

확장칼만필터를 이용한 수중 운동체의 자세계산 시스템 설계

The Design of Attitude Reference System for Underwater Vehicle Using Extended Kalman Filter

°홍현수*, 박찬국**, 한형석***, 이장규****

*서울대학교 전기공학부(Tel: +82-2-872-8190; Fax: +82-2-878-8198; E-mail: hshong@asrignc1.snu.ac.kr)

**광운대학교 제어계측공학과(Tel: +82-2-940-5157; Fax: +82-2-942-7950; E-mail: cgpark@daisy.kwangwoon.ac.kr)

***경원대학교 전기전자공학부(Tel: +82-0342-750-5561; E-mail: hhs@asrignc3.snu.ac.kr)

****서울대학교 전기공학부(Tel: +82-2-880-7308; Fax: +82-2-878-8198; E-mail: jgl@asrignc3.snu.ac.kr)

Abstracts This paper presents the algorithm for estimating the attitude of an underwater vehicle using EKF. The system model is designed by linearizing the nonlinear Euler angle differential equation and the measurement is a speed logger output. The simulation result shows that the estimation algorithm is adequate for decreasing attitude errors that grow abruptly during the motion with acceleration and rotation. It also shows that we can adapt the algorithm for compensating initial attitude errors generated after initial leveling.

Keywords underwater vehicle, EKF, attitude, Euler angle, speed logger

1. 서론

관성 센서로 구성되는 스트랩다운 자세계산 시스템은 자세각 계산 시에 적분 과정을 거치므로 시간에 따라 자세각의 오차가 증가하는 특성이 있다[1]. 특히 저가의 자이로스코프와 가속도계를 사용하는 시스템의 경우에는 자세각의 오차가 크게 증가할 수 있다. 따라서 저급 센서로 구성된 시스템은 오차의 누적을 억제하고 시스템이 허용하는 범위 내에서 오차를 유지시키는 자세계산 알고리즘이 필요하다. 이와 같은 이유로 본 논문에서는 저급 관성 센서와 전진방향속도계로 구성된 수중 운동체의 스트랩다운 자세계산 시스템에 적합하도록 자이로스코프와 가속도계의 출력으로부터 시스템 모델을 구하고 전진방향속도계의 출력으로 오차를 보정하는 확장칼만필터를 이용한 자세각 계산 알고리즘을 제시한다. 비선형인 오일러 각을 이용한 자세각 계산식으로부터 선형모델을 유도하는 과정과 이로 인한 제한 조건을 만족시키기 위하여 측정행렬인 비선형인 필터를 설계한다. 자세각 오차 누적을 억제하기 위한 알고리즘으로 확장칼만필터 알고리즘과 기존의 가속도계를 이용한 알고리즘을 비교해보고 그 결과를 분석한다.

2. 가속도계를 이용한 자세각 계산

2.1 좌표계 및 자세각 계산

자세계산 알고리즘에 사용되는 좌표계들과 운동체의 자세를 나타내는 오일러 각을 정의한다. 자세계산에 사용되는 좌표계로는 그림 1과 같이 관성 좌표계(i-frame), 지구 고정 좌표계(e-frame), 항법 좌표계(n-frame), 동체 좌표계(b-frame) 등이 쓰인다.

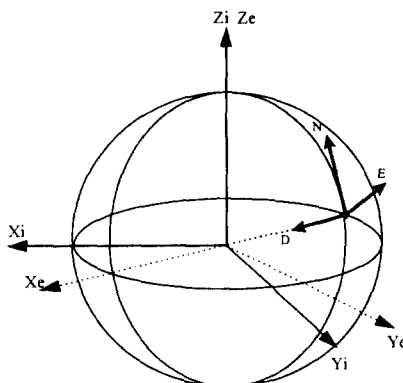


그림 1 관성 좌표계, 지구 고정 좌표계, 항법 좌표계의 정의

운동체의 자세는 항법 좌표계와 동체 좌표계 사이의 상대적 위치를 나타내는 오일러 각을 정의하여 나타낸다. 오일러 각은 롤각(roll, ϕ), 피치각(pitch, θ), 요각(yaw, ψ) 세가지 성분으로 구성되고 요각, 피치각, 롤각의 순서로 회전하는 각을 정의하여 사용한다. 오일러 각을 사용하여 항법 좌표계에서 동체 좌표계로의 좌표변환행렬 C_n^b 를 유도하면 다음과 같다[1,3].

