

GNSS 기반 선도-추종 제어를 활용한 실외 군집주행 시스템 설계 및 구현

김성운, 이세호, 임형섭, 이관석,

이유진, 김윤성*, 김진성**, 한찬호

경북대학교, *영남대학교, **엘아이지넥스원(주)

gh8579@knu.ac.kr

GNSS-based Leader-Follower Control for Outdoor Platooning System Design and Implementation

Seongun Kim, Seho Lee, Hyungseob Lim, Kwansuk Lee,

Yujin Lee, Yunseong Kim, Jinseong Kim**, Chanho Han,

Kyungpook Nat. Univ., **LIGNEX1 Co., Ltd

요약

본 논문은 미래 전장 환경(NCW, MUM)에 필수적인 군집주행 기술의 실증적 검증을 목표로, ROS 기반 Mesh Network 통신 구조를 갖춘 하드웨어 플랫폼을 설계 및 구현하였다. 기존 속도 기반 제어의 통신 불안정성 한계를 극복하고자 GNSS 레이터를 활용한 위치 중심 선도-추종 제어 기법을 적용하였으며, 초기 항법 시스템의 발산 문제를 해결하기 위해 위치는 DGNSS(RTCM 2.3)로 확보하고 IMU 센서는 칼만 필터 융합을 통해 주행 방향(Yaw) 안정화에 활용하는 전략을 채택하였다. 또한, 3m 이상 군집 이탈 시 최대 출력(PWM)으로 신속히 복귀하는 알고리즘을 포함하여, DGPS와 IMU 센서 융합 기반의 실외 군집주행 시스템을 성공적으로 구현하고 그 실증적 타당성을 검증하였다.

I. 서 론

미래 전장 환경은 네트워크 중심전(NCW)과 유·무인 복합 전투 체계(MUM)로 빠르게 변화하고 있다. 이러한 환경 속에서 다수의 자율 플랫폼이 실시간으로 정보를 공유하는 군집주행 기술[1]은 보급, 지원 등 다양한 분야의 핵심으로 주목받고 있다. 이러한 중요성에도 불구하고, 실제 차량이나 장비를 이용한 연구는 수많은 제약을 수반한다.

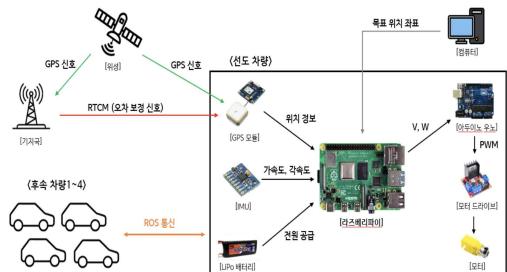
이에 본 연구는 제어기와 핵심 센서를 탑재한 맞춤형 하드웨어 플랫폼을 설계·제작하여, 군집주행 제어 알고리즘을 신속하게 검증할 필요가 있다. 또한, 저가형 GPS로부터 수신한 위치 좌표와 IMU 센서의 방위각 데이터를 융합해 신뢰도 높은 항법 정보를 생성할 필요가 있다.

공극적으로 본 연구의 필요성은 시스템 통합을 통한 실증적 타당성 검증에 있다. 본 연구의 최종 목표는 상용 하드웨어를 통합하여 실제 동작하는 군집주행 시스템을 설계, 구현 및 실증하는 것이다.

이를 위해, 맞춤 하드웨어를 제작하고 센서 융합에 기반한 실외 항법 시스템을 구축한다. 이후 모듈을 통합하여 HILS 환경에서의 군집주행 가능성을 검증한다.

II. 본 론

2.1 System Block Diagram



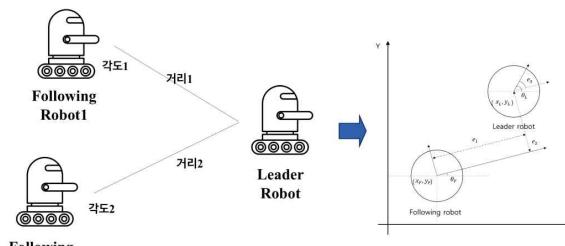
[그림 1] 실외 군집주행 시스템 블록 다이어그램

본 시스템의 전체 구조는 [그림 1]과 같다. 선도 차량은 DGPS를 통해 위

치 정보를 수신하고 IMU 센서의 데이터를 Kalman Filter로 융합해 방향(Yaw)값을 계산한다. 이후 목표 위치와 현재 위치를 비교하여 PWM 제어 신호를 산출하고 모터를 구동한다.

