

SPRD적용 UWB 기반 실시간 측위 알고리즘 개발 및 성능 검증

2025 KNS 추계학술대회 워크숍

2025.10.29

고려대학교 김황남

목차



1. 고려대학교(4연구) 연구 목표
2. 연구내용 및 결과
3. 향후 계획

고려대학교(4연구) 연구 목표

1) PDR 측위 안정성 향상을 위한 추가 인프라 활용방안 검토 및 선정 (UWB)

- ① 상대적 저렴한 센서 가격 및 1~3m 이내의 높은 실내 측위 정확도 달성 가능
- ② 최소한의 센서 배치로 비교적 신속한 설치 및 유연한 확장성 확보 가능

2) UWB 기반 측위 기술 개발

- ① 3D-BIM 데이터 분석을 통한 원전 작업장 내 UWB Anchor 위치 결정
- ② UWB 센서 간 Ranging 및 UWB Tag 노드의 Positioning 알고리즘 설계

3) 각 요소 측위 기술의 SPRD용 임베디드 소프트웨어 개발

- ① 1단계 개발 기술(PDR)과 상기 개발 기술(UWB) 각각에 대한 SPRD 플랫폼 적합성 검토
- ② 각 측위 기술에 대한 SPRD용 임베디드 소프트웨어 설계 및 개발
- ③ UWB 기반의 고정확도 측위 시스템 기술개발

① 딥러닝 기반 PDR 기술개발

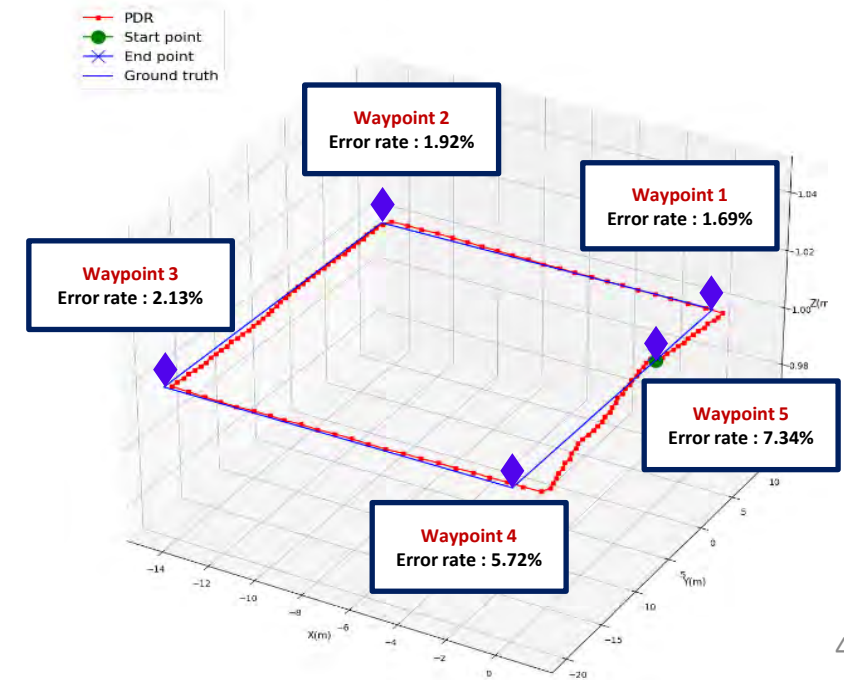
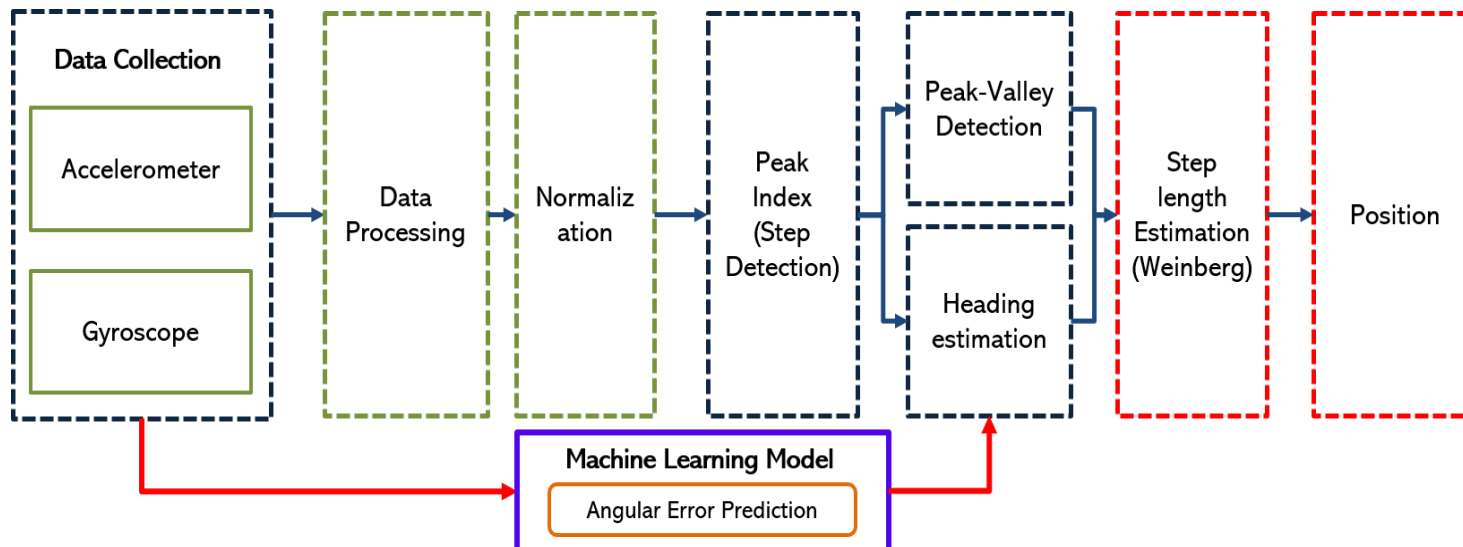
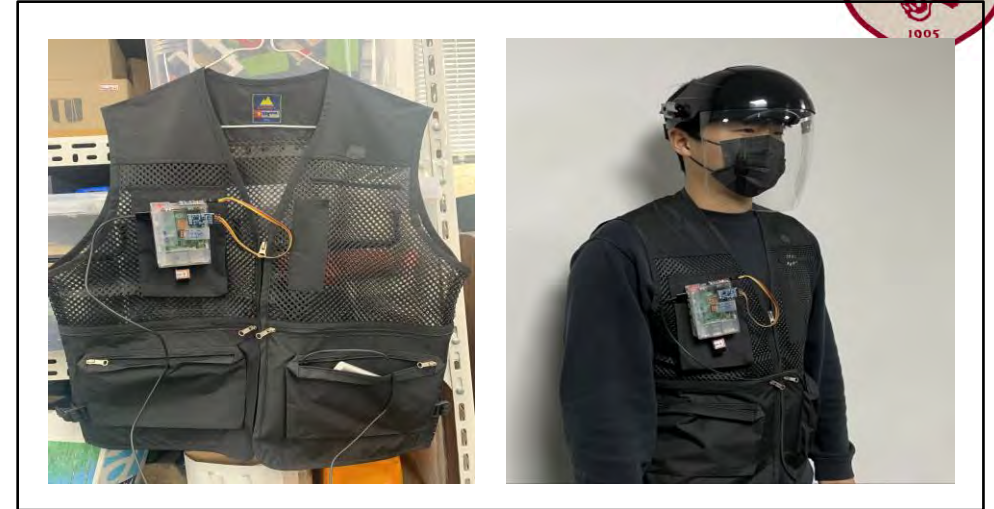
② 데이터 융합 (BIM 데이터, UWB, 최소 통신 인프라) 위치보정 알고리즘 개발

