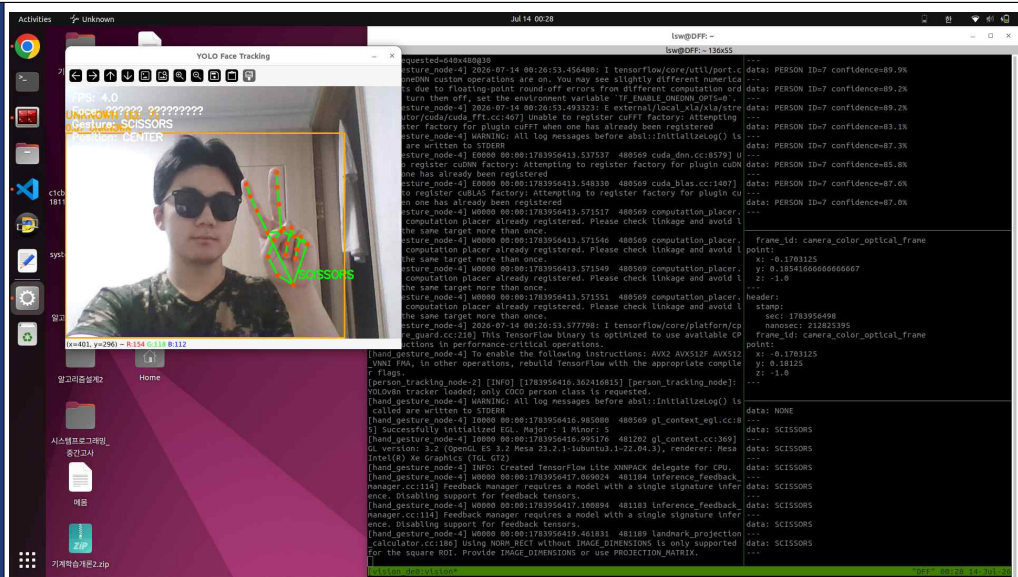


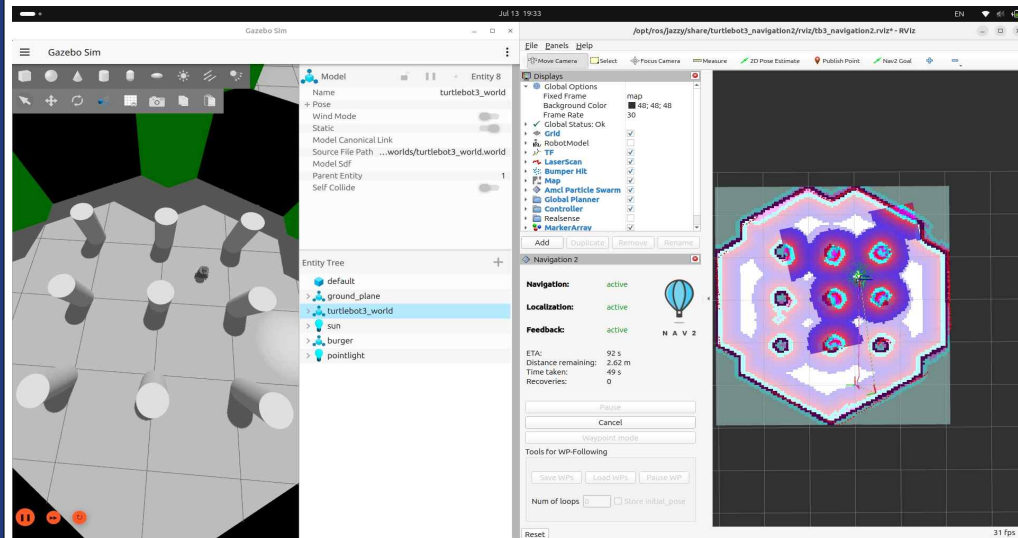
2026 종합설계경진대회 중간보고서 [일반 · 항공드론 분야]

