

긴급구조를 위한 비가시선 환경의 실내 측위 시스템 구현

이철수*, 임재욱*, 정성훈*, 설동민*, 이상범*

Implementation of Indoor Positioning Systems in NLOS Environment for Emergency Rescue

Chul-Soo Lee*, Jaewook Lim*, Sunghun Jung*, Dong-Min Seol*, Sangbeom Lee*

요약

본 논문에서는 건물의 화재나 대테러 상황 시 건물 내부에서 작전을 수행하는 인원의 정확한 위치를 측정하기 위해, IR-UWB 기술을 적용한 실내 측위 시스템을 구현하였다. 가시선 환경에서 주로 사용하는 기존의 방식과는 달리 본 논문은 기지국을 건물의 외부에 설치하고 건물 내부에 단말기를 운용하여 IR-UWB 기술이 비가시선 환경에서도 실내 측위에 활용될 수 있음을 보여 주었다. 실내 측위 시스템은 IR-UWB 신호가 건물의 외벽과 내벽을 통과하여 실내에 전달되도록 하기 위해 RF 증폭기와 고이득 안테나를 기지국과 단말기에 적용하였으며, 중앙처리국에서 거리정보를 수집하여 신호처리를 통해 단말기의 위치를 계산하도록 하였다. 구현된 시스템은 실제 건물과 유사한 환경에서 야외 실험을 수행하여 동작을 검증하였으며, 실내에 위치하는 단말기의 이동궤적과 위치오차를 확인하였다. 실험을 통하여 다수의 기지국과 단말기가 비가시선 환경에서 IR-UWB 통신을 수행하여도 단말기의 위치를 측정 및 추적할 수 있으며 IR-UWB가 실내 측위 시스템에 활용될 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Indoor positioning, Wireless Localization, IR-UWB, emergency rescue, ToA

ABSTRACT

In this paper, we implemented an indoor positioning system with IR-UWB technology to measure the exact location of personnel operating inside the building in the event of a building fire or counterterrorism situation. Unlike conventional methods used mainly in line-of-sight environments, this paper shows that IR-UWB technology can be utilized in non-line-of-sight environment by installing base stations outside the building and operating mobile units inside the building. We installed a RF amplifier and a high gain antenna in the base station and the mobile unit in order to allow that IR-UWB signals are transmitted indoors through the building's exterior and interior walls, and central station calculated the location of the mobile unit through signal processing. The implemented system was tested for operation by conducting outdoor experiments in an environment similar to the actual building, and identified the moving trajectory and position errors of the mobile unit. Through experiments, it was verified that we could estimate and track the location of the mobile unit even if multiple base stations and mobile units perform IR-UWB communication in non-line-of-sight environment and IR-UWB can be used for indoor positioning systems.

* 본 연구는 방위사업청과 방위산업기술지원센터(계약번호 UC160005D)의 연구비 지원에 의한 연구 결과임.

* First and Corresponding Author : LIGNex1 Co., Ltd., chulsoo.lee@lignex1.com, 정희원

* LIGNex1 Co., Ltd., {sunghun.jung, jaewook.lim, dongmin.seol, sangbum.lee}@lignex1.com, 정희원

논문번호 : 202102-036-D-RN, Received February 4, 2021; Revised March 10, 2021; Accepted March 15, 2021

1. 서 론

건물의 화재나 대테러 상황에서 소방관 또는 경찰관이 건물 내에서 작전을 수행하는 경우, 실내에서 이동하고 있는 사람들의 정확한 위치는 생명과 관련된 매우 중요한 정보로써 제공되어야 한다. 또한 건물 내부 인원의 위치 및 이동 경로는 건물 밖에 위치하는 지휘부가 보다 효과적인 명령과 지휘 체계를 수립하기 위해 반드시 필요한 요소이다.

실내에서 구조 요청자의 정확한 위치정보를 생성하기 위해 다양한 실내 측위 기술(또는 실내 위치 인식 기술)의 연구가 진행되고 있다. 스마트폰에서 기본적으로 제공하는 GNSS(Global Navigation Satellite System) 기술은 가장 쉽게 위치정보를 획득할 수 있으나 지상에 도달하는 신호의 강도가 -130dBm 이하로 매우 작아서 실내에서는 GNSS 신호를 거의 수신할 수 없다¹⁾.

이동통신망은 LTE(Long-Term Evolution) 기지국의 위치를 기반으로 단말의 위치를 추정하는 CID(Cell-ID) 기술과 기지국의 무선 신호 패턴을 활용한 RFPM(RF Pattern Matching), 기지국과 단말기 간의 거리 정보를 활용한 TDoA(Time Difference of Arrival) 등 다양한 측위 기술을 적용하고 있으며 50~100m의 위치 정확도를 제공한다²⁾. Wi-Fi 신호를 활용한 측위 기술의 경우, 기지국 기반 측위 기술에 비해 비교적 정확한 측위 성능(수십 m 수준)을 보인다. 하지만 Wi-Fi 인프라 환경에 따라 측위 정확도가 달라질 뿐만 아니라, Wi-Fi fingerprinting 데이터베이스가 없는 경우에는 측위 자체를 할 수 없는 단점이 존재한다³⁾.

