)의 첫 번째 측정치를 행렬식으로 전개하고, 오차항에 대한 고차항을 제거하면 식 (3)의 두 번째 식으로 표현된다. 또한 식 (3)을 상태변수를 포함하는 벡터식으로 표현하면 식 (4)와 같이 된다. 사용된 속도 및 자세 보정식은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{v} &= \mathbf{v}_{SINS}^n - \mathbf{v}_{MINS}^n \\ &= \delta \mathbf{v}^n + \mathbf{v}_v \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{z}_{DCM} &= \mathbf{C}_{b_MINS}^n \mathbf{C}_{b_SINS}^{b_MINS} \mathbf{C}_{b_SINS}^{b_SINS} - \mathbf{I} \\ &\approx \Psi^n - \mathbf{C}_{b_MINS}^n \mathbf{M} \mathbf{C}_{b_SINS}^{b_MINS} + \mathbf{v}_{DCM} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\mu_z & \delta\mu_y \\ \delta\mu_z & 0 & -\delta\mu_x \\ -\delta\mu_y & \delta\mu_x & 0 \end{bmatrix} \Psi^n = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\psi}_d^n & \hat{\psi}_e^n \\ \hat{\psi}_d^n & 0 & -\hat{\psi}_n^n \\ -\hat{\psi}_e^n & \hat{\psi}_n^n & 0 \end{bmatrix}$$

$$\delta \mathbf{z}_{DCM} = \Psi^n - \mathbf{C}_{b_MINS}^n \delta \boldsymbol{\mu} + \mathbf{v}_{DCM} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^n(k) &= \hat{\mathbf{v}}^n(k) - \delta \mathbf{v}^n(k) \\ \mathbf{C}_b^n(k) &= (\mathbf{I} + \hat{\Psi}^n) \hat{\mathbf{C}}_b^n(k) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\hat{\Psi}^n = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\psi}_d^n & \hat{\psi}_e^n \\ \hat{\psi}_d^n & 0 & -\hat{\psi}_n^n \\ -\hat{\psi}_e^n & \hat{\psi}_n^n & 0 \end{bmatrix}$$

위 식 (2)와 (3)에서 \mathbf{v}_{SINS}^n 는 SINS 속도이고, \mathbf{v}_{MINS}^n

는 MINS 속도를 나타낸다. $\mathbf{C}_{b_MINS}^n$ 는 MINS의 자세를 나타내는 자세변환행렬이고, $\mathbf{C}_{b_SINS}^{b_SINS}$ 는 SINS의 자세를 나타내는 자세변환행렬의 전치행렬이며, $\mathbf{C}_{b_SINS}^{b_MINS}$ 은 MINS와 SINS 사이의 장착 비정렬각을 나타내는 자세변환행렬이다. 식 (3)에서 M은 MINS와 SINS 사이의 장착 비정렬각 오차를 나타내는 전치행렬이다. $\delta \mathbf{v}^n(k)$ 는 필터에서 추정된 속도오차이고, $\hat{\boldsymbol{\psi}}^n$ 은 필터에서 추정된 자세오차 회전벡터이다. 자세정합의 경우 DCM정합 방식을 사용하므로 측정치를 만들기 위해 초기에는 수평상태인 MINS의 오일러각을 사용하여 $\mathbf{C}_{b_MINS}^n$ 을 계산하고, 초기 $\mathbf{C}_{b_SINS}^{b_SINS}$ 는 초기값이 MINS와 SINS의 자세가 같다는 가정아래 초기 $\mathbf{C}_{b_MINS}^n$ 값을 사용하며, $\mathbf{C}_{b_SINS}^{b_SINS}$ 는 위 가정에 의해 단위행렬을 사용한다. 초기 이후 계산에서는 $\mathbf{C}_{b_MINS}^n$ 는 수평상태인 MINS의 오일러각을 사용하고, $\mathbf{C}_{b_SINS}^{b_SINS}$ 는 SINS의 항법계산에 의해 생성되는 DCM을 사용하며, $\mathbf{C}_{b_SINS}^{b_MINS}$ 는 추정된 장착비정렬각 오차를 이용하여 보정된 DCM을 사용한다. 위에서 기술한 것과 같이 DCM 자세정합 방법을 사용하였을 경우 수평상태 전달정렬과 수직상태 전달정렬 방법이 같음을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 SINS의 초기자세는 수직이지만 수평상태 전달정렬 방법을 사용하여 수직상태 전달정렬을 수행한다.

