

논문 2011-48SC-1-1

Sensitivity Calibration 루틴 수행시 Tilt에 의한 방위각 측정 오차의 분석

(Analysis of Measured Azimuth Error on Sensitivity Calibration
Routine)

우 광 준*, 강 수 민**

(Kwang-Joon Woo and Su-Min Kang)

요 약

MR 센서에 의해 지구자기장의 세기를 측정하여 방위각을 결정하는 전자 Compass의 정밀도는 MR센서 및 OP-Amp.의 온도 Drift, DC Offset등 소자에 의한 오차, 측정주변 자성체에 의한 자기장의 왜곡, 및 Compass Tilt에 의한 오차 등의 영향을 받는다. 본 연구에서는 Set/Reset Pulse 방법에 의해 MR 센서 및 OP-Amp의 온도 Drift 및 DC Offset에 의한 오차를 해결하였고, 주변 자성체에 의한 자기장의 왜곡에 의한 오차를 Hard-Iron Calibration 루틴 수행에 의해 보상하였으며, Compass Tilt에 의한 오차를 Euler Rotational Equation에 의해 보상할 수 있는 3축 MR 센서 및 3축 Accelerometer를 기반으로 하는 전자 Compass 를 설계하였다. 특히 이와 같이 설계한 전자 Compass를 가지고 3축 MR 센서의 서로 다른 Sensitivity와 OP-Amp.의 서로 다른 Gain등을 규준화하기 위한 Sensitivity Calibration 루틴 수행 시 Tilt의 발생으로 야기되는 오차를 정량적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 1°精度 Compass를 설계할 수 있었다.

Abstract

The accuracy of MR sensor-based electronic compass is influenced by the temperature drift and DC offset of the MR sensor and the OP-amp, the magnetic distortion of nearby magnetic materials, and the compass tilt. We design the 3-axis MR sensor and accelerometers-based electronic compass which is compensated by the set/reset pulse switching method on the temperature drift and DC offset, by the execution of hard-iron calibration routine on the magnetic distortion, and by the execution of the Euler rotational equation on the compass tilt. We qualitatively analyze the measured azimuth error on the execution of sensitivity calibration routine which is the normalization process on the different sensitivity of each MR sensor and the different gain of each op-amps. This compensation and analytic result make us design the one degree accuracy electronic compass.

Keywords : Electronic Compass, MR Sensor, Accelerometer, Calibration Routine

I. 서 론

MR(Magneto Resistive)센서는 자기장의 세기가 수십 Microgauss에서 수십 Gauss까지 폭 넓게 측정할 수

있는 고감도의 자기장 센서로서 자기장의 세기 및 방향을 측정하는데 뛰어난 방법을 제공한다. 높은 감도, 빠른 응답성, 및 높은 안전성등의 특성과 저가이며 소형화된 소자등으로 인한 사용상의 편리성등으로 인하여 - 지상, 항공, 및 해양 분야에 사용되는 Navigation 시스템 및 GPS 항법 시스템- 선형 위치센서, 각도센서, 및 회전위치센서등 저가형 위치감지 시스템- 의료장비 등 다양한 응용분야에 적용되고 있다.

지구 자기장의 세기를 측정하여 방위각을 측정하는

* 정회원, ** 학생회원, 단국대학교 전자공학과
(Dept. of Electrical Engineering, Dankook University)

※ 이 연구는 2009학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었음.

접수일자: 2010년9월16일, 수정완료일: 2010년12월29일

시스템은 A/D 컨버터를 포함하는 Microcontroller를 기반으로 구성되며, 지구자기장의 세기를 측정하기 위하여 3축의 MR센서를 사용하며 이들 각각의 출력인 차전압은 Instrumentation Amp.에 입력되어 Common Mode의 제거 및 충분한 Gain을 얻는다.

Tilt(Pitch와 Roll)가 3축 MR 센서에 미치는 영향을 보상하기 위하여 3축 Accelerometer에 의해 Tilt각(Pitch각과 Roll각)을 측정하여 Euler Rotational Equation에 의해 Tilt 보상을 수행한다.

또한 Hard-Iron 왜곡을 보상하기 위하여 Hard-Iron Calibration 루틴을 수행한다.^[2]

상기와 같은 방위각 측정 시스템에서 1°精度를 실현하기 위해서는 MR센서, Tilt센서, 및 OP-Amp.등 H/W 소자로부터 야기되는 에러요인과 신호처리 S/W 레벨에서 해결되어야 하는 에러 즉 Tilt에 의한 오차 및 Hard-Iron 왜곡에 따른 오차등을 해결하여야 한다.^[3~5]

