
고성능 기준 센서를 이용한 저급 MEMS IMU 오차 보정

장근형* · 천세범** · 성상경* · 이은성*** · 전향식*** · 이영재*

Calibration of a Low Grade MEMS IMU Using a High Performance Reference Sensor

Keunhyung Chang* · Sebum Chun** · Sangkyung Sung* · Eunsung Lee*** · Hyang-Sig Jun*** · Young Jae Lee*

요약

항체가 정밀한 항법 정보를 얻기 위해서는 관성 센서의 초기 오차에 대한 보정이 매우 중요하다. 본 논문에서는 레이트 테이블과 고성능 센서를 기준 센서로 사용하여, 저급 MEMS 관성 센서 오차 보정에 따르는 비용과 효율성의 어려움을 극복하는 방법을 제안하였다. 초기 오차 보정 과정에서 기준 센서와 타겟 센서에 같은 동적 입력을 인가한 후 결과를 분석하였다. 실험 결과를 통해 제안된 초기 오차 보정 방법이 실제로 매우 효율적이며 유용함을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Calibration of a MEMS inertial measurement unit is very important process for obtaining precise navigation performance. In this paper, one method is proposed to overcome a limitations on cost and efficiency using a relatively higher grade sensor and a rate table. The same dynamic input is applied to both the reference and the target sensors during and after calibration process, then the results are analyzed. The experimental results show that the proposed method is very effective and useful in practice.

키워드

MEMS Inertial Sensor (MEMS 관성 센서), Calibration (오차 보정), Reference Sensor (기준 센서)

I. 서론

관성항법시스템이란, 병진 운동을 감지하는 가속도계와 회전 운동을 감지하는 자이로를 이용하여 3축에서의 가속도와 각속도를 측정함으로써 위치 및 자세, 속도를 계산하는 항법 시스템을 말한다[1,6,7].

관성항법시스템은 외부 환경에 영향을 받지 않으며 짧은 항법의 수행 기간 동안에는 매우 정확하고 연속적인 항법 데이터를 제공하는 장점이 있다. 그러나 긴 시간

동안 항법을 수행할 경우 오차가 누적되어 정밀한 항법의 수행이 어렵게되므로 센서의 초기 오차를 보정하는 과정이 필수적이다[1,6,7]. 지금까지 센서 초기 오차를 보정하는 방법에는 레이트 테이블이 보편적으로 사용되었다. 레이트 테이블 위에 보정하고자 하는 센서를 장착한 후 정확한 각속도 및 가속도 값을 인가하고, 센서의 출력값을 참 값과 비교하여 오차를 보정하는 것이다. 하지만 레이트 테이블은 장비 자체가 고가이며 설치에 있어 환경의 제약이 존재하기 때문에, 실제로 항체에 적용

* 건국대학교

** 마이크로 인피니티

*** 한국항공우주연구원

할 수 있으면서 기존의 레이트 테이블을 이용한 오차 보정을 대체할 수 있는 다른 방법의 오차 보정 방법을 알아 보았다.

본 논문에서는 저급 MEMS (마이크로 전자기계 시스템: Microelectromechanical Systems) 관성 센서의 초기 오차 보정 과정에서 타겟 센서에 비해 상대적으로 정확도가 높은 기준 센서를 이용하는 오차 보정 방식을 소개한다. 기준 센서와 오차를 보정하고자 하는 타겟 센서에 동일한 각속도 및 가속도를 입력하며 출력 데이터를 얻고, 두 출력의 차이만큼 타겟 센서에 대한 오차 보정을 수행하였다. 실험 결과 오차를 보정한 저급 MEMS 관성 센서의 정확도가 크게 향상되었고, 이는 고기동을 하는 항체의 운동 및 자세를 표현하는 데 적절함을 확인하였다.

II. 관성 센서의 센서 오차

관성 센서에서 보정해야 할 오차와 오차 모델은 다음과 같다.

