

도플러 레이더 센서를 이용한 이동 휴먼 식별 기법

현 유 진*, 진 영 석*, 배 지 은*

Moving Human Indication Scheme Using Doppler Radar Sensor

Eugin Hyun*, YoungSeok Jin*, Jieun Bae*

요 약

본 논문에서는 CW(Continuous Wave) 레이더를 이용한 휴먼 분류 기법을 제안하였다. 움직이는 휴먼의 경우, 수신 신호의 도플러 스펙트럼 분포가 시간이 지남에 따라 매우 가변적으로 변한다는 특징을 활용하였다. 이에 ‘현재 프레임의 산란점 개수’와 ‘연속 프레임의 산란점 개수 차이’, 그리고 ‘연속 프레임의 속도 변화량’의 3가지 특징벡터를 제안하였다. 제안된 휴먼 인지/분류 기법을 검증하기 위해 안테나, RF 송수신단, 베이스밴드 단으로 구성된 24GHz CW 모듈을 활용하였다. 도로 상에서 실측 데이터를 측정하기 위해, 걷는 보행자와 이동 차량을 시나리오로 활용하였다. 각 시나리오 환경에서 획득된 데이터를 활용하여 제안된 특징벡터 3개를 활용하여 98.2% 휴먼 인지 성능을 확인하였다.

키워드 : 레이더 센서, 도플러 레이더, 객체 분류, 휴먼 인지, 보행자 인지

Key Words : Radar Sensor, Doppler Radar, Target Classification, Human Indication, Pedestrian Detection

ABSTRACT

In this paper, we proposed a human classification method based on a Doppler spectrum distribution using CW (Continuous Wave) radar. Because the Doppler spectrum distribution of a moving human is highly variable over time, we proposed three feature: Doppler spectrum extension in the current frame, Doppler spectrum variance between two successive frames, and detected velocity variance feature between two successive frames. To verify the proposed classification method, we obtain the real data using 24GHz CW module consisting of antennas, RF transceiver, and baseband circuit. We conducted two scenarios of walking humans and moving vehicles. From the results of verification, we proved that the proposed method is effective to classify humans based on the three proposed features.

1. 서 론

레이더 센서는 카메라 센서 비해 조명이거나 외부환경에 강인하고, 객체의 상대속도를 직접 측정할 수 있는 장점이 있어 차량에 널리 활용되고 있다. 그 예로 차량

주행 안전 보조기술인 사각지대 탐지나 스마트 크루즈 지원, 그리고 외부 충돌 감지 응용을 들 수 있다^{1),2)}.

게다가 레이더는 광학 센서인 카메라와 비교하여 데이터 계산량이 현저히 낮아서 차량으로 접근하는 보행자를 신속하게 감지할 수 있다. 이때 수신된 레이더 전

* 본 연구는 과학기술정보통신부에서 지원하는 DGIST 기관고유과제에 의해 수행되었습니다. (23-IT-02 : 미래자동차 환경 센싱 및 소프트웨어 플랫폼 핵심기술 개발)

• First Author : DGIST, braham@dgist.ac.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : DGIST, braham@dgist.ac.kr, 정희원

* DGIST, ysjin@dgist.ac.kr, 정희원; jebae@dgist.ac.kr

논문번호 : 202306-126-0-SE, Received June 15, 2023; Revised August 7, 2023; Accepted August 16, 2023

파신호를 통해 이동객체를 보행자로 구별 인지할 수 있어야 하는데 이를 위한 기술로 머신러닝 기법이 활용되고 있다^{3,4}. 최근에는 차량의 외부 상황 감지뿐 아니라, 차량 내부의 탑승자 모니터링 센서로도 활용되고 있는데, 이는 레이더 센서가 탑승객의 호흡 신호까지도 감지할 수 있기 때문이다^{5,6}.

이러한 레이더 센서는 차량 뿐 아니라, 스마트 빌딩, 스마트 홈, 스마트 건물, 스마트 도시 등 다양한 스마트 환경에서 적용될 수 있다. 이는 카메라 센서의 경우 사생활 보호 문제로 소비자들이 정서적으로 꺼리는 이유가 존재하기 때문이다.

현재, 차량용 레이더 센서는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 방식을 활용하고 있으며, 다중객체의 거리-속도-각도 탐지가 가능하다. 더 나아가 FMCW 레이더 센서 기반으로 다양한 객체 종류를 구별하기 위한 연구도 진행되고 있다^{7,8}.

