

골격지도와 동적 계획법을 이용한 전역경로계획 알고리즘

양동훈, 홍석교
아주대학교 전자공학과

Global Path Planning Algorithm Using a Skeleton Map and Dynamic Programming

Dong-Hoon Yang, Suk-Kyo Hong
Department of Electronics Engineering, Ajou University

Abstract - This paper proposes a path-planning algorithm that enables a robot to reach the goal position while avoiding obstacles. The proposed method, which is based on dynamic programming, finds an optimum path to follow using a modified skeleton map method which exploits information on obstacle positions. Simulation results show the feasibility of the proposed method.

1. 서 론

이동로봇의 주된 목적은 출발지로부터 도착점까지 장애물과의 충돌로부터 안전하고 짧은 거리의 경로를 생성하는 것이 그 주된 목표로 주어진다. 경로를 짧게 생성하기 위해서는 장애물과 가까운 곳에 경로가 생성되어야 하므로 충돌로부터 안전한 경로라고 말할 수 없다. 따라서 장애물과의 일정한 거리를 확보하는 것은 경로계획과정에서 필수적으로 만족되어야 할 제약조건으로 주어져야 할 것이다. 이 제약조건 하에서 짧은 거리의 경로를 만들어낼 수 있는가가 경로계획 알고리즘의 성능을 평가할 수 있는 기준으로 삼을 수 있다. 짧은 거리의 경로의 의미는 짧은 시간동안 목표점에 도달하는 것이라 할 수 있으므로 경로의 방향전환 횟수도 중요한 요소로 작용한다고 볼 수 있다. 또한 경로계획 알고리즘에 따라 지역최소에 빠지는 경우가 생길 수 있는데, 이를 얼마나 빨리 극복할 수 있는가 또는 아예 지역최소가 생기지 않게 할 수 있는가도 중요한 성능평가의 기준이 될 수 있다.

기존의 많은 연구들로부터 이러한 안전과 경로의 거리의 기준에 따라 다양한 성능을 갖는 알고리즘들이 개발되어 왔다. Potential Field방법[1]은 간단하고 쉽게 응용이 가능하여 연구되고 있으나, 지역최소 문제[2]가 항상 문제로 대두되어 그 해결방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[3][4]. [5]에서는 충돌로부터 안전한 노드의 시야를 이용하여 Visibility Roadmap을 생성한 후 경로를 만들어 내는 방법이 제안되었다. 지도를 세로로 나누어 장애물과 세로선으로 구성된 사다리꼴로 이루어진 영역들로 표현하여 이 세로선들의 중점을 이어 경로를 만들어내는 방법도 제안되었다[6]. 또한, 장애물과 가장 멀리 떨어져 충돌로부터 안전한 지점들을 이어서 만든 Voronoi 다이어그램을 이용하여 최단거리의 경로를 계획하기보다는 안전성을 중시한 경로를 계획하는 방법도 제안되었다[7]. 격자로 나눈 지도에서 Voronoi 다이어그램의 생성원리인 Skeleton을 생성하여 이로부터 포텐셜 지도를 만든 후 이를 이용하여 주행하는 방법이 제안되었다[8]. 적은 연산을 위해 환경을 격자 등을 이용하여 표현화하는 방법이 많이 이용되고 있는데, 표현화된 환경에서 Depth-first search, Breadth-first search, Best-first search, A* search, Bi-directional search 등을 이용하여 경로를 찾아내는 방법 등이 제안되었다[9]. 또한 충돌로부터 안전한 거리 조건하에서 최적경로를 찾

는 방법으로 동적계획법을 이용한 방법도 연구되었다[10].

이 논문은 다음과 같이 구성되었다. 먼저 이 논문에서 이용된 골격지도와 이를 이용한 노드 생성원리를 설명하고, 2장에서는 동적계획법을 적용하기 위한 노드간의 비용을 구한다. 3장에서는 동적계획법을 이용하여 경로를 생성하고, 4장에서 시뮬레이션을 통해 만들어진 경로와 그 경로를 따라 주행하는 이동로봇의 궤적을 살펴볼 것이다.

2. 골격지도와 노드(Node)

본 논문에서는 기존의 골격지도를 따라 주행하는 방식 [2]과는 다르게 이 골격지도로부터 주행에 필요한 노드들을 생성하여 이를 따라 주행하는 방식을 제안한다.

PRM방법[11] 또는 Visibility Graph방법과는 다르게 골격지도 상에 노드를 생성하므로 장애물과의 충돌로부터 안전하면서도 로봇이 따라 주행하기 편하도록 연속적인 형태의 경로를 찾을 수 있다.

