

타원체를 이용한 3 축 센서의 실시간 보정 알고리즘 개발

Development of the Calibration Algorithm of 3 Axis Vector Sensor Using Ellipsoid

황정문¹, 김정한^{1,✉}

Jung Moon Hwang¹ and Jung Han Kim^{1,✉}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanic System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: hankim@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6397

Manuscript received: 2015.2.13. / Accepted: 2015.5.20.

Multi-axis magnetic and accelerometer sensor are widely used in consumer product such as smart phones. The vector output of multi-axis sensors have errors on each axis such as offset error, scale error, non-orthogonality. These errors cause many problems on the performance of the applications. In this paper, we designed the effective inline compensation algorithm for calibrating of 3 axis sensors using ellipsoid for mass production of multi-axis sensors. The outputs with those kinds of errors can be modeled by ellipsoid, and the proposed algorithm makes sequential mappings of the virtual ellipsoid to perfect sphere which is calibrated function of the sensor on three-dimensional space. The proposed calibrating process composed of four main stages and is very straightforward and effective. In addition, another imperfection of the sensor such as the drift from temperature can be easily inserted in each mapping stage. Numerical simulation and experimental results shows great performance of the proposed compensation algorithm.

KEYWORDS: 3 axis sensor calibration (3 축 센서 보정), Sensor calibration using ellipsoid (타원체를 이용한 센서 보정), Low cost sensor calibration (저가형 센서 보정), Rotational transformation (회전변환)

1. 서론

최근 센서 제조기술의 비약적인 발전으로, 기존에는 매우 고가였던 가속도계와 자기센서와 같은 벡터값 출력 방식의 센서가 스마트폰과 같은 대중적인 제품에서도 널리 사용되고 있다. 자동차의 에어백이나 전자 나침반 등에도 많이 사용되는 가속도계나 지자기 센서의 경우에도 두 축이나 세 개의 축이 하나의 패키지에 들어 있어서 한번에 다수 축에 대한 측정이 가능하다.¹

특히 MEMS 방식의 벡터 출력 형태의 센서들은 많은 경우 전공정에서 축별로 제조된 후, 후공정에서 3축으로 조립되어 패키지화 되는 경우가 많은데, 이러한 조립 공정에서 제품별, 개체별로 오프셋, 축별 민감도 및 직각도 편차가 항상 발생하게 된다. 따라서 제품 개별적으로 보정 절차가 반드시 필요하게 된다.²

고가의 INS 시스템등에서는 고정된 9가지의 자세를 정해놓고 센서를 돌려놓아가면서 보정하는 방법³등을 많이 사용하는데 이는 스마트폰과 같은

대량생산 제품에는 적절하지 않으며, 대량 생산되는 제품의 특성상 복잡하지 않고 간편하며 효율적인 알고리즘이 반드시 필요하다.

이러한 벡터방식의 3축 센서를 일정한 중력가속도나 지구자기장에 대해서 상대 회전시키면서 그 출력값을 공간상에서 맵핑하면 이론적으로는 완벽한 구의 형태를 형성해야 하지만, 전술한 센서의 직각도오차, 축별민감도 오차, 출력 오프셋 등의 이유로 오프셋이 있는 일그러진 형태의 타원체를 형성하게 된다.⁴

다수개의 데이터를 이용하여 이를 타원체로 모델링하는 작업은 다양한 쓰임새가 있기 때문에 많은 연구자들이 노이즈가 섞인 데이터를 이용하여 타원체에 대한 모델링을 연구하였다.⁵⁻⁸

Vasconcelos 등은 최대가능추정치(maximum likelihood estimator) 등을 사용하여 노이즈가 포함된 측정데이터로부터 센서의 보정을 연구하였고,⁹ Pang 은 이러한 3축 벡터 방식의 비선형성을 완화하기 위한 18가지의 파라미터를 구하여 보상하는 방법을 연구하였다.¹⁰ Wavelet과 같은 신호처리기법을 사용한 주파수 영역에서의 보상기법에 대한 연구도 수행되었다.¹¹

정밀한 INS 시스템과는 달리 대량 생산되는 스마트폰등은 센서의 보정을 일일이 수작업으로 할 수 없으므로 생산공정안에서 인라인으로 수행할 수 있는 간편한 보정 알고리즘이 반드시 필요한데, 본 연구에서는 이 부분에 집중하여 보다 효율적이고 자동화가 가능한 3축 벡터 보정 변환 알고리즘을 제시하였다.