선도 차량은 ROS 기반 Mesh Network를 통해 자신의 위치정보를 추종 차량으로 전송하여 자세를 유지하도록 제어한다. 또한, 네트워크 초기화, DGPS, PWM 보정 등은 시스템 구동 초기에 자동 수행되도록 설계하였다.

2.2 선도-추종 접근법을 활용한 군집제어



[그림 2] 선도-추종 접근법

기존의 선도-추종(Leader - Follower) 제어 방식은 선도 로봇의 선속도와 각속도 정보를 실시간으로 공유받아 추종 로봇의 주행 속도를 계산하는 속도 기반 제어(Velocity-based Control) 방식으로 설계된다. 그러나 이 방식은 통신이 불안정하면 동기화 주행이 어려운 한계가 있다.

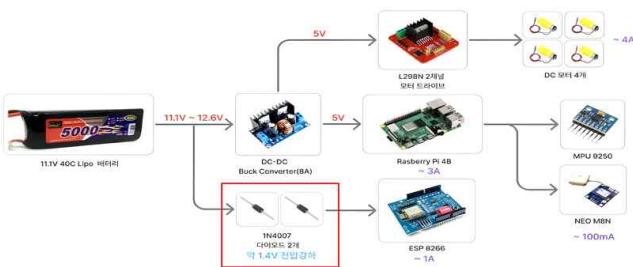
본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, GNSS(Global Navigation Satellite System) 데이터를 이용한 위치 중심 제어(Position-based Control) 방식[2]을 적용하였다. 각 로봇은 GNSS 모듈을 통해 실시간으로 자신의 위도, 경도를 수신하고, 이를 바탕으로 로봇 간의 거리와 방위각을 계산하여 상대 위치와 주행 방향을 인식한다.

$$x_{i,ref} = x_L - d_i \cos(\theta_L), y_{i,ref} = y_L - d_i \sin(\theta_L) + y_{off}$$

[수식 1] 추종 차량 기준 목표 위치 정의

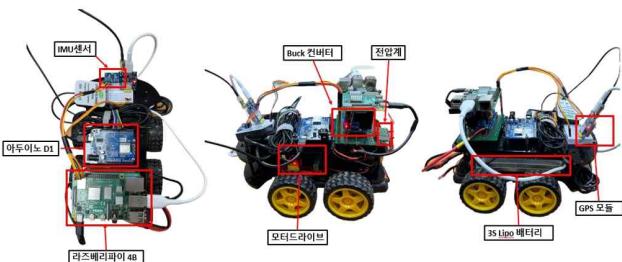
추종 차량의 목표 위치를 계산하는 수식은 [수식 1]과 같다.

2.3 군집주행 차량 플랫폼 설계



[그림 3] 전력 시스템 구성

시스템 전원은 충분한 전류 공급을 위해 40C 3S Li-Po 배터리를 사용하였다. 메인 컨트롤러와 주변 장치에는 최대허용전류 8A인 벽 컨버터(Buck Converter)를 적용하여 안정적인 전력 공급을 보장하였다. 보조 마이크로컨트롤러의 전원 안정화를 위해, 배터리 전압 변동에도 권장입력범위(~12V)를 유지하도록 다이오드를 활용하여 전원을 안정화했다.



[그림 4] 군집주행 차량의 최종 하드웨어 구성

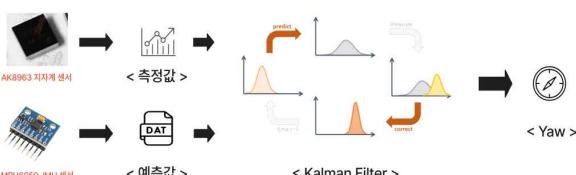
설계된 구조를 기반으로 [그림 4]와 같이 최종 부품을 배치하였으며, 이를 통해 군집주행 차량의 하드웨어 제작을 최종 완성하였다.