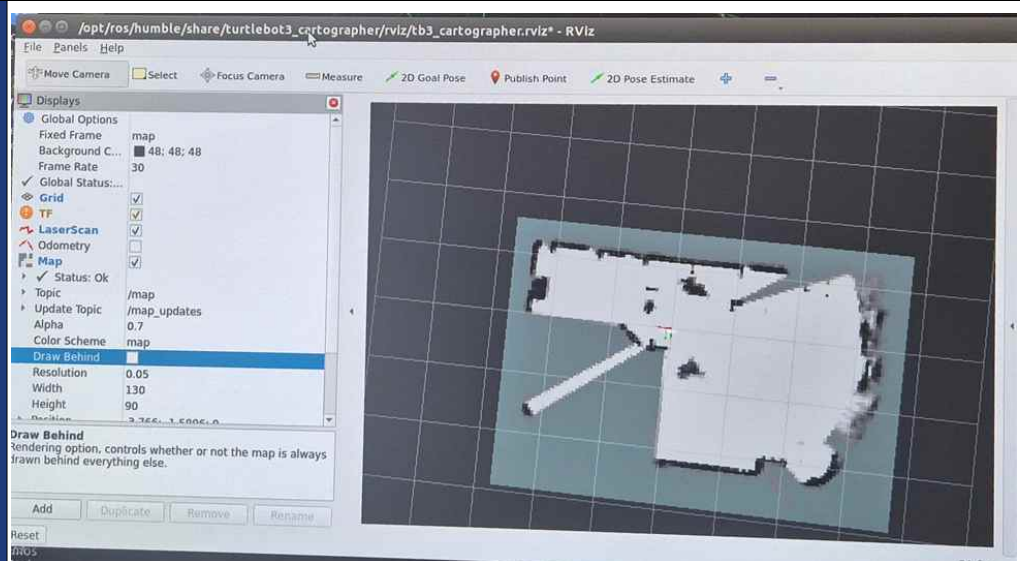
팀명		A.R.E.S. (아레스)	
작품(과제)명		비접촉 인터페이스 및 자동 파지 기술을 적용한 지능형 실내 보조 운송 시스템	
분야	일반	☐ 기업문제해결	☐ 사회기여형 ☒ 자유과제
	항공드론	☐ 지/산/연 문제해결	☐ 기능성 드론제작 ☐ 항공/드론 소재, 센서 ☐ 군집드론/AI접목드론 ☐ 종합설계과목 프로젝트
팀원 역할		이름	수행 역할(상세하게 기재할 것)
		최수아	Fusion 360과 3D 프린터를 활용한 전체적인 하드웨어의 디자인, 배선, 설계 및 제작
		이상원	YOLOv8과 MediaPipe를 활용한 사용자 얼굴 인식을 통한 팔로잉 기능과 제스처 인식을 통한 명령어 수행 기능 구현
		고민희	ROS2 환경에서 로봇 팔의 안정적인 운송 및 파지에 필요한 제어 및 2D 라이다와 Depth 카메라를 활용한 자율주행 시스템 구현
		정준상	ROS2 기반의 센서, 제어기, AI 모듈 간 통신 구조 설계 및 전체 시스템의 실시간 연동 담당
		백승아	역기구학을 활용한 로봇 팔 설계 및 제작
		성지현	교통약자의 생활 환경을 기준으로 로봇의 실제 활용 가능성 검토 및 사용자 안전성, 심리적 수용성, 개인정보 보호, 복지 현장 적용성 평가
1차 멘토링 내용 (1,500자 이내)		(1차 멘토링에 참여하지 않았음)	
변경 요약 (500자 이내)		초기 제안서 대비 주요 변경 사항은 시스템 아키텍처, 인지 알고리즘, 기구 설계의 세 가지 측면에서 이루어졌다. 우선, 기존 완전 독립형 분산 ROS2 통신 구조에서 발생하던 주행 명령(/cmd_vel) 충돌 문제를 해결하기 위해 Jetson Orin Nano 기반의 중앙 제어 노드를 신설하여 명령 우선순위를 중재하고 고수준·저수준 제어를 명확히 분리하였다. 이와 함께, Depth 카메라의 수급 및 연동 지연으로 인한 개발 차질을 방지하고자, 일반 웹캠을 활용해 2D 픽셀 기반으로 대상의 상대 위치(좌/중/우)를 계산하도록 인지 알고리즘을 임시 대체하여 소프트웨어 구현을 우선적으로 진행하였다. 마지막으로, 소형 로봇 내부의 공간 제약으로 인해 랙 앤 피니언 기어에 발생하는 언더컷 현상을 극복하기 위해 공학적 해석을 적용하였으며, 기어 모듈(M)을 2.0에서 1.5로 하향 조정함으로써 기구학적 설계를 수정하였다.	
진행 상황 및 어려운 점		1. 프로젝트 진행 상황 - 비전 인식 및 비접촉 제어 시스템 (70%) 카메라 프레임에서 대상의 안면 Bounding Box와 21개 손 관절 랜드마크를 실시간으로 추출하는 알고리즘을 구현하였다. 현재 단위 테스트를 통해 YOLOv8과 MediaPipe 모델의 인식률 및 상태 전이 명령 생성 로직 코드를 검증하고 있으며, 검증 완료 후 로봇 중심 좌표계 기반의 구동 제어부와 연동할 예정이다.	



