Journal of the KIMST, Vol. 18, No. 2, pp. 109-114, 2015
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2015.18.2.109

Research Paper 센서 · 신호처리 부문

온도 변화율을 이용한 자이로 바이어스 히스테리시스 오차 보상 기법

유해성*,1) · 김천중1) · 성창기1) · 이인섭1) · 박상은2) · 박흥원1)

1) 국방과학연구소 제3기술연구본부
2) 국방과학연구소 공용기술센터

Compensation Method of Gyro Bias Hysteresis Error using the Rate of Temperature

Haesung Yu*,1) · Cheon Joong Kim1) · Changgi Sung1) · Inseop Lee1) · SangEun Park2) · Heung-won Park1)

1) *The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*
2) *Common Technology Center, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 25 July 2014 / Revised 26 January 2015 / Accepted 27 February 2015)

ABSTRACT

A method to compensate a bias hysteresis error of the ring laser gyro using the rate of temperature is proposed in this paper. Until now, we generally have measured and compensated the error of gyro and accelerometer using the temperature. However, we utilize the measured values of the temperature dependent error elements on the temperature rate in navigation system level. We show through experiments that the proposed method can improve the navigation performance and be very effective.

Key Words : Gyro Bias Error(자이로 바이어스 오차), Temperature Hysteresis(온도 히스테리시스), Ring Laser Gyro(링 레이저 자이로), Rate of Temperature(온도 변화율)

1. 서 론

스트랩다운형 관성항법장치(Strapdown Inertial Navigation System(SDINS))는 김블형 관성항법장치(Gimbaled INS)와 달리 동체 좌표계에 장착된 자이로 출력을 이용하여 자세 계산을 수행한다. 따라서 자이로 성능은 관성항법장치 성능[1,2]을 결정하는 주요 요소이다. 자이로 오차요소 중 관성항법장치의 방위각 정렬 및 자세 계산의 정밀도를 결정하는 자이로 바이어스 오차는 관성항법장치 성능을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 센서의 생산 단계에서 자이로는 단품으로 램덤 웍(random walk), 바이어스 안정도(bias stability) 등을 측정과 검사를 수행한다. 그러나 관성센서 조립체(Inertial Measurement Unit) 조립 후, 디더링(Dithering) 및 각 센서 들간의 비정렬(Misalignment) 등

* Corresponding author, E-mail: haesong7@add.re.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

으로 인하여 최종적으로 관성항법장치의 시스템 단계 중 교정 과정에서 바이어스 오차, 척도 계수 오차, 비정렬 오차 등을 측정하고 보상한다. 즉 관성항법장치의 성능을 좌우하는 자이로 바이어스 등의 오차는 관성항법장치의 시스템 단계의 교정 과정에서 측정하고 보상하게 된다.

교정 단계에서는 온도 제어 장치를 내장하지 않는 관성항법장치에서 전 운용 온도(여기서는 -30~60 ℃)에 대해서 오차를 측정하고, 식별하여 그 값을 온도에 따라서 보상하게 된다. 교정 과정에서 온도별로 획득된 관성항법장치의 오차는 온도별 Look-up table, 온도에 대한 함수[3] 등의 형태로 메모리에 기록되고, 관성항법장치가 운용될 때 이 값을 이용하여 센서 오차를 보상한다. 그리고 일반적으로 메모리 및 운용상의 용이함을 이유로 온도에 대한 함수를 이용하는 경우가 많다. 그러나 교정 단계에서의 온도 변화 과정에서 획득하는 오차에 대해서 온도만으로는 표현되지 않는 히스테리시스 오차가 발생하게 된다.

본 논문에서는 시스템 단계에의 오차 중 자이로 바이어스 오차를 보상하는 방법으로 온도 외에 온도의 시간 변화율을 이용하여 히스테리시스 형태로 남아있는 자이로 바이어스 오차를 보상하는 방법을 제시하고 실험적 검증을 통해 그 유용성을 살펴본다.

2. 본 문

2.1 자이로 바이어스 측정 방법

본 논문에서 대상으로 하는 관성항법장치에 적용 중인 간접적인 교정 방법 중 자이로 바이어스를 측정하고 온도에 대한 보상 함수를 획득하는 과정을 살펴보고, 이 과정에서 발생하는 자이로 바이어스의 히스테리시스 온차에 대해서 살펴본다.

