

# 변형된 오일러각 기반의 칼만필터를 이용한 자세 추정 성능 향상

## Performance Improvement of Attitude Estimation Using Modified Euler Angle Based Kalman Filter

강 철 우, 유 영 민, 박 찬 국\*  
(Chul Woo Kang, Young Min Yoo, and Chan Gook Park)

**Abstract :** To calculate the attitude in ARS(Attitude Reference System) using 3 gyros and 3 accelerometers, gyro drift must be compensated with accelerometer to avoid divergence of attitude error. Kalman filter is most popular method to integrate those two sensor outputs. In this paper, new Kalman filtering method is proposed for roll and pitch attitude estimation. New states are defined to make linear equation and algorithm for changing Kalman filter parameters is proposed to ignore disturbances of acceleration. This algorithm can be easily applied to low cost ARS

**Keywords :** attitude reference system, ARS, attitude sensor, inertial sensor, gyro

### I. 서론

관성 센서(inertial sensor)를 이용하여 로봇이나 차량, 또는 항공기 등의 동체의 자세를 측정하는 장치를 ARS(Attitude Reference System)라고 한다. 일반적으로 상업적으로 판매되는 ARS는 저가형인 경우에도 수백 만원에 달한다. 최근 휴머노이드 로봇이나 견마형 로봇 등의 개발이 진행됨에 따라 로봇의 자세제어를 위한 저가의 자세 측정 센서가 필요하게 되었다. 뿐만 아니라 무인항공기와 초소형 인공위성체 등의 자세제어를 위해서도 저렴하지만 높은 정확도를 지닌 ARS가 요구되고 있다. 이를 위하여 저가형 센서를 이용한 ARS의 개발이 요구되고 있으며 많은 연구가 진행 중에 있다.

대부분의 ARS는 가속도계(accelerometer)와 자이로(gyro)를 이용하여 자세를 계산한다. 자이로는 동체의 각속도를 측정하는 센서이고 가속도계는 동체의 가속도를 측정하는 센서로 별도의 추가적인 장비를 필요로 하지 않고 ARS 하나만의 독립적인 자세계산이 가능하다. 기존의 관성 센서에서 자세를 계산하는 방법은 자이로를 이용하여 각속도를 적분하는 방식으로 구성된다. 그러나 저가형 MEMS 센서를 사용하여 자세 계산을 수행하게 되면 자이로 출력에 존재하는 오차가 적분을 통해 누적되어 자세 오차가 발산하는 결과를 가져온다. 저가형 센서를 사용하는 ARS의 경우 필연적으로 발생하는 자세 오차의 발산을 막기 위하여 자이로의 출력으로부터 계산되는 자세값을 가속도계 출력을 이용하여 보정하는 연구가 진행되고 있다. 기존 연구에서는 자이로 출력을 이용하여 계산된 자세와 가속도계 출력을 이용하여 계산된 자세를 서로 비교하여 자이로의 오차와 자세 오차를 추정하여 다시 추정된 자세를 계산하는 방식의 칼만필터를 구성하였다[1-3].

이 방식은 필터가 복잡해지고 추정이 쉽지 않은 상태변수를 추정하려고 함에 따라 필터가 불안정해지는 특성을 보인다. 또한 쿼터니언 계산방식을 적용하여 자세를 보정하는 연구도 진행되었으나 동체가 정지한 상황만을 고려하므로 실제 운행 중에 있는 로봇이나 차량에 적용하기 힘들다는 단점이 존재했다[4,5]. 이 밖에도 초소형 비행체의 자세계산을 위하여 칼만필터를 사용하는 ARS를 개발한 연구도 있었다[6].