그러나 다양한 스마트 응용 분야에 따라 차량용 레이더와 같은 고성능 기능이 아닌, 저가형 소형 센서가 필요한 경우도 있다. 예를 들어 특정 존 (Zone) 영역에 이동객체의 존재 확인부터, 다양한 객체 분류가 아닌 단지 휴면의 존재 판단을 위한 응용분야도 있다. 예를 들어 특정 존을 통과하는 이동객체가 사람인지 아닌지에 따라 조명이나 광고 간판을 다양한 방법으로 제어할 수도 있을 것이다. 또한 실내로 진입하는 경로에서는 이동객체의 휴면 여부만 판단하는 것 만으로도 스마트 보안에 효과적으로 활용할 수 있다.

이처럼 다중객체가 아닌 단지 휴면인지 아닌지를 구별하는 간단한 기능을 구현하기 위해서는 FMCW 방식이 아닌 CW 방식의 도플러 레이더 센서가 적합할 수 있다. 도플러 레이더는 FMCW 레이더 보다 매우 회로가 간단하고, 저전력으로 구현할 수 있다. 다만 거리 측정엔 불가능하고, 수신 신호는 오로지 이동객체에 대한 도플러 신호만 추출된다. 하지만 도플러 레이더를 이용하여 감지된 신호로부터 이동객체가 휴면인지 아닌지 판단할 수 있다면 그 응용범위는 매우 다양할 것이다.

도플러 레이더의 수신 신호를 이용하여 휴면 여부를 판단하는 기법 중 대표적인 방법은 마이크로 도플러 기법이다. STFT(Short Time Fourier Transform)을 이용하여 시간에 따른 도플러 스펙트럼 변화 모양을 이용하여 휴면을 판단하는 기법이다^{9,10}. 사람의 경우 몸통, 팔, 다리 등 다양한 컴포넌트(Component)로부터 다양한 산란점이 추출될 수 있는 특징을 이용한 방식이다. 하지만 마이크로 도플러를 생성하기 위해 긴 측정시간이 필요하며, 이미지 기반으로 처리해야 하므로 계산량이 많아 실시간성이 떨어지는 단점이 있다.

그래서 선행연구⁴에서는 FMCW 레이더 방식 기반으로 새로운 휴면 인지/분류 기법을 제안한 바 있다. 이 방법은 2개의 연속된 프레임에서 생성된 도플러의 산란점 분포 및 변화를 이용한 기법이다. 보행자의 경우 차량과 달리 움직이는 동안 발생하는 산란점들이 다양한 분포로 변화된다. 이 선행연구⁴에서는 3가지 특징 벡터를 활용하였다. 즉, ‘현재 프레임의 산란점 개수’와 ‘연속 프레임의 산란점 개수 차이’, 그리고 ‘연속 프레임의 신호 크기 변화량’이다. 이때 세 번째에 해당하는 신호 크기 변화량은 탐지된 거리로 정규화를 시켜야 하는데, 그 이유는 레이더 수신 신호 크기는 거리의 4승으로 반비례하기 때문이다.

그런데 CW 방식의 도플러 레이더 구조에서는 거리 값을 측정할 수가 없으므로 세 번째 특징벡터는 활용할 수가 없다. 그래서 선행연구¹¹에서는 CW 레이더 기반 휴면 인지를 위해, 2개의 특징벡터만 활용하는 방법을 제시 하였다. 그런데 본 논문에서는 보다 성능 향상을 위해 새로운 특징벡터인 ‘연속 프레임의 속도 변화량’을 새로 제안하였다. 즉, 휴면의 경우 자동차와 달리 반사되는 산란점의 위치가 프레임별로 계속 변하고, 그 산란점의 위치에 따라 탐지되는 속도 값이 조금씩 달라질 수 있는 특징을 활용하였다.

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 24GHz 도플러 레이더를 이용하여 야외에서 실험을 진행하였다. 이때 안테나와 송수신단으로 구성된 진단센서를 활용하였고, 필터와 MCU(Micro Control Unit)로 구성된 베이스밴드 보드를 제작하여 PC와 연결하였다.

실험을 통해 획득한 수신 데이터를 기반으로 Matlab에서 신호를 분석 및 알고리즘을 검증하였고, 추출된 특징벡터를 이용하여 휴면 인지/분류 성능을 검증하였다.

본 논문의 2장에서는 제안된 신호처리 기법을 설명하고, 3장에서는 실제 실험 셋업과 결과를 제시한다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 소개한다.

