

도시철도 환경에서 UWB 기반 거리 정보 전송 시스템 설계 및 구현

한 종훈*, 한 민 호*, 김 진 수*, 고 영 배^o

Design and Implementation of a UWB-Based Distance Information Provisioning System for Urban Transit

Jonghun Han*, Min-Ho Han*, Jinsu Kim*, Young-Bae Ko^o

요 약

본 연구에서는 도시철도, 특히 지하 및 터널 환경과 같이 GPS 수신이 어려운 환경에서 UWB 기반으로 동작하는 거리 측정 시스템을 개발하였다. 본 시스템의 주요 목적은 UWB 통신의 안정성을 향상시켜, 열차와 주변 앵커 간의 거리를 실시간으로 중앙 서버로 전송하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여, SS-TWR 스케줄링 기법과 레인지 스케줄링을 도입하여 UWB 기반 거리 정보 전송 시스템의 안정성을 향상시켰다. 또한, 실제 도시철도 환경과 유사한 축소열차를 활용한 테스트베드를 구성하고, 실험을 통해 개발된 시스템의 높은 안정성을 입증하였다. 이 연구의 결과는 도시철도, 특히 지하 및 터널이 복합적으로 구성된 환경에서 열차 위치 기반 서비스의 활용 가능성을 확장하는 기반으로 활용될 수 있다.

키워드 : 도시철도, UWB, 열차, 거리 측정

Keywords : Urban Transit, UWB, Train, Ranging

ABSTRACT

This study presents a development of a UWB-based distance information provisioning system for use in challenging GPS-denied environments, such as metro or urban transit systems. The primary objective of this system is to enhance the reliability of UWB communication and transmit real-time distance values between trains and surrounding anchors to a central server. To achieve this goal, the system incorporates SS-TWR scheduling and ranging scheduling, significantly improving system stability. Experimental validation conducted in a scaled-down urban transit environment demonstrates the high reliability of the developed system. The results of this research are expected to expand the potential applications of train location-based services in the environments comprised of underground tunnels, providing a foundation for practical implementation.

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(철도 신산업 창출을 위한 핵심기술 개발, PK2404B2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

♦ First Author : Korea Railroad Research Institute, jghan@krii.re.kr, 정회원

° Corresponding Author : Ajou University Department of Software and Computer Engineering, youngko@ajou.ac.kr, 종신회원

* Ajou University Department of AI Convergence Network, vosej2414@ajou.ac.kr 학생회원; wlstmsp1@ajou.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202310-100-B-RU, Received October 12, 2023; Revised November 16, 2023; Accepted November 26, 2023

I. 서 론

도시철도는 세계 각지의 도시에서 필수적인 교통수단으로 자리 잡아왔다. 이렇게 대도시의 교통 혼잡 완화를 위해 구축된 도시철도 시스템에서 열차의 실시간 위치 파악은 승객의 안전, 운행 효율성 향상 및 운영의 최적화와 밀접한 관계를 지니고 있다.

도시철도의 안전한 운영을 위해서는 열차 간의 충돌을 방지하고 안전거리를 유지하는 것이 매우 중요하다. 특히, 열차의 실시간 위치를 정확하게 검지하지 못하여 발생한 몇몇 사고 사례로 인하여, 열차의 위치를 정확하게 획득할 필요성이 더욱 증가되고 있다¹⁾. 또한, 열차의 실시간 위치 정보는 열차의 도착 예정 시간을 정확하게 예측할 수 있게 만들어, 승객들에게 향상된 서비스 경험을 제공할 수 있다. 뿐만 아니라, 도시철도의 효율적인 운영을 고려했을 때, 정확한 열차의 현재 위치 정보는 열차당 수용량 혹은 소요 시간의 최적화, 열차 간격 조절 및 스케줄 관리에 중요한 역할을 한다. 특히, 교통 첨두시간대에서는 이러한 정보를 통한 운행 최적화가 매우 중요한 역할을 할 수 있다²⁾.

현재 널리 사용되고 있는 태그 기반 궤도 회로 시스템은 도시철도를 운행하는 열차의 위치 파악에 오랜 시간 동안 사용되어 왔다. 그러나 이 기술은 다음과 같은 한계점들을 가진다³⁾.

갱신 빈도 제한: 태그 간의 거리로 인해 위치 정보의 갱신 빈도가 제한된다.

태그 사이의 정확도 문제: 태그 사이의 구간에서 열차의 위치 파악이 불안정하며 정확도가 떨어진다.

설치 및 유지비용: 초기 설치 비용이 높고, 유지 보수 작업에 많은 인력 투입과 비용이 발생한다.

간섭과 잡음: 다른 전자 장치와의 간섭이나 지하 환경 특성상 발생하는 잡음으로 인해 성능 저하가 발생할 수 있다.