$$C_n^b = C_3^b(\phi)C_2^3(\theta)C_n^2(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서

$$C_n^2(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_2^3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$C_3^b(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$

항법 좌표계에 대한 회전 각속도를 동체 좌표계로 나타낸 각속도 벡터를 $\omega_{nb}^b = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 라 하자. 또한 오일러 각의 변화율로 이루어진 벡터를 $[\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ 라 하자. 이렇게 정의된 두 벡터 사이의 관계식을 구해보면 식(3)과 같다[1,3].

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_3^b(\phi) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_3^b(\phi)C_2^3(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 사용된 행렬들은 식(2)에서 사용된 좌표변환 행렬이다. 다시 식(3)을 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)는 오일러 각에 대한 비선형 미분방정식을 나타낸다. 결국 ω_{nb}^b 를 자이로스코프 출력값으로 부터 얻고 식(4)를 수치 적분하여 자세각을 계산한다. 따라서 오일러 각을 이용한 방법은 적분 과정에서 초기 자세각의 오차가 그대로 유지되며 시간이 지남에 따라서 자세각의 오차가 누적되는 특성을 가지고 있다[5,7].

2.2 가속도계를 이용한 자세각 계산

식(4)의 오일러 각을 이용한 알고리즘과는 달리 가속도계와 전진방향속도계를 이용하여 적분을 하지 않고 롤각과 피치각을 구할 수 있는 알고리즘을 유도할 수 있다.

고정 좌표계인 관성좌표계와 그에 대한 각속도 ω_{ib}^b 를 가지고 회전하는 동체 좌표계에서 속도 \mathbf{v} 에 대한 변화율의 관계를 동체좌표계로 나타내면 다음과 같다[1,6].

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt}\Big|_i^b = \frac{d\mathbf{v}}{dt}\Big|_b^b + \omega_{ib}^b \times \mathbf{v}^b = \dot{\mathbf{v}}^b + \omega_{ib}^b \times \mathbf{v}^b \quad (5)$$

좌변은 관성 좌표계에 관한 \mathbf{v} 의 변화율이고 우변의 첫째 항은 동체 좌표계에 관한 \mathbf{v} 의 변화율이다. 식(5)와 가속도계에서 측정되는 힘(specific force) \mathbf{f} 의 정의에 따르면 \mathbf{f} 와 속도 \mathbf{v} 와의 관계식을 얻을 수 있다[1].

$$\mathbf{f} = \dot{\mathbf{v}}^b + (\omega_{eb}^b + 2\omega_{ie}^b) \times \mathbf{v}^b - \mathbf{g}(\mathbf{R}) \quad (6)$$

여기서 ω_{ie}^b 는 지구자전각속도이고 $\mathbf{g}(\mathbf{R})$ 은 중력벡터(gravity vector)이다. 자이로스코프의 출력값인 $\omega_{ib}^b (= \omega_{eb}^b + \omega_{ie}^b)$ 를 고려하면 다음 두 식을 만족한다.