연구내용 및 결과 1.

IMU 센서를 활용한 기계학습 기반 보행자 측위 알고리즘 개발

딥러닝 기반 PDR 기술개발

- ❑ PDR 성능 개선을 위한 기계학습 알고리즘 개발
 - 기계학습 기반 PDR 알고리즘의 개발
 - MLP (Multi-Layer Perceptron) 기반 심층학습 모델 개발
 - Restricted Boltzmann Machine (RBM) 구조 심층학습 모델 개발
 - 원자력 발전소 작업자 환경을 고려하여 Chest-mount 측위 성능 검증
 - 정량 목표인 PDR 위치 추정 정확도 10% 이내 달성 완료



① 딥러닝 기반 PDR 기술개발

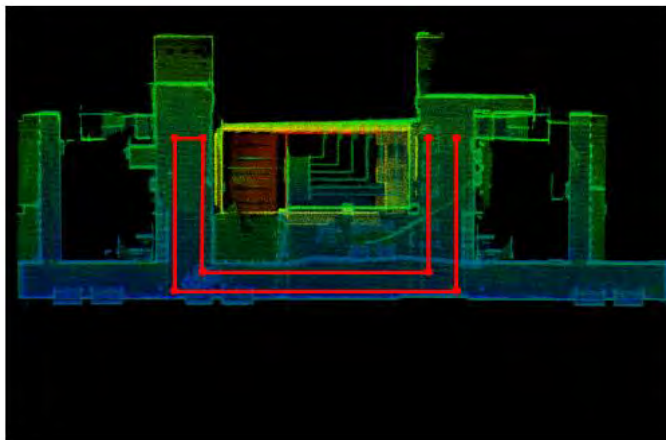
② 데이터 융합 (BIM 데이터, UWB/최소 통신 인프라) 위치보정 알고리즘 개발

연구내용 및 결과 1.

