

시각 정보를 이용한 3DGS 기반 안전 경로 계획

함형찬, 안희진*

한국과학기술원

hyeongchan.ham@kaist.ac.kr, heejin.ahn@kaist.ac.kr

Safe Path Planning using Visual Information on 3D Gaussian Splatting Maps

Hyeongchan Ham, Heejin Ahn*

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

요약

로봇이 임무를 수행하기 위해 위험에 노출되지 않는 안전한 경로를 계획하는 것은 중요한 문제이다. 주어진 환경 표현 지도가 높은 표현력을 가질수록 보다 많은 정보를 이용하여 안전한 경로 계획이 가능하다. 하지만 기존의 방법들은 물리적인 충돌만을 회피하며 물리적인 부피를 가지지 않는 의미론적인 안전은 달성하지 못하는 한계점이 존재한다. 예를 들어 사족보행 로봇은 도로 배수구 틈에 다리가 빠져 위험에 빠질 수 있으며, 이는 물리적 충돌 회피 만으로는 방지할 수 없는 문제이다. 본 연구에서는 3DGS로 표현된 환경 지도에서 시각 정보를 활용하여 부피를 가지지 않는 의미론적 위험을 회피할 수 있는 경로 계획 알고리즘을 제안한다. 이를 검증하기 위해 물리적 위험과 의미론적 위험이 복합적으로 존재하는 시뮬레이션 환경에서 실험을 진행하였으며, 제안하는 방법은 부피를 가지지 않는 의미론적 위험을 회피할 수 있다는 것을 확인하였다.

I. 서론

오늘날 로봇의 활용도는 높아지고 있으며 물리적 환경과 상호작용하며 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 navigation 로봇의 경우 무인 택시, 배달 로봇, 탐사 로봇 등 많은 산업 분야에서 수요가 증가하고 있다. 이러한 navigation 로봇이 동작하기 위해서는 주위 환경을 인식하고, 목적을 달성하기 위한 경로를 계획한 뒤, 경로를 따라 이동할 수 있는 제어 입력을 생성하여 동작하게 된다. 이때 로봇은 목적을 달성할 수 있는 최적의 경로를 계획함과 동시에 물리적 충돌, 손상 등의 위험을 회피할 수 있어야 하며, 경로가 부정확하거나 위험에 노출되는 경우 임무의 실패로 이어지게 된다.

경로 계획은 환경 표현 지도 (environment representation map)와 로봇의 상태, 목표에 대한 상태를 입력으로 받는다. 이때 환경 표현 지도는 point cloud, voxel 등의 방법을 통해 표현될 수 있다. 이러한 환경 표현은 쉽게 생성이 가능하다는 장점이 있지만, 낮은 표현력으로 인해 정보의 손실이 있을 수 있다는 단점이 존재한다. 특히 안전을 고려하기 위한 경우에는 낮은 표현력 문제로 인해 경로가 위험에 노출될 수 있다.

최근 환경을 표현하는 방법으로 radiance field 방법이 주목을 받고 있다. 이미지를 입력으로 받아 새로운 view point를 만들어 낼 수 있는 방법 (novel view synthesis)으로 풍부한 표현력을 가질 수 있다는 장점이 있다. 이러한 방법들 중 기하적인 정보를 explicit하게 가지는 3DGS[1]는 경로 계획을 위한 환경 표현으로 직접적으로 활용될 수 있다. Splat-Nav[2]는 3DGS로 표현된 환경에서 Gaussian ellipsoid와의 충돌을 회피하는 collision measure를 제안하였고, 기하적인 공간을 가지는 장애물의 충돌을 회피할 수 있는 경로 계획 알고리즘을 제안하였다.

하지만 기존의 방법은 환경과의 물리적인 충돌만 회피할 수 있다는 한계점이 존재한다. [그림 1] 왼쪽의 경로 시각화에서 부피를 가지는 장애물(보라색 기둥, 초록색 상자)은 회피가 가능한 반면, 부피가 존재하지 않는 바닥면의 장애물(보라색 원)은 회피하지 못하는 것을 볼 수 있다. 현실에서 안전한 경로를 계획하기 위해서는 배수구, 진흙과 같이 접근해서는 안 되는 영역을

