SDINS에서 의사 자이로 바이어스 보상 기법

Compensation of Pseudo Gyro Bias in SDINS

Jungmin Park[†] D Agency for Defense Development, Yuseong P.O. Box 35, Daejeon 34186, Korea

ABSTRACT

The performance of a Strapdown Inertial Navigation System (SDINS) relies heavily on the accuracy of sensor error calibration. Systematic calibration is usually employed when only a 2-axis turntable is available. For systematic calibration, the body frame is commonly defined with respect to sensor axes for ease of computation. The drawback of this approach is that sensor axes may undergo time-varying deflection under temperature change, causing pseudo gyro bias. The effect of pseudo gyro bias on navigation performance is negligible for low grade navigation systems. However, for higher grade systems undergoing rapid temperature change, the error is no longer negligible. This paper describes in detail conditions leading to the presence of pseudo gyro bias, and proposes two techniques for mitigating the error. Experimental results show that applying these techniques improves navigation performance for precision SDINS, especially under rapid temperature change.

Keywords: SDINS, time-varying misalignment, pseudo gyro bias 주요어: SDINS, 시변비정렬, 의사 자이로 바이어스

1. 서론

Strapdown Inertial Navigation System (SDINS)은 외부 도움 없이 3축 자이로와 가속도계로 측정한 각속도와 가속도를 적분 하여 항체의 위치와 속도, 자세를 추정하는 대표적인 추측항법 시스템이다. SDINS의 항법오차가 시간에 따라 누적되는 단점을 극복하기 위해 Global Navigation Satellite System (GNSS)와 결 합한 INS/GNSS 복합항법장치가 주로 사용된다. 저가의 민수용 항법장치부터 고가의 군수용 항법장치까지 INS/GNSS 복합항법 장치가 광범위하게 사용되고 있으나, GNSS 위성 신호 수신이 불 가능한 수중이나 재밍에 의해 신호 교란이 예상되는 지역에서 운 용되는 항법장치는 여전히 고정밀의 SDINS 단독 항법 성능을 요 구한다.

다양한 종류의 자이로와 가속도계가 INS에 사용되고 있으나, 1 Nm/hr급 이상의 정밀항법장치에는 링레이저자이로와 실리콘 또 는 쿼츠 펜듈럼 가속도계가 주로 사용된다. 링레이저자이로는 폐 광경로에서 CW 방향과 CCW 방향의 두 레이저 빔이 회전에 의 한 광학적 광경로 차이를 겪으면서 발생하는 Fringe Pattern으로 회전량을 계측하는 센서이다. 펜듈럼 가속도계는 실리콘 또는 쿼 츠 재질의 펜듈럼이 인가되는 가속도에 의해 변위가 발생할 때 발생한 변위를 원점으로 복귀시키기 위해 인가되는 전류 세기로 가속도를 계측하는 센서이다.

센서의 성능과 무관하게 제작 과정에서 발생하는 공차 또는 소자의 오차에 의해 모든 센서는 오차를 가지게 마련이다. 센서 오차를 추정하고 보상하는 과정을 교정이라고 하는데, 특히 고정 밀의 항법장치일수록 고정밀의 교정 기법이 요구된다. SDINS 교 정에서 추정 및 보상하는 센서오차 항목에는 바이어스, 환산계수 오차, 비정렬오차가 있다. 그 중 비정렬오차는 동체의 직교좌표 계 축으로부터 센서좌표계가 틀어져 있는 각을 의미한다. 각 센 서축은 직교좌표축에 대해 두 방향으로 틀어질 수 있으므로, 3축 자이로와 가속도계를 사용하는 SDINS의 경우 총 12개의 비정렬 오차를 정의할 수 있다.

Received May 08, 2024 Revised May 22, 2024 Accepted Jun 02, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: pjm8153@gmail.com



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

비정렬오차는 동체좌표계로부터 틀어진 각이므로, 동체좌표 계를 어떻게 정의하는지에 따라 값이 결정된다. SDINS에서 동체 좌표계는 임의로 정의할 수 있으나, 계산량 감소 및 교정 장비 저 가화 등을 위해 센서축을 기준으로 동체좌표계를 정의하는 방법 이 일반적이다. 동체좌표계의 3개 축을 일부 센서축과 일치시키 면, 해당 센서축의 비정렬오차는 0이 되고, 나머지 9개 축의 비정 렬오차가 그 오차를 내포하게 된다. 이렇게 구한 비정렬오차는 자세변환을 통해 센서축과 독립인 동체좌표계로 사영될 수 있으 며, 두 동체좌표계로 교정을 수행했을 때 상대적 자세 오프셋을 제외한 항법결과가 동일하다. 그러나 기준 센서축이 온도 변화 등의 이유로 시간에 따라 변하게 되면, 9개 비정렬오차를 보상하 는 것만으로는 기준 센서축 변화에 의한 동체좌표계의 변화를 추 종하지 못한다. 이는 자이로 바이어스와 동일한 효과로 항법오차 를 유발하게 된다. 기준 센서축 변화에 의해 발생하는 오차를 의 사 자이로 바이어스라고 한다 (Sung et al. 2007).

고정밀의 항법장치에서 자이로 바이어스는 매우 중요하다. Yu et al. (2015) 등 센서가 가지는 고유한 바이어스를 추정 및 보상하 는 기법에 대해서는 많은 연구가 진행되어왔으나, 의사 자이로 바 이어스를 보상하는 기법에 대해서는 Han et al. (2011) 한 개의 연 구사례만 확인되었다. 이에 본 논문에서는 새로운 두 개의 의사 자이로 바이어스 보상 기법을 제안하고, 실험을 통해 검증한다.

