

Nonholonomic 모바일 로봇의 A* 경로 계획을 위한 벡터장 기반 Heuristic 함수 제안

이광현¹, 유지환¹
¹ 한국기술교육대학교

Vector field-based Heuristic Function for A* Path Planning of Nonholonomic Mobile Robot

Lee Kwang-Hyun¹, Ryu Jee-Hwan¹

¹Korea University of Technology and Education

e-mail: kwanghyun@koreatech.ac.kr, jhryu@koreatech.ac.kr

요 약

모바일 로봇의 경로 계획의 경우 주로 위치로 표현되는 2 차원 공간 상에서 현재 위치에서 목표 위치까지 모바일 로봇이 도달하도록 경로를 계획한다. 그러나 nonholonomic 구조를 가지는 모바일 로봇의 경우 기구학적 제약에 의해 추종 불가능한 경로가 존재하게 된다. 또한 nonholonomic 모바일 로봇은 진행 방향을 포함한 3 차원 공간 상에서의 경로 계획이 이루어져야 한다. 모바일 로봇의 경로 계획 알고리즘으로는 A* 경로 계획 알고리즘이 주로 사용되는데, A* 경로 계획 알고리즘은 경로 계획 시 현재 위치에서부터 노드를 확장시켜 가며 경로를 탐색한다. 이 때 각 노드로부터 목표 위치까지의 비용을 계산하기 위해 heuristic 함수가 사용된다. 기존의 A* 경로 계획 알고리즘의 경우 Euclidean 거리에 기반한 heuristic 함수가 사용되었으나, 이 경우 모바일 로봇의 진행 방향은 고려하지 않아, 로봇이 목표 위치에 도달만 할 뿐 목표 방향으로의 도달은 보장 할 수 없다. 본 논문에서는, A* 경로 계획 알고리즘을 통해 nonholonomic 모바일 로봇이 목표 위치에 목표 방향에 맞추어 도달할 수 있도록 경로 생성이 이루어지는 heuristic 함수를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증한다.

1. 서론

모바일 로봇의 자율주행을 위해 다양한 경로 계획 알고리즘들이 연구 및 적용되고 있다[1],[4]. A* 경로 계획 알고리즘은 그 중 대표적인 경로 계획 알고리즘 중 하나이다. 일반적인 A* 경로 계획 알고리즘은 경로 탐색을 위해 탐색 노드를 확장시켜 나가는데, 이 때 모바일 로봇의 기구학적 구조를 고려하지 않아, nonholonomic 모바일 로봇의 경우 탐색한 경로가 모바일 로봇의 기구학적 제약 때문에 주행할 수 없는 경우가 생긴다. 때문에 일반적인 A* 경로 계획 알고리즘은 nonholonomic 모바일 로봇에 직접 적용하기에는 어려움이 따른다 [5]. 이를 해결하기 위해 예서는 nonholonomic 모바일 로봇의 기구학적 구조를 고려한 노드 확장 방법이 제안되었다 [2]. 그러나 이는 생성된 경로가 모바일 로봇이 추종 가능한 함만을 보장할 뿐, 목표 방향을 만족하지는 못한다. 또한 nonholonomic 모바일 로봇의 경우 로봇의 진행 방향이 존재하며, 로봇의 위치를 나타내는 상태는 진행 방향을 포함하여 (x, y, θ) 3차원으로 표현된다. 대표적으로 ackerman steering model의 차량이나, bicycle model로 표현되는 무인자율주행 자동차등이 이에 해당한다[3]. 이러한 모바일 로봇의 주행 및 주행 환경의 경우 주차 등과 같이 로봇의 진행 방향 또한 매우 중요하다. 때문에 목표 위치뿐만 아니라 목표 방향에 동시에 수렴하도록 하는 경로 계획이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 A* 경로 계획 알고

리즘이 위치와 방향으로 이루어진 (x, y, θ) 3차원 상태 공간에서 경로 계획이 이루어 질 수 있도록 하기 위한 새로운 heuristic 함수를 제안한다.

2. 본론

2.1 Nonholonomic 모바일 로봇을 위한 노드 확장

일반적인 A* 경로계획은 grid cell-based 경로 계획으로서 격자 지도 내에서 이웃한 cell로 노드를 확장시켜 나간다. 그러나 Nonholonomic 모바일 로봇의 경우 기구학적 제한 때문에 로봇이 생성된 경로를 추정할 수 없는 경우가 존재하기 때문에 이러한 기구학적인 제한을 고려한 노드 확장이 이루어져야 한다. Nonholonomic 모바일 로봇을 위한 노드 확장은 모바일 로봇의 최소 회전 반경을 고려하여 [그림 1]과 같이 이루어져야 한다. 이러한 방법으로 탐색이 이루어질 경우, 최종적으로 생성된 경로는 nonholonomic 모바일 로봇이 기구학적으로 추종 가능한 경로가 된다.