이와 대조적으로, UWB (Ultra-Wideband)를 기반으로 하는 TWR (Two Way Ranging)은 그 정밀도와 실시간 위치 파악 능력으로 최근에 주목받고 있다^{4,5)}. UWB는 넓은 주파수 대역을 저전력으로 활용하는 독자적인 특성으로 인하여, 다양한 장애물이나 간섭에도 불구하고 비교적 높은 정밀도로 위치를 측정할 수 있어, 안정적인 성능을 제공할 수 있다⁶⁾.

본 연구는 기존의 태그 기반 궤도 회로 시스템의 한계를 극복하기 위해 UWB 기술을 활용하여 그림 1과 같이 앵커와 태그 사이의 거리 정보를 실시간으로 서버에 전송하는 시스템을 구현하였다. 특히, UWB 기반

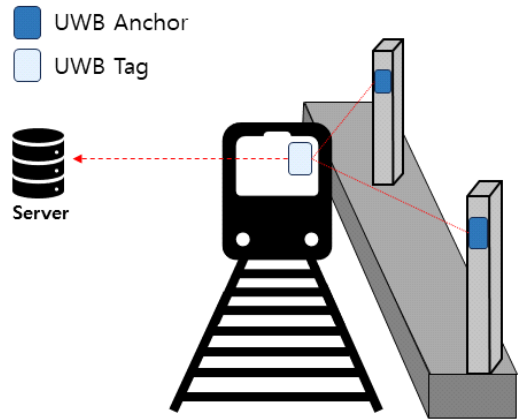


그림 1. 도시철도 환경에 거리 전송 서비스 구조도
Fig. 1. Schematic of the Distance Transmission Service Structure in an Urban Railway Environment

SS-TWR (Single-Sided Two-Way Ranging) 방식과 TDMA (Time-division multiple access) 기반 레인징 (Ranging) 스케줄링 기법을 통합하여, 앵커와 태그 간의 거리를 측정하고 이를 서버로 전송하는 시스템을 구축하였다. 또한, 구축된 시스템을 실제 도시철도와 유사한 환경의 축소 열차 테스트베드에 설치하고 검증하여 안정적으로 동작함을 확인하였다.

II. UWB 기술의 개요

2.1 UWB 기술의 정의

UWB 기술은 근거리 무선통신 기술에 비해 상당히 넓은 초광대역 주파수 대역을 활용하며, 시간 영역에서는 1~4 nsec 동안의 짧은 펄스(Pulse) 신호를 이용하는 무선기술이다⁷⁾. 미국 연방통신위원회 (FCC)는 UWB를 500 MHz 이상의 주파수 대역폭을 사용하는 무선통신 기술로 정의하고 있다. 이 기술은 1970년대 미국에서 군사용 레이더 및 원격 탐지용으로 초기 개발되었고, 2002년 FCC의 상업적 이용 승인 이후, 상용화를 위한 표준화 작업이 진행되었다⁸⁾. 이로 인해, 2007년 WPAN(Wireless Personal Area Networks) 표준화 단체인 IEEE 802.15 위원회에서 UWB 표준인 IEEE 802.15.4a가 처음 발표되었으며, 이어 2011년 IEEE 802.15.4 WPAN 표준문서로 통합되었다. 2020년 IEEE 802.15.4a 표준의 PHY enhancement가 포함된 새로운 UWB 표준이 발표되었다⁹⁾.

2.2 UWB 측위 기법 및 주요특성

UWB는 현대 무선 통신 분야에서 주목받는 기술로, 그 유연성과 높은 정밀도 때문에 다양한 애플리케이션

에서 거리 측정에 주로 활용되고 있다. 현재까지 널리 알려진 대표적인 무선 통신 기반 거리 측정 방법은 주로 RSSI(Received Signal Strength Indicator)와 ToF(Time of Flight) 방식이다⁹⁾.

RSSI 방식은 전송 단말의 송신 파워와 수신 단말에서 측정된 신호 세기 간의 관계를 이용하여 송신기와 수신기 사이의 거리를 추정하는 방식이다. 그러나 이 방식은 장애물이나 다른 신호와의 간섭과 같은 다양한 외부 요인에 크게 영향을 받을 수 있어, 결과적으로 비교적 큰 측위 오차가 발생할 수 있다⁹⁾.

ToF 방식은 신호의 발신과 수신 사이의 시간 차이를 이용하여 거리를 측정한다^{10,11)}. 이 방식은 다중 경로(Multipath) 현상과 다른 무선 잡음에 대해 상대적으로 강인한 특성을 가지며, 최대 30cm의 오차 범위 내에서의 정밀한 거리 측정이 가능하다^{6,12)}.

