

샘플링 기반의 자유 공간 추정을 이용한 최적해 모션 플래닝 가속화 알고리즘

김동혁, 윤성의
한국과학기술원, 전산학부

Sampling based free-space approximation for optimal motion planning

Kim Dong-Hyuk, Yoon Sung-Eui

¹Korea Advanced Institute of Science and Technology

School of Computing

e-mail: donghyuk.kim@kaist.ac.kr, sungeui@gmail.com

요 약

최적해의 계산을 위한 샘플링 기반의 모션 플래닝 알고리즘은 RRT*, RRG*, PRM* 가 제안된 이후 이에 기반한 최적해로의 수렴 속도를 높이기 위한 다양한 파생 연구들이 진행되어 왔다. 본 연구에서는 자유 공간 추정을 통해 주어진 공간을 작은 자유 공간의 구(sphere)형태로 근사하여 모션 플래너의 속도를 가속화하는 방안을 연구한다. 이러한 구 집합은 모션 플래닝 알고리즘 내에서 상대적으로 고비용 연산으로 간주되는 충돌 검사 및 샘플링 편중을 위해 활용된다. 본 연구는 제안한 기법의 이론적인 활용, 확장 가능성을 제시하고 이에 대한 분석을 담고자 한다.

1. 서론

1.1 샘플링 기반 모션 플래닝

샘플링 기반의 모션 플래닝 알고리즘은 주어진 기하 공간 상에서 장애물들과 충돌하지 않는 로봇의 구성 상태(Configuration state) 집합 V 와, 이들을 잇는 간선의 집합 E 를 컴포넌트로 갖는 그래프 $G = (V, E)$ 를 생성하는 것이 주요 목적이다[1, 2]. 주어진 문제의 기하 공간이 복잡해지고 차원이 증가함에 따라, 더불어 최적해 계산에 있어서는 이러한 그래프를 제한된 시간 혹은 제한된 개수의 샘플로 효율적인 샘플링 전략을 세우는 것 역시 중요하게 여겨져왔다[3]. 이러한 방식은 샘플링 편중(Sampling bias)으로 분류되며 일반적인 경우 최적해로의 빠른 수렴을 이끌어내는데 효율적인 성능을 보인다. 하지만 기본적으로 샘플링 편중 기법은 파악된 공간에서의 활용(Exploitation)에 집중하면서 반대급부로 탐색(Exploration)을 약화시키는 경향이 있다. 이는 활용과 탐색의 딜레마(Dilemma)로 알려져 있으며, 샘플링을 비롯하여 기계 학습 등 다양한 분야에서 존재해 온 문제이다[4].

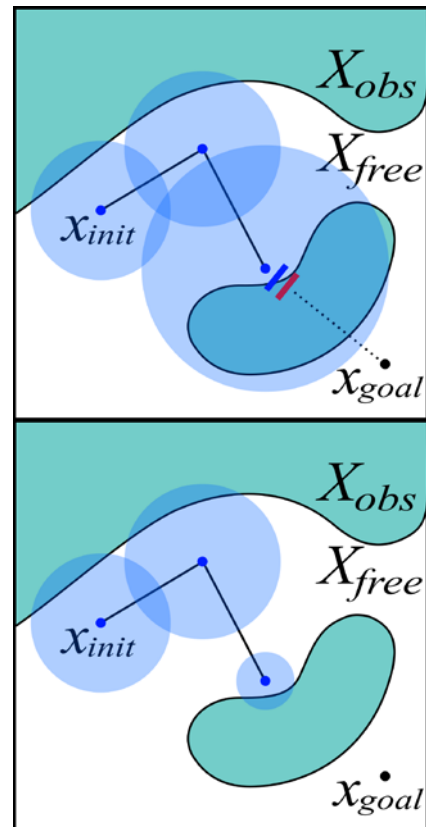
샘플링 전략 외에도 모션 플래닝 알고리즘에서 기본적으로 요구되는 충돌검사, 근접 이웃 탐색(Nearest Neighbor Search) 혹은 기반 자료구조의 성능 개선을 통한 연구 역시 활발히 진행되어 왔다[5]. 이러한 방식은 앞서 언급된 샘플링 편중을 야기하지 않으면서 전체적인 성능 향상을 기대할 수 있는 장점을 갖는다.

본 연구에서는 계산량이 높은 추가 연산을 배제하고 순수한 샘플링과 충돌 검사 과정 자체에서 얻어낼 수 있는 정보를 활용하여 자유 공간을 추정, 이를

통해 충돌 검사 연산의 감소와 샘플링 편중에 대한 이론적인 가능성에 대한 논의를 담고자 한다.

