시선벡터를 이용한 관성항법장치의 보정기법

임유철, 임정빈, 유준
충남대학교 전자공학과
전화 : 042-823-3533 / 핸드폰 : 016-9227-2406

Compensation of SDINS Navigation Errors Using Line-Of-Sight Vector

You_Chol Lim, Jong Bin Yim, Joon Lyou
Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University
E-mail : jbiny@cnu.ac.kr

Abstract

Since inertial sensor errors which increase with time are caused by initial orientation error and sensor errors (accelerometer bias and gyro drift bias), the accuracy of these devices, while still improving, is not adequate for many of today's high-precision, long-duration sea, aircraft, and long-range missile missions.

This paper presents a navigation error compensation scheme for Strap-Down Inertial Navigation System (SDINS) using Line-Of-Sight(LOS) vector from star sensor. To be specific, SDINS error model and measurement equation are derived, and Kalman filter is implemented. Simulation results show the boundedness of position and attitude errors.

I. 서론

일반적으로 항법오차는 주로 항법장치의 초기정렬오차 및 항법센서오차(가속도계 바이어스 및 자이로 드리프트)에 의해 유발되며 시간에 따라 누적되는 특성을 가진다. 유도오차의 대부분을 차지하는 항법오차의 감소는 유도성능 향상과 직결된 문제로서 그간 많은 연구가 이루어져 왔다. 보조항법장치를 이용하여 항법오차를 특정오차 한계 이내로 유지시키는 보정항법은 실제 응용성 및 성능 면에서 효과적인 대표적 항법오차 감소방안이다. GPS 보조항법장치를 이용한 항법보정방법은 가격이 저렴하고 정확도가 높은 반면에 정보의 의존도가 높고, 항법에 필요한 위성신호 교란 시 항법보정에 실패할 가능성이 높다는 단점이 있다.

광학센서 및 수평 센서로 구성된 전자-광학 관측시스템을 이용한 보정항법은 센서들이 고가이고 활용분야가 협소하여 현재까지 국내에서는 연구가 거의 이루어지지 않은 분야이나 외부의 교란을 받지 않는 독립적인 항법 시스템의 구성이 가능하다는 점에서 향후 지속적인 연구와 적용 가능성의 검토가 필요하다.

광학센서인 별센서의 정보를 이용한 관성항법장치의 보정 알고리즘이 주로 전략 무기체계에 많이 응용되어 유도무기의 표적탐지 정확도를 향상시키는데 중요한 역할을 하기 때문에 대부분의 관련기술이 해외 수출 통제 대상에 포함되어 있다. 전자-광학 관측시스템의 정보를 이용한 관성항법장치의 보정 알고리즘 관하여 자세하게 공개적으로 발표된 자료가 거의 없으며, 또한 유도무기 개발을 직접 수행하고 있는 선진 외국 연구기관에서는 이것에 관한 공개를 핵심부분이 되는 기법에 대하여 제한하고 있다.

이에 본 논문에서 전자-광학 관측시스템의 정보인 시선정보를 이용한 관성항법장치의 보정알고리즘을 제안한다. 먼저 2장에서 별센서에 대해 소개하고, 3장에서는 시선벡터를 이용한 보정항법의 구성을 설명하며, 칼만필터를 구현하기 위한 오차모델과 측정모델식을 유도한다. 4장에서 시뮬레이션을 통해 시선벡터를 이용한 항법보정을 검증하며, 마지막 5장에서는 본 논문의 결론으로 주요 결과를 요약한다.

II. 별센서

과거 별센서는 그 정밀도에 비해 가격이 비싸고, 무겁고, 전력 소비가 많고 복잡한 소프트웨어가 요구되는 센서로 알려져 왔다. 그러나 VLSI와 DSP 칩의 기술발전과 더불어 저가의 가볍고 전력 소비가 적은 별센서의 개발이 가능해 졌다.

별센서의 기본 원리는 천구상의 별자리 패턴 정보를 이용하여 기존에 저장된 별자리 패턴과 비교함으로써 현재의 위치정보와 자세정보를 추정하는 것이다.