3. 적응필터 구성

식 (2)와 (4)에서 각식의 마지막 항은 측정잡음으로 센서에 의해 발생하는 잡음 외에 모델링 오차에 의한 잡음으로 간주하였다. 그러므로 정확한 측정잡음 공분산 값을 모르는 경우 값을 작게 하면 필터의 안정성이 떨어지고, 크게 하면 성능이 나빠지므로 결정하기가 어렵다. 또한 MINS의 특성이 다른 경우 각각의 MINS에 대해서 측정잡음의 공분산 값이 틀려진다. 그러나, 일반적으로 칼만필터에서 측정잡음의 공분산값은 미리 결정되어 상수로 입력되어 있으므로 전달정렬 성능을 저하 시킬수 있다. 그러나 미리 결정된 측정잡음 공분산 값을 사용하지 않고, 전달정렬

시 실시간으로 측정잡음의 공분산 값을 알 수 있다면 최적의 전달정렬 성능을 이끌어 낼 수 있을 것이다. 그러므로 본 장에서는 측정잡음 공분산값을 실시간으로 추정하는 방법을 사용하고자 한다^[10]. 먼저 아래의 비선형 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = f[x(t)] + G(t)w(t) \quad (6)$$

$$z(t) = h[x(t)] + v(t) \quad (7)$$

위 식에서 측정 방정식의 이산화된 시스템 식을 구하면 식 (8)과 같다.

$$z(k+1) = h[x(k+1)] + v(k+1) \quad (8)$$

식 (8)에서 측정잡음 $v(k+1)$ 은 두 종류의 측정잡음으로 구성하고, 두 번째 측정잡음에 가중치를 두어 실시간으로 이 값을 구하면 정확한 전체 측정잡음을 구할 수 있다. 두 측정잡음은 서로 상관관계가 없다고 가정하고, 두 종류의 측정잡음을 이용하여 구해진 전체 측정잡음을 식 (9)와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} z(k+1) &= h[x(k+1)] + v(k+1) \\ &= h[x(k+1)] + v_1(k+1) + \alpha v_2(k+1) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 $v_1(k+1)$ 와 $v_2(k+1)$ 는 일정한 분산값을 가지는 측정잡음이고, $v_2(k+1)$ 는 추정 파라미터 α 에 의해 시간에 따라 변한다. α 는 $\alpha \geq 0$ 을 만족하는 실수 값이고, 각 측정치의 분산값의 변화를 실시간으로 결정하기 위해 사용한다. 확장형 칼만필터를 사용하면, 실제 측정값과 필터에서 추정된 측정값을 이용하여 측정잡음 잉여값을 구한다음 고차항을 제거하고 간단히 하면 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}(k+1) &= h[x(k+1)] + v(k+1) - h[\hat{x}(k+1|k)] \\ &= H(k+1)[x(k+1) - \hat{x}(k+1|k)] + v_1(k+1) \\ &\quad + \alpha v_2(k) + h.o.t \\ &\approx H(k+1)[x(k+1) - \hat{x}(k+1|k)] \\ &\quad + v_1(k+1) + \alpha v_2(k) \end{aligned} \quad (10)$$