본 연구에서 개발된 알고리즘은 일괄 3축 벡터 방식의 보다 손쉬운 타원체에서의 모델링 방법과, 완성된 모델링을 회전변환과 이동변환을 사용하여 중간 단계에서 센서의 특성 보정 및 드리프트 보정을 동시에 수행할 수 있는 보다 효율적인 실시간 보정 적용 알고리즘을 포함한다. 본 연구에서 제안한 모델링 적용 계산 방식은 계산량이 매우 작고, 지자기센서에서의 Hard Iron / Soft Iron 효과 및 온도 드리프트 등을 실시간으로 동시에 보정해 넣는 것이 가능하다.¹²

2. 벡터방식 3축 센서의 출력

2.1 센서의 모델링

벡터 출력을 가지고 있는 가속도 센서나 지자기 센서를 임의로 회전시키면서 각 축의 데이터를

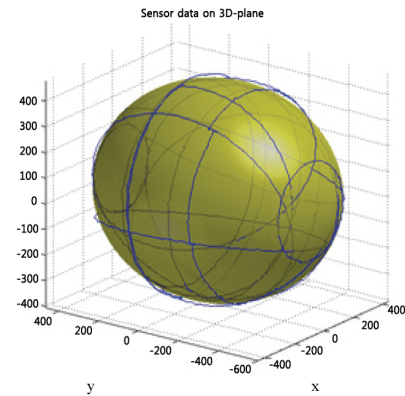


Fig. 1 3 axis sensor data on 3D-plane

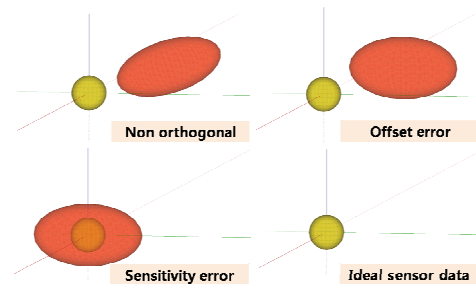


Fig. 2 Errors of 3 axis magnetic sensor

3차원 공간에 도시하면 그림 Fig. 1과 같이 센서 데이터는 하나의 타원체를 중심으로 분포하는 데이터를 얻을 수 있다.¹³

일정한 중력가속도 상의 가속도 센서의 경우, 만약 X, Y, Z 모든 축의 민감도가 동일하고, 출력의 바이어스가 없으며, 각 축들이 정확히 직각을 이룬다면 회전하는 센서의 출력 데이터는 원점에 고정된 반지름이 1인 구 모양을 이루게 된다.

2.2 에러 분석

이상적인 센서의 출력이 구형 형태의 맵핑을 가지는 것에 반하여, 실제적으로는 센서의 바이어스, 축별 민감도, 직교성, 측정값의 왜곡등으로 인하여 오프셋을 가지고, 각 축의 반지름과 방향이 서로 다른 타원체를 이룬다. 따라서 노이즈가 포함된 센서의 출력값으로부터 상기한 타원체의 모델링을 알아내는 것이 센서 보정의 첫 번째 단계가 된다. 3축 벡터 센서에서 출력되는 데이터는 3가지 에러(오프셋, 스케일, 직교성)로 인하여 Fig. 2와 같이 노란색 구모양의 데이터가 붉은색 타원체로 변형된다.

3. 벡터방식 3축 센서의 보정 알고리즘

3.1 타원체 피팅

상기한 바와 같이 3축 센서의 고정된 물리량에 대한 상대운동상태에서의 실제 출력값은 다음과 같이 타원체로 모델링 할 수 있다.

$$Q(x, y, z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + 2dxy + 2exz + 2fyz + gx + hy + kz + j = 0 \quad (1)$$

센서의 실제 출력값은 전기적인 노이즈를 포함한 측정 노이즈를 포함하고 있으므로 수식(1)과 같은 타원체의 방정식에서의 파라미터를 구하려면 파라미터의 개수보다 훨씬 많은 측정값을 측정하여 대표값을 찾아내어야 한다. 본 연구에서는 최소자승법을 사용하여 상기한 타원의 방정식을 빠른시간에 효율적으로 찾아내는 방법을 사용하였다.

$$S = \sum_{i=1}^n Q(x_i, y_i, z_i)^2 \quad (2)$$

다수개의 센서 데이터를 토대로 식(1)의 인자들을 구하기 위해서 식(2)의 비용함수를 최소화 하는 파라미터를 찾아내는 최소 좌승법을 이용한다. 실제로 최소좌승법을 사용하여 식(1)의 파라미터들을 구하려고 하면, 모든 파라미터가 0이 나오는 자명해(trivial solution)가 구해지는 경우가 발생한다. 따라서 이를 피하기 위하여 수식(1)을 노말라이제이션 하는 연구가 많이 진행되었는데, 본 연구에서는 Rosin 이 제안한 상수값을 기준으로 평준화해서 최소 좌승법을 수행한 후, 타원체 방정식의 각 인자들을 구하였다.¹⁴

Rosin이 제안한 $j=1$ 이라는 조건은 타원체가 원점을 중심으로 한 구에서 많이 벗어나지 않는 모양의 타원체에 대해서 피팅 성능이 다른 조건에 비해서 더 좋은데, 최근 생산되는 MEMS 방식의 센서들은 각 축들의 직교 오차가 적으며 축간 민감도가 크게 차이 나지 않으므로 실험결과 이러한 방법이 본 연구에서는 적합한 것을 알아내었다.

