

지자기 센서의 온라인 왜곡 보정기법

On-line Magnetic Distortion Calibration Method for a Magnetometer

김 태 연, 소 창 주, 유 준*
(Tae-Yeon Kim¹, Chang-Ju So¹, and Joon Lyou¹)

¹Chungnam National University

Abstract: This paper describes an on-line magnetic distortion calibration procedure for a magnetometer. The horizontal magnetic field is calculated through the earth magnetic field sensed by 3-axes magnetometer. The ellipse equation is derived from a set of horizontal magnetic field data using least square method and calibration parameters are determined. The calibration process is performed iteratively until parameters are not renewed, and experimental results show the effectiveness of the devised method.

Keywords: magnetometer, distortion calibration, hard-iron distortion, soft-iron distortion, least square method

I. 서론

최근 로봇이나 차량, 항공기 및 헬리콥터와 같은 시스템의 무인화에 관한 연구가 급증하면서 이에 필요한 센서의 선택과 신호 처리가 중요한 문제로 인식되고 있다. 특히, 무인화에 반드시 필요한 자율 항행을 위해서 동체의 방위각 정보가 요구되며 이를 획득하기 위해 GPS, 자이로 센서, 자이로 컴퍼스, 지자기 센서 등이 주로 이용되어 왔다. 이 중 지자기 센서는 지구 자기장의 크기를 측정하여 자북을 기준으로 360° 방위각을 검출할 수 있으며 측정치의 누적 오차와 온도 변화에 의한 오차가 없는 장점이 있다[1]. 또한, 근래 MEMS 기술의 발전에 따라 크기가 작고 가격이 저렴한 반도체 형태로 제조되어 소형 동체에도 적용이 가능하다. 그러나 지구 자기장의 크기는 매우 작기 때문에 주변 물체 및 환경의 영향으로 측정된 자기장의 왜곡이 발생하기 쉬우며 이러한 왜곡은 곧 방위각 오차를 유발시킴으로 반드시 보정을 수행해야 한다.

기존 연구에서는 지자기 센서를 일종의 회전 시험대(rate table)에 부착하여 이미 알고 있는 방위각과 센서 출력을 비교함으로써 다양한 방법으로 왜곡을 보정하는 연구가 수행되어 왔다[2-4] 이러한 방법은 간단하고 센서 사용 전 360° 전 방위각에 대해 보정이 수행될 수 있지만 정밀한 회전 시험대가 필요할 뿐 만 아니라 실제 센서가 부착되는 환경 및 주변 물체와 보정 당시의 조건이 다를 경우 왜곡이 완벽히 보정 될 수 없어 방위각 오차가 계속 존재하는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 지자기 센서의 자기장 왜곡을 운용 중 보정하기 위한 방법을 제안한다. 먼저 3축 지자기 센서에서 연속적으로 측정된 지구 자기장으로부터 좌표 변환을 통해 롤(roll)각과 피치(pitch)각이 보상된 수평 자기벡터를 계산하고 자기벡터 집합을 구성한다. 이러한 수평 자

기벡터의 관계는 강성 왜곡(hard-iron distortion) 및 약성 왜곡(soft-iron distortion)이 임의로 존재할 경우 타원의 방정식 형태를 나타내므로 수집한 자기벡터 집합으로부터 최소자승법을 적용하여 방정식 계수를 반복적으로 식별하고 이를 이용하여 수평 자기벡터 및 방위각을 보정한다. 제안된 방법의 성능을 입증하기 위해 기 개발된 MEMS AHRS (Attitude Heading Reference System)와 요(yaw)축 회전 장치를 이용하여 실험을 수행하고 자기장 왜곡의 실시간 보정 결과 및 방위각 오차 결과를 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 지자기 센서를 이용한 방위각 측정과 주변 물체 및 환경에 의해 발생할 수 있는 자기장 왜곡에 대하여 언급하고, III 장에서 복합적인 자기장 왜곡에 대한 실시간 보정 방법을 설명한다. 그리고 IV 장에서 실험 방법 및 왜곡 보정 결과를 제시하며 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 지자기 센서 및 자기장 왜곡

1. 방위각 측정

동체의 방위각은 항법 좌표계에 대한 자세를 알고 있다는 가정 아래 그림 1과 같이 항법 좌표계에서 표현된 진북(true north)과 자북(magnetic north), 그리고 수평 자기벡터의 상호 관계로부터 추출할 수 있다.

