

Software Requirement Specification

Ver1.0

재난 구조용 열화상 기반 인명 탐색 로봇 솔루션

2025.12.06

작성자: 이재형, 이하늘

1. 개요

1.1 프로젝트 배경 및 목표

재난 현장에서 119 구조대원의 최우선 목표는 '구조대원 자신과 동료의 안전 확보', '현장 내 생존자 구조', '효율적이고 조직적인 대응'이다. 하지만 현대 도심의 건물 화재 및 건물 붕괴 현장은 '주변 환경의 불안정성'과 '잔해로 인한 작업 제한'이라는 환경적 어려움으로 인해 이러한 구조활동 목표 달성을 중대한 장애를 미친다.

따라서, 구조대원의 진입이 제한되는 재난 환경에 투입될 수 있는 '원격 인명 탐색 로봇'을 개발하여 '구조대원의 안전 확보', '생존자 식별 가능성 극대화', '즉각적이고 효율적인 대응'이라는 목표 달성을 위한 장애물을 극복할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

1.2 프로젝트 구성 및 기능

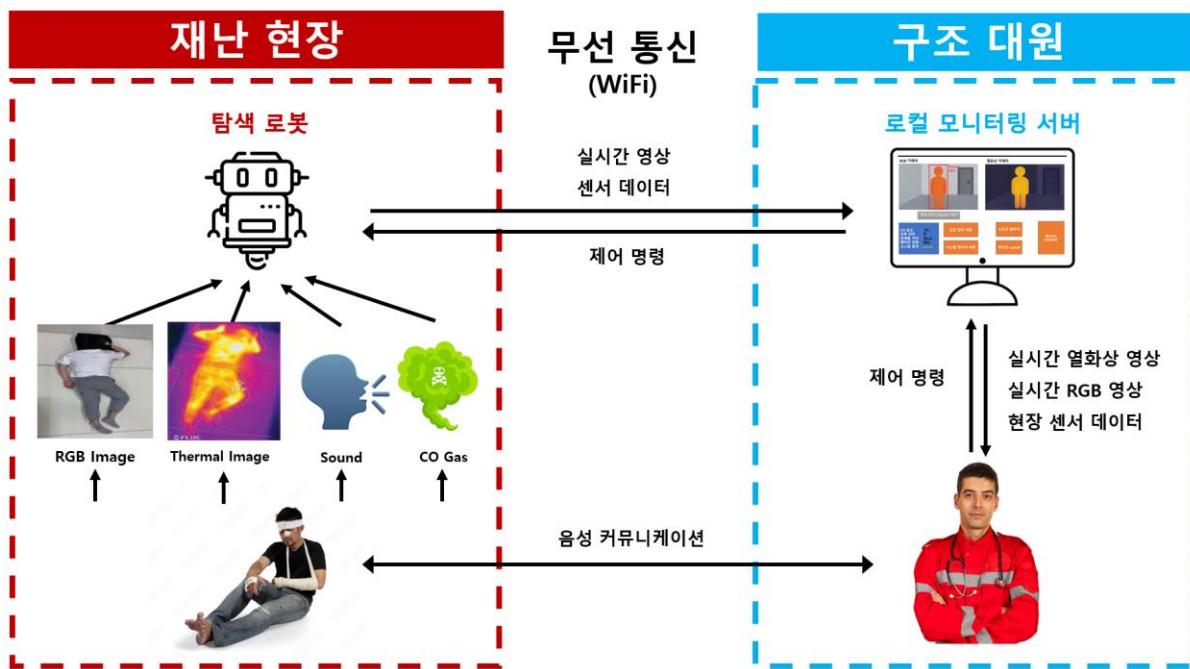


그림 1. Project Overview

'재난 구조용 열화상 기반 인명 탐색 로봇 솔루션'은 재난 현장의 다양한 정보(RGB 영상, 열화상 영상, 소리, CO 가스 농도)를 수집하고 조난자와의 커뮤니케이션을 가능하게 해주는 '탐색 로봇'과, 탐색 로봇에게 제어 명령을 내리고 실시간으로 수집되는 현장 정보를 시각화된 GUI로 식별하는 '로컬 모니터링 서버'로 구성된다.

