측정치 시간지연과 선체의 유연성을 고려한 전달정렬 기법

A Transfer Alignment Considering Measurement Time-Delay and Ship Body Flexure

임 유 철* 유 준**
Lim, You-Chol Lyou, Joon

ABSTRACT

This paper deals with the transfer alignment problem of SDINS(StrapDown Inertial Navigation System) subjected to roll and pitch motions of the ship. Specifically, to reduce alignment errors induced by measurement time-delay and ship body flexure, an error compensation method is suggested based on delay state augmentation and DCM(Direction Cosine Matrix) partial matching. 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 DCM partial matching is properly combined to reduce effects of a ship's Y axis flexure. The simulation results show that the suggested method is effective enough resulting in considerably less azimuth alignment errors.

주요기술용어 : Inertial Navigation System(관성항법장치), Transfer Alignment(전달정렬), Kalman Filter(칼만 필터), Delay State Augmentation(지연상태병합), DCM Partial Matching(방향코사인 행렬 부분 정합)

1. 서 론

전달정렬(transfer alignment)은 모선인 배 또는 비행기 등의 항법을 위한 정밀한 주 관성항법장치(Master Inertial Navigation System: MINS)의 출력정보를 이용하여 모선에 장착된 또 다른 부 관성항법장치(Slave Inertial Navigation System:SINS)의 자세정렬을 수행하는 방법이다. 여기서 SINS는 대부분 스트랩다운 관성항법장치(SDINS)가 사용된다. 초기 자세정렬의 정확도는 이동중인 주항체(배 또는 비행기 등)에서 발사되는 부항체의 관성유도시 부항체(유도탄 등)에 장착된 부 관성항법장치의 항법 성능을 좌우하는 중요한 요소이므로 최근에 전달정렬을 이용

* 충남대학교 전자공학과 대학원 박사과정
** 충남대학교 전자공학과 교수

한 부 관성항법장치의 운항 중 초기정렬이 널리 연구 응용되고 있는 추세이다[1].

본 논문은 항해중 파도 등에 의해 자연적으로 롤, 피치운동을 하는 배를 모선으로 하고 SINS가 SDINS인 경우의 초기자세 정렬을 위한 전달정렬 방법을 다룬다. 일반적으로 롤, 피치 운동중인 배에서 초기정렬 방법으로 전달정렬이 적합하며, 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 Gyrocompass자세정합 전달정렬은 함정의 롤, 피치운동에 의해 방위각 정렬이 가능하여 서로 보완 기능을 가지기 때문이다[2]. 또한 EM.log 속도정보와 Gyrocompass 자세정보를 연속적으로 이용하여 전달정렬을 원활히 수행하기 위해서는 적절한 반복 필터 또는 반복 추정기를 설계해야 하는데, 전달정렬을 위한 추정기로는 칼만필터가 가장 널리 적용되고 있다. 그 이유는 칼만필터가 전달정렬과 같이 확률적 동특성을 가지는 시스템이 완전 가관측하면 우수한 공칭 안정성과 최적 추정성능을 보장하기 때문이다.

전달정렬에 의한 정렬성능은 다양한 오차요인에 의해 좌우되는데 전달정렬에 다루어야 할 오차요소로는 SDINS의 자이로, 가속도계와 배의 EM.log속도정보와 Gyrocompass자세정보 등의 센서오차는 물론이고 전달정렬을 실현하는 과정에서 데이터 전송지연, 선체 구조의 유연성, 지렛대 속도 등이 있으며 이는 모두 측정오차를 유발하게 된다.

본 연구는 이러한 오차요소들 가운데 특히 데이터 전송지연과 선체의 유연성 오차요소의 영향을 모두 보상하는 전달정렬 기법에 대한 연구이다. 측정치 시간지연의 영향을 보상하기 위해 비선형 측정방정식을 지연시간에 관하여 선형화하고[3] 지연 상태변수를 도입하여 상태병합형 칼만필터를 유도한다. 그리고 유연성의 영향을 배제하기 위해 배와 같은 구조물의 유연성 특징(즉, X, Z축은 무시할 수 있는 반면에 Y축에서 크게 발생)을 감안하여 피치각 정렬쪽의 자세정합을 상태변수에서 제외시키는 DCM부분정합 방식[4]을 접목시킨다. 또한 제안된 보상기법의 성능 평가를 위해 실제 시스템에 가깝게 시뮬레이션 환경을 구성하고 모의 실험을 수행하여 기존의 전달정렬 기법에 비해 우수한 성능을 가진다는 것을 확인한다.

