Psi 각 오차모델 기반 스트랩다운 관성 항법 시스템의 정렬 알고리즘

Psi Angle Error Model based Alignment Algorithm for Strapdown Inertial Navigation System

박 슬 기, 황 동 환*, 이 상 정
 (Sul Gee Park¹, Dong-Hwan Hwang¹, and Sang Jeong Lee¹)
¹Chungnam National University

Abstract: An alignment algorithm for strapdown inertial navigation systems is proposed, in which the psi angle error model is utilized. The proposed alignment algorithm is derived from the Psi angle error model which has been widely used in real-time navigation systems. The equation for expecting steady state alignment error is also derived. The proposed algorithm was verified through real-time experiments. Experimental results show that the proposed algorithm can be used in the inertial navigation system and GNSS/INS integrated navigation system to get an initial attitude of the vehicle.

Keywords: alignment, strapdown, inertial navigation system, Psi angle, error model

I. 서론

관성 항법 시스템(INS: Inertial Navigation System)은 관성 센서라 불리는 자이로스코프와 가속도계에 의해 항체의 회전 각속도와 선형 가속도를 측정하고 이들 출력을 이용하여 외부의 도움없이 항법정보를 알아낸다[1]. INS는 센서의 장착 방식에 따라 김블드 관성 항법 시스템(GINS: Gimbaled INS)와 스트랩다운 관성 항법 시스템(SDINS: StrapDown INS)으로 나눌 수 있다. SDINS는 센서가 동체에 직접 부착되어 기계적인 안정대(mechanical stable platform)대신 컴퓨터상의 해석적인 안정대를 사용하여 항법을 수행하며, 비교적 저가이며 가벼운 장점 때문에 사용이 점점 증가하고 있다[2].

SDINS에서 초기정렬(initial alignment)이란 항체가 정지한 상태에서 가속도계와 자이로의 센서 출력으로부터 항법 좌표계에 대한 동체 좌표계의 초기자세를 나타내는 방향코사인 행렬(DCM: Direction Cosine Matrix)이나 쿼터니언(quaternion)을 구하는 것이다[1]. 일반적으로 초기정렬은 항체의 대략적인 자세를 구하는 개략정렬과 개략정렬의 오차를 추정하고, 보정하여 정확한 자세를 계산하는 정밀정렬로 나뉜다[1]. 초기 자세오차는 항법을 수행하는 동안 계속 누적되어 자세뿐만 아니라 속도와 위치정보에도 영향을 주어 항법 오차의 주요 원인으로 작용하게 되므로 항법성능을 향상시키기 위해서는 보다 정밀한 초기정렬과정이 필요하다[3].

정밀정렬에서는 먼저 수평축 정밀정렬에 해당하는 정밀 레벨링(fine leveling)을 수행한 후 수직축의 자이로컴파싱(gyrocompassing)을 수행한다[4-6]. 정밀정렬 알고리즘은 정지시의 오차모델을 이용하는데, 대부분의 알고리즘에서는 Phi 각 오차모델(phi angle error model)을 사용하고 있다[1,4-7]. Phi

각 오차모델은 오차가 없는 참 좌표계(true frame)와 센서가 장착된 플랫폼 좌표계(platform frame)간의 각을 이용한 것으로, 참 좌표계를 알아야만 항법에 사용할 수 있다. 따라서 참 좌표계를 알고 수행하는 모의실험에서는 유용하지만 실시간 항법에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 실시간 계산에 보다 적합한 Psi각 오차모델(psi angle error model)을 기반으로 정밀 정렬을 수행하는 알고리즘을 제안하였다. Psi각 오차모델은 비정렬 오차에 의해 생기는 컴퓨터 좌표계(computer frame)와 플랫폼 좌표계간의 각인 Psi각으로 서술된다. 이때 컴퓨터 좌표계는 실제 항법시 항법 컴퓨터상에 존재하는 계산상의 좌표계이므로 실시간 항법시에는 Psi각 오차모델을 이용하는 것이 더 적절하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II 장에서는 개략정렬 알고리즘에 대하여 설명하고, III 장에서는 정지시의 Psi 각 오차모델로부터 정밀정렬 알고리즘을 제시하였다. 그리고 IV 장에서는 실시간 실험을 통해 제안한 알고리즘의 유효성을 보였으며 V 장에서는 결론을 맺고 추후 연구과제를 제시하였다.