2.1 관성 센서 오차

관성 센서에서 초기에 보정해야 할 센서 오차에는 주요오차로써 바이어스, 비정렬오차, 환산계수 오차가 있다. 이러한 하드웨어적인 센서 자체의 오차를 제거하는 것이 오차 보정의 필수 과정이다[8]. 여기서 바이어스는 센서에 입력이 인가되지 않았음에도 센서의 출력이 존재하는 것을 말한다. 그리고 드리프트는 우리가 원하는 출력으로부터 시간에 따라 편차가 발생하는 비율을 말한다. 비정렬 오차는 센서의 설치 초기 조건 상태에서 센서의 입력 축과 그와 관계된 기준축 사이의 각이 정확하게 정렬되지 않았을 경우에 발생하는 오차이다. 이는 보통 기준좌표계에 대하여 서로 직교하지 않음으로 인해 나타나게 되고, 그 결과 각 축은 다른 축의 측정값에 의해 영향을 받게 된다. 환산계수오차는 출력에 대한 입력의 비로 표현되며 PPM (피피엠: Parts Per Million)이나 백분율로 나타낸다. 즉, 환산계수오차는 이상적인 값에서 일정한 비율만큼 벗어난 값으로 나타나며 일정치를 곱하거나 나눔으로써 소프트웨어적으로 쉽게 보정할 수 있다. 그리고 잡음은 원래의 신호 외에 추가적인 신호로 센서 자체 혹은 다른 전자 장비로 인하여 측정하고자 하는 출력 신호가 방해를 받는 현상을 말한다[2,8]. 주요 오

차 외의 기타 오차들에는 질량 불균형 오차, 이산화오차, 비탄성오차, 제곱 오차등이 있다.

2.2 관성 센서의 오차 모델

식 (1)은 일반화 된 자이로의 오차 모델이다[8].

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_x &= (1 + \lambda_{\omega_x})(\omega_x + \epsilon_{xz}\omega_y - \epsilon_{xy}\omega_z - m_1a_x + q_1a_y \\ &\quad + n_1a_xa_z + b_{\omega_x}) + \eta_{\omega_x} \\ \bar{\omega}_y &= (1 + \lambda_{\omega_y})(\omega_y + \epsilon_{yx}\omega_z - \epsilon_{yz}\omega_x - m_2a_y + q_2a_x \\ &\quad + n_2a_ya_z + b_{\omega_y}) + \eta_{\omega_y} \\ \bar{\omega}_z &= (1 + \lambda_{\omega_z})(\omega_z + \epsilon_{zy}\omega_x - \epsilon_{zx}\omega_y - m_3a_z + q_3a_y \\ &\quad + n_3a_za_x + b_{\omega_z}) + \eta_{\omega_z}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서,

$\bar{\omega}$: 타겟센서에서 측정된 각속도값
 λ : 환산계수오차
 ϵ : 비정렬오차
 m : 질량불균형오차
 n : 비탄성오차
 q : 제곱오차
 b : 자이로 바이어스
 η : 자이로 잡음

그리고 식 (2)는 일반화된 가속도계의 오차 모델을 나타낸다[8].

$$\begin{aligned}\bar{a}_x &= (1 + \lambda_{a_x})(a_x + \epsilon_{xz}a_y - \epsilon_{xy}a_z + Q_xa_x^2 + b_{a_x}) + \eta_{a_x} \\ \bar{a}_y &= (1 + \lambda_{a_y})(a_y + \epsilon_{yx}a_z - \epsilon_{yz}a_x + Q_ya_y^2 + b_{a_y}) + \eta_{a_y} \\ \bar{a}_z &= (1 + \lambda_{a_z})(a_z + \epsilon_{zy}a_x - \epsilon_{zx}a_y + Q_za_z^2 + b_{a_z}) + \eta_{a_z}\end{aligned}\quad (2)$$

여기서,

\bar{a} : 타겟센서에서 측정된 가속도값
 λ : 환산계수오차
 ϵ : 비정렬오차
 Q : 제곱오차
 b : 가속도계 바이어스
 η : 가속도계 잡음

III. 레이트 테이블을 이용한 오차 보정

레이트 테이블은 실험체에 정확한 각도와 각속도 및 가속도를 인가할 수 있는 장비로서, 관성 센서나 그것의

로 만들어진 IMU (관성 측정 장치: Inertial Measurement Unit)의 성능을 실험할 때 사용한다.

