

# 선택적 Anchors 기반 Indoor GPS 및 EKF를 이용한 이동 로봇 위치 추정

## Localization for Mobile Robot by Selective Anchors in Indoor GPS and EKF

강 한 구<sup>1</sup>, 윤 재 오<sup>1</sup>, 이 지 흥<sup>†</sup>

Hangoo Kang<sup>1</sup>, Jaeoh Yun<sup>1</sup>, Jihong Lee<sup>†</sup>

**Abstract** This paper proposes a technique of indoor localization for mobile robot by so called indoor GPS and EKF. Basically the concept of indoor GPS is similar outdoor GPS, and the indoor GPS gets distances between Anchors and Tag by a ranging method of CSS and then estimates the coordinate by distances and known Anchor positions. After we performed performance test of indoor GPS system in ideal and multipath environment, we configured that the indoor GPS has internal error factors and external error factors. This paper handled a multipath problem belonging to external error factors. At first various direct physical method are introduced to fix the multipath problems, and as expected we got errors corrected considerably. And then the method of selective anchors for indoor GPS is applied. With these two level improvement of indoor GPS performance, EKF(Extended Kalman Filter) is applied to mobile robot in indoor environment. The usefulness of the proposed methods are shown by a series of experiments in a environment giving contaminated data by multipath.

**Keywords** : LBS, Localization, Indoor GPS, Multipath, EKF

### 1. 서론

최근 위치 기반 서비스의 수요가 급증함에 따라서 다양한 종류의 위치 추정 시스템 및 방법이 활발하게 연구되고 있다. 위치 기반 서비스를 제공함에 있어서 위치 추정은 가장 기본적인 핵심적인 기술이다. 위치 추정 성능은 위치 기반 서비스의 질적인 문제와 직결된다. 이에 따라서 위치 추정의 정확도를 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다<sup>1)</sup>.

현재 GPS위성에 의한 위치 측위는 실외 측위의 대표적인 방법이며 다양한 위치 기반 서비스 제공하고 있다<sup>2)</sup>. 하지만 GPS는 가시거리(Line Of Sight, LOS)가 확보되지 않

는 터널, 숲, 건물 주변 및 실내 환경에서는 측위가 불가능하거나 가능하다 하더라도 많은 오차를 포함하여 정밀 위치 측위가 필요한 시스템에는 적용하기 부족한 성능을 보이고 있다. 그러므로 GPS의 운용 불가능한 환경을 대체할 수 있는 측위 방법이 요구된다. 이에 따라서 WLAN(Wireless LAN), IR(Infrared), RFID(Radio Frequency Identification), UWB(Ultra Wide Band), Ultra-sonic, Blue-tooth, 등 다양한 매체를 이용한 무선 측위 기술이 연구 개발 되고 있다. 연구 초기 이러한 위치 측위 기술은 근거리 통신 기술과 관련된  $\mu\text{sec}$  수준의 정밀한 시간 정보를 이용할 수 있는 기술이 존재하지 않았다. 또한 장치 간 시간 동기화를 맞추어야 하는 요구사항으로 인하여 TOF(Time of Flight) 대신하여 RSS(Received Signal Strength)가 위치 측위 기술에 적용 되었다. 그러나 RSS의 경우 주변 환경 변화에 민감하게 반응하기 때문에 간섭으로 인한 위치 측위의 정확도가 감소하는 취약점이 있다. 이에 따라서 2007

Received : Sep.08.2010; Reviewed : Nov.10.2010; Accepted : Nov.22.2010

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0017099)

<sup>†</sup> 교신저자 : 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수

<sup>1</sup> 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사과정

년 3월 IEEE 802.15.4a에서 제안하는 CSS(Chirp Spread Spectrum) 기반 거리 측정 방법의 표준 완성과 TWR(Two Way Ranging) 기술로 동기화 문제가 쉽게 해결됨으로 RSS 대신 TOF가 다시 관심을 끌기 시작하였다<sup>[3][4]</sup>.

이에 따라서 RF를 이용한 TOF 기반 CSS 거리 측정 방법에 의한 Indoor GPS라고 불리는 실내 측위 시스템이 개발되었다. 본 논문에서는 Nanotron사의 nanoLOC이 내장되어있는 Corebell사의 Nexbee라는 Indoor GPS 시스템을 이용하여 연구를 진행하였다. GPS의 수신기 역할을 하는 Tag와 GPS의 위성 역할을 하는 Anchor 간 거리를 획득하고 이미 알고 있는 Anchor의 위치를 이용하여 삼변 측위에 의해 Tag의 위치를 측위 할 수 있다. 현재의 Indoor GPS는 CSS 기술을 적용하였다 하더라도 외부적 오차 유발 요소로 발생하는 다중경로(Multipath)에 의해 왜곡되거나 중첩되어 수신된 신호로 인하여 오차가 크게 발생한다는 취약점이 있다<sup>[5]</sup>.

Indoor GPS는 실외 GPS와 운용 방식이 유사하여 비교적 구현이 복잡하고 빛에 민감하게 반응하는 영상기반 위치인식시스템에 비해서 공학적인 접근 및 구현이 용이하며 외란의 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 또한 정밀도가 수 Cm단위로 정밀도를 초음파는 측정 범위가 10m 이내이지만 Indoor GPS는 측정 범위가 50m 이상으로 보다 넓은 영역에 적용할 수 있다는 장점이 있다<sup>[6]</sup>. 기존 연구에서 다중경로에 의해 발생하는 문제점을 극복하기 신호처리적인 제거방법만을 적용한데 비하여 본 논문에서는 신호처리적인 제거방법과 물리적인 제거 방법을 적용하였으며, 실험을 통하여 다중경로 유발 오차가 대폭 감소하여 일반적인 경우 시스템 자체 성능이 향상 되는 것을 확인하였다. 그러나 실제로 이동 로봇을 이용하여 이동 중에 측정해 본 결과 간헐적으로 불특정 Anchor와의 거리 측정치가 실제 값을 크게 벗어나는 것을 확인하였다. 이를 해결하기 위하여 일반적인 센서융합 방법인 EKF 이동로봇 위치추정방법을 기반으로 하였다<sup>[7][8][9]</sup>. 좌표 추정 시 불필요한 오차 정보를 제거하기 위한 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS와 EKF(Extended Kalman Filter)를 이용한 로봇의 위치 추정 방법을 제안하고 1차 EKF결과를 기준으로 Indoor GPS의 정보를 선택적으로 적용하여 최종 EKF과정을 통하여 로봇의 위치 추정 성능이 향상됨을 실험을 통하여 검증하였다.