2.2 Heuristic 함수

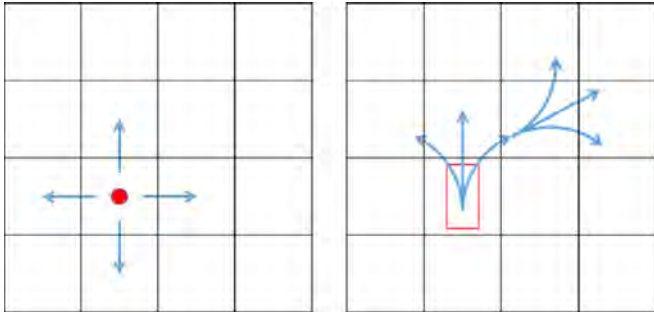
2.2.1 Heuristic 함수

A* 경로 계획에서 heuristic 함수는 현재 노드에서 목표 노드까지의 비용을 나타내는 함수이다. A* 경로 계획 알고리즘은 이동 비용(moving cost)와 heuristic 함수의 값을 통해 경로 비용을 계산하고

탐색을 진행한다. 이 때 경로 비용 C는 식(1)과 같이 계산된다.

$$C = g + h \quad \text{식(1)}$$

이 때 g는 모바일 로봇의 현재 노드에서 현재 탐색 노드까지의 이동 비용(moving cost), h는 heuristic 함수에 의한 현재 탐색 노드에서 목표 노드까지의 예상 비용이다.



[그림 1] Holonomic 모바일 로봇의 노드 확장(좌), nonholonomic 모바일 로봇의 노드 확장(우).

2.2.2 Euclidean 거리 기반 heuristic 함수

A* 경로 계획 알고리즘에서는 일반적으로 현재 노드에서 목표 노드까지의 Euclidean 거리를 비용으로 계산하는 Euclidean 거리 기반 heuristic 함수가 사용된다. Euclidean 거리 기반 heuristic 함수는 식(2)과 같이 정의된다.

$$h_{ed} = \sqrt{(x_g - x_c)^2 + (y_g - y_c)^2} \quad \text{식(2)}$$

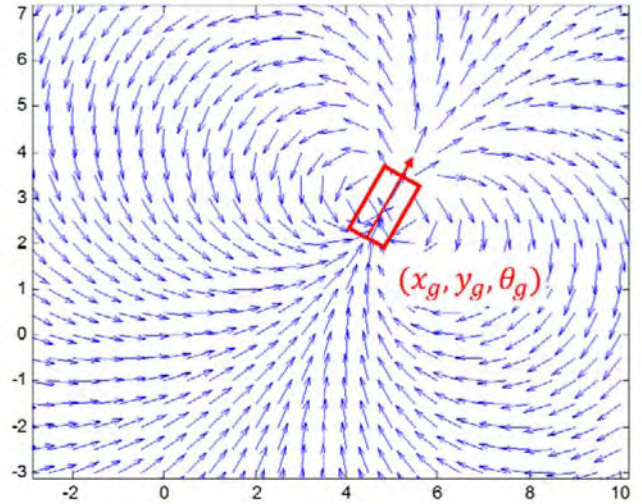
이 때, x_c, y_c 는 현재 탐색 노드, x_g, y_g 는 목표 노드를 나타낸다. Euclidean 거리를 heuristic 함수로 사용하여 경로 비용을 계산할 경우 최단 거리로 목표 노드까지 도달하는 경로를 생성할 수 있으나, nonholonomic 모바일 로봇이 목표 노드에 목표 방향으로 도달함을 보장할 수 없다.

2.2.3 제안된 heuristic 함수

제안된 heuristic 함수는 [그림 2]과 같은 가상의 벡터장에 기반한다. 이 벡터장은 목표 위치에서 목표 방향으로 뻗어져 나와 다시 반대 방향으로 들어가는 형태로 생성된다. 이렇게 생성된 벡터장의 방향을 따라 목표 노드로 접근할 경우 모바일 로봇은 최종적으로 목표 노드에 목표 방향으로 접근하게 된다.