UWB(Ultra-Wideband) 신호를 이용한 측위 기술은 위치를 정확하게 알고 있는 앵커(Anchor)와 자신의 위치를 모르는 단말(Tag) 간 UWB 신호를 송수신하는 과정을 통해 거리정보를 획득하고, 거리정보를 바탕으로 삼변측량법을 이용하여 단말의 위치를 찾는 기술이 연구되고 있다⁴⁾. 그 중 IR(Impulse Radio)-UWB 측위 기술은 1~2ns의 짧은 펄스를 전송함으로써 인해 거리 분해능이 뛰어나고, 실내에서 복잡하게 발생하는 다중 경로 환경에 강인하기 때문에 수십cm 수준의 정확한 위치정보를 제공할 수 있다. 게다가 건물의 벽과 내부 장애물들은 주파수에 따라 다른 전력 감쇄 특성을 보이기 때문에 500MHz 이상의 넓은 신호대역폭을 가지는 UWB 신호가 연속파(CW: Continuous Wave)에 비해 좋은 신호 전달 특성을 제공한다⁵⁾. 따라서 IR-UWB 기술은 Wi-Fi를 포함

한 다른 실내 측위 기술에 비해 건물의 화재나 대테러 작전을 수행하는데 가장 적합한 기술로 볼 수 있다. 다만 IR-UWB 신호를 이용하여 단말이 자신의 위치를 생성하기 위해서는 실내에 사전에 설치된 앵커가 있어야 하며, 다른 무선기기와의 주파수 충돌이 발생할 수 있기 때문에 IEEE 802.15.4a 표준에서는 UWB 신호 출력을 -41.3 dBm/MHz 이하로 제한하도록 규정하고 있다⁶⁾.

따라서 IR-UWB 기술을 긴급 구조에 활용하기 위해서는 그림 1과 같이 건물 외부에 앵커의 역할을 수행하는 다수의 기지국(BS: Base Station)을 설치하고, 신호 출력을 증가시켜 건물 안에 위치하는 단말기(MU: Mobile Unit)가 기지국 신호를 수신하여 위치 정보를 얻을 수 있도록 운영해야 한다. 대부분의 IR-UWB 실내 측위 기술은 30m 이내의 가시선(LOS: Line-Of-Sight) 환경에서 활용되고 있기 때문에, 긴급 구조 환경에 적용하기 위해서는 비가시선(NLOS: Non-Line-Of-Sight) 환경에서의 거리정보 변화에 대한 확인과 위치 정확도가 활용 가능한 수준인지에 대한 검증이 필요하다.

본 논문에서는 IR-UWB 측위 기술을 적용한 기지국과 단말기를 구현하고, 비가시선 환경에서 시험을 수행하여 화재나 대테러 상황에 대한 IR-UWB 측위 기술의 활용 가능성을 확인하였다. 구현된 실내 측위 시스템은 IR-UWB 신호가 건물의 외벽과 내벽을 통과하여 실내에 전달되기 위해 기지국과 단말기의 출력을 증가시켰다. 또한 벽과 실내에 존재하는 시설로 인해 무선 신호는 상당한 왜곡을 경험하게 되고, 이는 거리 정보와 위치 정보의 큰 오차를 발생시키기 때문에 거리 정보를 보상하기 위한 신호처리가 적용되었

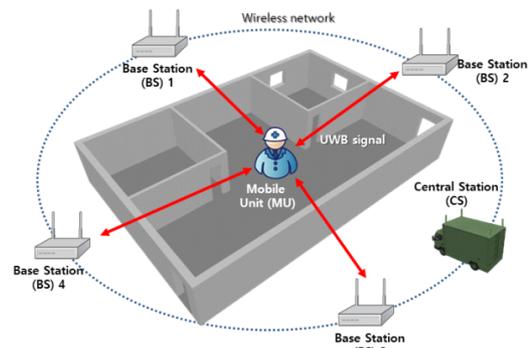


그림 1. 긴급구조를 위한 IR-UWB 실내 측위 측위 시스템 구성도
Fig. 1. Architecture of IR-UWB indoor positioning system for emergency rescue

다. 구현된 시스템은 실제 건물과 유사한 시험 시설에서 기능 및 성능이 검증되었으며, 기지국과 단말기가 IR-UWB 신호를 송수신하는 과정을 통해 거리 정보를 획득하고, 이를 중앙처리국(CS: Central Station)에서 취합하여 단말기의 정확한 위치를 도출할 수 있음을 확인하였다.