- 2D SLAM 및 자율주행 시스템 (90%)

2D LiDAR 데이터를 기반으로 2차원 실내 지도를 실시간으로 생성하고 전역 경로 계획기를 통해 최단 궤적을 산출한다. 현재 Gazebo 가상 환경을 통한 시뮬레이션과 실제 환경의 맵핑 테스트를 병행하고 있으며, 국소 경로 계획기인 DWA 알고리즘을 적용하여 동적 장애물을 회피하는 자율주행 성능을 검증하고 있다.



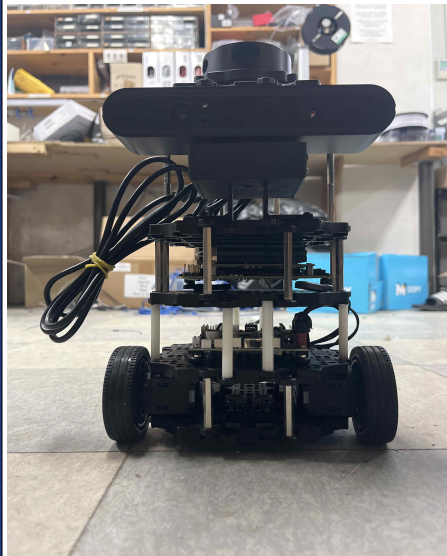


- 실시간 데이터베이스 연동 시스템 (0%)

ROS2 환경에서 발생하는 로봇의 주행 상태, 인지 결과, 파지 압력 센서값 등의 운송 데이터를 클라우드 데이터베이스와 실시간으로 동기화하는 시스템이다. 본 기능은 자율주행 및 파지 등 로봇의 하드웨어 핵심 구동 파트의 통합이 완료된 이후, 실 운용 테스트 단계에 맞추어 단계적으로 구축할 계획이다.

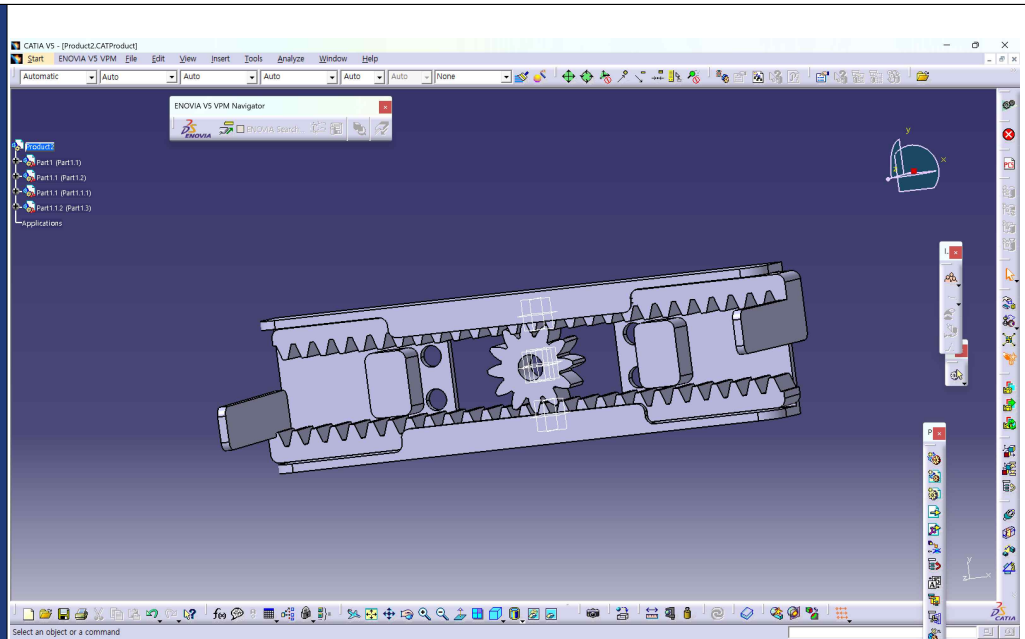
- 지능형 모바일 로봇 플랫폼 (70%)

