

실내 자율주행 무인 발렛파킹 관제 시스템을 위한 어안렌즈 기반 영상 보정

윤성웅, 권재민, 이상엽, 조정훈*

경북대학교

yhon89@knu.ac.kr, yjkwon9610@knu.ac.kr, lsy725lsy@knu.ac.kr, *jcho@knu.ac.kr

Fisheye Image Rectification Tailored for Indoor Autonomous Valet Parking Control Systems

Sungwoong Yoon, Jaemin Gwon, Sangyeop Lee, Jeonghun Cho*

School of Electronic and Electrical Engineering

Kyungpook National Univ.

요약

본 논문에서는 실내 주차 공간의 효율적 관리와 무인 발렛파킹을 지원하기 위해 어안 렌즈와 YOLOv8n을 활용하여 차량의 실시간 탐지부터 정밀 측위까지 통합 수행하는 지능형 관제 시스템 '내리다(Nae-Ri-Da)'를 제안한다. 본 시스템은 어안 렌즈 기반의 엣지 디바이스와 중앙 연산 서버로 구성되며, 등거리 투영 모델 기반의 왜곡 보정 및 YOLOv8n 알고리즘을 통해 차량을 탐지하고 추적한다. 탐지된 차량 정보는 호모그래피 변환을 거쳐 실제계 물리 좌표로 매핑되며, 이를 통해 GPS 신호가 없는 실내 환경에서도 정밀한 차량 위치 데이터를 생성한다. Flask 및 React 기반의 웹 통합 관제 UI는 실시간 영상 스트리밍과 좌표 시각화를 지원하며, Docker 컨테이너 환경은 시스템의 유연한 배포와 안정적인 리소스 관리를 보장한다. 실험 결과, 본 시스템은 객체 탐지 정확도 (mAP@0.5) 99.5%, 전체 처리 지연 시간 0.85초, 평균 위치 추정 오차 10cm 이내의 성능을 보였다. 본 시스템은 고가의 센서 없이 인프라 기반의 정밀 측위를 구현하여, 효율적이고 안전한 도심형 무인 주차 자동화의 가능성을 제시한다.

I. 서론

스마트 주차 시스템의 자동화는 도심의 주차난 해소와 교통 혼잡 완화를 위해 필수적이다. 특히 도심 내 주차 공간의 효율적 활용과 사용자 편의성 증대는 현대 스마트 시티의 핵심 과제이다. 그러나 기존의 실내 주차장 시스템은 초음파 센서를 통해 가용 주차면을 표시하는 수동적 안내 수준에 머물러 있어 여전히 운전자가 직접 배회하며 주차 공간을 탐색해야 하는 비효율성이 존재한다. 또한 대안으로 제시되는 인력 기반의 발렛파킹 서비스는 높은 인건비 부담과 운영상의 안전 문제를 가진다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 YOLOv8n과 어안렌즈를 활용한 실내 자율주행 무인 발렛파킹 관제 플랫폼 '내리다(Nae-Ri-Da)'를 제안한다. 내리다는 어안렌즈 기반의 차량 추적 시스템을 중심으로 설계되었으며 입차부터 출차까지의 과정을 무인화하기 위한 핵심 인프라 기술을 다룬다. 본 시스템은 영상 왜곡 보정 및 호모그래피 변환을 통해 기존 CCTV 인프라만으로도 GPS가 없는 실내에서 정밀한 차량 좌표를 추출하도록 구현되었다. 또한 웹 기반의 통합 관제 시스템을 구축하여 실시간 주차 현황 파악 및 차량 위치 데이터를 시각적으로 관리할 수 있도록 하였다. 내리다의 통합 솔루션은 기존 수동적 주차 시스템의 기술적 한계를 영상 인식 기술로 극복하고, 향후 완전 자동화된 주차 서비스를 실현하기 위한 정밀 측위 및 관제 환경을 제시한다.

II. 스마트 주차를 위한 통합 무인 발렛파킹 시스템 설계와 구현

본 논문에서는 실내 주차 공간의 효율적 관리와 무인 발렛파킹 지원을 위한 통합 관제 시스템 '내리다(Nae-Ri-Da)'의 설계 및 구현 내용을 다룬다. 본 시스템은 그림1과 같이 영상 수집을 담당하는 엣지 디바이스, 정밀 영상 처리 및 AI 추론을 수행하는 중앙 연산 장치, 그리고 실시간 모니터링을 위한 웹 기반 관제 서버로 구성된다.

