

영속도 보정 알고리즘을 이용한 전술급 관성항법장치의 자세 유지 기법

Method for Maintaining Initial Azimuth of Tactical Grade IMU by Using Zero Velocity Update Algorithm

김 선 아*
(Suna Kim)

Abstract - This paper describe the method for maintaining initial azimuth of tactical grade IMU. The proposed method uses the zero velocity update (ZUPT) algorithm based on Kalman filter and the azimuth information previously obtained through transfer alignment. ZUPT technique can estimate and correct navigation attitude errors using the observed velocity error without the need of other sensors. Also, ZUPT combined pre-obtained azimuth information allows to maintain initial azimuth for tactical grade IMU. We verify the performance improvement of the proposed azimuth maintaining method by simulation and test.

Key Words : ZUPT, Zero velocity update, Navigation

1. 서 론

관성항법장치(INS: Inertial Navigation System)는 자이로/가속도계 등과 같은 관성센서를 이용하여 외부의 도움 없이 항체의 위치, 속도, 자세 등의 항법정보를 제공하는 장치이다. 관성항법장치는 별도의 장비 없이 항법정보를 계산할 수 있으나, 항법계산 시 적분을 통해 위치, 속도, 자세를 계산하므로 정확한 항법계산을 위해서는 각각에 대한 정확한 초기값이 필요하다. 대부분의 경우 위치 및 속도 정보는 외부에서 정보를 제공하지만, 자세 정보는 자체적으로 계산하는 경우가 많다. 따라서 초기 자세오차가 항법 성능에 매우 중요하다.

관성항법장치의 초기 자세를 찾는 과정을 정렬(alignment)이라고 하는데, 정렬 알고리즘은 보조 센서의 유무에 따라 자체정렬(self alignment) 알고리즘과 전달정렬(Transfer alignment) 알고리즘으로 구분될 수 있다. 자체정렬 알고리즘은 별도의 보조센서 없이 관성항법장치의 자이로스코프가 아주 작은 크기의 지구회전 각속도를 측정하여 방위각 자세를 계산하기 때문에, 고정밀의 관성항법장치가 요구되며 또한 정렬시간이 오래 소요되는 단점을 갖는다. 전달정렬 알고리즘은 자체정렬 알고리즘의 단점을 보완하기 위해 별도의 고성능 보조 관성항법장치의 정보를 이용하여 정렬을 수행하는 것으로, 자체정렬 알고리즘 기법보다 상대적으로 짧은 시간 내에 동일한 성능의 초기 정렬을 완료할 수 있다.

가격이 저렴한 전술급 자이로의 경우 센서의 측정오차가 크기 때문에 지구회전 각속도를 정확하게 측정할 수 없으므로 자체정렬을 통해서 원하는 방위각 정확도를 얻을 수 없다. 따라서 이 경우 보조 관성항법장치의 자세정보를 이용하여 전달정렬을 통해 정렬 성능을 얻을 수 있다.

영속도 보정 알고리즘(ZUPT, Zero velocity UPdaTe)은 '정지 상태에 있는 물체의 속도는 0이다'라는 정보를 이용하여 관성항법장치의 속도 오차를 보정하는 알고리즘이다. 정지 상태에서는 물체의 속도가 0이므로, 이를 통해 순수항법의 속도 오차를 보정하면 그림 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. 기존의 영속도 보정 알고리즘은 주로 차량에 적용되는 항법장치와 같이 지상에서 작동되는 관성항법장치에 적합한 보정항법으로 고정밀 관성항법장치를 이용하여 설계된 경우가 대다수이다. [2]

본 논문에서는 전술급 항법장치를 이용하여 설계된 영속도 보정 알고리즘과 전달정렬을 통해 사전 획득된 방위각 정보를 융합하여 전술급 관성항법장치의 전달정렬을 통해 얻어진 자세정보를 장시간 유지하는 기법에 대해 살펴본다. 전술급 관성항법장치는 단독으로 오랜 시간 항법이 불가능하며 보조 정보를 이용하여 보정 항법을 수행하여야 한다. 영속도 보정 알고리즘을 통해 전달정렬을 통해 찾은 전술급 관성항법장치의 정확한 자세정보를 장시간 유지할 수 있도록 한다. 또한 기존의 영속도 보정 알고리즘으로 보상되지 않는 방위각 오차를 보상하기 위해 사전에 찾은 방위각 정보를 융합하여 새로운 개념의 자세 유지 기법을 설계하였다. 이러한 자세 유지 기법을 통해 최초 전달정렬 후 보조 관성항법장치의 정보가 더 이상 제공되지 않더라도 시간의 경과에 따라 급격하게 누적되는 위치, 속도, 자세 오차를 보상할 수 있다.

