

자율주행 로봇의 실내·외 주행을 위한 위치 인식 알고리즘 개선

Improvement of Localization Algorithm for Indoor and Outdoor Navigation of Autonomous Robots

조 준 혁¹, 김 봉 상¹, 문 희 창^{2*}

(Joonhyuk Cho¹, Bongsang Kim¹, and Heechang Moon^{2*})

¹Industrial Convergence Interdepartmental Program Autonomous Vehicle·Intelligent Robotics, The Graduate School of Hongik University

²Mechanical & System Design Engineering, Hongik University

Abstract: Location estimation for waypoint-based autonomous driving robots primarily relies on SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) and GNSS (Global Navigation Satellite System) technologies. GNSS performs well in open areas but struggles with signal issues, while SLAM offers high accuracy in feature-rich environments but faces challenges in open spaces. This study integrates SLAM and GNSS, enabling seamless switching between systems when one encounters difficulties. The combined system ensures consistency by aligning coordinate systems and directional data. Experiments in indoor, forest, and open environments demonstrate that the switching algorithm enables stable autonomous driving in diverse conditions, effectively leveraging the strengths of both systems.

Keywords: autonomous mobile robot, localization, SLAM

I. 서론

자율주행 로봇이 다양한 환경에서 안정적으로 운행하려면 정밀한 자기 위치 파악과 경로 추종 기술이 필수적이다. 위치 인식 방법에는 여러 가지가 있지만, 대표적으로 GNSS (Global Navigation Satellite System) 방식과 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 방식으로 구분된다. 그러나 각 시스템은 고유한 한계를 지니고 있다.

GNSS 기반 위치 인식 기술은 기존에 널리 활용되는 방법으로 평야와 같이 개방된 공간의 위치 인식은 효과적이지만, 고층 건물이나 터널과 같은 도심 환경에서는 신호 감쇠나 외란으로 인해 로봇의 위치 정확도가 저하되는 한계가 있다 [1][2]. 반면, SLAM 기반 위치 추정 기술은 특징(landmark)이 풍부한 환경에서는 정밀한 성능을 보이지만, 반복적인 패턴이 있는 터널[3], 특징이 없는 개활지 같은 환경 또는 비정형 환경[4]에서는 센서가 주변의 고유한 특징을 인식하는 데 어려움을 겪어 위치를 정확히 파악하기 어렵다는 한계가 있다.

GNSS 시스템이 가지는 한계를 극복하기 위한 연구는 활발히 진행되고 있다. GNSS와 컴퍼스 센서를 결합한 혼합항법 시스템을 통해 GNSS 신호가 약해지거나 차단되는 상황에서도 컴퍼스 센서의 방향 정보를 활용하여 안정적으로 자율주행을 수행하는 방법을 제안한 연구[5]와 GNSS 신호가 불안정하거나 차단되는 상황에서는 차량 내부에서 제공되는 속도,

조향각, Yaw 데이터를 활용하고, 확장 칼만 필터를 적용하여 차량의 현재 위치를 추정하는 연구 사례가 있다[6]. SLAM 시스템 또한 위치 추정 성능을 높이기 위해 IMU (Inertial Measurement Unit), 그리고 GNSS를 결합하여 더 안정적이고 신뢰성 높은 SLAM 시스템을 구축하여 경로 추종 성능을 높인 연구 사례가 있다[7].

본 연구에서는 단일 시스템의 성능 향상에 집중하기보다는 GNSS 기반 방식[8]과 SLAM 방식을 융합하여 두 시스템을 동시에 운영함으로써 경로점 기반 자율주행 로봇의 위치 추정 안정성과 신뢰도를 높이는 것을 목표로 한다. 시스템 융합을 통해 각각의 시스템이 가진 한계를 상호 보완함으로써 자율주행 로봇이 다양한 환경에서 높은 정밀도와 안정성을 유지하며 경로를 따라가고 위치를 인식할 수 있도록 한다. 이를 위해 SLAM 모듈과 GNSS 모듈 간의 좌표 체계를 일치시키고 기준 방향을 정합하며, 두 시스템 간 데이터 연계를 원활히 수행할 수 있는 변환 기법을 제안한다. 또한, 환경적 요인이나 기술적 한계로 인해 SLAM 또는 GNSS 중 하나의 방식이 정확한 위치 추정을 수행하기 어려운 상황에서도 다른 시스템이 이를 보완하도록 설계한다. 이러한 전환 알고리즘은 두 방식의 장점을 극대화하여 자율주행 로봇이 실내·외 복합 환경에서 더욱 신뢰성 있게 위치를 추정하고 주행 경로를 따라갈 수 있도록 한다.

*Corresponding Author

Manuscript received February 10, 2025; revised March 4, 2025; accepted April 14, 2025

조준혁: 홍익대학교 산업융합협동과정 자율주행·지능로봇전공 석사(wnsgurz@naver.com, ORCID[®] 0009-0002-8981-8935)

김봉상: 홍익대학교 산업융합협동과정 자율주행·지능로봇전공 박사(bongsai@mail.hongik.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-3597-4628)

문희창: 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 부교수(hcmoon@hongik.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-6779-603X)

※ 본 논문은 2024학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 연구된 것임.

II. 시스템 구성 및 통합

1. 자율주행 로봇의 시스템 구성

자율주행 로봇은 다양한 환경에서 운행될 수 있으므로, 주행 플랫폼은 여러 환경적 변화에 대응할 수 있어야 한다. 또한, 자율주행 시스템의 안정적인 주행을 고려하여 다음과 같은 플랫폼을 사용하였다. 플랫폼이 낼 수 있는 최대 속도는 7km/h이다.