$$\omega_{eb}^b + 2\omega_{ie}^b = \omega_{ib}^b + \omega_{ie}^b \quad (7)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{R}) = C_n^b \mathbf{g}^n = C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin\theta \\ g \sin\phi \cos\theta \\ g \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 \mathbf{g}^n 은 항법 좌표계에서의 중력벡터이다. 수중 운동체와 같은 단시간의 운동을 하는 항체의 경우에는 위치 오차에 따른 $\omega_{ie}^b (= [\Omega_x \ \Omega_y \ \Omega_z]^T)$ 의 오차를 무시할 수 있으므로 이 식들로부터 \mathbf{f} , $\mathbf{v}^b (= [u \ v \ w]^T)$, $\omega_{ib}^b (= [p^* \ q^* \ r^*]^T)$ 를 사용하여 자세각 중에서 롤각과 피치각을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta &= \sin^{-1}((\mathbf{f}_x - \dot{u} + (r^* + \Omega_z)v - (q^* + \Omega_y)w) / g) \\ \phi &= \sin^{-1}((-f_y + \dot{v} + (r^* + \Omega_z)u - (p^* + \Omega_x)w) / g \sin\theta) \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 v, w 나 변화율인 \dot{u}, \dot{v} 등은 그 값을 얻기가 어려우므로 그 크기를 무시하고 사용한다. 따라서 이로 인한 롤각, 피치각의 오차가 커질 수 있다.

3. 자세각 계산을 위한 확장칼만필터 설계

칼만필터는 상태변수의 최적 추정치를 구하는 방법으로 구조가 선형적이고 실제 값의 평균치와 추정 값의 평균치 사이에 바이어스가 없으며 추정된 상태변수의 오차분산을 최소로 하는 특성을 가지고 있다. 칼만필터는 선형 모델의 경우에 최적의

성능을 보이며 비선형 모델의 경우에는 확장칼만필터를 적용할 수 있다. 확장칼만필터는 칼만필터 알고리즘에 선형화 알고리즘을 덧붙인 것으로 근사화 된 필터이므로 최적의 필터는 아니다[8]. 3.1 과 3.2 에서는 자세각 중에서 롤각과 피치각을 계산하기 위한 이산 시간 확장칼만필터의 설계 과정을 다룬다.

3.1 확장칼만필터

일반적인 비선형 시스템식 및 측정식은 $\mathbf{x}(t)$ 가 상태변수일 때 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), t] + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t) \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (10)$$

위 식에서 \mathbf{f} 와 \mathbf{h} 는 $\mathbf{x}(t)$ 에 대해 미분가능하고, $\mathbf{w}(t)$ 와 \mathbf{v}_k 는 각각 $N(0, Q)$ 와 $N(0, R_k)$ 의 정규분포를 갖는 백색 잡음이다. 위의 두 식은 추정된 상태변수 $\mathbf{x}(t)$ 에 대하여 다음과 같이 테일러 급수(Taylor series)로 선형화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) &\cong \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), t) + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) &\cong \mathbf{h}_k(\hat{\mathbf{x}}_k) + \frac{\partial \mathbf{h}_k}{\partial \mathbf{x}_k} \Big|_{\mathbf{x}_k=\hat{\mathbf{x}}_k} (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k) \end{aligned} \quad (11)$$

이 두 근사식을 식(10)에 대입하여 칼만필터를 적용한 것이 확장칼만필터이며 이를 요약한다.

$P(t)$ 가 공분산일 때 필터의 시간에 따른 계산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), t) & t_{k-1} \leq t \leq t_k \\ \dot{P}(t) &= F(\hat{\mathbf{x}}(t), t)P(t) + P(t)F^T(\hat{\mathbf{x}}(t), t) + G(t)Q(t)G^T(t) \end{aligned} \quad (12)$$

한편, K_k 가 이득 값일 때 측정치가 있을 때의 계산은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k(+) &= \hat{\mathbf{x}}_k(-) + K_k[\mathbf{z}_k - \mathbf{h}_k(\hat{\mathbf{x}}_k(-))] \\ P_k(+) &= [I - K_k H_k(\hat{\mathbf{x}}_k(-))]P_k(-) \\ K_k &= P_k(-)H_k^T(\hat{\mathbf{x}}_k(-))[H_k(\hat{\mathbf{x}}_k(-))P_k(-)H_k^T(\hat{\mathbf{x}}_k(-)) + R_k^T]^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} F(\hat{\mathbf{x}}(t), t) &= \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t)}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}_k(t)=\hat{\mathbf{x}}(t)} \\ H_k(\hat{\mathbf{x}}_k(-)) &= \frac{\partial \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k(t_k))}{\partial \mathbf{x}_k} \Big|_{\mathbf{x}_k(t_k)=\hat{\mathbf{x}}_k(-)} \end{aligned}$$