그림 2-1에서 보인 것처럼 별센서로부터 관측되는 별의 정보와 별센서 좌표계에 대한 시선벡터를 직접 얻을 수 있으며 천측항법 알고리즘을 통해 항법결과인 위치와, 자세정보를 얻을 수 있다.

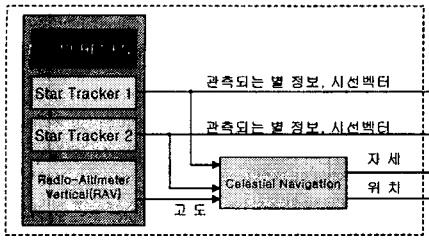

그림 2-1 별센서에서 제공하는 정보

천측항법 알고리즘을 통해 자세와 위치를 계산하여 보정에 이용할 수도 있으나, 본 연구에서는 천측항법 알고리즘이 추가적으로 필요하지 않으며, 요구되는 별센서의 수를 최소화 할 수 있는 장점을 가진 시선벡터를 보정에 이용하는 방법을 새롭게 제안한다.

III. 시선벡터를 이용한 항법보정 알고리즘

3.1 시선벡터를 이용한 보정항법 구성

별센서의 시선벡터를 이용한 오차보정의 개념은 플랫폼에 장착된 별센서의 지향 오차를 이용하여 위치 오차를 간접적으로 추정하는 것이다.

그림 3-1에서 별센서에서 측정된 별의 별센서 좌표계에서의 적경 (α)과 적위 (β)와 지구중심관성좌표계에서의 적경 (γ)과 적위 (δ)의 관계를 보여준다.

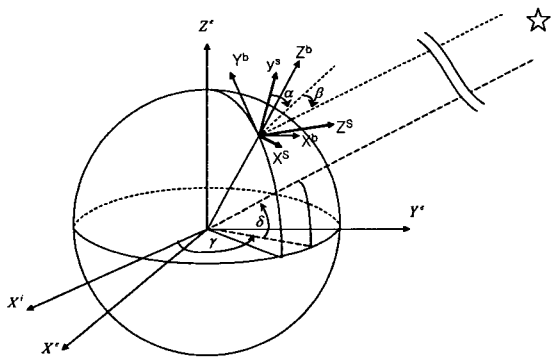

그림 3-1 별센서의 시선벡터를 이용한 INS 보정 개념도

각각의 적경과 적위를 단위시선벡터로 변환하면

$$u^s = \begin{bmatrix} \sin(\alpha)\cos(\beta) \\ \cos(\alpha)\cos(\beta) \\ \sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (3\text{-}1)$$

$$u^i = \begin{bmatrix} \cos(\gamma)\cos(\delta) \\ \sin(\gamma)\cos(\delta) \\ \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (3\text{-}2)$$

와 같고 좌표변환행렬을 이용하여 두 시선벡터사이의 관계식을 식(3-3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{u}^s = C_b^s \mathcal{C}_n^b \mathcal{C}_e^n C_i^e u^i \quad (3\text{-}3)$$

별센서로부터 측정된 시선단위벡터 u^s와 식(3-3)에서 계산된 동체좌표계에서의 시선단위벡터 $\hat{u}^s$와의 차를 z로 정의하면

$$\begin{aligned} z &= \hat{u}^s - u^s \\ &= C_b^s \mathcal{C}_n^b \mathcal{C}_e^n C_i^e u^i - u^b \end{aligned} \quad (3\text{-}4)$$

여기서 C_b^s는 동체 좌표계에 대한 별센서 좌표계의 좌표변환행렬로 동체에 부착된 별센서의 자세각이고, $\mathcal{C}_n^b$는 항법좌표계에 대한 동체좌표계의 자세변환행렬로 이는 INS로부터 계산되며 $\mathcal{C}_e^n$ 은 지구중심고정좌표계에 대한 항법좌표계의 자세변환행렬로 현재의 위치를 알면 계산된다. 따라서 z를 INS 보정 칼만필터의 측정치로 이용할 경우 INS의 자세오차와 위치오차가 보정이 가능하다.

