

스트랩다운 관성항법시스템의 초기 개략정렬 알고리즘

An Initial Coarse Alignment Algorithm for Strapdown Inertial Navigation System

박 찬 국, 김 광 진*, 박 흥 원**, 이 장 규***

*광운대학교 제어계측공학과(Tel: 940-5157; Fax: 942-7950; E-mail: cgpark@daisy.kwangwoon.ac.kr)

**국방과학연구소(Tel: (042)821-4497; Fax: (042)821-2224)

***서울대학교 전기공학부/자동제어특화연구센터(Tel: 880-7308; Fax: 878-8198; E-mail: jgl@asrignc3.snu.ac.kr)

Abstracts: In this paper, a coarse alignment algorithm for strapdown inertial navigation system is proposed and evaluated analytically. The algorithm computes roll and pitch angles of the vehicle using accelerometer outputs, and then determines yaw angle with gyro outputs. It is referred as *two-step coarse alignment* in this work. With the geometric relation between sensor outputs and roll, pitch and yaw angles, the algorithm error is analytically derived and compared with the previous coarse alignment algorithm introduced by Britting. The results show that the proposed two-step coarse alignment algorithm has better performance for pitch angle computation.

Keywords: Strapdown Inertial Navigation System(SDINS), Initial coarse alignment, Accelerometer, Gyro, Euler angle

1. 서론

스트랩다운 관성항법시스템(StrapDown Inertial Navigation System-SDINS)에서 초기 자기정렬(initial self-alignment)이란 항법 모드 진입 전에 항체가 정지한 상태에서 가속도계와 자이로의 센서 측정치로부터 항법좌표계에 대한 동체좌표계의 초기 자세를 나타내는 행렬 $C_n^s(0)$ 이나 초기 quaternion $q(0)$ 를 구하는 것이다[1]. 항체의 자세 오차는 항법 오차의 주요 요인 중에 하나로서 항법모드에서의 자세 오차는 최적 자세계산 알고리즘을 이용하여 최소화 할 수 있으나[2], 항법모드 진입 전인 초기 자세에서 오차가 발생하면 그 오차는 계속 누적되어 항법시스템의 성능에 큰 영향을 주게 된다[3]. 특히 시간적인 제약이 따르는 항체에 있어서 초기 정렬은 가장 중요한 문제중의 하나이다[4].

일반적으로 초기 자기정렬은 중력가속도와 지구 자전각속도를 이용하여 동체좌표계의 대략적인 자세를 구하는 개략정렬(coarse alignment)과 개략정렬에서 구한 자세 오차를 추정, 보정하는 정밀정렬(fine alignment)로 나눌 수 있다[5]. 즉 개략정렬이란 짧은 시간에 항체의 대략적인 초기 자세를 계산하는 것으로서 정밀정렬의 초기값을 제공하게 된다. 이 방법은 항법시스템은 물론 간단히 자세 정보를 얻고자 할 경우에도 유용하게 적용될 수 있다.

초기 자기정렬에서는 항체가 정지 상태에 있으므로 중력가속도와 지구 자전각속도만이 센서에 입력되며 이 때 가속도계와 자이로 출력을 동시에 사용하여 개략정렬을 수행하는 방법이 Britting에 의하여 제시 되었다[1], [4]. 그러나 이 방법을 수행하기 위해서는 가속도계 출력과 자이로 출력을 외적(cross product)한 새로운 벡터가 필요하며 가속도계와 자이로에 센서 오차가 존재하는 경우에는 센서 오차의 외적에 의한 영향이 자세 오차에 복합적으로 나타나게 된다.

