

보행자 안전 시스템을 위한 FMCW 레이다 기반 객체 탐지 기법

FMCW Radar-Based Vehicle Detection Techniques for Pedestrian Safety Systems

문 경 록 · 김 해 정 · 양 종 렬

Kyung-Rok Mun · Hae-Jung Kim · Jong-Ryul Yang

요 약

보행자 안전을 위해 접근 차량을 효율적으로 식별할 수 있는 FMCW 레이다 기반 감지 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 도플러 기반 속도 추정, 전력 스펙트럼 밀도 분석, 그리고 칼만 필터를 결합한 알고리즘을 통해 차량과 보행자를 효과적으로 구분하며, 높은 탐지 신뢰도와 안정성을 확보하였다. 또한, 객체의 이동 방향과 경로 추적 정보를 이용하여 보행자에게 접근하는 차량과 이탈하는 차량을 실시간으로 판별하고, 보행자 안전에 영향을 줄 수 있는 접근 차량에 대해서만 모니터링 정보를 제공한다. 상용 77 GHz 대역 FMCW 레이다를 기반으로 구현된 제안 시스템은 최대 4대의 차량을 동시에 식별하였으며, 98.03%의 검출 정확도와 5.88%의 오탐률을 달성하였다.

Abstract

An FMCW radar-based detection system was proposed to identify approaching vehicles and enhance pedestrian safety. The proposed system combined Doppler-based velocity estimation, the power spectrum density analysis, and a Kalman filter algorithm to effectively distinguish between vehicles and pedestrians, thereby achieving a high detection reliability. In addition, by analyzing the movement direction and trajectory of the detected objects, the system classified vehicles approaching or departing from pedestrians in real time and provided the monitoring information only for vehicles that might pose potential risks to pedestrians. Implemented using a commercial 77 GHz FMCW radar module, the proposed system successfully distinguished up to four vehicles simultaneously, achieving a detection accuracy of 98.03% and false alarm rate of 5.88%.

Key words: FMCW Radar, Pedestrian Safety, Vehicle Detection, Power Spectral Density, Kalman Filter

I. 서 론

최근 자율주행 기술과 첨단 운전자 지원 시스템(ADAS, advanced driver assistance system)의 발전에 따라 차량 중심의 감지 및 인식 기술은 빠르게 고도화되고 있

다. 반면, 보행자 입장에서 위험을 사전에 인지하고 회피할 수 있도록 지원하는 보행자 중심의 감지 기술은 상대적으로 미흡한 수준에 머물러 있다. 특히, 보행 중 스마트폰을 사용하는 보행자의 약 69.6%가 이어폰을 착용하고 있으며, 이들은 차량 경적을 1 m 거리까지 접근해야 이를

건국대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronics Engineering, Konkuk University)

· Manuscript received October 22, 2025 ; Revised November 4, 2025 ; Accepted November 17, 2025. (ID No. 20251022-129)

· Corresponding Author: Jong-Ryul Yang (e-mail: jryang@konkuk.ac.kr)

인지할 수 있는 것으로 보고되었다^{[1][2]}. 이는 보행자의 인지 능력에 의존하는 기존 방식만으로는 보행자 안전을 효과적으로 확보하기 어렵다는 점을 시사한다. 따라서 외부 환경에서 차량의 접근을 실시간으로 감지하고, 위험 상황 발생 전 보행자에게 경고를 제공할 수 있는 능동형 보행자 안전 시스템의 필요성이 커지고 있다.

기존의 보행자 안전 보조 시스템은 주로 카메라 기반 센서와 인공지능을 활용한 영상 인식 기술에 의존하고 있다. 그러나, 이러한 접근 방식은 대규모 학습 영상 데이터가 필요하며, 야간이나 악천후와 같은 열악한 환경에서 인식 성능이 급격히 저하되는 한계를 가진다^[3]. 또한 영상 수집 과정에서 발생할 수 있는 프라이버시 침해 문제로 인해 실제 공공장소나 보행 환경에서의 적용은 제한적이다^[4]. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 주파수 변조 연속파(FMCW, frequency-modulated continuous wave) 레이다를 이용한 비전 대체 감지 기술이 주목받고 있다. 레이다는 조도나 날씨에 영향을 받지 않으며, 거리·속도·방향 정보를 실시간으로 획득할 수 있는 장점을 가진다^[5]. 차량과 보행자를 구분하기 위한 FMCW 레이다 기반 연구로서, 수신 전력 밀도의 물리적 차이를 활용한 분류 기법이 제시된 바 있다^[6]. 또한, 연속 프레임 간의 신호 세기 변화를 분석하여 객체 이동의 특성을 분리·추출함으로써 판단 정확도를 향상시키는 방법도 보고되었다^[7]. 최근에는 레이다 반사 신호를 거리-도플러 맵(RDM, range-doppler map) 또는 거리-시간 영상으로 변환한 후, 이미지 처리 및 딥러닝 분석을 통해 객체를 구분하는 연구도 활발히 진행되고 있다^[8]. 그러나 이러한 선행 연구는 빠르게 이동하는 객체에 의해 발생하는 수신 전력 밀도의 변화를 효과적으로 보상하지 못하며, 두 객체 간 거리가 급격히 좁혀지는 경우에 위급 상황을 실시간으로 인지하기에는 한계가 있다는 문제점을 갖는다.