3.2 모델 유도 및 자세각 계산

오일러 각을 이용한 식(4)와 가속도계의 출력값을 이용한 식(6)으로부터 롤각과 피치각을 구할 수 있는 필터의 시스템 행렬을 유도할 수 있다. 선형 모델을 얻기 위하여 ϕ 과 θ 를 대신하여 세 변수 C_1, C_2, C_3 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} C_1 &= -\sin\theta, \\ C_2 &= \sin\phi \cos\theta, \\ C_3 &= \cos\phi \cos\theta \end{aligned} \quad (14)$$

식(4)으로부터 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \omega_x + \omega_y \sin\phi \tan\theta + \omega_z \cos\phi \tan\theta, \\ \dot{\theta} &= \omega_y \cos\phi - \omega_z \sin\phi\end{aligned}$$

식(14)를 미분하여 식(15)을 이용하면 식(16)이 유도된다.

$$\begin{aligned}\dot{C}_1 &= -\dot{\theta} \cos\theta = \omega_z C_2 - \omega_y C_3, \\ \dot{C}_2 &= \dot{\phi} \cos\phi \cos\theta - \dot{\theta} \sin\phi \sin\theta = -\omega_z C_1 + \omega_x C_3, \\ \dot{C}_3 &= -\dot{\phi} \sin\phi \cos\theta - \dot{\theta} \cos\phi \sin\theta = \omega_y C_1 - \omega_x C_2\end{aligned}$$

한편, 식(6)~(8)로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} rv - qw \\ -ru + pv \\ qu - pv \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -g \sin\theta \\ g \sin\phi \cos\theta \\ g \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & r & -q \\ -r & 0 & p \\ q & -p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} gC_1 \\ gC_2 \\ gC_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}\end{aligned}$$

여기서 $p = \dot{p} + \Omega_x$, $q = \dot{q} + \Omega_y$, $r = \dot{r} + \Omega_z$

식(16)과 (17)를 이용하면 $\dot{x} = [u \ v \ w \ C_1 \ C_2 \ C_3]^T$ 가 상태변수인 필터의 시스템 행렬 A 로 구성된 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + b \\ &= \begin{bmatrix} 0 & r & -q & g & 0 & 0 \\ -r & 0 & p & 0 & g & 0 \\ q & -p & 0 & 0 & 0 & g \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ 0 & 0 & 0 & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

식(14)의 정의에 따라 세 변수 C_1, C_2, C_3 는 다음 조건을 만족한다.

$$C_1^2 + C_2^2 + C_3^2 = 1 \quad (19)$$

이것은 2개의 변수인 ϕ 와 θ 가 3개의 변수 C_1, C_2, C_3 의 형태로 변형되었기 때문에 나타난 제한 조건으로 볼 수 있다. 이와 같은 제한 조건을 위하여 확장칼만필터를 도입한다. 전진방향 속도 u 를 측정치로 하면서 식(19)의 좌변을 측정치로 가정하면 h_k 의 2번째 성분이므로 제한 조건을 만족시키기 위한 관측 행렬 H_k 는 식(13)에 의해 h_k 를 미분하여 식(20)을 얻는다.