회피해야 하지만 이는 의미론적인 (semantic) 위험으로 간주되어 기하적인 표현으로는 일반적인 바닥면과 구분하기가 어렵다. 따라서 의미론적인 위험을 회피할 수 있는 안전한 경로 계획 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 의미론적인 위험을 회피할 수 있는 시각적 정보 기반의 safe path planning 알고리즘을 제안한다. Radiance field 방식의 환경 표현이 novel view synthesis를 통해 좀 더 풍부한 정보를 표현할 수 있다는 점을 활용하여, 기하적인 정보 뿐만 아니라 시각적 정보를 활용하여 안전 조건을 만족시키는 경로 계획을 진행한다. 이를 통해 부피를 가지는 장애물을 회피하는 것 뿐만 아니라 부피를 가지지 않지만 위험에 노출될 수 있는 장애물 또한 회피가 가능하게 된다. 이를 검증하기 위해 물리적인 부피가 있는 장애물과 물리적인 부피가 없는 위험한 장애물이 복합적으로 존재하는 환경에서 경로 계획의 성능을 비교하였다.

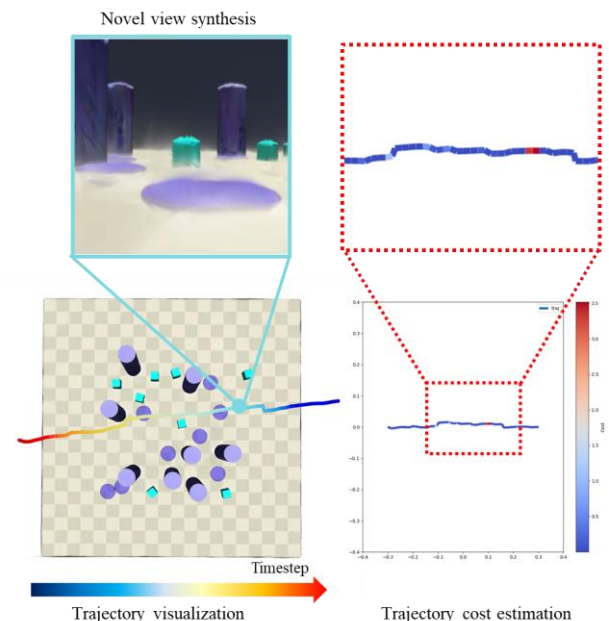


그림 1 기존[2] 경로계획 결과와 위험 비용 시각화

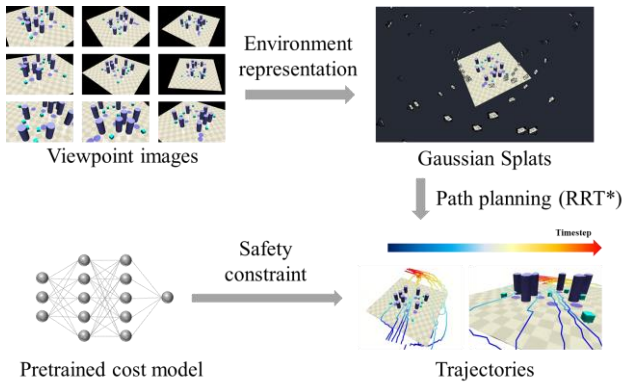


그림 2 제안된 안전 경로계획 알고리즘

II. 본론

본 연구에서 제안하는 안전한 경로 계획 과정은 [그림 2]와 같다. 먼저 주위 환경을 관측하며 이미지 데이터를 수집한다. 충분한 이미지가 수집된 후 3DGS 를 이용하여 Gaussian Splatting map 을 생성한다 [1]. 이와 같이 생성된 환경 표현에서는 수집된 이미지에 존재하지 않는 새로운 viewpoint 에서의 이미지를 생성할 수 있게 된다. 이 과정과 별개로 환경과 상호작용하며 학습된 위험 비용 추정 함수인 cost model 을 확보한다. 이 cost model 은 로봇마다 다르게 학습이 될 수 있으며, safe reinforcement learning 을 통해 학습할 수 있다 [3]. 관측 이미지가 cost model 의 입력으로 들어오게 되면 현재 상태에 대한 위험 비용을 추정하여 출력하게 된다. 이를 통해 [그림 1] 우측 시각화와 같이 경로 계획 상에서 현재 경로 위의 상태가 안전한지 여부를 시각적 정보를 통해 확인할 수 있다. 앞서 확보된 환경 표현인 Gaussian Splatting map 과 cost model 을 활용하여 안전한 경로를 생성한다. 이때 경로 생성 알고리즘은 RRT*를 사용한다 [4]. RRT*는 샘플링 기반의 경로 생성 알고리즘이며 상태 공간에서 임의의 상태를 샘플링한 뒤 환경과의 물리적 충돌 여부를 확인 후 이상이 없을 경우 최단 경로가 되는 상태로 추가한다. 이때 물리적 충돌 뿐만 아니라 시각적 정보를 통한 안전 또한 확보하기 위해 본 연구에서는 cost model 의 출력에 대한 안전 충족 여부 조건을 추가하였다. 샘플링 된 상태가 물리적 충돌이 발생하지 않더라도 cost model 로 추정된 위험 비용이 기준보다 높으면 해당 상태는 위험한 상태로 간주되어 경로로 포함되지 않고 삭제된다. 이러한 과정을 반복하여 안전 조건을 충족하는 상태들로 이루어진 안전한 경로를 생성할 수 있다.

