

시각-언어 모델을 활용한 사족보행 로봇의 장애물 회피

서명준*, 전찬욱** 이상문***

경북대 물IT융합공학과*, 경북대 전기전자공학부**, 경북대 전자공학부***

Obstacle Avoidance for Quadrupedal Robots Using Vision-Language Models

MyeongJun Seo*, ChanWook Jeon**, Sangmoon Lee***

Department of Water & IT Engineering, Kyungpook University*,

Department Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook University**,

Department Electronic Engineering, Kyungpook University***

Abstract - 사족보행로봇은 뛰어난 주행성과 적응력을 바탕으로 복잡하고 비정형적인 지형을 효과적으로 주행할 수 있다. 그러나 이러한 환경에서 장기적이고 목표 지향적인 작업을 안정적으로 수행하는 것은 여전히 도전적인 과제이다. 본 논문에서는 시각-언어 모델(Vision-Language Model, VLM)의 고차원 추론 능력과 행동유도성(Affordance)을 결합한 인지-행동 통합 프레임워크를 제안한다. 제안하는 프레임워크는 로봇이 환경에서 의미적 정보를 해석하고, 물리적 특성을 반영한 행동 가능성을 추론하며, 이를 바탕으로 복잡한 행동 시퀀스를 동적으로 생성할 수 있도록 한다. 시뮬레이션 실험을 통해, 본 프레임워크가 사전 학습되지 않은 환경에서도 로봇이 복잡한 상황을 이해하고 장기적 작업을 성공적으로 수행할 수 있음을 검증하였다. 실험 결과, VLM 기반 의미 추론과 행동유도성 기반 행동 선택의 융합은 사족보행로봇의 동적 환경 내 적응성과 행동생성을 효과적으로 수행하는 것으로 나타났다. 본 연구는 시각-언어 기반 추론과 물리적 행동유도성의 통합이 실제 환경에서의 자율 로봇 운영에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였으며, 향후 인간-로봇 협업 및 물리적 상호작용 로봇 개발에 새로운 방향성을 제시한다.

1. 서 론

사족보행 로봇(Quadruped Robot)은 위험하거나 접근이 어려운 지역에서 인간을 대신하여 다양한 산업 분야에 활용되고 있다. 예를 들어, 재난 구조나 위험물 탐지와 같은 응용에서는 로봇이 좁은 통로나 불안정한 구조물 사이를 통과해 임무를 수행해야 한다. 이러한 작업은 고도의 기동성, 자율성, 적응성을 요구하며, 이를 만족시키기 위한 다양한 기술적 접근이 이루어지고 있다.

기존의 사족보행 로봇의 제어 방식 중 하나는 궤적 기반 보행 알고리즘으로, 사전에 정의된 루트를 따라 움직이며 주로 평평한 지형에서 안정적인 보행을 보장한다. 특히, 궤적 최적화를 통해 로봇의 pitch/roll 진동을 줄여, 비전 센서나 열화상 센서 등 탑재된 장비의 데이터 품질을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 방식은 본질적으로 지형의 변화나 예상치 못한 장애물에 적응하기 어려우며, 높이 변화가 있는 복잡한 지형에서는 보행 성능이 급격히 저하된다. 대부분의 기존 시스템은 정적 궤적, 제한된 센서 피드백, 사전 학습된 행동 모듈에 의존하고 있어, 새로운 환경이나 돌발 상황에서 의사결정과 적응 행동을 수행하는 데 한계를 가진다 [1].

이러한 문제를 해결하기 위해, 최근에는 VLM을 활용하여 인지-행동 통합 시스템을 구성하는 연구가 활발히 진행되고 있다 [2]. VLM은 시각 정보와 자연어 명령을 통합적으로 처리할 수 있어, 로봇이 사전에 지도가 없는 환경에서도 명령 기반으로 자율 탐색을 수행할 수 있는 잠재력을 지닌다.