위 식 (10)을 이용하여 측정치 잉여값의 분산을 구해보면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} S(k+1|k) &= E[\hat{\varepsilon}(k+1) \hat{\varepsilon}(k+1)^T] \\ &= H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) \\ &\quad + R_1(k+1) + \alpha^2 R_2(k+1) \\ &= H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) \\ &\quad + R_1(k+1) + \beta R_2(k+1) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 $R_1(k+1)$ 와 $R_2(k+1)$ 는 각각 $v_1(k+1)$ 와 $v_2(k+1)$ 의 공분산 행렬이고, $P(k+1|k)$ 은 추정된 오차 공분산 행렬로 다음 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} R_1(k+1) &= E[v_1(k+1) v_1(k+1)^T] \\ R_2(k+1) &= E[v_2(k+1) v_2(k+1)^T] \\ P(k+1|k) &= \Phi(k+1, k)P(k|k)\Phi(k+1|k)^T + Q_d \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 Q_d 는 공정잡음의 공분산 행렬이며, 식 (12)을 식 (11)에 대입하면 측정치 잉여값의 공분산 행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} S(k+1|k) &= E[\hat{\varepsilon}(k+1) \hat{\varepsilon}(k+1)^T] \\ &= H(k+1)[\Phi(k+1, k)P(k|k)\Phi(k+1, k)^T \\ &\quad + Q_d]H^T(k+1) + R_1(k+1) + \beta R_2(k+1) \\ &= L_1 + \beta L_2 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 L_1 과 L_2 는 식 (14)와 같고, 측정잡음 잉여값의 정보를 포함하고 있다.

$$\begin{aligned} L_1 &= H(k+1)[\Phi(k+1, k)P(k|k)\Phi(k+1, k)^T + Q_d] \\ &\quad H^T(k+1) + R_1(k+1) \\ L_2 &= R_2(k+1) \end{aligned} \quad (14)$$

측정잡음 공분산값을 결정하는 β 를 추정하기 위해 다음과 같이 N 개의 측정치 잉여값 공분산의 평균값을 사용한다.

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{\varepsilon}(k+1-N+i) \hat{\varepsilon}(k+1-N+i)^T] \quad (15)$$

식 (13)과 식 (15)를 이용하여 가격함수를 결정하면 β 를 추정할 수 있다. β 를 추정하기 위하여 가격함수로 Frobenius norm을 정의하여 사용하였으며, Frobenius norm이 최소가 되도록 하는 β 를 구한다. 가격함수는 식 (16)과 같다.

$$\min_{\beta \geq 0} \{ J(\beta) = \| M - (L_1 + \beta L_2) \|^2 \} \quad (16)$$

식 (16)에서 norm $\| \cdot \|$ 은 Frobenius norm을 의미하고, $\| A \|^2 = \text{tr}(AA^T)$ 로 정의된다. 식 (16)에서 가격함수 $J(\beta)$ 를 구해보면 식 (17)과 같다. 가격함수를 최소로 하는 β 를 구하기 위해 식 (17)을 β 에 대해 미분하면 식 (18)이 되며, 이 값이 0이 되도록 하는 β 는 식 (19)과 같다.

$$\begin{aligned} J(\beta) &= \| M - (L_1 + \beta L_2) \|^2 \\ &= \text{tr}[(M - L_1 - \beta L_2)(M - L_1 - \beta L_2)^T] \\ &= \text{tr}[(M - L_1)(M - L_1)^T - 2\beta L_2(M - L_1)^T \\ &\quad + \beta^2 L_2 L_2^T] \\ &= \text{tr}[(M - L_1)(M - L_1)^T] \\ &\quad - 2\beta \text{tr}[L_2(M - L_1)^T] + \beta^2 \text{tr}[L_2 L_2^T] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{dJ(\beta)}{d\beta} = -2\text{tr}[(M - L_1)L_2^T] + 2\beta \text{tr}[L_2 L_2^T] \quad (18)$$

$$\beta = \frac{\text{tr}[(M - L_1)L_2^T]}{\text{tr}[L_2 L_2^T]} \quad (19)$$

식 (11)과 같이 β 정의에 의해 사용되는 값은 0보다 크거나 같은 값을 사용한다. 만약 추정된 β 값이 0보다 작은 경우에는 0보다 크거나 같아야 한다는 정의를 만족시키기 위해 0으로 치환하여 사용해야 한다. 최종적으로 구해진 β 을 식 (13)에 대입함으로 측정치 잉여값을 사용하여 측정잡음 공분산값을 실시간으로 추정하여 구할 수 있게 된다. 식 (11)에서 R_1 과 R_2 는 미리 정해지는 값이고 β 가 실시간으로 결정되어 전체 측정잡음 공분산값을 결정한다. 그러므로 R_1 과 R_2 는 적응필터 설계자가 시스템에 맞게 결정해 줄