J. Barraquand[8]등이 제안한 골격생성 알고리즘이 그림 1에 정리되어 있다. 이 알고리즘에서는 골격이 주변 장애물과의 거리가 설정거리 α 보다 클 경우에 생성된다. α 는 로봇의 크기를 고려하여 결정된다. 이 논문에서는 이 골격 생성 알고리즘에서 골격 생성조건을 L^1 거리(Manhattan distance)가 아닌 L^2 거리(Euclidean distance)를 이용하여 판단하였다. L^2 거리가 로봇의 충돌가능성을 판단하는데 있어서 보다 유용하게 쓰일 것이다.

이 알고리즘에서 환경은 Shukharev 격자를 이용하여 표현된다. 보다 세밀한 환경의 표현을 위해 격자의 간격을 줄이면 골격을 표현하기 위한 정보의 양이 커지게 된다. 이는 다시 경로 정보의 양에도 영향을 준다. 또한 생성된 골격지도 상에 생성된 경로를 주행 알고리즘을 이용하여 주행할 경우 이동로봇의 경로 추종알고리즘 또는 주행 성능에 따라 불필요한 Yaw동작이 포함될 수 있다. 이 경우 불안정한 주행을 할 수도 있다. 이 문제를 해결하기 위해 격자단위의 경로를 이용하지 않고 환경 상의 주요 지점을 노드로 이용할 수 있다. 이는 로봇이 안전한 주행을 할 수 있도록 하고 경로 정보의 양도 또한 줄일 수 있다. 하지만 노드를 줄이기는 하되 경로는 충돌로부터 안전해야 하므로 노드 간의 연결선이 장애물과 만나서는 안 된다. 따라서 골격지도상에서 서로 연결 시 충돌이 발생하지 않는 주요 노드들을 생성하고 이를 이용하여 주행을 하는 방법을 제안한다. 이 방법으로 경로의 정보량이 감소하고 안전한 주행제어를 할 수 있다.

골격지도는 여러 골격성분들이 이어져 전체 골격을 이루는데, 이 이어진 골격성분들을 골격선이라고 하자. 여러 골격선들은 한 지점에서 만날 수 있다. 이러한 지점들을 교차점이라 부른다. 이 교차점에 연결된 골격선 상

procedure Skeleton;
begin

for every q in gc_{free} do $U(q) \leftarrow M$; [M : large number]
[$L_i, i=0, 1, \dots$: a list of configuration, initially empty]

for every q in gc/gc_{free} do

if there exists a 1-neighbor q' of q in gc_{free} do
begin

$d_1(q) \leftarrow 0$; $O(q) = q$;

insert q at the end of L_0 ;

end;

for $i=0, 1, \dots$, until L_i is empty do

for every q in L_i do

for every 1-neighbor q' of q in gc_{free} do

if $d_1(q') = M$ then

begin

$d_1(q') \leftarrow i+1$; $O(q') \leftarrow O(q)$;

insert q' at the end of L_{i+1} ;

end;

else if $D1(O(q'), O(q)) > \alpha$ then

if $q \notin S$ then insert q' in S ;

end;

그림 1 골격 지도 생성 알고리즘[8]

에서 교차점으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 성분들이 이 교차점의 이웃으로 간주 할 수 있다. 세 갈래의 골격 선을 가진 교차점은 일반적으로 세 개의 이웃을 갖게 된다. 이 이웃들을 이용하여 출발로부터 안전한 경로를 생성할 수 있다. 같은 교차점의 이웃은 서로 충돌로부터 안전한 경로를 갖는다. 그러나 이웃을 교차점으로부터 멀리 떨어진 곳에 생성하면 장애물과의 충돌할 가능성이 존재하게 되고, 반면 너무 가까워지면 주행성능 개선의 목적에 부합하지 않게 된다. 따라서 이 거리는 로봇의 크기와 장애물의 간격, 그리고 골격이 생성되는 거리 α 를 고려하여 결정한다. 다음은 시뮬레이션을 통해 얻어진 안전한 경로 생성을 위한 기준이다.

$$\text{로봇의 반지름} = \frac{\alpha}{3}$$

$$\text{장애물 최소 간격} = 2\alpha$$

$$\text{교차점과 이웃 간의 거리}(d_1 \text{ map 이용}) = \frac{2\alpha}{3}$$

골격지도상에서 서로 연결된 교차점은 각각의 이웃 중에 장애물과의 충돌 없이 연결될 수 있는 쌍을 갖는다. 그러나 교차점으로부터 가까운 위치에 다른 교차점이 존재하여 각 교차점의 이웃들이 매우 가까워지면 그 이웃들은 다른 교차점을 지나 생성되는데, 이는 이웃으로 간주하지 않는다. 따라서 이 교차점들은 각각 다른 교차점들보다 하나 적은 이웃들을 갖게 된다.