기존 연구들에서는 주로 오일러각을 직접 상태변수로 정의하거나 오일러각의 오차를 상태변수로 정의하는 방식으로 자세를 추정한다. 이러한 형태의 칼만필터는 저가형 센서인 경우 오차가 잘 추정이 되지 않거나 추정되더라도 수렴속도가 느린 단점이 존재한다. 뿐만 아니라 필터식 내에서 복잡한 자세변환 연산을 수행하므로 계산량도 극히 많아진다. 반면 각 축의 속도를 추정하는 경우에는 자세의 오차 때문에 속도가 정확하게 추정이 되지 않으면서 다시 자세도 부정확해지는 결과를 보였다. 본 연구에서는 추정이 정확하게 되지 않는 상태변수를 모두 제외하고 오일러각을 이용해 새로운 상태변수를 제안하여 이를 이용한 필터를 설계하였다.

II장에서는 일반적인 오일러각 업데이트 자세 계산 방법을 소개하고 이로부터 각속도와 자세의 관계식을 유도한다. III장에서는 II장의 관계식과 동체의 가속도 모델을 이용하여 칼만필터를 구성한다. 그리고 IV장에서는 새로이 구성된 칼만필터를 이용한 실험 결과를 소개한다.

### II. 오일러각 업데이트 자세 계산

일반적인 관성항법 시스템에서 자이로 적분을 통해 자세를 계산하는 방법으로는 쿼터니언(quaternion)을 이용하는 방법, 방향코사인 행렬(direction cosine matrix)을 이용하는 방법, 그리고 오일러각(Euler angle)을 이용하는 방법 등이 있다. 오일러각을 이용하는 방법은 동체 좌표계에서 표현한 고정 좌표계와 동체 좌표계 사이의 회전 각속도와 오일러각의 미분치 사이의 관계를 이용하여 좌표변환에 필요한 롤(roll,  $\phi$ ), 피치(pitch,  $\theta$ ) 및 요(yaw,  $\psi$ )를 계산하고, 이들 세 각을 이

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 5. 15., 채택확정 : 2008. 6. 30.

강철우, 유영민, 박찬국 : 서울대학교 기계항공공학부

(julio7@snu.ac.kr/ym0903@snu.ac.kr/chanpark@snu.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천 기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었음 (과제번호 : S10801000163-08A0100-16310).

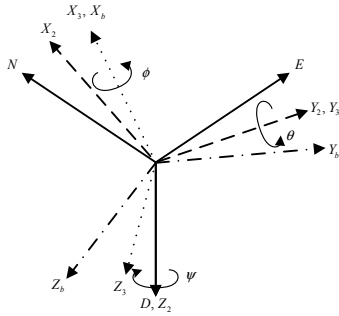


그림 1. 오일러각의 정의.

Fig. 1. Definition of euler angle.

용하여 좌표변환 행렬을 구성한다. 오일러각은 물리적 의미가 확실하고 사용자가 직접적으로 자세를 바로 인식할 수 있으므로 많은 ARS에서 출력으로 이용된다. 따라서 오일러각을 이용하여 계산을 수행하면 계산상의 의미를 쉽게 이해할 수 있고 다른 변환 과정 없이 출력을 직접적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방식의 단점은 피치 각이 90[deg]인 경우에는 미분치를 구할 수 없는 문제(singularity problem)가 있다. 오일러각은 그림 1과 같이 정의된다.

오일러각은 롤, 피치, 요로 이루어진다. 동체의 자세는 이 각들의 연속적인 회전으로 표현가능하다. 먼저 기준 좌표계로의 z축으로부터 요각을 회전하고 회전된 y축에서의 회전을 통해 피치를 계산하고 다시 새로운 x축에서의 회전을 통해 롤각을 계산한다. 이러한 연속적인 자세회전은 각각의 좌표 변환행렬의 곱을 통하여 전체 자세의 좌표 변환 행렬을 계산할 수 있다. 따라서 항법 좌표계(navigation frame)으로 표현되는 기준좌표계에서 동체좌표계로의 변환행렬  $C_n^b$ 는 (1)과 같이 정의 될 수 있다[7,8].

$$C_n^b = C_3^b(\phi)C_2^3(\theta)C_n^2(\psi)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$C_3^b(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2a)$$

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

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

시간에 따른 각속의 각속도와 오일러각과의 관계는 아래 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_3^b(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_3^b(\phi)C_2^3(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

이를 (2)를 이용하여 전개하면 (4)와 같이 쓸 수 있다.

