

Wi-Fi RSSI 삼변측량 기반 실내 대피 모니터링 시스템

2025-2
AJOU
SOFTCON

이 름 김형민

지도교수 고영배 교수님

개발동기 및 목적

[개발 동기: 재난 현장의 '눈'이 필요하다]

- 사회적 배경: 화성 배터리 공장(2024), 이천 물류창고(2020) 화재 등 대형 참사 발생 시, 연기로 인한 시야 차단과 패닉으로 대피 실패 및 고립 인원 파악 불가가 인명 피해의 주원인.
- 기존 시스템의 한계: 단순 경보(Alarm) 위주로, 재실자가 실제로 대피했는지 확인하는 '추적(Tracking)' 기능 부재.

[개발 목적: 골든타임 확보를 위한 대피 모니터링]

- 실시간 위치 추적: Wi-Fi RSSI 신호를 분석하여 재실자의 위치 좌표 (x, y)를 실시간 시각화 및 경로 생성.
- 대피 여부 판단: 사용자가 안전 구역(Safe Zone)으로 이동했는지, 혹은 위험 구역에 고립되었는지 즉각 판별하여 구조자에게 정보 제공.

개발내용

[시스템 구성 및 동작 원리]

Transmitter (User Tag)

- 30ms 초고속 주기의 비콘 신호 송출로 이동 경로의 연속성 확보.
- 저전력 설계로 장시간 대피 상황 대응 가능.

Multi-node Receiver (Anchors)

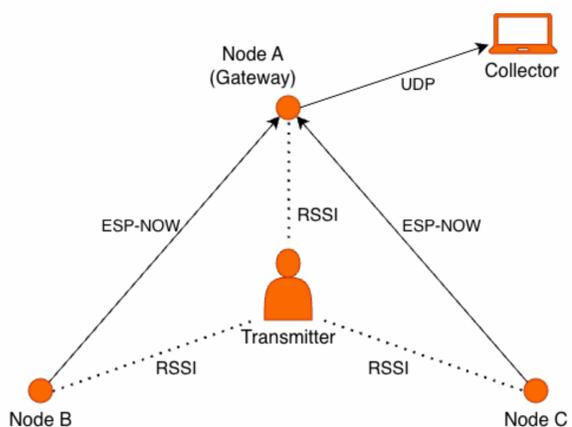
- 3개의 앵커 노드(A, B, C)를 삼각 구도로 배치하여 사각지대 최소화 및 RSSI 다각도 수집.
- Promiscuous Mode를 활용하여 태그의 RSSI 신호를 다각도에서 실시간 스니핑(Sniffing).

Gateway Bridge (Node A)

- Dual-Stack 통신: ESP-NOW(수집)와 SoftAP(PC 전송)를 동시에 수행하여 데이터 병목 제거.
- 데이터 허브: 분산된 노드(B, C)의 데이터를 취합하고 타임스탬프 동기화(Time Sync) 및 패킷 정렬 수행.

Collector & Analyzer (PC)

- Python 기반 실시간 데이터 파이프라인:
수집(UDP) → 보정(Clipping) → 필터링(Filtering) → 시각화(GUI)



[하드웨어 및 통신 환경]

MCU (Microcontroller Unit): Espressif ESP32-C6

- 차세대 Wi-Fi 6 지원으로 혼잡한 2.4GHz 대역에서도 안정적인 통신 성능 확보.
- 저비용 모듈로 다수의 노드(Multi-node)를 부담 없이 구축 가능.

Network Protocol

- Node ↔ Gateway (ESP-NOW): 연결 절차(Handshake)가 없는 비연결성 프로토콜.
- Gateway ↔ PC (UDP Socket): 센서 데이터의 실시간 스트리밍을 위한 오버헤드가 적은 프로토콜.

