creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000265882

2017년 2월

석사학위논문

IEEE 802.15.4a UWB 기반 실내 위치측정 시스템의 설계 및 구현

조 선 대 학 교 대 학 원

정보통신공학과

김 대 호

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

IEEE 802.15.4a UWB 기반 실내 위치측정 시스템의 설계 및 구현

Design and Implementation of IEEE 802.15.4a UWB based Indoor Positioning System

2017년 2월 24일

조 선 대 학 교 대 학 원

정보통신공학과

김 대 호

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

IEEE 802.15.4a UWB 기반 실내 위치측정 시스템의 설계 및 구현

지도교수 변 재 영

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

정보통신공학과

김 대 호

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

김대호의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 한 승 조 印

위 원 조선대학교 교수 변 재 영 印

위 원 조선대학교 교수 권 구 락 印

2016년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

그 림 목 차 ····· iii
표 목 차 ····· v
Acronyms ····· vi
ABSTRACT ····· vii

Ⅰ. 서 론 ····· 1
A. 연구 배경 및 목적 ····· 1
B. 연구 목표 ····· 2
C. 논문 구성 ····· 2
Ⅱ. 실내 위치측정 기술 ····· 3
A. 신호강도 기반 위치측정 ····· 3
B. 시간 기반 위치측정 ····· 4
1. Angle of arrival (AOA) ····· 4
2. Time difference of arrival (TDOA) ····· 4
3. Time of arrival (TOA) ····· 5
Ⅲ. IEEE 802.15.4a UWB 위치측정 시스템 ····· 6
A. Two way ranging (TWR) ····· 7
1. TWR ····· 7
2. Symmetrical double-sided two way ranging (SDS-TWR) ····· 8
3. 태그 주도형 TWR ····· 9
4. 안테나 지연 보정 ····· 11
B. 삼변측량 ····· 13
1. 삼변측량 ····· 13
2. 개선된 삼변측량 ····· 14
C. IEEE 802.15.4a UWB 태그 ····· 16
1. 하드웨어 구성 ····· 16
2. 위치측정용 MAC 프로토콜 ····· 18
Ⅳ. 성능 평가 및 결과 분석 ····· 19

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

A. 실험 시나리오 ····· 19
1. 고정 대상 위치측정 ····· 20
2. 이동 대상 위치측정 ····· 23
B. 측정 결과 ····· 26
1. 고정 대상 위치측정 ····· 26
2. 이동 대상 위치측정 ····· 35
Ⅴ. 결론 및 향후 연구과제 ····· 43
참고문헌 ····· 45

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 림 목 차

그림 1. Angle of arrival (AOA) 방식 ····· 4
그림 2. Time difference of arrival (TDOA) 방식 ····· 5
그림 3. Time of arrival 방식 (TOA) ····· 5
그림 4. IEEE 802.15.4a UWB 기반 위치측정 시스템 ····· 6
그림 5. IEEE 802.15.4a UWB 기반 위치측정 시스템의 블록도 ····· 6
그림 6. Two way ranging (TWR) ····· 7
그림 7. Symmetrical double-sided two way ranging (SDS-TWR) ····· 8
그림 8. 태그 주도형 TWR ····· 9
그림 9. 안테나 지연 ····· 11
그림 10. 삼변측량 기본개념 ····· 13
그림 11. 실사용 환경의 삼변측량 ····· 14
그림 12. 제안하는 시스템의 위치측정 알고리즘 ····· 15
그림 13. 앵커로 활용된 EVB1000 ····· 17
그림 14. 설계한 UWB 모듈 ····· 17
그림 15. IEEE 802.15.4a UWB 기반 태그 장치 ····· 17
그림 16. 위치측정을 위한 superframe 구조 ····· 18
그림 17. 실내 복도 실험 환경 ····· 19
그림 18. 고정 및 이동 대상의 위치측정 ····· 20
그림 19. 고정 대상의 거리측정 방법 ····· 20
그림 20. 좁은 범위에서 고정 대상 위치측정의 태그와 앵커 배치 ····· 21
그림 21. 중간 범위에서 고정 대상 위치측정의 태그와 앵커 배치 (앵커 3개 사용) 22
그림 22. 중간 범위에서 고정 대상 위치측정의 태그와 앵커 배치 ····· 22
그림 23. 넓은 범위에서 고정 대상 위치측정의 태그와 앵커 배치 ····· 22
그림 24. 이동 대상의 거리측정 방법 ····· 23
그림 25. 좁은 범위에서 이동 대상 위치측정의 태그 경로와 앵커 배치 ····· 24
그림 26. 중간 범위에서 이동 대상 위치측정의 태그 경로와 앵커 배치 (앵커 3개 사용 ····· 25
그림 27. 중간 범위에서 이동 대상 위치측정의 태그 경로와 앵커 배치 ····· 25
그림 28. 넓은 범위에서 이동 대상 위치측정의 태그 경로와 앵커 배치 ····· 25

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 29. 근거리 고정 대상의 거리측정 오차 분포 ····· 26
그림 30. 중거리 고정 대상의 거리측정 오차 분포 ····· 27
그림 31. 장거리 고정 대상의 거리측정 오차 분포 ····· 28
그림 32. 최장거리 고정 대상의 거리측정 오차 분포 ····· 29
그림 33. 좁은 범위의 고정 대상에 대한 위치측정 결과 ····· 30
그림 34. 중간 범위의 고정 대상에 대한 위치측정 결과 (앵커 3개 사용) ····· 31
그림 35. 중간 범위의 고정 대상에 대한 위치측정 결과 ····· 32
그림 36. 넓은 범위의 고정 대상에 대한 위치측정 결과 ····· 33
그림 37. 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE 결과 ····· 34
그림 38. 근거리 이동 대상의 거리측정 결과 ····· 35
그림 39. 중거리 이동 대상의 거리측정 결과 ····· 36
그림 40. 장거리 이동 대상의 거리측정 결과 ····· 37
그림 41. 좁은 범위의 이동 대상에 대한 위치측정 결과 ····· 38
그림 42. 중간 범위의 이동 대상에 대한 위치측정 결과 (앵커 3개 사용) ····· 39
그림 43. 중간 범위의 이동 대상에 대한 위치측정 결과 ····· 40
그림 44. 넓은 범위의 이동 대상에 대한 위치측정 결과 ····· 41
그림 45. 이동 대상에 대한 위치측정 RMSE 결과 ····· 42

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목 차

표 1. Recommended RX power level for antenna calibration ····· 12
표 2. Recommended TX-RX separation for antenna calibration ····· 12
표 3. UWB 트랜시버의 사양 ····· 16
표 4. 실험에 적용된 UWB 물리계층 설정 값 ····· 19
표 5. 근거리 고정 대상 거리측정의 RMSE ····· 26
표 6. 중거리 고정 대상 거리측정의 RMSE ····· 27
표 7. 장거리 고정 대상 거리측정의 RMSE ····· 28
표 8. 최장거리 고정 대상 거리측정의 RMSE ····· 29
표 9. 좁은 범위 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 30
표 10. 중간 범위 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 (앵커 3개 사용) ····· 31
표 11. 중간 범위 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 32
표 12. 넓은 범위 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 33
표 13. 근거리 이동 대상 거리측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 35
표 14. 중거리 이동 대상 거리측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 36
표 15. 장거리 이동 대상 거리측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 37
표 16. 좁은 범위 이동 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 38
표 17. 중간 범위 이동 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 (앵커 3개 사용) ····· 39
표 18. 중간 범위 이동 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 40
표 19. 넓은 범위 이동 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 ····· 41

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Acronyms

IPS :	indoor positioning system
BLE :	bluetooth low energy
RFID :	radio frequency identification
UWB :	ultra wideband
CSS :	chirp spread spectrum
RF :	radio frequency
IMU :	inertial measurement unit
PDR :	pedestrian dead reckoning
RSSI :	received signal strength Indication
AP :	access Point
TOA :	time of arrival
LOS :	line of sight
NLOS :	non-line of sight
TWR:	two way ranging
SDS-TWR:	symmetric double sided two way ranging
RTT :	round trip time
AOA :	angle of arrival
TDOA :	time difference of arrival
PRF :	pulse repetition frequency
MCU :	micro controller unit
TDMA :	time division multiple access
SPI :	serial peripheral interface
OLED :	organic light emitting diode
PHY :	physical layer (of the OSI)
MAC :	media access control
RMSE :	root mean square error

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Design and Implementation of IEEE 802.15.4a UWB based Indoor Positioning System

Kim, Dae-Ho
Advisor : Prof. Pyun, Jae-Young, Ph.D.
Department of Information and Communication Engineering
Graduate School of Chosun University

Nowadays, many people spend most of their life indoor. Thus, positioning and tracking of target at indoor environment have become very important applications. The conventional positioning systems such as global positioning system (GPS) have limited performance at the indoor environment because GPS signal is weakened. For indoor positioning, there are many possible approaches such as WiFi, BLE, Infrared Ray, UWB, and so on.

This thesis discusses a design and implementation of ultra wideband (UWB) positioning system based on IEEE 802.15.4a standard. This IEEE 802.15.4 UWB positioning system uses time based positioning scheme called time of arrival (TOA) to measure the distance from a target tag. In order to measure TOA, a mobile tag performs the two way ranging (TWR) with adjacent 3 fixed anchors. After that, the position of tag is calculated by trilateration using distance between tag and each anchor. This thesis introduces a practical TWR algorithm and trilateration method for indoor positioning system. Also, the thesis shows the result of performance evaluation of the proposed UWB based positioning system. The experimental results validate that the proposed IEEE 802.15.4a UWB based positioning system measures the moving tag's position with tolerable error of 1m.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

I. 서 론

A. 연구 배경 및 목적

최근, 자동차 내비게이션부터 스마트폰, 로봇에 이르기까지 기술의 발전에 따라 위치 정보의 수요가 폭발적으로 늘어가고 있다. 현재 위치 인식 기술을 대표하고 있는 GPS (global positioning system)는 인공위성을 이용하여 대상의 위치를 측정하게 되는데 인공위성의 신호가 약해지는 지하나 빌딩 등의 실내 환경에서는 사용할 수 없다. 대다수의 현대인이 실내에서 생활하는 시간이 많은 만큼 실내 환경에서 사용할 수 있는 실내 위치측정 시스템 (indoor positioning system : IPS)이 필요하다 [1]. 실내 위치측정 방법으로는 Wi-Fi fingerprinting, BLE (bluetooth low energy) beacon, RFID (radio frequency identification), UWB (ultra wideband), CSS (chirp spread spectrum) 등의 RF (radio frequency)를 이용한 방법과 적외선, 초음파, RiFi, IMU PDR 등의 비 RF 방식이 있다 [2]. 이들 중 RF를 이용한 무선 위치측정 시스템은 비교적 간편한 방법으로 정밀도 있는 위치 측정 결과를 제공하게 되는데, 크게 수신신호강도 (received signal strength indicator : RSSI)를 이용한 방법과 전파지연시간을 이용한 시간 기반 방법으로 나눌 수 있다. RSSI 방식을 이용하는 Wi-Fi fingerprinting 은 Wi-Fi가 보편화 되면서 늘어난 Wi-Fi의 AP (access point) 기기들로부터 수신되는 RF 신호의 세기를 이용하는 방법이며, BLE beacon 은 BLE의 beacon frame을 주기적으로 송신하는 디바이스를 이용한 방법이다. 이들은 수신 신호의 세기를 측정, 거리에 따른 경로 손실을 고려한 전파모델을 이용하여 거리를 추정하는 방식이다. RSSI를 사용한 위치 추정의 정확성은 RSSI의 측정의 정확성과 환경에 따른 경로 손실 모델의 정확성, 실제 환경에 따라 달라진다. 즉, 환경에 따라 측정된 RSSI 값이 경로 손실 모델로 추정된 거리의 변화가 안정적이지 못할 수 있다. 이는 수신 노드와 AP 간의 안테나의 방향성, NLOS (non-line of sight) 환경, 공간의 재질에 신호의 경로손실이 영향을 받기 때문이다. 따라서 RSSI 방식을 사용한 위치 인식방법은 상대적으로 낮은 위치 측정 정확성 및 안정성을 제공한다 [3]. 반면, 시간 기반 방식을 이용하는 UWB와 CSS는 위치 측정 메시지를 교환하여 걸리는 시간을 통해 거리를 계산하므로 비교적 정확하다. 시간 기반 방식을 사용할 경우 다중경로 상에서 수신되는 신호 중 최단거리 신호의 구별이 쉬워야 하고 기기 간 정확한 시간 측정이 요구되어진다. 이러한 요구

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에 충족되는 것이 IEEE 802.15.4a 표준이다. IEEE 802.15.4a는 저속 무선 개인영역 네트워크 (low-rate wireless personal area network) 표준의 일부로 고 정밀 위치 기능을 포함하고 있다 [4]. IEEE 802.15.4a 의 물리 계층중 하나인 UWB는 나노초의 길이를 갖는 매우 짧은 펄스 (impulse radio)를 이용하여 통신을 하므로 시간 분해능이 매우 높아 최단 경로와 다중 경로간의 신호구별이 용이하여 수 cm 이내의 정확도로 거리 측정이 가능하고 낮은 전력밀도로 인해 저전력으로 대용량 데이터를 전달할 수도 있다. 또한 신호도달 거리가 비교적 길고 건물의 얇은 벽이나 비금속 칸막이 등을 통과할 수 있어 실내 위치 인식에 적합하다.

B. 연구 목표

본 논문에서는 IEEE 802.15.4a UWB 태그와 앵커를 활용하여 움직이거나 정지된 태그의 실시간 거리 측정 및 위치 측정 시스템을 설계하고 구현한다. 움직이는 대상의 실시간 위치 측정 및 거리 측정을 위하여 위치 인식을 하고자 하는 범위와 대상에 각각 UWB 트랜시버를 포함한 앵커와 태그를 장치하고 양방향 거리측정 (two way ranging : TWR)을 통해 고정 앵커와 태그 간의 거리를 측정한 후, 삼변측량 (trilateration)을 통해 대상의 위치를 계산한다. 삼변측량은 대상인 태그와 미리 알려진 위치에 존재하는 앵커 노드와의 거리를 기반으로 대상의 위치를 결정하는 알고리즘으로 통신이 가능한 범위 내에 최소 3개 이상의 거리 측정 정보가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 삼변측량을 위한 UWB 위치 인식 시스템을 구현하고 그 성능을 높이기 위한 방법을 연구한다.

C. 논문 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서 실내 위치측정 기술에 대하여 논하고, 제 III장에서 IEEE 802.15.4a UWB 기반 위치측정 시스템에 대하여 기술하며, 제 IV장에서 구현된 위치측정 시스템의 성능 평가 및 결과 분석을 한다. 마지막으로 제 V장에서 결론을 맺는다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

II. 실내 위치측정 기술

실내 위치 측정 시스템은 폭발 하는 위치 정보 수요에 맞춰 실내 환경에서도 정확한 위치 정보를 제공하는 것을 목표로 한다. 실내에서 대상의 위치를 2D 또는 3D로 측정하기 위해서는 미리 정의되어 있는 위치에 존재하는 앵커로 부터 대상이 어느 정도 떨어져 있는지 또는 어느 방향에 존재하는지 알아야 한다. 대부분의 실내 위치측정 시스템은 이러한 접근법으로 얻어진 정보를 기반으로 측량알고리즘에 적용하여 대상의 위치를 계산해낸다. 실내 위치측정 시스템을 설계 또는 구현하기 위해서는 많은 방법이 존재하지만 크게 무선 신호강도를 기반으로 하는 위치측정과 시간을 기반으로 하는 위치측정으로 나눌 수 있다.