ToF 기반 UWB 측위는 크게 TWR과 OWR(One Way Ranging)로 분류된다. TWR는 양방향 통신을 통해 거리를 추정하는 방식인 반면 OWR는 여러 수신 단말들의 수신 시간차를 활용하여 거리를 추정한다. 하지만 OWR을 구현하기 위해서는 해당 수신 단말들의 시간 동기화는 물론, 이 정보들을 서버로 모으기 위한 통신망의 구축이 필요하기 때문에, 비용 측면에서의 부담이 크다¹³⁾. 따라서 본 연구는 이러한 문제점을 피하기 위해 TWR 방식을 택하였으며, 그중에서도 SS-TWR방식을 사용하여 UWB 기반의 측위를 수행하였다.

2.3 SS-TWR 방식

SS-TWR 방식은 UWB 기반의 위치 측정 방식 중 하나로 알려져 있다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 SS-TWR 방식의 메커니즘을 분석하고 이를 도시철도, 특히 GPS 사용이 어려운 지하 및 터널 환경에서의 거리 측정에 적용할 수 있는 방안에 대하여 검토하였다.

$$R = c \times \frac{T_{Rresp} - T_{Tpoll} - T_{reply}}{2} \quad (1)$$

기본적인 SS-TWR 방식에서 각 노드들이 수행하는 절차는 다음과 같다. 앵커(Anchor)는 태그(Tag)로 정보를 송신하고, 이 때의 타임스탬프를 기록한다. 태그는 해당 메시지를 수신한 후, 일정한 대기 시간을 갖고 앵커로 응답한다. 응답 메시지를 수신한 앵커 역시 타임스탬프를 기록한다. 이렇게 양방향 통신을 통해 두 단말 간의 실제 거리를 측정할 수 있다. 거리는 전파의 왕복 시간인 ToF의 절반을 계산하여 얻을 수 있다. 식 (1)에

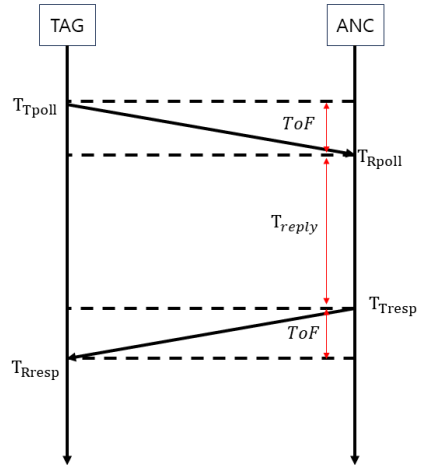


그림 2. SS-TWR 방식
Fig. 2. SS-TWR mechanism

서 c 는 빛의 속도를 나타내며, 이를 통해 거리를 추정한다⁷⁾.

III. UWB 기반 거리 정보 전송 시스템 구현

3.1 시스템 구조 및 구성 요소

본 연구에서 제안하는 UWB 기반 거리 정보 전송 시스템은 도시철도 환경을 대상으로 최적화된 설계를 통해 구현되었다. 이 시스템의 주요 구성 요소로는 태그, 앵커, 및 중앙 서버가 포함되어 있다.

태그: 열차 내부에 설치된 장치이며, 주변 앵커와의 거리 정보를 실시간으로 측정하여 위치 정보를 계산하기 위한 정보를 획득하는 장치이다. 설치물은 법적인 제약으로 열차 내부에 설치해야 하며¹⁴⁾, 설치 시 주변 물체들과의 간섭을 최소화할 수 있는 위치에 설치를 요한다. 따라서, 본 시스템에서는 열차의 이러한 조건을 만족할 수 있도록 열차의 전면부 유리에 태그를 부착하였다.

앵커: 터널 내에 선로를 따라 다수의 장치가 설치되며, 각각의 앵커는 특정 위치에 고정되어 설치되며, 각각 별도의 고유 주소를 가진다. 각 앵커들은 태그로부터의 거리를 측정하기 위한 UWB 신호의 송수신을 담당한다.

서버: 태그와 앵커로부터 수집된 거리 정보를 처리, 저장 및 관리한다. 이 정보는 지하철 운행 상황의 실시간 모니터링, 스케줄 최적화 및 안전 감시와 같은 다양한 용도로 활용될 수 있다. 서버는 또한 외부 시스템과의 통신과 연동을 담당하여 지하철 운행의 효율성 및 안전성 강화에 중추적인 역할을 한다. 본 연구에서는



그림 3. UWB 기반 레인지 시스템의 구성 요소들. (a) 위치 정보를 효과적으로 전송하기 위해 열차 내부에 설치된 TAG. (b) 선로 위에서 정차한 열차의 모습. (c) 선로로부터 3.5m 떨어진 위치에 설치된 앵커로, TAG로부터 신호를 수신하는 역할을 수행
 Fig. 3. Components of the UWB-based ranging system. (a) TAG installed inside the train to effectively transmit its location information. (b) Depiction of the train stationary on the tracks. (c) Anchor, installed 3.5m away from the track, which receives signals from the TAG.

서버가 태그와 무선으로 연결되어 정보를 수집하도록 구현하였다.