이러한 조건을 식(1)에 적용하면, 식(3)과 같이 정리된다.

$$Q(x, y, z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + 2dxy + 2exz + 2fyz + gx + hy + kz + 1 = 0 \quad (3)$$

식(3)에 최소 좌승법을 적용하기 위해서는 최

소 9개의 자세로부터 데이터를 수집하여야 한다. 9개 이상의 자세로부터 나온 데이터를 이용하여 최소좌승법을 적용, 9개의 타원체 파라미터들을 구하는 방법은 아래와 같다.

$$\mathbf{u} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{y} \quad (4)$$

식(4)에서 각 행렬들은 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = [a \ b \ c \ d \ e \ f \ g \ h \ k]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & 2x_1y_1 & 2x_1z_1 & 2y_1z_1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & 2x_2y_2 & 2x_2z_2 & 2y_2z_2 & x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 & 2x_ny_n & 2x_nz_n & 2y_nz_n & x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = [-1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1]^T \quad (7)$$

3.2 모델링에 의한 보정 함수계산

센서 출력값의 실시간 보정을 위해서는 상기한 모델링을 이용하여 보정값을 간편하게 계산하는 함수를 구하여야 한다. 본 연구에서는 회전변환 및 이동변환 그리고 스케일링 보정 방법을 순차적으로 사용하여 이를 원하는 사이즈의 구형태로 만드는 함수를 제안하였고, 이 과정에서 온도의 드리프트나 기타 가변 오프셋 등을 반영하기 매우 용이한 모듈 보정 함수를 설계하였다. 제안된 방법을 사용하면, 축별 민감도 변화, 오프셋 이동 등 대량 생산되는 센서의 파라미터들의 변화의 경향을 추적하기 용이하며, 온도에 의한 드리프트 보정 등 추가적인 알고리즘이 별도로 삽입되기 매우 용이하므로, 대량생산되는 벡터방식의 인라인 센서 보정에 매우 유리하며, 사용중 제 캘리브레이션이 필요할 경우에도 상당히 편리하다.

상기에서 구한 센서의 모델링을 사용하여 왜곡된 센서 특성을 보정하는 함수를 구하는 과정을 본 연구에서는 좌표축의 회전, 오프셋의 보정, 민감도의 보정, 원래 벡터 방향으로의 복귀의 4단계로 구성하였으며 이는 시각적으로 Fig. 3과 같이 표현될 수 있다.

X, Y, Z 축의 반지름이 모두 1인 원점 중심의 구는 아래 식(8)과 같이 표현 할 수 있는데, 이 과정을 단계별로 정리하면 다음과 같다.

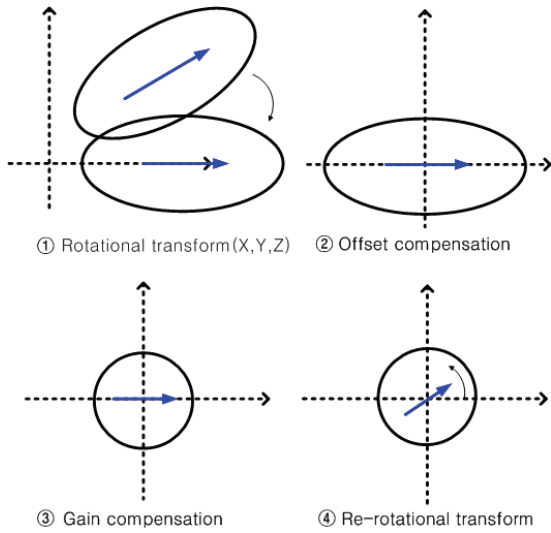


Fig. 3 Compensation of ellipsoid

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1 \tag{8}$$

① X, Y, Z축 방향으로 회전변환

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2dxy + 2exz + 2fyz + gx + hy + kz + 1 = 0 \tag{9}$$

타원체 방정식(9)는 아래와 같이 행렬식으로 표현이 가능하다.⁵

$$\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{s} \mathbf{x} + 1 = 0, \tag{10}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{bmatrix}, \mathbf{s} = [g \ h \ k]. \tag{11}$$

벡터 \mathbf{x} 의 변환된 좌표를 \mathbf{x}' 이라 하고, 식(11)에서 대칭행렬 \mathbf{A} 를 직교 대각화하는 행렬을 \mathbf{P} 라 하면(행렬 \mathbf{A} 의 고유벡터들을 열벡터로 하는 행렬) 대각화 분해(eigen-decomposition)를 통하여 식(10)을 $\mathbf{x} = \mathbf{P} \mathbf{x}'$ 을 만족하는 새로운 변수 \mathbf{x}' 에 대하여 변환하면 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{s} \mathbf{x} + 1 = \mathbf{x}'^T \mathbf{D} \mathbf{x}' + (\mathbf{s} \mathbf{P}) \mathbf{x}' + 1 = \lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 z'^2 + g' x' + h' y' + k' z' + 1 = 0 \tag{12}$$

식(12)에서 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 은 행렬 \mathbf{A} 의 고유값이고, 행렬 \mathbf{D} 는 대각행렬 $\mathbf{D} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P}$ 이며, $\mathbf{s} \mathbf{P} = [g' \ h' \ k']$ 이다.

