

[붙임3]

2024 METLAB 프로그램 최종보고서

작 성 일	2024.09.29.	학 과	임베디드시스템공학과
팀 명	SPARK	지 도 교 수	최병조
연구주제명	악천후 시 자율주행 정확도 향상에 대한 고찰		
팀원 성명(학번)	채수빈(202001720)		
	박소윤(202201658)		
	박시우(202201659)		

연구 활동 내용

1. 서론

1.1 연구 배경

4차 산업혁명의 주요 기술 중 하나로 손꼽히는 자율주행 기술은 교통의 효율성을 높이고, 사고를 줄이며, 궁극적으로는 인간의 운전 개입을 최소화할 수 있는 혁신적인 해결책으로 주목받고 있다. 자율주행 차량은 레이더, 라이다(LiDAR), 카메라, 초음파 센서 등을 결합하여 주변 환경을 인식하고, 이를 기반으로 실시간 주행 결정을 내리는 고도화된 기술을 사용한다. 이러한 기술적 발전은 자율주행 차량이 교통 체증 해소, 운전자의 피로 감소, 그리고 교통사고 예방에 기여할 가능성을 보여주고 있다. 그러나 자율주행 기술이 현실 세계에서 널리 상용화되기 위해서는 극복해야 할 수많은 과제가 존재하며, 그중에서도 악천후 환경에서의 운행 안정성은 가장 중요한 도전 과제 중 하나이다.

1.2 연구 필요성

악천후 상황, 즉 비, 눈, 안개, 강풍 등의 기상 조건은 자율주행 차량의 핵심적인 센서 성능에 큰 영향을 미친다. 예를 들어, 카메라는 강한 비나 눈이 내릴 때 시야가 가려져 물체를 정확히 인식하지 못할 수 있으며, 라이다는 안개나 폭설 속에서 레이저 빔의 산란으로 인해 탐지 범위가 줄어들고 정확도가 떨어진다. 이러한 문제는 자율주행 차량이 주변 환경을 정확히 인식하지 못하게 하고, 그로 인해 경로 설정과 장애물 회피와 같은 필수적인 주행 결정의 신뢰성을 저하할 수 있다. 이에 따라 자율주행 차량 이용자들은 악천후 속에서 차량이 안정적으로 작동할 수 있을지에 대한 불안감을 가지게 되며, 이는 자율주행 기술의 도입과 대중화를 저해하는 중요한 요인 중 하나가 되고 있다.

1.3 연구 목적 및 주요 연구 주제

본 연구는 악천후 환경이 자율주행 차량의 운행 안정성에 미치는 영향을 깊이 있게 고찰하고, 이를 해결하기 위한 다양한 기술적 방안을 모색하는 것을 목표로 한다. 구체적으로는, 악천후 상황에서도 자율주행 차량의 탐지 및 판단 능력을 향상하기 위한 여러 가지 접근 방법을 다룰 예정이다.

첫 번째로, V2X(차량 간 통신) 기술을 활용한 정보 공유를 통해 악천후 속에서 차량들이 서로의 위치 및 도로 상황을 실시간으로 공유함으로써, 센서의 제한을 보완하고 주행 안전성을 높이는 방안을 모색할 것이다. V2X 기술은 개별 차량의 센서가 감지할 수 없는 정보를 주변 차량이나 인프라와 교환함으로써, 자율주행 차량이 악천후 환경에서도 더 많은 데이터를 기반으로 주행 결정을 내릴 수 있도록 돕는다.

두 번째로, 기계 학습을 활용한 인간 감지 기술을 연구한다. 본 연구에서는 Wi-Fi CSI(Channel State Information) 데이터를 활용하여 짙은 안개나 폭설과 같은 극한의 시계가 제한된 환경에서도 효과적으로 사람을 감지할 방법을 탐구할 예정이다. 기존의 광학 센서나 레이더에 비해 Wi-Fi CSI는 환경의 변화에 덜 민감하며, 물체의 움직임을 더 세밀하게 분석할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 이러한 기계 학습 기반의 기술은 자율주행 차량이 보행자나 다른 차량을 더욱 정확하게 감지하여 사고를 예방하는 데 기여할 수 있다.

마지막으로, 악천후 상황에서 센서의 성능 저하를 막기 위한 하드웨어적 해결책인 센서 클리닝 장치의 설계 및 구현 방안을 제안할 것이다. 악천후 속에서는 차량의 센서에 눈, 비, 먼지 등이 쌓여 탐지 능력이 급격히 저하될 수 있다. 이를 방지하기 위한 자동화된 센서 클리닝 장치는 자율주행 차량의 핵심 장비를 깨끗하게 유지하여, 어떤 환경에서도 최적의 탐지 성능을 발휘할 수 있도록 한다.

본 연구는 이러한 다양한 기술적 해결책들을 종합적으로 분석하고, 악천후 속에서도 자율주행 차량의 정확도와 신뢰성을 높이는 방안을 제시하고자 한다. 이를 통해 자율주행 기술이 더 안전하고 안정적인 방향으로 발전할 수 있는 기반을 마련하고, 궁극적으로는 자율주행 차량의 상용화를 촉진하는 데 기여할 수 있을 것이다.

2. 본론

2.1.1 연구 방법론 - V2X 통신 기술을 이용한 정보 공유

1) 연구 배경 및 필요성

자율주행 자동차의 발전은 현대 교통 시스템의 혁신을 주도하고 있다. 그러나 기존의 자율주행 시스템은 주로 차량 자체에 장착된 센서들을 통해 주변 환경을 인식하고 의사결정을 내린다. 이러한 센서 기반 정보 수집 방식은 시야의 제한성, 환경 요인에 대한 민감성, 그리고 높은 비용과 복잡성 등의 한계를 가지고 있다. 센서는 물리적인 범위 내에서만 작동하므로 곡선 도로나 건물 뒤편의 상황을 인식하는 데 한계가 있으며, 비, 눈, 안개 등의 기상 조건에 의해 성능이 저하될 수 있다. 또한, 고성능 센서의 도입은 비용 상승과 기술적 복잡성을 증가시켜 자율주행 차량의 상용화에 장애물이 될 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신 기술을 이용한 정보 공유의 필요성이 대두되고 있다. V2X 통신은 차량과 차량(V2V), 차량과 인프라(V2I), 차량과 보행자(V2P) 등 다양한 주체 간의 실시간 정보 교환을 가능하게 함으로써, 센서의 한계를 보완하고 인식 범위를 확장한다. 이를 통해 시야 밖의 위험 요소까지 사전에 인지할 수 있으며, 교통 상황, 도로 공사, 사고 등의 정보를 즉각적으로 공유하여 보다 안전하고 효율적인 주행이 가능해진다. 또한 통신 기반의 정보 교환은 기상 조건에 영향을 덜 받으며, 센서의 한계를 보완하는 데 효과적이다.

커넥티드 카와 유비쿼터스 환경은 이러한 V2X 통신 기술의 장점을 극대화한다. 커넥티드 카는 인터넷과 지속적으로 연결되어 다양한 서비스와 정보를 제공함으로써 사용자 경험을 향상하고, 차량의 기능을 확장한다. 유비쿼터스 환경에서는 차량이 교통 신호, 도로 상태, 주차 공간 등의 인프라 정보를 실시간으로 수신하고 활용할 수 있어 스마트 인프라와의 연동이 가능

하다. 이는 운전자의 습관 분석, 차량 유지보수 예측 등 데이터에 기반한 다양한 부가 서비스를 제공할 수 있게 하여 교통 시스템 전반의 효율성을 높인다.

따라서 V2X 통신 기술을 활용한 정보 공유는 자율주행 차량의 안전성과 효율성을 크게 향상할 수 있는 핵심 요소로서, 기존 센서 기반 시스템의 한계를 극복하고 더 포괄적인 데이터 수집과 활용을 통해 교통 시스템의 혁신을 이루기 위해 필수적이다. 이러한 이유로 V2X 통신 기술에 대한 지속적인 연구와 개발이 필요하며, 이는 미래 교통의 안전성과 효율성을 높이는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

2) 연구 방법론

본 연구는 V2X 통신 기술의 효과적인 적용을 위해 기존 통신 프로토콜과 표준을 심층적으로 탐구하고, 실제 교통 상황에서의 다양한 시나리오를 구상하였다. BLE를 통신 매체로 선택하여 비용 효율적이고 에너지 효율적인 시스템을 구현하였으며, BLE 비콘과 RSSI 기반의 위치 추정 기술을 활용하여 보행자의 정밀한 위치 정보를 획득하였다. 이를 통해 자율주행 차량의 안전성과 교통 효율성을 향상하는 정보 공유 시스템의 기반을 마련하였다.

3) 기존의 통신 프로토콜과 표준 탐구

웨이브 방식과 C-V2X 방식 비교

웨이브		C-V2X
와이파이 기반	개요	셀룰러 이동통신 기반. LTE와 5G 기반으로 C-V2X로 통칭
오랜 연구개발, 투자에 따른 안정성	장점	커버리지, 전송 속도 등 성능 우수
커버리지, 확장성	단점	기투자한 웨이브 방식 매몰비용 발생
1km 미만	커버리지	수km
0.1초 미만	지연시간	LTE-V2X는 0.1초 미만, 5G-V2X는 0.01초 미만

현재 V2X 통신에서 주로 사용되는 프로토콜로는 C-V2X(Cellular Vehicle-to-Everything)와 WAVE(Wireless Access in Vehicular Environments)가 있다.