II. 개략정렬 알고리즘

개략정렬은 짧은 시간에 대략적인 초기자세를 구하는 것으로 수평축 정렬과 방위각 정렬로 나누어진다. 수평축 정렬에서는 정지상태일 때 항법 좌표계의 D축의 가속도계에만 중력이 나타나는 특성을 이용하여 동체 좌표계에서 측정된 중력가속도 성분으로부터 롤각과 피치각을 계산한다. 동체 좌표계에서의 가속도계 출력 $\mathbf{f}^b$ 와 항법 좌표계에서의 가속도계 출력 $\mathbf{f}^n$ 은 다음 (1)과 같은 관계를 가진다.

$$\mathbf{f}^b = \mathbf{C}_n^b \mathbf{f}^n \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{f}^b = [f_x^b \ f_y^b \ f_z^b]^T$ 이고, $\mathbf{f}^n = [0 \ 0 \ -g]^T$ 이다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 2. 23., 수정: 2010. 9. 9., 채택확정: 2010. 12. 13.

박슬기, 황동환, 이상정: 충남대학교 전자공학과
 (baewood@cnu.ac.kr/dhwhwang@cnu.ac.kr/eesjl@cnu.ac.kr)

C_n^b 는 항법 좌표계로부터 동체 좌표계로의 방향코사인 행렬이며, g 는 중력을 나타낸다. (1)에서 C_n^b 를 롤각(ϕ) 및 피치각(θ)과 요각(ψ)의 오일러 순서각을 사용하여 표현하면 (2)가 된다.

$$\begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi \\ \sin\theta\sin\phi\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \sin\theta\sin\phi\sin\psi + \cos\phi\cos\psi \\ \sin\theta\cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g\sin\theta \\ -g\sin\phi\cos\theta \\ -g\cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2)로부터 다음과 같이 롤각과 피치각을 구할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{f_y^b}{f_z^b}\right) \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{f_x^b}{\sqrt{(f_y^b)^2 + (f_z^b)^2}}\right) \quad (4)$$

정지상태일 때 방위각 정렬은 항법 좌표계의 E축 자이로에 나타나는 지구 자전 각속도가 0인 특성을 이용하여 동체 좌표계에서 측정한 지구 자전 각속도로부터 요각(또는 방위각)을 계산한다. 동체 좌표계에서의 지구 자전 각속도 ω_{ie}^b 와 항법 좌표계의 지구 자전 각속도 ω_{ie}^n 는 다음 (5)와 같은 관계를 가진다.

$$\omega_{ie}^b = C_n^b \omega_{ie}^n = C_n^b [\Omega \cos L \quad 0 \quad -\Omega \sin L]^T \quad (5)$$

여기서 Ω 는 지구 자전 각속도의 크기 $0.262[\text{rad/hr}]$ 이며 L 은 위도를 나타낸다. 방위 코사인 행렬은 (3)과 (4)에서 계산한 롤각과 피치각으로부터 다음 (6)과 같이 정리할 수 있다[1-3].

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\phi \\ \sin\theta\sin\phi & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ \sin\theta\cos\phi & -\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = C_1 C_2 \quad (6)$$

(6)을 (5)에 대입하고 (5)의 양변에 C_1^T 를 곱하면 (7)을 얻을 수 있다.

$$C_1^T \omega_{ie}^b = C_2 \omega_{ie}^n = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3]^T = [\Omega \cos\psi \cos L \quad -\Omega \sin\psi \cos L \quad -\Omega \sin L]^T \quad (7)$$

여기서 $C_1^T \omega_{ie}^b$ 는 항법 좌표계에 대하여 요각만큼 회전한 Wander-azimuth 좌표계로 생각할 수 있다. (7)로부터 (8)과 같이 요각을 구할 수 있다.

$$\psi = \tan^{-1}\left[\frac{-\omega_2}{\omega_1}\right] \quad (8)$$

III. 정밀 정렬 알고리즘

널리 사용되는 오차모델에는 Phi각 오차모델과 Psi각 오차모델이 있으며, 그림 1에 나타난 바와 같이 Phi각은 참 좌표계와 플랫폼 좌표계간의 각이고, Psi각은 컴퓨터 좌표계와 플랫폼 좌표계간의 각이다. 본 절에서는 Psi각 오차모델로부터 정밀정렬 알고리즘을 도출하는 과정을 서술한다.