자율주행 로봇의 시스템 구성은 그림 2와 같은 구조로 설계되어 있다. 이 시스템은 위치 추정을 담당하는 SLAM 모듈과 GNSS 모듈을 포함하며, 두 모듈은 각각 독립적으로 작동한다. SLAM 컨트롤러는 Ouster OS1-32 라이다와 라이



그림 1. 자율주행 로봇 플랫폼.

Fig. 1. Autonomous driving robot platform.

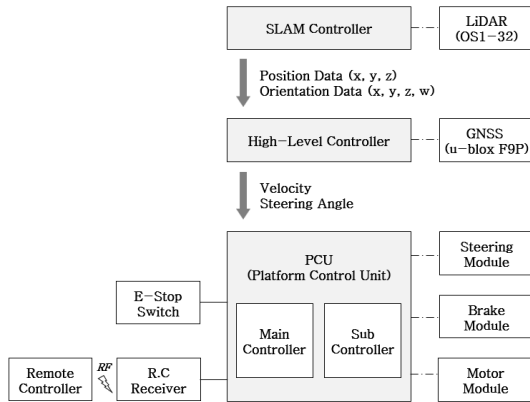


그림 2. 자율주행 로봇의 시스템 구성.

Fig. 2. System configuration of the autonomous driving robot.

표 1. 자율주행로봇 플랫폼 사양.

Table 1. Specifications of the autonomous driving robot platform.

Size	L × W × H : 1,320 × 660 × 1,100mm Ground clearance : 135mm
Weight	250kg (Payload : 200kg)
Steer	Front wheel steer (Ackermann steering type)
Engine	3kW AC Induction motor & AC Inverter
Drive Speed	Max. 7km/h
Driving Mode	Manual mode : Remote control Auto mode : Autonomous driving
Battery	Li-ion battery 48V/90Ah, 4,300Wh 1ea
Sensors	Lidar SLAM Module 1ea GNSS Module 1ea

다에 내장된 IMU 데이터를 활용하여 3D 지도를 생성한다. 이를 기반으로 현재 위치 정보인 (x, y, z) 좌표와 방향 정보인 orientation 값 (x, y, z, w)을 계산한다. 이러한 데이터 처리는 SLAM 컨트롤러 내부에서 이루어지며, 처리된 데이터는 상위 제어기로 전달된다. 상위 제어기는 GNSS 모듈과 연결되어 NMEA 프로토콜을 통해 위도, 경도, 및 헤딩 정보를 받는다. 또한, 이 컨트롤러는 SLAM 모듈의 데이터를 GNSS 데이터 형식에 맞게 변환하여 일치시킨다. 변환된 데이터는 속도와 조향 값을 계산하는 데 사용되며, 이후 플랫폼 컨트롤 유닛으로 전달된다. 이 컨트롤 유닛은 모터와 조향을 제어하여 로봇의 움직임을 구현한다.

2. SLAM의 알고리즘

SLAM 과정은 스캔 데이터의 왜곡 보정으로 시작된다. 로봇 이동 중에 발생하는 스캔 데이터와 실제 환경 간 불일치를 센서 이동을 예측해 수정하며, 곡률을 기준으로 평면상의 특징점과 모서리 점만 추출해 효율성을 높인다. 이후, 현재 프레임과 이전 프레임을 비교해 특징점을 활용한 프레임 매칭으로 로봇의 위치와 회전을 추정한다. 추정된 데이터는 과거 프레임 데이터를 통합하여 지도를 확장하고, 위치 추정에 활용된다. 마지막으로 루프 클로저 단계에서 이전에 지나온 장소를 다시 스캔해 누적된 오차를 보정하고 지도의 정확도를 높인다.

3. SLAM과 GNSS의 좌표계 통합

SLAM 시스템과 GNSS 시스템은 서로 다른 좌표계를 사용하기 때문에, 이 두 시스템을 원활히 전환하려면 좌표계를 통합하는 과정이 필요하다. SLAM 시스템은 위치 추정을 할 때 사용하는 지도를 생성할 때 로봇이 바라보는 각도에 따라 좌표계가 달라지는 반면, GNSS는 고정된 좌표계를 기반으로 절대적인 세계 좌표를 제공한다. 따라서 SLAM의 상대 좌표계를 GNSS의 절대 좌표계로 변환하는 작업이 필수적이다. 본 연구에서 사용된 SLAM 모듈은 GNSS와 연동하여 지도를 생성하면 LAS 형식의 지도 파일을 취득할 수 있다. 이 지도는 센서의 위치를 (0, 0, 0)으로 설정하지만, 좌표계 방향은 GNSS 좌표계를 기준으로 포인트 클라우드 데이터를 표현한다. 반면, 위치 추정을 위해 사용되는 PLY(또는 KDLM) 형식의 지도는 로봇이 지도 생성을 시작할 때의 플랫폼 방향을 기준으로 좌표계를 정의하며, 로봇의 앞쪽을 x축, 왼쪽을 y축으로 설정한다.

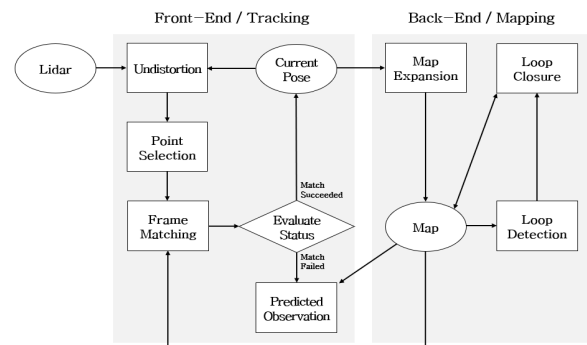


그림 3. 라이다 기반 SLAM의 알고리즘.

Fig. 3. Algorithm of LiDAR-Based SLAM.