2. 샘플링 기반 자유 공간 추정

2.1 자유 공간 추정에 의한 충돌 검사



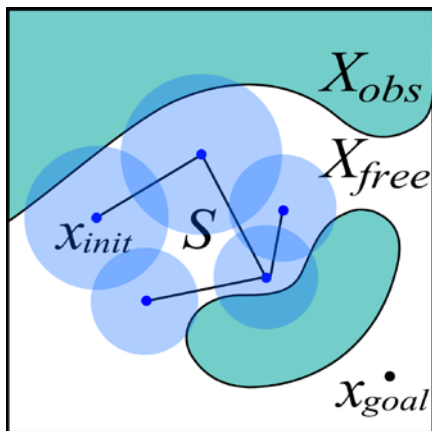
[그림 1] 샘플링을 통한 자유 공간 추정.

충돌 검사 이전(상단) 및 이후(하단)의 예

샘플링을 통해 그래프를 확장해 나가는 과정에서 인접 노드들로의 충돌이 없는 간선을 계산하는 과정에서 많은 계산량이 요구된다. 그림1에서는 주어진 시작 상태 x_{init} 으로부터 목표 상태 x_{goal} 에 이르는 경로를 주어진 구성 공간(Configuration Space) X (장애물 공간 X_{obs} 와 자유 공간 $X_{free} = X \setminus X_{obs}$ 의 합집합) 상에서 경로를 구하는 예가 제시되어 있다. 여기서 각 노드를 뒤덮는 원들은 이 노드를 중심으로 가장 가까운 장애물 공간 까지의 거리 r 을 반지름으로 갖는 근사원을 뜻하며 이 때의 그래프 $G = (V, E)$, V 는 원소 (v, r) 를 갖는다. 반지름 r 은 노드 v 를 샘플링하는 시점에 임의의 초기값으로 지정되어 반복되는 샘플링 과정에서 그림1 상단에서 하단으로 이어지는 충돌 검사 과정을 통해, 점진적으로 실제 장애물 공간 까지의 거리로 수렴하게 된다. 각 노드들이 가지고 있는 추정된 자유 공간은 차후 충돌 검사 시 자유 공간으로 가정하여 충돌 검사를 생략하여 계산량을 감소시키는 방향으로 활용될 수 있다.

하지만 이 경우 불확실한 정보에 의해 실제 충돌을 잡아내지 못 하는 false-negative가 발생할 수 있다. 따라서 이를 위해 Lazy-evaluation을 통해 최종해를 다시 한 번 검토하는 과정이 필요하다.

2.2 자유 공간 추정에 의한 샘플링 편중



[그림 2] 주어진 공간 상에서 추정된 자유 공간 집합(푸른색 투명 원)의 예

추정된 자유 공간의 집합 $S = \{S_i, v_i$ 를 중심으로 r_i 의 반지름으로 표현된 공간}의 합집합 공간은 항상 전체 샘플링 공간 X 보다 작고 충돌이 없을 확률이 점진적으로 높아짐에 따라, 이 공간내에서 샘플링을 시도하는 것은 전체 공간 X 보다 효율적인 결과를 기대할 수 있다. 이를 위해서는 첫째로 S 의 면적 $\mu(S)$ 를 계산해야 하며 이는 포함-배제(inclusion-exclusion) 문제로 귀결된다. 이는 지수 시간(exponential) 복잡도를 갖는 문제로 알려져 있으나 구의 경우 Laguerre-Voronoi Diagram [6]을 통한

다항 시간 해법이 알려져 있다. 효율적인 동적 시간 업데이트 혹은, 다항 시간 근사 해법을 통해 활용(근사 자유 공간 S 에서의 샘플링) 혹은 탐색(전체 공간 X 에서의 샘플링)을 조율함으로써 수렴속도를 증가시킬 수 있는 여지가 존재하며 또한 기존의 계산된 해를 포함한 근사 자유 공간 $S \subset S$ 에 대한 샘플링 편중 방법 또한 수렴 속도를 높이는데 기여할 가능성을 갖는다.

3. 결론

본 고에서는 샘플링만을 통해 주어진 공간상에서 자유 공간을 근사하고 이를 통해 충돌 검사의 계산량 절감과 샘플링 편중을 통한 모션 플래닝 알고리즘의 최적해 수렴 속도 가속화의 이론적 가능성을 제시하였다. 향후 이론적 보완과 구현을 통해 실질적인 성능 비교를 진행을 수행할 계획에 있다.

후기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(UD140022PD).

참고문헌

- [1] LaValle, Steven M. "Rapidly-Exploring Random Trees A New Tool for Path Planning." (1998).
- [2] Kavraki, Lydia E., et al. "Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces." Robotics and Automation, IEEE Transactions on 12.4 (1996): 566-580.
- [3] Lindemann, Stephen R., and Steven M. LaValle. "Current issues in sampling-based motion planning." Robotics Research. The Eleventh International Symposium. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [4] Rickert, Markus, Oliver Brock, and Alois Knoll. "Balancing exploration and exploitation in motion planning." Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on. IEEE, 2008.
- [5] Bialkowski, Joshua, et al. "Efficient collision checking in sampling-based motion planning." Algorithmic Foundations of Robotics X. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 365-380.
- [6] Avis, David, Binay K. Bhattacharya, and Hiroshi Imai. "Computing the volume of the union of spheres." The Visual Computer 3.6 (1988): 323-328.