고부하 인지 연산을 전담하는 Jetson Orin Nano와 모터 제어를 담당하는 OpenCR 간의 분산 제어 아키텍처를 물리적으로 구현한 통합 플랫폼이다. 센서 사각지대를 최소화하도록 프레임을 구성하여 전체적인 하드웨어 조립 및 배선 작업을 완료하였으며, 시스템 연동 및 통합 주행 테스트를 준비하고 있다.



- 2자유도 로봇 팔 및 자동 파지 모듈 (70%)

제어 직관성과 공간 효율성을 높이기 위해 모듈 1.5, 피치원 지름 18mm의 최적 치수로 역산 및 자체 설계한 랙 앤 피니언 기반의 2 자유도 구동계이다. 현재 3D 모델링을 통해 부품 출력 및 조립을 진행하고 있으며 FSR 센서 피드백 기반의 가변 파지 제어를 적용할 예정이다.



2. 프로젝트 진행 과정에서 발생한 문제점

- S/W

일반 웹캠 사용으로 인한 정확한 3D 거리 좌표 변환의 한계가 존재했으며, 대상의 얼굴이 순간적으로 가려지거나 손 모양이 흔들릴 때 추적이 끊기고 명령이 오인식되는 문제와 Jetson 환경에서 ROS2 bringup 시 다이내믹셀 통신 오류가 발생하며 하드웨어 구동이 이루어지지 않는 문제가 있었다.

- H/W

로봇 팔 제어 시 목표 각도만 전달하면 모터가 급가속하여 기구에 타격을 주었으며, 파지 대상 물체의 규격이 다를 경우 그리퍼가 물체를 파손하거나 놓치는 문제가 발생하였다.

해결방안

1. 비전 인식 예외 처리 알고리즘 적용

얼굴 가림 시 대상 해제 문제를 해결하기 위해 YOLO 추적 ID를 일정 시간 유지하는 로직을 추가하였다. 또한, 수신호 오인식을 방지하기 위해 동일한 제스처가 '여러 프레임 연속'으로 확인될 때만 최종 제어 명령 토픽으로 확정 발행하도록 필터링을 구현하였다.

2. 저수준 제어기(OpenCR) 펌웨어 재구성

단순 USB 통신 불량에 아닌 하위 제어기의 오도메트리 해석 문제임을 파악하고, OpenCR 포트(/dev/ttyACM0)에 burger.opencr 펌웨어를 재업로드하여 해결하였다. 이를 통해 OpenCR이 단순 연결 보드가 아닌 실제 모터 제어와 센서 퓨전을 담당하는 핵심 저수준 제어기임을 확인하였다.

3. 로봇 팔 및 그리퍼의 페루프 제어 도입

로봇 팔의 급기동을 막기 위해 'Joint Trajectory Controller'를 도입하여 시간에 따른 미세 궤적을 계산해 부드럽게 구동하도록 하였다. 그리퍼에는 FSR 압력 센서를 부착하여 수집된 아날로그 데이터가 임계값에 도달하면 즉시 모터를 정지시키는 페루프 제어 방식을 채택하여 파손 문제를 해결하였다.