* Corresponding Author : Agency for Defence Development, Korea

E-mail: sunakim@add.re.kr

ORCID: <https://orcid.id :0000-0001-8173-3406>

Received : November 30, 2018; Accepted : December 24, 2018

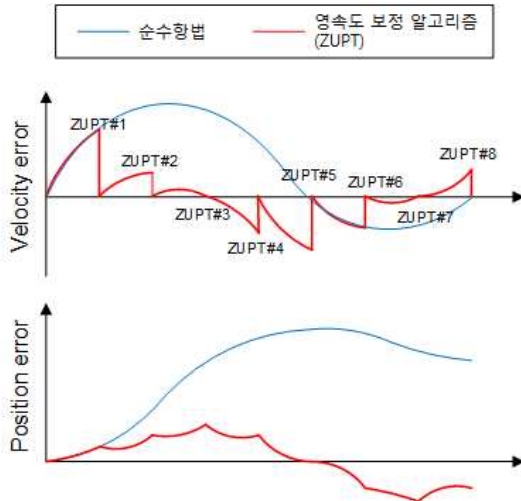


그림 1 영속도 보정 알고리즘 개념도
Fig. 1 Zero velocity update

2. 전술급 관성항법장치의 자세 유지 기법

전술급 관성항법장치의 자세 유지 기법은 그림 2에서 도시한 것처럼 사전 전달정렬 과정과 영속도 보정 알고리즘을 이용한 자세 유지 과정으로 구성된다. 전술급 관성항법장치는 정밀한 보조 관성항법장치로부터 제공되는 정보를 이용하여 전달정렬을 수행하고 이를 통해 정밀한 자세정보를 구한 후, 플랫폼에 견고하게 구속되어 있어 자세가 변하지 않는 안정된 상태에 있어야 한다. 이후, 보조 관성항법장치로부터 전달정렬 정보가 더 이상 제공되지 않으면, 수정된 영속도 보정 알고리즘을 통해 전달정렬로 찾은 자세 정보를 유지할 수 있다. 영속도 보정 알고리즘은 정지 상태에 있는 물체의 속도가 0이 되도록 항법오차를 보정해주는 기법이다. 고성능 항법급 항법장치의 경우 영속도 보정을 수행하는 것만으로도 자세 정확도 유지가 가능하다. 하지만 전술급 관성항법장치를 사용하는 경우, 영속도 보정을 통해 수평축 자세정확도는 유지할 수 있지만, 수직축의 방위각 부유오차를 보상할 수 없다. 따라서 기존의 영속도 보정 알고리즘에 전달정렬을 통해 찾은 방위각정보를 융합하여 정확한 자세를 유지할 수 있도록 한다.

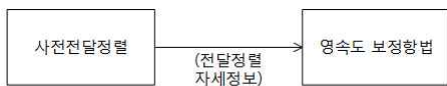


그림 2 전술급 관성항법장치를 위한 자세 유지 기법 구성도
Fig. 2 Configuration of method for maintaining initial azimuth

2.1 사전 전달정렬 알고리즘

사전 전달정렬 과정은 간접 되먹임 방식의 칼만필터로 구성되며 상태 방정식으로 관성항법장치의 속도 및 자세 오차 방정식과

장착 비정렬각 오차 방정식을 사용한다. 속도 및 자세 오차 방정식은 psi 오차 모델 및 회전벡터 형태의 자세오차 모델을 사용하였다. 시스템의 상태 방정식은 아래와 같이 시간지연 오차를 포함한 10차 모델이다. [3]

$$X = [\delta v_e \ \delta v_n \ \delta v_u \ \phi_e \ \phi_n \ \phi_u \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z \ \Delta t]^T \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\delta v}^n &= -(2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)\delta v^n + f^n \phi^n \\ \dot{\phi}^n &= -(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)\phi^n \\ \dot{\theta} &= 0 \\ \dot{\Delta t} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, δv^n 는 속도오차, ϕ^n 는 자세오차, θ 는 장착 비정렬각 오차, Δt 는 시간 지연을 나타낸다. 이를 시스템 행렬 F 로 나타내면 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} -(2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)_{3 \times 3} & f_{3 \times 3}^n & 0_{3 \times 4} \\ 0_{3 \times 3} & -(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)_{3 \times 3} & 0_{3 \times 4} \\ 0_{4 \times 3} & 0_{4 \times 3} & 0_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