도시철도 환경에서의 시스템 응용은 다음과 같다. 태그는 그림 3과 같이 열차 전면부 유리에 설치되며, 앵커는 선로변에 50m 간격으로 총 6개가 설치된다. 앵커는 00부터 05까지의 주소를 가지며, 실험 진행 시 열차의 최대 속도는 18km/h로 설정되고, 가속한 후에 감속으로 총 300m를 주행한다. 태그는 앵커에게 실시간으로 신호를 송신하고, 앵커는 신호를 수신한 후 태그로 응답한다. 이 상호작용을 통해 거리 정보가 확립되며, 이를 기반으로 실시간으로 레인징을 수행할 수 있다.

고속열차는 최대 110km/h로 주행한다. 제안된 시스템의 SS-TWR은 그림 2에서 T_{reply} 를 240us로 설정했다. 이 경우 태그가 앵커에게 T_{Tpoll} 를 보낸 이후, 고속열차가 0.73cm 이동한 후에 T_{Rresp} 메시지를 보낸다. 고속열차가 움직이면서 발생하는 오차는 0.73cm의 절반인 약 0.37cm이다. 이는 실제 시스템에서 고려할 필요가 없는 정도의 작은 값이다.

3.2 앵커 및 태그 하드웨어 구성

제안하는 UWB 기반 거리 정보 전송 시스템의 핵심 구성 요소로 그림 4과 같이 앵커와 태그의 역할을 하는 별도의 하드웨어를 도입하였다. 앵커에는 Qorvo사의 DWM3001CDK 모듈이 사용되었다. 또한, 열차의

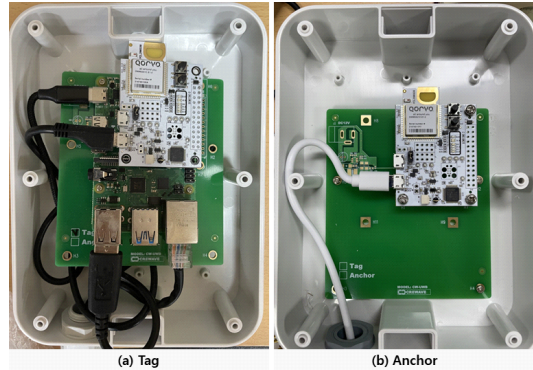


그림 4. UWB 기반 위치 추적 시스템의 핵심 구성요소. (a) 태그(Tag) 장비: Raspberry Pi 4와 DWM3001CDK를 결합하여 고정을 위한 기판과 함께 구성되어 있다. (b) 앵커(Anchor) 장비: DWM3001CDK 보드가 고정을 위한 기판과 결합되어 구성되어 있다.
 Fig. 4. Key components of the UWB-based location tracking system. (a) Tag Device: Comprised of a Raspberry Pi 4 and DWM3001CDK, combined with a board for stability and mounting. (b) Anchor Device: Configured with a DWM3001CDK board, paired with a mounting board for secure attachment.

다양하고 예측 불가능한 환경 변화를 대비하여 앵커 모듈은 별도로 제작된 견고한 플라스틱 함체 안에 안전하게 배치되어 보호된다.

반면, 태그는 DWM3001CDK 모듈과 라즈베리파이 4로 구성하여, 앵커와의 거리 정보를 실시간으로 측정하고 거리값을 서버로 전송하는 역할을 담당한다. 앵커는 태그로부터의 UWB 신호를 수신한 후, 응답 메시지를 반환하며, 태그는 이 정보를 중앙 서버로 실시간으로 전송한다. 이렇게 통합된 앵커와 태그의 상호 작용은 도시철도 환경에서의 UWB 기반 거리 측정을 가능하게 하며, 이렇게 측정된 열차의 실시간 위치는 별도의 컴퓨팅 파워를 가지는 서버를 거쳐 열차 운행 상황의 실시간 모니터링 및 각종 데이터 분석 기반의 서비스 최적화에 활용될 수 있다.

3.3 레인지 및 스케줄링

빠르게 이동하는 열차와 같은 객체의 거리를 정밀하게 측정해야 하는 시나리오에서 전송의 안정성은 전체 시스템의 위치 추정 성능에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 예를 들어, 도시철도의 급행열차는 최대 속도로 110km/h로 주행한다. 이 경우, 10Hz의 주기로 거리 측정을 진행할 때, 매 측정 주기마다 열차는 약 3.06m를 이동한다. 이러한 이동은 열차 제어 시스템에서 단 한번의 통신 실패만으로도 7.12m의 추정 오차를 유발할 수 있다. 따라서, 통신의 안정성 확보는 중요한 문제로 대두된다

