

산업제조현장 스마트 안전 시스템용 레이더 및 IMU 센서를 이용한 앙상블 부스팅 모델 기반 작업자 탐지 기술⁺

(Worker Detection Based on Ensemble Boosting Model
Using a Low-cost Radar and IMU for Smart Safety
System in Manufacturing)

송승언^{1),++}, 김상동¹⁾, 김봉석¹⁾, 류정탁²⁾, 이종훈^{1),++}

(Seungeon Song, Sangdong Kim, Bong-Seok Kim, Jeong Tak Ryu, and Jonghun Lee)

요약 본 논문은 산업 제조 현장에서 작업자의 안전을 위협하는 사각지대를 해결하기 위해서 저가형 CW(Continuous Wave) 레이더와 IMU(Inertial Measurement Unit)센서를 결합한 스마트안전시스템을 제안하였다. 24GHz 레이더와 6축 IMU 센서를 사용하여 작업자의 움직임을 감지하고, 기계 학습 모델을 통해 작업자 상황을 인식할 수 있었다. 레이더와 IMU 특징점과 앙상블 부스팅 트리 기반 기계학습모델을 사용한 결과, 92.8% 이상의 작업자 탐지율을 확보하였다.

핵심주제어: 스마트 안전 시스템, 레이더, IMU, 산업제조현장, 작업자 탐지, 작업자 상황인식, 앙상블 부스팅 모델, 머신러닝

Abstract This paper proposes a smart safety system that combines low-cost CW(Continuous Wave) radar and IMU sensors to enhance blind spots that pose safety risks to workers in industrial manufacturing environments. The system employs a 24 GHz radar and a 6-axis IMU sensor to detect worker movements and utilizes a machine learning model to recognize worker situations in vibrating manufacturing sites. The ensemble boosting tree-based model achieved over 92.8% worker detection accuracy, demonstrating its effectiveness in improving safety in industrial settings.

Keywords: Smart Safety System, Radar, IMU, Industrial Environment, Worker Detection, Ensemble Boosting Model, Worker Situation Recognition, Machine Learning

* Corresponding Author: jhlee@dgist.ac.kr

+ 이 논문은 2024년 행정안전부에서 지원하는 재난안전산업 기술사업화 지원사업(RS-2024-00416793)과 2024년 과학기술정보통신부 재원으로 DGIST 기관사업 (2024-IT-01)의 지원에 의해 연구되었음.

Manuscript received October 01, 2024 / revised October 11, 2024 / accepted October 14, 2024

++ 제1저자

1) 대구경북과학기술원 첨단레이더연구소

2) 대구대학교 전자전기공학부

1. 서론

산업 제조 현장에서의 작업자 안전은 작업자의 생명과 직결되는 중요한 문제로, 산업 환경에서 사고를 예방하고 작업자의 안전을 보장하는 것이 필수적이다. 특히, 다양한 작업 환경에서 작업자를 정확하게 식별하고 상황을 인식하는 것은 작업자 보호에 있어서 핵심적인 기술이다(Shen et al., 2024; Skog, 2024).

기존 안전시스템은 주로 로봇과 휴먼 협동작업(Linder et al., 2021; Ergun et al., 2021), 철도 경계감시, 산업 현장 공중감시 및 안전 감시(Rey-Merchan et al., 2020) 등이 있으며, 카메라 및 레이더 센서를 융합한 기술과 다양한 멀티모달센싱 등을 활용한 이중센서기반 스마트 안전시스템이 활발하게 연구되고 있다(Ajakwe et al., 2022).

산업 현장에서는 복잡한 제조 환경이 일반적이며, 금속 자재, 자동화 로봇, 소형 이동 객체 등이 혼재된 상태에서 작업자와 로봇의 움직임을 동시에 식별해야 한다. 특히, 작업자가 특정 위험 상황에 놓였을 때 이를 즉각적으로 감지하고 대응할 수 있는 기술이 점점 더 필요하다. 예를 들어, 작업자의 실시간 탐지 및 다양한 상황 인식(예: 넘어짐, 작업 중/멈춤 자세, 보행 등)은 안전을 보장하는 데 매우 중요한 요소로 작용하지만, 기존의 광학 기반 또는 음향 센서 기반의 감지 시스템들은 복잡한 제조 환경에서 신뢰할 만한 성능을 제공하는 데 한계가 있다. 광학 카메라 기반 시스템은 날씨나 조명 조건에 영향을 받으며, 음향 센서는 주변 소음에 취약해 다양한 소음이 있는 현장에서 오류를 발생시킬 가능성이 크다.

레이더기반 안전시스템은 휴먼 탐지 및 추락 감지 그리고 휴먼자세인식 등 기술이 연구되고 있다(Sommer et al., 2020; Liu et al., 2023; Shi et al., 2024). 하지만, 산업제조현장에서 스마트 안전시스템용 탐지 기술의 개발은 매우 미미한 상태이며, 실제 현장에서의 효과적인 안전 기술은 여전히 부족한 상황이다. 특히, 자동화된 제조 시스템에서 작업자와 로봇간의 상호작용을 감지하고 분석할 수 있는 스마트 안전시스템의

개발이 절실히 필요한 실정이다.

현재, 제조 현장에서 사용되는 레이더 기반 안전시스템은 대부분 낙하물 감지 또는 추락 감지와 같은 특정 위험 요소 감지, 작업자 탐지와 작업자 상황 인식에 특화된 시스템 개발은 미흡한 상황이다. 특히, 제조 현장에서 작업자의 다양한 동작을 실시간으로 인식하는 기술과, 작업자와 로봇 간의 상호작용을 분석하고 모니터링하는 기술은 전무한 상태이다. 레이더 기반 스마트 안전시스템은 조명이나 기상 조건에 크게 영향을 받지 않으며, 다양한 환경에서도 안정적인 감지가 가능한 장점이 있다(Kim et al., 2018; Kim et al., 2017). 그럼에도 불구하고, 레이더 센서는 복잡한 산업제조현장의 주변 진동 또는 로봇 등에 의해서 작업자의 움직임을 정확히 탐지하고 분석하는 데 한계가 존재한다. 본 논문에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해서는 레이더와 IMU(Inertial Measurement Unit)센서 융합을 통해서 작업자 탐지 성능을 개선하고자 한다.