본 논문에서는 개략정렬시 중력가속도에 의한 가속도계 출력을 이용하여 롤각과 피치각을 계산한 후 지구 자전각속도에 의한 자이로 출력을 이용하여 요각을 계산하는 2단계 개략정렬 알고리즘을 제시한다. 제시된 알고리즘의 성능 분석을 위하여 가속도계와 자이로 출력과 롤, 피치, 요각의 기하학적인 관계로부터 해석적인 오차식을 유도하며, 이를 이용하여 Britting에 의하여 제시되었던 단일 개략정렬과의 성능을 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절에서는 단일 개략정렬과 2단계 개략정렬 알고리즘에 대하여 설명하며 3절에서는 두 알고리즘의 해석적인 오차식을 유도한다. 그리고 4절에

서는 항법모드 진입 전인 초기 상태에서 동체좌표계와 항법좌표계가 일치한다는 가정하에 두 알고리즘의 오차를 비교하며 마지막으로 5절에서 결론을 맺는다.

2. 초기 개략정렬 알고리즘

자이로나 가속도계 등의 관성센서가 안정대 위에 장착되어 있는 GINS(Gimballed INS)는 레벨링(leveling)과 자이로컴파싱(gyrocompassing)을 통하여 초기 정렬을 수행한다[6], [7]. GINS는 두 수평축에 있는 가속도계의 출력이 0이 되도록 자이로에 신호를 보내어 플랫폼을 회전시킴으로써 레벨링을 수행하며, 수평축에 있는 한축을 정북 방향과 일치시키기 위하여 수직축 자이로를 회전시킴으로써 자이로컴파싱을 수행한다[7]. 그러나 SDINS에서는 가속도계와 자이로가 항체에 직접 부착되어 있으므로 GINS의 경우와 같이 플랫폼을 회전시킬 수 없으며 가속도계에 입력되는 중력가속도 성분과 자이로에 입력되는 지구 자전각속도 성분을 이용하여 항법좌표계와 동체좌표계의 관계를 나타내는 좌표변환행렬 $C_n^s(0)$ 을 구한다.

2.1 단일 개략정렬[1]

Britting이 제시한 단일 개략정렬은 가속도계와 자이로 출력을 동시에 사용하여 초기 좌표변환행렬을 계산하는 알고리즘이다.

먼저 동체좌표계로 표현된 항체의 가속도를 f_x, f_y, f_z 라 하면 항법좌표계 n과 동체좌표계 b 사이에는 다음의 관계가 성립하게 된다.

$$f^s = [f_x, f_y, f_z]^T = C_n^s f^b = C_n^s [0 \ 0 \ -g]^T \quad (1)$$

여기서 g는 중력가속도이다.

또한 관성공간에 대한 항체의 회전각속도를 동체좌표계로 나타낸 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 에 대하여 다음 식을 만족한다.

$$\omega^s = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T = C_n^s \omega^b = [\omega_x \cos L \ 0 \ -\omega_x \sin L]^T \quad (2)$$

여기서 ω_x 는 지구 자전각속도, L은 위도를 나타내며 식(1)과 식(2)를 외적인 새로운 벡터를 $v \equiv f \times \omega$ 로 정의하면 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$v^s = C_n^s v^b = C_n^s [0 \ -g\omega_x \cos L \ 0]^T \quad (3)$$

식(1)~(3)을 전치(transpose)한 후 벡터식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} (f^*)^T \\ (\omega^*)^T \\ (v^*)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f^*)^T \\ (\omega^*)^T \\ (v^*)^T \end{bmatrix} C_s^* \quad (4)$$

식(4)에서 항법좌표계와 동체좌표계 사이의 변환행렬인 C_s^* 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_s^* = \begin{bmatrix} (f^*)^T \\ (\omega^*)^T \\ (v^*)^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (f^*)^T \\ (\omega^*)^T \\ (v^*)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -g \\ \omega_x \cos L & 0 & -\omega_x \sin L \\ 0 & -g\omega_x \cos L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (f^*)^T \\ (\omega^*)^T \\ (v^*)^T \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} -(1/g)\tan L & (1/\omega_x)\sec L & 0 \\ 0 & 0 & -(1/g\omega_x)\sec L \\ -1/g & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (f^*)^T \\ (\omega^*)^T \\ (v^*)^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $(f^*)^T$, $(\omega^*)^T$ 는 가속도계와 자이로 출력이 되며 $(v^*)^T$ 는 계산을 통하여 얻을 수 있는 값이다. 그리고 현재 위치에서의 위도는 정확히 알 수 있으므로 나머지 값들의 계산이 가능하며 식(5)를 이용하여 좌표변환행렬을 구할 수 있다.

