



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

3차원화 지자기 **Fingerprint**를 이용한  
실내위치인식에 관한 연구

A Study on Indoor Positioning using 3-Dimensionalization  
Geomagnetic Fingerprint



韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

李 承 炫

本 論 文 을 李 承 炫 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 金 潤 植



委 員 : 工 學 博 士 朱 良 翊



委 員 : 工 學 博 士 徐 東 煥



2018年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

李 承 炫

# 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	ii
<b>Abstract .....</b>	<b>iv</b>
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>01</b>
<b>제 2 장 관련이론 .....</b>	<b>06</b>
2.1 지구자기장 .....	06
2.2 자기벡터기반 방위각 획득 .....	07
2.3 최소자승법 .....	11
2.4 Fingerprint 측위 기법 .....	13
<b>제 3 장 제안한 실내 위치 인식 방법 .....</b>	<b>15</b>
3.1 시스템 구조 .....	15
3.2 3차원화 Training phase .....	16
3.3 3차원화 Positioning phase .....	20
<b>제 4 장 실험 및 결과 .....</b>	<b>23</b>
4.1 실험 환경 .....	23
4.2 실험 결과 분석 .....	27
<b>제 5 장 결 론 .....</b>	<b>38</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>39</b>

## 그림 및 표 목차

### <그림목차>

그림 2.1	자기벡터의 7가지 구성 요소 .....	7
그림 2.2	전방위각에 대한 2차원 자기벡터 특성 .....	9
그림 2.3	Fingerprint 흐름도 .....	13
그림 3.1	제안하는 3차원화 시스템 .....	15
그림 3.2	타원의 형태로 출력되는 2차원 자기벡터의 특성 .....	16
그림 3.3	제안하는 데이터베이스: Ellipse Coefficient Map .....	19
그림 3.4	Ratio 조정에 따른 위치인식 정확도 변화 .....	21
그림 4.1	실험공간과 참조위치 .....	23
그림 4.2	실험에 사용한 지자기 센서 모듈 .....	25
그림 4.3	기존 및 제안된 방법의 획득된 위치인식 빈도수 .....	27
그림 4.4	기존 및 제안된 방법의 위치인식 오차거리 .....	30
그림 4.5	2층에서 기존 및 제안된 방법의 경로에 따른 위치인식 결과 ...	34
그림 4.6	3층에서 기존 및 제안된 방법의 경로에 따른 위치인식 결과 ...	35
그림 4.7	4층에서 기존 및 제안된 방법의 경로에 따른 위치인식 결과 ...	36

<표 목 차>

표 1.1	실내위치인식 시스템 .....	2
표 4.1	지자기 센서의 사양 .....	26
표 4.2	위치인식 정확도 비교 .....	29
표 4.3	위치인식 오차거리 비교 .....	32
표 4.4	경로에 따른 위치인식 정확도 비교 .....	37
표 4.5	경로에 따른 위치인식 오차거리 비교 .....	37



3차원화 지자기 Fingerprint를 이용한 실내위치인식에 관한 연구

*by Seung-Hyun, Lee*

Department of Electrical & Electronics Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University  
Busan, Republic of Korea

**Abstract**

지자기기반 실내위치인식은 시간이 경과되더라도 안정적인 신호 및 높은 분해능으로 측위 정확성이 높기 때문에 활발히 연구되고 있다. 그러나 동일한 위치에서도 방위 변화에 따른 지자기 신호가 일정하지 않기 때문에 위치 오차가 발생한다. 본 논문에서는 Fingerprint기반 2차원 자기벡터 및 yaw축 보정을 적용한 실내위치인식 알고리즘을 제안한다. 제안한 3차원화 시스템은 정규화 선형 최소자승법을 적용한 지자기의 Ellipse Coefficient Map을 설계함으로써 데이터베이스가 간소화됨에도 곡률편향이 거의 없고 지자기 신호 평활화 기법을 적용함으로써 위치인식 정확도를 향상시켰다. 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 48 m × 30 m의 일반적인

실내공간에서 기존 지자기 세기기반 방식과 제안한 방법에 대한 결과를 비교 및 분석하였다. 실험 결과 위치 인식 정확도는 62.14% 개선하였고 오차거리는 3.98 m 감소하였다.





A Study on Indoor Positioning using 3-Dimensionalization  
Geomagnetic Fingerprint

*by Seung-Hyun, Lee*

Department of Electrical & Electronics Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime University  
Busan, Republic of Korea

Indoor positioning based on geomagnetism has been actively studied because of the stable signal and high resolution positioning accuracy even when the time has elapsed. Because the geomagnetic signal can vary according to changes in azimuth, large positioning errors may occur, even from the same position. Therefore, this thesis proposes a fingerprint-based indoor positioning algorithm that fuses 2-Dimensional magnetic vectors and yaw-axis correction techniques. In the proposed 3-Dimensional system, the curvature is less biased heavily by using the Ellipse Coefficient Map of the geomagnetism based on the normalized linear least squares method even when database size is reduced, and the accuracy of positioning is

improved by applying the geomagnetic signal equalization method. To verify the validity of the proposed algorithm in general indoor spaces of  $48 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ , the results of the proposed method are compared with results obtained existing research based on geomagnetism intensity. The results show that the positioning accuracy is improved by 62.14% and the error distance is reduced by 3.98 m.



## 제 1 장 서 론

IT 발전으로 스마트폰, 태블릿 PC 등 소형 스마트 단말기의 보급이 진행됨에 따라 1인 1디바이스 시대가 도래하였으며 단말기를 소유한 사용자의 실시간으로 변경되는 위치에 따라 내비게이션, 위치밀착형 정보, 추적, 위치기반 과금 등의 특정 정보를 제공하는 위치기반서비스(LBS:Location-Based Service)의 시장이 확대되어왔다. 또한 최근 센서의 소형화 및 데이터 처리 기술의 발달로 사물인터넷(Internet of Things), 나아가 소물인터넷 시장의 성장이 진행중이며 4차 산업혁명의 핵심인 스마트 팩토리(Smart Factory)가 산업체에 도입됨으로 산업현장 내부의 정보전달, 실내 객체 파악 및 추적 등 중요성이 부각되고 있다.

실외 위치기반서비스는 범지구 위치결정시스템인 GPS(Global Positioning System), 이동통신기지국(Cell-ID), RFID, Radio Beacon, WLAN(Wireless LAN) 등의 측위 기술을 이용한다. 가장 널리 쓰이는 방법인 GPS는 삼변측량을 이용하며 세 개 이상의 위성으로부터 송신된 신호를 기반으로 거리측정 또는 각도를 이용하여 객체의 좌표를 인식한다. 그러나 고층건물이 밀집되어 있는 도심 지역에서는 다중 경로 페이딩(Multipath Fading)으로 인해 거리 정보 오차가 발생하며 직진성이 강한 GPS 신호 특성으로 인해 NLOS(Non-Line-Of-Sight) 상황에서는 신호의 감쇠로 인한 수신 한계점이 존재하기 때문에 벽과 장애물 등이 다수 존재하는 실내 환경에서 위치를 추정하기 어렵다[1-2].

이러한 GPS의 한계점을 극복하기 위하여 다양한 방법의 실내 위치인식 기술에 관한 연구가 진행되고 있으며 대표적인 시스템은 다음 표 1.1과 같다.

표 1.1 실내위치인식 시스템

Table 1.1 The localization system

Technology	Positioning method	Accuracy	Coverage	Advantages	Limitations
Bluetooth Beacon	Cell ID, Trilateration	5cm ~ dm	50 m	Low price, Low power	Channel interference
RFID	Proximity detection, TOA	dm ~ m	Less than 1 m	Low price, high speed	Short signal distance
Wi-Fi	TOA, TDOA, AOA, Fingerprint	m	100 m	Available as a smartphone	Low Resolution
UWB	TOA, TDOA, TOP, Radar	cm ~ m	50 m	Outstanding permeability	High price, Sensitive performance
IMU Sensor	Operation by sensing	m	scalable	Low price, Customized settings	Cumulative error
Vision	Feature Extraction, Landmark	mm ~ dm	20 m	Light nomadic techniques	High price, High computation
Geo-magnetism	Fingerprint	cm ~ m	scalable	Available as a smartphone	Magnetic substance distortion

Bluetooth기반 기술은 Cell-ID 또는 삼각측량의 측위 방식을 사용하여 오프라인 영역에서 데이터베이스를 구축하지 않아도 되는 장점이 있으나 Wi-Fi에 비해 신호세기(RSSI)에 따른 커버리지 영역이 한정되어 있기 때문에 일반적으로 매우 많은 수의 Beacon을 설치해야하고 채널 간섭에 취약하다. Wi-Fi를 적용하는 기술은 Fingerprint를 기반으로 일반적인 건물에 구축되어 있는 AP(Access Point)를 사용하여 추가적인 인프라를 구축하지 않아도 되는 장점이 있으나 조밀한 커버리지 영역에서는 AP로부터 출력되는 신호들의 분해능이 떨어진다. UWB(Ultra-wide band)기반 기술은 WLAN기반 기술 중에서 가장 정확한 위치인식이 가능하지만 고가이며 별도의 송수신 장치를 설치해야하는 한계점이 있다. IMU센서기반 기술은 건물 내에 추가적인 인프라를 구축하지 않고도 단일 센서에 모션추측항법을 적용함으로써 위치인식이 가능한 장점이 있으나 센서 내재 오차와 움직임에 의해 발생하는 누적오차를 실시간으로 보정해야하는 어려움이 있다[3-12].

이러한 위치인식 기술들의 한계점을 보완하기 위한 추가적인 연구가 진행되고 있으며 별도의 설치 장비를 구축하지 않고도 스마트기기에 내장되어 있는 지자기 센서를 이용한 연구가 각광받고 있다.

지구자기장 특성상 수집되는 신호에 누적오차가 발생하지 않고 시간이 경과되더라도 안정된 신호를 획득할 수 있어 주기적인 업데이트에 소요되는 시간과 비용을 절약할 수 있다. 또한 실내 공간에서 벽과 장애물에 따른 감쇠현상이 발생하지 않으며 공간 분해능이 강인하기 때문에 NLOS 상황에서도 위치인식 구현이 가능하다[13-25].

최근 지자기기반 연구는 Wi-Fi, IMU 등의 기술과 융합형 시스템 구축을 통해 위치 인식 정확도를 개선하고 칼만필터, 파티클필터와 같은 필터링 알고리즘을 통해 위치 추정 오차를 보정하지만 지자기 센서 이외에 추가적인 인프라 구축이 필요하고 연산량 증가에 따른 실시간 위치 추정 성능을 감소시킨다. 따라서, 다음에서는 지자기 센서만을 이용하여 제안된 연구에 대해 제시하였다.