MR 센서의 Temp. Drift, Bridge Offset과 OP-Amp.의 Temp. Drift 및 DC Offset 등으로 인한 에러는 Set/Reset Pulse Switching 방법으로 보상을 수행하며, MR 센서의 측정위치 부근의 자성체에 의한 자기장 왜곡에 따른 측정 방위각에 에러를 유발하는 요인은 Hard-Iron Calibration 루틴을 수행하여 보상이 이루어지며, 3축 Tilt센서에 의해 Tilt각(Pitch각과 Roll각)을 측정하여 Euler Angle을 이용한 Rotational Equation에 의해 Tilt 보상을 수행한다.^[6]

본 연구에서는 3축 MR 센서가 서로 다른 Sensitivity를 갖고며 또한 OP-Amp.가 서로다른 Gain등을 갖고이며와 같이 서로 다른 특성들을 규준화 시키기 위한 과정인 Sensitivity Calibration 루틴 수행시 Tilt에 의한 방위각 측정 오차를 정량적으로 분석하였다.

II. 방위각 측정 시스템

1°精度의 방위각 측정 시스템을 실현하기 위해서는 0.1°의 Resolution의 자기장 센서가 필요하며 이러한 센서는 낮은 Hysteresis Error(<0.05% FS), 낮은 선형성 Error(0.5% FS), 그리고 낮은 반복성 Error(<0.1% FS)가 요구된다.^[1]

지구자기장에 의해 측정되는 방위각(Azimuth) α 는 (1)식으로 주어진다.

$$\alpha = \arctan \frac{Y}{X} \quad (1)$$

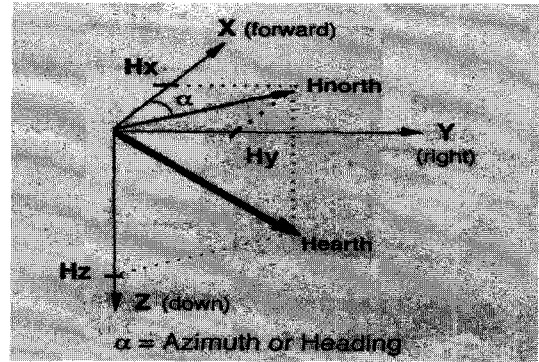


그림 1. X-Y 평면상에서 정의된 방위각
Fig. 1. Azimuth Defined In the X-Y Plane.

여기서, X는 X-Y평면상에서 X축 지구 자기장의 세기이며, Y는 X-Y평면상에서 Y축 지구 자기장의 세기이다.

Tan 함수의 특성을 고려하여 (1)식은 (2)식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \alpha(X=0, Y<0) &= 90^\circ \\ \alpha(X=0, Y>0) &= 270^\circ \\ \alpha(X<0) &= 180^\circ - \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \\ \alpha(X>0, Y<0) &= -\arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \\ \alpha(X>0, Y>0) &= 360^\circ - \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \end{aligned} \quad (2)$$

그림 1에 X-Y 평면상에서 정의된 방위각 α 를 도시하였다

1°精度를 갖는 전자 Compass를 HMC1022 MR 센서를 X축 및 Y축용으로, HMC 1021 MR 센서를 Z축용으로 사용하고 이들 각각의 출력은 INA332 Instrumentation Amp에서 충분한 Gain이 설정된 후 ADuC 7022 Microcontroller의 A/D 컨버터에 입력되도록 설계하였다.

MR 센서의 자화상태, Temp. Drift, 및 Bridge Offset 등의 영향과 Instrumentation Amp.의 DC Offset등의 영향을 제거하기 위하여 Set/Reset Pulse를 3축 MR 센서의 해당 Strap에 인가하였다.

3축 MR 센서의 Tilt에 의한 영향을 보상하기 위하여 MMA7260 Accelerometer를 사용하여 Tilt각을 측정하였다. 지평면을 기준으로 한 Tilt각 정의를 그림 2에 도시하였다

지평면에 대한 Tilt인 Pitch 각(Φ)는 Right Level 방향인 Y축의 회전각으로, Roll 각(Θ)은 Forward Level 방향인 X축의 회전각으로 정의한다.

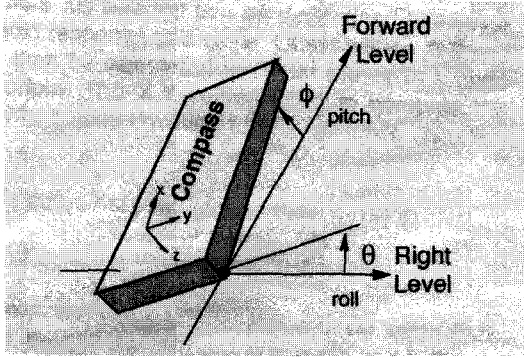


그림 2. 지평면을 기준으로 한 Compass Tilt
Fig. 2. Compass Tilt Referenced to the Earth's Horizontal Plane.

