

Application of 3-Axis Magnetic Sensors for the Orientation Determination of Mobile Devices

Dong Young Kim and Seok Soo Yoon*

Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

(Received 9 December 2020, Received in final form 16 December 2020, Accepted 16 December 2020)

In recent, most mobile devices such as smartphone come with embedded 3-axis magnetic sensor. The 3-components of earth magnetic field for the body axis of devices are essential to determine the orientation of the devices together with the 3-components of earth gravitational field. In this paper, we present in detail the algebraic process deriving the formulas to calculate the Yaw, Roll and Pitch angles, which specify the orientation of mobile devices, from the measured total 6-components of earth magnetic and gravitational fields. In addition, the derived formulas are verified by experiment with a simple apparatus and smartphone. Through this paper, we expect to provide a reference to developers of application software and sensor firmware who require calculating the orientation angles of mobile devices.

Keywords : magnetic sensor, magnetic sensor application, orientation of mobile devices, electric compass

모바일 기기의 자세 결정을 위한 3축 자기장 센서의 응용

김동영 · 윤석수*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2020년 12월 9일 받음, 2020년 12월 16일 최종수정본 받음, 2020년 12월 16일 게재확정)

최근 스마트폰과 같은 모바일 디바이스는 대부분 3축 자기장 센서를 탑재하고 있다. 3축 자기장 센서가 측정하는 지구 자기장의 디바이스 몸체 축 3성분은 3축 가속도 센서가 측정하는 지구 중력장의 3성분 값과 함께 모바일 디바이스의 자세를 결정하기 위해 반드시 필요하다. 본 논문에서는 이들 센서들이 측정하는 지구 자기장의 3성분 값과 중력장의 3성분 값으로부터 모바일 기기의 자세를 나타내는 Yaw, Roll, Pitch 각들을 결정하는 공식들이 유도되는 과정을 상세하게 기술하고자 한다. 그리고 유도한 공식들이 성립된다는 것을 간단한 실험기구를 통해 실험적으로 검증한 결과도 제시하고자 한다. 본 논문을 통해 모바일 디바이스의 자세에 대한 계산을 필요로 하는 응용 소프트웨어 또는 센서 펌웨어 개발자들이 Yaw, Roll, Pitch 각을 구하는 공식을 제대로 사용하고 있는지 계산한 결과가 올바른 지를 검증하는데 참고를 제공하고자 한다.

주제어 : 자기센서, 자기센서 응용, 모바일 기기의 자세, 전자 나침반

I. 서 론

3축 자기장 센서는 자기장 벡터의 x , y , z 축 성분을 측정하는 센서이다. 스마트폰, 태블릿 PC, 스마트워치 등의 모바일 기기들은 대부분 3축 자기장 센서 칩을 기본으로 탑재하고 있으며, 이로 인해 수요가 급증하면서 3축 자기장 센서를 시스템온칩 형태로 개발하여 시장을 점유하기 위한 경쟁이 치열하게 진행되고 있다. 이들 센서 칩들은 Hall, Anisotropic

Magneto Resistance(AMR), Giant Magneto Resistance(GMR), TMR(Tunneling Magneto Resistance), MI(Magneto Impedance), Micro Fluxgate 등 다양한 기술들을 기반으로 개발되고 있다 [1-3].

스마트폰과 같은 모바일 기기에 3축 자기장 센서가 탑재되는 기본적인 이유는 나침반 앱, 별자리 관측 앱, 네비게이션 앱, 게임 앱 등과 같은 다양한 응용에서 모바일 기기의 자세 (orientation, attitude)에 대한 정보를 필요로 하기 때문이다. 3차원 공간에서 모바일 기기가 어떤 자세를 취하고 있는가를 결정할 수 있는 것은 지구가 만드는 중력장과 지구 자기장 덕분이다. 모바일 기기에 있는 3축 가속도 센서와 3축 자기

장 센서는 각각 지구의 중력장과 자기장 벡터를 모바일 기기의 x, y, z 3개 몸체 축(body axis)에 대한 성분으로 측정하며, 총 6개의 측정된 성분 값을 이용하여 자세를 결정하게 된다. 총 6개의 성분으로부터 자세를 결정하는 구체적인 공식은 이미 알려져 있으며, 이 공식들을 적용하여 자세를 결정하는 펌웨어가 모바일 디바이스에 설치되어 있어 앱 개발자들은 자세에 관한 데이터들을 마이크로 컨트롤러로부터 받아 사용할 수 있게 되어 있다[4]. 뿐만 아니라 아두이노 보드와 가속도 및 자기장 센서를 이용하여 자세를 결정하는 과정을 실행해 볼 수 있는 프로젝트들도 유튜브 등에서 어렵지 않게 찾아 볼 수 있다[5]. 그러나 3축 가속도 센서와 3축 지구 자기장 센서 측정 값으로부터 자세를 결정하는 공식이 구체적으로 어떻게 구해지는 것인가를 설명한 자료는 찾기 쉽지 않으며 종종 이에 대한 질문을 접하게 된다.

본 논문은 교육적인 측면에서 3축 가속도 센서와 3축 지구 자기장 센서 측정 값으로부터 자세를 결정하는 공식이 얻어지는 상세한 과정을 기술하고 이 공식이 성립한다는 것을 실험으로 검증하는 방법과 그 결과도 제시하고자 한다. 이를 통해 모바일 디바이스의 자세에 대한 계산을 필요로 하는 응용 소프트웨어 또는 센서 펌웨어 개발자들에게 참고를 제공하고자 한다.