전달정렬의 측정치 Z 는 전술급 관성항법장치(SINS)와 보조 관성항법장치(MINS)의 속도 차와 자세 차를 이용한다. 자세 차를 계산하는 방법은 자세를 표현하는 방법에 따라 오일러각 자세정합, 쿼터니온 자세정합, DCM 자세정합 등이 존재하며 여기서는 DCM 자세정합을 이용한 전달정렬 식을 사용한다. 이를 통해 측정치 Z 와 측정 행렬 H 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_v(k) &= \hat{v}_{SINS}^n - \hat{v}_{MINS}^n \\ &= (v^n + \delta v^n) - (v^n + \Delta v_{MINS}) \\ &= \delta v^n(k) + \nu_v(k) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Z_{dcm}(k) &= \hat{C}_r^x \hat{C}_b^y \hat{C}_n^z \\ &= \phi(k) - C_r^n(k - \delta t)\theta(k) + d(k)\delta t + \nu_{dcm}(k) \end{aligned} \quad (5)$$

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -f \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} - C_r^n & -d & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 영속도 보정 알고리즘

영속도 보정 알고리즘을 이용한 전술급 관성항법장치의 자세 유지 시스템은 사전 전달정렬을 통해 찾은 방위각 정보와 영속도 정보를 이용하여 칼만 필터를 통해 관성항법장치의 정확한 초기 자세를 유지한다. 영속도 보정 알고리즘과 사전의 전달정렬 방위각정보를 융합하여 항체의 방위각오차 추정치를 계산함으로써, 초기 전달정렬 후에 보조 관성항법장치로부터 전달정렬 자세정보가 더 이상 제공되지 않더라도 전술급 관성항법장치의 방위각이 틀어지는 것을 효과적으로 방지할 수 있다.

제한한 자세 유지 기법이 적용되는 칼만 필터는 시간전파(Time Propagation)와 측정치 갱신(Measurement Update)의 두 과정으로 구분될 수 있다. 시간 전파는 이전에 계산된 상태변수들을 이

용하여 현재 시점의 오차를 예측하는 과정을 의미하고, 측정치 갱신은 새롭게 측정된 정보를 이용하여 현재의 추정치 정보를 갱신하는 과정을 의미한다. (그림 3)

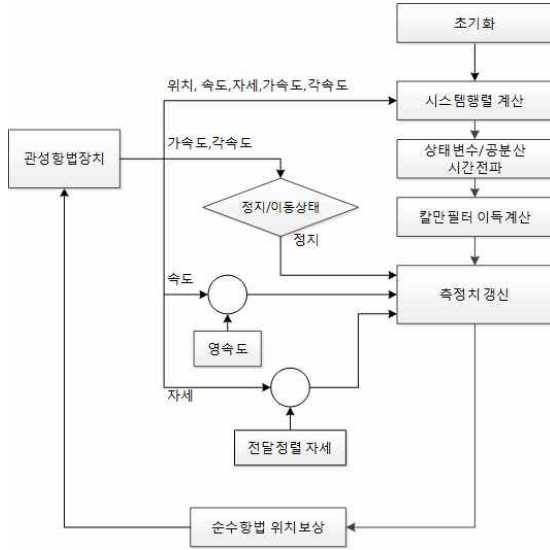


그림 3 자세 유지 기법 실행 순서도
Fig. 3 Diagram of method for maintaining initial azimuth

2.2.1 상태 변수 및 상태 방정식

자세 유지 기법은 위치 오차, 속도 오차, 자세 오차, 자이로 센서오차, 가속도계 센서 오차 등이 포함된 시스템으로, 상태변수 x 를 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{x}_k = F_k x_k + w_k \quad (7)$$

$$x = [x_p \quad x_v \quad x_\phi \quad x_{Cb} \quad x_{Ab}]^T \quad (8)$$

여기서 x_k 는 k번째 시점의 상태변수를, w_k 는 백색잡음을, F_k 는 시스템 행렬을 나타내며, $x_p = [\delta l \quad \delta L \quad \delta h]^T$ 는 경도, 위도, 고도 오차, $x_v = [\delta v_e^n \quad \delta v_n^n \quad \delta v_u^n]^T$ 는 East, North, Up 축 속도 오차, $x_\phi = [\phi_e^n \quad \phi_n^n \quad \phi_u^n]^T$ 는 East, North, Up 축 자세 오차, $x_{Cb} = [\delta B_{Cx}^b \quad \delta B_{Cy}^b \quad \delta B_{Cz}^b]^T$ 는 동체좌표계에서의 자이로 바이어스 오차, $x_{Ab} = [\delta B_{Ax}^b \quad \delta B_{Ay}^b \quad \delta B_{Az}^b]^T$ 는 동체좌표계에서의 가속도계 바이어스 오차를 나타낸다. 시스템 행렬 F_k 은 다음과 같은 위치, 속도, 자세에 대한 항법오차 방정식을 통해 계산될 수 있다. 또한 자이로 바이어스 오차와 가속도계 바이어스 오차는 랜덤상수로 가정한다.

