

ROS2 기반 실시간 ICP-SLAM을 활용한 지형 정보 구축 시스템 설계

(Design of a terrain information construction system using ROS2-based real-time ICP-SLAM)

정도윤*, 천종훈**, 김남호***

(Doyoon Jung, Jonghun Chun, Namho Kim)

요약

본 연구는 ROS2 Humble 프레임워크와 YDLidar X4 Pro를 활용하여 실시간 고정밀 지형 정보를 구축하는 ICP-SLAM 시스템을 제안한다. 기존 시스템의 연산 부하 문제를 해결하기 위해 ROS2의 DDS 체계를 기반으로 데이터 통신을 최적화하였으며, ICP 알고리즘을 통해 점군 데이터의 정밀 정합을 수행하였다. 교내 강의동 7층 복도(약 50m 구간)에서 실시한 실증 실험 결과, 시스템은 약 140초의 주행 시간 동안 데이터 결손 없는 지형 매핑 성능을 보였다. 특히 시계열 분석 결과, 개방된 복도 구간에서 최대 4.6m의 측정 거리를 기록하였으며, 장애물 인지 시 최소 0.8m까지의 거리 변화를 실시간으로 반영하며 지형의 기하학적 특성을 정확히 투영하였다. 또한, 구축된 지도는 실제 물리적 구조와 높은 일치성을 보였으며, 복잡한 장애물 환경에서도 안정적인 위치 추정 및 지도 갱신이 가능함을 입증하였다. 본 연구는 실무적인 지형 정보 구축을 위한 ROS2 기반의 통합 시스템 구현 방안을 제시하며, 향후 자율주행 로봇 및 드론의 공간 인지 기술 발전에 이바지할 것으로 기대된다.

■ 중심어 : 로봇 운영체제 2 ; ICP-SLAM ; 지형 정보 구축 ; 반복 근접점 알고리즘 ; 실시간 지도 작성

Abstract

This study proposes an ICP-SLAM system that constructs real-time high-precision terrain information using the ROS2 Humble framework and YDLidar X4 Pro. To address the computational load issues of existing systems, data communication was optimized based on ROS2's DDS scheme, and precise alignment of point cloud data was performed using the ICP algorithm. As a result of a demonstration experiment conducted in the corridor on the 7th floor of a campus lecture building (approximately 50m section), the system demonstrated terrain mapping performance without data loss during a travel time of about 140 seconds. In particular, time-series analysis revealed a maximum measurement distance of 4.6m in the open corridor section, and accurately projected the geometric characteristics of the terrain by reflecting distance changes of up to 0.8m in real-time upon obstacle detection. Furthermore, the constructed map showed high consistency with the actual physical structure, proving that stable position estimation and map updates are possible even in complex obstacle environments. This study presents a method for implementing a ROS2-based integrated system for practical terrain information construction and is expected to contribute to the advancement of spatial perception technology for autonomous robots and drones in the future.

■ keywords : Robot Operating System 2 ; ICP-SLAM ; Terrain Information Construction ; Iterative Closest Point(ICP) ; Real-time Mapping

I. 서론

자율주행 이동 로봇 기술의 비약적인 발전과 더불어

어, 복잡하고 비정형화된 환경에서의 정밀한 지형 정보 구축 및 공간 인지 능력의 중요성이 날로 증대되고 있다. 특히 건설 현장, 재난 구조 지역 및 험지 탐색과 같은 특수 환경에서 로봇이 안전하게 임무를

* 정회원, 호남대학교 컴퓨터공학과 박사과정, ** 정회원, 목포대학교 항공드론융합전공학과, *** 정회원, 호남대학교 컴퓨터공학과
이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2026-RS-2022-00156287).

수행하기 위해서는 실시간으로 주변 지형을 파악하고 고정밀 지도를 생성하는 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 기술이 필수적이다. 그중에서도 LiDAR 센서 기반의 ICP(Iterative Closest Point) 알고리즘은 점군 데이터(Point Cloud Data) 간의 정합을 통해 정밀한 상대 좌표를 산출하는 데 탁월한 성능을 보여 지형 매핑 분야에서 널리 활용되어 왔다[1,2].