수 있으며, 특히 R_2 를 단위 대각행렬로 가정하면 L_2 도 단위 대각 행렬이 되어 식 (19)의 분모 및 분자의 L_2 가 단위 행렬이 되어 식 (20)과 같이 되어 계산이 간단하게 된다.

$$\beta = \text{tr}[M - L_1] \quad (20)$$

지금까지 구해진 β 와 식들을 이용하여 적응필터를 다시 정리하면 식 (21)~(30)과 같다.

$$\hat{x}(k+1|k) = \hat{x}(k|k) + \int_k^{k+1} f[\hat{x}(t|t_k)]dt \quad (21)$$

$$P(k+1|k) = \Phi(k+1|k)P(k|k)\Phi(k+1|k) + Q_d \quad (22)$$

$$L_1 = H(k+1)P(k+1|k)H(k+1)^T + R_1(k+1) \quad (23)$$

$$L_2 = R_2(k+1) \quad (24)$$

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{x}(k+1-N+i)\hat{x}(k+1-N+i)^T] \quad (25)$$

$$\beta = \text{tr}[M - L_1] \quad , \quad \beta < 0 \text{ 이면 } \beta = 0 \quad (26)$$

$$S(k+1|k) = L_1 + \beta L_2 \quad (27)$$

$$K(k+1) = P(k+1|k)H(k+1)^T S(k+1|k)^{-1} \quad (28)$$

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)[z(k+1) - h(\hat{x}(k+1|k))] \quad (29)$$

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)]P(k+1|k) \quad (30)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서 적용한 적응필터의 성능을 분석하기 위해 수직상태 SDINS 속도 및 자세정합 전달정렬 시뮬레이션을 하였다. 사용된 상태변수는 수평축 속

도오차, 자세오차와 장착 비정렬각 오차로 8차의 필터로 구성되었고, 보정 주기는 5Hz로 하였다. 식 (25)에서 사용되는 적응필터의 측정치 잉여값 개수는 배의 운동이 느리므로 측정잡음 분산값의 특성이 빠르게 변하지 않는다고 가정하여 25개로 5초 동안의 측정치 잉여값 평균을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 MINS는 GPS 보정과 EM_LOG 보정을 계속적으로 수행하여, 출력되는 속도 정보에는 EM_LOG의 바이어스 오차와 백색잡음이 포함되어 있고, 자세정보에는 초기 정렬 오차와 백색잡음이 포함되어 있는 것으로 가정하였다. 자세 정보의 초기정렬 오차는 랜덤상수로 모델링 하였다. 시뮬레이션에 사용된 SINS는 동조자이로를 사용하는 중급 성능의 SDINS로 성능은 표 1과 같다. 시뮬레이션에 사용된 배의 운동조건은 예상할 수 있는 가장 작은 자세운동을 가정하였으며, 롤각의 경우 주파수 대역이 0.07~0.08Hz이고 최대 크기가 0.2°이며, 피치각 운동은 주파수 대역이 0.11~0.22Hz이고 최대 크기가 0.04°로 설정하였다. 요각 운동은 없는 것으로 가정하였으며 선형운동인 종동요, 횡동요와 수직동요가 존재하는 것으로 가정하였다. 그리고, 배는 진행방향으로 5m/sec의 속도로 정속운동을 하는 것으로 가정하였다. SINS은 수직상태로 장착되어 있고, MINS와의 장착 비정렬각은 각 축으로 1°가 있는 것으로 가정하였다.