3.1 레이트 테스트

IMU 좌표축을 레이트 테이블의 NED 좌표축에 일치시킨 후, 레이트 테이블에 각속도를 입력함으로써 센서를 회전시키고 그 출력을 관찰하는 방법을 말한다. 레이트 테스트를 통해 자이로의 환산계수오차와 비정렬오차, 바이어스를 추정할 수 있다[8.9].

3.2 다위치 정적 시험

다위치 정적 시험이란, 레이트 테이블에 각도 입력을 주어 IMU를 회전시키며 가속도계의 축마다 인가되는 중력 가속도를 이용하여 출력을 관찰하는 것이다. 다위치 정적 시험을 통해 가속도계의 환산계수오차와 비정렬오차, 바이어스를 추정한다[8,9].

IV. 기준 센서를 이용한 관성 센서의 오차 보정

타겟 센서를 기준 센서에 축 정렬하여 부착하고, 두 IMU를 함께 손으로 직접 회전시켜 각속도와 각도 입력을 주면서 출력을 비교하였다. 이 방법은 큰 각속도 입력에 대하여 시각 오차로 인해 전체 동적 영역에서 센서 성능을 파악하기 어려우므로 손으로 회전시킬 수 있는 입력 범위 내에서 센서 성능을 파악하였다.

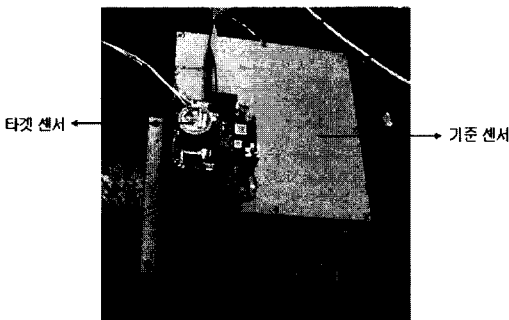


그림 1. 기준 센서와 타겟 센서
Fig. 1. Reference sensor and target sensor

4.1 하드웨어 구성

실험에서 기준 센서로는 FOG (Fiber Optic Gyro) IMU를 사용하였다. 그리고 타겟 센서를 기준 센서의 좌표축에 일치하도록 그림 1과 같이 축 정렬하여 장착하였다. 표 1은 기준 센서의 사양을 나타낸 것이며, 표 2와 표 3은 타겟 센서의 자이로와 가속도계 사양을 나타낸다.

표 1. 기준 센서의 사양
Table. 1. Specification of reference sensor

모델명		VG 700CA-201
제작사		Crossbow
자이로		FOG
Update Rate (Hz)		>125
Band width	자이로(Hz)	>100
	가속도계(Hz)	>75
각속도(deg/s)		±200
가속도(G)		±10
드리프트	각속도(deg/h)	<0.4
	가속도(m/s/h)	<1.0

표 2. 타겟 센서의 자이로 사양
Table. 2. Specification of target sensor's gyro

모델명		ADXRS 300
제작사		Analog Device
Bandwidth(Hz)		80
Update Rate(Hz)		200
각속도(deg/s)		±300

표 3. 타겟 센서의 가속도계 사양
Table. 3. Specification of target sensor's accelerometer

모델명		ADXL 203
제작사		Analog Device
Bandwidth(Hz)		100 (noise: 1.4mg)
Update Rate(Hz)		200
가속도(G)		±1.7

센서를 배치할 때, 기준 센서에 비하여 타겟 센서는 무게가 매우 가벼워서 무게 중심의 불일치에 따른 효과는 무시할 수 있었다. 그리고 기준 센서와 타겟 센서 간의 출력주기가 다르므로, 시각 동기를 수행한 후 결과값을 후처리하였다. 시각 동기를 수행하는 과정에서 일반 PC를 이용할 시에는 데이터 갱신 주기의 한계로 인하여 지연이 발생하기 때문에 그림 2와 같은 시각 동기 장치를 구성하였다.