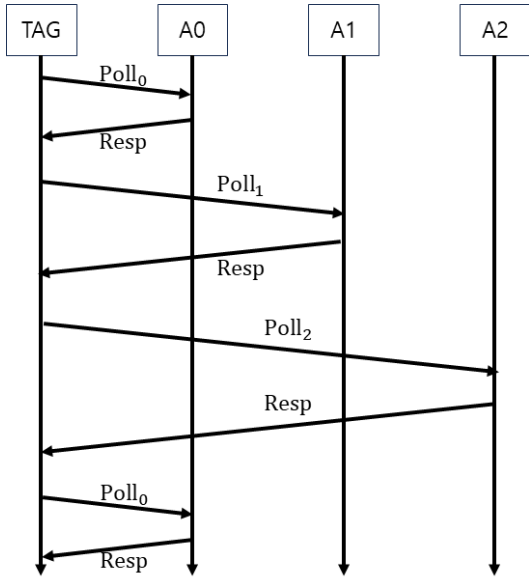


그림 5. 레인징 스케줄링: 태그의 Poll 메시지에 따라 0, 1, 2, 0 순서로 레인징이 수행되어 통신 충돌을 방지한다.
 Fig. 5. Ranging Scheduling : Ranging is performed in the order of 0, 1, 2, 0 based on the Tag's Poll messages to prevent communication collisions.

본 시스템은 위와 같은 이유로 태그가 각 앵커와 1대 1 레인징을 할 수 있도록 그림 5와 같이 레인징을 스케줄링하였다. 또한, DS-TWR와 SS-TWR의 두 가지 레인징 방식 중에서 상대적으로 적은 횟수의 송수신을 통해 어려움을 낮출 수 있는 SS-TWR을 선택하였다.

제안하는 스케줄링 기법에 따르면, 앵커는 각자 자신의 물리적 주소에 따라 0에서 (N-1)까지의 그룹에 할당된다. N은 그룹의 수이며, 앵커의 설치 간격에 따라, 하나의 태그의 레인징 거리 내에 동일한 그룹을 가지는 앵커가 존재하지 않도록 계산하여 설정한다. 각 앵커에 할당되는 그룹의 값은 앵커의 주소를 N으로 모듈로 연산한 결과로 결정된다. 태그와 앵커의 1대1 통신 환경을 보장하기 위하여 N은 태그의 통신범위에 들어간 최대 앵커의 수 이상이어야 한다.

레인징은 태그가 POLL 메시지를 주변 앵커들에게 전송하는 것으로 시작한다. POLL 메시지에 그룹 식별자가 포함되어있다. 태그가 전송한 POLL 메시지를 받은 앵커들은 그룹 식별자를 확인한 뒤 자신의 그룹과 같으면 RESP 메시지를 전송한다. 앵커와의 레인징이 완료된 후에 태그는 레인징 값을 서버로 전송하고, 다음 앵커와의 레인징을 위해 새로운 POLL 메시지를 전송한다.

IV. UWB 레인징 파라미터 최적화 및 테스트베드 결과 분석

4.1 UWB 레인징 파라미터 설정 및 결과 분석

본 연구는 도시철도 환경에서 UWB 레인징 데이터를 중앙 서버로 안정적으로 전송하는 시스템을 구축하는 것을 핵심 목표로 한다. 이를 위하여, UWB 통신의 안정성 확보를 위해서 4개의 파라미터의 조정이 이루어졌다. Qorvo에서 제공된 기본 설정 값과 "MAXIMISING RANGE IN DW1000 BASED SYSTEMS" 문서를 참조하여 이를 변경하였다^[5]. 조절 대상이 된 UWB 파라미터는 PLEN(Pulse Length), RX PAC(Preamble Acquisition Chunk), DATARATE(Data Rate), 및 SFD(Start Frame Delimite) 이며, 세부 설정은 표 1에서 확인할 수 있다. 실험은 2023년 10월 19일 오후 2시 아주대학교 운동장 (약 120m x 160m의 직사각형)에서 LOS(Line of Sight) 환경을 유지하면서 대각선을 가로질러 직선으로 이동하면서 진행되었다. 실험은 평균 15.4℃, 습도 90%로 구름이 많은 흐린 날씨에서 진행되었다. DWM3001CDK으로 UWB 레인징을 수행하여 각 파라미터에 따른 성능 차이를 표 2에서 확인할 수 있다. 실험을 통해 UWB 파라미터를 조정함으로써, UWB 레인징의 범위를 기존 163m에서 200m로, 약 40m의 성능 향상을 보였다. 실험장소의 한계로 인해 200m가 최대 측정 거리로 제한되었음을 고려할 때, 실제 성능 향상치는 더욱 클 것으로 예상된다.

표 1. UWB 레인징을 위한 파라미터 설정값: Qorvo에서 제공하는 기본 설정값과 최적화된 설정값의 비교
 Table 1. UWB Ranging Parameter Settings: A Comparison between Qorvo's Default and the Optimized Settings.

