

저시야 재난 환경에서의 실시간 객체 탐지 시스템

이준호, 김지후, 김승희, 이순형, 배현진, 이성주*

세종대학교 전자정보통신공학과, *세종대학교 AI융합전자공학과 및 지능형드론융합전공

junho@itsoc.sejong.ac.kr, jeehoo@itsoc.sejong.ac.kr, seunghee@itsoc.sejong.ac.kr, sunhyeong@itsoc.sejong.ac.kr,
hyunjin@itsoc.sejong.ac.kr, *seongjoo@sejong.ac.kr

A Real-time Time Object Detection System for Low-Visibility Disaster Environments

Junho Lee, Jeehoo Kim, Seunghee Kim, Sunhyeong Lee, Hyunjin Bae Seongjoo Lee*

Dept. Electronic Information Communication Engineering, Sejong University.,

*Dept. of AI Convergence Electronic Eng. and Dept. of AI Convergence Eng. of Intellignet Drone, Sejong University

요 약

본 논문은 시야 확보가 어려운 재난·구조 환경에서 사람의 위치를 실시간으로 인지하기 위한 mmWave 레이더 기반 실시간 객체 탐지 시스템을 제안한다. 기존 카메라 기반 인식 시스템은 연기, 조명 변화, 가시성 저하 환경에서 성능이 급격히 저하되는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 IWR6843AOP mmWave 레이더로부터 획득한 Type-Length-Value (TLV) 데이터를 Field Programmable Gate Array (FPGA)에서 실시간으로 처리하고, 이동 특성 기반의 객체 구별을 통해 사람 존재 여부를 판단한다. 또한 UART 수신부터 데이터 파싱, 이벤트 판단, 음성 피드백 생성까지의 전 과정을 온보드에서 수행하여 외부 PC 의존성을 제거하였다. 아울러 레이더-카메라 캘리브레이션을 통해 레이더 검출 결과를 시각 좌표계로 정합하고, 이를 기반으로 검출 결과의 신뢰성을 정량적으로 검증하였다. 실험 결과, 제안한 시스템은 임베디드 환경에서 안정적인 실시간 동작과 즉각적인 사용자 피드백 제공이 가능함을 확인하였으며, 향후 웨어러블을 구조 장비 및 센서 융합 시스템으로의 확장 가능성을 보여준다.

I. 서 론

재난 및 긴급 구조 현장은 연기, 분진, 화염, 정전 등으로 인해 가시성이 크게 저하되며, 이러한 환경에서 사람의 위치를 신속하게 파악하는 것은 구조 인력과 피구조자의 안전 확보에 필수적이다. 그러나 카메라 기반 객체 탐지 시스템은 광학적 조건에 민감하여 저시야 환경에서 활용에 한계가 있다 [1].

이에 대한 대안으로 mmWave 레이더 기반 객체 인식 기술이 주목받고 있다. mmWave 레이더는 연기와 분진 등에 대한 투과성이 우수하며, 거리 및 속도 정보를 직접 제공함으로써 광학적 환경 변화에 대한 의존도를 낮춘 객체 인식이 가능하다. 다만 기존 레이더 기반 시스템은 외부 PC 의존 또는 오프라인 처리를 전제로 하는 경우가 많아 현장 적용에 제약이 존재한다.

본 논문에서는 저시야 재난 환경에서의 실시간 객체 탐지를 위한 mmWave 레이더 기반 임베디드 시스템을 제안한다. 제안한 시스템은 IWR6843AOP 레이더로부터 획득한 포인트 데이터를 FPGA 기반 Zybo Z7-20 보드에서 실시간으로 처리하여, 온보드에서 객체를 구별하고 사람 존재 여부 및 속도 정보를 산출한 뒤 음성 피드백으로 즉시 제공한다. 또한 레이더-카메라 캘리브레이션 [2]을 통해 레이더 검출 결과를 시각 좌표계로 정합하여 검출 결과의 신뢰성을 정량적으로 검증하였다. 실험 결과, 본 시스템은 저시야 환경에서도 안정적인 실시간 동작이 가능함을 확인하였으며, 재난 구조 현장에서 활용 가능한 착용형 인지 보조 장치로의 적용 가능성을 보여준다.

II. 본 론

2.1 시스템 전체 구조 및 동작 원리

본 연구는 저시야 재난 환경에서 시각 정보에 의존하지 않고 사람의 존

재를 인지하기 위해, mmWave 레이더의 포인트 데이터를 FPGA 기반 임베디드 보드에서 실시간 처리하고 음성 피드백을 제공하는 단독 시스템을 구현한다. 시스템은 외부PC 없이 독립적으로 동작하며, 착용형 장비 적용을 고려한 핸드프리 인터페이스를 목표로 설계되었다.