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

(4)는 오일러각의 변화량을 각속도로 표현한 식이다. 롤과 피치 각에 대한 식으로 나타내면 (5)와 (6)이 된다.

$$\dot{\phi} = \omega_x + \omega_y \sin\phi\tan\theta + \omega_z \cos\phi\tan\theta \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = \omega_y \cos\phi - \omega_z \sin\phi \quad (6)$$

### III. 칼만필터 설계

칼만필터를 이용하여 자이로의 출력을 보정하고 자세를 추정하는 과정은 그림 2와 같이 이루어진다.

칼만필터는 공정 잡음과 측정 잡음이 백색, 가우시안 분포를 지니는 경우 오차를 최소화하는 추정기이다. 칼만필터는 선형의 동역학적 시스템 모델과 측정치 모델을 필요로 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + W \\ y &= Cx + V \end{aligned} \quad (7)$$

(7)의 상태 변수 방정식에서 첫번째 방정식은 시스템 모델로 시간의 변화에 따른 상태변수들의 변화를 의미하고 두번째 방정식은 측정치 모델로 상태변수에 따른 센서 측정치를 의미한다.

#### 1. 시스템 모델

앞에서 살펴본 오일러각 수식을 선형의 상태변수 형태로 유도하기 위하여 아래와 같은 상태변수를 새로이 정의한다.

$$\begin{aligned} C_1 &= -\sin\theta \\ C_2 &= \sin\phi\cos\theta \\ C_3 &= \cos\phi\cos\theta \end{aligned} \quad (8)$$

(8)의 양변을 시간에 대하여 미분하여 미분 방정식 형태의 연속 함수 시스템 모델을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{C}_1 &= -\dot{\theta}\cos\theta = \omega_z C_2 - \omega_y C_3 \\ \dot{C}_2 &= \dot{\phi}\cos\phi\cos\theta - \dot{\theta}\sin\phi\sin\theta = -\omega_z C_1 + \omega_x C_3 \\ \dot{C}_3 &= -\dot{\phi}\sin\phi\cos\theta - \dot{\theta}\cos\phi\sin\theta = \omega_y C_1 - \omega_x C_2 \end{aligned} \quad (9)$$

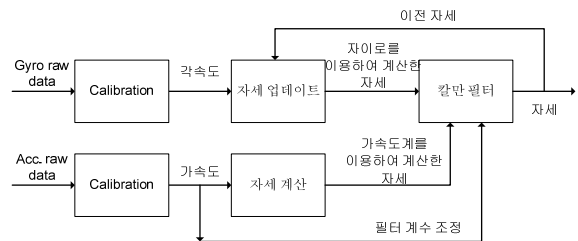


그림 2. 칼만필터를 이용한 자세 추정 과정.

Fig. 2. Attitude estimation with Kalman filter.

(9)를 행렬식 형태로 나타내면 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{C}_1 \\ \dot{C}_2 \\ \dot{C}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} + W \quad (10)$$

이렇게 계산된 시스템 모델은 시스템 행렬에 자이로를 이용하여 측정된 각속도 측정치가 들어간다. 각 축의 자이로 측정치의 측정잡음은 공정잡음  $W$ 에 포함된다. (8)의 형태로 정의된 상태 변수를 도입함으로써 기존 연구[1-3,6,8]에서의 복잡한 시스템 방정식을 선형화된 간단한 형태로 대체할 수 있다.

