

자기장 지도를 이용한 위치 추정

Position Estimation Using Magnetic Field Map

김 한 솔, 문 우 성, 서 우 진, 백 광 렬*

(Han-Sol Kim¹, Woo-Sung Moon¹, Woo-Jin Seo¹, and Kwang-Ryul Baek¹)

¹Pusan National University

Abstract: Geomagnetic is refracted by building's wall and pillar. Therefore refracted geomagnetic is able to be used as feature point. In a specific space, a mobile device that is equipped with magnetic sensor array measures 3-axis magnetic field for each point. Magnetic field map is acquired by collecting the every sample point in the magnetic field. The measured magnetic field must be calibrated, because each magnetic sensor has a distortion. For this reason, sensor distortion model and sensor calibration method are proposed in this paper. Magnetic field that is measured by mobile device matches magnetic field map. Result of the matching is used for position estimation. This paper implements hardware system for position estimation method using magnetic field map.

Keywords: magnetic field map, magnetic sensor, position estimation, sensor calibration, sensor distortion, absolute position

I. 서론

이동장치에 대한 위치 추정은 다양한 방법으로 구현되고 있다. 위치 추정 방법은 이동장치 내부의 센서를 사용하는 방법과 외부의 센서를 사용하는 방법, 이들을 복합적으로 사용하는 방법으로 분류 할 수 있다. 일반적으로 내부 센서를 이용한 위치 추정 방법의 종류는 INS, 엔코더를 사용하는 방법이 있다. 내부 센서를 사용할 경우, 외부의 도움 없이 이동장치 내부에 장착된 센서만으로 위치를 추정 할 수 있지만 위치를 추정하기 위한 적분연산의 오차가 누적되고 이전에 연산된 위치 오차가 누적되어 현재 위치 추정의 결과 값이 발산 할 수 있다[1]. 외부 센서를 이용한 위치 추정 방법의 종류는 GPS [2], 초음파[3,4]와 RFID 등을 사용하는 방법이 있다. GPS를 사용하는 경우 2m 이내의 위치 오차를 가지는 방법들이 개발되고 있지만 최소 4대 이상의 인공위성의 신호를 수신해야 하므로 실내에서 위치 추정에 한계가 있다[2]. 초음파 센서를 사용하는 경우, 1cm 이내의 위치 오차를 가지는 방법들이 개발되고 있지만 이동장치 외부에 설비를 구축해야한다[3]. 이러한 외부 센서를 사용하는 방법들은 이동장치의 현재 위치를 이전 위치와 상관 없이 추정하므로 위치 추정 결과 값이 발산하지 않고 이동장치의 절대위치를 추정한다. 내부 센서와 외부 센서의 단점을 극복하기 위해 이들을 복합적으로 사용하여 위치 추정의 정확도를 높이는 방법들도 있다[5].

본 논문에서는 이동장치 내부의 자기 센서를 이용하여 절대 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 기

존 내부 센서들의 단점인 누적 오차로 인한 위치 추정 결과값의 발산 위험성이 없으며, 기존 외부 센서들의 단점인 이동장치 외부의 설비를 구축할 필요가 없다.

이동장치 내부의 자기 센서를 이용하여 절대위치를 추정하는 방법은 특정 위치들에 대한 자기장 정보플 가지고 이동장치에서 측정되는 자기장을 비교하여 위치를 추정한다. 자기센서를 이용한 절대 위치 추정 방법의 종류에는 자기 테이프나 자기 마크와 같이 주변 환경에 비해 자기장 크기 변화가 뚜렷이 나타나는 자성체를 설치하여 설치된 위치 근처에서만 절대위치를 판단하는 방법[6]과 자성체 근처 위치 뿐만 아니라 이외의 지점에서 위치를 추정하기 위해 특정 공간 전체 지점의 자기장 정보를 이용하는 방법이 있다 [7-12]. 건물내부의 벽, 기둥이나 바닥 등의 재료와 구조에 의해 지자기의 크기와 방향이 달라지고 자체적으로 자기장이 형성된다[7]. 특정 공간에서 형성된 자기장이 모든 지점에서 같은 크기가 아니라면 해당 공간의 각 지점의 자기장은 위치 추정 시 유용한 정보가 된다[7,8]. 이동 장치의 위치 추정에 필요한 특정 공간의 자기장 정보를 자기장 지도라고 한다. 본 논문의 자기센서를 이용하여 절대 위치를 추정하는 방법은 자기장 지도를 이용하여 이동장치의 절대 위치를 추정하는 방법이다.

기존에 구현된 자기장 지도를 이용한 위치 추정 방법에는 1차원 경로의 자기장 지도를 이용하여 위치를 추정하는 방법[7-10]과 시뮬레이션으로 구현된 2차원 평면의 자기장 지도를 이용하여 위치를 추정 하는 방법이 있다[11,12]. 1차원 경로에서 위치를 추정하는 방법은 1차원 경로의 자기장 지도 데이터와 일정시간동안 측정되는 자기장의 오차의 합이 최소가 되는 지점을 이동장치의 위치로 추정[9]하거나 경로상의 모든 지점에 대한 오차를 확률밀도함수로 나타내어 최대값을 가지는 지점과 분산을 이용하여 위치를 추정 [10]한다. 1차원 경로에서 위치를 추정하는 방법은 정해진 경로의 자기장오차를 비교하므로 2차원 평면에서 위치를

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 9. 27., 수정: 2013. 1. 16., 채택확정: 2013. 3. 3.

김한솔, 문우성, 서우진, 백광렬: 부산대학교 전자전기공학과

(hsv138@pusan.ac.kr/crenmoon@pusan.ac.kr/seowoojin@pusan.ac.kr/krbaek@pusan.ac.kr)

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

추정하는 방법에 비해 연산이 간단하다. 하지만 이동장치의 자유도가 더 높은 2차원 평면에서 위의 방법으로 위치를 추정하기는 어렵다. 기존에 제시된 2차원 평면의 자기장 지도를 이용하여 위치를 추정하는 방법은 INS로 추정된 경로의 자기장지도와 측정된 자기장을 비교하여 위치를 추정한다[11,12]. 본 논문에서는 기존의 방법과는 다르게 2차원 평면에서 한개의 3축 자기 센서만을 이용하여 절대 위치를 추정하는 방법을 제안하고 구현하였다.

자기장 지도를 이용한 위치 추정을 위해 자기장지도를 획득 하여야한다. 본 논문의 본문에서 자기장 지도를 획득 하는 방법을 소개한다. 그리고 자기장 지도를 획득 할 때 사용되는 다수의 자기 센서들이 사용된다. 각각의 자기 센서는 X, Y, Z 각 방향의 축이 틀어져 있거나 센서의 전기적인 노이즈와 주변 회로 환경의 영향으로 인해 측정값이 실제 값과 다르게 나타나는 왜곡이 발생한다. 그리고 왜곡 정도는 센서마다 다르게 나타나므로 각 센서마다 왜곡정도를 파악하고 이를 보정하는 과정을 거쳐야 획득된 자기장 지도 위에서 이동장치에 장착된 자기 센서를 이용해 위치를 추정 할 수 있다. 센서의 왜곡을 보정하기 위해 외부의 자기장이 차폐되어 있는 장치의 내부에서 각각의 자기 센서에서 측정되는 값을 이용하여 실제 자기장 값과 비교한다. 본 논문에서는 자기 센서의 왜곡 보정을 위해 센서 왜곡을 모델링하고 보정 하는 방법을 제안한다.