이렇게 정해진 교차점들의 모든 이웃들이 기존의 교차점 대신 노드로 정의되어 로봇의 주행에 이용된다. 여기에 이동 로봇에 주어진 출발점과 도착점도 노드로 추가되어 주행에 이용될 모든 노드가 정의된다. 여기서 출발점과 도착점은 로봇의 기구학적(Kinematic) 제약조건과 초기 방향을 고려하여 장애물과 충분한 거리를 가진 위치에 생성되어야 한다.

3. 경로 계획

3.1 노드 사이의 비용계산

동적계획법을 이용하여 경로를 계획하기 전에 앞서 각 노드 사이에 생성된 경로의 이동비용을 계산해야 한다. 여기서 노드 사이의 비용은 Euclidean 거리로 계산된다. 비용은 다음의 관계들을 가진 노드의 쌍에만 유한하게 주어진다.

- 골격지도 상에서 한 교차점의 이웃들로 이루어진 쌍. 단, 이 교차점이 다른 교차점과 가까이 있지 않아야 한다.
- 서로 멀리 떨어진 두 교차점의 이웃들로 만들 수 있는 쌍 중에서 가장 가까운 이웃 쌍.
- 서로 가까운 교차점들의 이웃들로 이루어진 모든 쌍.
- 출발점과 연결된 노드로 이루어진 쌍.
- 도착점과 연결된 노드로 이루어진 쌍.

위의 다섯 가지의 관계를 하나도 갖지 않는 노드 사이의 이동비용은 무한대로 주어진다. 결과적으로 무한대의 비용을 갖는 노드들은 경로가 생성되지 않아 서로 이동할 수 없게 된다. 이렇게 유한한 비용을 갖는 노드 쌍만을 이동할 수 있는 지점으로 간주되어 이들을 연결하여 도착점까지의 경로를 생성하게 된다.

3.2 동적계획법

출발점부터 도착점까지 최소비용을 갖는 경로를 구하기 위해 동적계획법을 적용하였다[12]. $1 \leq k \leq F$ 일 때, (1)을 G_k^* 를 k 번째 스테이지에서 F 번째 스테이지까지 최적 경로를 따라 이동하였을 때의 누적된 이동 비용이라 하자. $k = F$ 의 경계 조건의 최적 도달비용은 (2)와 같다.

$$G_k^*(x_k) = \min \left\{ \sum_{i=k}^F l(x_i) + l_F(x_F) \right\} \quad (1)$$

$$G_F^*(x_F) = l_F(x_F) \quad (2)$$

(1)에서 x_i 는 도착점에서 역방향으로 i 번 이동한 후의 노드이다. (1)의 (1)식을 변형하여 $k+1$ 번 역방향으로 진행한 노드에서부터 도착점까지의 도착비용을 포함한 형태로 표현하면 다음과 같은 반복식의 형태가 된다.

$$G_k^*(x_k) = \min \{ l(x_k) + G_{k+1}^*(x_{k+1}) \} \quad (3)$$

위 식을 만족하는 x_k 노드를 찾아나가면 도착점으로부터 출발점까지의 최소 비용을 갖는 경로를 찾아낼 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

그림2에 환경지도에서 출발점부터 도착점까지의 경로를 구하는 과정과 생성된 경로를 따라 주행하는 로봇의 궤적을 나타내었다.

그림2(a)는 시뮬레이션에 이용된 간단한 다각형의 장애물을 포함한 환경지도를 보여준다. 이 환경지도로부터 골격생성 알고리즘을 이용해 생성한 골격지도를 그림2(b)에 나타내었다. 이 골격지도에서 골격은 장애물간의 거리가 $\alpha = 6$ 이상인 경우에만 생성되었다.

그림2(c)는 교차점으로부터 일정거리 이상 떨어진 골격 선 상의 지점들에 노드를 취한 것을 보여주고 있다. 이 시뮬레이션에서 출발점은 (0.5, 0.5), 도착점은 (7.5, 9.5) 지점에 두었다.

그림2(d)에서는 유한한 이동비용을 가진 노드들을 선

으로 연결하였다. 그림에서 교차되어 표시된 부분은 가까운 거리에 위치한 두 개의 교차점이 만나 서로를 지나서 생성되는 두 개의 이웃은 무시되어 나머지 네 개의 교차점에 대한 비용을 계산하여 그린 것이다.