C-V2X는 LTE 기반의 기술로 시작하여 최근에는 5G 기반의 새로운 버전이 제시되었다. LTE 기반 C-V2X는 기존의 이동통신 인프라를 활용하여 비교적 넓은 커버리지와 안정적인 통신을 제공한다. 5G 기반 C-V2X는 초저지연성과 고신뢰성을 바탕으로 자율주행과 실시간 통신에 더욱 적합한 환경을 조성한다. 이러한 발전은 차량과 모든 사물 간의 원활한 통신을 가능하게 하여 V2X 기술의 핵심적인 역할을 수행한다.

한편, WAVE는 DSRC(Dedicated Short Range Communications) 기반으로 개발되었다. WAVE는 IEEE 802.11p 표준을 기반으로 하며, 차량 간의 근거리 통신을 지원한다. 저지연성과 높은 신뢰성을 제공하지만, 통신 범위와 대역폭의 한계로 인해 대규모 네트워크 구성에는 제약이 있을 수 있다.

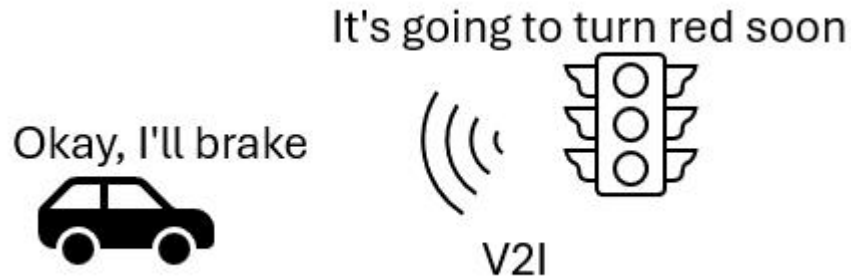
또한, 대한민국에서는 하이패스(Hi-Pass) 시스템이 DSRC 기반의 V2I(Vehicle-to-Infrastructure) 통신의 일종으로 운영되고 있다. 하이패스는 RF(Radio Frequency) 또는 IR(Infrared)를 이용하여 통행료 징수를 위한 차량과 인프라 간의 통신을 수행한다. 이는 V2X 통신의 실질적인 적용 사례로서, 차량과 인프라 간의 실시간 정보 교환이 가능함을 보여준다.

대한민국 정부는 2023년 12월에 C-V2X를 국가 표준으로 발표하였다. 이는 국제적인 V2X

통신 표준화 추세와 기술 발전을 반영한 것으로, 향후 C-V2X 기반의 인프라 구축과 서비스 개발이 더욱 활발해질 전망이다.

4) 실제 적용 시나리오 구상

V2X 통신 기술의 실효성을 검증하기 위해 실제 교통 환경에서의 다양한 적용 시나리오를 구상하였다. 주요 시나리오는 다음과 같다:



▶ 신호등과 자동차 간의 통신을 통한 딜레마 존 억제: 차량이 교차로에 접근할 때 신호등과 실시간으로 통신하여 신호 변경 정보를 사전에 제공함으로써 급제동이나 급가속을 방지한다.



▶ 차량 간 통신을 통한 유령 정체 예방: 앞선 차량의 감속이나 정체 정보를 후방 차량에 전달하여 급작스러운 정체 현상을 완화하고 교통 흐름의 효율성을 향상한다.

▶ 전방 추돌 사고 예방: 선행 차량의 급정지나 도로상의 장애물 정보를 공유하여 후방 차량의 운전자가 신속하게 대응할 수 있도록 지원한다.



▶ 사각지대 보행자 정보 공유: 차량 주변의 보행자 위치 정보를 실시간으로 수집하고 공유하여 운전자의 시야에서 벗어난 보행자와의 충돌 위험을 감소시킨다.

5) 적용 시나리오에 적합한 통신 방식 선정

본 연구에서 설정한 다양한 V2X 통신 시나리오에 적합한 통신 방식을 선정하기 위해 여러 가지 기술을 검토하였다. 주요 고려 사항은 통신 범위, 데이터 전송 속도, 지연 시간, 소비 전

력, 구현 용이성 및 비용 효율성이다.

BLE(Bluetooth Low Energy)는 이러한 고려 사항에서 여러 장점을 가지고 있다. 특히 Bluetooth 5.0에서 BLE의 최대 전송 거리가 약 200m로 증가하여, 신호등과 차량 간 통신, 차량 간 정보 공유, 보행자와의 통신 등 다양한 V2X 시나리오에서 활용 가능성이 크다.

BLE의 주요 장점은 다음과 같다:

- ▶ 저전력 소비: 배터리 수명이 중요한 디바이스에 적합하며, 보행자용 웨어러블 디바이스나 센서에 적용하기 용이하다.
- ▶ 높은 호환성: 스마트폰 대부분과 IoT 기기에 내장되어 있어 추가 인프라 없이도 활용할 수 있다.
- ▶ 구현 용이성 및 비용 효율성: 개발 및 유지보수 비용이 상대적으로 낮아 빠른 도입과 확산이 가능하다.

BLE는 초저지연성이나 고속 데이터 전송이 가능한 C-V2X와는 달리, 비교적 낮은 데이터 전송 속도와 지연 시간을 가지지만, 보행자 안전을 위한 위치 정보 교환이나 간단한 상태 정보 전달에는 충분하다. 또한, BLE를 활용하면 기존의 스마트 기기와 연동하여 보행자나 자전거 이용자 등 교통 약자와의 통신이 가능하다는 이점이 있다.

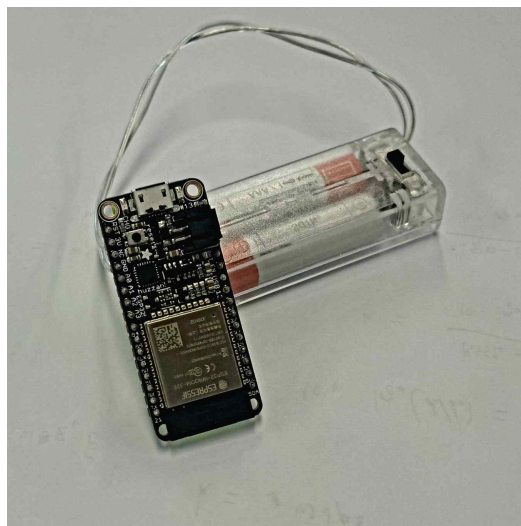
따라서 본 연구에서는 설정한 시나리오에 적합하고 구현이 용이한 통신 방식으로 BLE를 선정하였다. 이를 통해 자율주행 차량과 주변 환경 간의 효율적인 정보 공유 시스템을 구축하고, 교통 안전과 효율성 향상에 기여하고자 한다.

6) 비콘을 통한 정밀 위치 추적

본 연구에서는 BLE 비콘을 활용하여 보행자의 정밀한 위치를 추적하는 방법을 개발하였다. 이는 차량의 센서로 감지하기 어려운 사각지대의 보행자 정보를 실시간으로 획득하여 자율주행 차량의 안전성을 향상하는 것을 목표로 한다.

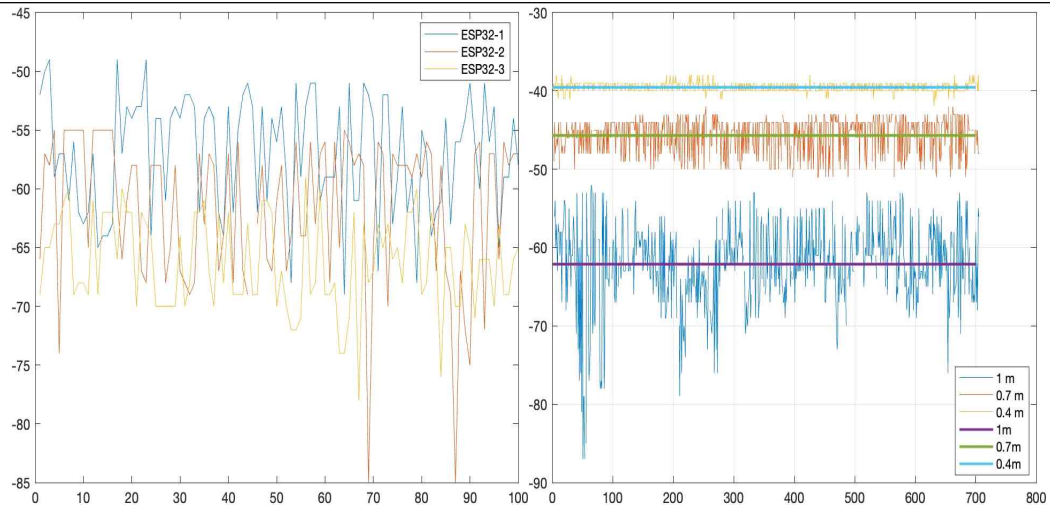
구체적인 연구 절차는 다음과 같다:

1. BLE 비콘 구현:



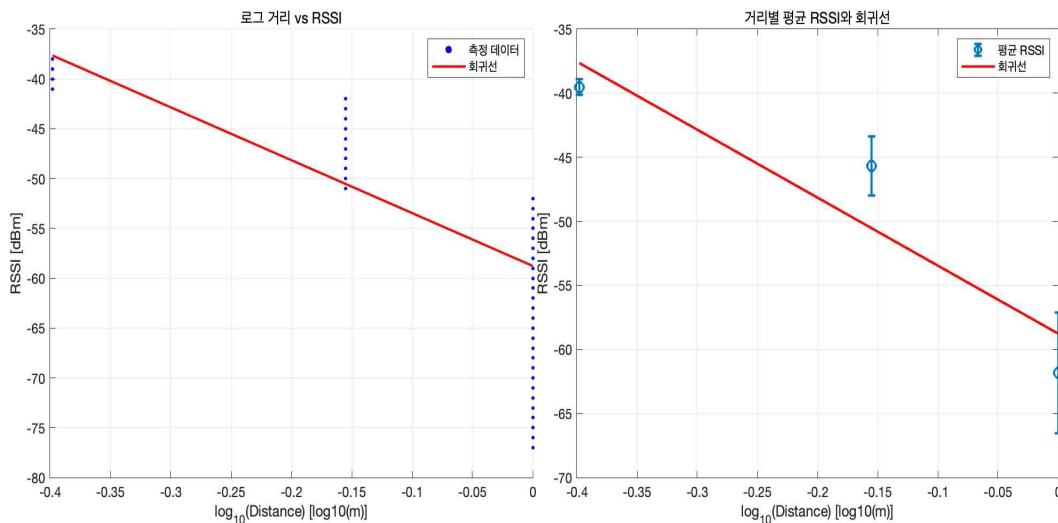
Adafruit사의 ESP32 기반 Feather 보드를 사용하여 BLE 비콘을 제작하였다. ESP32는 BLE 기능을 내장하고 있어 비콘으로서의 역할을 수행하기에 적합하다.

2. RSSI 값 측정:



M1 MacBook Air에서 MATLAB의 blelist 함수를 활용하여 주변 BLE 비콘들의 RSSI(Received Signal Strength Indicator) 값을 실시간으로 측정 및 수집하였다.

3. 데이터 수집 및 환경 변수 계산:



계산된 TxPower: -58.76 dBm

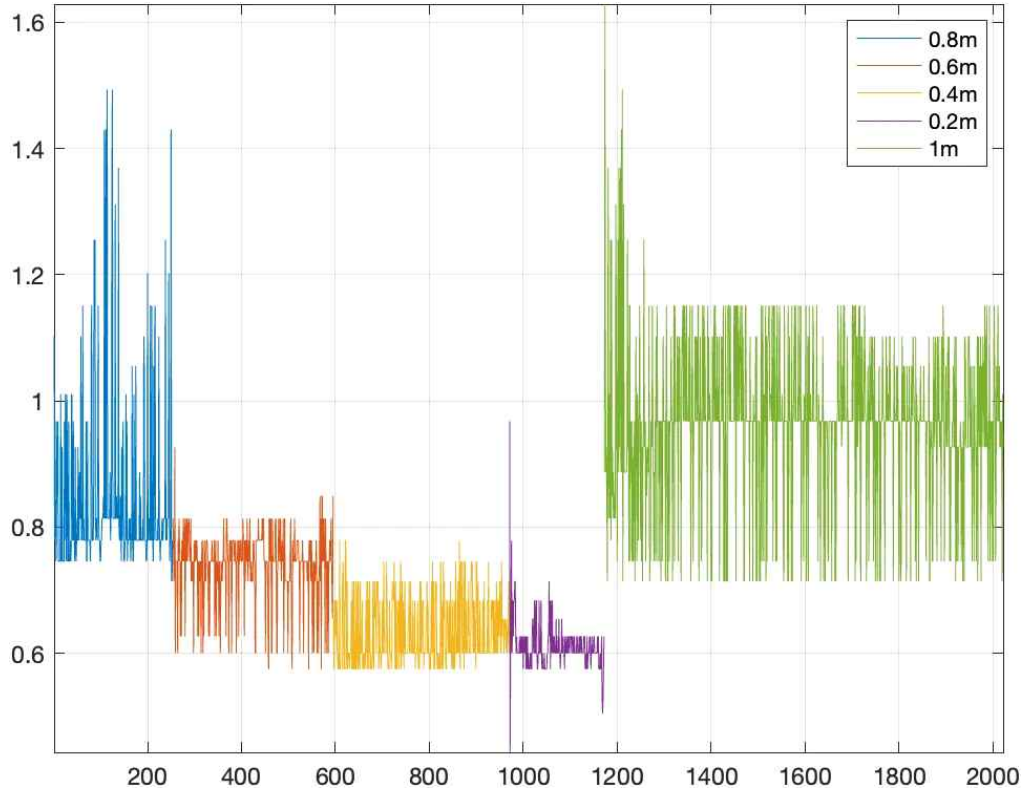
계산된 신호 감쇠 계수 (n): 5.30

fitlm을 사용한 계산된 TxPower: -58.76 dBm

fitlm을 사용한 계산된 신호 감쇠 계수 (n): 5.30

거리별로 약 700개의 RSSI 데이터를 수집하였다. 수집한 데이터를 기반으로 RSSI와 거리 간의 관계를 나타내는 전파 손실 모델을 적용하여 환경 변수를 선형 회귀 분석으로 계산하였다. 이를 통해 특정 환경에서의 신호 감쇠 특성을 파악하였다.

4. 거리 계산 및 위치 추정:



도출된 상수(환경 변수)를 사용하여 새로운 RSSI 값을 측정하고 해당 비콘과의 거리를 계산하였다. 이때, RSSI와 거리의 관계식 $d = 10^{\frac{\text{TxPower} - \text{RSSI}(d)}{10n}} = 10^{\frac{-58.7617 - \text{RSSI}(d)}{10 \times 5.3043}}$ 을 활용하여 실시간으로 거리를 추정하였다.

5. 노이즈 문제 및 위치 추정의 한계:

그러나 RSSI 데이터에는 환경 요인으로 인한 노이즈가 다수 섞여 있어, 신뢰할 수 있는 거리 계산이 어려웠다. 신호 반사, 장애물, 전자기 간섭 등으로 인해 RSSI 값의 변동성이 커서 실제 위치 추정을 수행하지 못하였다.

노이즈를 줄이기 위한 필터링 기법 도입이나 추가 센서 데이터와의 융합 등을 통해 위치 추정의 정확도를 향상시킬 필요가 있다. 이러한 개선을 통해 BLE를 활용한 정밀 위치 추적의 실현 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

7) 다른 시나리오의 실현 가능성 확인

또한, 앞서 제시한 다른 시나리오들에 대해서도 간단한 검토를 통해 실현 가능성을 확인하였다

▶ 신호등과 자동차 간의 통신: BLE를 활용하여 신호등 상태 정보를 차량에 전달하는 방안을 모색하였다. 이를 통해 차량이 교차로에 접근할 때 신호 변경 정보를 사전에 수신하여 운행 전략을 조정할 가능성을 검토하였다.

70km/h의 속도로 주행 중이던 차량이 약 $0.2g$ ($= 1.96m/s^2$) 크기의 가속도로 정지하는데 걸리는 시간은 9.92초이다. 해당 시간 동안 차량은 약 96.43m를 이동하므로, 200m 수준의 통신 거리라면 커버할 수 있다.

▶ 차량 간 통신: BLE 모듈을 이용한 차량 간 간단한 메시지 교환이 가능함을 이론적으로 확인하였다. 이를 통해 앞선 차량의 급정지나 장애물 정보를 후방 차량에 전달하는 응용이 가능할 것으로 예상하였다.

이러한 검토를 통해 BLE를 활용한 V2X 통신 시스템이 다양한 시나리오에서 적용 가능성이 있음을 확인하였다. 그러나 실제 구현과 실험을 통해 성능을 검증하고, 발생할 수 있는 기술적 한계를 극복하기 위한 추가 연구가 필요하다.

2.1.2 결과 - V2X 통신 기술을 이용한 정보 공유

본 연구에서는 V2X 통신 기술을 활용하여 자율주행 차량과 주변 환경 간의 효율적인 정보 공유 시스템을 구현하고자 하였다. 이를 위해 BLE를 통신 방식으로 선택하고, 다양한 시나리오에서의 적용 가능성을 실험 및 검토하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. BLE를 활용한 통신 방식의 적용 가능성 확인

- ▶ 통신 범위의 적합성: Bluetooth 5.0에서 BLE의 최대 전송 거리가 약 200m로 증가하여, 신호등과 차량 간의 통신, 차량 간 정보 교환, 보행자와의 통신 등 다양한 V2X 시나리오에서 활용 가능성을 확인하였다.
- ▶ 구현 용이성 및 비용 효율성: BLE는 대부분의 스마트폰과 IoT 기기에 내장되어 있어 추가 인프라 없이도 활용할 수 있으며, 저전력 소비로 유지비용이 적게 든다.

2. 비콘을 통한 정밀 위치 추적 시도

- ▶ BLE 비콘 구현 및 데이터 수집: Adafruit사의 ESP32 기반 Feather 보드를 사용하여 BLE 비콘을 구현하였다. M1 MacBook Air에서 MATLAB의 blelist 함수를 활용하여 비콘들의 RSSI 값을 측정하고, 거리별로 약 700개의 데이터를 수집하였다.
- ▶ 환경 변수 계산 및 거리 추정: 수집된 데이터를 기반으로 RSSI와 거리 간의 관계식을 적용하여 환경 변수를 선형 회귀로 계산하였다. 도출한 상수들을 사용하여 RSSI 값으로부터 거리를 추정하고자 하였다.
- ▶ 노이즈로 인한 한계 발견: 그러나 RSSI 데이터에 환경 요인으로 인한 노이즈가 다수 섞여 있어, 신뢰할 수 있는 거리 계산이 어려웠다. 이로 인해 실제 위치 추정을 수행하지 못하였다.