본 논문은 자기장 지도를 획득하는 방법, 센서들의 왜곡을 보정하는 방법과 측정되는 자기장을 이용하여 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 그리고 하드웨어로 시스템을 구현해 실험을 통하여 제안된 위치 추정 방법을 검증하였다.

II. 자기 센서 보정

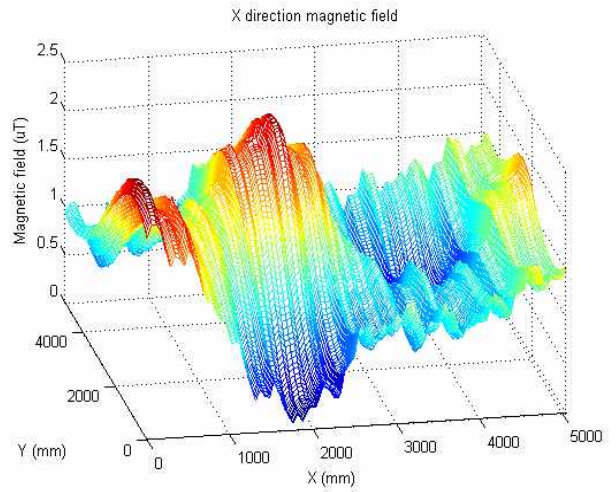
1. 자기장 지도 획득

측정영역의 한 지점을 기준으로 하는 X-Y 좌표계를 설정한다. 자기장 지도는 해당 X-Y 좌표계에서 이동장치가 위치할 수 있는 모든 지점의 3축 자기장 정보를 가진다. 자기장 지도 획득 시, 해당 공간의 모든 지점의 자기장을 측정할 수 없다. 그러므로 해당 공간의 X, Y축으로 d 간격을 가지는 지점들에 대해 자기장을 측정 한다.

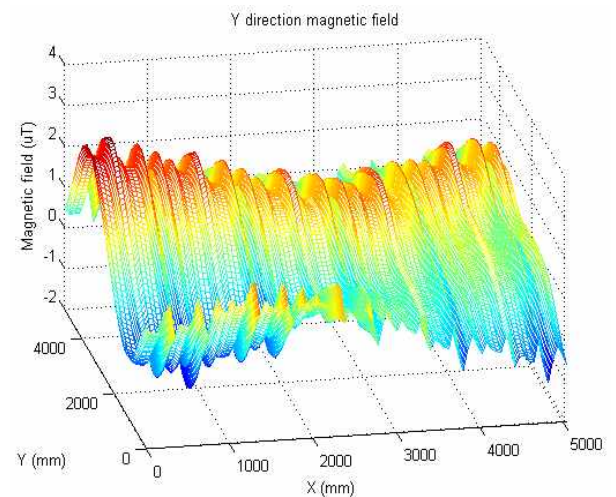
2차원 평면에 대한 자기장 지도를 획득하기 위해서 자기 센서가 장착된 이동장치를 사용한다. 이동장치에는 N개의 자기 센서들이 3축의 자기장을 측정하며 일정한 간격으로 나란히 배치되어 있다. 그리고 이동장치를 실험 공간의 Y 방향으로 움직이며 d 간격 마다 자기장을 측정한다. 실험 공간에 설정된 모든 좌표에 대해 자기장 데이터를 획득하고, 각 좌표 사이를 1차 보간하여 그림 1과 같이 3축 자기장 지도를 완성한다. 이동장치 진행방향의 자기장은 부드럽게 연결된 반면에 진행방향의 수직방향 자기장은 불연속적으로 연결 되어 있다. 이는 각각의 자기 센서의 왜곡 정도가 달라 나타나는 현상이다. 그러므로 각각의 자기 센서의 왜곡을 보정한 후, 자기장 지도를 획득해야 한다.

2. 자기 센서 왜곡 보정

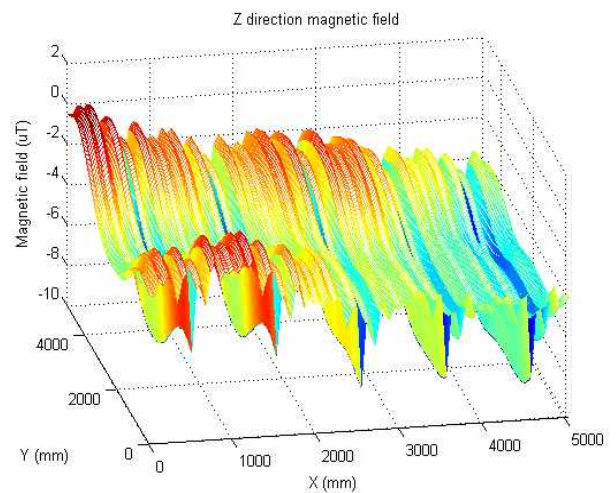
높이 $z = h$ 로 고정된 평면상의 어떤 위치 (x, y) 에서 실제 자기장 $M^r(x, y)$ 의 X, Y, Z 방향의 크기는 식 (1)과 같이 나타낸다.



(a) Distorted X direction magnetic field map.



(b) Distorted Y direction magnetic field map.



(c) Distorted Z direction magnetic field map.

그림 1. 왜곡된 자기장 지도.

Fig. 1. Distorted magnetic field map.

$$M^r(x, y) = \begin{bmatrix} m_X^r(x, y) \\ m_Y^r(x, y) \\ m_Z^r(x, y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

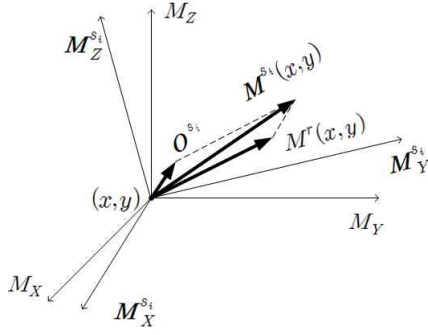


그림 2. 자기장 왜곡 모델링.

Fig. 2. Modeling of magnetic field distortion.