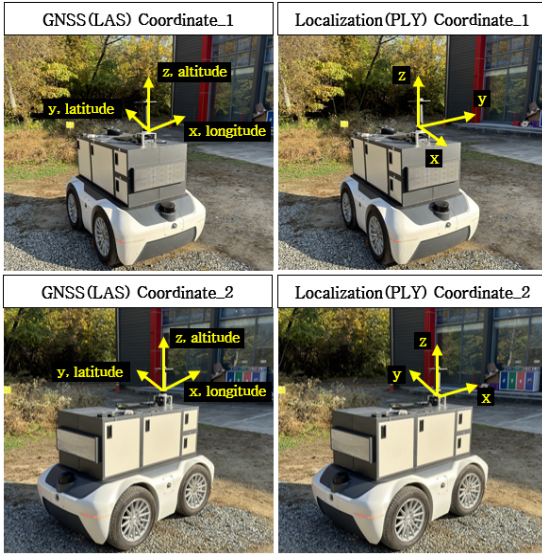


그림 4. LAS와 PLY의 좌표계 예시.

Fig. 4. Example of LAS and PLY coordinate systems.

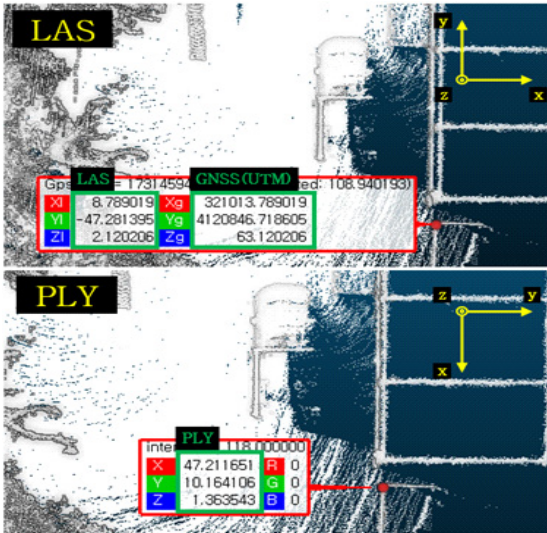


그림 5. LAS와 PLY의 포인트 클라우드 예시.

Fig. 5. Example of point clouds in LAS and PLY formats.

따라서, 특정 지역의 지도를 생성한 후, SLAM에서 생성된 상대적인 좌표계를 GNSS 좌표계와 일치시키기 위해 두 가지 변환 과정을 거쳐야 한다. 먼저, PLY 좌표계를 LAS 좌표계와 맞추기 위해 회전 변환을 수행한다. 그다음, 이렇게 변환된 좌표계를 GNSS 좌표계와 정렬시키기 위해 평행 이동 변환을 적용한다. 이러한 변환 과정을 통해 SLAM과 GNSS 시스템 간의 좌표계를 통합하여 데이터를 일관되게 처리할 수 있다. 본 연구의 로봇이 자율주행을 할 때는 UTM 평면 좌표계를 사용하므로 z축은 고려하지 않는다. LAS와 PLY 지도의 회전 각도를 구하려면, 두 지도에서 동일한 한 점을 기준으로 각 지도의 방향 벡터를 구한 후 이를 이용해 계산한다. θ 는 벡터의 내적, 외적 그리고 atan2 함수를 통해 구할 수 있다. 그다음, 회전 변환과 평행 이동변환을 통해 SLAM의 PLY 좌표계를 UTM 좌표계로 일치 시킨다. 수식으로 나타내면 다음과 같다.

- P: PLY 좌표계 (로봇의 원점 0, 0)
- L: LAS 좌표계 (로봇의 원점 0, 0)
- U: UTM 좌표계 (로봇의 원점 x' , y')

(1) PLY에서 LAS로의 회전 변환

$$H_{LP} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

• θ : PLY 좌표계에서 LAS 좌표계로 변환 시 회전 각도

(2) LAS에서 UTM으로의 평행 이동변환

$$H_{UL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x' \\ 0 & 1 & y' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

최종 변환 행렬은 다음과 같다.

$$H_{UP} = H_{UL} \cdot H_{LP}$$

$$H_{UP} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x' \\ 0 & 1 & y' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_{UP} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x' \\ \sin \theta & \cos \theta & y' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

최종 좌표 변환 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_{utm} \\ y_{utm} \\ 1 \end{bmatrix} = H_{UP} \begin{bmatrix} x_{ply} \\ y_{ply} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{utm} \\ y_{utm} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x' \\ \sin \theta & \cos \theta & y' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{ply} \\ y_{ply} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} x_{utm} &= \cos \theta \cdot x_{ply} - \sin \theta \cdot x' + x' \\ y_{utm} &= \sin \theta \cdot x_{ply} + \cos \theta \cdot y_{ply} + y' \end{aligned} \quad (4)$$

x' 와 y' 값은 Cloud Compare 소프트웨어에서 LAS 파일을 불러오는 과정에서 확인할 수 있다. 위 과정을 통해 SLAM 시스템에서 실시간으로 출력되는 위치 데이터를 UTM 좌표계로 변환하여 출력할 수 있다.