본 논문의 구성으로 제 2장에서는 연구에서 사용된 Indoor GPS 시스템에서 사용하는 CSS에 대한 설명과 거리측정 방법 및 삼변 측량 기법에 대하여 기술하며, 이상적인 환경과 다중경로 환경에서 성능 실험을 실시하였다. 제 3장에서는 Indoor GPS 시스템의 내외부적 문제점을 기술하며 외부적 문제점 중에 하나인 다중경로오차의 보정 방법 및 신호처리 방법에 의한 오차 보정 실험을 진행하였다. 제 4장에서는 EKF를 적용한 로봇 위치 추정에 대하여 기술하며 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS와 EKF에 의한 실내 이동 로봇의 위치 추정방법을 제안한다. 제 5장에서는 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS와 EKF에 의한 로봇 위치 추정 실험 및 결과 분석하였으며, 마지막으로 제 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. CSS 거리 측정 기반 Indoor GPS 시스템

### 2.1 CSS(Chirp Spread Spectrum)

CSS란 무선 주파수 신호를 전달하는 방법 중 하나로, 그림 1과 같이 주파수를 선형적으로 증가 시키거나 감소시켜 신호의 반송파 구현하는 스펙트럼 확산 통신의 변조 방법이다. CSS 신호의 수식은 식 (1)-(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기에서  $w_s$ 는 초기 주파수,  $w_{BW}$ 는 대역폭,  $T_C$ 는 펄스의 지속시간,  $u$ 는 계단함수를 의미한다. 초기 주파수에 가감의 변화를 주어 증가 혹은 감소 주파수를 만들어 낼 수 있다.

국제 표준으로 제정된 IEEE 802.15.4의 Zigbee 기술이 갖고 있는 기존의 문제점인 잡음에 대한 견고성, 통달거리, 소모전력 등과 같은 결점을 보완하여 Zigbee 응용 기술과 호환 될 수 있도록 하였다. IEEE 802.15.4 MAC을 사용하며 IEEE 802.15.4a PHY의 근거리 무선 통신 국제 표준으

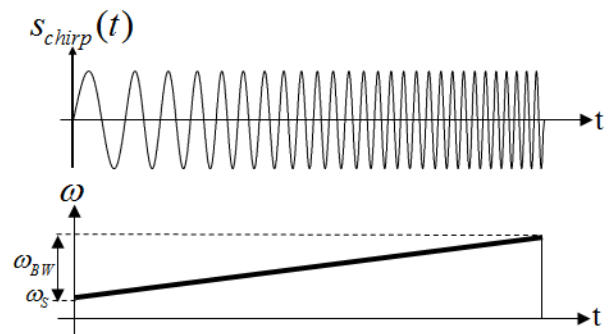


그림 1. Chirp 신호의 펄스와 증가 주파수 변화

로 제정 되어있다<sup>[10]</sup>.

CSS 기술은 다중 경로로 수신되는 오염된 신호에 강한 특성이 있으며, 송신 신호와 잡음 신호를 주파수 영역에서 분리하기 용이하다는 장점이 있다. 하지만 CSS 기술을 적용하였다 하더라도 다중경로가 무수히 많이 존재하는 실내 환경에서는 위치 측위에 필요한 Indoor GPS의 거리 측정 시 많은 오차를 포함하게 된다. 이러한 문제를 해결하기위한 방법으로 물리적인 장치에 의한 오차 제거 방법과 신호 처리에 의한 방법 적용하여 오차 보정을 수행하였으며 이는 3장에서 기술한다.

$$S_c(t) = \exp\left[j\left(w_s + \frac{w_{BW}}{2T_c}t\right)t + \theta_o\right] \times [u(t) - (t - T_c)] \quad (1)$$

$$S_c(t) = \exp\left[j\left(w_s - \frac{w_{BW}}{2T_c}t\right)t + \theta_o\right] \times [u(t) - (t - T_c)] \quad (2)$$

### 2.2 TOF 방식을 이용한 거리 측정

본 연구에 사용된 CSS 기반 Indoor GPS 시스템은 시각 기반 측정 방법인 Round-trip TOF방식으로 거리 측정을 수행한다. 그림 2와 수식 (3)-(6)에서와 같이 장치와 장치 간 신호의 전파시간( $t_{propagation}$ ), 왕복 비행시간( $t_{round}$ ), 장치 자체의 프로세서 응답시간( $t_{reply}$ )을 측정하여 신호의 전파 횟수를 이용하여 평균비행시간( $t_p$ )과 전파의 속도( $c$ )를 이용하여 거리( $d$ )를 추정한다.

GPS와 같이 단방향 측정 방법(One Way Ranging)을 이용하여 거리 정보를 추정하는 시스템에서는 시간 동기화가 매우 중요한 요소로 작용한다, 하지만 전파의 왕복 시간을 측정하는 양방향 측정 방법(TWR)은 장치 간 시간 동기화가 요구 되지 않는다는 장점이 있다. 또한 측정 오차를 줄이고자 SDS-TWR(Symmetric Double Sided Two Way Ranging)방법을 통하여 거리를 측정한다. SDS-TWR는 1회의 측정으로 인한 부정확함을 감소해주며 각각의 장치에서 양방향 측정을 대칭적으로 수행하고 최종적으로 거리를 측정한다.

$$t_{roundA} = 2t_p + t_{replyB} \quad (3)$$

$$t_{roundB} = 2 \cdot t_p + t_{replyA} \quad (4)$$

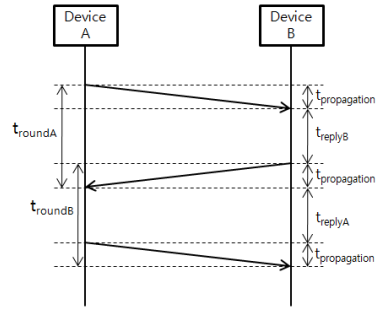


그림 2. SDS-TWR에 의한 거리 측정

$$4 \cdot t_p = t_{roundA} - t_{replyB} + t_{roundB} - t_{replyA} \quad (5)$$

$$d = c \frac{t_{roundA} - t_{replyB} + t_{roundB} - t_{replyA}}{4} = c \cdot t_p \quad (6)$$

### 2.3 삼변 측량 기법에 의한 좌표 추정

TOA(Time of Arrival)기반 위치 추정 알고리즘으로 그림 3에서와 같이 각 Anchor(A)와 Tag(T)간의 거리를 측정하여 이미 알고 있는 각 Anchor의 위치를 중심으로

측정된 거리를 반지름( $r$ )으로 하는 원의 교점을 찾는 방법으로 좌표를 추정하는 방법이다<sup>[11]</sup>.