2. 전달정렬 칼만필터 모델

배의 EM.log 속도정보와 Gyrocompass 자세정보를 이용한 SDINS의 전달정렬 시스템은 크게 SDINS의 항법 알고리즘과 정합오차 추정을 위한 칼만필터로 나뉘어 진다. SDINS 항법 알고리즘은 자이로와 가속도계의 출력값으로 항체의 자세 및 속도, 위치 등의 항법정보를 계산하며, 칼만필터는 항법 알고리즘에서 계산된 SDINS의 속도, 자세정보와 EM.log와 Gyrocompass로부터 측정된 속도, 자세정보를 가지고 SDINS 오차모델을 이용하여 SDINS의 속도 및 자세를 보정하는 오차 추정기로 작용한다.

칼만필터에 사용될 전달정렬의 시스템 모델은 SDINS 오차 방정식과 EM.log 속도와 Gyrocompass 자세 측정방정식으로 구성되며 SDINS 오차방정식과 측정식으로부터 칼만필터에 포함할 수 있는 상태변수로는 SDINS 속도 및 자세오차 이외에 센서오차인 자이로, 가속도계 오차요소와 측정모델에 포함된 유색잡음 등이 있다. 여기서 자이로, 가속도계 오차요소 중 주된 오차인 바이어스를 칼만필터의 상태변수

로 추가하여 추정 보상할 수 있으나 추정속도가 느려 100초 이내의 전달정렬 소요시간 내에서는 추정 효과가 거의 없는 것으로 분석되어 칼만필터의 상태변수에서 제외시켰다. 자세정합 전달정렬의 측정모델에는 주요오차 요소인 장착비정렬이 포함되는데 장착비정렬 오차는 칼만필터의 상태변수로 반드시 선정되어야 한다. 그리고 EM.log의 속도 측정오차와 Gyrocompass의 자세 측정오차를 모델링하여 칼만필터의 상태변수로 추가시킬 수 있다. 그러나 이러한 센서오차 모델의 특성은 명확하게 알려져 있지 않으므로 칼만필터에 포함시키더라도 모델링 오차가 발생하여 현실적으로 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, 자세정합의 전달정렬의 경우 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 같고 상태방정식과 측정방정식은 각각 (2)-(4)와 (5), (6)과 같다.

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

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

$$\dot{\psi} = -\widehat{\Omega^n_{in}}\psi + w_\psi \quad (3)$$

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

$$Z_v(k) = \Delta v(k) + w_v(k) \quad (5)$$

$$Z_{dcm}(k) = \psi(k) - C^n_m(k)\,\mu(k) - w_\varepsilon(k) \quad (6)$$

여기서 w_f는 가속도계 오차요소를, w_ψ는 자이로 오차요소를, w_v는 속도측정 오차요소를, w_ε는 자세 측정오차 요소를 나타내며 모두다 백색잡음으로 간주한다.

3. 시간지연 상태병합을 통한 측정치 시간지연 보상

Gyrocompass 자세정보 ϕ, θ, η와 EM.log 속도정보 v_{em}은 통신지연으로 인하여 Gyrocompass와 EM.log에서 측정된 데이터와 SDINS에서 계산된 데이터 사이에 시간 비정합을 유발시킨다. 정속으로 순항중인 배에서는 짧은 시간동안 속도변화가 작기 때문에 시간지연으로 인한 EM.log의 속도 측정오차는 무시할 수 있다. 하지만 Gyrocompass의 자세 측정오차는 크기가 선체의 움직임에 의존하여 발생하므로 측정잡음을 백색잡음으로 가정하는 칼만필터를 수행할 경우 오차추정에 어려움을 갖게 되며 이는 방위각 정렬오차로 작용한다.