4. SLAM Yaw와 GNSS Heading의 기준 방향 정합

두 시스템을 전환하며 로봇을 제어하려면 시스템 간 방향 기준이 일치해야 한다. 이를 위해 SLAM 모듈에서 출력되는 쿼터니언 형태의 orientation 값 (x, y, z, w)을 기반으로 yaw 값을 계산하고, 이를 GNSS 모듈의 heading 값과 일치시켜야 한다. Yaw 값을 구하는 과정은 식 (5)에 나타나 있으며, 이를 구하기 전에 앞서 orientation의 (x, y, z, w) 값을 다른 좌표축이나 벡터 요소와 구분하기 위해 (q_x, q_y, q_z, q_w)라고 정의하였다.

$$yaw = \text{atan2} \left(\frac{2 \cdot (q_w \cdot q_z + q_x \cdot q_y)}{1 - 2 \cdot (q_y^2 + q_z^2)} \right) \quad (5)$$

Yaw 값을 GNSS의 heading 값과 일치시키기 위해서는 두 값의 증가 방향과 기준을 맞추는 과정이 필요하다. GNSS heading은 0° 에서 시작해 시계방향으로 360° 까지 증가하는

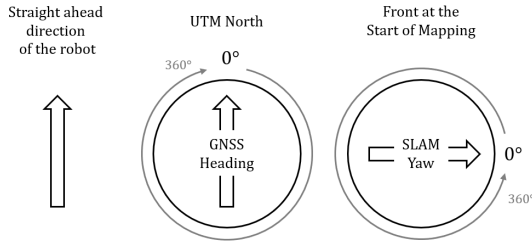


그림 6. GNSS heading과 SLAM yaw의 0° 기준과 방향.
 Fig. 6. The 0° reference and direction for GNSS heading and SLAM yaw.

반면, SLAM yaw는 오른손 좌표계를 사용하여 쿼터니언을 계산하므로 0°를 기준으로 반시계 방향으로 증가한다. 따라서 SLAM의 yaw 값을 GNSS heading과 동일한 증가 방향으로 맞추기 위해 yaw 값의 부호를 반전하여 기준 축의 방향성을 통일하였다. 또한, 두 값의 기준 차이를 보정하는 과정이 필요하다. GNSS heading은 항상 북쪽(UTM y축)을 0°로 측정하지만, SLAM yaw는 초기 지도 생성 시 로봇의 앞쪽을 0°로 설정하는 차이가 존재한다. 이를 보정하기 위해 SLAM의 로컬 좌표계를 GNSS (UTM) 좌표계로 변환할 때 계산된 회전 변환 각도에 90°의 오프셋을 추가하였다. 이는 SLAM 좌표계를 GNSS 좌표계와 정렬하면 SLAM yaw 값이 0°에서 북쪽을 바라보게 되지만, GNSS 기준에서는 SLAM yaw 값이 동쪽(UTM x축)을 가리키기 때문이다. 이러한 변환을 적용함으로써 SLAM yaw 값을 GNSS heading과 일치시킬 수 있었으며, 이를 통해 두 센서 시스템의 데이터를 하나의 조향 알고리즘에서 원활하게 스위칭하여 사용할 수 있도록 하였다.

$$yaw' = -yaw + \theta + 90 \quad (6)$$

5. SLAM과 GNSS의 시스템 우선순위 결정

SLAM 시스템과 GNSS 시스템을 함께 사용할 때, 두 시스템의 조건이 모두 충족되면 어느 시스템을 기반으로 사용할지 결정해야 한다. 본 연구에서의 자율주행로봇은 고속주행을 하지 않으므로 로봇이 정지 상태일 때의 정지 위치오차, 그리고 로봇의 실험 주행 속도인 3.5km/h에서 SLAM과 GNSS의 동적 위치오차를 실험하고 이 결과를 바탕으로 시스템의 우선순위를 결정하였다. 정지 상태에서의 위치오차를 비교하기 위해 자율주행 로봇을 정차시키고, 5분 동안 데이터를 수집하여 SLAM과 GNSS의 위치오차를 분석하였다. GNSS 시스템은 RTK GPS를 기반으로 하였고, 보정신호를 활용해 매우 정확한 위치를 추정하는 상태인 ‘Fixed’ 상태에서 실험하였다. 동적 위치오차는 바닥에 테이프를 붙여서 직선으로 주행하는

표 2. SLAM과 GNSS의 오차.

Table 2. The Error of SLAM and GNSS.

	System	Path Tracking Error	Standard Deviation
Static Position Error	SLAM	0.5cm	0.2cm
	GNSS	13cm	6cm
Dynamic Position Error (3.5km/h)	SLAM	18cm	7cm
	GNSS	22cm	5cm



그림 7. SLAM과 GNSS의 오차 실험 환경.
 Fig. 7. Test Environment for SLAM and GNSS error analysis.

방식으로 측정하였으며, INS (Inertial Navigation System)를 이용해 경로 데이터인 RDDF (Route Data Definition File)를 생성한 뒤 로봇을 3.5km/h로 주행시키며 두 시스템을 각각 평가하였다. 실험의 목적은 로봇이 주행할 때 두 시스템이 데이터 누락 없이 정확한 위치 추정이 이루어지는지 확인하고, 위치오차를 확인하는 것이다.

실험은 그림 7에 나타난 것처럼 나무가 울창한 비정형 숲속 환경에서 진행되었다. 표 2의 결과에서 볼 수 있듯이, 정적 및 동적 위치오차는 일반적으로 알려진 RTK-GPS의 오차 범위(±5cm)에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이는 숲과 같은 환경에서는 GNSS 위성 신호 수신이나 나무나 지형 등의 영향으로 방해를 받아 위치오차가 증가했기 때문으로 판단된다. 동적 위치오차 실험의 경우, 두 시스템 모두 주행에 따른 데이터 누락은 없었으며, 본 연구에서는 측위 정확도 비교자료와 두 시스템의 정지 위치오차와 동적 위치오차를 종합적으로 고려하여 SLAM을 기본 시스템으로 설정하였다.