Chung et. al.[22]은 방위각에 따라 지자기 신호가 다양하게 왜곡되는 것을 검증하였으며 Training phase에서 동일한 위치에서 스테핑 모터를 이용하여 전방위각에 대한  $x$ ,  $y$ ,  $z$  지자기 신호 및 전체 지자기 신호의 전체 세기를 데이터베이스로 구축하고 Positioning phase에서 센서 4개를 이용하여 0, 90, 180, 270°의 방위각 지자기 신호와 그 전체 세기에 대해 데이터베이스와의 RMS(Root Mean Square) 차이가 최소로 나타나는 곳을 위치로 인식하였다. 그러나 데이터베이스 구축하는 시간이 오래 걸리며 Training phase에서 0, 90, 180, 270°의 지자기 신호만 구축하더라도 Positioning phase에서 다른 방위각에 대한 지자기 신호에 따른 위치인식에 한계점이 존재한다.

Kang et.al.[23]은 Training phase에서 수집되는  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축의 지자기 세기와 위치별 Cell-ID를 구축하고 Positioning phase에서 수집되는 지자기 신호에 대해 LSM(Least Squares Method) 및 MSD(Mean Square Difference)를 기반으로 데이터베이스와의 유사도 측정을 하여 위치를 인식하였다. 그러나 방위각에 따른 지자기 신호 변화를 고려하지 않았으며 동일한 위치에서도 위치 오차가 발생할 수 있다.

Xie et. al.[25]은 지자기 신호의 전체 세기를 사용할 시 고유성이 감소하는 것을 인지하여 수평 자기벡터와 수직 자기벡터를 추출하고 이를 기반으로 데이터베이스를 구축한 후 파티클 필터를 적용한 위치인식을 하였다. 이전 값을 리샘플링 하여 현재의 위치를 추정하는 파티클 필터를 적용함으로써 사용자의 움직임에 따라 정확도를 개선시킬 수 있으나 매핑되지 않은 방위각의 자기벡터를 이용한 위치 추정에 오차가 발생한다.

이러한 한계점을 해결하기 위해 본 논문에서는 지자기 센서만을 사용하여 자력선 분포를 왜곡시키는 다양한 강자성 재료로 구성된 실내 환경에서 방위 변화에 따른 지자기 신호에 의해 발생하는 위치 오차를 감소시키기 위해 Fingerprint기반 2차원 자기벡터 및 yaw축 보정기법을 적용한 실내위치인식 알고리즘을 제안한다. 제안한 3차원화 시스템은 타원의 형태로 출력되는 전 방위 2차원 자기벡터의 곡률을 보정하기 위해 정규화 선형 최소자승법을 적용한 Ellipse Coefficient Map을 구축함으로써 데이터베이스를 간소화하였고 위치 별 지자기 z값에 대해 일정비율을 보상하는 신호 평활화 기법을 적용함으로써 위치인식 정확도를 향상시켰다. 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 기존 지자기 세기기반 방식과 제안한 방법에 대한 오차를 비교 및 분석하였다.

## 제 2 장 관 련 이 론

### 2.1 지구자기장

전기적으로 편극된 유체인 외핵의 대류운동으로 인해 전자기유도현상이 발생하게 되어 전류가 형성되는데 이로 인해 유기적인 자기장이 생성된다. 이러한 현상으로 인해 지구와 지구 주위에 나타나는 자기장을 지구자기장이라 하며 지구 중심 부근에서 막대자석을 자전축 방향으로 놓은 쌍극자 자기장 형상을 하고 있다. 지구자기장의 크기는 자속 밀도 [ $\text{Wb/m}^2$ ]로 묘사되며 테슬라 [T] 또는 가우스 [ $1\text{Wb/m}^2 = 1\text{T} = 1*10^4\text{G}$ ]로 측정이 되며 지구 지표면의 자기장은 일반적으로 25~65 [ $\mu\text{T}$ ]의 범위를 가진다. 그러나 간섭을 유발하는 자연적 현상 또는 강자성체 및 전도 구조를 통화하는 전류와 같은 인공적인 영향을 받아 시간과 장소에 따라 왜곡 현상이 발생할 수 있다.

자연계에서도 지구자기장은 매우 중요한 항법 역할을 한다. Lohmann et.al[24]이 수행한 연구에서 바다거북과 조류 등의 동물들이 지구 자기장의 자기 경사각과 자기장 강도를 측정하여 이동 경로를 판별하였으며 자기장을 인위적으로 왜곡함에 따라 이동 방향이 다양하게 변화될 수 있는 것을 확인하였다. 이를 통해 지구 자기장을 이용하여 위치를 인식하고 이동 경로를 파악할 수 있는 가능성을 제시하였다.

현대식 건물은 H빔과 철근 콘크리트 등과 같은 강자성 재료로 이루어져 있으며 이는 지구자기장의 자력선 확산을 변화시킨다. 건물 내 서로 다른 위치에서 다양하게 왜곡된 자기장이 분포되어 있으며 시간이 지나도 쉽게 변화하지 않는 정적인 특성을 이용하기 때문에 실내위치인식 연구에 다방면으로 진행 중이다[25-27].



## 2.2 자기벡터기반 방위각 획득

지구자기장의 자기벡터는 그림 2.1과 같이 7가지 구성 요소로 이루어져 있다. X는 지구가 회전하는 축의 북쪽 끝에 있는 지리적 북쪽(진북), Y는 지리적 서쪽, Z는 지구의 천저를 향하는 연직자기력, F는 지구자기력, H는 수평자기력(자북방향), I는 지구자기력과 수평 평면이 이루는 각(북각), D는 진북과 자북이 이루는 각(편각)이다[28].

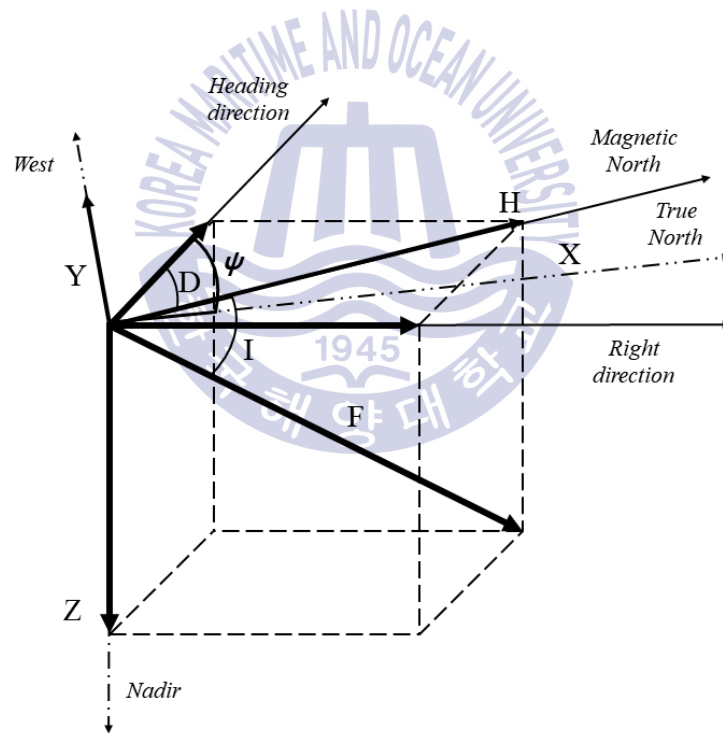


그림 2.1 자기벡터의 7가지 구성 요소

Fig. 2.1 The seven components of magnetic vectors

여기서 3축으로 출력되는 지자기의 전체 세기(norm)는 식 (2.1)과 같으며 수평 지자기 세기는 식 (2.2)와 같다.

$$F = \sqrt{Hd^2 + Rd^2 + Nd^2} \quad (2.1)$$

$$H = \sqrt{Hd^2 + Rd^2} \quad (2.2)$$

여기서  $Hd$ ,  $Rd$ ,  $Nd$ 는 각각 진행 방향(Heading direction), 우측 방향(Right direction), 천저 방향(Nadir direction)이다.

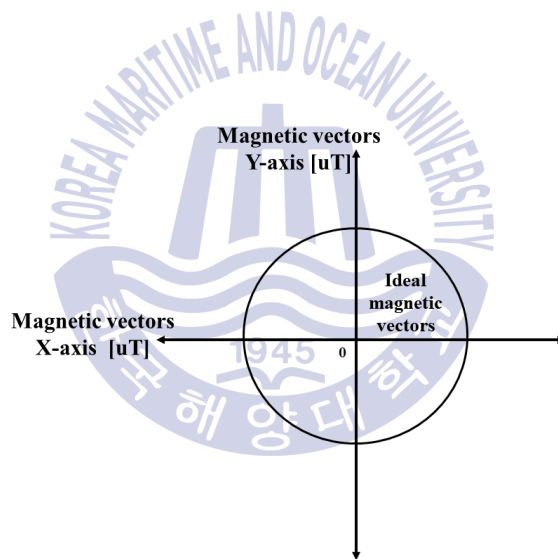
동체 좌표계 상에서 방위각을 알고자 할 경우 현재 자세각에 따른 수평 좌표계 변환이 필수적이며 식 (2.3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

여기서  $\theta$ 와  $\phi$ 는 롤(Roll)각, 피치(Pitch)각이며  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ 는 동체 좌표계에서 측정된 3축 지구 자기장이며  $X_H$ ,  $Y_H$ ,  $Z_H$ 는 자세각이 보상된 자기 벡터 값이다. 이를 통해 수평 자기벡터  $X_H$ 와  $Y_H$ 를 획득 가능하며 방위각  $\psi$ 는 식 (2.4)와 같이 구할 수 있다[29].

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{m_y \cos\theta - m_z \sin\phi}{m_x \cos\theta + m_y \sin\phi \sin\phi + m_z \cos\phi \sin\theta} \right) + D \quad (2.4)$$

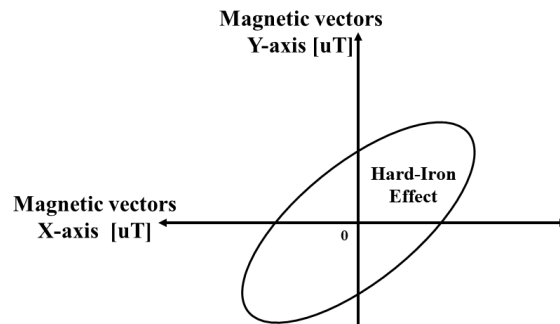
왜곡이 발생하지 않는 이상적인 상황일 경우 한 위치에서  $0\sim 360^\circ$  방위 각에 따른 지자기 신호를 획득하여 2차원 자기벡터 값으로 그래프로 출력하면 그림 2.2의 Ideal magnetic vectors와 같이 원의 형태로 표현된다. 그러나 센서의 전기적인 내재 오차(Soft-Iron Effect) 또는 철근 구조 건물 및 자성 물체에 따른 오차(Hard-Iron Effect)로 인해 타원의 형태로 출력이 되며 위치 별로 상이하게 출력되는 특성을 이용하여 실내에서 위치에 따른 구분이 가능하다[30].