2차원 평면에서 좌표 추정을 위해서는 최소 3대의 Anchor 위치와 거리 정보가 요구되며, 3차원 공간에서 좌표 정보를 추정하고자 할 경우 최소 4대 이상의 Anchor가 요구된다. 일반적으로 Anchor와 Tag 간의 측정된 거리( $r$ )과 이미 알려진 Anchor의 위치( $X, Y, Z$ ), 추정하고자하는 Tag의 위치( $x, y, z$ )의 관계식은 식 (7)과 같다. 삼변 측위를 위해서 식 (7)을 이용하여 식 (8)-(10)과 같이 선형방정식을 구하고 이를 행렬로 표현한다.

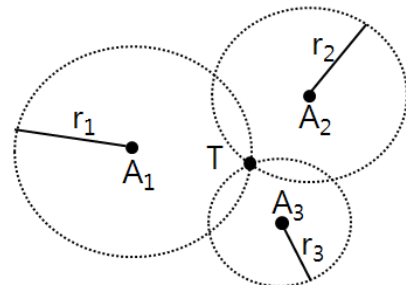


그림 3. TOA 기반의 삼변 측량 기법 개념도

$$r_i^2 = (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 \quad (7)$$

$$Ax = \vec{b} \quad (8)$$

$$A = 2 \begin{bmatrix} (X_2 - X_1) & (Y_2 - Y_1) & (Z_2 - Z_1) \\ (X_3 - X_1) & (Y_3 - Y_1) & (Z_3 - Z_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (X_N - X_1) & (Y_N - Y_1) & (Z_N - Z_1) \end{bmatrix} \rightarrow x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} (X_2^2 - X_1^2) + (Y_2^2 - Y_1^2) + (Z_2^2 - Z_1^2) - (r_2^2 - r_1^2) \\ (X_3^2 - X_1^2) + (Y_3^2 - Y_1^2) + (Z_3^2 - Z_1^2) - (r_3^2 - r_1^2) \\ \vdots \\ (X_N^2 - X_1^2) + (Y_N^2 - Y_1^2) + (Z_N^2 - Z_1^2) - (r_N^2 - r_1^2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

삼변 측량에 의한 교점을 찾고자 할 경우 실제 Indoor GPS는 내외부적 오차로 인하여 교점이 하나의 점이 아닌 영역으로 나타나게 된다. 점 단위의 좌표를 추정하기 위하여 식 (11), (12)의 MMSE(Minimum Mean Square Error) 방법에 의하여 최종적으로 좌표를 하나의 점 단위로 추정할 수 있다.

$$A^T A x = A^T \vec{b} \quad (11)$$

$$\vec{x} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{b} \quad (12)$$

## 2.4 CSS 기반 위치 추정 시스템의 성능

### 2.4.1 이상적인 환경

장치 자체의 기본 성능을 확인하기 위하여 외부적 오차 요소의 영향을 받지 않는 대전 테크노파크에 위치한 고주파센터의 무반향실(그림 4)과 건물 옥상에서 Indoor GPS 시스템을 이용한 장치간 거리 측정 실험을 진행하였다. Anchor와 Tag를 3m의 거리에 고정시켜 측정하였으며 총 100개의 샘플을 취득한 결과(그림 5)와 같이 무반향실에서

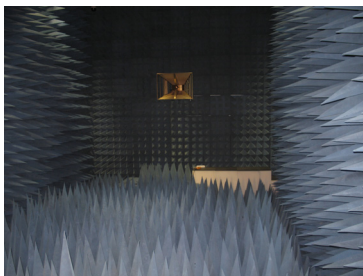


그림 4. Indoor GPS의 성능 실험을 실시한 무반향실

는 3.02m, 건물 옥상에서는 2.93m의 평균값을 보이며 측정되었으며 실제 거리와 매우 근사하게 측정되는 것을 확인 하였다.

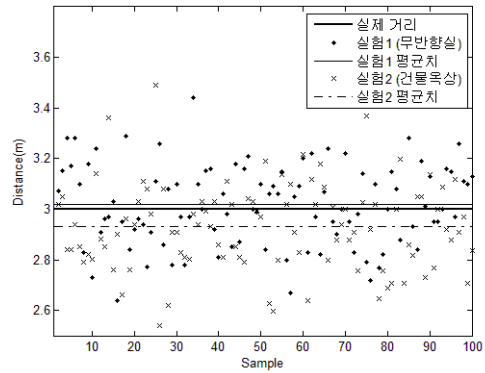


그림 5. 이상적인 환경에서 거리 3m 성능 실험 결과

### 2.4.2 다중 경로 환경

다중 경로 환경에서 Indoor GPS 시스템의 특성을 확인하기 위하여 건물 옥상에 인위적인 환경을 구성하여 장치간 거리 측정 실험을 진행 하였다. 실험 구성은 그림 6과 같이 Indoor GPS의 Anchor와 Tag를 3m 거리에 고정하였다. 다중경로를 생성하기 위하여 알루미늄 재질의 반사체를 거리 측정 방향과 수직인 거리 d를 1m, 2m, 3m의 위치로 이동시키며 각 위치별 100개의 샘플을 취득하여 거리 측정 실험을 진행하였으며 결과는 그림 7과 같다. 거리 측정 실험 결과의 평균값이 d가 1m일 경우에는 3.5m, 2m일 경우에는 3.88m, 3m일 때 2.46m로 정규분포를 보이며 측정 되었다. d가 3m일 경우와 같은 특정 구간에서 실제 거리보다 오히려 짧게 측정되는 것을 실험을 통하여 확인 할 수 있었다. 다중경로 환경에서 거리 측정 시 실제 거리보다 짧게 측정되는 것은 수신측에서 직접신호와 다중경로 신호가 중첩되어 다중경로 신호의 지연시간, 위상차, 감쇠비와 같은 요소들의 영향으로 Indoor GPS시스템은 수신시

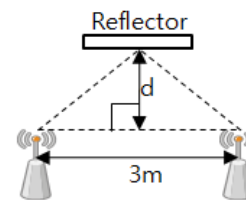


그림 6. 다중경로 환경 실험 구성

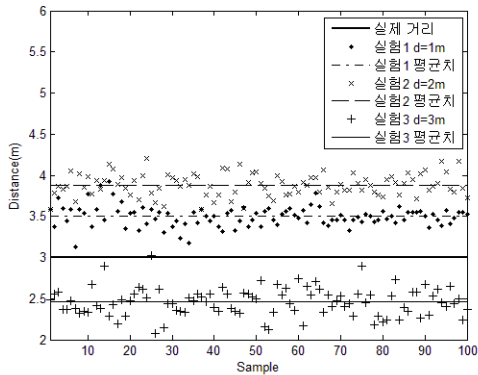


그림 7. 다중경로 환경에서 거리 3m 성능 실험 결과  
간 추정 시 실제 거리보다 길거나 짧게 측정된다<sup>[12]</sup>.