그림 3-2는 별센서의 시선벡터를 이용한 INS 보정 항법의 구성도를 보여준다.

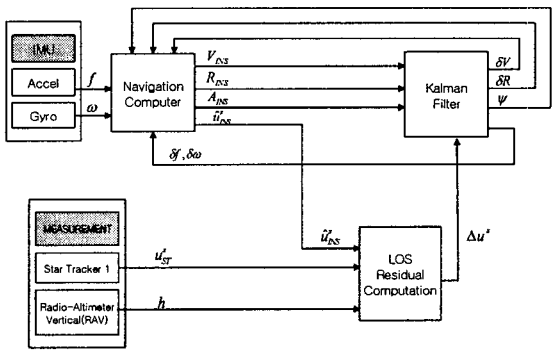

그림 3-2 시선벡터를 이용한 보정항법 구성도

3.2 칼만필터 모델

(1) SDINS 오차모델

칼만필터의 동적모델로는 psi angle 방식을 이용한 SDINS 오차방정식을 사용하였으며, SDINS에서 NED 좌표계를 항법 좌표계로서 사용하는 경우 속도, 위치 및 자세 오차 방정식[3]은 다음과 같다.

$$\delta\dot{R} = -\hat{w}_{en}^n \times \delta R + \delta V \quad (3\text{-}5)$$

$$\delta\dot{V} = \Omega_s \delta R - (2\hat{w}_{ie}^n + \hat{w}_{en}^n) \times \delta V + \hat{f}^n \times \psi + \hat{C}_b^n \delta f^b \quad (3\text{-}6)$$

$$\dot{\psi} = -\hat{w}_{in}^n \times \psi - \hat{C}_b^n \delta w^b \quad (3\text{-}7)$$

식(3-5~7)을 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t) \quad (3\text{-}8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_i & F_f \\ 0_{6\times 9} & 0_{6\times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ x_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_i \\ 0_{6\times 1} \end{bmatrix} \quad (3\text{-}9)$$

여기서 오차상태변수는 다음과 같다.

$$x_i \equiv [\ \delta\Phi\ \ \delta\lambda\ \ \delta h\ \vdots\ \delta V_N\ \delta V_E\ \delta V_D\ \vdots\ \psi_N\ \psi_E\ \psi_D\ ]^T \quad (3\text{-}10)$$

$$x_f \equiv [\ \delta f_x\ \ \delta f_y\ \ \delta f_z\ \vdots\ \delta w_x\ \delta w_y\ \delta w_z\ ]^T \quad (3\text{-}11)$$

w는 공정잡음에 해당하며 다음과 같다.

$$w \equiv [\ w_1\ w_2\ w_3\ \vdots\ w_4\ w_5\ w_6\ \vdots\ w_7\ w_8\ w_9\ ]^T, \quad w \sim N(0, Q) \quad (3\text{-}12)$$

식(3-9)에서 F_i와 F_f는 각각 다음과 같다.