UWB Parameter	UWB Setting	
	Default	Optimized
PLEN	64 symbols	1024 symbols
RX PAC	8	32
DATARATE	6810 kpbs/s	850 kpbs/s
SFD	65	1027

4.2 테스트베드 구축 및 결과 분석

실제 도시철도 환경을 상정하여 축소 열차를 활용한 테스트베드 구성은 태그와 별도 제작한 앵커 장비로 구성되었으며, 그에 대한 상세한 구성은 그림 4에서 볼 수 있다. 앵커는 50m 간격으로 6개가 설치되어 있으며,

표 2. DWM3001CDK를 사용하여 진행된 UWB 레인지 실험 결과. 실험은 Default 및 Optimized 두 가지 UWB 파라미터 설정을 사용하였으며, 앵커와 태그 거리를 점차 증가하면서 측정했다. 각 거리에서의 UWB Ranging 평균 값, 분산 값, 및 통신 성공률이다. Table 2. UWB Ranging experiment results using the DWM3001CDK. The experiment utilized two UWB parameter settings: Default and Optimized, progressively increasing the distance between the anchor and tag during measurements. Presented are the UWB Ranging average value, variance, and communication success rate at each distance.

Distance (m)	Mean(m)		Variance		Success Rate of Communication(%)	
	Default	Optimized	Default	Optimized	Default	Optimized
100	99.79338	99.78189	0.0036	0.00142	99.59101	99.57291
110	109.87538	109.87538	0.00275	0.00275	99.61222	99.61222
120	119.84241	119.84669	0.00326	0.00277	99.50851	99.60335
163	163.73877	163.7125	0.00321	0.00251	99.228	99.60852
180	-	181.67223	-	0.00155	-	99.59726
200	-	200.15536	-	0.0035	-	99.2629

표 3. 열차 주행 환경 UWB 레인지 실험 결과. Transmitted Poll은 태그가 대상 앵커와 레인징을 성공한 시점부터 마지막 레인지 성공까지 보낸 Poll 메시지의 총 개수를 의미한다. Ranging Success는 성공적으로 거리 정보를 획득한 횟수이다. 반면, Ranging Fail은 Poll 및 Resp 메시지 종류별로 분류된 Ranging 단계에서의 통신 실패 횟수이다.

Table 3. Results of the UWB Ranging Experiment in a Train Operating Environment. 'Transmitted Poll' refers to the total number of Poll messages sent from the point where the tag successfully ranged with the target anchor to the last successful ranging. 'Ranging Success' denotes the number of instances where distance information was successfully acquired. Conversely, 'Ranging Fail' indicates the number of communication failures at the Ranging stage, classified by Poll and Resp message types.

Anchor	Transmitted Poll	Ranging Success	Ranging Fail		Success Rate(%)	Poll Fail Rate(%)	Resp Fail Rate(%)
			Poll Fail	Resp Fail			
00	186	156	27	3	0.838	0.145	0.016
01	218	203	15	0	0.931	0.07	0
02	323	230	92	1	0.712	0.285	0.003
03	463	336	126	1	0.726	0.272	0.002
04	407	305	99	3	0.749	0.243	0.007
05	686	489	197	0	0.713	0.287	0

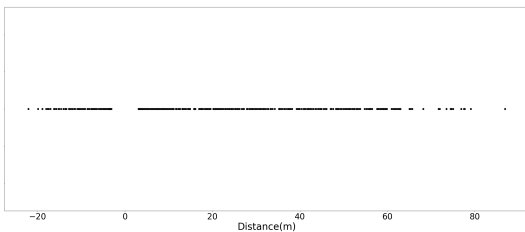


그림 6. 앵커4와 태그의 레인지 거리 분산그래프. 최대 레인지 거리와 인접한 거리에서 Ranging Fail이 자주 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6. Ranging plotting graph between anchor 4 and tag: Ranging Failures occur more frequently when ranging distance measurement is closer to maximum ranging distance.

태그는 축소 열차 내부에 설치되어 있다. 중앙 서버의 역할을 하는 장치는 노트북으로 구성하였고, 해당 노트북과의 통신은 LAN 연결로 구성하였다. 서버와 태그 사이의 데이터 전송은 UDP 프로토콜을 활용하였다.

테스트베드 내에서 정지 상태인 축소 열차에서의 위치 측정값은 다음과 같이 확인되었다. 앵커 1번과의 열차의 실제 거리는 33.5m이고, UWB 레인지 측정값의 평균은 33.83194m, 표준편차는 1.86473이다. 또한, 앵커 3번과의 실제 거리는 8.26m이며, UWB 레인지 측정값은 평균 8.35192m, 표준편차는 0.17827이다.

표 3은 테스트베드 내에 움직이는 열차에서의 레인지 성공률을 보인다. 실험결과 Poll Fail Rate이 최대 28.7%로 상당히 높게 측정되었다. 이는 태그의 설치 위치와 관련이 있을 것으로 예상된다. 태그가 축소 열차 내부 전면부 유리에 부착되어 있어, 신호가 유리창을 통과하여 전송되는 과정에서 신호 감쇄가 원인으로 판단된다. 특히 후면 앵커와의 통신에서는 열차 내부 구조물로 인해 신호 감쇄가 더욱 뚜렷하게 나타난다.