2.4 GNSS 수신기 및 IMU 센서를 이용한 위치 추정

프로젝트 초기에는 GNSS와 IMU 센서를 결합한 선형 칼만 필터(Linear Kalman Filter)를 통해 차량의 위치를 추정하는 구조를 설계하였다. 이는 다수의 선행 연구[3]에서 제안되는 대표적인 센서 융합 방식과 유사한 접근이다.

그러나, 초기실험 과정에서 IMU 센서의 고주파 노이즈와 부정확한 선형 칼만 필터 모델링의 한계가 복합적으로 작용하여 위치가 발산하는 현상이 확인되었다.

이에 따라 본 연구에서는 센서 융합 전략을 다음과 같이 수정하였다.



[그림 5] IMU 센서를 이용한 Yaw 추정 매커니즘

IMU 센서는 자세(Yaw) 추정으로 사용하여 주행 방향 안정화에만 활용한다. 위치 추정은 RTCM 2.3 메시지를 수신하여 DGNSS를 적용하는 방식으로 변경하였다. 이를 이용함으로써, 단일 GNSS 대비 향상된 위치 정확도를 확보했으며, 군집 간 간격 제어에 필요한 정밀도(약 수십 cm~1 m 수준)를 만족하는 결과를 확인하였다.

2.5 주행 알고리즘

구분	역할 및 동작
선도(Leader)차량	1. 목표지점으로 주행 2. 팔로워에게 위치 및 자세(yaw) 정보 전송
추종(Follower)차량 (정상주행)	1. 선도의 위치를 목표로 추종 2. 선도의 주행 방향(yaw)과 동일하게 유지
추종(Follower)차량 차량(군집이탈)	1. (조건) 선도와 거리 > 3 m
	2. (동작) 단독 주행 모드로 전환
	3. (제어) 최대 PWM 인가로 군집에 신속히 복귀

[표 1] 선도-추종 주행 알고리즘

선도 차량은 사전에 정의된 목표 지점으로 주행하며 자신의 위치 및 자세(Yaw) 정보를 추종 차량에게 주기적으로 전송하는 역할을 수행한다.

추종 차량은 정상 주행 시 선도 차량의 위치와 주행 방향을 기준으로 설정된 대형을 추종하지만, 선도와의 거리가 3m 이상 이탈하는 예외 상황 시 단독 주행 모드로 전환하고 최대 출력(PWM)을 인가하여 군집에 신속히 복귀하도록 설계되었다.

III. 결론

본 연구를 통해 ROS 기반 Mesh Network 통신 구조를 이용한 GNSS 기반 실의 군집주행 시스템을 선도-추종 제어 기법으로 설계 및 구현했다. DGPS와 IMU(지자계, 자이로) 센서 데이터를 Kalman Filter로 융합하여 차량의 위치 및 자세 정보를 정밀하게 추정했다.

향후 연구에서는 RTK 수준의 고정밀 GNSS 수신기 적용, 차량 간 협력 인지(V2V, V2I 통신), 비선형/적응형 제어기 및 고도화된 센서 융합 필터를 도입함으로써 미래 전장 환경으로 확장할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 「지역혁신중심 대학지원체계(RISE)」 ICT-ABB 사업단의 지원을 받아 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Shinsuke Oh-hara, Akihiro Fujimori, "A Leader-follower formation control of mobile robots by position-based visual servo method using fisheye camera," ROBOMECH Journal, vol. 10, article 30, 2023.
- [2] Sung-Jin Lee, "A compact RTK-GNSS device for high-precision localization of outdoor mobile robots," Journal of Field Robotics, vol. 41, no. 5, pp. 1349 - 1365, 2024.
- [3] Y. Zhu et al., "Multi-Sensor Information Fusion for Mobile Robot Indoor Localization," Electronics, 2025