

## 효율적인 각/가속도 센서 오차 보상을 위한 3축 각도 측정 장치의 개발 및 활용

# Development and Application of Three-axis Motion Rate Table for Efficient Calibration of Accelerometer and Gyroscope

곽 환 주, 황 정 문, 김 정 한\*, 박 귀 태  
(Hwan-Joo Kwak<sup>1</sup>, Jung-Moon Hwang<sup>2</sup>, Jung-Han Kim<sup>2</sup>, and Gwi-Tae Park<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul, South Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical and System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, South Korea

**Abstract:** This paper introduces a simple and efficient calibration method for three-axis accelerometers and three-axis gyroscopes using three-axis motion rate table. Usually, the performance of low cost MEMS-based inertial sensors is affected by scale and bias errors significantly. The calibration of these errors is a bothersome problem, but the previous calibration methods cannot propose simple and efficient method to calibrate the errors of three-axis inertial sensors. This paper introduces a new simple and efficient method for the calibration of accelerometer and gyroscope. By using a three-axis motion rate table, this method can calibrate the accelerometer and gyroscope simultaneously and simply. Experimental results confirm the performance of the proposed method.

**Keywords:** inertial sensor calibration, motion rate table, accelerometer, gyroscope

### I. 서론

최근 관성센서의 용도가 많아짐에 따라 관성센서의 성능 향상을 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히, 주행환경/차량정보를 융합한 차량용 X-by-Wire 시스템의 개발에 대한 요구가 커짐에 따라 차량의 주행 상황 판단을 위한 관성 센서의 성능 향상 기술은 매우 중요한 연구 분야로 주목 받고 있다. By-Wire 기술의 시초는 항공조종기술로서 개발된 것으로서 항공기의 조종 기구를 와이어로 바꾸어 컴퓨터로 비행 을 제어할 수 있도록 한 것이다. 차량용 X-by-Wire 시스템은 운전 에 필요한 지시가 물리적으로 전달되는 것이 아니라 전 자신호에 의해 전달되는 시스템을 말한다. 이를 위해서는 기존의 차량에서 기계식으로 연결되고 작동되던 부품들이 전기식 연결 구조를 사용하는 초소형 반도체 및 센서로 대체 되어야 하며, 차량 주행 환경 및 운행 상황 판단을 위한 관 성 센서의 성능 향상 기술이 개발 되어야 한다[1-3].

관성센서의 성능향상을 위한 연구에는 노이즈 제거, 파라미터 오차 보상, 온도 드리프트(drift) 보상 등의 각종 신호 처리 기술들이 있으며[4-11], 그 중 본 논문은 파라미터 오차의 보상에 관한 연구이다[12]. 기존 연구에서의 관성센서의 파라미터 오차를 보상하는 방법은 크게 가속도 센서의 보상과 각속도 센서의 보상으로 나뉠 수 있다. 가속도 센서의 파라미터 오차 보상에 관한 연구 중 대표적인 것에는 3축에 대한 가속도의 합이 1 g 임을 이용하는 방법이 있으며[7-9], 각속도 센서의 파라미터 오차 보상에 관한 연구에는 퍼지 로직 및

고차 다항식을 활용한 보상 등이 있다[10,11].

하지만 이러한 관성센서 보상 방법들은 가속도 센서와 각속도 센서 각각에 대한 보상 방법으로서, 가속도 센서와 각속도 센서 모두를 포함하는 6자유도의 차량용 관성 센서의 파라미터 보상을 위해서는 최소 2가지의 보상 과정을 거쳐야 한다. 또한, 기존의 보상 방법들은 센서 각각에 대한 많은 실험 데이터를 필요로 하기 때문에 관성 센서의 파라미터 오차 보상에 오랜 실험 시간과 노력이 소요된다. 이에, 본 논문에서는 3축 각도 측정 장치를 활용하여 관성센서의 파라미터 보상 과정의 효율성을 최대화 하고 보상에 필요한 시간을 최소화 하고자 한다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성된다. II 장에서 실험을 위해 개발한 3축 각도 측정 장치의 소개한 이후, 각/가속도 센서의 오차 보상 알고리즘을 III 장에서 설명한다. 그리고 본 논문에서의 보상 알고리즘을 통한 실험의 결과를 IV 장에서 보이고, V 장에서 결론 맺도록 한다.