### 3. 오차 유발 요소 및 보정 방법

#### 3.1 내외부적 오차 유발 요소

Indoor GPS에서 좌표 추정을 위한 거리 측정 시 발생하는 오차의 원인은 내부적인 요소와 외부적인 요소로 나눌 수 있다.

내부적인 오차 유발 요소에는 발진 Crystal offset, 송수신시 발생하는 회로 내부의 시간지연, 시간 추정 카운터의 정밀도에 따라서 발생하며 이러한 문제를 해결하기 위해서는 현재 하드웨어의 기술적 한계를 극복 하여야 한다.

외부적인 오차 유발 요소에는 비 가시거리 전달 오차와 다중경로 전달 오차가 있다. 비 가시거리 전달 오차란 장애물에 의해 가시거리가 확보되지 않는 상태에서 장애물을 투과하거나 다중경로로 수신된 신호에 의해 발생하는 오차이다. 다중경로 전달 오차란 가시거리가 확보된 상태에서 직접신호와 다중경로 신호가 중첩되어 수신되며 거리 추정 시 발생하는 오차이다. 발생하는 오차는 다중경로 신호의 거리와 관계된 시간지연, 반사체의 물성에 따른 위상차, 반사계수의 변화에 따라 영향력이 달라진다.

#### 3.2 다중경로 신호 차단에 의한 오차 보정

다중경로에 의해 발생하는 오차를 제거하기 위하여 본 논문에서는 두 가지 물리적인 방법을 적용하여 다중경로가 최대한 생성되지 않도록 하여 성능이 향상되는 것을 실험으로 확인 하였다. 물리적인 방법으로 기존에 적용하고 있는 전 방향 무지향성 안테나를 일정한 방향으로 이득이 높은 지향성안테나로 대체 적용 하였다. 그러나 지향방향

이외의 방향으로도 이득이 작지만 전파가 수신되어 2차적으로 신호를 차단할 수 있도록 전자기장이 동시에 차단되는 EMCpro사의 EMP메탈시트로 그림 8과 같이 전파차단막을 제작하여 제한된 방향으로만 전파가 방사되도록 구성하여 실험을 진행하였다. 실험의 구성으로는 Indoor GPS의 Anchor 4대를 사용하여 6m\*5m의 2차원 직교좌표를 설정하였다. 2.3절에서 소개한 삼변 측량을 통하여 1대 Tag를 그림 9, 10의 측정위치(O)에 각각 위치시켜 20개의

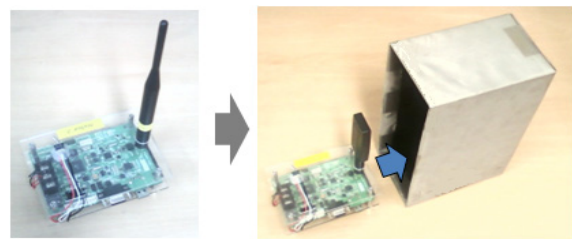


그림 8. 무지향성안테나와 지향성안테나 및 전파차단막

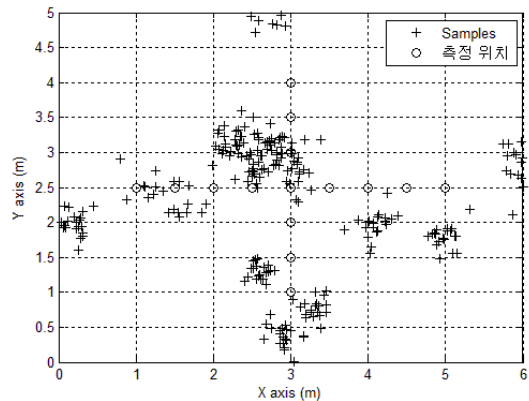


그림 9. 무지향성안테나를 적용한 위치 추정 실험

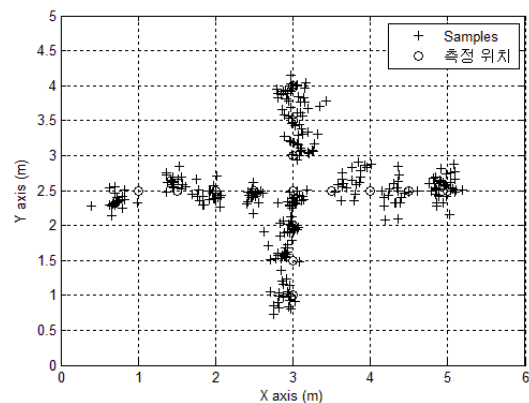


그림 10. 지향성안테나와 전파차단막을 적용한 위치 추정 실험

2차원 좌표 샘플을 취득하였다. 물리적인 방법을 적용하지 않은 그림 8의 결과보다 지향성안테나와 전파차단막을 적용한 그림 9의 결과가 우수한 성능을 보여주었으며, RMS 를 기준으로 약 80%의 오차가 보정 되었다.

### 3.3 필터링에 의한 오차 보정

기본적인 신호처리 필터 중 Median filter와 Mean filter 을 적용하여 Indoor GPS의 좌표 추정 오차를 보정하였다. 1차적으로 Mask 10개의 Median filter를 통하여 각 Anchor 와 Tag간 거리 추정 시 발생하는 음과 양 방향의 최대 임 펄스 노이즈를 제거였다. 2차적으로 Median filter 적용결 과에서 고정거리 측정 시 발생하는 약 1m의 오실레이션을 제거하기 위해 Mean Filter를 적용하였으며, 그림 11과 같 은 결과를 확인 하였다. Mask를 적용하여 과거의 결과가 반영되기 때문에 이동 로봇과 같은 실시간 위치 측위가 필 요한 시스템에는 부적합하나, 고정된 물체의 위치 측위를 필요로 하는 시스템에는 적용 가능할 것으로 판단된다.

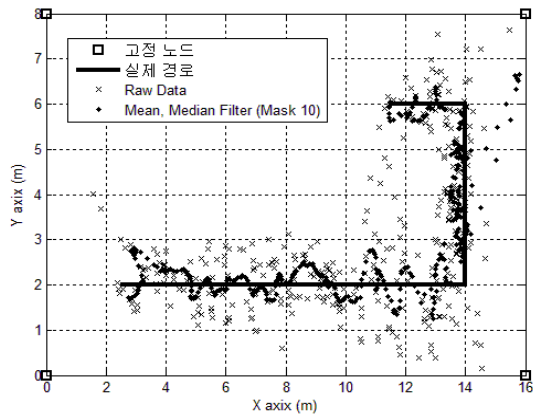


그림 11. Indoor GPS의 Median Filter와 Mean Filter 적용 결과

## 4. 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS와 EKF에 의한 로봇 위치 추정

KF(Kalman Filter)는 추정오차를 최소화하여 시스템의 특성을 효과적으로 예측하는 알고리즘이다<sup>[13]</sup>. 불확실한 모델에서 오차를 포함한 측정값에 의해 모델의 불확실성을 고려함과 동시에 측정값을 획득할 때마다 상태 보정 후 다시 예측 과정을 수행함으로써, 예측과정과 보정과정을 반복적으로 수행하여 참값에 가깝게 수렴한 추정치를 제시한다. 일반적인 KF가 선형 시스템에만 적용할 수 있던

것을 시스템 모델의 선형화 과정을 통하여 비선형시스템에 적용할 수 있도록 개선된 것이 EKF이다<sup>[14]</sup>.