항법 좌표계에서의 수평축 속도 오차 δV_x, δV_y의 시간 변화율은 항법 좌표계에서의 수평축 가가속도 오차 δA_x, δA_y와 수평축 자세 오차 ϕ_x, ϕ_y에 대해서 식 (1)[4]과 같은 관계를 형성한다.

$$\begin{aligned}\delta \dot{V}_x &= \delta A_x - g\phi_y \\ \delta \dot{V}_y &= \delta A_y + g\phi_x\end{aligned} \tag{1}$$

여기서, g는 중력 가속도를 의미한다.

수평축 자세 오차 및 수직축 자세 오차 ϕ_z의 시간 변화율은 지구 회전 각속도 $\Omega = [\Omega_x, \Omega_y \Omega_z]^T$와 항법 좌표계에서의 센서 오차 $\delta\omega = [\delta\omega_x \ \delta\omega_y \ \delta\omega_z]^T$와 식 (2)와 같은 관계를 형성한다.

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_x &= -\delta\omega_x - \Omega_y\phi_z \\ \dot{\phi}_y &= -\delta\omega_y + \Omega_x\phi_z \\ \dot{\phi}_z &= -\delta\omega_z\end{aligned} \tag{2}$$

자이로 바이어스는 전 단계의 교정 즉 자이로 바이어스를 제외한 오차를 획득하는 과정에서 가속도 오차 및 자이로 바이어스 오차를 제외한 자이로 오차가 정상적으로 보상되어 시간 변화율이 없다고 가정할 수 있으므로

$$\begin{aligned}\delta \ddot{V}_x &\cong -g\dot{\phi}_y \\ \delta \ddot{V}_y &\cong +g\dot{\phi}_x\end{aligned} \tag{3}$$

와 같이 근사화 할 수 있다.

자이로 바이어스를 계산하기 위해서 정렬은 방위각 0도($C_b^N(0)$)에서 수행하고, 비행 모드를 진입 후 일정 시간 후(여기서는 10분) 방위각을 180도($C_b^N(T)$) 회전시킨다(여기서 0은 회전 전, T는 회전 후의 순간을 의미한다).

0도에서의 자세 오차

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_x(0) &= -\beta_x - \Omega_y\phi_z \\ \dot{\phi}_y(0) &= -\beta_y + \Omega_x\phi_z \\ \dot{\phi}_z(0) &= -\beta_z\end{aligned} \tag{4-1}$$

180도에서의 자세 오차는

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_x(T) &= \beta_x - \Omega_y\phi_z \\ \dot{\phi}_y(T) &= \beta_y + \Omega_x\phi_z \\ \dot{\phi}_z(0) &= -\beta_z\end{aligned} \tag{4-2}$$

0도에서의 속도 오차는

$$\delta \ddot{V}_x(0) = -g\dot{\phi}_x(0)$$
$$\delta \ddot{V}_y(0) = g\dot{\phi}_y(0) \quad (5\text{-}1)$$

180도에서의 속도 오차

$$\delta \ddot{V}_x(T) = -g\dot{\phi}_x(T)$$
$$\delta \ddot{V}_y(T) = g\dot{\phi}_y(T) \quad (5\text{-}2)$$

식 (4-1), (4-2)를 식 (5-1), (5-2)에 넣고 정리하면

$$\beta_x = \frac{\delta \ddot{V}_y(T) - \delta \ddot{V}_y(0)}{2g}$$
$$\beta_y = \frac{\delta \ddot{V}_x(T) - \delta \ddot{V}_x(0)}{-2g} \quad (6)$$
$$\beta_z = \frac{\dot{\phi}_z(T) + \dot{\phi}_z(0)}{-2}$$

즉 회전 전(0), 회전 후(T)의 수평축 속도 오차의 시간에 대한 2차 계수 $\delta \ddot{V}_x$, $\delta \ddot{V}_y$를 이용하여 수평축 자이로 바이어스 β_x, β_y를 계산하고, Yaw의 시간 변화율 $\dot{\phi}_z$를 이용하여 β_z를 계산[5,6]한다. 이렇게 획득된 자이로 바이어스는 측정 시간 약 33분 정도의 소요되며, 그 동안 변화한 온도의 중간 값에 대한 함수로 바이어스를 표현되게 된다.



Fig. 1. Rate table

Fig. 1은 관성항법장치의 방위각 회전을 위해 사용하는 2축 Rate Table을 보여주며, Fig. 2는 관성항법장치의 운용 온도 전 구간에서 교정 데이터를 획득하기 위한 Rate Table 챔버의 온도 변화 과정을 보여준다.