### II. 3축 각도 측정 장치의 개발

6D 센서들의 각종 파라미터 오차 및 에러를 보상하고 그 성능을 검증하기 위해 그림 1과 같은 실험 장비를 개발하여 활용하였다. 본 연구에서의 실험 장비는 3DOF의 자유도를 가지고 있으며, 센서 모듈이 어떠한 형태의 자세라도 취할 수 있도록 설계되었다. 실험 장비는 기구, 엔코더, 계측 보드로 구성된다. 기본적으로 기구는 알루미늄 재질의 프레임을 통해 가볍고 센서의 회전 테스트가 용이하도록 설계 제작하였으며, 설계에는 Autodesk社의 Inventor가 사용되었다. 장착된 센서의 각도 측정을 위한 엔코더에는 Autonics社의 E50S 시리즈의 8000펄스 축형 인크리멘탈 로타리 엔코더(incremental rotary encoder)가 사용 되었다. 또한 엔코더로부터의 신호를

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 4. 30., 수정: 2012. 6. 18., 채택확정: 2012. 6. 20.

곽환주, 박귀태: 고려대학교 전기전자전파공학부

(khj3271@korea.ac.kr/gtpark@korea.ac.kr)

황정문, 김정한: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(lancia02@nate.com/hankim@snut.ac.kr)

※ 이 논문은 2012 제 27회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음.

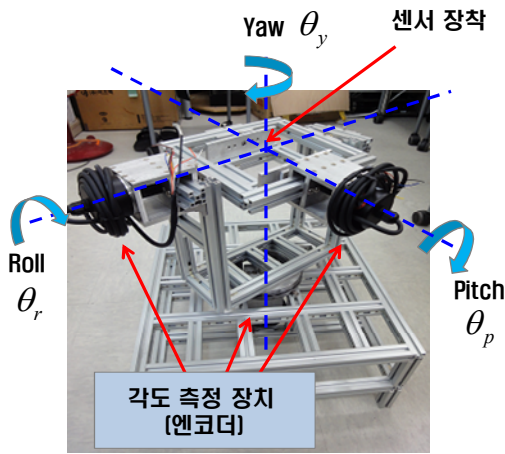


그림 1. 제작 된 각도 측정 장치.  
Fig. 1. The developed motion rate table.

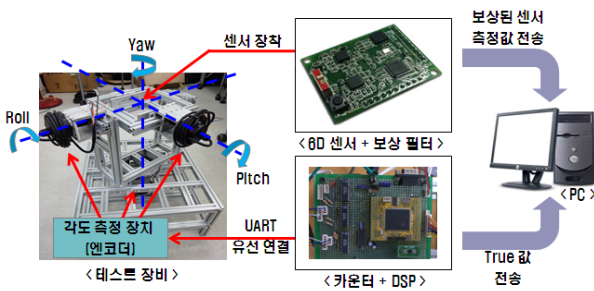


그림 2. 테스트 장비를 활용한 전체 시스템 구성도.  
Fig. 2. The structure of overall system using the motion rate table.

통해 센서의 자세 정보를 PC로 전송 시키기 위한 계측 보드는 LS7166 엔코더 카운터가 장착된 DSP (Digital Signal Processor, TMS320F28335)를 기반으로 하여 설계 및 제작 되었다. 해당 계측보드는 엔코더 뿐만 아니라 센서모듈로부터의 신호 역시 수신하여 PC로 전송시키는 역할을 한다. 센서 모듈로부터의 데이터 수신에는 CAN (Controller Area Network) 이 적용 되었다.

그림 2는 테스트 장비를 사용해 실제 구축된 테스트 환경이다. 오차 보상을 하고자 하는 센서 보드는 테스트 장비의 가장 위쪽 중앙 부분에 위치한 센서모듈 장착 지그에 단단히 고정된다. 실험 장비의 중앙에 장착된 센서 모듈의 회전 및 자세 정보는 3개의 엔코더를 통해 획득할 수 있다. 엔코더를 통해 얻어진 3DOF의 피치(pitch), 롤(roll), 요(yaw) 관련 데이터와 센서 모듈 및 센서 보드로부터의 측정 데이터는 1차적으로 DSP 보드로 전송되며, 모아진 데이터들은 규격화 된 프로토콜을 갖는 시리얼 통신을 통해 PC로 전송 된다. 센서 모듈 및 엔코더로부터 실시간으로 획득된 데이터는 각/가속도 센서의 오차 보상 필터 개발에 사용되거나 오차 보상 필터의 성능 평가에 사용될 수 있다.

