

77GHz FMCW 인캐빈 레이더를 이용한 운전자 상태모니터링 시스템 연구

Study on Driver Condition Monitoring Using 77GHz In-cabin FMCW Radar

주 경 덕*, 오 명 준*, 김 용 명*, 조 윤 성*, 정 영 배**

Gyeong-Deok Ju*, Myeong-Jun Oh*, Yong-Myeong Kim*, Yun-Seong Jol, Young-Bae Jung**

Abstract

In this paper, we propose a driver condition monitoring system using FMCW in-cabin radar, which is free from wearing inconvenience and privacy issues. Using 77GHz high-precision radar, the system detects changes in eye blinking patterns according to changes in the driving environment and the driver's condition using an adaptive multiple filtering algorithm, and accurately determines drowsy driving by measuring the number of eye blinks and the time it takes to open and close the eyes through the detected data. With the emergence of high-performance radars that are becoming more and more miniaturized, it is possible to embed them in the instrument panel or rearview mirror of the vehicle, and if the driver is judged to be drowsy, it can wake up the driver through an alarm or interlock with the vehicle's driving system to slow down and make an emergency stop to prevent accidents and promote driver safety.

요 약

본 논문에서는 착용의 불편함이나 사생활 침해문제에 자유로운 FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) 인캐빈(In-cabin) 레이더를 이용한 운전자 상태모니터링 시스템을 구현하였다. 77GHz 대역의 고정밀 레이더를 이용하여 운전 환경변화와 운전자의 상태(Condition)에 따른 눈 깜빡임 패턴변화를 적응형 다중 필터링 알고리즘을 사용해 탐지하도록 하였으며, 검출된 데이터를 통하여 눈 깜빡임 횟수와 눈을 떴다가 감는데 소요되는 시간을 측정함으로써 졸음운전을 정확하게 판단하도록 하였다. 최근 날로 소형화되고 있는 고성능 레이더의 등장으로 차량 내 계기판이나 백미러 등에 매립이 가능하며, 운전자가 졸음 상태로 판단될 경우, 알람을 통해 운전자를 깨우거나 차량의 주행시스템과 연동하여 서행 및 비상 정차시킴으로써 사고방지와 운전자의 안전을 도모할 수 있다.

Key words : FMCW, radar, driver, drowsiness, adaptive multiple filtering, ADAS

* Electronics Engineering, Hanbat National University, Deajeon 34158, South Korea

★ Corresponding author

E-mail : ybjung@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1136

※ Acknowledgment:

This results was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (2021RIS-004).

This research was supported by the MSIT (Ministry of Science and ICT), Korea, under the ICAN (ICT Challenge and Advanced Network of HRD) program (IITP-2024-RS-2022-00156212) supervised by the IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation).

Manuscript received Aug. 20, 2024; revised Aug. 23, 2024; accepted Aug. 23, 2024.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

졸음운전은 교통사고의 주요 원인 중 하나로, 경찰청 교통사고 통계에 따르면 지난 5년간(2019~2023년) 졸음운전으로 인한 교통사고는 총 1만 765건이 발생했다. 사망자는 316명으로 사고 100건당 약 2.9명이 사망했고, 이는 같은 기간 음주 운전 교통사고(1.5명)의 약 2배에 달했다[1]. 졸음운전은 눈 깜박임 변화를 포함한 여러 생리적 변화를 일으키며, 이는 다양한 방식으로 모니터링을 함으로써 감지할 수 있다[2].

졸음을 감지하여 모니터링을 하는 기술로는 각막과 망막 간 전위를 측정하여 눈의 움직임을 기록하는 EOG (Electrooculography)와 스마트 글라스를 포함하여 눈에 근접하여 눈꺼풀의 움직임을 모니터링하는 근접 센서 등이 있으며, 근래에는 자율주행 등에 널리 활용되고 있는 인캐빈(In-cabin) 카메라가 활용되고 있다. 이중, EOG와 근접 센서는 웨어러블 디바이스에 내장되어 높은 정확도를 보이나 직접 착용해야 하는 불편함을 가지고 있다. 카메라의 경우, 고해상도의 실시간 이미지 분석을 통하여 객체의 상태변화를 판단하기가 용이하나 사생활 촬영에 따른 개인정보 문제가 심각하게 대두되고 있다[3]. 따라서, 졸음 감지 시스템은 어떠한 상태에도 운전자의 상태 모니터링을 할 수 있으며, 높은 감지 정확도와 개인정보 보호를 보장할 수 있도록 개발되어야 한다[4].