A. 신호강도 기반 위치측정

무선 신호강도 또는 RSSI 방식은 미리 정의된 위치에 존재하는 무선기기의 송출신호를 수신기에서 수신하여 그 신호의 세기를 거리로 환산하여 측량에 이용한다. 신호세기의 거리 환산은 대개 무선기기가 신호를 송출할 때의 전력을 대하여 그 신호의 자유공간 전파 특성에 따라 전송된 신호가 어떻게 감쇠가 일어나는지에 기초한다 [5][6]. 수식 (2.1)은 전파의 경로 손실과 거리와의 관계를 나타내는 Friis 공식이다. L은 경로 손실이며, λ는 전파의 파장, d는 송신기와 수신기 사이의 거리이다 [7].

$$L = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) [dBm] \tag{2.1}$$

실제 RSSI를 활용한 방식은 사용되는 환경 및 신호의 사용 주파수 등 물리적인 조건에 따라 다르게 적용된다. 즉, 무선기기의 안테나, 배치, 배치 장소의 장애물 및 재질 등에 영향을 받아 정밀한 위치 정보 제공이 어렵다. 그러나 기술적으로 낮은 복잡도로 인해 인프라 구성이 쉽고 저가에 위치 서비스를 제공할 수 있는 장점이 있다. 따라서 특정 상황에서 충분한 위치 정보를 제공하기도 하지만, 일반적으로 높은 정확도가 요구되는 경우에는 다른 기술 (적외선, 초음파 등)과의 융합을 통해 성능을 향상시켜 적용하기도 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

B. 시간 기반 위치측정

시간 기반 위치측정은 대표적으로 AOA (angle of arrival), TDOA (time difference of arrival), TOA (time of arrival)의 3가지 기법이 존재하는데 이 기술들은 서로 다른 위치에 존재하는 무선기기간의 통신 신호의 도달시간 및 전파 시간의 측정을 통해 거리 및 각도로 환산하여 측량에 이용 한다. 따라서 시간 기반 위치측정 시스템은 무엇보다 정확한 시간측정이 성능에 큰 영향을 미치는 만큼 적용되는 기술의 정밀한 시간 측정 기능을 요구한다.

1. Angle of arrival (AOA)

AOA는 태그와 고정 앵커 간의 방향각을 이용하여 태그의 위치를 계산하는 방식으로 고정 앵커는 태그가 송출하는 신호를 수신하여 어레이 안테나를 이용, 각 안테나별 수신된 신호의 시간차이를 통해 수신 신호의 방향을 측정하고 그 각들이 이루는 교점을 태그의 위치로 계산하는 알고리즘이다. 그림 1은 AOA 방식을 도시화 한 것이다.

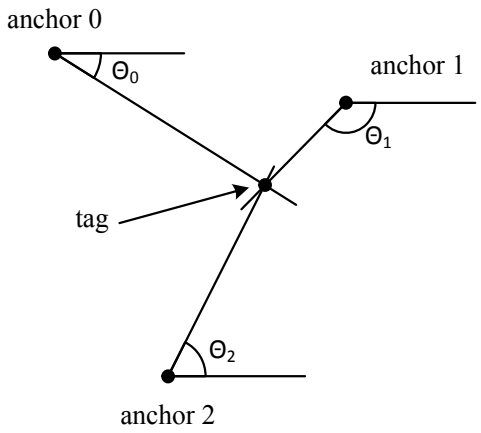

그림 1. Angle of arrival (AOA) 방식

2. Time difference of arrival (TDOA)

TDOA는 시간이 동기화된 3개 이상의 앵커에서 태그가 송출하는 신호를 수신하여 그 차이를 측정하여 앵커간 거리차가 일정한 지점을 찾아 태그의 위치로 계산하는 방식으로 최초 태그의 신호를 수신하는 앵커는 TOA와 같은 방식으로 시간을 측정하지만

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 이후에 도달한 앵커는 각각의 앵커에서 측정된 시간의 차이를 거리로 환산하여 그림 2와 같이 쌍곡선을 만들고 그것들의 교점을 태그의 위치로 계산하는 알고리즘이다.

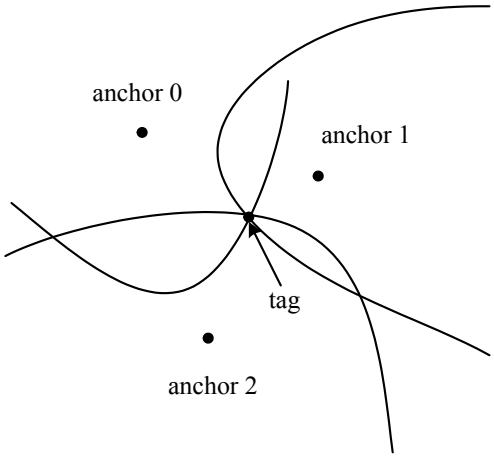

그림 2. Time difference of arrival (TDOA) 방식

3. Time of arrival (TOA)

TOA는 신호가 도달하는 시간을 이용해서 위치를 측정하는 방식으로 3개 이상의 앵커와 태그간의 메시지 교환을 통한 신호의 도달시간을 측정하고 이것을 그림 3과 같이 거리로 환산하여 앵커의 위치가 중심이 되고 환산된 거리가 반지름이 되는 원을 그려 이 원들의 교점을 태그의 위치로 계산하는 알고리즘이다. 본 논문에서 구현된 위치 측정 시스템에서 사용하는 방식이다.

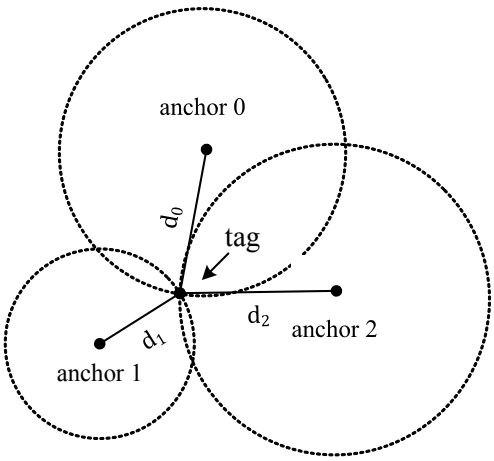

그림 3. Time of arrival (TOA) 방식

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

III. IEEE 802.15.4a UWB 위치측정 시스템

IEEE 802.15.4a UWB 기반 위치측정 시스템은 고정 노드인 앵커와 이동 노드인 태그간의 위치측정용 메시지의 왕복시간인 TOA를 이용하여 거리를 측정하고 삼변측량을 통해 태그의 위치를 실시간으로 측정, 제공하는 시스템이다. 그림 4는 실내 환경에서 사용자의 위치를 측정하기 위해 위치측정 구역에 앵커를 배치하고 태그를 통해 위치정보를 제공받는 사용자의 모습을 도시한 것이다. 여기서 태그는 위치측정을 위해 그림 5와 같이 각각의 앵커와의 거리를 TWR을 통해 측정하고, 미리 정의한 앵커의 위치와 함께 삼변측량을 수행한다. 추가적으로, 태그의 위치를 2차원 평면의 좌표로 나타내기 위해서는 3개 이상의 앵커를 필요로 한다.

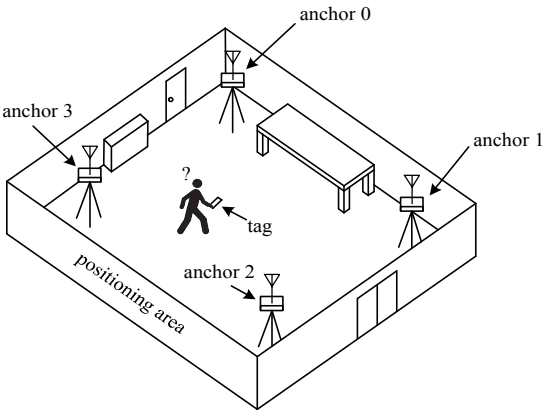

그림 4. IEEE 802.15.4a UWB 기반 위치측정 시스템

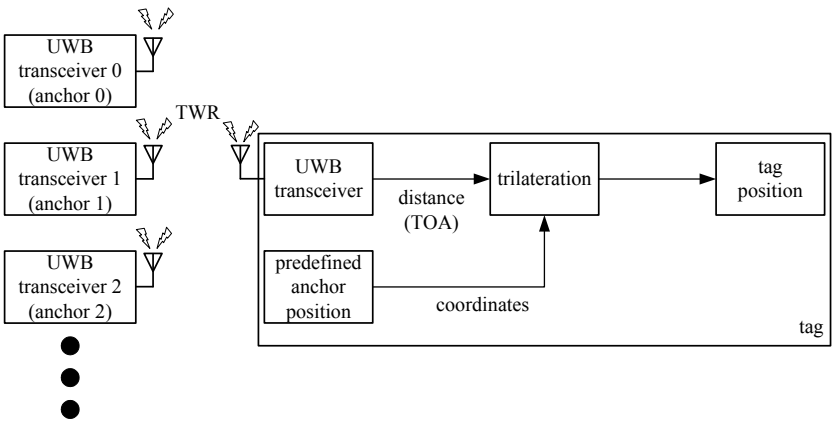

그림 5. IEEE 802.15.4a UWB 기반 위치측정 시스템의 블록도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

A. Two way ranging (TWR)

1. TWR

TWR은 무선기기간의 거리를 측정하기 위한 메시지 교환 알고리즘으로 그림 6과 같이 동작한다. 노드 A는 노드 B에게 거리측정용 메시지를 송신하고, 노드 B는 노드 A로부터 수신한 메시지에 대한 응답 메시지를 송신한다. 노드 A 역시 노드 B가 송신한 응답 메시지를 수신하며 메시지 교환을 끝낸다. 이 때, 노드 A가 거리측정용 메시지를 송신한 순간부터 노드 B의 응답 메시지를 수신했을 때의 시간, 즉 거리 측정 메시지의 왕복시간 (round trip time : RTT)을 t_{roundA}라 하고, 노드 B의 응답시간 또는 처리시간 (processing time)을 t_{replyB} 라 할 때, 거리 측정 메시지와 응답 메시지로 이루어진 신호의 전파시간은 수식 (3.1)로 나타낼 수 있다 [8][9][10].

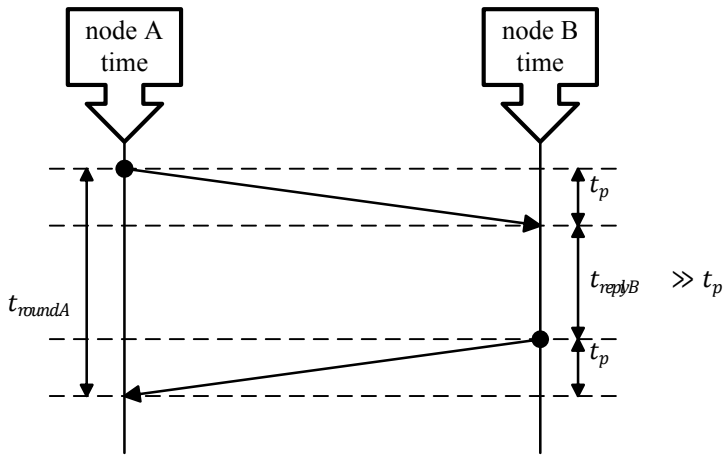

그림 6. Two way ranging (TWR)

$$TOA(t_p) = \frac{t_{roundA} - t_{replyB}}{2} \tag{3.1}$$

따라서 거리 측정 메시지의 단방향 도달 시간 t_p는 두 기기간의 TOA가 되며 두기기간의 거리는 d는 수식 (3.2)와 같다. 여기서 c는 자유 공간의 전파의 전파속도인 광속도이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$d = TOA \times c \ \ (c, 299792485[m/s]) \tag{3.2}$$

2. Symmetrical double-sided two way ranging (SDS-TWR)

순수한 TWR은 두기기간의 하드웨어적 차이로 인해 시간측정이 달라 TOA에 오차가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 고안 된 방법이 SDS-TWR (symmetrical double-sided two way ranging) 이다. SDS-TWR은 서로 대칭적으로 TWR을 수행하며 각각 방향에서 TOA를 측정하여 기기 간 측정오차를 저감 한다 [11][12].

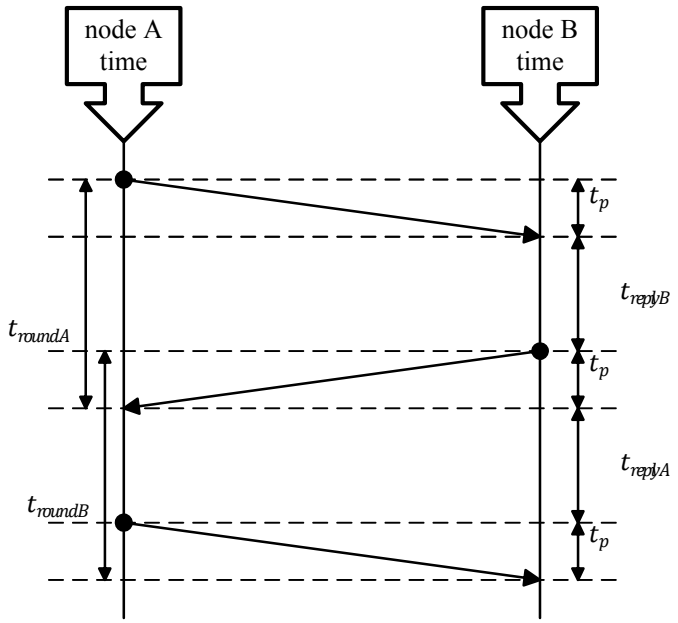

그림 7. Symmetrical double-sided two way ranging (SDS-TWR)

그림 7은 노드 A와 노드 B 간의 거리를 측정하기 위해 SDS-TWR을 수행하고 있는 것을 도시화 한 것이다. TOA를 계산하기 위해 노드 A가 거리측정용 메시지를 보내고 노드 B가 응답하는 것은 순수한 TWR과 동일하지만 SDS-TWR은 노드 B가 응답 메시지를 보낸 후 그것에 대한 응답을 노드 A가 함으로써 총 3번의 메시지 교환이 이루어지는 것에서 차이가 있다. 따라서 SDS-TWR을 수행할 경우 노드 A의 거리측정용 메시지 왕복시간 t_{roundA}와 노드 B의 응답시간 t_{replyB}, 그리고 노드 B의 응답 메시지의 왕복시간 t_{roundB}와 노드 A의 응답시간 t_{replyA}의 총 4개의 시간정보를 관측할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$TOA_{nodeA} = \frac{t_{roundA} - t_{replyB}}{2} \tag{3.3}$$

$$TOA_{nodeB} = \frac{t_{roundB} - t_{replyA}}{2} \tag{3.4}$$

$$TOA_{avg} = \frac{TOA_{nodeA} + TOA_{nodeB}}{2} \tag{3.5}$$

수식 (3.3)과 (3.4)는 SDS-TWR을 통해 관측된 4개의 시간 정보를 토대로 계산 된 노드 A와 노드 B의 TOA를 나타낸다. 또한 수식 (3.5)는 두 기기에서 측정된 TOA의 평균으로 기기간 시간측정의 오차가 보정된 결과이다.

3. 태그 주도형 TWR

본 논문에서는 SDS-TWR을 통해 태그와 앵커간의 거리를 측정하였으며 태그의 소비전력을 효율적으로 조절하기 위해 위치측정 메시지 교환을 태그가 먼저 시작하도록 구현하였다.