SDINS Psi각 속도 오차 방정식은 다음과 같다[8].

$$\begin{aligned} (\delta \dot{V}_e^n)_N &= f_E^n \delta A_D - f_D^n \delta A_E + \delta f_N^n + 2(\omega_{ie}^n)_E (\delta V_e^n)_D \\ &\quad - 2(\omega_{ie}^n)_D (\delta V_e^n)_E + (\omega_{en}^n)_E (\delta V_e^n)_D \\ &\quad - (\omega_{en}^n)_D (\delta V_e^n)_E + \delta g_N^n \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (\delta \dot{V}_e^n)_E &= f_D^n \delta A_N - f_N^n \delta A_D + \delta f_E^n + 2(\omega_{ie}^n)_D (\delta V_e^n)_N \\ &\quad - 2(\omega_{ie}^n)_N (\delta V_e^n)_D + (\omega_{en}^n)_D (\delta V_e^n)_N \\ &\quad - (\omega_{en}^n)_N (\delta V_e^n)_D + \delta g_E^n \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\delta \dot{V}_e^n)_D &= f_N^n \delta A_E - f_E^n \delta A_N + \delta f_D^n + 2(\omega_{ie}^n)_N (\delta V_e^n)_E \\ &\quad - 2(\omega_{ie}^n)_E (\delta V_e^n)_N + (\omega_{en}^n)_N (\delta V_e^n)_E \\ &\quad - (\omega_{en}^n)_E (\delta V_e^n)_N + \delta g_D^n \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 V_e 는 지구에대한 항체의 속도(ground velocity)를 나타낸다. δA 는 자세(롤, 피치, 요)오차이며, ω_{en}^n 은 Craft rate를 나타낸다. δ 는 해당변수의 오차를 나타내며, 아래첨자 N , E , D 는 항법 좌표계의 각축을 나타낸다.

Craft rate의 오차를 항법 좌표계에서 나타내면 다음 (12)와 같다[9].

$$\delta \omega_{en}^n = \begin{bmatrix} -\frac{(V_e^n)_E \delta h}{R_y^2} \\ \frac{(V_e^n)_N \delta h}{R_x^2} \\ \frac{(V_e^n)_E \tan L \cdot \delta h}{R_y^2} - \frac{(V_e^n)_E \sec^2 L \cdot \delta L}{R_y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_y} & 0 \\ -\frac{1}{R_x} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\tan L}{R_y} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\delta V_e^n)_N \\ (\delta V_e^n)_E \\ (\delta V_e^n)_D \end{bmatrix} \quad (12)$$

그림 1. Psi각과 Phi각.

Fig. 1. Psi angle and Phi angle.

여기서 $R_x = (R_l + h)\cos L$, $R_y = R_m + h$ 이다.

정렬에서 항체는 정지되어 있으며, 항체의 위치는 알고있으므로, 위치 오차는 없다. 따라서, 정렬에서는 (12)의 δh 과 δL 은 0이다. 그러므로 Craft rate의 오차는 (13)과 같이 정리할 수 있다.

$$\delta \omega_{en}^n = \begin{bmatrix} \frac{(\delta V_e^n)_N}{R_y} & -\frac{(\delta V_e^n)_E}{R_x} & -\frac{\tan L (\delta V_e^n)_D}{R_y} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

Craft rate의 오차는 R_l 와 R_m 은 각각 동서운동과 남북운동에 대한 지구 반지름으로 다음 (14)와 (15)와 같이 나타난다.

$$R_m(L) = \frac{e_- r(1 - (e_- c)^2)}{(1 - (e_- c)^2 \sin^2(L))^{1.5}} \quad (14)$$

$$R_l(L) = \frac{e_- r}{\sqrt{1 - (e_- c)^2 \sin^2(L)}} \quad (15)$$

여기서 $e_- r$ 은 지구 평균 반지름으로 6378137[m], $e_- c$ 는 지구 이심률로 나타낸다.