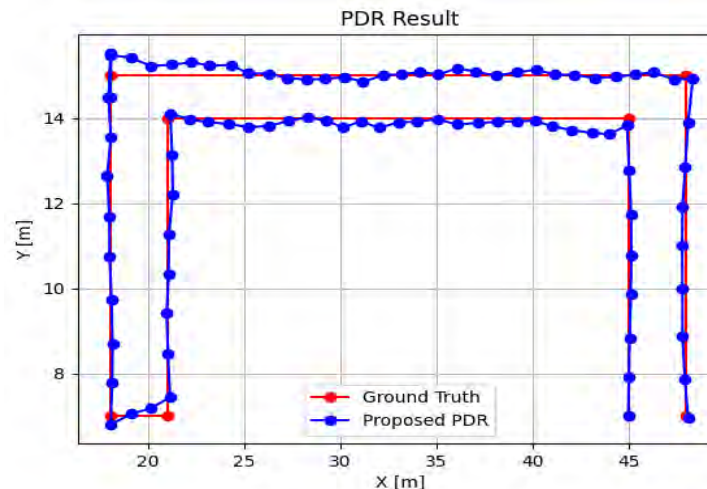
IMU 센서를 활용한 기계학습 기반 보행자 측위 알고리즘 개발

융합 보정 알고리즘 기술개발

- 기술 통합 융합 작업자 위치보정 기술 개발
 - 3D-BIM 데이터를 이용한 작업자 위치보정 기술 개발
 - 클라우드 포인트 데이터 기반 BIM 이미지 데이터 생성
 - BIM 데이터에 기반한 객체 검출 및 비정상 궤도 판정 및 보정 알고리즘 개발
 - 애드 혹 인프라 및 최소 통신 인프라에 기반한 작업자 위치보정 기술 개발
 - UWB 기반 작업자 상호 거리를 활용한 PDR 누적 오류 보정
- 실증을 통한 개발 기술 성능 검증
 - 고려대학교 신공학관 지하 1층 환경에서 테스트 수행
 - 2차년도 연구목표 개발 측위 시스템 **오차율 7% 이내 달성 완료**
 - **신고리 원자력 발전소 측위 테스트 (24.03.05~24.03.08)**를 통한 1~2차년도 개발 측위 시스템 성능 검증 완료



제안 PDR 알고리즘 실험 경로 계획



기술 통합 융합 작업자 위치보정 PDR 알고리즘 수행 결과 그래프

Waypoint	Proposed PDR
Waypoint1	4.5600%
Waypoint2	0.7394%
Waypoint3	3.8770%
Waypoint4	6.9559%
Waypoint5	5.4608%
Waypoint6	2.4237%
Waypoint7	1.9037%

Metric	Proposed PDR
Average	3.7029%
Maximum	6.9559%
Minimum	0.7394%

현장 실험 내용



□ 신고리 원자력 발전소 측위 테스트 (24.03.05~24.03.08)

■ 원자력 발전소 보조건물 테스트

- Wi-Fi RSSI (Received Signal Strength Indicator) 측정 테스트
- LOS 환경 기반 UWB Ranging 테스트
- NLOS 환경 기반 UWB Ranging 테스트

■ 원자력 발전소 원자로 건물 테스트

- 개발 PDR 기술 현장 적용 테스트
- UWB 기반 거리 추정 알고리즘 테스트

```
sangmin@sangmin-desktop:~/Desktop$ ./monitor_rssi.sh
2024 -03 -04 23:51:15 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.24 meters
2024 -03 -04 23:51:16 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.24 meters
2024 -03 -04 23:51:17 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.24 meters
2024 -03 -04 23:51:19 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.24 meters
2024 -03 -04 23:51:20 Signal strength: -29 dBm, Estimated distance: 2.02 meters
^Csangmin@sangmin-desktop:~/Desktop$ nano monitor_rssi.sh
sangmin@sangmin-desktop:~/Desktop$ ./monitor_rssi.sh
2024 -03 -04 23:51:33 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.20 meters
2024 -03 -04 23:51:34 Signal strength: -32 dBm, Estimated distance: 4.04 meters
2024 -03 -04 23:51:35 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.20 meters
2024 -03 -04 23:51:37 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.20 meters
2024 -03 -04 23:51:38 Signal strength: -30 dBm, Estimated distance: 2.54 meters
2024 -03 -04 23:51:39 Signal strength: -29 dBm, Estimated distance: 2.01 meters
2024 -03 -04 23:51:40 Signal strength: -29 dBm, Estimated distance: 2.01 meters
2024 -03 -04 23:51:41 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.20 meters
2024 -03 -04 23:51:42 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.20 meters
2024 -03 -04 23:51:43 Signal strength: -30 dBm, Estimated distance: 2.54 meters
2024 -03 -04 23:51:44 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.20 meters
2024 -03 -04 23:51:45 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.20 meters
2024 -03 -04 23:51:46 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.20 meters
2024 -03 -04 23:51:47 Signal strength: -30 dBm, Estimated distance: 2.54 meters
^Csangmin@sangmin-desktop:~/Desktop$ nano monitor_rssi.sh
sangmin@sangmin-desktop:~/Desktop$ ./monitor_rssi.sh
2024 -03 -04 23:52:03 Signal strength: -30 dBm, Estimated distance: 2.51 meters
2024 -03 -04 23:52:04 Signal strength: -30 dBm, Estimated distance: 2.51 meters
2024 -03 -04 23:52:05 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.17 meters
2024 -03 -04 23:52:06 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.17 meters
2024 -03 -04 23:52:07 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.17 meters
2024 -03 -04 23:52:08 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.17 meters
2024 -03 -04 23:52:09 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.17 meters
2024 -03 -04 23:52:10 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.17 meters
2024 -03 -04 23:52:11 Signal strength: -31 dBm, Estimated distance: 3.17 meters
sangmin@sangmin-desktop:~/Desktop$
```