이때 3축 Accelerometer에 의한 Pitch 각(ϕ)과 Roll 각(θ)은 (3)식으로 정의 된다

$$\begin{aligned} \phi &= \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right) \\ \theta &= \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, A_x 는 X축 Accelerometer의 출력값,
 A_y 는 Y축 Accelerometer의 출력값,
 A_z 는 Z축 Accelerometer의 출력값

이다.

한편 자기장에 대한 좌표축을 그림 1과 같이 정의하고 Tilt각에 대한 좌표축을 그림 2와 같이 정의한 공간에서 Euler Angle을 이용하여 3 Dimensional Rotations 으로부터 Azimuth Angle을 다음과 같이 구한다.

Y축에 대한 Rotation의 Matrix 표현은 식(4)와 같다.

$$[R_\phi] = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & -\cos \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

X축에 대한 Rotation의 Matrix 표현은 식(5)와 같다.

$$[R_\theta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

YX축에 대한 Rotation의 Matrix 표현은 식(6)과 같다.

$$[R_\phi] \cdot [R_\theta] = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & -\cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

(6)식으로부터 X-Y평면에서의 Rotational Equation

은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} X_H &= X \cdot \cos \phi + Y \cdot \sin \phi \cdot \sin \theta - Z \cdot \sin \phi \cdot \cos \theta \\ Y_H &= Y \cdot \cos \theta + Z \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, X는 X축 MR센서의 출력값,
Y는 Y축 MR센서의 출력값,
Z는 Z축 MR센서의 출력값

이다.

따라서 Tilt가 보상된 Azimuth Angle은 식 (8)과 같다.

$$Azimuth = \arctan\left(\frac{Y_H}{X_H}\right) \quad (8)$$

한편 3축 MR센서의 측정위치 부근의 자성체에 의한 자기장의 왜곡에 따른 측정 방위각의 에러는 Hard-Iron Calibration 루틴을 수행하여 보상이 이루어진다. 3축 MR센서중 X축 및 Y축 MR센서가 지평면에 수평하게 Compass를 1회전 이상 회전하면서 (7)식에 의해 Tilt가 보상된 X축 및 Y축 MR 센서의 최대값 및 최소값을 각각 X_{max} , X_{min} , 및 Y_{max} , Y_{min} 이라 하면 자기장 왜곡이 보상된 X축값 X_{comp} 및 Y축값 Y_{comp} 는 각각 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} X_{comp} &= X_{sf} \cdot X_H + X_{dev.} \\ Y_{comp} &= Y_{sf} \cdot Y_H + Y_{dev.} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$X_{sf} = 1 \text{ 혹은 } \left(\frac{Y_{max} - Y_{min}}{X_{max} - X_{min}}\right) \text{중에서 큰값,}$$

$$Y_{sf} = 1 \text{ 혹은 } \left(\frac{X_{max} - X_{min}}{Y_{max} - Y_{min}}\right) \text{중에서 큰값}$$

이며,

$$X_{dev} = \left[\left(\frac{X_{max} - X_{min}}{2}\right) - X_{max}\right] \cdot X_{sf},$$

$$Y_{dev} = \left[\left(\frac{Y_{max} - Y_{min}}{2}\right) - Y_{max}\right] \cdot Y_{sf}$$

이다.

따라서 Tilt에 대한 보상 및 자기장 왜곡에 대한 보상이 이루어진 방위각(α)은 식 (10)과 같이 주어진다.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y_{comp}}{X_{comp}}\right) \quad (10)$$

III. Sensitivity Calibration 루틴에서의 Tilt 영향

3축 MR센서를 구성하는 각축의 MR센서는 Sensitivity 같은 특성이 서로 다르며 또한 Instrumentation Amp.가 서로 다른 Gain을 갖으며 이와 같이 서로 다른 특성들을 규준화 시키기 위한 과정인 Sensitivity Calibration 루틴 수행시 Tilt에 의해 측정 방위각에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

외부에 자기장을 왜곡시키는 자성체가 없는 Clean Magnet 환경에서 II장에서 설계한 전자 Compass(그림 3)를 X축 및 Y축 MR센서가 지평면에 수평하게 1회전 이상 회전하면서 3축 MR 센서의 출력값인 Raw Data를 취출하는 Sensitivity Calibration 루틴(이하 S-Cal. 루틴이라 칭한다)을 수행하였다.

X축 MR센서 및 Y축 MR 센서가 각각 최대값 및 최소값을 나타내는 방향에서 Tilt가 없는 상태(Tilt(0,0))와 Tilt가 있는 상태(Tilt(ϕ, θ))의 경우 각각에 대하여 X축 및 Y축 MR센서의 Raw Data를 이용하여 Tilt로 인해 발생하는 방위각 측정 오차를 확인하였다

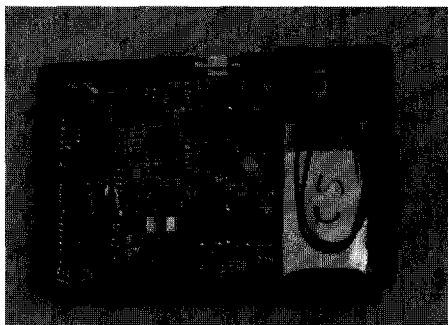


그림 3 설계된 전자 Compass
Fig. 3. Designed Electronic Compass.