본 논문에서 레이더는 먼 거리에서 작업자의 움직임을 실시간으로 감지할 수 있는 장점을 지니고 있으며, IMU 센서는 제조 현장주변의 미세한 움직임과 변화를 정확하게 측정할 수 있다. 두 센서의 결합은 기존의 레이더기반 스마트 안전시스템의 한계점을 보완하여, 작업자의 움직임과 상태를 보다 정확하게 감지할 수 있다.

또한, 본 논문에서는 앙상블 부스팅 모델을 적용하여 작업자 감지 성능을 개선하고자 한다. 앙상블 부스팅 모델은 여러 개의 약한 학습기를 결합하여 예측 성능을 극대화하는 기법으로, 이를 통해 작업자의 움직임을 정교하게 감지할 수 있다.

본 논문의 구성은 2장에서 산업제조현장의 스마트 안전시스템 구성을 간단하게 설명하고, 3장에서 레이더 센서기반 작업자 탐지 알고리즘을 단계별 동작원리와 이론적 수학적식을 통해서 분석하고, 4장에서 실험장치 및 실험결과를 통해서 작업자의 탐지 성능을 평가하고 5장에서 결론을 맺고자 한다.

2. 시스템 구성

2.1 시스템 구성

산업 제조 현장 스마트 안전 시스템은 산업 제조 현장의 작업자 탐지를 위해서 설계된 레이더 센서, IMU 센서 등 주요 구성 요소로 이루어진다. Fig. 1은 개발된 레이더 센서와 IMU센서(Bosch BNO-055)를 결합한 스마트안전시스템을 나타낸다. 각 구성 요소는 레이더 안테나, 레이더 송수신모듈, IMU센서, 레이더 신호 처리, 데이터 분석, 하우징 등 다양한 기능과 요소로 구성되며, 이를 통해 복잡한 제조 환경에서 작업자의 움직임을 정확하게 탐지하고자 한다. IMU센서는 9축 센서이며, 16비트 해상도를 가지고, 감지범위는 125deg/s에서 2000deg/s를 갖는다.

1) 안테나 장치

스마트 안전시스템에 사용되는 레이더는 중심주파수가 24GHz이고, 대역폭은 250MHz이다. Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이, 사용된 안테나는 패치 안테나(Patch Antenna)를 사용하여 120도 이상의 방위각 방향으로 빔을 형성하며, 넓은 탐지 범위를 제공한다. 이는 산업 현장에서 작업자와 로봇 또는 낙하물 등을 다양한 각도에서 탐지할 수 있다(Song et al., 2021; Song et al., 2022).

2) 송수신 장치

레이더는 CW(Continuous Wave) 송신 신호를 생성하며, 방사된 전자기파가 목표물에 반사되어 돌아오는 신호를 수신한다. 이 신호는 I-채널과 Q-채널을 통해서 복소비트 주파수를 출력한다.

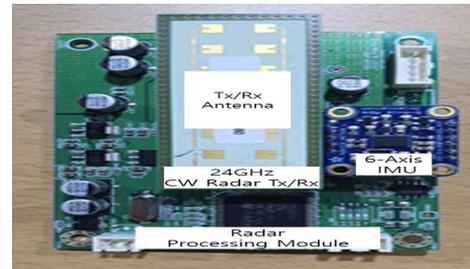
3) 레이더 신호 처리 장치

레이더 신호처리장치는 레이더의 작업자 탐지를 담당하며, 수신된 신호를 처리하고 분석하는 역할을 수행한다. 레이더 신호처리장치는 물체 탐지, 속도 계산 및 위상변화를 추정한다. 다양한 잡음제거 및 임계값 설정 알고리즘을 C-언어를 통해서 임베디드로 구현되어 감지된 객체 탐

지 정보를 실시간으로 처리한다. 이를 통해 스마트안전시스템은 작업자의 이동을 감지하고, 작업자의 상태 변화를 정확하게 분석할 수 있다.

4) 하우징

하우징은 레이더의 구성 요소들을 보호하며, 외부 환경으로부터 차폐하는 역할을 한다(Yeo et al., 2024). 하우징은 수분, 먼지, 염분, 불꽃 등의 외부 요인으로부터 레이더 센서와 IMU센서(Bosch BNO-055)를 보호하며, Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이, 레이더 안테나를 안정적으로 지지하고 고정한다. 또한, 레이더 작동 시 발생하는 열을 관리하고, 외부의 전자기 간섭으로부터 시스템을 보호한다. 이러한 특성은 레이더 시스템이 산업 현장의 까다로운 환경에서도 안정적으로 작동하도록 보장한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Smart Safety System for Industrial Manufacturing Factory (a) Radar Antenna & TRx Module, (b) Radar Processing Module & Housing, (C) Main Control & Interface Unit

5) 전원부 및 인터페이스

전원부는 스마트 안전시스템 전체에 안정적인 전원을 공급하며, 이를 통해 시스템이 장시간 작동할 수 있도록 한다. Fig. 1(c)에서 볼 수 있듯이, 주제어부 및 인터페이스는 이더넷과 RS485 등 다양한 통신 인터페이스를 제공하여 외부 시스템과의 통신을 가능하게 한다. 이는 레이더 시스템이 제조 현장의 다른 안전 시스템과 통합되어 데이터를 공유하고, 작업자 안전 모니터링에 활용될 수 있도록 한다. 개발된 안전시스템은 3개 이상의 안전시스템을 동시에 운용할 수 있도록 설계되었다.