본문의 구성은 아래와 같다. 2장에서는 IR-UWB 기반의 실내 측위 시스템의 구성과 구현 내용에 대하여 설명하였으며, 3장에서는 구현된 기지국, 단말기, 중앙처리국을 이용하여 시험용 시설에서 시험을 수행하고 위치오차와 이동 궤적 등을 확인하였다. 4장에서는 결론을 맺고, 향후 연구 방향에 대해서 소개하였다

II. IR-UWB 기반 실내 측위 시스템

2.1 시스템 구성

긴급 구조를 위한 IR-UWB 기반의 실내 측위 시스템은 그림 1과 같이 기지국, 단말기, 중앙처리국으로 구성된다. 기지국은 건물 외부에서 GPS를 이용하여 자신의 위치를 확인하고, 단말기를 향해 IR-UWB 신호를 송출하는 장비이다. 단말기는 건물 내에서 기지국과 IR-UWB 신호를 송수신하는 과정을 통해 기지국과 단말기 간의 거리를 계산할 수 있다. 중앙처리국은 기지국과 단말기 간의 거리정보를 Wi-Fi 상용 네트워크를 통해서 수집하고, 거리정보를 활용하여 단말기의 위치를 도출하고 지도에 표현하는 장비이다.

2.2 기지국(BS) 설계 및 구현

기지국은 건물의 외부에서 자신의 정확한 위치를 기준으로 단말기와 IR-UWB 통신을 수행하는 장비이다. IR-UWB 신호를 이용한 기지국과 단말기 간의 거리는 무선신호의 왕복시간(RTT: Round-Trip Time)을 통해 이루어진다. 왕복시간은 기지국에서 무선신호를 전송하는 시점으로부터 단말기가 수신한 신호를 다시 송출하여 기지국에 도달하는 시점까지의 시간을 의미한다. 무선신호가 동일한 경로를 이동했다는 가정하에 기지국과 단말기 간 전파지연시간은 왕복시간의 절반으로 계산할 수 있다.

IR-UWB를 이용한 거리 추정 방식은 여러 가지 방법이 있으며, 본 논문에서는 그림 2와 같이 DS-TWR(Double Sided-Two Way Ranging) 방식을 이용하여 기지국과 단말기 간 거리를 측정하였다⁷⁾. 기지국이 레인지 요청(Ranging Request) 메시지를 단말기에 송신하면, 단말기는 내부 메시지 처리 시간 이후에 레인지 응답(Ranging Response) 메시지를 기지

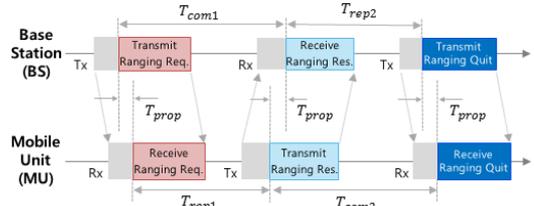


그림 2. Double-sided TWR 동작 절차
Fig. 2. Double-Sided TWR operation procedure

국에 전송하고, 기지국이 내부 메시지 처리 시간 이후에 레인지 종료(Ranging Quit) 메시지를 단말기에 전송함으로써 거리추정 절차가 완료된다. 이 과정을 통하여 도출되는 메시지 전송시간은 아래와 같이 산출된다⁷⁾.

$$T_{prop} = \frac{(T_{com1} \times T_{com2} - T_{rep1} \times T_{rep2})}{(T_{com1} + T_{com2} + T_{rep1} + T_{rep2})} \quad (1)$$

여기서 T_{prop} 은 기지국과 단말기 간의 메시지 전송 시간, T_{com1} , T_{com2} 는 기지국 또는 단말기가 메시지를 전송한 순간부터 다음 메시지를 수신할 때까지 걸린 시간, T_{rep1} , T_{rep2} 는 메시지를 수신한 순간부터 다음 메시지를 송신할 때까지 걸린 시간을 의미한다. 기지국과 단말기 간의 거리는 전송시간과 속도의 곱으로 도출할 수 있다. DS-TWR 방식의 거리 측정은 기지국 및 단말기 간 동기화가 이루어져 있지 않더라도 거리를 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 거리측정 과정에서 측정값에 포함되는 기지국과 단말기의 Clock offset, Clock drift 오차를 제거 할 수 있기 때문에 많이 활용되는 기술 중 하나이다.

그림 3은 기지국의 형상과 세부 구성을 보여준다. 기지국은 건물의 외부에 설치되며, 기지국에서 송신하는 IR-UWB 신호는 건물의 외벽과, 내벽을 통과하여 단말기에 전달되어야 하기 때문에 UWB 표준 보다 높은 신호 출력으로 신호를 송출하여야 한다. 신호의 증폭을 위해서는 RF 증폭 회로와 높은 이득을 가지는 안테나가 적용되어야 한다.