6. SLAM 시스템 사용조건

SLAM 데이터는 초당 10Hz로 입력되며, 시스템은 로봇이 현재 주변 환경과 기존 지도 데이터를 비교하여 일치한다고 판단하면 데이터를 출력하지만, 일치하지 않는다고 판단하면 데이터를 출력하지 않다가 다시 자신의 위치를 파악하면 데이터를 출력한다. 이러한 시스템 특성 때문에 자율주행 로봇이 위치를 잃어버리는 시점을 예측하는 것이 어렵다. SLAM 시스템이 매우 짧은 시간(0.1초 또는 0.2초) 동안 위치를 잃는 상황이 발생할 수 있다. 그러나 이러한 순간적인 위치 손실이 발생할 때마다 GNSS로 즉시 전환하면, 잦은 시스템 전환으로 인해 경로 추종의 안정성이 저하될 가능성이 있다. 이를 고려하여, SLAM이 위치를 잃더라도 1초 이내에 위치를 다시 추정할 수 있다면 시스템이 정상적으로 작동하도록 설계하였다. 유지 시간을 1초로 설정한 이유는 본 연구에서 자율주행 중 허용 가능한 경로 추종 오차를 1m 이내로 정했기 때문이다. 로봇의 속도를 3.5km/h로 설정했을 때, SLAM 데이터가 1초 동안 갱신되지 않더라도 약 0.98m 이동에 그쳐 허용 오차 범위 내에서 안정성이 확보될 것으로 판단하였다. 또한, SLAM 데이터가 1초 동안 갱신되지 않는 동안, SLAM이 위치 추정을 잃기 전의 마지막 위치를 계속 로봇에 출력하는 방식으로 시스템을 설계하였다. 다만, 이 유지 시간은 로봇의 속도에 따라 조정되어야 하며, 다양한 주행 조건에 맞춰 최적화가 필요하다.

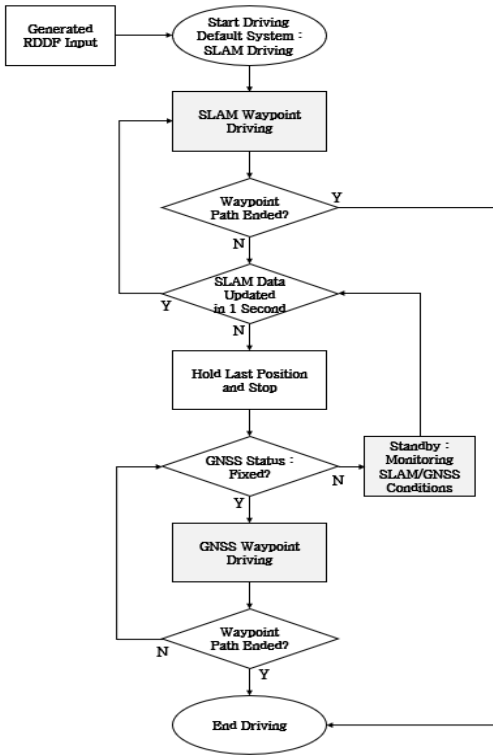


그림 8. SLAM 기반 SLAM-GNSS 전환 알고리즘.
Fig. 8. SLAM-based SLAM-GNSS transition algorithm.

7. GNSS 시스템 사용조건

GNSS 데이터는 초당 10Hz로 입력되며, SLAM 시스템과 달리 신호 상태를 구분할 수 있어 이를 기준으로 사용조건을 판단할 수 있다. 앞서 언급한 것처럼, 허용 가능한 경로 추종 오차를 1m 이내로 설정하였으며, 이전 실험에서 확인한 GNSS 위치오차를 기반으로 GNSS 신호 상태가 Fixed인 경우에만 GNSS 시스템을 사용하도록 설계하였다.

8. 시스템 전환 알고리즘

기본 시스템은 SLAM 기반으로 운용되며, SLAM 시스템이 1초 이상 데이터 갱신을 하지 못할 경우, GNSS 신호 상태를 확인하여 GNSS 시스템으로 전환한다. 이때, SLAM 데이터가 갱신되지 않는 동안에는 마지막으로 확인된 SLAM 위치 데이터를 계속 출력한다. GNSS 신호 상태가 Fixed인 경우에만 GNSS 시스템으로 전환되며, 그 외의 상태에서는 로봇이 주행을 멈추고 두 시스템의 위치 추정 상태가 개선될 때까지 대기한다. 이후, 두 시스템 중 하나라도 상태가 개선되면 해당 시스템을 통해 자율주행을 재개하며, 자율주행을 재개할 때도 SLAM 시스템은 기본 시스템으로서 항상 우선하여 사용된다. 또한, SLAM 시스템 또는 GNSS 시스템으로 주행하는 동안 경로점 도착 여부를 계속해서 확인하여, 도착 시 주행을 종료하고, 도착하지 않았으면 주행을 계속 이어간다.

III. 실험

1. 실험 개요

실험 1과 실험 2는 환경에 따라 SLAM과 GNSS 시스템이 어떻게 작동하는지를 확인하는 실험이다. 다양한 환경에서 로

봇을 직접 조종하며 INS를 활용해 RDDF를 생성한 뒤, SLAM과 GNSS 시스템을 이용해 각각 자율주행을 수행하였다. 이후, INS를 통해 주행 경로 데이터를 수집하고, 각 시스템의 경로 추종 성능과 경로 오차를 비교하였다. 실험 3은 시스템 전환 알고리즘의 성능을 검증하는 실험으로, SLAM과 GNSS가 각각 정상적으로 작동하지 않는 구간을 포함한 환경에서 진행되었다. INS 없이 수동 주행을 통해 RDDF를 생성한 후, 전환 알고리즘을 적용하여 자율주행을 수행하면서 두 시스템 간의 원활한 전환 여부를 평가하였다. 실험에서 자율주행 로봇의 주행 속도는 3.5km/h로 설정하였으며, LAD (Look-Ahead Distance)는 3.5m로 설정하였다.