식(12)가 Fig. 3의 ①번 과정을 수행한 식이며, 여기서 행렬 \mathbf{P} 가 타원체의 방향과 직교 방향사이를 변환해 주는 회전행렬이 된다.

② 원점(0,0,0)으로 이동(오프셋의 제거)
타원체의 중심을 계산하기 위하여 식(12)를 완전 제곱식으로 나타내면 식(13)과 같다.

$$\lambda_1 \left(x' + \frac{g'}{2\lambda_1}\right)^2 + \left(y' + \frac{h'}{2\lambda_2}\right)^2 + \left(z' + \frac{k'}{2\lambda_3}\right)^2 = \frac{g'^2}{4\lambda_1} + \frac{h'^2}{4\lambda_2} + \frac{k'^2}{4\lambda_3} - 1 \tag{13}$$

식(13)을 다음과 같은 기호를 사용해 좌표축을 평행이동하면 식(15)와 같이 표현 가능하다.

$$x'' = x' + \frac{g'}{2\lambda_1}, \quad y'' = y' + \frac{h'}{2\lambda_2}, \quad z'' = z' + \frac{k'}{2\lambda_3} \tag{14}$$

$$\lambda_1 x''^2 + \lambda_2 y''^2 + \lambda_3 z''^2 = \frac{g'^2}{4\lambda_1} + \frac{h'^2}{4\lambda_2} + \frac{k'^2}{4\lambda_3} - 1 \tag{15}$$

만약 센서의 온도에 대한 출력 드리프트 특성 모델을 별도로 구할 수 있다면, 이 단계에서 오프셋 보정시 해당 파라미터의 추가 보정이 가능하다.

③ 반지름의 크기 보정(축별 민감도 보정)

식(15)의 우항을 상수 q 로 두면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\lambda_1}{q} x''^2 + \frac{\lambda_2}{q} y''^2 + \frac{\lambda_3}{q} z''^2 = 1 \tag{16}$$

위 식(16)을 식(17)과 같은 새로운 기호로 표현하면 다음의 식(18)와 표준화된 구의 방정식으로 표현 가능하다.

$$x''' = x'' \sqrt{\frac{\lambda_1}{q}}, \quad y''' = y'' \sqrt{\frac{\lambda_2}{q}}, \quad z''' = z'' \sqrt{\frac{\lambda_3}{q}} \tag{17}$$

$$x'''^2 + y'''^2 + z'''^2 = 1 \tag{18}$$

위 식(18)의 우항에 원하는 크기의 반지름 (r)을 곱해줌으로써 X, Y, Z축 반지름 r 을 가지는 구의 방정식을 얻을 수 있는데 이는 물리적으로 센서의 민감도 계인을 조정할 수 있는 것을 의미한

다. 이 단계는 센서 보정의 성능에 중요한 성능을 미치는데 센서의 출력값 스케일이 센서마다 상당히 다르므로 그 값에 맞는 스케일로 조정해 주어야 수식 변환등에서 발생하는 수치적인 에러를 최소화 할 수 있다.

④ 초기 방향으로 회전

초기 센서데이터들의 벡터 방향의 복원을 위하여 위에서 구한 식(18)의 변수항에 고유벡터 P를 다시 곱해준다.

3.3 센서 데이터의 실시간 보정값 계산

본 연구의 전체적인 보정 순서는 Fig. 4와 같다. 센서 데이터를 이용하여 타원체에 피팅을 한 후, 생성된 타원체를 구로 만든다. 타원체를 구로 만드는 과정을 그대로 실시간 센서 데이터에 적용하면, 센서 데이터에 보정이 이루어진다.

센서 데이터에 Fig. 4의 과정을 적용하면 원하는 크기의 구 표면에 데이터들이 분포하는 보정 데이터를 얻을 수 있다. Fig. 5의 과정을 적용하기 위해서는 회전행렬, 오프셋행렬, 스케일행렬이 필요하며 이를 최종적으로 순서대로 정리하면 식 (19)-(25)와 같다.