IWR6843AOP 레이더에서 출력되는 포인트 데이터 및 도플러 정보는 고속 UART를 통해 Zybo Z7-20 보드로 전송된다. 수신된 데이터는 FPGA에서 전처리 및 클러스터링 기반의 객체 판별을 거쳐 사람 존재 여부와 속도 정보를 산출하며, 산출 결과는 음성의 높낮이 기반 매핑을 통해 사용자에게 실시간으로 제공된다. 또한 검출 결과의 신뢰성 검증을 위해 레이더-카메라 캘리브레이션 절차를 포함하며, 카메라 내·외부 파라미터를 추정된 뒤 레이더와 카메라에서 각각 검출·정합하여 레이더 3차원 포인트를 영상 좌표계로 투영함으로써 공간적 일관성을 정량적으로 확인한다.

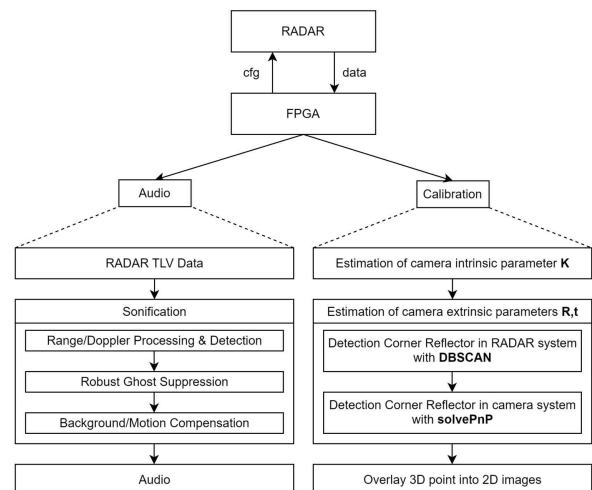


그림 1. 시스템 Flowchart

* 교신저자

2.2 입력 데이터 정의

본 시스템은 IWR6843AOP mmWave 레이더에서 출력되는 TLV 포맷 데이터를 입력으로 사용한다. 레이더는 프레임 단위로 검출 포인트 집합을 제공하며, 해당 데이터는 고속 UART를 통해 FPGA 기반 Zybo Z7-20 보드로 전송된다. 본 연구에서는 포인트 데이터 중 사람 존재 여부 판단에 필요한 3차원 위치 (x, y, z)와 도플러 기반 속도 정보 v 를 추출하여 FPGA에서 파싱 및 전처리를 수행하고, 이후 클러스터링 기반의 객체 판별에 활용한다. 데이터 전송 및 처리는 프레임 주기에 맞추어 수행되며, 실시간 동작을 위해 수신 - 파싱 - 처리의 각 단계는 파이프라인 구조로 구성된다.

2.3 FPGA 온보드 데이터 처리

Zybo Z7-20의 FPGA는 2.2절에서 정의한 포인트 데이터 (x, y, z, v)를 입력으로 받아, 좌표·속도 기반 전처리 후 유효 후보를 구성하고 사람 존재 여부와 속도 정보를 산출한다. 먼저 좌표 및 속도 기반 전처리를 통해 관심 영역 밖의 포인트와 비정상 포인트를 제거하고, 사람 판별에 필요한 후보 집합을 구성한다. 이후 고스트 타깃 및 멀티패스로 인한 오경보를 완화하기 위해 mean-K 기반 필터를 적용하여 신뢰도가 높은 상위 $K\%$ 포인트만을 선택해 후속 판단에 사용한다.

착용형 운용에서는 사용자의 움직임이 도플러 성분에 직접 반영될 수 있으므로, 정적 배경을 기준으로 도플러 오프셋을 추정하여 사용자 이동에 의해 도플러가 과도하게 검출되지 않도록 설계하였다. 최종적으로 사람 존재 여부와 도플러 기반 속도 정보는 음높이 기반 sonification으로 매핑되어 사용자에게 실시간 음성 피드백으로 제공된다.

2.4 캘리브레이션 기반 검증

본 절에서는 저시야 환경에서의 동작 가능성과 착용형 시스템의 신뢰성을 검증하기 위한 참조 기준을 마련하기 위해 수행한 레이더-카메라 캘리브레이션 절차를 설명한다. 먼저 카메라의 내부 파라미터 K 를 추정한 뒤, 코너 리플렉터를 기준 타겟으로 사용하여 레이더 좌표계와 카메라 좌표계 간의 외부 파라미터 (R, t)를 산출한다 [3]. 레이더에서는 코너 리플렉터에 해당하는 포인트 군집을 검출하고, 카메라에서는 타겟의 영상 상 위치를 추정하여 두 센서 관측을 대응시킨다.