3. 다른 시나리오의 실현 가능성 확인

- ▶ 신호등과 차량 간 통신: BLE를 활용하여 신호등 상태 정보를 차량에 전달하는 가능성을 검토하였다.
- ▶ 차량 간 통신: BLE 모듈을 장착한 장치 간의 간단한 메시지 교환이 가능함을 확인하였다.
- ▶ 보행자 안전 향상: BLE를 통해 보행자와 차량 간의 정보 교환이 가능하여, 교통 안전을 향상시킬 수 있는 잠재성을 확인하였다.

2.1.3 논의 - V2X 통신 기술을 이용한 정보 공유

본 연구를 통해 BLE를 활용한 V2X 통신 시스템의 가능성과 한계를 파악할 수 있었다.

1. BLE의 장점과 적용성

- ▶ 높은 호환성 및 저전력 소비: BLE는 이미 광범위하게 사용되고 있는 기술로, 다양한 기기와의 연동이 용이하다. 저전력 특성은 배터리로 구동되는 디바이스에 적합하다.
- ▶ 다양한 시나리오에서의 활용 가능성: 최대 200m의 통신 범위를 바탕으로 여러 V2X 시나

리오에 적용 가능하며, 구현이 비교적 용이하다.

2. RSSI 기반 위치 추정의 한계

- ▶ 노이즈 영향: 실험 결과, RSSI 값은 환경 요인(신호 반사, 장애물, 전자기 간섭 등)에 매우 민감하여 데이터에 노이즈가 많이 포함되었다.
- ▶ 정확한 위치 추정의 어려움: 노이즈로 인해 거리 계산의 오차가 커져, 실제로 보행자의 정확한 위치를 추정하는 데 한계가 있었다.

3. 향후 개선 방안

- ▶ 신호 처리 기법 도입: Kalman 필터 등 신호 처리 알고리즘을 적용하여 RSSI 데이터의 노이즈를 감소시키는 방안을 고려할 수 있다.
- ▶ 다중 센서 융합: BLE 외에 다른 센서(예: UWB, GPS, IMU 등)와의 데이터 융합을 통해 위치 추정의 정확도를 높일 수 있다.
- ▶ 환경 특성 분석: 실험 환경의 특성을 상세히 분석하여 환경 변수에 따른 보정 값을 적용함으로써 정확도를 향상시킬 수 있다.

4. BLE 기반 V2X 통신의 의의

- ▶ 교통 약자와의 통신 강화: BLE를 활용하면 보행자나 자전거 이용자 등 교통 약자와의 통신이 가능하며, 자율주행 차량의 안전성을 높일 수 있다.
- ▶ 비용 효율적 접근: 기존 인프라를 활용하면서도 비교적 낮은 비용으로 V2X 통신 시스템을 구현할 수 있다.

2.2.1. 연구 방법론 - Wi-Fi CSI 데이터를 활용한 기계 학습

1) 연구 배경 및 필요성

자율주행 차량의 핵심 기술 중 하나는 보행자와 같은 주변 객체를 정확하게 탐지하는 능력이다. 하지만 카메라, 라이다와 같은 시각적 센서를 활용한 탐지 시스템은 악천후, 특히 짙은 안개와 같은 환경에서는 큰 한계를 가진다. 안개나 비, 눈과 같은 기후 조건에서는 센서가 물체를 제대로 인식하지 못해 탐지 실패가 발생할 수 있으며, 이는 자율주행 차량의 안전성에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 이유로 자율주행 기술이 실생활에 널리 적용되기 위해서는 악천후에서도 신뢰할 수 있는 감지 기술이 필수적이다.

특히, 짙은 안개 속에서는 가시거리가 제한되기 때문에 기존의 카메라나 라이다 센서가 사람이나 장애물을 인식하는 데 실패할 수 있다. 이로 인해 차량이 긴급한 상황에서 적절한 조치를 취하지 못하는 경우가 발생할 수 있어 자율주행의 안전성과 신뢰성에 큰 문제를 초래할 수 있다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 Wi-Fi CSI(Channel State Information) 데이터를 활용한 기계 학습 기술을 적용하여 짙은 안개와 같은 악천후에서도 사람의 위치를 효과적으로 탐지할 수 있는 방안을 연구하고자 한다. Wi-Fi CSI 데이터는 Wi-Fi 신호가 주위의 물체나 사람에 의해 반사되거나 굴절될 때 발생하는 변화를 측정하는 기술로, 시각적 정보가 아닌 무선 신호를 통해 물체를 감지한다. 이 기술은 전파를 기반으로 하기 때문에 시각적 장애물이나 기상 조건에 크게 영향을 받지 않으며, 자율주행 차량의 보행자 탐지 성능을 보완할 수 있다.

2) 연구 방법론

본 연구는 Wi-Fi CSI 데이터를 이용해 실시간으로 사람의 움직임을 감지하고, 이를 기계 학습을 통해 분석하는 과정으로 구성된다. 연구 방법론은 크게 세 가지 단계로 나눌 수 있다:

- ▶ Wi-Fi CSI 데이터 수집
- ▶ 데이터 전처리 및 학습
- ▶ 모델 성능 평가 및 결과 분석

3) Wi-Fi CSI 데이터 수집

Wi-Fi CSI 데이터를 수집하기 위해 ESP32-CAM 두 대와 노트북을 사용했다. ESP32-CAM은 Wi-Fi 신호를 송수신할 수 있는 IoT 장치로, Wi-Fi 신호가 전파되는 과정에서 발생하는 변화를 포착하여 CSI 데이터를 수집할 수 있다. 이를 통해 주변 환경의 변화를 감지하고, 이를 분석하여 사람의 위치를 파악할 수 있다.

준비물: ESP32-CAM 2대, ESP32-CAM-MB 모듈, USB 케이블, 노트북

설정 환경: ESP32-CAM 두 대 중 한 대는 Wi-Fi 신호를 송출하고, 다른 한 대는 이 신호를 수신하여 CSI 데이터를 기록하도록 설정하였다. 이를 위해 VS Code와 ESP-IDF 5.3 버전을 설치하여 개발 환경을 구축하였다.

데이터 수집 환경: 연구는 다양한 실험 환경에서 진행되었다. 실내 공간, 1.6m 거리가 있는 공터, 가구가 있는 방 등 여러 환경에서 데이터를 수집하였으며, 각 환경에서 사람의 위치에 따른 Wi-Fi 신호의 변화를 측정했다.

수집된 데이터는 네 가지 시나리오에서 기록되었다.

- ▶ 아무것도 없는 상태
- ▶ 사람이 왼쪽에 있을 때
- ▶ 사람이 중앙에 있을 때
- ▶ 사람이 오른쪽에 있을 때

Wi-Fi CSI 데이터를 수집하는 과정에서 중요한 요소로 RSSI(Received Signal Strength Indicator), Timestamp, 그리고 128개의 CSI 데이터 배열이 활용되었다. 먼저 RSSI는 esp32-cam의 dBm 신호 변화를 통해 사람의 움직임을 감지하는 데 사용됐다. 사람이 Wi-Fi 신호 경로에 위치할 때 신호 강도가 변하는 특성을 이용하여 사람의 위치를 예측할 수 있었으며, 이 데이터는 보행자의 유무와 위치를 파악하는 데 중요한 역할을 했다.

또한, Timestamp는 수집되는 데이터의 실시간성을 기록하고 예측할 수 있는 중요한 정보로, 데이터가 수집된 시간을 기반으로 실시간 분석이 가능했다. 이를 통해 보행자가 특정 위치를 통과하는 시간을 추적하고, 자율주행 환경에서의 실시간 반응성을 확인할 수 있었다.

마지막으로 128개의 CSI 데이터 배열은 Wi-Fi 신호의 세밀한 변화를 반영하며, 사람이 Wi-Fi 신호 경로를 가로지르거나 특정 위치에 있을 때 나타나는 미세한 변동을 측정할 수 있었다. 이 데이터는 신호가 벽이나 물체를 통과할 때의 변화뿐만 아니라, 특히, 이 CSI 데이터 배열은 Wi-Fi 신호의 다양한 경로에서 반사 및 굴절을 포함한 다중 경로 효과를 추적하여, 보행자의 방향과 이동 경로를 분석하는 데 중요한 역할을 했다. 이러한 데이터를 바탕으로 다양한 시나리오에서 Wi-Fi CSI 데이터를 수집하고, 사람의 위치와 움직임을 보다 정교하게 추적

할 수 있었다.

Wi-Fi CSI 데이터를 수집하기 위한 환경을 구축하기 위해, ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework)와 VS Code를 활용하였다. 이를 통해 데이터 수집 및 전처리 과정을 진행했으며, 두 도구의 장단점을 이해하고 적절히 활용하는 것이 핵심적인 역할을 하였다.

이를 바탕으로, VS Code와 ESP-IDF 버전 5.3을 설치하여 환경을 연동하고 작업을 시작하였다. CSI 데이터를 수집하기 위해 Espressif 공식 GitHub 저장소에서 esp-csi 폴더를 clone 하여 사용하였으며, CSI 데이터를 정확하게 수집하기 위한 설정 과정이 이어졌다.

이후, idf.py 명령어를 실행하기 위해 필요한 환경 변수를 설정하기 위해 다음 경로로 이동하였다.