$$\delta \dot{l} = \left(\frac{\rho_e \tan L}{\cos L} - \frac{\rho_n}{(R_E + h) \cos L} R_{EE} \right) \delta L - \frac{\rho_n}{(R_E + h) \cos L} \delta h + \frac{1}{(R_E + h) \cos L} \delta v_e$$

$$\delta \dot{L} = \frac{\rho_e}{(R_E + h)} R_{NN} \delta L - \frac{\rho_e}{(R_N + h)} \delta h + \frac{1}{(R_N + h)} \delta v_n \quad (9)$$

$$\delta \dot{h} = \delta v_u$$

$$\delta \dot{v}^n = f^n \phi^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \delta v^n - (2\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n) v^n + \delta g^n + C_b^n \delta f^b \quad (10)$$

$$\dot{\phi}^n = -(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \phi^n - (\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n) - C_b^n \delta \omega_{ib}^b \quad (11)$$

여기서 l, L, h 는 각각 경도, 위도, 고도, v_e^n, v_n^n, v_u^n 은 East, North, Up 축 속도, $\phi_e^n, \phi_n^n, \phi_u^n$ 은 East, North, Up 축 자세 오차, ω_{ie}^n 은 지구자전각속도, ω_{en}^n 은 대지속도에 의해 발생하는 회전각속도, g 은 중력, ω_{ib}^b 은 자이로 출력 값, f^b 은 가속도계 출력 값을 나타낸다.

시스템 행렬을 이용하여 현재 시점의 상태변수 x_k^- 와 공분산 시간전파 P_k^- 을 계산한다.

$$\Phi_k = 1 + F_k \Delta T \quad (12)$$

$$x_k^- = \Phi_{k-1} x_{k-1}^+ \quad (13)$$

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + Q \quad (14)$$

여기서 Φ 는 이산화된 시스템 행렬, Q 는 시스템 공정 잡음을 나타낸다.

2.2.2 측정치와 측정방정식

측정치 z_k 는 관성항법장치의 속도 정보와 사전 전달정렬을 통해 계산된 방위각 정보로 구성되며, 측정방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$z_k = H_k x_k + \nu_k \quad (15)$$

H_k : 측정행렬, ν_k : 측정 잡음

기존의 영속도 보정 알고리즘에서는 아래의 식에서와 같이 관성항법장치의 속도 정보만을 사용하여 측정치를 계산한다.

$$z_k = [\hat{v}_e \quad \hat{v}_n \quad \hat{v}_u]^T \quad (16)$$

$$H_k = [O_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad O_{3 \times 18}] \quad (17)$$

여기서 \hat{v} 는 관성항법장치의 East, North, Up 축 현재 속도, O 는 영행렬, I 는 단위행렬을 뜻한다.

기존의 영속도 보정 알고리즘에서는 속도 정보만을 사용하여 항법오차를 보상하므로 전술급 관성항법장치의 센서 오차에 의해 전달정렬을 통해 찾은 정확한 방위각 정보가 오염될 수 있다. 따라서 전달정렬을 통해 찾은 방위각 정보를 측정치에 추가하고 측정방정식을 수정한다. 전술급 관성항법장치를 이용하여 추정된 오차가 섞인 항법 축을 플랫폼 좌표계(p-frame)라고 하면 동체

좌표계(b-frame)과 플랫폼 좌표계 간의 관계는 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X^p \\ Y^p \\ Z^p \end{bmatrix} = (I - \begin{bmatrix} 0 & -\phi_u & \phi_n \\ \phi_u & 0 & -\phi_e \\ -\phi_n & \phi_e & 0 \end{bmatrix}) (C_b^n \begin{bmatrix} X^b \\ Y^b \\ Z^b \end{bmatrix}) \quad (18)$$

$$= C_b^p \begin{bmatrix} X^b \\ Y^b \\ Z^b \end{bmatrix}$$

C_b^p : 동체좌표계와 플랫폼좌표계 사이의 좌표변환행렬

동체 좌표계와 플랫폼 좌표계 사이의 좌표변환행렬 C_b^p 은 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$C_b^p = (I - \check{\Phi}) C_b^n \quad (19)$$

$$\check{\Phi} = \begin{bmatrix} 0 & -\phi_u & \phi_n \\ \phi_u & 0 & -\phi_e \\ -\phi_n & \phi_e & 0 \end{bmatrix}$$