2.2 단계 개략정렬 알고리즘

단일 개략정렬에서는 좌표변환행렬을 구하기 위하여 중력가속도와 지구 자전각속도를 동시에 이용하였으나 2단계 개략정렬에서는 중력가속도와 지구 자전각속도를 나누어서 C_s^* 즉, 항체의 롤, 피치, 요각을 계산한다.

식(1)에서 C_s^* 에 롤, 피치, 요각의 관계식을 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cos \theta \cos \psi & \alpha \sin \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} g \sin \theta \\ -g \sin \phi \cos \theta \\ -g \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 ϕ 는 롤각, θ 는 피치각 그리고 ψ 는 요각을 나타낸다.

식(6)에서 롤각과 피치각은 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{-g \sin \phi \cos \theta}{-g \cos \phi \cos \theta} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{f_x}{f_z} \right) \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{g \sin \theta}{g \cos \theta} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{f_y}{\sqrt{f_x^2 + f_z^2}} \right) \quad (8)$$

식(7)과 식(8)에서 가속도계 출력에 의하여 롤각과 피치각이 결정됨을 알 수 있다.

다음으로 요각 ψ 을 계산하기 위하여 좌표변환행렬 C_s^* 를 롤, 피치각으로 구성된 행렬 C_1 과 기수각으로 구성된 행렬 C_2 로 나누어 다음과 같이 정의한다.

$$C_s^* = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

항법좌표계와 동체좌표계 사이의 자이로 출력들 간의 관계를 정의한 식(2)에 위의 식(9)를 대입하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$C_1^T \omega^* = C_2 \omega^* \quad (10)$$

위 식의 좌변을 새로운 벡터 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 로 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = C_1^T \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x \cos \theta + \omega_y \sin \phi \sin \theta + \omega_z \cos \phi \sin \theta \\ \omega_x \cos \phi - \omega_y \sin \phi \\ -\omega_x \sin \theta + \omega_y \sin \phi \cos \theta + \omega_z \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$= C_2 \begin{bmatrix} \omega_\psi \\ 0 \\ \omega_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_\psi \cos \psi \\ -\omega_\psi \sin \psi \\ \omega_\phi \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 $\omega_\psi = \omega_x \cos L$, $\omega_\phi = -\omega_x \sin L$.

식(12)에서 요각은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_\psi \sin \psi}{\omega_\psi \cos \psi} \right) = \tan^{-1} \left(-\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (13)$$

위 식에서 ω_1, ω_2 는 식(7)과 식(8)에서 구한 롤각과 피치각을 식(11)에 대입하여 구할 수 있으며 개략정렬이 롤각과 피치각을 구한 후 요각을 계산하는 2단계로 나누어 수행됨을 알 수 있다. 지금까지 계산된 ϕ, θ, ψ 를 이용하여 좌표변환행렬 $C_s^*(0)$ 을 직접 계산할 수 있으며 다음과 같이 초기 quaternion $q(0)$ 도 결정할 수 있다.

$$\begin{cases} q_0 = \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ q_1 = \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ q_2 = \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ q_3 = -\sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \end{cases} \quad (14)$$

식(14)에서 구한 quaternion과 좌표변환행렬과의 관계는 다음과 같다.

$$C_s^*(0) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_0 q_1 + q_2 q_3) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_0 q_2 - q_1 q_3) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

2단계 개략정렬은 가속도계의 입력을 이용하여 식(7)과 식(8)에서 롤각과 피치각을 계산한 후 식(13)을 이용하여 기수각을 계산한다. 이 값을 식(14)와 식(15)에 대입하여 quaternion과 좌표변환행렬의 초기값을 각각 계산할 수 있다.