▶ C:\Users\asx12\esp32\new_esp5\components\esp-idf-v5.3

이 경로에서 export.bat 명령어를 실행하여 환경을 설정한 후, esp32-cam과 Wi-Fi 라우터 사이의 CSI 데이터를 수집할 준비를 마쳤다.

CSI 데이터를 수집하기 위한 다음 경로로 이동하여 추가 설정을 진행하였다.

▶ C:\Users\asx12\esp32\new_esp5\components\esp-idf-v5.3
\\git-esp-csi\esp-csi-master\examples\get-started\csi_recv_router

이후, idf.py menuconfig 명령어를 사용하여 Wi-Fi SSID와 Password를 설정하였다.

▶ idf.py menuconfig → Example Connection Configuration → WiFi SSID, WiFi Password 설정

설정을 완료한 후 저장하고, idf.py build, idf.py flash, 그리고 idf.py monitor 명령어를 사용하여 실시간으로 Wi-Fi CSI 데이터를 수집하였다.

환경 설정을 위해 idf.py 명령어를 사용할 때, Python 인코딩을 맞추기 위해 반드시 set PYTHONIOENCODING=utf-8 명령어를 설정해야 한다. 이를 통해 idf.py monitor를 실행할 수 있으며, 데이터를 실시간으로 확인할 수 있다. 추가적으로, 데이터를 수집하고 이를 파일로 저장하기 위해 다음 명령어를 사용했다.

▶ powershell -Command "& {idf.py -p COM5 monitor | Tee-Object -FilePath csi_8m_mt.csv }"

이 명령어를 사용하면 CSI 데이터가 실시간으로 수집되며, 로그 창에서 데이터를 실시간으로 확인할 수 있을 뿐만 아니라 CSV 파일에 저장된다.

이 과정을 통해, 수집한 데이터를 기반으로 RSSI, Timestamp, 그리고 128개의 CSI 데이터 배열을 활용하여 사람의 위치와 움직임을 보다 정확하게 감지할 수 있었으며, 다양한 환경에서 안정적인 데이터를 확보했다.

4) 데이터 전처리 및 학습

수집된 Wi-Fi CSI 데이터는 기계 학습에 사용되기 전에 데이터 전처리 과정이 필요하다. Wi-Fi CSI 데이터는 노이즈가 포함될 수 있으며, 이를 제거하고 학습 가능한 형식으로 변환해야 한다. 본 연구에서는 StandardScaler를 사용하여 데이터를 정규화하였다. StandardScaler는 각 데이터의 평균을 0으로 맞추고, 표준 편차를 1로 변환하여 데이터의 크기를 표준화하는 도구이다. 이를 통해 각 데이터 포인트 간의 차이가 과도하게 크거나 작아지지 않도록 조정할 수 있다. 특히, Wi-Fi CSI 데이터는 신호 세기나 시간 스탬프 등 여러 요인에 의해 크게 변동될 수 있기 때문에 이러한 정규화 작업이 필수적이다.

정규화된 데이터를 기반으로 우리는 Random Forest 알고리즘을 사용해 학습을 진행했다. Random Forest는 다수의 결정 트리를 결합하여 예측 정확도를 높이는 앙상블 학습 기법으로, 다중 클래스 분류 문제에서 특히 효과적이다. 이 알고리즘은 다양한 환경에서 사람의 위치를 감지하는 데 매우 유용하며, 특히 신호의 변화가 복잡한 Wi-Fi CSI 데이터에서 우수한 성능을 보였다. 학습을 위해 수집한 데이터를 80%는 훈련 데이터로, 나머지 20%는 테스트 데이터로 나누어 사용했다. 훈련 데이터는 모델을 학습시키는 데 사용되었으며, 테스트 데이터는 학습된 모델의 성능을 평가하는 데 활용되었다. 데이터를 적절히 분할함으로써 모델이 과적합되지 않도록 방지하고, 각 시나리오에서의 Wi-Fi CSI 데이터를 기반으로 사람의 위치를 예측하도록 하였다.

5) 모델 성능 평가 및 결과 분석

모델의 성능을 평가하기 위해 다양한 지표를 사용하여 정확도와 성능을 측정했다. 모델의 성능을 평가하기 위한 주요 지표로는 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 재현율(Recall), 그리고 F1-score를 사용하였다. 이들은 기계 학습 모델이 얼마나 정확하게 예측을 수행하는지에 대한 지표로, 특히 불균형한 데이터셋에서 모델의 성능을 정확히 평가할 수 있도록 도와준다.

▶ **정확도(Accuracy):** 실험 결과, 전반적인 정확도는 93% 이상을 기록하였다. 이는 Wi-Fi CSI 데이터를 이용한 사람의 위치 감지 시스템이 매우 높은 신뢰성을 가진다는 것을 의미한다. 특히, 짙은 안개와 같은 시각적 정보가 제한된 상황에서도 정확도가 90% 이상으로 유지되었다.

▶ **정밀도(Precision)와 재현율(Recall):** 실험에서 각 위치별로 사람의 위치를 정확히 감지한 비율을 나타낸다. 정밀도는 모델이 감지한 결과 중 실제로 사람이 존재하는 비율을, 재현율은 실제로 사람이 존재하는 모든 경우 중 모델이 정확히 감지한 비율을 나타낸다. 이 두 지표 모두 85% 이상의 높은 값을 기록하였다. 특히, 사람의 위치에 따라 Wi-Fi 신호의 변화를 잘 포착하여 높은 성능을 유지할 수 있었다.

▶ **F1-score:** 정밀도와 재현율의 조화를 나타내는 F1-score 역시 85% 이상을 기록하였다. 이는 모델이 균형 잡힌 성능을 보여주었음을 의미하며, 각 클래스(왼쪽, 중앙, 오른쪽, 아무것도 없음)에 대해 균등하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