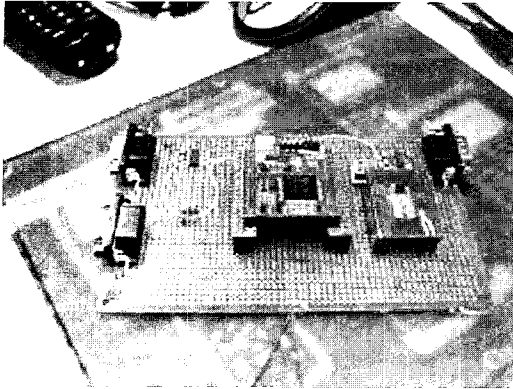


그림 2. 시각 동기 장치
Fig. 2. Time synchronous equipment

두 개의 시리얼 포트를 통해 기준 센서와 타겟 센서의 출력이 입력되면, DSP를 이용하여 시각 동기를 수행한다. 그리고 동기화된 센서 간 출력은 우측의 포트를 통해 PC에 연결되어 저장한 후 후처리 한다. 그림 3은 오차 보정 절차를 나타낸 것이다.

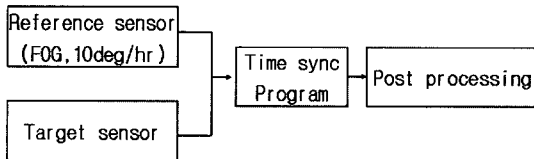


그림 3. 오차 보정 절차
Fig. 3. Process of calibration

4.2 오차 보정 방법

기준 센서를 이용할 경우 비정렬 오차는 레이트 테이블을 이용할 때에 비해 신뢰도가 떨어지지만 환산계수 오차 및 바이어스를 추정하는 데 문제가 없다.

4.2.1 자이로의 오차 보정

식 (3)은 기준 센서를 사용하기 위해 자이로의 오차 모델을 간략화한 것이다. 오차의 주요 원인인 환산계수 오차와 비정렬오차, 바이어스만을 보정할 때는 오차 모델을 식 (3)과 같이 단순화시킬 수 있다[8].

$$\begin{bmatrix} \bar{\omega}_x \\ \bar{\omega}_y \\ \bar{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_x & \alpha_{xz} & \alpha_{xy} \\ \alpha_{yz} & \lambda_y & \alpha_{yx} \\ \alpha_{zy} & \alpha_{zx} & \lambda_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{wx} \\ b_{wy} \\ b_{wz} \end{bmatrix} + v_{gryo} \quad (3)$$

식 (3)에서 좌측항은 타겟센서로부터 측정된 각속도 값이다. 그리고 λ 는 환산계수오차를 나타내며, α 는 축 간의 비정렬오차를 나타낸다. 우측항의 ω 는 기준 센서를 이용하여 측정된 각속도 참 값을 나타내며, b 는 바이어스 오차, v 는 자이로의 잡음이다. 오차 모델이 선형이므로 최소자승법을 사용하여 오차를 추정할 수 있다. 식 (4)는 최소자승법을 적용하기 위해 식 (3)을 변형시킨 것이다. 추정해야 할 오차 벡터 X 는 x, y, z 의 각 축으로 나타난 비정렬 오차계수 6개와 환산계수오차 3개, 그리고 바이어스 오차 계수 3개로 이루어진 12차의 미지수 벡터이다. 그러므로 랭크가 3인 자이로 오차 모델에서 4세트 이상의 측정치를 수집하면 최소자승법을 이용하여 오차들의 추정이 가능하다.