II. 제안된 신호처리 기법

본 논문에서는 24GHz CW 레이더를 이용하여 움직이는 휴면의 다양한 컴포넌트 (몸통, 팔, 다리)로부터 반사되는 신호의 특성을 활용한 보행자 인지/분류 기법을 제안하였다.

논문에서 사용된 CW 레이더의 진단모듈은 이노센트社에서 제작한 것으로 안테나와 송수신회로로 구성되어 있으며, 송신출력은 약 10dBm이며, 안테나 FOV(Field Of View)는 수평방향 약 43도와 수직방향

약 110도이다. 전단센서 후단에 별도의 필터와 증폭기를 베이스밴드 단으로 구성하여 연결하였다. 최종적으로 출력되는 신호는 I 및 Q 신호로 구성되어 있어, 움직이는 객체의 속도값 뿐 아니라 방향도 확인 가능한 구조이다.

사용된 24GHz CW 레이더의 파형을 운영하기 위해 그림 1과 같이 시스템 파라미터를 설계하였다.

최대 감지 가능한 속도를 40Km/h로 설정하였고, 이에 ADC(Analog Digital Converter) 샘플링 주파수 (fs)는 4kHz로 설계하였다. 아울러 최소 탐지 속도를 0.1m/s로 설정하기 위해 송수신 시간 (T_{rx})는 64ms로 설계하였다. 프레임 갱신주기(T_{frame})는 200ms로 세팅하여 신호처리 가능 시간을 136ms로 설계하였는데, 이는 향후 알고리즘을 MCU로 구현 시 그 성능에 따라 최적화가 가능하다.

주기마다 획득되는 샘플수는 256개이며, FFT (Fast Fourier Transform)의 포인트 수도 256으로 설계하였다. 총 프레임 수 (N_{frame})은 사용자가 원하는 만큼 선택할 수 있는 데, 본 논문에서는 시험 검증을 위해 시나리오 별 50프레임으로 약 11초 정도 측정하도록 설계하였다.

그림 2는 본 논문에서 제안한 신호처리 흐름도이다. 기존 FMCW 레이더 기반의 선행연구⁴⁾를 기반으로 설계하였다. ADC를 통해 샘플링된 신호는 ‘DC cancellation’과 ‘Low pass filter’를 통해 DC 오프셋과 불필요한 고주파 성분을 제거한다. ‘Windowing’과

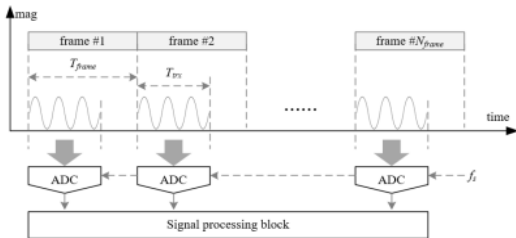


그림 1. 설계된 파형 및 시스템 파라미터
Fig. 1. Diagram of designed waveform parameters

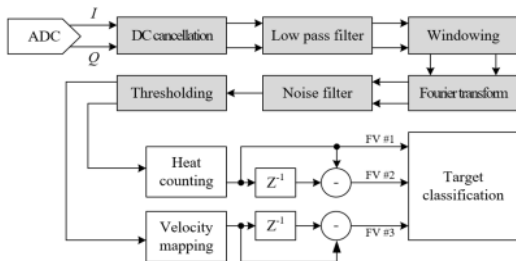


그림 2. 설계된 신호처리 흐름도
Fig. 2. Flow of designed signal processing

‘Fourier Transform’을 통해 시간 영역 신호를 주파수 도메인으로 변환시킨다. 객체가 없는 상태에서 측정할 잡음 도플러 스펙트럼을 이용해서 ‘Noise filter’에서 배경 잡음을 제거하고, ‘Thresholding’에서 기준 크기 이상의 산란점을 이동객체로 선택하였다. 이때 해당 산란점의 도플러 성분 값, 즉 속도 값도 추출하였다.

이렇게 추출된 산란점을 기준으로 총 3가지의 특징 벡터를 본 논문에서는 추출하였다.

첫 번째는 현재 프레임 기준으로 탐지된 산란점의 개수이고, 두 번째 특징벡터는 직전 프레임과 현재 프레임의 산란점 개수 차이를 나타낸다. 차량의 경우 시간의 변화와 상관없이 산란점의 개수가 거의 일정한 데 비해, 움직이는 보행자의 경우 다양한 산란점의 변화가 일어나는 것을 측정하기 위한 것으로 선행연구⁴⁾에서 제안한 기법을 그대로 활용하였다.

