



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](#)

공학석사 학위논문

고정밀 위치 모니터링을 위한  
초광대역 통신 기반 측위 알고리즘 연구  
A Study on UWB-based Positioning Algorithm  
for High Precision Position Monitoring

울산대학교 대학원  
중공업융합기술공학과  
윤수경

고정밀 위치 모니터링을 위한  
초광대역 통신 기반 측위 알고리즘 연구

지도교수 서영수

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2020년 02월

울산대학교 대학원  
중공업융합기술공학과  
윤수경

윤수경의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 김 성 현

심사위원 서 영 수

심사위원 박 재 현



울산대학교 대학원

2020년 02월

## 국 문 요 약

### 고정밀 위치 모니터링을 위한 초광대역 통신 기반 측위 알고리즘 연구

울산대학교 대학원

중공업융합기술공학과

윤수경

최근 작업 구역 내 인명 안전 및 작업 생산량 관리 등의 목적으로 위치 정보를 이용한 모니터링에 관해 관심이 높아지면서 실내외 정확한 위치 및 이동경로 파악 등이 주요 해결 과제로 부상하고 있다. 이를 위해서는 유선이 아닌 무선 통신 환경을 구축하여야 하는데 실제 접목시키고자 하는 중공업 내 대부분의 작업 환경 여건 상 이와 같은 통신 환경을 구축하기는 어려운 실정이며, 주변 작업 환경이 주로 철판 격벽 및 철판 구조 등으로 이루어진 환경으로 인해 전파의 회절 및 굴절에 의한 레인징 오차가 발생해 정확한 위치 파악이 어려운 상황이다. 본 논문에서는 이러한 열악한 작업 환경 내에서 다중경로에 비교적 강인하고 자유공간에서 수 센티미터 오차를 가지는 정밀도가 높은 초광대역 통신 기술을 이용한 측위 알고리즘 연구를 진행하였다. 초광대역 통신 방식은 매우 짧은 펄스 폭을 가진 임펄스 신호를 이용한 방식이며, 송수신된 전파 신호의 도달 시간을 이용하여 거리를 계산하게 된다. 이 거리 정보를 이용하여 좌표를 추정하는데 사용되는 측위 알고리즘은 기본적으로 ToA(Time of Arrival)방식을 적용하였다. 또한 초광대역 통신은 다른 통신 방식에 비해 저전력이며 별도의 반송파(Carrier)를 사용하지 않아 송수신 시 신호 구별이 뚜렷하며 정확한 측위가 가능한 장점이 있다. 이를 응용하면 목표물의 거리, 목표물의 존재 파악, 목표물의 움직임 파악(속도 등), 여러 목표물의 정보 파악 등 다양한 정보를 취득하여 이용할 수 있다. 본 논문에서 사용한 하드웨어는 상업적으로 초광대역 통신 기술을 이용 가능하도록 출시된 여러 하드웨어들의 정밀도 측면에서 비교 과정을 통해 아일랜드 업체인 Decawave® 사의 DWM1001 모듈을 선정하였으며, 이 모듈을 사용하여 임의의 초광대역 통신 네트워크 시스템을 구축한 후, 각종 환경에서의 실험 및 보정 연구를 통해 위치 정밀도를 개선하고자 하였다. 마지막 부분에서는 각종 실험 분석 결과에 따라 제안하고자 하는 측위 알고리즘에 대해 설명하고 적용하였다. 제안하는 측위 알고리즘의 목적은 장애물 존재 여부에 따른 거리 차이를 감지한 뒤 이를 개선하기 위함이며 보정 방법으로는 스플라인 근사(Spline Approximation)법을 접목시켰다. 단, 보정된 측위 알고리즘은 성능 실험을 통한 ranging 실험 결과 및 실제 거리보다 큰 거리 오차에 대한 보정에 초점을 두었다.



## 목 차

그림 목 차.....	III
표 목 차.....	IV
1. 서론.....	1
1.1 연구배경.....	1
1.2 연구목적.....	2
2. 이론적 배경.....	3
2.1 무선 통신 측위 기술.....	3
2.1.1 GPS(Global Positioning System).....	3
2.1.2 WiFi(Wireless Fidelity).....	3
2.1.3 RFID(Radio Frequency Identification).....	4
2.1.4 UWB(Ultra Wide Band).....	4
2.1.5 BlueTooth.....	6
2.2 무선 측위 알고리즘.....	6
2.2.1 RSSI(Received Signal Strength Indicator) 방식.....	7
2.2.2 AOA(Angle Of Arrival) 방식.....	7
2.2.3 TOA(Time Of Arrival) 방식.....	8
2.2.4 TDOA(Time Difference Of Arrival) 방식.....	11
3. 연구방법 및 과정.....	12
3.1 UWB 통신 기반 실내 측위 시스템 구현.....	12
3.1.1 연구에 사용한 하드웨어 특성.....	13

3.1.2 시스템 기본 구조(초기 설정 단계) 및 프로토콜 방식 .....	15
3.1.3 하드웨어 성능 분석 .....	18
3.1.3.1 거리 변화에 따른 정밀도 실험 및 분석 .....	19
3.1.3.2 안테나 방향에 따른 정밀도 실험 및 분석 .....	20
3.1.3.3 높이 변화에 따른 정밀도 실험 및 분석 .....	22
3.2 시간 기반 측위 알고리즘 구현 및 시뮬레이션 .....	23
3.2.1 기본 측위 시스템 구성 및 기하학적 계산 방법 .....	23
3.2.2 알려진 고정노드 위치가 있는 조건의 이동노드 위치 추정 .....	25
3.2.3 알려진 고정노드 위치가 없는 조건의 이동노드 위치 추정 .....	26
3.3 측위 알고리즘 실험 및 오차 분석 .....	28
3.3.1 실험 설정 .....	30
3.3.2 고정객체의 위치 추정 실험 .....	30
3.3.3 이동객체의 위치 추정 실험 .....	32
3.3.4 다중 경로 환경에서의 위치 추정 실험 .....	34
3.3.5 실험 결과 분석 .....	40
3.4 정밀도 개선을 위한 측위 알고리즘 제안 .....	42
3.4.1 알고리즘 목적 및 구성 .....	42
3.4.2 알고리즘 적용 및 실험 .....	52
4. 연구 결과 .....	52
4.1 제안된 측위 알고리즘 실험 결과 .....	52
4.2 산업 모니터링 적용 시나리오 .....	55
5. 결론 및 보완점 .....	56



참고문헌 .....	58
APPENDIX .....	60
ABSTRACT .....	61

## 그림 목 차

그림1 초광대역 시스템과 협대역 시스템 비교 .....	5
그림2 (a) Reverse link AOA [3] .....	8
그림3 (b) Forward link AOA [3] .....	8
그림4 시간 기반 레인징 방법.....	9
그림5 기하학적 TOA 방식.....	10
그림6 기하학적 TDOA 방식 .....	11
그림7 DWM1001 module [11].....	13
그림8 DWM1001 내부 블록 다이어그램 [9] .....	14
그림9 DWM1001 UWB 파라미터 특성 .....	14
그림10 FDMA(Frequency Division Multiple Access).....	16
그림11 TDMA(Time Division Multiple Access) .....	16
그림12 CDMA(Code Division Multiple Access) .....	16
그림13 Superframe 구조.....	17
그림14 TWR(Two Way Ranging) slot 내부 구조.....	17
그림15 실험 배경 1(Distance Accuracy).....	19
그림16 실험 결과 1(Distance Accuracy).....	20
그림17 실험 배경 2(Antenna Orientation).....	20
그림18 실험 결과 2(Antenna Orientation).....	21
그림19 모듈 자세에 따른 분석 .....	21
그림20 실험 배경 3(Antenna Height) .....	22
그림21 기본 측위 시스템 구성 및 시뮬레이션.....	23
그림22 추정된 Tag 좌표 비교.....	26
그림23 추정된 Tag 및 Anchor 좌표 비교 .....	27
그림24 Anchor-free case [14].....	28

그림25 고정 객체 실험 배경 .....	31
그림26 고정 객체 추정 실험 결과 .....	31
그림27 이동 객체 실험 배경 .....	32
그림28 이동 객체 추정 실험 결과1 .....	32
그림29 이동 객체 추정 실험 결과2 .....	33
그림30 다중 경로 환경 .....	34
그림31 다중 경로 신호 형태 .....	35
그림32 철판 영향 실험 결과1 .....	36
그림33 철판 영향 실험 결과2 .....	36
그림34 직접 경로 유무 실험 설정 .....	37
그림35 DP 오차 분포 .....	38
그림36 각 d 오차 분포 형태 .....	38
그림37 UDP 오차 분포 .....	39
그림38 각 d 오차 분포 형태 .....	39
그림39 평균 거리 분포 비교 .....	40
그림40 네트워크 확장 실험 설정 .....	41
그림41 네트워크 확장 추정 실험 결과 .....	42
그림42 NLoS 개선 목적 측위 알고리즘 순서도 .....	43
그림43 측위 알고리즘 내부 과정(순서도 1) .....	44
그림44 스플라인 곡선 .....	48
그림45 스플라인 근사 곡선 .....	49
그림46 실험 환경 및 개요 .....	52
그림47 실험 결과 1(NLoS 판단 과정) .....	53
그림48 실험 결과 2(스플라인 근사 과정) .....	54
그림49 실험 결과 3(이동 궤적 개선 결과) .....	55

## 표 목 차

표 1 대표적인 다중화 기법 .....	15
표 2 하드웨어 정밀도 실험 파라미터 .....	18
표 3 실험 결과 3(Antenna Height) .....	22
표 4 위치 추정 실험 파라미터.....	30
표 5 NLoS 판단 경우의 수 .....	45
표 6 위치 정보 활용 시나리오.....	56

## 1. 서론

### 1.1 연구배경

최근 주파수 자원 한정 문제로 인해 각광받고 있는 무선 통신 방식 중 하나인 UWB(Ultra Wide Band) 기술을 이용한 위치 인식 방법은 정밀도 높은 근거리 고속 무선 통신망을 제공해 준다. 초기에는 군사용 목적으로 사용되었던 기술이었으나 오늘날에는 특정 주파수 대역 및 전력 제한을 두어 상업용 목적으로도 이용이 가능하게 되었다. UWB는 매우 좁은 펄스 폭을 가진 임펄스 신호를 통신에 사용하기 때문에 일반적인 무선 통신에서 사용되는 복잡한 변복조 과정이 필요 없게 되어 통신 장비의 구조도 간단하게 제조할 수 있으며 그만큼 비용도 낮출 수 있다. 송수신 신호의 전력 밀도 또한 잡음 이하 대역으로 낮기 때문에 전력 소모도 줄일 수 있으며 고속 데이터 통신이 가능할 것으로 기대되고 있다. 또한 UWB 신호는 투과성이 좋기 때문에 건물의 벽이나 비금속 장애물 등을 투과할 수 있다.[4] 그렇기 때문에 벽면에 가려져 있던 사물의 위치를 파악할 수 있게 되므로 실내 위치 인식 분야에서 사용이 확대되고 있는 실정이다. 하지만 초광대역의 주파수 대역폭을 사용하는 만큼 여러 UWB 통신용 기기들이 동 시간대에 사용됨에 따라 이 또한 간섭의 문제가 발생하므로 UWB가 가지는 장점들을 온전히 이용할 수 없게 되며, 대역폭을 분할하여 다중화 하는 방식이 많이 제안되고 있다. 이에 따라 우리나라의 초광대역 통신을 이용할 수 있는 주파수는 3.735~4.8GHz 대역과 7.2~10.2GHz 대역으로 분배되어 있으며, 최근에는 UWB 통신용으로 6.0~7.2GHz 대역이 추가적으로 확보되었다. UWB 기술은 초기 개발 시점에는 근거리 내 초고속 데이터 전송 분야에 많이 활용되었으나 최근에는 위치를 추적하고 인식하는 분야로 확대되고 있다. 물류 위치 추적, 작업장 안전 관리 분야, 운동 경기 분석, 차량 충돌 방지, 로봇 자율 주행 제어, 병원 내 환자 추적, 재고 관리, 자동 정밀 조립 공정 등 다양한 산업에서 UWB의 활용 분야가 등장하고 있다.

일반적으로 많은 산업 분야의 작업 현장에는 구역 모니터링 목적으로 유선 방식의 CCTV를 많이 이용하고 있다. 이는 설치 공간을 많이 차지하게 되며, 전체적인 공간을 한눈에 파악할 수 없어 다수 대의 설치가 요구된다. 또한 여러 변수들(작업장 내 이물질, 날씨 등)로 인해 시야가 확보되지 않을 수 있다. 그렇기 때문에 차세대 무선 통신 기술들을 이용해 전체적인 작업의 흐름을 파악하고 관리하고자 하는 요구가 늘어나고 있다. 이러한 작업 모니터링의 필요성으로는 작업 현장을 파악함으로써 업무 손실을 줄이는 동시에 작업 계획을 수립할 수 있고, 작업 중 긴급한 상황이 발생할 경우 신속하게 대처할 수 있으며, 결과적으로 작업 업무를 효율적으로 할 수 있게 만들어 준다. 더해서 작업 구역 내 자산 관리 및 보안이 확대됨에 따라 모니터링을 통해 사전에 예방할 수 있게 된다.

## 1.2 연구목적

UWB 통신에 관한 중점이 되고 있는 연구는 크게 세가지 방향의 주제로 나눌 수 있다. 첫 번째로 센서 통신을 기반으로 한 위치 파악 알고리즘의 정확성을 높이는 방법, 두 번째는 기존의 여러 Localization 알고리즘의 이점들을 결합하는 방법, 마지막으로 기존 알고리즘을 다양한 환경으로 개선하거나 확장하는 방법에 관한 연구이다.

본 연구는 초광대역 통신 기술을 이용하여 보다 정밀한 위치를 인식하고 추적하는 것을 목표로 하였고 개선된 측위 알고리즘을 적용시킴으로써 작업 구역 내 정확한 모니터링을 통해 작업의 효율을 보다 향상시키고자 하였다. 특히 무선 통신망을 구축하고자 하는 주변 환경 여건에 따라 통신의 매개체인 전파의 다중경로가 발생되어 추정하고자 하는 위치의 정밀도에 영향을 주기 때문에 접목시키고자 하는 작업 환경에 맞게 보정된 측위 알고리즘을 연구해보고자 하였다. 본 논문에서는 기본적으로 기존의 위치 추정 알고리즘 중 전파 도달 시간을 이용하여 거리를 계산하는 TOA(Time Of Arrival) 방법의 원리를 적용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같은 순서로 구성되었다. 제2장에서는 본 논문에 필요한 이론적인 배경들을 설명하였고, 제3장에서는 본 연구에 사용한 하드웨어의 특성과 통신 규격에 대해 설명하고 이론적인 계산을 바탕으로 위치를 추정하는 시뮬레이션 과정을 실시한 뒤 실제로 초광대역 통신망 환경을 구성하여 실험을 수행하였다. 그리고 마지막 부분(3.4절)에서 실험 분석에 대한 결과로 제안하고자 하는 알고리즘에 관해 수록하였다. 제4장에서는 제안하고자 하는 측위 알고리즘을 적용한 실험 결과에 대해 분석하고 작업 환경 모니터링 방안에 대해 생각해 보았다. 마지막으로 제5장에서는 연구 과정의 결론을 도출하고 보완점을 고찰해 보았다.

따라서 정확한 위치 파악과 접목시킬 환경으로 개선하는 방법에 대해 연구하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 무선 통신 측위 기술

위치 인식 기술은 크게 세 분류로 나눌 수 있다. 첫 번째로 위성통신을 이용한 기술, 두 번째로 이동 통신망을 이용한 기술, 마지막으로 근거리 무선 통신 기반으로 하는 기술이 있다. 현재 전세계적으로 위치 인식 기술을 대표하는 GPS(Global Positioning System)는 인공위성을 이용하여 대상의 위치를 인식하게 되는데 인공위성의 신호가 약해지는 지하나 빌딩 등의 실내 환경에서는 한계가 있다. 이를 해결하기 위한 실내 환경 및 음영 지역에서는 WiFi, RFID, UWB, Bluetooth 등의 무선 주파수(RF, Radio Frequency)를 이용한 방법의 근거리 무선 통신 기반으로 하는 시스템들이 개발되고 이미 적용되어 많은 분야에서 사용되고 있다. 위치확인서비스, 물류서비스, 주변정보서비스, 교통서비스, 안전 및 구난 서비스, 광고거래서비스 등이 적용 예이다.

#### 2.1.1 GPS (Global Positioning System)

GPS는 1970년 미국 국방부에서 지구 상에 존재하고 있는 사물의 위치를 측정하고 인식하기 위한 당시 군사 목적의 시스템이었지만 현재로서는 미국에서 개발한 인공위성을 이용한 세계적인 범용 무선 항법 시스템이다. 지구 주위를 도는 24개의 GPS 위성을 이용한 위치, 속도 및 시간 측정 서비스를 제공한다. 현재는 모든 스마트폰 및 네비게이션 장치들에 수신기가 포함되어 있다. 이를 이용하여 사용자는 위치, 속도 및 시간을 정확도 높게 계산할 수 있으며, 전세계적으로 공통 좌표계를 사용 가능하도록 해준다. 또한 24시간 연속적인 서비스를 제공하므로 시간제한이 없으며, 기상조건에도 강한 것으로 알려져 있다. 수신기의 성능과 수신된 위성 신호에 의해 정밀도가 결정되고, 사용자 입장에서는 GPS 수신기로부터 신호를 수신하여 수신기의 안테나의 위치와 속도 및 시각을 알 수 있다. 일반적으로 GPS는 10m 정도의 오차를 가지는 정보를 제공한다. 3차원 좌표와 시간의 변수를 알기 위해서는 4개 이상의 위성을 동시에 관측해야 한다. GPS는 측정된 거리로부터 삼각 측량법을 이용하여 위치를 계산하는 시스템의 대표적인 예이다. 삼각 측량법의 원리를 이용하여, 수신기 안테나까지의 거리는 각각의 위성에서 발생시킨 신호의 발생시점과 수신된 시점의 시간 차이를 측정한 다음 자유공간의 전파의 속도인 빛의 속도를 곱하여 계산하게 된다. (거리 = 전파도달시간 x 빛의 속도)

#### 2.1.2 WiFi (Wireless Fidelity)

WiFi는 근거리 무선 통신 기술로서, 2000년 초반에 인터넷의 활성화에 따라 노트북을 중심으로 사용이 확대되었다. IEEE 802.11 [1]에서는 와이파이가 무선 접속 기술을 개발하고 있고, 점차 다양한 서비스에 와이파이가 활용됨에 따라 요구하는 기능이 점점 많아지고, 그 결과 와이파이가 매체 접속 제어 프로토콜, 물리 계층 프로토콜 등의 복잡도가 증가하고 있다. 초기 와이파이의 목

적은 다양한 환경에서 네트워크와의 연결을 쉽게 제공하기 위한 것이었고, 무선 자원의 효율적인 이용보다는 구현이 용이하고 쉽게 확장될 수 있도록 통신 프로토콜이 개발되었다.

### 2.1.3 RFID (Radio Frequency Identification)

일반적으로 RFID 기술은 관리하고자 하는 대상 사물들에 RFID 태그를 부착하고 전파를 이용하여 해당 태그의 정보를 획득 후, 처리 및 활용하는 기술을 의미한다. 이 기술은 최초로 2차 세계대전 중 영국 공군이 야군과 적군 비행기를 레이더 상으로 구별하기 위해 활용하였다. 그 후 무선학회에서 RFID 이론과 이를 구현하기 위한 연구 논문들이 발표되어 왔으며, 1973년에 Charles Walton이 수동 RFID 기반 도어 록 리더기로 최초로 RFID 특허를 취득하였다. 이후에 RFID 태그의 크기가 작아지면서 가격도 낮아졌고 각종 관리 분야와 기타 산업분야에서 일반용으로 사용되기 시작하였다. 2000년대에 RFID의 무선 인식 기술의 중요성이 크게 부각되면서 다양한 적용 분야들이 등장하였는데 예를 들어, 물류관리, 보안 분야, 전자화폐 등의 핵심적인 기술로 부각되었다. RFID 시스템의 구성으로는 사물의 정보를 가지고 있는 태그(Tag), 이 태그 정보를 판독하고 해독하는 기능을 가진 리더기(Reader), 이 리더기로부터 제공받은 정보들을 처리하는 중심이 되는 처리장치인 응용프로그램, 호스트 컴퓨터 등으로 구성된다. 다양한 산업분야에 응용 및 적용이 가능한 이 RFID 기술은 매우 큰 시장 잠재력으로 가지고 있으며 물품의 흐름이 있는 곳이라면 어디에서나 적용이 가능할 것으로 생각된다.

### 2.1.4 UWB (Ultra Wide Band)

UWB 통신 시스템은 중심 주파수의 20% 이상(또는 500MHz)의 주파수 대역폭을 사용하는 통신 시스템을 말하며, 미국 국방부가 1960년대에 군사용 목적으로 처음 개발한 기술로써 시간 대역에서 매우 짧은 폭을 가진 펄스 신호를 주파수 대역에서 넓은 대역으로 확산시켜 통신하는 기술이다. 대부분의 기본적인 전파를 이용한 무선 통신 기술들은 반송파라고 정의하는 기준 주파수 파형의 형태를 변화시켜 디지털 정보를 전달하는데 비해 UWB 기술은 별도의 반송파를 사용하지 않고 0과 1처럼 일정한 주기와 파형을 가지는 전기적인 신호인 펄스를 1초에 수십억 회 발산시키는 방법을 이용해 정보를 전달한다. 이 신호는 규칙성을 가진 펄스열로 구성되고, 폭이 매우 좁은 초광대역 특성에 의해 신호 스펙트럼 밀도를 넓은 대역에 분산시키게 된다. 잡음과 유사한 정도의 낮은 에너지 밀도를 가지므로 이를 식별하거나 차단하기 어려운 특징을 가지기 때문에 보안 유지에 적합하다고 할 수 있으며 다른 서비스와의 간섭이 최소화된다. 또한 매우 짧은 펄스를 가지기 때문에 직접파와 반사파의 경로의 차이가 조금만 나더라도 신호의 구분이 용이해져 다중 경로 페이딩의 영향이 감소된다. 따라서 정확한 거리와 위치 측정에 있어서 높은 해상도를 가진다. 또한 UWB는 다중 접속이 시도되는 경우에 영상과 음성 신호가 혼합된 데이터를 실시간으로 전송할 수 있고, 동일 영역에 존재하는 여러 개의 UWB 통신용 기기가 동시에 동작할 수도



있다. 이러한 상황에서 패킷의 충돌 방지를 위한 MAC 프로토콜이 IEEE802.15.3에 규정되어 있다. IEEE 802.15.4a는 2007년 IEEE에서 RF를 이용한 거리 측정을 위한 표준으로 규정되었고, 이 표준 규격에는 IR-UWB 방식과 CCS(Chirp Spread Spectrum)방식이 반영되었는데 이는 거리를 측정하기 위한 통신 규격을 정하고 있다. IR-UWB는 Impulse Radio를 이용해 반사된 신호로 거리를 측정하는 방식이고, CCS는 시간에 따라 주파수가 바뀌는 Chirp 신호를 이용해 거리를 측정하는 방식이다. 이 2가지 방식 모두 Radar의 기본 원리를 이용하고 있다고 할 수 있다. RTLS(Real Time Location System, 실시간 위치 추적 시스템)에서는 CCS를 사용하는 경우가 제한적이기 때문에 주로 IR-UWB 방식을 채택한다. IR-UWB에서 IR은 시간 축 개념이고, UWB는 주파수축 개념이다. 즉 수 ns의 Impulse Radio를 발생시키는데 이는 주파수 대역에서 보았을 때, 광대역의 범위로 주파수가 나타나기 때문에 Ultra Wide Band 가 되는 것이다.