구현된 기지국은 자신의 위치 정보를 얻기 위해 GPS(Global Positioning System) 안테나를 위쪽에 설치하였으며, 가운데에는 BS 송수신기(BS Transceiver)를 장착하였다. BS 송수신기 내부의 UWB 송수신기(UWB Transceiver)는 Decawave사의 DW1000을 적용하였으며 벽 투과 손실과 5G 서비스 주파수 대역을 고려하여 3.7~4.3GHz의 주파수

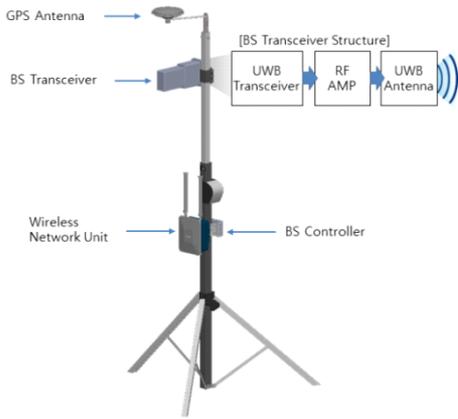


그림 3. 기지국(BS) 구성도
Fig. 3. Base Station(BS) Structure

(UWB Channel 2)를 사용하였다⁷⁾. UWB 송수신기는 표준 출력인 -41.3dBm/MHz (신호 대역폭: 500MHz)의 전력을 송출하기 때문에, 출력신호가 건물의 외벽과 내벽 및 자유공간(Free Space)을 통과하여 단말기에 전달될 수 없다. 이를 보완하기 위해 UWB 송수신기는 RF 전력증폭기를 적용하여 평균 20dBm 이상의 IR-UWB 신호를 송출할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 RF 신호가 $20\sim 30\text{cm}$ 의 콘크리트 및 벽돌로 구성된 벽을 투과할 수 있을 것으로 예상된다. 벽 투과를 위한 손실 및 전파지연 값은 자료 분석 및 시험을 통해 분석하였고 측정 결과 약 30dB 수준의 벽 투과 손실 및 약 1ns 수준의 전파지연을 확인 할 수 있었다⁸⁾.

UWB 안테나는 최대 6dBi 의 이득과 광대역 주파수 특성을 가지도록 그림 4와 같이 로그주기형(Log-Periodic type)의 안테나를 제작하여 적용하였다. 기지국에 장착된 Wireless Network Unit은 여러 대의

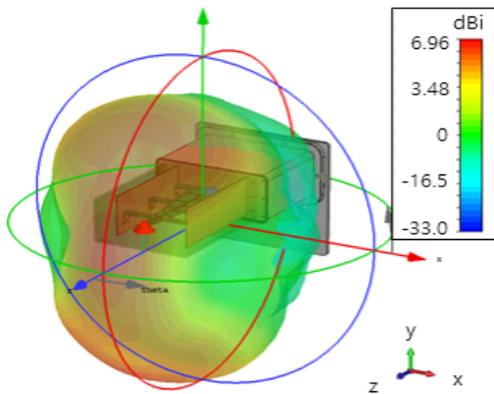


그림 4. 기지국(BS) 안테나 패턴
Fig. 4. Antenna pattern of Base Station(BS)

기지국과 중앙처리국간 무선 네트워크를 구성하기 위해 Wi-Fi 네트워크 장비를 적용하였다. BS 제어기(BS Controller)는 BS 송수신기를 포함하여 기지국에 장착된 각 구성품의 기능을 제어하기 위한 견고화 컴퓨터이며, GPS 수신기를 포함하고 있다.

2.3 단말기(MU) 설계 및 구현

단말기는 건물 내에서 움직이는 사용자가 휴대하는 장비이며 기지국과 그림 2의 과정을 통해 IR-UWB 신호를 송수신함으로써 기지국과 단말기 간의 거리를 계산한다.

단말기는 사용자의 휴대성을 고려하여 헬멧과 휴대용 전시기 형태로 구현하였다. 기지국과 단말기 간 UWB 통신을 수행하기 위해서는 사용자가 UWB 송수신기 및 안테나를 가지고 있어야 한다. 그러나 신호의 지연에 영향을 많이 받는 측위 기술의 특성 상 통신 경로에 사람의 몸을 포함한 장애물을 최소화해야 하기 때문에 UWB 송수신기와 안테나는 헬멧에 장착하고, 휴대용 전시기(Display Unit)에는 Bluetooth 무선 통신을 통해 중앙처리국에서 생성한 단말기의 위치 정보를 제공하여 화면으로 표시할 수 있도록 하였다.

그림 5는 단말기의 형상 및 세부 구성을 나타낸다. 헬멧의 위쪽에는 UWB 안테나와 블루투스 안테나를 일체형으로 적용하였다.

