

슬러주기 오차 영향에 따른 스트랩다운 관성항법시스템 성능 분석

고보성*, 이주한*, 박소진*, 김응주*, 송진우*
 세종대학교 지능기전공학과/지능형드론융합전공*

Analysis of SDINS Performance According to Schuler Period Error Effect

Bo Sung Ko*, Joo Han Lee*, So Jin Park*, Eung Ju Kim*, Jin Woo Song*

Department of Intelligent Mechatronics Engineering and Convergence Engineering for Intelligent Drone Engineering Sejong University*

Abstract - To configure an optimal precision SDINS, it's error should be considered and analyzed. In this paper, the error propagation, caused by inertial sensor bias and Schuler period effect, is handled. Through the simulation, it is shown that inertial navigation with high-performance IMU, having a specification of gyroscope bias $0.0035^\circ/h$ and accelerometer bias $30\mu g$, has error with a Schuler taking 33.9%, a meaningful portion to be considered.

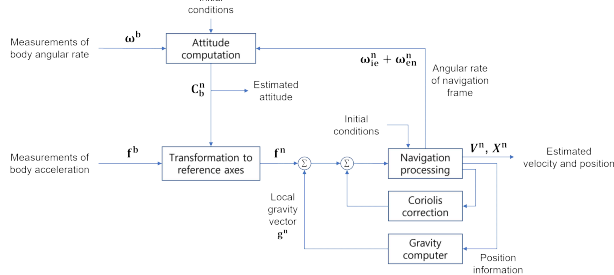
1. 서 론

잠수함의 잠항과 같이 GNSS 측위가 불가능한 특별한 상황에서 지속적으로 정확한 항법 정보를 획득하기 위해선 안정적인 센서 정보를 제공할 수 있는 높은 성능의 관성항법장치가 필수적이다. 최적의 관성항법시스템을 구성하기 위해서는 센서 오차 요소에 따른 항법 오차를 분석하는 것은 필수적이다. 본 논문은 간략화된 관성항법시스템의 오차 요인과 센서 바이어스에 의한 위치오차의 추세를 분석해 센서 오차와 관성항법시스템 오차의 상관관계를 분석함으로써, 센서 선정과 운용에 있어서 유의미한 가이드라인을 제공하였다.

2. 센서 성능에 따른 오차 추세와 슬러주기 오차의 영향 분석

2.1 관성항법시스템의 구성과 특징

스트랩다운 관성항법시스템(strapdown inertial navigation system, SDINS)은 3축 가속도계와 3축 자이로스코프(gyroscope)로 구성된 관성측정장치를 기반으로 각각의 센서에서 얻은 가속도와 각속도를 이용해 위치를 계산한다. 스트랩다운 관성항법시스템의 블록선도는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 스트랩다운 관성항법시스템의 블록선도

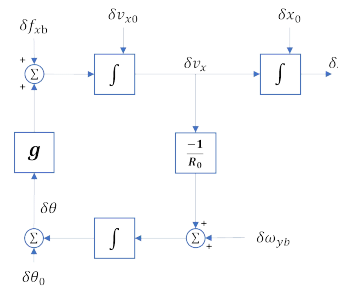
관성항법시스템은 외부 환경으로부터 영향을 받지 않으며 짧은 기간 동안 정확한 위치 정보를 제공하는 반면 그 기간이 길어질수록 그 값이 발산하며 정확도가 감소한다. 따라서 잠수함과 같이 장기간 GNSS(global navigation satellite system)와 같은 위치 정보를 보상에 줄 수 없는 환경에서 관성항법시스템만으로 운용하는 경우 효과적인 항법시스템을 구성하기 위해서, 센서의 오차에 따른 관성항법시스템의 오차 추이를 분석하는 것

이 매우 중요하다. 즉 센서 오차에 의해 정량적으로 발산하는 오차와 시스템 특성에 따른 오차를 구분하여 분석함으로써 작전 운용에 알맞은 최적의 센서 사양을 선택할 수 있다.

2.2 관성항법시스템에서 발생하는 오차 종류

관성항법시스템의 오차 요인은 크게 계산 오차, 초기 정렬 불량으로 인한 오차, 관성 센서의 오차와 같이 세 가지로 분류할 수 있다. 계산 오차는 대역폭 제한(bandwidth limitation), 계산의 올림과 버림, 적분 방법에서 생기는 오차가 있지만 그 비중이 상대적으로 낮다. 초기 정렬 불량은 정렬 과정을 구체적으로 모델링하지 않을 경우 센서의 오차로써 시스템에 영향을 준다.