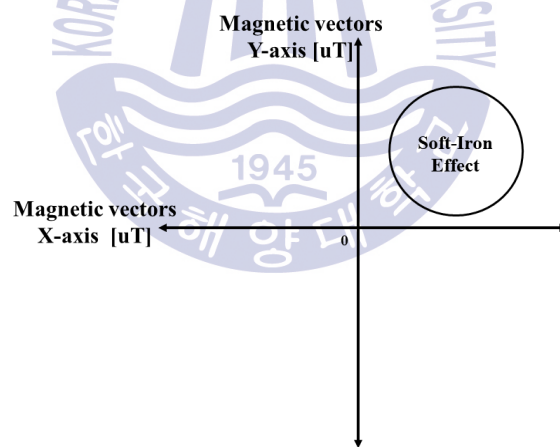
(a) Ideal magnetic vectors

그림 2.2 전방위각에 대한 2차원 자기벡터 특성

Fig. 2.2. 2-Dimensional magnetic vectors characteristics for all azimuth angle



(b) Magnetic vectors by Hard-Iron Effect



(c) Magnetic vectors by Soft-Iron Effect

그림 2.2 전방위각에 대한 2차원 자기벡터 특성(계속)

Fig. 2.2. 2-Dimensional magnetic vectors characteristics for all azimuth angle

(Cont.)

### 2.3 최소자승법(Least Squares Method)

최소자승법은 어떤 모델의 파라미터를 구하는 한 방법으로서 데이터와의 오차 제곱 합(Sum of error squares) 또는 평균을 최소화하도록 모델의 파라미터를 결정하는 방법이다. 어떤 문제가 주어졌을 때 최소자승법을 활용하기 위해서는 행렬식으로 표현 가능해야하며 대수적인 방법의 예시는 식 (2.5)와 같다.

$$\begin{aligned} ax_1 + b &= y_1 \\ ax_2 + b &= y_2 \\ &\vdots \\ ax_n + b &= y_n \end{aligned} \quad (2.5)$$

$n$ 개의 다항식의 개수를 가지는 1차 방정식이 존재할 때 이를 행렬식으로 표현하면 식 (2.6)과 같다.

$$\begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

여기서  $\begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{pmatrix} = A$ ,  $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = X$ ,  $\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = B$ 로 치환을 했을 때 의사역행렬

(Pseudo-inverse)인 식 (2.7)을 적용한다.

$$AX = B$$

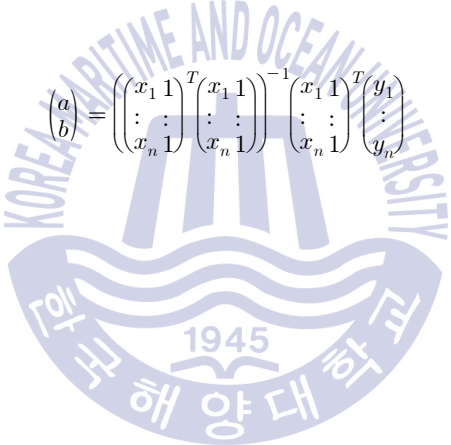
$$(A^T A)X = A^T B$$

(2.7)

$$(A^T A)(A^T A)X = (A^T A)^{-1} B$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B$$

따라서 최적의 파라미터  $a$ 와  $b$ 는 식 (2.8)과 같으며 어떤 계의 방정식 파라미터 값을 추정하는데 최소자승법은 최적의 근사방법이다.

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \left( \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{pmatrix} \right)^{-1} \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (2.8)$$
The watermark is a circular logo for Korea Maritime and Ocean University. It features a stylized ship's hull at the bottom with the year '1945' in the center. The text 'KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY' is written in an arc at the top, and '한국해양대학교' is written in Korean characters at the bottom.

## 2.3 Fingerprint 측위 기법

Fingerprint는 일반적으로 Wi-Fi 등의 WLAN기반의 위치인식 방법으로 AP를 통해 출력되는 신호세기를 측정함으로써 위치를 추정하는 방식으로 수집되는 신호에 따라 데이터베이스를 만드는 Training phase와 실시간으로 실제 위치를 추정하는 Positioning phase로 그림 2.3과 같다[5].

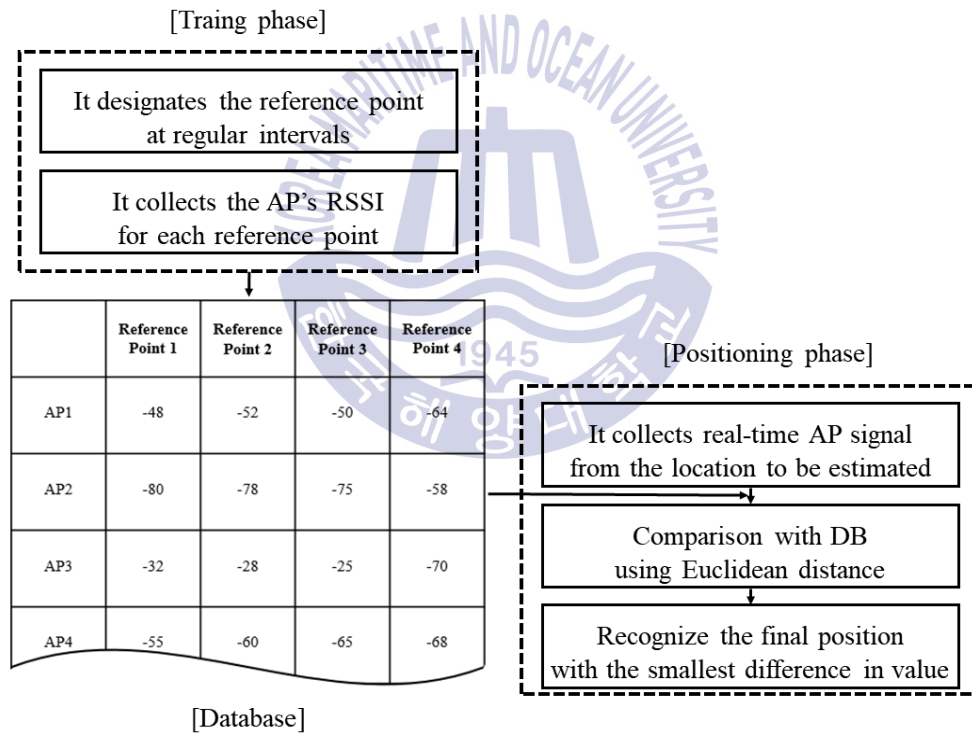


그림 2.3 Fingerprint 흐름도

Fig. 2.3 Fingerprint flowchart

Training phase에서 위치를 알고자 하는 공간에서 일정한 간격으로 참조위치(Reference point:  $RP$ )를 지정하고 수신기를 통해 수집되는 신호를 데이터베이스를 구축한다. 각  $i$ 번째 참조위치에 따라  $n$ 개의 AP로부터 수집되는 신호는 식 (2.9)과 같다.

$$RP_i = [AP_1, AP_2, AP_3, \dots, AP_n] \quad (2.9)$$

Positioning phase에서는 식 (2.10)와 같이 실시간(Real time:  $RT$ )으로 신호 세기를 측정하며 Training phase에서 구성한 데이터베이스와 식 (2.11)과 같이 유클리드 거리법(Euclidean distance:  $Dist$ )을 이용하여 연산한다.

$$RP_{RT_i} = [AP_{RT_1}, AP_{RT_2}, \dots, AP_{RT_n}] \quad (2.10)$$

$$Dist(i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (AP_j - AP_{RT_j})^2} \quad (2.11)$$

각 참조위치 당 연산된  $Dist(i)$ 는 식 (2.12)을 통해 값의 차이가 가장 근접한 위치  $RP_{position}$ 로 인식한다.

$$RP_{position} = \operatorname{argmin}(Dist(i)) \quad (2.12)$$



### 3. 제안한 실내 위치 인식 방법

#### 3.1 시스템 구조

본 논문에서는 방위 변화에 따라 일정하지 않은 지자기 신호에 의해 발생하는 위치 오차를 개선하기 위하여 Fingerprint기반 2차원 자기벡터 및 yaw축 보정기법을 적용한 실내위치인식 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 시스템은 그림 3.1로 Fingerprint를 적용하여 Training phase와 Positioning phase에 따라 동작한다. Training phase에서는 제안하는 방법으로 데이터베이스를 만들기 위해 일정 간격으로 나눈 참조위치에서 센서 회전에 따른 5개의 각도의 2차원 자기벡터기반 Ellipse Coefficient와 보상된 지자기 z값을 획득하여 Ellipse Coefficient Map로 저장한다. Positioning phase에서는 실시간으로 2차원 자기벡터와 지자기 z값을 수집함에 따라 사전에 구축한 데이터베이스와 비교 연산하며 각 참조위치당 연산된 값 중 차이가 가장 근접한 위치로 인식한다.

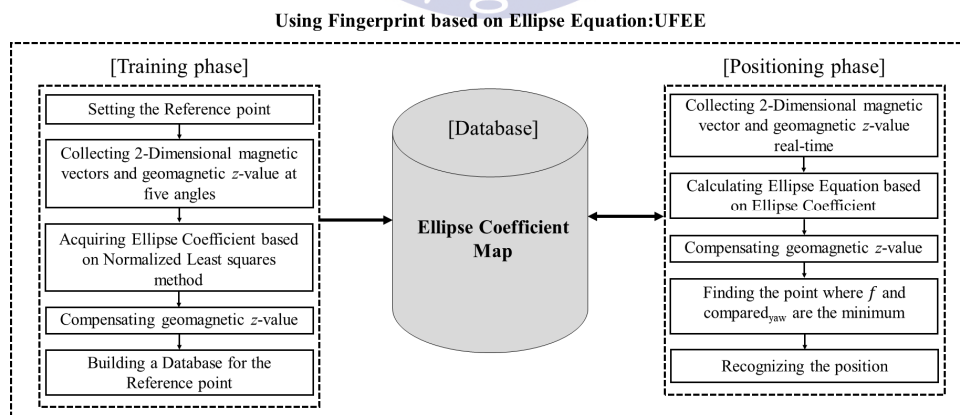


그림 3.1 제안하는 3차원화 시스템

Fig. 3.1 The proposed 3-Dimensional system

### 3.2 3차원화 Training phase

동일한 위치에서  $0^\circ \sim 360^\circ$  방위각에 따른 2차원 자기벡터를 그래프 상의 출력시키면 그림 3.2와 같은 타원의 형태로 나타난다. 여기서  $x$ 축은 자기벡터  $x$ 값,  $y$ 축은 자기벡터  $y$ 값으로 파란색 점은 해당 위치의 전방위각에 대한 2차원 자기벡터고 빨간색 점은 해당 위치의  $0^\circ, 70^\circ, 140^\circ, 210^\circ, 280^\circ$ 의 2차원 자기벡터다.