자기 센서에서 측정되는 자기장의 왜곡을 모델링한다. 축의 회전과 스케일에 관련된 A^{s_i} 행렬과 오프셋에 관련된 O^{s_i} 행렬을 이용해 실제 자기장 $M^r(x,y)$ 과 i 번째의 센서로 측정된 자기장 $M^{s_i}(x,y)$ 의 관계를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 측정된 자기장 $M^{s_i}(x,y)$ 과 A^{s_i} , O^{s_i} 를 알고 있다면, 실제 자기장 $M^r(x,y)$ 를 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$A^{s_i} M^r(x,y) + O^{s_i} = M^{s_i}(x,y) = \begin{bmatrix} m_x^{s_i}(x,y) \\ m_y^{s_i}(x,y) \\ m_z^{s_i}(x,y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A^{s_i} = \begin{bmatrix} a_{11}^{s_i} & a_{12}^{s_i} & a_{13}^{s_i} \\ a_{21}^{s_i} & a_{22}^{s_i} & a_{23}^{s_i} \\ a_{31}^{s_i} & a_{32}^{s_i} & a_{33}^{s_i} \end{bmatrix}, \quad O^{s_i} = \begin{bmatrix} O_x^{s_i} \\ O_y^{s_i} \\ O_z^{s_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[A^{s_i}]^{-1} [M^{s_i}(x,y) - O^{s_i}] = M^r(x,y) \quad (4)$$

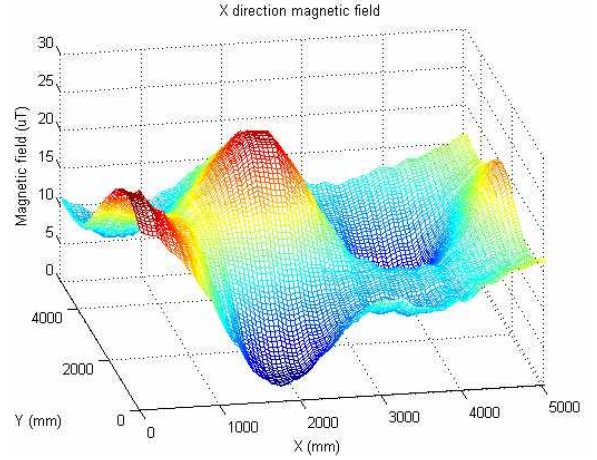
A^{s_i} 과 O^{s_i} 의 12개 원소 값을 알기 위해 최소 4지점 이상의 실제 자기장 데이터가 필요하다. 하지만 실제 자기장 데이터는 알지 못하므로 각 위치에서 N 개의 센서 측정 데이터들의 평균으로 추정된 자기장 $M^r(x,y)$ 을 구한다.

$$M^r(x,y) = \sum_{i=1}^N \frac{M^{s_i}(x,y)}{N} \quad (5)$$

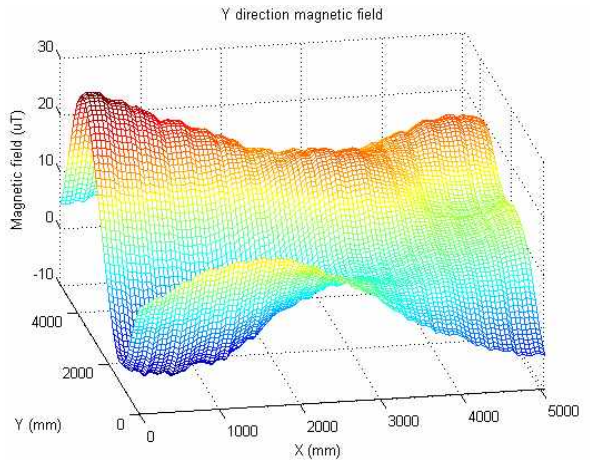
연산의 편의를 위해 A^{s_i} 과 O^{s_i} 를 합쳐 크기가 3×4 인 행렬 B^{s_i} 로 만든다. $(m+1)(l+1)$ 개의 각 지점에서의 추정된 자기장 $M^r(x,y)$ 과 측정된 자기장 $M^{s_i}(x,y)$ 행렬을 식 (7)과 같이 전개한다.

$$[A^{s_i}, O^{s_i}] = B^{s_i} \quad (6)$$

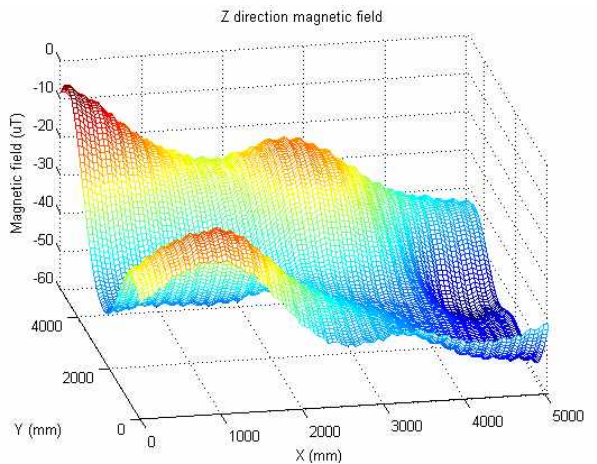
$$\begin{bmatrix} a_{11}^{s_i} & a_{12}^{s_i} & a_{13}^{s_i} & O_x^{s_i} \\ a_{21}^{s_i} & a_{22}^{s_i} & a_{23}^{s_i} & O_y^{s_i} \\ a_{31}^{s_i} & a_{32}^{s_i} & a_{33}^{s_i} & O_z^{s_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x^r(x_0, y_0) \cdots m_x^r(x_m, y_l) \\ m_y^r(x_0, y_0) \cdots m_y^r(x_m, y_l) \\ m_z^r(x_0, y_0) \cdots m_z^r(x_m, y_l) \\ 1 \quad \cdots \quad 1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} m_x^{s_i}(x_0, y_0) \cdots m_x^{s_i}(x_m, y_l) \\ m_y^{s_i}(x_0, y_0) \cdots m_y^{s_i}(x_m, y_l) \\ m_z^{s_i}(x_0, y_0) \cdots m_z^{s_i}(x_m, y_l) \end{bmatrix} \quad (7)$$



(a) Calibrated X direction magnetic field map.



(b) Calibrated Y direction magnetic field map.



(c) Calibrated Z direction magnetic field map.

그림 3. 보정된 자기장 지도.

Fig. 3. Calibrated magnetic field map.

$$B^{s_i} M^r = M^{s_i} \quad (8)$$

B^{s_i} 를 구하기 위해서는 M^{s_i} 와 M^r 의 역행렬을 연산해야 한다. 5개 이상의 지점에서 측정된 자기장 값을 이용할 경우, M^r 의 행과 열의 크기가 달라 유사역행렬(pseudo inverse)을 사용하여 M^r 의 역행렬을 구한다. 그러면 식

(10)과 같이 B^{s_i} 를 구할 수 있다. 그러면 식 (11)을 이용하여 각 센서의 측정 데이터를 보정 할 수 있다.

$$[M^{r'}]^{-1} = [M^{r'}]^T([M^{r'}][M^{r'}]^T)^{-1} \quad (9)$$

$$B^{s_i} = M^s[M^{r'}]^{-1} \quad (10)$$

$$[A^{s_i}]^{-1}[M^{s_i}(x,y) - O^{s_i}] = M^{r'}(x,y) \quad (11)$$

센서 각각의 보정 행렬을 이용해 측정된 자기장을 보정하면 3방향의 자기장 지도는 그림 3과 같이 이전보다 부드러운 형태의 자기장 지도를 얻을 수 있다. 본 논문에서 제시한 보정방법은 통계적인 데이터를 이용하므로 추정된 자기장 위치가 많을수록 B^{s_i} 의 정확도가 높아져 더 부드럽게 보정된 자기장을 얻을 수 있다.