기술 및 상세설계

1. 중앙 집중형 명령 우선순위 제어 아키텍처 구축으로 구동 안정성 확보

업데이트
(1차 제안서 대비
변경/발전사항
중심)

기존의 완전 독립형 분산 ROS2 통신 방식은 사용자 추종 노드와 자율주행(Nav2) 노드에서 이동 명령(/cmd_vel)을 동시에 발행할 경우 모터 제어권 충돌이 발생하는 한계가 있었다. 이를 해결하기 위해 Jetson 보드 내부에 제어 명령을 중재하는 '중앙 제어 노드'를 신설하고 제어 가중치 우선순위를 설정하였다. 구체적으로 비상정지/오류를 1순위로 하여 명령 대기, 안전거리 위반 회피, 파지 동작, 사용자 추종, 일반 자율주행 순으로 논리적 가중치를 부여하였다. 이러한 구조는 상위 우선순위 이벤트 발생 시 수행 중이던 하위 명령을 즉시 취소하고 제어권을 최우선으로 회수함으로써, 복합 동작 수행 중 발생할 수 있는 시스템 충돌을 원천적으로 방지하고 구동 안정성을 극대화한다.

2. 고수준, 저수준 제어 계층 이원화

단일 보드에서 모든 제어를 처리할 때 발생하는 연산 병목 및 제어 지연 현상을 방지하기 위해 제어 계층을 고수준과 저수준으로 명확히 분리하여 설계하였다. 고수준 제어기인 Jetson 보드는 비전 AI 추론, Nav2 기반 경로 계획, SLAM 등 연산량이 많은 데이터 처리 및 판단에 집중하도록 구성하였다. 반면 저수준 제어기인 OpenCR 보드는 고수준 제어기에서 산출된 명령을 수신하여 실제 모터 구동을 위한 실시간 PID 제어, 전압 공급 및 엔코더 값 피드백을 전담하게 하였다. 이처럼 하드웨어 구동을 독립적인 하위 제어기에 일임하는 이원화 구조를 통해 모터의 급가속이나 오버슈트 현상을 효과적으로 방지하고, 한층 부드럽고 정밀한 주행 질감을 확보하였다.

3. 로봇 팔 기구학 설계 변경 및 공학적 최적화

초기 기구 설계 시 기어 모듈(M)을 2.0으로 설정하였으나, 로봇 내부의 한정된 공간 제약으로 인해 피니언 잇수(Z)가 최소 기준에 미달하며 기어 이빨 뿌리가 파이는 언더컷 현상이 발견되었다. 이를 해결하기 위해 기어 모듈을 $M=1.5$ 로 하향 조정하여 재설계하고 정밀한 공학적 치수 산출을 진행하였다. 공간 제약을 고려해 피치원 지름(D)을 18mm로 고정하고 최적 잇수 12개($Z = \frac{D}{M}$)를 도출하여 언더컷을 원천 차단하였으며, 주변 하우징과의 간섭 방지를 위해 이끝원 지름 21mm ($D_k = D + 2M$)를 적용해 여유 간극을 확보하였다. 또한 랙 기어와의 동력 손실 없는 정밀한 맞물림을 위해 약 4.71mm의 원주 피치($p = \pi \times M$)를 치형에 반영하였고, 도출된 수치들을 3D CAD(CATIA) 어셈블리에 적용하여 구동 메커니즘의 기계적 신뢰성을 최종적으로 검증하였다.

검증
방안

1. 자율주행 및 주행 모터 제어 성능 검증

주행 제어의 신뢰성을 평가하기 위해 Teleop 노드를 활용한 전/후/좌/우 이동 시 구동 모터의 정상 작동 여부를 1차적으로 확인한다. 이후 Nav2 스택을 적용하여 지정된 출발점에서 목표 지점까지 동적/정적 고정 장애물을 회피하며 충돌 횟수 0 회로 안전하게 자율 주행하는지 반복 시험한다. 또한 주행 중 비상 상황 발생 시 주행 속도 지령을 0으로 강제 설정하고 실행 중인 모든 액션을 취소하는 E-stop (강제 정지) 기능을 테스트하여, 제어 명령 인가 후 0.5초 이내에 로봇이 완전히 정지하는지를 정량적 목표 기준으로 삼아 검증을 수행한다.

2. 로봇 팔 기구학적 구동 및 지능형 파지 제어 검증

제작된 랙 앤 피니언 로봇 팔의 신뢰성을 확인하기 위해 구동 범위 전 구간을 왕복 이송하며 기어의 탈조나 맞물림 이탈이 없는지 검증하고, 3D 프린팅 공차

(0.1~0.2mm)를 반영한 조립부의 원활한 구동 여부를 확인한다. 위치 제어 정밀도는 Joint Trajectory 컨트롤러 구동 후 버니어 캘리퍼스로 실측하여 관절별 작동 오차 $\pm 5^\circ$ 이내 및 선형 이동 오차 1.5mm 이내(코드 보정을 통해 최종 1.0mm 이하) 달성 여부를 평가한다. 더불어 최대 정격 부하 인가 시 속도 저하 현상이 없음을 점검하고, 그리퍼부에 부착된 FSR 압력 센서 데이터를 기반으로 파지 임계값 초과 시 즉각 모터를 100% 정지시켜 물체의 파손이나 낙하를 방지하는지 종합적으로 검증한다.