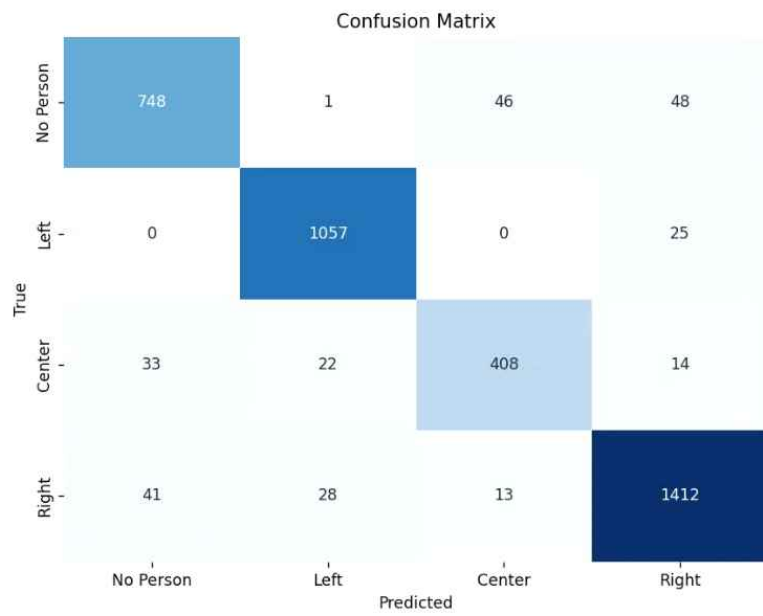


Fig. 혼동행렬

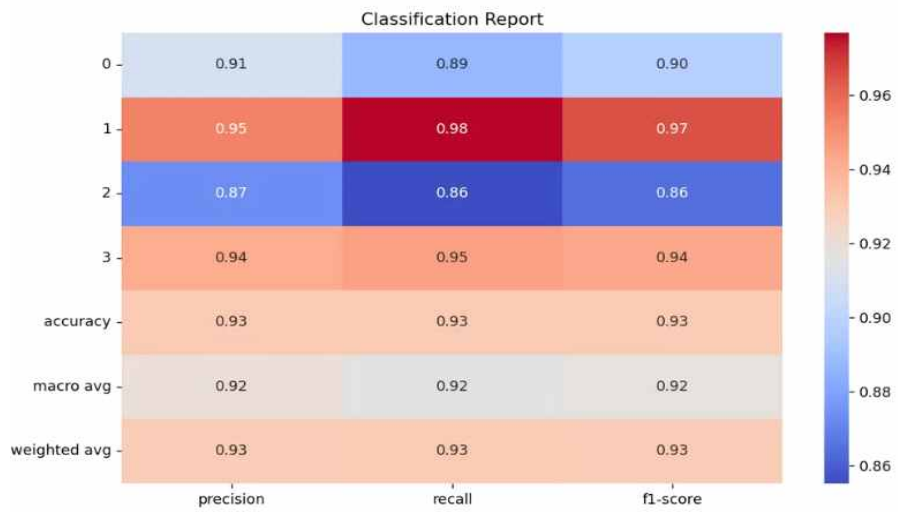


Fig. Classification Report

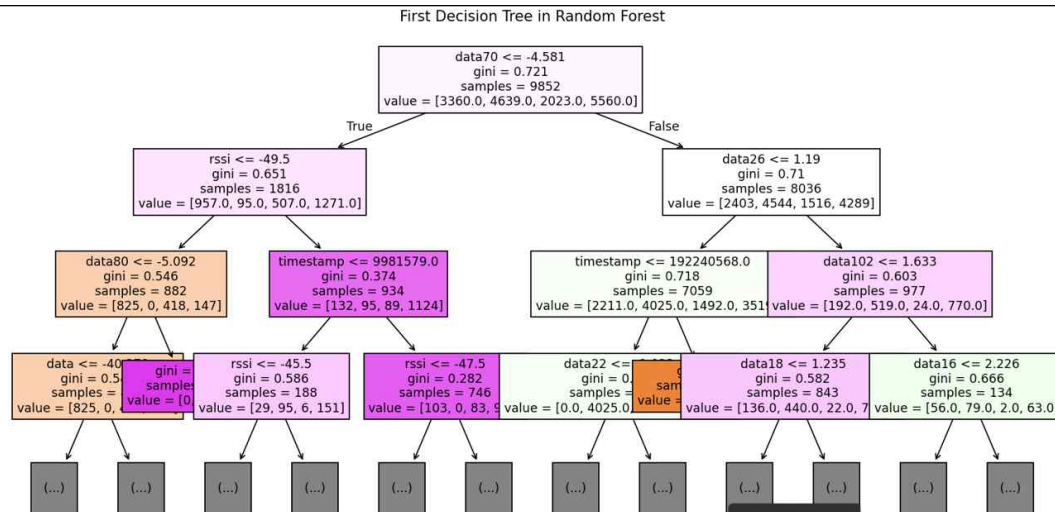
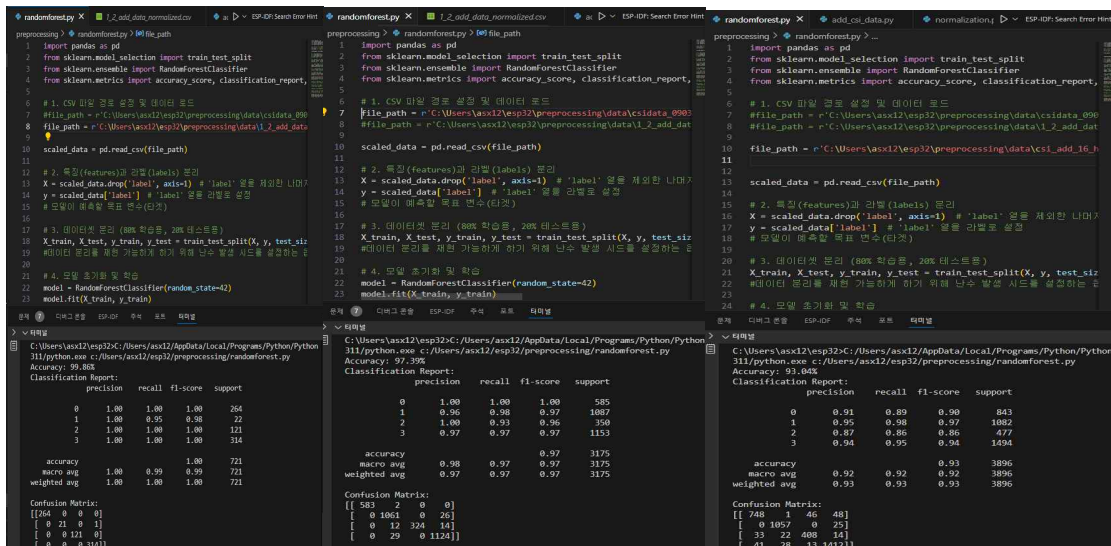


Fig. random forest 모델의 깊이가 3인 개별 결정 트리



=> 왼쪽부터 실내, 실외(낮과 밤)에서 수집한 데이터를 가지고 학습시킨 결과이고, 마지막은 실내, 실외에서 수집한 데이터를 합쳤을 때의 결과를 가진다. 실험 결과, 전반적인 정확도는 90% 이상을 기록한다.

2.2.2 결과 - Wi-Fi CSI 데이터를 활용한 기계 학습

본 연구를 통해 Wi-Fi CSI 데이터를 활용하여 사람의 위치를 감지하는 데 매우 높은 정확도를 기록할 수 있음을 확인했다. 주요 연구 결과는 다음과 같다:

▶ **다양한 환경에서의 안정적인 성능:** 실험은 짙은 안개, 실내, 가구가 있는 방, 공터 등 다양한 환경에서 진행되었으며, 모든 환경에서 90% 이상의 높은 정확도를 기록하였다. 이는 Wi-Fi CSI 데이터가 시각적 센서의 한계를 보완할 수 있는 강력한 도구임을 시사한다.

▶ **전파 기반 감지 기술의 강점:** Wi-Fi CSI 데이터는 전파 신호를 기반으로 하므로, 시각적 장애물이나 날씨의 영향을 크게 받지 않는다. 따라서 자율주행 차량의 안전성을 높이는 데 중요한 역할을 할 수 있으며, 특히 시각적 정보가 제한된 환경에서 효과적이다.

▶ **모델의 확장 가능성:** Random Forest 모델을 사용한 기계 학습 방법은 다양한 상황에서 사람의 위치를 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다. 이는 향후 자율주행 차량의 탐지 시스템에 적용될 수 있다.

템에 적용되어 보행자 탐지의 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있을 것이다.

2.2.3 논의 - Wi-Fi CSI 데이터를 활용한 기계 학습

본 연구는 Wi-Fi CSI 데이터를 활용하여 짙은 안개와 같은 악천후 환경에서도 사람의 위치를 감지하는 새로운 기술적 가능성을 제시하였다. 실험 결과, 기존의 카메라 기반 시스템이 한계를 드러내는 상황에서도 Wi-Fi CSI 데이터를 이용한 기계 학습 모델이 우수한 성능을 발휘하였다.

앞으로 더 다양한 환경에서 추가 실험을 진행하여 모델의 성능을 더욱 개선하고, 다른 기계 학습 알고리즘과의 성능 비교를 통해 최적의 모델을 선정할 계획이다. 또한, 이 기술을 자율주행 차량의 다른 센서 시스템과 결합하여, 악천후 상황에서도 안정적이고 신뢰할 수 있는 보행자 탐지 기술을 구축하는 데 기여할 것이다.

2.3.1 연구 방법론 - 센서 클리닝 장치 설계 및 구현

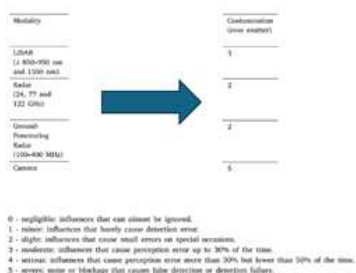
1) 연구 배경 및 필요성

자율주행에서 카메라 센서는 차량이 주변 환경을 인식하고 물체를 판별하는 데 핵심적인 역할을 담당한다. 특히 테슬라와 같은 자율주행 선두 기업은 카메라 센서를 중심으로 자율주행 기술을 발전시켜왔으며, 이는 다른 센서와 비교할 수 없는 높은 사물 인식 능력을 바탕으로 한 것이다.

카메라를 통해 차량은 보행자, 장애물, 도로 표지판, 차량의 위치 등을 정확하게 파악할 수 있으며, 이러한 시각적 정보를 바탕으로 자율주행 차량은 신속하고 안전한 결정을 내릴 수 있다.

하지만, 아무리 카메라 처리 기술이 발달하고 알고리즘의 성능이 좋아지더라도, 자율주행 기술에 여전히 한계가 존재한다. 그중 하나는 바로 카메라 렌즈에 물방울이나 먼지, 이물질이 부착되었을 때, 카메라의 인지 능력이 크게 저하된다는 점이다. 이는 카메라 센서의 기본적인 특성으로 인해 발생하는 문제로, 렌즈에 이물질이 묻으면 광학적 신호가 왜곡되거나 차단되어 카메라가 물체를 제대로 인식하지 못하게 된다. 이러한 상황이 지속되면 자율주행 시스템의 안정성에 큰 영향을 미치며, 특히 비, 눈, 안개 등의 악천후 상황에서는 더 쉽게 문제가 발생할 수 있다.

실제로, 논문 결과에 따르면 카메라 렌즈에 물방울이 묻었을 때 인지 능력의 감쇠가 상당히 큰 것으로 나타났다.



The effect from the wetting of the emitter window varies based on drop size, from max attenuation around 50% when the water drops are relatively small, to a minimal of 25% when the drop is about half the aperture size. It seems like wetness does not really impact LiDARs but it is still worth noticing that when the atmosphere temperature is just below the dew point, the condensed water drops on the emitter might just be smaller than the lowest drop size in [Fersch et al. \(2016\)](#) and a signal with a power loss over 50% can hardly be considered a reliable one. Additionally, the influence of rain on LiDAR may not merely lie in signal power level but the accuracy and integrity of the point cloud

논문 제목: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

카메라 센서는 렌즈에 물방울이 묻었을 때, 물방울의 크기가 작으면 최대 50%, 크기가 크면

최소 25% 감쇠가 발생한다.

이는 자율주행 시스템이 즉각적인 대응을 해야 할 상황에서 물체를 제대로 인식하지 못할 위험이 있으며, 안전성에 직접적인 영향을 미치는 요인이 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 카메라 렌즈에 묻은 물방울과 이물질이 자율주행 시스템의 성능에 미치는 영향을 최소화하는 기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 두 가지 모델을 설계하고 성능을 비교 실험했다.

첫 번째 모델은 현대 자동차의 ROTATE 기술을 기반으로 하여 렌즈를 회전시켜 물방울을 원심력으로 제거하는 방식이다. 두 번째 모델은 인간의 눈 깜빡임을 모사한 EYE CAM으로, 와이퍼와 워셔액을 사용하여 렌즈를 빠르고 완벽하게 닦아내는 방식을 구현했다.