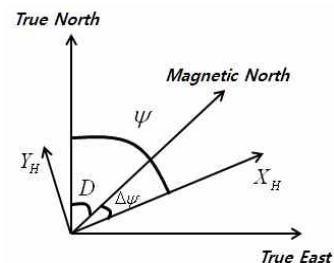


그림 1. 자북 및 항법 좌표계.

Fig. 1. Magnetic north in the navigation coordinate frame.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 6. 1., 수정: 2012. 8. 3., 채택확정: 2012. 8. 17.

김태연, 소창주, 유준: 충남대학교 전자공학과
(lst676@cnu.ac.kr/changju@cnu.ac.kr/jlyou@cnu.ac.kr)

위 그림에서 롤각과 피치각이 보상된 수평 자기벡터 X_H , Y_H 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} X_H &= mx \cos \theta + my \sin \phi \sin \theta + mz \cos \phi \sin \theta \\ Y_H &= my \cos \phi - mz \sin \phi \end{aligned}$$

여기서 m_x , m_y , m_z 는 동체 좌표계에서 측정된 3축 지구 자기장을 나타내며, ϕ 와 θ 는 각각 롤각 및 피치각이다. 이로부터 진북을 기준으로 한 동체의 방위각 ψ 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{Y_H}{X_H}\right) + D \quad (2)$$

여기서 D 는 진북과 자북의 차이인 편각(declination angle)으로써 지역에 따라 값의 차이가 있으며 일반적으로 WMM (World Magnetic Model) 2000으로부터 얻는다.

한편, 식 (2)로부터 360° 전 방위각에 대한 수평 자기벡터의 관계는 이상적인 경우 그림 2와 같이 중심이 원점에 위치한 원의 방정식을 나타낸다[2].

2. 자기장 왜곡 분석

지자기 센서를 이용하여 지구 자기장을 측정할 경우 자성을 갖고 있는 주변 물체 및 동작 환경에 따라 측정값의 왜곡이 발생할 수 있는데, 이러한 자기장 왜곡은 강성 왜곡과 약성 왜곡으로 분류된다[2-4].

강성 왜곡은 식 (3)과 같이 일정한 크기의 자기장 c_x , c_y 가 각 축의 수평 자기벡터에 더해진 형태로 발생되며 이 경우 왜곡된 수평 자기벡터 관계는 그림 3(a)와 같이 중심이 c_x , c_y 만큼 편향된 원의 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} X'_H &= X_H + c_x \\ Y'_H &= Y_H + c_y \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 이로부터 계산된 방위각은 그림 3(b)와 같이 한주기, 즉 $0^\circ \sim 360^\circ$ 범위에서 오차가 반복되는 특성을 보인다.

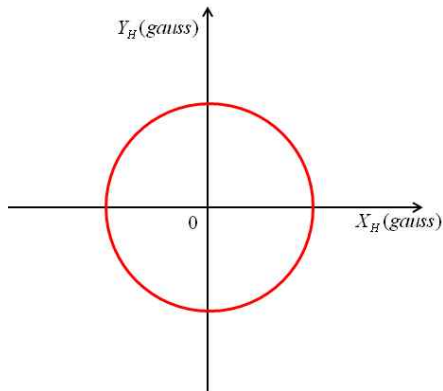


그림 2. 이상적인 수평 자기벡터 관계.
Fig. 2. The ideal 2-axes horizontal magnetic vectors.

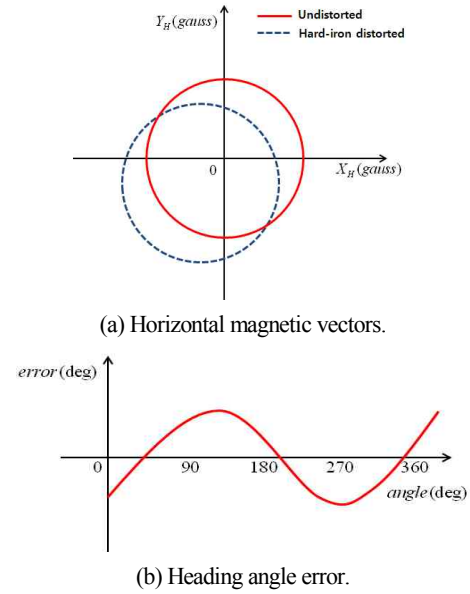


그림 3. 강성 왜곡 영향.
Fig. 3. Description of the hard-iron distortion.