RSSI 기반 거리 측정

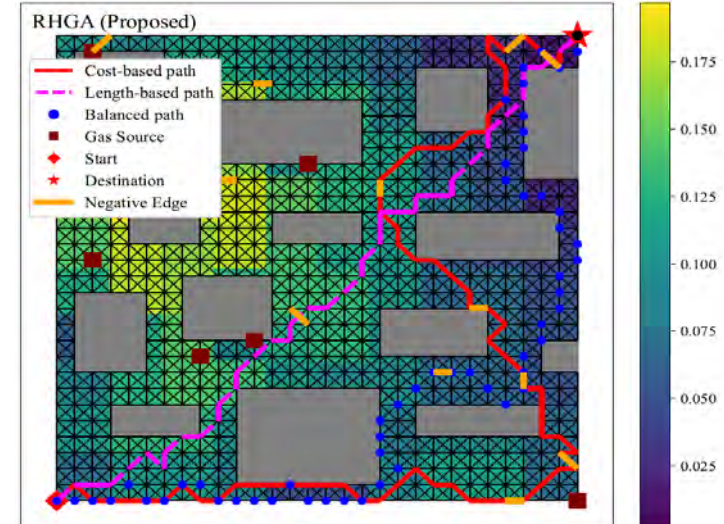
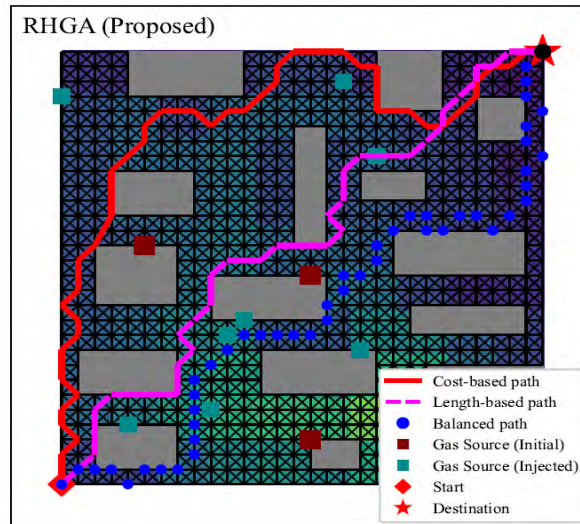
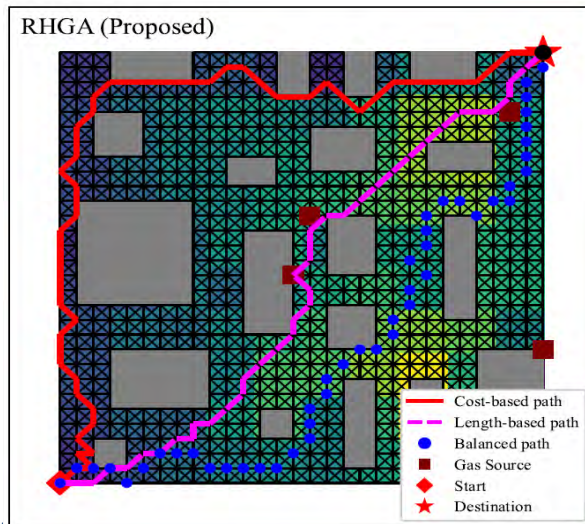
- ① 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 기반 거시경로 계획 – 작업자 탈출
- ② 강화학습(Reinforcement Learning, RL) 기반 거시경로 계획 – 작업자 투입

연구내용 및 결과 2.

디바이스 기반 거시적 경로계획 기술 개발

유전알고리즘 기반 거시경로 계획 - 작업자 탈출

- 작업자 탈출 경로 계획: 탈출구가 정해진 상황에서 동적 선량 환경을 고려하여, 기계학습 또는 Evolutionary 알고리즘의 일종인 **유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 활용**
 - 다양한 솔루션 제공: 하나의 최적 경로뿐 아니라 우회·대체 경로 등 다수의 후보 경로를 동시에 제시함으로써 상황별 유연한 대응이 가능하도록 유전 알고리즘(GA)를 적용
 - 사고 초기 단계에서 관제소 서버가 즉각적으로 전체 탈출 경로 정보를 획득하여, 작업장 내 작업자에게 최적 경로를 전송하는 것이 가능함
- 도출 경로에 대한 적합도 점수 (fitness score) 부여
 - 전체 경로 길이와 누적 가스 농도를 고려
- 우수 개체 선별을 위한 최적 알고리즘 선정 (토너먼트 선택 기법 / 다양성 강화 교차 기법 등)
- 다수의 선원향을 고려하여 다수 source를 활용
- 사용자 목적에 부합하는 다수의 경로 도출을 통해 사고 상황에서 우회 기동을 가능케 함



다수의 유전알고리즘 기반 탈출 거시경로
(1회 시행 시 blue, magenta, red 3개 경로 도출)

- ① 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 기반 거시경로 계획 – 작업자 탈출
- ② 강화학습(Reinforcement Learning, RL) 기반 거시경로 계획 – 작업자 투입

