

전달정렬의 측정치 시간지연 오차보상 기법

Measurement Time-Delay Error Compensation for Transfer Alignment

임 유철, 송 기 원, 유 준
(You-Chol Lim, Ki-Won Song, and Joon Lyou)

Abstracts : This paper is concerned with a transfer alignment method for the SDINS under ship motions. Major error sources of transfer alignment are data transfer time-delay, lever-arm velocity and ship body flexure. Specifically, to reduce alignment errors induced by measurement time-delay effects, the error compensation method through delay state augmentation is suggested. A linearized error model for the velocity and attitude matching transfer alignment system is first derived by linearizing the nonlinear measurement equation with respect to its time delay and augmenting the delay state into the conventional linear state equations. And then it is shown via observability analysis and computer simulations that the delay state can be estimated and compensated during ship motions resulting in considerably less alignment errors.

Keywords : inertial navigation system, transfer alignment, Kalman filter

I. 서론

SDINS(StrapDown Inertial Navigation System)의 초기정렬은 항법초기에 관성센서인 자이로, 가속도계 몸치의 관성측정기(Inertial Measurement Unit: IMU)좌표계와 항법좌표계 사이의 상대적 자세각 또는 좌표변환 행렬을 결정하는 것이다. 초기 자세정렬의 정확도는 이동중인 주항체(배 또는 비행기 등)에서 방사되는 부항체의 관성유도시 부항체(유도탄 등)에 장착된 부 관성항법장치의 항법 성능을 좌우하는 중요한 요소이므로 최근에 전달정렬을 이용한 운항 중에 방사되는 부 관성항법장치의 초기정렬이 널리 연구 응용되고 있는 추세이다. 전달정렬이란 주항체의 항법을 위한 정밀한 주 관성항법장치(Master INS:MINS)의 출력 정보를 이용하여 모선에 장착된 또 다른 부 관성항법장치(Slave INS:SINS)의 자세정렬을 수행하는 방법이다. 여기서 SINS는 대부분 SDINS가 사용된다. 전달정렬에 있어서 SINS 출력정보와 정합 가능한 MINS 출력정보는 속도, 자세, 각속도, 가속도 등이 있으며, 모선의 항해 중 운동환경에 따라 적절한 정합방식을 조합하여 전달정렬을 구성한다.

롤, 피치 운동중인 배에서 초기정렬 방법으로 전달정렬이 적합하며, 일반적으로 배에서 전달정렬의 구성은 배의 항법장치인 Gyrocompass와 EM.log 정보를 동시에 이용하는 방식이 정렬성능을 극대화하는데 유리한 것으로 알려져 있다. EM.log 속도정합 전달정렬은 함정의 운동과 무관하게 수평축 정렬이 가능하고 Gyrocompass 자세정합 전달정렬은 함정의 롤, 피치운동에 의해 방위각 정렬이 가능하여 서로 보완기능을 가지기 때문이다. 또한 EM.log 속도정보와 Gyrocompass 자세정보를 연속적으로 이용하여 전달정렬을 원활히 수행하기 위해서는 적절한 반복 필터 또는 반복 추정기

를 설계해야 하는데, 전달정렬을 위한 추정기로는 칼만필터가 가정 널리 적용되고 있다. 그 이유는 칼만필터가 전달정렬과 같이 확률적 동특성을 가지는 시스템이 완전 가관측하면 우수한 공칭 안정성과 최적 추정성능을 보장하기 때문이다[1].