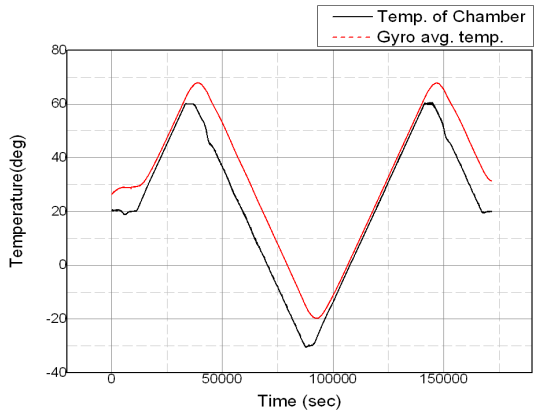


Fig. 2. Temperature of the calibration process

Fig. 3은 온도를 변화시키면서 실제로 측정된 3축의 자이로 바이어스 중 Y축 자이로 바이어스를 표시한 결과이다.

위에 제시한 방법으로 계산된 자이로 바이어스(—•—)는 Fig. 3과 같으며, 교정 완료 시점에서 온도에 대한 3차 함수(—▫—)로 항법 컴퓨터의 메모리에 저장된다. 추후 관성항법장치의 운용 중에 센서로 부터 획득된 자이로 데이터에 대해서 온도에 대한 3차 함수로 측정치를 보상하여 관성항법장치의 항법 계산에 이용되게 된다.

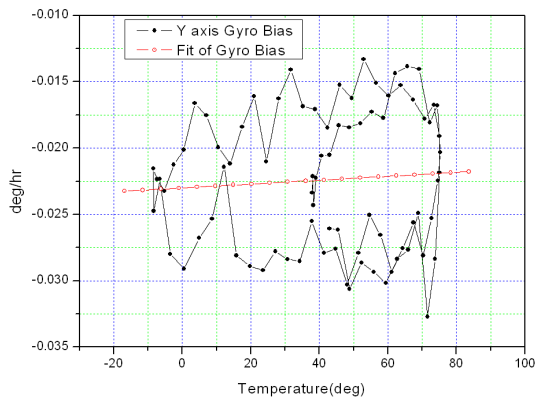


Fig. 3. Example of Y axis gyro bias

Fig. 3과 같이 교정 과정에서 센서가 겪게 되는 온도에 대해서 획득된 자이로 바이어스와 이를 표현하

는 온도 함수간 차이가 발생하게 된다. 본 논문에서는 이 차이를 온도의 시간 변화율로 표현하고 이를 보상하는 방법을 제시하고자 한다.

2.2 온도 시간의 변화율을 이용한 보상 방법

Fig. 3과 같이 실제 측정된 자이로 바이어스와 그 값을 표현하는 함수와는 히스테리시스에 의해 차이가 발생한다. 본 논문에서는 실제 자이로가 겪게 되는 온도 뿐만 아니라 온도의 시간 변화율로 실제 측정된 자이로 바이어스를 표현하여 보상하고, 그 결과를 평가해 본다.

교정에서 발생하는 온도 및 온도 변화율 정보를 이용한 자이로 바이어스 오차 보상식은 아래와 같다.

$$y_{com} = y_o + y_1 T + y_2 \dot{T} \tag{7}$$

여기서, y_{com}는 보상할 자이로 바이어스 오차, y_0, y_1은 온도에 대한 보상 계수, y_2는 온도의 시간 변화율에 대한 보상계수, T는 센서 온도, $\dot{T}$는 온도의 시간 변화율을 나타낸다.

시스템 교정 단계에서 온도를 위 Fig. 2와 같이 변화 시켜 가면서 온도에 대한 자이로 바이어스 오차 보상 계수 y_0, y_1를 계산한다.