선행연구에서는 세 번째 특징벡터로 직전 프레임과 현재 프레임의 신호크기 변화량을 활용하였다. 이 역시 움직이는 휴먼의 특징을 반영한 것인데, 다만 이 경우 신호 크기를 거리값으로 정규화 해주어야 정확하게 측정될 수 있다. 하지만 본 논문에서 사용되는 도플러 레이더는 거리값을 측정할 수가 없기 때문에, 선행연구의 세 번째 특징벡터는 추출할 수가 없다.

그래서 본 논문에서는 추가적인 특징벡터를 제안하였는데, 바로 가장 큰 신호크기를 가지는 산란점의 속도 변화량이다. 이동차량의 경우 연속된 프레임에서 산란점들의 속도가 거의 같지만, 걸어가는 휴먼의 경우 움직이는 다양한 컴포넌트에 의해 가장 큰 신호크기를 가지는 산란점의 위치가 달라질 수 있다. 따라서 이 산란점에 해당하는 속도 정보 역시 이동차량과 비교할 경우 다소 변화가 발생한다. 이러한 특징을 본 논문에서는 세 번째 특징벡터로 활용하였다.

본 논문에서는 그림 2의 알고리즘을 Matlab을 통해 구현하고 검증하였다. 아울러 객체 인지 및 분류 기법은 별도의 머신러닝 없이, 실험에 의한 통계적 분석으로 기준점을 결정하여 적용하였다.

III. 실험 및 결과

그림 3은 본 논문에서 활용한 테스트 베드 사진이다. 안테나, 송수신단, 베이스밴드 단으로 구성된 레이더 모듈은 별도로 제작된 지그에 장착 되었다. 전원 공급기를 통해 3.3V가 입력되고 레이더 베이스밴드 단의 MCU에서는 획득된 신호를 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)를 통해 PC로 전송한다. 이렇게 PC로 수신된 레이더 신호 데이터는 Matlab에서 구현된

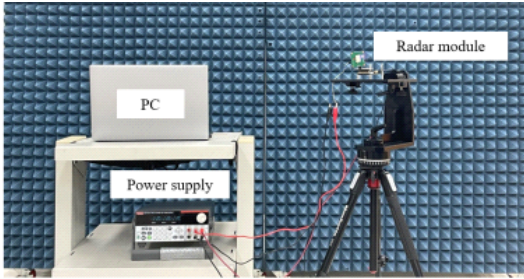


그림 3. 실험 측정을 위한 테스트 베드 구성 사진
Fig. 3. Configuration of measurement set-up

코드에 의해 알고리즘을 검증한다.

그림 4은 본 논문에서 알고리즘을 검증하기 위해 실험한 시나리오 사진이다. 그림 4(a)는 이동하는 보행자 예제로 약 5km/h 정도로 걸었으며, 그림 4(b)는 이동 차량으로 대략 시속 20km/h 정도로 저속으로 운행하였다.

본 논문의 시나리오에서는 보행자도 차량도 모두 다가오는 상황만 고려하였으며, 사람의 경우 15m에서 출발하였고, 차량의 경우 60m에서 출발하였다. 따라서 보행자와 차량의 속도를 고려하면 출발지로부터 레이더 센서 위치까지 이동시간은 약 11초 정도가 소요된다.

그림 1에서 레이더 파형 설계에서 갱신주기를 200ms로 설계하였으므로, 각 객체들이 전체 이동하는 데 약 55 프레임 정도가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 보행자의 경우 한 번에 50프레임씩 총 3회에 걸쳐 데이터를 획득하였고, 이때 3명의 사람을 대상으로 각각 실험하여 총 획득된 프레임은 450개이다. 차량의 경우 역시 50프레임씩 3회에 걸쳐 데이터를 획득하여, 총 150개 프레임 데이터를 획득하였다.