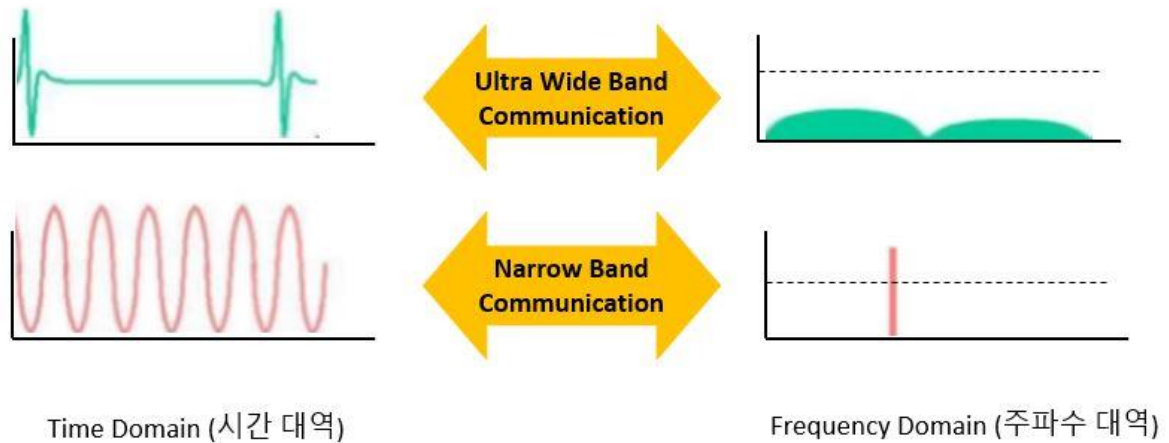


그림1 초광대역 시스템과 협대역 시스템 비교

UWB 기반 통신의 특징을 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 매우 짧은 펄스 폭을 가진 임펄스 신호로 송/수신함.
- 매우 넓은 주파수 대역폭을 가짐.
- 대역폭이 클수록 파장이 작아 분해능(resolution)이 높아짐.
- 기존의 다른 무선 시스템들 과의 간섭이 매우 적음.
- 기존 주파수 대역에 대해 잡음으로 표현 가능함.
- RF 에너지를 광대역으로 분산시킴.
- 정밀한 위치 추적 및 인식이 가능함.
- 서비스 거리에 제한이 있음.
- 다중 경로 페이딩에 강인함.

- 미국의 비허가 소출력 제도에 부합해 주파수 자원들을 중복 사용 가능함.
- 반송파를 사용하지 않아 송수신기 구조가 간단해지고 상대적으로 소비전력이 적음.
- 대용량의 데이터를 전송 가능함.

### 2.1.5 BlueTooth

블루투스 1994년에 에릭슨이 최초로 개발을 시작하였고 2000년대에 본격적으로 이용되기 시작한 근거리 무선 통신 기술이다. 이는 반경 10m 이내의 근거리에서 있는 통신 기기들 사이에서 음성 및 데이터 전송을 위한 개방 표준 규격이다. 무선랜과 같은 2.4GHz 주파수 대역을 사용하고, 주파수 대역을 여러 개의 채널로 분할한 뒤 신호 간의 간섭을 피하기 위해 주파수 호핑 방식을 사용한다. 블루투스는 다수 기기보다는 1:1 방식의 데이터 통신을 위한 목적이며, 경우에 따라서는 하나의 마스터 장치를 중심으로 여러 대의 슬레이브 장치가 연결되는 Piconet을 구성할 수 있다. 블루투스는 각종 정보기기들 뿐 아니라 가전 제품 등을 포함하는 네트워크도 구성 가능하며 어떠한 유무선 망 과도 연동 가능하게 한다. 블루투스 통신 표준은 지속적으로 변화해왔고, 이 중 블루투스 버전 2.0과 버전 4.0를 많이 접할 수 있다. 블루투스 버전 2.0은 지원하는 단말의 스펙트럼이 넓고 상대적으로 빠르며, 구현도 간단한 장점을 가지고 있으나, 블루투스 연결이 성립된 후에는 소모전류가 상대적으로 높은 단점이 있다. 블루투스 4.0 버전은 2.0 버전의 단점을 해결한 BLE(BlueTooth Low Energy) 특성이 포함되어 있다. 이는 모바일 장치가 저전력으로 블루투스 통신 기능을 사용할 수 있도록 해주기 때문에 각종 웨어러블 장치[2]등이 BLE 기반으로 동작한다. 단, 이전의 2.0 버전보다는 속도가 느린 편이다.

참고로 주파수 호핑 방식이란 다수의 채널 사이를 특정 순서에 따라 이동하며 데이터를 분할하여 전송하는 방법으로 혼잡이 심한 채널은 건너뛰고 다른 채널을 사용함으로써 동일 주파수 대역폭을 사용하는 기기간의 주파수 간섭에 대응이 가능하다. 블루투스 클래식 경우 1초당 1600번 호핑이 가능하고 마스터 기기가 생성하는 호핑 패턴에 슬레이브 기기가 동기화함으로써 통신이 가능하다.

### 2.2 무선 측위 알고리즘

앞서 나열한 위치 인식 기술을 기반으로 한 대표적인 측위 알고리즘으로는 수신된 신호의 세기를 기반으로 위치(거리)를 인식하는 방법인 RSSI(Received Signal Strength Indicator, 수신신호세기 기반) 방식과 전파가 도달하는 각을 측정하고 신호의 방향을 이용해 위치를 인식하는 AOA(Angle Of Arrival) 방식, 그리고 전파의 도달 시간을 측정하여 위치(거리)를 인식하는 TOA(Time Of Arrival) 방식 및 전파 도달 시간의 차이를 이용하여 상대적인 위치(거리)를 파악하는 TDOA(Time Difference Of Arrival) 방식 등이 있고, 각각의 위치 계산 알고리즘을 이용한

방식을 자세하게 설명한다.

### 2.2.1 RSSI (Received Signal Strength Indicator) 방식

RSSI 방법은 무선 통신 기술에서 수신기에서 수신된 전파의 세기가 거리에 따라 달라지는 원리를 이용하여 송신기와 수신기 사이의 거리를 측정하는 방법이다. 이 방법은 간편한 측정이 가능하고 비용이 적게 드는 장점이 있으나 환경적인 요인들로 인해 측정 오차가 많이 발생할 수 있으므로 전파 환경에 따라 정확한 경로 손실(Path Loss) 모델이 필요하게 된다. 다음은 신호 전파에 따른 수신 신호 Power를 구하는 모델식이다.

$$P_r[dBm] = P_t[dBm] + G_t + G_r - 20 \log(R) - 20 \log(FREQ) - 32.44 \quad (2.1)$$

$P_r[dBm]$  = 수신기에서 수신되는 전파의 세기 (RSSI 로 변환되는 값)

$P_t[dBm]$  = 송신기 출력

$G_t$  = 송신기 안테나 이득 (dBi)

$G_r$  = 수신기 안테나 이득 (dBi)

$R$  = 통신 거리 (m)

$FREQ$  = 주파수 (단위 MHz)

32.44 = 일반 대기 모델의 상수 값

(2.1)식에서 볼 수 있듯이, 신호의 경로 손실과 통신 거리(R)와의 관계는 로그 관계에 있기 때문에 측정되는 거리가 멀수록 경로 손실의 변화가 위치 추정 정확도에 미치는 영향이 커지게 된다. 그러므로 RSSI 방식을 이용한 위치 추정은 상대적으로 위치 정확도가 낮은 편이다.

### 2.2.2 AOA (Angle Of Arrival) 방식

각도 기반의 측정을 하는 AOA방법은 정확한 시간동기가 필요 없지만 신호 수신 단에 배열안테나를 설치하여 수신된 신호의 방위각을 측정해야 한다. 배열안테나는 기준점에 대응해 고정된 위치 값을 갖는 센서로부터 전달된 신호를 수신하는 기능을 수행한다. 하지만 이 배열안테나로 인해 센서 크기도 커지게 되고 비용이 증가하게 되는 단점이 있다. 기존에는 역방향 링크(reverse link) 신호를 수신하여 입사각을 구했지만, [3]과 같이 순방향 링크(forward link) 신호를 수신하여 입사각을 측정하는 방식을 이용하면 센서의 크기도 줄일 수 있으며 효율적인 운용이 가능하다.

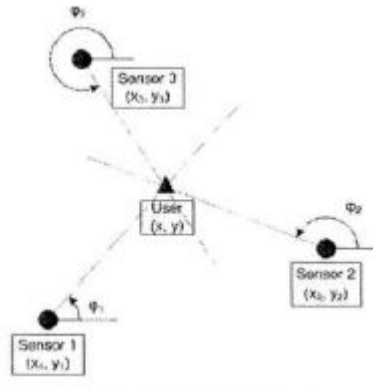


그림2 (a) Reverse link AOA [3]

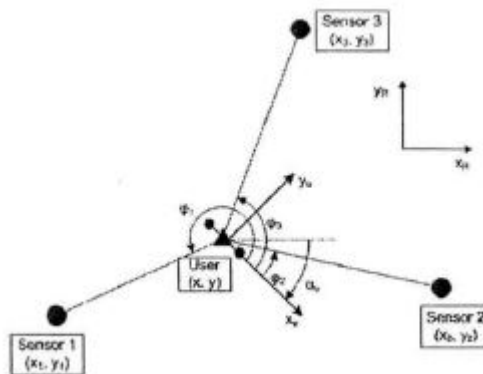


그림3 (b) Forward link AOA [3]

### 2.2.3 TOA (Time Of Arrival) 방식

TOA 방식은 전파가 도달하는 시간을 이용해 위치(거리)를 계산하는 방식이다. 목표물과 고정 노드 간의 거리 계산은 자유공간 내 전파속도인 빛의 속도를 산출한 도달 시간과 곱해서 구할 수 있다. 이 방식은 목표물과 고정 노드의 시간 동기가 맞아야 정확한 거리를 산출해 낼 수 있다. 시간을 기반으로 한 통신 방법은 기본적인 레인징 방법인 TWR(Two Way Ranging) protocol 방법과 이를 두 번 반복하여 측정하는 SDS-TWR(Symmetric Double Sided Two Way Ranging) protocol 방법의 두가지 형태가 있다. 두 가지 통신 방법의 차이는 한 cycle 당 통신하는 메시지의 개수이다. 아래 그림과 같이 SDS-TWR protocol 방법은 두 노드 간에 서로 한번씩 DATA Frame 과 ACK Frame을 주고받는 두 개의 round로 구성된다.

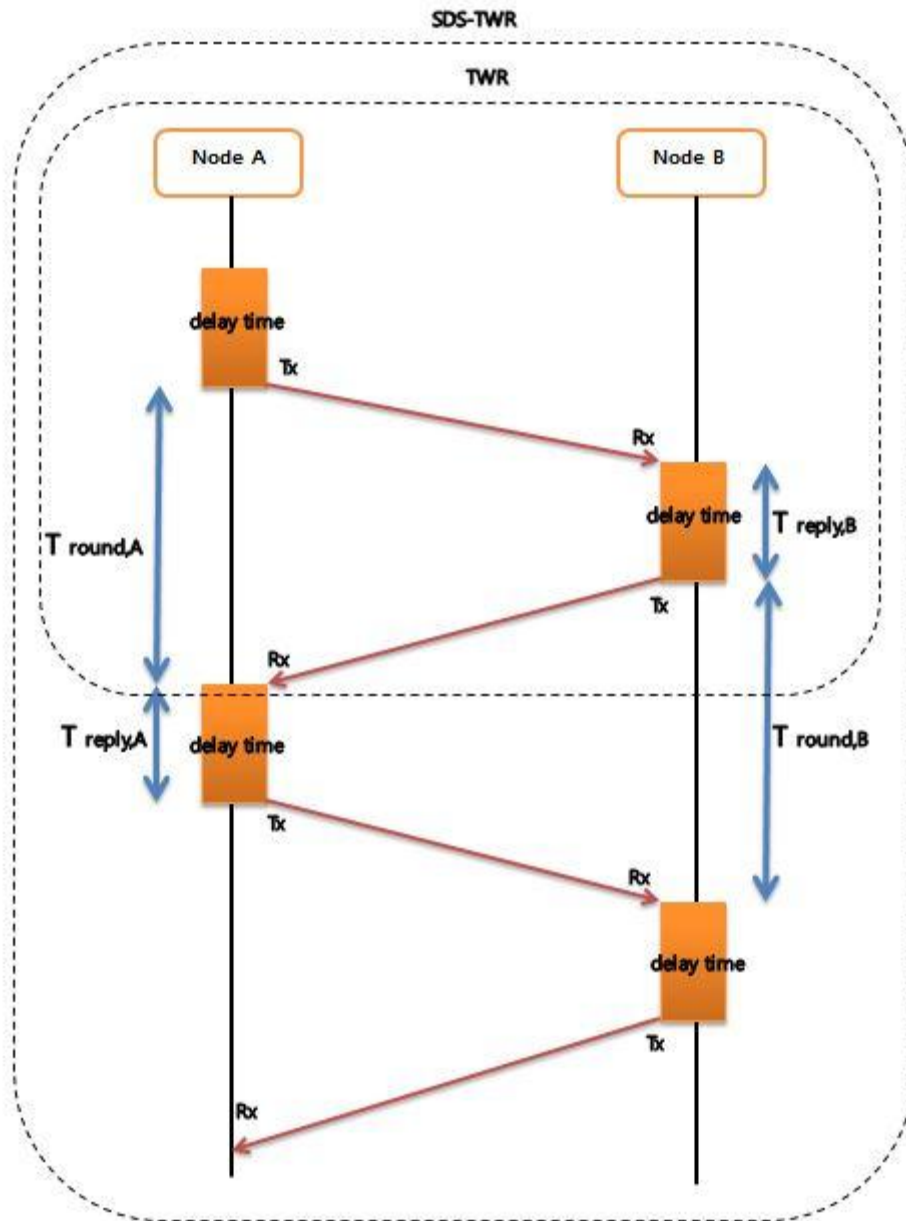


그림4 시간 기반 레인지 방법

$$t_{p,TWR} = \frac{1}{2}(T_{round,A} - T_{reply,B}) \quad (2.2)$$

$$t_{p,SDS-TWR} = \frac{1}{4}\{(T_{round,A} - T_{reply,B}) + (T_{round,B} - T_{reply,A})\} \quad (2.3)$$

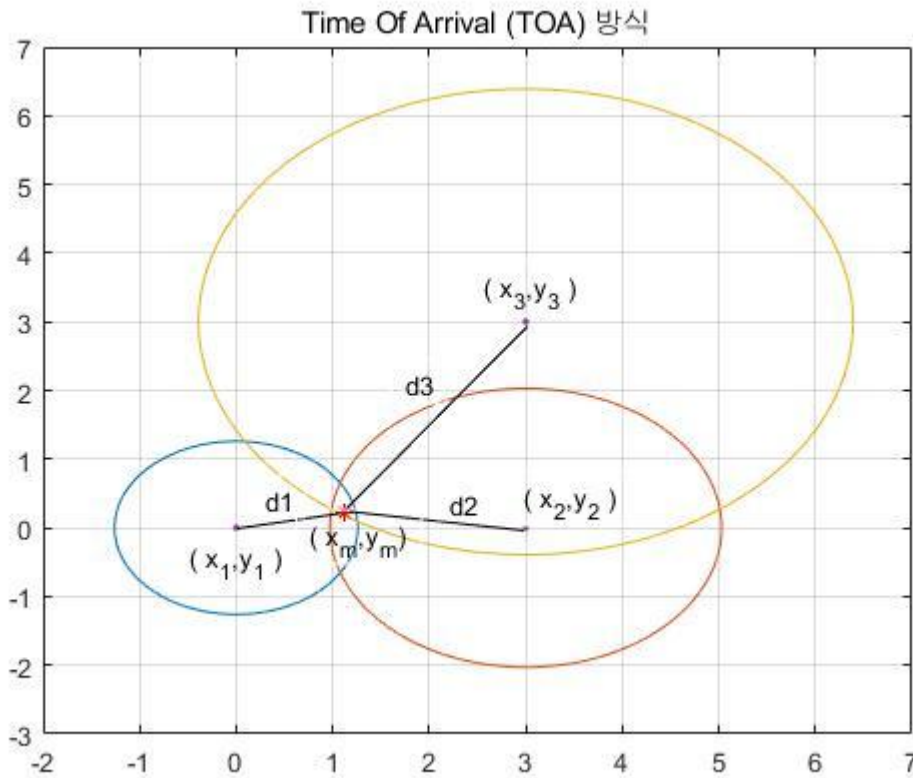


그림5 기하학적 TOA 방식

그림 5과 같이 기하학적인 설명으로는 알려진 위치의 고정 노드들을 중심으로 하는 원을 그려 보았을 때, 이 원들의 교점(또는 내부)에 목표물이 위치해 있게 된다.  $(x_m, y_m)$  은 추정하고자 하는 임의의 목표물의 위치 좌표이고,  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  는 알려진 위치의 고정 노드들의 좌표이다.  $d_1, d_2, d_3$  은 전파 도달 시간을 이용해 산출한 거리를 나타낸다. 이 거리를 이용해 각 고정 노드를 중심으로 하는 원을 나타내면 교차점을 구해낼 수 있다.

$$(d_1)^2 = (x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2 \quad (2.4)$$

$$(d_2)^2 = (x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2 \quad (2.5)$$

$$(d_3)^2 = (x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2 \quad (2.6)$$

$d_1$  = 목표물과 고정 노드1과의 거리

$d_2$  = 목표물과 고정 노드2과의 거리

$d_3$  = 목표물과 고정 노드3과의 거리

### 2.2.4 TDOA (Time Difference Of Arrival) 방식

TDOA 방법은 목표물과 두 개 이상의 알려진 위치의 고정 노드들 사이의 전파 도달 시간의 차이를 측정하여 목표물의 위치를 추정하는 방식이다.

그림 6과 같이 기하학적인 설명으로는 최소로 3개의 고정 노드가 존재할 때 이 중 2개의 고정 노드가 한 쌍의 초점이 되어 쌍곡선을 형성하면 총 2개의 쌍곡선을 그릴 수 있게 된다. 이 쌍곡선들의 교점을 찾아냄으로써 목표물의 위치를 결정할 수 있다.  $(x_m, y_m)$ 은 추정하고자 하는 임의의 목표물의 위치 좌표이고,  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 는 알려진 위치의 고정 노드들의 좌표이다.  $d_1 - d_2, d_1 - d_3, d_2 - d_3$ 은 각 고정 노드에서 목표물의 전파 도달 시간 차이를 나타내고, 이 차이가 쌍곡선의 형태로 표현될 수 있고, 쌍곡선이 교차되는 지점을 추정하면 목표물의 위치를 구해낼 수 있다. 이러한 TDOA 방법은 목표물과 고정 노드의 시간 동기화가 필요하지는 않지만 고정 노드들 간의 시간 동기화가 정확하게 이루어져야 계산된 거리의 정밀도가 높아진다.

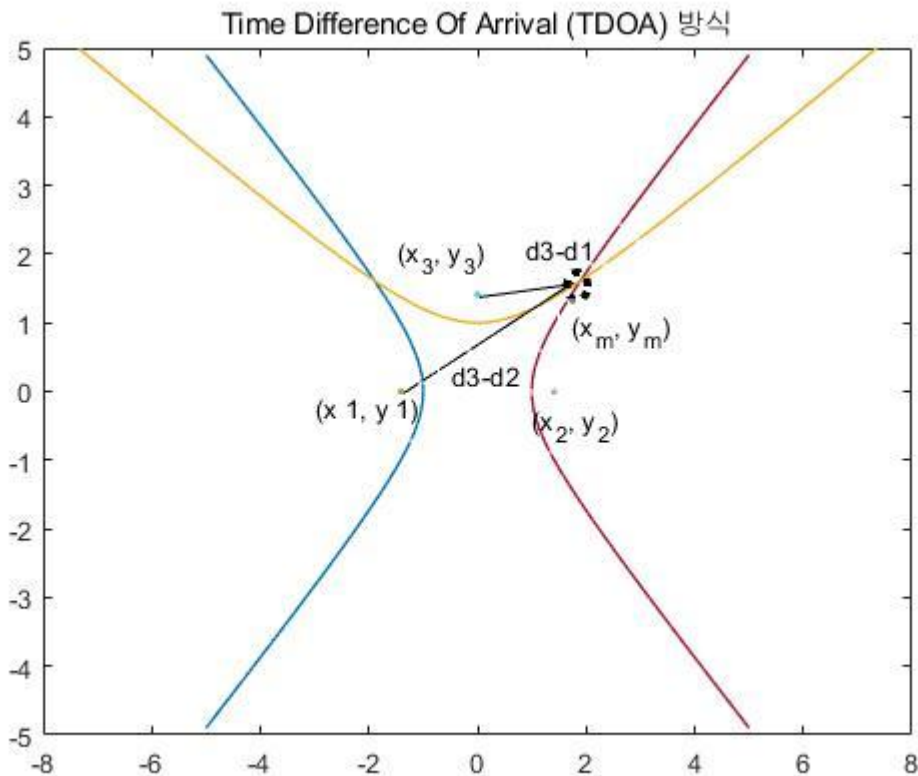


그림6 기하학적 TDOA 방식

$$(d3 - d1) = \sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} - \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2} \quad (2.7)$$

$$(d3 - d2) = \sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} - \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2} \quad (2.8)$$

$d1$  = 목표물과 고정 노드1과의 거리

$d2$  = 목표물과 고정 노드2과의 거리

$d3$  = 목표물과 고정 노드3과의 거리

### 3 연구방법 및 과정

초 광대역 기반 실내 측위 시스템은 광대역 특성으로 인해 다중 경로 및 고해상도에 대한 내성으로 널리 보급되고 있다. 이러한 장점을 이용하여 본 논문에서 제안하고자 하는 위치 보정 알고리즘은 UWB 통신을 기반으로 추정된 위치가 실제 좌표 위치에 근사하도록 보정하여 정확한 위치 추정을 위한 것이다. UWB 통신 기반 시스템은 인프라 기반 시스템으로서 전체적인 배치와 실내 설정을 위한 특수 하드웨어가 필요하다. 따라서 우선 상용화 되어 나온 모듈을 이용해 실내 작업 구역의 UWB 네트워크를 구축하였으며, 모듈로부터 얻은 거리 측정 오차를 분석하고 보정하였고, 이를 다양한 환경에 적용하였다.

#### 3.1 UWB 통신 기반 실내 측위 시스템 구현

최근 상용화된 UWB(Ultra Wide Band) 통신 기술이 위치를 인식하는 분야에 확대되어 사용되고 있다. Ubisense®, Time Domain®, Decawave® 및 Bespoon®과 같은 회사에서는 저비용, 저전력, 소형의 UWB 안테나 칩을 포함한 모듈을 제공함으로써 이를 이용한 새로운 응용 측위 알고리즘 및 프로그램을 구현할 수 있게 되었다. 또한 이 UWB 기술은 모듈 간 통신 링크를 제공하여 메시지 교환을 통한 거리 측정을 가능하게 한다. 하지만 상업적인 이용 목적의 UWB 시스템은 실제 응용에서 기대하는 정확도를 달성하지 못하는 부분이 있다. 이는 두 노드가 가시선 거리(LOS, Line Of Sight)에 있을 때 신뢰할 수 있는 위치를 얻을 수 있는데, 일반적으로 넓은 범위 구역에서의 다중 경로 도달 시간 및 주변 환경에 따른 전파의 반사, 회절, 산란 등이 발생한다. 결국 NLOS(None Line Of Sight) 조건이 발생하여 얻어진 거리는 LOS 조건의 거리보다 항상 크게 나타난다. 따라서 이를 감지하고 보정하기 위한 수많은 알고리즘 및 방법들의 연구가 진행되고 있다[5],[6]. 그렇기 때문에 실제로는 신호 송수신시 계산되는 위치를 아래 식(3.1)과 같이 하드웨어 및 안테나 지연과 같은 추가 지연이 고려되어야 한다.

$$\text{Calculated position} = \text{Real location} + \text{bias error} + \text{noise} \quad (3.1)$$



### 3.1.1 연구에 사용한 하드웨어 특성

본 논문에서 사용한 하드웨어는 DecaWave® 사에서 제조한 DWM1001 (Development Board) 모듈을 사용하였다. 이 하드웨어를 선택한 주된 이유는 [8]과 같이 다른 경쟁 제조사와 비교해보았을 때 이동 경로의 정확도 면에서 우수하고 저렴한 제품을 제공하기 때문이다.



그림7 DWM1001 module [11]

DWM1001 모듈은 DW1000 칩, UWB 무지향성 평면 안테나, Nordic nRF52832 마이크로 컨트롤러 및 휴대용 전화기 및 태블릿과 연결가능한 Bluetooth 기능을 주요 구성요소로 하는 모듈이다. DW1000 칩은 UWB 통신을 통해 메시지를 보내고 채널정보를 얻으며, 들어오는 메시지를 디코딩하여 감지한다. 따라서 내부의 DW1000칩이 핵심이라고 할 수 있다. Nordic nRF52832 은 SPI(Serial Peripheral Interface) 통신을 통해 DW1000칩과 통신하고 USB(Universal Serial Bus) 또는 UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)를 통해 PC로 메시지를 전송하는 32비트 마이크로 프로세서이다.