이러한 구성 요소들은 서로 유기적으로 연결되어 산업 제조 현장에서 작업자와 물체의 움직임을 실시간으로 탐지하고 분석할 수 있는 스마트 안전 시스템을 구축하는 데 핵심적인 역할을 한다.

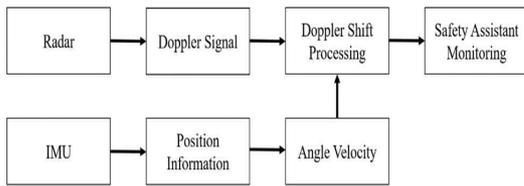


Fig. 2 Functional Blocks of Smart Safety System based on Radar and IMU Sensor

산업제조현장 스마트안전시스템은 Fig. 2와 같이 24GHz CW 레이더와 6축 IMU 센서로 구

성되며, 제조 현장에서 발생할 수 있는 다양한 안전 사고를 미리 감지하고 예방한다. 레이더 센서는 작업자의 움직임에 해당하는 도플러 신호를 감지하고, 도플러 천이성분을 추출하고, IMU 센서는 위치정보와 각 속도 정보를 통해서 스마트안전시스템의 진동 또는 시스템 자기속도를 추정함으로써 작업자를 감지하고 작업자의 상태를 모니터링한다.

3. 레이더 센서기반 작업자 탐지 알고리즘

본 논문에서는 산업제조현장 스마트안전시스템용 레이더기반 작업자 탐지기술을 제안한다. 스마트안전시스템에서 레이더의 객체탐지의 전체적인 알고리즘은 Fig. 3과 같다.

스마트안전시스템에서 레이더 객체 탐지기술은 CW레이더 수신신호처리단계, I/Q 비트신호 출력, 주파수변환단계, 수신신호전력추정단계, 위상추출단계, 위상차이추정단계, 위상차이 및 수신전력 임계값 비교단계 그리고 최종 객체 결정단계로 구성된다. CW(Continuous Wave) 레이더 시스템은 단계별로 구분되어 객체를 탐지하고 처리하는 절차를 따른다.

산업제조현장 스마트안전시스템용 작업자탐지용 CW레이더의 송신신호 $S_T(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_T(t) = A_T \cos(2\pi f_c t + \phi_T) \quad (1)$$

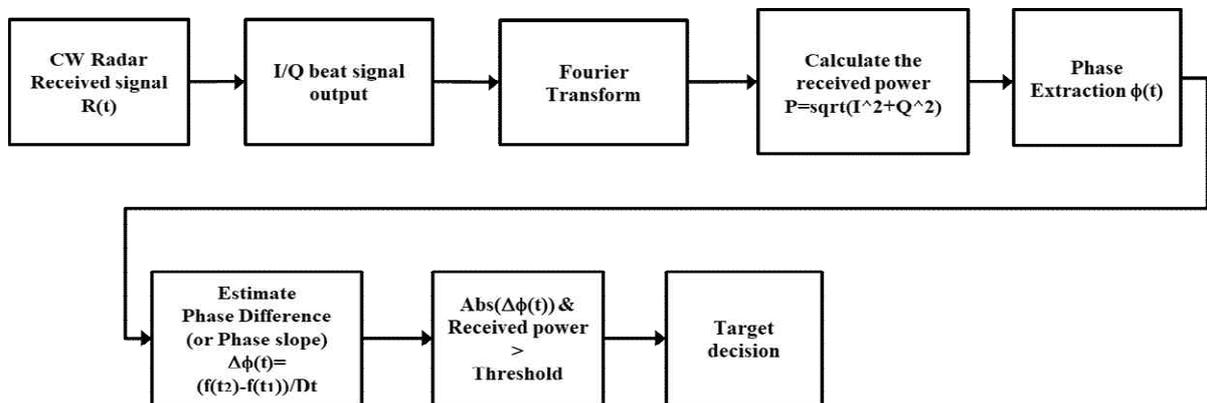


Fig. 3 Radar based Target Detection Algorithm for Smart Safety System

이때, A_T 는 송신신호의 진폭이고, f_c 는 레이더의 중심주파수이고, ϕ_T 는 송신신호의 초기위상을 나타낸다.

3.1 CW 레이더 수신 신호 처리

레이더는 방사된 중심주파수 24GHz CW신호가 목표물에 반사되어 돌아온 신호를 수신신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_R(t) = \sum_{i=1}^N A_R^i \cos(2\pi(f_c - f_d^i)(t - \tau_i) + \phi_R^i) \quad (2)$$

이때, A_R^i 는 i 번째 목표물에 의한 수신신호의 진폭이고, τ_i 는 i 번째 목표물에 의한 왕복시간 지연이고, f_d^i 는 i 번째 목표물에 의한 도플러주파수 편이를 나타내고, ϕ_R^i 는 i 번째 목표물에 의한 수신신호의 위상을 의미한다. 수신신호의 위상 ϕ_R^i 은 $\phi_T - 2\pi f_c \tau_i + \phi_d^i$ 이고, ϕ_d^i 는 i 번째 목표물의 도플러효과에 의한 위상변화를 나타낸다.

수신기를 통해서 복소혼합기와 저역통과필터를 통과한 후의 레이더 비트신호출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_b(t) = \sum_{i=1}^N A_b^i \cos(2\pi f_d^i t + \phi_b^i) \quad (3)$$

이때, A_b 는 i 번째 목표물에 해당하는 비트신호의 진폭이고, f_d^i 는 i 번째 목표물에 해당되는 도플러 주파수이고, ϕ_b^i 는 i 번째 목표물에 해당되는 비트신호의 초기위상을 의미한다. 또한, 복소수 I/Q 비트 신호 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$S_b(t) = I(t) + jQ(t) \quad (4)$$

이때, I-채널 신호 $I(t)$ 는 복소비트신호의 실수 성분을 나타내고 $I(t) = \sum_{i=1}^N A_b^i \cos(2\pi f_d^i t + \phi_b^i)$ 이고, Q-채널 신호 $Q(t)$ 는 복소비트신호의 허수 성분을 나타내고 $Q(t) = \sum_{i=1}^N A_b^i \sin(2\pi f_d^i t + \phi_b^i)$

이 된다. 위의 복소비트신호로부터, 목표물의 주파수 분석을 통해서 목표물의 속도, 위상분석을 통한 목표물의 위치 변화 및 특징점을 추정할 수 있다.