기존 연구에서 사용되는 일반적인 모델은 자이로 바이어스와 가속도계 바이어스를 추정하는 방식으로 이루어진다. 저가형 센서를 사용하는 경우 센서의 잡음이 크고 바이어스 안정도가 낮다. 이를 자세오차로부터 추정할 경우, 추정정확도가 매우 낮아서 자세 추정에 오히려 악영향을 미칠 뿐만 아니라 추정속도가 느려 바이어스가 제대로 추정되지 못하는 결과를 보인다. 본 논문에서 새롭게 제안된 간단한 형태의 상태변수를 도입하면 추정이 힘든 상태변수를 생략하고 자세를 직접 계산하므로 빠른 수렴성능을 보이게 된다.

## 2. 측정치 모델

측정치는 가속도계를 이용하여 측정한다. 가속도계에서 측정되는 값은 동체에 작용하는 비력으로 중력가속도와 동체의 가속도의 합으로 이루어진다.

$$f^b = \dot{v}^b + \omega_{nb}^b \times v^b - \bar{g}^b = \begin{bmatrix} \dot{u} - ru + qw \\ \dot{v} + ru - pw \\ \dot{w} - qu + pv \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g \sin \theta \\ -g \sin \phi \cos \theta \\ -g \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

(11)에서  $u, v, w$ 는 속도항으로써 독립적인 ARS는 동체의 속도를 계산할 수 있는 추가적인 센서가 존재하지 않으므로 측정이 불가능하다. 그러므로 정지상태인 경우를 가정하여 속도항을 무시하고 수식을 전개하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} ru - qw \\ -ru + pw \\ qu - pv \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} +g \sin \theta \\ -g \sin \phi \cos \theta \\ -g \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\approx -g \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

이로부터 측정치 방정식을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} + V \quad (13)$$

새로 정의된 상태 변수는 기존 연구에서의 복잡한 측정치 방정식도 매우 간단한 형태로 대체할 수 있다.

## 3. Q와 R의 설정

측정치 방정식은 속도항을 무시하는 가정이 있으므로 동체의 운동에 의한 가속도가 발생 하는 경우에는 측정치를 무

표 1. Q와 R설정.

Table 1. setting on Q, R.

	1[g]	1.0001~1.02[g]	1.02[g]~
Q	0.1	0.1	0.1
R	500	50000	1000000

시하고 가속도의 영향을 받지 않는 자이로 출력을 신뢰하도록 하여야 한다. 이를 위하여 칼만필터식에 들어가는 Q와 R을 변화시켜 자이로와 가속도계의 신뢰수준을 변화시킨다. Q와 R은 (14)와 같다[9].

$$\begin{aligned} Q_k &= E[W_k W_k^T] \\ R_k &= E[V_k V_k^T] \end{aligned} \quad (14)$$

Q는 공정 잡음의 공분산 행렬로 시스템 모델이 자이로 출력에 기반하므로 Q가 상대적으로 작을 경우 자이로에 대한 신뢰도를 높인다. 반면에 R은 측정치 잡음의 공분산 행렬로 R이 작을 경우 가속도계를 신뢰하는 결과를 보인다. 따라서 가속도계에 추가적인 가속도 외란이 들어오는 경우에는 R을 크게 변화시킴으로써 상대적으로 자이로 출력을 신뢰하는 칼만필터 추정치를 얻을 수 있다.

본 연구에서 사용한 방식은 3축의 가속도계 출력이 1[g] (9.79871m/s<sup>2</sup>)를 초과하거나 부족한 경우 동체에 중력 가속도 이외의 가속도가 작용하는 것으로 생각하여 R을 크게 변화시킨다. 설정된 Q와 R의 크기는 표 1과 같다.