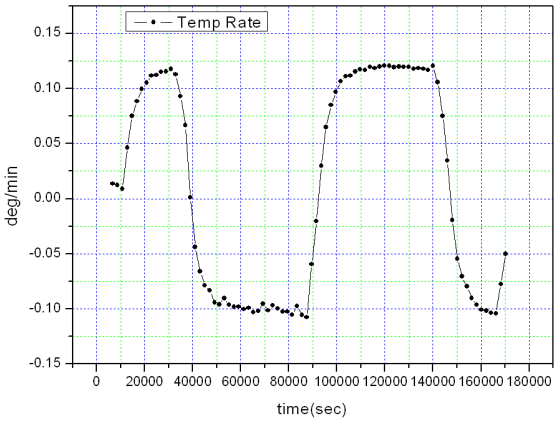


Fig. 4. Time rate of temp. at calibration pro

Fig. 4는 Fig. 1과 같은 온도 변화 과정에서 발생한 시간 변화율 나타낸 것으로 온도 변화율에 대한 함수로 측정된 자이로 바이어스 오차와 $y_o + y_1 T$에 의한 보상값의 차이가 최소가 되도록 y_2를 계산한다.

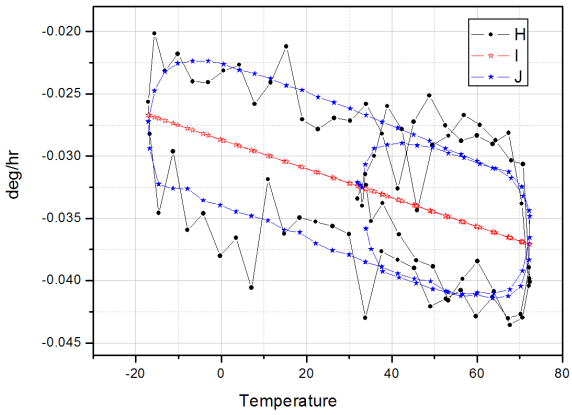


Fig. 5. Gyro Compensation example of Y axis gyro

Fig. 5은 실제 측정된 Y축 자이로 바이어스(—•— H), 온도만의 함수로 표현된 보상식(—☆— I), 온도와 온도의 시간 변화율로 표현된 보상식(—★— J)을 보여준다. 온도 변화율이 보상된 식 (6)에 의해 실제 측정된 자이로 바이어스와 일치되는 모양을 나타낸다.

3. 구현 및 시험 평가 방법

3.1 온도 시간의 변화율 계산

위에 방법으로 계산된 식 (7)은 항법 컴퓨터의 메모리에 기록되고, 실시간 운용 중 센서 데이터에 대해서 식 (7)을 자이로 데이터에 보상하여 항법 계산을 수행한다. 식 (7)의 실시간 온도 시간 변화율($\dot{T}$)을 계산하기 위해서 칼만 필터(Kalman Filter)를 이용한다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + w \tag{8}$$

$$H = [1\,0\,0] \tag{9}$$

시스템 및 측정 모델링은 식 (8), (9)와 같으며, 상태 변수는 $x = [T\ \dot{T}\ \ddot{T}]$와 같다. 온도 시간 변화율을 계산하는 칼만 필터는 항법 컴퓨터에서 1 Hz task을 생성하여 수행하고 $\dot{T}$에 대해서는 0.1 Hz Moving Average (MA)를 수행하여 온도 센서의 노이즈에 대해서 온도 변화율을 안정화 시킨다.

2400 Hz의 자이로의 센서 출력에 대해서 12개의 샘

플을 더하여 200 Hz로 만들고, 식 (7)의 각 계수 y_0, y_1, y_2 정보는 메모리에서 읽는다. 온도 변화률 $\dot{T}$는 Kalman Filter을 이용한다.

3.2 시험평가 방법

본 논문에서 제시된 온도 시간 변화율에 대한 효과를 검증하기 위해서 동일한 센서 데이터에 대해서 온도만을 이용한 기존 방법(시험1)과 식 (7)를 보상하는 방법(시험2)에 대하여, 자체 정렬 모드 단계와 비행 모드 단계로 나누어 그 성능을 검증한다. 센서 데이터는 관성항법장치를 상온에서 운용하는 환경을 대표할 수 있는 상온에서 상승하는 환경과 연속으로 운용하는 환경을 대표할 수 있는 고온에서 연속으로 운용한 데이터을 이용한다.

자체 정렬 모드 단계에서의 시험 평가는 방위각이 0도 일때로 자이로 Y축 및 Z축을 평가할 수 있으며, 비행모드 단계에서의 시험 평가 방법으로 Vn 속도 오차를 관찰함으로써 자이로 X축을 평가할 수 있다. 따라서 위 두 단계의 평가로 3개의 자이로에 대한 성능 평가를 수행할 수 있다.