3.2 수신 신호의 전력 계산

레이더 출력인 복소비트신호의 I/Q-채널 신호를 바탕으로 레이더의 수신전력을 계산하며 신호의 세기를 계산하여 객체가 탐지되었는지 여부를 판단하는 데 사용된다. 이때, 목표물에 의한 수신신호의 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_i(t) = \sum_{i=1}^N (I_i^2(t) + Q_i^2(t)) \quad (5)$$

3.3 위상 추출 및 위상 차이 계산

스마트안전시스템용 레이더는 신호의 위상을 기반으로 움직임을 탐지하고, 목표물에 의한 비트신호의 위상 정보는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_i(t) = \sum_{i=1}^N (\tan^{-1}(\frac{I_i(t)}{Q_i(t)})) \quad (6)$$

식(6)에 의해서 계산된 목표물에 의한 비트신호의 위상 정보를 통해서 작업자 또는 소형 이동체 등 객체의 대상과 속도를 감지한다.

또한, 시간 차이에 따른 위상 변화량을 계산하여, 위상 차이 계산하여 움직임의 변화율을 측정한다. 이때, 시간에 따른 위상변화는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\phi_i(t) = \phi_i^i(t) - \phi_i^i(t + \Delta t) \quad (7)$$

이때, Δt 는 샘플링 간격을 의미한다.

식(7)로부터 추출된 위상 차이가 클수록 대상이 더 빨리 움직이고, 이를 통해서 움직임의 속도나 방향을 파악할 수 있다.

3.4 위상 차이 절대값 및 수신 전력 임계값

최종적인 목표물 결정에 앞서, 추출된 위상 차이와 수신전력은 목표물 결정의 기준으로 미리 설정된 임계값에 의해서 목표물이 결정된다. 목표물 탐지기준 조건은 다음과 같이 정할 수 있다.

$$|\Delta\phi_i(t)| \geq \phi_{Threshold}^i(t) \text{ AND } |P_i(t)| \geq P_{Threshold}^i(t) \quad (8)$$

이때, $\phi_{Threshold}^i(t)$ 와 $P_{Threshold}^i(t)$ 는 각각 위상차이와 수신전력에 대한 임계값을 나타낸다. 임계값은 제조현장의 환경과 목표물의 대상에 의해서 결정되며, 특정 조건을 만족하는 경우, 목표물에 해당되는 탐지 신호를 출력하도록 설정하는 기준이다.

4. 객체 탐지

최종적으로 목표물 탐지를 결정하는 단계로 추출된 위상 차이와 수신전력에 의해서 미리 설정된 임계값에 의해서 목표물이 결정된다.

위의 단계를 통해 계산된 결과가 임계값을 초과하면 스마트안전시스템은 객체(목표물)이 있다고 결정한다. 이때, 목표물이 없는 경우와 목표물이 있는 경우를 구분하여 객체가 존재하는지 여부를 결정하게 된다. 레이다는 고정된 상태에서 객체의 존재를 탐지할 수 있도록 설계되었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 레이다 신호는 객체에서 반사되어 오는 신호에 의해서 결정된다. 따라서, 움직이지 않는 상태에서의 신호 변화는 매우 작은 편이지만, 위상 및 주파수 변화를 통해객체를 식별할 수 있다.

Fig. 5에서 Fig. 7은 레이다센서를 통해서 객체여부와 레이다 이동유무에 따른 레이다 출력 신호를 실험한 결과를 나타낸다. 이때, Fig. 5는 레이다 센서는 고정된 상태에서 이동 객체의 여부에 따라서 시간스펙트럼의 I/Q채널 비트신호와 비트신호의 주파수스펙트럼 특성을 보여주는 그림이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, 객체가 존

재하는 경우, 주파수 스펙트럼상의 대역폭이 넓어지는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 객체의 이동속도가 4km/hr이하의 매우 느린 속도에 의한 주파수천이에 의한 영향인 것으로 생각된다.

Fig. 6는 고정된 레이다센서에 보행하는 작업자에 의한 비트신호, 위상변화, 그리고 주파수스펙트럼과 위상차이를 보여주는 그림이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 작업자의 일정한 보행속도에 의해서 시간에 따른 위상특성과 일정한 범위의 위상차이가 발생함을 확인할 수 있다.

```
# Setting thresholds
P_threshold = ... # Received power threshold
P_threshold_low = ... # Low received power threshold (for non-metal objects)
P_threshold_high = ... # High received power threshold (for metal objects)
phi_threshold_low = ... # Low phase change threshold (for stationary objects)
phi_threshold_high = ... # High phase change threshold (for slow-moving objects)
sigma_phi_threshold = ... # Phase change standard deviation threshold
velocity_threshold = ... # Velocity threshold
velocity_threshold_low = ... # Low velocity threshold (for slow objects)
velocity_threshold_high = ... # High velocity threshold (for fast objects)

# Measurement calculations
P_received = I(t)**2 + Q(t)**2
delta_phi = calculate_phase_difference(t)
sigma_phi = calculate_phase_variance(t)
velocity = calculate_velocity(t)

# Object determination
if P_received > P_threshold:
    if abs(delta_phi) <= phi_threshold_low:
        print("Stationary object detected")
    elif abs(delta_phi) > phi_threshold_high:
        if sigma_phi > sigma_phi_threshold:
            print("Human detected")
        elif velocity < velocity_threshold:
            print("Slow moving object detected")
        else:
            print("Unknown moving object")
    else:
        print("Unknown object")
else:
    print("No object detected")
```

Fig. 4 Flowchart of Target Decision

Fig. 7은 이동하는 레이다센서와 이동한 속도로 이동하는 객체에 의한 비트신호, 위상변화, 그리고 주파수스펙트럼과 위상차이를 보여주는 그림이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이, 레이다 센서의 진동과 객체의 이동속도에 의한 주파수천이에 의해서 시간에 따른 비선형적 위상변화와 상당한 폭의 위상변화율을 갖는 특성을 확인할 수 있다.