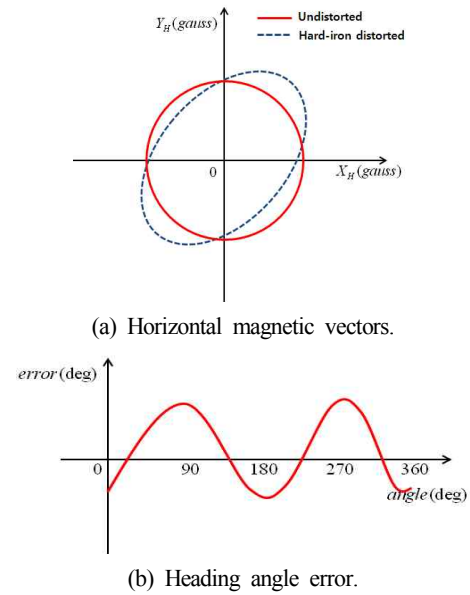


그림 4. 약성 왜곡 영향.
Fig. 4. Description of the soft-iron distortion.

또한, 약성 왜곡은 식 (4)와 같이 수평 자기벡터가 임의의 크기 S_x , S_y 만큼 변화하고 임의로 방향 δ 만큼 회전한 형태로 발생되며 이 경우 왜곡된 수평 자기벡터 관계는 그림 4(a)와 같이 δ 만큼 회전한 타원의 방정식 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} X'_H \\ Y'_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_x X_H \\ S_y Y_H \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서 이로부터 계산된 방위각은 그림 4(b)와 같이 반주기, 즉 $0^\circ \sim 180^\circ$ 범위 및 $181^\circ \sim 360^\circ$ 에서 오차가 반복되는 특성을 보인다.

III. 실시간 왜곡 보정기법

II 장에서 언급한 바와 같이 동체의 방위각은 수평 자기 벡터로부터 직접 계산할 수 있지만 다양한 변수에 의해 왜곡이 발생한다. 또한, 이러한 자기장 왜곡은 실제 센서 운용 중 어느 한 종류만 발생하지 않고 복합적으로 나타날 수 있다. 이에 본 장에서는 어떠한 외부적인 장치의 도움 없이 왜곡된 수평 자기벡터의 기하학적인 관계만으로 보정을 수행하는 방법을 제시한다.

강성 왜곡과 약성 왜곡이 동시에 발생할 경우 왜곡된 수평 자기벡터의 관계는 중심이 임의의 위치에 있고 임의의 방향으로 회전한 타원의 형태로 나타날 수 있으며 이는 곧 식 (5)와 같은 타원의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (5)$$

위 식의 양변을 a 로 나누고 정리하면 다음과 같다.

$$b'xy + c'y^2 + d'x + e'y + f' = -x^2 \quad (6)$$

여기서 각 계수의 위첨자는 a 로 나누어짐을 나타내며 n 개의 (x,y) 수평 자기벡터 집합에 대하여 식 (7)과 같은 행렬 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_ny_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b' \\ c' \\ d' \\ e' \\ f' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1^2 \\ \vdots \\ -x_n^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 식으로부터 수평 자기벡터 집합의 원소가 5개 이상일 경우 방정식의 각 계수는 식 (8)과 같이 최소자승법에 의해 구할 수 있다. 그리고 이러한 방정식 식별은 계수가 더 이상 갱신되지 않을 때까지 반복적으로 수행한다.

$$\begin{aligned} AX &= B \\ X &= (A^T A)^{-1} A^T B \end{aligned} \quad (8)$$

한편, 식별된 방정식의 각 계수로부터 왜곡된 수평 자기 벡터의 보정에 필요한 타원의 회전각과 중심위치, 장반경 및 단반경은 식 (9)와 같이 계산되며 결과적으로 강성 왜곡과 약성 왜곡이 개별적, 혹은 동시에 발생하였을 모든 경우에 대하여 보정 계수를 추출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{b'}{1-c'} \right) \\ c_x &= \frac{2c'd' - b'e'}{b^2 - 4c'}, \quad c_y = \frac{2a'e' - b'd'}{b^2 - 4c'} \\ w &= \sqrt{\frac{c_x^2 + b'c_xc_y + c'y^2 - f'}{\cos^2 \delta + b' \cos \delta \sin \delta + c' \sin^2 \delta}} \\ h &= \sqrt{\frac{c_x^2 + b'c_xc_y + c'y^2 - f'}{\sin^2 \delta + b' \cos \delta \sin \delta + c' \cos^2 \delta}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 δ 는 타원의 회전각, c_x, c_y 는 중심위치를 나타내며 w 와 h 는 각각 장반경과 단반경이다. 이를 이용하여 먼저 식 (10)과 같이 왜곡된 수평 자기벡터에 대하여 중심을 원점으로 이동하고 회전각을 보정한다.

