

# 가우시안 프로세스 회귀를 활용한 동적 객체의 UWB 기반 위치 측위 시스템

한민호, 고영배\*

아주대학교

vosej2414@ajou.ac.kr, \*youngko@ajou.ac.kr

## UWB Based Positioning with Gaussian Process Regression for Dynamic Object

Han Min Ho, Ko Yung Bae\*

Ajou Univ.

### 요약

본 논문은 도시 지하 교통 시스템에서의 이동 환경에서 정확한 위치 추정을 위해 가우시안 프로세스 회귀(Gaussian Process Regression, GPR)를 활용한 측위 알고리즘을 제안한다. 기존의 초광대역(Ultra-Wideband, UWB) 기술의 TWR(Two-Way Ranging)에서 발생하는 고속 이동 취약성 문제로 인한 오차를 극복하기 위해 본 연구는 GPR을 도입하였다. GPR은 데이터의 비선형성을 고려하여 더 정확한 위치 추정이 가능하며, 이를 통해 도시 지하 이동 시스템의 안정성과 효율성을 향상시킬 수 있다. 실험 결과는 GPR 기반 알고리즘이 기존 알고리즘에 비해 더 부드럽고 일관된 경로를 제시하는 것을 확인하였으며, 이 연구의 결과는 도시 지하 교통 시스템에서의 고속 이동 환경에서 교통 상황 모니터링 및 관리 서비스의 활용 가능성을 높이는 데 기여할 수 있다.

### I. 서론

도시 교통 시스템은 현대 사회의 핵심 인프라로서, 경제 활동의 원활한 진행과 주민 생활의 편의를 위해 필수적이다. 고속도로와 도시 철도 시스템은 대도시의 교통 혼잡을 완화하고, 이동 시간을 단축하며, 교통 안전성을 향상시키기 위해 지속적으로 개선되고 있다. 그러나 급격한 도시화와 인구 증가로 인해 지상 교통 시스템의 한계가 드러나면서, 지하 교통 시스템으로의 전환이 혁신적인 대안으로 주목받고 있다. 이러한 지하 교통 시스템은 공간 활용의 효율성을 높일 수 있지만, 지하 터널에서는 위성항법 시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS) 신호가 차단되어 정확한 위치 측정이 어려운 문제가 있다.

최근 5년간 터널 내 교통 사고 발생률은 40% 이상 증가했으며, 이로 인한 사망률도 48% 이상 증가하였다. 이는 지하 이동 시스템의 안전성과 효율성을 저하시키는 주요 요인으로 작용하고 있다[1]. 따라서 지하 교통 시스템의 성공적인 운영을 위해서는 정확하고 신속한 위치 측정 기술이 필수적이다. 이를 위해 정밀한 위치 정보 제공이 가능한 교통 상황 모니터링 및 관리 기술의 개발이 요구된다.

이와 관련하여, 초광대역(Ultra-Wideband, UWB) 기술은 높은 정밀도의 위치 측정 능력으로 지하 환경에서의 위치 추정에 특히 효과적이다. 현재 고속 이동 목표물의 위치 측정에는 도착 시간 차이(Time Difference of Arrival, TDOA) 방식이 주로 사용되나, 이 방식은 높은 설치 비용과 유지보수 비용이 필요하다. 반면, 비행 시간(Time of Flight, TOF)을 기반으로 하는 양방향 거리 측정(TWR) 기술은 설치가 간편하고 시간 동기화가 필요 없다는 장점이 있지만, 이동성 측면에서는 취약점을 가지고 있다. TWR 기술의 1:1 통신 구조는 다수의 앵커로부터의 거리 측정 데이터를 종합하여 위치를 추정할 때 각 앵커별로 측정된 목표 위치의 차이로 인해 110km/h이동 시 약 13.47m의 오차가 발생할 수 있다[2].

관련 연구로, UWB 기술의 정밀한 위치 측정 능력은 지하 환경에서 매우 유효하지만, 이동 중 발생하는 위치 측정 오류를 줄이는 것이 중요한 과제



앵커	x축(m)	z축(m)	y축(m)
0	0.000	1.611	0.000
1	-3.150	0.688	3.600
2	-9.000	0.758	8.100
3	-2.700	1.630	17.550
4	6.750	1.087	13.500
5	6.750	0.886	4.950
6	0.450	5.737	13.050

그림1. 실험 환경 앵커 위치 및 설치 위치

이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 [3] 논문에서는 퍼지 가우시안 프로세스 회귀(F-GPR)와 주성분 분석(PCA)을 활용하여 데이터의 차원을 축소하고, NLOS 오류를 완화하는 방법을 제안하였다. 이 접근법은 신호의 비선형 특성을 효과적으로 처리하고, NLOS 환경에서 발생하는 위치 측정 오류를 줄이는 데 중점을 둔다. 그러나, 복잡한 모델링과 높은 계산 자원이 필요하다는 한계가 있다.