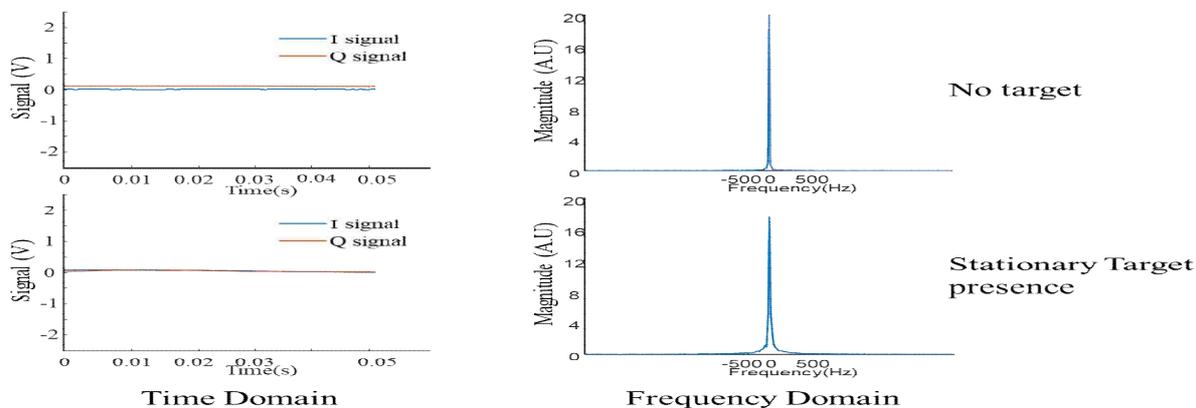


Fig. 5 Radar Processing Output for Target Detection

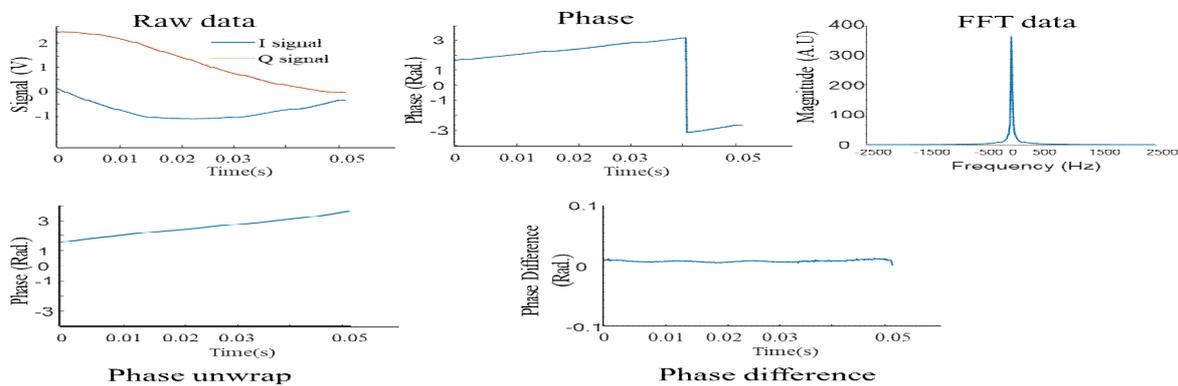


Fig. 6 Radar Processing Output for a Slowly Moving Target Detection

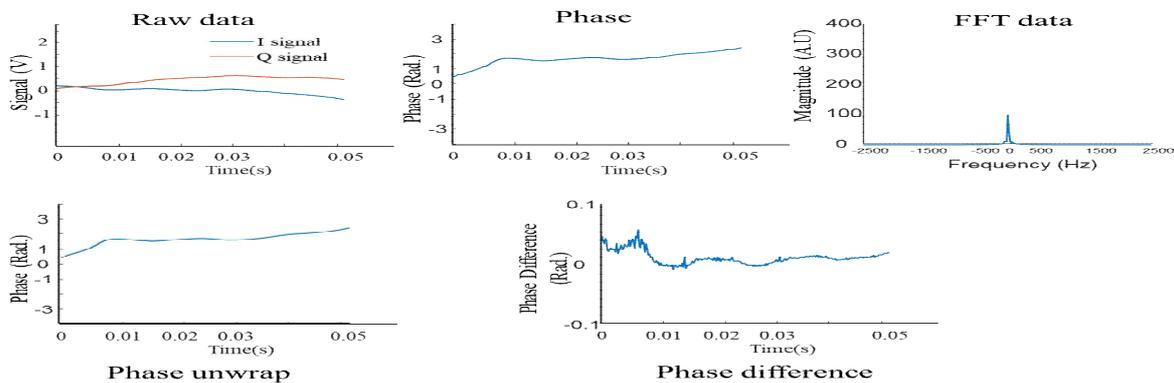


Fig. 7 Radar Processing Output for Moving Target Detection in Vibrating Environments

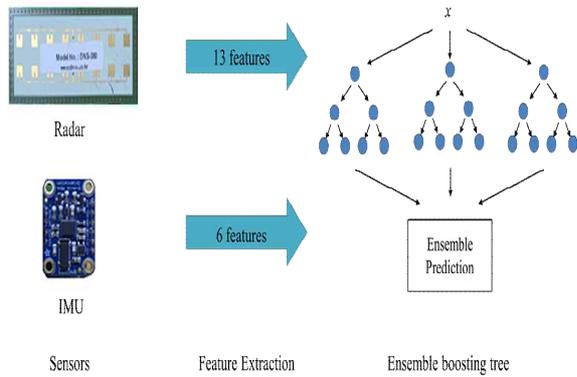


Fig. 8 Ensemble Boosting Tree based Worker Detection

Fig. 8은 스마트 안전시스템 레이더의 작업자 탐지용 앙상블 부스팅 트리 기반 인식 알고리즘을 나타내고 있다. 앙상블 부스팅 트리는 여러 개의 약한 학습기(weak learner)를 결합하여 강력한 예측 모델을 만드는 방법이다. 각 학습기는 순차적으로 학습되며, 이전 학습기가 잘못 예측한 데이터를 더 잘 예측하도록 다음 학습기에 가중치가 부여한다. 이러한 방식으로 모델의 정확도를 점진적으로 높이는 것이 특징이 있다.