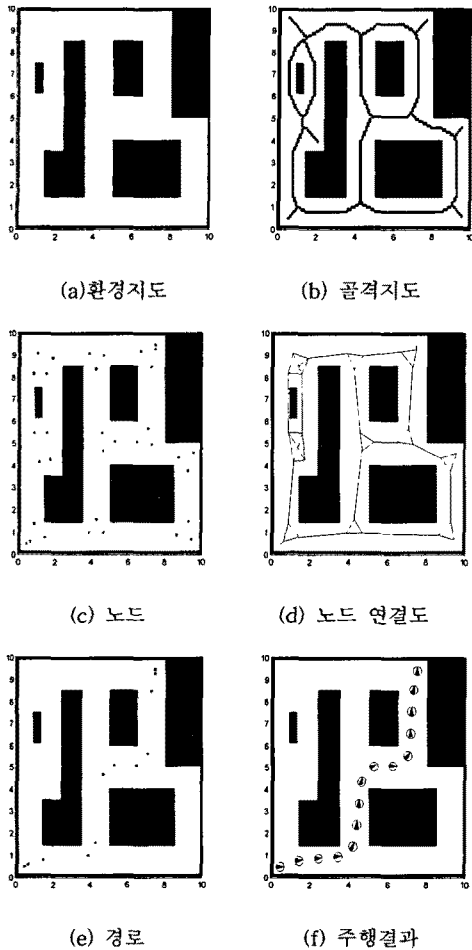


그림 2. 경로 생성 과정 및 주행 결과

그림2(e)에는 동적계획법을 이용하여 출발점에서 도착점까지의 최단 경로를 나타내었다.

그림2(f)에서는 이동로봇이 출발점에서 도착점까지 최단 경로를 따라 이동하는 과정을 보여준다. 시뮬레이션 결과를 통해 로봇이 불필요한 Yaw 동작이 없어졌음을 확인하였다.

생성된 경로를 따라 이동하는 과정에서 장애물에 근접 또는 부분적으로 충돌할 가능성이 있다. 따라서 로봇은 장애물 감지센서를 이용하여 회피 기능을 통해 장애물을 피한 후 다시 경로로 복귀하여야 한다.

5. 결 론

이 논문에서는 골격지도를 이용하여 장애물로부터 안전한 노드를 찾아 출발점부터 도착점까지 최단 거리의 경로를 동적계획법을 이용하여 생성하는 방법을 제안하였다. 안전한 노드는 골격 상의 교차점 주변의 이웃들로 선정하였고, 그 이동 비용은 Euclidean 거리를 이용하여 결정하였다. 이동로봇은 완성된 전체 경로를 따르며 주행하다 부분적으로 가까워지는 장애물은 센서를 이용한 회피 기능을 통해 회피하도록 하였다.

앞으로, 두 갈래의 연결 경로를 갖는 노드 쌍에 대해서는 경로 중간에 노드를 추가하여 보다 안전한 경로를 생성해야 할 것이다. 이 논문에서 제안된 노드 생성방법과 경로 생성방법은 추후에 다단계 이동로봇의 충돌회피에 적용될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] O. Khatib, "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 1, Spring 1986
- [2] J.C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1991
- [3] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation", *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Sacramento, California, pp. 1398-1404, 1991
- [4] S. S. Ge and Y. J. Cui, "New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 5, October, 2000
- [5] T. Simeon, J.P. Laumond, and C. Nissoux, "Visibility-based probabilistic roadmaps for motion planning", *Advanced Robotics Journal*, Vol. 14, No. 6, 2000
- [6] B. Chazelle, "Approximation and decomposition of shapes", *Algorithmic and Geometric Aspects of Robotics*, pp. 145-185, 1987
- [7] C. O'Dunlaing and C. K. Yap, "A Retraction Method for Planning the Motion of a Disc", *Journal of Algorithms*, 6, pp. 104-111, 1982
- [8] J. Barraquand, B. Langlois and J. C. Latombe, "Numerical Potential Field Techniques for Robot Path Planning", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 22, No. 2, pp 224-241, March/April 1992.
- [9] Y. K. Hwang and N. Ahuja, "Gross Motion Planning-A Survey", *ACM Computing Surveys*, Vol. 24, No. 3, September 1992
- [10] S. H. Suh and K. G. Shin, "A Variational Dynamic Programming Approach to Robot-Path Planning With a Distance-Safety Criterion", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 3, June 1988
- [11] L. E. Kavraki, P. Svestka, J. C. Latombe, and M. H. Overmars, "Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 4, August 1996
- [12] S. M. LaValle, *Planning Algorithms*, <http://msl.cs.uiuc.edu/~lvalle>, 2005