본 논문의 2장에서는 SDINS의 센서오차 모델링과 비정렬오차 의 정의, 시변 비정렬오차에 의한 의사 자이로 바이어스 발생 원 인을 살펴본다. 3장에서는 의사 자이로 바이어스 보상 방안을 제 시하고, 4장에서는 보상 기법을 적용한 실험 결과를 기술한다. 5 장에서 결론을 맺는다.

2. SDINS에서 의사 자이로 바이어스

2.1 SDINS 센서 오차 모델링

동체좌표계에서 가속도계 오차 δα^B는 Eq. (1)과 같다.

$$\delta \alpha^{B} = \begin{bmatrix} \alpha_{x} \\ \alpha_{y} \\ \alpha_{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_{xz} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} & \alpha_{yz} \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & \alpha_{zz} \end{bmatrix} A^{B}$$
(1)

여기서,

α; 가속도계 바이어스

α": 가속도계 환산계수오차

```
α<sub>ii</sub> (i≠j): 가속도계 비정렬오차
```

A^B: 동체좌표계에서의 참 가속도

가속도계 비정렬오차 α_{ij} 는 *i*축 가속도계가 *j*축 동체좌표계 방 향으로 틀어진 각을 의미한다. Fig. 1은 동체좌표계와 비정렬오차 를 갖는 가속도계 센서축과의 관계를 나타낸다.

동체좌표계에서 자이로 오차 δβ^B는 Eq. (2)와 같다.

$$\delta\beta^{B} = \begin{bmatrix} \beta_{x} \\ \beta_{y} \\ \beta_{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{xx} & \beta_{xy} & \beta_{xz} \\ \beta_{yx} & \beta_{yy} & \beta_{yz} \\ \beta_{zx} & \beta_{zy} & \beta_{zz} \end{bmatrix} \omega^{B}$$
(2)

여기서



Fig. 1. Relationship between body frame (*B* frame) and accelerometer axes (*a* axes) with misalignments.

βⁱ: 자이로 바이어스
 βⁱⁱ: 자이로 환산계수오차
 β^{ij} (i ≠ j): 자이로 비정렬오차
 ω^B: 동체좌표계에서의 참 각속도

자이로, 특히 lock-in 보상을 위해 기계적 디더링을 하는 링레 이저자이로는 압전효과를 이용하여 진동을 인가할 수 있도록 광 경로 블록이 몸체진동스프링을 통해 센서 하우징에 장착된다. 따 라서 외부에서 인가되는 힘에 의해 이 몸체진동스프링이 뒤틀릴 수 있고, 이는 동적 비정렬오차를 유발한다. 이 동적 비정렬오차 는 몸체진동스프링의 재질 및 기구적 형상에 의해 결정되고, 따 라서 동일 설계를 따르는 시스템은 모두 같은 값을 갖는다. 그러 므로 개발 단계에서 측정한 동적 비정렬오차 값은 양산 시 모든 시스템에 공통으로 사용된다. 해당 오차를 추정하기 위해서는 정 밀 3축 레이트 테이블이 필요하며, 저가의 2축 레이트 테이블을 주로 사용하는 SDINS 교정과는 구분된다. 따라서 본 논문에서는 이를 다루지 않는다.

SDINS 교정은 알고리즘에 따라 직접 교정 기법과 간접 교정 기법으로 나뉜다 (Yu et al. 2012). 직접 교정 기법은 와 같이 센서 출력을 직접 지구중력가속도나 지구회전각속도, 레이트 테이블 회전과 비교하는 방식이다. 반면 간접 교정 기법은 센서 출력을 직접 이용하는 대신 순수항법을 계산한 후 속도오차가 0이 되도 록 하는 오차를 계산하는 방식이다. 일반적으로 정밀 SDINS에는 장비 및 장착 오차에 강인한 것으로 알려진 간접 교정 기법을 적 용한다 (Lee & Sung 2004, Gao et al. 2022).

두 기법 사이에는 비정렬오차 교정과 관련해서 큰 차이가 있 다. 바이어스나 환산계수오차는 각 센서축이 갖는 고유한 값이므 로, 기준이 되는 동체좌표계와는 무관하다. 반면 비정렬오차는 직교하는 동체좌표계로부터 3축 센서가 이격된 각이므로, 동체좌 표계의 정의에 따라 값이 달라진다. Fig. 2는 *x*-*z* 평면 상의 동체좌 표계와 센서축과의 비정렬 관계를 나타낸다. 만약 B 좌표계 대신 B 좌표계를 새로 정의하고, B 좌표계의 *x*축이 B 좌표계의 *x*축으 로부터 M_x 만큼 이격되어 있다면, B 좌표계에서의 비정렬오차 중 α_{xx} β_x는 M_x 만큼 감소하고, α'_{xx} β_x는 M_x 만큼 증가한다. 그림에 서 가속도계 비정렬오차는 모두 양으로, 자이로 비정렬오차는 모 두 음으로 나타내었다.

직접 교정 기법은 축별 센서 측정오차가 0이 되도록 파라미터



Fig. 2. Relationships between body frame (B frame), accelerometer axes (a axes), and gyro axes (g axes) on x-z plane.

를 추정하는 기법으로, 동체좌표계를 임의로 설정할 수 없다. 반 면 간접 교정 기법은 속도오차로 표현되는 오차 파라미터를 추정 하는 기법이므로 센서 오차 모델링 시 개발자가 설정한 동체좌표 계를 기준으로 비정렬 값을 계산할 수 있다.