$$\begin{bmatrix} X_{cal} \\ Y_{cal} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (X_H - c_x) \\ (Y_H - c_y) \end{bmatrix} \quad (10)$$

그리고 식 (11)과 같이 중심과 회전이 보정된 x 축 수평 자기벡터의 크기를 장반경과 단반경의 비율 σ 만큼 조정함으로써 강성 왜곡과 약성 왜곡이 모두 보정된 수평 자기벡터를 구할 수 있다.

$$X_{cal} = X_{cal} \times \sigma, \quad \sigma = \frac{h}{w} \quad (11)$$

IV. 실험 방법 및 결과 분석

1. 실험방법 구성

제안된 지자기 센서의 온라인 왜곡 보정기법에 대한 성능을 검증하기 위해 3축 자이로센서, 가속도센서 및 지자기 센서가 내장된 MEMS AHRS를 활용하였다. 기 개발된 AHRS는 $\pm 1^\circ$ 정확도를 갖는 동체의 자세를 출력하며 이를 이용하여 물각과 피치각이 보상된 수평 자기벡터를 획득하였다. 그리고 AHRS를 그림 5와 같은 제작된 요측 회전 장치에 부착하고 회전시키면서 보정된 방위각 출력과 회전 장치의 슬립링 축에 부착된 엔코더 출력을 비교하였다.

2. 왜곡보정 실험 결과

그림 6은 보정 전·후 3축 지자기 센서 출력으로부터 획득한 수평 자기벡터의 기하학적 관계를 나타낸다. 보정 전 자기벡터(파란색 점)는 강성 왜곡과 약성 왜곡이 같이 동시에 알 수 있으며 제안된 방법에 의해 보정 된 자기벡터(붉은색 원)는 중심이 원점인 원의 형태를 보인다.

그림 7은 보정된 방위각 출력과 엔코더 출력을 비교한 그래프이다. 약 4회전 정도 회전을 수행하였을 때 엔코더 출력(파란색 실선)은 0~360°의 출력이 반복되어 나타나며 이에 대한 방위각 출력(붉은색 점선) 회전이 시작 100ms 이후부터 엔코더 출력과 오차가 거의 없음을 확인할 수 있다.

보정이 시작된 시점을 판단하기 위해 200ms 시점까지의 방위각 오차를 나타내면 그림 8과 같다. 즉, 회전 초기에 수집된 자기벡터 집합의 경우 왜곡을 식별할 수 있을 정도

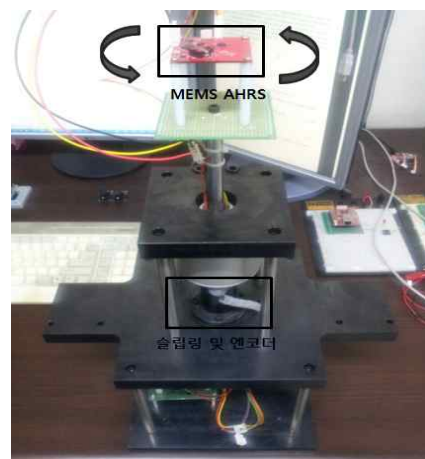


그림 5. 방위각 보정 실험장치 구성.

Fig. 5. The experimental setup for magnetic heading calibration.

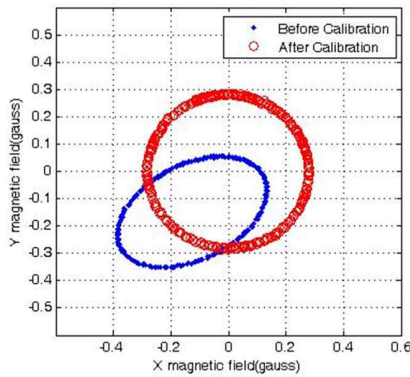


그림 6. 왜곡 보정 전·후 수평 자기벡터 비교.
Fig. 6. Horizontal magnetic vectors comparison.