III. 자기장을 이용한 위치추정

1. 좌표계 선정

한 지점에서 3방향의 자기장이 측정되며, 자기장 지도의 X-Y좌표계에서 (x,y) 지점의 자기장은 $M^R(x,y)$ 이고 각 성분은 식 (12)와 같이 나타낸다. 이동장치의 동체 좌표계를 U-V좌표계라 할 때, 중심에 위치한 센서에서 얻어진 자기장의 크기는 $M^S(0,0)$ 이고 각 성분은 식 (13)과 같이 나타낸다.

$$M^R(x,y) = \begin{bmatrix} m_x(x,y) \\ m_y(x,y) \\ m_z(x,y) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M^S(0,0) = \begin{bmatrix} m_U(0,0) \\ m_V(0,0) \\ m_W(0,0) \end{bmatrix} \quad (13)$$

2. 오차를 이용한 위치 추정

2.1 자기장을 이용한 이동장치 위치 추정 방법

그림 4는 자기장 지도를 이용하여 이동장치의 위치를 추정하는 방법을 간략하게 나타내는 순서도이다. 이동장치에서 측정되는 자기장의 왜곡을 보정하고 자기장 지도의 각 지점에서 오차를 구하여 오차가 최소가 되는 지점을 추정 위치로 판단하는 과정을 나타내고 있다.

2.2 수평, 수직 방향의 자기장 오차

이동장치에서 측정된 자기장 데이터를 이용하여 위치를 추정 할 때, 각 방향의 데이터와 자기장 지도의 데이터를 비교 한다. 자기장 지도 위에서 이동장치가 회전을 하게 되면 각 지점에서 수평방향인 $m_x(x,y)$, $m_y(x,y)$ 와 $m_U(0,0)$, $m_V(0,0)$ 를 비교하기 어렵다. 이동장치의 회전에 상관없이 수평방향과 수직방향 자기장의 크기를 비교해야 한다. 자기장 지도에서 X, Y방향 자기장의 크기를 식 (14)와 같이 $m_{X,Y}(x,y)$ 로 나타낸다. 자기장 지도의 X, Y방향의 자기장 크기를 그림 5(a)와 같이 수평방향의 자기장 크기로 나타낸다. U-V좌표계에서 이동장치의 수평방향크기를 식 (15)와 같이 $m_{U,V}(0,0)$ 로 나타낸다.

$$m_{X,Y}(x,y) = \sqrt{(m_x(x,y))^2 + (m_y(x,y))^2} \quad (14)$$

$$m_{U,V}(0,0) = \sqrt{(m_U(0,0))^2 + (m_V(0,0))^2} \quad (15)$$

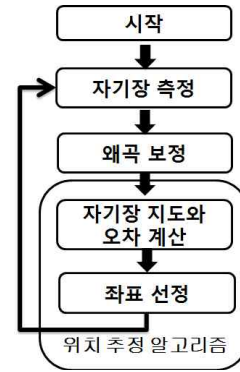


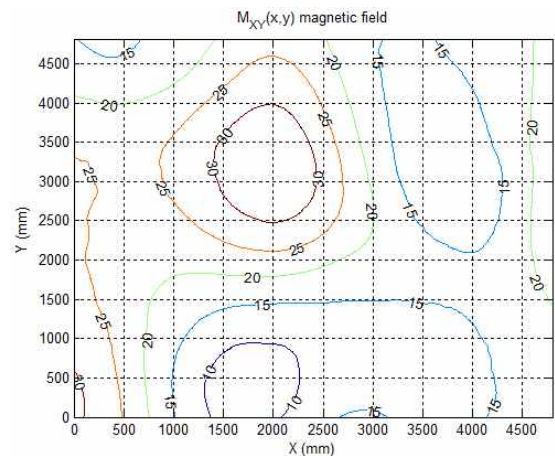
그림 4. 위치 추정 과정.

Fig. 4. Procedure of position estimation.

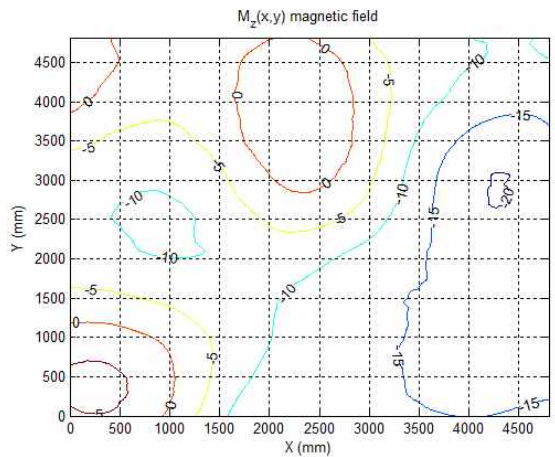
자기장 지도의 (2700, 900)위치에서 측정되는 자기장을 이용하여 자기장 지도 각 지점에서 비교 해본다. 해당지점에서 측정되는 자기장은 식 (16), (17)과 같다.

$$m_{U,V}(0,0) = m_{X,Y}(2700,900) \quad (16)$$

$$m_W(0,0) = m_Z(2700,900) \quad (17)$$



(a) Contour of horizontal direction magnetic field map.



(b) Contour of vertical direction magnetic field map.

그림 5. 수평, 수직 방향 자기장 지도 등고선.

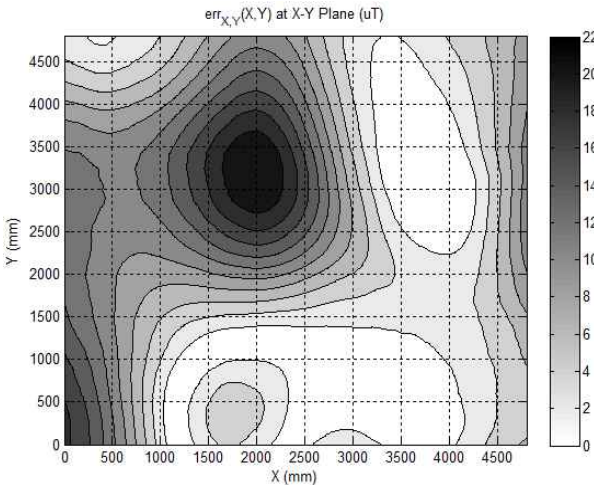
Fig. 5. Contour of horizontal and vertical directions magnetic field map.