### III. 각/가속도 센서의 오차 보상

본 연구에서의 파라미터 보상 필터는 그림 3에서와 같이 각/가속도 센서로부터의 측정 값이 변환 함수를 통해 3축 각도 측정 장치로부터의 이상 값으로 변환 되도록 함을 최종 목표로 한다.



그림 3. 오차 보상 필터의 입출력 관계.  
Fig. 3. The relation between input and output of calibration filter.

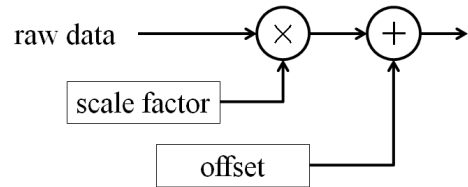


그림 4. 각/가속도 센서의 오프셋 및 민감도 에러 보상.  
Fig. 4. The offset and sensitivity calibration of accelerometer and gyroscope.

본 연구에서 보상하고자 하는 각/가속도 센서의 파라미터 오차는 오프셋(offset)과 민감도(sensitivity)이므로, 각/가속도 센서로부터의 측정 값의 오프셋 및 민감도 에러의 보상을 통해 필터를 통한 출력 값이 센서 모듈의 실제 값과 최대한 유사하게 되도록 변환해야 한다. 그리고 이를 위한 보상 필터는 그림 4와 같이 설계할 수 있으며, 이를 측정 값에 대한 이상 값의 함수로 표현하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & 0 \\ 0 & a_y & 0 \\ 0 & 0 & a_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{m}_x \\ \tilde{m}_y \\ \tilde{m}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\tilde{m}_x, \tilde{m}_y, \tilde{m}_z$  은 각/가속도 센서의 실제 측정 값이며,  $m_x, m_y, m_z$  은 보상된 결과 값이다. 본 논문에서의 최종 목표가 각/가속도 센서로부터의 측정 값을 이상 값으로 변환하는 함수를 찾는 것을 목표로 하고 있으므로, 식 (1)에서의 오프셋( $b_x, b_y, b_z$ )과 민감도( $a_x, a_y, a_z$ )에 해당하는 변수들의 최적 값을 구함을 통해 그 목표를 달성할 수 있다. 식 (1)에서의 변환 함수는 각속도 센서와 가속도 센서 모두에 적용이 가능한 모델이며, 센서 각각에 대한 최적 값을 구해야 한다.

본 연구에서는 3축 각도 측정장치를 통해, 각속도 센서 및 가속도 센서 각각에 해당하는 식 (1)의 변환 함수를 최소한의 노력으로 동시에 구하고자 한다. 이를 위해, 변환 함수의 최적화에 사용되는 센서 측정 값 및 이상 값의 수가 최소가 되도록 하였으며, 효율성을 최대화하여 해당 값들의 획득을 위해 필요한 실험을 최대한으로 간소화하였다.

변환 함수의 최적화를 위해서는 센서로부터의 측정 값과 엔코더로부터의 이상 값을 동시에 획득하여야 한다. 이때, 가속도 센서의 변환 함수 최적화를 위해서는 센서 모듈이 완전히 정지한 상태에서의 데이터만을 획득해야 하며, 각속도 센서의 변환 함수 최적화를 위해서는 센서 모듈의 회전 상태에서의 데이터까지도 획득해야 한다. 본 논문에서의 각/가속도 센서의 변환 함수 최적화를 위한 센서 모듈 및 엔코더 데이터의 획득은 그림 5에서와 같이 센서 모듈의 각도 측정 장비

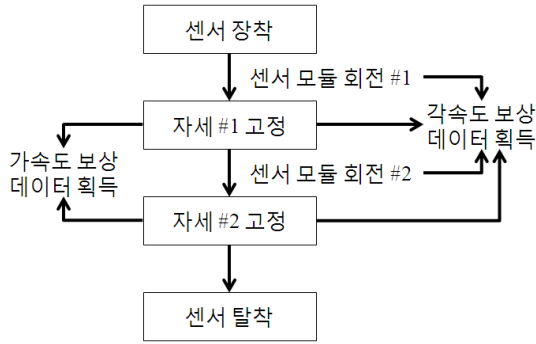


그림 5. 각/가속도 센서 및 엔코더 데이터 획득 과정.