본 연구에서 EKF를 적용하여 이동로봇의 실내 위치 추정 실험을 수행하였으며, EKF를 적용하기 위해 필요한 시스템 모델인 로봇의 기구학적 모델로 추정된 식 (25)의 로봇 위치( $x_t, y_t$ ) 및 지향방향자세( $\theta_t$ )와 측정 모델인 Indoor GPS시스템과 자이로센서에 의해 측정된 식 (30)의 위치( $\tilde{x}_t, \tilde{y}_t$ ) 및 자세( $\tilde{\theta}_t$ ) 정보를 융합하였다. 측정 모델의 자세 정보를 사용하기 위해 절대 값을 제공하는 지자기센서의 방위 정보를 사용하여야한다. 하지만 로봇 모터에서 발생하는 자기장의 외란에 의해 지자기센서에 오동작을 유발 시킴으로 전기적 모터가 장착된 시스템에는 사용이 부적합하며 외란에 강한 지자기센서가 필요한 실정이다. 이를 위한 대안으로 상대적인 방위정보를 제공하지만 시간당  $10^0$ 의 비교적 적은 오차 누적량을 갖는 MicroInfinity사의 자이로센서 XG1010을 이용한 방위 정보를 측정하여 사용하였다. 실험에 적용된 이동로봇의 기구학 모델은 그림 12와 같으며 식(20~24)로 나타낼 수 있다. 식 (20)에서  $r_R, r_L$  은 각 바퀴의 반지름,  $w_R, w_L$ 은 각 바퀴의 회전속도,  $v_R, v_L$ 은 선형속도,  $v$ 는 로봇의 진행속도를 나타낸다. 식 (21)에서  $L$ 은 두 바퀴 사이의 거리,  $w$ 는 로봇의 회전속도를 나타내며 식 (22)-(24)에서  $\Delta T$ 는 샘플링 시간을 나타낸다. 로봇의 상태 변화는 현재의 상태와 입력에 따라 식 (22)-(24)로 표시되어지며, 위치와 방향을 갖는 식 (25)와 같이 벡터로 나타 낼 수 있다. 로봇의 상태 변수  $X$ 와 시스템 입력 변수  $U$ 를 통하여 시스템 입력 오차  $\delta_u$ 를 갖는 일반적인 시스템 모델로 식 (27)과 같다.

$$v_R = r_R w_R, \quad v_L = r_L w_L, \quad v = \frac{v_R + v_L}{2} \quad (20)$$

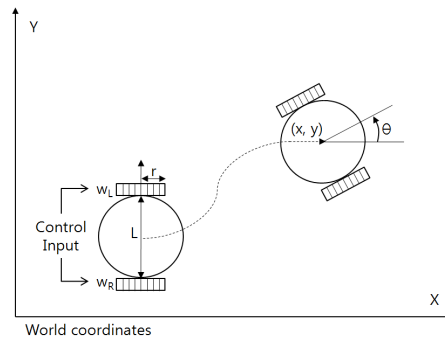


그림 12. 이동 로봇 기구학 모델

$$w = \frac{v_R - v_L}{L} \quad (21)$$

$$x_{t+1} = x_t + v_t \cos(\theta_t) \Delta T \quad (22)$$

$$y_{t+1} = y_t + v_t \sin(\theta_t) \Delta T \quad (23)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t + w_t \Delta T \quad (24)$$

$$X_t = [x_t \ y_t \ \theta_t]^T \quad (25)$$

$$U_t = [w_R \ w_L]^T \quad (26)$$

$$X_t = f(X_{t-1} + U_t) + \delta_u \quad (27)$$

EKF를 적용하기 위하여 로봇의 기구학적 모델을 선형화 하는 과정이 필요하다. 이를 위하여 식 (25)를 현재의 상태  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$ 와 제어입력  $w_R$ ,  $w_L$ 로 각각 편미분하게 되면 식 (28)-(29)을 얻을 수 있다.

$$\nabla_x f = F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_t \sin(\theta_t) \Delta T \\ 0 & 1 & v_t \cos(\theta_t) \Delta T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\nabla_u f = G = \begin{bmatrix} \frac{r_R \cos(\theta_t) \Delta T}{2} & \frac{r_L \cos(\theta_t) \Delta T}{2} \\ \frac{r_R \sin(\theta_t) \Delta T}{2} & \frac{r_L \sin(\theta_t) \Delta T}{2} \\ \frac{r_R \Delta T}{L} & -\frac{r_L \Delta T}{L} \end{bmatrix} \quad (29)$$

식 (30)의 Indoor GPS의 위치 정보와 자이로센서로의 자세 정보는 측정 오차  $\delta_z$ 를 갖는 일반적인 측정 모델은 식 (32)과 같이 나타낼 수 있다. 시스템 모델의 상태와 측정행렬  $h$ 는 동일한 차원의 값으로 단위행렬로 나타낸다.

$$Z_t = [\tilde{x}_t \ \tilde{y}_t \ \tilde{\theta}_t]^T \quad (30)$$

$$h(X_t) = I^{3 \times 3} \quad (31)$$

$$Z_t = h(X_t) + \delta_z \quad (32)$$

앞서 얻어진 선형화된 시스템 모델과 측정 모델을 이용하여 식 (33)-(37)의 EKF알고리즘을 적용한 로봇의 위치 추정이 가능하다. 식 (34)에서  $Q$ 는 로봇 시스템 모델에 대한 잡음의 공분산 행렬과 식 (35)에서  $R$ 은 측정 모델에 대한 잡음의 공분산 행렬을 나타낸다. 식 (34), (37)에서  $P$ 는 추정 오차 공분산 행렬을 나타낸다. 식 (35)의 Kalman gain ( $K$ )에 의해 추정 오차 공분산은 최소화 된다.