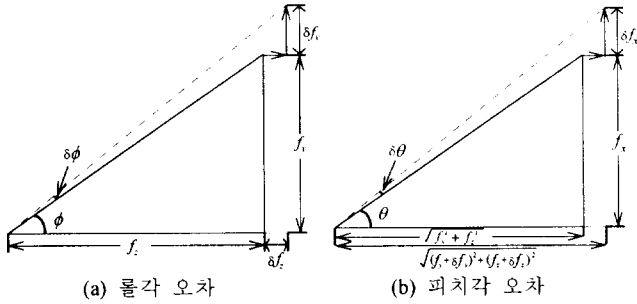
3. 알고리즘 오차

초기 자세계산에서 오차가 발생하면 그 오차는 비행 중에 계속 누적되어 항법시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 특히 초기 개략정렬의 경우에는 개루프(open loop) 상태에서 알고리즘이 수행되므로 센서의 오차가 직접적으로 좌표변환행렬과 quaternion에 영향을 주게 된다.

3.1 단일 개략정렬 알고리즘

단일 개략정렬 알고리즘은 [1]과 [4]에서 $C_s^* = I$ 의 조건에서 해석적으로 오차가 유도되어졌으며 N, E, D 방향에 대하여 다음과 같은 비정렬각(misalignment angle)을 가진다.

$$\varepsilon_x = -\frac{\delta f_x}{g} \quad (16)$$



(a) 롤각 오차 (b) 피치각 오차

그림 1. 가속도계 오차와 자세각의 관계

Fig. 1. The relations between the attitude and the accelerometer error

$$\epsilon_\epsilon = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta f_x}{g} - \frac{\delta f_y}{g} \tan L - \frac{\delta \omega_z}{\omega_x} \sec L \right] \quad (17)$$

$$\epsilon_\phi = \frac{\delta f_x}{g} \tan L + \frac{\delta \omega_z}{\omega_x} \sec L \quad (18)$$

3.2.2 단계 개략정렬 알고리즘

2단계 개략정렬 알고리즘의 오차 해석을 위하여 먼저 식(7)과 식(8)에서 롤, 피치각과 가속도계 출력과의 관계식을 다음과 같이 다시 표현한다.

$$\tan \phi = \frac{f_x}{f_y} \quad (19)$$

$$\tan \theta = \frac{f_x}{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}} \quad (20)$$

위 식의 기하학적인 모양은 그림 1과 같으며 오차 성분을 δ 로 표시하면 그림에서 센서오차에 의한 각 증분값 $\delta\phi, \delta\theta$ 를 구할 수 있다.

그림 1(a)에서 롤각 오차 성분이 포함된 가속도계의 관계식은 다음과 같다.

$$\tan(\phi + \delta\phi) = \frac{f_x + \delta f_x}{f_y + \delta f_y} \quad (21)$$

롤각 오차 $\delta\phi$ 가 매우 작다고 가정하면 다음의 관계가 성립한다.

$$\sin \delta\phi \approx \delta\phi, \cos \delta\phi \approx 1, \tan \delta\phi \approx \delta\phi \quad (22)$$

위 식을 식(21)에 대입하면 다음과 같은 근사식을 만들 수 있다.

$$\frac{\tan \phi + \delta\phi}{1 - \delta\phi \tan \phi} = \frac{f_x + \delta f_x}{f_y + \delta f_y} \quad (23)$$

식(23)에서 오차 제곱항을 무시하고 $\delta\phi$ 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\delta\phi = \frac{f_x + \delta f_x - f_y \tan \phi - \delta f_y \tan \phi}{f_y \tan \phi + f_x} \quad (24)$$