이러한 문제점을 해결하고자 운전자의 졸음 방식을 포함한 상태모니터링 레이더에 대한 연구가 수행되었으나, 운전자마다의 눈 깜박임 동작의 크기나 속도를 포함한 패턴이 상이하고, 동일 운전자의 경우에 운전 환경에 따라 다양한 패턴이 감지될 수 있다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 기존의 단일 필터링 기법으로 탐지하기 어려운 미세한 눈 깜박임 동작 변화와 생체 신호 검출에 영향을 주는 다양한 잡음 전력 제거가 가능한 77GHz 밀리미터파 대역 FMCW 레이더를 제안한다. 높은 해상도를 가지는 고주파 대역 레이더를 이용하여 미세한 운전자의 운동 데이터를 검출하고, 다양한 운전환경과 운전자의 신체 상태에 따른 생체패턴 변화에 대응이 가능한 적응형 다중 필터링 알고리즘을 적용하였다. 이를 통해, 실시간 운전자의 상태를 감시하여 졸음 여부를 판단하고, 소리나 진동을 통한 알람으로 운전자를 각성시키고, 개선되지 않는 경우, 실신을 포함한 건강상의 위험 상황으로 판단하여 차량의 주행시스템에 연동하여 긴급 제동이 가능하도록 알고리즘을 구현하였다.

II. 본론

1. Sawtooth Frequency Modulation, SFM

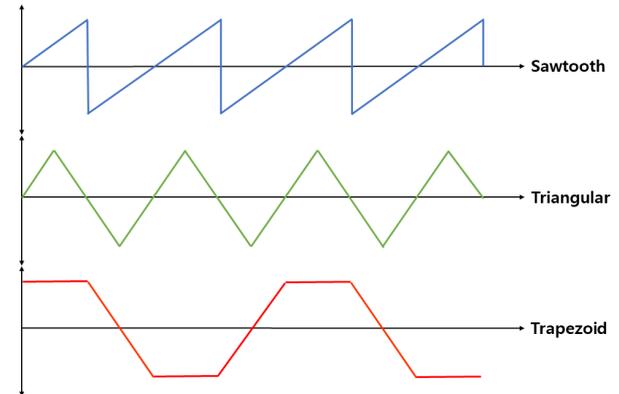


Fig. 1. Comparison of FMCW radar signal waveforms.

그림 1. FMCW 레이더 신호 파형 비교

상술한 목적을 달성하기 위하여, 본 논문에서는 목표물의 거리와 높은 검출 분해능을 갖는 FMCW 방식의 레이더를 적용하였다. FMCW 신호는 기본적으로 톱니(sawtooth), 삼각(triangular), 부등변 사각(trapezoid) 형태의 파형을 이용하며, 톱니파의 경우, 신호 처리를 통해 얻은 거리 프로파일을 추적하고, 추적된 거리 프로파일을 FFT(Fast Fourier Transform) 연산하여 속도 값을 구하는데 매우 유용하다. 삼각파의 경우, 고속 신호에도 적용이 가능하나, 상승 칩(Up-chirp)과 하강 칩(Down-chirp) 간에 발생하는 고스트 표적 신호를 제거하기 어려워 다수 표적 상황에 적용하기 어렵다는 단점이 있으며, 부등변 사각파 또한 거리 정보와 속도 정보가 혼재되어 속도가 같은 다수 표적에 의한 고스트 표적을 제거하기 어렵다[5-6].

따라서, 본 연구에서는 장거리나 고속 이동표적에 적용하기 어려우나 근거리에서 연속적인 눈 깜박임을 안정적으로 모니터링을 할 수 있는 톱니파 신호를 사용하였다.