그림 6은 태그와 앵커 간의 거리 측정 정보이다. 그래프상 0m 부근이 비어 있는 이유는 앵커와 태그 간의 최소 설치 거리가 3.14m로 설정되어 있기 때문이다.

표 4. 앵커 4와 태그의 거리에 따른 레인징 성공률. 최대 레인징 성공 거리를 기준으로 레인징 범위를 10%씩 감소시키며 관측하였다.

Table 4. Ranging success rate according to the distance between anchor 4 and tag. It was observed by reducing by 10% based on the maximum ranging success distance.

Distance(%)	Transmitted Poll	Ranging Success	Ranging Fail		Success Rate(%)
			Poll Fail	Resp Fail	
100	407	305	99	3	74.9
90	357	302	53	2	84.6
80	314	289	24	1	92.0
70	276	272	4	0	98.5
60	240	239	1	0	99.6

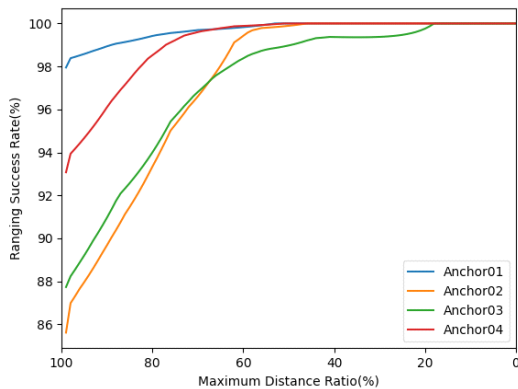


그림 7. 실내에 설치된 앵커와 태그의 최대 거리 비율에 따른 레인징 성공률. x축은 최대 레인징 성공 거리를 비율로 표현한 것이다. y축은 해당 레인징 거리 내에서 레인징 성공률을 의미한다.

Fig. 7. Ranging Success Rate Based on the Ratio of Maximum Ranging Distance for Anchors and Tags Installed Indoors. The x-axis represents the maximum ranging success distance expressed as a ratio. The y-axis denotes the ranging success rate within the respective ranging distance.

해당 그림에서 방향성에 따른 거리 측정값의 변동이 관찰되었으며, 이는 태그의 설치 방향에 의한 장애물 유무 차이에서 기인한다. 또한, 그래프에는 UWB 거리 측정 시 발생한 오차와 Ranging Fail로 인한 빈 공간이 관찰되었다. 빈 공간은 거리측정 최대값에 가까울수록 높은 빈도로 발생하며, 이는 신호감쇄와 주변 환경으로 인해 발생한 것으로 분석된다.

신호 감쇄로 인한 영향을 확인하기 위해 거리측정 최댓값을 기준으로 구간을 구분하여 레인징 성공률을 분석하고자 하였다. 표 4는 앵커4와 태그의 거리에 따른 레인징 성공률을 보여주며 최대 레인징 거리의 60% 지점에서 99%의 성공률을 보였다. 그림 7은 앵커4를 포함하여 실내에 설치된 앵커들과 태그의 거리에 따른 레인징 성공률을 보여주는 그래프이다. 표 4와 유사하

게 60% 지점을 기준으로 98% 이상의 레인징 성공률을 보였다. 해당 실험을 통해 안정성 있는 레인징을 제공하기 위하여 최대 레인징 거리를 고려하여 앵커를 설치해야함을 확인하였다.

본 연구를 통해 UWB 레인징 데이터가 노트북 서버로 안정적으로 전송되는 과정이 확인되었으며, 이로써 본 연구의 주요 목표는 성공적으로 달성되었다.

V. 결 론

본 연구에서는 GPS 수신에 불가능한 도시철도 환경에서 안정적으로 열차의 실시간 위치 정보를 획득하고 이를 서버로 안정적으로 전송할 수 있는 UWB 기반 거리 측정 시스템을 설계 및 구축하였다. 해당 시스템은 SS-TWR 방식을 사용하고, 통신 안정성을 고려하여 레인징 스케줄링 기법을 도입하였다.

또한, UWB 기반 거리 측정 시스템을 실제 도시철도 환경과 유사한 축소열차에 구현하고, 터널 환경의 실제 테스트베드에서 레인징 성능을 측정하여 제안하는 시스템이 안정적으로 동작할 수 있음을 확인하여 실용적 가능성을 입증하였다.