2. 실험 1. 숲길

약 320m 길이의 숲길로, 나무들로 인해 GNSS 수신 상태가 개활지에 비해 떨어질 수 있는 환경이다. SLAM과 GNSS 두 시스템을 사용하여 경로 추종 자율주행을 수행한 결과, SLAM 시스템은 경로를 따라 길의 정중앙을 정확히 이동했지만, GNSS 시스템은 특정 구간(그림 10의 녹색 화살표)에서 길 가장자리로 치우쳐 운행하는 모습을 보였다. SLAM은 평균오차가 0.13m, 표준편차가 0.14m였고, GNSS는 평균오차가 0.38m, 표준편차가 0.23m였다.

3. 실험 2. 숲길-운동장 순환경로

약 450m 길이의 숲길과 운동장을 지나가는 경로로, 운동장에서는 주변 환경에서 특징점을 찾기 어려워 SLAM의 위치 추정이 어려워질 수 있는 환경이다.

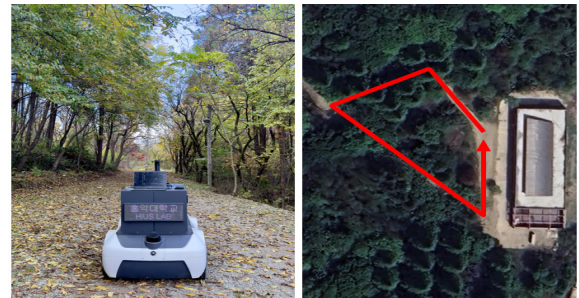


그림 9. 실험 1: 숲길 환경.
Fig. 9. Experiment 1: Forest path environment.

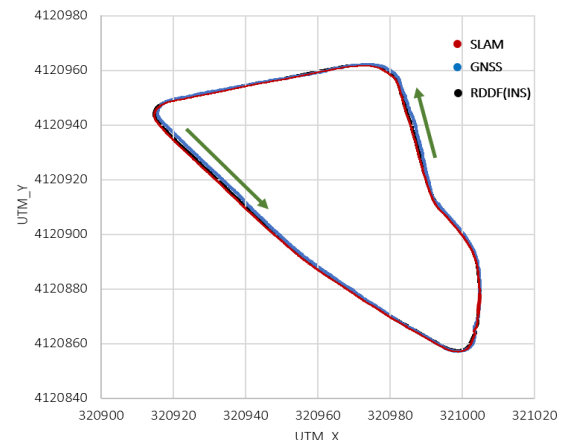


그림 10. 실험 1. 추종 경로 비교(숲길).
Fig. 10. Experiment 1: Tracking paths (Forest path).

SLAM 시스템은 여러 번의 실험에서 경로 추종에 성공하기도 했으나, 실패한 사례도 있었다(그림 13의 녹색 경로). 녹색 추종 경로를 보면, 주황색 화살표의 시작 지점에서 특징점을 인식하지 못해 위치 추정에 실패했으며, 화살표 끝 지점에서 다시 위치를 추정된 뒤 경로 추종을 재개하였다. 반면, GNSS 시스템은 운동장 구간에서도 안정적으로 경로를 추종하였다. 성공 시 SLAM의 평균오차는 0.14m, 표준편차는 0.15m

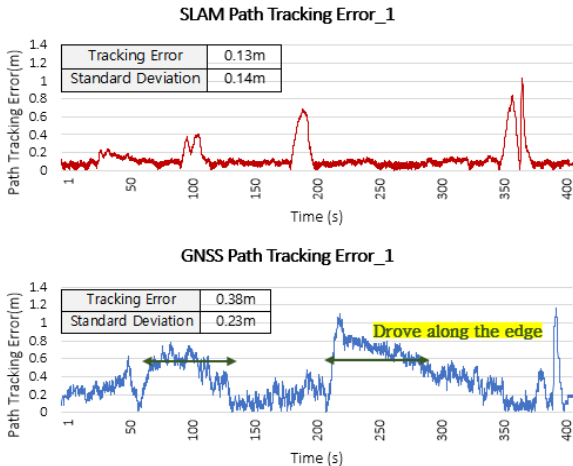


그림 11. 실험 1. SLAM과 GNSS의 경로 오차.
 Fig. 11. Experiment 1: Path tracking error of SLAM and GNSS.



그림 12. 실험 2. 숲길-운동장 순환경로.
 Fig. 12. Experiment 2: Forest-open filed route.

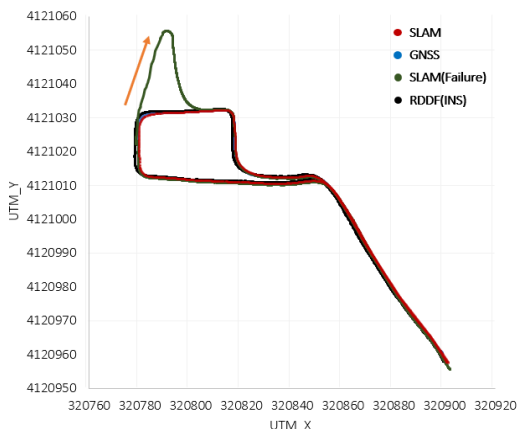


그림 13. 실험 2. 추종 경로 비교(숲길-운동장 순환경로).
 Fig. 13. Experiment 2: Tracking paths (Forest-open filed route).