## IV. 실험 결과

실험은 Xsens 사의 MTx 센서를 이용하여 수행되었다. MTx센서는 현재 500만원 대에서 판매되고 있는 상용 ARS로 가속도계와 자이로의 센서 출력과 함께 자체적으로 계산된 자세값을 출력한다. MTx의 자세 출력은 정지 상태에서 0.5[deg] 이내의 오차를 보장하므로 본 논문에서 새로 제안된 필터의 결과와의 비교 대상으로 활용한다. 이러한 비교는 동일한 센서 데이터를 바탕으로 기존 알고리즘과 새로 제안된 알고리즘의 성능 비교를 수행하는 의미가 있다.

첫번째 실험은 센서를 정지 상태로 80초간 두었을 경우의 결과이다.

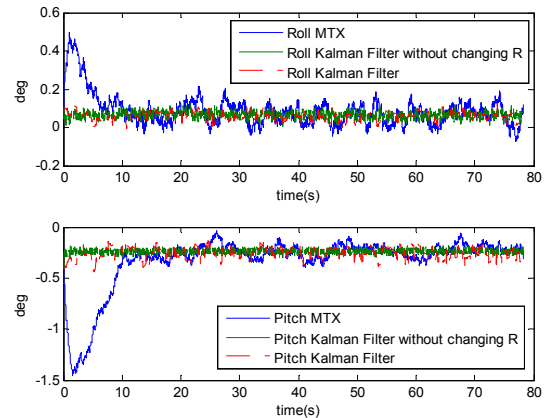


그림 3. 정지 상태 자세출력.

Fig. 3. Steady state attitude output.

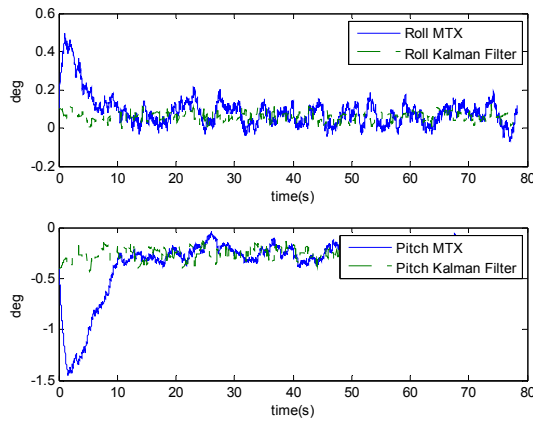


그림 4. 정지 상태 자세출력(확대).

Fig. 4. Steady state attitude output(closed up).

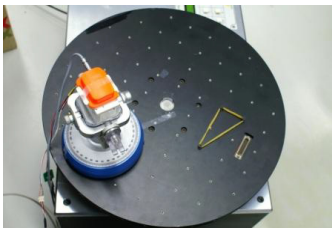


그림 5. 레이트 테이블을 이용한 실험.

Fig. 5. The experiment using rate table.

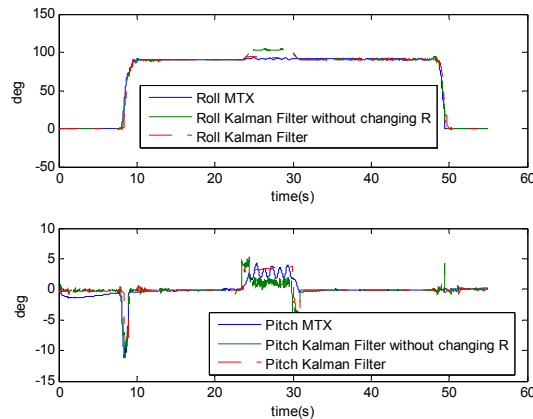


그림 6. 레이트 테이블을 이용한 실험의 결과.

Fig. 6. Result of the experiment using rate table.

점선으로 표시된 새로운 칼만필터 방식과 1점 쇄선으로 표시된 R을 변화시킨 칼만필터의 경우, 자세추정 결과는 자세가 발산하지 않고 0 근처에서 유지되는 것을 볼 수 있다. 칼만필터를 이용하여 보정한 경우만을 따로 표시한 결과는 그림 4와 같다.