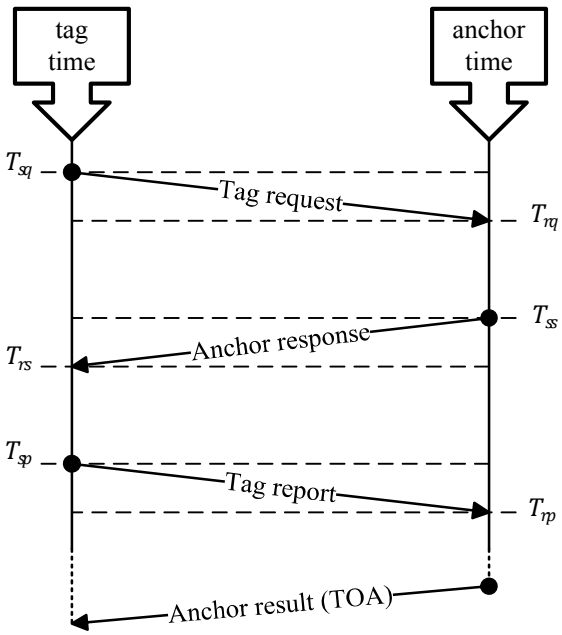

그림 8. 태그 주도형 TWR

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 8은 실제 시스템에 적용된 태그 주도형 TWR로 태그의 거리측정에 대한 요청 메시지와 앵커의 응답 메시지 그리고 태그의 리포트 메시지와 TOA 계산 결과를 공유하기 위한 앵커의 결과 메시지로 구성된다. 동작은 최초 태그가 앵커에게 거리 측정을 요청하는 메시지를 송신하며 시작된다. 거리 측정의 시작인 태그의 요청 메시지는 태그를 식별하기 위한 ID를 포함하고 있으며 이후 SDS-TWR 방식으로 메시지를 교환하게 된다. 또한 송수신 동작마다 IEEE 802.15.4a UWB의 물리계층 (PHY)에서 제공되는 time stamp를 각각의 기기에서 저장한다. 이러한 time stamp는 IEEE 802.15.4a UWB의 위치측정을 위한 기능으로써 송수신 동작에 대한 시간 지표이다.

TOA 계산을 위해서는 왕복시간과 응답시간이 필요로 하며 각각의 기기에서 측정된 time stamp를 취합하여 계산할 수 있다. 따라서 태그는 두 번째 송신 동작인 리포트 메시지를 보낼 때 자신에게 관측된 3개의 time stamp 즉, 거리측정에 대한 요청 메시지 송신 time stamp T_{sq} , 응답 메시지 수신 time stamp T_{rs}, 리포트 메시지 송신 time stamp T_{sp}를 함께 전송한다. 이 메시지를 수신한 앵커는 그 시점의 time stamp T_{rp}, 거리측정에 대한 요청 메시지 수신 time stamp T_{rq}, 응답 메시지 송신 time stamp T_{ss}와 전송된 태그의 time stamp를 취합하여 6개의 time stamp를 통해 TOA를 계산하게 된다. 수식 (3.6)~(3.9)는 태그와 앵커의 6개의 time stamp를 통해 SDS-TWR에서 필요로 하는 왕복시간과 응답시간을 구한 것으로 수식 (3.6)은 태그의 왕복시간을, 수식 (3.7)은 앵커의 응답시간을, 수식 (3.8)은 앵커의 왕복시간을, 수식 (3.9)는 태그의 응답시간을 나타낸다.

$$t_{roundT} = T_{rs} - T_{sq} \tag{3.6}$$

$$t_{replyA} = T_{ss} - T_{rq} \tag{3.7}$$

$$t_{roundA} = T_{rp} - T_{ss} \tag{3.8}$$

$$t_{replyT} = T_{sp} - T_{rs} \tag{3.9}$$

수식 (3.10)은 태그 측에서 측정된 TOA이며 수식 (3.11)은 앵커 측에서 측정된 TOA 이다. 따라서 평균 TOA는 수식 (3.12)와 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$TOA_{tag} = \frac{t_{roundT} - t_{replyA}}{2} = \frac{(T_{rs} - T_{sq}) - (T_{ss} - T_{rq})}{2} \quad (3.10)$$

$$TOA_{anchor} = \frac{t_{roundA} - t_{replyT}}{2} = \frac{(T_{rp} - T_{ss}) - (T_{sp} - T_{rs})}{2} \quad (3.11)$$

$$TOA = \frac{TOA_{tag+} TOA_{anchor}}{2} \quad (3.12)$$

TOA가 계산 된 후 앵커는 그 결과를 태그에게 전송하게 되는데 이는 시스템의 확장성을 위한 것으로 모바일 노드인 태그의 위치를 스스로 파악하고 또 외부의 앵커에서도 태그의 위치를 추적할 수 있도록 설계하기 위한 것이다.

4. 안테나 지연 보정

UWB 트랜시버에서 측정되는 time stamp는 트랜시버 IC 와 안테나 사이의 전파 지연시간이 포함되어 있다. 이러한 지연시간은 송신 안테나와 수신 안테나에서 모두 발생하며 이는 안테나의 종류에 따라 독립적으로 나타난다.

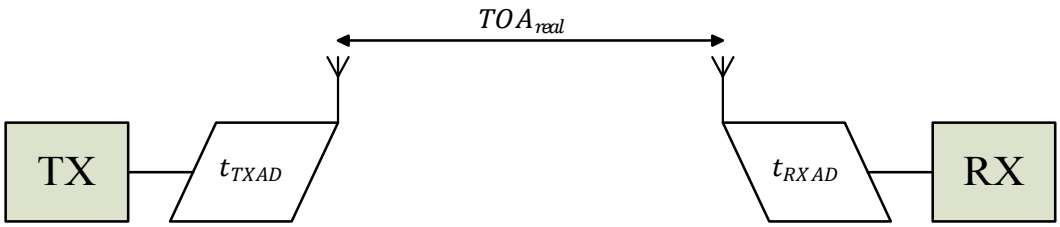

그림 9. 안테나 지연

$$TOA_{measured} = t_{TXAD} + TOA_{real} + t_{RXAD} \quad (3.13)$$

그림 9는 송신기와 수신기간의 안테나로 인한 지연시간을 도시한 것이며 수식 (3.13)은 측정된 TOA 결과로 송신기 안테나 지연시간 t_{TXAD}, 실제 자유공간 전파 시간 TOA_{real} 그리고 수신기 안테나 지연시간 t_{RXAD}으로 이루어져 있다. 본 논문에서는

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

보다 정확한 거리 측정 정보를 얻기 위해 UWB 트랜시버 제조사인 decawave사의 antenna calibration을 적용하였다. decawave사의 antenna calibration은 송신기가 출력 -41.3dBm/MHz, 0dBi 안테나를 사용할 때 입력되는 신호의 세기를 표 1과 같이 나타나도록 수신기를 배치하고, 동시에 위치측정 결과가 표 2와 유사해지도록 안테나 지연시간을 조절하는 것이다 [13]. 표 1과 표 2는 각각 안테나 지연 시간을 보정하기 위해 제조사에서 권장하는 수신기에 입력되는 신호세기와 해당 조건에서의 송신기와 수신기 사이의 거리이다.

표 1. Recommended RX power level for antenna calibration

power at receiver input (dBm/MHz)	PRF (MHz)	channel
-108	16	1,2,3,5
-104	64	1,2,3,5
-102	16	4,7
-102	64	4,7

표 2. Recommended TX-RX separation for antenna calibration

channel	PRF (MHz)	calibration Separation (m)
1	16	14.75
1	64	9.3
2	16	12.9
2	64	8.14
3	16	11.47
3	64	7.24
4	16/64	8.68
5	16	7.94
5	64	5.01
7	16/64	5.34

본 논문에서는 태그와 앵커가 서로 다른 안테나를 사용하므로 안테나 지연 보정이 반드시 필요하다. 앵커의 경우 제조사에서 제공하는 모듈을 사용하여 기본 설정 값을 적용하였으며 태그의 경우 antenna calibration을 적용하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

B. 삼변측량

1. 삼변측량

거리 정보 기반 측량 기법중 하나인 삼변 측량은 3개의 고정된 무선 장치와 대상이 되는 무선 장치 간의 거리정보를 토대로 위치를 계산한다. 수식 (3.14)와 그림 10은 고정 앵커 3개로부터 태그 간의 거리를 통해 생성된 원의 교점을 태그의 위치로 계산하는 삼변측량의 기본개념을 보여준다 [14].

$$\begin{cases} d_0 = \sqrt{(x_0 - x_t)^2 + (y_0 - y_t)^2} \\ d_1 = \sqrt{(x_1 - x_t)^2 + (y_1 - y_t)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - x_t)^2 + (y_2 - y_t)^2} \end{cases} \tag{3.14}$$

이는 기하학에서 말하는 원의 중심과 반지름을 통해 생성된 원의 방정식으로 만약 3개의 원이 서로 한 개의 점에서 만난다고 할 때 이 점은 3개의 원을 나타내는 방정식의 연립 해가 된다. 여기서 각 원의 중심점은 고정 앵커의 절대 위치 값(좌표) 이며 태그와의 거리는 원의 반지름으로 표현된다. 수식 (3.14)와 그림 10에서 d_0, d_1, d_2는 각각의 앵커와 태그간의 거리이며, (x_0:x_1:x_2, y_0:y_1:y_2)는 3개의 앵커의 위치이다. 그리고 (x_t, y_t)는 측량을 통해 구하고자 하는 태그의 상대 위치이다.

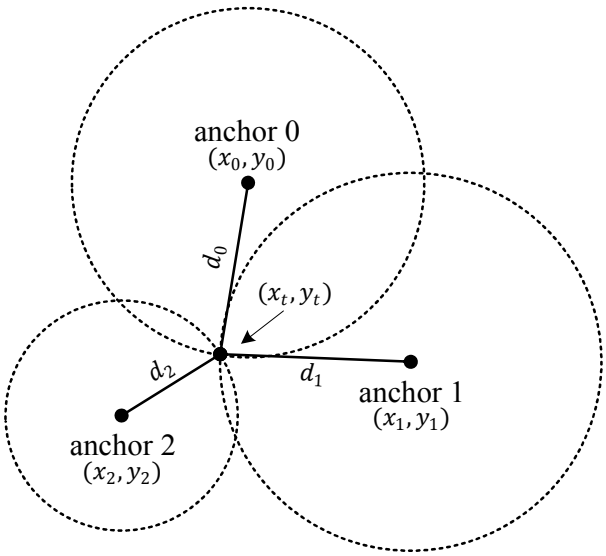

그림 10. 삼변측량 기본개념

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 개선된 삼변측량

본 논문에서는 태그의 위치를 기본적인 삼변측량을 응용한 방법으로 측정하였다. IEEE 802.15.4a UWB 시스템에서는 TWR 알고리즘을 통해 앵커와 태그의 거리를 정밀 측정하지만 무선 시스템의 특성상 오차가 존재한다. 이러한 환경에서 기본적인 삼변측량을 적용할 경우 앵커들이 만드는 원의 하나 된 교점을 찾을 수 없어 측량이 실패하게 된다 [15]. 그림 11은 실사용 환경의 삼변측량을 보여주고 있다. 각 앵커와 태그 간의 거리는 실제 거리 d에 오차 e가 포함되어 측정 된다 [16]. 이러한 오차는 대개 양수로써 NLOS의 다중경로로 인해 최단거리보다 먼 거리가 측정되는 것이다. 본 논문의 시스템에서는 이러한 환경에서 태그의 위치를 측정하기 위해 각 원에서 생성되는 교점 c_0, c_1, c_2와 i_0, i_1, i_2에서 c_0, c_1, c_2가 이루는 삼각형의 무게중심을 태그의 위치로 적용하였다.

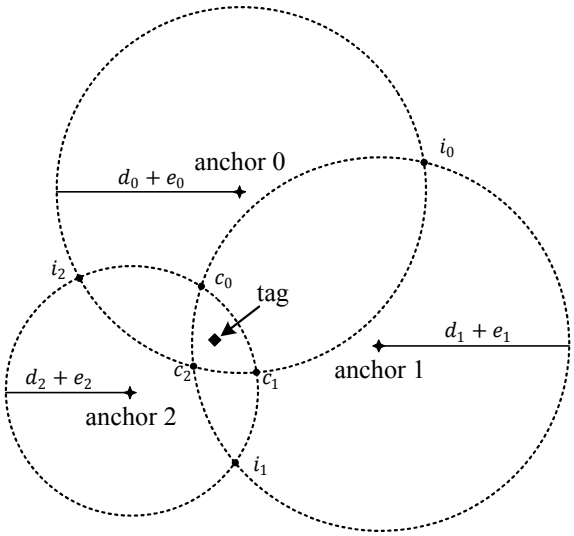

그림 11. 실사용 환경의 삼변측량

그림 11에서 생성된 6개의 교점 중, 중앙의 교점 3개를 구하기 위해서 두 개의 앵커가 만드는 원의 교점을 먼저 계산한 후 생성된 두 개의 교점 c 와 i 중 또 다른 앵커의 중심점과 가까운 교점인 c를 선택하도록 하였다. 이 때, 교점 c_0, c_1, c_2 가 생성되지 않을 경우는 삼변측량이 실패한 경우로 특정 앵커와의 거리측정에 다중경로 오차가 크게 포함되었거나, 시스템의 오류로 실제 거리보다 적게 측정된 경우이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 12는 제안하는 시스템의 위치측정 알고리즘으로 4개의 앵커와 각각 TWR을 수행한 후, 측정된 거리를 기준으로 태그와 근접한 앵커 3개의 결과를 우선적으로 삼변측량에 적용한다. 여기서, 삼변측량에 성공할 경우 위치정보를 업데이트하고 삼변측량이 실패할 경우 그림 11에서 원의 반지름인 측정된 거리 d_0+e_0, d_1+e_1, d_2+e_2를 각각 추가 거리 D_{extra} 만큼 증가시켜 교점 생성을 유도하고 삼변측량을 반복한다. 그리고 컴퓨팅 오버헤드를 줄이기 위하여 반복 횟수 N_{count}를 $N_{\max}$로 제한하였다. 구현된 시스템에서는 추가 거리 D_{extra}를 0.1m, 반복횟수 $N_{\max}$는 5회로 적용하였다.

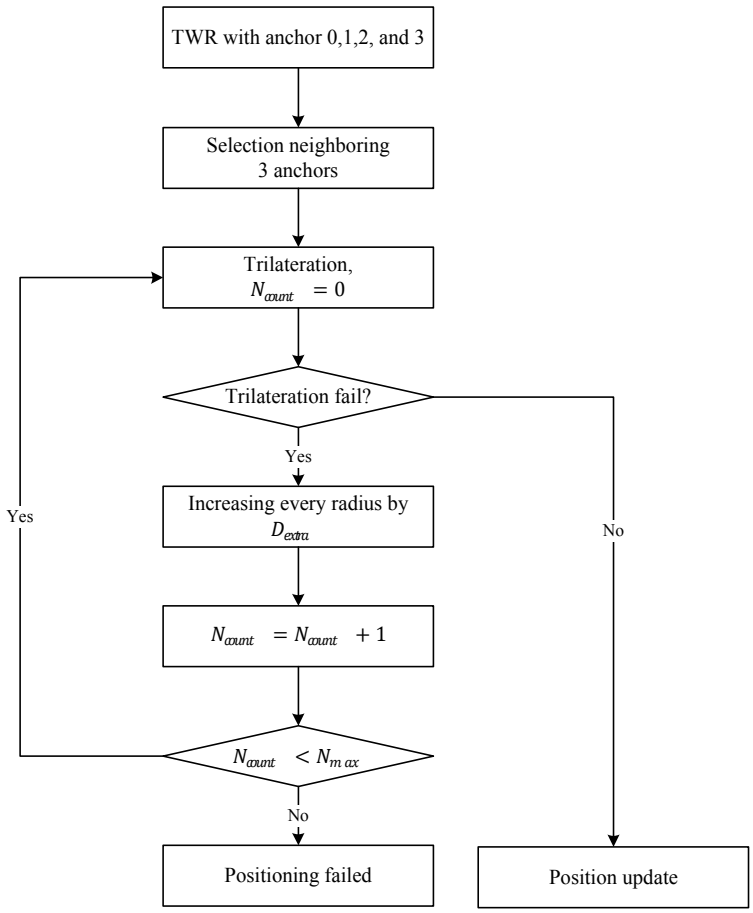

그림 12. 제안하는 시스템의 위치측정 알고리즘

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

C. IEEE 802.15.4a UWB 태그

1. 하드웨어 구성

IEEE 802.15.4a UWB 기반의 위치 측정을 위해서 실험에 사용된 UWB 트랜시버는 decawave사의 제품을 사용했다. decawave사는 IEEE 802.15.4a UWB 물리계층을 호환하는 RF 칩인 DW1000을, 그와 함께 안테나가 내장된 모듈로 DWM1000을 출시하고 있다. 또한 DW1000 칩을 평가하기 위해 RF단과 드라이브용 MCU를 포함 모듈인 EVB1000을 판매하고 있다 [13]. 본 논문에서는 고정 앵커로 EVB1000을, 태그로 DWM1000을 이용해 직접 설계한 모듈을 사용한다. 표 3은 UWB 트랜시버 칩의 사양이다.