1. Tilt(0,0)인 상태로 S-Cal. 루틴을 수행

Pitch 각과 Roll 각을 지평면에 대해 각각 0 rad. 상태에서 S-Cal. 루틴을 수행하여 취출된 X축 및 Y축 MR센서의 12-Bit A/D 컨버터 출력값인 Raw Data중에서 X_{max} 는 2190, X_{min} 는 898, Y_{max} 는 3195, 및 Y_{min} 는 1914를 얻었다.

이들 취출된 Raw Data를 근거하여 1회전시의 변화를 그림 4에 도시하였으며 회전각 β 는 X축 MR센서의 출력값이 최대일 때를 기준각 0° 로 하였다

그림 4에서 X축 및 Y축 MR센서 출력값(X 및 Y)의 진폭(X_{mag} 및 Y_{mag})와 II장에서 언급한 Set/Reset Pulse Switching 방법에 의해 제거되는 DC Offset(X_{off} 및

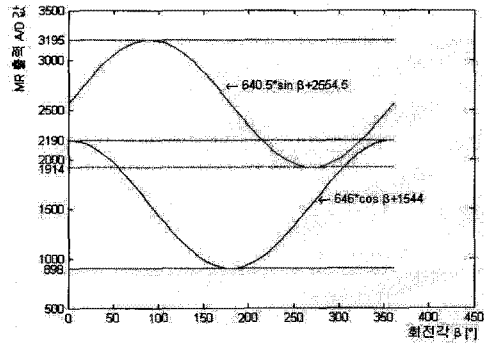


그림 4 X축 및 Y축 MR 센서의 출력값
Fig. 4. Output Data of X and Y Axis MR Sensors.

Y_{off} 는 각각 식 (11)과 같으며 Sensitivity Scale Factor(S_x 및 S_y)는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} X_{mag} &= 2190 - 898 = 1292 \\ Y_{mag} &= 3195 - 1914 = 1281 \\ X_{off} &= 2190 - \frac{1292}{2} = 1544 \\ Y_{off} &= 3195 - \frac{1281}{2} = 2554.5 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S_x &= 1.000 \\ S_y &= \frac{1292}{1281} = 1.0086 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 Tilt(0,0)상태에서 구한 S-Scale Factor S_x 및 S_y 를 그림 4의 Tilt(0,0) 상태의 Raw Data에 적용하여 구한 Tilt(0,0) 상태에서의 방위각 $\alpha(0,0)$ 은 식 13과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha(0,0) &= \arctan\left(\frac{1281 \times 1.0086 \times \sin \beta}{1292 \times 1.000 \times \cos \beta}\right) \\ &= \beta \end{aligned} \quad (13)$$

Tilt(0,0)상태로 S-Cal.루틴을 수행하여 생성된 S-Scale Factor를 적용하여 방위각을 산출하면 오차가 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

2. Tilt[P(+0.05,+0.05),R(+0.05,0.05)]상태로 S-Cal. 루틴을 수행

X축 MR센서가 최대값을 나타내는 방향에서의 Pitch 각이 +0.05 rad., 최소값을 나타내는 방향에서 +0.05 rad., Y축 MR 센서가 최대값을 나타내는 방향에서의 Roll 각이 +0.05 rad., 최소값을 나타내는 방향에서 +0.05 rad. 의 Tilt 상태에서 S-Cal 루틴을 수행하여 취출된 X축 및 Y축 MR 센서의 12-Bit A/D 컨버터 출력

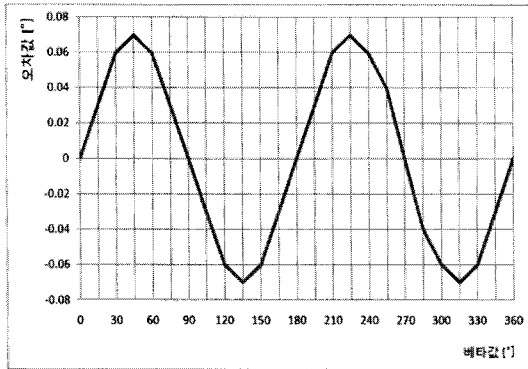


그림 5 Tilt(+0.05,+0.05,+0.05,+0.05)로 발생된 오차각
Fig. 5. Error Angle Caused by Tilt(+0.05,+0.05,+0.05,+0.05).