Fig. 5. The data obtain process of inertial sensors and encoders.

에의 장착 이후 각각 두 차례의 센서 모듈 회전 및 자세 고정 과정에서 차례로 이루어진다.

그림 5에서의 과정을 통해 획득한 센서 모듈로부터의 데이터는 식 (1)에서의 오프셋과 민감도 변수들의 최적 값을 구하는데 바로 사용될 수 있다. 하지만 엔코더로부터의 각도 값( $\theta_p, \theta_r, \theta_y$ )은 각 센서에 대한 이상 값( $m_x, m_y, m_z$ )으로의 변환 이후 활용될 수 있다. 아래는 각 엔코더로부터의 측정 값들의 가속도 센서 및 각속도 센서 각각에 대한 이상 값으로의 변환 과정과, 이를 통한 식 (1)에서의 변환 함수를 구하는 과정에 대해 설명한다.

### 1. 가속도 센서의 오차 보상

3축 가속도 센서의 파라미터 오차 보상을 위해서는 서로 다른 두 가지의 자세로 정지된 상태에서 얻은 가속도 센서의 가속도 측정 값과 각도 측정 장치의 각도 측정 값이 필요하다. 각도 측정 장치로부터 얻은 측정 값은 센서의 보상을 위한 기준이 되며, 가속도 센서의 보상을 위해서는 이 각도 값들( $\theta_p, \theta_r, \theta_y$ )을 각 가속도 센서들에 해당하는 가속도 값( $m_x, m_y, m_z$ )으로 변환해 줄 필요가 있다. 본 연구에서 제작한 그림 1에서의 3축 각도 측정 장치에의 센서 모듈 장착한 경우, 초기 각 가속도 센서의 방향 벡터들( $\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z$ )은 식 (2)에서의 3X3 행렬  $\mathbf{A}$ 로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_x & \mathbf{v}_y & \mathbf{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

그리고 각 가속도 센서들의 방향 벡터들은 센서 모듈의 회전에 따라 식 (3)에서와 같이 회전 변환된다.

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_y \cos\theta_p - \sin\theta_y \sin\theta_r \sin\theta_p & -\sin\theta_y \cos\theta_r & \cos\theta_y \sin\theta_p \\ \sin\theta_y \cos\theta_p + \cos\theta_y \sin\theta_r \sin\theta_p & \cos\theta_y \cos\theta_r & \sin\theta_y \sin\theta_r \cos\theta_p \\ -\cos\theta_r \sin\theta_p & \sin\theta_r & \cos\theta_r \cos\theta_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

이때, 식 (3)은 본 연구에서 제작된 그림 1에서의 3축 각도 측정 장치의 구성에 따라 피치(pitch), 롤(roll), 요(yaw) 방향으로 차례로 각 엔코더 측정 각도만큼 회전됨에 따른 회전 변환식이다. 최종적으로, 이렇게 엔코더 측정 각도만큼 회전된 각 가속도 센서의 방향 벡터들과 중력 벡터와의 내적 결과가 각 가속도 센서들에 대한 이상적 가속도 값들이 되며

식 (4)와 같이 간략히 정리 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_r \sin\theta_p \\ \sin\theta_r \\ \cos\theta_r \cos\theta_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

위 식을 통해 변환된 두 가지 자세에서의 기준 값들과 두 가지 자세에서의 가속도 센서 측정 값들을 통해 식 (1)에서의 가속도 파라미터들의 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_{x1} - m_{x2}) / (\tilde{m}_{x1} - \tilde{m}_{x2}) \\ (m_{y1} - m_{y2}) / (\tilde{m}_{y1} - \tilde{m}_{y2}) \\ (m_{z1} - m_{z2}) / (\tilde{m}_{z1} - \tilde{m}_{z2}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{x1} \\ m_{y1} \\ m_{z1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_x & 0 & 0 \\ 0 & a_y & 0 \\ 0 & 0 & a_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{m}_{x1} \\ \tilde{m}_{y1} \\ \tilde{m}_{z1} \end{bmatrix}$$