헬멧의 뒤쪽에는 UWB 송수신기, RF AMP (Amplifier), 배터리 등을 내장하였다. 배터리를 포함한 구성품의 추가 장착은 헬멧의 무게를 증가시키기 때문에 무게를 줄이기 위한 노력이 필요하며, 가장 큰 무게를 가지는 배터리 무게를 줄이기 위해서는 통신 장치의 저전력화가 중요하다. IR-UWB 방식은 약 2ms 의 임펄스를 전송하는 방식이기 때문에 임펄스를 전



그림 5. 단말기(MU) 구성도
Fig. 5. Mobile Unit Structure

송하는 주기(Pulse Repetition Rate)를 적절하게 조정하면 다른 통신 방식에 비해 저전력의 측위 시스템을 구현할 수 있으며, Bluetooth 무선 통신도 BLE(Bluetooth Low Energy)모드를 사용하여 저전력을 구현이 가능하다.

Bluetooth 무선통신장치는 UWB 통신을 통해 중앙처리국 및 기지국으로부터 수신한 메시지를 전시기(Display Unit)에 전달하는 역할을 수행한다.

안테나는 UWB와 Bluetooth 안테나를 통합하여 제작하였다. UWB 안테나는 $\lambda/4$ 길이를 갖는 Monopole 안테나 특성을 이용하여 반파장 Dipole 안테나보다 크기를 줄였으며 주변의 다른 부품으로부터 방사패턴 왜곡 방지 및 광대역 주파수 특성을 확보하기 위해 Elliptical Monopole 방식을 적용하였다. 구현된 UWB 안테나는 최대 약 4dBi의 이득을 제공한다. 그림 6은 단말기 UWB 안테나의 3D 빔 패턴과 수평 2D 빔 패턴을 보여준다. 또한, UWB 안테나는 기지국과 단말기 간의 거리측정 오차를 최소화하기 위해 방향별 군지연이 최소화 되도록 제작 하였다. 그림 7은 단말기 UWB 안테나의 군지연(Group Delay)을 시뮬레이션 분석한 결과이다. 주요 사용영역인 Elevation angle $80^\circ \sim 100^\circ$ 사이에서의 최대 군지연 차이는 0.36ns로 분석되었고, 이는 약 11cm 의 거리측정 오차를 발생시킬 것으로 예상된다.

전시기는 단말기의 위치를 사용자가 확인할 수 있

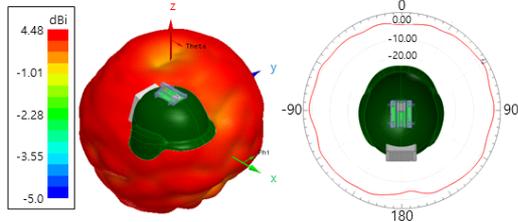


그림 6. 단말기(MU) 안테나 패턴
Fig. 6. Antenna pattern of Mobile Unit(MU)

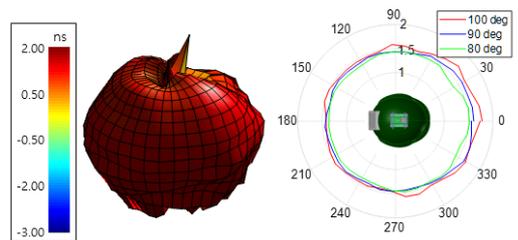


그림 7. 단말기(MU) 안테나 군지연
Fig. 7. Antenna Group Delay of Mobile Unit(MU)

도록 하기 위해 그림 5와 같이 지도 기반 형태로 구현하였다. 전시기는 Honeywell사의 Dolphin CT50 하드웨어를 기반으로 지도상에 사용자의 위치를 표시할 수 있도록 어플리케이션을 구현하였다. 여러 대의 사용자가 단말기를 가지고 이동하는 경우, 사용자는 단말기 화면을 통해 자신의 위치와 다른 사용자의 위치를 파악할 수 있다.

2.4 중앙처리국(CS) 설계 및 구현

중앙처리국은 기지국과 단말기 간의 거리정보를 수집하여 단말기의 위치를 계산하고, 단말기의 위치정보를 지도에 표시하는 장비이다. 또한 계산된 위치 정보를 UWB 통신을 통해서 단말기에 전달하여 사용자가 자신의 위치 및 다른 단말기의 위치를 확인할 수 있도록 하였다.

중앙처리국은 그림 8과 같이 전시기와 안테나 거치대로 구성된다. 전시기는 지도 위에 각 단말기의 위치를 표시하기 위한 컴퓨터이다. 전시기는 Wireless Network Unit을 통해서 각 기지국과 Wi-Fi로 연동되며, 기지국과 단말기 간의 거리 정보를 실시간으로 획득하게 된다.

중앙처리국이 단말기의 위치를 계산하는 방식은 TOA(Time of Arrival) 기반의 Gauss-Newton(GN) 측위 알고리즘을 이용하였다.