탐색 로봇의 탑재 컴퓨터로는 Raspberry Pi 4B 를, 로봇 내부에 기능을 보조해주는 센서 허브로는 Cortex-M3 개발보드(STM32F103RB) 를 사용한다. 탐색 로봇은 성공적인 임무수행을 위하여 데이터 처리와 제어 소프트웨어의 안정적인 운영, 로봇 내의 다양한 IO 제어를 바탕으로 로봇과 모니터링 서버간의 명령 및 각종 데이터(영상, 음성, 센서)를 교환하는 역할을 한다. 탐색 로봇의 주요 구성 및 기능은 다음과 같다.

- **메인 프로세서 모듈**(Raspberry Pi 4B) : 첫째, 재난 현장에서 수집된 RGB 동영상, 열화상 동영상, 센서 허브에서 수집되는 센서 값, 현장의 음성 정보를 모니터링 서버로 전달하는 역할을 수행한다. 둘째, 모니터링 서버에서 받아온 구조대원의 음성을 스피커로 출력하는 역할을 수행한다.
- **센서 허브**(Cortex-M3 Development Board) : CO 측정기, 초음파 모듈, 자이로 센서가 연결된 보조 MCU로, 각 센서의 데이터를 취합해 시리얼 통신으로 메인 프로세서 모듈에게 전달하는 역할을 수행한다.

모니터링 서버 컴퓨터의 주요 구성 및 기능은 다음과 같다.

- **모니터링 프로세서**(Jetson Nano) : 첫째, 탐색 로봇으로부터 수신된 영상 및 센서 데이터들을 처리한 뒤 GUI 시각화를 통해 구조자의 판단을 돋는 기능을 수행한다. 둘째, 탐색 로봇에게 제어 명령을 내리는 역할을 수행한다. 셋째, 조난자의 음성을 스피커로 출력하는 역할을 수행한다. 넷째, 구조대원의 목소리를 압축하여 탐색 로봇에게 전달하는 역할을 수행한다. 다섯째, 수신받은 RGB 영상에 대한 Human Detection 딥러닝 모델을 Inference 하는 역할을 수행한다.