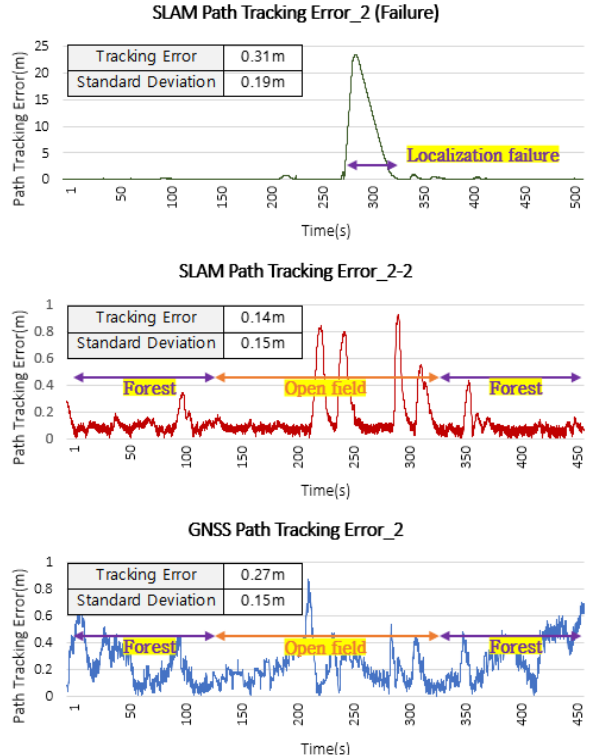


그림 14. 실험 2. SLAM과 GNSS의 경로 오차.
 Fig. 14. Experiment 2: Path tracking error of SLAM and GNSS.

였으며, GNSS의 평균오차는 0.27m, 표준편차는 0.15m로 나타났다. SLAM은 위치를 추정할 수 있으면 추종 오차가 적었지만, 위치 추정에 실패하면 치명적인 결과를 초래할 수 있었다. 반면, GNSS는 SLAM에 비해 경로 추종 오차는 다소 컸지만, 위치 추정에 실패하는 경우는 없었다.

4. 실험 3. 터널-빌딩 숲-운동장-실내

앞선 실험 결과, 숲이나 실내처럼 하늘이 가려진 환경에서는 GNSS 시스템의 경로 추종 성능이 떨어지는 반면, 운동장과 같은 특징점이 없는 넓은 공간에서는 SLAM 시스템이 더 취약하게 작동함을 확인하였다. 이를 바탕으로, GNSS 시스템이 취약한 터널과 실내, 그리고 SLAM 시스템이 어려움을 겪는 운동장을 포함한 경로를 구성하고, 시스템 전환 알고리즘을 적용하여 경로를 추종하는 자율주행 실험을 수행하였다. 실험 장소는 홍익대학교 서울캠퍼스이며, 주행 거리는 약 500m이다.

수동으로 이동하며 취득한 SLAM과 GNSS의 RDDF 데이터를 분석한 결과, GNSS는 터널과 빌딩 숲의 일부 구간에서 위치 정확도가 크게 저하되었으며, 실내에 진입한 이후로는 데이터를 전혀 수신하지 못해 경로 데이터를 획득하는 데 실패했다. 이는 GNSS만으로는 해당 경로에서 경로 추종 자율주행이 불가능함을 의미한다. 반면, SLAM을 활용한 RDDF 데이터는 GNSS와 비교했을 때 모든 구간에서 상대적으로 더 정확한 경로 데이터를 확보할 수 있었다. 따라서 최종적으로 SLAM 기반 RDDF를 활용하여 시스템 전환 알고리즘을 적용한 자율주행 실험을 수행하였다. 실험 결과, 운동장 중심부에서만 GNSS 시스템으로 전환하여 주행했으며, 이를 제외한 모든 구간에서는 SLAM 시스템을 활용한 경로 추종 자율주행이 원활



그림 15. 실험 3. 터널-빌딩 숲-운동장-실내.
Fig. 15. Experiment 3: Tunnel-urban-open field-indoor.

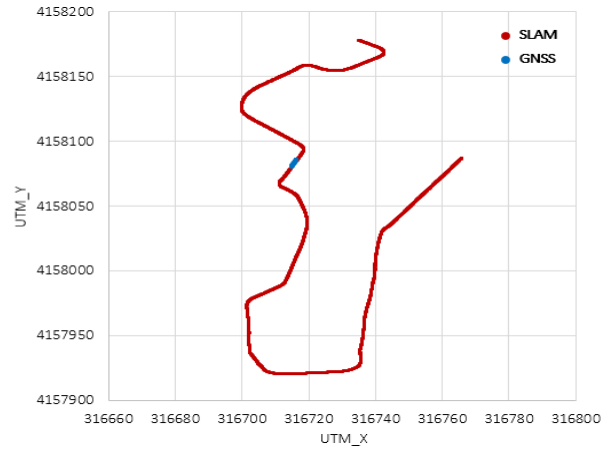


그림 18. 위치 결정 알고리즘에 따른 주행 경로.
Fig. 18. Driving path with localization algorithm.



그림 16. 실험 3. 주행 환경.
Fig. 16. Experiment 3: Driving environment.