$$\begin{aligned} X &= [\lambda_x \alpha_{xz} \alpha_{xy} \alpha_{yz} \lambda_y \alpha_{yx} \alpha_{zy} \alpha_{zx} \lambda_z b_{wx} b_{wy} b_{wz}]^T \\ Y &= [\bar{\omega}_x \bar{\omega}_y \bar{\omega}_z]^T \\ H &= \begin{pmatrix} \omega_{1 \times 3} 0_{1 \times 3} 0_{1 \times 3} 1 0 0 \\ 0_{1 \times 3} \omega_{1 \times 3} 0_{1 \times 3} 0 1 0 \\ 0_{1 \times 3} 0_{1 \times 3} \omega_{1 \times 3} 0 0 1 \end{pmatrix} \\ Y &= HX \end{aligned} \quad (4)$$

4.2.2 가속도계의 오차 보정

식 (5)는 기준 센서를 사용하기 위해 가속도계 오차 모델을 간략화한 것이다. 가속도계도 자이로의 오차 모델과 마찬가지로 주요 오차 원인인 환산계수오차와 비정렬오차, 바이어스를 추정하기 위해 단순화하였다[8].

$$\begin{bmatrix} \bar{a}_x \\ \bar{a}_y \\ \bar{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_x & \alpha_{xz} & \alpha_{xy} \\ \alpha_{yz} & \lambda_y & \alpha_{yx} \\ \alpha_{zy} & \alpha_{zx} & \lambda_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{ax} \\ b_{ay} \\ b_{az} \end{bmatrix} + v_{Acc} \quad (5)$$

식 (5)에서 좌측항은 타겟 센서로부터 측정된 가속도 값이다. 그리고 우측항의 a 는 기준 센서로부터 측정된 가속도 값이다. 식 (6)은 최소자승법을 적용하여 가속도계 오차를 추정하기 위해 식 (5)를 변형시킨 것이다. 타겟 센서에서 측정된 가속도 측정값을 Y 벡터로 두고 기준 센서로부터 얻은 가속도 참값을 측정행렬 H 로 놓았다. 그리고 추정하고자 하는 오차들을 벡터 X 로 설정하였다. 그러므로 오차 벡터는 12차의 미지수로 이루어진 벡터이며, 가속도 참값으로 이루어진 측정행렬 H 는

3×12 행렬이다. 가속도계 오차 모델 역시 랭크가 3이므로 4 세트 이상의 측정치를 수집하면 최소자승법을 통하여 오차를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X &= [\lambda_x \alpha_{xx} \alpha_{xy} \alpha_{yz} \lambda_y \alpha_{yx} \alpha_{zy} \alpha_{zx} \lambda_z b_{ax} b_{ay} b_{az}]^T \\
 Y &= [a_x a_y a_z]^T \\
 H &= \begin{pmatrix} a_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 1 & 0 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & a_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0 & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & a_{1 \times 3} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 Y &= HX \\
 X &= (H^T H)^{-1} H^T Y
 \end{aligned} \tag{6}$$

이렇게 구해진 자이로 및 가속도계의 오차를 식 (3)과 (5)에 각각 대입하여, 자이로와 가속도계의 초기 오차 보정을 수행할 수 있다.

V. 초기 오차 보정 결과

기준 센서를 이용하여 초기 오차 보정을 수행한 결과는 다음과 같다.

5.1 자이로의 초기 오차 보정 결과

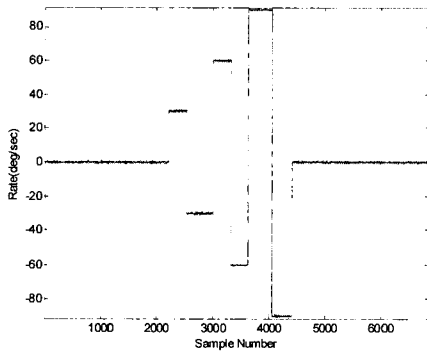


그림 4 레이트 테이블 이용한 자이로 오차 보정
Fig. 4. Gyro calibration using rate table

그림 4는 기준 센서를 이용한 오차 보정 결과를 비교하기 위해 레이트 테이블을 이용하여 실험한 결과이다. 레이트 테이블에 ±30deg/s, ±60deg/s, ±90deg/s의 각속도를 인가함으로써, 기준 센서 및 타겟 센서에 입력한 각속도 범위와 유사하게 설정하였다. 직선으로 나타난 부분

은 타겟 센서에 실제로 레이트 테이블 컨트롤러를 이용하여 입력한 각속도 참 값이다. 오차 보정 결과가 참 값에 대해 잘 쫓아가며 레이트 테이블을 이용한 오차 보정이 정확히 이루어졌음을 보여주고 있다.