획득된 레이더 신호는 그림 2에 설계된 신호처리를 통해 도플러 스펙트럼을 추출한다. 그림 5와 그림 6은 보행자와 차량에 대한 연속 프레임의 도플러 스펙트럼을 추출한 것으로, 가로축은 속도 (km/h), 세로축은 신

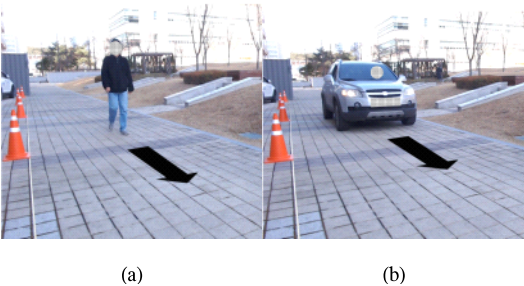
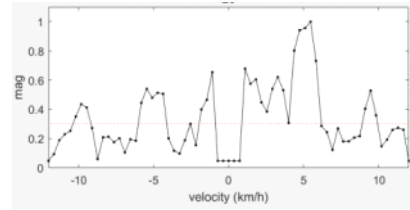
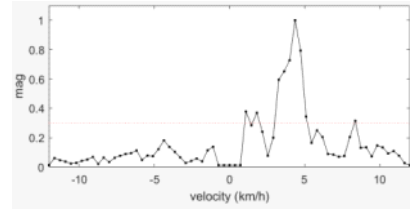


그림 4. 실제 야외 실험 시나리오: (a) 움직이는 보행자, (b) 이동 차량
Fig. 4. Test scenarios on real road: (a) walking human and (b) moving vehicle



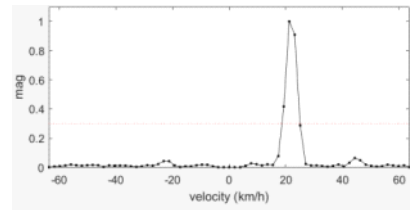
(a)



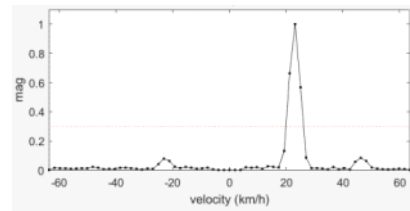
(b)

그림 5. 움직이는 보행자의 도플러 스펙트럼: (a) 직전 프레임, (b) 현재 프레임

Fig. 5. Doppler spectra of walking human: (a) last frame and (b) current frame



(a)



(b)

그림 6. 이동 차량의 도플러 스펙트럼: (a) 직전 프레임, (b) 현재 프레임

Fig. 6. Doppler spectra of moving vehicle: (a) last frame and (b) current frame

호 크기의 정규화 값을 나타낸다.

앞서 설명한 바와 같이 그림 5에서는 보행자의 도플러 산란점이 다양하게 발생함을 보여주고, 스펙트럼의 모양 역시 연속된 프레임임에도 불구하고 변화되는 것을 확인 할 수 있다. 반면에 그림 6의 차량의 경우에는, 도플러 스펙트럼의 모양이 매우 뾰족하게 분포되어 있고, 연속된 프레임에서도 그 모양이 매우 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.

게다가 보행자의 경우 가장 크기가 높은 크기를 가지는 산란점의 위치가 매우 짧은 시간의 연속된 프레임에서도 변화되어, 이에 상응하는 속도 값 역시 조금 다를 수 있다. 하지만 차량의 경우에는 산란점의 위치와 상응하는 속도 값이 두 개의 연속 프레임에서 거의 비슷함을 알 수 있다.

그림 5와 6과 같이 획득된 도플러 스펙트럼으로부터, 그림 2에서 설계한 신호처리를 통해 3가지 특징벡터를 추출하였다.

그림 7은 3가지 특징벡터의 분포를 3D 그래프로 한번에 나타낸 것이다. 보행자의 경우 빨간색 점으로 총 450개, 차량의 경우 파란색 동그라미로 150개를 표시하였다. 다만 프레임별로 중복된 값으로 추출된 경우가 많아서 그림 7에서는 실제의 샘플 수 만큼 보이지 않을 수도 있다.

그림 7의 결과에서 차량의 경우 3가지 특징벡터 값이 매우 낮은 값으로 나타남을 알 수 있고, 보행자의 경우 3가지 특징벡터 값이 널리 분포됨을 확인할 수 있다.