SDINS에서 Gyrocompass의 자세정보를 획득한 시간을 k라 하고 Δt의 전송지연이 있다고 하면 Δt만큼 지연된 측정치를 사용하여 계산된 DCM 행렬 $\widehat{C^n_m}(k-\Delta t)$는 원소별로 다음과 같이 주어지고

$$\widehat{C^n_m}(k-\Delta t) = \widehat{C^n_m}(\tilde{\phi}, \tilde{\theta}, \tilde{\eta}) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\tilde{\theta}\cos\tilde{\eta} & \sin\tilde{\phi}\sin\tilde{\theta}\cos\tilde{\eta} - \cos\tilde{\phi}\sin\tilde{\eta} & \cos\tilde{\phi}\sin\tilde{\theta}\cos\tilde{\eta} + \sin\tilde{\phi}\sin\tilde{\eta} \\ \cos\tilde{\theta}\sin\tilde{\eta} & \sin\tilde{\phi}\sin\tilde{\theta}\sin\tilde{\eta} + \cos\tilde{\phi}\cos\tilde{\eta} & \cos\tilde{\phi}\sin\tilde{\theta}\sin\tilde{\eta} - \sin\tilde{\phi}\cos\tilde{\eta} \\ -\sin\tilde{\theta} & \sin\tilde{\phi}\cos\tilde{\theta} & \cos\tilde{\phi}\cos\tilde{\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

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 경우에 대해서도 마찬가지이며, 이를 (7)에 대입하면 $\hat{C}_m^n(\tilde{\phi}, \tilde{\theta}, \tilde{\eta})$는 오일러각 ϕ, θ, η와 $\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta$에 관한 두 성분의 합으로 표현된다.

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

여기서 $\Delta C_m^n(\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta)$은 $\hat{C}_m^n(\tilde{\phi}, \tilde{\theta}, \tilde{\eta})$에서 $\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta$을 포함하는 모든 원소들로 구성된 행렬이며, 다시 $\Delta\phi\approx\dot{\phi}\Delta t, \Delta\theta=\dot{\theta}\Delta t, \Delta\eta\approx\dot{\eta}\Delta t$의 근사식을 (8)우변의 두 번째 항에 대입정리하고, 시간함수 형태로 환원하여 나타내면

$$\hat{C}_m^n(k-\Delta t) = \hat{C}_m^n(k) + \Delta C_m^n(k)\Delta t \tag{9}$$

여기서 $\Delta\hat{C}_m^n(k)$는 (8)의 $\Delta\hat{C}_m^n(\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta)$에서 $(\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\eta)$대신 (ϕ, θ, η)을 대입한 행렬이다. 이제 (9)을 이용하여 시간지연이 포함된 비선형 측정방정식을 Δt에 관하여 다음과 같이 선형화될 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{Z}_{DCM}(k) &= \hat{C}_m^n(k-\Delta t)\,\hat{C}_s^m(k)\,\hat{C}_n^s(k)\\ &= Z_{DCM}(k) + D(k)\Delta t\end{aligned} \tag{10}$$

(10)을 벡터형태로 변환하면

$$\hat{Z}_{dcm}(k) = Z_{dcm}(k) + d(k)\Delta t \tag{11}$$

여기서

$$D(k) = \Delta\hat{C}_m^n(k)\,\hat{C}_s^m(k)\,\hat{C}_n^s(k) \tag{12}$$

$$d = [-D_{(2,3)}\ D_{(1,3)}\ -D_{(1,2)}]^T \tag{13}$$

(12), 즉 (9)의 $\Delta\hat{C}_m^n(k)$을 계산하는데 있어 필요한 $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\eta}$은 짧은 시간동안 오일러각 변화량을 의미하므로 1초 마다 취득되는 Gyrocompass의 출력정보 ϕ, θ, η를 차분하여 얻는 것은 정밀도 측면에서 적절하지 못하다. 따라서 200Hz(5ms)주기로 갱신되는 SDINS 항법계산으로부터 $\hat{C}_s^n$을 가져와 $\hat{C}_m^s$을 곱하여 $\hat{C}_m^n$을 구하고, 이를 오일러각으로 변환하여 5ms 마다 차분하여 쓰면 충분히 정확한 $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\eta}$를 얻을 수 있다.