II. 이 론

3차원 공간에서 어떤 물체의 자세를 규정하는 방법 중 가장 널리 이용되는 것이 (Yaw, Roll, Pitch) 3개의 각을 이용하는 것이다. 스마트폰 모형을 이용하여 Yaw, Roll, Pitch 각을 설명하는 것이 Fig. 1이다. 자세를 규정하기 위해 땅에 고정된 기준좌표계의 설정이 필요하며 본 논문에서는 Fig. 1(a)

와 같이 수평면에서 자북(magnetic north) 방향을 y^o 축 수평면에서 동쪽 방향을 x^o 축 수평면의 수직 위 방향을 z^o 축으로 하는 직교좌표계를 채택한다. 이 기준좌표계에서 지구 중력장(중력가속도) 벡터 \mathbf{g} 는 $-z^o$ 축을 향하며 지구 자기장 벡터 \mathbf{B} 는 y^o, z^o 축이 이루는 평면상에 놓이며 y^o 축을 기준으로 복각 α 라 불리는 기울기 각을 가진다. 다음으로 스마트폰 몸체에 고정된 (x_b, y_b, z_b) 직교좌표계를 설정하며 이를 몸체축이라 한다. 본 논문에서는 편의상 스마트폰의 가로 방향을 x_b 축, 세로 방향을 y_b 축, 두께 방향을 z_b 축으로 설정한다. 스마트폰이 처음에는 Fig. 1(a)와 같이 몸체 좌표축이 땅에 고정된 기준좌표축 (x^o, y^o, z^o) 과 나란한 자세를 취하고 있다고 가정하며 이를 (x_b^o, y_b^o, z_b^o) 로 표시하고 몸체 기준좌표계라 하자. 즉 스마트폰 화면이 수평면에 놓여있으며 스마트폰 머리 쪽이 자북을 향하는 자세를 취하고 있다고 가정한다. 이렇게 놓여있는 스마트폰을 먼저 Fig. 1(a)에 표시된 z_b^o 축을 Yaw 각이라 불리는 θ_Y 각도 만큼 회전한다. 1차 Yaw 회전 후 스마트폰의 자세는 Fig. 1(b)와 같이 되며 이 회전 후 새로운 몸체 좌표계를 (x_b^i, y_b^i, z_b^i) 라 하자. 이때 z_b^i 축과 z_b^o 축은 같은 방향이며 x_b^i 축과 y_b^i 축은 각각 원래 축으로부터 θ_Y 각도 만큼 회전한 방향으로 놓이게 된다. Yaw 회전에 이어서 2차 회전으로 Fig. 1(b)에 표시된 y_b^i 축을 Roll 각이라 불리는 θ_R 각도 만큼 회전한다. 2차 회전 후 스마트폰의 자세는 Fig. 1(c)와 같이 되며, 2차 회전 후 새로운 몸체 좌표계를 $(x_b^{ii}, y_b^{ii}, z_b^{ii})$ 라 하자. 마지막으로 Fig. 1(c)에 표시된 x_b^{ii} 축을 Pitch라 불리는 θ_P 각도 만큼 회전한다. 3차 회전 후 스마트폰의 자세는 Fig. 1(d)가 되며, 3차 회전 후 새로운 몸체 좌표계를 $(x_b^{iii}, y_b^{iii}, z_b^{iii})$ 라 하자. 스마트폰의 모든 자세는 특정한 Yaw, Roll, Pitch 각도로 3개의 회전을 연속으로 수행된 결과와 대응할 수 있다. 이와 같이 모바일기기를 포함

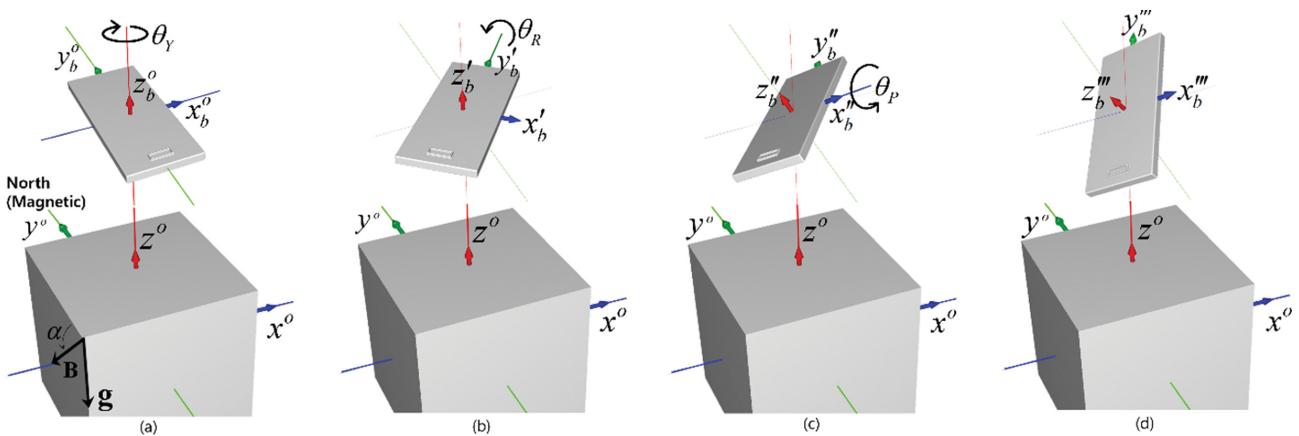


Fig. 1. (Color online) The definition for the orientation of mobile devices by three successive rotations of Yaw, Roll, and Pitch and definitions of coordinate systems (a) Reference coordinates and Yaw rotation axis (b) Coordinates after Yaw rotation and Roll rotation axis (c) Coordinates after Roll rotation and Pitch rotation axis (d) Coordinates after Pitch rotation.