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2dxy + 2exz + 2fyz + gx + hy + kz + 1 = 0 \tag{19}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{bmatrix}, \mathbf{s} = [g \ h \ k], \tag{20}$$

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 + \lambda_3 z^2 + g'x + h'y + k'z + 1 = 0 \tag{21}$$

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} \frac{g'}{2\lambda_1} & \frac{h'}{2\lambda_2} & \frac{k'}{2\lambda_3} \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{\lambda_1}{q}} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{\lambda_2}{q}} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{\lambda_3}{q}} \end{bmatrix} \tag{23}$$

$$q = \frac{g'^2}{4\lambda_1} + \frac{h'^2}{4\lambda_2} + \frac{k'^2}{4\lambda_3} - 1, \tag{24}$$

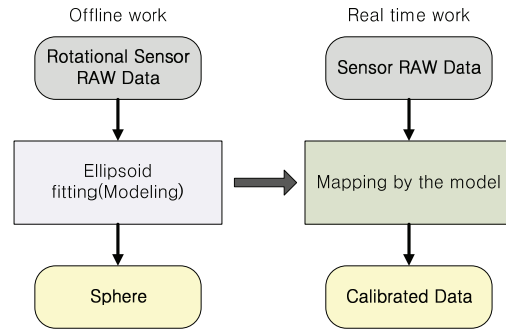


Fig. 4 Calibration process

$$\mathbf{x}_{comp} = \mathbf{P}\mathbf{G}[\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x}_{raw} + \mathbf{O}] \tag{25}$$

여기서 λ 및 \mathbf{P} 는 식(12)에서 정의한 대로이며, \mathbf{x}_{raw} 는 보정 전 데이터이고 식(25)에서 구해지는 값이 최종적으로 실시간 보정된 센서 데이터의 값이 된다.

4. 시뮬레이션 결과

양산형 센서에서 타원체 피팅을 할 때 수집할 수 있는 데이터의 양은 한정되어 있으며 모든 각도에서의 센서 값을 수집할 수 없다. 시뮬레이션 또한 이러한 점을 고려하여 X, Y, Z값이 모두 양의 값을 갖는 한정된 공간에서 각 축마다 오프셋, 스케일, 축의 방향을 다르게 하여서 타원체 피팅을 위한 샘플 데이터를 설계하였다.

타원체 피팅과 각 파라미터들을 구한 후, 다른 먼 위의 데이터를 파라미터에 대입하여, 보정된 값들이 정확히 원하는 구의 표면에 있는지 확인하였다. 기본 반지름을 1로 하는 구체에서 아래와 같이 오프셋, 스케일, 직교성에 에러를 임의로 준 후, 시뮬레이션을 진행하였다. 실험 조건을 가혹하게 하기 위하여 스케일과 직교성 등의 일반적인 조건보다 크게 설정하였다.

- 오프셋: X축 +3 Y축 +2.4 Z축 +4
- 스케일: X축 ×15 Y축 ×22 Z축 ×18
- 직교성: X축 30° Y축 0° Z축 0°

Fig. 5는 에러를 포함한 타원체를 3차원상에 도시한 그래프이며, 임의로 준 오프셋, 스케일, 직교성 에러에 의해 반지름 1의 구체가 변형을 일으켜 타원체로 변형된 모습을 확인할 수 있다. 이러한

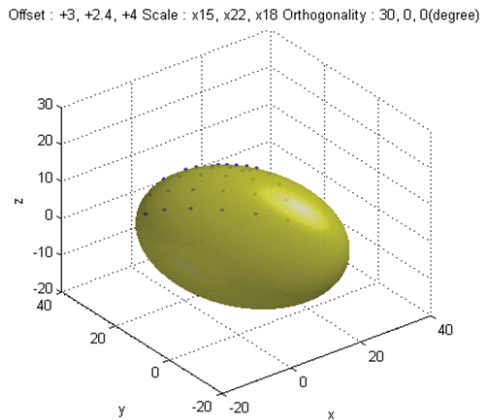


Fig. 5 Before calibration

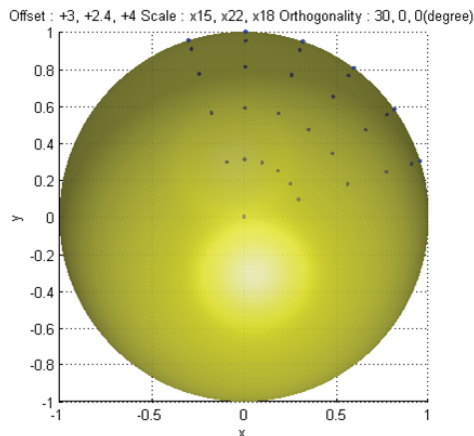


Fig. 6 After calibration (XY view)

타원체를 상기한 알고리즘을 이용하여, 구체로 변환한 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6과 같이 정확히 반지름이 1이며 원점이 (0, 0, 0) 인 구체로 변환된 모습을 확인 할 수 있다.

5. 실험

실제 3축 지자기 센서를 이용하여, 센서에서 나오는 데이터를 원점 기준 반지름 1을 갖는 구에 맞게 보정을 하였다. 보정을 한 후 데이터가 얼마나 구에 정확히 매칭이 되었는지에 확인하기 위하여 원점으로부터의 반지름을 계산하여 보정 오류율을 구하였다.