또한 서서히 변하고 변화량이 작은 시간지연 Δt는 랜덤상수로 가정하여 상태변수로 추가 도입한다.

4. DCM부분정합을 통한 유연성 보상

일반적으로 SDINS와 Gyrocompass가 장착되는 구조물은 비강체 특성을 지니며, SDINS와 Gyro-

compass사이의 비정렬을 회전벡터(rotation vector)로 표현한 μ는 회전벡터의 미분방정식에 의해 SDINS와 Gyrocompass의 상대적 각속도인 ω_{ms}^{s}의 곱으로 (14)와 같이 유도할 수 있다.

$$\dot{\mu}=\left[I+\frac{1}{2}M+\left(1-\mu_o\frac{\sin\mu_o}{2(1-\cos\mu_o)}\right)M^2\right]\omega_{ms}^{s} \tag{14}$$

여기서 M는 μ의 외대칭(skew-symmetric)행렬이고 μ_o는 μ의 크기이다.

(14)에서 ω_{ms}^{s}는 SDINS와 Gyrocompass가 장착되는 비강체의 구조물에 의해 유연성이 존재하면 $\omega_{ms}^{s}\neq 0$ 이므로 더 이상 (4)의 $\dot{\mu}=0$을 만족하지 못하게 되고 이는 시간지연과 마찬가지로 방위각 정렬오차를 유발하게 된다. 이러한 비강체 구조물에 의한 유연성은 장착되는 구조물의 형태와 운동상태에 따라 다르므로 정확한 모델링이 어렵다. 따라서 모델링이 용이하지 않은 ω_{ms}^{s}을 상태변수에 추가하지 않고 ω_{ms}^{s}에 의해 가장 큰 영향을 받는 장착 비정렬 μ의 성분과 관련된 상태변수와 측정값을 칼만필터에서 제외시키는 DCM 부분정합을 적용한다. 단 유연성은 배의 구조를 감안하여 X, Z축의 유연성은 무시할 만큼 작은 반면에 Y축 유연성이 비교적 크다는 가정을 전제로 한다.

ω_{ms}^{s}에 가장 큰 영향을 받는 상태변수를 알아보기 위해 우선 고정된 장착 비정렬과 선체의 유연성에 의한 SDINS 좌표계와 Gyrocompass 좌표계 사이의 비정렬을 3도 내외로 가정하면 (14)식의 μ_o와 M은 각각, $\mu_o\approx 0$, $M\approx 0_{3\times 3}$ 으로 근사화시킬 수 있어 (14)식은 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\dot{\mu}_X\\ \dot{\mu}_Y\\ \dot{\mu}_Z\end{bmatrix}\approx\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega_{Xx}\\ \omega_{Yy}\\ \omega_{Zz}\end{bmatrix} \tag{15}$$

여기서 $\omega_{ms}^{s}=[\omega_{Xx},\omega_{Yy},\omega_{Zz}]^T$이다. (15)에서 ω_{ms}^{s}의 Y축 성분인 ω_{Yy}만 존재한다고 가정하면 장착 비정렬 μ중에서 μ_y가 Y축 성분의 유연성 ω_{Yy}의 영향을 가장 크게 받는다. 따라서 상태변수에서 μ_y를 제거시키는 부분정합 방식을 생각할 수 있다. 하지만 (6)의 자세 측정방정식에서 μ_y와 관련된 측정값을 분리하기가 어렵게 된다. 이를 해결하기 위해 (6)의 양변에 $\widehat{C}_n^m$을 곱함으로써 μ_y의 영향을 분리할 수 있는 변형된 측정방정식 (16)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\tilde{z}_{dcm(Xx)}\\ \tilde{z}_{dcm(Yy)}\\ \tilde{z}_{dcm(Zz)}\end{bmatrix}=C_n^m\begin{bmatrix}\psi_N\\ \psi_E\\ \psi_D\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\mu_X\\ \mu_Y\\ \mu_Z\end{bmatrix}+C_n^m d\,\Delta t-\widetilde{w}_{\phi} \tag{16}$$