자기장 지도의 각 지점에서 수평, 수직방향 자기장 $m_{x,y}(x,y)$, $m_z(x,y)$ 와 이동장치의 수평, 수직방향 자기장 $m_{u,v}(0,0)$, $m_w(0,0)$ 의 오차를 계산한다. 식 (18), (19)를 사용하여 자기장 지도 전체 좌표에 대한 각 방향의 자기장 오차를 계산하면, 그림 5와 같이 수평, 수직 방향의 자기장 오차를 얻는다. 그림에서 가장 밝은 폐곡면에 해당하는 지점들의 자기장 크기는 (2700,900)지점의 각 자기장 크기와 비슷한 지역이 된다. 식 (20)과 같이 수평, 수직 방향에 대한 오차를 더하게 되면 최종 오차는 그림 7과 같다. 그림 7에서 가장 밝은 폐곡면에 해당하는 지점들은 (2700,900)지점의 자기장 크기와 비슷한 자기장 크기를 가진다. 이 결과를 살펴보면 그림 6의 각 방향 오차에서 가장 밝은 폐곡면이 서로 겹쳐지는 지점임을 알 수 있다.

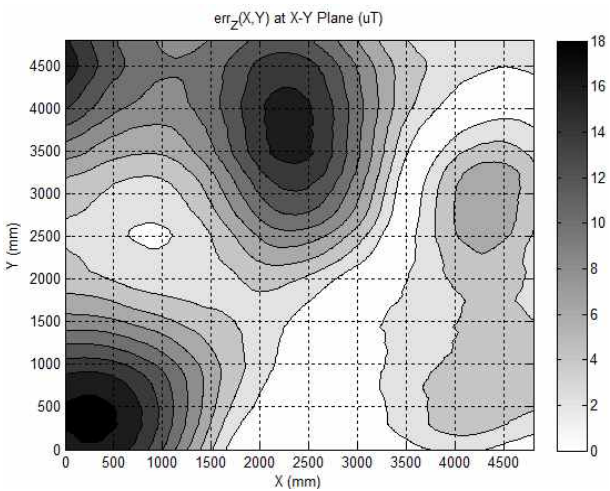
$$err_{x,y}(x,y) = |m_{u,v}(0,0) - m_{x,y}(x,y)| \quad (18)$$

$$err_z(x,y) = |m_w(0,0) - m_z(x,y)| \quad (19)$$

$$err(x,y) = err_z(x,y) + err_{x,y}(x,y) \quad (20)$$



(a) Contour of horizontal direction magnetic field error.



(b) Contour of vertical direction magnetic field error.

그림 6. 수평, 수직 방향 자기장 오차 등고선.

Fig. 6. Contour of horizontal and vertical direction magnetic field error.

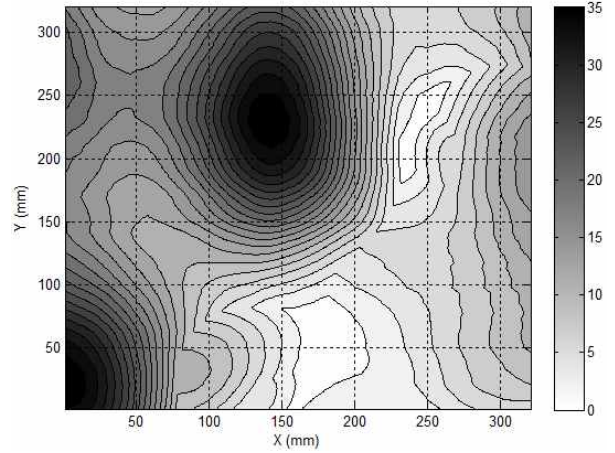


그림 7. 최종 오차 등고선.

Fig. 7. Contour of magnetic field error.

2.3 후보 지점 도출

임의의 한 지점의 자기장을 자기 센서로 측정하게 되면, 측정 오차가 발생하게 된다. 그러므로 측정오차를 감안하여 추정 위치를 판단해야 한다. 최종 오차 지도에서 후보 위치를 도출하는 방법으로 문턱값을 이용한다. 문턱값은 센서 측정 오차의 표준편차를 이용하여 구한다. 센서 측정 오차 분는 표준편차 σ 를 가지고 평균이 0인 가우시안 분포로 모델링한다. 이 때 각 방향의 표준편차를 $\sigma_{u,v}$, σ_w 라고 한다.

식 (21)과 같이 최종 오차가 $\pm 3\sigma$ 범위 안에 존재 할 때만 후보 지역으로 판단한다.

$$err(x,y) \leq 3(\sigma_{u,v} + \sigma_w) \quad (21)$$

구해진 문턱값이 2.4uT 일 때 후보지역은 그림 8과 같이 2개의 지역으로 도출된다. 그림 9는 각 후보지역의 오차를 등고선으로 나타내고 있다. 각 후보 지역에서 오차가 가장 작은 값을 가진 위치를 각 후보 지역의 후보 지점으로 정한다. 1번 지역의 후보 지점은 오차가 0uT인 (2700, 900)지점이며, 2번 지역의 후보 지점은 오차가 0.02uT인 (3750, 3620) 지점이다. 도출된 후보 지점들 중 가장 오차가 작은 위치인 (2700, 900)가 최종적으로 추정된 위치로 판단한다.

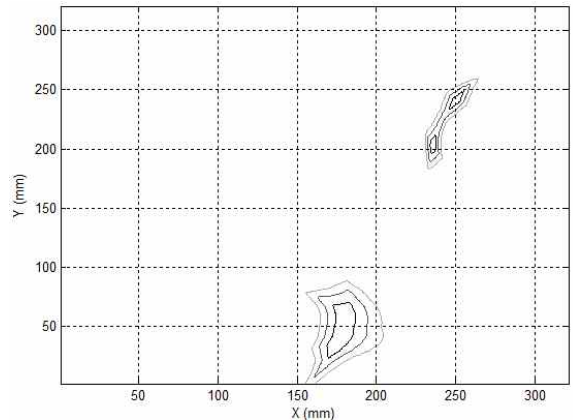
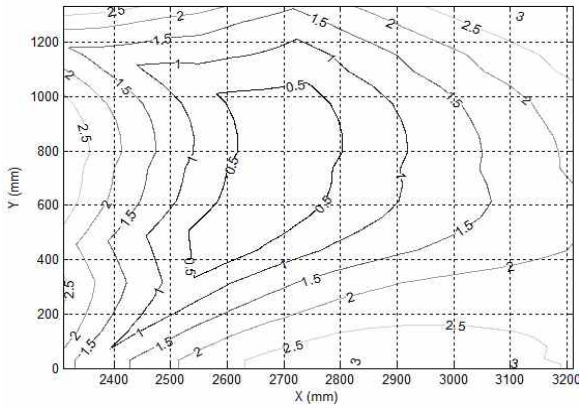
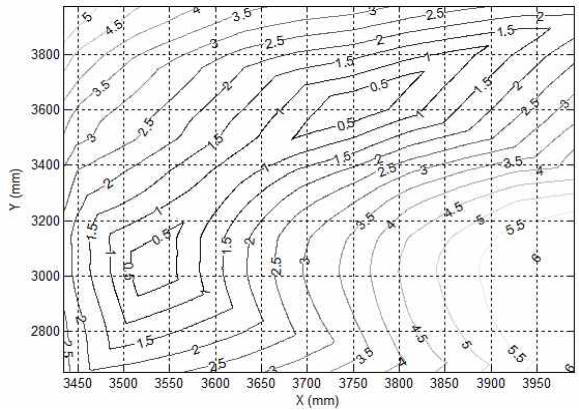


그림 8. 도출된 후보 지역.