### 2. 각속도 센서의 오차 보상

3축 각속도 센서의 파라미터 오차 보상에는 가속도 센서의 보상을 위해 센서의 자세를 변화시키는 과정에서 발생한 각속도와 그에 따른 각속도 센서와 각도 측정 장치로부터의 측정 값이 사용된다. 각도 측정 장치로부터 얻은 측정 값은 센서의 보상을 위한 기준이 된다. 센서 모듈의 회전에 의해 발생한 각속도는 식 (6)에서와 같이 3축 각도 측정 장치의 현재 위치한 피치, 롤의 각도 값에 의존적이며, 식 (6)을 통해 각속도의 이상 값( $m_{pitch}, m_{roll}, m_{yaw}$ )으로 변환 시킬 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_{pitch} \\ m_{roll} \\ m_{yaw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin\theta_r \\ 0 & \cos\theta_p & \sin\theta_p \\ 0 & \sin\theta_p & \sin\theta_p \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta_p/dt \\ d\theta_r/dt \\ d\theta_y/dt \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (1)에서의 각속도 파라미터들의 값은 식 (6)에서 구한 각속도의 이상 값과 각속도 센서로부터의 측정 값을 바탕으로 아래와 같이 최소평균자승법(least mean square method)을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_{pitch\_1} \\ m_{roll\_1} \\ m_{yaw\_1} \\ \vdots \\ m_{pitch\_n} \\ m_{roll\_n} \\ m_{yaw\_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{m}_{pitch\_1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{m}_{roll\_1} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{m}_{yaw\_1} & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{m}_{pitch\_n} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{m}_{roll\_n} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{m}_{yaw\_n} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{m} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{a}$$

$$\mathbf{a} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{m}$$

## IV. 실험결과

그림 6은 본 연구에서 제작한 3축 각도 측정 장비를 사용해 실제 구축한 실험 환경이다. 본 3축 각도 측정 장치는 0.01125°의 해상도를 가지는 엔코더를 사용하였으며, 고성능 DSP 보드가 탑재하고 있다. 이 DSP 보드는 센서 모듈 및 엔코더로부터의 측정 데이터를 시리얼 통신을 통해 PC로 전달하는 역할을 한다. 보상 필터를 거친 센서 측정 값 및 엔코

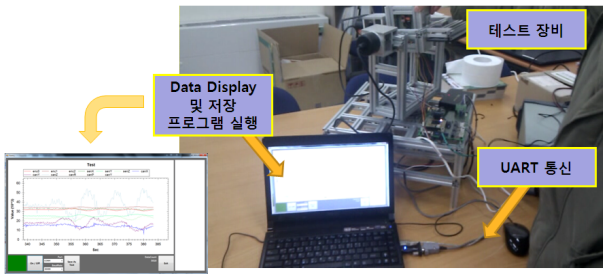


그림 6. 실제 실험 환경.

Fig. 6. The actual experimental environment.

더로부터의 이상 값을 전달받은 PC에서는 획득된 데이터를 바탕으로 본 논문에서 제시한 각/가속도 센서 오차 보상 필터의 성능을 평가한다.

1. 가속도 센서의 오차 보상 결과

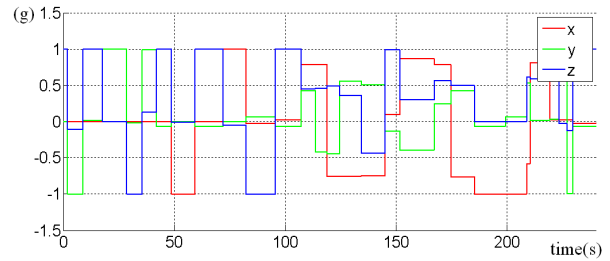
그림 7은 가속도 센서의 오차 보상 결과의 성능 평가를 위해 사용한 실험 데이터 및 결과 데이터의 그래프이다. 실험 결과의 신뢰성을 높이기 위해 다양한 자세에서의 실험 데이터를 사용하였다. 센서 모듈의 다양한 각 자세에서의 엔코더 값과 식 (4)를 통해 구한 3축 가속도 센서에 대한 이상 값들은 그림 7(a)와 같으며, 본 논문에서의 오차 보상 필터를 통해 오프셋과 민감도가 보상된 가속도 센서로부터의 측정 값들은 그림 7(b)와 같다. 본 실험에서의 결과를 볼 때, 엔코더를 통해 획득한 이상 값과 오차가 보상된 가속도 센서의 측정 값이 거의 일치함을 확인 할 수 있다. 그림 8은 보다 정확한 비교를 위해 이상 값과 측정 값 간의 오차를 표시한 그래프이다.