그리고 (16)에서 $\tilde{z}_{dcm(Yy)}$의 측정값을 칼만필터의 측정값에서 제외시키고 (4)의 $\dot{\mu}_y=0$을 상태방정식에서 제거함으로써 유연성을 고려한 DCM 부분정합 모델을 구성할 수 있다. 이제 시간지연 상태병합 모델에 DCM부분정합을 접목시켜 (1)-(6)의 칼만필터 모델을 상태변수 X, 시스템 행렬 A, 측정행렬 H로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$X=[\Delta v_N,\Delta v_E,\psi_N,\psi_E,\psi_D,\mu_X,\mu_Z,\Delta t]^T \tag{17}$$

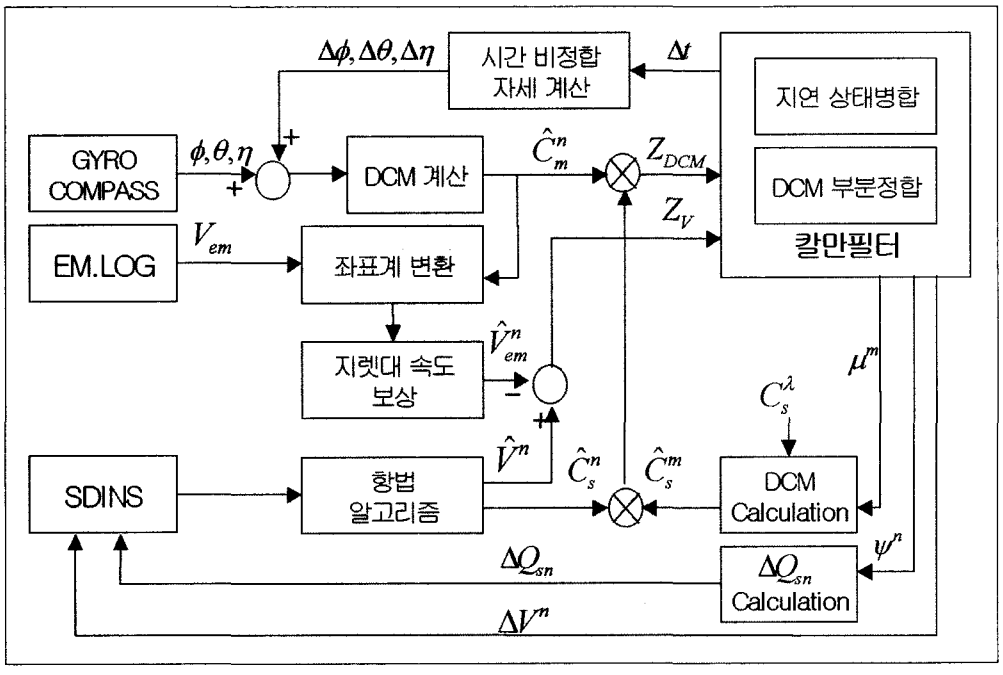
$$A=\begin{bmatrix} -[\widehat{\Omega}^n_{ie}+\widehat{\Omega}^n_{in}] & \widehat{F}_n & 0_{2\times2} & 0_{2\times1} \\ 0_{3\times2} & -\Omega^n_{in} & 0_{3\times2} & 0_{3\times1} \\ 0_{2\times2} & 0_{2\times3} & 0_{2\times2} & 0_{2\times1} \\ 0_{1\times2} & 0_{1\times3} & 0_{1\times2} & 0_{1\times1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$H=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C^m_{n11} & C^m_{n12} & C^m_{n13} & -1 & 0 & -D_{23} \\ 0 & 0 & C^m_{n31} & C^m_{n32} & C^m_{n33} & 0 & -1 & -D_{21} \end{bmatrix} \quad (19)$$