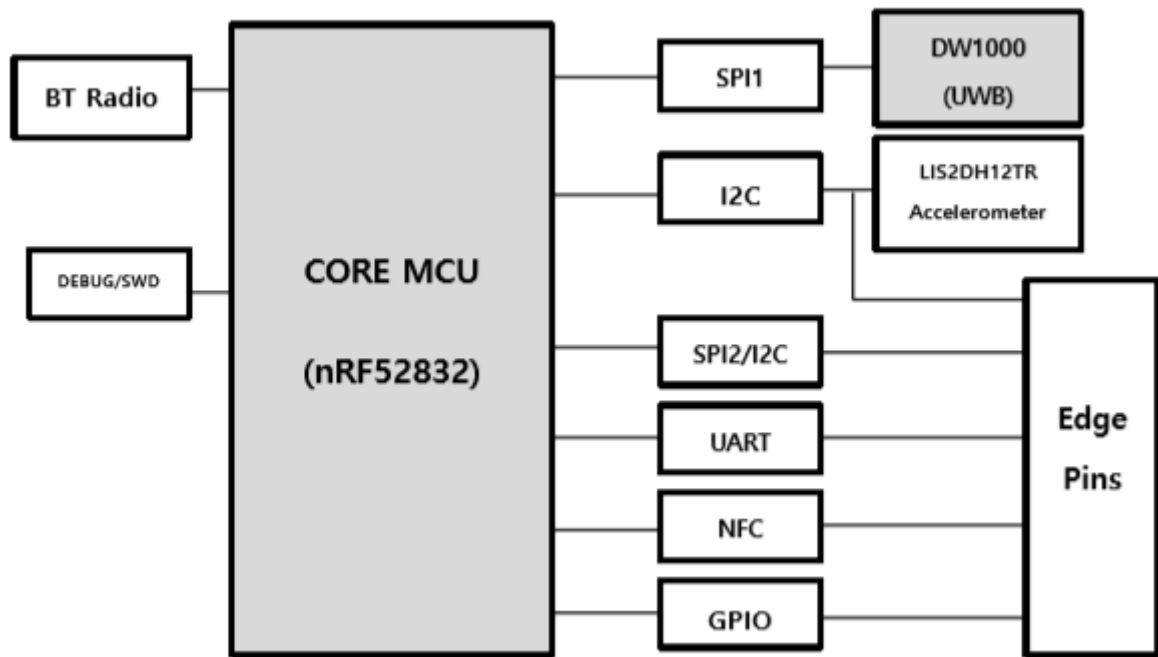


그림8 DWM1001 내부 블록 다이어그램 [9]

MDEK1001은 DWM1001 모듈에 탑재되어 있는 DW1000칩에서 모든 UWB 통신을 수행한다. 총 6개의 사용 가능한 주파수 채널이 있고, 각 채널에는 중심 주파수 및 대역폭의 조합이 다르다. 또한 16MHz 또는 64MHz PRF(Pulse Repetition Frequency)를 지원하는 다양한 프리앰블 코드가 있다. 위치 결정을 위한 타임 스탬프는 미리 정해진 프리앰블 시퀀스를 수신된 신호와 상관시킴으로써 얻어지는 채널 임펄스 응답의 추정에 의해 제공된다. DW1000의 작동 기능은 IEEE 802.15.4-2011 표준을 기반으로 동작 한다. 이러한 규정으로 송신 전력 밀도는 -41.3dbm/MHz로 제한된다. 본 논문의 실험에 사용된 MDEK1001 시스템은 64MHz PRF로 Channel 5에서 실행되도록 구성된다.

UWB Parameters	
UWB Channel	Channel 5 (6.5 GHz)
Data Rate	6.81 Mbps
PRF	64 MHz
Preamble Length	128
Preamble Code	9

그림9 DWM1001 UWB 파라미터 특성

또한 전파를 매개체로 통신하는 무선 시스템에서의 안테나는 핵심 부분이며, 안테나에서 전파를 센싱 하여 서로 간의 통신이 이루어지므로 측정 오차에 영향을 미치는 중요한 요소들 중 하나가 안테나 방향성 [7], 즉, 자세이다. 따라서 모듈의 특정 안테나 방사 패턴을 정확히 아는 것이 중요하다.

### 3.1.2 시스템 기본 구조(초기 설정 단계) 및 프로토콜 방식

DWM1001 모듈로 구성된 MDEK1001 RTLS시스템은 다수의 Anchor 및 Tag 로 구성될 수 있고, 성공적으로 네트워크 망이 구성되면 범위 측정을 수행하고 Tag의 위치 좌표를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 Anchor와 Tag 사이의 거리를 계산하기 위해 사용된 방법은 TOA(Time Of arrival) 방식이다. 이는 시간에 매우 민감한 방식이므로 구성된 네트워크 내에 하나 이상의 Anchor 와 Tag 사이에 장애물이 있을 경우, 송수신 신호가 최단 경로로 도달할 수 없게 되어 Tag의 계산된 위치가 부정확하게 된다. 이 부정확성은 장애물 재질과 크기에 따라 달라진다.

또한 다수의 노드들이 서로 메시지를 주고받기 위해 하드웨어 제조사마다 미리 정해 놓은 프로토콜 방식이 있다. 다중화 기법이란 데이터 송수신의 효율성을 극대화하기 위한 것인데 간단히 말해서 다수의 장치들이 데이터를 주고받는 과정에서 정해진 교환기법을 따르도록 정해 놓은 것이다. 대표적인 3가지의 다중 교환기법을 아래 표1과 같이 정리하였다. 본 논문에서 사용한 하드웨어의 경우는 시간을 분할하여 데이터 통신 순서를 정하는 TDMA(시분할 다중화 기법)방식을 채택하고 있다.

종류	설명	장/단점
<b>FDMA</b> (Frequency Division Multiple Access)	데이터 링크(채널)의 주파수 대역폭을 여러 개의 독립된 주파수 대역으로 나누어 여러 개의 장치 각각이 사용할 주파수를 할당함. 각 장치는 자신의 고유한 주파수 대역에서만 통신하므로 동시에 여러 장치의 정보를 전송할 수 있음.	-장점 : 간단한 구조로 구현이 가능하므로 가격이 비교적 저렴하고 별도의 변/복조기가 필요하지 않음 -단점 : 주파수 대역폭의 낭비를 초래할 수 있고 채널의 이용률이 저하될 수 있음.
<b>TDMA</b> (Time Division Multiple Access)	데이터 링크(채널)에 할당된 전송허용 시간을 일정한 시간슬롯으로 구분하여 각 시간슬롯에 각 장치들을 순차적으로 할당시켜 장치 별 해당 시간 동안만 통신하는 방법.	-장점 : 간단한 구조로 구현되고 비용도 저렴하며 데이터 전송률을 조절할 수 있음. -단점 : 시간슬롯의 낭비를 초래할 가능성이 있음.
<b>CDMA</b> (Code Division Multiple Access)	시간과 주파수를 모두 이용하도록 고안되어 있으나 각각의 장치들이 자신만의 Code로 서로를 구분하여 통신하도록 개발된 디지털 방식.	-장점 : 보안 유지가 되며, 시간과 주파수 낭비가 없음. -단점 : 고속 데이터 통신이 어려움.

표1 대표적인 다중화 기법

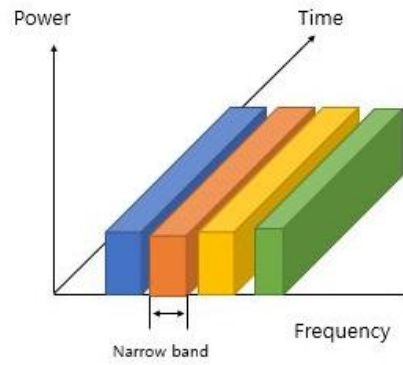


그림10 FDMA (Frequency Division Multiple Access)

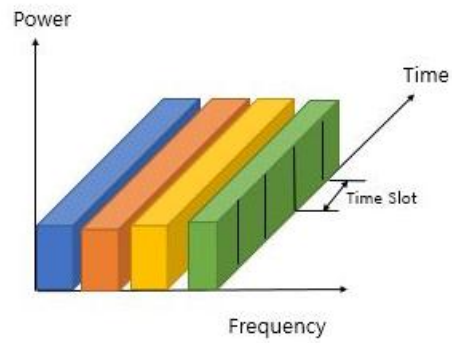


그림11 TDMA (Time Division Multiple Access)

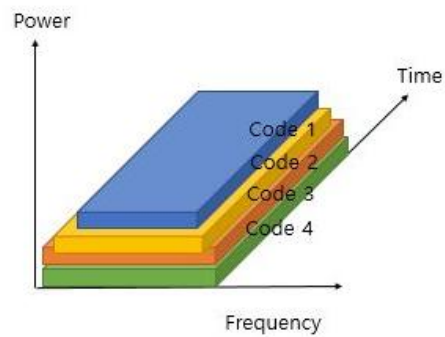


그림12 CDMA (Code Division Multiple Access)

그림11과 같이 TDMA 채널 접근법의 장점은 통신 채널을 시간 슬롯으로 구분하여 사용함으로써 주파수 자원을 효율적으로 사용할 수 있게 되며 DWM1001 모듈은 아래 그림13과 같이 “Superframe (한 frame당 100ms)”구조[10]의 반복을 통해 노드 간의 통신이 이루어 진다. 이는 초기에 지정한 Initiator Anchor에 의해 타이밍이 제어된다.

<b>BCN(0-15)</b> Beacon message slot	<b>SVC(0-1)</b> Service and almanac message	<b>TWR(0-14)</b> Two Way Ranging interaction slot	<b>Idle Time (end)</b>
---	--	--	------------------------

그림13 Superframe 구조

TWR(Two Way Ranging)이 이루어지기 전, Tag는 Superframe 앞 부분의 Beacon 메시지와 Almanac 메시지를 듣고, 범위 내에 있는 4개의 Anchor를 선택한다. BCN time slot 구간은 총 16개(0-15)의 구조로 되어있으므로 최대 16개의 Anchor로 구성될 수 있다. 추가로 네트워크에 구성되고자 하는 새로운 Anchor의 free seat이 없을 경우는, 기다리며 추후에 연결을 재시도하게 된다. Almanac 메시지에는 “Initiator”의 FW 버전 정보가 포함되어 있으므로 모든 네트워크 구성 노드들은 이 버전 정보와 동일해야 한다. 또한 SVC slot 내의 service message에는 Anchor 이중 충돌 report 등의 내용이 포함되어 있다. 유효한 Beacon 및 Almanac 메시지인 경우, 하드웨어 버전 및 FW 버전이 호환가능한지 먼저 확인한 후, 가능하다면 TWR 절차를 진행한다. 자세한 구조는 아래 그림14와 같다.

<b>Group Poll</b>	<b>AN_A,B,C,D Poll</b> (전송 시간이 기록되어 있음)	<b>Tag Response</b>	<b>AN_A,B,C,D Final</b>	<b>Calc_Location</b>
-------------------	--	---------------------	-------------------------	----------------------

그림14 TWR(Two Way Ranging) slot 내부 구조

이 과정은 Tag가 먼저 Group Poll 메시지를 전송한다. 이 메시지는 적용 범위 내에 있는 모든 Anchor에 전송되며, ranging period, update rate 및 Anchor address 등의 내용이 포함되어 있다. Group poll 메시지에 대한 응답으로 각 Anchor 들이 Tag로 AN\_Poll 메시지를 전송한다. 그런 다음, Tag는 Response message를 보내면 이에 대한 응답으로 각 Anchor들이 AN\_Final 메시지를 전송하고, 이 메시지에 포함된 시간 내용을 이용해 Anchor로부터의 거리를 계산할 수 있게 된다. Tag 내부의 LE(Location Engine)에서 자신의 위치를 계산한다. 단, TWR slot 내에

Final 메시지가 없는 경우는 충돌이 발생하거나 메시지를 잃어버린 경우이므로 Tag는 새로운 slot을 탐색한다. 이 때, LE(Location Engine)은 선택된 Anchor의 알려진 위치와 TWR 결과를 이용해 Tag의 위치추정 값을 계산하고, 위치 추정치는 3~4개의 결과값이 산출되어지는데, 최대 가능성이 높은 추정치를 사용한다. 다중 경로의 영향으로 인해 결과 값들 중 가장 짧은 거리가 정확도가 높은 것으로 판단한다.

### 3.1.3 하드웨어 성능 분석

대부분의 데이터 시트에 표기되어 있는 정밀도는 가시선 거리(LOS)에 있는 노드 간의 측정을 의미한다. 하지만 실제 상황에는 가시선 거리(LOS)에 놓일 수 있는 환경이 거의 없다. 따라서 적용하고자 하는 환경에서 전파 방해 요소 및 측위 정밀도를 미리 알고 있을 필요가 있다. 위치 추정 시, 장애를 유발하는 NLOS의 크기와 위치도 TOA 범위 계산에 큰 영향을 미친다. 장애를 일으키는 NLOS의 크기와 Anchor 와 Tag 사이의 거리는 NLOS에 의해 유도된 측정 오차에 비례한다. 먼 거리에서의 높이 차이보다 가까운 거리에서의 높이 차이에 대한 오차가 더 큰 영향을 미친다. 실제로 TOA를 적용할 때 신호의 처리 시간 및 하드웨어 자체 지연시간도 알고 있어야 한다. 이것은 하드웨어에 따라 다르며, 정확한 거리 측정을 위해 하드웨어 처리 시간을 고려해야 한다.

Channel	Channel 5 (6.5 GHz)
Algorithm	Time of Arrival
Ranging method	Two Way Ranging
Number of nodes	1 Anchor, 1 Tag
Average transmitted power	-70.0dBm

표2 하드웨어 정밀도 실험 파라미터

### 3.1.3.1 거리 변화에 따른 정밀도 실험 및 분석



그림15 실험 배경 1 (Distance Accuracy)

첫 번째 정밀도 실험의 목적은 거리 변화에 따른 측정치를 실제 거리와 비교하는 것이다. 실험 장소는 울산대학교 전기공학관 4층 실험실 복도에서 진행하였다. 1m에서 30m까지 5m단위로 측정을 해보았으며, Anchor 노드와 Tag 노드의 일대일 거리를 측정하였다. 측정 속도는 1Hz로 1초에 한번 측정을 하였으며 각 거리 당 100회씩 측정하였다. 아래 그림 와 같이 비교적 가까운 거리인 1m, 5m, 10m에서의 측정치는 해당 실제 거리와 근접하게 측정된 것을 볼 수 있다. 반면에 비교적 먼 거리인 15m, 20m, 30m로 증가할수록 실제 거리와의 오차가 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 평균적인 거리 오차의 범위는 1m에서 약 10cm, 5m에서 약 10~15cm, 10m에서 약 10~20cm, 15m에서 약 10~50cm, 20m에서 약 40~70cm, 25m에서 약 40~80cm, 30m에서 약 40~80cm의 거리 오차가 나타났다. 앞서 측정한 측정치의 환경은 가시선 거리가 보장되는 환경에서 측정을 하였고, 마지막 그래프의 측정치는 5m 거리를 두고 두 노드를 고정시켜 놓은 상태에서 사람의 유무에 따른 측정을 시행하였다. 복도 내에 사람이 없는 경우와 사람이 지나다닐 때 측정되는 거리 값을 확인할 수 있다. 사람으로 인해 전파의 도달 시간이 길어져 거리 값이 실제 거리보다 길게 측정되는 부분을 볼 수 있었다.



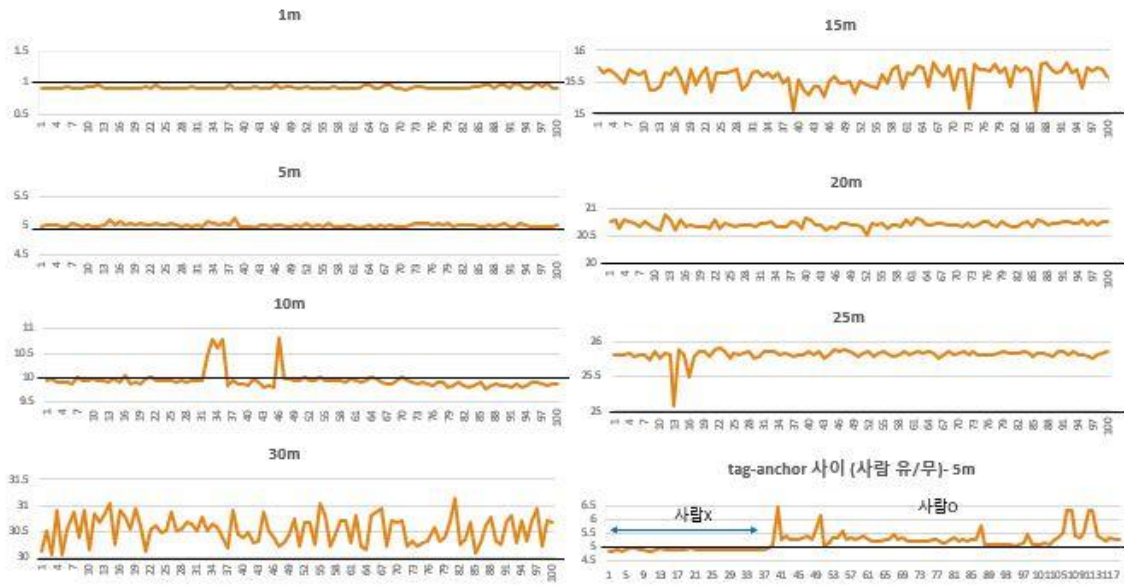


그림16 실험 결과 1 (Distance Accuracy)

### 3.1.3.2 안테나 방향에 따른 정밀도 실험 및 분석

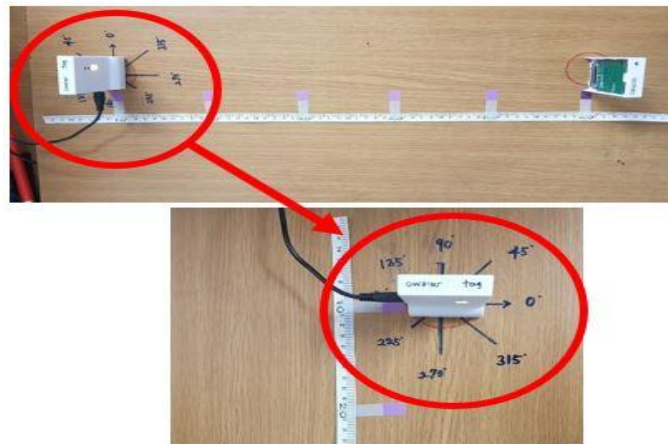


그림17 실험 배경 2 (Antenna Orientation)

두 번째 정밀도 실험의 목적은 안테나 방향에 따른 거리 측정치 차이를 분석해보기 위함이다. 무선 통신시스템에서 안테나는 전파를 송수신하는 것으로 가장 핵심적인 역할을 한다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 안테나는 특정한 방향성과 빔패턴 (beam pattern) 을 가지기 때문에 이를 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 실험 장소는 실험실 내부에서 진행하였고 0.5m 일정 거리에서 안테나가 포함된 노드 방향을 변경해가며 측정하였다. 장애물이 없이 가시선 거리 환경에서 측정하였고, 한 쌍의 노드 간 거리를 측정하였다. 측정 속도는 1Hz로 한 방향 당 30회씩 측정하여 평균하였다. 아래 그림과 같이 0°에서 360° 사이를 8개의 방향으로 구분하여 측정하였으며 각 노



드를 같은 자세로 위치시켰을 경우에 평균적인 거리 측정치가 실제 거리와 가장 근접하게 측정되었다. 그 외의 각도에서는 거리 정확도가 낮은 것을 알 수 있었다.

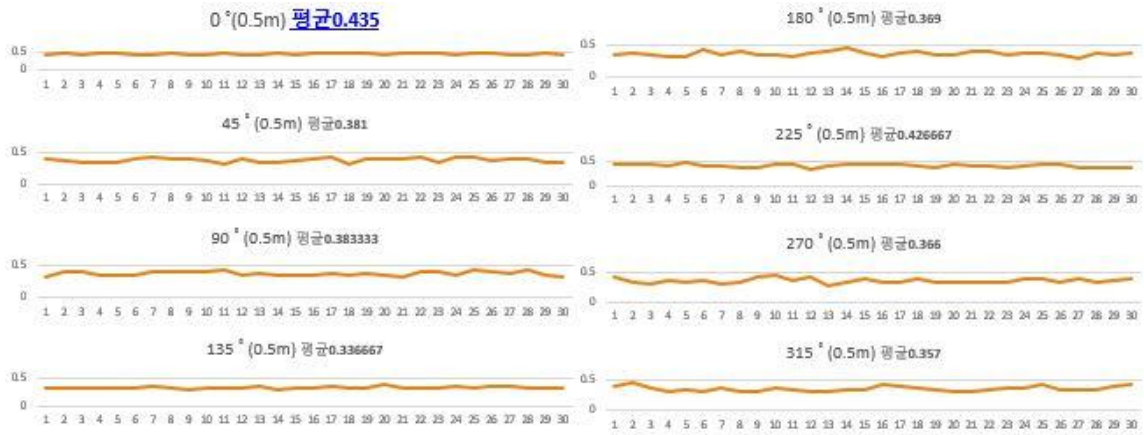


그림18 실험 결과 2(Antenna Orientation)

또한 모듈 자세에 따른 분석을 별도로 시행해 보았다. 한 쌍의 노드가 같은 거리에서 모듈을 세운 상태에서 측정치와 눕혔을 때의 측정치를 비교해 보았다. 그 결과 모듈은 눕혔을 때 거리가 짧아 더 길게 측정됨을 다음 그림19와 같이 확인할 수 있었다.

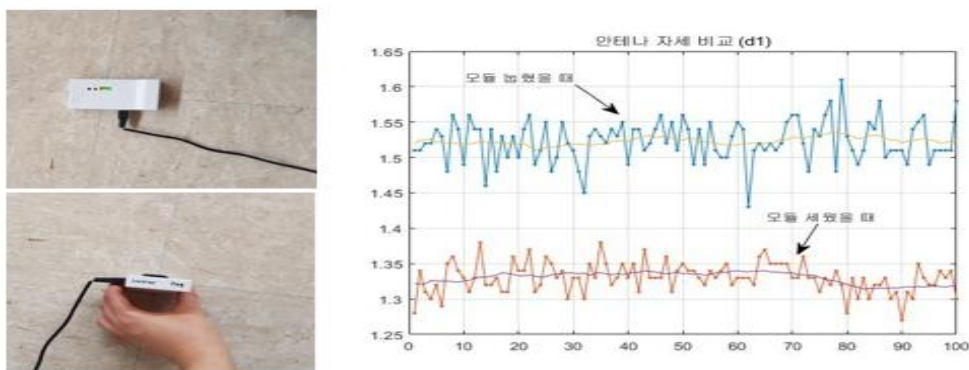


그림19 모듈 자세에 따른 분석

### 3.1.3.3 높이 변화에 따른 정밀도 실험 및 분석

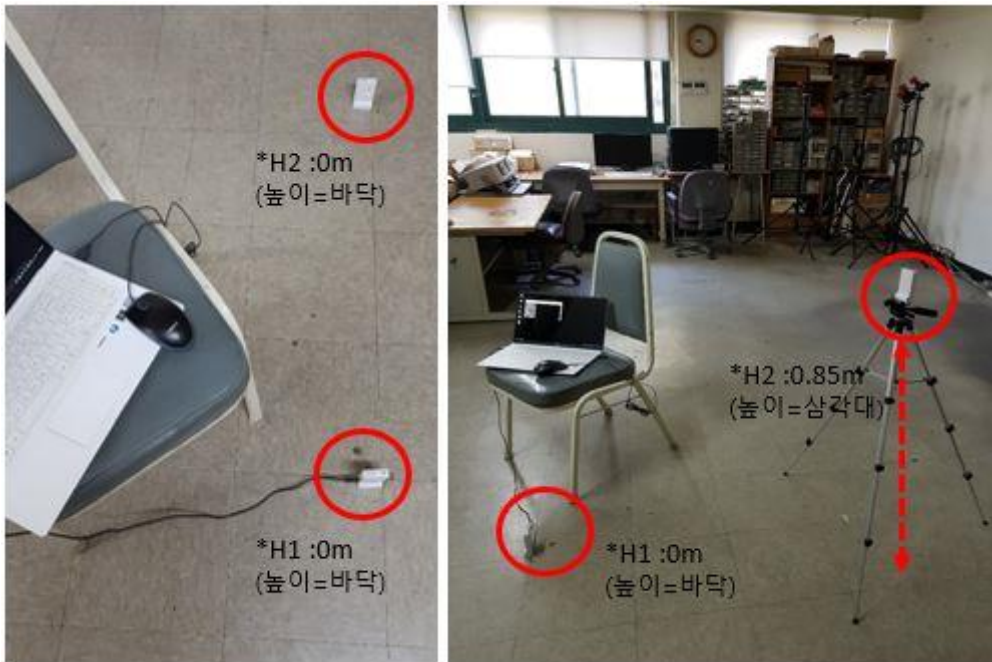


그림20 실험 배경 3(Antenna Height)

세 번째 정밀도 실험의 목적은 한 쌍의 송수신기 노드 사이의 안테나 높이 H1(0m)과 H2(0.85m)의 변화에 따른 거리 측정치의 차이를 비교하기 위함이다. 즉, 근거리와 원거리에서 안테나 높이 차이의 영향의 정도를 알아보기 위해서 진행하였다. 이는 추후에 노드 설치 위치를 선정할 때 참고가 될 수 있다. 실험 장소는 실험실 내에서 진행하였고, 측정 거리의 항목은 1m, 2m, 3m로 구분하여 측정하였다. 측정 속도는 1Hz로 각 항목별 50회씩 측정한 뒤 평균 값을 이용하였다. 아래 표3과 같이 가까운 거리일수록 안테나 높이 차이의 영향을 많이 받으며, 멀어질수록 안테나 높이 차이의 영향이 나타나지 않는 것을 알 수 있었다.