목표 노드가 (x_g, y_g, θ_g) 로 정의될 때, 임의의 탐색 노드 (x, y, θ) 에서 벡터장의 방향 (i, j) 은 식(3)과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_g & -\sin \theta_g \\ \sin \theta_g & \cos \theta_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_r \\ -\frac{x_r^2 - y_r^2}{2x_r} \end{bmatrix} \quad \text{식(3)}$$



[그림 2] 목표 위치 및 방향을 통한 벡터장 생성

이 때 x_r 과 y_r 는 식(4)과 식(5)와 같이 정의된다.

$$x_r = (x - x_g) \cos \theta_g + (y - y_g) \sin \theta_g \quad \text{식(4)}$$

$$y_r = -(x - x_g) \sin \theta_g + (y - y_g) \cos \theta_g \quad \text{식(5)}$$

경로 탐색 중인 현재 노드의 방향과 벡터장의 방향 각 차이는 식(6)과 같으며 이를 경로 비용으로 활용한다.

$$h_{ad} = \theta - \tan^{-1}\left(\frac{j}{i}\right) \quad \text{식(6)}$$

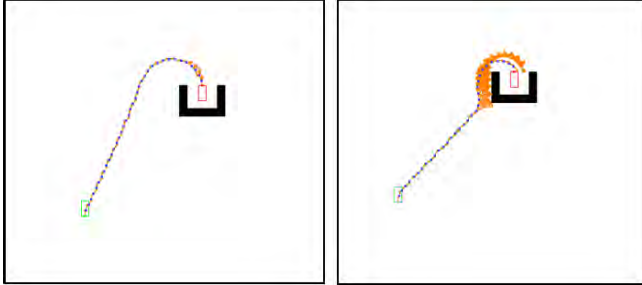
본 논문에서는, 목표 노드에 빠르게 접근하면서 일정 범위 이내에서는 목표 방향을 추종하는 경로를 생성하기 위해 식(2)에서 얻어진 Euclidean 거리 기반 heuristic 함수 결과값 h_{ed} 와 식(6)의 진행 방향 각 차이 기반 heuristic 함수 결과값 h_{ad} 를 적절히 결합하여 경로 계획에 사용하였다.



[그림 3] Euclidean 거리 heuristic 함수 기반(좌), euclidean 거리와 방향각 차이가 결합된 heuristic 함수 기반(우) A* 경로 계획.

2.3 Simulation 결과

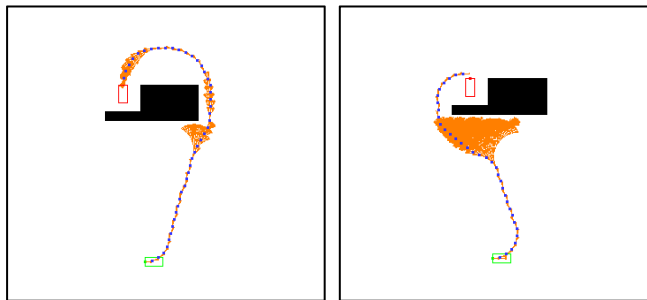
Simulation은 대표적인 nonholonomic 모바일 로봇인 4-wheel의 무인 자율주행차량이 주차를 수행하는 상황을 가정하였다. 또한 기존의 Euclidean 거리 기반 heuristic 함수와, 제안된 heuristic 함수를 각각 적용하여 그 결과를 비교하였다.



[그림 4] Euclidean 거리 heuristic 함수 기반(좌), 제안된 heuristic 함수 기반(우) A* 경로 계획.

	Euclidean 거리 Heuristic 함수	Proposed Heuristic 함수
탐색 노드 확장	2519	137
연산 시간 (s)	0.2848	0.0301
경로 거리 (m)	38.2868	43.0868
목표 방향각 오차 (deg)	63.2178	6.1683

[표 1] Euclidean 거리 heuristic 함수 기반 A* 경로 계획 결과와 제안된 heuristic 함수 기반(우) A* 경로 계획 결과 비교.