IV. 결론

본 연구에서는 자율주행 로봇이 실내·외 복합 환경에서도 안정적으로 주행할 수 있도록, SLAM과 GNSS의 장단점을 상호 보완하는 경로점 기반 주행 알고리즘을 제안하고, 이를 실험을 통해 검증하였다. 이를 위해 SLAM과 GNSS 간의 좌표 및 방향 정보를 통합하는 데이터 변환 기법을 연구하여, 다양한 환경에서 효과적으로 활용할 수 있는 기반을 마련하였다. 실험 결과, SLAM 시스템은 특징점이 부족한 넓은 공간에서 위치 추정 성능이 현저히 저하되었으며, GNSS 시스템은 신호의 약화 및 차단으로 인해 하늘이 가려진 환경에서 성능이 떨어지는 한계를 보였다. 특히 개활지에서는 SLAM의 성능 저하가 치명적인 문제로 작용할 수 있으므로, 향후 연구에서는 이러한 문제를 반영하여 SLAM과 GNSS의 최적 가중치를 설정하는 방안과 시스템 전환 알고리즘의 고도화가 요구된다. 또한, SLAM의 위치 추정이 일시적으로 끊기는 상황만을 기준으로 사용 방식을 결정할 경우, SLAM이 잘못된 위치를 지속해서 추정하는 상황에서는 자율주행 로봇이 잘못된 방향으로 이동할 우려가 있다. 따라서 위치 추정의 끊김뿐만 아니라 GNSS와의 절대 오차를 함께 지속해서 비교하여, SLAM의 위치 추정 오류 여부를 확인할 수 있는 알고리즘을 추가할 필요가 있다. 향후 연구에서는 이러한 부분을 보완함으로써, 다양한 환경에서도 더 안정적이고 신뢰성 높은 자율주행 시스템을 구현할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

[1] B. S. Kim, I. J. Nam, J. K. Ryu, and H. C. Moon, "A comparative study on GPS module and SLAM module for driving stability of waypoint-based autonomous delivery robots," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 59, no. 12, pp. 87-94, Dec 2022.
doi: <https://doi.org/10.5573/ieie.2022.59.12.87>

[2] E. J. Chu and H. I. Son, "Performance evaluation of 3D LiDAR slam for autonomous UAV in GPS-denied orchard," *Proc. of 2024 39th ICROS Annual Conference (ICROS 2024)*,

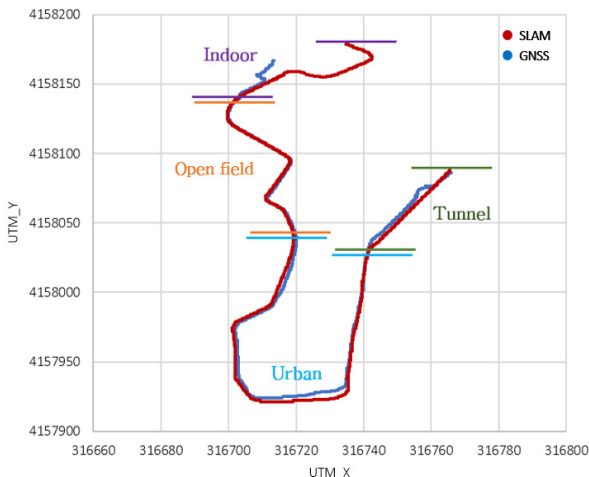


그림 17. SLAM과 GNSS의 RDDF 비교.
Fig. 17. Comparison of RDDF between SLAM and GNSS.

하게 이루어졌음을 확인하였다. 또한, 실내 구간과 실외 구간을 이동하는 데에도 문제가 없음을 확인하였다. 그림 18은 SLAM 기반 RDDF 데이터를 이용하여 시스템 전환 실험을 수행한 결과를 보여준다.

pp. 1062-1063, July 2024.

<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11909226>

- [3] G. S. Park, S. H. Jang, S. H. Jang, and S. H. Yoon, "Design and analysis of the integrated navigation system based on INS/UWB/LiDAR considering tunnel environment," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 47, no. 12, pp. 2147-2155, Dec 2022.
doi: 10.7840/kics.2022.47.12.2147
- [4] K. W. Park and S. Y. Park, "Robot SLAM in unstructured environment using the position of tree landmark," *Proc. of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, Jeju, Korea, pp. 183-184, June 2024.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11905876>
- [5] Y. J. Oh, K. H. Jung, and E. S. Jeon, "Development of autonomous driving system using GPS," *Proc. of the KAIS Fall Conference*, vol. 9, no 12, pp. 695-698, Dec 2009.
<https://koreascience.kr/article/CFKO200914064131773.page>
- [6] H. J. Jo, S. W. Kwak, and J. M. Yang, "Vehicle localization using internal sensors and low-cost GPS for autonomous driving," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 209-214, December 2017.
doi: 10.5391/JKIIS.2017.27.3.209
- [7] H. J. Gil, D. J. Lee, G. H. Song, S. U. Ahn, and A. Y. Kim, "Tightly-coupled GNSS-LiDAR-inertial state estimator for mapping and autonomous driving," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 18, no.1, pp. 72-81, March 2023.
doi: 10.7746/jkros.2023.18.1.072
- [8] J. H. Son, J. W. Baek, Y. H. Shin, and Y. S. Nam, "Development of GNSS waypoint based mobile autonomous driving delivery robot," *Proc. of 2024 39th ICROS Annual Conference (ICROS 2024)*, pp. 929-930, July 2024.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11909165>



조 준혁

2015년 Missouri State University Risk Management & Insurance 졸업. 2025년 홍익대학교 대학원 산업융합협동과정 자율주행·지능로봇전공 석사. 관심분야는 Lidar, Radar, SLAM, 자율주행 로봇.



김 봉 상

2012년 한국기술교육대학교 메카트로닉스학과 졸업. 2019년 홍익대학교 기계공학과 석사. 2024년 홍익대학교 대학원 산업융합협동과정 자율주행·지능로봇전공 박사. 관심분야는 자율주행 모빌리티 시스템 설계, 농업 및 건설용 서비스 로봇.



문 희 창

2001년 선문대학교 기계설계학과/제어계측학과 졸업. 2003년 국민대학교 자동차공학전문대학원 차량전자제어시스템 전공 석사. 2009년 국민대학교 자동차공학 전문대학원 차량전자제어시스템전공 박사. 2017년~현재 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 부교수. 관심분야는 자율주행 모빌리티, 필드 로봇(농업용 로봇 및 드론).