교정 완료 후 센서 오차 보상식은 Eqs. (3-4)와 같다.

$$\hat{A}^{B} = \begin{bmatrix} 1 + \alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_{xz} \\ \alpha_{yx} & 1 + \alpha_{yy} & \alpha_{yz} \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & 1 + \alpha_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{A}^{B} - \begin{bmatrix} \alpha_{x} \\ \alpha_{y} \\ \alpha_{z} \end{bmatrix}$$
(3)

$$\widehat{\omega}^{B} = \begin{bmatrix} 1 + \beta_{xx} & \beta_{xy} & \beta_{xz} \\ \beta_{yx} & 1 + \beta_{yy} & \beta_{yz} \\ \beta_{zx} & \beta_{zy} & 1 + \beta_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \left(\widetilde{\omega}^{B} - \begin{bmatrix} \beta_{x} \\ \beta_{y} \\ \beta_{z} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

여기서 \hat{A}^{B} , \hat{a}^{B} , $\hat{\omega}^{B}$ 는 각각 오차가 보상된 가속도 추정치, 가속 도 측정치를 나타낸다.

2.2 비정렬오차와 동체좌표계 정의

비정렬오차는 센서축이 직교인 동체좌표계로부터 어긋나 있는 값을 의미하므로, 동체좌표계 정의에 따라 달라진다. 2.1절에서 언급했듯이 간접 교정 기법에서는 개발자 설계에 따라 동체좌 표계를 정의하는 것이 가능하다. 이때 특정 센서축 또는 센서축 간 평면이 동체좌표계의 것과 동일하다고 정의하면 일부 비정렬 오차를 0이 되도록 할 수 있다. 3x3 행렬의 원소 일부를 0이 되게 하면 Eqs. (3-4)의 역행렬 계산 시 계산량을 다소 감소시킬 수 있다. 일반화를 위해 가상의 동체좌표계 B frame으로부터 미소각 ϕ_i (*i=x,y,z*) 만큼 회전된 새로운 동체좌표계를 B frame이라고 하면 두 동체좌표계 간 회전변환행렬은 Eq. (5)와 같다.

$$C_B^{B'} = \begin{bmatrix} 1 & -M_{xy} & -M_{xz} \\ -M_{yx} & 1 & -M_{yz} \\ -M_{zx} & -M_{zy} & 1 \end{bmatrix}$$
(5)

미소각 회전변환행렬은 $M_{ij} = -M_{ji}$, $(i \neq j)$ 의 형태를 갖는다. 따라서 B frame에서 비정렬오차는 Eq. (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
\alpha'_{ij} &= \alpha_{ij} - M_{ij} (\text{or } \alpha_{ij} + M_{ji}) \\
\beta'_{ij} &= \beta_{ij} - M_{ij} (\text{or } \beta_{ij} + M_{ji})
\end{aligned}$$
(6)

 M_y 의 선택은 임의로 가능하지만, 주로 Eqs. (1-2)에서 가속도 계 또는 자이로 비정렬오차 행렬의 윗삼각 부분을 0으로 만드는 삼각형 방식이다. $M_{xy} = \alpha_{xy}$, $M_{xz} = \alpha_{xz}$, $M_{yz} = \alpha_{yz}$ 로 정의하면, B frame 에서 가속도계의 비정렬오차는 Eq. (7)과 같아진다.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \alpha'_{yx} & 0 & 0 \\ \alpha'_{zx} & \alpha'_{zy} & 0 \end{bmatrix}$$
(7)

이 같은 동체좌표계 정의를 정성적으로 표현하면 다음과 같 다. "동체좌표계 *x*축은 가속도계 *x*축과 동일하고, 동체좌표계 *x*¬*y* 평면은 가속도계 *x*¬*y* 평면과 동일하다." 반대로 아래 삼각부분을 0으로 만드는 동체좌표계 정의는 "동체좌표계 *z*축은 가속도계 *z* 축과 동일하고, 동체좌표계 *y*-*z* 평면은 가속도계 *y*-*z* 평면과 동일 하다."이고, *M_{xy}*=-α_{*yx*},*M_{yz}*=-α_{*zx*},*M_{yz}*=-α_{*zy*}이다. 이 정의를 적용하면 가속도계 비정렬오차는 Eq. (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 & \alpha'_{xy} & \alpha'_{xz} \\ 0 & 0 & \alpha'_{yz} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(8)

이외에도 대칭형, 순환형 방식으로 정의하면 비정렬오차는 각 각 Eqs. (9), (10)과 같은 형태를 갖는다.

$$\begin{bmatrix} 0 & \alpha'_{xy}/2 & \alpha'_{xz}/2 \\ \alpha'_{xy}/2 & 0 & \alpha'_{yz}/2 \\ \alpha'_{xz}/2 & \alpha'_{yz}/2 & 0 \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} 0 & \alpha'_{yx}/2 & \alpha'_{xx}/2 \\ \alpha'_{yx}/2 & 0 & \alpha'_{zy}/2 \\ \alpha'_{zx}/2 & \alpha'_{yy}/2 & 0 \end{bmatrix}$$
(9)
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \alpha'_{xy} \\ \alpha'_{yx} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha'_{xy} & 0 \\ 0 & \alpha'_{xy} & 0 \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} 0 & \alpha'_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha'_{yz} \\ \alpha'_{zx} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(10)

2.3 의사 자이로 바이어스

비정렬오차에 의한 영향만을 고려하기 위해 바이어스와 환산

계수오차는 없다고 가정하면 동체좌표계 B에서 센서 측정치는 Eq. (11)과 같다.

$$\tilde{A}^{B} = (I + \epsilon_{\alpha})A^{B}
\tilde{\omega}^{B} = (I + \epsilon_{\beta})\omega^{B}$$
(11)