2. 개발 요구조건

2.1 탐색 로봇 개발 주요 요구조건

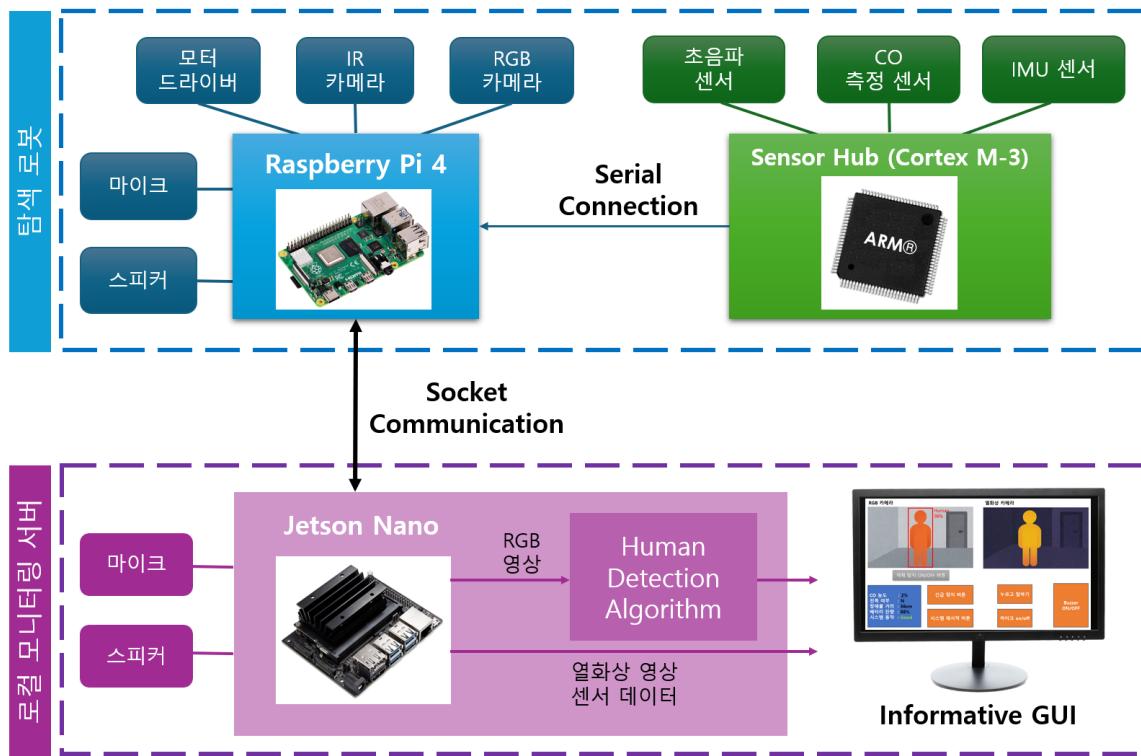


그림 2. 탐색 로봇 / 모니터링 서버 구성도

탐색 로봇은 RGB 카메라 데이터와 열화상 카메라 데이터 및 각종 센서 데이터를 처리해 서버로 송신하고, 로컬 모니터링 서버로부터의 제어 명령을 모터 제어 신호로 변환하는 제어

처리부(Raspberry Pi 4B)와, 초음파 센서, 자이로 센서, CO 가스 센서 데이터를 수집해 제어 처리부로 데이터를 보내는 **센서 허브(Cortex-M3 MCU)**로 나뉜다. 이러한 설계의 분리에는 탐색 로봇의 과도한 연산 수행을 방지하고자 하는 의도가 있다.

탐색 로봇의 제어 처리부 주요 기능은 다음과 같으며, 3 절에서 상세한 요구사항으로 세분화한다.

1. 모니터링 서버로부터 들어오는 제어 신호를 해석하여 모터에 적절한 제어 명령을 내린다.
2. RGB 카메라로부터 재난 현장 영상 데이터를 수집한다.
3. 수집된 RGB 카메라의 데이터를 처리하여 서버로 실시간 스트리밍한다.
4. 열화상 카메라로부터 재난 현장 열화상 데이터를 수집한다.
5. 수집된 열화상 카메라의 데이터를 처리하여 서버로 실시간 스트리밍한다.
6. 마이크로부터 음성 신호를 수집한다.
7. 마이크로 수집되는 조난자 음성 신호를 처리하여 서버로 실시간 스트리밍한다.
8. 서버로부터 수신되는 제어 신호를 해석하여 이에 맞는 모터 제어를 수행한다.
9. 서버로부터 수신되는 구조대원의 음성 신호를 해석하여 스피커로 송출한다.
10. 센서 허브로부터 주기적으로 수집되는 초음파 센서, CO 농도, 자이로 값은 인코딩한다.

11. 인코딩한 센서 데이터를 서버로 송신한다.
12. 초음파 센서 값을 해석하여 장애물이 가까이(<7cm) 있을 경우 전진 제어 명령을 수행하지 않는다.

탐색 로봇 센서 허브의 주요 기능은 다음과 같으며, 3 절에서 상세한 요구사항으로 세분화한다.

1. 초음파 센서 값을 Parsing 하여 탐색 로봇 앞 장애물의 위치 정보를 수집한다.
2. CO(일산화탄소) 센서값을 수집한다.
3. IMU(Inertial Measurement Unit)센서 값을 수집한다.
4. 수집된 센서 값을 인코딩하여 주기적으로 제어 처리부로 보낸다.