관성항법장치의 방위각 오차를 구하기 위해 C_b^p 의 양 변에 전달정렬을 통해 찾은 방위각정보를 담은 DCM \overline{C}_n^b 를 곱하면 아래의 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_b^p \overline{C}_n^b &= (I - \check{\Phi}) C_b^n \overline{C}_n^b \\ &= (I - \check{\Phi}) \begin{bmatrix} 1 & \phi_u & -\phi_n \\ -\phi_u & 1 & \phi_e \\ \phi_n & -\phi_e & 1 \end{bmatrix} \\ \therefore \phi_u &= (C_b^p \overline{C}_n^b(1,2) - C_b^n \overline{C}_n^b(2,1))/2 \end{aligned} \quad (20)$$

따라서 상술한 식 16에서 정의된 속도 오차 측정치와 식 21의 수직축 방위각 오차 측정치, 이에 따른 측정방정식 행렬 H 을 다시 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\therefore z_k = [\hat{v}_e \quad \hat{v}_n \quad \hat{v}_u \quad \phi_u]^T \quad (22)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 15} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 \ 0 \ 1 & \mathbf{0}_{1 \times 15} \end{bmatrix} \quad (23)$$

2.2.3 상태변수 갱신

칼만 이득 행렬 K_k 과 앞서 유도한 측정치와 측정방정식을 이용하여 필터를 갱신하며, 갱신된 추정치를 순수항법 결과에 보상하여 보상된 항법 결과를 계산한다. 칼만 이득 행렬 K_k 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (24)$$

P : 상태변수 공분산, H : 측정행렬, R : 측정오차 공분산

앞 절에서 정의된 측정치와 측정행렬을 이용하여 아래의 식과

같이 필터를 갱신할 수 있다.

$$x_k^+ = x_k^- + K_k(z_k - H_k x_k^-) \quad (25)$$

$$P_k^+ = [I - K_k H_k] P_k^- \quad (26)$$

추정된 상태변수 x_k^+ 를 관성항법장치의 순수항법에 보상한다. 위치와 속도 보정은 순수항법의 위치와 속도를 추정된 값으로 빼줌으로써 보정할 수 있다.

$$l = \hat{l} - \delta, \quad L = \hat{L} - \delta L, \quad h = \hat{h} - \delta h \quad (27)$$

$\hat{l}, \hat{L}, \hat{h}$: 순수항법 경도, 위도, 고도

$$v_e = \hat{v}_e - \delta v_e, \quad v_n = \hat{v}_n - \delta v_n, \quad v_u = \hat{v}_u - \delta v_u \quad (28)$$

$\hat{v}_e, \hat{v}_n, \hat{v}_u$: 순수항법 East, North, Up 축 속도

자세오차 보정은 칼만필터에서 추정된 회전벡터 오차를 쿼터니언 오차로 변환 후 쿼터니언 오차를 보정해 준다. 구한 쿼터니언은 정규화를 한 다음 자세변환행렬로 변환해 자세변환행렬을 갱신해 준다.

$$Q = \Delta Q \cdot \hat{Q} \quad (29)$$

$$\Delta Q = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ q_2 & -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_e \\ \phi_n \\ \phi_u \end{bmatrix}$$

2.2.4 정지/이동 판단 기법

영속도 보정 알고리즘이 정상적으로 동작하기 위해서는 물체가 정지한 상태여야 하며, 따라서 관성항법장치의 센서 출력을 이용하여 물체의 이동 상태를 자동 판단하기 위한 정지/이동 판단 기법이 필요하다. [4] 관성항법장치의 센서 출력은 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$y_k = s_k(\theta) + \nu_k \quad (30)$$

$$s_k(\theta) = \begin{bmatrix} s_k^a(\theta) \\ s_k^\omega(\theta) \end{bmatrix}, \quad \nu_k = \begin{bmatrix} \nu_k^a \\ \nu_k^\omega \end{bmatrix}$$

여기서 $s_k^a(\theta) \in \mathbb{R}^3$, $s_k^\omega(\theta) \in \mathbb{R}^3$ 은 각각 관성항법장치에 입력된 가속도와 각속도를 의미한다. $\nu_k^a(\theta) \in \mathbb{R}^3$ 과 $\nu_k^\omega(\theta) \in \mathbb{R}^3$ 는 관성항법장치의 센서 측정 잡음으로 Gaussian 분포를 따르며 iid 하다고 가정한다.