전달정렬의 주 오차요소로는 데이터 전송지연, 선체 유연성, 지렛대 속도를 꼽을 수 있는데 이들은 확률적 동특성을 모델링하기가 어렵기 때문에 결국 모델오차로 작용하여 칼만필터의 추정성능을 저하시키게 된다. 본 연구는 이 중에서 측정치 시간지연에 의한 전달정렬오차를 보상하기 위해, 우선 측정치 시간지연 항이 인가되는 비선형 오차방정식으로부터 시간지연에 의한 측정치 오차의 선형 모델을 유도하여 지연 상태변수를 기존의 선형 오차방정식에 추가하여 병합된 모델을 구한다. 지연상태 병합 모델에 대한 가관측성 분석을 통하여 지연 상태변수가 선체의 각운동하에서 추정 가능함을 보이고 시간지연 추정으로 정렬오차를 보상하는 기법을 제시한다. 아울러 시물레이션을 통해 제시한 기법의 타당성 검증하고 성능 분석을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 전달정렬 시스템의 구조를 설명하고 3장에서는 측정값의 시간지연 보상을 위한 지연 상태변수를 병합된 모델을 유도하며 4장에서는 병합된 모델의 가관측성을 분석하였다. 그리고 5장에서 본테칼로 시물레이션을 통하여 기존의 모델과의 추정 성능을 비교 분석하고 6장에서 결론을 맺는다.

II. 속도 및 자세정합 전달정렬 시스템

1. 속도 및 DCM 자세정합 전달정렬

그림 1은 EM.log 속도정합과 Gyrocompass 자세정합을 혼합한 전달정렬의 구성을 나타내며 각각의 구성요소에 대해 살펴보면 EM.log에서 측정된 속도 v_{em} 은 배의 자세인 \hat{C}_m^n 을 이용하여 항법좌표계로 변환되어 항법좌표계로 변환된 속도와 SDINS의 속도출력 \hat{v}^n 과 차이를 주기적으로 칼만필터

접수일자 : 2000. 12. 30., 수정완료 : 2001. 6. 18.

임유철, 유 준 : 충남대학교 전자공학과(s_hangel@cnu.ac.kr/jlyou@cnu.ac.kr)

송기원 : 국방과학연구소(sk1w2@hananet.net)

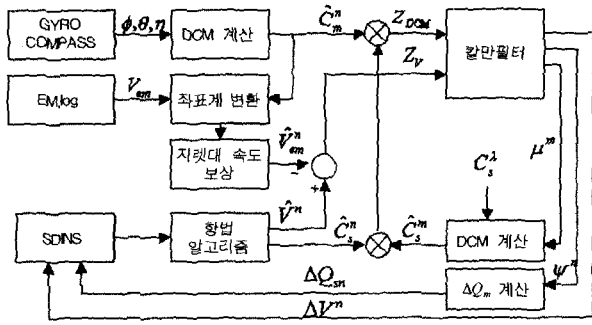


그림 1. 속도 및 자세정합에 의한 전달정렬 구성.
Fig. 1. Transfer alignment system based on EM.log velocity and gyrocompass attitude matching.

에 입력하며, Gyrocompass에서 출력된 오일러각은 DCM인 \hat{C}_m^n 으로 변환하고 발사대 자세각 \hat{C}_s^n 과 칼만필터에 의해 추정되는 장착 비정렬(SDINS 장착시 발생하는 Gyrocompass에 대한 SDINS 상대 자세값의 오차 성분) \hat{C}_s^m 그리고 SDINS의 DCM인 \hat{C}_s^n 을 곱하여 칼만필터에 입력한다. 지렛대 속도 보상은 EM.log에서 측정된 속도와 SDINS에서 추정된 가속도에 의해 계산된 속도와의 지렛대 속도만큼의 차이가 발생하므로 이 차이를 없애기 위한 것이다[1].

2. 전달정렬 칼만필터 모델

전달정렬을 위한 시스템의 모델은 SDINS 오차 방정식과 EM.log 속도와 Gyrocompass 자세 측정방정식으로 구성되며 SDINS 오차 모델은 비교적 널리 알려져 있으므로 자세한 소개는 생략한다[2]-[4].