스트랩다운 관성항법시스템을 설계할 시 가속도계에서 얻은 가속도를 두 번 적분하여 위치 정보를 얻는다. 자세의 영향을 보상하고 중력가속도 성분을 제거하기 위해 <그림 2>과 같은 페루프 형태를 취하며, 이러한 페루프를 슬러 루프(Schuler loop)라고 한다[1].



<그림 2> 스트랩다운 관성항법시스템 슬러 루프 블록선도

슬러 루프는 자세 계산을 위해 측정된 비력(specific force)을 한번 적분해 속도를 만들고 지구의 반지름 R_0 을 나누어 이동률(transport rate)을 구한다. 또한 INS가 지구 위를 이동하며 바뀌는 중력가속도 성분을 보상하기 위해 중력가속도 g 를 자세에 곱해 이용한다. 이러한 슬러 루프에 자이로스코프 또는 가속도계 오차 등이 들어가 생기는 $\sqrt{g/R_0}$, 약 84.4분의 주기를 갖는 오차 성분이 슬러 진동이다.

푸코(Foucault) 진동과 지구 자전 진동은 슬러 진동과 같이 장시간에 걸쳐 전파되는 오차 성분이다. INS의 진동면이 지면의 자전으로 회전하기 때문에 생기는 자세의 진동을 푸코 진동이라 하며 $2\pi/\Omega\sin L$, 약 30시간의 주기를 갖는다. 지구 자전 진동은 주로 위도와 방위각에서 주로 나타나는 진동으로, 지구의 자전 주기와 직접적인 관련이 있으며 24시간의 주기를 갖고 나타난다.

2.3 관성항법시스템의 슬러주기에 따른 오차

지구 자전 진동과 푸코 진동은 그 주기가 매우 길고 센서와 관계없이 지구 자전에 의해 생기는 현상으로 관성항법시스템의 오차 분석 시에는 무시할 수 있다. 이러한 오차 성분을 제외하고 센서의 오차와 슬러 주기에 의해 발생하는 오차 추세를 나타

내는 수식은 다음과 같이 세 가지로 구성된다[1]. 우선 바이어스(bias)에 의한 북향으로의 위치 오차는 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_0 \left(t - \frac{\sin \omega_s t}{\omega_s} \right) \delta B_{gE} \quad (1)$$

여기서 R_0 은 지구의 반지름, ω_s 는 슬러 진동의 진동수를 나타내며 δB_{gE} 는 동쪽 방향의 자이로스코프 바이어스 오차를 의미한다.

수직방향의 자이로스코프 바이어스로 인한 위치 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

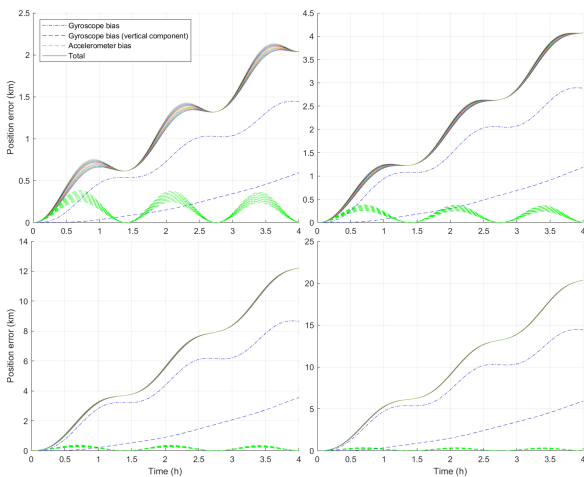
$$-R_0 \dot{\lambda} \cos L \left(\frac{t^2}{2} - \frac{1 - \cos \omega_s t}{\omega_s^2} \right) \delta B_{gD} \quad (2)$$

여기서 $\dot{\lambda}$ 는 $\Omega + v_E / R_0 \cos L$ 과 같으며 Ω 는 지구의 자전 속도, v_E 는 속도의 동쪽 성분, L 은 위도를 나타낸다. 가속도 바이어스에 의한 위치오차의 추세를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{1 - \cos \omega_s t}{\omega_s^2} \right) \delta B_{aN} \quad (3)$$

2.4 슬러주기 오차에 따른 관성항법 오차 분석 시뮬레이션

관성항법시스템의 위치 오차를 시간에 따라 <그림 3>에 나타냈다. 이때, 자이로스코프 바이어스와 가속도계 바이어스는 정밀 관성항법시스템에 적용될 센서의 전반적인 성능을 고려해 Intermediate 성능 등급인 $0.15mg$, $0.5^\circ/h$ 에서부터 가장 고성능의 Marine 성능 등급인 $30\mu g$, $0.0035^\circ/h$ 까지의 값을 이용했다[2].