$$F_i = \begin{bmatrix} 0 & \frac{V_E \tan\Phi}{R\cos\Phi} & \frac{-V_E}{R\cos\Phi} & 0 & \frac{1}{R\cos\Phi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-V_E}{R} & \frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\Omega\sin\Phi V_E - \frac{V_N V_E}{R\cos^2\Phi} & \frac{V_N V_E \tan\Phi + V_D V_E}{R} & \frac{V_E}{R} & -2\frac{V_E \tan\Phi}{R} + 2\Omega\sin\Phi & \frac{V_N}{R} & 0 & f_z & -f_y \\ 0 & 2\Omega\sin\Phi V_N + \frac{V_N V_E}{R\cos^2\Phi} & \frac{-V_N V_N \tan\Phi + V_D V_N}{R} & \frac{V_N \tan\Phi}{R} + 2\Omega\sin\Phi & \frac{V_N \tan\Phi + V_D}{R} & \frac{V_E}{R} & -f_z & 0 & f_x \\ 0 & 2\Omega\cos\Phi V_E & \frac{2}{R}(V_N^2 + V_E^2) & \frac{2V_D}{R} & -\frac{V_E}{R} + 2\Omega\cos\Phi & 0 & f_y & -f_x & 0 \\ 0 & 2\Omega\sin\Phi & \frac{-V_E}{R} & 0 & \frac{1}{R} & 0 & 0 & -\frac{V_E \tan\Phi}{R} + 2\Omega\sin\Phi & \frac{V_N}{R} \\ 0 & 0 & \frac{V_N}{R} & \frac{1}{R} & 0 & 0 & \frac{V_E \tan\Phi}{R} + 2\Omega\sin\Phi & 0 & -\frac{V_E}{R} + 2\Omega\cos\Phi \\ 0 & 2\Omega\cos\Phi \frac{V_E(1-\tan^2\Phi)}{R} & \frac{V_E}{R} & 0 & \frac{\tan\Phi}{R} & 0 & \frac{V_N}{R} & \frac{V_E}{R} + 2\Omega\cos\Phi & 0 \end{bmatrix} \quad (3\text{-}13)$$

$$F_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ C_b^n & 0 \\ 0 & -C_b^n \end{bmatrix} \quad (3\text{-}14)$$

(2) 측정모델

별센서의 시선벡터를 이용한 INS 보정 측정방정식은 측정치 z를 INS와 별센서에 대한 단위시선벡터 잔여치로 식(3-15)와 같이 정의한다.

$$z = \hat{u}^s_{INS} - u^s_{ST} \quad (3\text{-}15)$$

$\hat{u}^s_{INS}$는 식(3-4)에서와 같이 INS에서 계산된 시선단위벡터를 u^s_{ST}는 별센서로부터 측정된 시선단위벡터를 의미하며 그리고 여기서 잔여치와 INS의 오차상태변수와의 선형관계식은 다음과 같이 유도된다.

우선 $\hat{u}^s_{INS}$의 계산과정을 전개하면

$$\begin{aligned} \hat{u}^s_{INS} &= C^s_b C^b_n C^n_e C^e_i u^i \\ &= [I - M]\ C^s_b\, C^b_n\, [I + \Psi]\, [C^n_e + \Delta C^n_e] C^e_i\, u^i \\ &\approx C^s_b\, C^b_l\, C^l_e\, C^e_i\, u^i - M\, C^s_b\, C^b_l\, C^l_e\, C^e_i\, u^i + C^s_b\, C^b_l\, \Psi\, C^l_e\, C^e_i\, u^i \\ &\quad + C^s_b\, C^b_n\, \Delta C^n_e\, C^e_i\, u^i \end{aligned} \quad (3\text{-}16)$$

다시 식(3-15)에 식(3-16)을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} z &= \hat{u}^s_{INS} - u^s_{ST} \\ &= -M C^s_b C^b_n C^n_e C^e_i u^i + C^s_b C^b_n \Psi C^n_e C^e_i u^i + C^s_b C^b_n \Delta C^n_e C^e_i u^i + v_{ST} \end{aligned} \quad (3\text{-}17)$$

여기서 M, Ψ, ΔC^n_e 은 각각

$$M = \begin{bmatrix} 0 & -\mu_z & \mu_y \\ \mu_z & 0 & -\mu_x \\ -\mu_y & \mu_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3\text{-}18)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & -\psi_D & \psi_E \\ \psi_D & 0 & -\psi_N \\ -\psi_E & \psi_N & 0 \end{bmatrix} \quad (3\text{-}19)$$

$$\Delta C^n_e = \begin{bmatrix} -\sin\Phi\cos\lambda\,\delta\Phi & -\sin\Phi\sin\lambda\,\delta\Phi & \cos\Phi\,\delta\Phi \\ -\cos\Phi\sin\lambda\,\delta\lambda & +\cos\Phi\cos\lambda\,\delta\lambda & \\ -\cos\Phi\,\delta\Phi & -\sin\lambda\,\delta\lambda & 0 \\ -\cos\Phi\cos\lambda\,\delta\Phi & -\cos\Phi\sin\lambda\,\delta\Phi & -\sin\Phi\,\delta\Phi \\ +\sin\Phi\sin\lambda\,\delta\lambda & -\sin\Phi\cos\lambda\,\delta\lambda & \end{bmatrix} \quad (3\text{-}20)$$

와 같고, v_{st} 는 별센서의 측정잡음을 의미한다.