그림 7의 특징벡터 3차원 분포도를 보다 자세히 분석하기 위해서, 각 특징벡터들의 낮은 값 영역을 확대하여 그림 8에 나타내었다. 특히 본 논문에서 제안한 세 번째 특징벡터가 인지 성능을 어떻게 향상할 수 있는지를 그래프를 통해 확인할 수 있게 2개의 그림으로 나누어 제시하였다. 먼저 그림 8(a)은 선행연구의 방법인 첫 번째 특징벡터 ‘현재 프레임의 산란점 개수’와 두 번째 특징벡터 ‘연속 프레임의 산란점 개수 차이’만을 이용한 3차원 분포도이다. 차량에 해당하는 파란색 동그라미와 사람에 해당하는 빨간색 점이 겹치는 부분이 많아서 2개의 특징벡터로는 구별이 어려운 영역이 있음을 확인할 수 있다.

이에 반해 세 번째 특징벡터 ‘연속 프레임의 속도 변화량’을 세로축에 추가할 경우, 그림 8(a)에서 겹친 부분의 일부가 분리되어 그림 8(b)의 3차원 분포도와

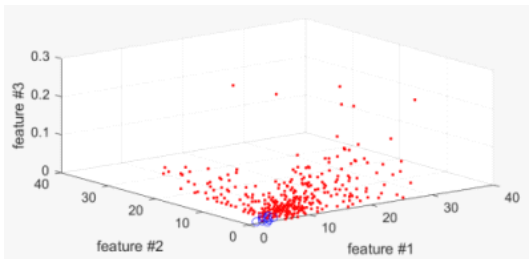
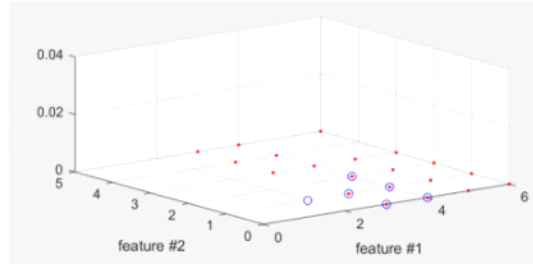
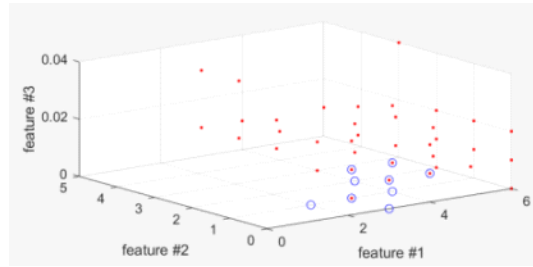


그림 7. 3가지 특징벡터의 3차원 분포도
Fig. 7. 3D Distribution of three feature vectors



(a)



(b)

그림 8. 경계영역을 확대한 3차원 특징벡터 3차원 분포도: (a) 기존 방법, (b) 제안된 방법
Fig. 8. 3D Distribution of zoomed threshold areas: (a) previous work and (b) proposed work

같이 나타남을 확인할 수 있다.

이렇게 3차원으로 분포된 특징벡터로부터, 차량과 보행자를 구별 할 수 있는 경계 기준점을 구하기 위해, 그림 9와 같이 각 특징벡터의 히스토그램을 추출하였다. 이 히스토그램의 통계값을 기반으로 기존, 차량을 100% 감지 할 수 있는 값으로 각 특징벡터의 기준점을 선택하였다. 이는 선행 연구의 방법과 제안된 방법의 성능 비교를 하기 위한 기준으로 활용하기 위한 것이다.

히스토그램의 통계적 분석을 통해 각 특징벡터의 결정 기준점을 5 이상, 3 이상, 0.02 이상의 경우 보행자로 결정하도록 알고리즘을 설계하였다.

기존 선행연구와 달리 본 논문에서 머신러닝을 사용하지 않은 이유는, 실험한 객체의 종류와 프레임 수가 적어서 통계적 분포를 확인하는 것만으로도 충분히 결정 기준점을 선택할 수 있기 때문이다. 향후 다양한 보행자와 차량은 물론이고 다른 객체 종류도 함께 실험을 진행할 경우, 머신러닝을 통해 객체 유형 분류 알고리즘 설계 및 검증을 진행할 예정이다.

그래서 본 논문에서는 그림 9를 통해 통계적으로 선택한 각 특징벡터의 기준점을 기반으로 제안된 방법을 검증하였다. 첫 번째 특징벡터 ‘현재 프레임의 산란점 개수’와 두 번째 특징벡터 ‘연속 프레임의 산란점 개수 차이’만을 활용할 경우, 휴먼의 인지 성능이 95.9%로

IV. 결 론

움직이는 휴먼은 몸통, 팔, 다리 등 다양한 컴포넌트로부터 도플러 산란점이 발생한다. 이러한 특성 기반의 대표적인 휴먼 인지 방법은 마이크로 도플러 이미지 처리 방법이다. 하지만 측정시간과 처리시간이 오래 걸려 빠른 결정이 필요한 응용분야에서는 적합하지 않다.