한 모든 강체의 자세는 Yaw, Roll, Pitch($\theta_Y, \theta_R, \theta_P$) 3개의 각도로 표현할 수 있으며, 모바일 기기의 자세를 결정한다는 것은 ($\theta_Y, \theta_R, \theta_P$) 3개의 각도를 구하는 것이 된다.

모바일 기기의 Yaw, Roll, Pitch 3개의 각도는 지구의 중력장과 자기장 벡터의 몸체 축 성분들을 측정된 후 특정 공식들에 대입하면 구할 수 있다. 이때 사용되는 공식들은 좌표계의 회전에 의한 벡터의 변환으로부터 구할 수 있다. 어떤 (x, y, z) 직교좌표계와 이 좌표계로부터 회전한 새로운 좌표계(x', y', z')를 고려하자. 이 두 좌표계에서 한 임의의 벡터 \mathbf{A} 를 관찰하면 두 좌표계에서 이 벡터의 성분들은 다음의 행렬 식을 만족한다[6].

$$\begin{pmatrix} A'_1 \\ A'_2 \\ A'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{A}' = \mathbf{R}\mathbf{A} \quad (1)$$

여기서 A_1, A_2, A_3 은 각각 원 좌표계에 대한 벡터 \mathbf{A} 의 x, y, z 축 성분이며 마찬가지로 A'_1, A'_2, A'_3 은 회전된 좌표계에 대한 벡터 \mathbf{A} 의 성분이다. 그리고 \mathbf{R} 은 회전행렬이라 불리며 이 행렬의 요소는 다음 식을 만족한다[6].

$$R_{ij} = \cos(x'_i, x_j), i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

여기서 $\cos(x'_i, x_j)$ 는 x'_i 축과 x_j 축 사이 각의 코사인 값을 의미한다. 예를 들어 R_{23} 는 회전된 좌표계의 y' 축과 원 좌표계의 z 축 사이 각의 코사인 값이 된다.

식(1)과 (2)를 이용하면 Yaw, Roll, Pitch 연속 회전 후 지구 중력장과 자기장 벡터의 몸체축 성분들을 구할 수 있다. 이를 위해 먼저 1차 Yaw 회전에 대한 회전행렬 \mathbf{R}_Y 을 구해 보자. 앞에서 설명했듯이 Yaw 회전은 (x_b^o, y_b^o, z_b^o) 좌표계를 z 축에 대해 θ_Y 각도 만큼 회전하여 새로운 좌표계(x'_b, y'_b, z'_b)가 된 것이다. 이를 z_b^o 축을 정면에서 바라본 것으로 표현하면 Fig. 2(a)와 같이 회전한 것이 되며 이 회전에 대해 식 (2)를 적용하면 \mathbf{R}_Y 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_Y &= \begin{pmatrix} \cos \theta_Y & \cos(\pi/2 + \theta_Y) & 0 \\ \cos(\pi/2 - \theta_Y) & \cos \theta_Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta_Y & -\sin \theta_Y & 0 \\ \sin \theta_Y & \cos \theta_Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 z_b^o 축을 시계방향으로 회전한 경우를 + 각도로 정하였으며 이후 다른 모든 축의 회전도 시계 방향을 + 각도로 정하였다. 같은 방법으로 Fig. 2(b)의 1차 회전된 (x'_b, y'_b, z'_b) 좌표계와 이를 y'_b 축에 대해 Roll 각 θ_R 만큼 2차 회전한 (x''_b, y''_b, z''_b) 좌표계 사이의 회전 행렬 \mathbf{R}_R 을 구하면 다음과 같이 된다.

$$R_R = \begin{pmatrix} \cos \theta_R & 0 & -\sin \theta_R \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_R & 0 & \cos \theta_R \end{pmatrix} \quad (4)$$

마지막으로 Fig. 2(c)의 2차 회전된 (x''_b, y''_b, z''_b) 좌표계와 이를 x''_b 축에 대해 Pitch 각 θ_P 만큼 회전한 (x'''_b, y'''_b, z'''_b) 좌표계 사이의 회전 행렬 \mathbf{R}_P 을 구하면 다음과 같이 된다.

$$R_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_P & -\sin \theta_P \\ 0 & \sin \theta_P & \cos \theta_P \end{pmatrix} \quad (5)$$

이제 어떤 ($\theta_Y, \theta_R, \theta_P$) 각의 자세를 취하고 있는 모바일 기기의 몸체축(x_b, y_b, z_b)과 수평면에서 자북을 향하는 자세를 취하고 있는 기준 몸체축(x_b^o, y_b^o, z_b^o) 사이의 회전행렬은 Yaw, Roll, Pitch의 회전이 연속으로 행해진 결과로 대응할 수 있기 때문에 위에서 구한 3개의 회전행렬을 순서대로 곱하여 구할 수 있으며 곱한 결과는 다음 식이 된다.

