

그리드 맵과 음성 인식을 이용한 실내 안내 로봇

Indoor guided robots using grid maps and voice recognition

채형주* 이정재* 한명규* 안상겸* 원정식* 박성웅* 강태원**

영문저자*(Times New Roman 11크기)

요 약 본 논문에서는 SLAM의 한계를 극복하기 위한 2D 그리드 맵 변환, A* 알고리즘 기반 경로 탐색, LiDAR를 이용한 장애물 회피, 그리고 음성 인식 및 마르코프 체인을 결합한 적응형 상호작용 시스템 개발 과정을 상세하게 기술한다. 'AIMob'은 사용자의 음성 명령을 통해 목표 지점을 인식하고, 그리드 맵 상에서 최적 경로를 탐색하여 자율 주행을 수행하며, 서비스 종료 후 피드백을 수집하여 다음 안내 시 로봇의 행동을 자동으로 최적화한다. 이를 통해 기존 자율주행 방식의 불안정성 문제를 해결하여 안정적인 경로 안내를 제공하고, 사용자와의 상호작용으로 개인화된 경험을 들려줄 수 있다. 결과적으로 이 시스템은 단순 길 안내를 넘어 사용자와 능동적으로 소통하며 스스로를 개선하는 차세대 실내 안내 로봇의 실용성과 사용자 경험을 높이는 데 기여할 수 있다.

Abstract This paper describes in detail the process of developing an adaptive interaction system that combines 2D grid map conversion, A* algorithm-based path search, obstacle avoidance using LiDAR, and voice recognition and Markov chain to overcome the limitations of SLAM. 'AIMob' recognizes the target point through the user's voice command, searches for the optimal path on the grid map to perform autonomous driving, collects feedback after the service is terminated, and automatically optimizes the robot's behavior during the next guidance. Through this, it can solve the instability problem of the existing autonomous driving method to provide stable route guidance and to provide personalized experiences through interaction with users. As a result, this system can contribute to enhancing the practicality and user experience of the next generation indoor guide robot that actively communicates with users and improves itself beyond simple road guidance.

Key Words : ROS, Grid map, HRI, Markov Chain, Voice Recognition, A* algorithm, SLAM, LiDAR

* 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 대학원(예)

**강릉원주대학교 컴퓨터공학과 지도교수(예)

접수일: , 수정완료일:

게재확정일:

교신 저자 : twkang@gwnu.ac.kr

교신 소속 : 강릉원주대학교 컴퓨터공학과

I. 서론

현대의 병원, 캠퍼스, 박물관, 쇼핑몰, 박물관 등은 넓고 복잡한 공간 구조로 인해 방문객의 자율적 이동이 어렵고, 기존 안내 수단(표지판, 키오스크, 지도 등)으로는 사용자 특성에 따라 비효율적이다.² 또한 기존 로봇들은 실시간 변화를 반영하기 어렵다.³ 특히 고령자, 외국인, 초행 방문객 등에게는 능동적이고 직관적인 안내 시스템이 요구된다.

이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 실시간 사람 추적 기반 자율 안내 로봇이 주목받고 있으며, 최근 로봇공학과 인공지능 기술의 발전으로 사람 인식 및 추적 기술이 상용화 수준에 도달하고 있다. 그러나 기존 연구는 대부분 정해진 경로 기반의 안내에 머무르며, 실시간 상황 대응이나 시각적 피드백 제공, 직관적 사용자 인터페이스에는 한계가 있었다.

본 연구에서 개발한 AIMob 시스템은 2D 그리드 기반 객체 인식 시스템, PyQt5 기반 GUI와 TTS 통합 시스템, ROS 2 기반 통신 구조 및 실시간 처리를 통해 기존 로봇이 제공하지 못한 공간 인식 능력과 피드백 시각화를 동시에 제공하고 ROS, 음성 안내를 통합하여 사용자와의 상호작용성을 향상시키며 모듈화된 구조를 통해 실시간 응답성과 확장성을 보장한다.