Fig. 8. Drawn candidate region.



(a) First candidate region.



(b) Second candidate region.

그림 9. 후보 지역.

Fig. 9. Candidate region.

표 1. 도출된 후보 지점들.

Table 1. Drawn candidate point.

| 후보 | 1 | 2 |
|--------|------------|-------------|
| 위치(mm) | (2700,900) | (3750,3620) |
| 오차(uT) | 0.00 | 0.02 |

하지만 측정 오차를 고려하면 (3750, 3620) 지점이 최종적으로 선정 될 수도 있으므로 도출된 모든 후보 지점을 고려해야 한다. 같은 크기의 오차를 가지는 2개 이상의 후보 지점이 도출될 경우 이전에 추정된 위치에서 가장 가까운 지점을 현재의 추정위치로 도출한다.

IV. 시스템 구현 및 실험 결과

1. 하드웨어 구성

실험을 위한 하드웨어 구성은 다음과 같다. 그림 10의 사진과 같이 자기장 측정을 위한 이동장치는 AGV 한대와 자기 센서 보드 3개로 구성된다. AGV는 DC 모터로 구동되는 바퀴 2개, 보조바퀴 2개, 제어보드, 모터 드라이버로 구성된다. 자기 센서 보드는 6개의 자기 센서가 55.88 mm 간격으로 나란히 배치되어 있다. 자기센서는 X, Y, Z방향의 자기장을 측정할 수 있다. 사용된 자기 센서의 사양은 표 2와 같고 자기 센서의 측정 오차의 평균은 표 3과 같다. 0uT이며, 표준편차는 0.173uT이다.

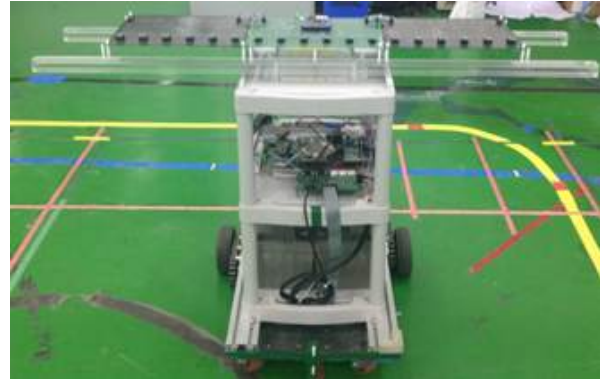


그림 10. 자기장 측정을 위한 이동장치.

Fig. 10. Mobile device for magnetic field sensing.

표 2. 자기 센서 사양.

Table 2. Magnetic sensor specification.

| 센서 명 | LSM303DLHC |
|-----------------|-------------|
| 측정범위 (uT) | ±130 ~ ±810 |
| 분해능 (bit) | 12 |
| 최대 샘플링 주파수 (Hz) | 220 |
| 통신 방식 | I2C |

2. 자기 센서 보정

본문에서 제시한 방법을 토대로 자기장 지도를 획득시 사용된 18개의 자기 센서를 보정 하였다. 보정을 위한 공간은 시간에 대하여 일정한 자기장이 형성된다고 가정하였다. 왜곡 모델링을 적용하여 각각의 자기 센서의 회전과 스케일에 관련된 A^{s_i} 행렬과 오프셋 O^{s_i} 행렬을 구하였다. 오프셋 행렬인 O^{s_i} 는 센서마다 큰 차이를 보였다. 그리고 A^{s_i} 행렬의 경우 대각방향의 성분은 1에 가까웠고 다른 원소는 0에 가까워 스케일과 회전에 대한 왜곡이 오프셋 행렬에 비해 크기 않았다. 첫 번째 자기 센서의 왜곡 행렬 A^{s_1} 와 O^{s_1} 의 값을 표 3에 나타내었다. 그리고 표 4는 18개 자기 센서들의 오프셋 행렬의 통계를 보여준다.

표 3. 첫 번째 자기 센서 왜곡 행렬.

Table 3. Distortion matrix of first magnetic sensor.

| | |
|-----------|--|
| A^{s_1} | $\begin{bmatrix} 1.0059 & -0.0036 & 0.0083 \\ 0.0064 & 0.9413 & 0.0094 \\ 0.0165 & -0.0127 & 1.0376 \end{bmatrix}$ |
| O^{s_1} | $\begin{bmatrix} 0.5285 \\ -1.2720 \\ -2.4108 \end{bmatrix}$ |

표 4. 자기 센서들의 오프셋 통계.

Table 4. Statics of magnetic sensor offset.

| | |
|----------------------|---|
| 평균(uT) | $\begin{bmatrix} 0.0324 \\ 0.0172 \\ 0.0183 \end{bmatrix}$ |
| 분산(uT ²) | $\begin{bmatrix} 1.9221 \\ 9.7082 \\ 91.7444 \end{bmatrix}$ |

3. 자기장 지도 획득

부산대학교 과학 기술 연구동 101호 LIT 테스트센터 내의 4973 mmX4973 mm 공간에서 자기장 지도를 획득하였다. 자기장 데이터를 획득하기 위해 그림 11과 같이 이동장치를 Y축으로 55.88 mm 간격으로 이동하며 자기장을 측정하였다. 각 지점에서 자기장을 10000번 측정하였고, 측정된 자기장 크기의 평균을 해당 지점의 자기장으로 선택하였다. 총 8100 지점에서 3방향의 자기장을 측정 하였다. 측정된 3방향의 자기장은 보정 행렬과 연산을 통해 보정되어진다. 그러면 그림 3과 같은 X, Y, Z 3방향의 자기장 지도를 획득 할 수 있다.

X, Y방향의 자기장 지도를 이용하여 그림 12와 같은 수평방향의 자기장 지도가 만들어지고 Z방향의 자기장 지도

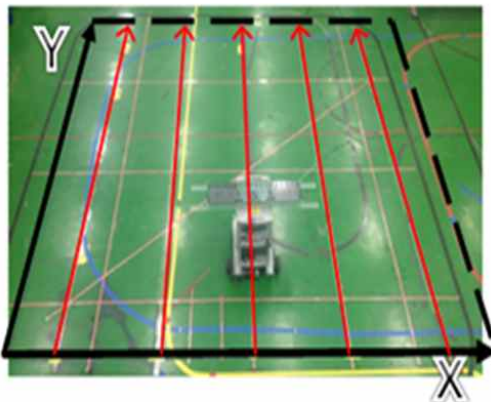


그림 11. 자기장 지도 획득 방법.