DCM 부분정합에 의한 자세 정합이 원활히 수행되기 위해 제외된 μ_y를 복구해야하는 과정이 필요하며, 이는 (20)과 같이 바로 전시간에 추정된 장착비정렬 $\widehat{C}^s_m(k-1)$과 현재 측정된 Gyrocompass 자세정보 $\widehat{C}^n_m(k)$와 SDINS 자세정보 $\widehat{C}^n_s(k)$를 이용하여 역으로 $\widehat{\mu}_y(k)$를 계산함으로써 DCM부분정합의 불완전성을 보완할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \widehat{\mu}_X(k) \\ \widehat{\mu}_Y(k) \\ \widehat{\mu}_Z(k) \end{bmatrix} = rot\{\widehat{C}^n_m(k)\,\widehat{C}^n_s(k)\,\widehat{C}^s_m(k-1)\} \quad (20)$$

여기서 rot는 DCM으로부터 회전벡터로의 변환을 의미한다. 하지만 (20)에서 측정치 시간지연이 존재하는 경우 Gyrocompass의 지연된 자세정보 $\widehat{C}^n_m(k)$는 μ_y를 복구해야하는 과정에 또 다른 오차 요소로 작용하여 시간지연이 병합된 속도 및 DCM부분정합을 구현하는데 있어 어려움이 따른다. 따라서 지연으로 인한 측정오차가 DCM부분정합에 주는 영향을 줄이기 위해 추정된 시간지연으로 측정값을 보정한 후 DCM 부분정합을 수행하도록 구성하였으며 그림 1은 시간지연 상태병합과 DCM 부분정합을 접목시킨 전달정렬 시스템의 구조를 보여준다.



[그림 1] 시간지연 상태병합과 DCM 부분정합을 접목시킨 전달정렬 시스템 구성

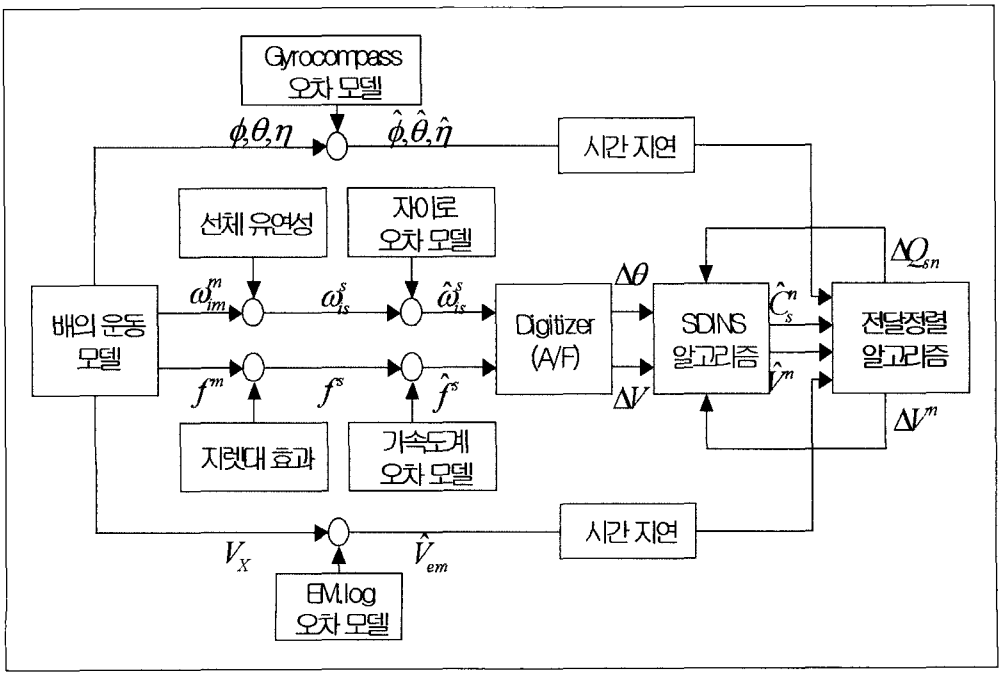
5. 시뮬레이션을 통한 성능분석

자연적인 롤, 피치운동이 존재하는 순항중인 배에서 Gyrocompass의 자세정보의 전송지연과 선체의 Y축 유연성이 비교적 크게 존재하는 경우, 본 논문에서 제시하는 병합형 칼만필터와 DCM부분정합을 구성하여 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였으며, 성능분석을 위해 동일한 조건에서 기존의 속도 및 DCM정합과 비교하였다.

