

카메라 오염 식별 모델 및 3-Tier 구조 기반 자율주행 운영 안전성 확보 방안에 관한 연구

황영서, 서우창, 윤형석, 이명수, 김봉섭, 윤경수*

지능형자동차부품진흥원

dudtj7476@kiapi.or.kr, wcseo@kiapi.or.kr, gudtjr0124@kiapi.or.kr, trust@kiapi.or.kr, bskim@kiapi.or.kr, *kadbonow@kiapi.or.kr

A Study on Camera Soiling Detection Model and Safety Assurance Approach for Autonomous Driving Based on a 3-Tier Architecture

Youngseo Hwang · Woochang Seo · Hyeongseok Yun · Myungsu Lee · BongSeob Kim · Kungsu Yun*

Korea Intelligent Automotive Parts Promotion Institute(KIAPI)

요 약

본 연구는 자율주행 차량의 카메라 렌즈 오염으로 인해 발생하는 인지 한계 상황을 해결하기 위해 코스트 볼륨 기반 카메라 오염 식별 모델을 제안한다. 실험 결과, 제안된 구조는 기존 이미지 기반 모델에 비해 학습되지 않은 새로운 오염 유형에서도 향상된 식별 성능을 보였으며, 이를 통해 코스트 볼륨이 오염 식별의 일반화 성능향상에 효과적임을 입증하였다. 또한, 실제 차량에 모델을 탑재하여 렌즈표면에 진흙 및 물방울 상황을 재현하고, Fail-Safe 모듈과 연계한 제어권 전환 및 AEB 기반 비상 정지를 통해 실용성을 검증하였다. 아울러 3-Tier 운영환경을 고려한 메시지 프로토콜을 설계하고 차량-관제 시스템 간 데이터 연동을 확인함으로써, 향후 위험 상황에서 관제 시스템 기반 원격지원 및 개입을 통한 안전성 확보 가능성을 제시하였다.

I. 서 론

자율주행 차량의 핵심 인지 센서인 카메라는 차선·객체·장면을 인식해 안전한 주행을 가능하게 하지만, 조도 변화, 악천후, 렌즈 오염 등에 취약하다 [1], [2]. 소량의 물방울만으로도 영상 선명도가 크게 저하되고, 다수의 물방울은 소형 객체의 탐지 정확도를 급격히 떨어뜨린다는 결과가 보고되었으며 [3], 이는 렌즈표면 오염에 대한 체계적 대응이 자율주행 시스템에 필수임을 시사한다. 이러한 필요성에 부응해, 국제 표준은 자율주행 차량의 DDT(Dynamic Driving Task)가 정상적으로 작동할 수 없는 DDT Fallback 상황에서 운전자에게 제어권을 전환하거나 MRM(Minimal Risk Maneuver)를 통해 MRC(Minimal Risk Condition)를 달성하도록 권고하고 있다 [4], [5].

카메라 오염 식별에 관한 선행연구는 하드웨어, 영상처리, 딥러닝 기반 접근으로 렌즈 표면의 오염을 탐지하며, 주로 특정 오염 유형에서의 성능 향상과 연산량 최적화를 목표로 해왔다. 그러나 이러한 방법들은 대체로 특정 조건에 최적화되어 새로운 형태의 오염에 대한 일반화 성능이 부족하다는 한계를 가진다. 이에 본 연구는 일반화 성능 제고를 위해 시차 추정·옵티컬 플로우 분야에서 널리 사용되는 코스트 볼륨을 도입하였으며, 이를 이미지 특징과 함께 학습하였다. 그 결과, 학습에 포함되지 않은 이미지와 오염 패턴에서도 식별 성능이 유의미하게 향상되어, 코스트 볼륨 기반 표현이 오염 식별의 일반화에 실질적으로 기여함을 입증하였다.

나아가 제안 모델을 실제 차량의 Fail-Safe 모듈과 연동하였으며, 카메라 렌즈표면 오염 발생 시 시스템이 인간 운전자에게 제어권 전환을 요청하고, 미응답 시 AEB(Automated Emergency Braking)로 비상정지를 수행하는 절차를 검증하였다. 이를 통해 제안하는 모델이 실제 차량의 안전메커니즘과의 연계 가능성을 검증하였다. 또한 차량, 도로 인프라, 관제 시스템으로 구성된 3-Tier 운영환경에서, AEB와 같은 차량의 극단적 안전조치에 앞서 운영 관리자의 개입으로 MRC를 달성할 수 있도록 차량-관제 시스템 간 데이터 송수신 메시지 프로토콜을 설계하였다.