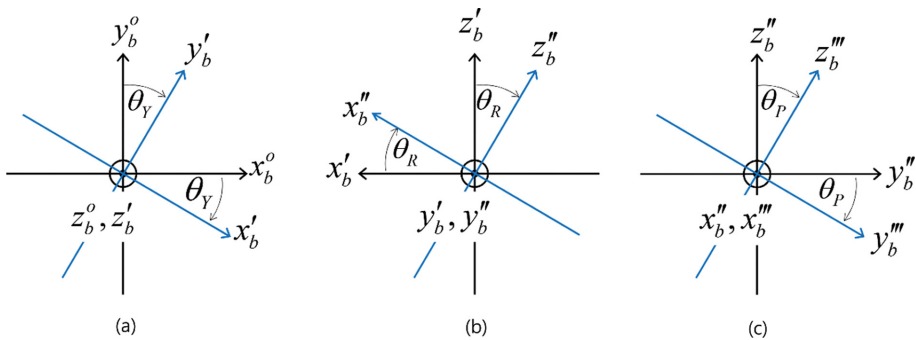


Fig. 2. (Color online) Rotations of body coordinate system by (a) Yaw (b) Roll (c) Pitch.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_P \mathbf{R}_R \mathbf{R}_Y = \begin{pmatrix} \cos \theta_R \cos \theta_Y & & & \\ \cos \theta_P \sin \theta_Y + \sin \theta_P \sin \theta_R \cos \theta_Y & & & \\ \sin \theta_P \sin \theta_Y - \cos \theta_P \sin \theta_R \cos \theta_Y & & & \\ & -\cos \theta_R \sin \theta_Y & \sin \theta_R & \\ \cos \theta_P \cos \theta_Y - \sin \theta_P \sin \theta_R \sin \theta_Y & -\sin \theta_P \cos \theta_R & & \\ \sin \theta_P \cos \theta_Y + \cos \theta_P \sin \theta_R \sin \theta_Y & \cos \theta_P \cos \theta_R & & \end{pmatrix} \quad (6)$$

Fig. 1(a)에 표시된 수평면에서 자북을 향하는 자세를 취하고 있는 기준 몸체축(x_b^o, y_b^o, z_b^o)에 대해 지구 중력장 \mathbf{g} 와 자기장 벡터 \mathbf{B} 및 이 둘의 벡터 곱 $\mathbf{B} \times \mathbf{g}$ 의 성분들을 행렬로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{g}_b^o = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}, \quad (7a)$$

$$\mathbf{B}_b^o = \begin{pmatrix} 0 \\ B \cos \alpha \\ -B \sin \alpha \end{pmatrix}, \quad (7b)$$

$$(\mathbf{B} \times \mathbf{g})_b^o = \begin{pmatrix} -B g \cos \alpha \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7c)$$

여기서 g 는 지구 중력가속도의 크기, B 는 지구 자기장의 크기, α 는 지구 자기장의 경사각(북각)이며 북각은 수평면 아래로 향할 때를 + 각으로 수평면 위를 향할 때를 - 각으로 정의한다.

이제 어떤 ($\theta_k, \theta_R, \theta_P$) 각도의 자세로 취하고 있는 모바일 기기의 몸체 축 (x_b, y_b, z_b)에 대한 위 3개의 벡터는 식(1)을 적용하면 다음 행렬식을 만족한다.

$$\mathbf{g}_b = \mathbf{R} \mathbf{g}_b^o, \quad (8a)$$

$$\mathbf{B}_b = \mathbf{R} \mathbf{B}_b^o, \quad (8b)$$

$$(\mathbf{R} \times \mathbf{g})_b = \mathbf{R} (\mathbf{B} \times \mathbf{g})_b^o \quad (8c)$$

위 식들에 식(6)과 식(7)을 대입하여 행렬 곱을 계산하면 세 벡터의 몸체 축 성분 값들에 대한 식들을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$g_{bx} = -g \sin \theta_R \quad (9a)$$

$$g_{by} = g \sin \theta_P \cos \theta_R \quad (9b)$$

$$g_{bz} = -g \cos \theta_P \cos \theta_R \quad (9c)$$

$$B_{bx} = B(-\cos \theta_R \sin \theta_Y \cos \alpha - \sin \theta_R \sin \alpha) \quad (10a)$$

$$B_{by} = B\{(\cos \theta_P \cos \theta_Y - \sin \theta_P \sin \theta_R \sin \theta_Y) \cos \alpha + \sin \theta_P \cos \theta_R \sin \alpha\} \quad (10b)$$

$$B_{bz} = B\{(\sin \theta_P \cos \theta_Y + \cos \theta_P \sin \theta_R \sin \theta_Y) \cos \alpha - \cos \theta_P \cos \theta_R \sin \alpha\} \quad (10c)$$

$$(\mathbf{B} \times \mathbf{g})_{bx} = -g B \cos \theta_R \cos \theta_Y \cos \alpha \quad (11a)$$

$$(\mathbf{B} \times \mathbf{g})_{by} = -g B (\cos \theta_P \sin \theta_Y + \sin \theta_P \sin \theta_R \cos \theta_Y) \cos \alpha \quad (11b)$$

$$(\mathbf{B} \times \mathbf{g})_{bz} = -g B (\sin \theta_P \sin \theta_Y - \cos \theta_P \sin \theta_R \cos \theta_Y) \cos \alpha \quad (11c)$$