이처럼 AIMob은 단순 추적 기능을 넘어, 사람-로봇 간 직관적 상호작용과 실시간 환경 이해를 목표로 하며, 실내 안내 로봇의 진화 방향을 제시하는 사례로서 의미를 가진다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제2장에서는 실내 자율주행 로봇의 이론적 배경과 SLAM, A* 알고리즘 등 주요 선행 연구들을 분석한다. 제3장에서는 초기 접근법이었던 SLAM 기반 시스템의 한계를 기술하고, 이를 극복하기 위해 새롭게 설계한 그리드 기반 시스템의 개념과 핵심 알고리즘을 상세히 설명한다. 제4장에서는 개발된 시스템의 구현 내용과 시뮬레이션 환경에서의 작동 결과를 제시하며 그 성능을 분석한다. 마지막으로 제5장에서는 전체 연구 내용을 요약하고, 본 연구가 갖는 의의와 한계점을 밝히며, 향후 연구 과제를 제안하며 논문을 마무리한다.

II. 배경이론 및 기술

1. 로봇 운영체제(ROS: Robot Operation System)

OS는 로봇 응용 프로그램 개발을 위한 오픈소스 기반의 미들웨어 플랫폼이다. 로봇의 하드웨어 제어, 센서 데이터 처리, 통신 등 다양한 기능을 표준화된 방식으로 제공하여 개발의 복잡성을 낮춘다. 본 연구에서는 ROS2를 기반으로 하여 실시간성과 안정성을 확보한 통신 아키텍처를 구축하였다.

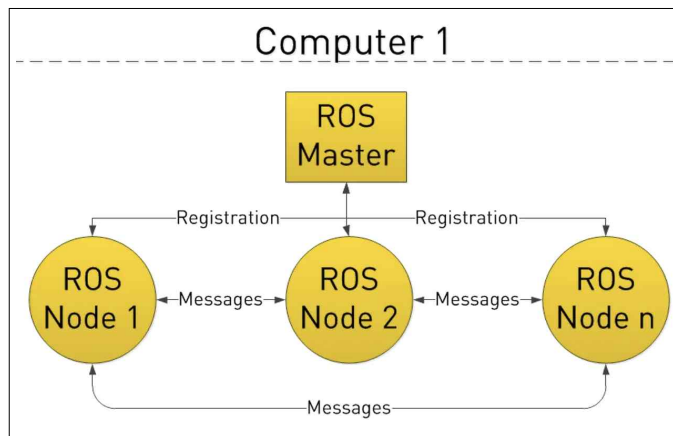


그림 1. ROS 작동 형태

Fig 1. How ROS Works

2. SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)

SLAM은 로봇이 미지의 환경을 탐색하면서 동시에 지도를 작성하고, 그 지도상에서 자신의 위치를 추정하는 기술이다. LiDAR나 카메라와 같은 센서를 통해 주변 환경 정보를 수집하고, 이를 바탕으로 점유 격자 지도(Occupancy Grid Map) 등을 생성한다. SLAM은 완전 자율주행의 핵심 기술이지만, 대규모 맵 생성 시 높은 연산 비용을 요구하며, 센서 오류 누적이나 환경 변화에 따라 맵 데이터의 일관성이 저하되는 등 안정성 측면에서 한계를 가질 수 있다.

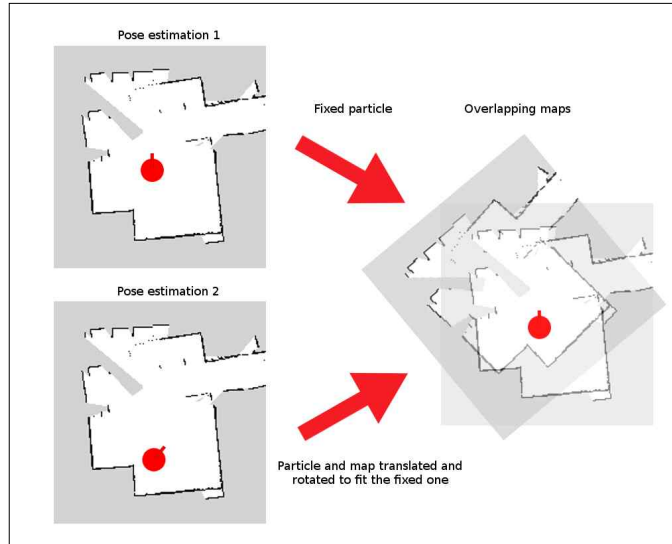


그림 2. 격자 지도

Fig 2. Occupancy Grid Map

3. A* 알고리즘

A* 알고리즘은 그래프 탐색 기법 중 하나로, 출발지부터 목적지까지의 최적 경로를 효율적으로 찾아내는 데 널리 사용된다. A*는 현재까지의 실제 이동 비용($g(n)$)과 목적지까지의 추정 비용($h(n)$)의 합, 즉 평가 함수 $f(n) = g(n) + h(n)$ 이 가장 작은 노드를 우선적으로 탐색한다. 본 연구에서는 추정 비용을 계산하는 휴리스틱 함수로 두 지점 간의 가로, 세로 이동 거리의 합을 계산하는 맨해튼 거리(Manhattan distance)를 사용하여 계산 효율성을 높였다.