여기서 ϵ_a , ϵ_β 는 Eq. (3)에서 환산계수오차가 0인 3x3 행렬이다. 다음으로 센서오차 추정 및 보상을 위해 동체좌표계는 Eq. (7)의 정의를 따른다고 가정하자. 그러면 교정을 통한 비정렬오차 추정 치는 Eq. (12)와 같다.

$$\hat{\epsilon}_{\alpha} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{yx} + \alpha_{xy} & 0 & 0 \\ \alpha_{zx} + \alpha_{xz} & \alpha_{zy} + \alpha_{yz} & 0 \end{bmatrix}$$
(12)

$$\hat{\epsilon}_{\beta} = \begin{bmatrix} 0 & \beta_{xy} - \alpha_{xy} & \beta_{xz} - \alpha_{xz} \\ \beta_{yx} + \alpha_{xy} & 0 & \beta_{yz} - \alpha_{yz} \\ \beta_{zx} + \alpha_{xz} & \beta_{zy} + \alpha_{yz} & 0 \end{bmatrix}$$
(13)

Eqs. (3-4)의 센서오차 보상식에 Eqs. (12-13)의 추정값을 대입 하면 Eq. (14)와 같다.

$$\hat{A}^{B} = (I + \hat{\epsilon}_{\alpha})^{-1} (I + \epsilon_{\alpha}) A^{B}$$
$$\hat{\omega}^{B} = (I + \hat{\epsilon}_{\beta})^{-1} (I + \epsilon_{\beta}) \omega^{B}$$
(14)

Eq. (14)는 Eq. (15)와 같이 근사할 수 있다.

$$\hat{A}^{B} \simeq (I - \epsilon_{c}) A^{B} \hat{\omega}^{B} \simeq (I - \epsilon_{c}) \omega^{B}$$
(15)

여기서 ϵ_c 는 Eq. (16)과 같다.

$$\epsilon_{C} = \begin{bmatrix} 0 & +\alpha_{xy} & +\alpha_{xz} \\ -\alpha_{xy} & 0 & +\alpha_{yz} \\ -\alpha_{xz} & -\alpha_{yz} & 0 \end{bmatrix}$$
(16)

 $M_{xy}=\alpha_{xy}, M_{xz}=\alpha_{xz}, M_{yz}=\alpha_{yz}$ 이므로 $(I-\epsilon_c)$ 를 Eq. (5)와 비교하면, $(I-\epsilon_c)=C_B^B$ 임을 알 수 있다. 즉, Eqs. (14-15)의 센서오차 보상식은 B 좌표계의 가속도와 각속도를 B 좌표계로 사영시킨다. 따라서 $(I-\epsilon_c)$ 의 자세 차이를 제외하면 동일한 항법결과를 산출한다.

여기서 동체좌표계 B의 기준축으로 삼은 세 센서축의 비정렬 오차가 시불변이면 문제가 발생하지 않는다. 그러나 센서축은 온 도 변화에 따른 기구적 뒤틀림 등에 의해 시간에 따라 변할 수 있 다 (Ban et al. 2022). 이는 B 좌표계 대비 B 좌표계가 변하는 것 을 의미한다. 기준 비정렬오차가 시변이면 Eqs. (14-15)의 두 센서 오차 보상식만으로는 B 좌표계에 대한 B 좌표계의 자세 변화가 반영되지 않는다. 이 현상을 살펴보기 위해서 먼저 좌표변환행렬 C[®] 의 미분식으로부터 Eq. (17)을 얻을 수 있다.

$$\dot{C}_{B}^{B'} = -\dot{\epsilon}_{C}$$

$$\dot{C}_{B}^{B'} = C_{B}^{B'}[\omega_{IB}^{B} \times] - \left[\omega_{IB'}^{B'} \times\right] C_{B}^{B'}$$
(17)

여기서 $\omega_{lB}^{B'}$, $\omega_{lB}^{B'}$ 는 각각 Eq. (14)의 $\hat{\omega}^{B}$, ω^{B} 에 해당된다. Eq. (17)을 $\omega_{B}^{B'}$ 에 대해서 정리하면 Eq. (18)과 같다.

$$\left[\omega_{IB'}^{B'}\times\right] = C_B^{B'}[\omega_{IB}^B\times]C_{B'}^B + \dot{\epsilon}_C + \dot{\epsilon}_C\epsilon_C$$
(18)

여기서 $\dot{\epsilon}_c \epsilon_c \simeq 0$ 이라고 가정하면, Eq. (19)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\omega_{IB'}^{B'} = (I - \epsilon_C)\omega_{IB}^{B} + \omega_{BB'}^{B'}
\omega_{BB'}^{B'} = \left[+ \dot{\alpha}_{yz}, - \dot{\alpha}_{xz}, + \dot{\alpha}_{xy} \right]^T$$
(19)

Eq. (19)를 Eq. (15)의 자이로 오차 보상식과 비교하면, 센서오차 보상식에 ω_{B}^{B} 이 누락되어 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급했듯 이 *B* 좌표계에 대한 *B* 좌표계의 자세 변화가 각속도에 포함되어 있지 않음을 의미한다. ω_{B}^{B} 는 항법오차에 자이로 바이어스와 동 일한 형태로 오차를 유발하므로 의사 자이로 바이어스라고 명명 한다. 온도 변화율은 시간에 따라 변하므로 해당 오차는 랜덤 상 수 형태가 아니지만, 전원 인가부터 항법장치 내부 발열 등에 의 한 온도변화가 일정 수준 이하로 수렴할 때까지의 온도 변화율을 고려하면 고정밀 항법장치에서는 교정 정확도에 미치는 영향이 적지 않을 수 있다.