Table 1은 본 스마트안전시스템용 머신러닝 모델에 사용된 특징점 (Feature Vector)을 나타낸다. 이때, 특징점은 총 19종으로 구성되었으며, 레이더 특징점은 13종, IMU 특징점은 6종으로 사용하였다. 이때, 13종의 레이더 특징점은 주로 주파수 변화, 신호의 위상 및 에너지를 기반으로 객체의 움직임과 상태를 분석하는 데 사용된다. 특히 위상과 주파수의 변화는 레이더와 작업자를 포함한 객체의 움직임을 파악하는 데 매우 유용하게 활용될 수 있다. 그리고, 6종의 IMU 특징점은 레이더의 미세 진동성분과 같은 미세 움직임을 감지하기 위한 것으로, 가속도와 각속도를 측정하여 레이더에 미치는 미세 진동 또는 움직임을 분석하는 데 활용된다. 본 논문에서는 3종의 시나리오에 따라서 데이터를 구성하였다. 즉 시나리오 1(Case 1)은 객체 부재 상태에서 레이더의 고정된 상태인 경우이고, 시나리오 2(Case 2)는 레이더와 객체 모두 움직임이 있는 경우이고, 그리고 시나리오 3(Case 3)은

레이더의 미세 움직임 또는 진동이 있는 경우 객체가 정지 상태인 경우로 구분하였다. 세 가지 시나리오 상황에 따라서 시나리오 1, 시나리오 2와 시나리오 3의 데이터세트수는 각각 272개, 501개 그리고 71개의 데이터세트로 총 844개의 데이터세트를 구성하고, 학습 및 인식하는데 사용하였다.

Table 1 The Radar and IMU Feature Vectors

Sensors	Feature Vectors
Radar	Phase average Phase variance Phase difference average Phase difference variance Positive frequency energy Positive frequency average Positive frequency variance Negative frequency energy Negative frequency average Negative frequency variance Frequency energy Frequency average Frequency variance
IMU	x-axis acceleration y-axis acceleration z-axis acceleration x-axis angular velocity y-axis angular velocity z-axis angular velocity

Fig. 9은 산업제조현장용 스마트안전시스템을 위한 레이더 및 IMU 센서를 통한 작업자 탐지를 구현한 수행시간을 보여주는 그림이다. 수행 시간은 레이더의 비트신호를 입력해서 레이더의 탐지결과를 출력하는 데 걸리는 시간은 대략 2.8ms로 확인되었다.

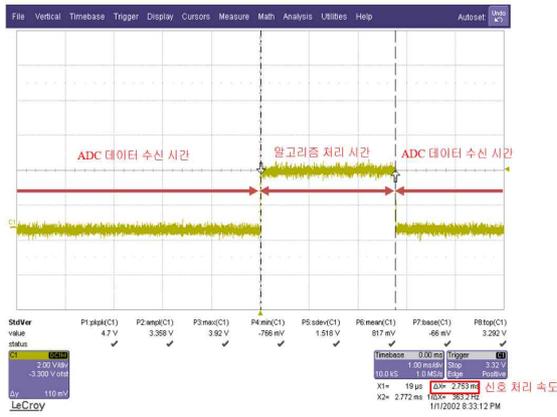


Fig. 9 Processing Time for Worker Detection

5. 실험결과

5.1 실험 장치

Fig. 10은 스마트 안전시스템의 객체 탐지 성능을 평가하는 실험장치를 나타내고 있다. 레이더의 탐지 영역을 고려하여 일반적으로 방위각 120° 정도의 탐지 영역을 커버할 수 있는 위치를 선택하였다. 또한, 고정된 위치에 하우징을 단단히 고정하고 진동이나 외부 충격에 영향을 받지 않도록 견고하게 설치하였다. 레이더를 적절히 장착하고, 회전 및 높이 조절이 가능한 테이블에 레이더를 장착하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 무반향 챔버 실험 환경에서 24GHz CW 레이더가 사용되었으며, 대략 30cm x 40cm x 20cm 크기의 종이박스, 작업자의 보행, 정지 그리고 빈 공간 등 여러 가지 작업상황을 고려하였다. 실험에 사용된 레이더는 1.2m에서 5m 이내의 높이로 설치되었다. 이때, 레이더 높이는 수직 이동 스테이지와 회전 이동 스테이지에 의해서 자동으로 조정할 수 있도록 하였다. 레이더 센서와 IMU 센서는 수직 이동 스테이지위의 센서 거치대에 동시에 장착된다. 이때, IMU센서는 움직이는 사람 또는 주변의 이동객체에 의한 미세한 진동을 감지할 수 있도록 하였다.