가. 송신 신호

$$x_T(t) = A_T \cos(2\pi f_c t + 2\pi \int_0^t f_T(\tau) d\tau) \quad (1)$$

A_T 는 송신 신호의 진폭, f_c 는 반송파 주파수, $f_T(\tau)$ 는 시간 주기 내에 변화하는 순간 송신 신호의 주파수로 $f_T(\tau) = (B/T)\tau$ 로 정의된다. 여기서, B 는 대역폭, T 는 칩(chirp) 신호의 지속 시간이다. 이 수식은 주파수가 톱니파 형태로 주기 내에서 선형적으로 증가함을

나타내고, 다양한 주파수 성분을 포함하는 신호를 생성한다.

나. 수신 신호

$$x_R(t) = A_R \cos(2\pi f_c(t - t_d)) + 2\pi \int_0^t f_R(\tau) d\tau \quad (2)$$

A_R 는 수신 신호의 진폭, t_d 는 송신 신호의 시간 지연으로 $t_d = (2R/c)$ 로 정의되며, R 은 목표물과 레이더 간의 거리, c 는 빛의 속도이다. 수신 신호의 순간 주파수는 $f_R(t) = S \cdot (t - t_d) + \Delta f_d$ 로 정의되며, f_d 는 도플러 주파수를 의미한다. 이 수식은 송신 신호가 목표물에 역산란(inverse scattering)되어 수신될 때 발생하는 시간 지연과 주파수 변화를 설명한다.

다. 중간 주파수 (IF) 신호

$$S_{IF}(t) = \frac{1}{2} A_{IF} \cos(2\pi f_c t_d + 2\pi(S \cdot t_d - \Delta f_d)t) \quad (3)$$

$A_{IF} = A_T A_R$ 는 중간 주파수 신호의 진폭, $2\pi f_c t_d$ 는 시간 지연에 따른 위상 변화를 나타내고, $2\pi(S \cdot t_d - \Delta f_d)t$ 는 도플러 이동과 시간 지연에 따른 주파수 변화를 나타낸다. 송신 신호와 수신 신호는 믹서에서 혼합되어 중간 주파수(IF) 신호는 송신 신호와 수신 신호 간의 주파수 차이를 통해 목표물의 거리와 속도를 추출하고, 톱니파 변조 방식을 통해 송신, 수신, 혼합 과정을 거쳐 목표물의 거리와 속도를 정확하게 측정할 수 있다.

라. Short Time Fourier Transform, STFT

시간-주파수 영역에서 눈 깜박임 동작이 관찰 가능하기에 신호 $s(t)$ 에 STFT(Short Time Fourier Transform)를 적용하여 관찰이 가능한 주파수 스펙트럼으로 표현한다.

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(\tau - t)e^{-2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

$s(\tau)$ 는 재구성된 신호, $h(t - \tau)$ 는 창 함수로 특정 시간 t 주위의 신호를 잘라서 분석하고, $e^{-2\pi f\tau}$ 는 주파수 성분을 추출하는 복소 지수 함수다. 창 함수(window function)를 활용하여 신호 특정 구간을 선택하고, 푸리에 변환을 통해 시간에 따른 주파수 성분으로 분석한다. 주어진 시간 t 에 대해 해당하는 주파수 스펙트럼을 얻고,

이를 모아 시간-주파수 지도를 생성한다. 이를 통해 신호 패턴을 명확하게 파악이 가능하다.