단말기의 추정하는 위치 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2 + (\hat{z} - z_i)^2 = \hat{d}_i^2 \quad (2)$$

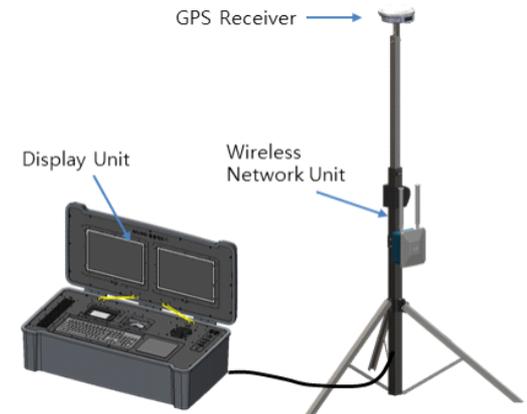


그림 8. 중앙처리국(CS) 구성도
Fig. 8. Central Station(CS) Structure

여기서 x_i, y_i, z_i 는 i 번째 기지국의 위치, \hat{d}_i 는 i 번째 기지국과 단말기 간의 측정된 거리이다. 기지국의 위치는 GPS를 통해서 확보하며, 기지국과 단말기 간의 거리는 UWB 통신을 통해서 얻을 수 있다. 3개 이상의 기지국이 존재하고 노이즈가 없는 경우 식 (2)은 최소자승법(Least Square Method)을 이용하여 단말기의 위치 해를 구할 수 있다. 하지만 기지국과 단말기 사이에 존재하는 무선채널 및 장애물의 영향으로 인해 측정된 \hat{d}_i 에는 실제 거리 d_i 와 AWGN(Additive White Gaussian Noise), 그리고 비가시선 환경으로 인해 발생하는 지연이 함께 존재한다. 각 기지국으로부터 도출된 식 (2)을 이용하여 단말기의 위치는 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$\hat{X} = \arg \min_x \sum_{i=1}^N r_i^2 = \arg \min_x \sum_{i=1}^N |d_i - \hat{d}_i|^2 \quad (3)$$

식 (3)을 통해서 단말기의 위치 x 는 손실함수인 r_i^2 을 최소로 하는 값을 구하는 것임을 알 수 있다. 비가시선 환경에서의 손실함수는 비선형성을 가지며, 이를 해결하기 위한 방법은 많은 논문을 통해서 연구가 되었기에 생략하도록 한다⁹⁾. 본 논문에서는 반복적 연산을 통해서 위치 오차를 줄여나가는 GN 알고리즘을 적용하였다¹⁰⁾. GN 알고리즘은 가시선 환경에서 사용하는 UWB 측위에 많이 적용되는 방식이다. 그러나 비가시선 환경에서는 각 기지국과 단말기 간의 경로(벽 두께, 벽 개수, 재질 등)에 따라서 지연의 변화가 더 크다. 이러한 거리정보의 지연 오차는 위치 해에 bias를 발생시키며, 건물의 가운데 에서는 각 기지국에 대하여 거리정보의 오차가 일정하기 때문에 위치 오차가 크게 발생하지 않지만, 건물의 가장자리 또는 구석에서는 각 기지국에 대한 거리 오차가 균일하지 않기 때문에 위치오차가 더 크게 발생할 수 있다. 이러한 경향을 보완하기 위해 반복적으로 GN 알고리즘을 수행하는 과정에서 도출된 위치 해를 기준으로 각 기지국과의 거리를 예측해 보고, 측정된 거리가 예측값보다 일정 수준이상 큰 경우는 bias로 추정하고 측정된 거리를 줄여나가는 방법을 적용하였다.

III. 실험 구성 및 결과

구현된 비가시선 환경에서의 실내 측위 시스템은 야외에 실제 건물과 유사한 구조물을 구축하여 그 성능을 검증하였다. 그림 9와 그림 10은 시험을 위해 구



그림 9. 시험 시설 및 BS 설치
Fig. 9. Test Facility and BS Installation

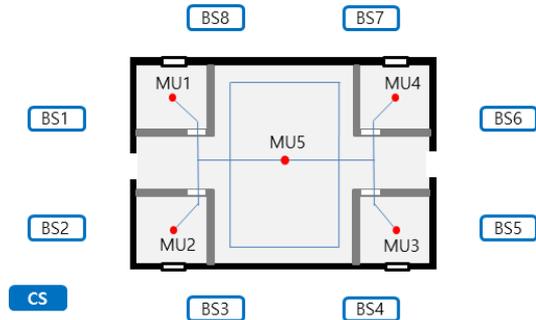


그림 10. 시험 환경 및 구성
Fig. 10. Test Environment and Organization

축한 구조물의 형상과 기지국, 단말기, 중앙처리국의 배치를 보여 준다. 구조물의 외벽은 그림 10의 검은색에 해당하는 부분으로써 콘크리트와 벽돌을 결합하여 약 20cm의 벽체를 구축하였다. 내벽은 그림의 회색으로 표시한 부분으로 두께 15cm의 콘크리트 블록으로 구성하였다. 구조물의 지지를 위해 내벽과 외벽 모두 약 50cm 간격으로 철근을 삽입하였다.