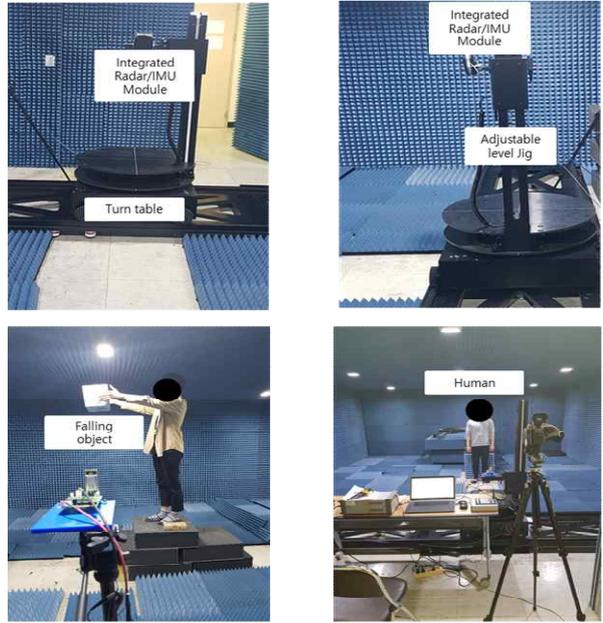


Fig. 10 Experimental setup for Object & Worker Detection

5.2 작업자 검출

작업자 검출 알고리즘에서 작업자를 감지하는 실험결과와 Fig. 11과 같다. 스마트 안전장치에서 작업자를 감지하는 탐지율은 92.8%이상으로 우수함을 확인할 수 있다.

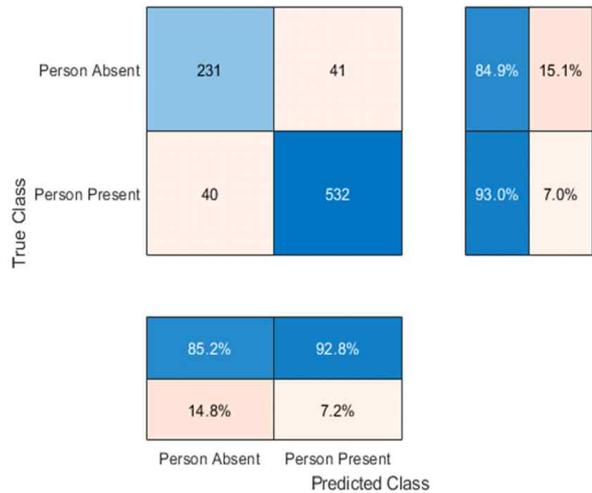


Fig. 11 Prediction Results for Worker Detection

5.3 작업자 탐지 성능

Fig. 12에서 볼 수 있는 실험 결과에 따르면 레이더기반 스마트안전시스템은 1.0m에서 15m 범위내에서 이동객체를 탐지할 수 있었다. 최대 탐지 거리는 15m이상의 지점부터 탐지율이 88%로 신호 감쇄에 인한 탐지성능의 열화가 나타남을 알 수 있다. 이러한 실험을 통해서 레이더 및 IMU센서 결합 스마트안전시스템은 산업제조 현장에서 15m 이내의 범위에서 작업자와 이동객체를 효과적으로 탐지함으로써 제조 환경에서 발생할 수 있는 다양한 상황에 대응할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 레이더와 IMU 센서를 결합한 스마트 안전시스템을 이용하여 실내작업 환경하의 우수한 작업자 탐지율을 확보할 수 있었다.

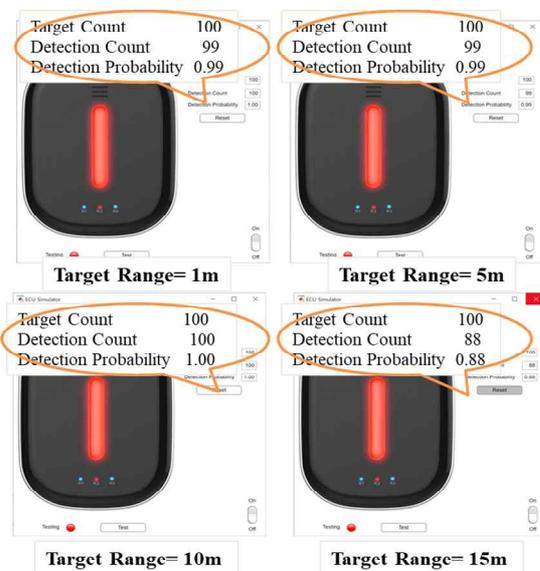


Fig. 12 Detection Results for Worker

6. 결론

산업 제조 현장에서 발생할 수 있는 사각지대는 작업자의 안전을 위협하는 중요한 요소 중 하나이다. 이를 해결하기 위해 다양한 센서를 이용한 스마트 안전시스템이 개발되고 있으며, 특히 레이더를 활용한 연구가 활발히 진행되고

있다. 본 논문에서는 제조 현장의 자동화 로봇 주변의 가려진 작업자를 감지하기 위해서 저가형 레이더와 IMU센서를 결합하고, 기계 학습(ML) 모델을 이용하여 작업자를 탐지하는 기술을 제안하였다.

일반적으로 CW 레이더 단독 센서는 진동 및 미세한 움직이는 제조 현장의 로봇과 작업자를 명확하게 식별하는 데 상당한 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 IMU 센서와 레이더를 결합함으로써 객체의 움직임 방향과 속도를 측정하고, 이를 통해 탐지 정확도를 개선하였다. 본 논문에서 개발된 스마트 안전 장치는 24GHz CW 레이더와 6축 IMU 센서로 구성되며, 레이더 특징 벡터와 IMU 특징 벡터를 추출하고, 기계 학습 모델을 통해서 작업자를 감지한다.

스마트 안전시스템에 적용된 기계 학습 모델은 여러 개의 단일 분류기를 연결하고 이를 강화하는 앙상블 부스팅 트리를 기반으로 설계하였다. 실험 결과에 의하면, 레이더와 IMU에서 각각 13개와 6개의 특징점을 사용함으로써, 탐지범위 1m에서 15m에서 92.8% 이상의 작업자 탐지율을 확보하였다.