표 3. UWB 트랜시버의 사양

parameter	unit
data rate	110 kbps, 850 kbps, 6.8 Mbps
operation frequency	3.5 ~ 6.5 GHz (6 bands)
preamble length	64 us to 4 ms
packet sizes	up to 1023 bytes
modulation	BPM with BPSK

그림 13은 앵커 노드로 이용된 EVB1000 모듈이다. UWB 안테나인 WB002, UWB RF 칩인 DW1000, 호스트 MCU인 STM사의 STM32F105RC 그리고 입출력 인터페이스인 스위치와 LCD 로 구성되어 있다 [13]. 그림 14는 태그로 활용하기 위해 설계한 UWB 모듈이며 안테나 내장 제품인 DWM1000과 호스트 MCU인 STM 사의 STM32F105RC 그리고 범용 입출력 포트와 스위치로 구성하였다. DWM1000 SPI를 이용하여 드라이브되며 그것을 통해 time stamp 등의 물리계층 데이터를 MCU로 전달한다. 호스트 MCU인 STM32F105는 ARM사의 Cortex M3 기반의 MCU로써 거리 측정(TWR)을 MAC 프로토콜에 따라 동작한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

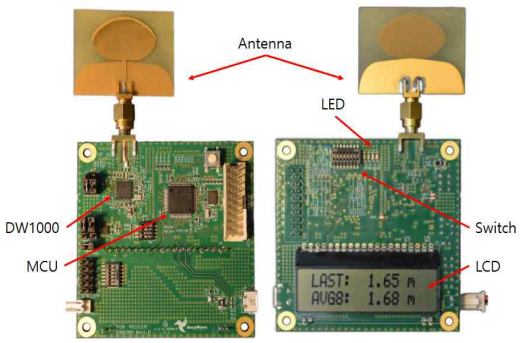

그림 13. 앵커로 활용된 EVB1000

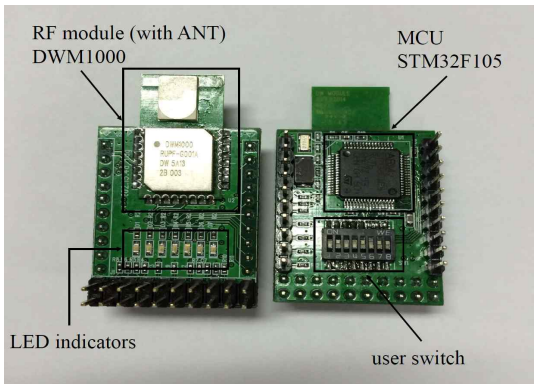

그림 14. 설계한 UWB 모듈

추가적으로, 설계된 UWB 모듈의 성능평가를 위해 위치측정 단말기를 그림 15와 같이 제작하였다. 앵커와의 거리 정보를 제공할 UWB 모듈과 위치측정 알고리즘이 적용된 main MCU (NXP사, LPC1768), 데이터 입출력용 bluetooth 장치와 OLED (organic light emitting diode) display, 실험의 편의를 위한 버튼으로 구성되어 있다.

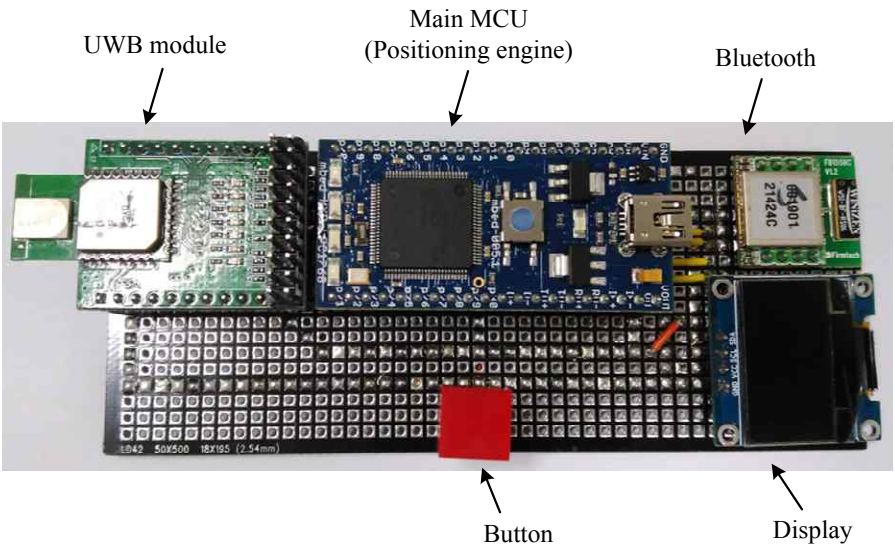

그림 15. IEEE 802.15.4a UWB 기반 태그 장치

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 위치측정용 MAC 프로토콜

물리적으로 같은 채널에서 태그는 최소 3개의 앵커와 위치측정 메시지를 교환하여야 하므로 그 동안 다른 기기로부터 충돌이 일어나서는 안 된다. 따라서 본 논문에서는 다중 태그를 지원하기 위해 시간 축에서 채널 자원을 분할하는 TDMA (time division multiple access) 방식으로 superframe 을 구성하여 그 안에 타임 슬롯을 할당하였다 [17][18]. 앵커는 유휴상태로 태그의 위치측정 메시지를 기다리며 태그는 자신의 타임 슬롯에서 거리 요청 메시지를 전송하게 된다. 이 과정에서 모든 태그는 자신의 타임 슬롯에 할당되기 위해 0번 앵커 (anchor 0) 로부터 타임 슬롯에 맞는 휴식시간을 부여받는다. 그림 16은 본 논문에서 사용된 UWB 태그와 앵커간의 동작을 나타낸 것으로 1개의 superframe 에 N개의 타임 슬롯이 구성되었으며 타임 슬롯 1개당 1개의 태그만을 할당하여 간섭 및 충돌을 없앴다. 또한 1개의 타임 슬롯은 고정된 앵커 4개와 각각 TWR을 수행하는 시간이며, TWR의 시간은 거리 측정 메시지와 응답 메시지, 리포트 메시지, 결과 메시지 그리고 가드 타임의 합산 시간이다. 본 논문에서는 가드 타임을 포함한 TWR의 메시지 교환 시간을 UWB 물리계층의 data rate에 따라 최적의 시간인 2ms로 하였다. 따라서 TWR을 4회 실행하는 타임 슬롯의 주기는 8ms 이다.

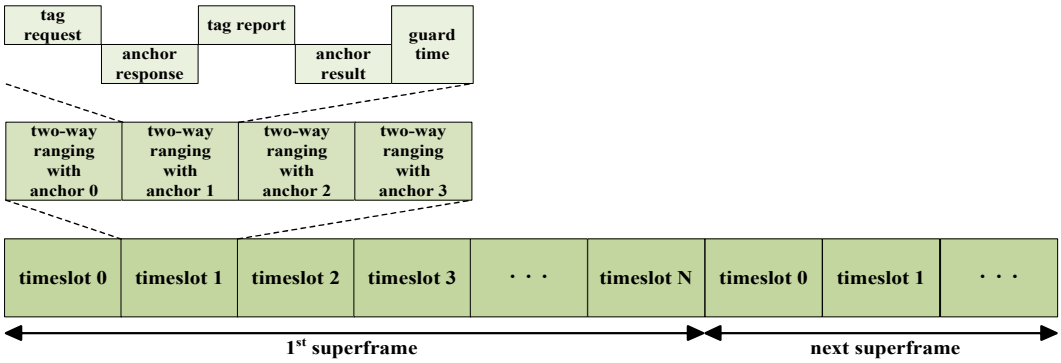

그림 16. 위치측정을 위한 superframe 구조

태그의 위치는 앵커들과의 TWR이 모두 끝나고 측정된 거리를 기반으로 삼변측량 알고리즘에 적용하기 때문에 위치 정보가 새롭게 갱신되는 주기는 자신의 타임 슬롯이 돌아오는 주기로써 superframe의 주기와 같다. 본 논문에서는 그림 16의 타임 슬롯의 개수를 6개로 제한하여 superframe의 주기를 약 50ms로 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

IV. 성능 평가 및 결과 분석

A. 실험 시나리오

구현된 IEEE 802.15.4a UWB 기반의 실시간 위치 시스템의 성능평가를 위하여 그림 18과 같이 대상을 고정 또는 이동시키며 실험 하였다. 각각의 실험은 그림 17과 같이 폭 2.55m 길이 100m의 조선대학교 전자정보공과대학 8층 중앙 통로에서 진행되었으며, 고정된 대상의 위치측정은 삼각대를 이용하여 LOS (line of sight) 환경으로 실험하였다. 또, 이동하는 대상의 위치측정은 보행자가 태그를 파지한 상태를 가정, 앵커를 등져 인체에 의한 NLOS 환경으로 실험하였다. 추가적으로, 기반 정보인 거리측정 실험을 같은 조건에서 실험하였으며 UWB 물리계층을 표4와 같이 설정하였다.

표 4. 실험에 적용된 UWB 물리계층 설정 값

parameter	unit
channel	2
pulse repetition frequency (PRF)	16 MHz
data rate	6.8 Mbps
preamble Code	4
preamble Size	128

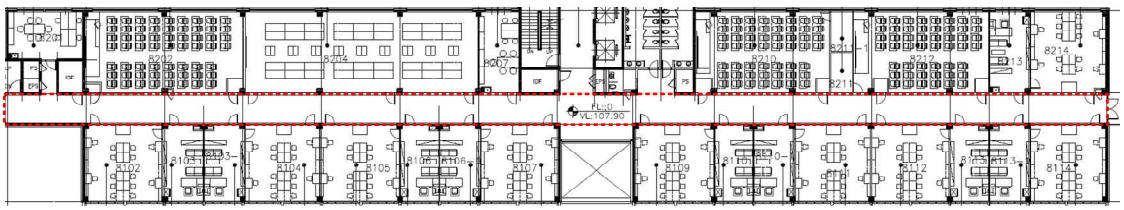

그림 17. 실내 복도 실험 환경

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

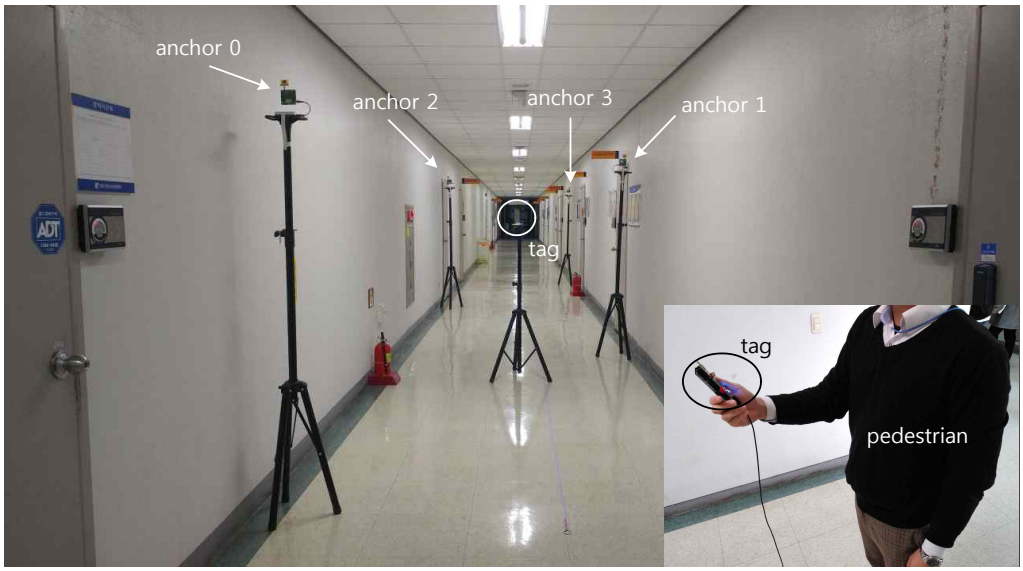

그림 18. 고정 및 이동 대상의 위치측정

1. 고정 대상 위치측정

고정 대상의 위치측정에 앞서, 앵커와 태그 간의 거리측정 실험을 진행하였다. 앵커와 태그는 LOS를 유지하고 각각 통로 폭의 중앙, 높이 1.55m에 배치하였으며 1m부터 90m의 거리를 근거리, 중거리, 장거리, 최장거리로 분류하여 실험하였다. 근거리인 1~10m 범위는 태그와 앵커의 거리를 1m 간격으로 늘려가며 각 지점에서 1분간 약 900개의 거리측정 정보를 수집하여 RMSE (root mean square error)를 구하였다. 같은 방법으로 중거리인 10~30m 범위는 2m 간격으로, 장거리인 30~60m 범위는 3m 간격으로, 최장거리인 60~90m 범위는 5m 간격으로 늘려가며 실험하였다. 그림 19는 고정 대상의 거리측정 방법을 도시화 한 것이다.

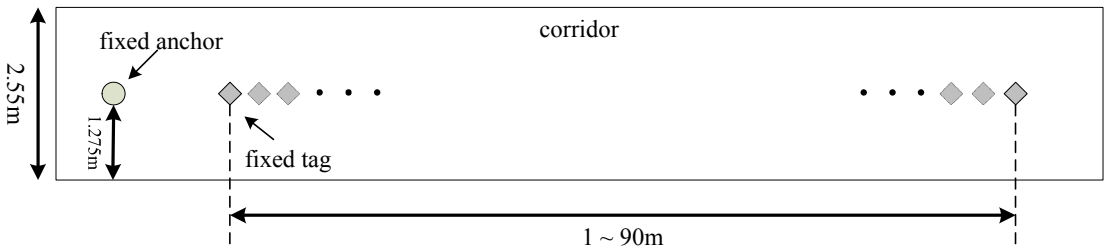

그림 19. 고정 대상의 거리측정 방법

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고정 대상의 위치측정은 제안된 위치측정 알고리즘을 이용하여 태그의 위치를 측정하였다. 앵커와 태그는 LOS를 유지하고 너비 2.55m의 통로에서 각각 2.1m 와 1.55m 높이에 배치하였으며, 30m^{2}부터 92m^{2}의 범위를 2.55 × 12m^2 공간의 좁은 범위, 2.55 × 24m^2 공간의 중간 범위, 2.55 × 36m^2 공간의 넓은 범위로 분류하여 실험하였다. 각각의 실험에서 앵커는 서로의 위치가 대칭이 되도록 평행사변형 구조로 배치하였으며 태그는 위치 측정 범위를 가로세로 3등분하여 9개의 참조위치에서 위치측정을 진행하였다. 추가적으로, 앵커 개수에 따른 성능 평가를 위해 2.55 × 24m^2 공간의 중간 범위에서 앵커 3개를 이등변 삼각형 구조로 배치하여 실험하였다. 그림 20~23은 고정 대상의 위치측정을 위한 범위별 태그와 앵커의 배치로써 통로의 너비를 x축으로, 통로의 길이를 y축으로 하여 구성하였다. 각각의 그림은 녹색 원으로 표기된 A0~A3은 앵커의 위치를, 빨간색 사각형으로 표현된 p_{11}~p_{33} 은 태그의 참조위치를 보여주며 괄호는 좌표로써 단위는 m이다.