거리 \ 높이	1m	2m	3m
H1 = H2	0.98627 m	2.0792 m	3.0786 m
H1 < H2 (*H2 : 0.85m)	1.6532 m	2.2696 m	3.0492 m

표 3 실험 결과 3(Antenna Height)

### 3.2 시간 기반 측위 알고리즘 구현 및 시뮬레이션

#### 3.2.1 기본 측위 시스템 구성 및 기하학적 계산 방법

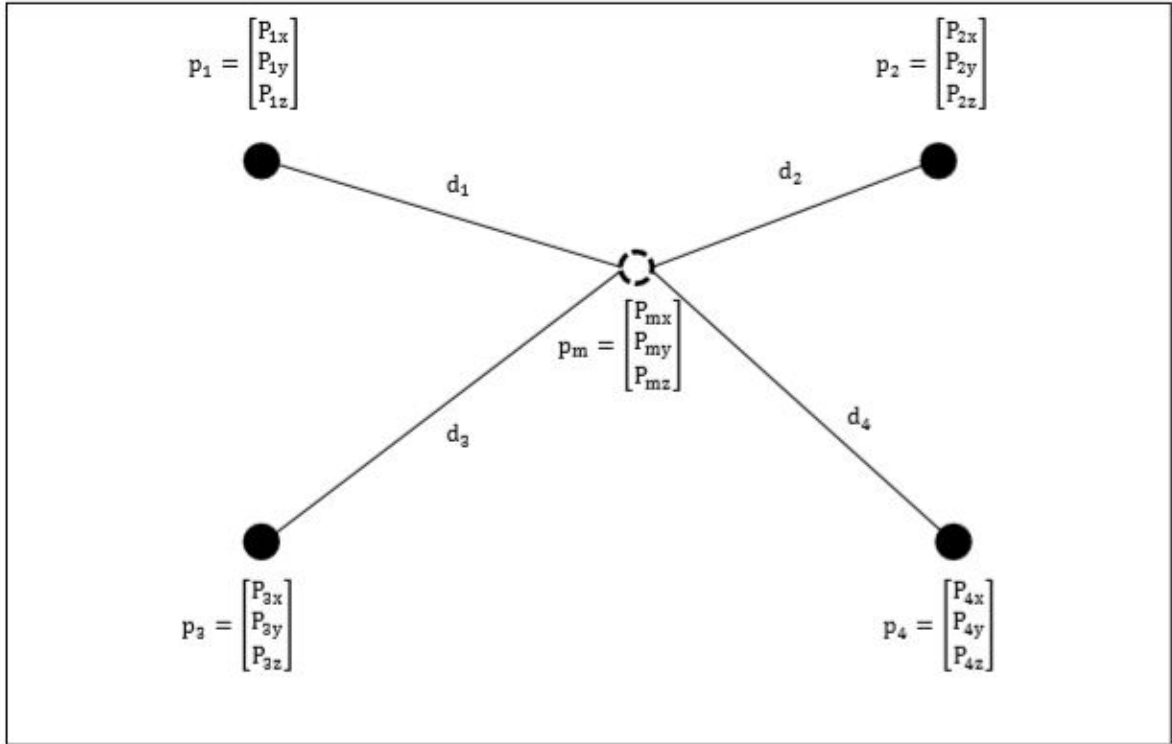


그림21 기본 측위 시스템 구성 및 시뮬레이션

앞서 DWM1001 모듈의 거리 정밀도를 여러 항목별로 측정하고, 결과 분석을 해보았으며, 다수의 모듈을 이용하여 네트워크를 형성하기 전에 우선적으로 측위 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 실행해 보았다. 일반적으로 [12],[13]와 같이 Tag의 위치를 추정하는 식과 연구에 대해 많이 알려져 있다. 본 논문에서는 Tag의 위치를 알고 Anchor의 위치 좌표를 추정하는 식을 고안하여 시뮬레이션을 실행해보았다.  $p_1, p_2, p_3, p_4$ 는 그림과 같이 고정되어 있는 Anchor의 위치로 가정하였다.  $p_m$ 은 모바일 노드로 임의의 Tag의 위치를 나타내고 있다. 시뮬레이션은 Matlab® 프로그램을 이용하여 두가지 순서로 시행하였다. 첫 번째로 Tag의 데이터를 생성시키는 과정 (*Data Generation,  $i = 1:N, i \neq j, N = \text{number of sampling data}$* )을 실행하고, 두 번째 과정으로는 생성된 데이터를 이용해 위치를 추정 (*Position Estimation*)해보았다. 생성된 각 sampling 데이터 마다 다음과 같은 4개의 식이 얻어진다.

$$d_1^2 = (p_m - p_1)^2 = (p_m - p_1)^T(p_m - p_1) = \|p_m - p_1\|^2 \quad (3.2)$$

$$d_2^2 = (p_m - p_2)^2 = (p_m - p_2)^T(p_m - p_2) = \|p_m - p_2\|^2 \quad (3.3)$$

$$d_3^2 = (p_m - p_3)^2 = (p_m - p_3)^T(p_m - p_3) = \|p_m - p_3\|^2 \quad (3.4)$$

$$d_4^2 = (p_m - p_4)^2 = (p_m - p_4)^T(p_m - p_4) = \|p_m - p_4\|^2 \quad (3.5)$$

$$d^i = \begin{bmatrix} d_1^i \\ d_2^i \\ d_3^i \\ d_4^i \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$N$  개의 데이터일 때,  $4N$  개의 식이 만들어 지고, 각 sampling 데이터를 한 쌍의 조합으로 묶었을 때 총  $\frac{N(N-1)}{2} = M$  개의 조합을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} i = 1, j = 2 : N &\Rightarrow (N-1) \text{ 개} \\ i = 2, j = 3 : N &\Rightarrow (N-2) \text{ 개} \\ i = 3, j = 4 : N &\Rightarrow (N-3) \text{ 개} \\ &\vdots \\ i = N-1, j = N &\Rightarrow (N-(N-1)) \text{ 개} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$i$  번째 측정 값 중  $d_1$ 을 구하는 식은 다음과 같다.

$$d_1^2 = (p_{mx}^i - p_{1x}^i)^2 + (p_{my}^i - p_{1y}^i)^2 + (p_{mz}^i - p_{1z}^i)^2 \quad (3.8)$$

$$= (p_{mx}^i)^2 - 2p_{mx}^i p_{1x}^i + (p_{1x}^i)^2 + (p_{my}^i)^2 - 2p_{my}^i p_{1y}^i + (p_{1y}^i)^2 + (p_{mz}^i)^2 - 2p_{mz}^i p_{1z}^i + (p_{1z}^i)^2 \quad (3.9)$$

$$= (p_{mx}^i{}^2 + p_{my}^i{}^2 + p_{mz}^i{}^2) + (p_{1x}^i{}^2 + p_{1y}^i{}^2 + p_{1z}^i{}^2) - 2(p_{mx}^i p_{1x}^i + p_{my}^i p_{1y}^i + p_{mz}^i p_{1z}^i) \quad (3.10)$$

$j$  번째 측정 값 중  $d_1$ 을 구하는 식은 다음과 같다.

$$d_1^2 = (p_{mx}^j - p_{1x}^j)^2 + (p_{my}^j - p_{1y}^j)^2 + (p_{mz}^j - p_{1z}^j)^2 \quad (3.11)$$

$$= (p_{mx}^j)^2 - 2p_{mx}^j p_{1x}^j + (p_{1x}^j)^2 + (p_{my}^j)^2 - 2p_{my}^j p_{1y}^j + (p_{1y}^j)^2 + (p_{mz}^j)^2 - 2p_{mz}^j p_{1z}^j + (p_{1z}^j)^2 \quad (3.12)$$

$$= (p_{mx}^j{}^2 + p_{my}^j{}^2 + p_{mz}^j{}^2) + (p_{1x}^j{}^2 + p_{1y}^j{}^2 + p_{1z}^j{}^2) - 2(p_{mx}^j p_{1x}^j + p_{my}^j p_{1y}^j + p_{mz}^j p_{1z}^j) \quad (3.13)$$

$i$  번째 구한 ( $d_1^i$ ) 과  $j$  번째 구한 ( $d_1^j$ ) 을 빼면 다음과 같이  $p_1$ 에 관한 값들이 소거됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1^i - d_1^j &= (p_{mx}^i{}^2 + p_{my}^i{}^2 + p_{mz}^i{}^2) - (p_{mx}^j{}^2 + p_{my}^j{}^2 + p_{mz}^j{}^2) - 2\{(p_{mx}^i p_{1x}^i + p_{my}^i p_{1y}^i + p_{mz}^i p_{1z}^i) \\ &\quad + (p_{mx}^j p_{1x}^j + p_{my}^j p_{1y}^j + p_{mz}^j p_{1z}^j)\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

이들 중 일부를 좌변으로 옮겨 식을 정리하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$-\frac{1}{2} \{d_1^i - d_1^j - (p_{mx}^i{}^2 + p_{my}^i{}^2 + p_{mz}^i{}^2) + (p_{mx}^j{}^2 + p_{my}^j{}^2 + p_{mz}^j{}^2)\} = \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} (p_{mx}^i - p_{mx}^j) \\ (p_{my}^i - p_{my}^j) \\ (p_{mz}^i - p_{mz}^j) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$A = \begin{bmatrix} (p_{mx}^i - p_{mx}^j) \\ (p_{my}^i - p_{my}^j) \\ (p_{mz}^i - p_{mz}^j) \end{bmatrix} = (p_m^i - p_m^j) \quad (3.16)$$

$$B = -\frac{1}{2} \{ d_1^i{}^2 - d_1^j{}^2 - (p_{mx}^i{}^2 + p_{my}^i{}^2 + p_{mz}^i{}^2) + (p_{mx}^j{}^2 + p_{my}^j{}^2 + p_{mz}^j{}^2) \} \quad (3.17)$$

간단히 표현하기 위해, 위와 같은 식을 A, B로 정의하였다. A, B를 이용해 Anchor의 위치 좌표 (P)를 추정할 수 있다.

$$P^T A = B, \quad A^T P = B^T \quad (3.18)$$

$$A(A^T P) = A B^T \quad (3.19)$$

$$P = (A A^T)^{-1} B^T \quad (3.20)$$

위의 과정은  $d_1$ 을 이용한 과정이었으며,  $d_2, d_3, d_4$ 을 이용할 경우에도 동일하게 적용하여 구할 수 있다.

### 3.2.2 알려진 고정 노드 위치가 있는 조건의 이동 노드 위치추정

네트워크 구성 시 가장 일반적인 위치추정의 형태이다. 고정된 Anchor들의 위치를 이용하여 상대적인 Tag의 위치를 구하는 방법이다. 위와 같은 4개의 고정된 Anchor ( $p_1, p_2, p_3, p_4$ )를 이용하면 식이 4개가 존재하고 Tag ( $p_m$ )의 위치 좌표  $p_{mx}, p_{my}, p_{mz}$ 가 3개의 미지수로 존재하게 된다. 따라서 식이 미지수의 개수보다 많기 때문에 이론적으로 계산이 가능하다. 아래 그림은 임의의 고정 Anchor 좌표를 이용하여 계산되어진 Tag의 위치좌표와 함께 노이즈를 포함시킨 추정 좌표를 비교해 보았다.

$$d_1^2 = (p_{mx}^i - p_{1x})^2 + (p_{my}^i - p_{1y})^2 + (p_{mz}^i - p_{1z})^2 \quad (3.21)$$

$$d_2^2 = (p_{mx}^i - p_{2x})^2 + (p_{my}^i - p_{2y})^2 + (p_{mz}^i - p_{2z})^2 \quad (3.22)$$

$$d_3^2 = (p_{mx}^i - p_{3x})^2 + (p_{my}^i - p_{3y})^2 + (p_{mz}^i - p_{3z})^2 \quad (3.23)$$

$$d_4^2 = (p_{mx}^i - p_{4x})^2 + (p_{my}^i - p_{4y})^2 + (p_{mz}^i - p_{4z})^2 \quad (3.24)$$

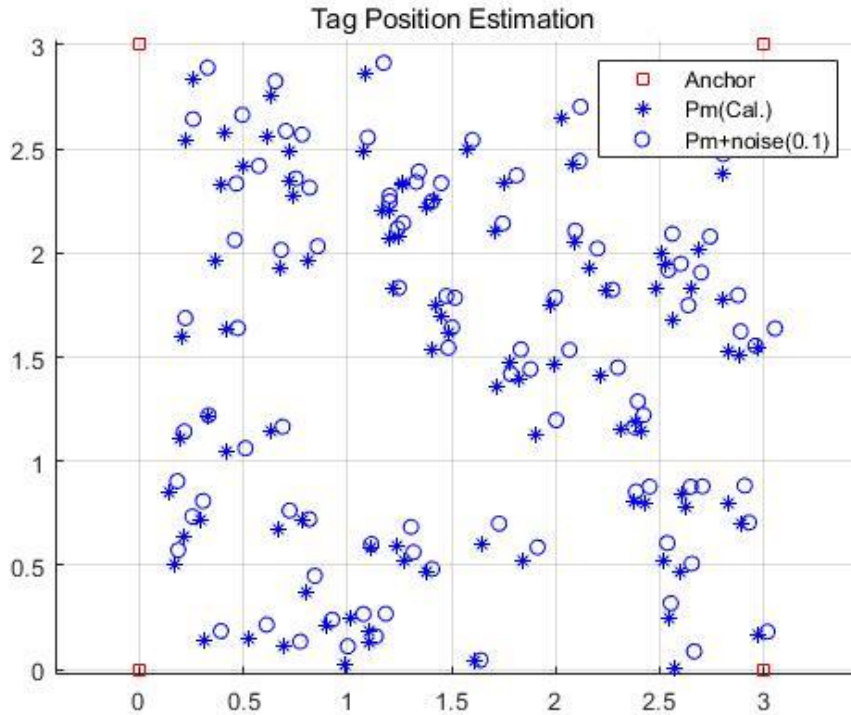


그림22 추정된 Tag 좌표 비교

### 3.2.3 알려진 고정 노드 위치가 없는 조건의 이동 노드 위치추정

일반적인 경우가 아닌 알려진 고정 노드의 위치가 없는 경우에 각각의 노드 간에 상대적인 거리를 이용해 전체적인 위치좌표를 추정하는 방법을 생각해 보았다. 이는 적용 환경이 달라지는 경우에 자동적으로 각각의 노드 위치 계산이 가능하게 되면 어디에서나 빠르게 접목시키는 것이 가능할 것이라고 생각해보았다. 우선 Tag의 위치 좌표를 시뮬레이션과 같이  $P_m$ 을  $i = M$  번 측정한다. 이 경우 한 좌표당 4개의 거리에 관한 식( $d_1^i, d_2^i, d_3^i, d_4^i$ )이 계산되고  $M$ 개의 좌표에 대한 모든 거리를 계산했을 때 총  $4 * M$ 개의 식이 존재하게 된다. 다음으로 Anchor의 위치 좌표( $p_1, p_2, p_3, p_4$ ) 또한 미지수이므로 각각 Anchor에 대한 좌표 변수는 총 12개( $P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}, P_{2x}, P_{2y}, P_{2z}, P_{3x}, P_{3y}, P_{3z}, P_{4x}, P_{4y}, P_{4z}$ )이고 Tag( $p_m$ )의 위치 좌표  $P_{mx}, P_{my}, P_{mz}$ 가 3개의 미지수이기 때문에 총  $12 + 3 * M$  개가 된다. 이론적으로 식의 개수가 미지수의 개수보다 많게 되면 해결이 가능한 문제가 되므로  $M$  (Tag 샘플링 수)이 클수록 해결이 가능하다.

$$d_1^2 = (p_{mx}^i - p_{1x}^i)^2 + (p_{my}^i - p_{1y}^i)^2 + (p_{mz}^i - p_{1z}^i)^2 \quad (3.25)$$

$$d_2^2 = (p_{mx}^i - p_{2x}^i)^2 + (p_{my}^i - p_{2y}^i)^2 + (p_{mz}^i - p_{2z}^i)^2 \quad (3.26)$$

$$d_3^i{}^2 = (p_{mx}^i - p_{3x}^i)^2 + (p_{my}^i - p_{3y}^i)^2 + (p_{mz}^i - p_{3z}^i)^2 \quad (3.27)$$

$$d_4^i{}^2 = (p_{mx}^i - p_{4x}^i)^2 + (p_{my}^i - p_{4y}^i)^2 + (p_{mz}^i - p_{4z}^i)^2 \quad (3.28)$$

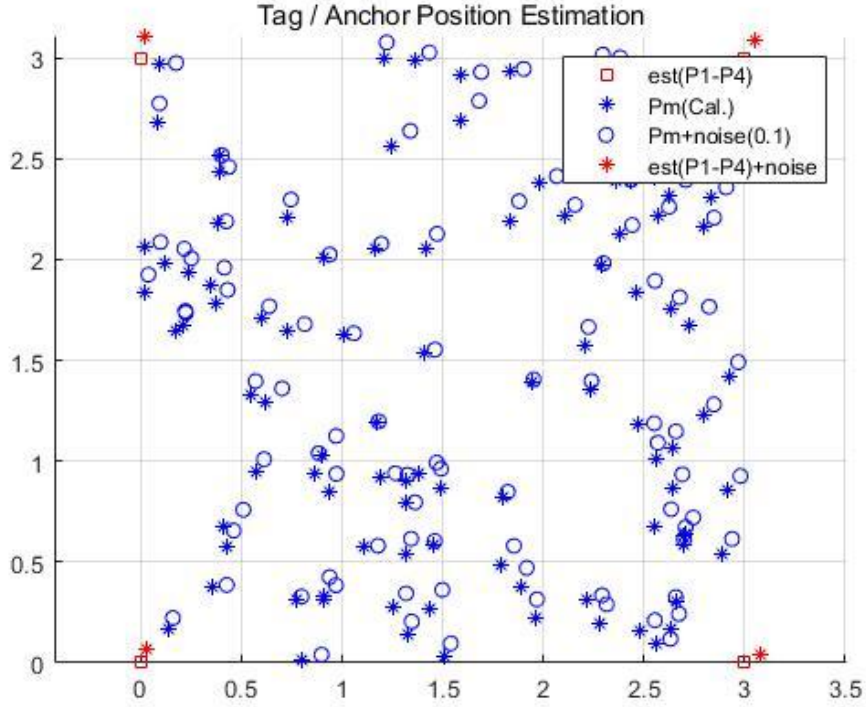


그림23 추정된 Tag 및 Anchor 좌표 비교

또한, 이러한 Anchor-free 문제는 [14]과 같이 생각해 볼 수 있다. 정해진 절대적인 네트워크 기준 위치가 없는 경우, 상대적인 거리를 이용해 네트워크 중심을 기준으로 하는 원점으로 위치 시킨다. 다음과 같은 식을 이용해 설명될 수 있다. 4개의 Anchor가 존재하고, 측정된 한 Tag의 위치 값이  $k$ 개 일 때, 각 샘플링 좌표로부터 거리 값을 계산할 수 있다. 이 전체 정보를 이용해 전체 네트워크 중심을 원점으로 옮기는 과정을 식(3.37)과 같이 실행한다. 좌표 값들의 평균을 구해 각각의 좌표에 동일하게 소거해 중심을 원점으로 옮긴다. Tag의 위치 좌표의 경우의 수는 3가지로 생각해 볼 수 있다.

$$A(anchor) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$T(tag) = \begin{bmatrix} x_m^1 & x_m^2 & \dots & x_m^k \\ y_m^1 & y_m^2 & \dots & y_m^k \\ z_m^1 & z_m^2 & \dots & z_m^k \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$D(distnace) = \begin{bmatrix} d_1^1 & d_2^1 & d_3^1 & d_4^1 \\ d_1^2 & d_2^2 & d_3^2 & d_4^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_1^k & d_2^k & d_3^k & d_4^k \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$d_1^{i^2} = (x_m^i - x_1)^2 + (y_m^i - y_1)^2 + (z_m^i - z_1)^2 \quad (3.32)$$

$$d_2^{i^2} = (x_m^i - x_2)^2 + (y_m^i - y_2)^2 + (z_m^i - z_2)^2 \quad (3.33)$$

$$d_3^{i^2} = (x_m^i - x_3)^2 + (y_m^i - y_3)^2 + (z_m^i - z_3)^2 \quad (3.34)$$

$$d_4^{i^2} = (x_m^i - x_4)^2 + (y_m^i - y_4)^2 + (z_m^i - z_4)^2 \quad (3.35)$$

$$Am(\text{anchor mean}) = \begin{bmatrix} \frac{x_1+x_2+x_3+x_4}{4} \\ \frac{y_1+y_2+y_3+y_4}{4} \\ \frac{z_1+z_2+z_3+z_4}{4} \end{bmatrix}, Tm(\text{tag mean}) = \begin{bmatrix} \frac{x_m^1+\dots+x_m^k}{k} \\ \frac{y_m^1+\dots+y_m^k}{k} \\ \frac{z_m^1+\dots+z_m^k}{k} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$Ac = A(\text{anchor}) - Am(\text{anchor mean}), Tc = T(\text{tag}) - Tm(\text{tag mean}) \quad (3.37)$$

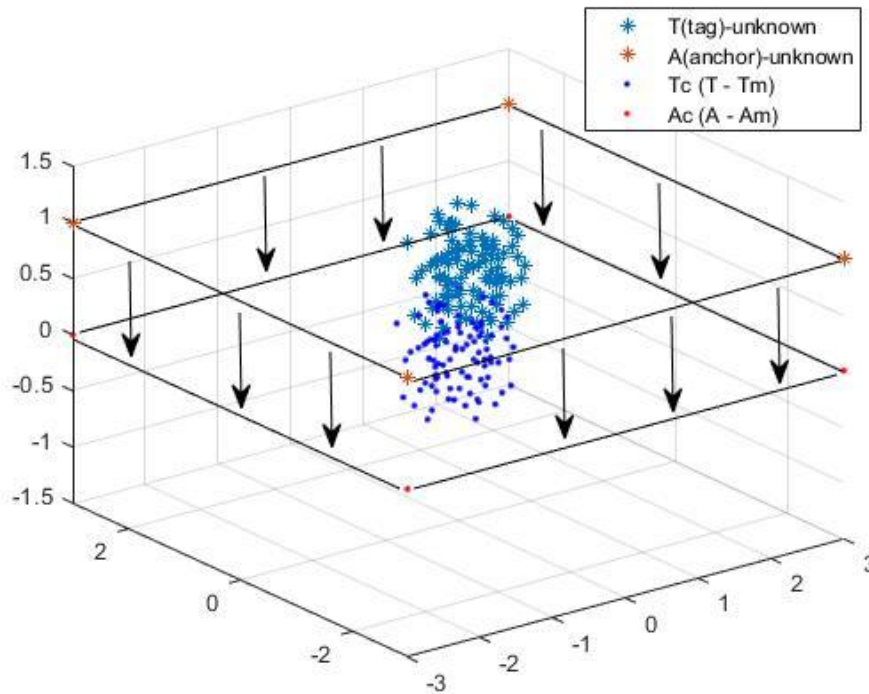


그림24 Anchor-free case [14]

### 3.3 측위 알고리즘 실험 및 오차 분석 [16]

알려져 있는 고정된 Anchor 노드의 위치  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $p_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $p_3(x_3, y_3, z_3)$ ,  $p_4(x_4, y_4, z_4)$  를 이용하여 일반적인 다변 측량을 통한 최소 자승 계산법을 시행하여 Tag 노드의 초기 위치를 계산한다. 이와 같은 문제는 선형화 하기 위해 기준이 되는 방정식을 먼저 설정한 후( $d_4$ ), 나머지 모든 방정식( $d_1, d_2, d_3$ )을 기준 방정식( $d_4$ )과 빼준다. 아래의 식과 같이 제곱 항을 모두 풀어 계산 하면 알려지지 않은 위치 좌표인 Tag 좌표 성분의 제곱 항들이 사라지게 된다. 마지막으로 식을