그러나 기존의 SLAM 시스템은 대규모 점군 데이터를 처리하는 과정에서 발생하는 과도한 연산 부하와 통신 지연으로 인해 고속 이동 상황에서의 실시간성을 확보하는 데 한계를 보였다. 또한, 초기 위치 추정값에 대한 높은 의존성과 환경적 요인에 의한 정합 오차 누적은 장기 주행 시 지도의 기하학적 왜곡을 초래하는 주요 원인이 된다. 이러한 기술적 난제를 해결하기 위해 로봇 시스템의 실시간성과 확장성을 보장하는 차세대 프레임워크의 도입이 요구되고 있다. 본 논문에서는 ROS2(Robot Operating System 2) 환경을 기반으로 실시간성을 극대화한 ICP-SLAM 지형 정보 구축 시스템의 설계를 제안한다[3,4]. ROS2의 데이터 분산 서비스(DDS) 체계를 활용하여 노드 간 통신 효율을 최적화하고, 멀티스레딩 기반의 병렬 처리를 통해 대용량 센서 데이터의 연산 병목 현상을 해소하고자 한다. 또한, 개선된 ICP 알고리즘을 활용하여 지형 구축 과정에서 발생하는 누적 오차를 최소화하고 시스템의 강인성을 확보하는 데 주력하였다. 본 연구를 통해 제안된 시스템은 다양한 동적 환경에서도 안정적으로 고정밀 3D 지형 지도를 생성할 수 있음을 실험적으로 검증한다.

II. 관련 연구

1. ROS2 프레임워크의 실시간성 및 분산 통신 특성 연구

로봇 운영 체제(Robot Operating System, ROS)는 로봇 소프트웨어 개발을 위한 표준 미들웨어로 자리 잡았으나, 초기 버전인 ROS1은 마스터 중심의 통신 구조와 실시간성 보장의 한계로 인해 대규모 데이터

를 처리하는 SLAM 시스템 적용에 제약이 있었다. 이를 보완하기 위해 등장한 ROS2는 DDS(Data Distribution Service)를 통신 표준으로 채택하여 분산형 노드 구조를 구현함으로써 시스템의 신뢰성과 유연성을 획기적으로 향상했다[5,6].

특히 ROS2에서 제공하는 서비스 품질(Quality of Service, QoS) 설정 기능은 네트워크 대역폭이 제한적이거나 손실이 빈번한 환경에서도 LiDAR의 대용량 점군 데이터(Point Cloud Data)를 안정적으로 전송할 수 있는 핵심 기법으로 작용한다. 최근의 연구들은 ROS2의 멀티스레딩 실행기(Static/Threaded Executor)를 최적화하여 센서 데이터 수집, 데이터 전처리, 정합 연산 과정을 병렬화함으로써 연산 병목 현상을 해결하는 데 집중하고 있다. 이러한 ROS2 기반의 실시간 통신 최적화 연구는 고해상도 지형 정보를 실시간으로 처리해야 하는 SLAM 시스템의 하드웨어 자원 효율성을 극대화하는 근거를 제공한다. 또한, 노드 간의 비동기적 통신 제어와 하드웨어 가속 기술의 결합은 고속 이동체에서도 지연 시간(Latency)을 최소화하며 지형 지도를 구축할 수 있는 기술적 토대가 되고 있다.