식(24)에 식(6)의 가속도계 입력을 대입하면 롤각 오차 $\delta\phi$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\delta\phi = \frac{\delta f_y \sin \phi - \delta f_x \cos \phi}{g \cos \phi} \quad (25)$$

위 식에서 롤각 오차는 y, z축 가속도계 오차에 의하여 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

그림 1(b)에서 오차가 포함된 피치각과 가속도계 출력과의

관계는 다음과 같다.

$$\tan(\theta + \delta\theta) = \frac{f_x + \delta f_x}{\sqrt{(f_y + \delta f_y)^2 + (f_z + \delta f_z)^2}} \quad (26)$$

위 식의 우변의 분모는 제곱근 형태이므로 식을 간략히 하기 위하여 가속도계 입력을 대입하여 다음과 같이 전개한다.

$$\begin{aligned} (f_y + \delta f_y)^2 + (f_z + \delta f_z)^2 &= (g \cos \theta)^2 - 2g \cos \theta (\delta f_y \sin \phi + \delta f_z \cos \phi) + \delta f_y^2 + \delta f_z^2 \\ &\approx (g \cos \theta)^2 - 2g \cos \theta (\delta f_y \sin \phi + \delta f_z \cos \phi) \\ &\approx (g \cos \theta - \delta f_y \sin \phi - \delta f_z \cos \phi)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

식(26)에 식(27)을 대입하고 삼각함수 성질을 이용하여 전개하면 피치각 오차 $\delta\theta$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\delta\theta = \frac{\delta f_x \cos \theta + \sin \theta (\delta f_y \sin \phi + \delta f_z \cos \phi)}{g} \quad (28)$$

위 식에서 피치각 오차는 x, y, z축 가속도계 오차에 모두 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

다음으로 자이로 출력을 이용하는 요각의 오차식을 앞의 과정과 동일하게 유도한다. 먼저 식(13)에서 다음의 관계가 성립한다.

$$\tan \psi = -\frac{\omega_z}{\omega_x} \quad (29)$$

식(11)에서 ω_x, ω_z 의 오차에 영향을 주는 항으로 가속도계 오차에 의하여 발생하는 $\delta\phi, \delta\theta$ 와 자이로 오차 $\delta\omega_x, \delta\omega_z$ 가 있다. 그러나 요각 오차 $\delta\psi$ 는 가속도계 오차에 의한 영향보다는 자이로 오차에 의한 영향이 지배적이므로 식(11)에서 다음과 같이 $\delta\omega_x, \delta\omega_z$ 를 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta\omega_x &\approx \delta\omega_x \cos \theta + \delta\omega_z \sin \theta + \delta\omega_y \cos \phi \sin \theta \\ \delta\omega_z &\approx \delta\omega_z \cos \phi - \delta\omega_y \sin \phi \end{aligned} \quad (30)$$

식(29)는 그림 1과 유사한 관계가 성립하므로 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\tan(\psi + \delta\psi) = \frac{\tan \psi + \delta\psi}{1 - \delta\psi \tan \psi} = -\frac{\omega_z + \delta\omega_z}{\omega_x + \delta\omega_x} \quad (31)$$

위 식을 오차 제곱항은 무시하고 $\delta\psi$ 에 대하여 정리하면 요각 오차는 다음과 같다.

$$\delta\psi = -\frac{\delta\omega_x \sin \psi + \delta\omega_z \cos \psi}{\omega_x} \quad (32)$$

식(32)는 항체의 자세와 자이로 오차에 의한 요각 오차를 나타내는 식이다.

앞에서 유도한 식(25), 식(28) 그리고 식(32)로부터 개략정렬 시 발생한 자세 오차는 가속도계와 자이로에 의한 센서 오차와 항체의 초기 자세에 의하여 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 개략정렬 알고리즘 성능 비교

Britting이 제시한 단일 개략정렬 알고리즘과 본 논문에서 제시한 2단계 개략정렬 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 3절에서 유도한 오차식을 이용하여 오차 분석을 수행한다. 오차 해석은 여러 가지 오차들이 동시에 입력되므로 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 오차를 이용하여 수행한다[8].