재정렬하면 왼쪽 항에 Tag 좌표 성분이 그룹화 되어 선형화 과정을 통한 행렬로 정리하면  $Ap = B$  형태의 선형 방정식 시스템으로 나타낼 수 있고,  $\|Ap - B\| = 0$ 를 만족하는  $p$ 값을 추정하였다. 본 논문에서는 특이치를 해결하기 위해 Matlab® 프로그램을 이용하여  $p$ 의 좌표를 구하는 과정에 의사역행렬(Pseudo inverse)을 적용하였다.  $d$  (거리)정보는 사용한 하드웨어에서 UWB 통신으로부터 측정된 값을 사용하였다.

$$d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \quad (3.38)$$

$$d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \quad (3.39)$$

$$d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \quad (3.40)$$

$$d_4^2 = (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 \quad (3.41)$$

$$d_4^2 - d_1^2 = (x^2 - 2x x_4 + x_4^2 + y^2 - 2y y_4 + y_4^2 + z^2 - 2z z_4 + z_4^2) - (x^2 - 2x x_1 + x_1^2 + y^2 - 2y y_1 + y_1^2 + z^2 - 2z z_1 + z_1^2) \quad (3.42)$$

$$d_4^2 - d_2^2 = (x^2 - 2x x_4 + x_4^2 + y^2 - 2y y_4 + y_4^2 + z^2 - 2z z_4 + z_4^2) - (x^2 - 2x x_2 + x_2^2 + y^2 - 2y y_2 + y_2^2 + z^2 - 2z z_2 + z_2^2) \quad (3.43)$$

$$d_4^2 - d_3^2 = (x^2 - 2x x_4 + x_4^2 + y^2 - 2y y_4 + y_4^2 + z^2 - 2z z_4 + z_4^2) - (x^2 - 2x x_3 + x_3^2 + y^2 - 2y y_3 + y_3^2 + z^2 - 2z z_3 + z_3^2) \quad (3.44)$$

$$d_4^2 - d_1^2 = -2x x_4 - 2y y_4 - 2z z_4 + 2x x_1 + 2y y_1 + 2z z_1 + x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \quad (3.45)$$

$$d_4^2 - d_2^2 = -2x x_4 - 2y y_4 - 2z z_4 + 2x x_2 + 2y y_2 + 2z z_2 + x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \quad (3.46)$$

$$d_4^2 - d_3^2 = -2x x_4 - 2y y_4 - 2z z_4 + 2x x_3 + 2y y_3 + 2z z_3 + x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \quad (3.47)$$

$$2x(x_1 - x_4) + 2y(y_1 - y_4) + 2z(z_1 - z_4) = d_4^2 - d_1^2 - x_4^2 - y_4^2 - z_4^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \quad (3.48)$$

$$2x(x_2 - x_4) + 2y(y_2 - y_4) + 2z(z_2 - z_4) = d_4^2 - d_2^2 - x_4^2 - y_4^2 - z_4^2 + x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \quad (3.49)$$

$$2x(x_3 - x_4) + 2y(y_3 - y_4) + 2z(z_3 - z_4) = d_4^2 - d_3^2 - x_4^2 - y_4^2 - z_4^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \quad (3.50)$$

$$\begin{pmatrix} 2(x_1 - x_4) & 2(y_1 - y_4) & 2(z_1 - z_4) \\ 2(x_2 - x_4) & 2(y_2 - y_4) & 2(z_2 - z_4) \\ 2(x_3 - x_4) & 2(y_3 - y_4) & 2(z_3 - z_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_4^2 - d_1^2 - x_4^2 - y_4^2 - z_4^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ d_4^2 - d_2^2 - x_4^2 - y_4^2 - z_4^2 + x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ d_4^2 - d_3^2 - x_4^2 - y_4^2 - z_4^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_4) & 2(y_1 - y_4) & 2(z_1 - z_4) \\ 2(x_2 - x_4) & 2(y_2 - y_4) & 2(z_2 - z_4) \\ 2(x_3 - x_4) & 2(y_3 - y_4) & 2(z_3 - z_4) \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$p = (x, y, z) \quad (3.53)$$

$$B = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_4^2 + y_1^2 - y_4^2 + z_1^2 - z_4^2 + d_4^2 - d_1^2 \\ x_2^2 - x_4^2 + y_2^2 - y_4^2 + z_2^2 - z_4^2 + d_4^2 - d_2^2 \\ x_3^2 - x_4^2 + y_3^2 - y_4^2 + z_3^2 - z_4^2 + d_4^2 - d_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$p = \text{inv}(A' * A) * A' * B \quad (3.55)$$

### 3.3.1 실험 설정

시뮬레이션에 적용한 네트워크 구성과 같이 Anchor(고정 노드) 4개, Tag(이동 노드) 1개를 이용하여 실험을 진행하였다. UWB 통신을 사용하여 안테나 사이의 거리를 측정 한 후, 측정된 거리 값을 이용하여 3.3에서 설명한 측위 알고리즘을 적용하였고, 적용하여 계산된 위치의 정밀도를 높이기 위한 보정 방안을 연구하였다. 대부분의 실험은 가시선 거리가 있는 LOS(Line Of Sight) 환경에서 진행되었으며, 본 논문에서 적용하고자 하는 환경에 분포되어 있는 주 요소인 철골 구조물에 대한 측정 영향을 알아보기 위해 실험한 후 분석해 보았다.

<b>Channel</b>	Channel 5(6.5 GHz)
<b>Algorithm</b>	Time of Arrival
<b>Ranging method</b>	Two Way Ranging
<b>Number of nodes</b>	4 Anchor, 1 Tag
<b>Average transmitted power</b>	-83.0dBm

표 4 위치 추정 실험 파라미터

### 3.3.2 고정객체의 위치 추정 실험

실험 환경은 울산대학교 전기공학관 1층 로비에서 실시하였다. 통신 네트워크 공간을 구성하기 위해 다음과 같이 가로 9.6m, 세로 4.8m의 직사각형 공간을 형성하여 진행하였다. Anchor(고정 노드)의 높이는 동일하게 1.5m에 설치하였다. Tag의 위치는 이동하지 않고 바닥에서 고정된 위치에서 50회씩 측정을 하였고, 각 측정 위치는 구성된 네트워크 공간 내의 총 105개 지점(그림 25)에서 측정하였다. 가시선 거리가 보장되는 환경에서 실험하였으며, 실제 위치와 UWB 통신을 통해 얻어진 거리(d) 값을 이용해 측위 알고리즘을 통해 계산되어진 추정 위치를 다음 그림 26에 나타내었다.

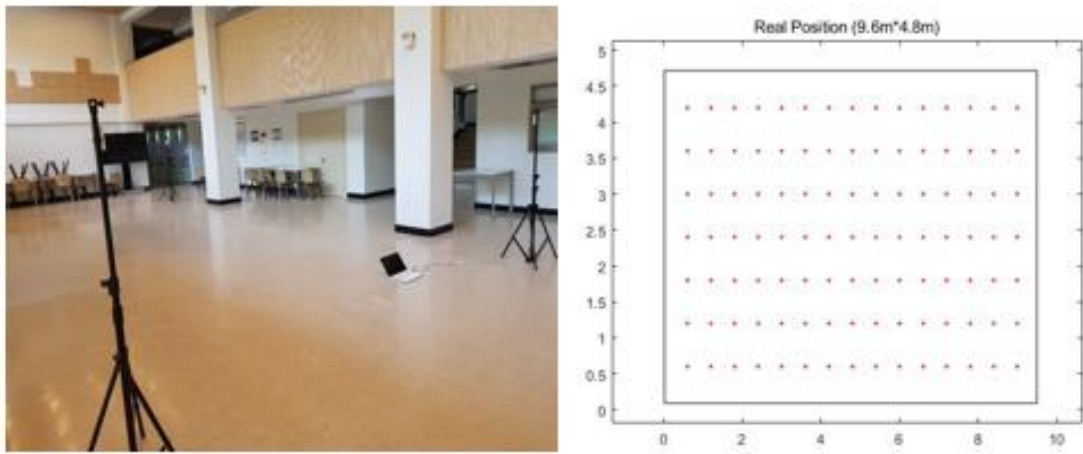


그림25 고정 객체 실험 배경

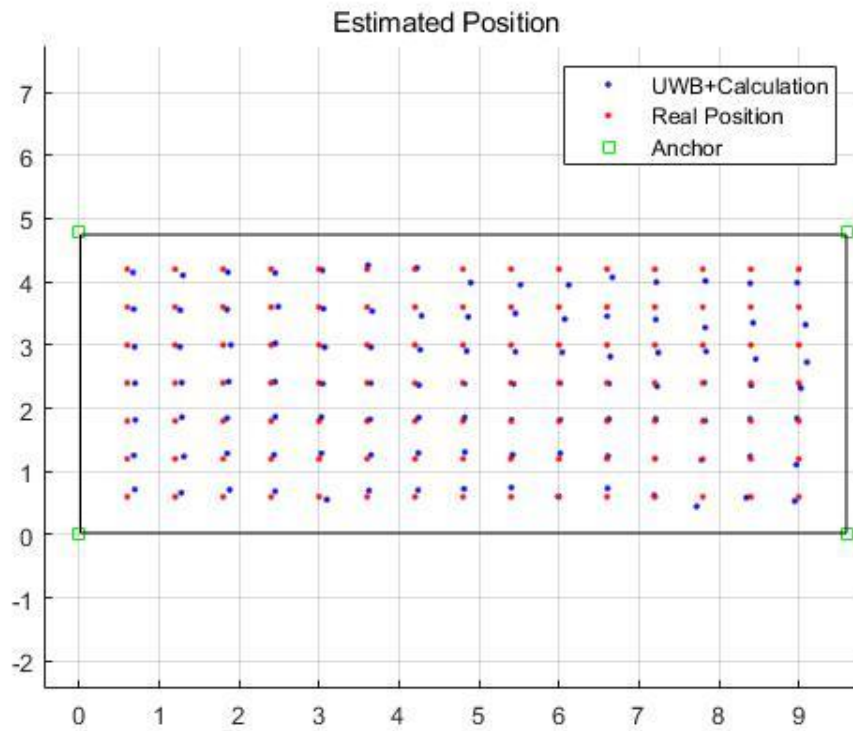


그림26 고정 객체 추정 실험 결과

### 3.3.3 이동 객체의 위치 추정 실험

실제로 실시간 모니터링을 하기 위해서는 이동 객체의 정밀도가 매우 중요하다. 첫번째 직선 이동 실험은 울산대학교 전기공학관 정보시스템 연구실 내부에서 실시되었고, Tag를 사람의 허리 한쪽 면에 부착한 뒤 일직선으로 이동한 경로를 측정하였다. 일정 속도의 보폭으로 300회 측정하였다. UWB 통신으로 측정된 각 Anchor로부터의 거리 값( $d_1, d_2, d_3, d_4$ )을 이용하여 측위 알고리즘을 적용해 Tag의 위치를 계산하였다. 하지만 사람의 몸체 중심에서 허리 한쪽 면까지의 오프셋 거리가 존재하므로 실제로 걸었던 중심선과는 조금 벗어난 위치로 측정되었다.

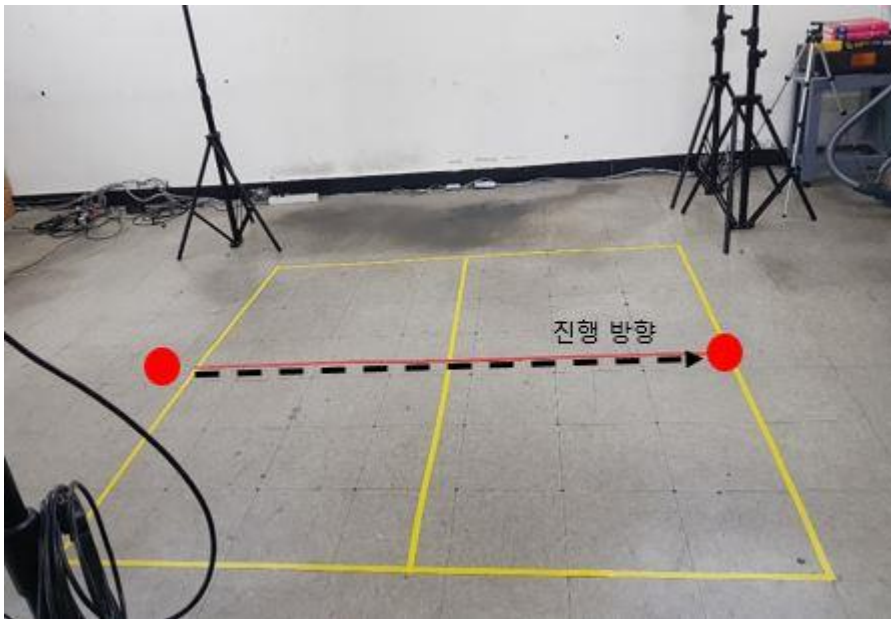


그림27 이동 객체 실험 배경

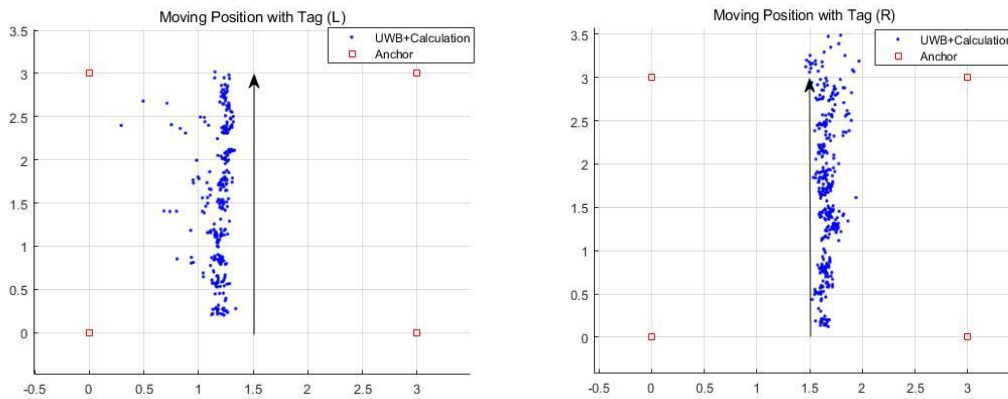


그림28 이동 객체 추정 실험 결과1

두번째 이동 실험은 Anchor 개수를 늘려 실험을 해보았다.

이상치(Outlier)에 대한 부분을 제거하기 위해 이동 평균 필터를 적용시켜 궤적을 추적하였다.

평균을 활용하면 잡음이 어느정도 제거되며, 이동 평균 필터는 모든 데이터의 평균을 계산하는 것이 아니라 평균하고자 하는 개수를 지정하여 가장 오래된 데이터는 버리고 최근 데이터를 포함시켜 계속적으로 평균을 계산하는 방법이다. 이렇게 함으로써 동적인 변화를 나타낼 수 있다.

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i-n+1} + x_{i-n+2} + \dots + x_i}{2a} \quad (3.56)$$

$$\bar{x}_{i-1} = \frac{x_{i-n} + x_{i-n+1} + \dots + x_{i-1}}{2a} \quad (3.57)$$

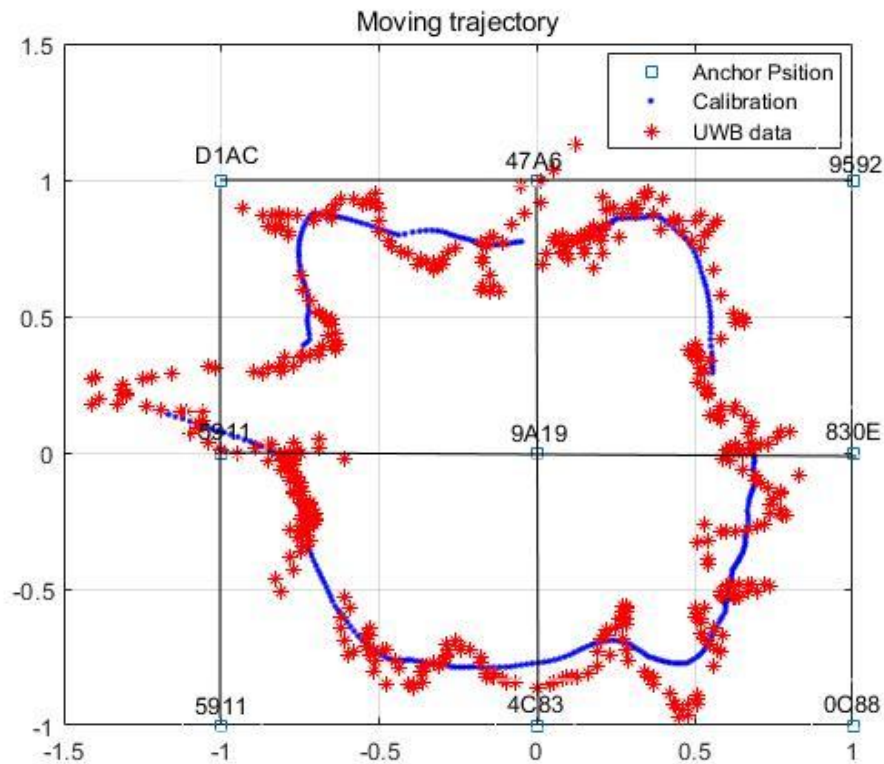


그림29 이동 객체 추정 실험 결과2

### 3.3.4 다중 경로 환경에서의 위치 추정 실험 [15]

다른 무선 통신 시스템과 마찬가지로 UWB 통신의 성능은 시스템이 작동하는 전파 채널에 의해 결정되는데, 무선 전파의 기본 메커니즘은 다중 경로 전파, 즉 아래 그림30과 같이 신호가 서로 다른 경로 및 상호 작용을 통해 송신기에서 수신기에 도달될 수 있다는 사실이다. 따라서 실제 환경에 적용하기 위해서는 반드시 수신기에 도달되는 전파 신호의 다중 경로를 고려해야 한다. 다중 경로를 거쳐 수신되는 신호의 세기는 약해질 것이고 도달 경로의 거리가 길수록 도착 지연 시간도 길어지므로 측정하고자 하는 실제 거리보다 길게 계산되어 나타난다. 이 경우에 일반적으로 신호의 특징 중 시간 지연, 진폭, 위상, 위상 변화율의 변화가 나타난다. 다음의 식(3.58)은 일반적으로 다중 경로 성분을 가진 수신 신호 모델을 표현한 것이다[17].

$$r(t) = \sum_{j=1}^L \alpha_j s(t - \tau_j) + n(t) \quad (3.58)$$

$L$ 은 경로의 수를 나타내며,  $\alpha_j$ 는 경로의 진폭, 그리고  $\tau_j$ 는 지연된 시간을 의미하고  $n(t)$ 은 Gaussian 잡음 성분을 나타내는 파라미터이다. 이 때 지연 시간은  $\tau_j < \tau_{j+1}$  이다.

수신 신호의 세기는 적용되는 수신기 환경에 따라 변화의 정도가 다르기 때문에 예측하기 어려운 단점이 있다. 하지만 넓은 대역폭을 사용하는 초광대역 통신 방법의 경우에는 밀집된 다중 경로 환경에서 비교적 정확한 도달 시간 측정 및 고해상도의 채널 임펄스 응답 추정을 허용한다. 이를 통해 수신기는 다양한 다중 경로 반사를 구별할 수 있다. 본 논문에 사용된 DecaWave®사의 모듈은 무선 센서 네트워크 구축 및 실시간 추정 시스템을 목표로 하는 최초의 상용 IEEE 802.15.4a 표준을 구현한 것으로써 초광대역 통신의 장점을 최대한 활용해 다중 경로 환경에서 잡음층보다 20dB 이상의 높은 신호를 안정적으로 감지할 수 있다.

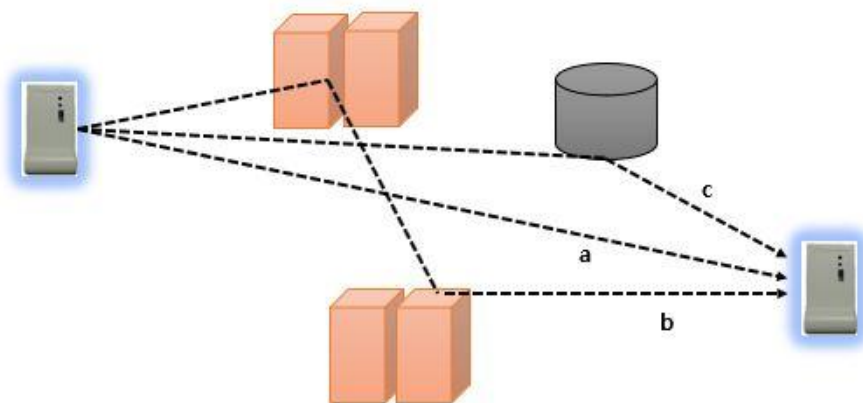


그림30 다중 경로 환경

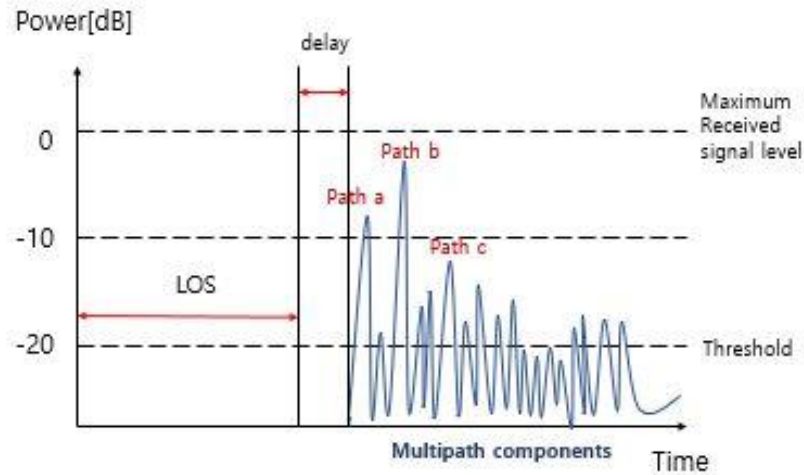


그림31 다중 경로 신호 형태

또한 송수신기 사이의 전파 손실 요인으로서는 경로손실(path loss, 거리에 따른 전파의 감쇄), 섀도잉(shadowing, 전파가 전달되는 동안 장애물 등의 음영지역으로 인한 전파의 감쇄), 페이딩(fading, 반사 또는 산란 등에 의한 다중경로 감쇄와 이동에 따른 주파수 천이로 인한 감쇄), 간섭 현상(interference, 동일 주파수 대역을 사용하는 다중 사용자로 인해 자신의 전파 신호에 영향을 받는 현상) 등이 있다. 따라서 본 논문에서 적용하고자 하는 환경의 특성을 고려하여 금속 물질이 존재하는 환경을 구성해 보았다. 금속은 전자파(전기장)를 가장 잘 차단할 수 있는 물질 중 하나인데 그 이유는 전자파를 모두 반사하는 특성이 있기 때문이다. 실생활을 예로 들면 엘리베이터 내에서 휴대전화가 잘 작동하지 않는 경우가 있다. 해당 실험을 위해 철판을 이용하여 안테나 주변을 차단시킨 뒤, 철판 유무에 따른 결과를 비교하였다. 다음 그림 32는 철판 영향을 알아보기 위해 철판이 있는 경우와 없는 경우 각각에 대해 안테나 자세를 바꿔가며 실험한 결과이다.



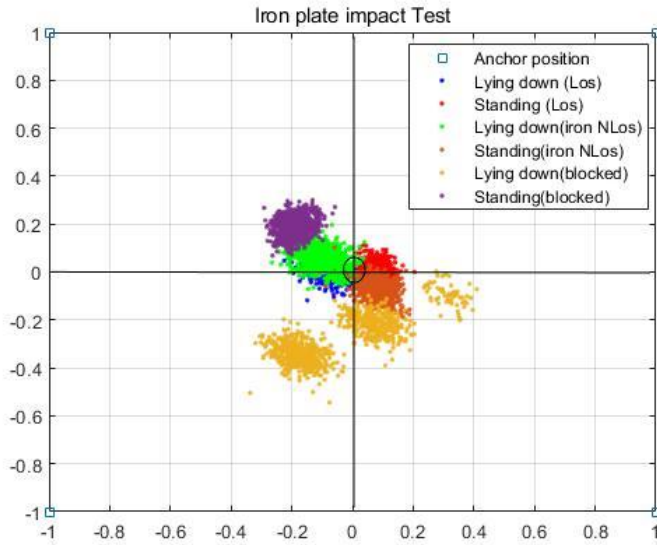


그림32 철판 영향 실험 결과1

실험 결과에서 10Hz 샘플링 속도로 500회이상 측정 한 결과 그림 33과 같이 여러 부분으로 흩어지는 현상이 나타났다. 이는 전파의 회절 및 반사에 의해 도착시간의 차이로 계산되어진 위치의 결과이다.