그림 8(a)는 보상되지 않은 측정 값과 이상 값에 대한 오차를 보여주며, 그림 8(b)는 본 논문에서의 보상 필터를 통해 오차가 보상된 측정 값의 이상 값에 대한 오차를 보여준다. 또한, 표 1은 각 실험 결과를 정량적으로 평가한 내용이다. 그림 8(a)에서의 실험 결과의 RMS (Root Mean Square)는 19.5 mg로서, 약 3.38 %의 오차율을 가지는 반면, 그림 8(b)에서의 실험 결과의 RMS는 18.2 mg로서, 약 3.15 %의 오차율을 가진다. 즉, 본 논문에서의 오차 보상 필터를 통해 가속도 센서의 성능이 6.80%만큼 향상 됐음을 확인할 수 있다.

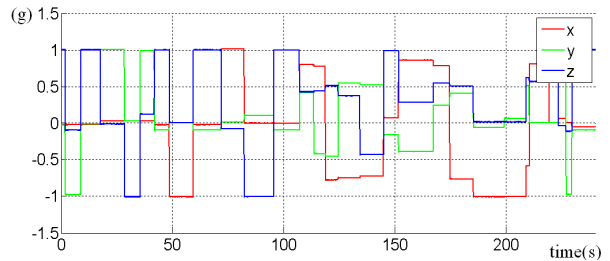
2. 각속도 센서의 오차 보상 결과

그림 9는 각속도 센서의 오차 보상 결과의 성능 평가를 위해 사용한 실험 데이터 및 결과 데이터의 그래프이다. 가속도 센서의 오차 보상 실험과 유사하게, 센서 모듈의 회전 시의 엔코더 값과 식 (6)을 통해 구한 3축 각속도 센서에 대한 이상 값들은 그림 9(a)와 같으며, 본 논문에서의 오차 보상 필터를 통해 오프셋과 민감도가 보상된 각속도 센서로부터의 측정 값들은 그림 9(b)와 같다. 가속도 센서의 실험 결과에서와 마찬가지로 엔코더를 통해 획득한 이상 값과 오차가 보상된 각속도 센서의 측정 값이 거의 일치함을 확인 할 수 있으며, 그림 10은 보다 정확한 비교를 위해 이상 값과 측정 값 간의 오차를 표시한 그래프이다.

그림 10(a)는 보상되지 않은 측정 값과 이상 값에 대한 오차를 보여주며, 그림 10(b)는 본 논문에서의 보상 필터를 통해 오차가 보상된 측정 값의 이상 값에 대한 오차를 보여준다. 또한, 표 2는 각 실험 결과를 정량적으로 평가한 내용이다.



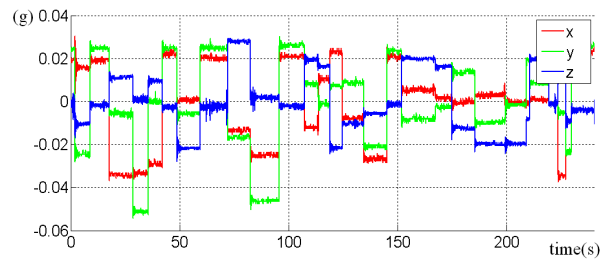
(a) The true value.



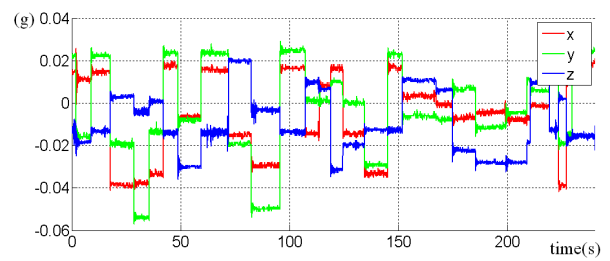
(b) The calibrated measured value.

그림 7. 가속도 센서 오차 보상 필터 실험 결과.

Fig. 7. The experiment result of accelerometer calibration.



(a) Before calibration.



(b) After calibration.

그림 8. 가속도 센서의 측정 오차.

Fig. 8. The measurement error of accelerometer.