위의 식(9)와 (10)으로부터 모바일 기기의 자세를 나타내는 Yaw, Roll, Pitch 각을 알면 그 자세에서 지구 중력장과 자기장의 몸체축 성분들을 예측할 수 있다. 그러나 우리가 필요로 하는 식은 역으로 모바일 기기에 있는 가속도 센서와 자기장 센서가 측정된 지구 중력장과 자기장 벡터의 몸체 축 성분 값 들로부터 $\theta_k, \theta_R, \theta_P$ 각을 결정하는 식이다. 먼저 식(9b)를 (9c)로 나누면 $\tan \theta_P$ 에 대한 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{g_{by}}{-g_{bz}} = \frac{g \sin \theta_P \cos \theta_R}{g \cos \theta_P \cos \theta_R} = \tan \theta_P \quad (12)$$

이 식에 의해 Pitch 각을 가속도 센서가 측정된 지구 중력장의 몸체 축 성분 값들로 계산할 수 있는 공식을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_P = \tan^{-1} \left(\frac{g_{by}}{-g_{bz}} \right) \quad (13)$$

다음으로 식(9b)에 $\sin \theta_P$ 를 곱하고 식(9c)에 $-\cos \theta_P$ 를 곱한 후 두 식을 더한 값으로 식(9a)를 나누면 다음과 같이 $\tan \theta_R$ 에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{-g_{bx}}{g_{by} \sin \theta_P - g_{bz} \cos \theta_P} = \frac{g \sin \theta_R}{g \cos \theta_R (\sin^2 \theta_P + \cos^2 \theta_P)} = \tan \theta_R \quad (14)$$

이 식에 의해 Roll 각을 가속도 센서가 측정된 중력장의 몸체 축 성분 값들로 계산할 수 있는 공식을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_R = \tan^{-1} \left(\frac{-g_{bx}}{g_{by} \sin \theta_P - g_{bz} \cos \theta_P} \right) \quad (15)$$

결과적으로 Pitch 각과 Roll 각은 가속도 센서가 측정된 지구 중력장의 몸체 축 3성분 값과 식(13)과 식(15)를 이용하여 구할 수 있다. 그런데 수학적으로만 보면 Roll 각은 식(9a)에 의해 $\theta_R = \sin^{-1}(-g_{bx}/g)$ 식으로부터 Pitch 각은 식(9c)에 의해 $\theta_P = \cos^{-1}(g_{bz}/-g \cos \theta_R)$ 식으로부터 구할 수도 있으나 \sin 함수는 90도와 270도 부근에서 \cos 함수는 0도와 180도 부근에서 각도에 대한 변화가 크지 않기 때문에 이러한 식을 이용하여 각도를 계산 하는 경우 오차가 크게 나타나게 된다. 이를 피하기 위해 \tan^{-1} 함수 형태의 공식으로 하게 된다.

이제 3개의 자세를 나타내는 각 중에서 마지막으로 Yaw 각을 구하는 공식을 마찬가지로 tangent 함수 관계에서 유도하자. 식(10b)에 $\cos\theta_p$ 를 식(10c)에 $\sin\theta_p$ 를 곱한 후 두 식을 더하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$B_{by}\cos\theta_p + B_{bz}\sin\theta_p = B\cos\theta_Y\cos\alpha \quad (16)$$

그리고 식(11b)에 $\cos\theta_p$ 식(10c)에 $\sin\theta_p$ 를 곱한 후 두 식을 더하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$(\mathbf{B} \times \mathbf{g})_{by}\cos\theta_p + (\mathbf{B} \times \mathbf{g})_{bz}\sin\theta_p = -gB\sin\theta_Y\cos\alpha \quad (17)$$

식(16)을 식(17)로 나누면 Yaw 각을 구할 수 있는 다음 공식을 얻을 수 있게 된다.

$$\theta_Y = \tan^{-1} \left(\frac{(\mathbf{B} \times \mathbf{g})_{by} \cdot \cos\theta_p - \frac{(\mathbf{B} \times \mathbf{g})_{bz}}{g} \cdot \sin\theta_p}{B_{by}\cos\theta_p + B_{bz}\sin\theta_p} \right) \quad (18)$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{\frac{(-B_{bx}g_{bz} + B_{bz}g_{bx})}{g} \cdot \cos\theta_p - \frac{(B_{bx}g_{by} - B_{by}g_{bx})}{g} \cdot \sin\theta_p}{B_{by}\cos\theta_p + B_{bz}\sin\theta_p} \right)$$

Yaw 각을 구할 때 위 식을 바로 이용해도 되나 식(18)의 분자에 있는 중력가속도의 몸체축 성분들에 식(9a), (9b), (9c)에 있는 표현을 삽입한 후 정리하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\theta_Y = \tan^{-1} \left(\frac{-B_{bx}\cos\theta_R - B_{by}\sin\theta_p\sin\theta_R + B_{bz}\cos\theta_p\sin\theta_R}{B_{by}\cos\theta_p + B_{bz}\sin\theta_p} \right) \quad (19)$$

식(18) 또는 (19)를 보면 Yaw 각은 지구 자기장의 몸체 축 3성분과 중력장의 몸체 축 3성분 값을 모두 알아야 한다는 것을 알 수 있다(식(19)에 있는 Roll 각과 Pitch 각을 알기 위해서 중력가속도의 3성분이 필요). 만약 θ_R 와 θ_p 가 모두 0°인 경우 즉 모바일 기기 화면이 수평면과 나란한 자세를 취하고 있는 경우 식(19)에서 θ_Y 는 다음 식이 된다.