시뮬레이션에 사용된 배의 운동조건으로는 롤각의 경우 주파수대역이 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. Gyrocompass자세정보의 전송지연은 선체의 구조적인 특성 및 통신주기를 근거로 하여 최대 30msec이며 순간적으로 5msec의 변화가 생길 수 있는 것으로 가정하였으며 배의 유연성은 선체의 구조와 지속적으로 인가되는 외력인 중력을 고려하여 Y축의 유연성이 X, Z축에 비하여 크게 설정하였으며 Y축의 유연성의 크기는 0.05~0.1도(rms값)로 가정하였다. Y축의 유연성의 특성은 (21)과 같이 2차 마코프로 모델링하였으며 감쇄율 ζ와 고유진동수 ω_n은 각각 0.5, 0.15Hz로 정하였다. X, Z축의 유연성의 크기는 배의 구조적 형태에 따라 약간의 차이는 있으나 0.01도, 0.001도 내외로 Y축에 비해 상대적으로 작게 설정하였다.

$$\ddot{\theta}_f + 2\zeta\omega_n\dot{\theta}_f + \omega_n^2\theta_f = w \tag{21}$$

여기서 w는 $E(w)=0$, $E(w^2)=4\zeta\omega_n^3\sigma^2$ 인 백색잡음이다. SDINS 및 Gyrocompass, EM.log 의 성능규격은 표1, 2와 같이 설정하였으며 전체적인 시뮬레이션 구성은 그림 2와 같다.



[그림 2]
전달정렬
시뮬레이션 구성도

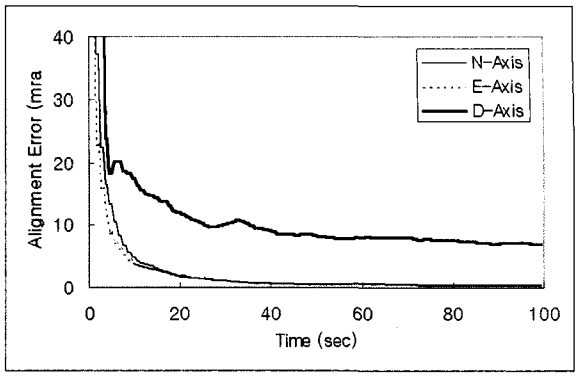
[표 1] SDINS 사양

	오 차 요 소	크 기
가속도계	바이어스 반복도	200μg
	환산계수 안정도	200ppm
	비정렬 오차	1.0arcmin
	비등관성	50μg /(*rad*/ sec)^2
	백색잡음	40μg
	랜덤워크	10μg /$hr^{1/2}$
	1차 마코프	30μg, 1.0min
자이로	바이어스 반복도	0.2deg/hr
	환산계수 안정도	200ppm
	질량불균형	0.05deg/hr/g
	비정렬 오차	1.0arcmin
	비등탄성	0.5deg/hr /g^2
	비등관성	0.5deg/h /(*rad*/ sec)^2
	백색잡음	0.01deg/hr
	랜덤워크	0.001deg/hr/hr1/2
	1차마코프	0.05deg/hr ,1.0min