2.2 모니터링 서버 개발 주요 요구조건

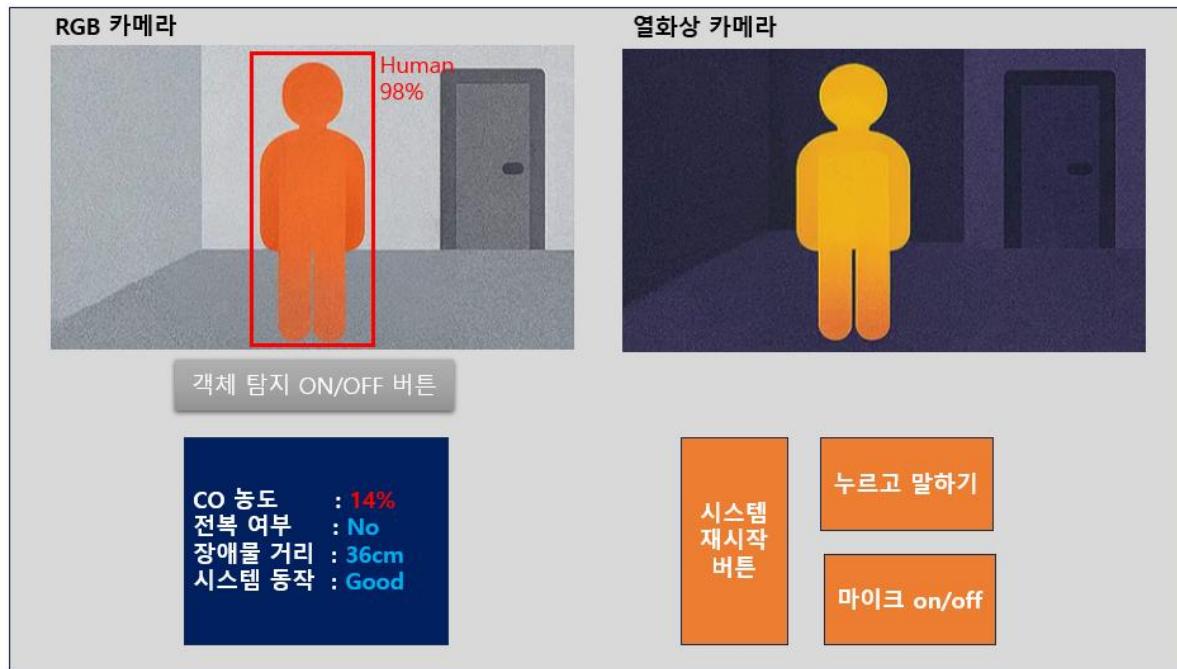


그림 3. 모니터링 서버 GUI 구성도

로컬 모니터링 서버는 구조대원을 위한 상황 모니터링 시스템으로, 탐색 로봇이 수집한 다양한 데이터를 육안으로 확인하기 위한 GUI를 제공한다.

로컬 모니터링 서버가 구조대원에게 제공하는 주요 기능은 다음과 같으며, 3 절에서 상세한 요구사항으로 세분화한다.

1. 탐색 로봇으로부터 RGB 영상 데이터와 열화상 영상 데이터를 실시간 수신받는다.
2. RGB 영상 데이터에 대해 Human Detection 딥러닝 모델 연산을 수행한다.
3. RGB 영상에 대해 연산된 Human Detection 결과를 GUI에 해당 프레임과 함께 붉은 Bounding Box로 정확도와 함께 표기한다.
4. 수신 받은 열화상 영상 데이터를 실시간 GUI에 표기한다.
5. 수신 받은 센서 데이터를 Parsing 하여 GUI에 값을 표기한다.
6. 시스템 재시작 버튼을 누르면 탐색 로봇을 재부팅 시킨다.
7. 토글 버튼으로 로컬 모니터링 서버측 마이크를 On/ Off 할 수 있는 기능을 제공한다.
8. 키보드의 W, A, S, D 값을 이용해 로봇의 전진, 좌회전, 후진, 우회전을 제어한다.