그림 10과 같이 구조물의 외부에는 총 8개의 기지국(BS)을 설치하였으며, 단말기를 내부(빨간색 점 위치) 5개 지점에 설치하고, UWB 측위를 수행하여 각 위치에서의 단말기 위치 정확도를 측정하였다. 단말기의 정확한 위치는 측지장비를 이용하여 확보하였다.

그림 11 및 표 1은 그림 10의 시험 환경에서 구조물 내부 5개 지점에 단말기를 고정시키고 측정된 위치오차 결과이다. 시험은 각 지점에서 100회 위치를 측정(Calculated MU Position)하고 실제위치(True Position)에 대한 위치오차의 평균(MAE: Mean

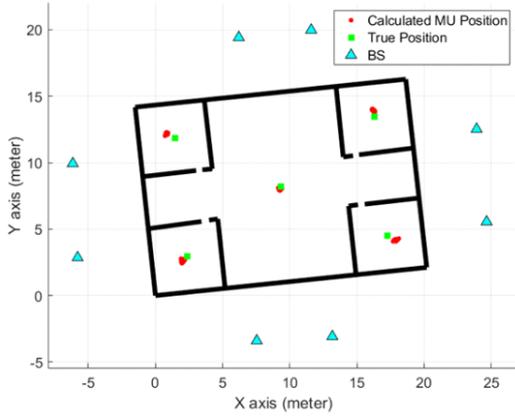


그림 11. 단말기 위치 오차 (정지상태)
Fig. 11. Position Error of Mobile Unit (Static)

표 1. 지점별 단말기 위치 오차 (MAE)
Table 1. Position Error of Mobile Unit for each location (MAE)

단말기 위치	위치 오차 (m)
MU1	0.67
MU2	0.49
MU3	0.67
MU4	0.50
MU5	0.13

Absolute Error)을 계산하여 표 1에 기록하였다. 단말기는 기지국과 UWB 통신을 수행하는 과정에서 각 기지국의 위치에 따라 다른 벽 투과 지연 특성을 경험하게 된다. 신호의 지연은 벽의 개수와 재질, 두께, 신호의 투과 각도에 따라 다르게 나타나며 이를 수학적으로 예측하기는 어렵다. 따라서 2장 4절에서 설명한 바와 같이 반복으로 위치 해를 도출하는 과정을 통해서 오차의 잔차(residual)를 최소화 하도록 유도하는 것이 바람직한 방법이다. 표 1은 5개소의 단말기 위치에 대하여 최대 67cm의 위치 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다.

단말기의 위치 정확도는 정지상태와 이동 시 특성이 다르게 나타날 수 있다. 그림 12는 단말기를 그림 10의 파란색 궤적을 따라 이동시켰을 때 단말기의 위치를 보여준다. 시험자가 이동하는 과정에서 직선을 정확하게 그리고 이동하지는 않았으며, 위치해의 오차로 인해서 정확하지는 않았지만, 단말기가 어느 정도 예상된 궤적을 따라서 이동하였으며 구현된 알고리즘이 단말기의 이동간에도 동작할 수 있음을 보여주었다.

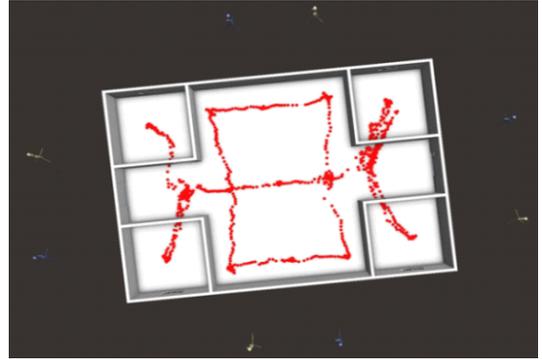


그림 12. 단말기 위치 오차 (이동 시)
Fig. 12. Position Error of Mobile Unit (Moving)

IV. 결론

본 논문에서는 건물의 화재나 대테러 상황 발생 시 건물 내에서 구조 및 작전을 수행하는 인원의 정확한 위치를 제공하기 위한 실내 측위 시스템의 구현 및 시험 결과에 대해 설명하였다. 특히 LOS 환경에서 주로 운용하는 기존의 IR-UWB 측위 방식이 아닌, 기지국을 건물의 외부에 배치하고 내부에 단말기를 운용하는 비가시선 환경에서도 반복적인 측위 알고리즘을 IR-UWB 기반의 실내 측위 기술에 적용하여 단말기의 위치를 도출할 수 있음을 확인하였다. 실험을 위해서 IR-UWB 신호를 송수신하는 기지국과 단말기를 구현하고, DS-TWR 방식을 이용하여 기지국과 단말기 간 거리를 측정하였다. 단말기는 사용자의 휴대성을 고려하여 헬멧 형태로 제작하였으며, 저전력의 장비를 운용할 수 있음을 확인하였다. 중앙처리국은 기지국과 단말기로부터 확보한 거리 정보를 기반으로 단말기의 위치를 실시간으로 계산하여 화면에 도시하였다.