성능 평가를 위한 지표로 각 참조위치에서 900개의 위치측정 데이터를 수집하고, 동시에 삼변측량 알고리즘의 위치측정 실패율을 계산하였으며, 위치측정 정확도의 지표로는 측정 결과와 실제 위치간의 유클리드거리 (euclidean distance)를 오차로 하여 RMSE를 산출하였다.

그림 20은 좁은 범위 (2.55 × 12m^2)에서 고정 대상 위치측정을 위한 태그와 앵커의 배치이다.

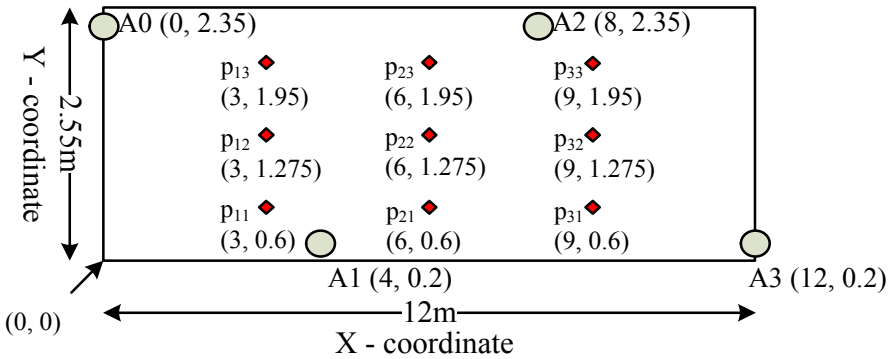

그림 20. 좁은 범위에서 고정 대상 위치측정의 태그와 앵커 배치

그림 21은 중간 범위 (2.55 × 24m^2)에서 앵커 3개를 사용, 고정 대상 위치측정을 위한 태그와 앵커의 배치이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

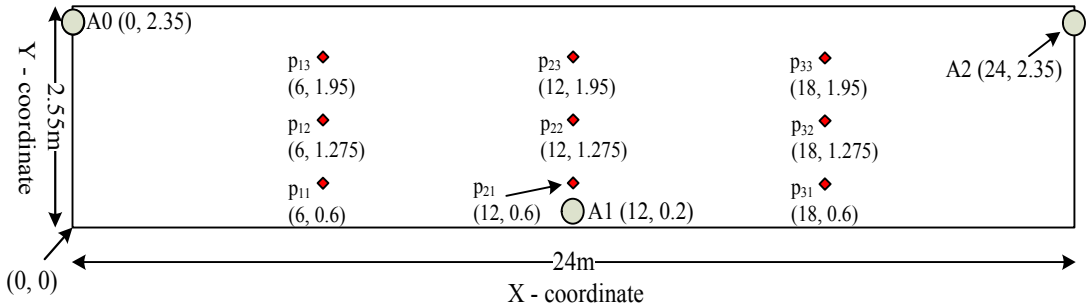

그림 21. 중간 범위에서 고정 대상 위치측정의 태그와 앵커 배치
(앵커 3개 사용)

그림 22는 중간 범위 (2.55 × 24m^2)에서 앵커 4개를 사용, 고정 대상 위치측정을 위한 태그와 앵커의 배치이다.

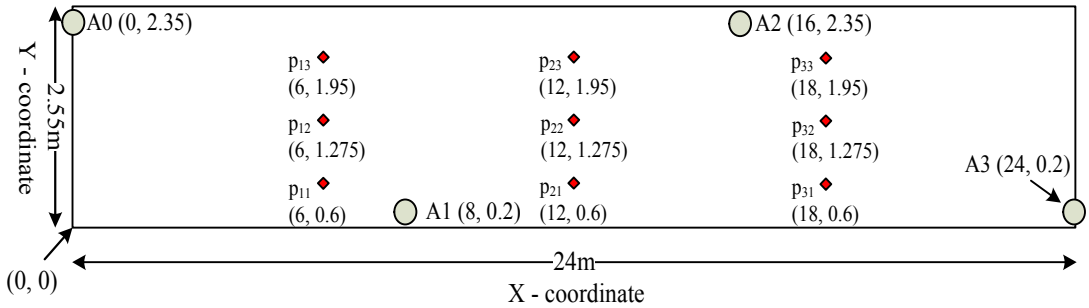

그림 22. 중간 범위에서 고정 대상 위치측정의 태그와 앵커 배치

그림 23은 넓은 범위 (2.55 × 36m^2)에서 고정 대상 위치측정을 위한 태그와 앵커 배치이다.

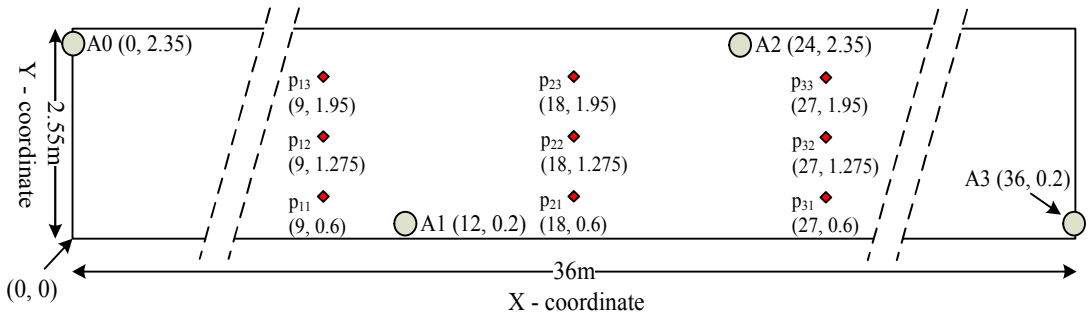

그림 23. 넓은 범위에서 고정 대상 위치측정의 태그와 앵커 배치

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 이동 대상 위치측정

이동 대상의 위치 측정에 앞서, 고정 앵커와 이동 태그 간의 거리 측정 실험을 진행하였다. 앵커는 통로 중앙의 1.45m 높이에 배치되었으며 태그는 같은 높이에서 보행자에 의해 파지된 상태로 이동하였다. 성능 평가와 분석을 위하여 거리 정보 업데이트마다 실제 보행자의 위치를 보행자의 속도를 통해 계산하였다. 보행자는 일정한 속도로 앵커로부터 멀어지며 위치측정 시작 시점 t_{start} 와 끝 시점 t_{end}, 보행자의 이동거리 d를 통해 평균 보행속도 v를 수식 (4.1)과 같이 계산하였다.

$$v = \frac{t_{end} - t_{start}}{d} \tag{4.1}$$

구현된 위치 시스템은 매 위치 정보가 업데이트 될 때마다 상대적인 시간을 기록하므로 보행자의 속도를 통해 위치 정보가 업데이트 되는 시점의 보행자의 실제 위치를 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 측정된 거리에 대한 RMSE를 산출하였다. 추가적으로, 보행자 거리 측정 시간 동안 측정 실패율을 구하였으며 고정 대상 거리 측정 시나리오와 동일하게 측정 범위에 따라 근거리, 중거리, 장거리로 분류하고 근거리인 1~10m 범위에서는 1m 지점에서 10m 지점까지, 중거리인 10~30m 범위에서는 16m 지점에서 23m 지점까지, 장거리인 30~60m 범위에서는 40m 지점에서 50m 지점까지의 보행자의 이동 각 3회 측정하였다. 그림 24는 이동 대상의 거리측정 방법을 도시화 한 것이다.

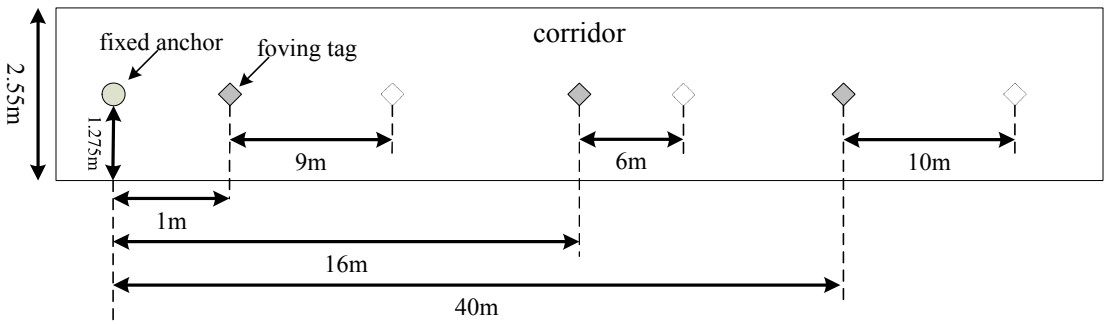

그림 24. 이동 대상의 거리측정 방법

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이동 대상의 위치측정은 고정 대상의 위치측정과 동일한 범위와 위치에 앵커를 배치하고, 보행자가 태그를 파지한 채 정해진 경로를 일정한 속도로 이동시켜 해당 경로마다 2회씩 진행하였다. 태그 (보행자)의 이동 경로는 그림 25~28과 같이 통로의 길이인 y축의 원점을 시작 지점 (start)으로 하고 각각의 범위의 끝 (12m, 24m, 36m)을 끝 지점 (end)으로 하였으며, 동시에 통로 너비인 x축의 0.6m 지점을 경로 1 (route 1), 1.275m 지점을 경로 2 (route 2), 1.95m 지점을 경로 3 (route 3)으로 하였다. 성능 평가를 위하여 거리 측정과 동일한 방법으로 보행자의 평균 속도를 계산하여 위치측정 정보에 대한 RMSE를 산출하였으며, 실험이 진행되는 동안 삼변측량 알고리즘의 실패율을 구하였다.

그림 25는 좁은 범위 (2.55 × 12m^2)에서 이동 대상 위치측정을 위한 태그의 이동 경로와 앵커 배치이다.

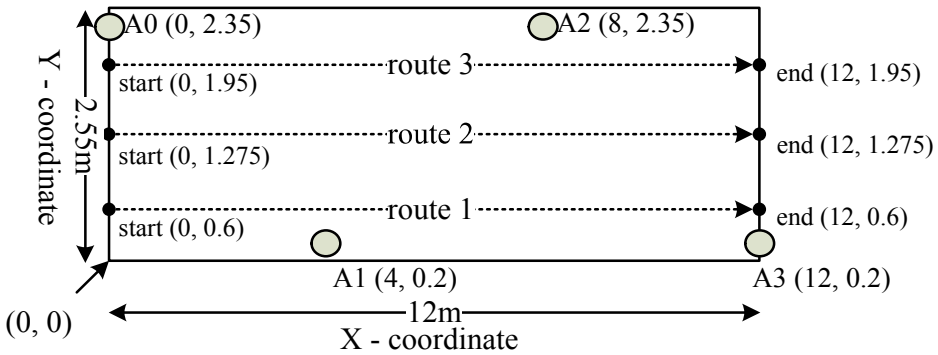

그림 25. 좁은 범위에서 이동 대상 위치측정의 태그 경로와 앵커 배치

그림 26은 중간 범위 (2.55 × 24m^2)에서 앵커 3개를 사용, 이동 대상 위치측정을 위한 태그의 이동 경로와 앵커 배치이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

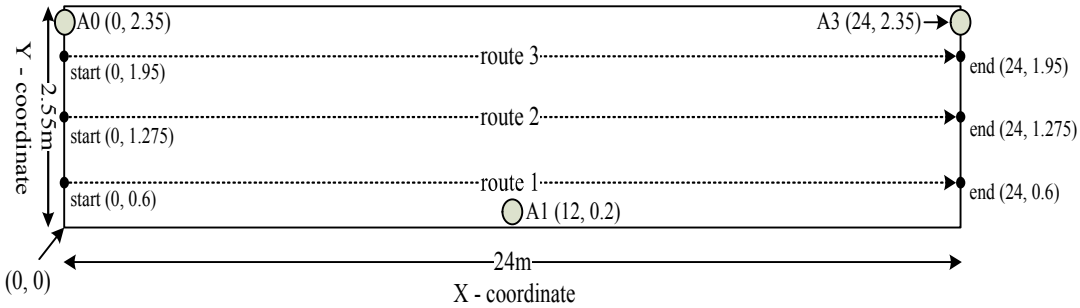

그림 26. 중간 범위에서 이동 대상 위치측정의 태그 경로와 앵커 배치
(앵커 3개 사용)

그림 27은 중간 범위 (2.55 × 24m^2)에서 앵커 4개를 사용, 이동 대상 위치측정을 위한 태그의 이동 경로와 앵커 배치이다.

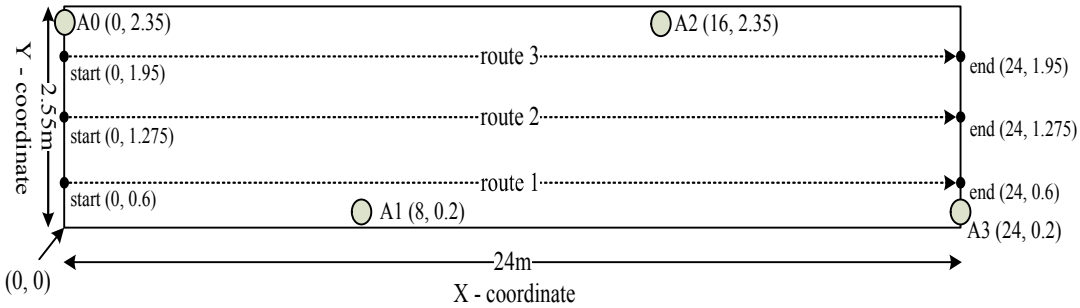

그림 27. 중간 범위에서 이동 대상 위치측정의 태그 경로와 앵커 배치

그림 28은 넓은 범위 (2.55 × 36m^2)에서 이동 대상 위치측정을 위한 태그의 이동 경로와 앵커 배치이다.