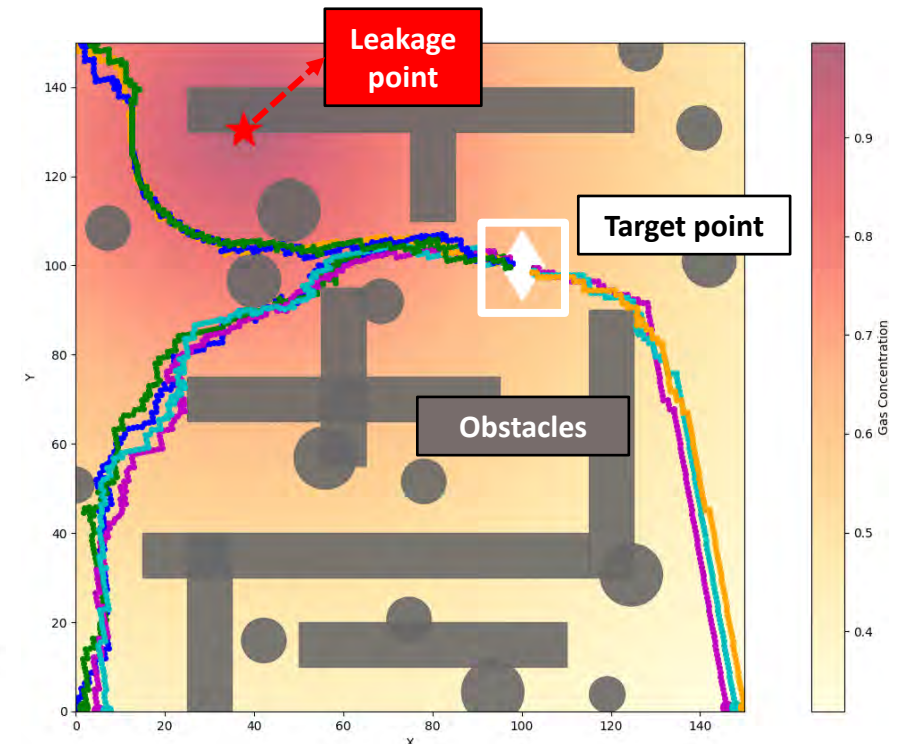
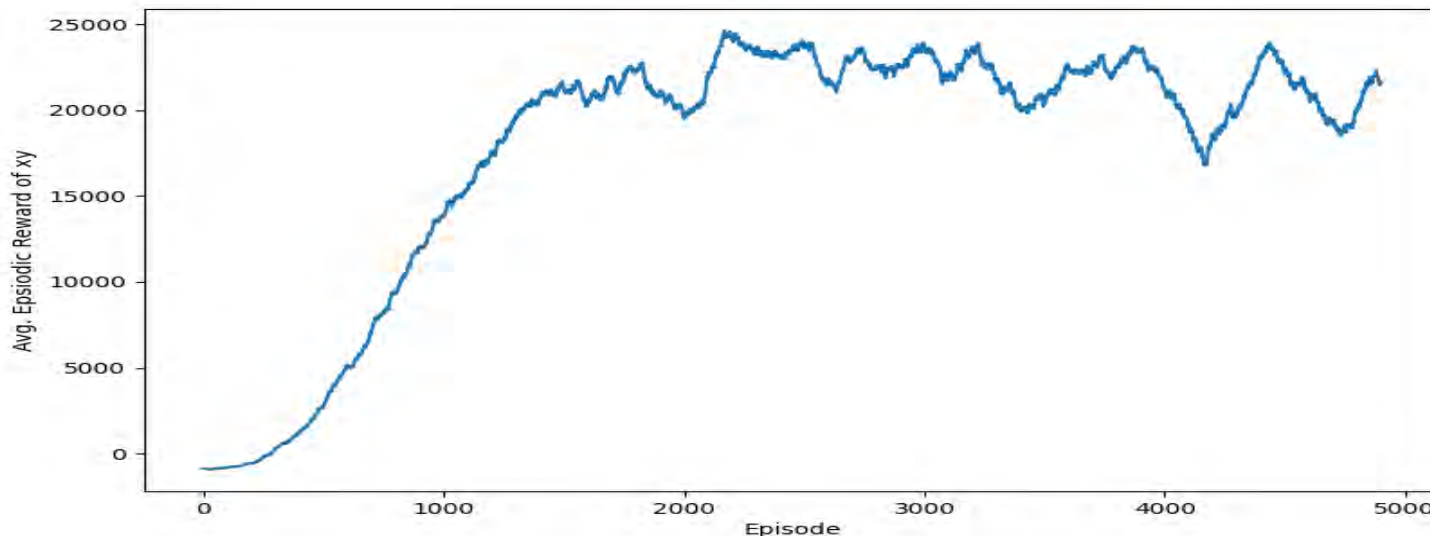
연구내용 및 결과 2.

디바이스 기반 거시적 경로계획 기술 개발

강화학습 기반 거시경로 계획 - 작업자 투입

□ 모델 학습 결과 - 세부 세팅 및 검증 결과

- 작업조 투입 경로 계획: 작업자 위치에서의 수집 정보만으로 타겟 지점으로 접근할 수 있도록 **강화학습(Reinforcement Learning, RL)**을 활용
 - 사고 발생 이후 관제소와의 통신이 두절되어 작업자가 획득할 수 있는 정보가 제한된 상황에서 SPRD 센서 관측 정보만으로 최적 투입 경로를 실시간으로 탐색할 수 있도록 강화학습을 적용
 - 작업자 10명 투입 시나리오를 산정 (출입구 3개를 통해 각각 4, 3, 3명의 작업자 투입)
 - 맵 내 특정 타겟 작업 지점을 향해 모든 작업자가 이동
- 맵 내에 누출 선원이 존재하여 해당 지점으로부터 방사선이 확산된다고 가정
- 복잡한 구조 반영을 위해 다양한 크기의 다수 장애물을 배치
- 이동 시 장애물 및 작업자 간의 충돌을 방지하고 선원을 회피하며 타겟 지점 도달을 목표
 - Reward function 구성
 - ❖ Positive feedback: 목표 지점에 가까워질수록 높은 보상
 - ❖ Negative feedback: 방사선량 증가 / 장애물 충돌 / 작업자 간 충돌 / 정지 액션 패널티



① UWB 기반 높은 정확도의 작업자 측위 기술개발

② 요소 측위 기술에 대한 SPRD용 임베디드 소프트웨어 개발

연구내용 및 결과 3.