2. ICP 알고리즘의 고도화 및 비정형 지형 정합 기법의 발전

ICP(Iterative Closest Point) 알고리즘은 두 점군 데이터 사이의 유클리드 거리를 최소화하는 변환 행렬을 반복적으로 계산하여 기구체의 궤적을 추정하는 SLAM의 핵심 기법이다. 초기 Besl과 McKay에 의해 제안된 Point-to-Point 정합 방식은 계산 구조가 단순하나, 초기 위치 추정값에 민감하고 기하학적 특징이 뚜렷하지 않은 야외 지형에서 국부 최솟값(Local Minima)에 수렴하기 쉽다는 한계가 있었다[7,8]. 이를 해결하기 위해 점과 평면 사이의 거리를 계산하는 Point-to-Plane ICP와 확률 밀도 함수를 활용한 Generalized-ICP(G-ICP) 등 다양한 변형 알고리즘이 제안되었으며, 이는 비정형적인 굴곡이 많은 지형 환경에서 정합 정확도를 비약적으로 향상했다.

최근 연구 동향은 ICP 정합 과정에서 발생하는 누적 오차(Drift)를 효과적으로 제어하기 위해 그래프 최적화(Graph-based Optimization) 기술과 루프 클로저(Loop Closure) 기법을 통합하는 방향으로 전개되고 있다. 특히 험지나 대규모 실외 환경에서는 단순한 기하학적 정합을 넘어, 지형의 법선 벡터(Normal Vector)와 곡률(Curvature) 정보를 특징값으로 추출하여 정합의 강인성을 확보하는 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 알고리즘적 개선은 LiDAR 센서의 정밀도 향상과 맞물려, 복잡한 3차원 지형 정보를 수밀성(Watertightness) 있게 복원하고 실시간 디지털 트윈 구축을 가능케 하는 결정적인 역할을 수행하고 있다.

III. 제안 - ROS2 기반 실시간 ICP-SLAM을 활용한 지형 정보 구축 시스템 설계

본 연구에서 제안하는 전체 시스템 구조는 그림 1과 같이 데이터 획득, 인지 및 SLAM, 그리고 제어 계층으로 구분된다. 하드웨어 플랫폼인 모바일 로봇에는 2D/3D LiDAR와 외부 IMU가 장착되어 기초 데이터를 수집한다. 수집된 원시 데이터는 ROS2 미들웨어의 DDS(Data Distribution Service) 체계를 통해 각 노드로 분산 전송된다[9,10].

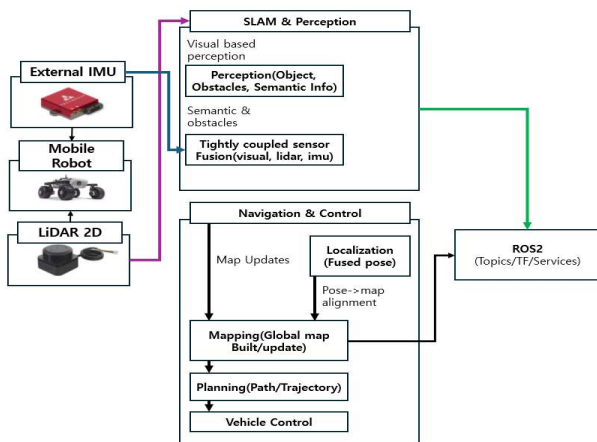


그림 1. ROS2-based real-time autonomous mapping and navigation integration visual slam

SLAM & Perception 모듈에서는 시각 기반 인지(Visual based perception)와 센서 융합(Tightly coupled sensor fusion)이 병렬적으로 수행된다. ROS2의 토픽 및 서비스 통신 구조를 활용함으로써 대용량의 포인트 클라우드 데이터를 지연 없이 처리하며, 이는 Navigation & Control 모듈로 전달되어 실시간 맵 업데이트(Map Updates)와 위치 추정(Localization)을 가능케 한다. 결과적으로 구축된 전역 지도(Global Map)는 경로 계획(Planning) 및 차량 제어(Vehicle Control)의 기초 데이터로 활용되어 시스템 전체의 자율성을 보장한다.