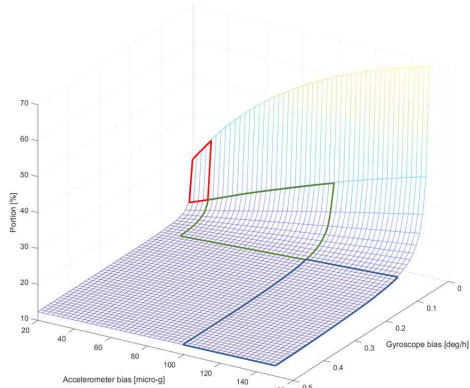


<그림 3> 센서 바이어스에 따른 위치 오차

<그림 3>의 각 사분면, 가장 상단의 추세선은 각 사분면에 그려진 모든 위치오차의 합이다. 파란 점선과 초록색 점선은 각각 자이로스코프 바이어스에 의한 위치오차, 가속도계 바이어스에 의한 위치오차이다.

가속도계의 바이어스로 인한 위치 오차는 슬러 튜닝(Schuler tuning)으로 인해 유계 되어있는 형태이며, 자이로스코프의 바이어스에 의한 위치 오차는 사인파 형태로 발산함을 확인할 수 있다. 전체 위치 오차 역시 주기를 가지며 증가함을 확인할 수 있다.

센서의 성능에 따른 슬러주기 오차의 영향을 확인하기 위해 슬러 튜닝으로 인해 증가한 오차의 비중을 센서 성능에 따라 각각 구해 <그림 4>에 나타냈으며 그 수치는 <표 1>과 같다.



<그림 4> 센서 바이어스에 따른 슬러주기 오차 영향

<표 1> 센서 바이어스에 따른 슬러주기 오차 영향

성능 등급	가속도계 바이어스 [μg]	자이로스코프 바이어스 [$^\circ/h$]	비율 [%]
Marine	20 ~ 30	0.0035 ~ 0.01	17.5 ~ 33.9
Aviation	30 ~ 100	0.01 ~ 0.1	13.0 ~ 21.2
Intermediate	100 ~ 150	0.1 ~ 0.5	12.8 ~ 16.2

<그림 4>에 빨간색, 초록색, 파란색으로 표시되어 있는 결과는 각각 Marine 등급, Aviation 등급, Intermediate 등급 센서를 이용했을 때이다. <그림 4>와 <표 1>을 통해 확인할 수 있듯, 자이로 바이어스와 가속도계 바이어스가 각각 $0.0035^\circ/h$, $30\mu g$ 인 Marine 등급의 INS는 슬러주기 오차로 인한 위치 오차가 전체 오차에서 최대 33.9%까지 차지하는 것으로 나타나며, 이러한 수준의 INS를 채택할 경우 슬러주기 오차를 고려해야 함을 의미한다. 이렇듯, 시뮬레이션의 결과는 슬러주기 오차를 고려해야 하는 센서 스펙의 척도로 활용될 수 있음을 보인다.

3. 결 론

본 논문에서 간략화된 위치 오차 모델링을 이용해 관성항법시스템의 위치 오차를 분석하여 센서의 성능에 따라 슬러주기 오차가 고려되어야 함을 확인하였다. 특히 시뮬레이션을 통해 센서 오차에 따라 전체 위치오차에서 슬러주기 오차가 차지하는 비중을 분석하여, 슬러주기 오차를 고려해야 하는 센서 사양 범위를 제시하였다. 이러한 분석 결과를 활용하면, 슬러주기 오차를 포함한 다양한 오차를 보상하기 위한 방안을 고성능 관성항법시스템 설계 초기부터 고려할 수 있다. 즉 관성항법시스템 운용 시간과 항법 오차의 관계, 센서 오차와 슬러주기 오차 및 항법 오차와의 관계를 분석하여 운용에 최적인 센서 사양을 결정할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2022-2018-0-01423)

[참고 문헌]

- [1] David H. Titterton, "Strapdown Inertial Navigation Technology - 2nd Edition", The Institution of Electrical Engineers, pp. 340-355, 2004
- [2] Paul D. Groves, "Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems", Artech House, pp. 113, 2008