전달정렬 칼만필터에 포함할 수 있는 상태변수는 SDINS 속도 및 자세오차 이외에 센서오차인 자이로, 가속도계 오차요소와 측정모델에 포함된 유색잡음 등이 있다. 여기서 자이로, 가속도계 오차요소 중 주된 오차인 바이어스를 칼만필터의 상태변수로 추가하여 추정 보상할 수 있으나 추정 속도가 느려 100초 이내의 전달정렬 소요시간 내에서는 추정효과가 거의 없는 것으로 분석되어 칼만필터의 상태변수에서 제외시켰다[2]. 자세정합 전달정렬의 측정모델에는 주요오차 요소인 장착비정렬이 포함되는데 장착비정렬 오차는 칼만필터의 상태변수로 반드시 선정되어야 한다. 그리고 자이로, 가속도계 오차, 속도정합 전달정렬에는 EM.log의 속도 측정오차 그리고 자세정합 전달정렬에는 Gyrocompass 자세 측정오차 등을 모델링하여 칼만필터의 상태변수로 추가시킬 수 있다. 그러나 이러한 센서오차 모델의 특성은 명확하게 알려져 있지 않으므로 칼만필터에 포함시키더라도 모델링 오차가 발생하여 우수한 추정성능을 기대하기 어렵다. 이러한 측면을 고려하여 최소한의 상태변수를 선정하게 되는데 우선 SDINS 속도오차($\Delta v_N, \Delta v_E$)와 자세오차(ψ_N, ψ_E, ψ_D)만을 칼만필터 상태변수로 선정하고, 자세정합 전달정렬의 경우 선체를 강체로 가정하여 장착비정렬(μ_X, μ_Y, μ_Z)을 랜덤상수로 칼만필터 상태변수에 추가하였다. 따라서 EM.log 속도정합과 Gyrocompass 자세정합을 혼합한 전달정렬 칼만필터 모델의 상태변수는 (1)과 같은 상태방정식과 측정방정식은 각각 (2)-(4)와 (5),(6)과 같다[2].

$$X = [\Delta v_N \Delta v_E \psi_N \psi_E \psi_D \mu_X \mu_Y \mu_Z]^T \quad (1)$$

$$\Delta \dot{v} = -(\hat{\Omega}_{ie}^n + \hat{\Omega}_{in}^n) \Delta v + \hat{f}^n \times \psi + w_f \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = -\hat{\Omega}_{in}^n \psi + w_\psi \quad (3)$$

$$\dot{\mu} = 0 \quad (4)$$

$$Z_{v(k)} = \Delta v^n(k) + w_v(k) \quad (5)$$

$$Z_{dcm(k)} = \psi(k) - C_m^n(k) \mu(k) - w_\epsilon(k) \quad (6)$$

여기서 w_f 는 가속도계 오차요소를, w_ψ 는 자이로 오차요소를, w_ϵ 는 속도측정 오차요소를, w_ϵ 는 자세측정 오차요소를 나타내며 모두다 백색잡음으로 간주한다.

III. 시간지연 상태방합

그림 1에서 Gyrocompass 자세정보 (ϕ, θ, η)와 EM.log의 속도정보인 V_{em} 은 통신지연으로 인하여 Gyrocompass와 EM.log에서 계산된 데이터와 SDINS에서 계산된 데이터 사이에 시간 비정합을 유발시킨다. 정속으로 순항중인 배에서는 짧은 시간동안 속도변화가 작기 때문에 EM.log의 시간지연으로 인한 측정오차는 무시할 수 있다. 하지만 시간지연으로 인한 Gyrocompass의 자세측정 오차는 크기가 선체의 움직임에 크게 의존하여 발생하므로 측정잡음을 백색잡음으로 가정하는 칼만필터를 수행하였을 경우 오차추정에 어려움을 갖게 되며 이는 방위각 정렬오차로 작용한다.

SDINS에서 Gyrocompass의 자세정보를 획득한 시간을 k 라 하고, Δt 의 전송지연이 있다고 하면 Δt 만큼 지연된 측정치를 사용하여 계산된 DCM행렬 $\hat{C}_m^n(k - \Delta t)$ 는 원소별로 다음과 같이 주어지고