값인 Raw Data중에서 X_{max} 는 2222, X_{min} 은 937, Y_{max} 는 3223, Y_{min} 은 1952를 얻었으며, S-Scale Factor S_x 는 1.000, S_y 는 1.011이다.

따라서 상기 Tilt 상태에서 구한 S_x, S_y 를 Tilt(0,0)상태의 Raw Data에 적용하여 구한 상기 Tilt 상태에서의 방위각 $\alpha(+0.05,+0.05,+0.05,+0.05)$ 는 식 (14)로 주어지며 상기 Tilt로 인해 발생된 오차각(α_{error})은 식 (15)와 같으며 이를 그림 5에 도시하였다.

$$\alpha(+0.05,+0.05,+0.05,+0.05) = \arctan\left(\frac{1281 \times 1.011 \times \sin \beta}{1292 \times 1.000 \times \cos \beta}\right) \quad (14)$$

$$\alpha_{error} = \alpha(+0.05,+0.05,+0.05,+0.05) - \beta = \alpha(+0.05,+0.05,+0.05,+0.05) - \alpha(0,0) \quad (15)$$

3. Tilt[P(+0.05,+0.05),R(-0.05,-0.05)]상태로 S-Cal. 루틴을 수행

상기의 Tilt 상태에서 S-Cal.루틴을 수행하여 추출된 Raw Data중에서 X_{max} 는 2222, X_{min} 은 937, Y_{max} 는 3164, Y_{min} 은 1874를 얻었으며, S-Scale Factor S_x 는 1.004, S_y 는 1.000이다.

따라서 상기 Tilt상태에서의 방위각 $\alpha(+0.05,+0.05,-0.05,-0.05)$ 는 식 (16)으로, 상기 Tilt로 인해 발생된 오차각(α_{error})은 식 (17)과 같으며 이를 그림 6에 도시하였다.

$$\alpha(+0.05,+0.05,-0.05,-0.05) = \arctan\left(\frac{1281 \times 1.000 \times \sin \beta}{1292 \times 1.004 \times \cos \beta}\right) \quad (16)$$

$$\alpha_{error} = \alpha(+0.05,+0.05,-0.05,-0.05) - \beta = \alpha(+0.05,+0.05,-0.05,-0.05) - \alpha(0,0) \quad (17)$$

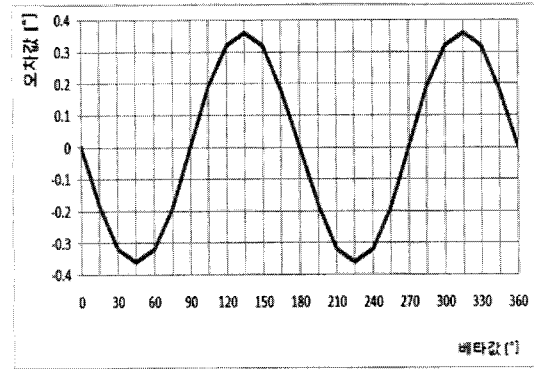


그림 6. Tilt(+0.05,+0.05,-0.05,-0.05)로 발생된 오차각
Fig. 6. Error Angle Caused by Tilt(+0.05,+0.05,-0.05,-0.05).

4. Tilt[P(-0.05,-0.05),R(+0.05,+0.05)]상태로 S-Cal. 루틴을 수행

상기의 Tilt 상태에서 S-Cal.루틴을 수행하여 추출된 Raw Data중에서 X_{max} 는 2154, X_{min} 은 865, Y_{max} 는 3223, Y_{min} 은 1952를 얻었으며, S-Scale Factor S_x 는 1.000, S_y 는 1.013이다.

따라서 상기 Tilt상태에서의 방위각 $\alpha(-0.05,-0.05,+0.05,+0.05)$ 는 식 (18)으로, 상기 Tilt로 인해 발생된 오차각(α_{error})은 식 (19)와 같으며 이를 그림 7에 도시하였다.

$$\alpha(-0.05,-0.05,+0.05,+0.05) = \arctan\left(\frac{1281 \times 1.013 \times \sin \beta}{1292 \times 1.000 \times \cos \beta}\right) \quad (18)$$

$$\alpha_{error} = \alpha(-0.05,-0.05,+0.05,+0.05) - \beta = \alpha(-0.05,-0.05,+0.05,+0.05) - \alpha(0,0) \quad (19)$$

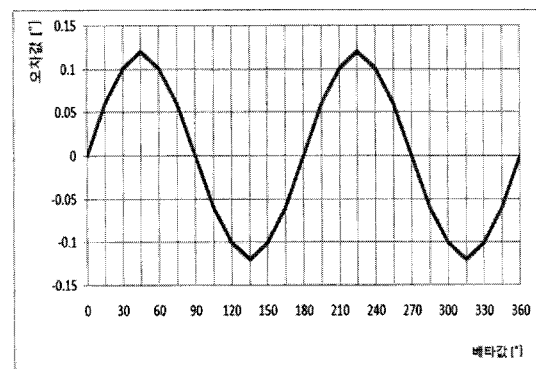


그림 7 Tilt(-0.05,-0.05,+0.05,+0.05)로 발생된 오차각
Fig. 7. Error Angle Caused by Tilt(-0.05,-0.05,+0.05,+0.05).