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_1 & 2C_2 & 2C_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서 C_1, C_2, C_3 는 각각 상태변수 x 의 4,5,6 번째 성분이다. 잉여 측정값 $[z_k - h_k(\hat{x}_k(-))]$ 은 다음과 같다.

$$[z_k - h_k(\hat{x}_k(-))] = \begin{bmatrix} z_{1k} \\ z_{2k} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{C}_1^2 + \hat{C}_2^2 + \hat{C}_3^2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} z_{1k} \\ z_{2k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

추정한 상태변수 $\hat{x}_k(+) = [\hat{u} \ \hat{v} \ \hat{w} \ \hat{C}_1 \ \hat{C}_2 \ \hat{C}_3]^T$ 로부터 피치 각과 롤각을 구하면 다음과 같다.

$$\theta = \sin^{-1}(-\hat{C}_1),$$

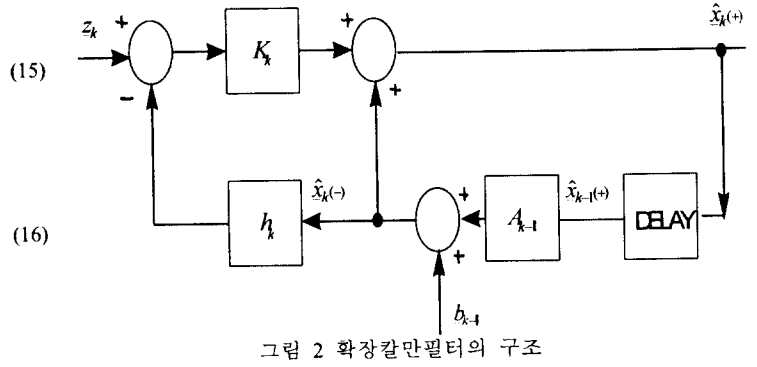


그림 2 확장칼만필터의 구조

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sin\phi \cos\theta}{\cos\phi \cos\theta} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{C}_2}{\hat{C}_3} \right) \quad (22)$$

연속 시간 모델로 되어있는 시스템 행렬 A 를 근사화 하여 이산 시간 모델 A_k 를 구한 후 h_k 와 함께 확장칼만필터를 구성하여 그림 2로 요약하였다.

4. 시뮬레이션 및 결과

확장칼만필터를 사용한 알고리즘을 수중 운동체의 자세각 계산 과정에 적용한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 수중 운동체가 입수하여 일정 시간 동안 가속운동을 동반하며 서서히 하강하는 궤적으로 자세각에 일정 오차가 존재할 때 이를 보정하는 과정이다. 필터의 상태변수 중에서 자세각 부분의 초기값으로는 식(9)를 사용하여 정하였고 식(9)를 사용한 결과와 비교해 보았다. A는 확장칼만필터 알고리즘으로 구한 자세각의 오차 절대값이고 B는 식(9)로 구한 자세각의 오차 절대값이다. A는 약 1.5°의 롤각 초기 오차와 약 2°의 피치각 초기 오차를 갖는 상황에서 점차 감소하는 경향을 보인다. 그림에서는 롤각의 초기 오차가 빠르게 감소하여 나타나지 않았다. 2초 부근에서는 v, w 나 변화율인 \dot{u}, \dot{v} 등의 크기가 커진 궤적이어서 이를 무시한 B의 자세 오차가 급격히 증가하였고 A도 다소 증가하지만 상대적으로 증가 정도가 작다는 것을 알 수 있다.

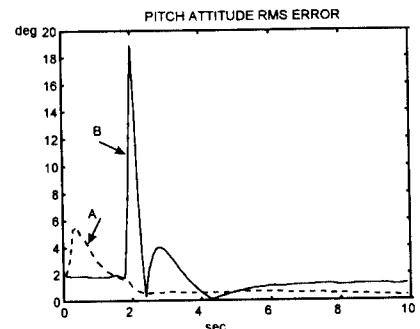
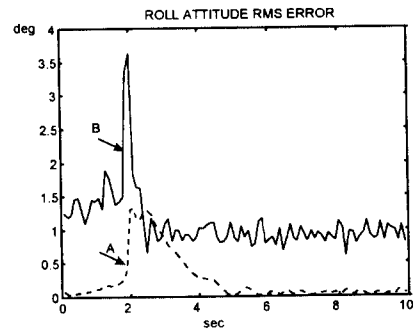


그림 3 시뮬레이션 결과

전체적으로 확장칼만필터 알고리즘은 v, w 나 \dot{u}, \dot{v} 의 크기를 무시할 수 없는 상황에서도 오차의 크기가 식(9)의 계산 방법보다 상대적으로 작으며 오차를 감소시키는 방향으로 수렴하는 경향을 나타내었다.