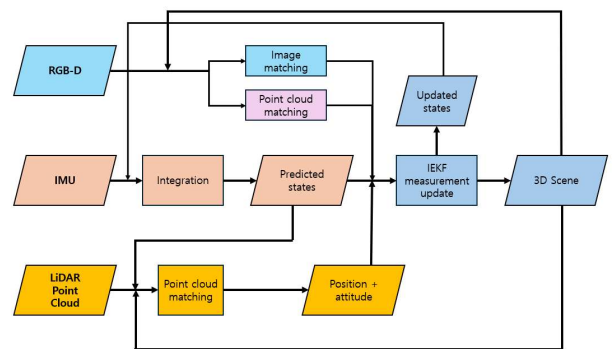


그림 2. The overall workflow of performing Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) using the Scan

시스템의 핵심 로직인 SLAM 알고리즘은 그림 2에 명시된 밀결합(Tightly-coupled) 방식의 센서 융합 프로세스를 따른다. 먼저 IMU 센서로부터 획득한 가속도 및 각속도 데이터를 적분(Integration)하여 로봇의 초기 상태를 예측(Predicted states)한다. 이후 RGB-D 카메라와 LiDAR로부터 입력된 점군 데이터를 바탕으로 이미지 매칭 및 포인트 클라우드 매칭을 수행한다.

이 과정에서 ICP 알고리즘은 현재 스캔된 데이터와 이전 지도 데이터 간의 유클리드 거리를 반복적으로 최소화하여 정밀한 정합 결과를 도출한다. 특히 본 시스템은 예측된 상태값을 ICP의 초기값으로 사용하여 수렴 속도를 향상했다. 정합된 위치 및 자세 정보는 IEKF(Iterated Extended Kalman Filter) 측정값 업데이트 과정을 거쳐 최종적인 상태 값(Updated states)으로 확정되며, 이를 통해 3차원 장면(3D Scene)이 실시간으로 갱신된다. 이러한 구조는 고속 주행이나 급격한 회전 상황에서도 안정적인 위치 추정 성능을 유지하게 한다[11-14].

IV. 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 ROS2 Humble과 YDLidar X4 Pro를 사용하여 지형 정보를 구축할 수 있는 시스템 구현하였다. 실험 장소는 교내 강의동 7층 복도에서 장애물이 있는 곳에서 지형 정보 구축 실험을 진행하였다. 지형 구축과 거리 측정 실험을 진행하였다.

(1) 실험 환경

실험 환경은 표 1과 같으며, Python 3.11를 사용하였다.

표 1. 실험 환경

Category	Description
Type	Laptop
OS	Ubuntu Desktop 22.04 / ROS2 Humble
CPU	Intel Core i7 12세대 1255U Processor
RAM	12GB(8GB DDR4 + 4GB DDR4)
GPU 1	Intel Iris XE Graphics
Disk	SSD 512GB
Python	3.11

(2) 실험 장비

실험 장비는 자체 구축한 모바일 플랫폼에 랩톱과 라이다를 적재하여 장애물 탐지 작업을 수행하였다.



그림 3. Laptop and YDLidar X4 pro loaded on a mobile platform

(3) 실험 방법

본 실험에서는 랩톱 또한 장애물로 간주할 수 있다고 판단하여 랩톱 위에 라이다를 위치하여 지형 정보를 수집하였다.



그림 4. LiDAR 2D equipment movement experiment in the 7th-floor hallway of the campus Creative Hall

(4) 실험에서의 장애 구역

본 연구의 실험 환경인 공과대학 창조관 강의동 7층 복도의 주요 지형적 특성은 그림 5와 같이 도식화할 수 있다. 시스템의 성능 검증을 위해 설정된 주행 경로는 직선 복도와 다수의 구조적 특징점이 공존하는 공간으로 구성되었다.