**Prediction :**

$$X_{t+1|t} = f(X_{t|t} + u_{t+1}) \quad (33)$$

$$P_{t+1|t} = F P_{t|t} F^T + G Q G^T \quad (34)$$

**Update(Correction) :**

$$K = P_{t+1|t} H^T (H P_{t+1|t} H^T + R)^{-1} \quad (35)$$

$$X_{t+1|t+1} = X_{t+1|t} + K(Z_{t+1} - h(X_{t+1|t})) \quad (36)$$

$$P_{t+1|t+1} = P_{t+1|t} - K(H P_{t+1|t} H^T + R) K^T \quad (37)$$

센서 정보 융합을 통한 위치 추정 시 측정 모델에 적용되는 Indoor GPS시스템의 좌표 추정 과정에서 임펄스 오차를 포함한 특정 Anchor의 거리 값이 반영되어 추정된 좌표 또한 큰 오차를 보임을 실험을 통하여 확인 하였다. 이를 보완하기 위하여 그림 13과 같이 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS와 EKF를 이용한 보정된 Indoor GPS의 측정값을 통한 로봇의 위치 추정 알고리즘을 제안한다.

Indoor GPS시스템에서 최대 오차를 갖는 Anchor를 알아내기 위해서는 측정된 각 Anchor와 Tag 간 거리가 적절하게 측정이 되었는지 비교할 기준이 필요하다. 기준을 정하기 위한 방법으로 그림 13에서의 단계 A와 같이 로봇 모터 엔코더에 의해 추정된 위치  $P_D(x, y)$  및 자세  $\theta_D$ 의 로봇의 시스템 모델과 4대의 Anchor의해 측정된 위치  $P_{iGh}(x, y)$ 와 자이로센서로부터 측정된 자세  $\theta_G$ 의 측정 모델로 초기 EKF를 수행하여 위치  $P_{mi}(x, y)$ 를 추정한다. 단계 A에서 추정된  $P_{mi}(x, y)$ 를 본 논문에서는 임펄스 오차 Anchor를 추정하는 기준 값으로 가정하였다. 비교할 기

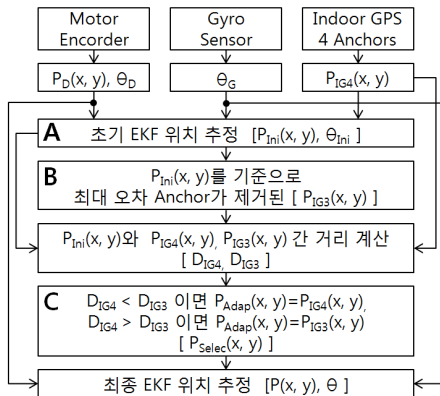


그림 13. 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS와 EKF를 이용한 로봇 위치 추정 알고리즘

준 값이란 불확실한 시스템 모델과 오차를 포함한 측정모델을 EKF에 의해 실제의 참값에 가깝게 수렴하므로  $P_{ini}(x, y)$ 를 기준 값으로 가정하는 것은 적합하다고 할 수 있다. 단계 B에서는 추정된  $P_{ini}(x, y)$ 를 기준으로 각 Anchor 간 거리를 수치적으로 계산하고 오차가 가장 큰 Anchor를 제거하여 3대의 Anchor만으로 Indoor GPS의 좌표  $P_{IG3}(x, y)$ 를 추정해낸다. 다음으로 단계 C에서는  $P_{ini}(x, y)$ 를 기준으로  $P_{ini}(x, y)$ 와  $P_{IG4}(x, y)$ 의 직선거리  $D_{IG4}$ 를,  $P_{ini}(x, y)$ 와  $P_{IG3}(x, y)$ 의 직선거리  $D_{IG3}$ 를 수치적으로 알아내고  $D_{IG4}$ 과  $D_{IG3}$ 의 크기를 비교하여 상황에 따라 오차가 적게 포함된 측정위치  $P_{Selec}(x, y)$ 를 추정해낸다. 여기에서 추정된  $P_{Selec}(x, y)$ 가 최종 EKF 로봇 위치 추정 과정의 측정 모델에 입력되어  $P(x, y), \theta$ 를 추정하게 된다. 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS를 로봇 위치 추정 알고리즘을 적용하면 측정 모델의 오차가 적게 포함된 추정 좌표를 적용하게 되므로 EKF 위치 추정 또한 성능이 향상되는 것을 실험을 통하여 확인 하였다.

## 5. 실험 결과

### 5.1 실험 구성

본 논문에서 제안한 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS와 EKF에 의한 로봇 위치 추정 알고리즘의 평가를 위해 건물의 실내에서 이동 로봇의 위치 추정에 관한 실험을 다음과 같이 진행 하였다. 실험에 사용된 Indoor GPS의 Anchor 수는 사용자가 원하는 대로 설정할 수 있으나 대수가 늘어남에 따라서 샘플링 시간 또한 길어짐으로 제안된 방법의

증명을 위하여 최소한의 대수인 4대의 Anchor로 설정하였다. 그림 14와 같이 8m\*16m의 2차원 직교 좌표를 설정하고 [0m, 0m], [16m, 0m], [16m, 8m], [0m, 8m]의 지점에 Anchor를 각각 고정하였다. 성능 평가를 위한 적외선 센서를 이용한 라이트레이서를 제작하여 로봇에 장착하여 로봇의 실제 이동 경로 추종하도록 하였다. 실험용 이동 로봇의 모터 엔코더를 이용하여 위치와 자세를 이용하여 시스템 모델의 상태를 추정하였으며, Indoor GPS를 이용하여 로봇의 좌표와, 자이로센서를 통하여 로봇의 자세를 측정하여 EKF 로봇 위치 추정에 적용하였다.

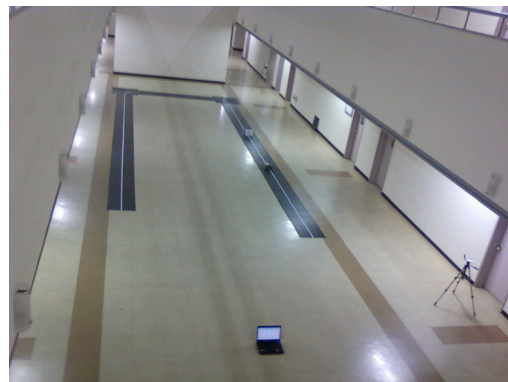


그림 14. 실내 로봇 위치 추정 실험 환경

### 5.2 실험 결과

그림 15의 결과는 4대의 Anchor로부터 측정된 거리를 이용하여 단계 A의 좌표 값  $P_{IG4}(x, y)$ 을 EKF에 적용하여 로봇의 위치추정을 수행한 결과이다. 실험결과 첫 번째 회전 구간에서 EKF 결과가 부분적으로 크게 벗어나는 것을 알 수 있다. 분석을 통하여 측정된 Anchor와 Tag의 거리 정보가 8m\*16m의 설정된 실험영역의 최대 거리를 초과하여 좌표 추정과정 또한 영향을 미쳐 발생하는 것을 확인하였다.