5. 결론

일반적인 자세계산 과정은 식(4)의 오일러 각을 이용한 알고리즘과 같이 초기 자세각의 오차가 그대로 유지되며 시간에 따라 자세각의 오차가 누적되는 특성이 있다. 식(9)의 가속도계와 전진방향속도계를 사용한 가속도계 이용 알고리즘은 적분 과정을 거치지 않으므로 오차의 누적 특성이 없고 간단한 계산 과정에 의해 롤각과 피치각을 구할 수 있으나 수중 운동체가 급격한 회전 운동을 하거나 외부 환경의 영향으로 안정적인 직진 운동을 하지 못하는 경우에는 롤각과 피치각의 오차가 크게 증가할 수 있는 성질을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위한 알고리즘으로 본 논문에서는 저급 관성 센서로 구성된 스트랩다운 자세계산 시스템을 대상으로 전진방향속도계를 보조 센서로 하는 확장칼만필터를 이용한 자세각 계산 알고리즘을 제시하였다. 확장칼만필터 알고리즘은 초기 자세각에 크게 의존하지 않으며 초기 오차를 점차 감소시키는 특성을 가지고 있다. 또한, 측면 속도 v 와 수직 방향 속도 w 가 커지는 상황이나 이들의 변화가 비교적 큰 상황에서도 이로 인한 롤각과 피치각의 오차가 비교적 작은 값을 유지하므로 초기 자세각을 구하는 과정이나 자세 계산 중의 누적된 오차를 보정하는 과정에 유용하게 쓰일 수 있다.

후기

본 논문은 국방과학연구소와 서울대학교 자동제어특화연구센터의 지원하에 이뤄진 연구와 관련된 것으로 이에 관계 제위께 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] G.M.Siouris, *Aerospace Avionics System : A Modern Synthesis*, Academic Press, 1993.
- [2] M.Koifman & S.J. Merhav, "Autonomously Aided Strapdown Attitude Reference System," *Journal of Guidance, Control & Dynamics*, Vol.14, No.6, Nov-Dec 1991.
- [3] 이장규 외, "표적변수 예측 알고리즘 개발 및 측면 공격용 유도 알고리즘 연구," 서울대학교 자동화시스템공동연구소, 1994.
- [4] 이장규, 박찬국, 유재중, "스트랩다운 비행 자세측정장치의 가속도계 보조 혼합 알고리즘 개발," 국방과학연구소 GUCD-417-89079, 1989.
- [5] 전창완, "스트랩다운 관성 항법 장치를 위한 자세계산 알고리즘의 계산 오차 해석," 공학석사학위논문, 서울대학교 제어측공학과, 1988.
- [6] 이장무, 동역학, 동명사, 1985.
- [7] 김영환, "피치 이론을 이용한 수중 운동체의 자세계산 혼합 알고리즘," 공학석사학위논문, 서울대학교, 1995.
- [8] 박성택, "확장칼만필터를 이용한 수중운동체의 유체계수 식별," 공학석사학위논문, 서울대학교, 1993.
- [9] I.Yaesh, "Design of Leveling Loop for Marine Navigation System", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol.29, No.2 April 1993.
- [10] Artur Gelb, *Applied Optimal Estimation*, M.I.T. Press, 1974.
- [11] 이장규 외, "항공기용 항법 시뮬레이터 개발," 서울대학교 자동화시스템공동연구소, 1995.