3. 의사 자이로 바이어스 보상 기법

의사 자이로 바이어스 발생 원인은 동체좌표계 기준 센서축의 시변 특성 때문이다. 그러므로 기준 센서축 선정 없이 12개의 비 정렬을 모두 갖도록 센서축과 무관하게 동체좌표계를 선정하면 된다. 일반적으로 SDINS 교정에 2축 레이트 테이블을 사용하는 데, 2축 레이트 테이블 상에서는 12개 비정렬오차가 모두 가관측 하지 않은 것으로 알려져 있다. 즉, 12개의 비정렬오차를 모두 추 정하기 위해서는 고가의 3축 레이트 테이블을 도입해야 한다. 그 러므로 비교적 저렴한 2축 레이트 테이블을 활용 시 의사 자이로 바이어스 보상 기법은 비용절감 측면에서 의의를 갖는다.

이번 장에서는 편의성을 위해 $M_{xy}=\alpha_{xy}$, $M_{xz}=\alpha_{xz}$, $M_{yz}=\alpha_{yz}$ 로 동체 좌표계를 정의하여 보상 기법을 유도한다. 유사한 방식으로 2장 에 기술한 다른 동체좌표계 정의에 대해서도 보상 기법을 유도할 수 있다.

3.1 기준 센서축 시변율을 고려한 동체좌표계 정의 및 교정계수 변환

펜듈럼 가속도계는 일반적으로 직경 1 cm 내외 크기의 펜듈럼 이 2개의 힌지를 통해 가속도계 케이스에 연결된다 (Fig. 3). 가속 도가 인가되면 펜듈럼이 관성에 의해 가속도 인가 방향과 동일방 향으로 힘을 받는다. 가속도계의 재평형회로는 펜듈럼 양면에 장 착된 코일에 전류를 흘려 정전기력을 발생시켜서 펜듈럼을 원점 으로 복귀시킨다. 이때 코일에 인가되는 전류는 인가되는 가속 도에 비례라고, 정밀저항으로 통해 인가된 전류를 계측한다. 제 조 공정 중 펜듈럼 및 힌지, 코일 등에 비대칭이 존재하고, 힌지 의 경우 두께가 약 10 μm 정도이므로 펜듈럼은 온도 등의 영향에 의해 펜듈럼축과 힌지 방향으로 뒤틀리게 된다. 링레이저자이로 는 Zerodur 재질의 공진기가 몸체진동 스프링을 통해 자이로 케 이스에 고정된다 (Fig. 4). 공진기 자체가 열변형이 적고 몸체진동 스피링 역시 거의 강체일뿐만 아니라, 가속도계의 힌지와 비교하 면 매우 큰 구조물이기 때문에 상대적으로 가속도계보다 열변형 이 적을 것으로 예상된다.



Fig. 3. Structure example of pendulum of silicon or quartz pendulous accelerometer (Beitia et al. 2015).



Fig. 4. Structure example of ring laser gyroscope (1) cavity case; (2, 15) photodetectors; (3, 14) planar mirrors; (4) anode; (5, 11) spherical mirrors; (6, 10) piezoelectric correctors; (7) vibro suspen¬sion; (8) aperture; (9) rotor of angular velocity sensor; (12) getter pump; (13) anode stem; (16) cathode (Kuznetsov et al. 2015).



Fig. 5. Three accelerometers mounting example.

센서 수준에서 가속도계와 자이로의 비정렬오차 측정 결과가 있다면 두 센서의 비정렬오차의 온도 변화율 특성을 직접 비교 할 수 있다. 그러나 그런 결과가 없다면, 가속도계 기준 교정결과 로부터 자이로의 비정렬오차 온도 변화율을 예측할 수 있다. Eq. (13)으로부터 자이로 비정렬오차 추정치는 $\hat{\beta}_{ij}=\beta_{ij}-\alpha_{ij}, \hat{\beta}_{ji}=\beta_{ji}+\alpha_{ij}$ 이 다. 만약 $\beta_{ij}\beta_{ji}$ 온도변화율이 α_{ij} 대비 상대적으로 작다면, $\hat{\beta}_{ij}, \hat{\beta}_{ji}$ 의 온도변화율은 크기는 비슷하고, 서로 부호가 반대이다. 따라서 기 획득한 교정결과로부터 자이로 비정렬오차 $\hat{\beta}_{ij}, \hat{\beta}_{ji}$ 의 온도변화 율이 서로 상이한 정도로 가속도계 대비 온도변화율이 작은지 여 부를 간접적으로 판단할 수 있다.

가속도계 기준축 교정 결과로부터 자이로 기준축 교정 결과로 변환할 수 있다. 먼저 가속도계 기준축 교정은 $M_{xy}=\alpha_{xy}, M_{xz}=\alpha_{xz}$ $M_{yz}=\alpha_{yz}$ 이고, 이때 비정렬오차 추정치는 Eq. (20)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_{xy} &= 0, & \hat{\alpha}_{yx} = \alpha_{yx} + \alpha_{xy} \\ \hat{\alpha}_{xz} &= 0, & \hat{\alpha}_{zx} = \alpha_{zx} + \alpha_{xz} \\ \hat{\alpha}_{yz} &= 0, & \hat{\alpha}_{zy} = \alpha_{zy} + \alpha_{yz} \\ \hat{\beta}_{xy} &= \beta_{xy} - \alpha_{xy}, & \hat{\beta}_{yx} = \beta_{yx} + \alpha_{xy} \\ \hat{\beta}_{xz} &= \beta_{xz} - \alpha_{xz}, & \hat{\beta}_{zx} = \beta_{zx} + \alpha_{xz} \\ \hat{\beta}_{yz} &= \beta_{yz} - \alpha_{yz}, & \hat{\beta}_{zy} = \beta_{zy} + \alpha_{yz} \end{aligned}$$

$$(20)$$

자이로 기준축 교정은 $M_{xy}=\beta_{xy}, M_{xz}=\beta_{xz}, M_{yz}=\beta_{yz}$ 이고, 이 경우 비정렬오차 추정치는 Eq. (21)과 같다.