$$\hat{C}_m^n(k - \Delta t) = \hat{C}_m^n(\tilde{\phi}, \tilde{\theta}, \tilde{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\theta} \cos \tilde{\eta} & \sin \tilde{\theta} \sin \tilde{\eta} \cos \tilde{\phi} & \cos \tilde{\theta} \sin \tilde{\eta} \cos \tilde{\phi} \\ -\cos \tilde{\theta} \sin \tilde{\eta} & \sin \tilde{\theta} \cos \tilde{\eta} \cos \tilde{\phi} & \sin \tilde{\theta} \sin \tilde{\eta} \cos \tilde{\phi} \\ \cos \tilde{\theta} \sin \tilde{\eta} & \sin \tilde{\theta} \sin \tilde{\eta} \sin \tilde{\phi} & \cos \tilde{\theta} \cos \tilde{\eta} \sin \tilde{\phi} \\ + \cos \tilde{\theta} \cos \tilde{\eta} & -\sin \tilde{\theta} \cos \tilde{\eta} \sin \tilde{\phi} & \\ -\sin \tilde{\theta} & \sin \tilde{\theta} \cos \tilde{\theta} & \cos \tilde{\theta} \cos \tilde{\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $\tilde{\phi} = \phi - \Delta\phi$, $\tilde{\theta} = \theta - \Delta\theta$, $\tilde{\eta} = \eta - \Delta\eta$ 는 k 시각을 기준으로 Δt 이전의 오일러각을 나타낸다. (7)에서 Δt 동안에 발생된 오일러각 변화량($\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta$)에 관하여 모든 원소들을 선형화하기 위해 다음의 관계식을 이용하면

$$\sin(\phi - \Delta\phi) \approx \sin \phi - \Delta\phi \cos \phi$$

$$\cos(\phi - \Delta\phi) \approx \cos \phi + \Delta\phi \sin \phi$$

$\theta - \Delta\theta$ 와 $\eta - \Delta\eta$ 의 경우에도 마찬가지이며, 이를 (7)에 대입하면 $\hat{C}_m^n(\tilde{\phi}, \tilde{\theta}, \tilde{\eta})$ 는 k 시각의 오일러각 (ϕ, θ, η)와 ($\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta$)에 관한 두 성분의 합으로 표현된다.

$$\hat{C}_m^n(\tilde{\phi}, \tilde{\theta}, \tilde{\eta}) = \hat{C}_m^n(\phi, \theta, \eta) + \Delta C_m^n(\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta) \quad (8)$$

여기서

$$\widehat{\Delta C}_m^n(\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta) = \begin{bmatrix} \Delta\theta \sin \theta \cos \eta & -\Delta\phi \cos \phi \sin \theta \cos \eta & \Delta\phi \sin \phi \sin \theta \cos \eta \\ +\Delta\psi \cos \theta \sin \eta & -\Delta\theta \sin \phi \cos \theta \cos \eta & -\Delta\theta \cos \phi \cos \theta \cos \eta \\ & +\Delta\eta \sin \phi \sin \theta \sin \eta & +\Delta\eta \cos \phi \sin \theta \sin \eta \\ & -\Delta\phi \sin \phi \sin \eta & -\Delta\phi \cos \phi \sin \eta \\ & +\Delta\eta \cos \phi \cos \eta & -\Delta\eta \sin \phi \cos \eta \\ \\ \Delta\theta \sin \theta \sin \eta & -\Delta\phi \cos \phi \sin \theta \sin \eta & \Delta\phi \sin \phi \sin \theta \sin \eta \\ -\Delta\eta \cos \theta \cos \eta & -\Delta\theta \sin \phi \cos \theta \sin \eta & -\Delta\theta \cos \phi \cos \theta \sin \eta \\ -\Delta\eta \sin \phi \sin \theta \cos \eta & -\Delta\eta \cos \phi \sin \theta \cos \eta & -\Delta\eta \sin \phi \sin \theta \cos \eta \\ +\Delta\phi \sin \phi \cos \eta & +\Delta\phi \cos \phi \cos \eta & \\ +\Delta\eta \cos \phi \sin \eta & -\Delta\eta \sin \phi \sin \eta & \\ \\ \Delta\theta \cos \theta & -\Delta\phi \cos \phi \cos \theta & \Delta\phi \sin \phi \cos \theta \\ +\Delta\theta \sin \phi \sin \theta & +\Delta\theta \cos \phi \sin \theta & \end{bmatrix} \quad (9)$$

다시 $\Delta\phi \approx \dot{\phi}\Delta t$, $\Delta\theta \approx \dot{\theta}\Delta t$, $\Delta\eta \approx \dot{\eta}\Delta t$ 의 근사식을 (9)에 대입 정리하고, (8)을 시간함수 형태로 환원하여 나타내면

$$\widehat{C}_m^n(k-\Delta t) = \widehat{C}_m^n(k) + \Delta \widehat{C}_m^n(k)\Delta t. \quad (10)$$

여기서, $\Delta \widehat{C}_m^n(k)$ 는 (9)의 $\widehat{\Delta C}_m^n(\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta)$ 에서 $(\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta)$ 대신 $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\eta})$ 을 대입한 행렬이다.