그러나 현재까지의 VLM 기반 연구 대부분은 단순한 명령 수행이나 장애물 감지 수준에 그치며, 장애물을 인식하더라도 대체로 물체의 높이를 낮추어 아래를 통과하거나 우회하는 방식에

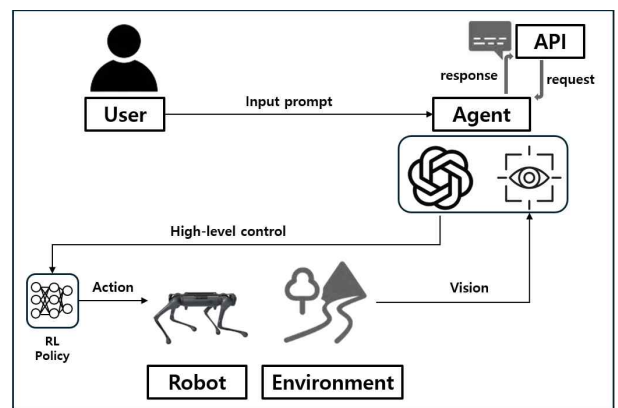
초점이 맞추어져 있다. 환경 변화에 따라 자율적으로 경로를 재설정하거나, 새로운 지형 조건에 적응하는 능동적인 전략은 거의 다뤄지지 않았다.

이러한 접근 방식을 개선하기 위해, 본 연구는 VLM의 사전 학습지식을 활용하여 행동 생성하고 행동 수행하는 구조를 설계하였다. 이를 실증하기 위해 시뮬레이션 환경에 사전 학습되지 않은 환경을 구성하고 로봇이 자율적으로 이동 전략을 생성하고 임무를 수행할 수 있는 능력을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 인지-행동 통합 프레임워크

VLM을 기반으로 한 사족보행로봇의 인지-행동 통합 제어 프레임워크의 동작은 다음과 같다. 사용자가 자연어 명령을 입력하면, 에이전트가 해당 명령을 해석하고, 필요한 경우 다양한 센서 데이터를 함께 분석하여 현재 환경과 상황을 인지한다[3]. VLM은 환경 이해와 명령의 의미를 연결하여 적합한 고수준 행동을 생성하며, 이 행동 의도는 강화학습 정책(PPO 등)에 의해 로봇의 저수준 제어 명령으로 변환된다. 로봇은 이러한 명령을 실행하며 자율적으로 이동하거나 장애물을 회피한다. 또한, 에이전트는 목표에 도달하거나 도움필요 시 사용자의 피드백을 요청하고, 이와 같은 순환 구조를 반복적으로 수행한다. 이러한 방식으로 고차원 의미 추론과 물리적 제어가 결합되어, 복잡한 환경에서의 행동 생성 및 수행을 효과적으로 이루어진다. 그림 1은 이러한 프레임워크의 구조를 보여준다.



〈그림 1〉 인지-행동 통합 프레임워크

2.2 관찰값 구성 및 LangGraphTool

본 연구에서는 VLM 기반의 로봇 제어를 위해 LangGraph 툴을 통합한 제어 시스템을 구현하였다. 이 과정에서 사용되는 관찰값은 정책 수행을 위한 고유감각 정보와 센서 기반 환경 인식 정보로 구성된다.

정책 관찰값 O_t^{policy} 은 베이스 선속도 및 각속도, 로봇 베이스

좌표계 기준 중력 벡터, 속도 명령, 관절 위치 및 속도, 이전 액션으로 구성된다.

에이전트는 환경에 따라 추가적인 센서 관찰값을 추가적으로 사용할 수 있다. 센서 관찰값 o_t^{sensor} 은 RGB 카메라 데이터 $I_{rgb} \in \mathbb{R}^{640 \times 480 \times 3}$, Depth 카메라 데이터 $I_{depth} \in \mathbb{R}^{640 \times 480 \times 1}$ 와 높이 스캐너 $I_{depth} \in \mathbb{R}^{11 \times 17 \times 1}$ 를 통한 지형 정보로 구성된다. 이를 통해 시각적 장면을 해석하고 로봇의 행동 결정에 필요한 환경 정보를 제공한다. 표 1은 LangGraph 툴에 대한 설명이다.