또한 레퍼런스와 비교를 통해 얼마만큼의 오차가 생기는지 확인하였다.

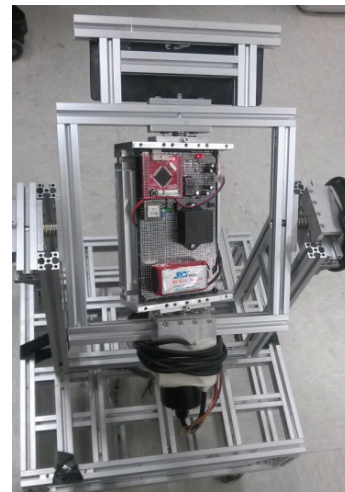


Fig. 7 Experimental gimbal stage

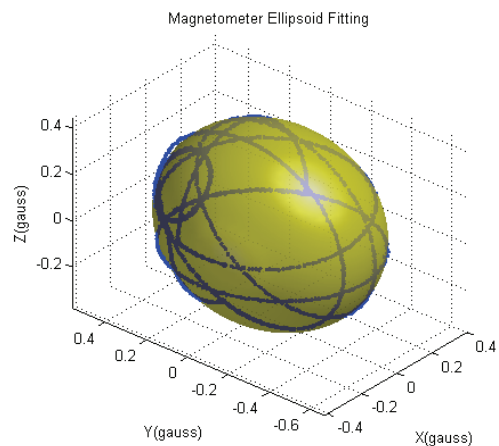


Fig. 8 Ellipsoid fitting by magnetometer data

5.1 실험 장치

센서의 다양한 움직임을 위하여, Fig. 7과 같은 3 자유도를 가진 짐발 타입의 기구를 설계하여, 그위에 MEMS형 3축 지자기센서(STM사의 LSM303DLHC), 그리고 레퍼런스로 사용될 높은 정밀도의 IMU기준 센서(XA3300)를 장착하여 실험을 진행하였다.

5.2 데이터 피팅

각 파라미터 측정을 위해서는 초기 센서 값들이 필요하다. 센서를 여러 각도로 회전하며 외란을 최소화한 상태에서 데이터를 수집하여 각 보정 파라미터들을 구한다. 실험에서는 지자기 센서를 임의의 5가지 방향으로 회전을 한 데이터를 보정 파라미터 추정을 위한 데이터로 사용하였다.

Table 1 Calibration parameters for magnetometer

	Offset	Scale	Orthogonality		
X	0.00116	0.98080	-0.9819	0.0564	-0.1807
Y	0.00210	1.01123	-0.0054	-0.9626	-0.2709
Z	0.07197	1.02089	0.1892	0.2650	-0.9454

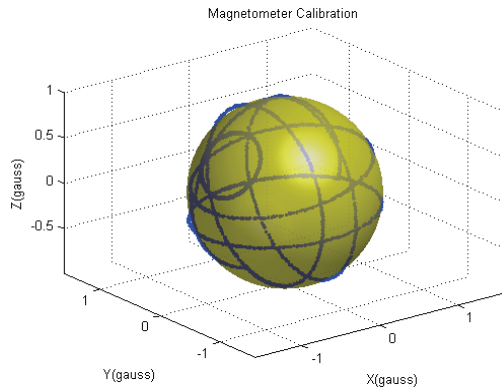


Fig. 9 Calibrated magnetometer data on sphere

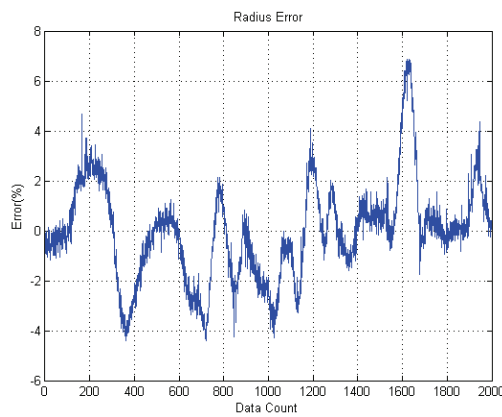


Fig. 10 Radius error of calibrated magnetometer

보정 파라미터 측정을 위하여 센서를 여러 각도로 회전한 데이터를 타원체에 피팅한다. 아래 타원체 피팅은 지자기 센서의 데이터에 가장 매칭이 잘 되는 타원체를 찾아 3차원 그래프에 도시한 것이다. 지자기 센서는 주변 자기장의 왜곡으로 인하여 좀 더 길쭉하고 회전된 타원체가 생성되었음을 알 수 있다.

피팅된 타원체로부터 오프셋, 스케일, 직각도에 대한 파라미터들을 구해 내었으며, 이를 Table 1과 같이 정리하였다.