5. Tilt[P(-0.05,-0.05),R(-0.05,-0.05)]상태로

S-Cal. 루틴을 수행

상기의 Tilt 상태에서 S-Cal.루틴을 수행하여 취출된 Raw Data중에서 X_{max} 는 2154, X_{min} 은 865, Y_{max} 는 3164, Y_{min} 은 1874를 얻었으며, S-Scale Factor S_x 는 1.002, S_y 는 1.000이다.

따라서 상기 Tilt상태에서의 방위각 $\alpha(-0.05,-0.05,-0.05,-0.05)$ 는 식 (20)으로, 상기 Tilt로 인해 발생된 오차각(α_{error})은 식 (21)과 같으며 이를 그림 8에 도시하였다.

$$\alpha(-0.05,-0.05,-0.05,-0.05) = \arctan\left(\frac{1281 \times 1.000 \times \sin \beta}{1292 \times 1.002 \times \cos \beta}\right) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{error} &= \alpha(-0.05,-0.05,-0.05,-0.05) - \beta \\ &= \alpha(-0.05,-0.05,-0.05,-0.05) - \alpha(0,0) \end{aligned} \quad (21)$$

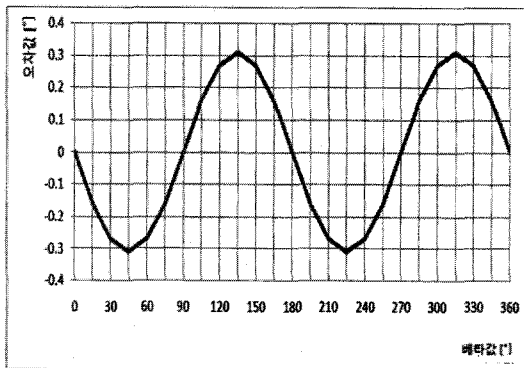


그림 8 Tilt(-0.05,-0.05,-0.05,-0.05)로 발생된 오차각
Fig. 8. Error Angle Caused by Tilt(-0.05,-0.05,-0.05,-0.05).

6. Tilt[P(+0.1,+0.1),R(+0.1,+0.1)]상태로

S-Cal. 루틴을 수행

상기의 Tilt 상태에서 S-Cal.루틴을 수행하여 취출된 Raw Data중에서 X_{max} 는 2255, X_{min} 은 974, Y_{max} 는 3260, Y_{min} 은 1970을 얻었으며, S-Scale Factor S_x 는 1.007, S_y 는 1.000이다.

따라서 상기 Tilt상태에서의 방위각 $\alpha(+0.1,+0.1,+0.1,+0.1)$ 는 식 (22)으로, 상기 Tilt로 인해 발생된 오차각(α_{error})은 식 (23)과 같으며 이를 그림 9에 도시하였다.

$$\alpha(+0.1,+0.1,+0.1,+0.1) = \arctan\left(\frac{1281 \times 1.000 \times \sin \beta}{1292 \times 1.007 \times \cos \beta}\right) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{error} &= \alpha(+0.1,+0.1,+0.1,+0.1) - \beta \\ &= \alpha(+0.1,+0.1,+0.1,+0.1) - \alpha(0,0) \end{aligned} \quad (23)$$

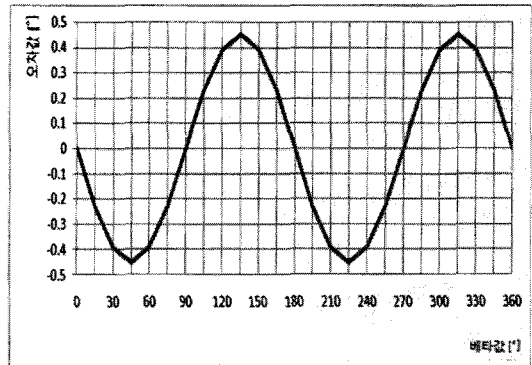


그림 9 Tilt(+0.1,+0.1,+0.1,+0.1)로 발생된 오차각

Fig. 9. Error Angle Caused by Tilt(+0.1,+0.1,+0.1,+0.1).

7. Tilt[P(+0.1,+0.1),R(-0.1,-0.1)]상태로

S-Cal. 루틴을 수행

상기의 Tilt 상태에서 S-Cal.루틴을 수행하여 취출된 Raw Data중에서 X_{max} 는 2255, X_{min} 은 974, Y_{max} 는 3136, Y_{min} 은 1840를 얻었으며, S-Scale Factor S_x 는 1.012, S_y 는 1.000이다.