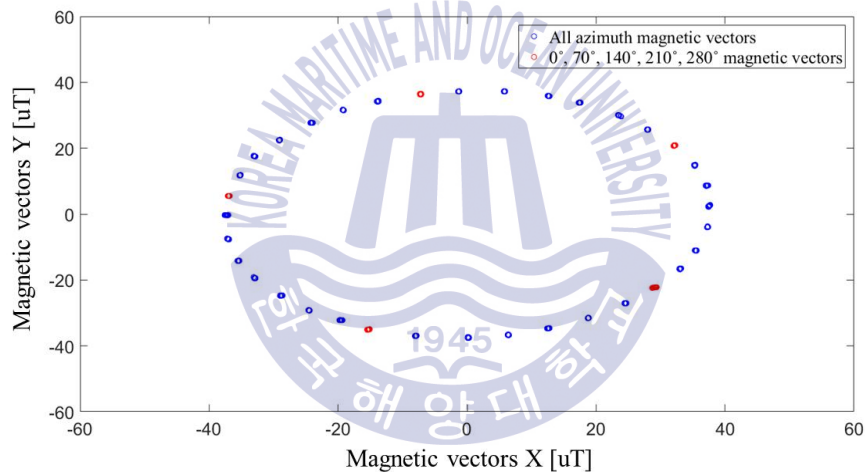


그림 3.2 타원의 형태로 출력되는 2차원 자기벡터의 특성

Fig. 3.2 The characteristics of 2-Dimensional magnetic vectors output in elliptical form

동일한 위치에서 조차 방위각 변화에 따라 신호가 일정하지 않으며 Training phase에서 변화하는 방위각 신호를 모두 저장할 시 데이터베이스가 늘어나는 한계점이 존재한다. 따라서 제안하는 Training phase는 타원의 형태로

출력되는 전 방위각의 2차원 자기벡터 특성에 대해 곡률편향에 강인한 정규화 선형 최소자승법을 적용함으로써 5개 각도의 2차원 자기벡터만을 기반으로 방위각 변화 특성을 포함한 **Ellipse Coefficient**를 획득할 수 있으며 데이터 베이스가 간소화 되더라도 방위각 변화에 따른 위치인식에 강인하다. 곡률편향에 따라 타원의 형태로 출력되는 2차원 자기벡터특성은 식 (3.1)과 같이 표현 가능하다.

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (3.1)$$

여기서  $a, b, c, d, e, f$ 는 타원의 회전각, 중심점, 장반경, 단반경을 결정하는 계수들이고  $x$ 와  $y$ 는 자기벡터  $x$ 값, 자기벡터  $y$ 값이다. 여기서  $a, b, c, d, e$  5개의 계수를 **Ellipse Coefficient**로 정의한다. 타원을 출력할 수 있는 **Ellipse Coefficient**를 구하기 위해서는 최소 5개 이상의 각도에 따른 2차원 자기벡터가 필요하며 위치별 고유한 특성을 더 반영하기 위해 동일한 위치에서 일정한 방위각 변화 간격으로 2차원 자기벡터를 획득해야 한다. 따라서 전방위각을 5등분한  $72^\circ$ 중  $2^\circ$  차이의 2차원 자기벡터는 곡률에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단하여  $70^\circ$ 의 기준간격으로 설정하였다.

다수의 수식을 이용하여 파라미터를 찾기 위해서는 최소자승법을 적용해야 하지만 조건을 설정하지 않는다면 모든 파라미터가 0이 나오는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 파라미터  $f$ 는 원점을 중심으로 곡률편향반경이 크지 않은 타원에 최적화된 계수인 1로 결정함으로써 **Ellipse Coefficient** 획득에 적합하게 최소자승법을 정규화 하였으며 적용한 전개과정은 식 (3.2), (3.3)과 같다[32].

$$\begin{aligned}
 ax_1^2 + bx_1y_1 + cy_1^2 + dx_1 + ey_1 + 1 &= 0 \\
 ax_2^2 + bx_2y_2 + cy_2^2 + dx_2 + ey_2 + 1 &= 0 \\
 &\vdots \\
 ax_5^2 + bx_5y_5 + cy_5^2 + dx_5 + ey_5 + 1 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{pmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_5^2 & x_5y_5 & y_5^2 & x_5 & y_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

여기서 Pseudo inverse인 식 (2.7)을 적용하면 최종 해 획득이 가능하며 식 (3.4)와 같다.

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 \\ x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 \\ x_4^2 & x_4y_4 & y_4^2 & x_4 & y_4 \\ x_5^2 & x_5y_5 & y_5^2 & x_5 & y_5 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 \\ x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

where

$$X = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 \\ x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 \\ x_4^2 & x_4y_4 & y_4^2 & x_4 & y_4 \\ x_5^2 & x_5y_5 & y_5^2 & x_5 & y_5 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

따라서 동일한 위치에서 5개 각도의 2차원 자기벡터를 수집할 수 있다면 정규화된 최소자승법 연산을 통해 최적의 Ellipse Coefficient 획득이 가능하다. 또한 yaw축 신호특성을 기반으로 위치인식 정확성을 향상시키기 위해 식 (3.5)를 적용하여 수집되는 지자기 z값을 일정비율로 평활화한다.

$$Compensated_{yaw} = Ratio \times Geomagnetic_z \quad (3.5)$$

여기서  $Compensated_{yaw}$ 는 보상된 지자기  $z$ 값,  $Ratio$ 는 지자기  $z$ 값을 보상하기 위한 비율,  $Geomagnetic_z$ 는 지자기  $z$ 값이다.

제안하는 데이터베이스인 Ellipse Coefficient Map은 그림 3.3과 같으며 참조위치에 따라 식(3.1) 기반의 Ellipse Coefficient를 이용한 Ellipse Equation과 보상된 지자기  $z$ 값이 구축되어 있다. Positioning phase에서는 2차원 자기벡터 값과 지자기  $z$ 값 수집에 따른 위치인식 방법을 제안한다.

**Ellipse Coefficient Map**

	Reference point 1(RP <sub>1</sub> )	Reference point 1(RP <sub>2</sub> )	...	
<b>Ellipse Coefficient</b>	<b>a</b>	-0.000707931460024170	-0.000909021471956782	...
	<b>b</b>	+5.47816945501369e-05	+3.09200931824894e-05	...
	<b>c</b>	-0.000725083424019593	-0.000924185845419355	...
	<b>d</b>	+9.14791096272762e-05	+0.00062919186061826	...
	<b>e</b>	+0.000319643552183864	+0.00115831036121910	...
<b>Ellipse Equation</b>	$a_{RP1}x^2 + b_{RP1}xy + c_{RP1}y^2 + d_{RP1}x + e_{RP1}y - f = 0$	$a_{RP2}x^2 + b_{RP2}xy + c_{RP2}y^2 + d_{RP2}x + e_{RP2}y - f = 0$	...	
<b>Compensated<sub>yaw</sub></b>	-0.277501851851852	-0.245944444444444	...	

그림 3.3 제안하는 데이터베이스: Ellipse Coefficient Map

Fig. 3.3 The proposed database: Ellipse Coefficient Map

### 3.3 3차원화 Positioning phase

Positioning phase는 Training phase에서 구성한 Ellipse Coefficient Map을 기반으로 실제 위치를 추정하는 단계다. 임의의 위치에서 실시간으로 수집되는 2차원 자기벡터 및 지자기  $z$ 값을 측정하면 식 (3.6)과 같다.

$$RP_{RT} = [(MV_{xn}, MV_{yn}, Geomagnetic_z)] \quad (3.6)$$

여기서  $RP$ 는 참조위치,  $RT$ 는 실시간,  $n$ 은  $n$ 번째 현재위치,  $MV_{xn}$ 은  $n$ 번째 위치에서 수집되는 자기벡터  $x$ 값,  $MV_{yn}$ 은  $n$ 번째 위치에서 수집되는 자기벡터  $y$ 값,  $Geomagnetic_z$ 는 지자기  $z$ 값이다. ① 2차원 자기벡터를 기반으로 Ellipse Coefficient Map에 구축된 Ellipse Equation과 연산하는 과정은 식 (3.7)과 같다.

$$\begin{aligned} a_{RP_1}MV_{xn}^2 + b_{RP_1}MV_{xn}MV_{yn} + c_{RP_1}MV_{yn}^2 + d_{RP_1}MV_{xn} + e_{RP_1}MV_{yn} &= -f_1 + 1 \approx 0 \\ a_{RP_2}MV_{xn}^2 + b_{RP_2}MV_{xn}MV_{yn} + c_{RP_2}MV_{yn}^2 + d_{RP_2}MV_{xn} + e_{RP_2}MV_{yn} &= -f_2 + 1 \approx 0 \\ &\vdots \\ a_{RP_m}MV_{xn}^2 + b_{RP_m}MV_{xn}MV_{yn} + c_{RP_m}MV_{yn}^2 + d_{RP_m}MV_{xn} + e_{RP_m}MV_{yn} &= -f_m + 1 \approx 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

여기서  $a, b, c, d, e$ 는 Ellipse Coefficient,  $m$ 은 참조위치 개수로  $n$ 번째 위치에서 수집되는 2차원자기벡터를 전체 참조위치 Ellipse Equation과 연산한다. 좌변의 결과는 절댓값을 취하며 Training phase에서 Ellipse Coefficient Map을 구축 시 타원 정규화를 위해 결정한 파라미터  $f$ 는 1의 조건으로 결정하였기 때문에 Positioning phase에서는  $f$ 를 이항하고 우변에  $+1$ 을 보상함으로써  $f$ 가 0에 가장 근사 하는 값의 위치를 실제위치로 인식한다. ② 지자기  $z$ 값을 기반으로 Ellipse

Coefficient Map에 구축된  $Compensated_{yaw}$ 와 비교 연산하는 과정은 식 (3.8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 Compared_{yaw_1} &= |Compensated_{yaw\_RP_1}| - |Compensated_{yaw_n}| \approx 0 \\
 Compared_{yaw_2} &= |Compensated_{yaw\_RP_2}| - |Compensated_{yaw_n}| \approx 0 \\
 &\vdots \\
 Compared_{yaw_m} &= |Compensated_{yaw\_RP_m}| - |Compensated_{yaw_n}| \approx 0
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

여기서  $Compensated_{yaw\_RP_m}$ 은 Ellipse Coefficient Map에 구축된  $m$ 개의 참조 위치 별 보상된 지자기  $z$ 값,  $Compensated_{yaw_n}$ 은  $n$ 번째 위치에서 수집되는 보상된 지자기  $z$ 값,  $Compared_{yaw_m}$ 은  $Compensated_{yaw_{RF}}$ 와  $Compensated_{yaw_n}$ 의 절댓값 비교를 통해 도출한 값으로 연산을 통해  $Compared_{yaw_m}$ 가 0에 가장 근사 하는 값의 위치를 실제위치로 인식한다. ①의 방법에 따라 연산한 결과(0과의 차이 값의 단위)가 ②의 방법을 통한 연산한 결과와 평활화 되어야 특정한 방법에 의해 가중 영향을 받지 않는다. 따라서 기초 실험을 통해 최적의  $Ratio$ 를 결정한 결과를 그림 3.4에 나타내었다.

