

Fault-Aware Switching: 스테레오 카메라 결함 대응 장애물 회피를 위한 Monocular Depth Fallback 기반 전환 기법

강아현, 신수용*

국립금오공과대학교 IT융복합공학과

ahyn935@kumoh.ac.kr, *wdragon@kumoh.ac.kr

Fault-Aware Switching: Monocular Depth Fallback for Stereo Camera Faults in Obstacle Avoidance

Ah Hyun Kang, Soo Young Shin*

Kumoh National Institute of Technology.

요약

스테레오 카메라의 물리적 손상(예: 렌즈 스크래치 또는 균열)은 좌·우 영상 비대칭을 유발하여 스테레오 정합 기반 깊이 추정을 저하시키고, ROS 2 Navigation2 (Nav2) costmap에서 장애물 관측의 누락 또는 잡음을 증가시켜 무인 지상 차량(UGV)의 장애물 회피 실패로 이어질 수 있다. 본 논문은 주행 위험 관점의 fault score를 산출하고, 점수가 임계치를 초과하면 스테레오 기반 관측을 DepthAnythingV2 기반 단안 metric depth로 대체하는 Fault-Aware Switching을 제안한다. 손상 수준별 복도 환경 실험에서 전환 임계치 선택을 위한 performance cliff가 관찰되었다. Severe damage($\geq 40\%$) 구간에서 제안 방법은 성공률을 향상시키고 충돌률을 감소시키며, 안전성 및 수행 성능 지표를 개선한다.

I. 서 론

자율주행 시스템은 카메라·LiDAR 등 외부 인지 센서에 크게 의존하며, 이들의 정상 작동이 실시간 장애물 인식과 안전 주행의 핵심 기반이다[1]. 이러한 센서 중 카메라는 단안 카메라(2D 영상 기반)와 스테레오 카메라(정합 기반 3D 깊이 추정)로 구분되며, 특히 스테레오 카메라는 저비용으로 고해상도 깊이 정보를 제공하여 주행 가능 영역 판단과 지역 지도 생성에 필수적인 역할을 수행한다. 그러나 실제 환경 운용 시 비산물·충격·장시간 노출 등으로 인해 렌즈 스크래치나 균열 같은 전면 광학계 물리적 손상(physical fault)이 발생할 수 있다[2]. 특히 스테레오 카메라의 단일 렌즈 손상은 좌·우 영상 품질의 비대칭을 유발하여 정합 알고리즘의 깊이 추정 성능을 급격히 저하시킨다. 이는 결과적으로 주변 환경에 대한 공간 인지 정보를 왜곡시키고 장애물 탐지 실패나 허위 장애물 생성을 초래하여, 로봇/차량의 충돌 위험을 높이고 안전한 경로 계획을 어렵게 만든다.

기존의 fault 관련 연구는 센서 이상 감지에 집중하거나, 센서 고장 모니터링에 초점을 맞추는 경우가 많다[3,4]. 하지만 현장 운용에서는 손상 정도를 주행 전략(관측/회피 방식) 전환과 연결해 성능 봉괴 구간에서 즉시 안전을 회복하는 의사결정이 중요하다. 이에 본 논문은 스테레오 카메라 손상 상황에서도 주행 안전성을 유지하기 위한 fault-score 기반 주행 모드 전환 기법(Fault-Aware Switching)을 제안한다.

II. 시스템 및 방법

제안하는 시스템은 그림 1과 같다. 물리적 손상은 영상의 국소적 흐림, 난반사, 대비 저하 등으로 나타나며, 스테레오 환경에서는 좌·우 영상 품질 비대칭이 정합 기반 깊이 추정을 불안정하게 만들어 장애물 관측 신뢰도를 저하시킬 수 있다. 본 시스템은 좌·우 RGB로부터 특징/품질 정보를 추출한 뒤, 전역 및 밴드 가중 기반 fault

score를 계산하고, 임계치 기반 switching policy를 통해 장애물 관측 입력을 스테레오 또는 단안 깊이로 선택한다. 선택된 관측은 Nav2의 local costmap 입력으로 전달되며, planner/controller는 이를 기반으로 주행 명령(cmd_vel)을 생성한다.

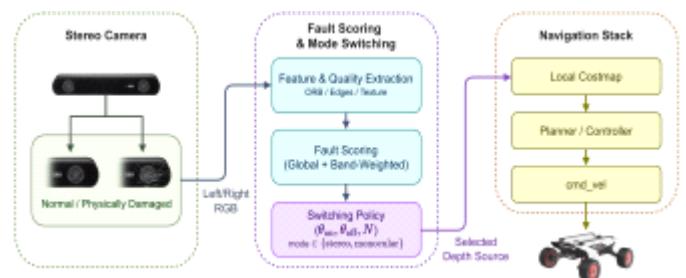


그림 1 제안하는 시스템 개요

UGV 주행에서 장애물 충돌 위험은 바닥 인접 장애물에 의해 영상 하단 영역에서 먼저 나타나는 경향이 있다. 이를 반영하여 카메라 손상에 의한 fault가 발생했을 때 프레임을 상/중/하 3개 밴드로 분할한다. 식 (1)과 같이 밴드별 결합 점수 $f_k(t)$ 를 가중 결합하여 밴드 기반 결합율 $F_{band}(t)$ 를 계산한다.