따라서 상기 Tilt상태에서의 방위각 $\alpha(+0.1,+0.1,-0.1,-0.1)$ 는 식 (24)으로, 상기 Tilt로 인해 발생된 오차각(α_{error})은 식 (25)와 같으며 이를 그림 10에 도시하였다.

$$\alpha(+0.1,+0.1,-0.1,-0.1) = \arctan\left(\frac{1281 \times 1.000 \times \sin \beta}{1292 \times 1.012 \times \cos \beta}\right) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{error} &= \alpha(+0.1,+0.1,-0.1,-0.1) - \beta \\ &= \alpha(+0.1,+0.1,-0.1,-0.1) - \alpha(0,0) \end{aligned} \quad (25)$$

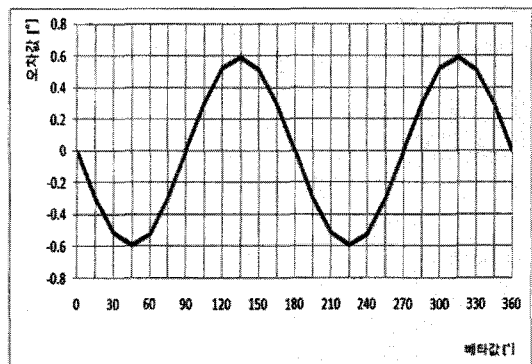


그림 10. Tilt(+0.1,+0.1,-0.1,-0.1)로 발생된 오차각

Fig. 10. Error Angle Caused by Tilt(+0.1,+0.1,-0.1,-0.1).

8. Tilt[P(-0.1,-0.1),R(+0.1,+0.1)]상태로

S-Cal. 루틴을 수행

상기의 Tilt 상태에서 S-Cal.루틴을 수행하여 취출된

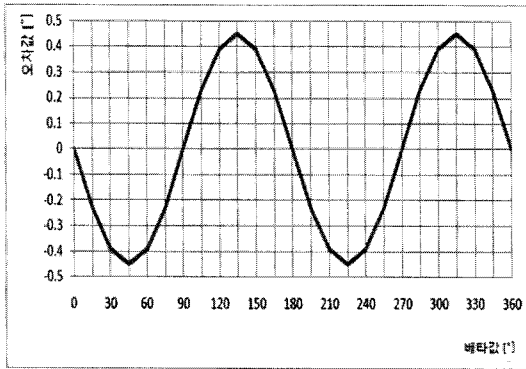


그림 11. Tilt(-0.1,-0.1,+0.1,+0.1)로 발생된 오차각
Fig. 11. Error Angle Caused by Tilt(-0.1,-0.1,+0.1,+0.1).

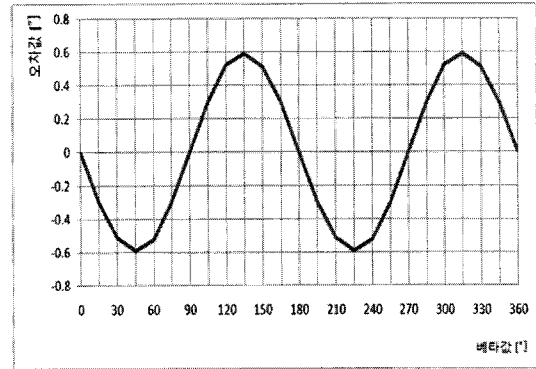


그림 12. Tilt(-0.1,-0.1,-0.1,-0.1)로 발생된 오차각
Fig. 12. Error Angle Caused by Tilt(-0.1,-0.1,-0.1,-0.1).

Raw Data중에서 X_{max} 는 2120, X_{min} 은 839, Y_{max} 는 3260, Y_{min} 은 1970을 얻었으며, S-Scale Factor S_x 는 1.007, S_y 는 1.000이다.

따라서 상기 Tilt상태에서의 방위각 $\alpha(-0.1,-0.1,+0.1,+0.1)$ 는 식 (26)으로, 상기 Tilt로 인해 발생된 오차각(α_{error})은 식 (27)와 같으며 이를 그림 11에 도시하였다.

$$\alpha(-0.1,-0.1,+0.1,+0.1) = \arctan\left(\frac{1281 \times 1.000 \times \sin\beta}{1292 \times 1.007 \times \cos\beta}\right) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{error} &= \alpha(-0.1,-0.1,+0.1,+0.1) - \beta \\ &= \alpha(-0.1,-0.1,+0.1,+0.1) - \alpha(0,0) \end{aligned} \quad (27)$$

9. Tilt[P(-0.1,-0.1),R(-0.1,-0.1)]상태로 S-Cal. 루틴을 수행

상기의 Tilt 상태에서 S-Cal.루틴을 수행하여 추출된 Raw Data중에서 X_{max} 는 2120, X_{min} 은 839, Y_{max} 는 3136, Y_{min} 은 1840을 얻었으며, S-Scale Factor S_x 는 1.012, S_y 는 1.000이다.