그림 16은 단계 B의 제안된 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS에 의한 로봇 위치 추정 알고리즘 수행과정 중 얻을 수 있는  $P_{IG3}(x, y)$ 를 EKF 로봇 위치 추정에 적용하여 추정된 결과이다. 단계 A에서  $P_{IG4}(x, y)$ 의 정보를 적용한 EKF 로봇 위치 추정 결과에서 발생하는 부분적으로 추정 결과가 크게 벗어나는 문제점이 해결할 수 있었다. 하지만 모든 Anchor가 임펄스 오차를 포함하지 않은 구간에서도 하나의 정보를 적게 사용함으로  $P_{IG3}(x, y)$ 의 결과가



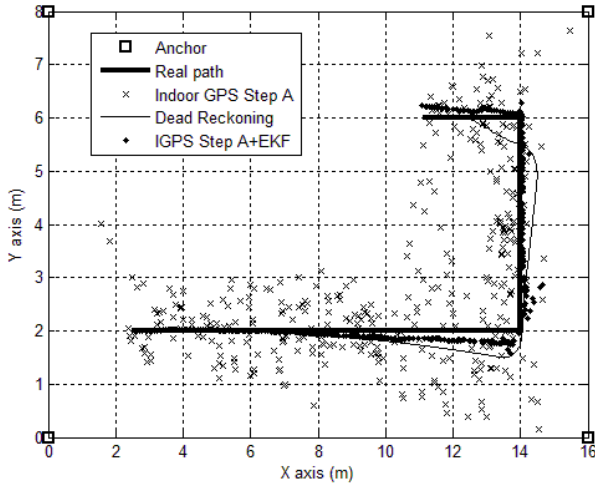


그림 15. 단계 A의  $P_{IG4}(x, y)$ 와 EKF에 의한 위치 추정 결과

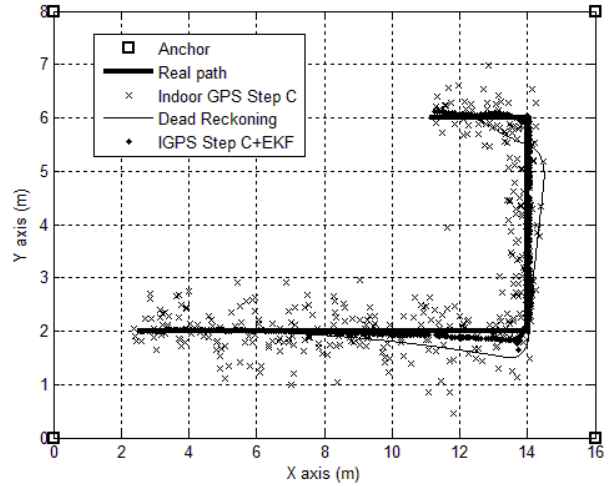


그림 17. 단계 C의  $P_{Selec}(x, y)$ 와 EKF에 의한 위치 추정 결과

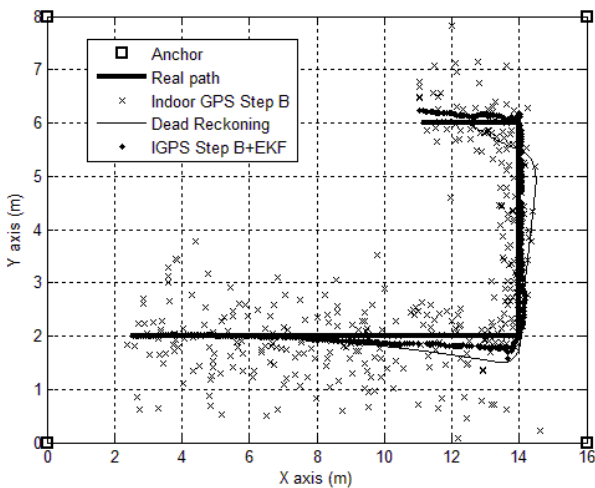


그림 16. 단계 B의  $P_{IG3}(x, y)$ 와 EKF에 의한 위치 추정 결과

$P_{IG4}(x, y)$ 의 결과보다 분산이 커지는 부분이 발생한다는 것을 알 수 있다.  $P_{IG4}(x, y)$  또는  $P_{IG3}(x, y)$ 의 정보 중 어느 하나만을 적용하여 좌표 추정을 하면 불필요한 정보의 추가 또는 제거에 의하여 상황에 따른 장단점을 갖는 결과를 보인다.

본 논문에서 제안한 단계 C와 같이 각각의 장점만을 취하기 위한 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS의  $P_{Selec}(x, y)$ 를 이용한 로봇 위치 추정으로 불필요한 정보의 추가 및 제거에 의한 취약점을 보완 할 수 있었으며 실험결과는 그림 17과 같다. 실험 결과와 같이  $P_{IG4}(x, y)$ 와 EKF 로봇 위치 추정 시 발생하는 임펄스 오차 Anchor의 문제를 해결

할 수 있었으며,  $P_{IG3}(x, y)$ 와 EKF 로봇 위치 추정 시 발생하는 정보의 불필요한 제거에 대한 문제점 또한 해결 할 수 있었다. 그림 18과 그림 19는 라이트레이서가 추종한 선을 기준으로 로봇 위치추정 샘플 축별 오차를 보여주고 있다. 두 번째 직선구간을 기준으로 x축 오차를 평가하였으며 첫 번째 직선구간과 세 번째 직선구간을 기준으로 y축 오차를 평가하였다. 라인을 그림 20은 단계별 위치 측위 정보와 EKF 로봇 위치 추정결과와 누적오차를 나타낸다. 누적오차 결과를 통하여 본 논문에서 제안된 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS와 EKF를 이용한 로봇 위치 추정이 일반적인 Indoor GPS를 적용한 결과보다 우수성한 성능을 보임을 확인 할 수 있다.