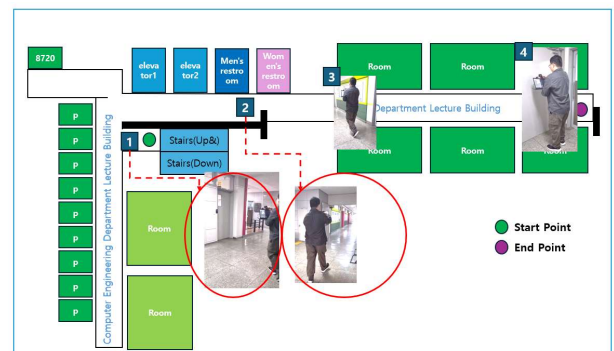


그림 5. View of the main hallway on the 7th floor of the Creative Hall

그림 5를 통해 확인된 바와 같이, 시작 지점 인근의 1번 구역과 중간 기점인 2번 구역, 그리고 종착 지점 (End Point)인 4번 구역은 벽면 및 출입문 등 정밀한 정합이 요구되는 고정 구조물이 집중하여 배치되어 있다. 이러한 수직 구조물들은 LiDAR 센서 기반의 점군 데이터 획득 시 명확한 기하학적 특징

(Geometric Feature)을 제공하며, ICP 알고리즘을 통한 실시간 스캔 매칭 과정에서 기구체의 위치 추정 정확도를 결정짓는 핵심 지표로 활용된다. 본 시스템은 해당 구역에서 추출된 특징점들을 기준 데이터로 삼아 실시간 지도 갱신을 수행하였으며, 구축된 지형 정보 내 벽면의 직선성과 구조물 배치의 일치성을 통해 시스템의 신뢰성을 검증하였다.

(5) 실험을 통한 지도 구축하기

본 연구에서는 ROS2 Humble 환경에서 ICP-SLAM 알고리즘을 활용하여 실시간 지형 정보를 구축하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.

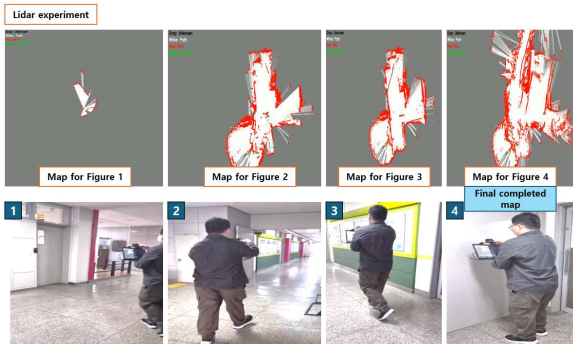


그림 6. Building a map by passing through the hallway obstacle section

실험이 진행됨에 따라 초기 탐색 지점(Map for Figure 1)으로부터 주행 경로를 따라 복도의 전체적인 기하학적 형상이 점진적으로 확장 및 최적화되는 과정을 확인하였다. 그림 6 상단의 LiDAR 매핑 결과 내 붉은색 영역은 복도 벽면 및 고정 구조물을 정밀하게 정합한 점군 데이터로, 하단의 실제 실험 환경 이미지 1부터 4번과 비교했을 때 출입문과 벽체의 위치가 물리적 구조와 매우 높은 일치성이 보임을 알 수 있다. 특히, 4번 구역의 종착 지점에 이르기까지 ICP 알고리즘을 통한 실시간 스캔 매칭이 안정적으로 수행되어, 누적 오차를 최소화한 상태에서 선명한 복도 지형 지도가 구축되었다. 이는 제안된 시스템이 특징점이 반복되는 긴 복도 환경에서도 실시간 지형 정보 구축 및 공간 인지 임무를 성공적으로 수행할 수 있음을 입증한다.

(6) LiDAR 평균 거리 위에 시간 그래프

본 실험 과정 중 LiDAR 센서가 인지하는 지형의 동적 변화를 정량적으로 분석하기 위해, 시간 경과에 따른 평균 측정 거리의 변화를 그림 7과 같이 도식화하였으며 주요 변곡점에 대한 해석을 표 2에 정리하였다.