그림 5는 기준 센서를 이용하여 자이로의 오차 보정을 수행한 후의 결과이다. 기준 센서와 타겟 센서에 인가하는 자이로의 입력값은 한 축에 대하여 손으로 회전시킬 수 있는 입력 범위로 70 - 80deg/s 이내의 회전 각속도를 주었다. 그리고 기준 센서와 타겟 센서의 출력을 동기화 시킨 후 후처리하였다.

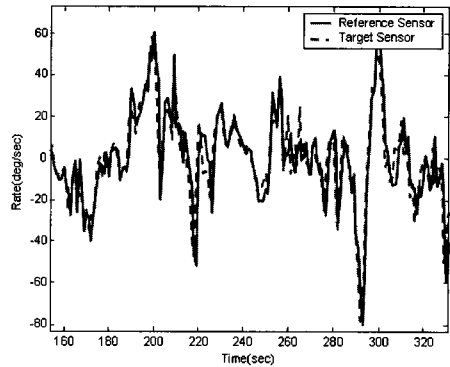


그림 5. 오차 보정 후의 센서 간 각속도 출력 비교
Fig. 5. Comparison of angular velocity output with reference sensor and target sensor after calibration

그림 6은 전체 동적 영역에서 입력 범위가 큰 부분에서의 결과를 확대해서 나타낸 것이다.

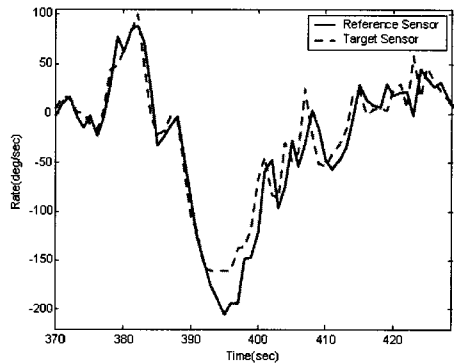


그림 6. 입력 범위가 큰 경우 기준 센서를 이용한 자이로 오차 보정 결과
Fig. 6. Gyro calibration using reference sensor result in very high dynamic input

그림 6에서 입력 범위가 200deg/s와 같이 큰 경우에는 오차를 보정한 타겟 센서의 추정 성능이 기준 센서를 잘 쫓아가지 못한다. 하지만 이러한 고기동을 하는 상황은 실제에서 많지 않으며, 90deg/s 이내 정도의 각속도 입력에 대해서는 기준 센서를 이용한 보정 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

그림 5에서 기준 센서를 이용한 오차 보정 결과는 그림 4에서 레이트 테이블을 이용한 오차 보정 결과만큼 좋은 성능을 나타낼 수 없었다. 하지만 저급 MEMS 자이로의 경우에는 기준 센서를 사용하는 정도만으로도 초기 오차의 보정이 충분히 이루어졌음을 확인할 수 있다.

5.2 가속도계의 초기 오차 보정 결과

그림 7은 기준 센서를 이용하여 가속도계의 초기 오차 보정을 수행한 결과를 비교하기 위해, 레이트 테이블을 사용하여 가속도계의 오차 보정을 수행한 결과이다. 이 때 입력은 45°씩 자세를 변화시키며 총 8개의 자세에 대한 오차 보정을 수행하였다. 여기서 x축은 가속도계의 샘플 개수를 나타내며, y축은 중력에 대한 가속도계 출력을 나타낸 것이다.