물체는 정지/이동 두 가지 상태 중 하나에 속하며 이러한 상태를 판단하는 검출기는 N개의 연속된 센서 출력을 이용하여 정지/이동 상태를 판단한다. 정지/이동 상태 검출기는 가속도의 이동평균, 이동표준편차 검출기와 각속도의 이동평균, 이동표준편차 검출기가 있을 수 있다. 가속도의 이동평균값은 중력 모델의 오차가 포함되므로 정확한 임계값 설정이 어려운 단점이 존재하며,

각속도의 이동 표준편차는 일정한 회전 운동이 있을 경우 편차 값이 매우 작으므로 정지/이동을 판별하기 어려운 단점이 있다. 따라서 각속도 이동평균값과 각속도의 이동표준편차를 이용하여 정지/이동 상태를 판단한다. 물체가 정지한 상태라면 각속도 이동표준편차 검출기와 각속도 이동평균 검출기는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T_a = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} \|y_k^a - \bar{y}_n^a\|^2} < \gamma_a \quad (31)$$

$$T_w = \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} y_k^w < \gamma_w \quad (32)$$

이때, $\Omega_n = \{n \leq l \leq N-1\}$, $\bar{y}_n^a = \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} y_k^a$

3. 시뮬레이션 및 시험결과

제안한 자세 유지 기법을 검증하고 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션과 실제 장비를 이용한 시험을 수행하였다. 시험은 전달정렬 시험대에 고정밀 보조항법장치와 전술급 관성항법장치를 장착하여 전달정렬을 수행한 후, 시험대를 견고하게 고정하여 관성항법장치의 자세가 변하지 않도록 하였다. 전달정렬에 사용된 고정밀 보조항법장치는 1m급 관성항법장치이며, 자세 유지 기법이 적용될 전술급 관성항법장치의 성능은 표 1에 정리하였다.

먼저 시뮬레이션을 통해 자세 유지 기법의 전달정렬 이후 자세 변화량을 확인한 결과를 그림 4에 나타내었다. 순수항법의 경우 센서 오차에 의해 시간이 지남에 따라 자세오차가 누적되는 것을 확인할 수 있다. 또한 단순히 영속도 보정 알고리즘만을 적용할 경우 가관측성이 높은 가속도계 출력이 적용되는 롤, 피치 자세의 경우 자세 틀어짐을 방지할 수 있으나, 가관측성이 낮은 방위각 보상은 오차가 누적되는 것을 확인할 수 있다. 여기에 제

표 1 시험에 사용된 전술급 관성항법장치 성능

Table 1 Performance of tactical grade IMU

센서	오차 성분	크기	단위
자이로	바이어스 반복도	1	deg/hr
	환산계수 안정도	150	ppm
	비정렬	100	urad
	랜덤워크	0.125	deg/√hr
가속도계	바이어스 반복도	1	mg
	환산계수 안정도	300	ppm
	비정렬	100	urad
	랜덤워크	0.065	ft/sec/√hr

안한 자세 유지 기법을 적용하면 장시간 시간이 지나도 방위각 자세가 유지됨을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 그림 5는 필터를 통해 추정된 자세 오차의 공분산 P를 도시한 그래프이다. 순수항법의 경우 시간의 지남에 따라 롤, 피치, 요 3축의 자세 오차 공분산이 모두 증가하고, 기존의 영속도 보정 알고리즘을 사용할 경우 롤, 피치 축의 공분산은 감소하나, 요 축은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 제안한 영속도 보정 알고리즘의 경우 3축의 공분산이 모두 수렴하는 것을 확인 하였다.

그림 6은 실제 장비를 사용하여 자세 유지 기법을 적용하였을 때의 자세 변화량을 도시한 그래프이다. 시뮬레이션에서 확인한 결과와 동일하게 영속도 보정 알고리즘만을 적용하면 방위각 자세를 유지할 수 없지만, 제안한 자세 유지 기법을 적용하면 방위각 자세도 장시간 유지할 수 있음을 확인하였다. 또한 주변 상황에 의한 영향을 확인하기 위해 약 500초 시점에 관성항법장치에 강한 충격을 인가하였다. 인가된 충격은 설계한 정지/이동 검출기에 의해 검출되어, 이 경우 영속도 상태가 아니라고 판단하여 보정 알고리즘이 동작 되지 않았다. 충격이 안정되고 난 뒤 다시 보정 알고리즘이 동작하며 충격 인가 후에도 자세가 잘 유지됨을