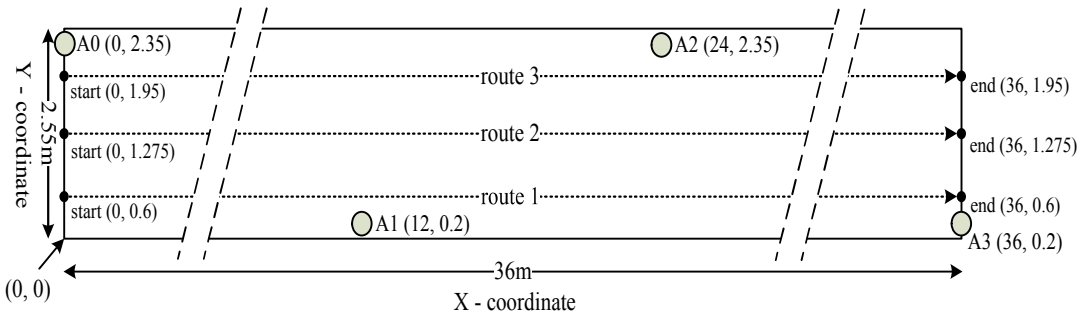

그림 28. 넓은 범위에서 이동 대상 위치측정의 태그 경로와 앵커 배치

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

B. 측정 결과

1. 고정 대상의 위치측정

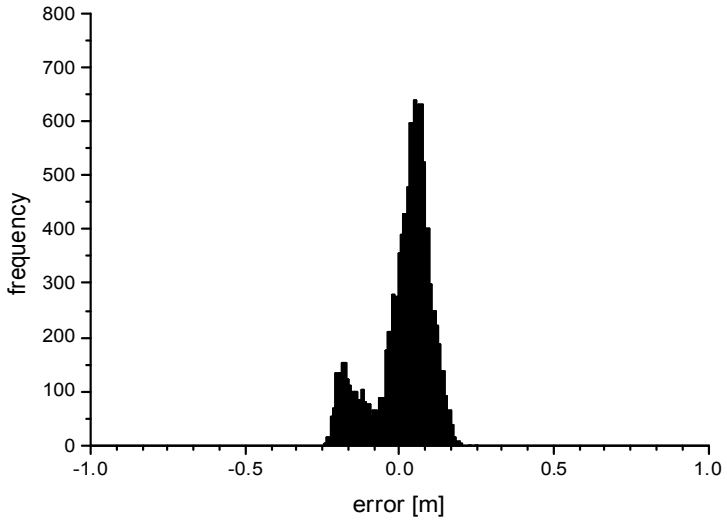

그림 29. 근거리 고정 대상의 거리측정 오차 분포

표 5. 근거리 고정 대상 거리측정의 RMSE

거리 (m)	RMSE (m)	거리 (m)	RMSE (m)
1	0.186	2	0.099
3	0.037	4	0.049
5	0.031	6	0.045
7	0.056	8	0.064
9	0.095	10	0.118

근거리 (1~10m 범위) 고정 대상 거리측정 결과는 평균 RMSE 0.078m로 10cm 내외의 오차를 보였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

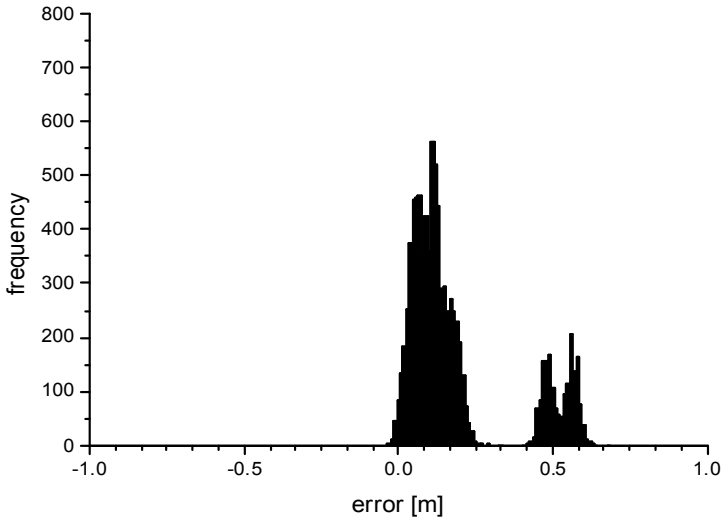

그림 30. 중거리 고정 대상의 거리측정 오차 분포

표 6. 중거리 고정 대상 거리측정의 RMSE

거리 (m)	RMSE (m)	거리 (m)	RMSE (m)
12	0.048	14	0.17
16	0.079	18	0.106
20	0.116	22	0.049
24	0.091	26	0.181
28	0.561	30	0.478

중거리 (10~30m 범위) 고정 대상 거리측정 결과는 평균 RMSE 0.188m로 20cm 내외의 오차를 보였으며 28m 지점과 30m 지점에서 통로에 존재하는 장애물로 인해 오차가 증가하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

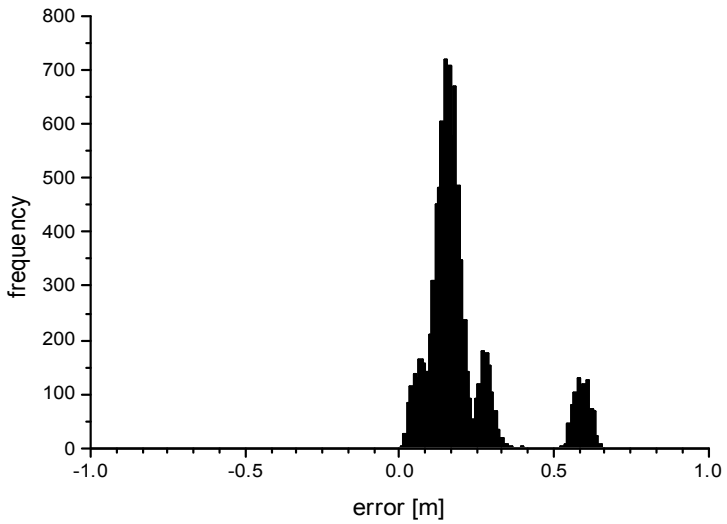

그림 31. 장거리 고정 대상의 거리측정 오차 분포

표 7. 장거리 고정 대상 거리측정의 RMSE

거리 (m)	RMSE (m)	거리 (m)	RMSE (m)
33	0.588	36	0.279
39	0.167	42	0.128
45	0.183	48	0.194
51	0.061	54	0.168
57	0.136	60	0.121

장거리 (30~60m 범위) 고정 대상 거리측정 결과는 평균 RMSE 0.203m로 20cm 내외의 오차를 보였으며 33m 지점과 36m 지점에서 통로에 존재하는 장애물로 인해 오차가 증가하였으나, 장애물과 멀어질수록 다중경로가 많아짐에 따라 오차가 감소하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

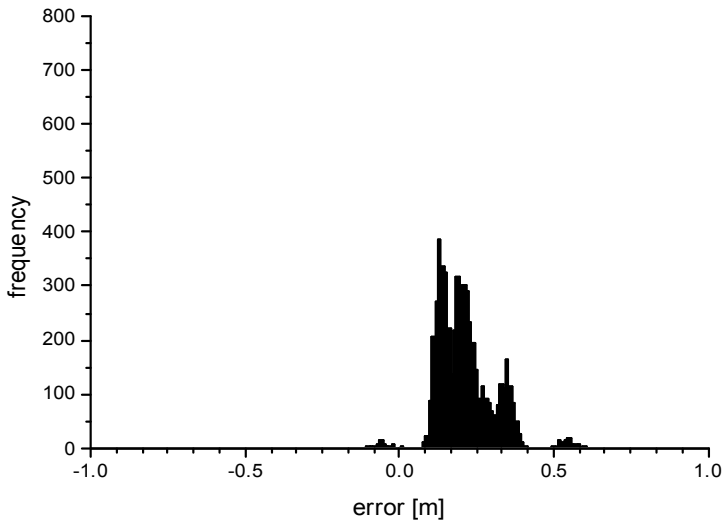

그림 32. 최장거리 고정 대상의 거리측정 오차 분포

표 8. 최장거리 고정 대상 거리측정의 RMSE

거리 (m)	RMSE (m)	거리 (m)	RMSE (m)
65	0.259	70	0.357
75	0.206	80	0.195
85	0.126	90	0.133

최장거리 (60~90m 범위) 고정 대상 거리측정 결과는 평균 RMSE 0.213m로 20cm 내외의 오차를 보였으며 중거리 범위와 장거리 범위의 장애물에 의해 관측된 오차 성분이 크게 감소함을 알 수 있다.

고정 대상에 대한 거리측정의 RMSE 산출 결과, 평균 RMSE는 근거리 0.078m, 중거리 0.188m, 장거리 0.203m, 최장거리 0.213m로 거리가 멀어질수록 오차가 증가했음을 알 수 있었다. 그중 중거리, 장거리의 경우 특정 거리에서 복도에 존재하는 장애물로 인해 오차가 크게 발생하였으나, 장애물과 태그가 멀어질수록 발생하는 다중경로로 인해 장애물에 의한 오차가 감소하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

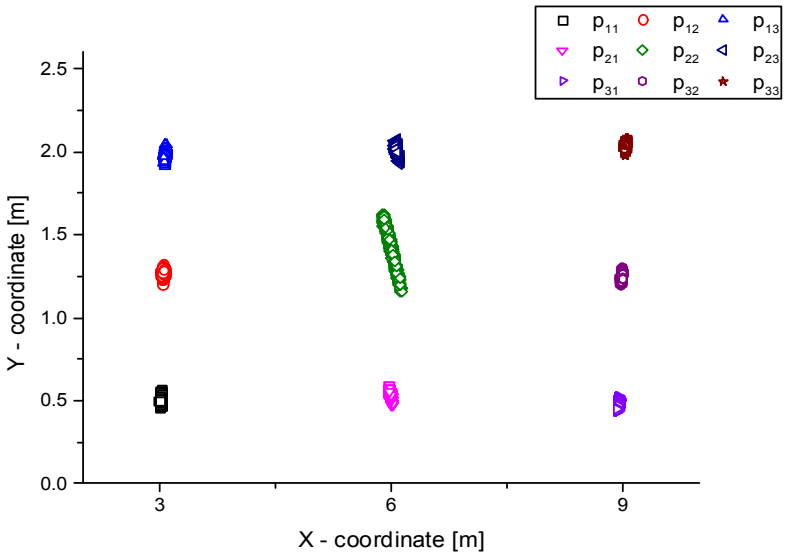

그림 33. 좁은 범위의 고정 대상에 대한 위치측정 결과

표 9. 좁은 범위 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율

참조 위치	좌표 (x, y)	RMSE [m]	측정실패율 [%]
p_{11}	(3, 0.6)	0.093	0
p_{12}	(3, 1.275)	0.041	0
p_{13}	(3, 1.95)	0.08	0.881
p_{21}	(6, 0.6)	0.074	0
p_{22}	(6, 1.275)	0.21	0
p_{23}	(6, 1.95)	0.1	0
p_{31}	(9, 0.6)	0.132	0
p_{32}	(9, 1.275)	0.033	0
p_{33}	(9, 1.95)	0.091	0

좁은 범위 (2.55 × 12m^2) 고정 대상 위치측정 결과는 전 구간에서 낮은 측정실패율과 평균 RMSE 0.095m로 10cm 내외의 오차를 보였으며 측위 범위의 중앙인 p_{22}에서 태그의 핸드오프로 인해 비교적 큰 오차가 관측되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

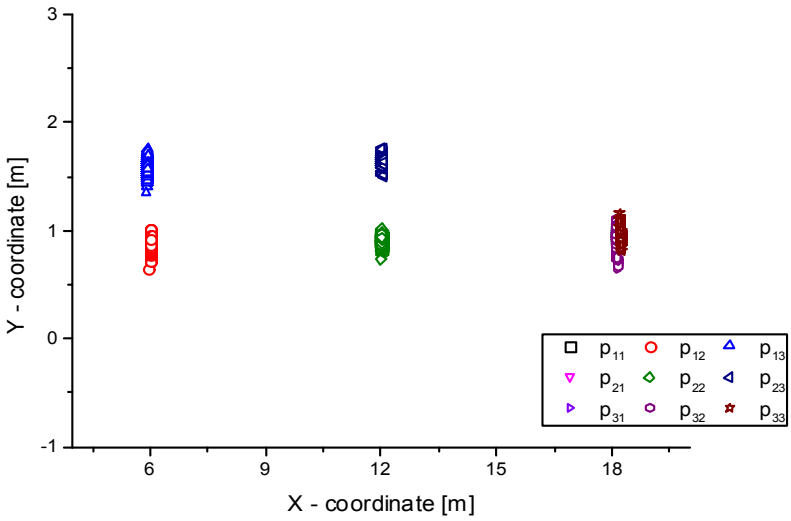

그림 34. 중간 범위의 고정 대상에 대한 위치측정 결과 (앵커 3개 사용)

표 10. 중간 범위 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 (앵커 3개 사용)

참조 위치	좌표 (x, y)	RMSE [m]	측정실패율 [%]
p_{11}	(6, 0.6)	–	100
p_{12}	(6, 1.275)	0.4	0
p_{13}	(6, 1.95)	0.371	0.556
p_{21}	(12, 0.6)	–	100
p_{22}	(12, 1.275)	0.371	0
p_{23}	(12, 1.95)	0.322	0
p_{31}	(18, 0.6)	–	100
p_{32}	(18, 1.275)	0.356	0.111
p_{33}	(18, 1.95)	0.999	0.111

앵커 3개를 사용한 중간 범위 (2.55 × 24m^2) 고정 대상 위치측정 결과는 앵커들이 이루는 범위 밖에 존재하는 p_{11}과 p_{31}, 앵커(A1)와 근접한 p_{21} 지점에서 위치측정에 실패하였으며 그밖에 지점에서 평균 RMSE 0.47m의 오차를 보였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

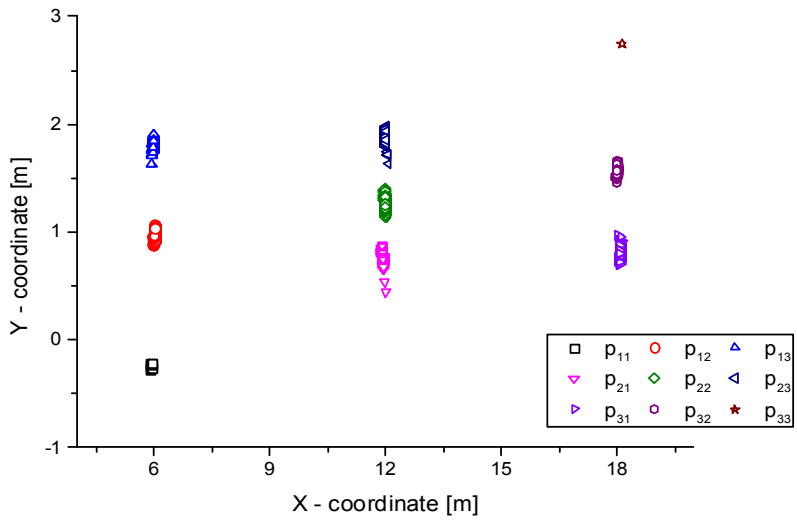

그림 35. 중간 범위의 고정 대상에 대한 위치측정 결과

표 11. 중간 범위 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율

참조 위치	좌표 (x, y)	RMSE [m]	측정실패율 [%]
p_{11}	(6, 0.6)	0.846	99
p_{12}	(6, 1.275)	0.301	0
p_{13}	(6, 1.95)	0.148	0
p_{21}	(12, 0.6)	0.178	0
p_{22}	(12, 1.275)	0.045	0
p_{23}	(12, 1.95)	0.086	0
p_{31}	(18, 0.6)	0.215	0.111
p_{32}	(18, 1.275)	0.287	0
p_{33}	(18, 1.95)	0.81	99.889

중간 범위 (2.55 × 24m^2) 고정 대상 위치측정 결과는 앵커들이 이루는 범위 밖에 존재하는 p_{11}과 p_{33} 지점에서 오차와 함께 측정실패율이 크게 나타났으며, 그밖에 지점에서 평균 RMSE 0.18m의 오차를 보였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