자체 정렬 모드 단계에서의 평가는 Fig. 9와 같은 온도 변화가 심한 경우에 대해서 자이로 mini bias를 측정하는 방법[2]을 이용한다. 관성항법장치는 자체 정렬 중 입력된 위도 값을 이용하여 예상되는 지구 회전각속도의 계산이 가능하다. 따라서 자이로에서 측정된 N축과 U축 지구 회전 각속도와 정렬 단계에서 계산된 지구회전 각속도를 비교하여 측정된 자이로 바이어스 오차의 추정이 가능하며 이를 자이로 mini bias[2]라 한다. 이 첫 번째 방법으로 시스템 단계에서 자이로 바이어스 오차 보상 성능의 평가는 정렬 모드에서 추정된 mini bias를 이용하여 판단한다. 이 방법은 N축과 U축에 놓인 센서 축에 대해서(여기서는 방위각 0 도 정렬로 y축, z축이 각각 N축, U축에 해당된다.) 오차를 판별할 수 있다.

Fig. 7은 온도의 시간변화율을 나타낸 것으로 자이로 3축의 온도 변화율 보상에서 동일하게 사용된다.

Table 1은 관성항법장치의 온도가 Fig. 6와 같은 환경에서 시험 1과 시험 2에서 각각 측정한 mini bias 값을 나타낸 것으로 롤, 피치, 요가 모드 0인 상태로 N축은 y축 자이로, U축은 z축 자이로를 나타낸다. Fig. 7은 온도의 시간 변화율을 나타낸 것이다. 시험2의 mini bias가 측정값이 작은 것으로 판단할 때, 바이어스 보상에 향상이 이루어진 것을 알 수 있다.

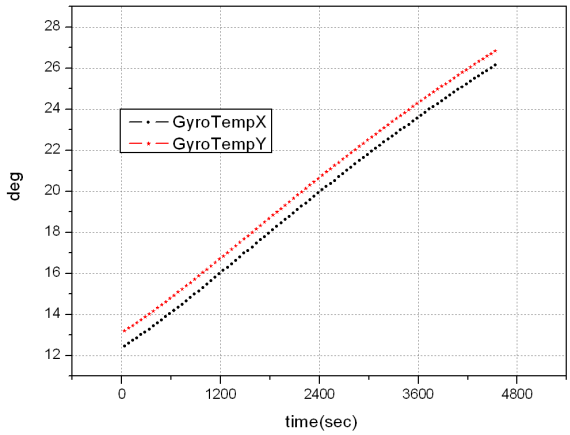


Fig. 6. Case of using mini bias method

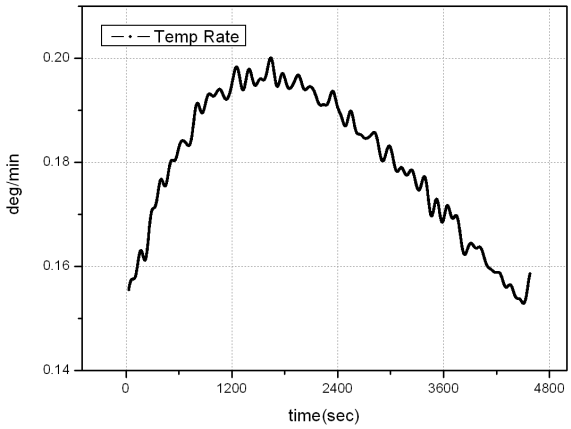


Fig. 7. The rate of temperature

Table 1. Measurement of mini bias

자세	시험1(기존방법)		시험2(제안방법)	
	y축	z축	y축	z축
0도	0.011	0.011	0.002	-0.006

두 번째 방법으로 Fig. 8과 같이 관성항법장치를 연속으로 사용하는 경우를 가정한 온도 변화에 대해서 비행 모드에서의 자이로 바이어스 평가를 수행한다. mini bias 방법은 y 및 z축 평가만 가능하다. 하지만 정렬을 관성항법장치의 램덤 웍(Random walk) 성능만큼 충분히 하였을 경우, 비행 모드에서의 Vn(N축 속도 오차)의 속도 오차는 E축 자이로의 바이어스 오차와 상쇄되고, 비행 모드에서의 속도 오차는 식 (10)과

같은 결과로 나타난다.

$$\delta V_N^{sh} = w_E^{dr} R(1-\cos\nu t) \quad (10)$$

방위각 0도 정렬, 0도 비행 모드에서는 $w_E^{dr} = w_x^{dr}$ 이며, $\nu = \sqrt{g/R}$, R은 지구반경을 의미한다.