$$\theta_Y = \tan^{-1} \left(\frac{-B_{bx}}{B_{by}} \right) \quad (20)$$

이때 θ_Y 각은 자북 방향을 기준으로 모바일기기의 머리가 향하는 heading 각과 일치하게 된다. 그러나 일반적으로 θ_R 와 θ_p 가 0이 아닌 경우 자기장의 몸체 축 x , y 성분과 식(20)을 이용하여 heading을 구하면 안되며 식(18) 또는 (19)를 이용해야 하며 이렇게 하여 구한 Yaw 각을 전자 나침반에서 기울어짐이 보정된 heading(tilt compensated heading)이라고 한다[5]. 사실 식(20)이 일반적으로 성립되는 것은 1차 Yaw 회전한 좌표계에서이다. 따라서 정확한 식은 다음과 같다.

$$\theta_Y = \tan^{-1} \left(\frac{-B'_{bx}}{B'_{by}} \right) \quad (21)$$

Yaw, Roll, Pitch 각의 자세를 취하고 있는 모바일 기기에서 측정된 지구 자기장 벡터의 성분으로부터 1차 회전에 대응하는 좌표계에서의 자기장 성분은 다음과 같이 회전행렬의 역행렬을 이용하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{B}'_b = \mathbf{R}_R^{-1}\mathbf{R}_p^{-1}\mathbf{B}_b = \mathbf{R}_R^T\mathbf{R}_p^T\mathbf{B}_b \quad (22)$$

이 식에서 회전행렬의 $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$ 즉 역행렬과 전치행렬이 같은 직교성이 이용되었다.

식(22)을 계산하여 B'_{bx} , B'_{by} 을 구한 후 식(21)에 대입하여도 식(19)와 같은 공식을 얻을 수 있다.

지금까지 좌표축 회전에 따른 벡터의 변환을 이용하여 3축 가속도와 자기장 센서가 측정 지구 중력장과 자기장 값으로부터 모바일기기의 자세를 나타내는 Yaw, Roll, Pitch 각을 결정하는 공식을 유도하는 과정을 자세히 기술하였다. 모바일 기기에 탑재된 두 센서가 측정된 지구 중력장의 몸체 축 3성분 중 (g_{by} , g_{bz}) 값을 식(13)에 대입하면 제일 먼저 θ_p 각이 얻어지며 그 다음으로 (g_{bx} , g_{by} , g_{bz}) 값과 먼저 구한 θ_p 값을 식(15)에 넣으면 θ_R 각을 계산할 수 있다. 마지막으로 중력장의 몸체 축 3성분과 함께 지구 자기장의 몸체 축 3성분 (B_{bx} , B_{by} , B_{bz}) 값 그리고 먼저 구한 θ_p 와 θ_R 값을 식(18) 또는 (19)에 대입하면 θ_Y 각을 계산할 수 있다. 다만 중력장의 몸체 축 3성분과 자기장의 몸체 축 3성분으로부터 θ_b , θ_R , θ_Y 를 결정하는 식(13), (15), (19)의 공식들을 사용할 때 유의해야할 점이 있다. 이들 공식들은 유도할 때 정한 몇가지 규칙하에서만 성립된다는 것이다. 우리는 Yaw 회전에 해당되는 축을 z 축 Roll 회전에 해당되는 축을 y 축 Pitch 회전에 해당되는 축을 x 로 정하였으며 1차 Yaw, 2차 Roll, 3차 Pitch로 회전 순서로 자세를 규정하였으며 각 축에 대해 시계방향 회전을 + 각으로 정하여 공식을 유도하였다. 각 회전에 해당되는 축이 다르거나 회전 순서가 다른 경우 공식을 유도하는 과정은 같지만 최종 공식의 형태는 달라지게 된다. 따라서 반드시 사용하는 공식이 어떤 규칙하에서 유도된 것인지 확인하고 그 규칙이 사용하고자 하는 모바일 기기의 몸체 축 세팅과 일치하는지도 확인해야 한다. 예를 들어 스마트폰의 세로 방향(Roll 회전에 대응하는 축)을 x 축 가로 방향(pitch 회전에 대응하는 축)을 y 축으로 센서를 세팅한 모바일 기기도 있을 수 있으며, 자세를 규정하는 각을 정의할 때 Yaw, Pitch, Roll 순서의 회전을 채택한 경우도 있다. 이런 경우 여기서 구한 공식은 그대로 적용할 수 없으며 해당 규칙 하에서 공식을 다시 유도해야 한다.

그리고 모바일 기기 속의 가속도 센서는 대부분 MEMS

센서로 센서가 측정하는 실제 가속도 값은 모바일 기기의 가속도 값 빼기 중력가속도 값이 된다. 따라서 모바일 기기가 정지해 있거나 가속도를 무시할 수 있을 정도로 운동하는 경우만 가속도 센서가 측정한 값이 중력장 값(실제로는 중력장의 - 값)이 되며 위의 공식들을 적용할 수 있다. 모바일 기기가 가속 운동하는 동적인 상황에서는 위의 공식들을 적용해서는 안된다. 동적 상황에서 자세를 트래킹하기 위해 추가적으로 몸체축에 대해 각속도 성분을 측정할 수 있는 3축 자이로 센서가 함께 탑재된다. 운동을 시작하기 직전 정적 상황에서 자세를 가속도와 자기장 센서 값으로부터 구한 후, 자이로 센서가 측정한 각속도 값을 적분하여 구한 각의 변화를 여기에 더하는 방법으로 동적 상황에서 자세를 결정한다. 자기장 센서의 경우 모바일 기기의 주변에 자성체가 있거나 모바일 기기 내부에 자성체가 있는 경우도 이들로 인해 Yaw 자세 결정이 불가능하게 되며 사전에 이들을 보정하는 것이 필요하다.