$$\begin{aligned} \widehat{\alpha'}_{xy} &= \alpha_{xy} - \beta_{xy}, & \widehat{\alpha'}_{yx} &= \alpha_{yx} + \beta_{xy} \\ \widehat{\alpha'}_{xz} &= \alpha_{xz} - \beta_{xz}, & \widehat{\alpha'}_{zx} &= \alpha_{zx} + \beta_{xz} \\ \widehat{\alpha'}_{yz} &= \alpha_{yz} - \beta_{yz}, & \widehat{\alpha'}_{zy} &= \alpha_{zy} + \beta_{yz} \\ \widehat{\beta'}_{xy} &= 0, & \widehat{\beta'}_{yx} &= \beta_{yx} + \beta_{xy} \\ \widehat{\beta'}_{xz} &= 0, & \widehat{\beta'}_{zx} &= \beta_{zx} + \beta_{xz} \\ \widehat{\beta'}_{yz} &= 0, & \widehat{\beta'}_{zy} &= \beta_{zy} + \beta_{yz} \end{aligned}$$
(21)

따라서 Eq. (20)과 Eq. (21)을 비교하면, 가속도계 기준축 교 정계수로부터 자이로 기준축 교정계수로의 변환식은 Eq. (22)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}'_{xy} &= -\hat{\beta}_{xy}, & \hat{\alpha}'_{yx} &= \hat{\alpha}_{yx} + \hat{\beta}_{xy} \\ \hat{\alpha}'_{xz} &= -\hat{\beta}_{xz}, & \hat{\alpha}'_{zx} &= \hat{\alpha}_{zx} + \hat{\beta}_{xz} \\ \hat{\alpha}'_{yz} &= -\hat{\beta}_{yz}, & \hat{\alpha}'_{zy} &= \hat{\alpha}_{zy} + \hat{\beta}_{yz} \\ \hat{\beta}'_{xy} &= 0, & \hat{\beta}'_{yx} &= \hat{\beta}_{yx} + \hat{\beta}_{xy} \\ \hat{\beta}'_{xz} &= 0, & \hat{\beta}'_{zx} &= \hat{\beta}_{zx} + \hat{\beta}_{xz} \\ \hat{\beta}'_{yz} &= 0, & \hat{\beta}'_{zy} &= \hat{\beta}_{zy} + \hat{\beta}_{yz} \end{aligned}$$
(22)

3.2 자이로 출력 보상

가속도계 수준에서 온도에 대한 비정렬오차 온도변화율을 사 전에 측정했다면, 이 값을 활용하여 Eq. (15)에서 누락된 ω_{Br}^{e} 를 직 접 계산 및 보상이 가능하다. 여기서 보상이라 함은 기존 교정 결 과에 누락된 ω_{Br}^{e} 를 더해주는 것을 의미한다. ω_{Br}^{e} 를 계산하기 위 해서는 가속도계 3축의 장착 구조를 알아야 한다. Fig. 5는 국내에 서 개발했던 항법장치에 가속도계가 장착된 방향의 한 예시이다. i축 가속도계 입력축이 힌지축과 펜듈럼축에 대해 회전되는 비정 렬오차를 각각 M_{i}^{OA} , M_{i}^{PA} 라고 하면, Fig. 5로부터 기준 센서축 비 정렬오차의 온도변화율은 Eq. (23)과 같다.

$$\frac{d\alpha_{xy}}{dT} = \frac{dM_x^{OA}}{dT}, \quad \frac{d\alpha_{xz}}{dT} = \frac{dM_x^{PA}}{dT}, \quad \frac{d\alpha_{yz}}{dT} = -\frac{dM_y^{OA}}{dT}$$
(23)

시스템 수준의 교정계수를 온도에 대한 3차 또는 4차 다항식 으로 산출하듯이 가속도계 수준의 비정렬오차도 온도에 대한 다 항식으로 산출하므로, Eq. (23)의 온도 변화율은 다항식 미분으로 쉽게 구할 수 있다. 그러면 누락된 비정렬오차 시변율은 Eq. (24) 와 같다.

$$\omega_{BB'}^{B'} = \left[\frac{dM_x^{OA}}{dT_x}\frac{dT_x}{dt} \quad \frac{dM_x^{PA}}{dT_x}\frac{dT_x}{dt} \quad -\frac{dM_y^{OA}}{dT_y}\frac{dT_y}{dt}\right]^T \quad (24)$$

여기서 T_x, T_y는 x축과 y축 가속도계의 온도이다. 온도 변화율 추



Fig. 6. Misalignment temperature rates of pendulous axis and hinge axis of silicon pendulous accelerometers (PA: pendulous axis, OA: hinge axis).

 Table 1. Statistics of misalignment temperature rates of pendulous axis and hinge axis of silicon pendulous accelerometers.