본 논문에서는 별도의 학습 과정 없이 경량화된 알고리즘만으로 실시간 객체 분류를 수행하고, 이를 기반으로 보행자에게 접근하는 차량 정보를 제공할 수 있는 FMCW 레이다 기반 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 단일 프레임 내 전력 스펙트럼 밀도(PSD, power spectral density) 차이 분석을 통해 연산 부하를 크게 줄이면서 고속 이동 객체의 실시간 구분을 가능하게 하고, 칼

만 필터(Kalman filter) 기반 추적 알고리즘을 적용하여 탐지 안정성을 향상시킨다. 또한 차량의 속도 부호와 이동 궤적 정보를 이용해 보행자에게 접근 중인 차량을 실시간으로 판별하고, 접근 차량 방향의 디스플레이에 위험 정보를 출력함으로써, 보행자가 실제로 위협받은 상황에서 선별적이고 즉각적인 경고를 받을 수 있도록 한다.

II. 제안하는 보행자 식별 기법

제안하는 알고리즘은 그림 1과 같이 FMCW 레이다로부터 RDM을 생성하여 필터를 거친 뒤, 속도와 PSD를 이용하여 차량과 보행자를 분류하고 칼만 필터 기반으로 추적과 안정성을 더한 뒤 접근 여부 판별의 과정을 거친다.

2-1 FMCW 레이다 기반 거리 및 속도 추정

수신된 IQ 데이터 대상으로 먼저 거리 방향에 대해 1차 FFT를 수행한 후, 속도 방향(시간 축 간 반복 칩)으로 2차 FFT를 적용한다. 이를 통해, 거리와 속도 성분이 포함된 그림 2와 같은 RDM을 생성한다.

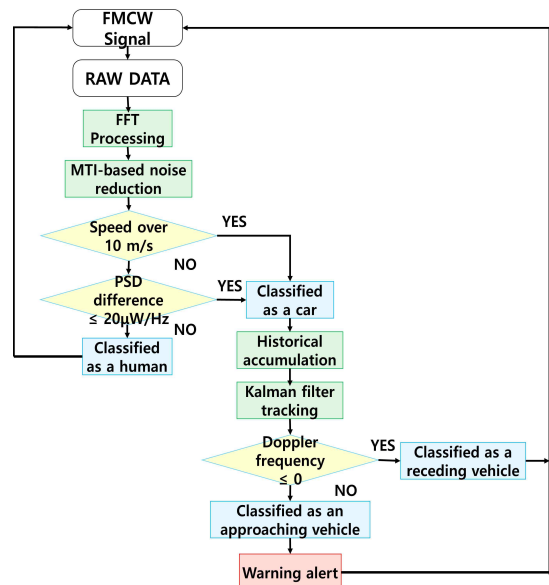


그림 1. FMCW 레이다 기반 접근 차량 식별 시스템의 신호처리 플로우 차트

Fig. 1. Signal processing flowchart of the proposed FMCW radar-based approaching vehicle identification system.

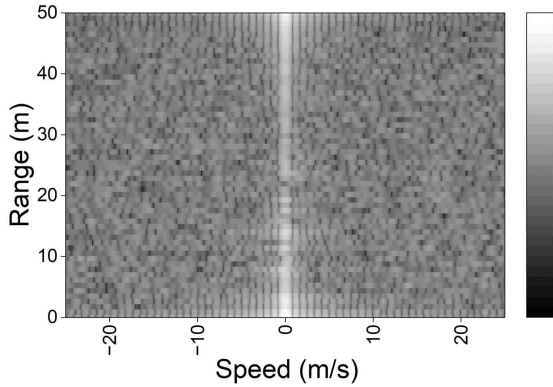


그림 2. 객체가 존재하지 않는 실험 환경에서의 거리-도플러 맵 측정 결과
 Fig. 2. Measured range-Doppler map in an environment without any target object.