SDINS Psi각 자세 오차 방정식을 정리하면 다음과 같다[8].

$$\delta \dot{A}_N = (\omega_{in}^n)_D \delta A_E - (\omega_{in}^n)_E \delta A_D - \varepsilon_N^n \quad (16)$$

$$\delta \dot{A}_E = -(\omega_{in}^n)_D \delta A_N + (\omega_{in}^n)_N \delta A_D - \varepsilon_E^n \quad (17)$$

$$\delta \dot{A}_D = -(\omega_{in}^n)_N \delta A_E + (\omega_{in}^n)_E \delta A_N - \varepsilon_D^n \quad (18)$$

여기서 ω_{in}^n 은 관성 좌표계에 대한 항법 좌표계의 각속도를 항법 좌표계에서 나타낸 것이며, ε^n 은 각속도 센서인 자이로의 오차를 항법 좌표계에서 나타낸 것이다. 일반적으로 개략정렬의 결과는 수평면에서의 방위각 오차가 제일 크므로 [4,10], 즉 $\delta A_N, \delta A_E \ll \delta A_D$ 이다. 즉, (16)~(18)에서 δA_N 과 δA_E 는 δA_D 에 비하여 큰 영향을 미치지 않으므로, 이를 무시한다[4]. 그러면 (19)~(21)이 얻어진다.

$$\delta \dot{A}_N = -(\omega_{in}^n)_E \delta A_D - \varepsilon_N^n \quad (19)$$

$$\delta \dot{A}_E = (\omega_{in}^n)_N \delta A_D - \varepsilon_E^n \quad (20)$$

$$\delta \dot{A}_D = -\varepsilon_D^n \quad (21)$$

항체가 정지하고 있으므로 항법 좌표계에서의 지구에 대한 각속도 (ω_{en}^n) 는 0이다. 즉, 다음 (22)가 성립한다.

$$(\omega_{en}^n)_N = (\omega_{en}^n)_E = (\omega_{en}^n)_D = 0 \quad (22)$$

그리고 지구에 대한 가속도(ground velocity의 미분, $\dot{V}_e^n$)는 0이며, 가속도계의 출력에는 D축상에 $-g$ 값만 측정된다. 즉, (1)이 성립한다. 한편, (9)~(11)에서 코리올리 효과에 의한 항은 정지시 매우 작은 값을 가지므로 다음 (23)을 만족한다[3].

$$\omega_e^n \times \delta V_e^n = 0 \quad (23)$$

(1), (22)와 (23)을 이용하면 속도 오차 방정식, 각 축에 대한 Craft rate 오차 및 자세 오차 방정식을 다음 (24)~(30)과 같이 정리할 수 있다.

$$(\delta \dot{V}_e^n)_N = \delta f_N^n + g \delta A_E + \delta g_N^n \quad (24)$$

$$(\delta \dot{V}_e^n)_E = \delta f_E^n - g \delta A_N + \delta g_E^n \quad (25)$$

$$(\delta \omega_{en}^n)_N = \frac{(\delta V_e^n)_E}{R_y} \quad (26)$$

$$(\delta \omega_{en}^n)_E = -\frac{(\delta V_e^n)_N}{R_x} \quad (27)$$

$$\delta \dot{A}_N = -(\omega_{ie}^n)_E \delta A_D - \varepsilon_N^n \quad (28)$$

$$\delta \dot{A}_E = (\omega_{ie}^n)_N \delta A_D - \varepsilon_E^n \quad (29)$$

$$\delta \dot{A}_D = -\varepsilon_D^n \quad (30)$$

여기서 δg 는 중력오차로 다음 (31)과 같다.

$$\delta g^n = [0 \ 0 \ g_h]^T \delta L + [0 \ 0 \ g_h] \delta h \quad (31)$$

그런데 (13)을 정리할 때와 마찬가지로 (31)에서 δh 과 δL 은 0이다. 그러므로 (31)은 무시할 수 있다.