		Pendulous axis	Hinge axis
Tomporature rate of missionments [acco/%C]	Mean	-0.10679	-0.30941
Temperature rate of misangiments [asec/ C]	Standard deviation	0.60282	0.58077
Predicted pseudo gyro bias (under 10°C/hr)		-0.00197 ~ +0.00138	-0.00247 ~ +0.00075



Fig. 7. Temperature rates of the sum of estimated misalignments $\hat{\beta}_{i}$ and $\hat{\beta}_{ir}$

정은 2차 Fading memory 필터를 적용한다 (Statman 1987).

4. 의사 자이로 바이어스 보상 기법 검증

제안한 의사 자이로 바이어스 보상 기법의 효용성을 검증하기 위해 국내에서 개발한 링레이저자이로 관성항법장치 대상으로 비정렬오차의 온도변화율과 가속도계 축 기반 교정결과, 정지상 태에 제안한 기법 적용 전과 후의 순수항법 성능을 분석했다.

먼저 센서의 비정렬오차 온도변화율을 알아보기 위해 국내 개 발 실리콘 펜듈럼 가속도계 60조의 온도변화율의 평균과 표준편 차를 산출했다. Fig. 6과 Table 1은 변화율의 히스토그램과 통계치 를 보여준다. 온도변화율이 10°C/hr라고 가정하면 펜듈럼축과 힌 지축 방향으로 평균 -3e-4 deg/hr, -8.6e-4 deg/hr의 의사 자이로

바이어스가 발생할 수 있다.

자이로의 경우는 센서 수준에서 비정렬오차를 측정하지 않았 기 때문에, 3장에서 언급한대로 가속도계 기준 교정결과로부터 간접적으로 온도변화율을 분석했다. 교정은 $\hat{\beta}_{ij}=\beta_{ij}-\alpha_{ij}$, $\hat{\beta}_{ji}=\beta_{ji}+\alpha_{ij}$ 의 비정렬오차를 추정하므로, $\hat{\beta}_{ij}+\hat{\beta}_{ji}$ 를 계산한 후 이 값의 온도변화 율을 계산했다. Fig. 7은 이 온도변화율의 히스토그램과 정규분포 로 적합한 곡선을 보여준다. 만약 자이로의 비정렬오차 온도변화 율이 가속도계보다 크다면 통계적으로 이 온도변화율은 넓은 범 위에 걸쳐 분포할 것이다. 그러나 통계를 보면 평균 0.135 asec/°C, 표준편차 0.22732 asec/°C로 나타났고, 이는 가속도계 온도변화 율보다 약 3배 작은 값이다. 즉, 링레이저자이로의 비정렬오차 온 도변화율이 실리콘 가속도계보다 약 3배 작다고 추정할 수 있다. 따라서 링레이저자이로와 실리콘 가속도계를 탑재한 관성항법장 치는 자이로를 기준축으로 정하는 것이 의사 자이로 바이어스 관 점에서 유리하다.

의사 자이로 바이어스 보상 기법 적용 실험을 위해 비정렬오 차 추정치 $\hat{\beta}_{xy}$ 와 $\hat{\beta}_{yx}$ 가 약 90 °C 온도 범위에서 154 asec 변하는 시 스템을 선정했다. 해당 시스템에서 가속도계 비정렬오차 온도변 화율은 약 1.7 asec/°C 정도로, 한 시간에 10 °C 온도 상승 환경에 서 약 0.0046 deg/hr의 의사 자이로 바이어스를 유발할 것으로 예 상했다. Fig. 8은 대상 시스템의 자이로 비정렬오차 추정치를 나 타내는데, $\hat{\beta}_{xy}$ 와 $\hat{\beta}_{yx}$ 는 각각 -20 °C ~ +70 °C 범위에서 약 150 asec 변해 앞서 예상한 의사 자이로 바이어스의 수준이었다. 이로부터 온도에 따른 자이로 비정렬오차의 변화가 가속도계 기준축의 변 화에 의해 주로 발생한 것을 알 수 있었다. $\hat{\beta}_{xx}$ 와 $\hat{\beta}_{zy}$. 그리고 $\hat{\beta}_{y}$ 와 $\hat{\beta}_{zy}$ 는 각각 서로 온도변화율이 달랐는데, 이는 자이로축 비정렬 또한 온도에 따라 변했음을 의미한다. 그러나 그 크기가 가속도 계축에 비해 여전히 작았다. 비교를 위해 실험용 시스템의 가속 도계 단품 시험 결과를 Fig. 9와 Table 2에 나타냈다. 앞서 자이로



Fig. 8. Estimated gyro misalignments of the experimental system.



Fig. 9. Estimated accelerometer misalignments of the reference axes of the experimental system.

 Table 2. Misalignment temperature rates of the reference axes of the experimental system.

Misalignment temperature rates [asec/°C]		Anticipated pseudo gyro bias [deg/hr]				
		Body axis	Temperature rate [°C/hr]			
			10	5	1	
X axis OA	+1.67	Z	+0.00464	+0.00232	+0.00046	
X axis PA	-0.98	Y	-0.00272	-0.00136	-0.00027	
Y axis OA	+0.44	Х	+0.00122	+0.00061	+0.00012	

비정렬오차 추정치로부터 예측한 가속도계 비정렬오차 온도변화 율이 1.7 asec/℃였고, 가속도계 센서 수준의 결과도 1.6 asec/℃로 값이 거의 일치했다.