II. 본론

본 연구에서는 카메라 렌즈표면 오염 식별의 일반화 성능 향상을 위해 DCVSMNet [6]의 이중 코스트 볼륨 구조를 재구성하였다. 1/16 및 1/8 특징맵 해상도에서 GWC와 GWD 기반 코스트 볼륨을 동시에 구축하여 픽셀 간 유사도와 차이를 함께 표현하고, 1/16 스케일 볼륨을 1/8로 업샘플한 뒤 채널 방향으로 결합하였다. 이렇게 얻은 두 코스트 볼륨은 병렬 2D Hourglass 모듈로 각각 정제하였다. 이후 요소별 합과 2D 합성곱으로 구성된 경량 결합 모듈을 통해 융합된 비용 표현을 생성하고, 이를 은닉상태로 유지하여 ConvGRU가 연속 프레임 간 변화를 학습하도록 하였다. 마지막으로 출력 헤드에서 해당 비용 표현을 이미지 특징과 결합하여 최종 결과를 산출하였다. 모델 학습을 위해 Woodscape [7], KITTI [8] 데이터 세트와 자체 취득 전방 카메라 이미지 데이터를 사용하였다. Woodscape의 어안 이미지는 일반 카메라 형태로 보정 및 변환하였고, 오염 마스크를 KITTI와 자체 이미지에 합성하여 전방 카메라 오염 이미지를 생성하였다. 부족한 빗방울 사례는 ROLE [9]을 이용해 합성 데이터로 보강하였다. 무작위 오염에 대해 학습하기 위해 Random Erasing을 통해 학습 데이터를 추가로 생성하였다. 학습 설정은 배치 크기 32, 학습률 1×10^{-4} , 최대 30 에폭이며, 검증 손실 개선이 1×10^{-2} 미만인 상태가 5 에폭 연속 지속될 경우 조기 종료되도록 하였다. 실험 결과는 표1과 같다. 코스트 볼륨을 사용한 CI 모델이 이미지 특징만 사용한 I 모델보다 개선된 성능을 보였으며, 비학습 데이터(표 1의 Geometric)인 무작위 도형에 대해서는 월등히 성능이 개선됨(그림 1)을 확인할 수 있다.

Datasets	Model	Acc	mIoU	F1	Rec	Prec
Mud	I	0.986	0.972	0.984	0.989	0.979
	CI	0.989	0.978	0.987	0.992	0.982
Raindrop	I	0.975	0.941	0.956	0.957	0.954
	CI	0.982	0.957	0.968	0.973	0.963
Random	I	0.988	0.976	0.985	0.982	0.988
	CI	0.993	0.985	0.991	0.992	0.990
Geometric	I	0.857	0.629	0.589	0.442	0.885
	CI	0.935	0.829	0.849	0.780	0.930

표 1. 카메라 오염 식별 모델 간 비교(I: 이미지 사용, CI: 이미지·코스트 볼륨 사용)

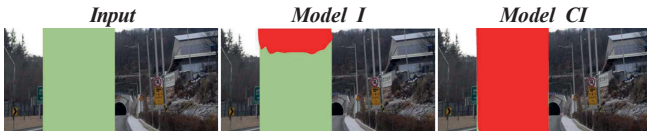


그림 1. 비학습 데이터에 대한 모델별 식별 결과

CI 모델의 실용성 검증을 위해 실제 차량에 탑재하여 자율주행 시스템의 Fail-Safe 모듈과의 연계하였으며, 오염으로 가려진 면적이 이미지 면적의 10% 이상이고 0.5초 이상 지속될 경우 카메라 센서 비정상 신호와 Take Over(TOR)를 보내도록 하였다. 자율주행 시스템의 판단 영역에서는 TOR 요청 이후 3초 동안 제어권 전환이 이루어지지 않을 시 AEB를 작동시켜 비상정지하도록 하였다. 실험결과 카메라 오염 발생 시 의도한 설계대로 렌즈표면 오염을 모델이 식별하고 제어권 전환 요청이 시작되었으며, 전환이 이루어지지 않자 AEB를 통해 비상정지하였다(그림 2, 3).