새롭게 제안된 상태변수를 이용한 칼만필터 알고리즘은 기존 상용의 MTx 센서 출력과 센서 스펙의 오차 범위 내에서 비슷한 결과를 보여준다. 그러나 새로운 알고리즘의 경우 앞서 예상했던 바대로, 안정된 자세 결과에 빠르게 수렴함을 알 수 있다. 뿐만 아니라 정지상태의 결과는 센서 잡음의 영향을 적게 받는 안정된 결과를 보여준다.

두번째 실험은 레이트 테이블(rate table) 위에 물을 약 90

## 표 2. RMS 오차.

Table 2. RMS error.

	R 변화 없음	R 변화
roll	4.0945	0.9149
pitch	1.0487	0.9042

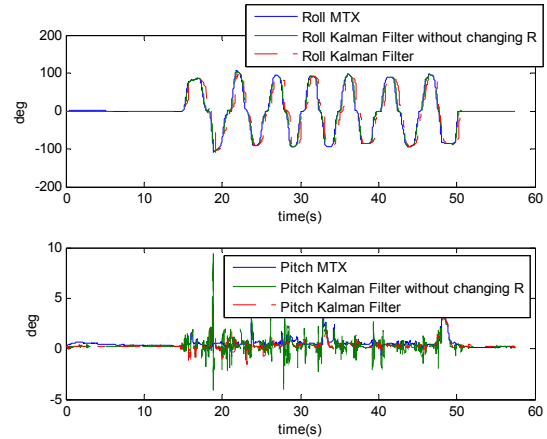


그림 7. 임의의 연속 물방향 회전시 자세출력.

Fig. 7. Attitude output about arbitrary change on roll angle.

[deg] 회전시켜 장착하고 일정한 회전속도로 회전을 가하여 원심력과 같은 예기치 않게 입력된 가속도에 의해 자세가 받는 영향을 관찰한다.

실험 시작 10초 근방에서 물을 90[deg] 회전시키고 레이트 테이블의 회전은 약 25초에 시작하였다.

R을 변화시킨 칼만필터의 경우 전체적으로 물과 피치가 잘 추정되고 있음을 알 수 있다. 그러나 가속도계에 따라 R을 변화시키지 않은 경우 원심력에 의해 물이 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 그리고 본 논문에서 제안한 칼만필터를 사용한 경우 MTx출력에 비해 초기 수렴성이 더 뛰어난 것을 알 수 있다. 그리고 가속도계에 의한 외란이 들어오는 경우에도 최대오차가 3[deg]이내인 안정된 결과를 보여 주었다.

RMS 오차는 MTi의 자세 출력과 제안된 칼만필터로 계산된 자세의 차이를 비교한 것이며 표 2와 같다. MTi 센서와의 자세 비교는 정확히 실제 오차를 의미하지는 않지만 RMS 오차가 작은 쪽이 동적인 상황에서도 자세의 정확도가 높은 것으로 생각할 수 있다. 결과를 보면 R을 변화시키는 경우가 RMS 오차 역시 작은 것을 알 수 있다.

세번째 실험은 물방향의 임의의 회전을 가했을 때 MTx와의 자세출력을 비교한 실험이다.

세 경우 모두 새로이 제안된 알고리즘과 상용의 MTx가 거의 동일한 각도 출력을 제공하는데 이를 근거로 본 알고리즘은 임의의 자세계산에 있어서도 충분히 정확한 자세계산 결과를 제공하는 것으로 신뢰할 수 있다.