적용된 MINS와 적응필터의 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다.

[표 1] 시뮬레이션에 사용된 SINS 성능

센서 종류	오차 종류	크기	단 위
자이로	바이어스 반복도	0.2	deg/hr
	환산계수 안정도	200	ppm
	비정렬	1	arcmin
	백색잡음	10	deg/hr
가속도 센서	바이어스 반복도	200	μg
	환산계수 안정도	200	ppm
	비정렬	1	arcmin
	백색잡음	1500	μg

[표 2] 적응필터 시뮬레이션 조건

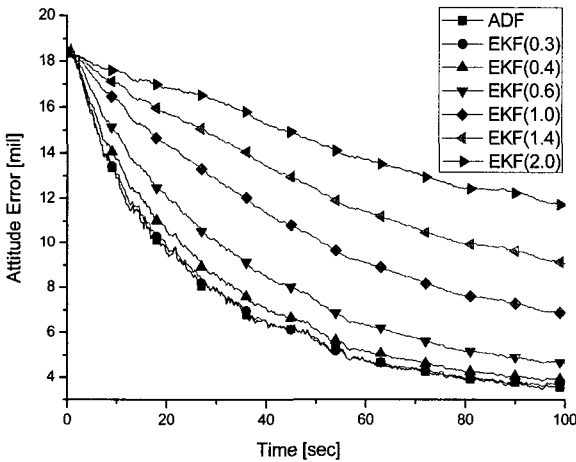
조 건	종 류	크 기	단 위
MINS 백색잡음	속도	2.57	m/sec
	롤, 피치, 요	0.2	arcmin
MINS 초기정렬오차	롤, 피치	1	arcmin
	요	3	arcmin
측정잡음 R1	속도	2.57×10^{-4}	m/sec
	롤, 피치, 요	0.2×10^{-3}	arcmin
측정잡음 R2	속도	1.0	m/sec
	롤, 피치, 요	1.0	rad

적용필터의 성능을 확인하기 위해 측정잡음 분산값을 시뮬레이션에 사용된 실제 측정잡음 분산값의 1.5, 3, 5, 7, 10배로 크게한 측정잡음 분산값을 가진 확장형 칼만필터의 성능과 비교하였다. 위에서 가정한 고정된 측정잡음 분산값의 여러 경우는 배 MINS의 성능 등급이 바뀌어 특성이 바뀌는 경우나 같은 MINS 성능 등급이지만 각각의 특성이 조금씩 틀린 경우에 충분히 가능한 가정으로 생각된다. 전달정렬의 성능은 전달정렬 100초후의 방위각 자세오차의 크기를 사용하였다. 시뮬레이션은 몬테칼로 방식을 사용하여 50회 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 표 3 및 그림 2와 같다. 결과에서 보여주는 바와 같이 확장형 칼만 필터에 측정잡음 분산값을 부정확하게 사용했을 때 정확한 값에 비해 큰 오차가 발생함을 보였고, 적응필터를 적용한 경우는 정확한 측정잡음 분산값을 몰라도 정확한 값을 사용한 경우와 유사한 전달정렬 성능을 보였다. 표 3에서 적응필터의 성능은 사용된 측정잡음 분산값이 2배 부정확한 경우 확장형 칼만필터보다 9% 향상되었고, 5배 부정확한 경우는 48% 향상되었으며, 10배 부정확한 경우에는 70% 향상되었다. 그러므로 적응필터를 사용하면 측정잡음 공분산값을 정확히 예상하지 못한 경우에도 정확한 값을 실시간으로 찾아서 전달정렬 성능을 유지시킴을 알 수 있다. 또한 주어진 일정 시간 내에서는 측정잡음 공분산값을 정확히 알 수 없는 경우보다 전달정렬 성능뿐만 아니라 수렴속도도 빨라짐을 알 수 있다.