2-2 거리 보정 및 잡음 제거

거리에 따라 감쇠되는 수신 신호의 크기를 레이다 방정식에 따라 $1/R^4$ 로 보정한 후, 탐지 객체가 존재하지 않는 환경에서 획득한 RDM은 그림 2와 같다. 탐지 객체가 없으므로, 그림 2에서는 유의미한 반사 신호가 관찰되지 않으며, 오직 0 m/s 부근에서 신호 세기가 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이때, 신호 세기가 특정 거리에서 국소적으로 증가하지 않고 거리 전반에 걸쳐 거의 일정한 크기를 보이는 점으로 미루어 보아, 이는 정지 클러터에 의한 반사에 의한 것이 아니라 시스템 내부 요인에 의한 신호로 판단된다. 이러한 신호는 플리커 잡음과 레이다 칩셋의 DC 오프셋이 결합되어 형성된 시스템 고유 잡음 특성으로 해석할 수 있다. 이후, 실제 도로 환경에서 발생하는 정적 클러터와 배경 노이즈를 제거하기 위해 지수 이동 평균(EMA, exponential moving average) 기반의 배경 제거 기법을 적용하였으며, 이를 통해 동적인 객체의 반사 신호만 남도록 하여 이후 단계의 검출 정확도를 향상시켰다.

객체 존재 여부는 FFT 크기 임계값(threshold)에 의해 결정될 수 있다. 이는 객체에 의한 거리 및 속도 성분의 신호가 잡음 성분보다 높은 크기를 갖는다는 일반적인 경향에 근거한 것으로, 임계값 이상의 신호만을 효과적으로 객체 탐지에 이용할 수 있다. 레이다에서 획득된 FFT

선형 크기 M 은 다음의 식 (1)을 통해 수신 전력으로 변환될 수 있다.

$$P_{dBm} = 20\log(M) - G_{RX} - 10\log(N_R \times N_D) - C_{ADC} \tag{1}$$

여기서 G_{RX} 는 수신단 이득, N_R 과 N_D 는 각각 거리 및 도플러 축에서의 FFT 포인트 수, C_{ADC} 는 디지털 신호 레벨을 물리적 전력으로 변환하는 값으로 이 값은 16-bit ADC의 이론적 동적 범위에서 FFT 윈도우 함수 적용에 따른 에너지 손실을 보정한 근사치로 본 시스템에서는 95 dB이다^[9]. 2차선 도로인 실험 환경에서 측정된 그림 3의 FFT 결과는 잡음과 객체 반사 신호가 명확히 구분되어 나타났으며, 이를 기반으로 객체 영역의 경계에 해당하는 -80.9 dBm을 임계값으로 설정하였다.

2-3 속도 기반 차량 1차 분류

전처리가 완료된 RDM에서, 객체의 속도 절댓값이 10 m/s를 초과하는 경우 보행자일 가능성이 매우 낮다고 판단하여 해당 객체를 차량으로 직접 분류한다. 이 기준값은 우사인 볼트가 2009년 베를린 세계육상선수권대회에서 세운 100 m 세계 신기록(9.58초)의 평균 속도인 약 10.44 m/s를 기준으로 하였다^[10]. 이 분류는 도플러 효과에 기반한 속도 정보에 따라 수행되며, 빠른 이동체만을 우선적으로 차량으로 판단하는 1차 고속 필터링 역할을 수행한다.

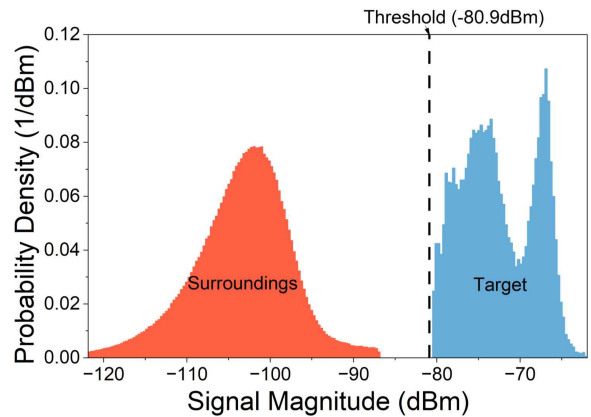


그림 3. FFT 크기 히스토그램
 Fig. 3. FFT magnitude histogram.

2.4 PSD 기반 차량/보행자 분류

속도 절댓값이 10 m/s 이하인 객체는 보행자일 가능성이 있으므로, 추가적인 분류 기준이 필요하다. 이를 위해 상향 및 하향 신호 간의 PSD 차이를 이용한 필터링 기법을 적용하였다.

FMCW 레이더는 상향 및 하향 칩 신호를 교차적으로 송신하며, 같은 물체라도 그 반사 특성은 두 칩 간에 차이를 보일 수 있다. 차량은 일반적으로 금속 재질로 인해 반사가 균일하게 발생하는 반면, 보행자는 생체 조직 및 복잡 상태에 따라 반사가 비균일하게 나타난다. 이 특성을 활용하여, 동일한 위치에서 상향/하향 칩에 대해 계산한 전력 스펙트럼의 절댓값 차이가 작은 경우를 차량으로, 큰 경우를 보행자로 판단한다^[11].