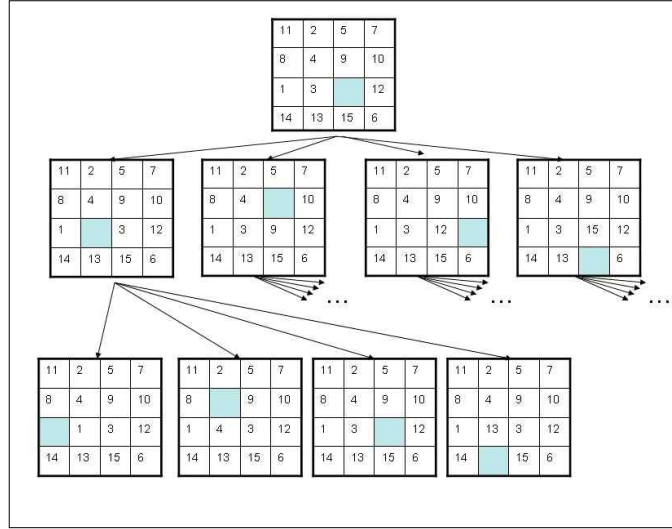


그림 3. 8-Puzzle 문제를 이용한 A* Algorithm

Fig 3. A* Algorithm Using 8-Puzzle Problem

4. 음성 인식 및 합성

음성 기반 상호작용은 사용자가 로봇과 직관적으로 소통할 수 있게 하는 핵심 기술이다. 음성 인식(STT: Speech-to-Text)은 사용자의 음성 명령을 텍스트로 변환하는 기술이며, 음성 합성(TTS: Text-to-Speech)은 로봇이 텍스트 정보를 음성으로 변환하여 사용자에게 전달하는 기술이다.

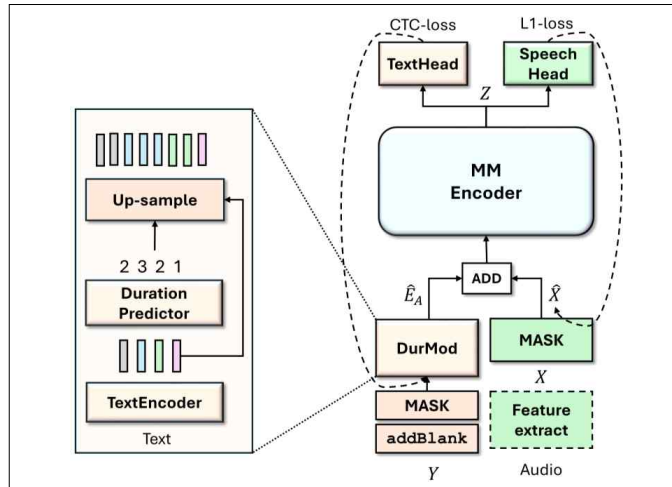


그림 4. 사용자와 로봇 간의 음성 인식(STT) 및 음성 합성(TTS)을 통한 상호작용

Fig 4. Interaction between users and robots with speech recognition (STT) and speech synthesis (TTS)

5. 마르코프 체인(Markov Chain)

마르코프 체인은 어떤 상태에서 다음 상태로의 전이 확률이 오직 현재 상태에만 의존하는 확률 모델이다. 즉, 과거의 이력과 무관하게 현재 상태만으로 미래를 예측할 수 있는 '마르코프 속성'을 갖는다. 본 연구에서는 이 모델을 사용하여 사용자의 피드백을 현재 상태로 정의하고, 다음 상호작용에서 긍정적인 경험을 제공할 확률이 가장 높은 다음 상태(로봇의 행동 파라미터)로 전이하는 적응형 시스템을 설계하는 데 활용하였다.