2. 운전자 상태모니터링 긴급 제동 시스템 설계

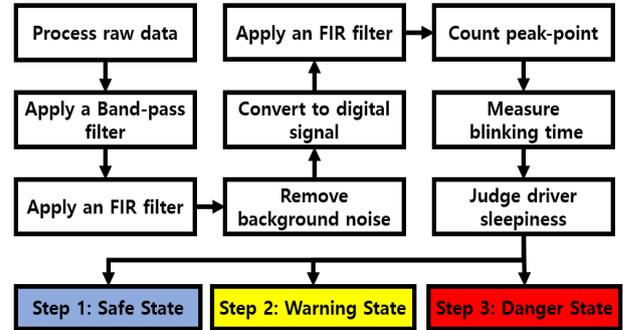


Fig. 2. Radar drowsiness detection algorithm.
그림 2. 레이더의 졸음 감지 알고리즘

가. 원시 데이터 수집 및 3D Cube 변환

77GHz 대역에서 동작하는 Texas Instruments(TI)사의 AWR1243 레이더를 활용하여 운전 상황을 모사한 환경에서 실시간 눈 깜박임 데이터를 검출하였다. 본 시험에서는 눈과 레이더의 간격은 30cm, 측정시간은 20초, 초당 1,000개의 데이터로 총 20,000개의 데이터를 획득하여 각 chirp 신호에 대해 128개의 샘플을 포함하는 창 함수를 사용하여 총 20,000개의 프레임을 수집하고 처리하였다.

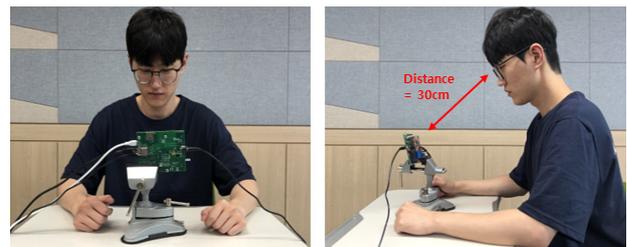


Fig. 3. Test environment for detecting eye blink data.
그림 3. 눈 깜박임 데이터 검출을 위한 시험환경

수집한 데이터는 MATLAB을 통해 3D Cube 형태로 변환되었다. 3D Cube 데이터는 기존의 2D 데이터 처리 방식과 비교해 복잡한 데이터 구조를 다룰 수 있어 더 정밀한 신호 분석이 가능하다. 목표물인 눈 깜박임을 감지하기 위해, 3D Cube 데이터에 2차 FFT와 FFT Shift를 적용하여 2D Plot 형태로 변환하였다. Plot 시각화를 통해 각 창의 인덱스 값 크기에 따라 색상을 구분하고, 밝은색으로 표시된 창 부분에서 값을 비교하여 가장 큰 인덱스 값을 추출하였다. 이를 통해 눈 깜박임

신호의 미세한 변화까지도 시각화하여 정밀한 눈 깜빡임 감지와 상태분석이 가능하도록 제작되었다.

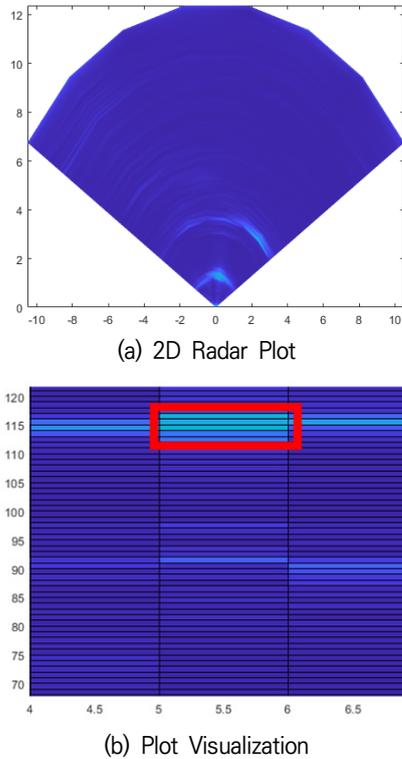


Fig. 4. Extraction of the maximum index value in a 3D cube.

그림 4. 3D Cube 최대 인덱스값 추출

나. 데이터 필터링 및 디지털 신호 변환

눈 깜빡임의 패턴은 사람마다 다르고 운전 환경에 따라 변동될 수 있으며, 단일 필터링 단계로 눈 깜빡임 신호와 잡음을 완전히 분리하기 어렵기 때문에, 이를 효과적으로 처리할 수 있는 적응형 다중 필터링 알고리즘을 개발하였다. 먼저, 추출된 최대 인덱스값을 바탕으로 특정 주파수 대역의 신호 데이터를 확인하기 위해 대역통과(band-pass) 필터링을 적용하였다.