상기와 같은 보정 파라미터를 이용하여, 초기에 쓰인 수집 데이터를 보정하면, 원하는 모양의

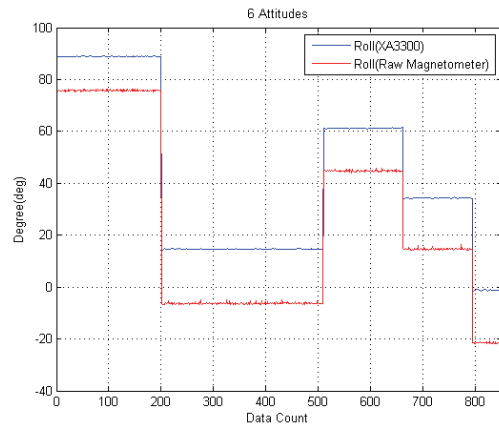


Fig. 11 Raw magnetometer vs. reference data

구 표면에 모든 데이터들이 분포하는 것을 볼 수 있다. 위의 Fig. 9는 피팅된 타원체의 표면에 분포된 데이터들을 반지름 1을 가지는 구로 보정 후, 보정된 데이터를 구 표면에 도시한 그래프이다.

보정된 데이터들은 구의 표면에 존재해야 하므로 원점으로부터 거리가 모두 1이어야 한다. 보정된 데이터의 보정 오차를 측정하기 위하여 거리에 대한 오차를 아래 그래프와 같이 도시하였다. 지자기 센서의 경우 최대 약 6%의 오차가 발생하는데 동일한 조건으로 가속도계에 대하여 실험하면 약 1%의 오차가 발생한다. 그 이유는 지자기 센서의 경우 위치에 따라 자기장의 절대값 크기가 많이 달라지기 때문이다.

5.3 보정 결과

지자기 센서의 경우, Hard-Iron Effect와 Soft-Iron Effect로 인하여 가속도 센서에 비하여 데이터들이 많은 오차를 포함하고 있다. 뿐만 아니라, 보정오차 또한 가속도 센서보다 좀 더 크다. 지자기 센서의 검증은 6가지 자세에 대하여 레퍼런스로 사용된 XA3300과 한 축의 각도 값을 비교하였다.

Fig. 11은 6가지 자세 별 XA3300와 보정된 지자기 센서, 보정되지 않은 지자기 센서의 Roll축 각도를 도시한 그래프이다.

보정을 한 지자기 센서값의 경우, 정밀한 가속도계를 사용하여 각도를 측정하는 기준값 센서(XA3300)와 측정 오차가 거의 없어지면서 측정값이 값이 거의 같아지는 것을 확인 할 수 있다.

보정 데이터로 구한 각도의 경우, Fig. 13과 같이 XA3300과 비교하면 약 0.5도의 오차를 보인다.

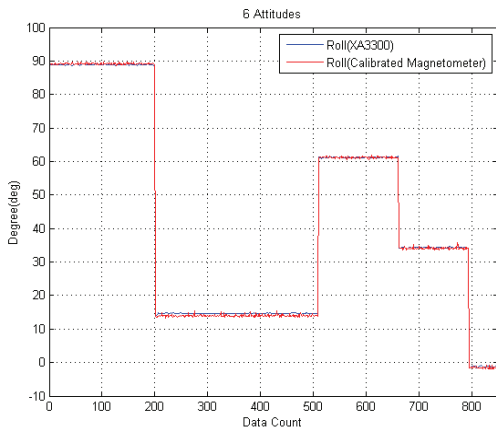


Fig. 12 Calibrated data vs. reference data

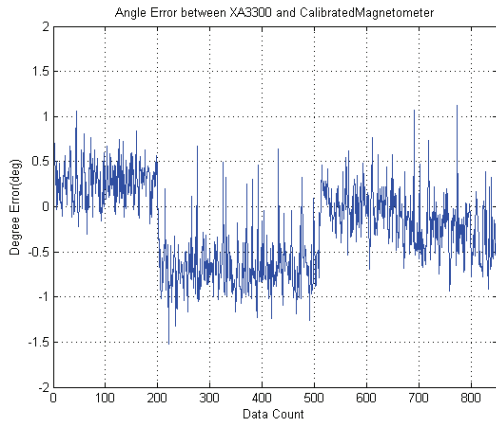


Fig. 13 Error of calibrated sensor data

Table 2 Improvement of calculated Data

RMS	Magnetometer		
	Raw	After Cal.	Improve
Angle error (deg)	18.41	0.52	97%

하지만 보정 하지 않은 데이터로부터의 각도 오차는 Hard-Iron Effect의 영향으로 한쪽 방향으로 약 18도 정도의 오차가 있으며, Soft-Iron Effect의 영향으로 약 5도의 오차를 보인다.

3축 형태의 지자기센서에 대하여 실험한 결과를 Table 2에 정리하였다. 각도 오차에 대한 RMS가 보정전 18.41 degree에서 보정 후 0.52 degree로 약 97% 개선효과를 얻을 수 있었다.