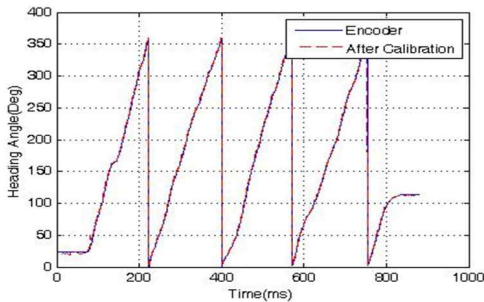


그림 7. 방위각 및 엔코더 출력 비교.
Fig. 7. The magnetic heading and encoder output comparison.

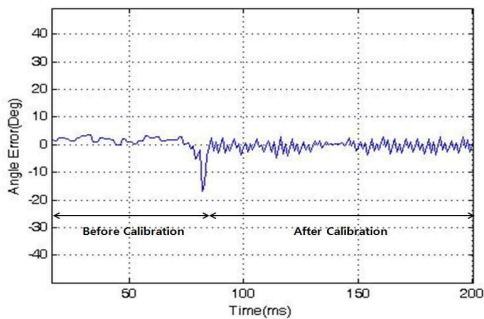


그림 8. 방위각 오차 결과.
Fig. 8. The magnetic heading error result.

의 변별력을 갖고 있지 않으므로 보정이 완료되지 않았지만 약 40° 정도 회전이 수행된 90ms 이후부터는 보정이 완료되어 방위각 오차가 ±1° 이내로 수렴함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 지자기 센서에 대한 온라인 왜곡 보정 방법을 제안하였다. 지자기 센서에 의해 측정된 방위각은 강성 왜곡과 약성 왜곡에 의해 오차가 발생하며 이는 센서 운용 전 충분히 보정될 수 없다. 이에 센서 운용 중 연속적으로 측정된 지구 자기장으로부터 롤각과 피치각이 보상된 수평 자기벡터를 수집하였고 이로부터 최소자승법을 적용하여 타원의 방정식으로 표현되는 왜곡된 수평 자기벡터 관계를 반복적으로 식별하였으며 보정 계수를 추출하였다.

또한, 기 개발된 MEMS AHRS와 제작된 요추 회전 장치를 이용하여 실험을 수행하였고 실시간으로 보정된 방위각 출력과 회전 장치의 엔코더 출력을 비교함으로써 제안된 방법의 성능을 제시하였다. 결과적으로 센서가 임의의 방향으로 약 40° 이상 회전하였을 때 보정이 완료되었으며 이 때 방위각 오차는 ±1° 이내로 수렴함을 확인하였다. 본 논문의 결과는 정확한 방위각 정보가 필요한 이동로봇 및 무인항공기의 위치추정과 제어 연구에 적용될 수 있으며 추후 이러한 시스템을 활용한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] J. H. Lee and S. Jung, "Azimuth Tracking Control of an Omni-Directional Mobile Robot(ODMR) Using a Magnetic Compass," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 2, pp.132-138, Feb. 2009.
- [2] E. L. Renk, W. Collins, M. Rizzo, and D. S. Bernstein, "Calibrating a triaxial accelerometer-magnetometer," *IEEE Trans. on Control Systems Magazine*, vol. 25, no. 6, pp. 86-95, Dec. 2005.
- [3] C. C. Foster and G. H. Elkaim, "Extension of a two-step calibration methodology to include nonorthogonal sensor axes," *IEEE Trans. on Aerospace Electronic Systems*, vol. 44, no. 3, pp. 1070-1078, Jul. 2008.
- [4] S. Bonnet, C. Bassompierre, C. Godin, and S. Lesecq, "Calibration methods for inertial and magnetic sensors," *Sensors and Actuators A*, vol. 156, no. 2, pp. 302-311, Dec. 2009.



김 태 연

2006년 충남대 전자공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 석박사 통합과정 재학. 관심분야는 쿼드콥터헬리콥터 비행 제어, 관성센서 신호처리.



소 창 주

2011년 충남대 전자공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 석사과정 재학. 관심분야는 이동로봇 위치추정.



유 준

1978년 서울대 전자공학과 졸업. 1984년 KAIST 전기전자공학과 박사. 1984년~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 산업공정제어, 센서신호처리, IT기반로봇, 항법시스템.