이때, 차량을 구분하는 임계값을 설정하기 위해, 본 연구에서는 실제 수집된 차량 데이터의 PSD 차이값을 통계적으로 분석하였다. 그림 4는 2차선 도로인 실험환경에서 얻은 데이터의 누적 분포 함수를 보여준다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 전체 차량 데이터의 정확히 90%가 20 $\mu\text{W}/\text{Hz}$ 값 이하에 분포하는 것을 확인하였다. 이는 선행 연구에서 제안된 값과 일치하는 결과로, 본 시스템에서도 20 $\mu\text{W}/\text{Hz}$ 가 10%의 예외적인 아웃라이어(outlier)를 제외한 대부분의 차량을 탐지하는 통계적으로 유효한 임계값임을 입증한다^[6]. 레이더의 구조적 특성과 실제 환경 반사 특성에 기반한 제안 기법은 보행자와 차량 간의 구분

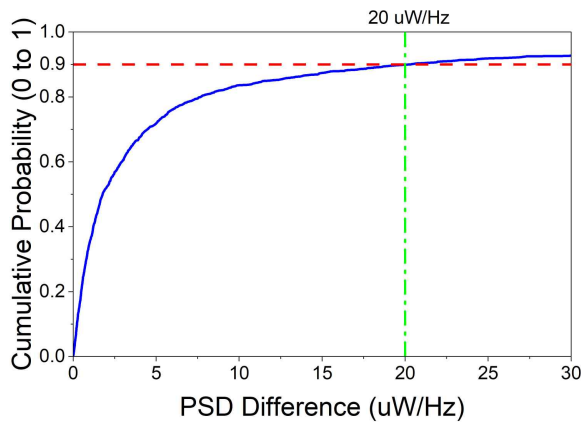


그림 4. 차량의 PSD 차이

Fig. 4. PSD difference of vehicle.

정확도를 효과적으로 개선할 수 있다.

2.5 히스토리 기반 안정화 조건 적용

PSD 필터링을 통과한 객체에 대해서도, 일시적인 반사나 오탐 가능성을 줄이기 위해 히스토리 기반 검증 로직을 적용한다^[12]. 최근 5프레임 내의 객체 기록을 저장하고, 현재 프레임의 객체가 과거 프레임들과 거리 및 속도 오차가 각각 2.5 m, 1.2 m/s 이하인 경우를 누적하여 등장 횟수를 계산한다.

5프레임 모두에서 동일한 위치에 유사한 객체가 등장한 경우에만 지속적으로 존재하는 유효 객체로 간주하며, 이 과정을 통해 검출 안정성을 확보하고 false positive를 줄일 수 있다.

2.6 칼만 필터를 이용한 궤적 추적

히스토리 조건을 만족한 객체에 대해서는 칼만 필터를 적용하여 궤적을 추정하고, 일시적인 검출 누락에도 대응할 수 있도록 한다. 필터의 상태 변수는 [거리, 속도]이며, 등속도 모델을 기반으로 상태 전이 행렬 F , 관측 행렬 H , 프로세스 노이즈 공분산 Q , 측정 노이즈 공분산 R 은 식 (2)와 같다^[13].

$$\begin{aligned} F &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ H &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ Q &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix} \\ R &= \begin{bmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 6 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

Q 는 등속도 모델의 불확실성을 나타내는 지표이며 R 은 레이더 센서의 측정 오차를 반영한다^[13]. 본 연구에서는 실험 결과를 기반으로 (5)와 같은 지표를 설정하였다. 그림 5는 칼만 필터 파라미터에 따른 추적 성능의 변화를 보여준다. 초기 단계에서는 R 을 Q 보다 크게 설정하여, 레이더에서 발생하는 순간적인 잡음 특성에 둔감한 추적 성능을 확보하였다. 이후, 잡음에 대한 민감도와 객체 이동에 대한 추적 성능 열화가 trade-off 관계로 나타내는 Q 와 R 을 반복 조정(iterative tuning)하여, 실험 환경에서 관찰된

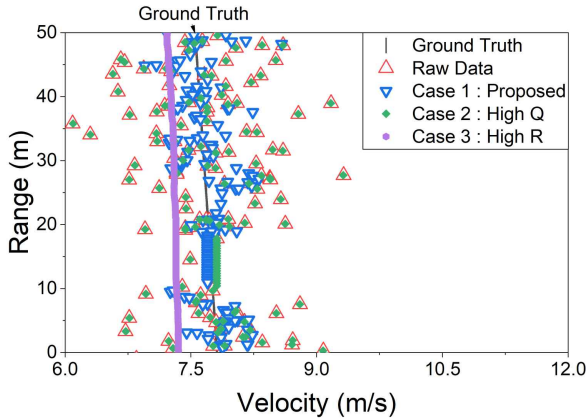


그림 5. 파라미터 설정에 따른 추적 성능
Fig. 5. Tracking performance according to parameter settings.