본 논문에서는 TWR 기반의 UWB 위치 측정 시스템에서 발생할 수 있는 이동성 취약성 문제를 극복하기 위해 가우시안 프로세스 회귀 기반 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 단일 앵커로부터 수신된 시간 데이터를 이용하여 다른 앵커와의 거리 값을 보정함으로써 보다 정확한 위치 추정을 가능하게 한다. 본 연구를 통해 UWB 기반 위치 측위 시스템의 성능을 향상시키고, 도시 지하 이동 시스템의 안정성과 효율성을 증대시키고자 한다.

### II. 이동 강건성을 고려한 측위 알고리즘

본 논문에서는 도시 지하 이동 시스템에서 고정밀 위치 측정을 위한 가우시안 프로세스 회귀 기반의 측위 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 UWB 기술을 활용하며, 앵커로부터 수집한 거리 데이터를 이용한다. UWB로 측정된 앵커와 태그 사이의 거리 값은 아래 수식으로 표현이 가능하다.

$$d = \begin{cases} d_{act} + e_M & \text{for LOS} \\ d_{act} + e_M + e_B & \text{for NLOS} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $d_{act}$ 는 앵커와 태그 사이에 실제 거리값이며,  $e_M$ 은 가우시안 노이즈(Gaussian noise)를 따르며, 이는  $e_M \sim N(0, \sigma_m^2)$  이라 같이 표현이 가능하다.  $e_B$ 는 랜덤하게 지수 분포를 따르는 변수이다[4].

본 알고리즘은 각 앵커로부터 태그에 수집된 거리 데이터를 대상으로 이비가시 통신 경로 (Non-Line-of-Sight, NLOS) 데이터 검증을 수행한다. 이 과정에서는 이동평균선을 기준으로 데이터가 얼마나 벗어나는지를 판단하여 NLOS 환경을 판별한다. NLOS로 판단된 데이터는 평균값으로 보정된다. 이러한 보정을 하는 이유는 GPR은 가우시안 노이즈에 대한 보정에는 유리하지만, NLOS로 발생하는 오차는 랜덤하게 지수 분포를 따르기 때문에 이에 대한 보정 능력이 제한적이다. 따라서 데이터의 사전 보정이 필요하다[4]. 최종적으로 보정된 거리 데이터로 GPR 모델을 학습시킨다. GPR 모델은 데이터의 비선형성을 효과적으로 처리하며, 예측의 불확실성을 정량화할 수 있는 장점이 있다.

학습된 GPR 모델 기반으로 위치가 추정되는 방법은 다음과 같다. Anchor 0번에서 거리 데이터가 들어오면, 그 순간에 앵커 1~6번과 타겟 사이의 거리 값을 예측한다. 예측값과 실측값을 기반으로 최소자승법 (Least Squares Method, LSM)을 사용하여 타겟의 위치를 추정한다. 이를 통해, 본 연구는 UWB 기반 측위 시스템의 성능을 향상시키고, 도시 지하 이동 시스템의 안정성과 효율성을 증대시키는 것을 목표로 한다.

### III. 테스트베드 구축 및 결과 분석

본 논문의 실험은 아주대학교 팔달관 1층에서 진행되었다. 실험 환경은 그림1과 같이 구성되었으며, 사용된 장비는 Qorvo사의 DWM3001CDK이다. UWB 통신 파라미터는 "MAXIMISING RANGE IN DW1000 BASED SYSTEMS" 문서를 참조하여 조정되었다[6]. 7개의 앵커는 팔달관의 1층과 2층에 설치되었다. 태그 장비는 DWM3001CDK와 스마트폰이 연결된 형태로 구성되었으며, 스마트폰은 수집된 거리 데이터를 저장하는 역할을 담당하였다.

통신 방식은 본 태그가 각 앵커와 순차적으로 TWR을 할 수 있도록 스케줄링하였다. 또한, DS-TWR(Double Side-TWR)와 SS-TWR(Single Side-TWR)의 두 가지 레인지 방식 중에서 상대적으로 적은 횟수의 송수신을 통해 에너지를 낮출 수 있는 SS-TWR을 선택하였다. SS-TWR으로 하나의 블록은 0번부터 6번 앵커까지 총 측정 시간은 약 0.016초가 걸린다. 태그와 통신하는 구조로 되어 있으며, 특정 앵커와 UWB Ranging이 실패하면 다음 앵커와 통신으로 넘어간다.