따라서 상기 Tilt상태에서의 방위각 $\alpha(-0.1,-0.1,-0.1,-0.1)$ 는 식 (28)으로, 상기 Tilt로 인해 발생된 오차각(α_{error})은 식 (29)와 같으며 이를 그림 12에 도시하였다.

$$\alpha(-0.1,-0.1,-0.1,-0.1) = \arctan\left(\frac{1281 \times 1.000 \times \sin\beta}{1292 \times 1.012 \times \cos\beta}\right) \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{error} &= \alpha(-0.1,-0.1,-0.1,-0.1) - \beta \\ &= \alpha(-0.1,-0.1,-0.1,-0.1) - \alpha(0,0) \end{aligned} \quad (29)$$

이상의 실험에서 보듯이 S-Cal.루틴의 실행시 Tilt발생이 없으면 이로 인해 발생된 방위각의 오차각도 없으나, MR 센서 최대값 또는 최소값을 나타내는 방향에서 Tilt가 발생되면 이로 인해 발생된 방위각의 오차각도 크게 나타나고 있으며, 이때 발생된 Tilt로 인한 오차각

은 보상이 되지 않는 각으로서 1° 精度 전자 Compass의 설계시 오차에 영향을 주는 다른 요소보다 훨씬 크게 작용한다.

IV. 결 론

MR(Magneto Resistive)센서는 자기장의 세기가 수십 Microgauss에서 수십 Gauss에 이르기 까지 폭넓게 측정할 수 있는 감지 소자로서 지구자기장 세기의 공간 분도등과 같이 작은 자기장의 세기를 측정하는 분야 등에 폭넓게 사용된다.

MR센서에 의해 지구자기장의 세기를 측정하여 방위각을 결정하는 전자 Compass에서 정밀도(Accuracy)는 MR센서 및 OP-Amp의 온도 Drift, DC Offset에 의한 오차, 측정 주변 자성체에 의한 자기장의 왜곡, 및 Compass Tilt에 의한 오차 등의 영향에 의해 결정된다.

따라서 본 연구에서는 MR센서 및 OP-Amp의 온도 Drift, DC Offset에 의한 오차문제를 Set/Reset Pulse Switching 방법에 의해서, 측정기 주변 자성체에 의한 자기장의 왜곡에 의한 오차문제는 Hard-Iron Calibration 루틴의 수행에 의해서, 또한 Compass Tilt에 의한 오차문제는 Euler Angle를 이용한 Rotational Equation에 의해 보상할 수 있도록 3축 MR센서 및 3축 Accelerometer를 기반으로 하는 전자 Compass를 설계하였다.

특히 이와 같이 설계한 전자 Compass에서 3축 MR센서의 Sensitivity 같은 특성이 서로 다르며 또한 OP-Amp의 Gain이 서로 다른 특성들을 규준화하기위한 과정인 S-Cal.루틴 수행시 Tilt 발생으로 인하여 발생하는 오차를 정량적으로 분석하였으며 이를 바탕으로 1°精度 Compass를 설계할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] M.J. Caruso, "Application of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems", Sensor and Actuators 1997, SAE SP-1220, (Feb. 1997) 15-21
- [2] M. Horton, C. Kitchin, "A Dual Axis Tilt Sensor Based on Micromachined Accelerometers", sensor, (April 1996).
- [3] Olson, Gregory J., et al, "Nongimbaled Solid-State Compass", Solid-State Sensor and Actuator Workshop, June 1994.
- [4] B.B. Pant, "Magnetoresistive Sensors", Scientific Honeyweller, Vol. 8, no. 1, (fall 1987) 29-34
- [5] J.E. Lenz, G.F.Rouse, L.K. Strandjord, B.B.Pant, A.Metze, H.B.French, E.T. Benser, D.R.Krahn, "A Highly Sensitive Magnetoresistive Sensors", Solid State Sensors and Actuator Workshop, 1992
- [6] J.Goetz, T.Bratland, M.Caruso, "Designing with Magnetoresistive Sensors", Sensor Expo Workshop, Philadelphia, October, 1996.

저자 소개

우 광 준(정회원)
대한전자공학회 논문지
제 44권 SC편 제6호 참조



강 수 민(학생회원)
2004년 단국대학교 전자공학과
학사 졸업.
2006년 현재 단국대학교
전자공학과 석사 졸업
2007년 현재 단국대학교 전자공
학과 박사과정 재학 중

<주관심분야 : 시스템제어, 로봇제어, 3차원
Display, Vision>