본 연구 결과를 통해, 도시철도 환경에서 UWB 기반 실시간 열차 위치 기반 서비스를 활용할 수 있는 가능성이 확대될 것으로 기대하며, 이러한 기술의 발전은 향후 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

References

[1] A. Ramzy, "Deadly crash adds to worries about china's high-speed trains," Jul. 10, 2011. [Online]. Available: <http://world.time.com/2011/07/24/deadly-crash-adds-to-worries-about>

- chinas-high-speed-trains/
- [2] C. Zhang, Y. Gao, L. Yang, Z. Gao, and J. Qi, "Joint optimization of train scheduling and maintenance planning in a railway network: A heuristic algorithm using Lagrangian relaxation," *Transport. Res. Part B: Methodological*, vol. 134, pp. 64-92, 2020. ISSN 0191-2615. (<https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.02.008>)
- [3] J. Otegui, A. Bahillo, I. Lopetegi, and L. E. Díez, "A survey of train positioning solutions," *IEEE Sensors J.*, vol. 17, no. 20, pp. 6788-6797, Oct. 2017. (<https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2747137>)
- [4] A. Bahr, A. Feldman, J. Colli-Vignarelli, S. Robert, C. Dehollain, and A. Martinoli, "Modeling and bench-marking ultra-wideband localization for mobile robots," in *2012 IEEE ICUBW*, pp. 443-447, Syracuse, NY, Sep. 2012.
- [5] A. R. Jiménez and F. Seco, "Comparing decawave and bespoon UWB location systems: Indoor/outdoor performance analysis," in *Proc. 2006 Int. Conf. IPIN*, pp. 1-8, Alcalá de Henares, Oct. 2016.
- [6] S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, et al., "Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 70-84, 2005.
- [7] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks, *Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband(UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques* - IEEE Std. 802.15.4z-2020.
- [8] G. Breed, "A summary of FCC rules for ultra wideband communications," *High Frequency Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 42-44, 2005.
- [9] B.-J. Jang, "Principles and trends of UWB positioning technology," *JKIEES*, 2022. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2022.33.1.1>)
- [10] Federal Communications Commission, "Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems," *ET Docket*, pp. 98-153, May 2002.
- [11] C. Chong, F. Watanabe, and H. Inamura, "Potential of UWB technology for the next generation wireless communications," in *2006 IEEE Ninth Int. Symp. Spread Spectrum Techniques and Applications*, pp. 422-429, Manaus, Aug. 2006.
- [12] Decawave, "*APS014 Application Note Antenna Delay Calibration of DW1000-BASED Products and Systems*," Retrieved Oct. 03, 2023. (<https://www.qorvo.com/products/p/DWM3001C#documents>)
- [13] Y. Jiang and V. C. M. Leung, "An asymmetric double sided two-way ranging for crystal offset," *IEEE 2007 Int. Symp. Signals, Syst. and Electr.*, pp. 525-528, 2007.
- [13] J. Pan, *Medical Applications of Ultra-Wideband (UWB)*, Available online, Retrieved Oct. 03, 2023. (<https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/uwb/>)
- [14] Urban Railway Design Division of the Metropolitan Rail Administration, *Urban Railway Regulations Compendium(2023)*, Retrieved Oct., 3, 2023, from <https://news.seoul.go.kr/citybuild/archives/521910>
- [15] *Maximising Range In DW1000 Based Systems*, 2015, Retrieved Oct. 03, 2023. (<https://www.qorvo.com/products/p/DWM3001CDK#documents>)

한 중 훈 (Jonghun Han)



2010년 2월: 서울대학교 전기
공학부 학사
2012년 2월: 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 석사
2017년 8월: 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 박사
2017년 11월~2022년 10월: 삼

성전자 시스템 LSI 사업부 책임연구원
2022년 11월~현재: 한국철도기술연구원 선임연구원
<관심분야> IEEE 802.11 (WLAN), 5G 사설망, 열
차 측위

김 진 수 (Jinsu Kim)



2022년 2월: 아주대학교 소프
트웨어학과 졸업
2022년 3월~현재: 아주대학교
AI융합네트워크학과 석사과
정
<관심분야> UWB, 컴퓨터 네
트워크, 실내 측위

한 민 호 (Min-Ho Han)



2019년 8월: 아주대학교 산업
공학과 졸업
2022년 8월: 아주대학교 AI융
합네트워크학과 석사
2023년 3월~현재: 아주대학교
AI융합네트워크학과 박사과
정

<관심분야> UWB, AR/VR, Energy conservation

고 영 배 (Young-Bae Ko)



1991년 2월: 아주대학교 컴퓨
터공학 학사
1995년 2월: 아주대학교 경영
정보학(MIS) 석사
2000년 7월: Texas A&M
University(College Station)
컴퓨터공학 박사

2000년 8월~2002년 8월: 미국 IBM T.J Watson 연
구소 전임연구원
2002년 9월~2011년: 아주대학교 정보통신대학 정보
컴퓨터공학부 조/부교수
2012년~현재: 아주대학교 정보통신대학 소프트웨어
학과 정교수
<관심분야> 신뢰 보장 네트워크, 전술 네트워크, 이
동 애드혹 네트워크, 사물인터넷(IoT)