(24)~(30)을 그림 2와 같이 블록선도로 나타낼 수 있다. 본 논문에서 대상으로 하는 Psi각 오차모델에서는 그림 2의 점선 부분이 연결되지 않는다.

(24)~(30)은 [4]에서 제시한 정렬시의 Phi각 오차 방정식에 대응하는 정렬시의 Psi각 오차방정식이다. 이와는 달리, [1]에서와 같이 (19)~(21) 유도에서의 가정을 사용하지 않은 정렬시의 Phi각 오차방정식에 대응하는 정렬시의 Psi각 오차방정식도 유도할 수 있다. 이 경우 (24)~(30)과 유사하지만, 정렬 결과의 성능에는 큰 차이가 없지만 더 복잡한 오차방정식을 얻을 수 있다.

그림 2에서 제시한 Psi각 오차모델의 블록선도를 phi각 오차모델의 블록선도[1,4,6]와 비교해보면 점선 화살표가 연결되면 Phi각 모델이며, 연결되지 않으면 Psi각 모델이다. 즉, Phi 각 오차모델에서는 $\delta \omega_{in}^n$ 이 자세오차에 직접적으로 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그 이유는 (9)~(11)의 오차모델 유도시 $\delta \omega_{ie}^n$ 의 값이 Phi각 모델에서는 0이 되지 않지만, Psi각 모델에서는 0이 되기 때문이다.

개략정렬 후 수행하는 정밀정렬은 그림 2에 제시한 오차모델을 대상으로 자세오차를 줄이는 방향으로 측정치인 속

그림 2. 정지시 SDINS Psi/Phi각 오차모델의 블록선도.

Fig. 2. Block diagram of SDINS Psi/Phi angle error model for stationary state.

그림 3. 정밀정렬 피드백 루프 구조.

Fig. 3. Fine alignment feedback loop structure.

그림 4. Psi각 오차모델 기반 정밀정렬 피드백 루프 블록선도.

Fig. 4. Psi angle error model based fine alignment feedback loop block diagram.

그림 5. 정밀정렬 알고리즘 전체 블록 선도.

Fig. 5. Fine alignment algorithm overall block diagram.

도오차에 적절한 이득을 곱하여 입력부로 귀환시킨다. 즉, 개략정렬과 마찬가지로 N, E축 가속도계로 측정되는 중력이 0인 특성과 E축 자이로스코프로 측정되는 지구 자전 각속도가 0인 특성을 이용한다. 그림 3과 같이 δA_E 와 δA_D 가 포함된 부분에 대하여 속도오차가 0이 되도록 K_1 , K_2 , K_3 이득을 설정하여 루프를 구성한다. 유사하게 δA_D 와 δA_N 이 포함된 루프도 대칭적으로 생각할 수 있으므로 그림 2에 그림 3의 정밀정렬 알고리즘을 적용하면 그림 4가 된다.

그림 5는 Psi각 오차모델을 이용한 SDINS 정밀정렬 알고리즘의 전체 블록 선도이다. 입력은 가속도계 출력 f^b 와 자이로스코프 출력 $\omega_{B_b}^b$ 이며, 항법 좌표계에 대한 동체 좌표계의 자세를 출력한다. 개략정렬에서와 마찬가지로 Wander-azimuth 좌표계를 사용하여 요각을 계산한다. 가속도계 출력과 자이로스코프 출력을 먼저 피치각과 롤각을 정렬한 Wander-azimuth 좌표계 (C_b^r)에서의 값으로 변환한다. 그림 5에서 δA_N 과 δA_E 는 자세계산 블록의 출력이며, δA_D 는 다음 (32)를 이용하여 계산한다.

$$\delta A_D = \alpha_0 + \delta \alpha \quad (32)$$

여기서 α_0 는 (33)과 같이 계산한다.

$$\alpha_0 = -\tan^{-1}\left(\frac{B_2}{B_1}\right) \quad (33)$$

그림 5에서 B_1 과 B_2 를 표시하였는데, 정상상태에서 그림 4를 이용하여 이 값들을 구하면 다음 (34)와 (35)와 같다.