[표 3] 적응필터와 확장형 칼만필터 전달정렬 성능 비교

측정잡음 분산값(배율)	방위각 오차 [mil]		방위각 성능 향상비 [%]
	확장형 칼만필터	적응필터	
0.3(1.5)	3.69	3.54	4
0.4(2)	3.91	3.54	9
0.6(3)	4.66	3.54	24
1.0(5)	6.85	3.54	48
1.4(7)	9.09	3.54	61
2.0(10)	11.68	3.54	70

고려한 측정잡음 분산값의 변화에 따른 확장형 칼만 필터와 적응필터의 방위각 자세 추정 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과 제한된 배의 자세운동과 전달정렬 시간 조건에서 제시된 적응필터는 확장형 칼만 필터의 측정잡음 분산값을 실제값 보다 2배 및 5배 크게 사용했을 때 보다 9%에서 48%의 방위각 자세 오차 추정 성능 향상을 보였다. 특히 적응필터의 성능은 실시간으로 정확한 측정잡음 분산값을 추정함으로써 제한된 전달정렬 수행 시간동안 방위각 자세 수렴속도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 측정잡음 결정을 위한 적은 실험 데이터로 인해 정확한 측정잡음을 모르는 경우에도 적응필터를 적용했을 때 전달정렬 성능이 크게 향상됨을 보였다.



[그림 2] 측정잡음 분산값 변화에 따른 적응 필터와 확장형 칼만필터의 방위각 자세오차 성능

5. 맺음말

적응필터를 사용한 수직상태 SDINS 속도 및 자세 정합 전달정렬 방법을 제시하였다. 수직상태 SDINS 속도 및 자세정합 전달정렬 방법을 유도하였고, 측정잡음 분산값을 정확히 알지 못하는 경우에 대하여 적응필터식을 유도하였다. 특히 배에 장착된 MINS의 종류가 바뀌어 성능과 특성이 변한 경우나, 같은 MINS 종류이나 각각의 특성이 조금씩 틀린 경우를

참고 문헌

- [1] H. V. White, "An All-Purpose Inertial Navigation Concept for Tactical Missile Systems", IEEE Conf. PLANS, Atlantic City, NJ, Dec., pp.246~253, 1982.
- [2] 송기원, 박찬주, "SDINS 전달정렬 알고리즘의 구현 및 FMS에서의 성능평가", 제어 자동화 시스템 공학회 충남대전지부 학술발표회, pp.79~84, 2000.
- [3] D. H. Titterton, J. L. Westone, "Dynamic Shipboard Alignment Technique", Symposium Gyro Technology, pp.9.0~9.27, 1989.
- [4] 박영범, 송기원, "GPS와 Gyrocompass를 이용한 SDINS 전달정렬 알고리즘 구현", 제10차 한국군사과학기술학회, 2002.
- [5] 임유철, 송기원, 유준, "전달정렬의 선체 유연성 보상을 위한 속도 및 DCM 부분 정합방식, 제어 자동화 시스템공학회 논문집, 2001.
- [6] J. M. Mendel, Lessons in Estimation Theory for Signal Processing Communications, and Control, Prentice-Hall International Inc., 1995.
- [7] R. G. Brown and Patrick Y. C. Hwang, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering 3rd edition, John Wiley &

- Sons Inc., 1997.
- [8] Peter S. Maybeck, Stochastic models, estimation, and control Volume 1, Academic Press, 1979.
- [9] 박찬주, 유명종, 김현백, “광학정렬을 이용한 수직상태 SDINS 초기정렬”, 유도무기학술대회, 국방과학연구소, 2003.
- [10] 유명종, 박찬주, 김현백, “레이다 보정형 스트랩다운 관성항법시스템을 위한 적응필터 구성”, 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, 9권, 6호, pp.420~424, 2003. 6.
- [11] 유명종, “INS/GPS를 위한 적응필터 구성”, 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, 11권, 8호, pp.717~725, 2005. 8.
- [12] Drora Goshen-meskin and I. Y. Bar-Itzhack, “A Unified Approach To Inertial Navigation System Error Modeling”, AIAA-90-3367-CP, 1990.