대역통과 필터링된 데이터는 FIR(finite impulse response) 필터링에 앞서 측정 시작과 끝 시간에 나타난 큰 배경 잡음을 제거하고, 신호의 정확도를 높이기 위해 25차 FIR 필터를 적용하여 피크(peak) 신호 주변의 잡음을 제거하였다. 이러한 FIR 필터링 과정을 통해 변환된 데이터는 CA-CFAR(Cell Averaging Constant False Alarm Rate)를 통해 디지털 신호로 변환되었으며, 이 신호는 설정된 임계값(Threshold)에 따라 피크 포인트(Peak-Point) 형태로 표현하고, 눈 깜빡임 신호와 관련되지 않은 다른 신호는 설정된 임계값 미만일 경우

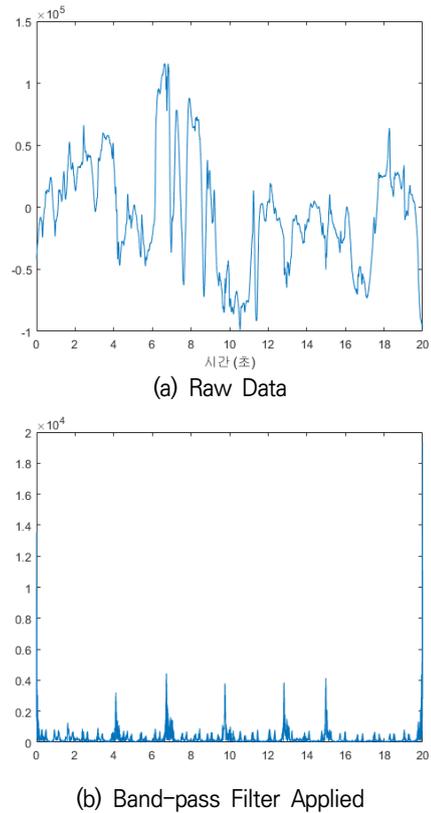


Fig. 5. Maximum Index Data Transformation. 그림 5. 최대 인덱스 데이터 변환

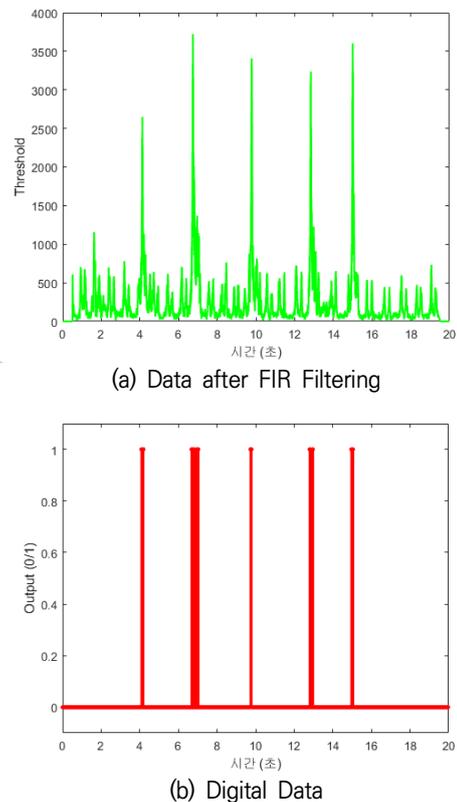


Fig. 6. Digital data conversion after FIR Filtering. 그림 6. FIR 필터링 이후의 디지털 데이터 변환

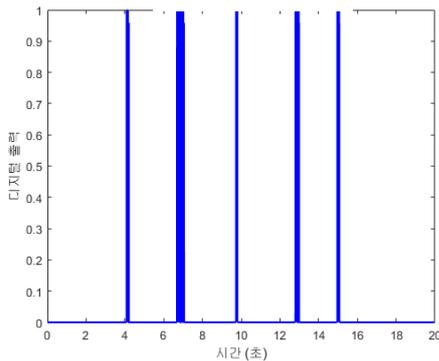
자동으로 제거되었다. 이를 통해 미세한 눈 깜박임 신호를 디지털화하여, 신호 처리 과정에서 불필요한 잡음을 줄이고, 눈 깜박임 신호를 명확하게 분석할 수 있도록 하였다.