의사 자이로 바이어스 보상 기법 적용 실험은 상온에서 센서 데이터를 획득한 후 후처리 시뮬레이션으로 보상 전과 후의 항법 성능을 분석했다. 15분 자체정렬 시간을 포함해서 총 1시간 15분 의 데이터를 연속해서 3회 획득했다. 관성항법장치는 내부 발열 때문에 전원 인가 직후의 온도 변화율은 크지만, 시간이 지남에 따라서 수렴하는 경향을 보인다. 시간 순서에 따른 케이스 별로 온도변화량은 Case 1이 27.4 ~ 36.6 °C, Case 2가 36.7 ~ 40.8 °C, Case 3이 41.2 ~ 42.5 °C였고, 온도변화율로 환산하면 각각 7.36 °C/hr, 3.28 °C/hr, 1.04 °C/hr이다. 앞서 기준축 온도변화율과 센 서 온도변화율을 고려하면 Case 1의 경우 Z축 방향으로 약 3.4e-3 deg/hr의 의사 자이로 바이어스 발생이 예상된다. Figs. 10-12는 의사 자이로 바이어스 보상 전과 자이로 기준축으로 교정 계수를 변경하는 방법(C1), 자이로 출력 보상 방법(C2)을 적용 했을 때 의 속도오차와 위치오차 결과이다. Fig. 10을 보면 보상 전의 동거 속도오차가 1.06 m/sec 에서 C1은 0.80 m/sec, C2는 0.84 m/sec로 각각 0.26 m/sec, 0.22 m/sec가 감소했다. 경도오차는 C1이 557 m, C2가 466 m 감소했다. 이 결과로부터 1 Nm/hr 급 이상의 항법 장치에서는 의사 자이로 바이어스 보상이 반드시 필요함을 알 수 있다. Figs. 11과 12는 Case 2, Case 3 결과인데 1시간 동안 온도변



Fig. 10. Case 1 velocity and position error comparison.



Fig. 11. Case 2 velocity and position error comparison.





화율이 작아지면서 Case 1 대비 의사 자이로 바이어스 보상 효과 역시 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 중대형 무인기나 잠수함 등 의 대형 플랫폼에서 장시간 항법장치를 운용하는 경우보다 유도 탄 등 발사 후 1~2시간 이내 운용이 종료되는 플랫폼에서 의사 자 이로 바이어스 보상이 더 중요함을 시사한다.

5. 결론

SDINS가속도계 센서축을 기준으로 하는 동체좌표계를 사용 하여 간접교정을 수행할 경우, 센서축의 온도변화율에 따라 의 사 자이로 바이어스가 발생함을 수식 유도 및 실험을 통해 확인 했다. 또한 2축 레이트 테이블을 활용한 두 가지 의사 자이로 바 이어스의 보상 기법을 제안하고, 보상 여부에 따른 항법 성능을 분석했다. 그 결과 운용시간이 짧은 고정밀 항법장치의 경우 온 도가 안정화되지 않아 의사 자이로 바이어스 보상이 항법 성능에 유의미한 영향을 미친다는 것을 확인했다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Agency for Defense Development funded by the Korean Government.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Ban, J., Chen, G., Meng, Y, & Shu, J. 2022, Calibration method for misalignment angles of a fiber optic gyroscope in single-axis rotational inertial navigation systems, Optics Express, 30, 6487-6499. https://doi.org/10.1364/ OE.449629
- Beitia, J., Clifford, A., Fell, C., & Loisel, P. 2015, in Proceedings of 2015 DGON International Sensors and Systems Symposium (ISS), Karlsruhe, Germany, 22-23 Sep 2015. https://doi.org/10.1109/InertialSensors.2015.7314256
- Gao, C., Wei, G., Wang, L., Wang, Q., & Liao, Z. 2022, A Systematic Calibration Modeling Method for Redundant INS with Multi-Sensors Non-Orthogonal Configuration, Micromachines, 13, 1684-. https://doi.org/10.3390/ mil3101684
- Han, K.-J., Sung, C.-K., & Yu, M.-J. 2011, Improved Calibration Method for SDINS Considering Body-Frame Drift, International Journal of Control, Automation, and Systems, 9, 497-505. https://doi.org/10.1007/s12555-011-0309-x
- Kuznetsov, A. G., Molchanov, A. V., Chirkin, M. V., & Izmailov, E. A. 2015, Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation, Quantum Electronics, 45, 78-88. https://doi.org/10.1070/QE2015v045n01ABEH015420
- Lee, T.-G. & Sung, C.-K. 2004, Estimation Technique of Fixed Sensor Errors for SDINS Calibration, International Journal of Control, Automation, and Systems, 2, 536-541. https://koreascience.kr/article/JAKO200411923048757. page
- Statman, J. I. 1987, Simplified Solution for a Class of Fading Memory Filters, IEEE Transactions on Aerospace and

Electronic Systems, 23, 355-360. https://doi.org/10.1109/ TAES.1987.310833

- Sung, C.-K., Cho, Y.-C., Lee, Y.-S., Lee, T.-G., & Lee, Y.-J. 2007, Effects of Time Varying Misalignment Errors on SDINS, in 2007 KIMST Conference, Busan, Korea, 16-17 Aug 2007.
- Yu, H., Kim, C. J., Sung, C.,-K., Lee, I., Park, S. E., et al. 2015, Compensation Method of Gyro Bias Hysteresis Error using the Rate of Temperature, Journal of the KIMST, 18, 109-114. https://doi.org/10.9766/KIMST.2015.18.2.109
- Yu, H., Kim, T., Kim, C. J., Lee, Y.-S., & Park, H.-W. 2012, A Study on Methods of Measuring and Compensating Misalignment between Inertial Sensor Body and Housing Frame, Journal of the KIMST, 15, 374-380. https://doi.org/10.9766/KIMST.2012.15.4.374



Jungmin Park received a Master's degree in aerospace engineering from Seoul National University in 2019. The individual is currently a researcher at Agency for Defense Development. Fields of specialization include strapdown inertial navigation systems, INS/GNSS integration and alternative

navigation systems.