이제 (10)을 이용하여 시간지연이 포함된 비선형 측정방정식은 Δt 에 관하여 다음과 같이 선형화 될 수 있다.

$$\widehat{Z}_{DCM}(k) = \widehat{C}_m^n(k-\Delta t)\widehat{C}_s^m(k)\widehat{C}_n^s(k) = \widehat{Z}_{DCM}(k) + D(k)\Delta t \quad (11)$$

(11)을 벡터형태로 변환하면

$$\widehat{Z}_{dcm}(k) = \widehat{Z}_{dcm}(k) + d(k)\Delta t \quad (12)$$

여기서

$$D(k) = \Delta \widehat{C}_m^n(k)\widehat{C}_s^m(k)\widehat{C}_n^s(k) \quad (13)$$

$$d = [-D_{(2,3)} \ D_{(1,3)} - D_{(1,2)}]^T. \quad (14)$$

(13), 즉 (10)의 $\Delta \widehat{C}_m^n$ 을 계산하는데 있어 필요한 $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\eta}$ 은 짧은 시간동안 오일러각 변화량을 의미하므로 1초마다 취득되는 Gyrocompass의 출력정보 ϕ, θ, η 를 차분하여 얻는 것은 정밀도 측면에서 적절하지 못하다. 따라서 200Hz(5ms)주기 로 갱신되는 SDINS 항법계산으로부터 \widehat{C}_s^m 을 가져와 \widehat{C}_m^n 와 곱하여 \widehat{C}_n^s 을 구하고, 즉 $\widehat{C}_m^n = \widehat{C}_s^m \widehat{C}_n^s$, \widehat{C}_m^n 의 오일러각을 5ms마다 차분하여 쓰면 충분히 정확한 $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\eta}$ 을 얻을 수 있다. 이때 \widehat{C}_n^s 는 SDINS와 Gyrocompass의 장착 비정렬을 표현하는 DCM으로 칼만필터에 의해 추정가능하며 거의 변하지 않는다는 가정을 내포하고 있다.

충분히 서서히 변하고 변화량이 작은 시간지연 Δt 를 다음과 같이 랜덤상수로 가정하여 상태변수로 추가 도입한다.

$$\Delta t = 0 \quad (15)$$

IV. 가관측성 분석

전송지연에 의한 정렬오차를 보상하기 위해 병합된 모델의 시간지연 상태변수 Δt 가 추정 가능해야 한다. 따라서 지연 상태가 병합된 칼만필터 모델의 가관측성 분석이 필요하다.

$$X = [\Delta v_N \ \Delta v_E \ \psi_N \ \psi_E \ \phi_D \ \mu_X \ \mu_Y \ \mu_Z \ \Delta t]^T \quad (16)$$

$$A = \begin{bmatrix} -(\widehat{\Omega}_{ie}^n + \widehat{\Omega}_{in}^n) & \widehat{F}^n & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{3 \times 2} & -\widehat{\Omega}_{in}^n & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$H = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{3 \times 2} & I_{3 \times 3} & -C_m^n & d \end{bmatrix} \quad (18)$$

운항중에 (16)-(18)은 시변 시스템이므로 시변 시스템을 임의의 시구간 내에서 시불변 시스템의 연속된 것으로 가정하여 가관측성을 판별하는 기법[5]을 이용한다. 편의상 선체의 운동을 4가지 모드, 즉 정지모드, 롤각 변화모드, 피치각 변화모드, 요각 변화모드로 구분하여 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

$$O = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{3 \times 2} & I_{3 \times 3} & -C_m^n & d \\ -(\widehat{\Omega}_{ie}^n + \widehat{\Omega}_{in}^n) & \widehat{F}^n & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{3 \times 2} & -\widehat{\Omega}_{in}^n & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (19)$$