객체 움직임 특성과 유사한 최적값을 도출하였다. 또한, 5개 이상의 프레임이 연속으로 갱신되지 않는 트랙은 무시하여, 추적 안정성을 향상시키고 불필요한 계산량을 감소시켰다.

2.7 속도 부호 기반 접근 차량 판단

마지막으로, 궤적이 안정화된 차량 중에서 속도가 음수인 경우, 해당 객체가 레이더, 즉 보행자의 방향으로 접근하고 있다고 판단한다. 이는 도플러 효과에 기반한 방향성 판단에 해당하며, 접근 차량일 경우 실시간으로 경고 메시지를 생성한다. 이 과정을 통해 보행자에게 실질적인 위협이 되는 객체만을 구분하여 알려줌으로써, 불필요한 경고는 줄이고 의미 있는 위협 요소에 집중하는 시스템을 구현하였다.

III. 데모 실험 환경 및 시스템 구현

3-1 하드웨어 구성

데모 실험에는 Texas Instruments 사의 AWR1843 BOOST FMCW 레이더 모듈과 DCA1000EVM 데이터 캡처 보드를 사용하였다. AWR1843BOOST는 76~81 GHz 주파수 대역에서 동작하며, 3개의 송신 안테나와 4개의 수신 안테나를 통해 MIMO(multiple input multiple output) 구성을 지원한다. 이를 통해 고해상도의 RDM을 생성할 수 있다.

DCA1000EVM은 수신한 IQ 데이터를 실시간으로 PC에 저장하여 오프라인 신호처리 및 알고리즘 구현이 가능하게 하였다.

3-2 레이더 파라미터 설정

표 1은 본 연구에서 사용된 레이더의 주요 파라미터를 정리한 것이다. 송신 신호는 약 12 GHz의 대역폭을 갖도록 설정하였으며, 최대 탐지 거리는 약 60 m, 거리 해상도는 약 0.044 m로 계산되었다. 또한 도플러 해상도는 약 0.17 m/s로 설정하여 보행자와 차량의 속도를 효과적으로 구분할 수 있도록 하였다.

3-3 데모 실험 환경

데모 실험은 그림 6과 같이 대학 캠퍼스 내 도로 및 보행로가 교차하는 구간에서 진행하였다. 레이더는 지면으로부터 약 1.2 m 높이에 설치되었으며, 차량과 보행자가 동시에 이동하는 상황을 모사하였다. 차량은 직선 주행,

표 1. 레이더 시스템 동작 사양

Table 1. Operating specifications of the radar system.

Parameter	Value	Description
Start frequency	77 GHz	Starting frequency of the FMCW sweep
Frequency slope, S	20.520 MHz/ μ s	Rate of frequency increase over time
Sampling rate	11.978 Ms/s	Number of ADC samples per second
Number of samples	58	Number of samples collected per chirp
Number of chirp loops, N	201	Delay between consecutive chirps
Idle time	2 μ s	Time after chirp start when ADC sampling begins
ADC valid start time	3.8 μ s	Time at which the frequency sweep ends after chirp start
Ramp end time	9.64 μ s	Time at which the frequency sweep ends after chirp start
Frame periodicity	60 ms	Duration of one frame (processing interval per frame)

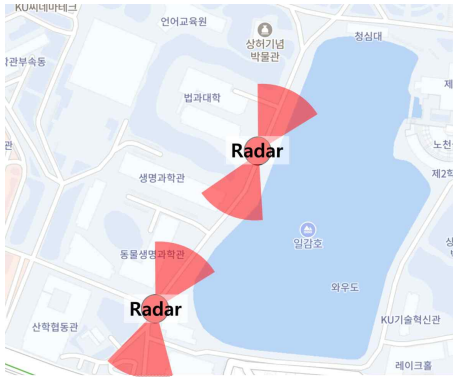


그림 6. 데모 평가 환경
Fig. 6. Demonstration environment.

우회전 진입, 저속 접근 등의 시나리오로 운행하였고, 보행자는 일정한 속도로 도로를 횡단하거나 레이더 측면에서 이동하였다. 다양한 거리(10~40 m)와 속도 조건에서 데이터를 수집하여 알고리즘 성능을 검증하였다.