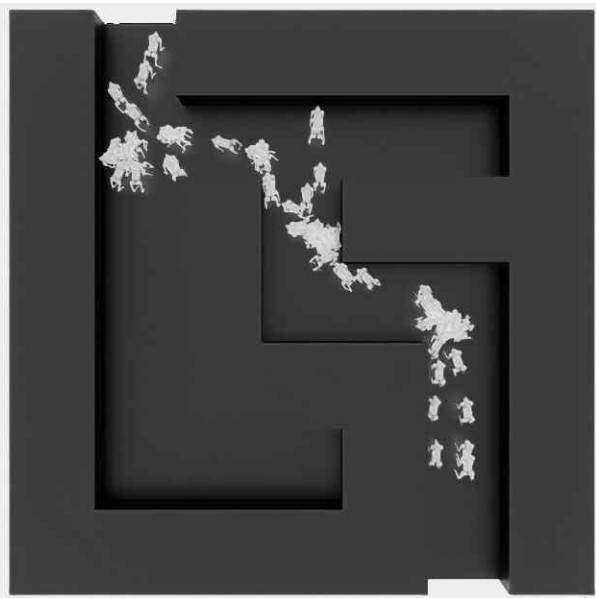
도구(tool) name	Function Description
human_assistance	사람의 도움 요청 및 상호작용
time_travel	상태 히스토리 탐색 및 특정 시점 복원
set_velocity	연속 속도 제어 (vx, vy, wz)
proprioception	로봇 몸체의 위치, 속도, 자세 정보 획득
switch_policy	정책 전환 및 제어 모드 변경
process_rgb	GPT-4.1을 이용한 RGB 카메라 기반 환경 인식
process_depth	GPT-4.1을 이용한 깊이 센서 데이터 기반 환경 인식
asynchronous_timer	비동기식 타이머 호출
asynchronous_timer_expired	비동기식 타이머 만료 시 자동 호출되는 콜백
blocking_timer	블로킹 타이머 호출

〈표 1〉 LangGraph Tools List

2.3 시뮬레이션 환경 및 결과

인지-행동 통합 프레임워크는 LangGraph 기반으로 구현되었으며, 2025년 4월 공개된 GPT-4.1을 사용한다. 실험에 사용된 하드웨어는 인텔 i9-10900x와 Nvidia RTX 3090이다. 시뮬레이터는 IsaacLab을 이용하여 구성하였다. 제안하는 시스템의 유효성을 평가하기 위해 실험은 통로 폭 2m의 5×5 격자형 미로 환경에서 진행되었으며, 총 66분간 연산을 통해 102.7초의 렌더링을 얻었고 609회의 LangGraph 툴호출을 통해 성공적으로 탐색하고 목표위치에 도달한다. 그림 2는 사족보행로봇이 사전학습 없이 미로환경에서 목표위치에 도달하는 궤적이다.

이러한 결과는 제안된 프레임워크가 사전 학습되지 않은 낮은 환경에서도 자연어 기반 고수준 제어를 통해 자율 주행을 안정적으로 수행할 수 있음을 입증하였다.



〈그림 2〉 미로환경에서 로봇의 궤적

3. 결 론

본 연구는 시각-언어 모델과 강화학습을 융합하여, 사족보행 로봇이 시뮬레이션 환경에서 VLM을 활용해 장애물을 회피하는 시스템을 구현하였다. 실험 결과, 상위레벨에서 자연어 명령을 기반으로 행동 생성을 성공적으로 수행할 수 있음을 확인하였으며, 이는 사용자 친화적인 로봇 제어 기술의 새로운 가능성을 제시한다.

하지만, 상위레벨의 행동 생성에 비해 하위레벨의 행동수행이 미흡하여, 일부 시나리오에서 기대한 동작이 제대로 실행되지 않는 한계가 관찰되었다. 이에 따라 향후 연구에서는 하위레벨에서의 정밀한 행동 수행을 보완하기 위해 도구(tool) 체계와 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)을 연계하여, 실시간으로 환경을 인지하고 장애물을 회피하며 불안정한 지형도 자율적으로 탐색할 수 있는 시스템으로 발전시킬 계획이다.

또한 향후연구에서 상위레벨의 자연어 기반 명령과 하위레벨의 센서 기반 실시간 제어 간의 행동충돌을 최소화하고 두 시스템 간의 조화로운 통합에 대한 연구를 통해 인간-로봇 상호작용 분야에서의 실용적 활용에 기여할 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(IITP-2025-RS-2022-00156389, 지역지능화혁신인재양성사업, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2025-RS-2024-00350118, 동적 정보 확산모델을 이용한 생성형 모방학습과 데이터 기반 제어, 50%)

[참 고 문 헌]

- [1] Jumentoro, Emanda, Ali Husein Alasiry, and Hendhi Hermawan, "Stability optimization on quadruped robot using trajectory algorithm", 2017 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), IEEE, 2017
- [2] Tang, Yujin, et al., "Saytap: Language to quadrupedal locomotion", arXiv preprint arXiv:2306.07580, 2023
- [3] Yao, Shunyu, et al., "React: Synergizing reasoning and acting in language models", International Conference on Learning Representations (ICLR), 2023