- 정지모드 : 정지모드에서 (19)의 C_m^n 와 d 는 상수행렬 ($C_m^n = I_{3 \times 3}, d = 0_{3 \times 1}$)이 되며, $\widehat{\Omega}_{in}^n = \widehat{\Omega}_{ie}^n \approx 0_{3 \times 3}$. 따라서 가관측성 행렬 O 의 rank는 7이 되며 가관측 가능한 상태변수는 $\Delta v_N, \Delta v_E, \psi_N, \psi_E, \mu_X, \mu_Y$ 이다.

- 롤각 변화모드 : 롤각 운동으로 인해 (19)의 C_m^n 은 더 이상 상수행렬이 아니고 d 도 더 이상 0이 아니므로 정지모드에 비해 가관측성을 증대시킬 수 있다. 즉 롤각의 자세 변화가 있을 경우 C_m^n 과 d 는 다음과 같이 주어지며

$$C_m^n = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & -\cos \phi \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} -D_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

가관측성 행렬 O 의 rank는 9가 되어 모든 상태변수가 추정 가능하며, 특히 시간지연 상태변수는 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\Delta t \approx \frac{\psi_N - \mu_X}{D_{23}} \quad (20)$$

- 피치각 변화모드 : 피치각 변화로 (19)의 C_m^n 과 d 는 다음과 같이 주어지며

$$C_m^n = \begin{bmatrix} -\cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & -\cos \theta \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} 0 \\ D_{13} \\ -D_{12} \end{bmatrix}$$

가관측성 행렬 O 의 rank는 9가 되어 시간지연 상태변수는 다음과 같이 추정된다.

$$\Delta t \approx \frac{\psi_E - \mu_Y}{D_{13}} \quad (21)$$

• 요각 변화모드 : 요각 변화로 (19)의 C_m^n 과 d 는 다음과 같이 주어지며

$$C_m^n = \begin{bmatrix} -\cos \eta & \sin \eta & 0 \\ -\sin \eta & -\cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 \\ D_{13} \\ -D_{12} \end{bmatrix}$$

$\Omega_{ie}^n \approx 0_{3 \times 3}$ 라 하면 롤각, 피치각 변화모드와 달리 가관측성 행렬 O 의 rank는 8이 되어 ψ_D 와 μ_Z 는 추정이 불가능하다. 하지만 시간지연 상태변수는 다음과 같이 추정된다.

$$\Delta t \approx \frac{\psi_D - \mu_Z}{D_{12}} \quad (22)$$

V. 시뮬레이션을 통한 성능분석

자연적인 물, 피치운동이 존재하는 순항중인 배에서 EM.log의 속도정보와 Gyrocompass의 자세정보를 이용한 SDINS의 초기 전달정렬 알고리즘에서 Gyrocompass의 자세정보의 전송지연이 있는 경우의 본 논문에서 제시하는 병합형 칼만 필터를 구성하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였으며, 성능분석을 위해 동일한 조건에서 기존의 칼만필터 모델도 수행하였다.

시뮬레이션에 사용된 배의 운동조건으로는 롤각의 경우 주파수 대역이 0.07~0.18Hz로 최대 크기가 2.1도이고 피치각의 경우 주파수 대역이 0.11~0.22Hz에 최대 1.5도로 설정하였으며 선형운동인 종동요, 횡동요, 수직동요도 고려하였다. Gyrocompass 자세정보의 전송지연은 선체의 구조적인 특성 및 통신주기를 근거로 하여 최대 30ms이며 순간적으로 5ms의 변화가 생길 수 있는 것으로 가정하였으며 본 시뮬레이션에서는 시간지연의 최대값인 30ms로 선정하였다. Gyrocompass, EM.log 및 SDINS의 성능규격은 참고문헌[1]을 바탕으로 표 1, 2와 같이 설정하였으며 전체적인 시뮬레이션 구성은 그림 2와 같다. 단, 본 논문은 Gyrocompass 자세정보의 전송지연으로 인한 정렬오차를 보상에 초점을 맞춘 것으로 Gyrocompass의 다른 오차 요소(김블 비직교성, 안정대 경사각 등)는 배제하였다.