$$B_1 = \Omega \cos L \cos \alpha_0 \quad (34)$$

$$B_2 = \Omega \cos L \sin \alpha_0 \quad (35)$$

(32)에서 $\delta \alpha$ 는 δA_D 와 α_0 의 차이로 개략정렬에서와 같이 좌표변환행렬 C_b^r 를 (34)와 같이 표현하자.

$$C_b^r = \begin{bmatrix} \cos \delta \alpha & \sin \delta \alpha & 0 \\ -\sin \delta \alpha & \cos \delta \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\delta \alpha = \tan^{-1}\left(-\frac{C_{21}}{C_{11}}\right) \quad (37)$$

그림 3에서 루프 이득 K_1 , K_2 , K_3 을 결정하기 위하여 전체 폐루프의 특성방정식을 구하면 (38)과 같다.

$$s^3 + K_1 s^2 + K_2 g s + K_3 = 0 \quad (38)$$

(38)이 아래 (39)의 형태가 된다고 하자.

$$(s + \alpha)(s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2) = 0 \quad (39)$$

(39)에서 α 는 $s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2$ 의 실수근의 10배이상이라고 하고, 항법 시스템의 특성에 따른 계단응답의 오버슈트(overshoot) 및 정착시간(settling time)사양을 만족하도록 ζ 와 ω_n 값을 정하면, (38)의 K_1 , K_2 , K_3 값을 구할 수 있다. 오버슈트가 5%, 정착시간이 10초이라고 할 때의 이득은 표 1과 같다.

센서오차에 의해서 유발되는 정밀정렬오차의 정상상태 값을 살펴보기 위하여 센서오차를 입력으로 두고, 각각의 자세오차를 출력으로 하는 전달함수는 그림 4로부터 (40)-(42)와

표 1. 정밀 정렬 루프 이득.

Table 1. Fine alignment loop gain.

	이득
K1	0.24295112
K2	$\frac{0.00294398632}{g}$
K3	$\frac{92.9352513078}{R+h}$

같이 구할 수 있다.

$$\delta A_N(s) = \frac{-(s - K_1)(\frac{\varepsilon_N}{s} + \Omega_E \delta A_D(s)) + K_2 \frac{\delta f_E}{s}}{s^2 + K_1 s + K_2 g} \quad (40)$$

$$\delta A_E(s) = \frac{(s + K_1)(\Omega_N \delta A_D(s) - \frac{\varepsilon_E}{s}) - K_2 \frac{\delta f_N}{s}}{s^2 + K_1 s - K_2 g} \quad (41)$$

$$\delta A_D(s) = \frac{K_3 \frac{\delta f_N}{s} + K_3 g \frac{\varepsilon_E}{s} + (s^2 + K_1 s - K_2 g) \frac{\varepsilon_D}{s}}{s^3 + K_1 s^2 - K_2 g s + g \Omega_N K_3} \quad (42)$$

(40)~(42)에서 센서오차를 랜덤 상수로 두고 최종치 정리를 적용하여 정상상태에서의 자세오차 값을 다음 (43)~(45)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta A_{N,ss} &\equiv \lim_{t \rightarrow \infty} \delta A_N(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \delta A_N(s) \\ &= -\frac{K_1}{K_2 g} \varepsilon_N - \frac{K_2}{K_2 g} \delta f_E - \frac{K_1}{K_2 K_3 \Omega_N} \varepsilon_E - \frac{K_1}{g K_3} \varepsilon_D \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \delta A_{E,ss} &\equiv \lim_{t \rightarrow \infty} \delta A_E(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \delta A_E(s) \\ &= \frac{K_1}{K_2 g} \varepsilon_E + \frac{K_2}{K_2 g} \delta f_N - \frac{K_1}{K_2 K_3} \varepsilon_E - \frac{K_1}{K_3 g} \varepsilon_D \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \delta A_{D,ss} &\equiv \lim_{t \rightarrow \infty} \delta A_D(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \delta A_D(s) \\ &= \frac{K_3 g}{g \Omega_N K_3} \varepsilon_E - \frac{K_2 g}{g \Omega_N K_3} \varepsilon_D \end{aligned} \quad (45)$$

(43)~(45)를 이용하면 랜덤상수 센서오차에 의한 자세오차의 정상상태 값을 알 수 있다. 이들을 살펴보면 정밀 정렬의 최종결과인 초기자세오차의 정상상태 값은 센서오차 및 루프 이득인 K_1 , K_2 , K_3 의 값에 따라 달라짐을 알 수 있다.