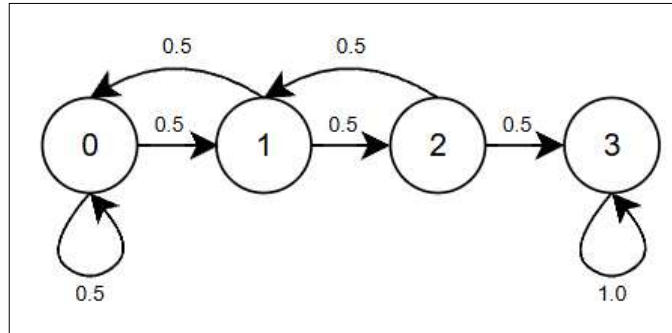


그림 5. 마르코프 체인 모델의 상태 전이 예시

Fig 5. Example of state transition in Markov chain model

III. 시스템 설계 및 구현

1. 초기 시스템 설계

본 연구의 초기 목표는 SerBot 로봇 플랫폼을 활용하여 지정된 목적지까지 사용자를 안내하는 완전 자율주행 로봇을 개발하는 것이었다. 초기 시스템의 개발 환경은 ROS2(Robot Operating System 2)를 기반으로 구축하였으며, 안정적인 원격 제어 및 테스트를 위해 원격 데스크톱 환경을 구성하였다. 로봇의 하드웨어 제어는 제조사에서 제공하는 공식 Python API를 활용하여 구현하였으며, 이를 통해 로봇의 기본 구동과 센서 데이터 수신 기능을 확보하였다.

2. 맵핑 및 내비게이션 구현의 기술적 한계

자율주행의 핵심 기능인 환경 맵(Map) 생성을 위해 Hector SLAM 및 rplidar 센서를 이용한 실내 환경 맵핑을 시도했다. SLAM 알고리즘을 통해 로봇이 주변 환경을 인식하고 지도를 구축한 후, 이를 기반으로 ROS 내비게이션 스택의 AMCL(Adaptive Monte Carlo Localization), move_base 등을 활용하여 목표 지점까지 스스로 경로를 탐색하고 장애물을 회피하는 기능을 구현하고자 하였다.

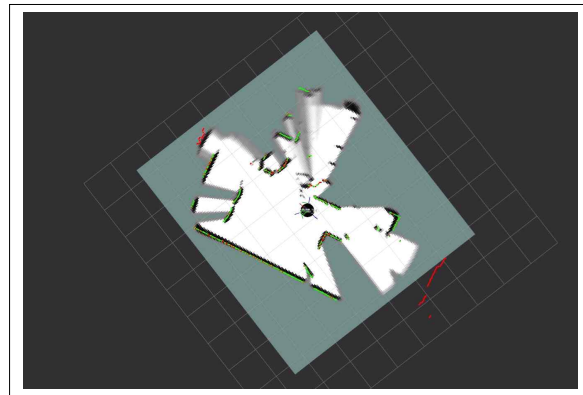


그림 6. SLAM 알고리즘을 이용한 실내 환경 맵핑 결과

Fig 6. Interior Environment Mapping Results Using SLAM Algorithm

하지만 이 과정에서 심각한 기술적 난관에 봉착했다. 주요 문제점으로는 일정 규모 이상의 맵에 대한 저장 실패 및 로드 오류가 지속적으로 발생했으며, 생성된 맵 데이터의 지속성이 부재하는 문제가 있었다. 이러한 현상은 제한된 온보드 시스템의 컴퓨팅 자원과 ROS 환경의 불안정성에 기인한 것으로 분석되었다. 선행되어야 할 맵핑 기능이 안정적으로 구현되지 않으면서, 이를 기반으로 하는 내비게이션 시스템 구축은 원천적으로 불가능했다.