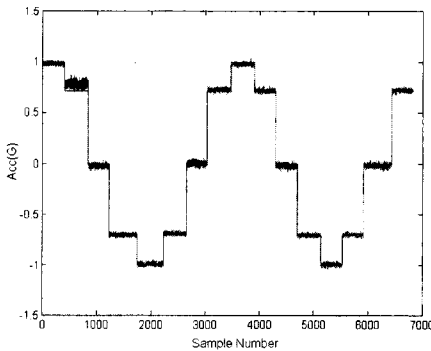


그림 7. 레이트 테이블을 이용한 가속도계 보정
Fig. 7. Accelerometer calibration using rate table

여기서 y축값 1은 센서 축이 중력이 작용하는 수직 하 방향을 가리킬 때 참 값이며, y축값 0은 센서 축이 중력의 방향과 수직을 이룰 때의 참 값을 말한다. 레이트 테이블 실험 결과 가속도계의 오차 보정 결과가 참 값을 쫓아가며 오차 보정이 정확히 이루어졌음을 알 수 있다.

그림 8은 기준 센서를 사용하여 타겟 센서 가속도계의 오차 보정을 수행한 결과이다. 이 때 기준 센서와 타겟 센서의 가속도계를 회전축을 중심으로 ±90°씩 자세를

변경하며 데이터를 얻은 후 후처리하였다. 그리고 그림 9는 가장 기동이 심한 부분인 180초와 200초 사이를 확대한 것이다.

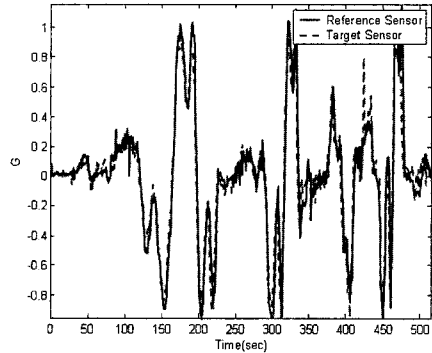


그림 8. 오차 보정 후의 센서 간 가속도 출력 비교
Fig. 8. Comparison of acceleration output with reference sensor and target sensor after calibration

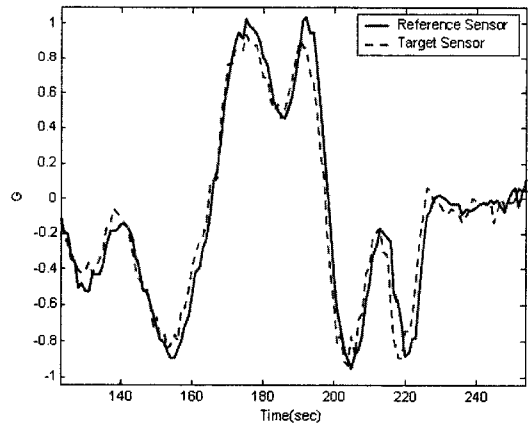


그림 9. 입력 범위가 큰 경우 기준 센서를 이용한 가속도계 오차 보정 결과

Fig. 9. Accelerometer calibration using reference sensor result in very high dynamic input

기준 센서의 가속도 출력에 대해 타겟 센서의 가속도 출력이 전체적으로 0.1G 이하의 차이를 보이며 초기 오차 보정이 적절히 이루어졌음을 알 수 있다.

마찬가지로 그림 8의 기준 센서를 이용한 가속도계의 오차 보정 결과가 그림 7에서 레이트 테이블을 이용한 오차 보정 결과의 정확도에 미치지지는 못한다. 하지만 저급 MEMS 가속도계의 경우 기준 센서를 사용한 정도의 오차 보정으로 충분히 활용 가능함을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