Fig. 11. Method of magnetic map acquisition.

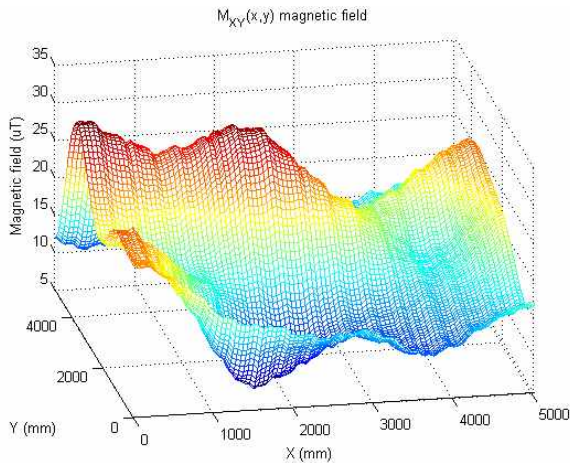


그림 12. 수평 방향의 자기장 지도.

Fig. 12. Horizontal direction magnetic field map.

표 5. 자기장 지도의 통계.

Table 5. Statistics of magnetic field map.

| 방향 | X | Y | XY(수평) | Z(수직) |
|-----------|-------|-------|--------|--------|
| 평균(uT) | 12.82 | 10.85 | 18.41 | -36.90 |
| 최대 세기(uT) | 25.91 | 29.84 | 32.10 | -4.29 |
| 최소 세기(uT) | 1.90 | -9.58 | 5.31 | -59.52 |
| 표준 편차 | 5.08 | 7.98 | 5.73 | 11.88 |

와 함께 이동장치의 위치 추정에 사용된다. 자기장 지도의 전체 좌표에서 각 축의 자기장 특성을 표 5와 같이 정리 하였다. 자기장 지도의 각 방향의 자기장이 다양한 크기로 골고루 분포되어 있으면 이동장치의 위치추정에 유리하다.

4. 자기장 지도를 이용한 위치 추정 실험

이동장치가 자기장 지도위를 지날 때 측정 되는 자기장을 이용하여 위치를 추정 하였다. 실험은 그림 13과 같이 이동장치를 Y방향 방향으로 10 cm/s 속도로 이동하며 5 cm 간격으로 자기장을 측정한다. 측정된 자기장은 보정 행렬과 연산을 통해 보정되어지며, 보정된 자기장으로 위치를 추정 한다.

자기장 지도의 (2570, 170)지점에서 (2570, 4970)지점까지 총 4800 mm를 이동하였고, 첫 지점을 포함하여 97개의 데이터를 획득하였다. 그림 14는 실제 이동한 위치를 나타낸다. 위치추정 결과 (2570, 2250) 지점에 대한 후보지점이 최대 5개가 발생하였다. 발생한 5개의 후보 지점 중 오차가 가장 작은 지점을 최종 위치로 선정하였다. 해당 위치에 대한 5개 후보지점의 위치와 오차 크기를 표 6에 나타내었다.

표 6. 실제 위치 (2570,2200)에 대한 5개 후보지점.

Table 6. Five candidates for real position.

| 후보 지점 번호 | 후보 지점 위치 | 자기장 오차크기(uT) |
|----------|-------------------|--------------|
| 1 | (65.435, 40.2) | 2.3uT |
| 2 | (1946.56, 138.89) | 1.81uT |
| 3 | (4158.17, 35.395) | 2.29uT |
| 4 | (4449.56, 37.91) | 2.30uT |
| 5 | (2480.17, 2307.5) | 0.05uT |

표 7. 추정된 위치 오차 통계.

Table 7. Statistics of estimated position error.

| 오차 평균(mm) | 표준 편차(mm) | 최대 오차(mm) |
|-----------|-----------|-----------|
| 512.47 | 650.85 | 2756.38 |

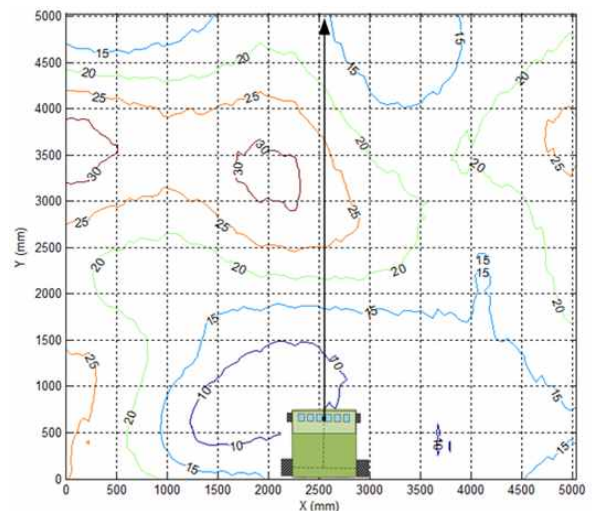


그림 13. 이동장치의 Y방향 주행.

Fig. 13. Driving Y direction of mobile device.

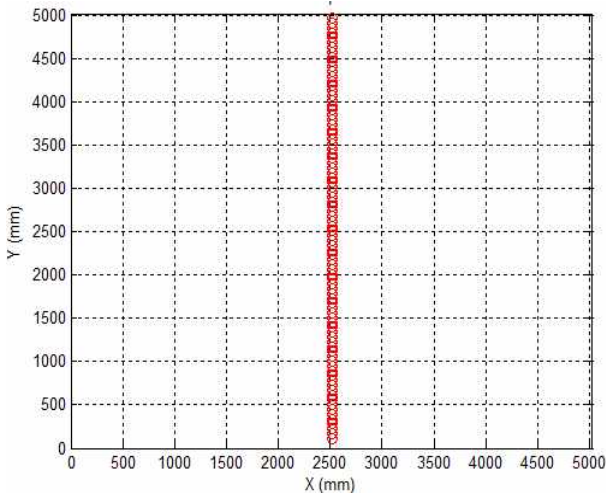


그림 14. 이동장치의 실제 위치.
Fig. 14. Real position of mobile device.

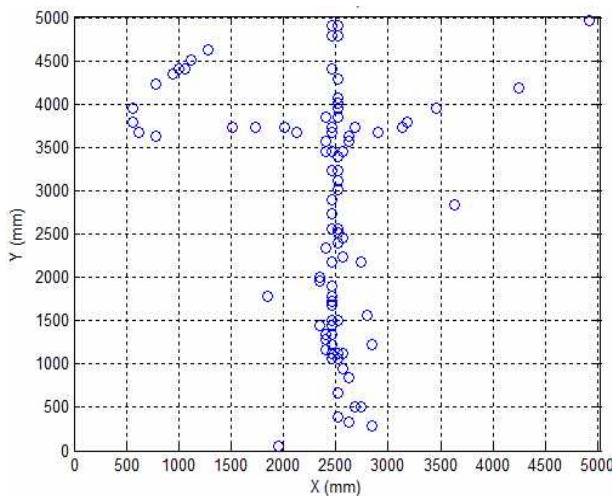


그림 15. 이동장치의 추정된 위치.
Fig. 15. Estimated position of mobile device.