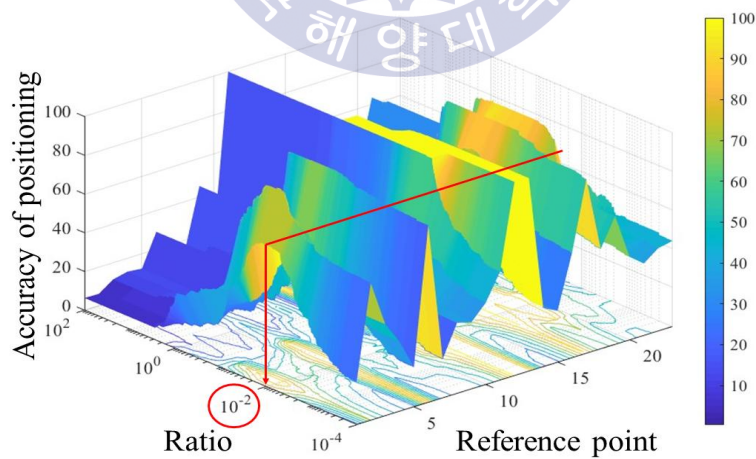


그림 3.4  $Ratio$  조정에 따른 위치인식 정확도 변화

Fig. 3.4 The change in accuracy of positioning by ratio adjustment

$x$ 축은 참조위치,  $y$ 축은 *Ratio*,  $z$ 축은 위치인식 정확도로 참조위치 별 수집되는 지자기  $z$ 값을 기반으로 *Ratio*의 범위를  $10^{-4}$ 에서  $10^2$ 까지 1000개로 나누어 이터레이션(Iteration)하여 위치인식 정확도를 비교하였다. 결과적으로 위치인식 비교연산 시 각각의 성분에 대해 가중 영향을 받지 않는 최적의 *Ratio*는  $10^{-2}$ 일 경우에 가장 높은 위치인식 정확도를 보였다.

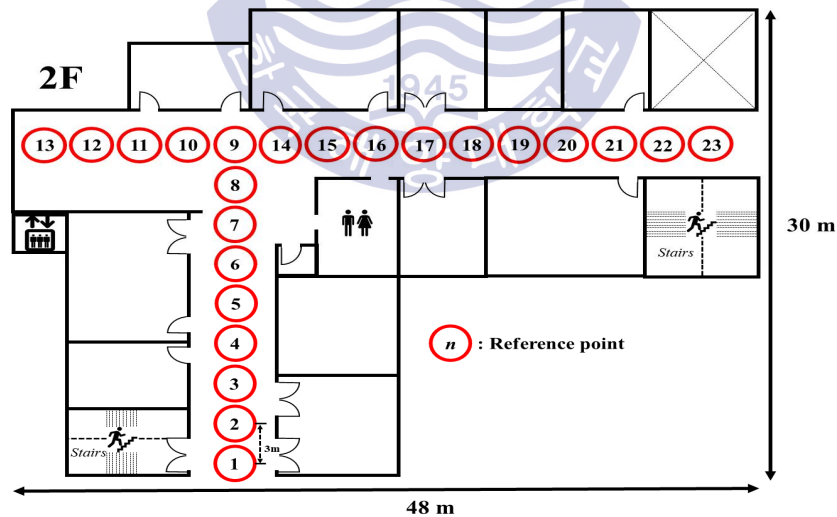




## 제 4 장 실험 및 결과

### 4.1 실험 환경

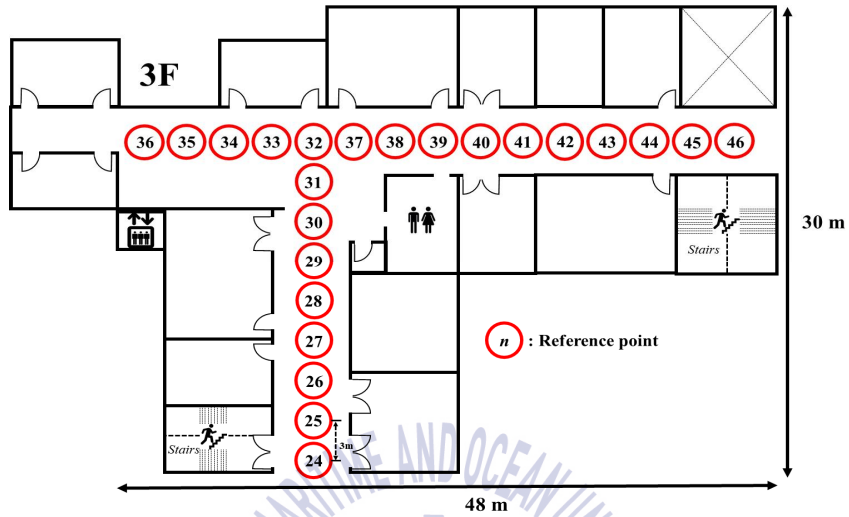
본 논문에서는 실내 다양한 강자성 요인으로 인해 발생하는 지자기의 자력선 분포 변화를 이용하여 공간 내 위치 별 지자기 출력 특성 확인 및 제안하는 방법의 위치인식 타당성을 검증하기 위해 일반적으로 현대 건축물에서 가장 많이 사용되는 강자성 재료인 철근과 H빔 등으로 이루어진 한국해양대학교 공과대학 1호관을 선정하였다. 한국해양대학교 공과대학 1호관은 많은 강의실, 실험실, 엘리베이터, 복도, 화장실 및 기타시설 등의 평범한 실내구조에 적합하게 건축되었으며 이러한 요인을 모두 포함하기 위해 그림 4.1과 같은 실험장소를 결정하였다.



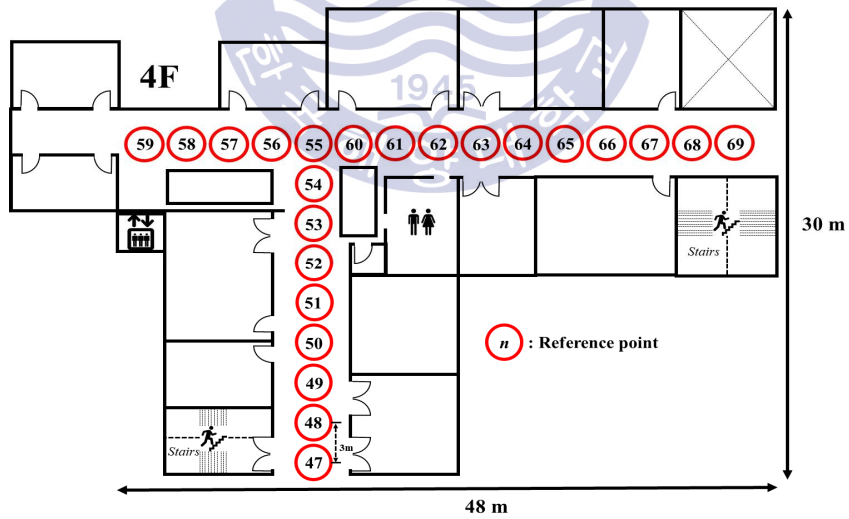
(a) Second floor (2F)

그림 4.1 실험공간과 참조위치

Fig. 4.1 The experimental space and reference point



(b) Third floor (3F)



(c) Fourth floor (4F)

그림 4.1 실험공간과 참조위치(계속)

Fig. 4.1 The experimental space and reference point(Cont.)

실내위치인식에서 널리 연구가 진행되고 있는 Wi-Fi기반 시스템에서는 AP에 따른 전파방사 특성 상 보편적으로 3m의 참조위치 간격으로 지정하지만 실내공간에서 지자기를 이용할 경우 철골과 구조물 등의 왜곡에 의해서 위치별로 신호 특성이 상이하여 거리에 따른 참조위치 설정이 일반화되어 있지 않다. 따라서 평균적인 사람 보폭이 초당 1.389m이며 센서가 온전히 데이터를 수집 받는 시간을 고려하여 참조위치 간격 3.00m, 높이 1.00m로 설정하였다. 일반적으로 지자기 신호는 시간에 따라 수집되는 값의 변동이 크지 않기 때문에 참조위치에서 0°~350°의 방위각에서 10°도 단위로 30개씩 수집하였으며 0°, 70°, 140°, 210°, 280°에 따른 Ellipse Coefficient Map 구축 시 각도 당 15개, 위치인식 시 전방위각에 대한 데이터를 15개씩 사용하였다.

자세 측정 장치나 관성 항법 장치에 탑재되는 IMU센서는 높은 분해능의 특성이 있지만 가격이 매우 고가이며 실내에서 생활하는 사용자에게 보편화 되어있지 않다. 따라서 본 논문에서는 Apple/Samsung/Xiaomi사에서 출시하는 대중적인 스마트폰에 내장되어 있는 저가형 지자기 센서(YAS537)를 사용하였다. 해당 센서 모듈은 그림 4.2와 같으며 동작 특성에 따른 자세한 스펙은 표 4.1에 제시되어 있다.

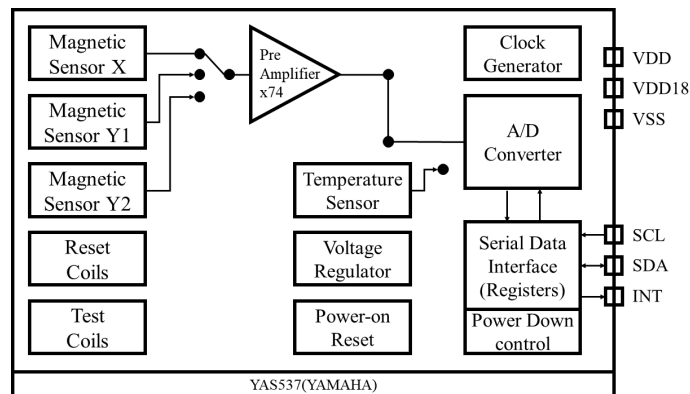


그림 4.2 실험에 사용한 지자기 센서 모듈

Fig. 4.2 The geomagnetic sensor module used in the experiment

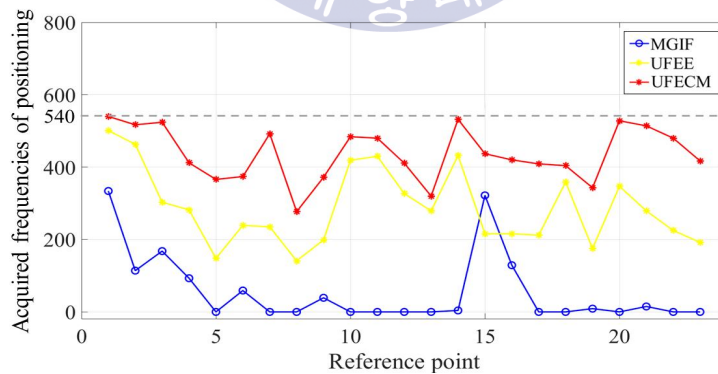
표 4.1 지자기 센서의 사양

Table 4.1 The specification of geomagnetic sensor

Parameter	Value
Manufacturing process	CMOS+ Magnetic sensor
Supply coltage for core	2.5 V to 3.6 V
Supply voltage (Operating temperature)	1.65 V to VDD (Operating temperature : -20 to +95°C)
	2.30 V to VDD (Operating temperature : -40 to +95°C)
Consumption current during operation	4mA (VDD = 3.0 V)
Measuring magnetic field range	± 300 uT
Resolution	≤ 0.6 uT/count(X, Y), ≥ 1.2 uT/count(Z)
Measuring time	10 ms