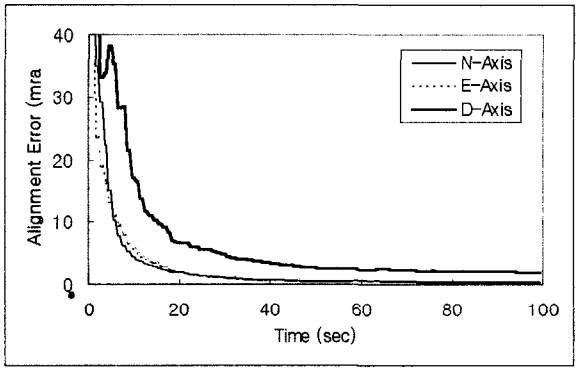
[표 2] Gyrocompass, EM.log 사양

	오 차 요 소	크 기
Gyrocompass	안정대 경사각	0 arcmin
	김블 비직교성	0 arcmin
	1차 마코프 잡음	1arcmin, 0.1sec
	시간지연	최대 30msec
EM.log	해조류 속도	0.5m/sec
	바이어스	0.1m/sec
	환산계수 오차	1%
	백색잡음	0.2m/sec
	시간지연	최대 30msec

우선 30msec의 측정치 시간지연과 Y축 방향으로 0.05~0.1도(rms값)의 선체유연성이 존재하는 경우 기존의 속도 및 DCM부분정합으로 SDINS의 초기정렬을 수행한 시뮬레이션 결과는 그림 3과 같이 60초



[그림 3] 보상기법 적용 전 시간지연과 선체유연성에 대한 전달정렬 오차 추이



[그림 4] 보상기법 적용 후 시간지연과 선체유연성에 대한 전달정렬 오차 추이

에 약 9mrad의 방위각 정렬 오차를 유발하는 것을 확인할 수 있다. 이는 수평축 정렬이 시간 지연과 유연성에 둔감한 속도 정합에 의하여 정렬이 이루어진 것으로 분석된다.

다음으로 그림 4는 동일한 조건에서 시간지연 상태 병합과 DCM부분정합을 접목시킨 전달정렬 알고리즘을 통한 SDINS의 초기정렬의 시뮬레이션 결과이며 방위각 정렬 오차가 60초 이후 3mrad 이내로 수렴함으로써 그림 3와 비교하여 방위각 정렬 오차가 효과적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 4에서 10초 이내의 정렬 오차가 큰 이유는 DCM부분정합에서

제외된 상태변수 μ_y를 복구하는데 시간이 걸리는 것으로 해석할 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 속도 및 DCM 정합을 이용한 초기 전달정렬시 측정치 시간지연과 선체의 유연성에 의해 유발되는 정렬오차를 보상하기 위해 시간지연오차의 선형모델을 유도하여 시간지연을 SDINS 오차모델에 상태변수로 병합시키고 유연성이 Y축에 크게 발생하여 영향을 주는 상태변수를 분리시키는 DCM 부분정합을 적용하여 측정치 시간지연과 선체의 유연성을 고려한 전달정렬 알고리즘을 제시하였다. 또한 시뮬레이션을 통한 성능분석 결과 방위각 정렬 오차가 60초 이내에 3mrad(rms값) 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 기존의 전달정렬 알고리즘에 비해 6mrad정도의 방위각 정렬오차를 개선시켰다.

추후과제로 μ_y를 복구해야하는 단점을 갖는 DCM 부분정합을 대체할 수 있는 유연성 보상기법으로 유연성 모델의 불확실성을 감안한 강인한 유연성 추정기법에 대한 연구가 진행 중에 있다.

참 고 문 헌

1. 유 준, 임유철, 송태승, 길현섭, "전달정렬의 시간지연과 유연성 오차요소 영향분석 및 보상기법 연구," 국방과학연구소 보고서, 2000. 6.
2. 송기원, 전창배, "SDINS의 전달정렬 알고리즘 설계 및 성능분석," MSDC-416-980574, 1998. 6.
3. 임유철, 송기원, 유준, "Measurement Time Delay Error Compensation for Transfer Alignment," in Abstract Book of 2000 KACC International Session, p. 486, 2000. 10.
4. 임유철, 송기원, 유준, "전달정렬의 선체 유연성 보상을 위한 속도 및 DCM 부분정합 방식," 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, 제7권 제4호 pp. 369~373, 2001.

주 요 기 호

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 좌표계 에서 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