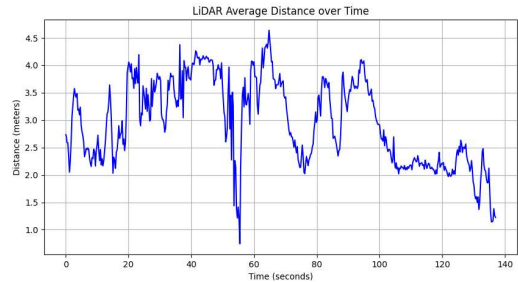


그림 7. Time graph over LiDAR average distance

약 140초의 실험 시간 동안 관측된 데이터의 진폭 변화는 로봇이 주행하며 만나는 지형의 기하학적 복잡도를 투영한다.

표 2. Analysis of LiDAR measurement distance changes and terrain characteristics by time period

시간 (sec)	구간	평균 거리 범위 (m)	지형 및 환경적 특징 요약
0~20		2.0~3.5	초기 구동 및 복도 진입 구간
50~60		0.8~3.5	장애물 근접 및 급격한 지형 변화 발생
60~70		4.0~4.6	개방된 직선 복도 구간(최대 측정 거리)
100~130		2.0~2.5	좁은 통로 또는 벽면 밀착 주행 구간
130~140		1.2~2.0	실험 종료 단계 및 벽면 종단점 인지

특히, 약 65초 지점에서 관측된 최대 측정 거리는 장애물이 없는 개방된 복도 구간의 특성을 반영하며, 55초 및 135초 부근에서 나타나는 급격한 거리 하락은 실험 환경 내 배치된 장애물 탐지 또는 벽면 근접 주행에 의한 결과로 분석된다. 이러한 데이터의 유동적인 변화는 제안된 시스템이 이동 환경에서 주변 지표면 정보를 결손 없이 실시간으로 수집하고 있음을 실증하며, 불규칙한 지형 변화 속에서도 시스템의 운용 안정성이 확보되었음을 입증한다.

V. 결론

본 연구에서는 ROS2 Humble 프레임워크와 ICP-SLAM 알고리즘을 결합하여 실시간으로 고정밀 지형 정보를 구축할 수 있는 시스템을 설계하고 그 성능을 검증하였다. YDLidar X4 Pro 센서를 활용하여 교내 강의동 복도 환경에서 실증 실험을 수행한 결과, 약 140초의 주행 시간 동안 지연 없는 데이터 수집과 정밀한 지도 작성이 가능함을 확인하였다.

특히 주행 중 지형적 복잡도에 따라 최대 4.6m에서 최소 0.8m에 이르는 변화하는 거리 데이터를 성공적으로 처리하며, 장애물이 존재하는 환경에서도 실제 구조와 부합하는 고정밀 지형 정보를 구축하였다. 본 시스템은 ROS2의 분산 통신 구조를 통해 연산 효율성을 확보하였으며, 정밀한 스캔 정합을 통해 시스템의 실용성을 입증하였다. 향후 연구에서는 실험 범위를 대규모 야외 환경으로 확장하고, 다중 센서 융합 기법을 도입하여 지형 구축의 정밀도를 더 고도화할 계획이다.