3. 개발 요구사항

시스템 구성

- **탐색 로봇:** Raspberry Pi 4B (영상 수집, 모터 제어, 센서 데이터 수신)
- **센서 허브:** STM32F103RB (초음파, CO, IMU 센서 데이터 수집 및 전송)
- **로컬 모니터링 서버:** Jetson Nano (영상 분석, GUI 제어, 통신 중계)

3.1 탐색 로봇 제어 처리부(Raspberry Pi 4B) 요구사항

FR1. RGB 카메라 및 영상 스트리밍

FR1.1 RGB 카메라 CSI 포트에서 1080p(1920×1080) 30fps 영상 수집

FR1.2 수집된 RGB 영상을 H.264(4Mbps)로 인코딩

FR1.3 인코딩된 영상을 RTSP로 서버에 실시간 스트리밍

FR2. 열화상 카메라 및 데이터 스트리밍

FR2.1 열화상 카메라 SPI(10MHz, CS=0)에서 80x60 해상도 8Hz 주기로 수집

FR2.2 인코딩된 열화상을 RTSP로 서버에 스트리밍

FR2.3 열화상 데이터 8Hz 주기 동기화 유지

FR3. 음성 수집 및 전송

FR3.1 마이크에서 16kHz 16-bit Mono 음성 신호 캡처

FR3.2 캡처된 음성을 G.726(32kbps) 또는 AAC(64kbps) 코덱으로 인코딩

FR3.3 인코딩된 음성을 RTP/RTSP 프로토콜로 서버에 실시간 전송

FR4. 음성 수신 및 재생

FR4.1 서버로부터 구조대원 음성 신호를 RTP/RTSP로 수신

FR4.2 수신한 음성을 디코딩하여 로컬 스피커로 재생

FR4.3 서버 음성 수신부터 스피커 출력까지 200ms 이내 지연

FR5. 센서 데이터 수신 및 처리

FR5.1 센서 허브와 UART(115200, 8N1)로 통신하여 센서 데이터 100ms 주기로 수신

FR5.2 수신한 초음파, CO, IMU 센서 데이터를 파싱하여 메모리 버퍼에 저장

FR5.3 파싱된 센서 데이터를 JSON 형식으로 인코딩

FR5.4 인코딩된 센서 데이터를 MQTT 로 서버에 10Hz 주기로 송신

FR5.5 센서 측정부터 서버 수신까지 200ms 이내 지연

FR6. 모터 제어 명령 수신

FR6.1 서버로부터 모터 제어 명령(motor, action, speed)을 MQTT 로 수신

FR6.2 수신한 제어 명령 형식 검증 및 파싱 (명령 구조: motor ID, action type, speed 0-255)

FR6.3 검증된 제어 명령을 PWM 신호로 변환

FR6.4 명령 수신부터 모터 동작까지 50ms 이내 응답

FR7. 자율 장애물 회피

FR7.1 STM32에서 수신한 초음파 센서 값을 주기적으로 모니터링

FR7.2 초음파 거리 < 7cm 감지 시 전진(Forward) 제어 명령 차단

FR7.3 차단된 제어는 로그 기록 및 서버에 경고 메시지 전송

FR7.4 장애물 감지부터 제어 차단까지 50ms 이내 응답

FR8. 모니터링 서버와의 통신

FR8.1 Jetson Nano 와 WiFi로 양방향 통신

FR8.2 WiFi 연결 실패 시 5초 간격으로 최대 6회 재연결 시도

FR8.3 모든 데이터에 UTC 기반 타임스탬프 부여 (1초 이내 오차)

FR8.4 네트워크 단절 시 RGB/음성 3 초, 센서 50 개 패킷 버퍼링

3.2 탐색 로봇 센서 서브(Cortex-M3 개발보드) 요구사항

FR1. 초음파 센서 데이터 수집

FR1.1 HC-SR04 센서에서 거리값 주기적 수집

FR1.2 측정 범위: 2cm ~ 300cm, 정확도: $\pm 0.5\text{cm}$

FR1.3 측정 주기: 50ms (20Hz)