식(3-17)의 첫 번째 항에서 $C^s_b C^b_n C^n_e C^e_i u^i = u^s = [u^s_x u^s_y u^s_z]^T$ 로 표현하고,

H_1을 아래와 같이 정의하자.

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & u^s_z & -u^s_y \\ -u^s_z & 0 & u^s_x \\ u^s_y & -u^s_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3\text{-}21)$$

두 번째 항에서 $C^n_e C^e_i u^i$ 를 $u^n = [\ u_N\ u_E\ u_D\ ]^T$ 로 표현하고,

$$C^s_b C^b_n \Psi C^n_e C^e_i u^i = C^s_n \Psi u^n = C^s_n \begin{bmatrix} 0 & u_D & -u_E \\ -u_D & 0 & u_N \\ u_E & -u_N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_N \\ \psi_E \\ \psi_D \end{bmatrix} \quad (3\text{-}22)$$

H_2을 아래와 같이 정의하자.

$$H_2 = C^s_n \begin{bmatrix} 0 & u_D & -u_E \\ -u_D & 0 & u_N \\ u_E & -u_N & 0 \end{bmatrix} \quad (3\text{-}23)$$

마찬가지 방법으로 세 번째 항에서 $C^e_i u^i$ 를 $u^e = [\ u_X\ u_Y\ u_Z\ ]^T$ 로 표현하고,

$$C^s_b C^b_n \Delta C^n_e C^e_i u^i = C^s_n \Delta C^n_e u^e \quad (3\text{-}24)$$

H_3를 식(3-25)와 같이 정의하면

$$H_3 = C_n^s \begin{bmatrix} -\sin\Phi\cos\lambda u_X - \cos\Phi\sin\lambda u_X \\ -\sin\Phi\sin\lambda u_Y + \cos\Phi\cos\lambda u_Y \\ +\cos\Phi u_Z \\ -\cos\Phi u_X \quad -\sin\lambda u_Y \\ -\cos\Phi\cos\lambda u_X \quad \sin\Phi\sin\lambda u_X \\ -\cos\Phi\sin\lambda u_Y - \sin\Phi\cos\lambda u_Y \\ -\sin\Phi u_Z \end{bmatrix} \quad (3\text{-}25)$$

최종 별센서의 시선벡터를 이용하여 INS를 보정하는 칼만필터의 측정방정식이 유도된다.

$$z = H_1\begin{bmatrix}\mu_x\\ \mu_y\\ \mu_z\end{bmatrix} + H_2\begin{bmatrix}\Psi_N\\ \Psi_E\\ \Psi_D\end{bmatrix} + H_3\begin{bmatrix}\delta\Phi\\ \delta\lambda\end{bmatrix} - v \quad (3\text{-}26)$$

IV. 시뮬레이션 수행

본 연구에서 제안한 보정기법을 확인해 보기 위해 전산 시뮬레이션을 구성하였다. 표 4-1은 시뮬레이션에 사용된 INS 모델의 계수를 보여준다. 별센서는 8°× 8°의 FOV(Field Of View)를 갖는 것으로 모델링 하였고, 주어진 공칭값에 백색잡음을 추가시킨 형태를 사용하였다(표4-2 참조). 시선벡터를 이용한 보정항법 시뮬레이션 결과를 그림 4-1과 4-2에 수록하였다.