우선 30ms의 측정값의 전송지연에 의한 기존의 속도 및

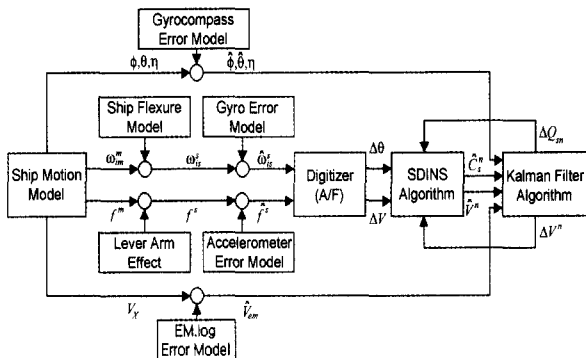


그림 2. 시뮬레이션 구성도.
Fig. 2. Computer simulation diagram.

DCM 자세정합의 칼만필터 모델에 관한 시뮬레이션 결과를 살펴보면 그림 3(표 3)과 같은데, 시간지연에 의한 측정오차가 주로 방위각 정렬오차에 영향이 나타나며, 이것은 배의 롤각과 피치각에 의존하여 방위각 정렬이 결정되는 가관측성 특성 및 시간지연에 둔감한 속도정합에 의하여 수평축 정렬이 이루어진 것으로 분석된다.

그림 4(표 4)는 시간지연을 고려한 병합형 칼만필터의 속도 및 DCM정합의 시뮬레이션 결과이다.

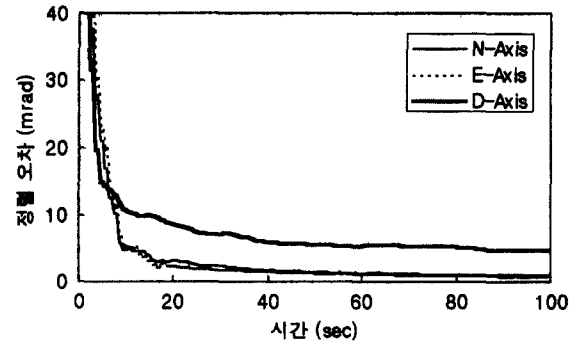


그림 3. 기존 칼만필터에 의한 정렬오차 추이.
Fig. 3. Trends of the align error by conventional Kalman filter.

표 1. 기존 칼만필터에 의한 정렬오차(mrad).

Table 1. Alignment error by conventional Kalman filter(mrad).

sec	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	4.66	3.10	2.43	1.64	1.37	1.26	1.09	0.99	1.01	0.89
E	5.52	2.30	1.78	1.51	1.28	1.25	1.03	0.94	0.87	0.83
D	10.74	8.61	7.10	5.90	5.52	5.35	5.30	5.22	4.71	4.63

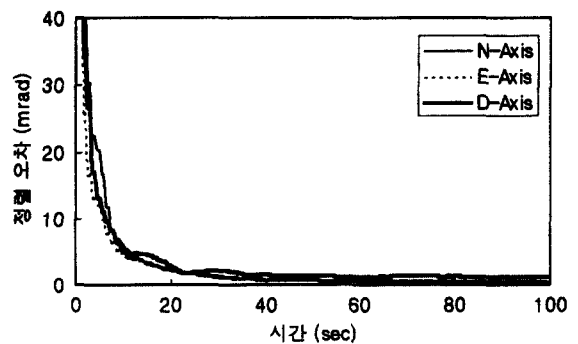


그림 4. 병합형 칼만필터에 의한 정렬오차.
Fig. 4. Trends of the align error by augmented Kalman filter.

표 2. 병합형 칼만필터에 의한 정렬오차(mrad).