Fig. 9에서와 같이 42분 부근에서의 Vn 속도 오차가 시험2의 경우가 작은 것을 알 수 있다.

식 (10)에 의해 Vn 속도 오차 0.6 m/sec에서 제안된 기법으로 Vn 속도 오차가 0.3 m/sec로 감소하였으며, 이는 동일 자세 정렬 후 항법 성능 시험으로 E축 자이로가 50 %의 성능 향상이 되었음을 나타낸다.

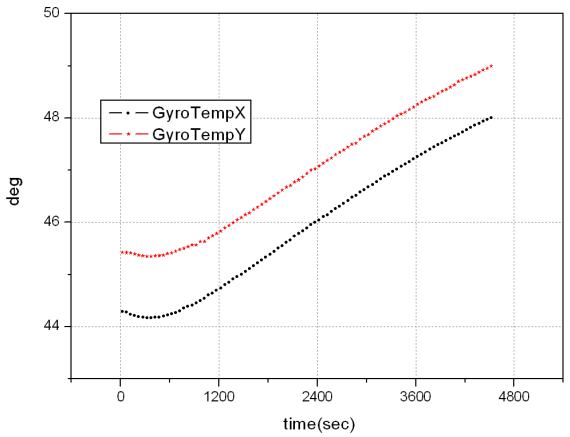


Fig. 8. Case of using velocity error method

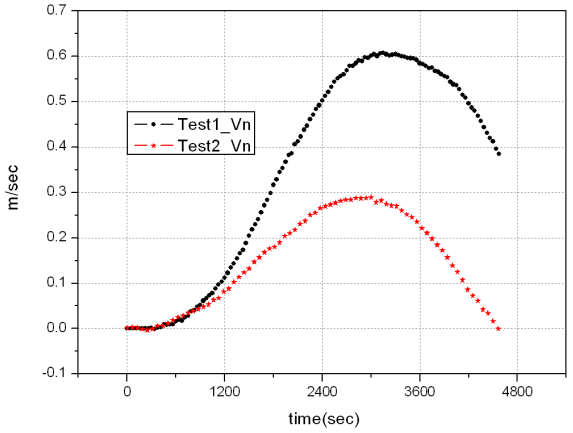


Fig. 9. Test 1 and Test 2 Vn velocity error

4. 결 론

본 논문에서는 링레이저 자이로 바이어스 오차의 온도에 대한 히스테리시스 오차를 온도 시간 변화율 정보를 이용하여 보상하고 그 결과를 평가하였다. 관성항법장치는 자이로 및 가속도계 단품에서의 오차 측정과 더불어 시스템 단계에서 온도에 대한 각각의 오차 성분을 측정하고, 그 값을 보상하여 사용하며, 본 논문에서는 자이로 바이어스 오차를 온도 정보만을 이용하여 보상하는 방법에 더불어 온도 변화율 정보를 이용하여 보상하는 방법을 제시하였다. 교정 단계에서 온도 변화율에 대한 오차 요소를 계산하고, 실제 운용 상황에서 보상하여 mini bias 및 비행 모드에서의 항법 성능을 확인함으로서 그 유용성을 검증하였다.

References

[1] G. M. Siouirs, Aerospace Avionics Systems, A Modern Synthesis, Academic Press, pp. 123～133, 1993.

[2] Oleg S. Salychev, Inertial Systems in Navigation and Geophysics, Bauman MSTU Press, Moscow, pp. 94～120, 1998.

[3] Hong W. S., Lee K. S, Paik B. S., “The Compensation Method for Thermal Bias of Ring Laser Gyro,” IEEE Laser and Electro-Optice Society, 2008.

[4] J. W. Diesel, “Calibration of a Ring Laser Gyro Inertial Navigation System,” Proceedings of the 13th Biennial Guidance Test Symposium, Vol. I, Holloman AFB, New Mexico, 1987.

[5] G. G. Han, M. J. Yu, C. G. Sung, “Improved Calibration Algorithm for SDINS Considering Body-Frame Drift,” AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009.

[6] G. G. Han, M. J. Yu, C. G. Sung, “Improved Calibration Method for SDINS Considering Body-Frame Drift,” International Journal of Control, Automation, and Systems, 2011.