REFERENCES

- [1] M. Park, C. Bae, and S. Kim, "Implementation of Autonomous Driving for Mobile Robots in an Engine Training Room Based on Robot Operating System 2," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, vol.31, no.4, pp. 485-491, 2025.
- [2] Y. Xu, J. Li, W. Zhang, S. Chen, S. Zhang, and Y. Leng, "FGS-SLAM: Fourier-based Gaussian Splatting for Real-time SLAM with Sparse and Dense Map Fusion," *2025 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5355-5362, 2025.
- [3] D. D. Yanyachi, Y. H. Anco-Agüero, G. A. Echaiz, M. A. Esquivel, A. Mamani-Saico, and P. R. Yanyachi, "Laser_RobMap: An open source ROS2 compatible tool for 3D mapping using a Mobile Robot and 2D LiDAR," *SoftwareX*, vol. 30, pp. 102142, 2025.
- [4] E. A. Rodríguez-Martínez, W. Flores-Fuentes, F. Achakir, O. Sergiyenko, and F. N. Murrieta-Rico, "Vision-Based Navigation and Perception for Autonomous Robots: Sensors, SLAM, Control Strategies, and Cross-Domain Applications—A Review," *Eng*, vol. 6, no. 7, pp. 153, 2025.
- [5] S. Lee, T. Kim, J. Chae, and K.-J. Park, "Optimizing ROS 2 Communication for Wireless Robotic Systems," *arXiv preprint arXiv:2508.11366*, 2025.
- [6] D. Casini, J.-J. Chen, J. Li, F. Reghenzani, and H. Teper, "A Survey of Real-Time Support, Analysis, and Advancements in ROS 2," *arXiv preprint arXiv:2601.10722*, 2026.
- [7] F. de L. Silva, E. de M. Fernandes, P. R. Barros, L. da C. Pimentel, F. C. Pimenta, A. G. B. de Lima, and J. M. P. Q. Delgado, "ICP-Based Mapping and Localization System for AGV with 2D LiDAR," *Sensors*, vol. 25, no. 15, pp. 4541, 2025.
- [8] M. Camara, L. Wang, and Z. You, "Three-Dimensional Point Cloud Displacement Analysis for Tunnel Deformation Detection Using Mobile Laser Scanning," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 625, 2025.
- [9] M. Ryalat, G. Al-Refai, N. Almtireen, and H. ElMoaqet, "Design of a ROS2-Based Hybrid Aerial-Ground Robot for Autonomous Inspection Applications," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 109274-109293, 2025.
- [10] İ. İnce, D. Yiltas-Kaplan, and F. Keleş, "From Simulation to Reality: Comparative Performance Analysis of SLAM Toolbox and Cartographer in ROS 2," *Electronics*, vol. 14, no. 24, pp. 4822, 2025.
- [11] H. You, J. Lee, S. Nam, J. Lee, Y. Lee, M. Kim, and H. Min, "A loop closing scheme using UWB based indoor positioning technique," *Smart Media Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 41-46, 2023.
- [12] J. H. Jung, S. H. Kim, D. J. Kim, and S. W. Yang, "A Study on the Use of Geospatial Information-Based Simulation for Preemptive Response to Water Disasters in Agricultural Land," *Smart Media Journal*, vol. 11, no. 7, pp. 52-60, 2022.
- [13] J. K. Kim and M. H. Lee, "Tomato Disease Detection Using Vision Transformer Model," *Smart Media Journal*, vol. 14, no. 8, pp. 35-41, 2025.
- [14] D.-Y. Jeong, H.-J. Jeong, and N.-H. Kim, "A Study on the Design and Implementation of a Camera-Based 6DoF Tracking and Pose Estimation System," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)*, vol. 24, no. 5, pp. 53-59, 2024.

— 저 자 소 개 —



정도윤(정회원)

2019 년 국가평생교육진흥원
컴퓨터공학전공 학사 졸업
2025 년 호남대학교 대학원
컴퓨터공학과 석사 졸업
2025 년 호남대학교 대학원
컴퓨터공학과 박사 과정

<주관심분야 : 컴퓨터비전, 자연어 처리, 인공지능>



천중훈(정회원)

1988 년 조선대학교 전자공학과 졸업
1990 년 조선대학교 대학원
전자공학과 졸업(공학석사)
1996 년 조선대학교 대학원
전자공학과 졸업(공학박사)
1991년~1994년 (주)맥슨전자
기술연구소 주임연구원

1994년~1997년 (주)현대전자 정보통신연구소
주임연구원

1997년~1999년 (주)한화 통신연구소 책임연구원

1999년~현재 국립목포대학교 항공드론융합전공학과
교수

<주관심분야 : 드론 및 자율자동차, RFID/USN, 위성
통신, 무선통신시스템>



김남호(정회원)

1997년 포항공과대학교 정보통신학과
석사 졸업.
2013년 전남대학교 전산통계학과
박사 졸업
1991년~1997 포스코DX(주) 연구원

1998년~현재 호남대학교 컴퓨터공학과 부교수

<주관심분야 : AI에이전트, 스마트센서응용, 인공지능,
스마트제조>