3-4 데이터 수집 및 처리

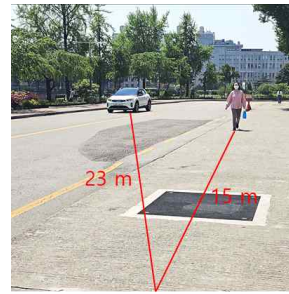
수집된 레이더 신호는 PC로 전송되어 MATLAB 환경에서 처리되었다. 우선 range-FFT와 Doppler-FFT를 통해 RDM을 생성하였으며, 이후 속도 기반 분류, PSD 분석, 칼만 필터 추적, 접근 여부 판별 과정을 순차적으로 수행하였다. 단계별 결과는 시각적으로 확인 가능하도록 RDM 위에 표시되었으며, 최종적으로 접근 차량만을 선택적으로 식별하도록 구현하였다.

IV. 데모 실험 결과

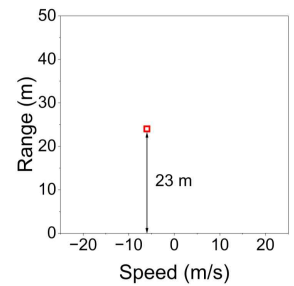
본 장에서는 제안된 알고리즘을 실제 환경에 적용하여 성능을 검증한 결과를 제시한다. 실험은 다양한 주행 시나리오(직선 주행, 저속 접근, 우회전 진입)와 보행자 이동 조건(횡단, 측면 이동)을 포함하여 수행되었다.

4-1 차량과 보행자의 구분

그림 7(a)은 보행자와 차량이 동시에 존재하는 실험 환경을 보여준다. 보행자와 차량이 레이더의 탐지 영역 내에서 존재하는 경우, 그림 7(b)와 같이 차량만 선택적으로



(a) 실험 환경 1
(a) Experimental environment 1



(b) 실험 환경 1의 결과
(b) Result

그림 7. 사람과 차량의 구분

Fig. 7. Discrimination between human and vehicle.

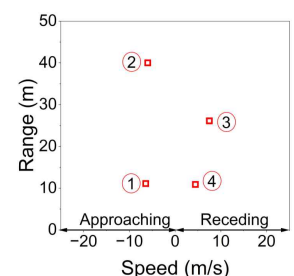
탐지할 수 있음을 제시하였다. 레이더에서는 두 객체 모두 탐지가 되지만, 제안한 알고리즘에 의해 보행자의 정보와 차량의 정보를 구분하여 차량 정보만을 보행자에게 제공할 수 있음을 나타내었다.

4-2 차량의 방향 구분 및 최대 감지 객체 개수

그림 8(a)는 도로에 다수 차량이 운행될 때 이를 구분하여 검출할 수 있는지를 판단하기 위한 실험 환경이다. 그림 8(b)의 실험 결과와 같이, 제안한 레이더 시스템을 통해, 레이더에게 다가오는 차량(①, ②)과 멀어지는 차량(③, ④)의 도플러 주파수에 의한 속도 부호와 거리 정보를 동시에 나타낼 수 있었다. 보행자의 이동 방향이 이와 동일하게 나타날 수 있으므로, 이를 이용하여 보행자의 이동 방향과 일치 여부와 비교할 수 있어 제안하는 응용



(a) 실험 환경 2
(a) Experimental environment 2



(b) 실험 환경 2의 결과
(b) Result

그림 8. 동시 차량 식별

Fig. 8. Simultaneous detection for various vehicles.

에 활용할 수 있음을 보여준다.

동시에 탐지 가능한 차량은 최대 4개로 분리 추출함은 물론 연속적인 경로를 추적할 수 있었다. 동시 측정 가능한 4대의 운행체 수는 다수 차량이 동시 교행하지 않는 교내 도로에서 충분히 유효한 숫자이다. 도심 교차로에 활용을 검증하기 위해서는 더 많은 차량에 대한 정보를 실시간으로 나타낼 수 있는가에 대한 추가 연구가 필요할 것이다.

4.3 탐지 성능 및 효과

제안된 시스템의 성능을 정량적으로 평가하기 위하여, 총 5차례의 데모 실험을 다른 날짜에 임의 객체를 대상으로 수행하였다. 탐지 정확도(DA, detection accuracy)는 탐지 시스템이 실제 상황을 얼마나 정확하게 판단하여 결과를 제시했는지를 나타내는 지표이며, 탐지 오탐률(FDR, false detection rate)은 탐지 결과 중에서 잘못된 탐지가 차지하는 비율로 아래와 같이 식 (3) 및 식 (4)으로 나타낼 수 있다.

$$DA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{3}$$

$$FDR = \frac{FP}{TP + FP} \tag{4}$$

표 2는 이러한 실험 결과 데이터와 이를 통해 계산된 정확도와 오탐률을 정리한 것이다. 총 351대의 차량과 258명의 보행자를 대상으로 분류를 시행한 결과, 제안된 시스템의 평균 정확도는 98.03%, 평균 오탐률은 5.88%로 측정되었다.