Fig. 6. (b)의 경우 적응형 필터링 알고리즘을 활용하여 디지털 데이터로 변환하였으나, 하나의 눈 깜박임 동작 안에 여러 개의 피크 포인트가 발생하는 문제점을 확인할 수 있다.

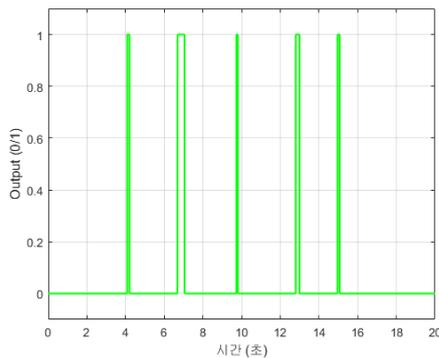
다. 피크 포인트 변환 및 눈 깜박임 횟수 측정

디지털 데이터 변환 과정에서 발생한 여러 피크 포인트를 처리하기 위해 3차 FIR 필터를 추가로 적용하여, 이를 하나의 피크 포인트로 변환하였다. 이렇게 변환된 피크 포인트를 통해 눈 깜박임 횟수를 정확하게 계산하였다.

Fig. 7은 Fig. 6 (b)에서 하나의 눈 깜박임 동작에서 여러 개의 피크 포인트가 발생한 것을 3차 FIR 필터를 적용해 하나의 피크 포인트로 변환한 결과를 보여준다.



(a) 3rd-order FIR Filtered Data



(b) Final Data

Fig. 7. Blink Count Measurement Final Data.

그림 7. 눈 깜박임 횟수 측정 최종 데이터

라. 졸음운전 판단 및 결과 출력

디지털 데이터로 변환된 피크 포인트의 간격을 이용해 눈 깜박임 시간을 측정하고, 졸음운전 감지 기준에 맞춰 눈 깜박임 횟수와 눈을 감았다가 다시 뜨기까지의 시간을 분석하여 졸음운전 위험 단계를 판단하였다[7].

Table 1. Criteria for determining sleepiness using detection data.

표 1. 검출데이터를 이용한 졸음 판정 기준

State Level	Criteria or Judgment Criteria
Level 1. Safe	Blink count ≥ 5 $0s < \text{Blink time} < 0.5s$
Level 2. Warning	$3 \leq \text{Blink count} < 5$ $0.5s \leq \text{Blink time} < 1s$
Level 3. Danger	$0 \leq \text{Blink count} < 3$ $\text{Blink time} \geq 1s, 0s \leq \text{Blink time}$

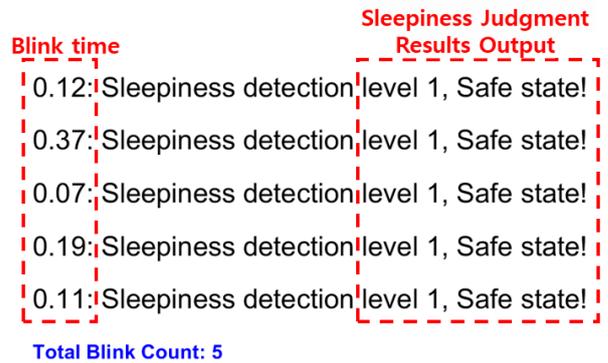


Fig. 8. Results of driver status analysis using drowsiness determination algorithm.

그림 8. 졸음 판단 알고리즘을 이용한 운전자의 상태분석 결과

Fig. 8은 졸음 감지 시스템 알고리즘에 따라 눈 깜박임 횟수, 눈 깜박임 동작 시간, 그리고 눈 깜박임 횟수를 기반으로 졸음을 판단한 단계별 출력 결과를 보여준다.