Table 2. Alignment error by augmented Kalman filter(mrad).

sec	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	5.47	2.38	1.36	0.86	0.70	0.61	0.54	0.46	0.43	0.42
E	4.83	2.27	1.26	0.82	0.69	0.70	0.64	0.58	0.56	0.54
D	5.98	3.01	2.16	1.53	1.36	1.22	1.34	1.27	1.19	1.08

그림 3, 4(표 1, 2)를 비교하면 알 수 있듯이 시간지연에 의해 발생한 5mrad의 방위각 정렬오차는 병합형 칼만필터를 통해 방위각 정렬오차를 1mrad 내외로 줄일 수 있으며 이는 병합형 칼만필터의 지연 상태변수를 추정함으로써 다른 상태변수들로부터 시간지연의 영향을 배제시킨 것으로 판단된다.

VI. 결론

본 논문은 속도 및 DCM 정합을 이용한 초기 전달정렬시 측정치 시간지연으로 유발되는 정렬오차를 보상하기 위해 시간지연오차의 선형모델을 유도하여 시간지연을 SDINS 오차모델에 상태변수로 병합시킴으로써 시간지연의 영향을 보상하는 기법을 제시하였으며 시뮬레이션을 통하여 측정치 시간지연에 의한 방위각정렬 오차를 60초 이내에 1mrad(rms 값) 내외로 줄일 수 있었다. 또한 시간지연을 상태변수로 병합한 칼만필터 모델의 가관측성을 분석하여 선체의 각운동이 존재하면 시간지연 상태변수는 추정 가능함을 보였다.

추후 과제로 전달정렬의 주요 오차요소로 시간비정합 이외에 선체의 유연성 오차가 존재하며 배제할 수 없는 요소이다. 따라서 시간비정합과 선체의 유연성 오차를 모두 고려한 전달정렬의 보상기법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

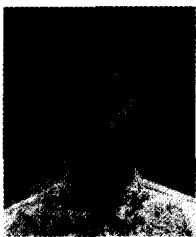
[1] 유준, 임유철, 송태승, 길현섭, "전달정렬의 시간지연과 유연성 오차요소 영향분석 및 보상기법 연구," 국방과학연구소 보고서, 2000. 6.
 [2] 송기원, 전창배, "SDINS의 전달정렬 알고리즘 설계 및

성능분석," 국방과학연구소 보고서 MSDC -416-980574, 1998. 6.

[3] 송기원, 전창배, 김현백, "유도탄 전달정렬의 구성기법 및 가관측성 분석," 국방과학연구소 보고서 MSDC -417-961123, 1996. 10.
 [4] G. M. Siouris, *Aerospace Avionic Systems, A Modern Synthesis*, Academic Press, 1993.
 [5] D. Goshen-Meskin and I. Y. Bar-Itzhack., "Observability analysis of piece-wise constant system-part II : applications," IEEE Trans. on AES., vol 28, no 4, pp. 1056-1067, Oct., 1992.

기호설명

- i : 관성좌표계
- e : 지구좌표계
- n : 항법좌표계 (N, E, D)
- s : SDINS의 IMU 좌표계
- m : 주항체의 Gyrocompass 동체좌표계 (X, Y, Z)
- λ : 발사대 좌표계
- C_A^B : A좌표계로부터 B좌표계로의 좌표변환 행렬
- v_B^A : A좌표계에서 측정된 B좌표계 지점의 속도
- ω_{ij}^k : j 좌표계의 i 좌표계에 대한 각속도를 k 좌표계에서 측정한 값
- f^k : 가속도를 k 좌표계에서 측정한 값
- Ω : ω 의 왜대칭 행렬
- F : f 의 왜대칭 행렬
- $(\hat{\cdot})$: 계산된 값을 표현하는 기호
- μ^m : SDINS와 Gyrocompass의 장착비정렬의 오차



임 유 철

1975년 10월 2일생. 1998년 충남대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(2000). 2000년~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 모델링 및 필터설계 등임.



송 기 원

1962년 1월 3일생. 1984년 성균관대 전자공학과 졸업. 충남대학교 전자공학과 석사(1992). 동대학원 박사과정(1998~현재). 1984년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 강인제어/필터, 추정이론 및 관성항법장치.



유 준

1956년 3월 22일생. 1978년 서울대 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 전기 및 전자공학 박사(1984). 1984년~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 산업 공정에의 제어응용, 센서 신호처리, 식별 및 추정기법 등임.