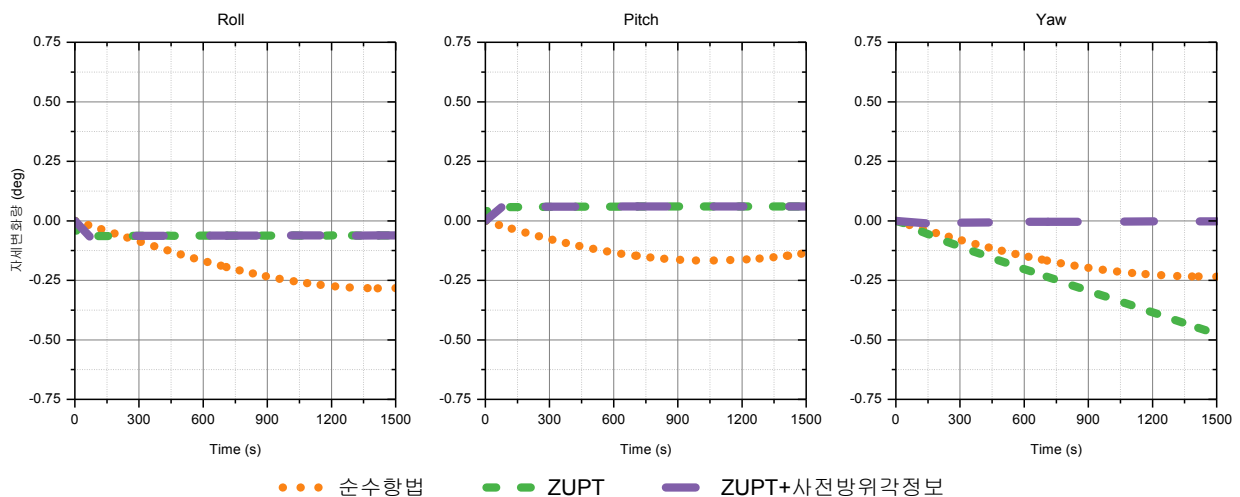


그림 4 전달정렬 이후 자세 변화량 비교 (시뮬레이션)

Fig. 4 Comparison of attitude change after transfer alignment (Simulation)

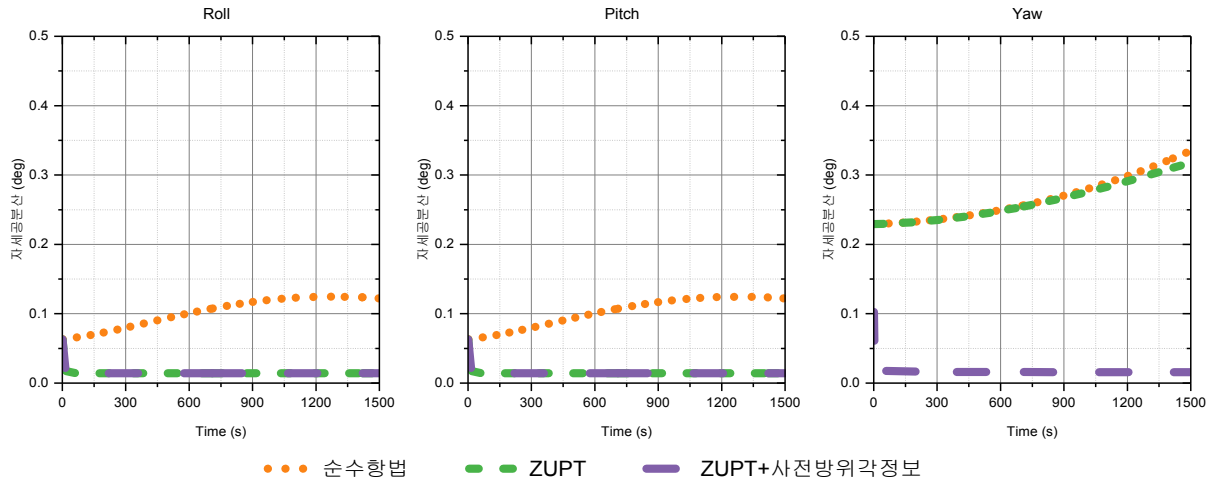


그림 5 전달정렬 이후 자세 오차 공분산 비교 (시뮬레이션)

Fig. 5 Comparison of attitude error covariance after transfer alignment (Simulation)