고정밀 측위를 위한 PDR 안정성 강화 및 UWB 인프라 기반 SPRD 임베디드 소프트웨어 개발

UWB 기반 높은 정확도의 작업자 측위기술 개발 - Ranging

□ UWB 센서 간 Ranging 알고리즘 설계

■ 소형 UWB 모듈을 위한 PCB 제작

- Qorvo 사의 DWM1000 모듈 활용

■ Time of Flight (ToF) 기반 거리 추정 알고리즘 설계

- Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR) 기법을 활용한 ToF 추정
- 3회 메시지 교환 기반의 양방향 통신을 활용하여 클럭 오프셋 및 응답 시간에 대해 견고한(Robust) 동작을 보장

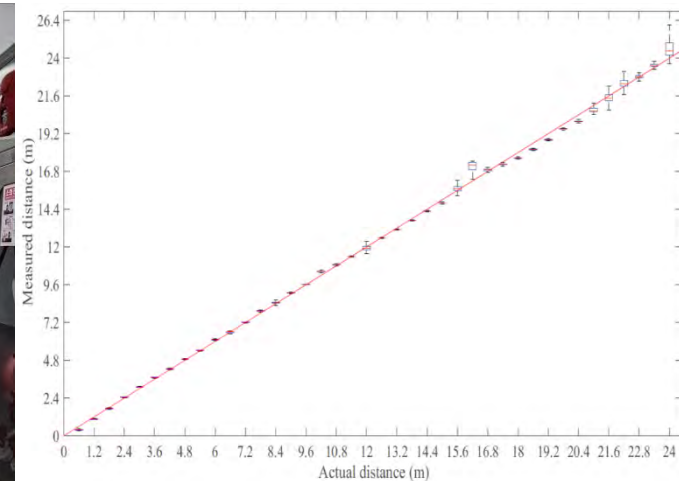
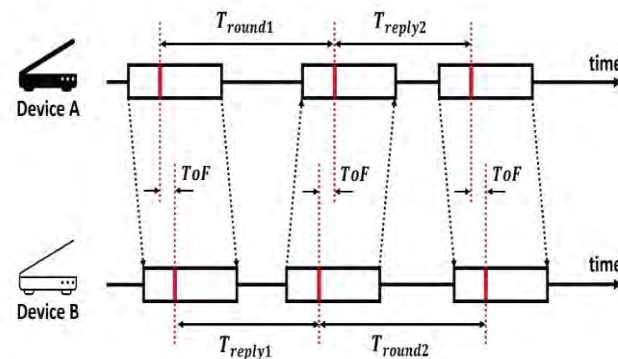
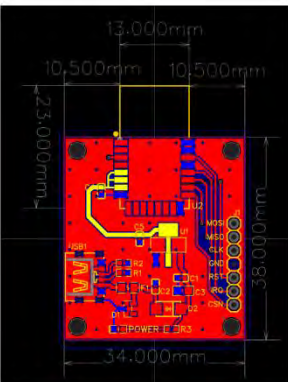
■ 40개의 distance case에 대한 Ranging 알고리즘 성능 검증

- 평균 오차 7.3cm로 안정적인 거리 측정 정확도 검증

$$t_{ToF} = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}}$$

$$d = \alpha * t_{ToF} + \beta$$

DS-TWR 기반 ToF 추정



DWM1000 기반 시각화 거버파일(좌)
및 실물 구현 UWB PCB 모듈(우)

3개 메시지를 활용하는 DS-TWR 통신 구조 모식도

Ranging 실증 실험 결과

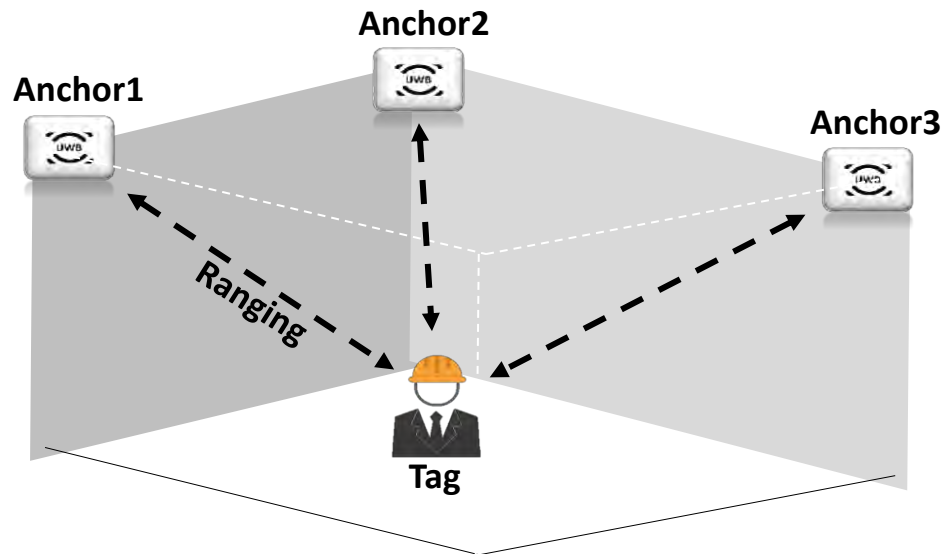
UWB 기반 높은 정확도의 작업자 측위기술 개발 - Positioning