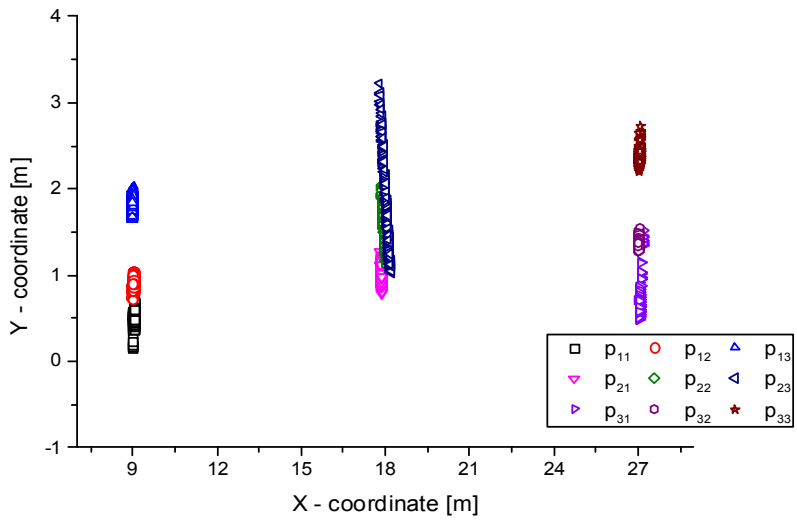

그림 36. 넓은 범위의 고정 대상에 대한 위치측정 결과

표 12. 넓은 범위 고정 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율

참조 위치	좌표 (x, y)	RMSE [m]	측정실패율 [%]
p_{11}	(9, 0.6)	0.497	0.778
p_{12}	(9, 1.275)	0.385	0
p_{13}	(9, 1.95)	0.116	0
p_{21}	(18, 0.6)	0.404	0.667
p_{22}	(18, 1.275)	0.435	0
p_{23}	(18, 1.95)	0.577	61.222
p_{31}	(27, 0.6)	0.143	0
p_{32}	(27, 1.275)	0.113	15.556
p_{33}	(27, 1.95)	0.412	36.333

넓은 범위 (2.55 × 36m^2) 고정 대상 위치측정 결과는 거리가 멀어짐에 증가되는 거리측정오차와 다중경로발생으로 전체 측정실패율은 감소하였지만, 평균 RMSE는 0.342m로 중간 범위에 비해 증가하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

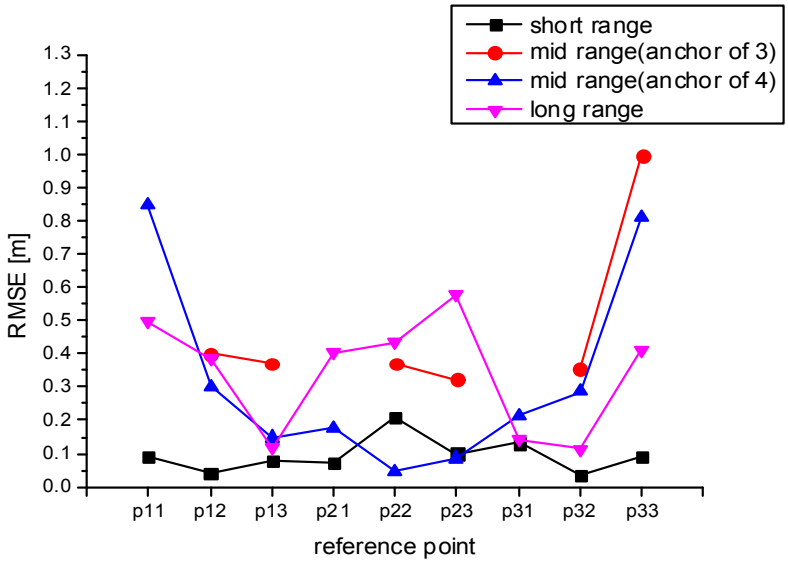

그림 37. 고정 대상에 대한 위치측정 RMSE 결과

고정 대상에 대한 위치측정은 그림 37과 같이 3개의 앵커를 사용할 경우 4개를 사용한 경우보다 약 42% 오차가 증가하였으며 p_{11}, p_{21}, p_{31} 지점에서 위치측정을 할 수 없었다. 여기서 p_{11}과 p_{31} 지점은 앵커들이 이루는 범위 밖 지점으로 태그와 인접 앵커 2개가 동일 선상에 위치하여 삼변측량 알고리즘에서 교점 생성이 어려운 지점이며 p_{21} 지점은 앵커와 가까운 측정 지점으로 실제 태그와 앵커간의 높이 차이로 인해 발생되는 거리측정오차가 크게 나타나 측량 알고리즘에서 해당 앵커와 다른 앵커간의 교점을 생성할 수 없었다. 반면 4개를 사용할 경우에는 앵커들이 이루는 범위의 가장자리인 p_{11}과 p_{33} 의 측정 실패율이 매우 높아 위치측정결과의 신뢰도가 낮았다. 이와 같은 결과를 통해 앵커의 배치에 따라 측정결과를 개선할 수 있음을 확인할 수 있었다. 넓은 범위의 경우 중간 범위의 경우보다 약 5% 오차가 증가했으며 위치측정 범위 내에서 오차가 두드러지나 위치측정 범위 가장자리인 p_{11}과 p_{33}은 중간 범위보다 오차 및 측정실패율이 감소하였다. 이는 교점생성이 어려운 해당위치에서는 거리측정에 대한 오차가 잘못된 교점생성을 유도하기 때문이다. 좁은 범위의 경우 중간 및 넓은 범위의 경우보다 약 70% 오차가 감소했으며 전 구간에서 0.2m 이내의 오차로 가장 성능이 좋았다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 이동 대상 위치 측정

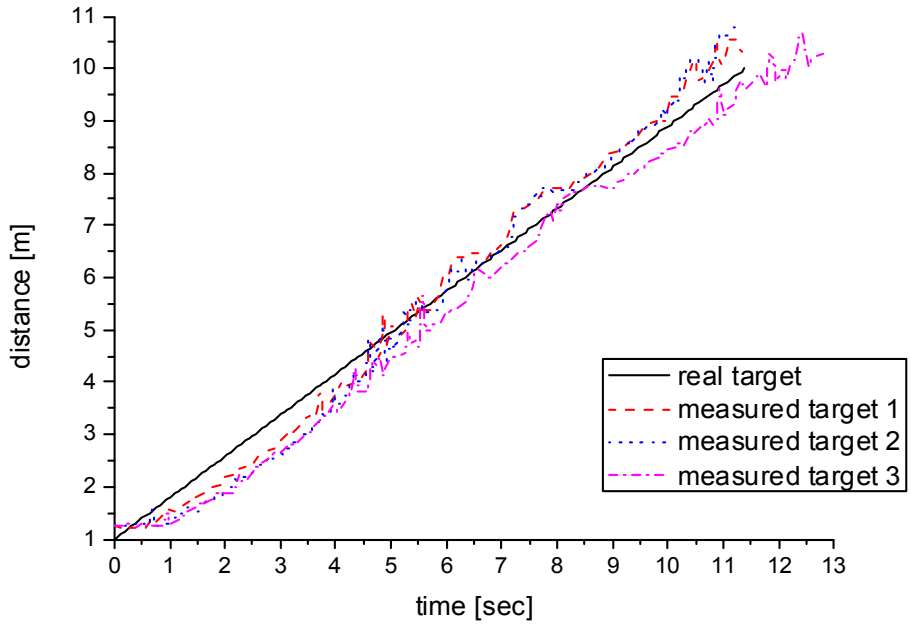

그림 38. 근거리 이동 대상의 거리측정 결과

표 13. 근거리 이동 대상 거리측정의 RMSE와 측정실패율

횟수	대상 속도 [m/s]	RMSE [m]	측정실패율 [%]
1	0.7	0.202	3.043
2	0.79	0.146	6.145
3	0.804	0.211	3.409

근거리 (1~10m 범위, 9m 이동) 이동 대상 거리측정 결과는 평균 RMSE 0.168m로 20cm 내외의 오차를 보였다. 또한 인체에 의한 NLOS으로 인해 TWR이 실패하는 경우가 발생하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

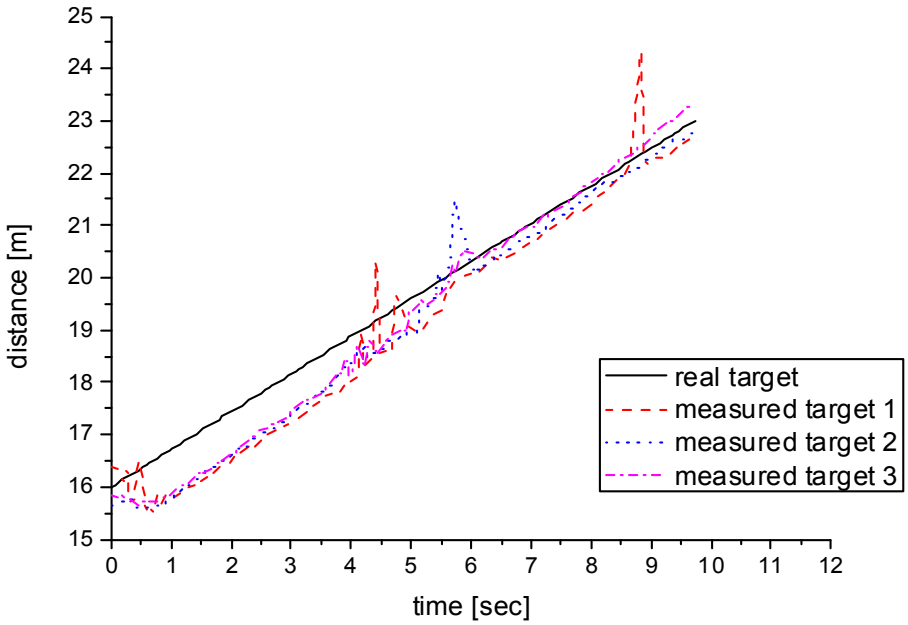

그림 39. 중거리 이동 대상의 거리측정 결과

표 14. 중거리 이동 대상 거리측정의 RMSE와 측정실패율

횟수	대상 속도 [m/s]	RMSE [m]	측정실패율 [%]
1	0.72	0.48	17.829
2	0.714	0.319	12.143
3	0.726	0.269	7.746

중거리 (16~23m 범위, 6m 이동) 이동 대상 거리측정 결과는 평균 RMSE 0.356m로 35cm 내외의 오차를 보였다. 또한 TWR의 실패율이 증가하였다. 이는 거리가 멀어짐에 따라 인체에 의해 감쇠된 태그의 신호가 앵커에 도달하기 어렵기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

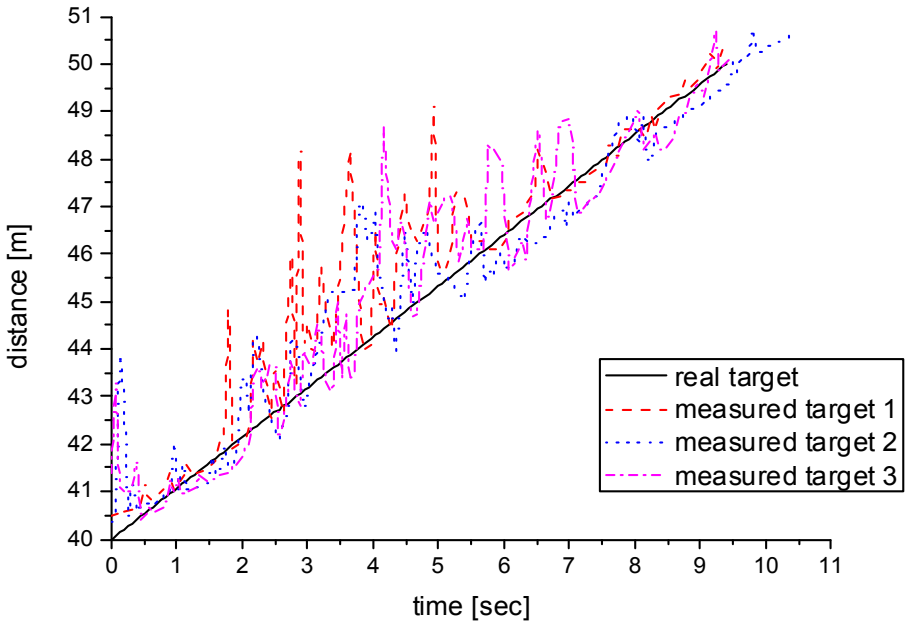

그림 40. 장거리 이동 대상의 거리측정 결과

표 15. 장거리 이동 대상 거리측정의 RMSE와 측정실패율

횟수	대상 속도 [m/s]	RMSE [m]	측정실패율 [%]
1	1.065	1.237	12.857
2	0.963	1.172	16.547
3	0.927	0.927	17.143

장거리 (40~50m 범위, 10m 이동) 이동 대상 거리측정 결과는 평균 RMSE 1.112m로 1m 내외의 오차로 중거리 범위에 비해 크게 증가하였다.

이동 대상에 대한 거리측정의 RMSE 산출 결과, 평균 RMSE는 근거리 0.186m, 중거리 0.356m, 장거리 1.112m로 가까운 거리 순으로 오차가 증가하였다. 평균 측정실패율 역시 각각 4.2%, 12.57%, 15.52% 로 RMSE에 비례하여 증가하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

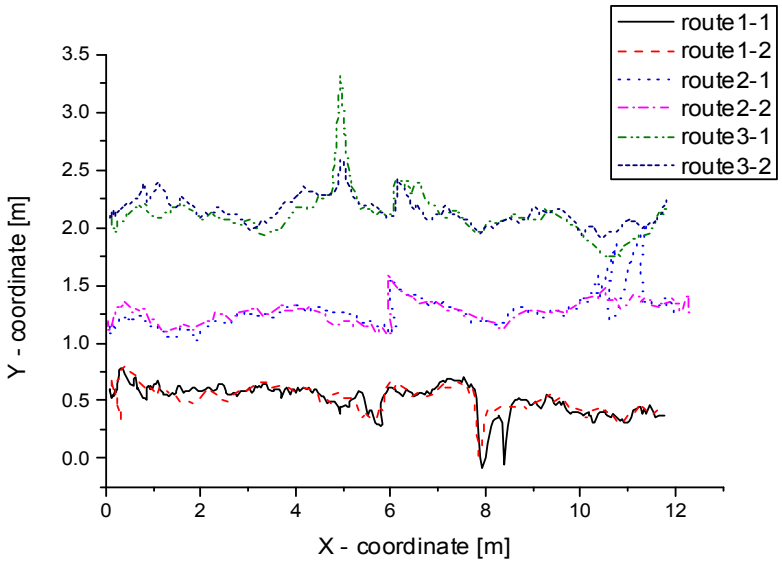

그림 41. 좁은 범위의 이동 대상에 대한 위치측정 결과

표 16. 좁은 범위 이동 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율

경로 - 횟수	대상 속도 [m/s]	RMSE [m]	측정실패율 [%]
route 1 - 1	0.677	0.568	0
route 1 - 2	0.826	0.49	0
route 2 - 1	0.856	0.408	0.455
route 2 - 2	0.837	0.409	0
route 3 - 1	0.987	0.409	0
route 3 - 2	1.008	0.51	0

좁은 범위 (2.55 × 12m^2) 이동 대상 위치측정 결과는 전 구간에서 낮은 측정실패율과 평균 RMSE 0.466m로 50cm 내외의 오차를 보였으며 고정 대상의 결과와 같이 측위 범위의 중앙인 y축 6m에서 태그의 핸드오프로 오차가 발생하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

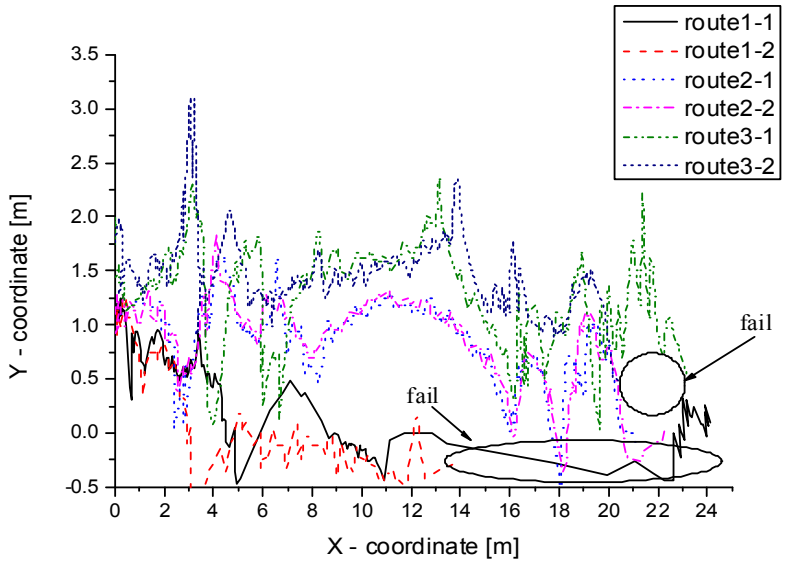

그림 42. 중간 범위의 이동 대상에 대한 위치측정 결과 (앵커 3개 사용)