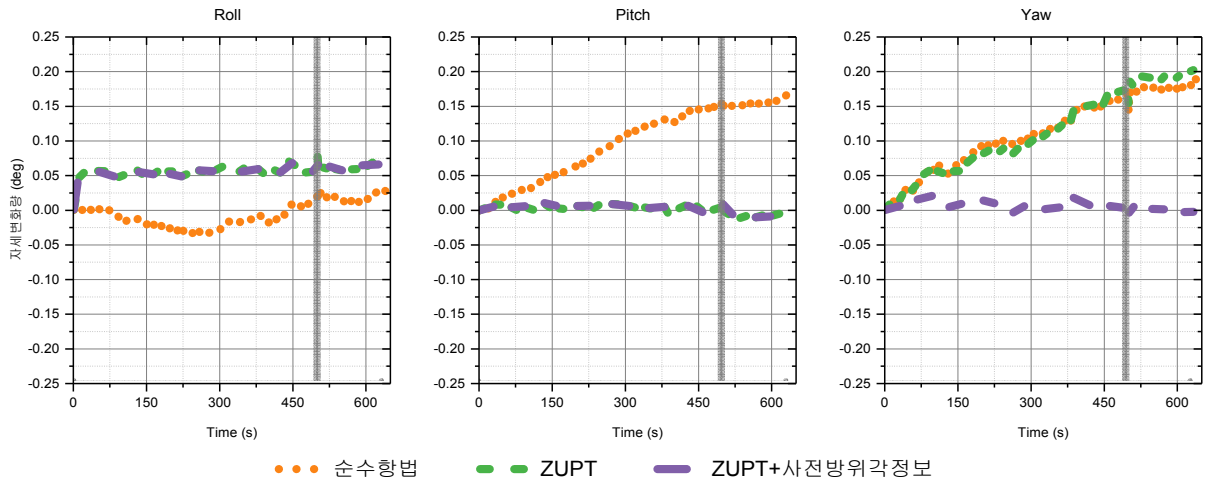


그림 6 전달정렬 이후 자세 변화량 비교 (실제 시험)

Fig. 6 Comparison of attitude change after transfer alignment (Real Test)

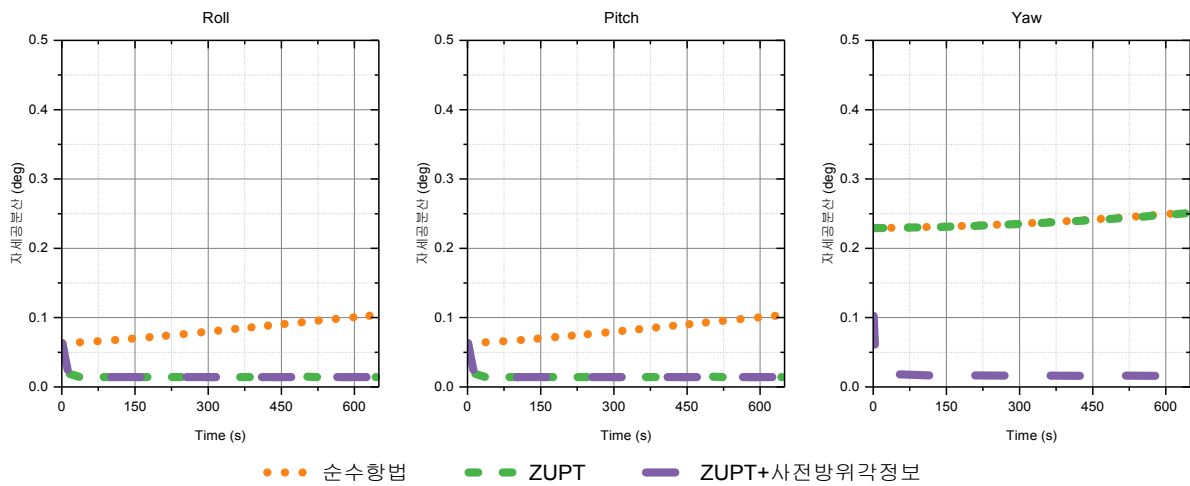


그림 7 전달정렬 이후 자세 오차 공분산 비교 (실제 시험)

Fig. 7 Comparison of attitude error covariance after transfer alignment (Real Test)

확인할 수 있다. 또한 그림 7에서 시뮬레이션과 유사한 자세 오차 공분산을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 전술급 항법장치를 이용하여 설계된 자세 유지 기법을 제안하였다. 제안된 자세 유지 기법은 영속도 보정 알고리즘과 사전 전달정렬을 통해 획득된 방위각 정보를 융합하여 롤, 피치축 자세뿐만 아니라 방위각 자세도 장시간 유지할 수 있는 것이 특징이다. 제안한 자세 유지 기법은 시뮬레이션과 시험을 통해 성능을 확인하였다. 시험 결과 순수항법이나 단순히 영속도 보정 알고리즘만을 적용 하는 것에 비해 제안된 기법을 적용할 경우 자세 정확도가 장시간 유지됨을 확인하였다.

References

- [1] P. D. Groves, "Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems", *Artech House*, 2013
- [2] S. A. Kim, K. J. Yoo, T. G. Lee, "Zero Velocity Update using tactical grade IMU", *2016 KIMST Fall Conference Proceedings*, pp. 507-508, 2016.
- [3] H. S. Lee, K. J. Han, S. W. Lee, M. J. Yu, "A Transfer Alignment Method considering a Data Latency Compensation for an Inertial Navigation System in High Dynamic Application", *The transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 65, no. 6, 2016, pp. 1038-1044
- [4] S. A. Kim, K. J. Yoo, T. G. Lee, "Zero velocity detector using tactical grade IMU", *2017 KIMST Spring Conference Proceedings*, pp. 479-480, 2017.

저 자 소 개



김 선 아 (Suna Kim)

2011년 포항공과대학교 화학과 졸업.
2014년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사).
2014년~현재 국방과학연구소 연구원.