## 4.2 실험 결과 분석

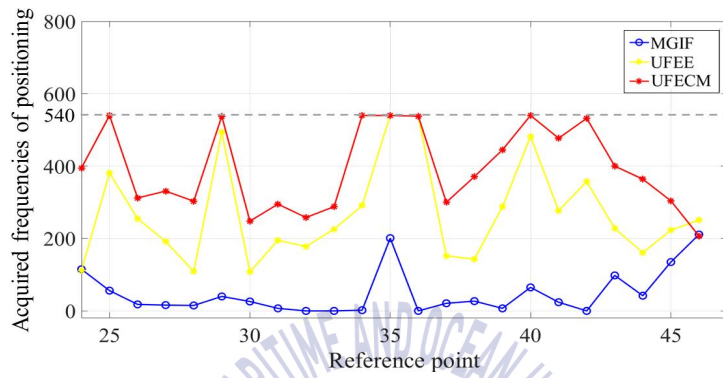
방위각에 따라 획득되는 지자기 신호를 이용하여 위치를 인식하는 결과는 그림 4.3에 나타내었다. 그래프의  $x$ 축은 참조위치,  $y$ 축은 위치인식 시 획득된 빈도수다. MGIF(Using Magnitude of the Geomagnetic Intensity based Fingerprint)는 기존에 제안되었던 Fingerprint기반 위치인식 방식으로 동일한 위치에서 전방위각에 대한 지자기 전체 세기의 평균값을 데이터베이스로 구축하고 수집되는 지자기 세기로 비교 연산을 통해 위치를 추정한다. UFEE(Using Fingerprint based on Ellipse Equation)는 제안한 위치인식 방법 중 2차원 자기벡터를 기반으로 Ellipse Coefficient Map에 구축된 Ellipse Equation만을 비교 연산하여 위치를 추정한 방식이다. UFECM(Using Fingerprint based on Ellipse Coefficient Map)은 제안한 위치인식 방법으로 UFEE방식에 가중영향을 최소화하기 위해 신호 평활화 기법을 적용한 지자기  $z$ 값을 기반으로 Ellipse Coefficient Map에 구축된  $Compensated_{yaw}$ 와 비교 연산하여 위치를 추정한 방식이다.



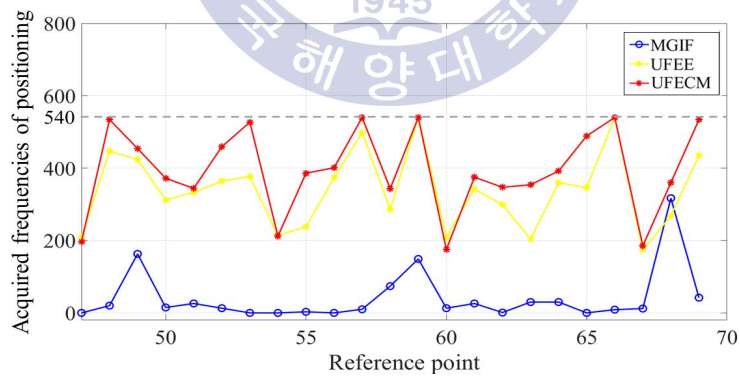
(a) Second floor

그림 4.3 기존 및 제안된 방법의 획득된 위치인식 빈도수

Fig. 4.3 The acquired positioning frequencies of existing and proposed methods



(b) Third floor



(c) Fourth floor

그림 4.3 기존 및 제안된 방법의 획득된 위치인식 빈도수(계속)

Fig 4.3 The acquired positioning frequencies of existing and proposed methods(Cont.)

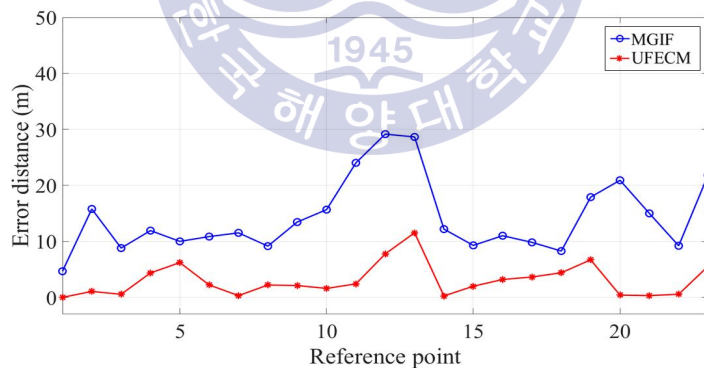
획득된 위치인식 빈도수에 따른 정확도 비교는 표 4.2와 같다. 2층에서 MGIF는 위치인식 최대 빈도수 334회, 최소 빈도수 4회로 평균 정확도 10.35 %, UFECM는 최대 빈도수 540회, 최소 빈도수 277회로 평균 정확도 80.94 %다. 3층에서 MGIF는 최대 빈도수 211회, 최소 빈도수 2회로 평균 정확도 9.07 %, UFECM는 최대 빈도수 540회, 최소 빈도수 207회로 평균 정확도 73.00 %다. 4층에서 MGIF는 최대 빈도수 317회, 최소 빈도수 1회로 평균 정확도 7.67 %, UFECM는 최대 빈도수 540회, 최소 빈도수 175회로 평균 정확도 72.94 %다. 전체 위치인식 빈도수 540회 중 방위각에 변화에 따라 MGIF는 지자기 전체 세기를 이용하기 때문에 개별 축 신호가 변화하더라도 전체 값 변화에 둔감하여 중첩되는 값을 가진 다른 위치로 인식하는 오차가 발생하였다. 그러나 UFECM는 참조위치 별 고유한 지자기 값으로 추출한 Ellipse Coefficient와 비교 연산을 하기 때문에 지자기 신호가 변하더라도 인식률이 높았으며 신호를 평활화하여 개별 축 신호 특성을 반영하였기 때문에 위치 인식에 더 강인한 모습을 보였다.

표 4.2 위치인식 정확도 비교

Table 4.2 The comparison of positioning accuracy

Method	Accuracy		
	MGIF	UFEE (Ellipse Coefficient)	UFEE (+Compansated z)
2F	10.35 %	53.29 %	<b>80.94 %</b>
3F	9.07 %	49.77 %	<b>73.00 %</b>
4F	7.67 %	62.75 %	<b>72.94 %</b>
Average	9.03 %	55.27 %	<b>75.63 %</b>

위치 인식 결과에 대한 오차거리 비교 결과는 그림 4.4에 나타내었으며 그래프의 x축은 전체 참조위치, y축은 오차거리로 (a)에서 MGIF는 1번 위치와 12번 위치에서 각각 4.66 m, 29.15 m, UFECM는 14번 위치와 13번 위치에서 각각 0.25 m, 11.53 m로 최소 및 최대오차거리를 보였다. (b)에서 MGIF는 42번 위치와 36번 위치에서 각각 9.70 m, 37.00 m, UFECM는 29, 42번 위치와 23번 위치에서 각각 0.04 m, 17.18 m로 최소 및 최대오차거리를 보였다. (c)에서 MGIF는 68번 위치와 59번 위치에서 각각 2.95 m, 30.41 m, UFECM는 48번 위치와 67번 위치에서 각각 0.13 m, 14.72 m로 최소 및 최대오차거리를 보였다.

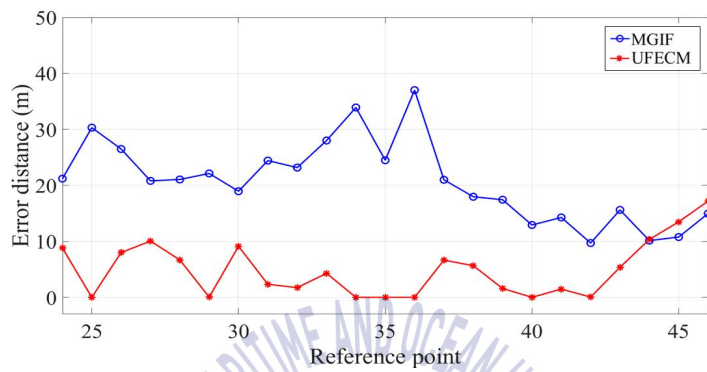


(a) Second floor

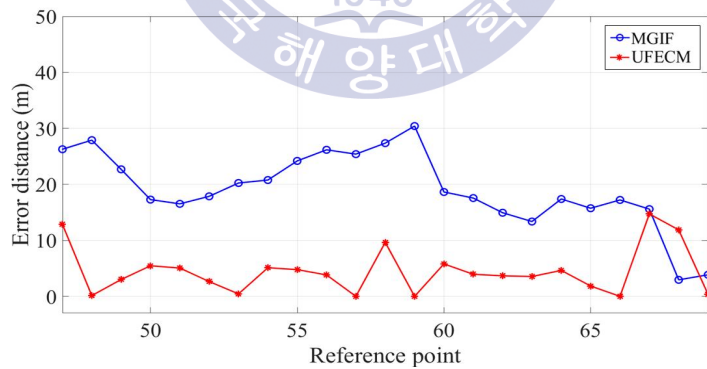
그림 4.4 기존 및 제안된 방법의 위치인식 오차거리

Fig. 4.4 The positioning error distance of existing and proposed methods





(b) Third floor



(c) Fourth floor

그림 4.4 기존 및 제안된 방법의 위치인식 오차거리(계속)

Fig. 4.4 The positioning error distance of existing and proposed methods(Cont.)

위치인식 오차거리의 전체 결과는 표 4.4와 같으며 MGIF는 각도에 따라 수집되는 고유한 지자기 신호에 대해 사전에 구축한 전방위각 DB와의 비교연산을 적용함으로써 위치인식이 가능하지만 참조위치별로 발생하는 다수의 신호 근사치로 인해 위치분해능이 떨어져 오차 발생에 취약하다. 또한 동일한 위치에서 조차 방위각에 따라 지자기 신호가 크게 변화될 수 있기 때문에 인식률이 크게 저하된다. 반면에 UFECM는 방위각을 고려한 Ellipse Coefficient Map 연산을 거치기 때문에 위치오차에 강인한 모습을 보이며 위치별 신호 특성에 따른 평활화를 적용함으로써 정확성을 향상시켰다.