□ UWB Tag 노드의 Positioning 알고리즘 설계

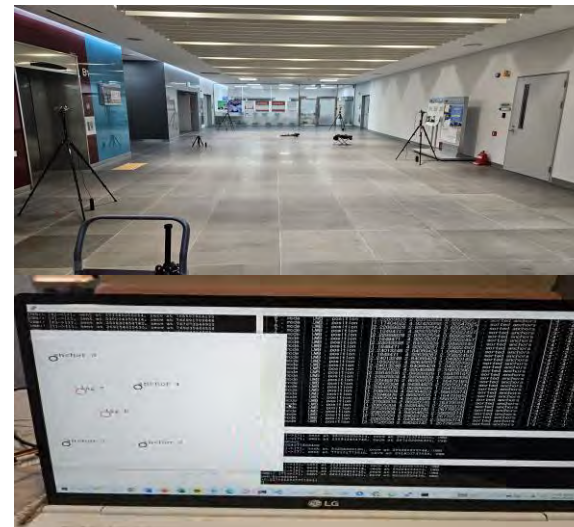
- 삼변측량 (Trilateration) 기반 측위 알고리즘 설계
- 측정 차원 + 1개의 Anchor 노드 활용
 - ex) 2차원의 경우 3개 Anchor, 3차원의 경우 4개 Anchor
- 실증 결과, 오차 범위 50 cm 이내의 측위 정확도 달성
 - 이후 3차원 측위 성능 검증 수행 예정

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

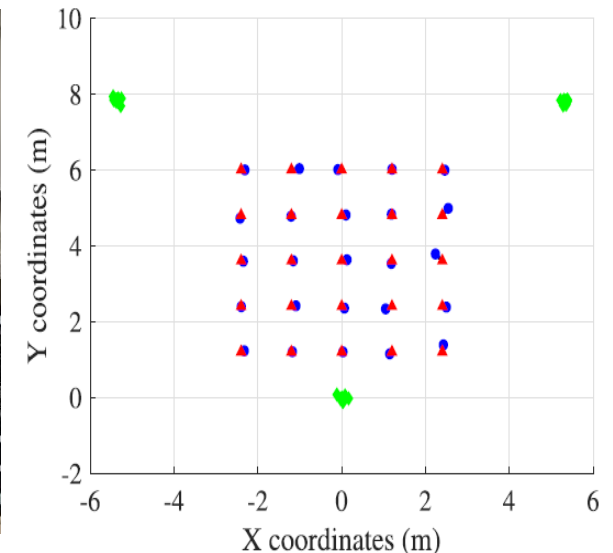
삼변측량 기반 측위 알고리즘 (3D)



삼변측량 기반 측위 모식도



Positioning 실증 실험 결과 (2D)



① UWB 기반 높은 정확도의 작업자 측위 기술개발

② 요소 측위 기술에 대한 SPRD용 임베디드 소프트웨어 개발

연구내용 및 결과 3.

고정밀 측위를 위한 PDR 안정성 강화 및 UWB 인프라 기반 SPRD 임베디드 소프트웨어 개발

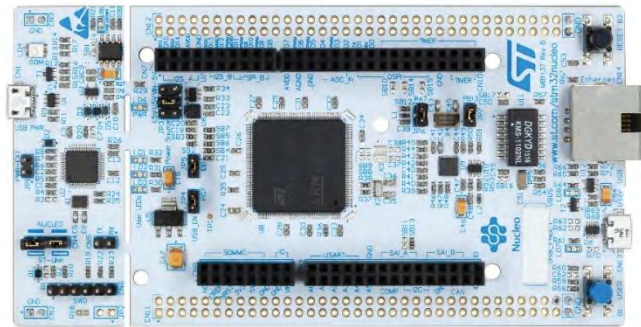
요소 측위 기술에 대한 SPRD용 임베디드 소프트웨어 개발

□ 제한된 리소스 환경 (CPU, 메모리) 조사

- MHz 단위 CPU, 수백 KB ~ MB 수준의 RAM/Flash 를 갖기 때문에 다음을 고려해야함
 - 연산량 최적화: 부동소수점 연산량, 실행 속도와 자원 효율성 확보를 위한 C/C++ 포팅
 - 메모리 절약: 동적 할당 최소화, 데이터 샘플링 최적화

□ 실시간 처리 요구 조사

- PDR 및 UWB 측위는 특정 주기 내에 필수 계산을 완료해야함
 - 실시간 응답을 위한 타이머 인터럽트로 우선순위 기반 처리 필요
 - 각 측위 계산 주기 보장을 위한 비동기식 처리 기법 (RTOS, Threading)