III. 실험 및 결과

제안한 방법을 검증하기 위해 Safety Gymnasium [5] 환경에서 실험을 설계하였다. 경로 계획의 목표는 출발지로부터 안전을 위반하지 않으며 목적지까지 최단거리로 도달하는 경로를 찾아내는 것이다. 환경에는 물리적 부피가 있는 pillar 와, 물리적 부피가 존재하지 않고 지면의 영역으로 표시된 hazard 를 안전 위반을 유발하는 장애물로 설정하였다. 비교하는 방법은 Gaussian Splatting map 에서 기하적인 정보를 이용하여 충돌 회피를 검증하는 기존의 알고리즘을 사용하였으며 [2], 시각적 정보를 이용하여 위험 비용을 추정하기 위한 cost model 은 안전을 고려한 강화학습 모델에서 학습된 모델을 사용하였다 [3].

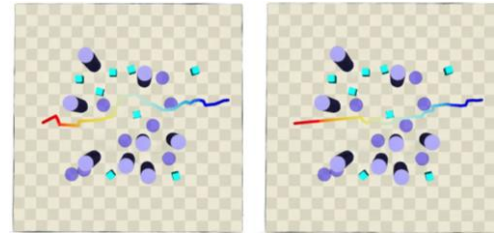


그림 3 안전한 경로 생성 시각화

실험 결과 제안한 방법은 시각적 정보를 통해 안전을 확인하여 부피가 존재하지 않는 hazard 또한 안전하게 회피하였다. [그림 3]에서의 경로 생성 결과와 같이 제안 알고리즘은 기존의 물리적 장애물(pillar)을 회피하는 것뿐만 아니라 기존의 방법으로는 회피할 수 없었던 지면의 hazard 를 회피하는 안전한 경로를 생성하였다. 이를 통해 경로 계획 단계에서 물리적 충돌만을 회피하는 것뿐만 아니라 시각적 정보를 함께 활용하여 의미론적인 안전에 대한 조건을 만족할 수 있게 되었다.

IV. 결론

본 연구는 로봇의 안전한 경로 계획을 위해 Gaussian Splatting map 으로 표현된 환경에서 시각적 정보를 활용한 방법을 제안하였다. 물리적 충돌만을 회피할 수 있는 기존의 방법과 달리, 본 연구는 상태의 시각적 정보와 cost model 을 활용하여 위험 비용을 계산함으로써 부피를 가지지 않는 의미론적인 위험도 회피가 가능하다. 이를 검증하기 위해 물리적 부피를 가진 장애물과 부피를 가지지 않는 장애물이 혼재된 환경에서 실험하였으며, 위험에 노출되지 않고 안전한 경로를 생성할 수 있는 것을 입증하였다. 향후 연구에서는 경로를 안전하게 추종할 수 있도록 로봇의 동역학을 함께 반영한 경로 계획 연구가 진행될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2023-00259991, 50%)과 현대차 정몽구 재단 장학생으로서 지원(50%)을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkühler, T., & Drettakis, G., "3D Gaussian splatting for real-time radiance field rendering," ACM Trans. Graph., 42(4), 2023, 139-1.
- [2] Chen, T., Shorinwa, O., Bruno, J., Swann, A., Yu, J., Zeng, W., ... & Schwager, M., "Splat-nav: Safe real-time robot navigation in gaussian splatting maps," IEEE Trans. Robot., 2024.
- [3] Huang, W., Ji, J., Xia, C., Zhang, B., & Yang, Y., "SafeDreamer: Safe Reinforcement Learning with World Models," In Proc. Int. Conf. Learn. Represent., 2024.
- [4] Karaman, S., & Frazzoli, E., "Sampling-based algorithms for optimal motion planning," Int. J. Robot. Res., 30(7), 2011, 846-894.
- [5] Ji, J., Zhang, B., Zhou, J., Pan, X., Huang, W., Sun, R., ... & Yang, Y., "Safety gymnasium: A unified safe reinforcement learning benchmark," In proc. Adv. Neural Inf. Process. Syst., 36, 2023, 18964-18993.