표 1. 개략정렬 알고리즘 오차

Table 1. Algorithm errors for two coarse alignment methods

자세 오차	단일 개략정렬	2단계 개략정렬
N 방향	$-\frac{\delta f_x}{g}$	$-\frac{\delta f_x}{g}$
E 방향	$\frac{1}{2} \left[\frac{\delta f_x}{g} - \frac{\delta f_x}{g} \tan L - \frac{\delta \omega_z}{\omega_{ie}} \sec L \right]$	$\frac{\delta f_x}{g}$
D 방향	$\frac{\delta f_x}{g} \tan L + \frac{\delta \omega_z}{\omega_{ie}} \sec L$	$\frac{\delta \omega_z}{\omega_{ie}} \sec L$

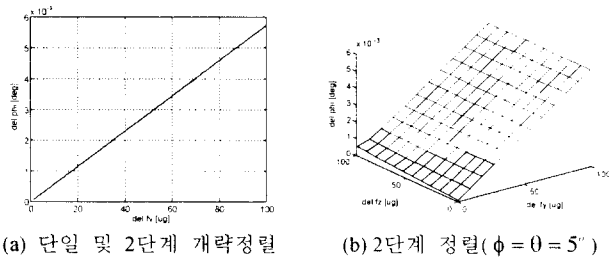


그림 2. 개략정렬시 롤각 오차
Fig. 2. Roll angle error for the coarse alignment

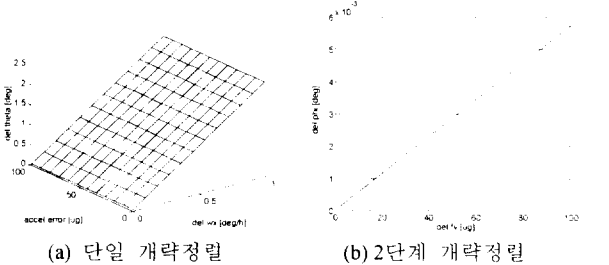


그림 3. 개략정렬시 피치각 오차
Fig. 3. Pitch angle error for the coarse alignment

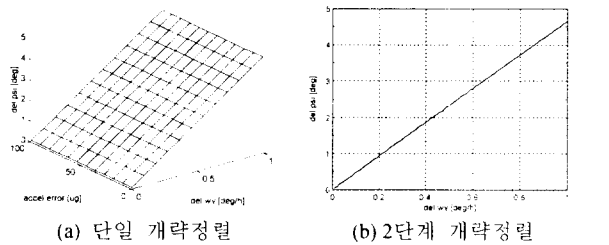


그림 4. 개략정렬시 요각 오차
Fig. 4. Yaw angle error for the coarse alignment

단일 개략정렬의 오차 해석은 [1], [4]에서 N, E, D축에 대하여 $C_n^a = 1$ 라는 가정하에 수행되었으며 앞에서 유도한 2단계 개략정렬 오차식에서 롤, 피치, 요각을 0으로 두면 $C_n^a = 1$ 가 만족되므로 두 알고리즘이 동일한 조건이 된다. 두 방법의 오차를 비교하면 표 1과 같다.