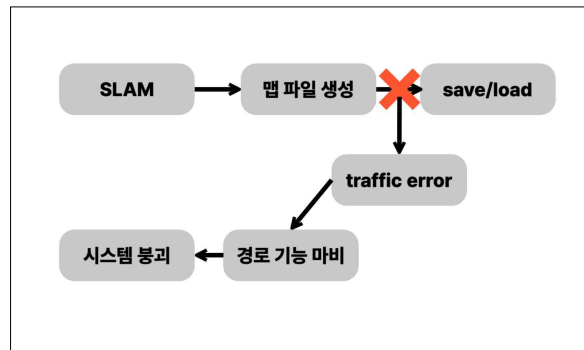


그림 7. SLAM 맵 데이터의 저장/로드 실패로 인한 시스템 오류 발생 과정

Fig 7. System error due to SLAM map data storage/load failure

3. 연구 방향 전환의 배경 및 설계 목표

초기 SLAM 기반 접근법의 근본적인 한계를 인지한 후, 팀 내부 논의를 통해 프로젝트의 방향을 전략적으로 전환하였다. 새로운 설계 목표는 SLAM의 불안정성과 높은 연산 비용 문제를 해결하고, 제한된 자원 내에서도 안정적인 경로 안내와 풍부한 사용자 상호작용을 제공하는 경량화된 시스템을 개발하는 것으로 재정의되었다.

4. 제안 시스템의 전체 아키텍처

제안하는 시스템은 환경 인식 모듈, 핵심 알고리즘 모듈, 상호작용 모듈의 세 가지 주요 부분으로 구성된다. 사용자의 음성 명령은 상호작용 모듈을 통해 입력되고, 환경 인식 모듈의 그리드 맵 정보를 바탕으로 핵심 알고리즘 모듈이 경로를 계획하고 주행을 제어한다. 주행 중 수집된 피드백은 다시 상호작용 모듈에 전달되어 다음 행동을 최적화하는 순환 구조를 가진다.

5. 환경 인식 모듈: 그리드 맵 생성 및 구조물 인식

본 시스템은 복잡한 현실 세계를 이산적인 2D 그리드 맵으로 추상화하는 접근법을 채택한다. 여기서 ‘객체’란 카메라로 식별하는 사물이 아닌, 사전 정의된 맵 내의 고정된 구조물(방, 복도, 벽 등)을 의미한다. 각 그리드 셀은 ‘점유’ 또는 ‘비점유’ 상태 값을 가지며, 이를 통해 로봇은 전체 환경을 단순화된 데이터 구조로 인식하고 경로 계획의 연산 복잡도를 획기적으로 낮춘다.

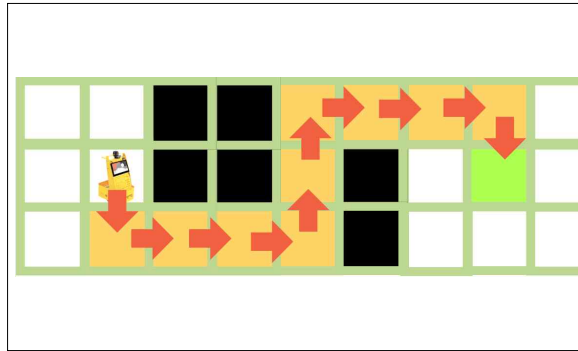


그림 8. 그리드 맵 환경에서의 경로 탐색 예시

Fig 8. Example of Route Discovery in a Grid Map Environment

6. 경로 탐색 및 장애물 회피 알고리즘 구현

경로 탐색은 그리드 맵 상에서 출발지부터 목적지까지의 최적 경로를 찾기 위해 A* 알고리즘을 적용하였다. A* 알고리즘은 평가 함수 $f(n) = g(n) + h(n)$ 이 가장 작은 노드를 우선적으로 탐색하며, 이때 추정 비용($h(n)$)을 계산하는 휴리스틱 함수로는 맨해튼 거리(Manhattan distance)를 사용하였다. 한편, 경로 주행 중 미탐지 장애물에 대응하기 위해 LiDAR 센서 데이터를 활용한 반응형 회피 로직을 구현하였다. 이 로직은 로봇 전방 50cm 이내의 객체를 ‘장애물’로 판단하고, 감지 시 즉시 정지한 후 좌우 공간을 비교하여 더 넓은 방향으로 회전하는 단순하고 즉각적인 회피 전략을 수행한다.

7. 사용자 인터페이스 및 지능형 피드백 시스템 구현

사용자와의 상호작용을 위해, 음성 명령 인식과 로봇의 이동 경로를 시각적으로 안내하는 GUI를 Pygame 라이브러리 기반으로 구축하였다. 본 시스템의 가장 독창적인 기여는 수집된 사용자 피드백을 활용하여 시스템의 행동을 동적으로 최적화하는 적응형 HRI 시스템에 있다. 사용자가 남긴 리뷰 데이터는 마르코프 체인(Markov Chain) 모델의 현재 상태로 입력되며, 모델은 다음 상호작용에서 만족도를 높일 확률이 가장 높은 최적의 상태로 전이할 확률을 계산한다. 각 상태는 안내 음성의 톤, 로봇의 이동 속도 등 사전 정의된 파라미터 세트와 매핑되어 있어, 모델의 전이 결과에 따라 다음 서비스 실행 시 로봇의 행동 양식이 자동으로 조절된다.