IV. 성능검증

본 절에서는 제안한 정밀정렬 알고리즘의 유효성을 보기 위한 실시간 실험 결과를 제시한다.

그림 6에 실험 시스템의 구성을 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 시스템은 IMU (Inertial Measurement Unit), CPU 보드, 모니터링 시스템 그리고 정반(precision table)으로 구성된다. IMU는 중저급에 속하는 미국 허니웰사의 HG1700AE를 이용하였다. PowerPC 기반의 CPU인 MPC 8560기반의 자체 제작한 CPU 보드를 사용하였으며, IMU로부터 관성 센서 데이터를 입력받아 제안한 알고리즘을 구동한다. 모니터링 시스템은 노트북 PC를 사용하였으며 정렬결과를 받아서 저장하고, 시현한다. 본 논문의 실시간 실험에서 사용한 중저급 IMU인 HG1700AE의 사양은 표 2와 같다. 실험에서 사용한

그림 6. 정반 및 실험 시스템.

Fig. 6. The Precision surface plate and the experimental system.

표 2. HG1700AE IMU의 사양.

Table 2. HG1700AE IMU Specification.

	크기(1σ)
자이로 랜덤바이어스	1°/hr
자이로 백색잡음	80μrad
자이로 랜덤워크	0.125°/√h
가속도계 랜덤바이어스	1 mg
가속도계 백색잡음	0.008 ft/sec
가속도계 랜덤워크	0.065 ft/sec/√h

그림 7. 첫 번째 실험의 개략정렬 결과.

Fig. 7. Coarse alignment result of the first experiment.

정반면의 편평도는 $3\mu m$ 이며, 자복과 일치한다.

정반의 북쪽 방향을 정렬의 기준으로 두고, 50회의 실험을 수행하였다. 각각의 실험에서 개략정렬은 60초, 정밀정렬을 540초, 총 정렬 시간 600초이었다. 첫 번째 실험의 결과는 그림 7과 그림 8에 제시하였다. 그림 7은 개략정렬 결과이며, 그림 8은 정밀정렬 결과이다. 그림에서 요각의 오차가 제일 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 7과 그림 8의 결과는 자복에 일치하는 정반의 자면각 오차를 고려한 것이다.

표 3은 50회의 정렬 실험결과로부터 구한 평균, 표준편차, RMS 오차를 정리한 것이다. 랜덤상수인 센서오차만 존재할 경우, (43)~(45)의 정상상태의 정렬오차식으로부터 다음과 같

표 3. 초기정렬 실험 결과.

Table 3. Experimental results of the initial alignment.

	평균	표준편차 (1σ)	RMS 오차	예상오차 (1σ)
롤 각 (도)	-0.0056	0.0037	0.0067	0.0490
피치각 (도)	-0.0025	0.0032	0.0041	0.0490
요 각 (도)	0.5200	3.3009	3.3416	2.0926

그림 8. 첫 번째 실험의 정밀정렬 결과.

Fig. 8. Fine alignment result of the first experiment.

이 정렬오차의 표준편차 (1σ)를 구할 수 있다.

$$\delta A_{N,ss} = \sqrt{\left(\frac{K_1}{K_2 g} \varepsilon_N\right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_2 g} \delta f_E\right)^2 + \left(\frac{K_1}{K_2 K_3 \Omega_N} \varepsilon_E\right)^2 + \left(\frac{K_1}{g K_3} \varepsilon_D\right)^2} \quad (46)$$

$$\delta A_{E,ss} = \sqrt{\left(\frac{K_1}{K_2 g} \varepsilon_E\right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_2 g} \delta f_N\right)^2 + \left(\frac{K_1}{K_2 K_3} \varepsilon_E\right)^2 + \left(\frac{K_1}{K_3 g} \varepsilon_D\right)^2} \quad (47)$$

$$\delta A_{D,ss} = \sqrt{\left(\frac{K_3 g}{g \Omega_N K_3} \varepsilon_E\right)^2 + \left(\frac{K_2 g}{g \Omega_N K_3} \varepsilon_D\right)^2} \quad (48)$$