움직이는 보행자의 경우 측정시간에 따라 산란점의 모양과 신호 크기가 매우 가변적이기 때문에, 이러한 특성을 본 논문에서는 활용하였다. 이러한 특성을 나타내기 위한 특징벡터로 ‘현재 프레임의 산란점 개수’와 ‘연속 프레임의 산란점 개수 차이’, 그리고 ‘연속 프레임의 속도 변화량’의 3가지를 제안하였다.

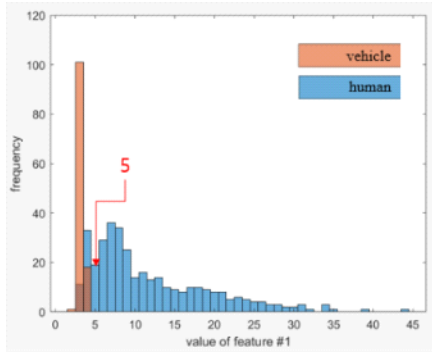
2개의 특징벡터는 FMCW 레이더를 사용한 선행연구에서 활용한 기법으로, 현재 프레임 기준으로 도플러 스펙트럼 확장 정도와 연속된 두 개 프레임의 산란점 변화량을 나타낸다. 반면 3번째 특징벡터는 본 논문에서 제안한 것으로 연속된 두 개 프레임에서 속도 변화량을 나타낸다.

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 움직이는 보행자와 차량을 기반으로 실제 도로에서 실험을 진행하였다. 본 논문에서 MCU를 포함한 베이스밴드 모듈을 제작하여 데이터 로깅을 위해 활용하였다. 그렇게 획득된 레이더 신호 데이터를 사용하여 설계된 휴먼 인지/분류 알고리즘을 검증하였고, 그 결과 휴먼 인지 성능이 98.2%임을 확인하였다.

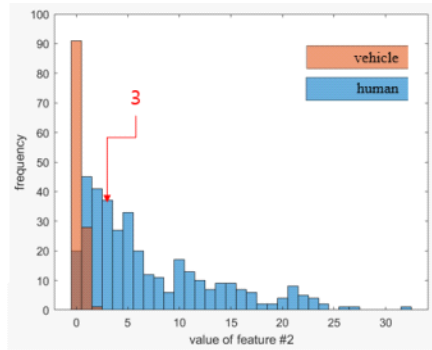
본 논문에서 활용한 도플러 레이더는 단일 객체만 탐지 할 수 있으므로, 앞으로는 다중객체 환경에서 객체 인지/분류를 위한 방안을 고려해야 할 것이다. 또한 실제 도로에서 존재하는 다양한 객체 유형도 분류할 수 있는 기법을 진행할 예정이다. 게다가 저속으로 움직이는 보행자에 관한 판단 연구도 함께 진행할 예정이다. 이를 위해 단순한 통계학적 기법이 아닌 다양한 머신러닝 기법도 함께 활용할 예정이다.

References

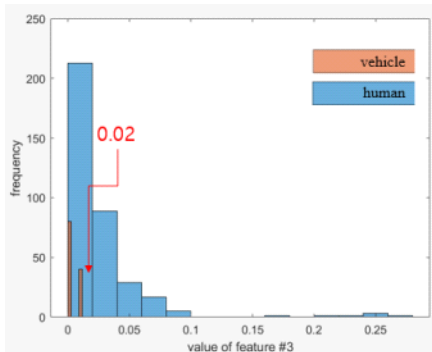
- [1] D. Shin, S. Jeong, Y. Won, J.-H. Lee, and M. Park, “Design and implementation of 77GHz FMCW radar signal processing algorithms for automotive environments,” *J. KICS*, vol. 43, no. 1, pp. 181-190, Jan. 2018. (<https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.1.181>)
- [2] C. Waldschmidt, J. Hasch, and W. Menzel, “Automotive radar : From first efforts to



(a)



(b)



(c)

그림 9. 차량과 보행자를 구별하기 위한 특징벡터의 히스토그램으로부터 결정 기준점 추출: (a) 특징벡터 1, (b) 특징벡터 2, (c) 특징벡터 3

Fig. 9. Decision threshold extraction from histogram of each feature vector to distinguish vehicles and pedestrians: (a) the first feature vector, (b) the second feature vector, and (c) the third feature vector

측정되었다. 그런데 본 논문에서 새로 제안한 세 번째 특징벡터 ‘연속 프레임의 속도 변화량’을 추가할 경우 98.2%로 향상됨을 확인할 수 있었다.