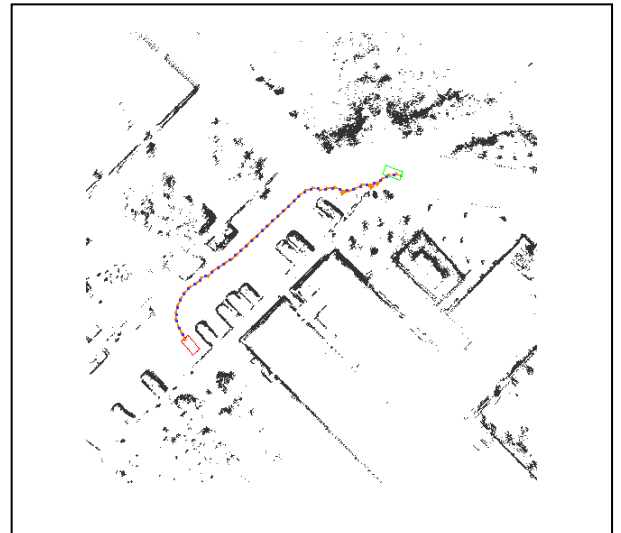
[그림 5] 보다 접근이 어려운 상황에서의 Euclidean 거리 heuristic 함수 기반(좌), 제안된 heuristic 함수 기반(우) A* 경로 계획.

	Euclidean 거리 Heuristic 함수	Proposed Heuristic 함수
탐색 노드 확장	11248	3231
연산 시간 (s)	0.3047	0.266
경로 거리 (m)	39.4616	52.67
목표 방향각 오차 (deg)	106.6832	6.6135

[표 2] Euclidean 거리 heuristic 함수 기반 A* 경로 계획 결과와 제안된 heuristic 함수 기반(우) A* 경로 계획 결과 비교.

[그림 4]와 [표 1]을 통해 simulation 결과를 확인할 수 있다. 목표 방향으로 도달하기 위해 경로의 길이는 길어 졌지만 정의된 threshold 이내에서 목표 방향으로 접근하는 것을 확인할 수 있다. Euclidean 거리 heuristic 함수 기반 A* 경로 계획의 경우 거리를 경로의 비용 함수로 사용함으로써 최종적으로 생성된 경로가 최소 거리 비용을 가지는 경로임을 확인할 수 있으나, 목표 방향과는 무관하게 목표 노드에 도달함 또한 확인할 수 있다. 목표 위치로의 접근이 보다 어렵게 설정된 환경에서 수행된 simulation의 경우에도 [그림 5]과 [표 2]에서 보이는 것과 같이 유사한 결과가 얻어짐을 확인할 수 있다.

추가적으로, 제안된 방법을 실제 주차장에서 얻어진 장애물 지도 상에서 simulation을 진행하였고, [그림 6]과 같이 적절한 주차 경로가 생성됨을 확인하였다.



[그림 6] 주차장에서의 주차 경로 생성 simulation

3. 결론

본 논문에서는 nonholonomic 모바일 로봇의 A* 경로 계획을 위한 heuristic 함수로서, 기존의 euclidean 거리 기반 heuristic 함수가 아닌 가상의 벡터장을 이용하여 벡터장과 모바일 로봇의 방향각 차이를 추가로 고려하는 heuristic 함수를 제안하였다. 이를 통해 A* 경로 계획 알고리즘이 모바일 로봇이 목표 위치에 목표 방향을 만족하며 도달할 수 있도록 하는 경로 계획이 가능하도록 하였다. 또한 Simulation을 통한 실험 결과를 통해 nonholonomic 모바일 로봇에게 요구되는 환경에서 본 논문에서 제안한 방법이 목표 방향에 맞추어 도달하면서 더 효율적인 탐색이 이루어짐을 확인하였다. 본 논문에서

는 전진 주행만을 가정하여 경로 계획을 진행하였으나, 보다 복잡한 환경에서의 경로 생성을 위해 후진 주행을 고려 알고리즘 적용 확장할 필요가 있다.

사사

This paper was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. NRF-2013R1A2A1A03069658).

참고문헌

- [1] S. M. LaValle, Planning Algorithms, Addison-Wesley, 2006.
- [2] D. Dolgov, S. Thrun, M. Montemerlo, J. Diebel, "Practical search techniques in path planning for autonomous driving," Proceedings of the First International Symposium on Search Techniques in Artificial Intelligence and Robotics (STAIR-08), 2008.
- [3] Buehler, M., Iagnemma, K. and Singh, S, "Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part II," Journal of Field Robotics, vol. 25. No. 9, pp.567-724, 2008.
- [4] Ersson, T. and Hu, X, "Path planning and navigation of mobile robots in unknown environments," IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2001.
- [5] J. P. Launmond, S. Sekhavat, F. Lamiroux, Guidelines in Nonholonomic Motion Planning for Mobile Robots, Springer Verlag, 1998.