STMicroelectronics 사
STM32F429ZI Nucleo 개발 보드



Espressif Systems 사
ESP32-DevKitC 개발 보드



Raspberry Pi Foundation 사
Raspberry Pi 5B 싱글보드 컴퓨터

요소 측위 기술에 대한 SPRD용 임베디드 소프트웨어 개발

□ 다양한 통신 인터페이스 선택

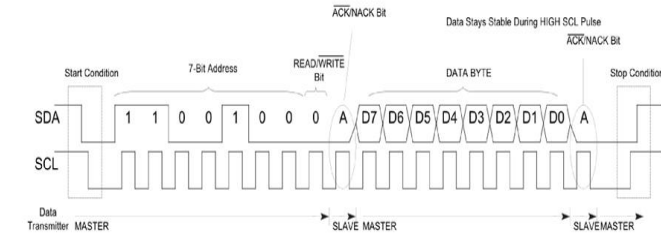
■ 각 센서 및 모듈은 서로 다른 인터페이스를 결정

- IMU (MPU9250) : I2C 사용, UWB: SPI 사용
- 각각의 인터페이스에 맞게 코드 변환
- 각 MCU 플랫폼마다 코드가 달라짐

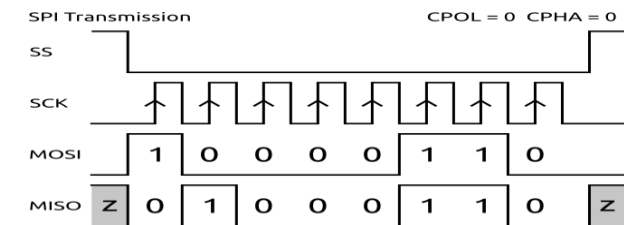
□ PDR/UWB 기반 임베디드 SW 설계

■ Ranging 알고리즘 포팅

- ToF (Time of Flight)계산, TWR (Two Way Ranging) 방식 기반
- 포팅 시 아래 사항 등을 고려하여 설계 진행중
 - ❖ 실시간 타이밍 동기화 정확도 확보 (μs 단위)
 - ❖ 전력 최적화를 위한 동작 주기 조절
 - ❖ HAL interface 기반, Arduino interface 기반
 - ❖ Linux 환경 내에서 각 언어의 threading 활용 가능



IMU 모듈은 I2C를 활용



UWB 모듈은 SPI를 활용

요소 측위 기술에 대한 SPRD용 임베디드 소프트웨어 개발

□ PDR/UWB 기반 임베디드 SW 설계

■ PDR 알고리즘 포팅

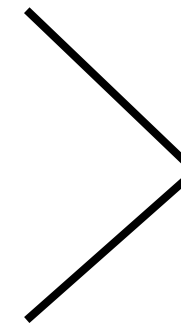
- Python으로 구현된 PDR 알고리즘을 C/C++로 포팅
 - ❖ 실행 속도 및 성능 최적화: C/C++은 컴파일 언어로, Python보다 더 낮은 레벨에서 최적화된 기계어 코드 생성 가능
- 핵심 구성
 - ❖ 방향 추정 정확도에 영향이 가지 않도록 전력 최적화를 고려한 센서 주기 결정 중요
 - ❖ 실험 보드 환경 변화에 따른 캘리브레이션 고려
 - ❖ Linux 환경에서 threading 방식 활용 가능
 - **SPRD 장비에서 Linux OS 환경을 확인**

■ 비동기 구조 및 운영체제 고려

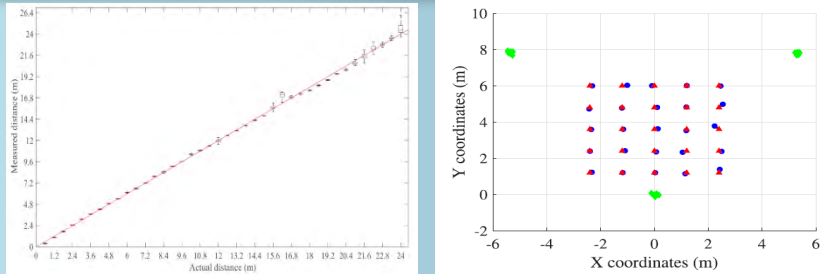
- 여러 센서/모듈을 동시에 제어하기 위해 비동기 방식 필요
 - ❖ Linux 환경에서의 비동기 방식:
 - Threading 방식, Multiprocessing 방식

Task 1
UWB Ranging

Task 2
PDR Positioning



SPRD 기반 실시간 비동기식 처리 예시

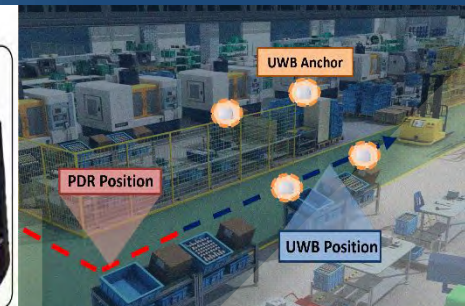


① UWB 기반 측위 알고리즘 개발 및 검증 (완료)

- 3D-BIM 기반 LOS/NLOS 고려 앵커 노드 위치 결정
- DS-TWR (Double-Sided Two-Way Ranging) 거리 측정
- 알고리즘 및 위치 추정 알고리즘 설계 및 검증
- 실험적 검증을 통한 삼변측량 알고리즘 고도화 완료

② SPRD 플랫폼 조사 및 요소 측위 기술(PDR, UWB) 적용 (진행 중)

- PDR/UWB 융합 구조 분석 및 플랫폼 통합 방향 검토
- UWB/PDR 간 유동적 선택 알고리즘 개발 완료
- SPRD 내 임베디드 소프트웨어 통합 개발 진행 중
- UWB/PDR 유동적 선택 알고리즘 개발 예정 (5차년도)
- 융합 측위 알고리즘 검증 및 보완 예정 (5차년도)



감사합니다.