- future systems,” *IEEE J. Microwaves (JMW)*, vol. 1, no. 1, pp. 135-148, Jan. 2021. (<https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3033616>)
- [3] E. Hyun and Y.-S. Jin, “Human-vehicle classification scheme using doppler spectrum distribution based on 2D range-doppler FMCW radar,” *JIFS*, vol. 35, no. 6, pp. 6035-6045, Dec. 2018. (<https://doi.org/10.3233/JIFS-169844>)
- [4] E. Hyun and Y.-S. Jin, “Doppler-spectrum feature-based human-vehicle classification scheme using machine learning for an FMCW radar sensor,” *MDPI Sensors*, vol. 20, no. 7, Apr. 2020. (<https://doi.org/10.3390/s20072001>)
- [5] I. S. Baek, M. K. Jung, and S. H. Cho, “Improvement of computational speed for the SVD background clutter signal subtraction algorithm in IR-UWB radar systems,” *J. KICS*, vol. 38c, no. 01, pp. 89-96, Jan. 2023. (<http://dx.doi.org/10.7840/kics.2013.38C.1.89>)
- [6] E. Hyun, Y.-S. Jin, J.-H. Park, and J.-R. Yang, “Machine learning-based human recognition scheme using a doppler radar sensor for in-vehicle applications,” *MDPI Sensors*, vol. 20, no. 21, Oct. 2020. (<https://doi.org/10.3390/s20216202>)
- [7] W. Kim, H. Cho, J. Kim, B. Kim, and S. Lee, “YOLO-based simultaneous target detection and classification in automotive FMCW radar systems,” *MDPI Sensors*, vol. 20, no. 10, May 2020. (<https://doi.org/10.3390/s20102897>)
- [8] E. Hyun, Y.-S. Jin, and H.-C. Jeon, “Radar image extraction scheme for FMCW radar-based human motion indication,” *J. KIEES*, vol. 6, no. 29, pp. 411-414, Jun. 2018. (<http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2018.29.6.411>)
- [9] Y. Kim and H. Ling, “Human activity classification based on micro-doppler signatures using a support vector machine,” *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing (TGRS)*, vol. 47, no. 5, pp. 1328-1337, May 2009. (<https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2012849>)
- [10] V. C. Chen, F. Li, S.-S. Ho, and H. Wechsler, “Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study,” *IEEE Trans. Aerospace and Electr. Syst.(TAES)*, vol. 42, no. 1, pp. 2-21, Jan. 2006. (<https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603402>)
- [11] E. Hyun, Y.-S. Jin, and J. Bae, “A study on doppler radar based human indication algorithms,” in *Proc. KICS Winter Conf. 2023*, p. 740, Gangwon-do Pyeongchang, Korea, Feb. 2023.

현 유 진 (Eugin Hyun)



1999년 2월 : 영남대학교 전자공학과 졸업
 2000년 8월 : 영남대학교 전자공학과 석사졸업
 2005년 3월 : 영남대학교 전자공학과 박사졸업
 2005년 6월~현재 : DGIST 미래자동차연구부 책임 연구원

<관심분야> 레이더 신호처리 및 머신러닝, 레이더 시스템 설계, 다중 센서 융합, 스마트 자동차 및 스마트 시티 응용 레이더 개발

[ORCID:0000-0001-8196-7173]

진 영 석 (YoungSeok Jin)



2009년 2월 : 대구대학교 통신공학과 졸업
 2012년 2월 : 대구대학교 통신공학과 석사 졸업
 2012년 3월 : DGIST 미래자동차연구부 전임연구원

<관심분야> 레이더 신호처리 및 머신러닝, 레이더 시스템 임베디드 구현, 스마트 자동차 및 스마트 시티 응용 레이더 개발

배 지 은 (Jieun Bae)



2021년 2월 : 계명대학교 전자공
학과 졸업

2022년 1월~현재 : DGIST 미래
자동차연구부 연구원

<관심분야> 레이더 신호분석
SW 구현, 레이더 시험 및 검
증, 스마트 자동차 및 스마트
시티 응용 레이더 개발