동일한 데이터 셋에 대해 칼만필터 적용 유무만을 비교하여 제안하는 알고리즘의 개선 효과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9(a)는 칼만 필터가 없는 신호처리이며, 과분할로 인한 객체 숫자의 증가가 확인되었다. 칼만 필터를 적용한 그림 9(b)는 객체의 과분할을 줄여 정확한 숫자의 객체 탐지가 가능했음을 보였다. 또한 그림 10에서는 동일한 데이터 셋의 220 프레임에 대상으로 칼만 필터 적용 유무에 따라 빈번한 트랙 단절 현상을 개선하여 추적의 안정성에 효과적임을 확인하였다. 이러한 특성은 공간 내

표 2. 제안하는 시스템을 통한 탐지 정확도와 오탐률
Table 2. Detection accuracy and false positive rate using the propose system.

Trials	#1	#2	#3	#4	#5	Avg.
Observation time (s)	725	718	729	714	732	
True positive (TP)	34	36	38	34	33	
False positive (FP)	2	3	4	0	2	
False negative (FN)	0	0	1	0	0	
True negative (TN)	88	83	76	93	82	
Accuracy (%)	98.39	97.54	95.80	100	98.29	98.03
False alarm rate (FDR, %)	5.56	7.69	9.30	0.00	5.71	5.88

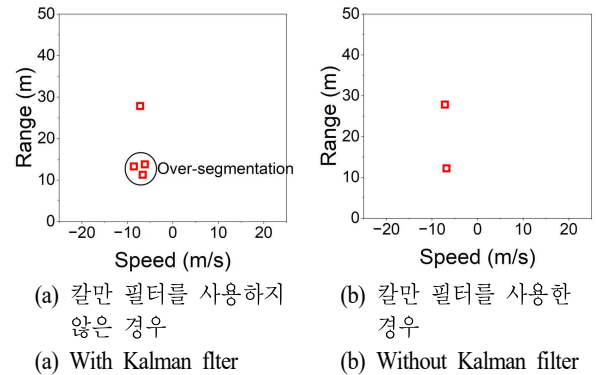


그림 9. 칼만 필터 유무에 따른 탐지 성능 비교
Fig. 9. Detection comparison for the usage of Kalman filter in the proposed algorithm.

에 탐지되는 객체의 숫자와 이들의 위치, 속도를 정확하게 파악하여 안정성 높은 추적이 가능함을 보여줄 수 있는 제안 알고리즘의 장점을 보여준다고 하겠다.

195초 분량의 동일 데이터 셋을 이용해 기존 PSD 기반으로 발표된 연구와 제안하는 연구 결과를 표 3과 같이 비교하였다. 탐지 오탐률이 35.1%에서 5.88%로 83.2% 감소하였다. 기존 연구 결과가 30% 이상의 높은 오탐률을 제시한 것과 달리, 제안 시스템은 모두 7% 이하의 오탐률을 제시하여 응용 분야에서 더욱 유의미한 활용이 가능

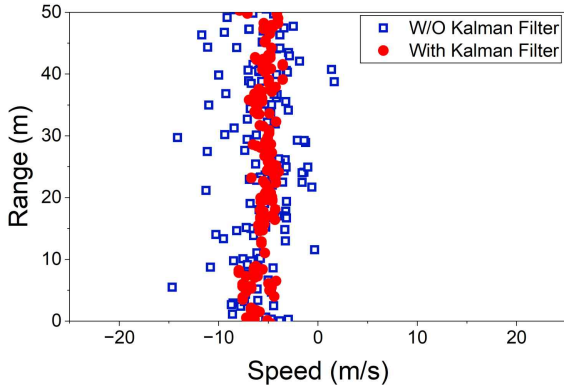


그림 10. 칼만 필터 유무에 따른 추적 궤도 비교
Fig. 10. Comparison of tracking trajectory with or without Kalman filter.

표 3. PSD 기반 선형 연구와의 비교 성능 평가
Table 3. Performance comparison of the proposed radar system with the previous PSD-Based approach.

Evaluation metric	PSD-Based classification [6]	Proposed algorithm
False detection rate (FDR, %)	35.1	5.88
Object identification consistency	Over-segmentation issue with a single object	Stable single-track maintenance
Detection stability	Severe flickering and frequent track losses	Continuous and reliable tracking

할 것을 보였다. 또한 기존 알고리즘에서 나타나던 단일 객체의 과분할 문제와 빈번한 트랙 단절 현상이 제안 알고리즘에서는 크게 완화되었다. 이는 제안 알고리즘이 안정성과 신뢰성을 동시에 확보했음을 보여준다.