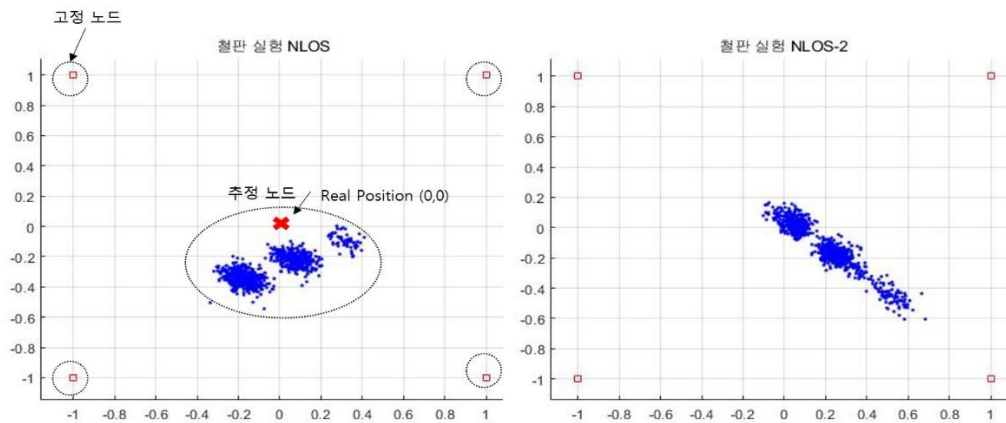


그림33 철판 영향 실험 결과2

이러한 결과는 정확한 실내 위치 정보를 알 수 없게 되는 문제를 겪게 된다. 따라서 [18]에서 주어진 오차 모델을 참고하여 분석을 해보았다. [18]에서는 일반적인 다중 경로 실내 환경을 기반으로 하였으며 직접 경로(Direct Path, DP)조건외 오차 요소와 감지되지 않은 직접 경로(Undetected Direct Path, UDP) 조건의 오차 요소로 인한 두 가지 구성 요소로 오차 모델을 고려하였다. 송신기와 수신기 사이의 실제 거리를  $d$ 로 정의하고 추정된 거리는  $\hat{d}_w = ct_w$ 로 주어지



며, 여기서  $c$ 와  $\hat{t}_w$ 는 각각 빛의 속도와 직접 경로상의 도달 시간 추정치이다. 아래 첨자인  $w$ 는 대역폭을 의미한다. 따라서 거리 측정 오차는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\epsilon_w(d) = \hat{d}_w - d \quad (3.59)$$

또한 이 오차를 두가지 구성 요소인 다중 경로로 인한 비교적 작은 오차,  $\epsilon_{M,w}(d)$ 와 UDP조건  
의 비교적 큰 오차,  $\epsilon_{U,w}(d)$ 로 구분 지어 나타내고 있으며 UDP오차 성분은 이 조건이 발생할 경  
우에만 존재한다. 따라서 랜덤 변수인  $\xi_w(d)$ 를 사용하여 UDP조건이 발생할 때 1, 그렇지 않은  
경우는 0의 값을 취하게 모델링 되었다.

$$\epsilon_w(d) = \epsilon_{M,w}(d) + \xi_w(d)\epsilon_{U,w}(d) \quad (3.60)$$

이 식을 더 자세하게 분해해보면 측정 거리가 증가함에 따라 거리 측정 오차도 증가할 것으로  
예상할 수 있으나 실제 실험적 측정 결과에서 이러한 증가는 비선형적 관계를 나타내고 있다. 따  
라서 식을 표현하기 위해 선형적인 조건 하에 증가하는 오차 속도를 수용하는데 로그 대수를 사  
용하였고, 측정 결과를 분석했을 때 오차의 분포가 가우시안 정규 분포를 형성하고 있어 다음과  
같이 표현되었다.

$$\epsilon_{M,w}(d) = G(m_{M,w}, \sigma_{M,w}) \log(1 + d) \quad (3.61)$$

단, UDP조건은 오차는 음수일 수 없으며, 동일하게 가우시안 분포 형태로서 다음과 같이 표현  
되어 진다.

$$\epsilon_{U,w}(d) = G(m_{U,w}, \sigma_{U,w}) \quad (3.62)$$

식(3.60)를 적용시켜 본 논문에서는 철판재료를 이용하여 직접 경로 유무에 따른 실험을 진행  
해보았다.

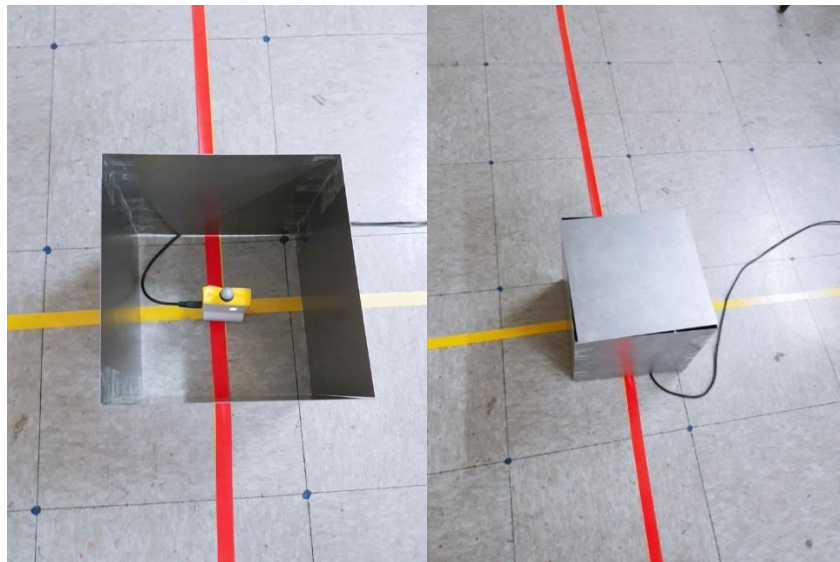


그림34 직접 경로 유무 실험 설정

위의 그림 34의 첫번째 그림은 DP조건에서의 오차를 분석하기 위함이며, 두번째 그림은 UDP 조건에서의 오차를 분석하기 위하여 실험 환경을 위와 같이 설정하였다.

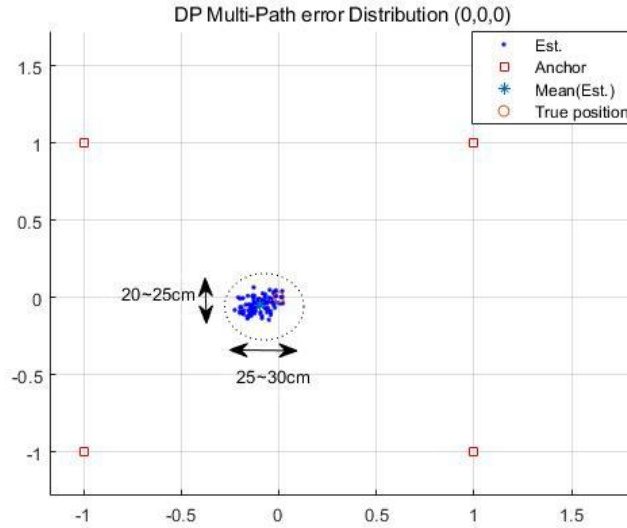


그림35 DP 오차 분포

그림 35는 실험 결과로 추정된 위치를 나타내며, 각 Anchor까지의 거리 오차에 대한 형태를 알아보기 위한 분석을 진행하였다.

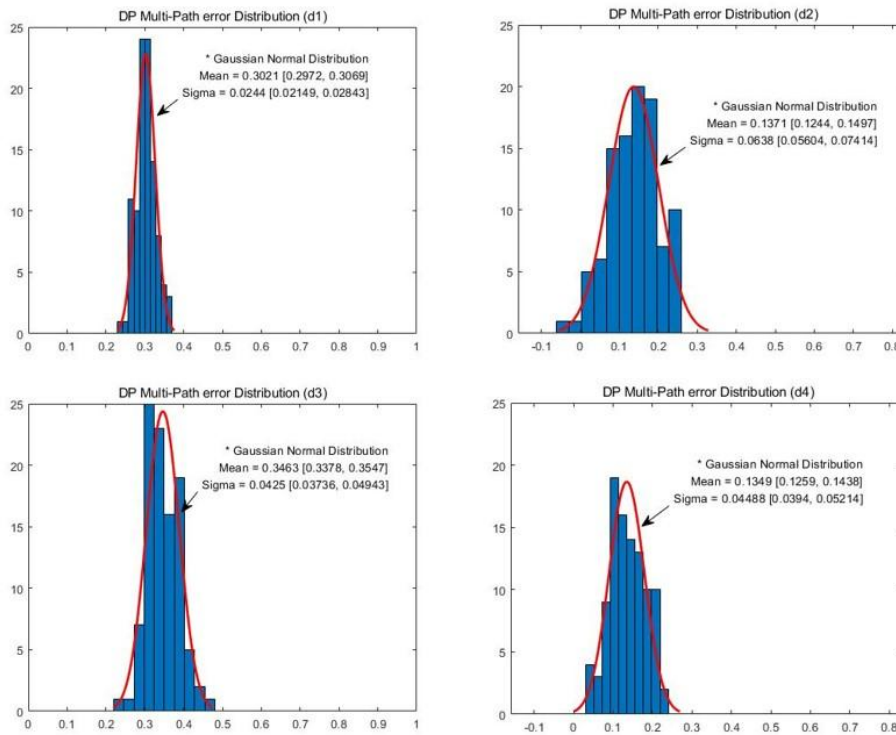


그림36 각 d 오차 분포 형태

거리 오차에 대한 분석 결과, 주어진 식(3.61)과 같이 가우시안 분포 형태로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 다음으로 UDP조건에 대한 오차 분포를 확인하기 위해 추정된 위치를 나타내었다. 직접 경로가 없는 조건에서는 그림 37과 같이 추정된 좌표 위치가 불규칙하게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 철탑에 의한 반사로 인해 송수신 시, 도달하는 전파 시간의 차이에 의해 발생한 것으로 예상할 수 있다. 마찬가지로 각 Anchor까지의 거리 오차에 대한 형태를 알아보기 위한 분석을 진행하였다.

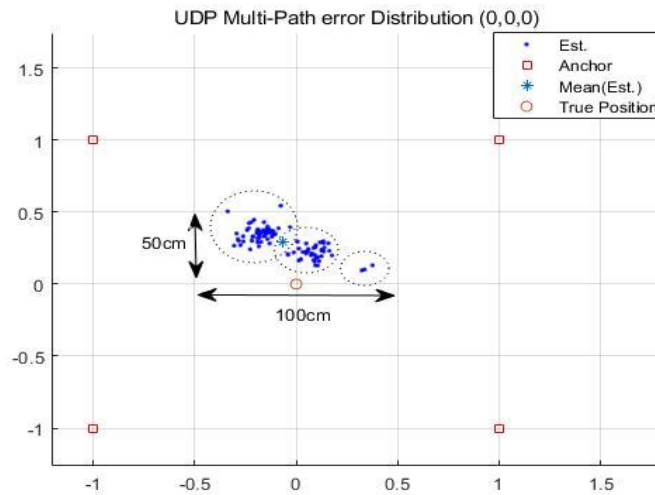


그림37 UDP 오차 분포

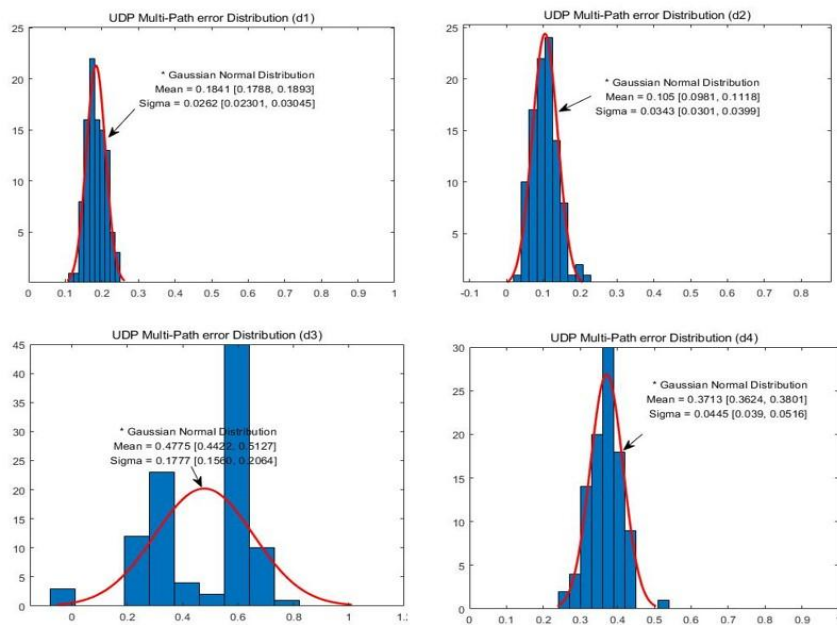


그림38 각 d 오차 분포 형태

거리 오차를 확인해본 결과, d3(Tag에서 Anchor3까지의 거리)의 오차 분포 형태가 가우시안 분포를 띄지 않았다. 따라서 가우시안 분포 외에도 다중 경로에 관한 오차의 형태는 지수 분포 형태[19], 균일 분포 형태[20], 측정 및 경험적 근거에 관한 형태[21]과 같이 적용 환경에 따라 여러 다른 분포 형태로 모델링될 수 있다.

### 3.3.5 실험 결과 분석

철판 영향의 다중 경로에 대한 실험 결과 중 거리 분포도 차이를 그림으로 나타내 보았다.

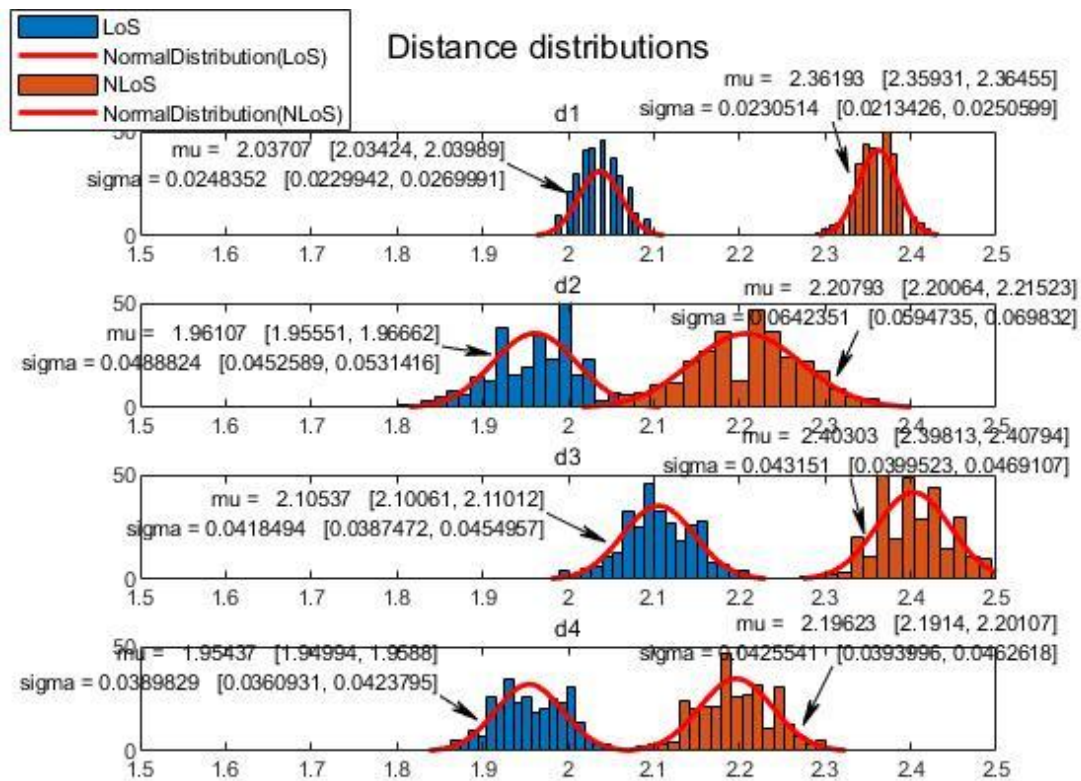


그림39 평균 거리 분포 비교

거리 값은 각각 정규분포 형태를 띄고 있으며 파란색 히스토그램은 철판 영향이 없는 경우이며, 주황색 히스토그램은 철판 영향에 따라 기존 거리 값에 오차가 포함되어 나타남을 보이고 있다. d1의 경우 약 33cm, d2의 경우 약 24cm, d3의 경우 약 30cm, d4의 경우 약 24cm의 오차가 포함되어 측정됨을 알 수 있었다. 이는 전체적인 좌표 추정 결과의 정밀도를 감소시키므로 반드시 개선 과정이 필요하다.

한 구역에서 더 정확한 측위와 네트워크 확장을 위해 Anchor의 개수를 늘려보았다. 총 9개를 이용하여 4개의 구역으로 구분하여 측위를 시행하였다. Tag는 근거리에 있는 4개의 Anchor에

의해 위치가 계산되어진다. 아래 그림40과 같이 실험 환경을 구성하였고 적용하고자 하는 환경의 주된 소재인 철판 유무에 대한 영향을 측정해보았다. 아래 그림41과 같은 결과가 나타났는데 이는 전파의 반사와 회절로 인해 측정된 값들이 동일 위치에 있지만 흩어지는 현상이 나타났다. 이를 보정하기 위해 신호의 첫번째 도달 경로를 찾는 것이 중요한데, 다중 경로 오차는 매우 일관되지 않은 측정으로 나타났다. 따라서 각 고정 노드와의 잔차를 평균적으로 분석하여 평균 수치의 잔차가 해당 환경에서 항상 포함되어 발생한다고 가정하고 위치 추정에 앞서 오차만큼 제거해주는 것이 합리적이라고 판단하였다.

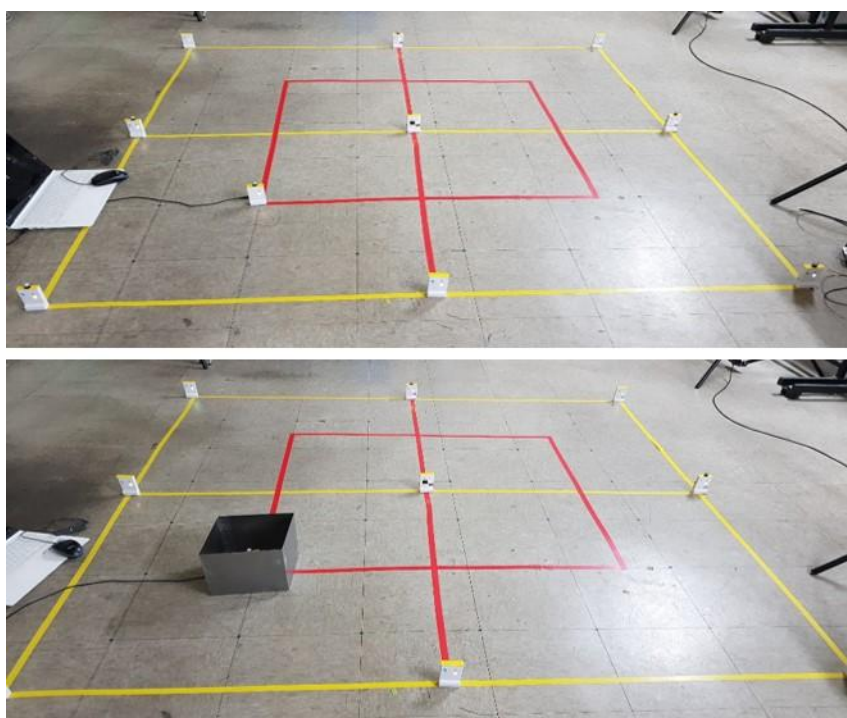


그림40 네트워크 확장 실험 설정

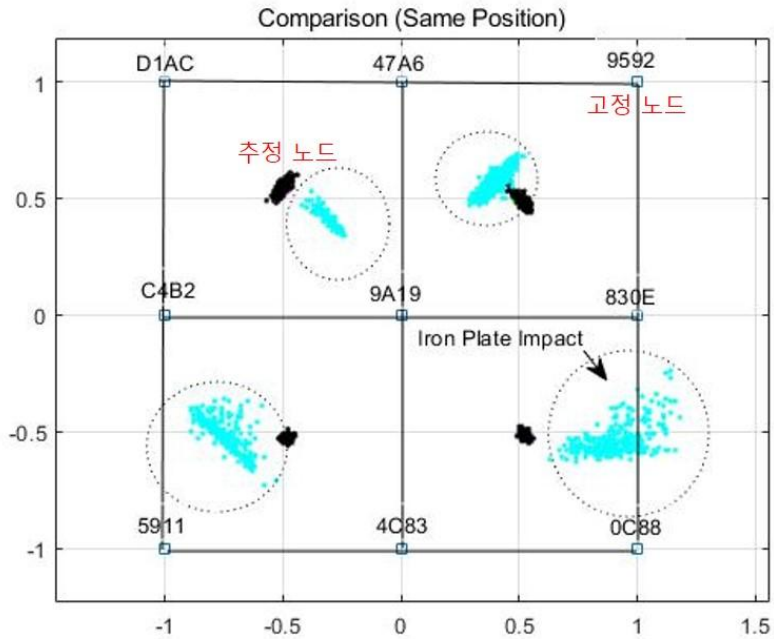


그림41 네트워크 확장 추정 실험 결과

### 3.4 정밀도 개선을 위한 측위 알고리즘 제안

#### 3.4.1 알고리즘 목적 및 구성

각종 실험 결과를 분석한 뒤 측정되는 거리 오차에 대한 개선을 목적으로 알고리즘을 제안하고 적용해보았다. 작업 구역 내에는 전파에 영향을 줄 수 있는 많은 방해 요소(작업 장비, 작업자 등)들이 있다. 따라서 안정된 측위를 위해 고정 노드를 4개로 구성하여 잡음이 포함된 거리 값을 감지하고 이를 개선하는 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘 순서도는 다음 그림 42와 같으며 각 단계별 도출 과정을 설명하였다.



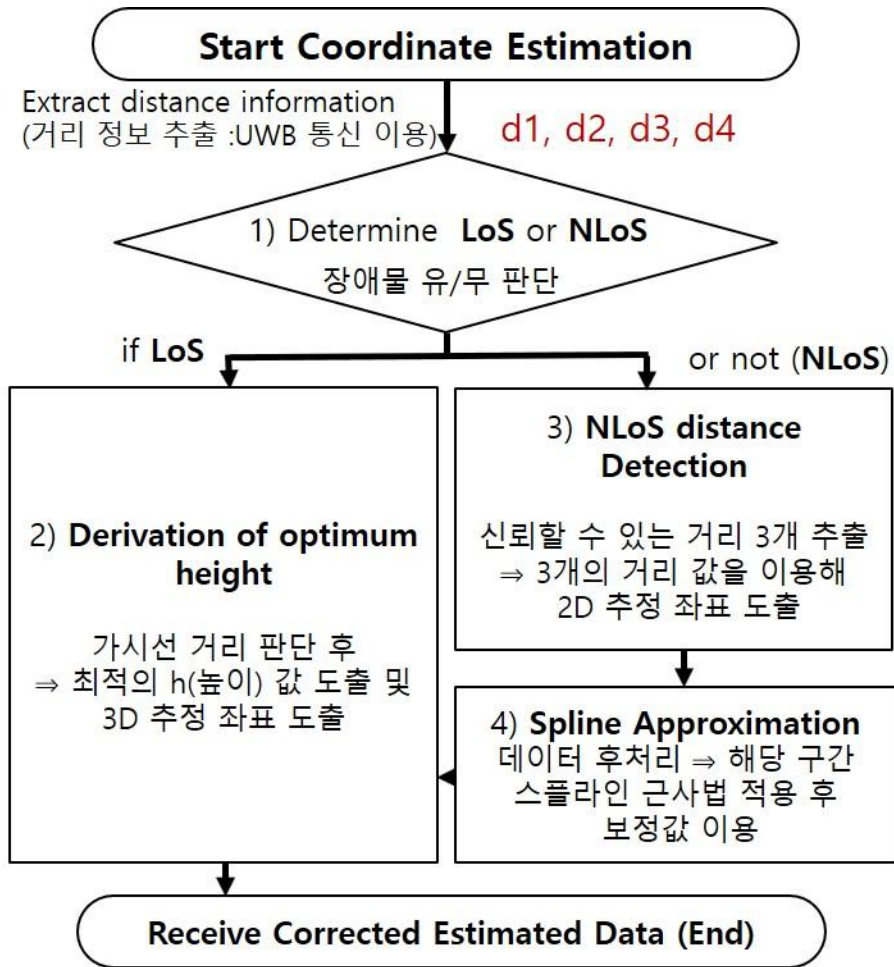


그림42 NLoS 개선 목적 측위 알고리즘 순서도

측위 시작 단계에서 UWB 통신을 이용하여 추정하고자 하는 목표 노드와 알고 있는 위치의 고정 노드들 사이의 각 거리 정보를 추출한다. 사실상 2차원 좌표의 경우에는 2개의 고정 노드 (known position)로도 상대적인 좌표 계산이 가능하다. 하지만 더 안정적인 좌표를 찾기 위해 총 4개의 고정 노드를 이용하여 비교 과정을 진행하였다.