마. 긴급 제동 시스템 활성화 및 하드웨어 제어

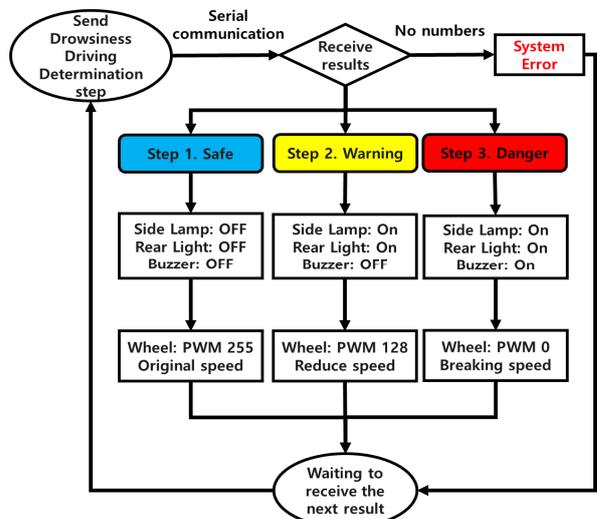


Fig. 9. Emergency braking system hardware control flowchart.

그림 9. 긴급 제동 시스템 하드웨어 제어 흐름도

Fig. 9는 졸음운전 판단 출력 결과의 2단계인 주의 상태와 3단계인 경보 상태에서는 소리 알림, 램프 활성화 및 차량의 속도를 제어하거나 제동 시스템을 활성화하도록 제작된 흐름도다. 아두이노 시리얼 통신을 통해 연결된 하드웨어에 판단 결과를 전송하여, 해당 하드웨어가 각 판단 단계에 맞는 제어 동작을 수행하도록 구현하였다.

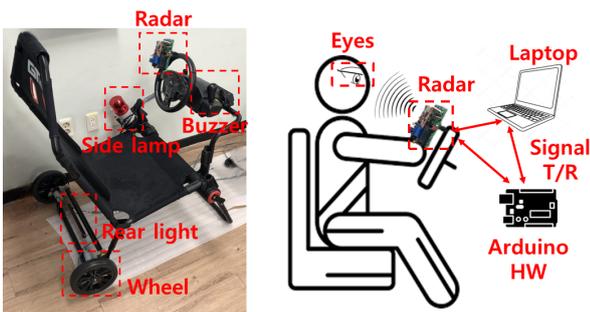


Fig. 10. Prototype of an emergency braking system that simulates driving conditions.

그림 10. 운전 상태를 모사한 긴급 제동 시스템 시제품

Fig 10은 졸음운전 위험 단계 출력에 따른 소리 알림, 사이드 램프, 후미등 온오프(ON/OFF), 차량 속도를 모사하는 시제품 하드웨어를 보여주고 있다. 핸들 부분에 장착된 레이더를 통해 운전자의 눈 깜박임을 감지하고, 졸음운전 위험 단계에 따라 졸음으로 판단 시 운전자에게 알림 신호를 발생하고, 제한된 시간 동안 정상상태로 판단되지 않은 경우, 위험 상황으로 인지하여 레이더와 연결된 자동차 제동 시스템을 통하여 비상감박이를 점멸하면서 긴급 서행 및 제어하는 방식으로 구현하였다.

III. 결론

본 논문에서는 눈 깜박임 분석을 활용한 운전자 상태 감시 모니터링을 통해 긴급 제동 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 77GHz 밀리미터파 대역 FMCW 레이더를 사용하여 눈 깜박임을 감지하고, 사람과 운전 환경에 따라 변동될 수 있는 신호 특성을 효과적으로 처리하기 위해 적응형 다중 필터링 알고리즘을 적용하여 정확한 눈 깜박임 패턴을 추출하였다. 이를 통해, 눈 깜박임 횟수와 눈을 감았다가 다시 뜨기까지의 소요 시간을 측정하여 운전자의 졸음 상태를 판단하였다. 또한, 졸음 운전의 단계에 따라 차량을 제어하는 기능을 구현하여 2단계 주의 상태와 3단계 경보 상태에서는 소리 알림, 램

프, 차량의 속도를 조절하거나 제동 시스템을 활성화하였다.