$$F_{band}(t) = \sum_{k=1}^3 \alpha_k f_k(t), \quad (1)$$
$$\alpha_k = \frac{w_k}{\sum_{j=1}^3 w_j}$$

또한 식 (2)와 같이 안전성을 우선하기 위해 전역 결합율 $F_{global}(t)$

과 밴드 기반 결합을 $F_{band}(t)$ 중 더 보수적인 값을 최종 Fault Score $F(t)$ 로 사용한다.

$$F(t) = \max(F_{global}(t), F_{band}(t)) \quad (2)$$

Fault score가 임계치 부근에서 흔들리면 빈번한 전환이 발생할 수 있으므로, 전환 임계치 θ_{on} , 복귀 임계치 θ_{off} , 연속 프레임 조건 N_{on} , N_{off} 를 적용한다.

- $F(t) \geq \theta_{on}$ 상태가 N_{on} 프레임 이상 유지되면 Fallback으로 전환
- $F(t) \leq \theta_{off}$ 상태가 N_{off} 프레임 이상 유지되면 정상 모드로 복귀

Fallback 모드에서는 단안 깊이 모델이 출력한 깊이 맵을 사용한다. 본 연구에서는 단안 깊이 추정을 위해 DepthAnything V2 기반 모델을 사용하여 입력 RGB로부터 metric depth map을 생성하였다[5]. 이후 이것을 Nav2 costmap의 obstacle layer 관측으로 사용한다.

III. 실험

본 실험은 ROS 2 Humble 기반 Nav2에서 SCOUT MINI(UGV)와 ZED2i(스테레오 카메라)를 사용했으며, 복도형 구간에서 목표점(직선거리 6m)까지 자율 주행하며 장애물을 회피하도록 구성했다. 손상 수준을 단계적으로 변화시키며 Normal, Faulty(스테레오 유지), Proposed(Fault-Aware Switching)를 비교했고, 각 조건은 5회 반복했다.

성능 평가는 Success/Collision rate로 목표 도달과 충돌 여부를 요약하고, D_{min} 으로 주행 중 확보된 최소 장애물 거리 기반의 안전성을 반영하였다. 또한 주행시간 $T_{mission}$ 은 성공한 실험 결과로만 측정하였다. 물리적 손상 수준을 구간화해 0%부터 점진적으로 평가한 결과, 손상 40% 이상에서 performance cliff가 관찰되었고, Faulty($\geq 40\%$)는 Success 20%, Collision 60%, $D_{min}=0.49$ m, $T_{mission}=93.32$ s로 악화되었다. 반면 Proposed는 Success 100%, Collision 0%로 회복하고 $D_{min}=0.88$ m, $T_{mission}=26.30$ s로 정상 수준에 근접한다.

IV. 결론

본 논문은 스테레오 카메라 렌즈 손상으로 인해 정합 기반 장애물 관측이 봉괴하는 상황에서, Risk-aligned Fault Score와 Fault-Aware Switching을 통해 스테레오 기반 관측을 단안 깊이 기반 Fallback으로 전환하는 방법을 제안하였다. Fallback 모드에서는 단안 깊이 맵을 Nav2 costmap obstacle layer에 입력함으로써, 손상 상황에서도 장애물 관측 입력을 유지하도록 설계하였다. 또한 손상 수준 증가에 따른 performance cliff를 관찰하여 전환 임계치 설정 근거를 제시하였다. 복도형 장애물 회피 실험에서는 제안 기법이 Faulty($\geq 40\%$) 조건 대비 성공률을 회복하고 충돌률을 감소시키며, 과 을 포함한 안전성 및 수행 성능 지표가 개선됨을 확인하였다. 향후에는 다양한 환경(조도 변화/야외/주행 속도)과 손상 형태(스크래치/균열/오염)에 대한 일반화, 그리고 전환 임계치의 자동 적응을 통해 현장 적용성을 확장할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2025-00553810, 50%)

This research was supported by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program(IITP-2025-RS-2024-00437190, 50%) supervised by the IITP(Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation)

참 고 문 헌

- [1] A. Ceccarelli and F. Secci, "RGB Cameras Failures and Their Effects in Autonomous Driving Applications," IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, vol. 20, no. 4, pp. 2731–2745, July–Aug. 2023.
- [2] Y. Wang, R. Wan, W. Yang, B. Wen, L.-P. Chau, and A. C. Kot, "Removing image artifacts from scratched lens protectors," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1–5, Monterey, CA, USA, May 2023.
- [3] Joon-Hyuk Lee, Min-Gyeong Kwon, Young-Beom Kim, Jang-Wook Hur, "Failure diagnostics of camera image sensor for vehicle using CNN," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 23, no. 12, pp. 877–884, 2022.
- [4] Y. Chen, W. Zhu, D. Chen and Z. Lu, "Online Image Sensor Fault Detection for Autonomous Vehicles," in Proc. IEEE Int. Symp. Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoC), pp. 120–127, Penang, Malaysia, 2022.
- [5] L. Yang, B. Kang, Z. Huang, Z. Zhao, X. Xu, J. Feng, and H. Zhao, Depth Anything V2(2024), Retrieved Dec. 30, 2025, from <https://arxiv.org/abs/2406.09414>.