그림 2. 시험 차량 및 카메라 오염 재현·식별 결과

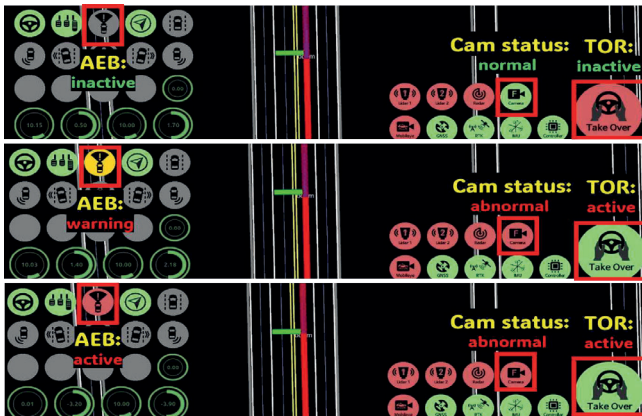


그림 3. 카메라 오염 상태에 따른 안전메커니즘 작동결과 표출

3-Tier(차량 - 인프라 - 관제) 운영환경에서 카메라 오염으로 인한 위험 상황에 대응하여 리스크를 최소화하고 안전상태를 달성하기 위해, 본 연구는 AEB 등 자율주행 시스템 단의 급격한 리스크 완화 전략이 작동하기 이전에 관제센터의 원격지원으로 안전상태에 도달할 수 있도록 차량 - 인프라 - 관제 연계 프로토콜 및 환경을 설계하였다. 차량과 인프라에 DAQ 장비를 탑재하여 각 시스템에서 생성되는 ROS 토픽 정보를 메시지 프로토콜에 따라 인코딩하고 관제 시스템으로 전송하도록 구현하였다. 또한, 차량에서 관제로 송신하는 메시지 헤더에 원격 지원 요청 필드를 추가하였으며, 관제 시스템은 해당 요청을 수신할 경우 주행 경로 전달 등 원격 개입을 통해 차량이 안전상태에 도달하도록 조치할 수 있도록 프로토콜을 정의하였다. 아울러 차량에서 DAQ를 통한 데이터 송신 테스트를 수행한 결과, 관제 시스템으로부터 메시지가 정상적으로 수신됨을 확인하여 설계한 프로토콜이 정상적으로 작동함을 검증하였다.

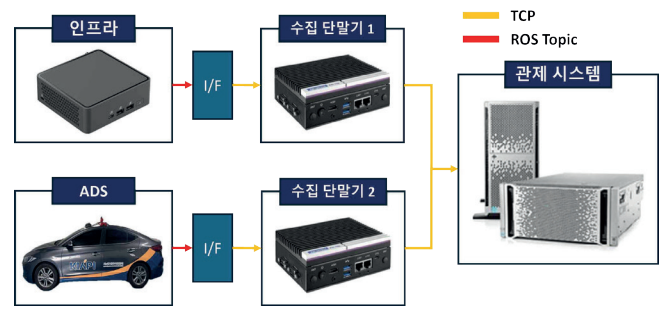


그림 4. 차량-인프라-관제 간 메시지 송수신 시스템 개요

III. 결론

본 연구는 이중 코스트 볼륨과 ConvGRU를 결합한 카메라 오염 식별 모델을 제안하고, 비학습 오염에서도 일반화 성능향상을 확인하였다. 실제 차량 실험에서 Fail-Safe 연계에 따라 제어권 전환 요청 후 미응답 시 AEB에 의한 비상정지 절차가 정상적으로 수행됨을 보여 제안 모델의 실용성을 입증하였다. 또한, 차량 - 인프라 - 관제 간 메시지 프로토콜과 운영환경을 설계·구현하고, 수신 시험을 통해 위험 상황에서 자율주행 시스템이 안전상태에 도달하도록 하는 관제 시스템 개입·연계의 실현 가능성을 확인하였다. 향후에는 관제 시스템에 축적된 데이터를 활용한 자율주행 안전성 검증 체계의 고도화를 추진할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-02221243, 3-Tier 연계형 자율주행 소프트웨어 및 데이터 통합 검증용 클라우드 기반 평가 모델·프로세스 개발)

참 고 문 헌

- [1] Ahangar, M. N., et al. "A survey on sensor failures in autonomous vehicles: Challenges and solutions." *Sensors* 24.16 (2023): 5108.
- [2] Son, Sungho, et al. "Evaluation of camera recognition performance under blockage using virtual test drive toolchain." *Sensors* 23.19 (2023): 8027.
- [3] Kim, Hyunwoo, et al. "Effect of droplet contamination on camera lens surfaces: Degradation of image quality and object detection performance." *Applied Sciences* 15.5 (2025): 2690.
- [4] ISO, Intelligent transport systems – Minimal risk manoeuvre (MRM) for automated driving – Part 1: Framework, straight-stop and in-lane stop, ISO 23793-1:2024
- [5] ISO/SAE, Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles, ISO/SAE PAS 22736:2021
- [6] Tahmasebi, Mahmoud, et al. "DCVSMNet: Double cost volume stereo matching network." *Neurocomputing* 618 (2025): 129002.
- [7] Yogamani, Senthil, et al. "Woodscape: A multi-task, multi-camera fisheye dataset for autonomous driving." *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2019.
- [8] Geiger, Andreas, et al. "Vision meets robotics: The kitti dataset." *The international journal of robotics research* 32.11 (2013): 1231-1237.
- [9] ricky40403, "ROLE" [Online]. GitHub repository, commit 242f541, 2019. Available: <https://github.com/ricky40403/ROLE> (Accessed: Sep. 30, 2025).