III. 실험을 통한 검증

앞 절에서 구한 모바일 기기의 자세를 결정하는 공식이 올바른지 실험적으로 검증하는 것이 필요하다. 이를 위해 모바일 기기로 스마트폰(Samsung Galaxy 7 FE model)을 사용하였으며 스마트폰을 정해진 Yaw, Roll, Pitch 각의 자세로 세팅할 수 있는 간이 기구를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 이 간이 기구는 딱딱한 표지를 가진 한 수첩 위에 다른 한 수첩

을 90도 돌려서 놓은 후 맞 닿은 표지를 접착제로 부착하고 위 수첩 표지에 스마트폰 케이스를 고정하여 스마트폰을 거치할 수 있게 한 구조이다. 이 기구를 자북 기준으로 각도가 표시된 수평면 위에 올려 놓은 후 기구 전체를 자북 기준으로부터 회전하여 Yaw 각을 조절하며 아래 수첩의 표지를 펼쳐 Roll 각을 위 수첩의 표지를 펼쳐 Pitch 각을 조절할 수 있다. 이 기구를 특정 Yaw, Roll, Pitch 각도의 자세로 유지한 채 스마트폰을 거치한 후 스마트폰에 설치된 가속도 센서와 자기장 센서가 측정하는 데이터 값을 읽을 수 있는 앱(예: Android용 Sensor List App.)을 실행하여 두 센서가 측정하는 중력장의 몸체 축 3성분 값과 지구 자기장의 몸체 축 3성분 값을 획득한다(이때 가속도 센서가 읽은 값에 -를 곱해야 중력장이 되는 경우가 있으니 사전에 확인이 필요하다). 각 센서의 3축이 각각 어느 방향인지 먼저 확인하였으며 본 실험에서 사용한 스마트폰의 경우 Fig. 1에 표시된 것과 일치되게 센서의 3축이 설정되어 있었다. 스마트폰의 지구 자기장 센서의 경우 스마트폰 내부에 존재하는 자기장을 제거하는 조정(calibration) 과정을 거쳤다. 이 조정은 자기장 센서 값을 측정하는 앱을 실행한 상태에서 스마트폰을 손으로 잡은 후 손목을 휘둘러 스마트폰을 공중에서 8자 형태를 여러 번 그리도록 하면 자동으로 이루어 진다. 조정이 잘 이루어졌으며 주변에 자성체가 없는 경우 자기 센서가 측정한 자기장의 세기($B = \sqrt{B_{bx}^2 + B_{by}^2 + B_{bz}^2}$)는 우리나라의 경우 약 $50 \mu T$ 가 된다. 간이 기구를 조절하여 특정 Yaw, Roll, Pitch 각도의 자세를 세팅한 후 두 센서가 측정하는(g_{bx}, g_{by}, g_{bz})(B_{bx}, B_{by}, B_{bz})

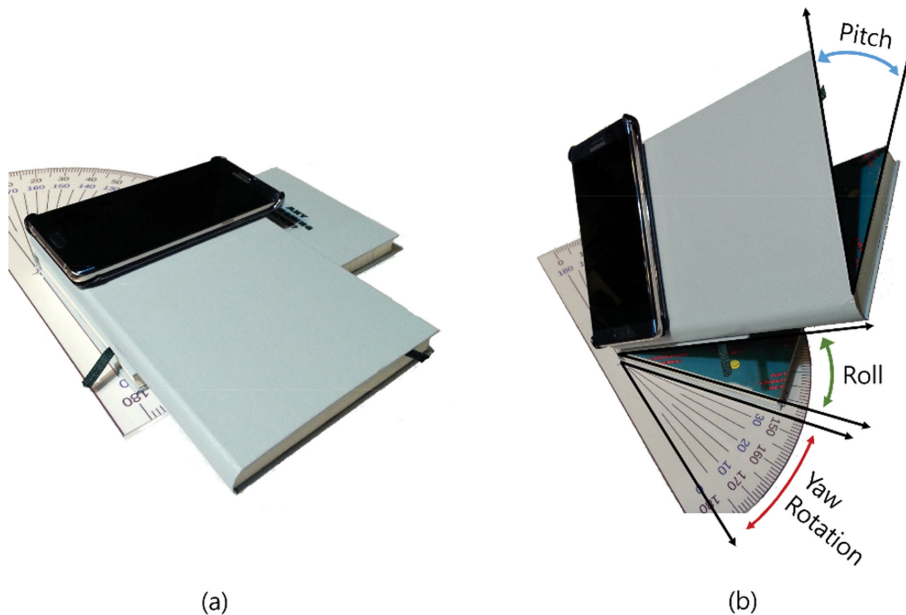


Fig. 3. (Color online) (a) Simple apparatus to set Yaw, Roll and Pitch angles and smartphone to measure the body axis components of earth magnetic and gravitational fields (b) Setting of Yaw, Roll and Pitch.