## V. 결론

일반적으로 자이로는 바이어스오차가 계속 변화하는 자이로 드리프트 현상이 발생한다. 자이로를 이용하여 각속도 출력을 적분하여 자세를 계산하는 경우 이러한 자이로 드리프트에 의해 발생한 오차가 적분되어 시간이 지남에 따라 기하

급수적으로 자세오차가 커지게 된다. ARS는 롤과 피치 방향 자세를 가속도계 출력을 이용하여 보정하여 안정적인 자세 값을 출력하는 장치이다. 이를 위하여 본 연구에서는 새로운 형태의 상태 변수를 도입하여 칼만필터를 설계하고 성능을 검증해 보았다. 일정 수준의 성능을 보장하는 상용의 ARS에 탑재된 알고리즘과 비교하여 새로이 제안한 자세계산 알고리즘은 초기 수렴성이 더 뛰어난 결과를 보여 주었다. 이는 저가형 관성 센서를 사용하는 경우, 잘 추정되지 않는 상태 변수를 추정하기 위해 소모되는 계산 시간과 정확성을 희생하지 않음을 의미하므로 본 알고리즘을 이용하면 성능이 향상될 수 있음을 의미한다. 그리고 칼만필터의 측정 잡음 R의 크기 변화를 통해 가속도계에 의한 외란이 들어오는 경우에도 충분히 신뢰할 수 있는 결과를 보여 준다. 특히 뛰어난 수렴성은 외란이 작용하고 난 이후에 정상적인 출력으로 복귀하는데 많은 시간이 소모되지 않음을 의미하므로 빠른 운동을 하는 동체에 사용되는 ARS에 강점을 지닌다. 그리고 이 알고리즘은 최소한의 상태변수만을 이용하기 때문에 빠른 연산이 가능하고 높지 않은 하드웨어 사양을 요구한다. 이러한 장점은 저가의 프로세서를 사용한 초소형 ARS에 쉽게 적용 가능한 장점을 지닌다.

#### 참고문헌

- [1] D. Roetenberg, H. Luinge, C. Baten, and P. Veltink "Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 13, pp. 395, Sep. 2005.
- [2] E. Foxlin, "Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter," *IEEE Proceedings of VRAIS '96*, pp. 185-194, 1996
- [3] H. Luinge, "Inertial sensing of human movement," Twente University Press, 2002.
- [4] E. R. Bachmann, I. Duman, U. Usta, R. B. McGhee, X. Yun, and M. J. Zyda. "Orientation tracking for humans and robots using inertial sensors," *International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 187-194, Monterey, CA, 1999.
- [5] Y. Xiaoping, M. Lizarraga, E. R. Bachmann, and R. B. McGhee, "An improved quaternion-based Kalman filter for real-time tracking of rigid body orientation," *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003)*, vol. 2, pp. 1074-1079.
- [6] 임종남, "초소형 비행체 자세추정 시스템 설계," 서울대학교 석사 학위 논문, 2006년 2월.
- [7] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology* Stevenage, U.K.: Peregrinus, 1997.
- [8] H. Hong, J. G Lee, C. G Park, and H. S. Han, "A leveling algorithm for an underwater vehicle using extended Kalman filter," *Proceedings of the IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium*, Palm Springs, California, U. S. A., April 20-23, 1998, pp. 280-285.
- [9] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H-Infinity, and Nonlinear Approaches*, Wiley & Sons, 2006.



강철우

2007년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2007년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 관성항법 시스템, 비선형 필터링, 센서 및 구동기 FDI 기법.



유영민

2005년 광운대학교 정보제어공학과 졸업. 2005년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사과정 재학중. 관심분야는 항법, 필터, 유비쿼터스 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 센서 시스템.



박찬국

1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년 서울대학교 제어계측신기술연구센터 Post Doc. 1994년~2002년 광운대학교 정보제어공학과 조교수/부교수. 1998

년 미국 UCLA 기계항공공학과 방문연구원. 1994년~2003년 서울대학교 자동제어특화연구센터 책임연구원. 2003년~현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수/교수. 연구 관심분야는 INS/ GPS 결합 알고리즘, MEMS IMU 응용 시스템 개발, 영상항법시스템, USN을 이용한 Ubiquitous Positioning, 필터링기법.