시험결과 <그림2>를 보면 기본 측위 알고리즘에 비해 더 GPR이 부드럽고 일관된 경로를 따라가고 있음을 알 수 있다. 이는 GPR이 데이터의 비선형성을 효과적으로 처리하여 실시간 위치 추적 성능을 크게 향상시켰음을 시사한다. 기본 알고리즘에서 나타난 파란색 점들은 특정 구간에서 불규칙하게 분포하거나 예상 경로에서 벗어난 위치에 나타나고 있다. 이는 기본 알고리즘이 NLOS 환경이나 기타 외부 요인으로 인한 오차를 충분히 보정하지 못했음을 나타낸다. 반면, GPR을 사용한 결과는 이러한 가우시안 노이즈를 효과적으로 보정하여 더 일관된 위치 추정을 제공하고 있다.

이러한 결과는 도시 지하 이동 시스템과 같은 복잡한 환경에서 위치 측정의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있음을 시사한다. 이는 GPR 기반의 측위 알고리즘이 고속 환경에서 TWR 기반 위치 측정의 문제를 효과적으로 해결하여, 시스템의 안정성과 효율성을 높일 뿐만 아니라, 유지보수 및 운영의 비용 효율성을 증대시킬 수 있음을 보여준다. 따라서, GPR은 도시 지하 이동 시스템을 비롯한 다양한 응용 분야에서 매우 유용하게 활용될 수 있다.

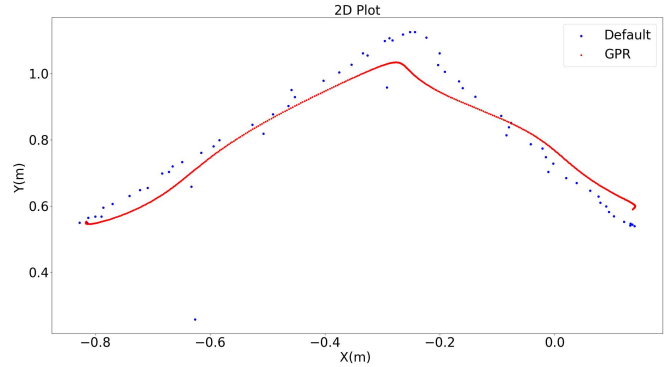


그림 2. 제안된 가우시안 프로세스 회귀 기반 알고리즘과 기본 레인지 값을 비교한 위치 추정 결과 점 그래프

### IV. 결론

본 논문은 도시 지하 이동 시스템의 고속 이동 환경에서 고정밀 위치 측정을 위해 가우시안 프로세스 회귀 기반의 측위 알고리즘을 제안하였다. 도시 교통 시스템은 현대 사회의 핵심 인프라로서, 효율적인 운영을 위해 정확하고 신속한 위치 측정 기술이 필수적이다. 특히, 고속 환경에서 TWR 기반 위치 측정의 문제를 해결하기 위해 본 연구는 초광대역 기술을 활용한 GPR 기반의 측위 알고리즘을 제시하였다.

결론적으로, GPR 기반의 측위 알고리즘은 기본 알고리즘에 비해 위치 측정의 실시간 성능을 크게 향상시켰으며, 이는 도시 지하 이동 시스템의 안정성과 효율성을 증대시키는 데 기여할 것으로 기대된다. 본 연구의 결과는 GPR이 초광대역 기술 기반 위치 측정 분야에서 매우 유용하게 활용될 수 있음을 시사하며, 특히 지하 환경에서의 고속으로 움직이는 타겟의 위치 측정 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있다. 이는 시스템의 유지보수 및 운영 비용 효율성 증대에도 긍정적인 영향을 미칠 것이다. 앞으로의 연구에서는 제안된 알고리즘을 다양한 환경에서 테스트하고, 실시간 응용에 최적화하는 방안에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

### ACKNOWLEDGMENT

Put sponsor acknowledgments.

### 참고 문헌

- [1] 도로교통공단(2022), "터널 내 교통사고 5년간 40% 이상 증가" Retrieved from [https://www.koroad.or.kr/kp\\_web/krPrView.do?board\\_code=GABBS\\_050&board\\_num=135900](https://www.koroad.or.kr/kp_web/krPrView.do?board_code=GABBS_050&board_num=135900)
- [2] 한종훈, 한민호, 김진수 and 고영배. (2024). 도시철도 환경에서 UWB 기반 거리 정보 전송 시스템 설계 및 구현. 한국통신학회논문지, 49(3), 444-452.
- [3] B Song, SL Li, M Tan, W Zhong "An adaptive approach for ultra-wide band positioning in complex environment"
- [4] D. -H. Kim, A. Farhad and J. -Y. Pyun, "UWB Positioning System Based on LSTM Classification With Mitigated NLOS Effects," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 2, pp. 1822-1835, 15 Jan.15, 2023
- [5] Song, Bo et al. "An Adaptive Approach for Ultra-Wideband Positioning in Complex Environment." Instrumentation Measure Métrologie (2019): n. pag.
- [6] MAXIMISING RANGE IN DW1000 BASED SYSTEMS, 2015 ,Retrieved Oct., 03, 2023, <https://www.qorvo.com/products/p/DWM3001CDK#documents>