Table I. Verification results for the derived formulas to calculate Yaw, Roll and Pitch angles.

Case	Setted orientations (deg)			Measured \mathbf{g}_b (m/s ²)			Measured \mathbf{B}_b (G)			Calculated orientations (deg)		
	θ_Y	θ_R	θ_P	g_{bx}	g_{by}	g_{bz}	B_{bx}	B_{by}	B_{bz}	θ_Y	θ_R	θ_P
1	25	52	-28	-7.7	-2.7	-5.2	-0.40	0.14	-0.26	24	53	-27
2	130	52	-28	-7.8	-2.6	-5.2	-0.47	-0.19	-0.02	129	53	-27
3	-35	52	-28	-7.7	-2.8	-5.2	-0.22	0.03	-0.46	-36	53	-28
4	-135	52	-28	-7.7	-2.8	-5.3	-0.22	-0.36	-0.28	-134	52	-28
5	-25	50	-20	-7.6	-2.1	-5.6	-0.25	0.11	-0.43	-27	52	-21
6	-25	50	-35	-7.4	-3.6	-5.0	-0.23	0.04	-0.46	-22	50	-36
7	-25	50	-64	-7.4	-5.7	-3.0	-0.24	-0.19	-0.41	-22	49	-62
8	30	28	-20	-4.6	-3.1	-7.7	-0.31	0.11	-0.37	27	29	-22
9	30	36	-20	-5.7	-2.7	-7.2	-0.35	0.14	-0.33	27	37	-21
10	30	50	-20	-7.4	-2.3	-5.8	-0.41	0.16	-0.26	27	50	-22

총 6개의 데이터를 획득한 후 이 값들을 식(13), 식(15), 식(19)에 대입하여 θ_b , θ_R , θ_Y 값을 차례로 결정한 후 사전에 설정한 자세에서의 값들과 일치하는지를 확인하였다. 이때 식(13), 식(15), 식(17)을 컴퓨터로 계산 할 때 atan2 함수를 사용하였다. atan2(x, y) 함수는 $\tan^{-1}(y/x)$ 를 계산하면서 (x, y) 값의 부호의 조합(4분면)에 맞는 한 개의 각도 값을 출력하여 주기 때문에 편리하다. 실제 계산은 MS Excel 프로그램을 이용하여 스마트폰이 측정된 (g_{bx} , g_{by} , g_{bz}), (B_{bx} , B_{by} , B_{bz}) 총 6개의 측정 데이터 값을 입력하면 식(13), 식(15), 식(17)의 공식에 의해 자동으로 θ_b , θ_R , θ_Y 값을 계산하는 시트를 작성하여 행하였으며 Table I이 그 결과를 보여준다. 처음 4가지 경우는 $\theta_R = 52$ deg, $\theta_Y = -28$ 도로 고정하고 Yaw 각을 4분면에 있는 경우로 변화시키면서 6개 성분을 측정하고 θ_b , θ_R , θ_Y 각을 계산한 결과이다. 계산된 자세 각도 값들이 세팅된 값들과 1 deg 오차 내로 일치하였다. Table I의 5~7 경우는 두 각을 고정하고 θ_P 각을 변화시킨 경우이며 8~10의 경우는 θ_R 을 변화시킨 경우로 모든 경우 3 deg 이하로 세팅한 값과 공식을 적용하여 계산한 결과가 일치하였다. 간이 실험 기구로 인한 각도 세팅의 오차와 센서들의 분해능 한계 등을 감안하면 오차는 무시할 수 있으며 따라서 유도된 공식들이 정확하다는 것을 확인 할 수 있었다. 본 실험에서 사용한 간단한 기구와 방법은 모바일 기기의 자세를 계산해야 하는 개발자들이 사용한 알고리즘이 정확한지 사용한 공식이 정확한지 등을 검증하는데 유용할 수 있다.

IV. 결 론

모바일 기기의 자세를 나타내는 Yaw, Roll, Pitch 각을 모

바일 기기에 탑재된 가속도 센서와 자기장 센서가 측정된 지구 중력장과 자기장 벡터의 몸체축 성분 값으로부터 계산 할 수 있는 공식들을 좌표계 회전에서 벡터 변환을 이용하여 유도할 수 있었다. Yaw, Roll, Pitch를 세팅할 수 있는 간이 기구와 스마트폰을 이용하여 유도한 공식들이 성립된다는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다. 본 논문에서 소개한 공식을 유도하는 상세한 과정과 간이 기구를 이용하여 검증하는 방법은 모바일 기기의 자세에 대한 계산을 필요로 하는 응용 소프트웨어 또는 센서 펌웨어 개발자들에게 유용한 참고자료가 될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본 연구 지원 사업에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] J. Lenz and A. S. Edelstein, IEEE Sens. J. **6**, 631 (2006).
- [2] S. Tumanski, Przegląd Elektrotechniczny **89**, 1 (2013).
- [3] A. Grosz, M. J. Haji-Sheikh, and S. C. Mukhopadhyay, High Sensitivity Magnetometers, Springer International Publishing (2017).
- [4] M. J. Caruso, IEEE 2000. Position Location and Navigation Symposium (Cat. No.00CH37062), San Diego, (2000), pp. 177-184.
- [5] <https://www.instructables.com/Tilt-Compensated-Compass/>.
- [6] J. B. Marion, Classical Dynamics of Particles and Systems, Academic Press (1965), pp. 1-31.