표 4-1. INS모델의 오차 계수

오차요소	크기 (1σ)
INS 초기 수평축 위치오차	40 m
INS 초기 수평축 속도오차	1 m/sec
INS 초기 수평축 자세오차	1 mrad
INS 초기 수직축 자세오차	5 mrad
INS 가속도계 백색잡음	5 μg $sec^{1/2}$
INS 가속도계 바이어스	200 μg
INS 자이로 백색잡음	0.001° $/hr^{1/2}$
INS 자이로 바이어스	0.1° /hr

표 4-2. 별센서의 특성

Characteristics	HD-1003
Field Of View	8°× 8°
Sensitivity Range(M_v)	+2 to +6
Accuracy(arcsec,1σ) in Roll and Pitch	6
Update Rate(Hz)	10
Acquisition Time(Full Field, second)	6
Maximum Number of Stars Tracked	6
Maximum Power(W)	12
Maximum Weight	81b
Operating Temperature(Deg)	-20 to +60

항법 scenario는 정북에서 동쪽으로 30도 방향으로 180초간 정지해 있다가 180초부터 200초 사이에 최대 180m/sec2의 가속도를 받고, 201초부터는 170m/sec의 등속도로 수평비행 하는 항체를 가정하였다.

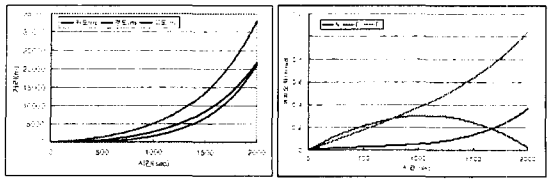

그림 4-1. INS 독립항법 시뮬레이션 결과(위치, 자세)

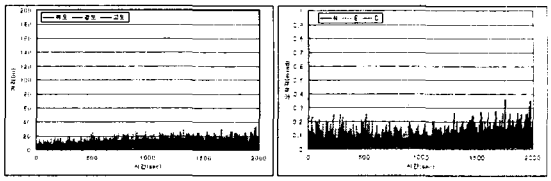

그림 4-2. 시선벡터를 이용하여 보정한 결과 (위치,자세)

그림 4-1은 별센서를 이용한 보정없이 INS만으로 항법 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸다. 130초에 위치오차가 약 150m를 넘어서며, 시간이 지날수록 위치오차가 발산한다. 자세오차 또한 발산함을 볼 수 있다.

그림 4-2는 별센서의 시선벡터를 이용하여 INS를 보정한 결과이다. INS만으로 항법을 수행한 그림 4-1과 비교해 보면 INS의 오차가 누적되지 않고, 위치 오차가 약 20m 이내로 유지됨을 볼 수 있다. 따라서 위 시뮬레이션을 통해 시선벡터를 통한 보정항법의 가능성을 확인할 수 있었다.

V. 결론

유도오차의 대부분을 차지하는 항법오차의 감소는 유도성능 향상과 직결된 문제로 중요한 연구분야로 본 논문에서 별센서를 이용하여 관성항법 장치의 항법오차를 보정하기 위해 별센서의 시선벡터를 이용한 보정항법 모델을 새롭게 도출하였으며, 시뮬레이션을 통해 제시한 보정기법의 가능성을 검증하였다. 추후 과제로 본 논문에서 제시한 시선벡터가 아닌 천측항법 알고리즘을 통해 계산된 위치와 자세 정보를 이용한 보정항법에 대한 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

[1] Farell J., and Barth M., *The Global Positioning System and Inertial Navigation*, McGraw-Hill, 1999.

[2] Kayton M., and Fired W.R., *Avionics Navigation Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.

[3] Siouris G.M., *Aerospace Avionic Systems. A Modern Synthesis*, Academic press, 1993.

[4] Grewal M.S., and Henderson V.D., "Application of Kalman Filtering to the Calibration and Alignment of Inertial Navigation Systems", Proceedings of the 29th IEEE Conference, PP. 3325-3334 vol.6, 1990

[5] Andy W., "Precision Attitude Determination for LEO Spacecraft", AIAA Guidance Navigation and Control Conference, AIAA-96-3753, 1996.