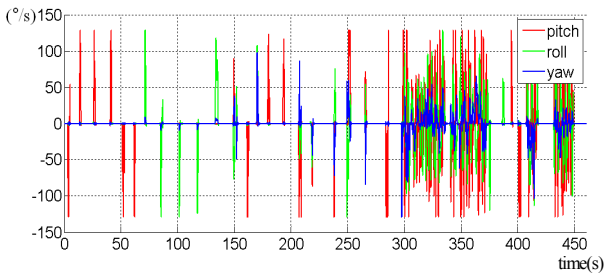
표 1. 가속도 센서 실험 결과.

Table 1. The experiment result for accelerometer.

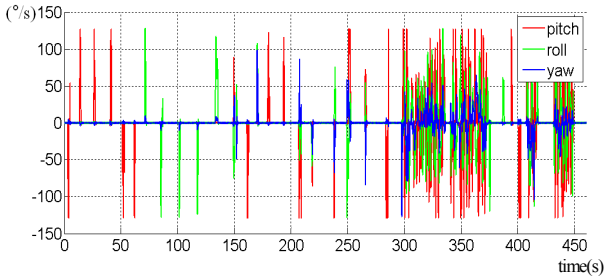
	RMS(mg)	오차율(%)
보상 필터 적용 전	19.5	3.38
보상 필터 적용 후	18.2	3.15

다. 그림 10(a)에서의 실험 결과의 RMS (Root Mean Square)는 0.953(s)로서, 약 4.085 %의 오차율을 가지는 반면, 그림 10(b)에서의 실험 결과의 RMS는 0.663(s)로서, 약 2.842 %의 오차율을 가진다. 즉, 본 논문에서의 오차 보상 필터를 통해 각속도 센서의 성능이 30.43 %만큼 향상 됐음을 확인할 수 있다.





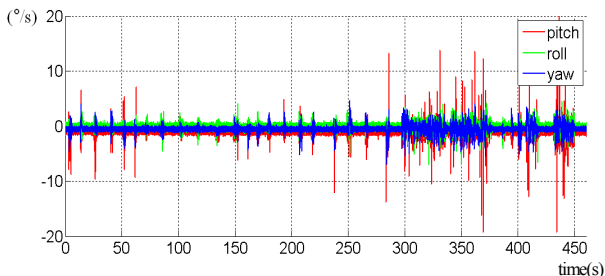
(a) The true value.



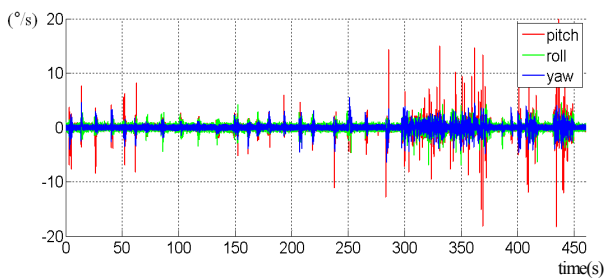
(b) The calibrated measured value.

그림 9. 각속도 센서 오차 보상 필터 실험 결과.

Fig. 9. The experiment result of gyroscope calibration.



(a) Before calibration.



(b) After calibration.

그림 10. 각속도 센서의 측정 오차.

Fig. 10. The measurement error of gyroscope.

표 2. 각속도 센서 실험 결과.

Table 2. The experiment result for gyroscope.

	RMS( $^{\circ}/s$ )	오차율(%)
보상 필터 적용 전	0.953	4.085
보상 필터 적용 후	0.663	2.842

V. 결론

본 논문에서는 최소한의 노력과 실험 시간을 통해 각/가속도 센서의 파라미터 오차를 한꺼번에 효율적으로 보상하기 위한 방법을 소개하였다. 그리고 실제 실험을 통해 본 논문

에서의 오차 보상 필터의 사용에 따른 각/가속도 센서의 성능 향상을 확인하였다. 하지만, 본 논문에서의 오차 보상 필터는 각/가속도 센서의 오프셋과 민감도만을 보상하고 있다. 일반적인 저가형 MEMS 기반 관성 센서가 가지는 파라미터 오차에는 비선형(nonlinearity) 에러, 얼라인먼트(alignment) 에러, 교차축(cross-axis) 에러 등이 있다. 예를 들어, 그림 7에서 6.5초 전후 가속도 센서의 결과를 볼 때, 센서 모듈의 z축이 바닥을 향하고 있는 자세임을 알 수 있다. 이 경우 그림 8을 통해, 센서의 x축과 y축의 오차가 0.02g로서 2% 가량 발생함을 확인할 수 있다. 이는 본 실험에 사용된 센서 모듈의 x축 및 y축에 대한 z축의 교차축 오차가 2%임을 나타낸다. 이에 따라 본 논문에서의 필터를 통해 보상 가능한 오프셋과 민감도 만이 아닌 비선형 에러, 얼라인먼트 에러, 교차축 에러 등의 오차들까지도 보상을 할 필요가 있다. 향후 연구로 이러한 오차들까지도 효율적이며 정확하게 보상할 수 있는 오차 보상 알고리즘 개발을 진행하고자 한다.