표 4.3 위치인식 오차거리 비교

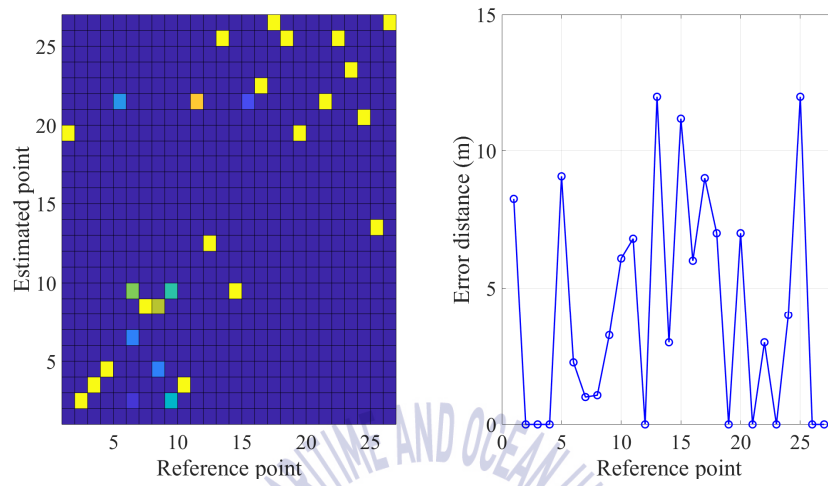
Table 4.3 The comparison of positioning error distance

Method		Error distance	
		MGIF	UFECM
2F	Min	4.66 m	<b>0.25 m</b>
	Max	29.15 m	<b>11.53 m</b>
	Average	14.30 m	<b>3.01 m</b>
3F	Min	9.70 m	<b>0.04 m</b>
	Max	37.00 m	<b>17.18 m</b>
	Average	20.72 m	<b>4.91 m</b>
4F	Min	2.95 m	<b>0.13 m</b>
	Max	30.41 m	<b>14.72 m</b>
	Average	19.14 m	<b>4.49 m</b>
Total average		18.05 m	<b>4.14 m</b>

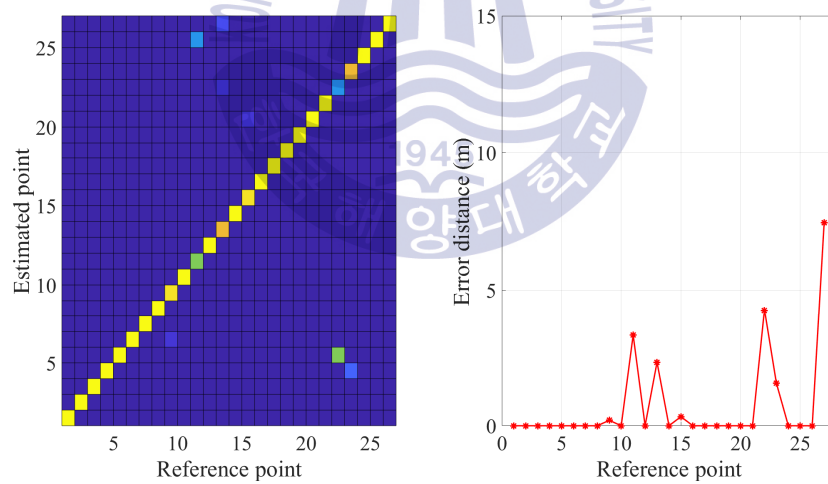
그림 4.5~4.7은 각 층별로 경로에 따른 위치인식 결과로 2층 1~9 (0°), 10~13 (270°), 12~9 (90°), 14~23 (90°), 3층 24~32 (0°), 33~36 (270°), 35~32 (90°), 37~46 (90°), 4층 47~55 (0°), 56~59 (270°), 58~55 (90°), 60~69 (90°)에서 지자기 신호를 수집하여 MGIF와 UFECM를 비교하였다. 여기서 왼쪽 그림의 x축은 참조위치, y축은 추정위치로서 이동 경로에 따라 위치를 추정한 결과고 오른쪽 그림의 x축은 참조위치, y축은 오차거리로서 위치오차 발생에 의해 생성된 추정오차거리를 나타낸 결과다.

표 4.5는 경로에 따른 위치인식 정확도를 나타낸 것으로 참조위치 간격이 3.00 m인 것을 고려하였을 때 좌측 Confusion matrix를 통해 MGIF는 정확한 위치인식 여부를 판단하는 대각선 영역에서 대부분 벗어난 것을 확인할 수 있으며 UFECM는 좌측 혼동 행렬을 통해 추정 위치가 참조위치와 대다수 일치함을 확인할 수 있다.

표 4.6은 경로에 따른 위치인식 오차거리 비교를 나타낸 것으로 경로 중 2층에서 MGIF는 7번째 위치와 13, 25번째 위치에서 1.00 m와 12.00 m로 최소 및 최대오차거리를 보였고 UFECM는 9, 15번째 위치와 27번째 위치에서 0.20 m와 7.45 m로 최소 및 최대오차거리를 보였다. 3층에서 MGIF는 12번째 위치와 30, 49번째 위치에서 1 m와 12 m로 최소 및 최대오차거리를 보였고 UFECM는 44번째 위치와 73번째 위치에서 0.67 m와 4.53 m로 최소 및 최대오차거리를 보였다. 4층에서는 66, 73, 75번째 위치와 56번째 위치에서 1 m와 11.40 m로 최소 및 최대오차거리를 보였고 UFECM는 62번째 위치와 79번째 위치에서 0.65 m와 6.27 m로 최소 및 최대오차를 보였다.



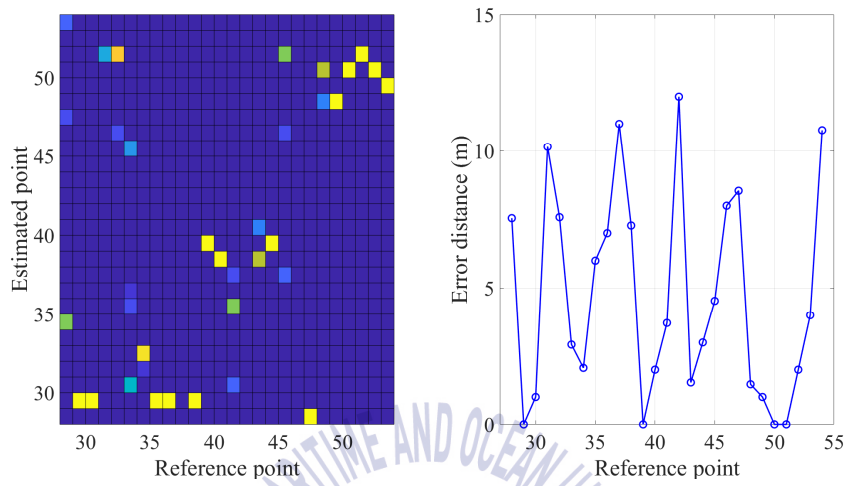
(a)MGIF



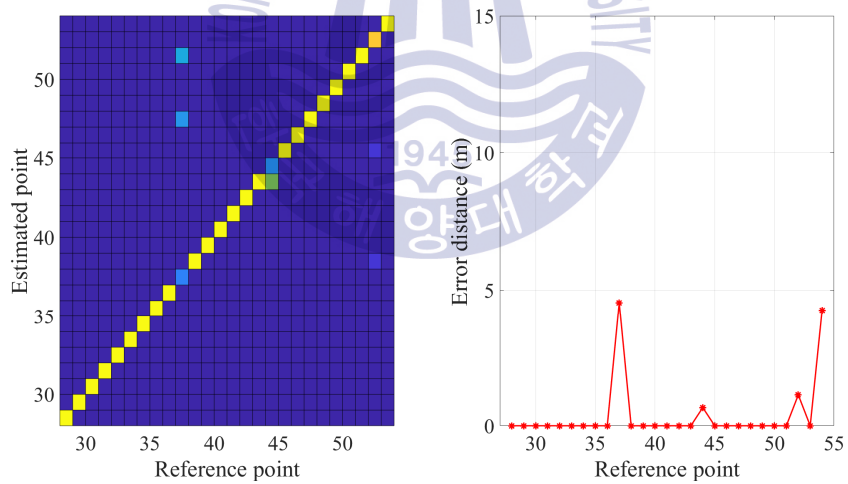
(b) UFECM

그림 4.5 2층에서 기존 및 제안된 방법의 경로에 따른 위치 인식 결과

Fig. 4.5 The positioning result in path of existing and proposed methods at second floor



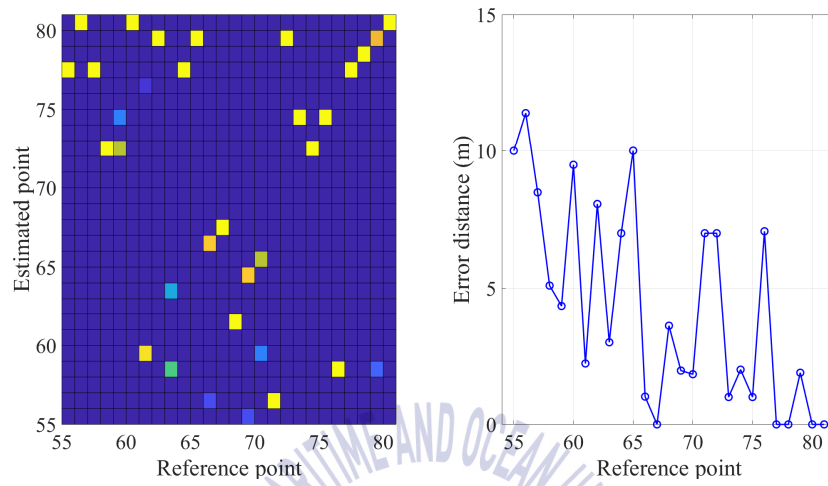
(a)MGIF



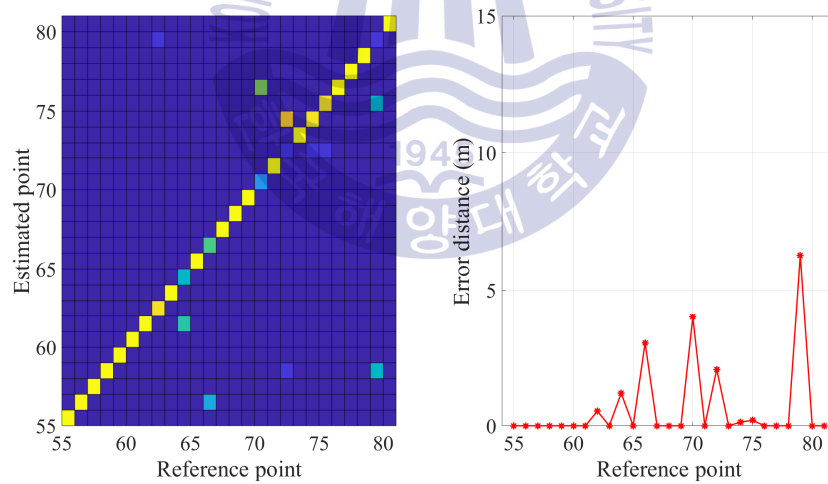
(b) UFECM

그림 4.6 3층에서 기존 및 제안된 방법의 경로에 따른 위치 인식 결과

Fig. 4.6 The positioning result in path of existing and proposed methods at third floor