V. 결 론

보행자 안전을 위해 FMCW 레이더를 기반으로 접근 차량을 효과적으로 구분하는 시스템을 제안하였다. 도플러 기반 속도 추정과 PSD 분석을 통해 차량과 보행자를 효과적으로 구분하고, 칼만 필터를 적용하여 탐지 안정성과 객체 식별의 일관성을 확보하였다. 또한 차량의 속도 부호와 추적 이력을 활용하여 접근 차량과 이탈 차량을

명확히 구분하고, 실제로 위험한 상황에 대해서만 보행자에게 경고를 제공할 수 있도록 구현하였다. 보행자와 차량 이동이 빈번한 대학 캠퍼스 공간에서 수행한 실험을 통해, 제안 시스템은 최대 4대의 차량을 동시에 탐지하여 보행자에게 다가오는 차량만을 효과적으로 제시할 수 있었으며, 평균 98.03%의 정확도와 5.88%의 오탐률을 달성하였다. 특히, 10% 이하의 낮은 오탐률은 기존 알고리즘 대비 83% 이상 성능 개선이 가능함을 보였다. 이러한 결과를 통해, 제안하는 시스템은 보행자 안전을 강화하기 위한 실시간 차량 접근 식별 시스템으로서의 가능성을 입증하여, 영상 기반 시스템의 한계를 보완할 수 있는 효과적인 대안임을 제시하였다.

References

- [1] Y. J. Han, H. S. Lee, *Big Data Analysis of Pedestrian Accidents in Seoul Using Deep Learning*, Seoul, The Seoul Institute, 2020.
- [2] H. M. Lee, Z. Bai, Y. S. Ho, J. X. Soh, and H. P. Lee, "Effect of music from headphone on pedestrians," *Applied Acoustics*, vol. 169, p. 107485, Dec. 2020.
- [3] Y. Zhang, A. Carballo, H. Yang, and K. Takeda, "Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: A survey," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 196, pp. 146-177, Feb. 2023.
- [4] T. Brophy, D. Mullins, A. Parsi, J. Horgan, E. Ward, and P. Denny, et al., "A review of the impact of rain on camera-based perception in automated driving systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 67040-67057, Jun. 2023.
- [5] S. Yao, R. Guan, X. Huang, Z. Li, X. Sha, and Y. Yue, et al, "Radar-camera fusion for object detection and semantic segmentation in autonomous driving: A comprehensive review," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 9, no. 1, pp. 2094-2128, Jan. 2024.
- [6] H. B. Choi, "Target recognizing algorithm using power spectra of FMCW radar transmitted and received signals," *The Korean Institute of Information Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 35-41, 2010.

- [7] E. Hyun, Y. S. Jin, "Doppler-spectrum feature-based human-vehicle classification scheme using machine learning for an FMCW radar sensor," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2001, Mar. 2020.
- [8] V. T. Nguyen, C. T. Vu, and V. S. Doan, "Improving deep CNN-based radar target classification performance by applying a denoise filter," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 2, pp. 198-205, Mar. 2024.
- [9] P. E. Allen, D. R. Holberg, *CMOS Analog Circuit Design*, 3rd ed. Oxford, Oxford University Press, 2012.
- [10] K. Mackala, M. L. Antti, M. Fostiak, and K. Kowalski, "Biomechanical analysis of Usain Bolt's 100 m world record: Is the 'fastest man on Earth' also the most efficient?," *Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 1, p. 52, 2023.
- [11] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2010.
- [12] B. Yang, M. Liang, and R. Urtasun, "HDNET: Exploiting HD maps for 3D object detection," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, Salt Lake City, UT, 2018, pp. 1469-1478.
- [13] G. Welch, G. Bishop, "An introduction to the Kalman filter," University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, TR 95-041, Jul. 2006.

문 경 록 [건국대학교/학부생]

<https://orcid.org/0009-0009-0613-3561>



2019년 2월 ~ 현재: 건국대학교 전기전자공학부 학부생 (공학사)
[주 관심분야] 레이더 시스템

양 종 렬 [건국대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4939-3274>



2009년 1월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)
2009년 2월 ~ 2011년 10월: 삼성전자 S.LSI 사업부 책임
2011년 11월 ~ 2016년 8월: 한국전기연구원 첨단의료기기연구본부 선임연구원
2016년 9월 ~ 2023년 2월: 영남대학교 전자공학과 조교수/부교수
2023년 3월 ~ 현재: 건국대학교 전기전자공학부 부교수
2023년 9월 ~ 현재: 밀리사이트테크놀로지스(주) 대표이사
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템, Sub-THz 비파괴 영상 시스템, 스마트 공간탐지용 레이더 센서 시스템

김 해 정 [고려대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-4711-9773>



2021년 2월 ~ 2025년 8월: 건국대학교 전기전자공학부 (공학사)
2025년 9월 ~ 현재: 고려대학교 전기전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 통신 신호처리