3. 중앙 집중형 우선순위 중재 및 시스템 통합 동작 검증
 신설된 Jetson 중심의 중앙 제어 노드가 다중 제어 명령을 올바르게 중재하는지 확인하기 위해, 사용자 추종, 일반 자율주행, 비상 정지, 물체 파지 등의 이벤트를 동시다발적으로 입력하고 잘못된 상태 전환(제어 충돌)이 0회로 유지되는지 엄격히 점검한다. 이를 바탕으로 로봇이 지정된 목표 위치까지 자율 주행으로 이동한 후, 목표물에 정밀하게 접근하여 지능형 파지 동작을 수행하는 전체 시나리오를 가동한다. 주행과 파지 동작이 단절이나 오작동 없이 연속적이고 정상적으로 수행되는지 반복 평가함으로써 전체 통합 시스템의 최종적인 구동 안정성을 입증한다.

예산집행 현황	항목	계획금액	집행금액	비고
		원	원	
최종보고서 제출까지 일정 및 계획	항목	수행내용		담당자
	Depth 센서 도입 및 인지 알고리즘	Depth 카메라(Astra)를 시스템에 통합하여 실제 3D 거리 좌표 기반의 정밀 인지 알고리즘을 적용할 계획이다. 이를 바탕으로 3D 좌표 기반 객체 추적을 수행하여 사용자 추종 안정성을 대폭 향상시키고, 2D 웹캠 환경에서 발생하던 한계를 극복함과 동시에 실제 거리와 측정 좌표 간의 오차율을 정량적으로 평가 및 보완한다.		이상원
	하드웨어 어셈블리 조립 및 페루프 제어	3D 프린팅으로 출력한 랙 앤 피니언 로봇 팔과 그리퍼 하드웨어의 최종 조립을 완료하고 기계적 구동 간섭 및 조립 공차를 점검한다. 이후 완성된 기구부에 FSR 압력 센서를 연동하여 실제 물리 데이터 기반의 지능형 파지 제어 시스템을 가동하며, 대상 물체의 파손이나 기어 탈조 현상이 발생하지 않도록 세밀한 모터 파라미터 튜닝을 집중적으로 수행한다.		백승아 정준상
	통합 시스템 테스트	개별 검증을 마친 비전 인지, 자율주행		고민희

	및 시나리오 검증	(SLAM/Nav2), 하드웨어 제어 노드를 모두 연동하고, 신설된 중앙 제어 노드의 명령 우선순위 중재 로직을 적용하여 최종 시나리오 구동 시험을 진행한다. 자율주행, 장애물 회피, 사용자 추종, 기구 파지 등 복합 동작이 동시에 요구되는 상황에서의 제어 충돌 유무를 꼼꼼히 테스트하고, 실제 주행 환경 데이터를 수집하여 최종 시스템의 구동 안정성을 극대화한다.	최수아 성지현
기타	X		
참고문헌	1, Jocher, G., et al. (2023). "YOLOv8: Real-Time Object Detection and Image Segmentation". Ultralytics Official Documentation. 2. Lugaresi, C., et al. (2019). "MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines". Google Research. 3. Macenski, S., et al. (2020). "The Marathon 2: A Navigation System". IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 4. Open Robotics. (2022). "ROS 2 Humble Hawksbill Documentation". https://docs.ros.org/en/humble/ 5. Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). Shigley's Mechanical Engineering Design (11th ed.). McGraw-Hill Education. 6. ROBOTIS. "Dynamixel XM430-W210-T 및 OpenCR 1.0 e-Manual". https://emanual.robotis.com/ 7. NVIDIA. "Jetson Orin Nano Developer Kit User Guide". NVIDIA Developer.		

팀 장: 최수아 (인)

최수아