본 논문은 산업 제조 로봇의 운용 중 발생할 수 있는 안전사고를 예방하기 위한 기술적 기반을 제공하며, 다중 센서와 기계 학습을 활용한 감지 성능 개선을 확인하고, 작업자를 정확하게 인식할 수 있었다. 향후 연구에서는 다양한 제조 환경에서의 실시간 감지 성능 향상과 더불어 작업자 상황인식 시스템의 상용화를 위한 추가적인 연구와 최적화가 더 필요할 것으로 생각된다.

References

Ajakwe, S. O., Ihekoronye, V. U., Kim, D.-S. and Lee, J. M. (2022). DRONET: Multi-tasking Framework for Real-time Industrial Facility Aerial Surveillance and Safety, *Drones*, 6(2), 46. <https://doi.org/10.3390/drones6020046>

Ergun, S., Han, D. G. and Kim, J. S. (2021).

- A Unified Perception Benchmark for Capacitive Proximity Sensing towards Safe Human-robot Collaboration (HRC), *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 30–Jun. 05, Xi'an, China, pp. 3634–3640. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9561224>
- Yeo, J., Lee, J. and Ryu, J. T. (2024). Study on Effects of Separation Distance between Flat Cover and Radar for 24 GHz Band Radar, *Journal of Korea Society of Industrial Information Systems*, 29(2), 27–33. <http://dx.doi.org/10.9723/jksii.2024.29.2.027>
- Kim, B., Kim, S. and Lee, J. (2018). A Novel DFT-Based DOA Estimation by a Virtual Array Extension Using Simple Multiplications for FMCW Radar, *Sensors*, 18(5), 1560–1576. <https://doi.org/10.3390/s18051560>
- Kim, S., Kim, B. and Lee, J. (2017). Low-complexity Spectral Partitioning Based Music Algorithm for Automotive Radar, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 23(4), 33–38. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.23.4.18719>
- Linder, T., Vaskevicius, N., Schirmer, R. and Arras, K. O. (2021). Cross-modal Analysis of Human Detection for Robotics: An Industrial Case Study, *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sep. 27–Oct. 01, Prague, Czech Republic, pp. 971–978. <https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636158>
- Liu, G., Li, X., Xu, C., Ma, L. and Li, H. (2023). FMCW Radar-based Human Sitting Posture Detection, *IEEE Access*, 11, 102746–102756. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3312328>
- Rey-Merchán, M. del C., Gómez-de-Gabriel, J. M., Fernández-Madrigal, J. A. and López-Arquillos, A. (2020). Improving the Prevention of Fall from Height on Construction Sites through the Combination of Technologies, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 28(1), 590–599. <https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1815393>
- Song, S., Kim, B., Kim, S. and Lee, J. (2021). Detection of Stationary and Moving Obstacles within a Critical Safety Zone Using 24GHz Multiple Radars and IMU Sensors in a Safety-assisted Module for Heavy Construction Vehicles, *2021 KSAE Annual Conference & Exhibition*, Nov. 17, Yeosu, Korea.
- Shen, Z., Nunez-Yanez, J. and Dahnoun, N. (2024). Advanced Millimeter-wave Radar System for Real-time Multiple-human Tracking and Fall Detection, *Sensors*, 24(11), 3660. <https://doi.org/10.3390/s24113660>
- Shi, T., Guo, P., Wang, R., Ma, Z., Zhang, W., Li, W., Fu, H. and Hu, H. (2024). A Survey on Multi-sensor Fusion Perimeter Intrusion Detection in High-speed Railways, *Sensors*, 24(17), 5463. <https://doi.org/10.3390/s24175463>
- Skog, M. (2024). *Human Detection in Low-visibility Industrial Settings Using Automotive 4D Radar and Deep Learning*, Dissertation, Graduate School of Örebro University, Örebro, Sweden.
- Sommer, P., Rigner, A. and Zlatanski, M. (2020). Radar-based Situational Awareness for Industrial Safety Applications, *2020 IEEE Sensors*, Oct. 25–28, Rotterdam, Netherlands, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278603>
- Song, S., Kim, S., Kim, B., Kweon, H. and Lee, J. (2022). Machine Learning in a Human Detection based on a Multi-radar and IMU Sensor for a Blind Spot Detection of a Smart Construction Vehicle, *ISITA 2022*, S5–16.



송 승 언 (Seungeon Song)

- 정회원
- 제주대학교 전자공학과 공학사
- 제주대학교 전자공학과 공학석사
- (현재) DGIST 미래자동차연구부 연구원

• 관심분야: 레이더, 신호처리



이 중 훈 (Jonghun Lee)

- 종신회원
- 성균관대학교 전자공학과 공학사
- 성균관대학교 전기전자및컴퓨터공학과 공학석사
- 성균관대학교 전기전자 및컴퓨터공학과 공학박사

- (현재) IEEE Senior Member
- (현재) DGIST 책임연구원 및 첨단레이더연구소장
- (현재) DGIST 대학원 융합전공 교수
- (현재) 대한임베디드공학회 부회장 및 스마트센서 연구회 위원장
- 관심분야: 레이더 신호처리, 레이더 인식 및 검출, 센서 융합, 양자레이더



김 상 동 (Sangdong Kim)

- 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 공학사
- 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 공학석사
- 경북대학교 전자공학과(공학박사)

- (현재) IEEE Senior Member
- (현재) DGIST 미래자동차연구부 책임연구원
- (현재) DGIST 대학원 융합전공 부교수(겸)
- 관심분야: 우주/항공/국방용 레이더, 레이더 신호처리 알고리즘, 다중 센서 인식 등



김 봉 석 (Bong-Seok Kim)

- 영남대학교 정보통신공학과 공학사
- 영남대학교 정보통신공학과 공학석사/공학박사
- (현재) DGIST 미래자동차연구부 선임연구원

• 관심분야: 레이더신호처리



류 정 탁 (Jeong Tak Ryu)

- 종신회원
- 1999년 오사카대학교 전자공학과 공학박사
- 2000년 3월 - 현재 대구대학교 전자전기공학부 교수

• 관심분야: 나노기술 및 센서시스템