표 1에서 제시한 K_1 , K_2 , K_3 와 표 2에서 제시한 센서사양을 (46)~(48)에 대입하여 구한 값을 예상오차라고 하고 표 3의 마지막 열에 제시하였다.

표 3의 실험 결과를 살펴보면 롤각과 피치각은 예상오차 범위와 유사한 결과를 보이며, 요각은 예상보다 큰 결과를 얻었다. 이는 예상오차 계산시 사용한 (46)~(48)에서는 센서 오차로 랜덤 바이어스만을 고려하였으며, 기타 백색잡음, 랜덤위크, 양자화오차 등은 고려하지 않았고, 자편각의 부정확도와 정반의 편평도에 의한 결과라고 볼 수 있다. 그림 7과 그림 8의 결과와 표 3의 결과로부터 본 논문에서 제안한 Psi각 오차모델기반 정렬 알고리즘이 충분히 유효함을 알 수 있다.

V. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 Psi각 오차모델 기반의 스트랩다운 관성 항법 시스템의 초기정렬 알고리즘을 제안하였다. 실시간 항법

에서 많이 사용되는 Psi각 오차모델로부터 정밀 정렬 알고리즘을 도출하였으며, 정상상태에서의 정렬알고리즘의 오차를 예상할 수 있는 식도 도출하였다. 실시간 실험을 통하여 제안한 방법의 유효성을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 정렬 알고리즘은 관성 항법 시스템이나 GNSS/INS 통합 항법 시스템 등에서 초기정렬 알고리즘으로 유용하게 사용될 것으로 생각한다.

참고문헌

- [1] K. R. Britting, *Inertial Navigation Systems Analysis*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1971.
- [2] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology*, Springer Verlag Inc., New York, 1993.
- [3] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd Ed., IEE, Stevenage, 2004.
- [4] Sam C. Bose, *Lecture Notes on GPS/INS Integrated Navigation Systems*, Technalytics, Inc., Canoga Park, 1997.
- [5] G. R. Pitman, *Inertial Guidance*, John Wiley & Sons, New York, 1962.
- [6] Y. S. Kim, "The initial alignment for the SDINS using an attitude GPS determination receiver," Department of Electronics Engineering, Graduate School Chungnam National University, Feb. 2001.
- [7] J.-H. Kim, S. W. Moon, S. H. Lee, S. H. Kim, D.-H. Hwang, S. J. Lee, and S.-W. Ra, "Implementation of an initial alignment algorithm for a strapdown inertial navigation system," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 138-145, Feb. 2000.
- [8] H. K. Lee, J. G. Lee, Y. K. Roh, and C. G. Park, "Modeling quaternion errors in SDINS: Computer frame approach," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 289-299, Jan. 1998.
- [9] E. Bekir, *Introduction to Modern Navigation Systems*, World Scientific Publishing, New Jersey, 2007.
- [10] C. G. Park, K. J. Kim, H. W. Park, and J. G. Lee, "Development of an initial alignment algorithm for strapdown inertial navigation system," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 674-679, Oct. 1998.

박 슬 기

2008년 충남대학교 전자전파정보통신 전공 졸업. 2010년 충남대학교 대학원 석사 졸업. 2010년~현재 한국해양연구원. 관심분야는 GPS/INS 통합 항법 시스템, DR/Vision 통합 항법 시스템.

황 동 환

1985년 서울대학교 전기공학과 학사 졸업. 1987년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사 졸업. 1991년 동 대학원 박사 졸업. 1996년~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 통합 항법, 항법 시스템.

이 상 정

1979년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업. 1981년 동 대학원 석사 졸업. 1987년 동 대학원 박사 졸업. 1988년~현 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 강인제어, GNSS.