표 1에서 롤각 오차는 두 방법이 동일하다는 것을 알 수 있다. 가속도계 오차가 1-100[ug]인 경우에 대한 롤각 오차는 그림 2(a)와 같으며 가속도계 오차가 선형적으로 증가함에 따라 롤각 오차도 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 2(b)는 2단계 개략정렬에서 항체의 롤, 피치각이 5도인 경우의 오차를 시뮬레이션한 것으로써 이 경우에도 y축 가속도계가 N 방향 자세오차에 주요 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그림 3은 가속도계와 자이로 오차가 각각 1-100[ug], 0.01-1 [deg/h]로 변화될 경우의 두 방법의 오차를 비교한 것이다. 그림 3(a)에서 단일 개략정렬의 오차는 x, z축의 가속도계 오차와

x축 자이로 오차에 의하여 최대 2.3도를 나타내며 x축 자이로 오차에 의하여 지배적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이것은 (b)에서 y축 가속도계 오차에만 영향을 받는 2단계 개략정렬 알고리즘의 오차와 비교하여 매우 큰 값을 나타냄을 알 수 있다.

그림 4는 두 알고리즘의 요각 오차를 분석한 것이다. 그림에서 단일 개략정렬의 요각 오차는 y축 가속도계와 y축 자이로 오차에 의하여 영향을 받는 반면에 2단계 개략정렬의 오차는 y축 자이로에 의해서만 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 두 방법을 비교하면 오차의 최대값은 단일 개략정렬이 약간 크게 나타나며 이것은 y축 가속도계 오차의 영향이 포함되기 때문이다. 그러나 그 영향은 그림 4에서 나타난 바와 같이 상대적으로 매우 작은 값으로 요각 오차에 영향을 미치는 것은 자이로 오차가 지배적임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 항체가 정지 상태에 있는 초기 정렬시 중력 가속도를 측정하는 가속도계와 지구 자전각속도를 측정하는 자이로의 출력을 차례로 이용하여 개략정렬을 수행하는 2단계 개략정렬 알고리즘을 제시하였다. 그리고 알고리즘의 해석적인 오차식을 항체의 자세와 센서 입력과의 기하학적인 관계를 이용하여 유도하였으며 그 결과 롤각과 피치각 오차는 가속도계에 의해서만 영향을 받게 되며 기수각은 자이로 오차에 의하여 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 이전에 많이 사용되었던 단일 개략정렬 알고리즘과의 성능 비교를 위하여 항법좌표계와 동체좌표계가 일치 되었다는 가정하에 오차 해석을 수행하였다. 그 결과 피치각의 경우에는 2단계 개략정렬 알고리즘이 상대적으로 매우 우수하다는 것을 알 수 있었으며 이것은 2단계 개략정렬 알고리즘의 피치각 오차는 가속도계 오차에만 영향을 받기 때문이다. 본 논문에서 제시된 2단계 개략정렬 알고리즘은 정밀정렬을 수행하기 이전에 항법시스템의 개략적인 자세를 구하기 위하여 효율적으로 사용될 수 있으며 그 이외에도 간단히 자세 정보를 얻고자 할 경우에도 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] K. R. Britting, *Inertial Navigation Systems Analysis*, Wiley & Sons, 1971.
- [2] 박찬국, 이달호, 박찬용 외, 관성항법장치 항법 알고리즘 연구, 자동차이특화연구센터 연구보고서, 1995.
- [3] 이장규, 박찬국, 정도형, 조준경 센서를 이용한 간이 지상항법시스템 구성(2차년도), 국방과학연구소 연구보고서, 1994.
- [4] K. R. Britting and T. Palsson, "Self-Alignment Techniques for Strapdown Inertial Navigation Systems with Aircraft Application," *Journal of Aircraft*, Vol.7, No. 4, 1970, pp. 302-307
- [5] S. G. Garg, L. D. Morrow and R. Mamen, "Strapdown Navigation Technology: A Literature Survey," *Journal of Guidance and Control*, Vol. 1, No. 3, 1978, pp.161-172
- [6] G. M. Siouris, *Special Lecture on Integrated Inertial Navigation Systems*, 서울대학교 제어계측신기술연구센터, 1993.
- [7] M. Kayton and W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*, Wiley & Sons, 1969.
- [8] C. W. de Silva, *Control Sensors and Actuators*, Prentice-Hall, 1989