제안된 레이더는 운전자 상태를 파악하는 기존 센서들의 한계점을 보완하여 착용의 불편함이 없으며, 영상 카메라와는 달리 개인의 사생활 정보를 보호하며 높은 탐지 정확도를 통해 졸음운전을 효과적으로 예방할 수 있다.

향후 연구에서는 운전자의 고개 끄덕임이나 심장 박동과 같은 다양한 생체 신호를 추가로 검출하도록 함으로써, 복합적인 생체정보를 통하여 운전자의 건강 상태와 졸음운전을 정밀하게 감지하고 예방할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통하여, 고도화되고 있는 첨단 운전자보조 시스템(ADAS: Advanced Driver Assistance Systems)의 일환으로 운전자와 탑승자 및 반려동물 등의 상태정보를 모니터링하고 다양한 위험 상황 대처할 수 있도록 기능과 성능을 고도화하고자 한다.

References

- [1] MEDICAL WORLD NEWS: "Traffic accident statistics related to drowsy driving," https://www.medicalworldnews.co.kr/bbs/board.php?bo_table=pds&mcode=m1046v1b&wr_id=5548&page=0
- [2] G. Sikander and S. Anwar, "Driver Fatigue Detection Systems: A Review," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.20, no.6, pp.2339-2352, 2019. DOI: 10.1109/TITS.2018.2868499
- [3] J. Hu et al. "Blink Radar: Non-Intrusive Driver Eye-Blink Detection with UWB Radar," *2022 IEEE 42nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Bologna, Italy, pp. 1040-1050, 2022. DOI: 10.1109/ICDCS54860.2022.00104
- [4] Cui Xu, Ying Zheng and Zengfu Wang, "Efficient eye states detection in real-time for drowsy driving monitoring system," *2008 International Conference on Information and Automation*, Changsha, China, pp.170-17, 2008. DOI: 10.1109/ICINFA.2008.4607990
- [5] Yoon Jaehyuk, Yoo Seongoh, Yang Jaewon, Lee Dongju "Multi-Target Detection Method Using FMCW and CW," *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.* 2020; 31(1): 79-84.

DOI: 10.5515/KJKIEES.2020.

[6] Y. Wang, Y. Shu and M. Zhou, "A Novel Eye Blink Detection Method using Frequency Modulated Continuous Wave Radar," *2021 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, Guangzhou, China, 2021, pp.1-3

DOI: 10.1109/iWEM53379.2021.9790529

[7] E. Cardillo, G. Sapienza, C. Li and A. Caddemi, "Head Motion and Eyes Blinking Detection: a mm-Wave Radar for Assisting People with Neurodegenerative Disorders," *2020 50th European Microwave Conference (EuMC)*, Utrecht, Netherlands, pp.925-928, 2021.

DOI: 10.23919/EuMC48046.2021.9338116

BIOGRAPHY

Gyeong-deok Ju (Member)



2024 : BS degree in electronic and control engineering, Hanbat National University
2024~ : Master's student, Hanbat National University

Myeong-jun Oh (Member)



2023 : BS degree in electronic and control engineering, Hanbat National University
2023~ : Master's student, Hanbat National University

Yong-myeong Kim (Member)



2019~ : Undergraduate student in electronic engineering, Hanbat National University

Yun-seong Jo (Member)



2019~ : Undergraduate student in electronic engineering, Hanbat National University

Young-Bae Jung (Member)



1998 : BS degree in Radio Science and Engineering, Kwangwoon University
2001 : MS degree in Information and Communication Engineering, KAIST

2009 : Ph.D degree in Information and communication Engineering, KAIST

2001~2011 : Senior researcher, Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI)

2010~2012 : Adjunct professor, University of Science and Technology(UST)

2011~Present : Full professor, Hanbat National University