본 논문은 실제 건물과 유사한 환경의 야외 실험을 통해서 비가시선 환경에서도 IR-UWB 신호를 이용하여 단말기의 위치를 추정할 수 있음을 확인하였으며, 단말기의 이동 패턴을 통해 긴급 상황에서의 실내 측위가 가능함을 확인하였다.

실내 측위 기술은 많은 관심과 연구를 통해 실용화 가능성이 보이지만 사용자의 이동 궤적에 따른 비가시선 환경의 극복과 다중경로 영향 등 해소해야 하는 분야가 아직 남아 있다. 본 연구를 통해 IR-UWB 기술이 비가시선 환경에 적용될 수 있으며, 향후 추가 연구를 통해서 긴급 상황 뿐 아니라 일상의 환경에 적용하기 위한 기술 개발에도 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] K. Ozsoy, A. Bozkurt, and I. Tekin, "Indoor positioning based on global positioning system signals," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 55, no. 5, pp. 1091-1097, Mar. 2013.
- [2] J. A. Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, "Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1G to 5G," *IEEE Commun. Surv. and Tuts.*, vol. 20, no. 2, pp. 1124-1148, Dec. 2017.
- [3] M. Yassin, E. Rachid, and R. Nasrall, "Performance comparison of positioning techniques in Wi-Fi networks," in *INNOVATIONS 2014*, Nov. 2014.
- [4] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies," *IEEE Commun. Surv. and Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, Apr. 2019.
- [5] S. Jung, D. Seol, C. Lee, S. Chung, and Y. Cho, "Loss and delay analysis of continuous wave through the wall," in *Proc. KIMST Fall Conf.*, pp. 649-650, Jul. 2017.
- [6] S. Susan S., K. A. Gupta, and S. S. Yellampalli, "Analysis of a transmitter system for IEEE 802.15.4a UWB standard," *ICIMIA 2020*, Bangalore, India, Mar. 2020.
- [7] Decawave, *DW1000 User Manual(2016)*, Retrieved Jan., 20, 2021, from <https://www.decawave.com/dw1000/usermanual>
- [8] William C. Stone, "Electromagnetic signal attenuation in construction," NIST Construction Automation Program Report, no. 3, Oct. 1997.
- [9] I. Guvenc and C.-C. Chong, "A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques," *IEEE Commun. Surv. and Tuts.*, vol. 11, no. 3, pp. 107-124, Aug. 2009.
- [10] S. Sand, A. Dammann, and C. Mensing, *Positioning in Wireless Communication Systems*, John Wiley & Sons Ltd., 2014.

이철수 (Chul-Soo Lee)



2000년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업
 2002년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
 2010년 8월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 박사
 2010년 9월~현재: LIG넥스원 수석연구원

<관심분야> 통신신호처리, 위성항법, 실내항법
 [ORCID:0000-0001-5551-0682]

임재욱 (Jaewook Lim)



2010년 2월 : 서울과학기술대학교 전자정보공학 졸업
 2012년 2월 : 광운대학교 임베디드소프트웨어공학 석사
 2014년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원

<관심분야> 항법시스템, 소프트웨어공학

[ORCID:0000-0001-6110-707X]

정성훈 (Sunghun Jung)



2009년 2월 : 명지대학교 전자공학과 졸업
 2012년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 석사
 2012년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원

<관심분야> Microwave Circuits, Antenna, Wireless Communication System

[ORCID:0000-0001-5243-9689]

설 등 민 (Dong-Min Seol)



2005년 2월 : 숭실대학교 정보
통신전자공학부 졸업
2011년 8월 : 과학기술연합대학
원대학교 광대역네트워크공
학과 박사
2011년 8월~현재 : LIG넥스원
수석연구원

<관심분야> 실내측위, 벽투과 레이더, 통신공학
[ORCID:0000-0002-1329-4875]

이 상 범 (Sangbeom Lee)



2012년 2월 : 단국대학교 전자
공학과 졸업
2014년 8월 : 고려대학교 임베디
드소프트웨어학 석사
2014년 3월~현재 : LIG넥스원
선임연구원
<관심분야> 통신공학, 임베디드
소프트웨어

[ORCID:0000-0003-3511-9530]