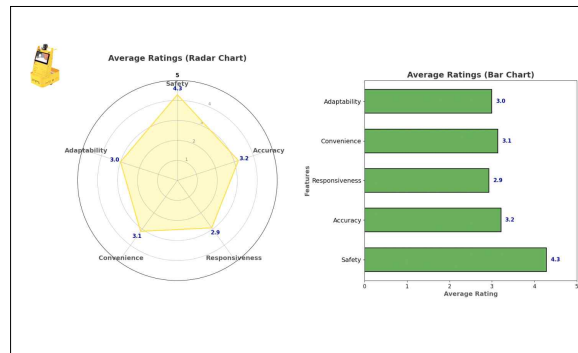


그림 9. 수집된 사용자 피드백의 평균 평점 시각화

Fig 9. Visualize average ratings of collected user feedback

IV. 시스템 구현 결과

1. 실험 환경

제안하는 시스템의 성능 검증은 시뮬레이션 환경을 기반으로 진행되었다. 개발에는 SerBot 로봇 플랫폼의 사양을 기준으로 하였으며, 주된 개발 환경은 ROS2(Foxy)와 Python 3.8을 사용하였다. 사용자 인터페이스 및 시각화는 Pygame 라이브러리를 통해 구현하였고, 모든 테스트는 가상으로 설정된 실내 환경의 2D 그리드 맵에서 수행되었다.

2. 음성 명령 기반 경로 탐색 테스트

사용자가 "301호로 가줘"와 같은 음성 명령을 내리면, 시스템은 목적지 '301호'를 인식하고 그리드 맵 상의 해당 좌표를 목표 지점으로 설정하였다. 이후 A* 알고리즘을 통해 현재 위치에서 목표 지점까지의 최적 경로를 성공적으로 생성하였으며, 로봇은 생성된 경로를 따라 안정적으로 주행함을 확인하였다. GUI 상에서는 계획된 경로와 로봇의 현재 위치가 실시간으로 시각화되어 사용자에게 직관적인 정보를 제공하였다.

3. 실시간 장애물 회피 기능 테스트

로봇이 정상적으로 경로를 주행하는 도중, 전방에 예기치 않은 장애물을 배치하였다. 로봇은 LiDAR 센서를 통해 50cm 이내로 접근한 장애물을 성공적으로 감지하고 즉시 주행을 멈추었다. 이후 좌우 공간을 스캔하여 더 넓은 회피 공간을 확보한 방향으로 회전한 뒤, 새로운 경로를 계획하여 장애물을 우회하는 반응형 회피 전략이 정상적으로 작동함을 확인하였다.

4. 지능형 피드백 시스템 테스트

경로 안내가 종료된 후, 사용자가 "로봇이 너무 느렸어"라는 부정적인 피드백을 리뷰로 남기는 상황을 가정하였다. 시스템은 이 피드백을 마르코프 체인 모델의 입력으로 사용하여, '느린 속도' 상태에서 '보통 속도' 또는 '빠른 속도' 상태로 전이할 확률을 계산하였다. 그 결과, 다음 서비스 실행 시 로봇의 기본 주행 속도 파라미터가 자동으로 상향 조정되어, 사용자의 피드백이 시스템의 다음 행동에 성공적으로 반영됨을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구는 복잡한 실내 환경에서 사용자를 효과적으로 안내하기 위한 지능형 로봇 시스템의 설계 및 구현을 다루었다. 초기 연구에서는 SLAM 기반의 완전 자율주행을 목표로 하였으나, 맵 데이터의 불안정성과 높은 연산 비용 문제로 인해 기술적 한계에 직면하였다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구는 사전 정의된 2D 맵을 이산적인 그리드로 변환하여 안정성과 효율성을 확보한 새로운 시스템을 제안하였다. 제안 시스템은 A* 알고리즘으로 최적 경로를 탐색하고 LiDAR 센서로 장애물을 회피하며, 음성 인식을 통해 사용자와 상호작용한다. 특히, 마르코프 체인 모델을 적용하여 사용자 피드백을 통해 로봇의 행동을 동적으로 최적화하는 적응형 상호작용 기능을 구현하였다. 시뮬레이션 환경에서의 테스트를 통해 제안 시스템이 안정적인 경로 안내와 지능형 상호작용 기능을 성공적으로 수행함을 확인하였다.