관성 센서의 초기 오차 보정 방식으로 기존에 많이 사용하던 레이트 테이블은 자이로 및 가속도계에 정확한 데이터를 입력해 줄 수 있는 장점이 있는 반면, 장비 자체가 고가이며 장비 설치에 있어서 공간적인 제약이 존재한다. 본 논문에서 제시한 기준 센서를 이용하여 초기 오차 보정을 수행한 결과는 레이트 테이블을 이용하여 초기 오차 보정을 수행한 결과와 비교할 때 정확도 측면에서는 우수하지 못했다. 하지만 비용 면에서 상대적으로 매우 저렴하며 사용 공간에 따른 제약을 받지 않는다는 장점이 있다. 그리고 실험을 통하여 MEMS 센서와 같은 저급 관성 센서의 경우, 레이트 테이블을 사용한 오차 보정을 하지 않더라도 기준 센서를 이용한 오차 보정의 결과만으로 선박을 비롯한 고기동을 하는 항체에 충분히 활용 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 항공우주부품기술개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] D.H.Titterton and J.L.Weston, *Strapdown inertial navigation technology*, IEEE, 1997
- [2] Stephen J.Huffman, *IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology*, IEEE Std 528, 1994
- [3] D.K.Joos, *Comparison of Typical gyro errors for Strapdown Applications*, DGON-Symposium, Sept. 1977
- [4] U.Krogmann, *Identification Procedures for Strapdown-Sensor-Parameters by Laboratory Testing*, DGON-Symposium, Sept.1978
- [5] Schmidt, G. T., *Strapdown Inertial Systems Theory and Applications. Introduction and Overview*, AGARD Lecture Series, No.95, 1978
- [6] Savage, P. G., *Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 1: Attitude Algorithms*, *Journal of Guidance, Control, and*

Dynamics, Vol 21, No 1, 1998

- [7] Savage, P. G., *Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 2: Velocity and Position Algorithms*, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol 21, No 2, 1998
- [8] 한국항공우주연구소, *Technology Development of the Inertial Navigation and Global Navigation Sarellite System*, 과학기술부, 2000
- [9] 박찬국, 진용, 원종석, “관성항법시스템을 위한 센서 오차의 최적추정 기법”, 한국항공우주학회지 26권 5호, pp.116 ~ 240, 1998

저자소개



장근형(Keunhyung Chang)

2000년 건국대 기계항공공학부 졸업.
2007년 ~ 현재 동 대학원 항공우주정 보시스템공학과 석사 과정.

※관심분야: RTK 응용, GPS_INS Integragion



천세범(Sebum Chun)

2000년 건국대 항공우주공학과 졸업.
2002년 동 대학원 석사 졸업.
2008년 동 대학원 박사 졸업.

2008~현재 (주)마이크로인피니티 책임연구원.
※관심분야: GPS, INS, 비전센서, 센서 퓨전.



성상경(Sangkyung Sung)

1996년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업.
1998년 동 대학원 석사 졸업.
2003년 동 대학 박사 졸업.

1996년~2003년 서울대학교 자동제어특화연구센터 연구원.
2003년~2007년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원, 2007년~현재 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 조교수.
※관심분야: 위성통신, 마이크로파 회로해석 및 설계, 계측제어



이은성(Eunsung Lee)

1996년 건국대학교 항공우주공학과 졸업.

1998년 동 대학원 석사 졸업.

2005년 동 대학원 박사 졸업.

2005~2006 동 대학원 박사 후 연수 연구원.

2006~2007 Univ. California Los Angeles 연구원.

2007~현재 한국항공우주연구원.

※관심분야 : GPS RTK, Orbit determination, fault detection of GPS systems



전향식(Hyang-Sig Jun)

1988년 부산대학교 전기공학과 졸업.

1992년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사).

1999년 동 대학원 전기공학 박사 수료.

1991~1999년 대우중공업.

1999~2003년 한국항공우주산업.

2004~현재 한국항공우주연구원.

※관심분야: 차세대 위성항행시스템 (CNS/ATM)



이영재(Young Jae Lee)

1982년 서울대 항공우주공학과 졸업.

1985년 동 대학원 석사 졸업.

1990년 The Univ. of Texas at Austin 미국 항공우주공학 박사 졸업.

1990년~1992년 미국 The Univ. of Texas at Austin 연구원.

1992년~현재 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 교수.

2002년~2003년 미국 UCLA 방문 교수.

※관심분야: GBAS, GPS를 이용한 정밀 위치 결정, 기타 GPS 응용