표 17. 중간 범위 이동 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율 (앵커 3개 사용)

경로 - 횟수	대상 속도 [m/s]	RMSE [m]	측정실패율 [%]
route 1 - 1	0.989	0.783	60.526
route 1 - 2	0.911	0.933	27.586
route 2 - 1	1.09	0.778	4.182
route 2 - 2	1.132	0.777	8.278
route 3 - 1	1.091	1.202	10.092
route 3 - 2	1.095	0.836	6.552

앵커 3개를 사용한 중간 범위 (2.55 × 24m^2) 이동 대상 위치측정 결과는 고정 대상의 경우와 유사하게 경로 1과 경로 2에서 일부 위치측정이 실패하였다. 또한 평균 RMSE 0.885m로 90cm 내외의 오차의 성능을 보여주었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

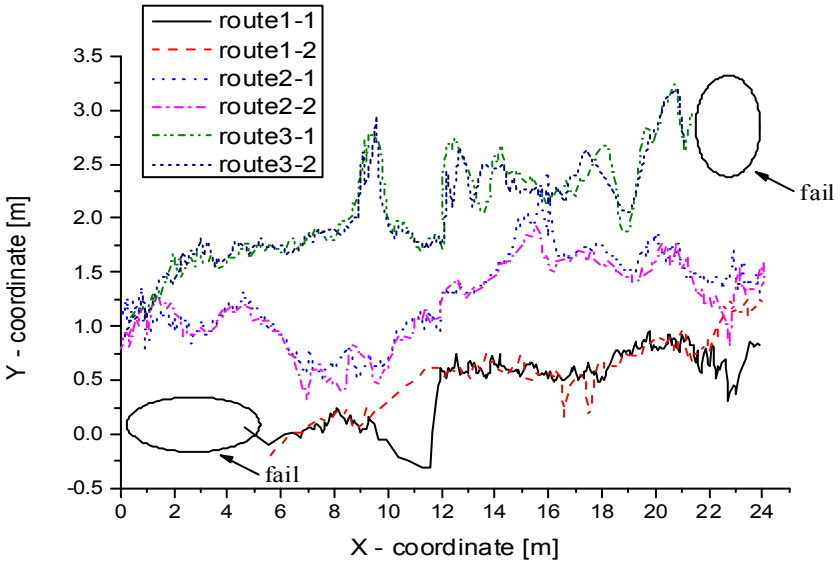

그림 43. 중간 범위의 이동 대상에 대한 위치측정 결과

표 18. 중간 범위 이동 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율

경로 - 횟수	대상 속도 [m/s]	RMSE [m]	측정실패율 [%]
route 1 - 1	0.913	0.533	38.443
route 1 - 2	1.169	0.544	41.292
route 2 - 1	1.033	0.413	0.274
route 2 - 2	1.053	0.514	0.565
route 3 - 1	1.117	0.474	18.59
route 3 - 2	1.09	0.719	27.575

중간 범위 (2.55 × 24m^2) 이동 대상 위치측정 결과는 고정 대상의 경우와 유사하게 경로 1과 경로 3에서 일부 위치측정이 실패하였다. 또한 평균 RMSE 0.533m로 50cm 내외의 오차의 성능으로 3개를 사용할 때 보다 성능이 개선됨을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

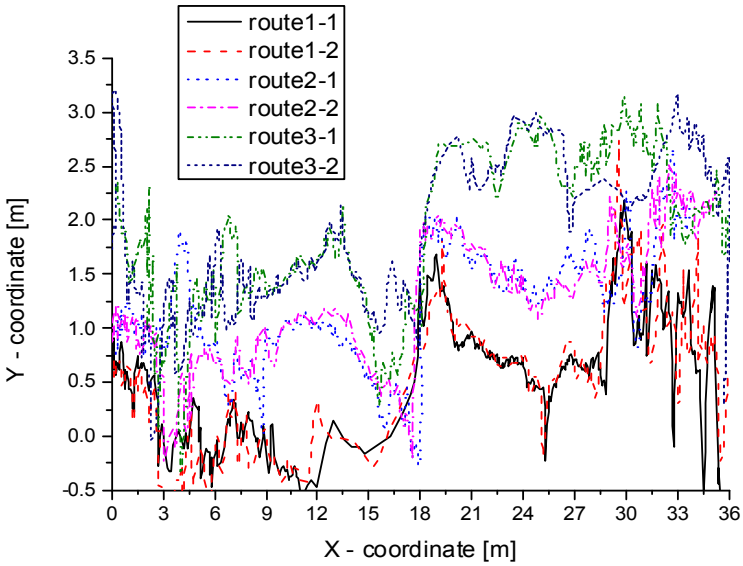

그림 44. 넓은 범위의 이동 대상에 대한 위치측정 결과

표 19. 넓은 범위 이동 대상에 대한 위치측정의 RMSE와 측정실패율

경로 – 횟수	대상 속도 [m/s]	RMSE [m]	측정실패율 [%]
route 1 – 1	1.025	0.736	23.757
route 1 – 2	1.082	0.713	23.036
route 2 – 1	1.181	0.566	1.818
route 2 – 2	1.189	0.848	5.157
route 3 – 1	1.121	0.746	25.523
route 3 – 2	1.086	0.88	32.863

넓은 범위 (2.55 × 36m^2) 이동 대상 위치측정 결과는 고정 대상의 경우와 유사하게 측정 실패율은 감소하였으나 평균 RMSE 0.748m로 중간범위에 비해 증가하였다. 또한, 태그의 핸드오프로 인한 오차가 가장 크게 관측되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

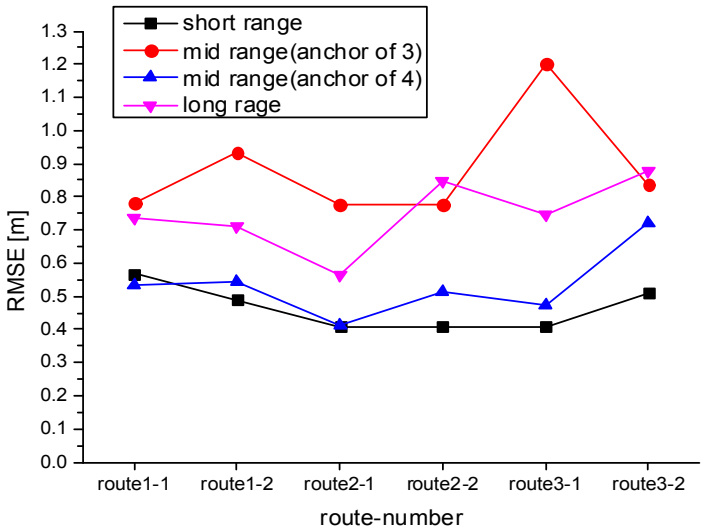

그림 45. 이동 대상에 대한 위치측정 RMSE 결과

이동 대상에 대한 위치측정은 그림 45와 같이 3개의 앵커를 사용한 경우 4개를 사용한 경우보다 약 40% 오차가 증가하였으며 경로 1과 경로 3의 일부 지역에서 위치측정을 할 수 없었다. 넓은 범위의 경우 중간 범위의 경우보다 약 29% 오차가 증가했으며 x축 18미터 지점에서 태그 핸드오프로 인한 오차가 가장 크게 나타난다. 중간 범위에서는 고정 대상 실험과 유사하게 위치측정 범위의 가장자리인 경로 1의 시작점과 경로 3의 끝점의 측정 실패율이 매우 높아 위치 측정의 신뢰도가 낮았다. 좁은 범위의 경우 중간 및 넓은 범위의 경우보다 약 70% 오차가 감소했으며 전 구간에서 0.5m 내외의 오차로 가장 성능이 좋았다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

V. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 IEEE 802.15.4a UWB를 활용하여 실시간 위치 측정 시스템을 구현하고 성능평가를 하였다. 거리 기반 위치측정 시스템인 IEEE 802.15.4a UWB 위치측정 시스템은 거리측정을 위하여 고정된 앵커와 태그간의 양방향 거리측정 알고리즘인 TWR를 이용한다. TWR 알고리즘은 두기기간의 독립적인 시간 측정을 통해 거리를 계산하므로 두기기간의 시간측정 오차가 발생한다. 이를 보완하고 성능향상을 위하여 SDS-TWR 알고리즘을 시스템에 적용하였다. 추가적으로 앵커와 태그의 안테나 차이로 인해 생기는 안테나 지연을 보정하였다. 측정된 거리를 통해 위치를 구하기 위한 삼변측량 알고리즘은 앵커와 측정거리가 이루는 원의 교점이 한 개로 생성되지 않기 때문에 여러 교점들 중 앵커들과 근접한 교점들이 만드는 삼각형의 중심을 태그의 위치로 추정하도록 하였다. 그리고 교점이 생성되지 않을 경우에는 각 원의 반지름을 10cm 증가시켜 교점을 만들도록 유도하였다.

구현된 시스템의 성능평가 및 분석을 위하여 고정 대상과 이동 대상의 두 개의 시나리오에서 거리측정 및 위치측정을 진행하였다. 고정 대상 시나리오에서 거리측정 결과는 LOS 환경 시 100m 이내의 위치측정 정보가 유효함을 보여 주었으며, 위치측정 결과는 위치 측정 범위가 좁을수록 좋은 성능을 보이며 1m 내의 위치측정 성능을 제공함을 알 수 있었다. 반면, 이동 대상의 시나리오에서는 인체가 위치측정 시스템의 오차를 증가시킴을 거리측정 실험을 통해 알 수 있었으며, 위치 측정 결과는 위치측정 범위에 따라 오차가 상이함을 보이며 평균 1m 내외의 위치측정 성능을 제공함을 알 수 있었다. 이와 같이 IEEE 802.15.4a UWB 기반의 위치측정 시스템을 활용하여 기존의 적외선, 초음파, RF 신호세기 등의 방식을 사용할 때 비교적 넓은 범위에 보다 정밀한 위치 측정이 가능하였다.

향후 본 논문에서 사용되었던 삼변측량 알고리즘의 문제점을 개선하는 연구를 진행할 계획이다. 제안된 위치측정 알고리즘은 태그의 위치를 낮은 컴퓨팅 오버헤드로 추정하는 실용적인 알고리즘으로 각각의 거리측정 결과가 서로 유사한 오차분포를 갖는 약한 NLOS 환경과 앵커들이 이루는 범위를 위치측정범위로 지정하였을 때 최적의 성능을 보여준다. 중간 범위의 실험의 결과에서 관측 된바와 같이 특정 위치에서 제안된 방법은 위치측정에 실패하였다. 이는 기하학적으로 교점이 생길 수 없게 거리가 측정

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

되는 경우로 모든 원의 반지름을 50cm 늘리더라도 교점이 생기지 않는다. 이를 해결하기 위하여 최적의 앵커 배치에 대한 연구와 함께 측정된 거리를 신호의 품질이나 위치에 따라 분류하고 그것에 따라 반지름을 늘리거나 줄이는 연구를 진행할 계획이다. 또한, 4개의 앵커를 사용한 만큼 다변측량에 대한 알고리즘 개발이 필요하다. 그리고 위치측정 정도에 대한 필터를 설계하여 오차를 줄이는 방안을 연구할 계획이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고 문헌

[1] 박상혁, 박영식, 김진영, “실내 위치추적 시스템의 비즈니스 모델 사례 연구,” 통신위성우주산업연구회논문지, 제 8권, 제 4호, pp. 64-69, 2013.

[2] 김범곤, 김관형, “무선 위치 인식 기술 소개,” 대한토목학회지, 제 58권. 제 10호, pp. 65-67, 2010.

[3] 김진영, 서철헌, “무선 측위 시스템” 공감북스, 2016.

[4] 허재두, 최은창, 조무호, 이종현, 최웅철, “저속 WPAN 프로토콜 완전해석”, 홍릉과학출판사, 2008.

[5] Liew Lin Shen and Wallace Wong Shung Hui, “Improved Pedestrian Dead-Reckoning-Based Indoor Positioning by RSSI-Based Heading Correction, IEEE Sensors Journal, vol. 16, pp. 7762-7773, Nov. 2016.

[6] Yuan Zhuang, You Li, Longning Qi, Haiyu Lan, Jun Yang, and Naser El-Sheimy, “A Two-Filter Integration of MEMS Sensors and WiFi Fingerprinting for Indoor Positioning” IEEE Sensors Journal, vol. 16, pp. 5125-5126, Jul. 2016.

[7] Suining He and S.-H. Gary Chan, “Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, pp. 466-490, Aug. 2015.

[8] Jie He, Shen Li, Kaveh Pahlavan, and Qin Wang, “A Realtime Testbed for Performance Evaluation of Indoor TOA Location System”, 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 482-468, Jun. 2012.

[9] Antonio A. D'Amico, Umberto Mengali, and Lorenzo Taponecco, “TOA Estimation with the IEEE 802.15.4a Standard”, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, pp. 2238-2247, Jul. 2010.

[10] Sunil Kumar Meghani and Muhammad Asif, “Localization of WSN node based on RTT ToA using ultra wide band & 802.15.4a channel” Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2014 IEEE 11th International

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Conference on, pp. 380-385, Apr. 2014.

[11] Tingcong Ye, Michael Walsh, Peter Haigh, John Barton, Alan Mathewson, and Brendan O'Flynn, "Experimental Impulse Radio IEEE 802.15.4a UWB Based Wireless Sensor Localization Technology: Characterization, Reliability and Ranging" IET Irish Signals and Systems Conference, Jun. 2011.

[12] IEEE, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN), 2011.

[13] http://www.decawave.com

[14] Alex Moschevikin, Alexandr Galov, Sergey Reginya, Alexander Volkov, and Axel Sikora, "The Impact of NLOS Components in Time-of-Flight Networks for Indoor Positioning System" IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, vol. 01, pp. 455-460 Sep. 2013.

[15] Florian Hammer, Member, IEEE, Risang Yudanto, Kai Neumann, Markus Pichler, Member, IEEE, Johan Cockx, Christian Niestroj, and Frederik Petre, "Performance Evaluation of 3D-Position Estimation Systems" IEEE Sensors Journal, vol. 16, pp. 6416-6424, Jun. 2016.

[16] Witsarawat Chantaweesomboon, Charuwalee Suwatthikul, Supatra Manatrinon, Krit Athikulwongse, Kamol Kaemarungsi, Ratchasak Ranron, and Prapun Suksompong, "On performance study of UWB real time locating system", pp. 19-24, May 2016.

[17] Christof Rohrig and Lars Telle, "Real-Time Communication and Localization for a Swarm of Mobile Robots Using IEEE 802.15.4a CSS", Vehicular Technology Conf., 2011 IEEE, pp. 1-5, Dec. 2011.

[18] Dae-Ho Kim, Jeong-Hoon Lee, and JaeYoung Pyun, "Positioning Protocol Design for IEEE 802.15.4a UWB based RTLS", Joint 8th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 17th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, Separate vol., pp. 5-8, Aug. 2016.

Collection @ chosun