이 두 가지 모델을 통해 카메라 렌즈에 부착된 물방울을 제거하는 성능을 평가하고, 자율주행 차량의 안정성과 인식 성능을 개선할 수 있는 실질적인 방법을 제시하고자 한다.

첫 번째 모델로 현대 자동차의 ROTATE CAM을 구현했으며, 두 번째 모델은 EYE CAM이다.

2) 연구 방법론

본 연구는 시뮬레이션 및 모델링으로 직접 센서 클리닝 시스템을 구현하고, 이를 실험을 통해 성능을 분석하는 과정으로 구성된다. 연구 방법론은 크게 세 가지 단계로 나눌 수 있다:

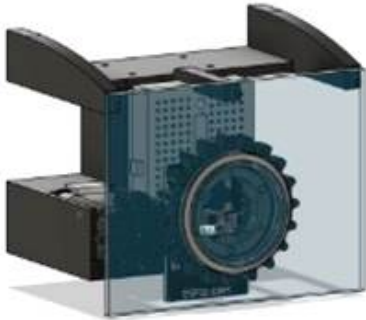
- ▶ 모델링 및 시뮬레이션
- ▶ 물방울 부착 및 제거 실험 분석
- ▶ 실시간 영상 품질 분석

3) 모델링 및 시뮬레이션

Fusion 소프트웨어를 사용하여 ROTATE CAM과 EYE CAM을 3D 모델링하고, 각각의 시스템이 물방울을 제거하는 과정을 시뮬레이션함으로써 예상 성능을 검토했다.

모델링

로테이터 캠



아이 캠

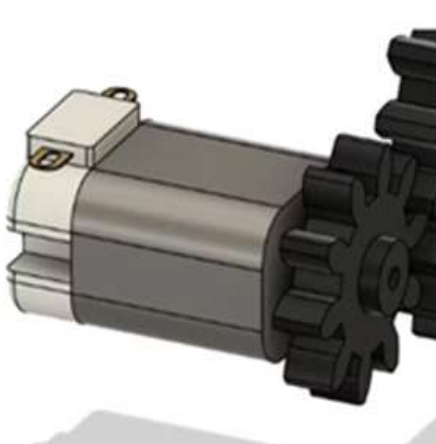


동작원리

ROTATE CAM은 렌즈가 빠른 속도로 회전하면서 물방울을 원심력을 이용해서 밀어내는 방식이다. 이 방식은 물리적 장치를 사용하지 않아 와이퍼가 카메라 센서에 장애물로 인식되는 문제를 해결했다.

렌즈 회전 부분을 베어링 방식으로 만들고 모터와 톱니바퀴를 사용해 결합하여 회전시키는 방법으로 구현했다.

모터 및 톱니바퀴



베어링



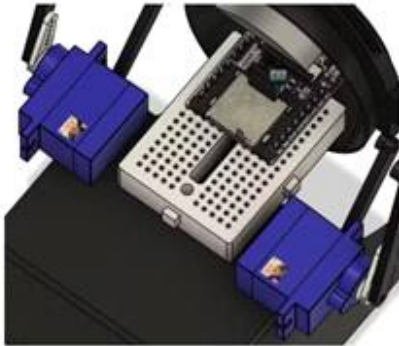
EYE CAM은 인간의 눈 깜빡임을 모사한 방식으로 내장된 와이퍼가 빠르게 움직여, 렌즈를 닦아내는 과정 중 영상에 와이퍼가 찍히지 않도록 설계되었다.

이 모델은 빠른 속도로 와이퍼가 움직여 물방울을 제거하는 동시에, 물방울이 남지 않도록 하는 것이 핵심이다.

또한, 워셔액 노즐도 장착되어 있어 렌즈를 깨끗이 세척할 수 있다.

서브모터 2개를 정밀하게 조작해 내장된 와이퍼를 강한 힘으로 빠르게 동작시키는 방법으로 구현했다.

서보모터 2개



워셔액 노즐



헤어드라이기 노즐을 보고 디자인 했습니다.

시뮬레이션

EYE CAM simulation

<https://youtu.be/wEh6YMNdw8Q>

ROTATE CAM simulation

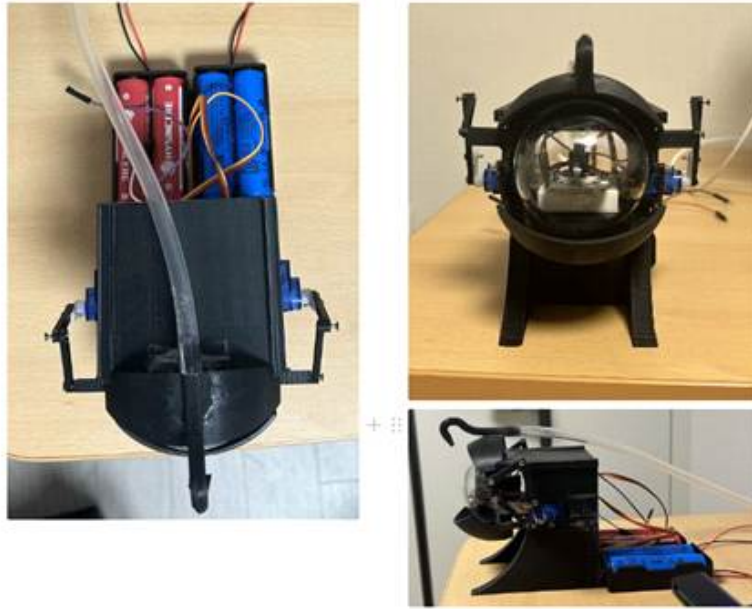
<https://youtu.be/BZ5CVjby1WQ>

구현

EYE CAM



ROTATE CAM



4) 물방울 부착 및 제거 실험 분석

카메라 렌즈에 인위적으로 물방울을 부착하여 두 모델의 성능을 비교하였다. 일정량의 물방울을 렌즈에 분사한 후, ROTATE CAM과 EYE CAM이 이를 얼마나 효과적으로 제거하는지 평가하였다.

<p>ROTATE CAM</p> <p>https://youtu.be/KCUnoD3E88I</p>	<p>EYE CAM</p> <p>와이퍼 동작</p> <p>https://youtu.be/wXipF9Pi1PM</p> <p>임서액 동작</p> <p>https://youtu.be/z08kkfoW3PU</p>
--	--

▶ ROTATE CAM

ROTATE CAM은 0.08초 만에 물방울을 제거하는 빠른 성능을 보였으나, 제거 후에도 미세한 잔여 물방울이 남아있었다.

고속으로 물방울을 제거하는 데 초점을 맞추었지만 완벽한 클리닝 성능에서는 약간의 한계가 있었다.

▶ EYE CAM

EYE CAM은 렌즈 전체를 완벽하게 닦는 데 0.1초가 소요되었다. 그러나 ESP32-CAM 모듈의 시야 범위 내에서 물방울을 제거하는 데는 0.05초가 걸려 ROTATE CAM보다 조금 더 빠르게 해당 영역을 세척했다. 무엇보다도, EYE CAM은 잔여 물방울 없이 매우 깨끗하게 렌즈를 세척해냈다.

즉, 전체적인 제거 속도는 ROTATE CAM보다 0.02초 느리지만, 물방울 제거 후 잔여 물방울 없이 완벽한 클리닝 성능을 보여주었다.

또한, EYE CAM은 강력한 워셔액 분사 기능을 통해 점성이 높은 이물질이 렌즈에 묻었을 때도 효과적으로 세척할 수 있었다. 워셔액과 함께 동작하는 내장 와이퍼는 이물질을 완벽히 제거하는 데 크게 기여하였으며, 전반적으로 더욱 정교한 클리닝 성능을 발휘하였다.

5) 실시간 영상 품질 분석

두 모델의 물방울 제거 동작 중, ESP32-CAM 모듈을 통해 실시간으로 영상을 기록하여 와이퍼 및 센서 클리닝 장치가 영상에 미치는 영향을 분석하였다.

<div>ROTATE CAM VIEW</div> <div>https://youtu.be/r-0PflfiS10</div>	EYE CAM VIEW
	와이퍼 동작 https://youtu.be/DroQwPCqIvg
	워셔액 동작 https://youtu.be/gclHAYWa8Q8

▶ ROTATE CAM VIEW

ROTATE CAM은 와이퍼를 사용하지 않고 렌즈 자체가 회전하는 방식으로 물방울을 제거하므로, 영상에 왜곡이나 품질 저하가 전혀 발생하지 않았다. 회전하는 동안에도 화면에는 아무런 변화가 없었으며, 물방울만이 자연스럽게 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 방식을 클리닝 과정에서 화면의 일관성을 유지하면서도 빠르고 안정적인 성능을 제공하였다.

▶ EYE CAM VIEW

EYE CAM은 내장된 와이퍼를 사용해 물방울을 빠르게 제거하는 방식이다. 이 과정에서 아주 미세한 화면의 깜빡임이 발생하지만, 와이퍼가 0.05초 만에 동작을 완료하기 때문에 이 변화는 실질적으로 카메라 영상에 거의 영향을 미치지 않았다. 즉, 영상에서 와이퍼의 흔적이나 깜빡임이 카메라 센서에 인식되지 않을 정도로 짧은 시간 안에 처리가 이루어졌다.