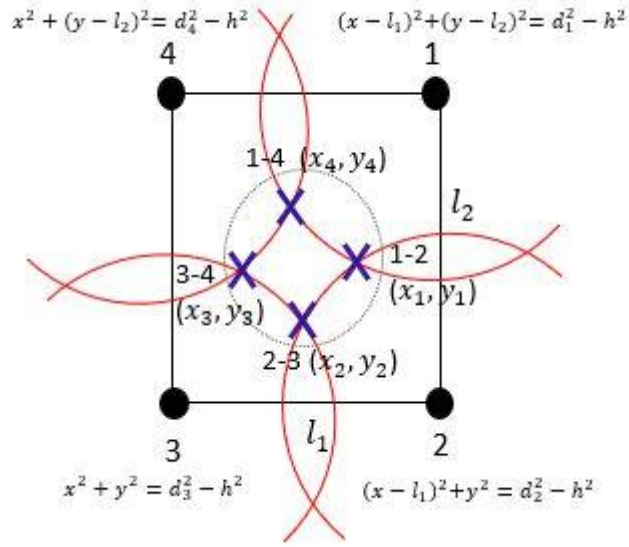


그림43 측위 알고리즘 내부 과정(순서도 1)

순서도 1)에서는 근접한 2개의 노드를 한 쌍으로 구성한 뒤 교점이 되는 좌표를 구한다. 단, 근접한 두 원의 교점 중 측위 범위 내 포함된 교점의 경우만 생각한다. 계산 과정을 거친 좌표는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[25]

$$x_1 = l_1 - \sqrt{d_2^2 - h^2 - y_1^2}, \quad y_1 = \frac{l_2^2 - d_1^2 + d_2^2}{2 l_2} \quad (3.63)$$

$$x_2 = \frac{l_1^2 - d_2^2 + d_3^2}{2 l_1}, \quad y_2 = \sqrt{d_3^2 - h^2 - x_2^2} \quad (3.64)$$

$$x_3 = \sqrt{d_3^2 - h^2 - y_3^2}, \quad y_3 = \frac{l_2^2 - d_4^2 + d_3^2}{2 l_2} \quad (3.65)$$

$$x_4 = \frac{l_1^2 - d_1^2 + d_4^2}{2 l_1}, \quad y_4 = l_2 - \sqrt{d_4^2 - h^2 - x_4^2} \quad (3.66)$$

오차가 포함되어 있지 않다고 가정하면 도출된 2차원의 4개의 좌표 값들은 모두 동일해야 한다. 하지만 실제 상황에서 오차가 0에 가까운 경우는 거의 없으므로 좌표 값들이 근접할수록 정밀도가 높다고 할 수 있다. 이 좌표들의 조합으로 NLoS(None Line of Sight, 비가시선)거리를 판단해 낼 수 있는 식(3.67)을 도출하였다.

$$f(d) = d_1^2 + d_3^2 - d_2^2 - d_4^2 \quad (3.67)$$

위 함수의 값이 대칭되는 경계 값으로 정한  $\delta_1$  값 내부에 있는 경우 LoS(Line of Sight, 가시선)거리로 판단하고, 반대인 경우는 비가시선 거리로 판단한다. 판단된 측위 정보가 LoS거리 인 경우, 순서도 2)과정으로 진행하게 된다. 이 과정은 최적화 문제로 어떤 목적 함수의 함수 값을 최적화(최소화)시키는 높이(h) 정보를 찾는 문제이다. 이 과정 또한 위 1)과정의 도출된 좌표를 이



용하여 h가 포함된 함수를 다음과 같이 생성하였다.

$$f_1(h) = \sqrt{f_3(h)} \quad (3.68)$$

$$f_2(h) = \sqrt{f_4(h)} \quad (3.69)$$

$$f_3(h) = d_2^2 - h^2 - y_1^2 \quad (3.70)$$

$$f_4(h) = d_3^2 - h^2 - y_3^2 \quad (3.71)$$

$$f_5(h) = l_1 - f_1(h) - f_2(h) \quad (3.72)$$

$$f_6(h) = f_5(h)^2 \quad (3.73)$$

위 함수들을 미분하는 과정을 통해 최소가 되는 h를 찾아 최적 값을 결정하였다.

$$\min_h f_6(h) \quad (3.74)$$

그 결과 LoS(Line of Sight, 가시선)거리로 추정된 좌표들의 높이 값이 결정되어 3차원 좌표를 얻게 된다. 반면에 1)과정을 통해 NLoS(None Line of Sight, 비가시선)거리로 판단된 경우에는 순서도 3)과정을 거치게 된다. 3)과정에서의 NLoS 판단은 최소 3개의 거리 값을 사용할 수 있는 조건만 적용하였다. 경우의 수는 다음 표 5와 같다.

d	LoS	NLoS			
$d_1$	○	○	○	○	X
$d_2$	○	○	○	X	○
$d_3$	○	○	X	○	○
$d_4$	○	X	○	○	○

표 5 NLoS 판단 경우의 수

각각의 거리 값에 대한 오차를 계산하는 과정을 통해 신뢰할 만한 3개의 거리 값을 추출하여 좌표 계산을 진행한다. 이 때 임계치  $\delta_2$ 는 판단할 오차 범위로 적절히 선정하여 이용하였다.

$$error1 = (x - l_1)^2 + (y - l_2)^2 - d_1^2 \quad (3.75)$$

$$error2 = (x - l_1)^2 + y^2 - d_2^2 \quad (3.76)$$

$$error3 = x^2 + y^2 - d_3^2 \quad (3.77)$$

$$error4 = x^2 + (y - l_2)^2 - d_4^2 \quad (3.78)$$

$$|error(i)| \leq \delta_2 \quad (3.79)$$

임계치  $\delta_2$ 보다 큰 오차가 포함된 구간을 NLoS 거리로 판단하고 다음과 같이 좌표 계산을 한다. 순서도 1)에서 설명한 기본적인 거리 방정식을 이용하여

$$(x - l_1)^2 + (y - l_2)^2 + h^2 = d_1^2 \quad (3.80)$$

$$(x - l_1)^2 + y^2 + h^2 = d_2^2 \quad (3.81)$$

$$x^2 + y^2 + h^2 = d_3^2 \quad (3.82)$$

$$x^2 + (y - l_2)^2 + h^2 = d_4^2 \quad (3.83)$$

위 식으로부터 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$-2l_1x - 2l_2y + r = d_1^2 \quad (3.84)$$

$$-2l_1x + r = d_2^2 \quad (3.85)$$

$$r = d_3^2 \quad (3.86)$$

$$-2l_2y + r = d_4^2 \quad (3.87)$$

$$r = x^2 + y^2 + h^2 \quad (3.88)$$

행렬로 표기하여 좌표를 구하면,

$$A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \\ d_4^2 \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

$$A = \begin{bmatrix} -2l_1 & -2l_2 & 1 \\ -2l_1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2l_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = (A'A)^{-1}A' \begin{bmatrix} \bar{d}_1^2 \\ \bar{d}_2^2 \\ \bar{d}_3^2 \\ \bar{d}_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\bar{d}_1^2 - \bar{d}_2^2 + \bar{d}_3^2 + \bar{d}_4^2 + 2l_1^2}{4l_1} \\ \frac{-\bar{d}_1^2 + \bar{d}_2^2 + \bar{d}_3^2 - \bar{d}_4^2 + 2l_1^2}{4l_2} \\ \frac{-\bar{d}_1^2 - \bar{d}_2^2 - \bar{d}_3^2 - \bar{d}_4^2}{4} \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

$$\hat{h}^2 = \hat{r} - \hat{x}^2 - \hat{y}^2 \quad (3.92)$$

으로 나타낼 수 있다.

NLoS(비가시선 구간)의 경우는 표 5와 같이 신뢰할 만한 총 3개의 거리 값을 이용하여 좌표를 도출하게 되는데, 다음과 같이 총 4가지 경우를 생각해 볼 수 있었다.

첫번째로  $d_1, d_2, d_3$ 를 이용하는 경우는

$$A_{123} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

$$A_{123} = \begin{bmatrix} -2l_1 & -2l_2 & 1 \\ -2l_1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = A_{123}^{-1} \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\bar{d}_2^2 + \bar{d}_3^2 + l_1^2}{2l_1} \\ \frac{-\bar{d}_1^2 + \bar{d}_2^2 + l_2^2}{2l_2} \\ \bar{d}_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.95)$$

이 된다.

두번째로  $d_1, d_2, d_4$ 를 이용하는 경우는

$$A_{124} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_4^2 \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

$$A_{124} = \begin{bmatrix} -2l_1 & -2l_2 & 1 \\ -2l_1 & 0 & 1 \\ 0 & -2l_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = A_{124}^{-1} \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\bar{d}_1^2 + \bar{d}_4^2 + l_1^2}{2l_1} \\ \frac{-\bar{d}_1^2 + \bar{d}_2^2 + l_2^2}{2l_2} \\ -\bar{d}_1^2 + \bar{d}_2^2 + \bar{d}_4^2 \end{bmatrix} \quad (3.98)$$

이 된다.

세번째로  $d_1, d_3, d_4$ 를 이용하는 경우는

$$A_{134} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_3^2 \\ d_4^2 \end{bmatrix} \quad (3.99)$$

$$A_{134} = \begin{bmatrix} -2l_1 & -2l_2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2l_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.100)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = A_{134}^{-1} \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_3^2 \\ d_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\bar{d}_1^2 + \bar{d}_4^2 + l_1^2}{2l_1} \\ \frac{\bar{d}_3^2 - \bar{d}_4^2 + l_2^2}{2l_2} \\ \bar{d}_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.101)$$

이 된다.

마지막으로  $d_2, d_3, d_4$ 를 이용하는 경우는

$$A_{234} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_2^2 \\ d_3^2 \\ d_4^2 \end{bmatrix} \quad (3.102)$$

$$A_{234} = \begin{bmatrix} -2l_1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2l_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.103)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = A_{234}^{-1} \begin{bmatrix} d_2^2 \\ d_3^2 \\ d_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\bar{d}_2^2 + \bar{d}_3^2 + l_1^2}{2l_1} \\ \frac{\bar{d}_3^2 - \bar{d}_4^2 + l_2^2}{2l_2} \\ \bar{d}_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.104)$$

이 된다.

좌표를 도출한 후 순서도 4)의 보정 과정을 거친다. 이는 각 d값의 오차 영향을 감소시키기 위해 스플라인 근사법을 적용하였다. 일반적으로 스플라인 계산 방법에는 보간, 근사, 평활화 등이 있다.

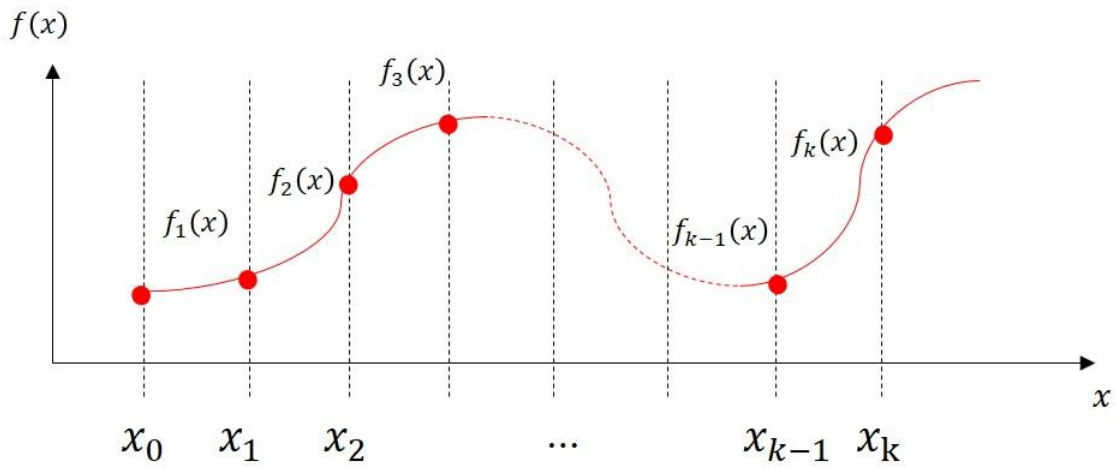


그림44 스플라인 곡선

초기 단계에 그림44와 같이 전체 함수의 구간을 일정하게 분해하여 k개의 다항식 함수를 생성한다.

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x), & x_0 \leq x \leq x_1 \\ \vdots \\ f_j(x), & x_{j-1} \leq x \leq x_j \\ \vdots \\ f_k(x), & x_{k-1} \leq x \leq x_k \end{cases} \quad (3.105)$$

이 문제를 해결하기 위해서는 구간 별 “경계 조건”인 다음의 3가지 유형의 조건이 일반적으로 사용되고, 이를 만족해야 불연속 구간이 없는 함수가 완성된다.

$$f_j(x) = f_{j+1}(x) \quad (3.106)$$

$$f_j'(x) = f_{j+1}'(x) \quad (3.107)$$

$$f_j''(x) = f_{j+1}''(x) \quad (3.108)$$

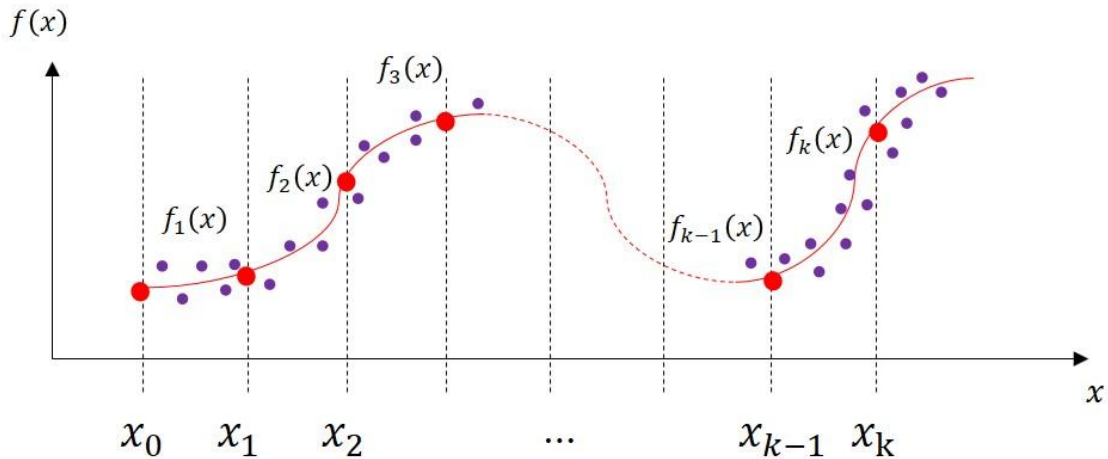


그림45 스플라인 근사 곡선

본 논문에 제안된 알고리즘에서는 위 그림과 같이 스플라인 곡선이 모든 데이터 점을 정확하게 따르지는 않지만 오차의 최소 제곱 조정을 통한 8차 스플라인 근사 방식[24]을 사용하였다. 스플라인 근사는 다차원 공간에서 가능한 모든 방향으로 이동하는 데이터 집합에 매우 유용하다 [22].

[24]에 의해 다음과 같은 함수식을 이용할 수 있다.

$$F = \sum_{i=0}^N P_i (y_i - f_i)^2 + \int_{t_0}^{t_N} \{ \alpha_1 [y'(t)]^2 + \alpha_2 [y''(t)]^2 + \alpha_3 [y'''(t)]^2 \} dt \quad (3.109)$$

$$y_{i,s}(t) = a_{i,s,0} + a_{i,s,1}t + a_{i,s,2}t^2 + a_{i,s,3}t^3 + a_{i,s,4}t^4 + a_{i,s,5}t^5 + a_{i,s,6}t^6 + a_{i,s,7}t^7 \quad (3.110)$$

여기서  $y_{i,s}(t)$ 는 제안한 알고리즘에서 적용한 구간(s)별 8차(Eight-order) 스플라인 곡선을 지칭하며, 미지수가 총 8개인 방정식과 같다.  $f_i$ 는 구간(s)별 실제 측정 데이터 값을 의미한다. 또한,  $P_i$ 는 Control parameter로써 사용자에게 의해 적절한 상수값으로 지정될 수 있으며, 이 값의 가중을 높이면 실제 실험 데이터와 매우 근접하거나 일치하게 지나가는 곡선을 만들 수 있다. 하지만 포함되어 있는 소량의 이상치(outliers) 데이터들을 무시하는 것과 함께 부드러운 곡선을 위해서는 이 값을 적당히 조절할 필요가 있다. 따라서 첫번째 수식 항의 의미는 최소 제곱항으로써 오차가 최소가 되도록 조정하는 식을 의미한다.

두번째 수식 항에서  $\alpha_i$ 의 값은 스플라인 곡선 파생물의 중요성을 나타내는 매개 변수로 이 값의 가중을 높이면 실제 실험 데이터와는 조금 벗어날 수 있으나 지나가는 곡선이 매우 부드럽고 안정적인 형태가 된다. 따라서 두 개의 파라미터  $P_i$ 와  $\alpha_i$ 는 상대적인 중요성을 고려하여 이 값들을 지정할 필요가 있다. 본 논문에서는 1차, 2차, 3차 도함수를 같도록 조건을 두어 구간(s)별 스플라인 곡선을 구하였다.

$$d_{i,k} , 1 \leq i \leq 4, 1 \leq k \leq N_s M_s \quad (3.111)$$

$$y_1(t) - y_2(t) + y_3(t) - y_4(t) , t = (k-1)T, \quad (3.112)$$

$$N_s \geq 1 , M_s \geq 1$$

$$k-1 = sM_s + m \quad (3.113)$$

$$0 \leq s \leq N_s - 1, 0 \leq m \leq M_s - 1$$

\* LoS distance constraint

$$y_i((k-1)T) = d_i^2((k-1)T), \quad \text{if } k \in S_{los,i} \quad (3.114)$$

\* NLoS distance constraint

$$y_i((k-1)T) \leq d_i^2((k-1)T), \quad \text{if } k \notin S_{los,i} \quad (3.115)$$

위 식에서  $N_s$ 는 조각의 수이며,  $M_s$ 는 구간의 길이이다. 최적화된 스플라인 곡선을 생성하는 동안 조각의 수 및 구간의 길이는 변함없이 유지시키면서 NLoS 오차 값을 보정하여 이용하였다.

$$T_i = t_i - t_{i-1} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (3.116)$$

$$\begin{bmatrix} y_{i-1} \\ y_{i-1}^{(1)} \\ y_{i-1}^{(2)} \\ y_{i-1}^{(3)} \\ y_i \\ y_i^{(1)} \\ y_i^{(2)} \\ y_i^{(3)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} a_{i,0} \\ a_{i,1} \\ \vdots \\ a_{i,7} \end{bmatrix} \quad (3.117)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & T & T^2 & T^3 & T^4 & T^5 & T^6 & T^7 \\ 0 & 1 & 2T & 3T^2 & 4T^3 & 5T^4 & 6T^5 & 7T^6 \\ 0 & 0 & 2 & 6T & 12T^2 & 20T^3 & 30T^4 & 42T^5 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 24T & 60T^2 & 120T^3 & 210T^4 \end{bmatrix} \quad (3.118)$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ K_2 & K_3 \end{bmatrix} = [M_1 \quad M_2] \quad (3.119)$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \quad (3.120)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -\frac{35}{T^4} & -\frac{20}{T^3} & -\frac{5}{T^2} & -\frac{2}{3T} \\ \frac{84}{T^5} & \frac{45}{T^4} & \frac{10}{T^3} & \frac{1}{T^2} \\ 70 & 36 & 15 & 2 \\ -\frac{20}{T^6} & -\frac{10}{T^5} & -\frac{2}{2T^4} & -\frac{1}{3T^3} \\ \frac{20}{T^7} & \frac{10}{T^6} & \frac{2}{T^5} & \frac{1}{6T^4} \end{bmatrix}, K_3 = \begin{bmatrix} \frac{35}{T^4} & \frac{15}{T^3} & \frac{5}{2T^2} & -\frac{1}{6T} \\ \frac{84}{T^5} & \frac{39}{T^4} & \frac{7}{T^3} & \frac{1}{2T^2} \\ 70 & 34 & 13 & 1 \\ \frac{20}{T^6} & -\frac{10}{T^5} & \frac{2}{2T^4} & -\frac{1}{2T^3} \\ -\frac{20}{T^7} & \frac{10}{T^6} & -\frac{2}{T^5} & \frac{1}{6T^4} \end{bmatrix} \quad (3.121)$$

$$\begin{bmatrix} a_{i,0} \\ a_{i,1} \\ \vdots \\ a_{i,7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ y_{i-1}^{(1)} \\ y_{i-1}^{(2)} \\ y_{i-1}^{(3)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ y_i^{(1)} \\ y_i^{(2)} \\ y_i^{(3)} \end{bmatrix} = M_1 \overline{y_{i-1}} + M_2 \overline{y_i} \quad (3.122)$$

$$(x'_i(t))^2 = \begin{bmatrix} \overline{y'_{i-1}} & \overline{y'_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_2 \end{bmatrix} D'_1 \overline{u'} \overline{u} D_1 [M_1 \quad M_2] \begin{bmatrix} \overline{y_{i-1}} \\ \overline{y_i} \end{bmatrix} \quad (3.123)$$

$$\int_0^T (x'_i(t))^2 dt = \begin{bmatrix} \overline{y'_{i-1}} & \overline{y'_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_2 \end{bmatrix} (D_1)' Q(T) D_1 [M_1 \quad M_2] \begin{bmatrix} \overline{y_{i-1}} \\ \overline{y_i} \end{bmatrix} \quad (3.124)$$

$$\int_0^T (x''_i(t))^2 dt = \begin{bmatrix} \overline{y'_{i-1}} & \overline{y'_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_2 \end{bmatrix} (D_1^2)' Q(T) (D_1^2) [M_1 \quad M_2] \begin{bmatrix} \overline{y_{i-1}} \\ \overline{y_i} \end{bmatrix} \quad (3.125)$$

$$\int_0^T (x'''_i(t))^2 dt = \begin{bmatrix} \overline{y'_{i-1}} & \overline{y'_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_2 \end{bmatrix} (D_1^3)' Q(T) (D_1^3) [M_1 \quad M_2] \begin{bmatrix} \overline{y_{i-1}} \\ \overline{y_i} \end{bmatrix} \quad (3.126)$$

$$Q(T) = \int_0^T \overline{u'} \overline{u} dt \quad (3.127)$$

$$Q(T) = \begin{bmatrix} T & \frac{T^2}{2} & \frac{T^3}{3} & \frac{T^4}{4} & \frac{T^5}{5} & \frac{T^6}{6} & \frac{T^7}{7} & \frac{T^8}{8} \\ T^2 & T^3 & T^4 & T^5 & T^6 & T^7 & T^8 & T^9 \\ \frac{2}{3} & \frac{3}{4} & \frac{4}{5} & \frac{5}{6} & \frac{6}{7} & \frac{7}{8} & \frac{8}{9} & \frac{9}{10} \\ T^3 & T^4 & T^5 & T^6 & T^7 & T^8 & T^9 & T^{10} \\ \frac{3}{4} & \frac{4}{5} & \frac{5}{6} & \frac{6}{7} & \frac{7}{8} & \frac{8}{9} & \frac{9}{10} & \frac{10}{11} \\ T^4 & T^5 & T^6 & T^7 & T^8 & T^9 & T^{10} & T^{11} \\ \frac{4}{5} & \frac{5}{6} & \frac{6}{7} & \frac{7}{8} & \frac{8}{9} & \frac{9}{10} & \frac{10}{11} & \frac{11}{12} \\ T^5 & T^6 & T^7 & T^8 & T^9 & T^{10} & T^{11} & T^{12} \\ \frac{5}{6} & \frac{6}{7} & \frac{7}{8} & \frac{8}{9} & \frac{9}{10} & \frac{10}{11} & \frac{11}{12} & \frac{12}{13} \\ T^6 & T^7 & T^8 & T^9 & T^{10} & T^{11} & T^{12} & T^{13} \\ \frac{6}{7} & \frac{7}{8} & \frac{8}{9} & \frac{9}{10} & \frac{10}{11} & \frac{11}{12} & \frac{12}{13} & \frac{13}{14} \\ T^7 & T^8 & T^9 & T^{10} & T^{11} & T^{12} & T^{13} & T^{14} \\ \frac{7}{8} & \frac{8}{9} & \frac{9}{10} & \frac{10}{11} & \frac{11}{12} & \frac{12}{13} & \frac{13}{14} & \frac{14}{15} \\ T^8 & T^9 & T^{10} & T^{11} & T^{12} & T^{13} & T^{14} & T^{15} \\ \frac{8}{9} & \frac{9}{10} & \frac{10}{11} & \frac{11}{12} & \frac{12}{13} & \frac{13}{14} & \frac{14}{15} & \frac{15}{16} \end{bmatrix} \quad (3.128)$$

$$\int_0^T x'_{1,i}(t) x'_{2,i}(t) dt = \begin{bmatrix} \overline{y'_{1,i-1}} & \overline{y'_{1,i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_2 \end{bmatrix} (D_1)' Q(T) D_1 [M_1 \quad M_2] \begin{bmatrix} \overline{y_{2,i-1}} \\ \overline{y_{2,i}} \end{bmatrix} \quad (3.129)$$

최종적으로 스플라인 근사된 곡선 값을 이용하면 추정된 좌표들이 어떤 환경이든 이동 경로를 크게 벗어나지 않게 하는 효과가 있으며, NLoS(비가시선) 거리의 개선된 결과를 얻을 수 있게 된다.