참고문헌

- [1] G S. Hhu, K. M. Bae, S.-R. Lee, and C.-Y. Lee, "Recognition of driving patterns using accelerometers," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 6, pp. 517-523, Oct. 2010.
- [2] J. Jin, "Angular speed estimation and two-axis attitude control of a spacecraft using a variable-speed control moment gyroscope," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 11, pp. 1104-1109, Nov. 2010.
- [3] S. Haggag, D. Alstrom, S. Cetinkunt, and A. Egelja, "Modeling, control, and validation of an electro-hydraulic steer-by-wire system for articulated vehicle applications," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 10, no. 6, pp. 688-692, Dec. 2005.
- [4] H.-J. Kwak, J.-H. Kim, and G.-T. Park, "A new approach for online denoising," *Proc. of 1st Int. Conf. on Engineering and Technology Innovation (ICETI 2011)*, pp. 1-5, Nov. 2011.
- [5] P. Aggarwal, Z. Syed, and N. El-Sheimy, "Thermal calibration of low cost MEMS sensors for land vehicle navigation system," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 2859-2863, Nov. 2008.
- [6] X. Li, C. Zhang, X. He, and Z. Zhong, "Temperature errors of IFOG and its compensation in engineering application," *Proc. of 9th Int. Conf. on Electronic Measurement and Instruments*, pp. 2230-2234, Aug. 2009.
- [7] C.-M. Song, "Autocalibration method of three-axis micromachined accelerometers," *Trans. KIEE (in Korean)*, vol. 55C, no. 9, pp. 456-460, Sep. 2006.
- [8] K. Tuck, "Implementing auto-zero calibration technique for accelerometers," Freescale Semiconductor Application Note, AN3447, Mar. 2007.
- [9] P. Won and F. Golnaraghi, "A triaxial accelerometer calibration method using a mathematical model," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 8, pp. 2144-2153, Aug. 2010.
- [10] L. Jianli, D. Min, and F. Jiancheng, "Fuzzy modeling and compensation of scale factor for MEMS gyroscope," *Mechanika*, vol. 17, no. 4, pp. 408-412, July 2011.
- [11] L. Ojeda, H. Chung, and J. Borenstein, "Precision-calibration of fiber-optics gyroscopes for mobile robot navigation," *Proc. of*

*IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2064-2069, Apr. 2000.

- [12] H.-J. Kwak, J.-M. Hwang, J.-H. Kim, C.-K. Kim, and G.-T. Park, "Simple calibration method for accelerometer and gyroscope using three-axis motion rate table," *Proc. of the 27<sup>th</sup> ICROS Annual Conference (in Korean)*, pp. 299-300, Apr. 2012.



**곽 환 주**

2007년 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사). 2007년~현재 고려대학교 전자전기공학과 석박사통합과정 재학중. 관심분야는 지능제어, 로봇 및 차량 시스템, 신호처리.



**황 정 문**

2011년 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(공학사). 2011년~현재 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 관성센서, 신호처리, 디지털제어.



**김 정 한**

1993년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1995년 KAIST 기계공학과(공학석사). 1999년 KAIST 기계공학과(공학박사). 2004년~현재 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 부교수. 관심분야는 관성센서, 신호처리, 정밀계측 및 디지털제어.



**박 귀 태**

1975년 고려대학교 전기공학과(공학학사). 1977년 고려대학교 전기공학과(공학석사). 1981년 고려대학교 대학원 전기공학과(공학박사). 1978년 3월~1981년 8월 광운대학교 전기공학과 조교수. 2000년 8월~2005년 11월 (사)IBS

KOREA 회장. 1981년 9월~현재 고려대학교 전기공학과 정교수. 관심분야는 퍼지 및 신경망, 컴퓨터 비전, 지능제어, 인텔리전트 빌딩시스템 및 정보통신.