지면관계상 넣지 못했지만 가속도계에 대해서도 동일한 조건으로 실험하였는데, 가속도계에 대

해서는 각도오차 기준으로 약 60% 정도의 성능개선이 있는 것으로 측정되었다. 지자기 센서의 경우 가속도계보다 성능개선 폭이 월등히 큰 이유는, 자기장센서는 특성상 Hard-Iron Effect로 인하여, 보정을 하지 않을 경우 큰 오프셋 오차가 생기며, Soft-Iron Effect에 의하여 축별 개인차이가 크게 나타나므로 센서 출력이 가속도계보다 크게 왜곡되기 때문이다.

6. 결론

본 연구에서는 3축 벡터 센서(가속도 센서, 지자기 센서)의 데이터를 이용하여 타원체 피팅을 통해 타원체를 만든 후, 만들어진 타원체로부터 오프셋, 스케일, 직교성을 단계별로 이용하여 원하는 크기의 구로 변환하는 과정을 센서에 적용함으로써 센서 데이터를 실시간 및 인라인으로 보정하는 효과적인 방법을 제안하였다.

제안된 방법을 이용하면 대량 생산되는 가속도 센서, 지자기 센서의 3축 데이터를 각각 원하는 모양의 구에 맵핑시킴으로써 센서의 보정과 계산이 좀 더 시각적이며, 효율적으로 이루어질 수 있다. 센서의 보정시 원하는 반지름의 구체로 맵핑시킴으로써 수치에러를 최소화 할 수 있으며, 지자기 센서의 경우 오프셋과 축별 민감도변화를 발생시키는 Hard-Iron Effect 와 Soft-Iron Effect의 보정을 해당 변환 스텝에 간편하게 삽입함으로써 센서의 특징에 맞는 최적화된 보정 알고리즘의 구현이 가능하다.

또한, 가속도 센서의 경우에는 중력가속도 크기에 대한 정밀한 보정 효과가 자동적으로 구현되어 보다 저주파수에 대한 정밀한 각도측정이 가능해진다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Won, S.-H. P. and Golnaraghi, F., "A Triaxial Accelerometer Calibration Method Using a Mathematical Model," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 59, No. 8, pp. 2144-2153, 2010.

2. Song, C., "Autocalibration Method of Three-Axis Micromachined Accelerometers," Transactions of the KIEE on Systems and Control, Vol. 55C, No. 9, pp. 456-460, 2006.
3. Tabatabaei, S. A. H., Gluhak, A., and Tafazolli, R., "A Fast Calibration Method for Triaxial Magnetometers," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 62, No. 11, pp. 2929-2937, 2013.
4. Li, Q. and Griffiths, J. G., "Least Squares Ellipsoid Specific Fitting," Proc. of the Geometric Modeling and Processing, pp. 335-340, 2004.
5. Fitzgibbon, A., Pilu, M., and Fisher, R. B., "Direct Least Square Fitting of Ellipses," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No. 5, pp. 476-480, 1999.
6. Li, Q. and Griffiths, J. G., "Least Squares Ellipsoid Specific Fitting," Proc. of the Geometric Modeling and Processing, pp. 335-340, 2004.
7. Grammalidis, N. and Srintzisz, M. G., "Head Detection and Tracking by 2-D and 3-D Ellipsoid Fitting," Proc. of the Computer Graphics International, pp. 221-226, 2000.
8. Yu, J., Kulkarni, S. R., and Poor, H. V., "Robust Fitting of Ellipses and Spheroids," Proc. of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, pp. 94-98, 2009.
9. Vasconcelos, J., Elkaim, G., Silvestre, C., Oliveira, P., and Cardeira, B., "Geometric Approach to Strapdown Magnetometer Calibration in Sensor Frame," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 47, No. 2, pp. 1293-1306, 2011.
10. Pang, H., Chen, D., Pan, M., Luo, S., Zhang, Q., et al., "A New Calibration Method of Three Axis Magnetometer with Nonlinearity Suppression," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 9, pp. 5011-5015, 2013.
11. Shen, S., Chen, C., and Huang, H., "A New Calibration Method for Mems Inertial Sensor Module," Proc. of the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2010, pp. 106-111, 2010.
12. Ozyagcilar, T., "Calibrating an Ecompass in the Presence of Hard and Soft-Iron Interference," Freescale Semiconductor, Document ID: AN4246, 2012.
13. Bragge, T., Hakkarainen, M., Tarvainen, M. P., Liikavainio, T., Arokoski, J., et al., "Calibration of Triaxial Accelerometer by Determining Sensitivity Matrix and Offsets Simultaneously," Proc. of the 1st Joint ESMAC-GCMAS Meeting, 2006.
14. Rosin, P. L., "A Note on the Least Squares Fitting of Ellipses," Pattern Recognition Letters, Vol. 14, No. 10, pp. 799-808, 1993.