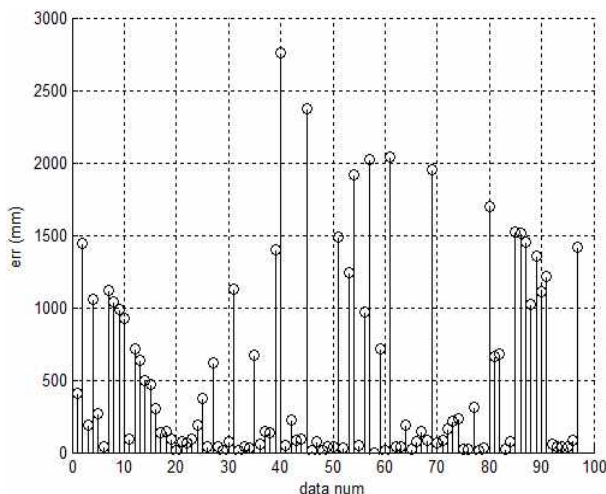


그림 16. 위치 오차 크기.
Fig. 16. Magnitude of position error.

그림 15는 이동장치 위치 추정의 결과이다. 이동장치의 진행방향에 벗어나는 지점들이 이동장치의 위치로 추정된 것을 확인 할 수 있다. 실제 지점과 추정된 지점의 위치 오차를 그림 16에 나타내었고 위치 오차 통계를 표 7에 정리하였다. 센서의 측정오차와 자기장지도에서 크기가 비슷한 자기장을 가지는 지점들에 의해 위치 오차가 발생한다. 실제 위치가 후보 지역에 존재했지만 해당 지점과 비슷한 자기장 크기를 가지는 다른 지점이 최종 추정된 위치로 선정된 경우가 있었다. 센서의 수를 늘리거나 다른 종류의 센서를 결합하면 위치 오차가 크게 줄어들 것이다.

V. 결론

2차원 평면에서 이동장치의 위치 추정을 제안하고 구현하였다. 각각의 자기 센서에서 측정되는 자기장에 왜곡이 있는 것을 확인하였고, 자기 센서 왜곡을 모델링하였다. 센서 왜곡 모델링을 이용하여 왜곡 보정 행렬을 구하였고 측정되는 자기장의 왜곡을 보정하였다. 위치 추정을 위해 필수적인 자기장 지도를 획득 하는 방법을 제안 하였고 이동장치에서 측정된 데이터를 가지고 위치 추정에 대한 검증을 하였다. 실험 결과, 센서의 측정 오차로 인해 위치 오차 평균 512.47 mm 최대 2756.38 mm가 발생하였다.

후보 지역에 실제 위치가 존재하기 때문에 이동장치 내부의 자기 센서만으로도 절대위치 추정의 정확도를 높일 가능성이 있다. 위치 추정의 정확도를 높이기 위해 자기 센서의 개수를 늘리거나 INS, 엔코더와 같은 다른 센서를 결합하여 추정된 위치를 보정 하는 연구가 필요하다. 그리고 원운동과 같은 실험을 통해 추정 방법을 더 검증할 필요도 있다. 본 논문에서는 특정 공간의 자기장이 시간에 대해 불변하다고 가정하였다. 이 후에는 변동하는 자기장내에서 자기장 지도를 업데이트하며 위치 추정을 하는 방법도 연구되어야 한다.

참고문헌

- [1] B.-S. Cho, W.-S. Moon, W.-J. Seo, and K.-R. Baek, "A dead reckoning localization system for mobile robots using inertial sensors and wheel revolution encoding," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, no. 11, pp. 2907-2917, Nov. 2011.
- [2] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, 2nd ed. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [3] J. Manuel Villadangos, J. Urena, M. Mazo, A. Hernandez, F. Alvarez, J. J. Garcia, C. De Marziani, and D. Alonso, "Improvement of ultrasonic beacon-based local position system using multi-access techniques," *Intelligent Signal Processing, 2005 IEEE International Workshop*, pp. 352-357, Sep. 2005.
- [4] S. Y. Kim and K. S. Yoon, "Improved ultrasonic satellite system for the localization of mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1240-1247, Dec. 2011.

- [5] S.-H. Bae and B.-K. Kim, "An efficient outdoor localization method using multi-sensor fusion for car-like robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 955-1005, Oct. 2011.
- [6] W. S. You, B. J. Choi, B. S. Kim, H. P. Moon, J. C. Koo, W. K. Chung, and H. R. Choi, "Global localization for a small mobile robot using magnetic patterns," *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 2618-2623, May 2010.
- [7] B. Gozick, K. P. Subbu, R. Dantu, and T. Maeshiro, "Magnetic maps for indoor navigation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 12, pp. 3883-3891, Dec. 2011.
- [8] W. Storms, J. Shockley, and J. Raquet, "Magnetic field navigation in an indoor environment," *Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS)*, pp. 1-10, Oct. 2010.
- [9] S. A. Rahok and O. Koichi, "Odometry correction with localization based on landmarkless magnetic map for navigation system of indoor mobile robot," *Proc. of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*, pp. 572-577, Feb. 2009.
- [10] T. H. Riehle, S. M. Anderson, P. A. Lichter, J. P. Condon, S. I. Sheikh, and D. S. Hedin, "Indoor waypoint navigation via magnetic anomalies," *33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS Boston*, pp. 5315-5318, Sep. 2011.
- [11] Y. Liu, M. Wu, X. Hu, and H. Xie, "Research on geomagnetic matching method," *Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 2707-2711, May 2007.
- [12] Y. Liu and M. Wu, "Geomagnetism aided inertial navigation system," *Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, 2008.



김 한 솔

2011년 부산대학교 전자전기공학부 졸업. 2013년 부산대학교 전자전기공학과 석사. 2013년~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정. 관심분야는 제어 및 계측 시스템.



문 우 성

2007년 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부 졸업. 2009년 부산대학교 전자전기공학과 석사. 2009년~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정. 관심분야는 고속 디지털 신호 처리 및 제어 시스템.



서 우 진

2008년 부경대학교 전자정보통신공학과 졸업. 2012년 부산대학교 전자전기공학과 석사. 2012년~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정. 관심분야는 로컬라이제이션 및 지능제어.



백 광 렬

1984년 부산대학교 전기기계공학과 졸업. 1986년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사. 1989년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사. 1994년~현재 부산대학교 전자공학과 교수. 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구원. 관심분야는 영상처리 및 디지털 시스템 설계.