### 3.4.2 알고리즘 적용 및 실험

앞서 설명한 알고리즘을 실제 위치 추정에 적용시켜 보았다. 실험 환경과 개요는 다음과 같다.



그림46 실험 환경 및 개요

그림 46과 같은 경로로 이동하면서 위치를 추정하였고, 고정된 노드들 중 하나의 노드 앞에 방해물을 이용한 NLoS(비가시선) 거리를 생성시켰다. 다른 방해 요소들은 구성된 범위 내에서 모두 제거하였다.

## 4. 연구 결과

### 4.1 구현된 측위 알고리즘 실험 결과

제안하는 측위 알고리즘 구현 및 데이터 분석은 MATLAB® 프로그램을 이용하였으며, 알고리즘 순서도에 따른 결과를 차례대로 나타내 보았다. 과정1)에서 도출된 함수 값( $f(\bar{d}_i)$ )을 이용해 NLoS 거리 판단을 유도하였고, 그림47과 같이 임계치  $\pm\delta_1$  범위를 벗어나는 구간을 비가시선 거리 구간으로 판단하였다.

$$\bar{d}_i = d_i + v_i + n_i \quad (4.1)$$

$$v_i \sim N(0, \sigma^2), \quad n_i : NLOS \text{ noise} \quad (4.2)$$

$$f(\bar{d}_i) \equiv \bar{d}_1^2 + \bar{d}_3^2 - \bar{d}_2^2 - \bar{d}_4^2 \quad (4.3)$$

$$|f(\bar{d}_i)| \leq \delta_1 \quad (4.4)$$



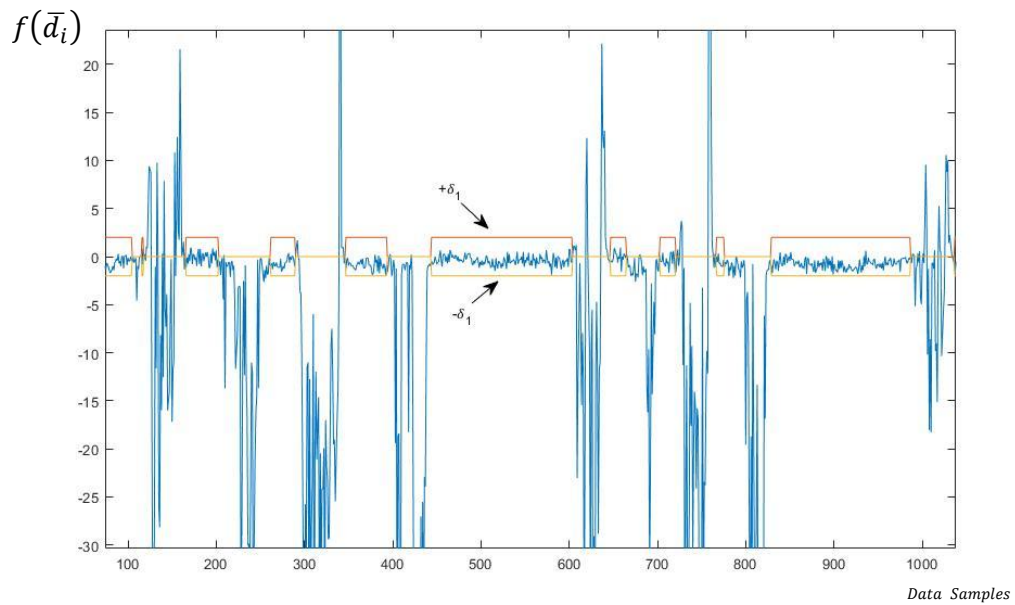


그림47 실험 결과 1(NLoS 판단 과정)

과정4)에서 스플라인 근사법을 이용한 보정 곡선에 대한 결과는 다음 그림 48과 같다.

앞서 비가시선으로 판단된 인덱스들에 해당되는 구간의 값들을 없애고 이전 LoS 구간과 이후 LoS 구간의 곡선 방정식을 근사하여 따라가도록 값을 보간시켜 곡선을 생성한 결과이다.

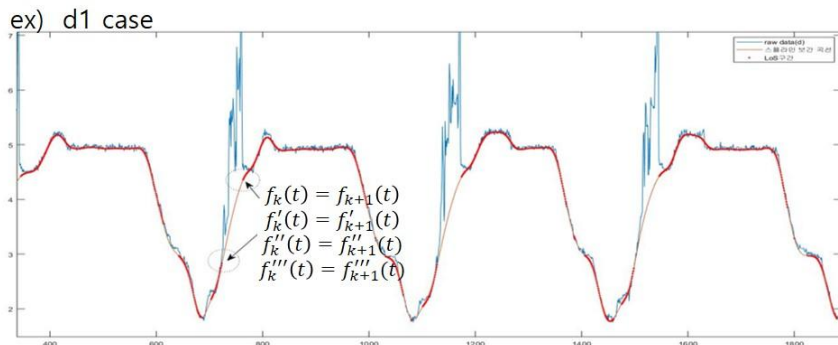
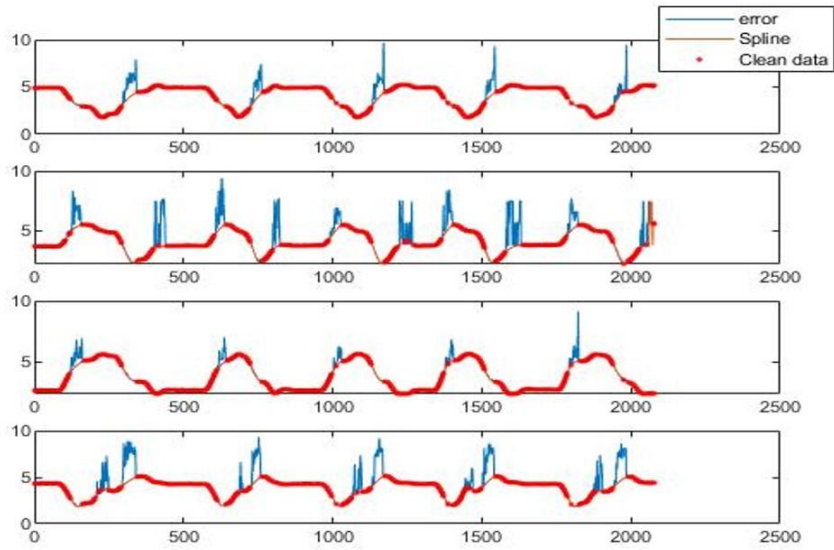


그림48 실험 결과 2(스플라인 근사 과정)

각 거리 ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ ) 마다 별도의 스플라인 근사 과정을 실행하였으며, 위 실험의 총 데이터 개수는 각 거리 별 2078개씩이며 이를 20개씩 ( $M_s$ ) 한 구간으로 정하였으며 총 103개 ( $N_s$ )의 구간이 나온다. 각 구간 별 스플라인 곡선을 생성하는 것을 통해 실제 측정 데이터에 포함된 이상치를 제거하고 보정하였다.

구간 별 함수를 일반화한 식은 다음과 같다.

$$d_{i,k}, 1 \leq i \leq 4, 1 \leq k \leq N_s M_s, N_s \geq 1, M_s \geq 1 \quad (4.5)$$

$$k - 1 = s M_s + m, 0 \leq s \leq N_s - 1, 0 \leq m \leq M_s - 1 \quad (4.6)$$

$$f_s(k - 1) = s, f_m(k - 1) = m \quad (4.7)$$

최종적으로 보정된 거리를 이용하여 추적한 이동 궤적의 결과는 다음 그림 49와 같다.

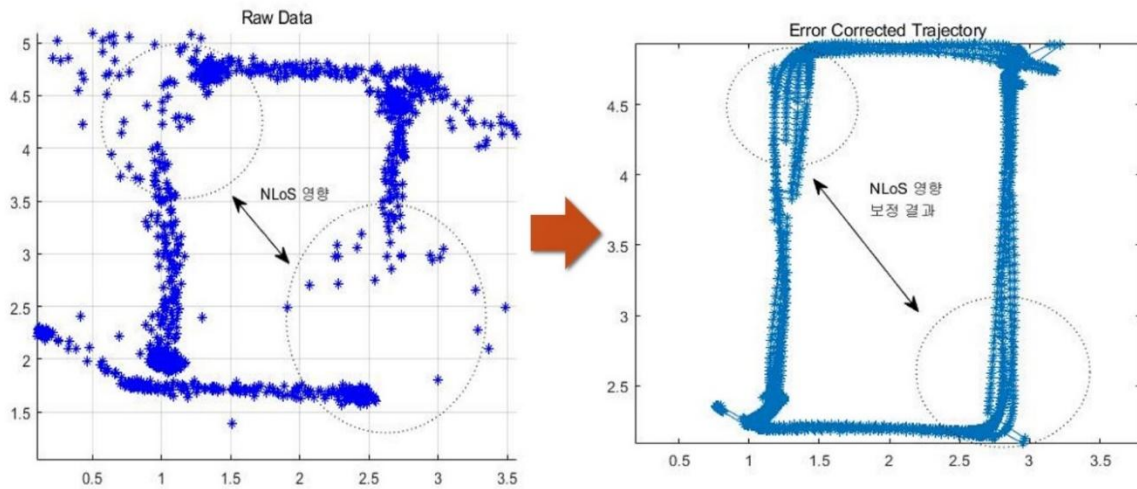


그림49 실험 결과 3(이동 궤적 개선 결과)

고정된 노드 앞의 방해물에 의해 NLoS 거리가 발생하고, 결과적으로 추정된 좌표의 신뢰도가 떨어짐을 알 수 있었다. 3.4절에서 제안한 알고리즘을 적용시키면 다음 그림과 같이 비교적 이동 경로가 정확하게 보정되는 것을 볼 수 있다.

## 4.2 산업 모니터링 적용 시나리오

본 논문에서의 핵심은 초광대역 통신 방법을 활용하여 정확한 위치 정보를 얻는 것이며, 노드의 위치 정보에 따라 활용 가치가 결정되므로 정밀도 높은 위치 인식이 중요하다고 생각하였다. 획득된 위치 정보를 이용하여 다방면의 모니터링의 목적으로 활용될 수 있다. 구현하고자 하는 시나리오 예시들을 다음 표 6과 같이 정리해보았다. 이는 작업자 및 작업 기기의 위치 정보, 각종 상태 정보를 수집하여 모니터링함으로써 관리와 제어의 편리를 도모하고 산업 현장의 안전사고 예방과 산업생산성을 높이고자 하는 것이 목적이다.

시나리오 예시	내용 (목적)
작업장 안전 관리	위치 정보를 이용해 각종 수단(알람, 센서 등)을 통해 사고가 발생한 지역의 비상 상황을 전파하고 안전 사고에 대응함으로써 사고 예방과 대처가 신속하게 이루어지도록 하기 위함. (작업장 사고, 재해 등은 현대 사회의 주요 이슈이므로 조기 예방이 가능할 것으로 예상됨)
작업장 생산 관리	작업 운영 정보에 대한 파악이 가능하므로 추후의 작업 계획 수립에 이용이 가능하게 됨. 작업자 인원 및 작업장 내 가동 중인 기기들의 현황을 파악할 수 있음.
작업장 보안 및 자산 관리	각 구역별 출입 인원을 파악하고 관계자 외 침입을 제한하기 위함. 또한 작업 장비들의 위치 정보를 확인하여 관리하기 위함.
작업장 환경 정보 감지	작업장 내 적정 환경 수준을 유지함으로써 보건 사고를 예방하고 적합한 작업 환경을 조성하기 위함. 추후 위치에 따라 각종 센서를 부착하여 가스, 연기, 온도, 밀폐 구역 산소 농도 등을 측정할 수 있음.
작업장 데이터 관리	구역 내 사고 발생 상황에 대한 원인을 분석하여 추후에 대처 가능한 방안을 마련함으로써 2차 사고를 예방할 수 있음. 재해 요소 이력, 기간 및 설비 별 사고 분석 및 조회 용도로 사용함.

표 6 위치 정보 활용 시나리오

## 5. 결론 및 보완점

기존의 위치 추정에 관한 연구는 주로 다음과 같이 세가지로 진행되고 있었다. 첫번째는 센서 통신을 기반으로 한 위치 파악의 알고리즘의 정확도를 높이는 연구, 두번째로는 기존의 여러 위치 추정 지역화 알고리즘의 이점들을 결합하는 방법에 관한 연구, 마지막으로 기존의 알고리즘을 활용하여 위치 추정을 시행하나 다양한 환경으로 적용 및 개선하거나 확장하는 방법에 관한 연구로 요약할 수 있다. 결국 위치 오차가 발생하는 원인을 파악하는 것이 중요하며, 본 연구를 진행함을 통해 결과적으로 위치 측정 시 오차(오류)의 원인을 세가지 범위로 정리할 수 있었다. 첫번째로 측정 장비 간의 오류이다. 측정 오류는 잡음을 가지고 있는 채널의 측정 과정에서 발생하며 이 때의 잡음은 시간 동기화, 즉 타이밍 오류라고 할 수 있다. 이를 개선하기 위한 방법은 각종 타이밍 기술을 이용하여 수신 신호 혹은 수신기 구조의 신호 대 잡음 비율을 향상시킴으로써 개선이 가능하다. 두번째 오류로는 다중경로, 즉 NLOS(None Line Of Sight) 전파 경로로 인한 시간 지연이다. 벽 등 주변 물체의 재질 특성, 주변 환경에 따른 신호의 산란 등을 반드시 고려해야 한다. 초광대역 기반 기술은 실내 환경에서 일반적인 다중 경로 전파의 개별 경로를 구별할 수 있기 때문에 도달 시간을 결정할 때 비교적 높은 정확도를 제공한다. 하지만 견고한 측위를 위해 전파 환경을 통계적으로 관찰하는 것이 요구되며 본 논문에서는 이 경우의 개선을 목적으로 측위 알고리즘을 제안하였다. 마지막으로서는 설치하고자 하는 노드 간의 지리적 위치에 따른 오류이다.

해당 경우는 3차원 측정을 할 필요가 있는 경우 고정된 노드의 위치가 서로 얼마만큼 분산되어 설치되어 있는지에 따라 오차가 나타나게 되었다.

결과적으로 정밀도의 차이의 원인은 매우 다양하므로 적용 환경을 관찰하고 이에 맞는 측위 알고리즘을 개발하는 것이 가장 적절할 것이다. 더해서 하나의 기술 방식을 사용하기보다 기존의 실내 탐지 및 측위 기술들을 적절히 결합하면 성능의 정확도는 훨씬 높아질 것이다.

추가적으로 자산 추적을 하기 위한 고려사항은 다음과 같았다. Tag의 크기, 네트워크 확장성, 위치 정밀도, 업데이트 비율(업데이트 속도 요구 사항은 크게 다를 수 있지만 물체를 세밀하고 정확하게 탐색하려면 10Hz정도의 속도를 필요로 함, 자산 추적시에는 대부분의 자산은 대개 오랜 기간 동안 범위 내에 고정되어 있기 때문에 전력 소모를 감소시키기 위해 위치 업데이트 속도를 낮출 필요가 있고 그 대신 잠재적으로 많은 자산 추적이 가능함.), Tag 소비전력, Tag 비용, Tag 무게, 현지화 시스템의 지연 시간(즉, 하드웨어 비용이 낮아야 하고, 시스템의 설치 및 유지보수가 최소화되어야 하며 아키텍처는 유연 해야함.) 등을 고려해야 할 것이다. 또한 내부 통신 데이터 크기 부분은 네트워크 확장성 문제에 있어 다수의 Tag를 효율적으로 사용하기 위해 프레임 패킷의 길이가 크기 때문에 높은 속도를 가지려면 조정된 타임 슬롯이 필요하다.

## 참고문헌

- [1] IEEE, "802.11-2016-IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications."
- [2] Ting Zhang, Jiang Lu, Fei Hu, Member, IEEE and Qi Hao, Member, IEEE, "Bluetooth Low Energy for Wearable Sensor-based Healthcare Systems", 2014 Health Innovations and Point-of-Care Technologies Conference, Seattle, Washington USA, October 8-10, 2014.
- [3] 김동혁, 송승현, 노기홍, 성태경, "이동 로봇을 위한 순방향 링크 AOA 측위 방법", Journal of Control, Automation and Systems Engineering Vol.13, No.6, June 2007.
- [4] 최진원, 김영훈, 강준성, 성유석, 김용화, 김성철, "초광대역 신호의 벽 투과 특성", JCCI 2008.
- [5] H. Wymeersch, "A Machine Learning Approach to Ranging Error Mitigation for UWB Localization," IEEE Transactions on communications, vol.60, no. 6, p. 1719-1728, 2012.
- [6] V. Savic, E. G. Larsson, J. Ferrer-Coll, and P. Stenumgaard, "Kernel Methods for Accurate UWB-Based Ranging With Reduced Complexity," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 3, pp. 1738-1793, Mar. 2016.
- [7] W. Srgel and W. Wiesbeck, "Influence of the Antennas on the Ultra-Wideband Transmission," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2005, no. 3, pp. 296-305, Mar. 2005.
- [8] Antonio. R. Jimenez and Fernando Seco, "Comparing Ubisense, Bespoon and Decawave UWB location system: indoor performance analysis" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (extension from 2016 IPIN Conference).
- [9] DecaWave Ltd, DWM1001\_Module\_Schematics\_vd1.21 (2018), Dublin, Ireland
- [10] DecaWave Ltd, DWM1001\_System\_Overview\_1.0 (2017), Dublin, Ireland
- [11] DecaWave Ltd, DWM1001\_DEV\_Product\_Brief-1.1, Dublin, Ireland.
- [12] Z. Sahinoglu, S. Gezici, and I. Güvenc, "Ultra-wideband Positioning System: Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols", pp.63-92, Cambridge University Press, 2011.
- [13] Ömer Çetin, Hakki Nazli, Ridvan Gürçan, Hilmi Öztürk, Hilal Güneren, Yasin Yelkovan, Mustafa Çayir, Hasari Çelebi, Hakan P. Partal, "An Experimental Study of High Precision

- TOA based UWB Positioning Systems" 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, 2012.
- [14] Ivan Dokmanic, Reza Parhizkar, Juri Ranieri, and Martin Vetterli, "Euclidean Distance Matrices : Essential theory, algorithms, and application" 2015 IEEE Signal Processing Magazine.
- [15] Dries Neiryck, Marcas O'Duinn and Ciaran McElroy, "Characterisation of NLOS Performance of an IEEE 802.15.4a Receiver", DecaWave Ltd, Dublin, Ireland.
- [16] Rainer Mautz, Washington Ochieng, Gary Brodin, and Andy Kemp, "3D Wireless Network Localization from Inconsistent Distance Observations", *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks Vol.3*, pp. 141–170, 2006.
- [17] Sinan Gezici, Zhi Tian, Georgios B. Giannakis, Hisashi Kobayashi, Andreas F. Molisch, H. Vincent Poor, Zafer Sahinoglu "Localization via Ultra-Wideband Radios", *IEEE Signal Processing Magazine Vol.22*, 2005.
- [18] Bardia Alavi, Kaveh Pahlavan, "Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements" *IEEE Communication Letters. Vol.10, No.4 April, 2006*.
- [19] S. Gezici and Z. Sahinoglu, "UWB geolocation techniques for IEEE 802.15.4a personal area networks," MERL Technical report, Cambridge, MA, Aug. 2004.
- [20] D. B. Jourdan and N. Roy, "Optical sensor placement for agent localization", in *Proc. IEEE Position, Location, and Navigation Symposium (PLANS)*, San Diego, CA, Apr. 2006, pp. 128–139.
- [21] D. B. Jourdan, D. Dardari, and M. Z. Win, "Position error bound for UWB localization in dense cluttered environments" , in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Vol. 8, Istanbul, Turkey, June 2006, pp. 3705–3710.
- [22] Nlkolaj Ezhov, Frank Neltzel, "Spline Approximation, Part1:Basic Methodology",Article In *Journal of Applied Geodesy*, February 2018.
- [23] Nekoogar, Faranak. *Ultra-Wideband Communications*. Prentice Hall, 2006. Print.
- [24] Dan Simon, "Data Smoothing and Interpolation Using Eight-order Algebraic Splines", *IEEE Transaction on Signal processing*, Vol.52, No.4, APRIL 2004.
- [25] Huu Toan Duong, Sukyeong Yoon, Duc Cong Dang and Young Soo Suh, "Robust Self-Calibration for Rectangle Shape UWB Anchor Locations", *IEEE Sensor conference*, 2019.

## APPENDIX

Table 1. Accuracy requirements of potential localization application [23]

	<b>IEEE Standard</b>						
	<b>WLAN</b>			<b>Bluetooth</b>	<b>WPAN</b>	<b>UWB</b>	<b>ZigBee</b>
	802.11a	802.11b	802.11g	802.15.1	802.15.3	802.15.3a	802.15.4
<b>Operational Frequency</b>	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	3.1–10.6 GHz	2.4 GHz
<b>Maximum Data Rate</b>	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	1 Mbps	55 Mbps	> 100 Mbps	250 Kbps
<b>Maximum Range</b>	100 meters	100 meters	100 meters	10 meters	10 meters	10 meters	50 meters



# ABSTRACT

**A study on UWB-based positioning algorithm for high precision position monitoring**

**Sukyeong Yoon**

**Dept. of Convergence Technology for Heavy Industries**

**Graduate School, University of Ulsan**

Recently, as interest in monitoring by using location information for the purpose of safety of people in the work area and management of production of work is increasing, identifying the exact location and moving path indoors and outdoors has emerged as a major challenge. For this purpose, it is necessary to establish a wireless communication environment, not wired, but it is difficult to establish such a communication environment due to most working environment conditions in the heavy industry to be applied. Due to the environment, ranging errors due to diffraction and refraction of radio waves are difficult to accurately locate. In this paper, we studied the positioning algorithm using high-precision ultra-wideband communication technology that is relatively robust to multipath in such a harsh working environment and has a few centimeters error in free space. The Ultra Wide Band communication method uses an impulse signal having a very short pulse width, and calculates a distance using the arrival time of the transmitted and received radio signal. The positioning algorithm used to estimate the coordinates using this distance information basically adopts the ToA(Time of Arrival) method. In addition, ultra-wideband communication has the advantages of low power and no distinction of signals when transmitting and receiving, and accurate positioning is possible because it does not use a separate carrier. This application can be used to obtain a variety of information, such as the distance of the target, the existence of the target, the movement of the target (speed, etc.), the information of the various targets. In this paper, the DWM1001 module of Decawave®, an Irish company, was selected through comparison process in terms of the precision of several hardware released to use commercially available ultra-wideband communication technology. After constructing the system, we tried to improve the position accuracy through experiments and calibration studies in various environments. In the last part, we describe and apply the proposed positioning algorithm according to the experimental results. The purpose of the proposed positioning algorithm is to detect the distance difference according to the presence of obstacles and to improve it. The correction method is spline approximation. In particular, the corrected positioning algorithm focuses on the results of ranging experiments through performance experiments and corrections for distance errors larger than the actual distance.