(a)MGIF



(b) UFECM

그림 4.7 4층에서 기존 및 제안 된 방법의 경로에 따른 위치 인식 결과

Fig. 4.7 The positioning result in path of existing and proposed methods at fourth floor

표 4.4 경로에 따른 위치인식 정확도 비교

Table 4.4 The comparison of positioning accuracy in path

Method	Accuracy	
	MGIF	UFECM
2F	39.01 %	<b>91.85 %</b>
3F	15.80 %	<b>89.14 %</b>
4F	26.17 %	<b>86.42 %</b>
Average	27.00 %	<b>89.14 %</b>

표 4.5 경로에 따른 위치인식 오차거리 비교

Table 4.5 The comparison of positioning error distance in path

Method		Error distance	
		MGIF	UFECM
2F	Min	1.00 m	<b>0.20 m</b>
	Max	12.00 m	<b>7.45 m</b>
	Average	4.15 m	<b>0.03 m</b>
3F	Min	1.00 m	<b>0.67 m</b>
	Max	12.00 m	<b>4.53 m</b>
	Average	4.63 m	<b>0.39 m</b>
4F	Min	1.00 m	<b>0.13 m</b>
	Max	11.40 m	<b>6.27 m</b>
	Average	4.24 m	<b>0.65 m</b>
Total average		4.34 m	<b>0.36 m</b>

위치 간격이 반경 3.00 m인 것을 고려하였을 때 MGIF는 실험 공간에 따른 평균최대오차 11.8 m로 정밀한 위치인식에 한계점이 존재한다. UFECM는 평균최대오차가 6.08 m지만 경로 내 참조위치에서 대체로 5.00 m 이내의 오차가 발생하기 때문에 경로에 따라 방위각이 변함에도 불구하고 MGIF 대비 UFECM가 매우 향상된 것을 검증하였다.

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 자력선 분포를 왜곡시키는 다양한 강자성 재료로 구성된 실내 환경에서 동일한 위치의 방위 변화에 따른 지자기 신호에 의해 발생하는 위치 오차를 감소시키기 위해 Fingerprint기반 지자기맵의 방위각에 따른 2차원 자기벡터 및 yaw축 보정을 적용한 실내위치인식 알고리즘을 제안하였다. 제안한 3차원화 시스템은 정규화 선형 최소자승법을 적용한 지자기의 Ellipse Coefficient Map을 설계함으로써 데이터베이스가 간소화됨에도 곡률편향이 거의 없고 지자기 신호 평활화 기법을 적용함으로써 위치인식 정확도를 향상시켰다. 제안한 알고리즘은 48 m × 30 m의 실내공간 다수의 층에서 기존 지자기 세기기반 방식과 제안한 방법에 대한 결과를 비교 및 분석하였다. 실험 결과 경로에 따른 위치 인식 정확도를 27.00%에서 89.14%로 62.14% 개선하였고 오차거리는 4.34 m에서 0.36 m로 3.98 m 감소하였다.

Fingerprint 데이터베이스 구축 시 고유한 지자기 신호 특성을 3차원화함으로써 조밀한 참조위치 간격에도 위치분해능을 개선할 수 있는 가능성을 제시하였으며 단일 지자기 센서만을 이용하여 방위각 변화에도 강인한 위치인식시스템을 구축하였기 때문에 현재 연구가 진행중인 타 실내측위 기술과 융합할 경우 고성능의 결과를 도출할 것으로 판단된다. 이 연구를 통하여 건물, 공장과 공공장소 등의 실내에서도 Ellipse Coefficient Map만 구축되어 있다면 향후 정밀한 위치 인식이 가능하여 LBS(Location based service)에 적용에 유용하게 쓰일 것으로 기대된다.



## 참 고 문 헌

- [1] K. Pahlavan, P. Krishnamurthy and A. Beneat, "Wideband radio propagation modeling for indoor geolocation applications," IEEE Communications Magazine, vol. 36, no. 4, pp.60-65, 1998.
- [2] S. Grzonka, G. Grisetti and W. Burgard, "A Fully Autonomous Indoor Quadrotor," IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, no. 1, pp. 90-100, 2012.
- [3] C. Y. Yao and W. C. Hsia, "An Indoor Positioning System Based on the Dual-Channel Passive RFID Technology," IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 11, pp. 4654-4663, 2018.
- [4] Z. Zheng, L. Liu C. Zhao and W. Hu, "High accuracy indoor positioning scheme using single LED and camera," Electronics Letters, vol. 54, no. 4, pp. 227-229, 2018.
- [5] J. H. Seong and D. H. Seo, "Environment Adaptive Localization Method Using Wi-Fi and Bluetooth Low Energy," Wireless Personal Communications, vol. 99, no. 2, pp. 765-778, 2018.
- [6] H. Fourati, "Heterogeneous Data Fusion Algorithm for Pedestrian Navigation via Foot-Mounted Inertial Measurement Unit and Complementary Filter," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, no. 1, pp. 221-229, 2015.
- [7] A. Perttula, H. Leppäkoski, M. Kirkko-Jaakkola, P. Davidson, J. Collin and J. Takala, "Distributed indoor positioning system with inertial measurements and map matching," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 15, no. 4, pp. 1714-1727, 2014.
- [8] P. K. Yoon, S. Zihajezadeh, B. S. Kang and E. J. Park, "Robust biomechanical model-based 3-D indoor localization and tracking method using UWB and IMU," IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 4, pp. 1084-1096, 2017.
- [9] B. Wang, S. Zhou, W. Liu, and Y. Mo, "Indoor localization based on

- curve fitting and location search using received signal strength,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 572-582, 2015.
- [10] J. Niu, B. Wang, L. Shu, T. Q. Duong, and Y. Chen, “ZIL: An energy-efficient indoor localization system using ZigBee radio to detect WiFi fingerprints,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 7 pp. 1431-1442, 2015.
- [11] L. Pei, R. Chen, J. Liu, H. Kuusniemi, T. Tenhunen, and Y. Chen, “Using inquiry-based Bluetooth RSSI probability distributions for indoor positioning,” Journal of Global Positioning Systems, vol. 9, no. 2, pp. 122-130, 2010.
- [12] J. H. Seong, E. C. Choi, J. S. Lee and D. H. Seo, “High-Speed Positioning and Automatic Updating Technique Using Wi-Fi and UWB in a Ship,” Wireless Personal Communications, vol. 94, no. 3, pp. 1105-1121, 2017.
- [13] J. Haverinen and A. Kemppainen, “Global indoor self-localization based on the ambient magnetic field,” Robotics and Autonomous Systems, vol. 57, no. 10, pp. 1028-1035, 2009.
- [14] H. Xie, T. Gu, X. Tao, H. Ye and J. Lv, “MaLoc: A practical magnetic fingerprinting approach to indoor localization using smartphones,” Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, pp. 243-253, 2014.
- [15] Z. Liu, L. Zhang, Q. Liu, Y. Yin, L. Cheng and R. Zimmermann, “Fusion of magnetic and visual sensors for indoor localization: Infrastructure-free and more effective,” IEEE Transactions on Multimedia, vol. 19, no. 4, pp. 874-888, 2017.
- [16] Y. Ma, Z. Dou, Q. Jiang and Z. Hou, “Basmag: An Optimized HMM-Based Localization System Using Backward Sequences Matching Algorithm Exploiting Geomagnetic Information,” IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 20, pp. 7472-7482, 2016.
- [17] K. M. Lee, M. Li and C. Y. Lin, “Magnetic Tensor Sensor and Way-Finding Method Based on Geomagnetic Field Effects With

- Applications for Visually Impaired Users,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no. 6, pp. 2694-2704, 2016.
- [18] Y. Shu, C. Bo, C. Zhao, L. Li and F. Zhao, “Magicol: Indoor Localization Using Pervasive Magnetic Field and Opportunistic WiFi Sensing,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 7, pp 1443-1457, 2015.
- [19] J. Jung, S. M. Lee and H. Myung, “Indoor Mobile Robot Localization and Mapping Based on Ambient Magnetic Fields and Aiding Radio Sources,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, no. 7, pp. 1922-1934, 2015.
- [20] C. Zhang, K. P. Subbu, J. Luo and J. Wu, “GROPING: Geomagnetism and cROwdsensing Powered Indoor NaviGation,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 14, no. 2, pp. 387-400, 2015.
- [21] K. A. Nguyen and Z. Luo, “Dynamic route prediction with the magnetic field strength for indoor positioning,” vol. 12, no. 1, pp. 16-35, 2017.
- [22] J. Chung, M. Donahoe, C. Schmandt, I. J. Kim, P. Razavai and M. Wiseman, “Indoor location sensing using geo-magnetism,” Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems, pp. 141-154, 2011.
- [23] R. Kang and L. Cao, “Smartphone indoor positioning system based on geomagnetic field,” IEEE Chinese Automation Congress (CAC), pp. 1826-1830, 2017.
- [24] L. C. Boles and K. J. Lohmann, “True navigation and magnetic maps in spiny lobsters,” Nature 421 , pp. 60-63, 2003.
- [25] H. Xie, T. Gu, X. Tao, H. Ye and J. Liu, “A Reliability-Augmented Particle Filter for Magnetic Fingerprint Based Indoor Localization on Smartphone,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 15, no. 8, pp. 1877-1892, 2016.
- [26] Z. Zhao, T. Hu, W. Cui, J. Huangfu, C. Li and L. Ran, “Long-Distance Geomagnetic Navigation: Imitations of Animal Migration Based on a New Assumption,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 10, pp. 6715-6723, 2014.

- [27] W. F. Storms, "Magnetic Field Aided Indoor Navigation," Master of Science thesis, Electrical and Computer Engineering, Air Force Institute of Technology, USA, 2009.
- [28] B. Li, T. Gallagher, A. G. Dempster and C. Rizos, "How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning?," 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1-9, 2012.
- [29] C. E. Lucas and T. C. Richards, "A novel technique for modelling ship magnetic signatures," proc. MARELEC, 2015.
- [30] P. Guo, H. Qiu, Y. Yang and Z. Ren, "The Soft Iron and Hard Iron Calibration Method using Extended Kalman Filter for Attitude and Heading Reference System," IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, pp. 1167-1174, 2008.
- [31] E. L. Renk, M. Rizzo, W. Collins, F. Lee and D. S. Bernstein, "Calibrating a triaxial accelerometer-magnetometer-using robotic actuation for sensor reorientation during data collection," IEEE Control Systems, vol. 25, no. 6, pp. 86-95, 2005.
- [32] P. L. Rosin, "A note on the least squares fitting of ellipses," Pattern Recognition Letters, vol. 14, no. 10, pp. 799-808, 1993.
- [33] M. Angermann, M. Frassi, M. Doniec, B. J. Julian and P. Robertson, "Characterization of the indoor magnetic field for applications in localization and mapping," 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1-9, 2012