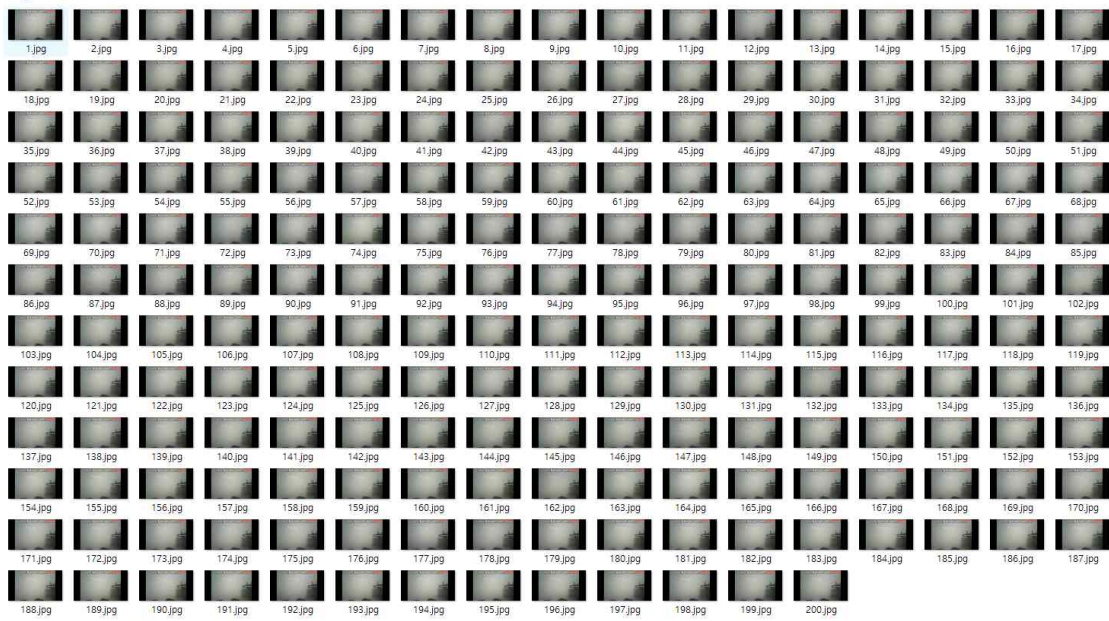


fig. EYE CAM의 ESP32-CAM 이미지 영상을 1프레임 단위로 추출한 이미지
 내장된 와이퍼가 영상에 포착된 프레임은 한 장도 없었다.
 이는 카메라 센서가 와이퍼를 물리적 장애물로 인식하거나 영상 품질을 저하할 가능성이 매우
 낮다는 것을 의미한다.

결론적으로, EYE CAM은 빠른 와이퍼 동작으로 물방울 제거에 매우 효과적이며, 실시간 영
 상 품질에는 거의 영향을 미치지 않는다. ROTATE CAM은 영상 왜곡 없이 물방울을 제거하
 는 데 있어 우수한 성능을 발휘했다.

2.3.2 결과

두 모델은 각각의 장단점을 가지고 있어 다양한 상황에 맞게 선택될 수 있다. 이를 아래 표
 에 정리하여 비교하였다.

비교 항목	ROTATE CAM	EYE CAM
물방울 제거 속도	0.08초	0.1초 (ESP32-CAM 시야 내: 0.05초)
잔여 물방울 여부	미세한 잔여 물방울 존재	잔여 물방울 없이 깨끗하게 제거
영상 왜곡	없음	아주 미세한 깜빡임 (0.05초)
영상 품질 영향	전혀 없음	와이퍼가 매우 빠르게 동작하여 영상에 영향 없음
이물질 제거 성능	물방울 제거에 주력, 이물질 제거에는 한계	워셔액과 와이퍼를 통해 점성 있는 이물질도 제거 가능
구조적 복잡성	비교적 간단한 구조	워셔액 분사 및 와이퍼 동작으로 복잡한 메커니즘
적용 가능 환경	외부 요인에 큰 영향을 받지 않음, 고속 이동 환경에 적합	렌즈 표면에 이물질이 자주 묻는 환경에 적합

▶ 물방울 제거 성능

ROTATE CAM은 물방울을 빠르게 제거하는 데 강점을 보였지만, 미세한 잔여 물방울이 남아있었다. 반면 EYE CAM은 약간 더 느리지만, 물방울을 완벽하게 제거하여 렌즈를 더 깨끗하게 유지할 수 있었다. 특히 ESP32-CAM 시야 내에서는 더욱 빠르게 클리닝이 이루어졌다.

▶ 영상 품질에 미치는 영향

ROTATE CAM은 렌즈가 회전하는 동안 영상에 어떠한 왜곡도 발생하지 않아, 실시간 영상 품질이 유지되었다. EYE CAM은 와이퍼의 빠른 동작으로 인해 아주 미세한 깜빡임이 감지될 수 있으나, 0.05초 이내로 처리되기 때문에 실질적으로 영상 품질에 미치는 영향은 미미했다.

▶ 이물질 제거 성능

ROTATE CAM은 주로 물방울 제거에 중점을 두었기 때문에 점성 있는 이물질 제거에는 한계가 있었다. 반면, EYE CAM은 강력한 분사 기능과 와이퍼를 결합하여 점성 있는 이물질도 효과적으로 제거할 수 있는 우수한 성능을 보였다.

▶ 소음 문제

ROTATE CAM은 렌즈가 고속으로 회전하는 특성상 소음이 있다는 단점이 있었다. 특히 정숙한 환경에서 부적합하다.

EYE CAM은 와이퍼 동작 시 소음이 ROTATE CAM보다 훨씬 적었지만 조용한 환경에선 문제될 가능성이 있다.

▶ 적용 가능성

ROTATE CAM은 구조가 단순하고 외부 요인의 영향을 크게 받지 않아, 고속 이동이 필요한 환경이나 물방울 제거가 주된 목적일 때 유용하다. EYE CAM은 물방울뿐 아니라 이물질 제거에 효과적이기 때문에 렌즈 표면에 오염이 자주 발생하는 환경에서 더 적합한 솔루션이 될 수 있다.

▶ 개인적인 느낌

실험을 통해 두 모델의 성능을 비교하면서, ROTATE CAM의 빠른 제거 속도는 인상적이었으나 소음이 크다는 점이 아쉬웠다. 반면, EYE CAM은 ROTATE CAM과 거의 유사한 속도로 물방울을 제거하면서(0.02초 차이, ESP32-CAM 시야 내에서는 더 빠름), 잔여 물방울 없이 깨끗하게 제거하였으며 소음도 적었다. 이러한 이유로, EYE CAM이 실제 응용 환경에서 더 효율적이고 실용적으로 활용될 가능성이 크다고 판단하였다.

2.3.3 논의 - 센서 클리닝 장치 설계 및 구현

본 연구는 카메라 렌즈의 성능을 저하시키는 물방울 및 이물질을 효과적으로 제거하기 위해 두 가지 센서 클리닝 장치를 설계하고 실험하였다. ROTATE CAM과 EYE CAM은 각기 다른 방식으로 렌즈를 청소하며, 동일한 실험 환경에서 성능을 비교한 결과, 각 모델은 고유한 장단점을 보였다.

ROTATE CAM은 빠른 물방울 제거 속도를 자랑하지만, 잔여 물방울이 일부 남고 소음이 크다는 한계가 있었다.

반면 EYE CAM은 물방울을 완벽하게 제거하고 제거 속도도 빠르고 소음도 적었지만, 영상에 미세한 깜빡임(0.05초)이 발생한다. 이러한 결과는 다양한 환경에서 시스템의 선택이 필요함을 시사하며, 특히 고속 이동이 필요한 환경과 정밀한 영상 품질이 요구되는 환경에 따라 최적의 시스템을 선택할 수 있다.

향후 연구에서는 더 다양한 기후 조건과 이물질 유형에 대한 실험을 통해 두 모델의 성능을 심층적으로 평가하고, 클리닝 성능과 영상 품질에 미치는 영향을 개선할 예정이다. 또한, 이 기술을 다른 센서 시스템과 결합하여, 실시간 환경 변화에도 안정적으로 카메라 렌즈를 유지할 수 있는 통합 클리닝 시스템 구축을 목표로 하고 있다.

이를 통해, 카메라 렌즈의 성능 저하를 방지하고 다양한 환경에서도 신뢰할 수 있는 영상 데이터를 제공하는 데 기여할 것이다.

3. 최종 결론

이 연구는 악천후 환경에서 자율주행 차량의 성능을 유지하는 도전에 대해 다루었으며, 이는 사용자 신뢰와 채택에 큰 영향을 미친다. 다양한 악천후 조건이 자율주행 차량의 센서에 미치는 영향을 종합적으로 분석하고, 이러한 조건에서도 정확도와 신뢰성을 높이기 위한 해결 방안을 모색했다. 연구 결과는 우리가 접근한 기술들이 통합될 경우 악천후에서 자율주행 차량의 강인성과 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있음을 보여준다. 그러나 다양한 날씨 조건에서의 추가 테스트와 각 해결 방안의 실제 배치 최적화 필요성 같은 한계점도 확인되었다. 향후 연구는 이러한 방법들을 개선하고, 악천후 환경에서 자율주행 차량 시스템을 더욱 향상시킬 수 있는 추가 기술들을 탐색하는 데 중점을 두어야 한다.