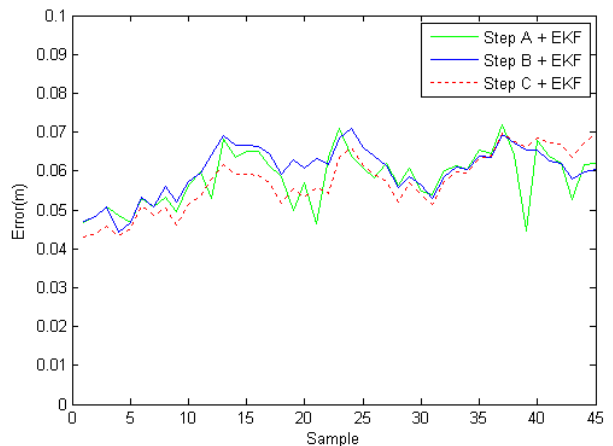


그림 18. 위치 추정 샘플별 누적된 오차 : x축

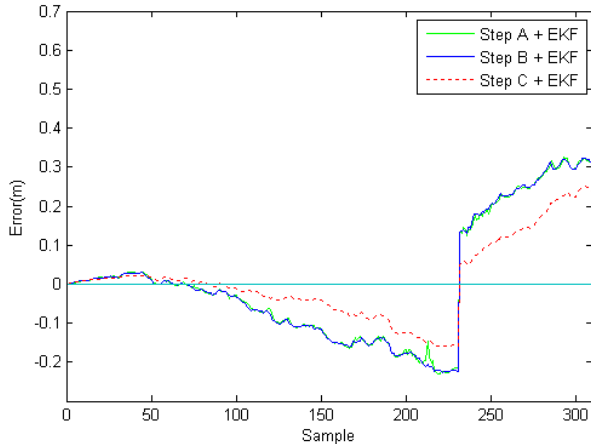


그림 19. 위치 추정 샘플별 누적된 오차 : y축

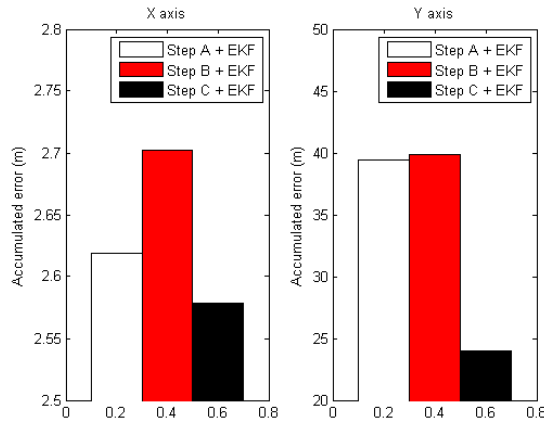


그림 20. 위치 추정 결과별 누적된 오차

## 6. 결론

본 논문에서는 CSS 기반 Indoor GPS 시스템으로 이상적인 환경과 인위적인 다중경로 환경에서의 실험을 통하여 시스템 자체 성능을 평가하였으며, 외부적 오차 유발요소 중에 하나인 다중경로 유발 오차를 제거하기 위하여 물리적인 방법인 지향성 안테나와 전파 차단막을 적용하여 다중경로를 최소로 하는 실험을 통하여 오차감소의 효과를 보여주었다. 또한 Indoor GPS에서 발생하는 임펄스 오차 Anchor 제거를 위하여 EKF에 의해 추정된 로봇 위치를 기준으로 하여 각 Anchor와 Tag 간 거리측정 정확도에 따라서 상황별로 선택적인 Anchor의 정보가 적용 되도록 하였다. 기존 단일 EKF 위치 추정 결과 보다 제안한 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS시스템과 EKF를 이용한 실내 이동 로봇의 위치 추정이 우수한 성능을 보임을 실험을 통하

여 보여주었다. 추후 Anchor의 수를 늘려 최적화된 선택적 Anchor 기반 Indoor GPS시스템에 관한 연구, 제안된 방법과 같이 위치 추정 정밀도에 의존하지 않는 오차 Anchor 식별에 관한 연구와 다양한 위치인식센서와의 융합을 통한 위치 추정의 성능을 향상시키는 연구가 지속적으로 필요하다.

## 참고문헌

- [1] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing", University of Washington, August 2001.
- [2] E. D. Kaplan, Understanding GPS: Principles and Applications, Boston, MA: Artech House, 1996
- [3] Kim Jung Soo, "A Study on the Location Awareness System using TOA(Time of arrival) algorithm", M.S. Thesis, Kwangwoon University, 2007.
- [4] Christof Rohrig, Marcel Muller, "Indoor Location Tracking in Non-line-of Sight Environments Using a IEEE 802.15.4a Wireless Network", Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.552-557, 2009.
- [5] Kim, Eui Seok, "The Ranging Performance fo Chirp Spread Spectrum in Indoor Multipath Environment", M.S. Thesis, Seoul National University, 2008.
- [6] 진조철, "위치 인식 시스템 개발 동향 소개", 정보와 통신 : 한국통신학회지 Vol.25, No.4, pp.5-10, 2008.
- [7] 조현우, 이영훈, 김상우 "Chirp Spread Spectrum 거리 측정을 이용한 이동 로봇의 위치 추정" 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제15권, 제10호, pp.994-1001, 2009.
- [8] 김정민, 김연태, 김성신 "확장 칼만 필터를 이용한 로봇의 실내위치측정" 한국지능시스템 학회 논문지, Vol.18, No.5, pp.706-711, 2008.
- [9] 진태석, 이장명 "이동물체의 기하학적 위치정보를 이용한 자율이동로봇의 위치추정" 퍼지 및 지능시스템학회 논문지, Vol.14, No.4, pp.438-444, 2004.
- [10] IEEE 802.15.4a, "Part 15.4: Wireless Medium Assess Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", 31 Aug. 2007.

- [11] E. Doukhnitch, M. Salamah, E. Ozen, "An efficient approach for trilateration in 3D positioning", Computer Communications 31, pp.4124-4129, Elsevier, 2008
- [12] Hangoon Kang, Geon woong Seo, Jihong Lee, "Error Compensation for CSS-based Localization System", Proc. of Int. Con. on Intelligent Automation and Robotics, Vol.2, pp.696-701, 2009
- [13] Greg Welch, Gary Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter", University of North Carolina Chapel Hill, July 2006
- [14] Howie Choset, Kevin Lynch, Seth Hutchinson, George Kantor, Wolfram Burgard, Lydia Kavraki, Sebastian Thrun, Principles of Robot Motion Theory, Algorithms, and Implementation, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2005



**강 한 구**

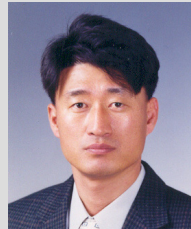
2009 한경대학교 정보제어공학  
과(공학사)  
2011 충남대학교 메카트로닉  
스공학과(석사)  
2011~현재 한국해양연구원 해  
양시스템안전연구소 연  
구원

관심분야 : 로봇틱스, 위치추정  
E-mail : hangoo@cnu.ac.kr



**윤 재 오**

2010 충남대학교 메카트로닉  
스공학과(공학사)  
2010~현재 충남대학교 메카트  
로닉스공학과 석사 과정  
관심분야 : 위치추정, 자율주행  
E-mail : yunjaeho@cnu.ac.kr



**이 지 흥**

1983 서울대학교 전자공학과  
(공학사)  
1985 한국과학기술원 전기 및  
전자공학과 (석사)  
1991 한국과학기술원 전기 및  
전자공학과 (박사)

1994~현재 충남대학교 메카트로닉스 정교수  
관심분야 : 로봇틱스, 위치추정, 경로계획  
E-mail : jihong@cnu.ac.kr