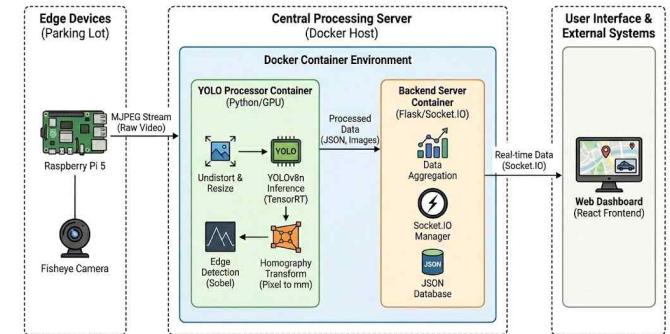


그림 1. 내리다의 소프트웨어 구성 및 기능

주차장 각 구역의 영상 수집을 담당하는 엣지 디바이스는 Raspberry Pi 5 모듈을 기반으로 하며, 여기에 175° 광각 시야각(FOV)을 지원하는 OV5647 센서 기반의 5MP 어안 렌즈 카메라를 연결하여 광각의 주차장 영상을 실시간으로 수집한다. 본 하드웨어 구성은 넓은 가시 범위를 확보하여 최소한의 장비로 사각지대 없는 모니터링을 가능하게 한다. 수집된 영상은 로컬 네트워크를 거쳐 고성능 GPU 중앙 서버로 전송된다. 중앙 서버는 시스템의 유연한 확장과 안정적 운영을 위해 Docker 컨테이너 기반으로 구축되었다. 특히 Docker-Compose를 활용하여 YOLO 프로세서, 백엔드 및 프론트엔드를 각각 독립된 컨테이너로 격리 구동함으로써, 소프트웨어 종속성 문제를 해결하고 효율적인 자원 관리를 실현하였다[1].

중앙 서버로 전송된 영상은 정밀한 주차 관제를 위해 기하학적 왜곡 보정 단계를 가장 먼저 거친다. 어안 렌즈는 넓은 시야각을 확보할 수 있다는 장점이 있으나, 렌즈 중심에서 멀어질수록 방사형 왜곡이 심화되어 객체의 형태와 위치 정보를 왜곡시킨다. 이를 해결하기 위해 본 시스템은 OpenCV의 fisheye 모듈을 활용하여 왜곡을 보정한다. 보정 모델로는 어

안 렌즈의 광학적 특성에 최적화된 등거리 투영 모델(Equidistant Projection Model)을 적용한다[2]. 입사각과 이미지 평면상의 거리 사이의 관계는 다음의 수식(1)과 같이 정의된다.

$$\gamma = f \cdot \theta \quad (\text{단, } f \text{는 초점 거리}) \quad (1)$$

γ 는 렌즈의 광학 축으로부터 이미지 센서 평면상의 점까지의 상고를 의미하고, θ 는 광학 축과 입사 광선 사이의 각도인 입사각을 의미한다. 수식의 정확한 적용을 위해 본 연구에서는 사전에 체커보드 패턴을 이용한 캘리브레이션을 수행하여, 카메라 내부 파라미터와 왜곡 계수를 산출하였다. 이를 기반으로 생성된 왜곡 맵은 입력되는 프레임의 왜곡을 실시간으로 보정한다. 이러한 전처리 과정은 영상의 직선성을 회복시킴으로써, 후속 단계인 실세계 좌표 변환의 정밀도를 확보하는 핵심적인 역할을 수행한다.

왜곡이 보정된 영상은 객체 탐지를 위해 YOLOv8n 딥러닝 모델에 입력된다[3]. 본 연구에서는 주차장이라는 특수한 운영 환경에서 최상의 성능을 확보하기 위해, 해당 환경에서 직접 수집한 1,220장 규모의 커스텀 데이터셋을 구축하여 모델을 미세 조정하였다. 실험 결과, 모델은 차량(Car) 클래스에 대해 1.0에 근접하는 정밀도와 재현율, 그리고 mAP@0.5 지표 모두 0.995라는 매우 높은 성능을 달성하였다. 학습 손실과 검증 손실이 동반 하락하는 안정적인 학습 곡선은 모델이 과적합 없이 일반화 성능을 확보하였음을 보여주며 이는 오탐지와 미탐지가 허용되지 않는 무인 관제 시스템의 요구사항을 충족한다[4]. 또한, 전체 파이프라인 처리 속도는 평균 0.85초, 순수 추론 시간은 0.6초(RTX 4080 기준)를 기록하여 실시간 관제에 적합한 응답성을 확보하였다[5].

탐지된 차량 정보는 최종적으로 물리적 좌표 변환 및 시각화 단계를 거쳐 그림2와 같이 사용자에게 제공된다.