추정된 (K, R, t)를 이용해 레이더에서 산출된 3차원 포인트를 영상 평면으로 투영함으로써, 레이더 검출 결과를 시각 좌표계 상에서 일관되게 비교·해석할 수 있는 검증 프레임워크를 구성하였다. 이를 통해 저시야 조건에서도 레이더 기반 검출이 유지됨을 확인하였으며, 센서 정합 기반의 교차 검증을 통해 제안한 시스템의 출력 결과가 일관되게 해석 가능함을 보여 제품 신뢰성을 평가하였다.

III. 실험

3.1 실험 환경

실험은 IWR6843AOP mmWave 레이더와 FPGA 기반 Zybo Z7-20 보드로 구성된 제안 시스템에서 수행하였다. 실험은 일반 환경과 Fog 머신을 이용해 가시성을 저하시킨 저시야 환경에서 각각 진행하여, 환경 변화에 따른 시스템 동작을 비교하였다. 또한 평가 목적에 따라 레이더-FPGA만으로 구성된 단독 운용 조건과 검증을 위해 카메라를 추가 장착한 조건의 두 가지 설정으로 실험을 수행하였으며, 후자의 경우 캘리브레이션을 통해 레이더 검출 결과를 영상 좌표계로 정합하여 검증에 활용하였다.

3.2 실험 결과 및 기준값 도출

제안 시스템의 운용 상황을 정적 (Static), 저속 생존자 (Slow Survivor), 낙하 물체 (Falling Object)의 3가지 시나리오로 구분하여 실험을 수행하였다. 각 시나리오에 대해 레이더 포인트로부터 산출되는 속도, 트랙 지속 시간, 높이 변화, 클러스터 점 개수, 가속도를 측정하였고, 이를 바탕으로 시나리오 판별에 필요한 기준값을 설정하였다. 표 1은 각 시나리오별 임계 조건과 실험에서 관측된 대표 측정값을 요약한 것이다.

정적 시나리오에서는 속도가 매우 작고 높이 변화가 작게 유지되는 특성이 관측되어, 배경 상태로 안정적으로 분류될 수 있음을 확인하였다. 저속 생존자 시나리오에서는 일정 시간 이상 유지되는 트랙과 함께 사람 높이에 해당하는 평균 높이, 그리고 충분한 포인트 군집이 관측되어 사람 후보의 군집 특성을 확인하였다. 낙하 물체 시나리오에서는 짧은 지속 시간 동안 높은 속도와 큰 가속도가 나타나며, 높이 변화 조건과 결합할 경우 낙하 물체를 명확히 구분할 수 있음을 확인하였다.

표 1. 시나리오 판별을 위한 파라미터 기준값

| | Doppler [v] [m/s] | Lifetime [s] | Height [z] [m] | Cluster [pts] | Acceleration [m/s ²] |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|-------------------------------------|
| Static | $\bullet < 0.10$ (0.0) | $\bullet > 0.5$ ~ 1.0 | $\bullet < 0.5$ (0.02) | - | - |
| Slow Survivor | $0.10 \leq \bullet$ < 0.70 (0.0) | $\bullet \geq 1.0$ | $0.0 \leq \bullet$ ≤ 1.0 (0.42) | $\bullet \geq 10$ ~ 20 (14) | - |
| Falling Object | $\bullet > 3.00$ | $\bullet \leq 0.5$ ~ 0.7 | $\Delta z > 1.5$ (3.0) | - | $\bullet \geq 2.0$ ~ 3.0 (9.4) |

IV. 결론

본 논문에서는 저시야 재난 환경에서 사람 존재 여부를 실시간으로 인지하기 위한 mmWave 레이더-FPGA 기반 임베디드 시스템을 제안하였다. 제안 시스템은 레이더 포인트 데이터를 온보드에서 처리하여 고스트/멀티패스 및 사용자 움직임 영향을 완화하고, 도플러 기반 정보를 음높이로 변환해 외부 PC 없이 청각 피드백을 제공한다. 정적 상태·저속 생존자·낙하 물체 시나리오 실험을 통해 판별 기준값을 도출하였으며, 레이더-카메라 캘리브레이션 기반 교차 검증으로 저시야 조건에서도 시스템 출력의 신뢰성을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2023R1A2C1006340)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동체원천기술개발사업 (No. 2023M3C1C1A01098414)을 통해 수행된 연구이며, 검증을 위한 EDA 관련 툴은 IDEC의 지원을 받았다.

참고 문헌

- [1] W. Wang et al., "Multiple Attn. Mech. for Camera - Radar Fusion Obj. Det.," IEEE Trans. Veh. Technol., 2025. doi:10.1109/TVT.2025.3531379
- [2] Z. Zhang, "A Flexible New Tech. for Camera Calib.," IEEE Trans. PAMI, 2000. doi:10.1109/34.888718
- [3] Kim, J., Kim, S., Lee, J., Lee, S., & Lee, S. (2025-06-24). An iterative refinement algorithm for extrinsic parameter estimation in FMCW RADAR-camera alignment under low visibility environments. 대한전자공학회 학술대회, 제주.