주요기술

[정밀 측위 알고리즘]

- 로그 거리 경로 손실 모델 (LDPL Model): RSSI를 거리로 변환. 환경 변수 n 최적화를 통해 거리 오차 최소화.

$$d = 10^{\left(\frac{RSSI_0 - RSSI}{10 \cdot n}\right)}$$

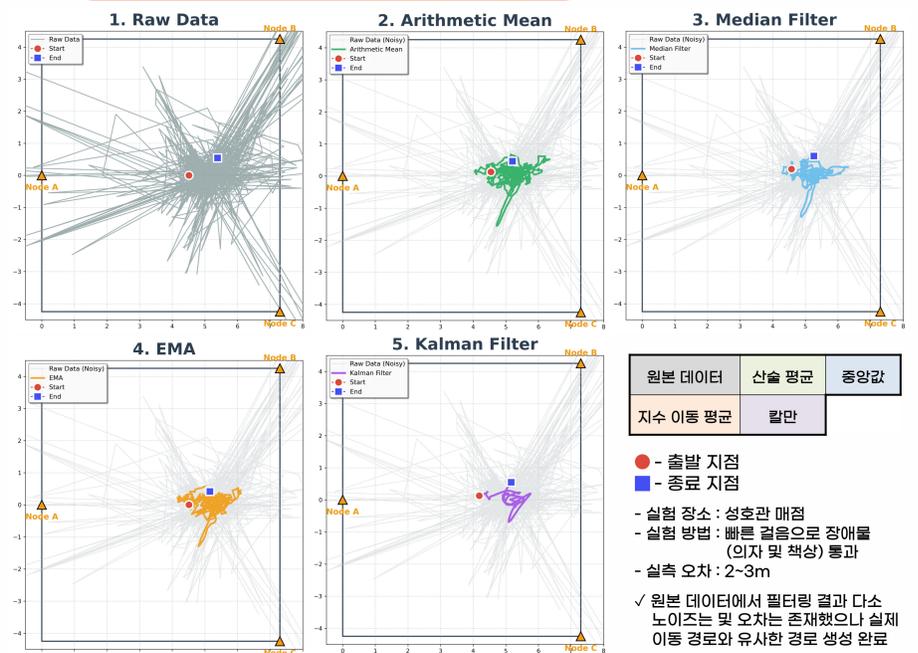
- 가중 최소제곱법 (Weighted Least Squares, WLS):

단순 삼변측량의 한계를 극복. 신호 세기가 강한(신뢰도 높은) 앵커에 가중치를 부여하여 최적의 좌표 도출.

[노이즈 필터링 및 보정]

- 방 경계 클리핑 (Boundary Clipping): 물리적 공간(Room)을 벗어나는 이상치(Outlier)를 벽면 좌표로 강제 보정하여 데이터 이탈 방지.
- 기초 필터 (Mean/Median/EMA): 산술 평균 및 중앙값 필터를 통해 돌발적인 노이즈(Spike) 1차 제거.
- 칼만 필터 (Kalman Filter): 시스템의 물리적 운동 모델(관성)을 기반으로 이동 경로를 부드럽게 추정 및 보정하여 최종 추적 정밀도 극대화.

결과 및 분석



활용방안 및 기대효과

[활용 방안]

- 스마트 빌딩 안전 시스템: 화재 시 방제실에서 모든 층의 재실자 대피 현황 모니터링.
- 고위험 작업장 관리: 공장, 건설 현장 등 위험 지역 내 작업자 위치 실시간 관제.
- 요양병원 및 복지 시설: 거동이 불편한 환자의 무단 이탈 방지 및 비상 대피 지원.

[기대 효과]

- 구조 효율성 증대: "어디에 사람이 있는가?"를 구조대가 진입 전 파악하여 골든타임 내 구조 확률 획기적 증가.
- 저비용 고효율: 고가의 전용 장비 대신 범용 Wi-Fi 모듈 (ESP32)을 사용하여 경제적인 안전 시스템 구축 가능.
- 확장성: 기존 Wi-Fi 인프라와 연동하여 대규모 건물에도 유연하게 적용 가능.

오픈소스 URL

<https://github.com/BroMin/WiFi-Fire-Evacuation-Monitor-System>