FR1.4 거리값을 정수(cm 단위)로 파싱 및 저장

FR2. CO 농도 센서 데이터 수집

FR2.1 CO 센서에서 일산화탄소 농도값 주기적(100ms) 수집

FR2.2 농도값을 정수(ppm 단위)로 파싱 및 저장

FR3. IMU 센서 데이터 수집

FR3.1 IMU 센서에서 자이ロ스코프 3 축(X, Y, Z) 각속도 수집

FR3.2 샘플링 레이트: 100Hz (10ms 주기)

FR3.3 각속도값을 float($^{\circ}/\text{s}$ 단위)으로 파싱 및 저장

FR4. 센서 데이터 통합 및 인코딩

FR4.1 초음파, CO, IMU 센서 데이터를 100ms 주기로 수집

FR4.2 수집된 데이터를 구조화된 형식(JSON 또는 바이너리)으로 인코딩

FR4.4 각 패킷에 시퀀스 번호 및 체크섬 포함

FR5. 탐색 로봇으로의 데이터 전송

FR5.1 UART(115200 baud, 8N1)로 탐색 로봇(Pi)에 센서 데이터 주기적 전송

FR5.2 데이터 전송 주기: 100ms (10Hz)

FR5.3 전송 실패 시 다음 주기에 재전송 (최대 3 회)

FR5.4 수신 측 타임아웃(500ms) 시 재연결 시도

FR6. 모터 제어 명령 수신

FR6.1 탐색 로봇(Pi)으로부터 UART로 모터 제어 명령 수신

FR6.2 명령 형식 검증 및 파싱 (motor ID, action, speed)

FR6.3 검증된 명령을 해당 모터 제어 회로로 전달

FR6.4 명령 수신부터 모터 동작까지 10ms 이내 응답

3.3 로컬 모니터링 서버(Jetson Nano) 요구사항

FR1. 영상 수신 및 처리

FR1.1 탐색 로봇으로부터 RGB 영상 데이터를 RTSP로 실시간 수신

FR1.2 수신한 RGB 영상을 메모리 버퍼에 저장

FR1.3 탐색 로봇으로부터 열화상 데이터를 RTSP로 실시간 수신

FR1.4 수신한 열화상 영상을 메모리 버퍼에 저장

FR1.5 RGB/열화상 영상 수신부터 GUI 디스플레이까지 500ms 이내 지연

FR2. Human Detection 딥러닝 분석

FR2.1 수신한 RGB 영상 프레임에 대해 Human Detection 딥러닝 모델 연산 수행

FR2.2 사용 모델: YOLOv8, YOLOv5 또는 TensorRT 최적화 모델

FR2.3 모델 입력: 1920×1080 RGB 프레임

FR2.4 모델 출력: 탐지된 인물의 바운딩 박스 좌표 및 신뢰도(confidence)

FR2.5 모델 추론 지연: 프레임당 200ms 이내

FR2.6 최소 신뢰도 임계값: 0.8 (80%) 이상만 표시

FR3. Human Detection 결과 시각화

FR3.1 Human Detection 결과를 RGB 프레임에 붉은색 Bounding Box로 오버레이

FR3.2 각 바운딩 박스에 신뢰도(%) 표기

FR3.3 결과 프레임을 GUI에 실시간 표시 (20fps 이상)

FR4. 열화상 영상 시각화

FR4.1 수신한 열화상 JPEG 데이터를 디코딩

FR4.2 열화상을 컬러맵(Jet, Viridis 등) 적용하여 GUI에 표시

FR4.3 열화상 온도 범위 표시

FR4.4 열화상 영상 업데이트 주기: 8Hz

FR5. 센서 데이터 시각화

FR5.1 탐색 로봇으로부터 센서 데이터(JSON 형식)를 MQTT로 수신

FR5.2 수신한 센서 데이터 파싱 (초음파, CO, IMU, 초음파)