본 연구 결과물이 갖는 기술적 의의는 크게 두 가지로 요약할 수 있다.

첫째, 기존 SLAM 방식의 불안정성과 높은 연산 비용 문제를 해결하기 위한 대안으로서 경량화된 2D 그리드 기반 환경 인식 시스템을 제안하고 그 효율성을 입증했다는 점이다. 본 시스템은 복잡한 환경을 이산적인 그리드 맵으로 추상화하여, 제한된 온보드 컴퓨팅 자원 내에서도 안정적인 경로 탐색을 가능하게 했다.

둘째, 정적인 상호작용에서 벗어나 사용자 피드백을 통해 스스로 행동을 개선하는 초기 단계의 적응형 HRI(Human-Robot Interaction) 시스템을 구현했다는 점이다. 마르코프 체인 모델을 적용하여 사용자의 리뷰 데이터를 시스템의 다음 행동 파라미터(음성 톤, 이동 속도 등)에 동적으로 반영하는 순환 학습 구조를 설계했다.

이러한 결과물은 병원, 쇼핑몰, 박물관 등 복잡한 실내 공간에서의 안내 서비스뿐만 아니라, 재난 현장에서의 신속한 상황 인지 등 다양한 분야로 확장 및 응용될 수 있는 잠재력을 가진다.

본 연구는 다음과 같은 명확한 한계점을 가지며, 이를 극복하기 위한 향후 연구 과제를 제안한다.

첫째, 환경 적응력의 한계이다. 현재 시스템은 2D 그리드 맵에 제한되어 있어 3차원 공간이나 비정형 환경에 대한 대응력이 부족하다. 향후 3D 환경 모델링 기술과 통합하여, 완전 자율 주행과 같은 고급 기능을 보완하고 보다 정밀한 공간 인식을 수행하는 연구가 필요하다.

둘째, 상호작용 기능의 한계이다. 현재는 간단한 음성 명령 인식과 피드백 시스템을 갖추고 있지만, 보다 복잡한 대화는 불가능하다. 향후 자연어 처리(NLP) 기반의 질의응답 시스템을 고도화하여 사용자와 로봇이 더욱 자연스럽게 소통할 수 있도록 개선하는 연구가 요구된다.

셋째, 인식 알고리즘의 한계이다. 초기 목표였던 실시간 사람 추적 기능은 복잡한 환경에서의 오인식 문제로 인해 완성되지 못했다. 향후 최신 딥러닝 기반의 객체 탐지 및 추적 알고리즘을 도입하여, 다중 인원 및 동적인 환경에서도 강인한(robust) 인식 성능을 확보하는 연구가 필요하다.

이러한 연구들을 통해 본 시스템의 완성도를 높이고, 실제 사용자 환경에서 더욱 유용하게 활용될 수 있도록 기여할 것이다.

References

- [1] CSE143 Autumn 2004 Project #3 Part B The 15-puzzle game
<http://courses.cs.washington.edu/courses/cse143/04au/projects/project3/partB.html>
- [2] A Non-autoregressive Model for Joint STT and TTS
<https://arxiv.org/pdf/2501.09104>
- [3] Optimized Pathfinding for Autonomous Robots: Enhancing Operational Range and Safety in Varied Terrains
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-96-1687-9_2
- [4] Global and local path planning of robots combining ACO and dynamic window algorithm
<https://www.nature.com/articles/s41598-025-93571-8>
- [5] overlapping occupancy grid maps
<https://robotics.stackexchange.com/questions/83750/overlapping-occupancy-grid-maps>

※ 지원금 표시하는 곳... 해당되는 논문만 표기

저자 소개

- 채형주 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 4학년 재학 중
- 이정재 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 4학년 재학 중
- 한명규 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 4학년 재학 중
- 안상겸 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 4학년 재학 중
- 원정식 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 4학년 재학 중
- 박성웅 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 4학년 재학 중

저자 소개

- 강태원 강릉원주대학교 컴퓨터공학과 교수