FR5.3 파싱된 데이터를 GUI 패널에 실시간 표시

FR5.4 초음파 거리: "거리: XXcm" 형식 표시

FR5.5 CO 농도: "CO 농도: XXppm" 형식 표시

FR5.6 IMU 각속도: "전복 여부: Y/N" 형식 표시

FR5.7 센서 데이터 업데이트 주기: 10Hz (100ms)

FR6. 키보드 제어

FR6.1 GUI에 포커스가 있을 때 키보드 입력 감지

FR6.2 키 'W' 입력: 탐색 로봇 전진 명령 전송

FR6.3 키 'A' 입력: 탐색 로봇 좌회전 명령 전송

FR6.4 키 'S' 입력: 탐색 로봇 후진 명령 전송

FR6.5 키 'D' 입력: 탐색 로봇 우회전 명령 전송

FR6.6 키 해제 시 정지 명령 자동 전송

FR6.7 제어 명령을 MQTT로 탐색 로봇에 전송

FR6.8 명령 전송부터 로봇 반응까지 100ms 이내

FR7. 시스템 제어

FR7.1 GUI에 '시스템 재시작' 버튼 제공

FR7.2 버튼 클릭 시 탐색 로봇에 재부팅 명령 전송

FR7.3 재부팅 완료 시 GUI에 상태 메시지 표시

FR8. 마이크 제어

FR8.1 GUI에 '마이크 On/Off' 토글 버튼 제공

FR8.2 토글 On 상태: 서버 마이크(Jetson Nano 내장)에서 음성 수집

FR8.3 토글 Off 상태: 음성 수집 중단

FR8.4 마이크로부터 수집된 음성을 16kHz 16-bit로 캡처

FR8.5 캡처된 음성을 G.726/ACC 인코딩하여 탐색 로봇 스피커로 전송

FR8.6 서버 마이크 입력부터 로봇 스피커 출력까지 300ms 이내 지연

FR9. 실시간 GUI 표시

FR9.1 GUI 개발 스택: OpenCV + Qt

FR9.2 RGB 영상 + Human Detection 오버레이 표시 (왼쪽 상단)

FR9.3 열화상 영상 실시간 표시 (오른쪽 상단)

FR9.4 센서 데이터 패널 (초음파, CO, IMU) 표시 (왼쪽 하단)

FR9.5 제어 버튼 및 상태 표시 패널 (오른쪽 하단)

FR9.6 GUI 갱신 주기: 20fps 이상 (영상), 10Hz (센서)

FR9.7 GUI 응답성: 사용자 입력부터 명령 전송까지 100ms 이내

FR10. 로봇 전복 감지

FR10.1 탐색 로봇으로부터 수신한 IMU 센서 데이터(3 축 가속도, 3 축 자이로)를 실시간 분석

FR10.2 가속도 센서 Z 축 값으로 로봇의 수평/기울임 상태 판단 (정상: -9.8m/s^2 , 범위: $\pm 5 \text{m/s}^2$ 허용)

FR10.3 자이로스코프 X, Y 축 각속도가 임계값($\pm 100^\circ/\text{s}$) 이상 지속되는 경우 로봇 전복으로 판단

FR10.4 연속된 3 개 IMU 샘플(300ms)에서 전복 조건 만족 시 "전복 상태"로 확정

FR10.5 전복 감지 시 로봇에 긴급 정지(Emergency Stop) 명령 자동 전송

FR10.6 전복 상태를 GUI에 경고 알림으로 표시

FR10.7 전복 후 복구 감지: 로봇이 안정적 상태(가속도 Z 축: $-9.5 \sim -10.1 \text{m/s}^2$)로 돌아오면 경고 해제

4. 참고 문헌

- 1) 소방청, 재난현장 표준작전절차