

거리와 안전도를 고려한 이동 로봇 경로 계획

조 동 권, 정 명 진

한국 과학 기술 원 전기 및 전자공학과

Mobile Robot Path Planning considering both the Distance and Safety

Dong-Kwon Cho, Myung Jin chung

Dept. of EE KAIST

Abstract-This paper introduces a path planning technique for a mobile robot in the presence of obstacles. In the technique, workspace is described by regional graph and represented obstacles by the three-layer neural network. And performance cost is defined under consideration both the traveling distance and the safety of a mobile robot. Then a collision-free path is obtained using the neural optimization technique.

1. 서 론

이동 로봇은 일반적인 산업용 로봇보다 제한적인 작업 영역을 갖는 단점을 해결할 수 있기 때문에 점점적으로 그 역할의 중요성이 커지고 있다. 이러한 이동 로봇은 경로상에 존재하는 장애물과 충돌 회피를 하며 목적지까지 도달할 수 있는 경로의 계획이 필요하다. 또한 짧은 경로는 생산성의 향상을 가져오기 때문에 가능한 짧은 것이 효과적이다. 본 논문에서는 다각형 형태의 고정 장애물이 널려있는 환경하에서 이동 로봇의 초기 위치와 최종 위치가 주어졌을 때 충돌 회피가 가능한 짧은 경로를 계획함을 목적으로 한다.

고정 장애물상에서의 경로 계획 문제를 해결하려는 연구는 다음과 같은 것이 있다. 로봇의 위치와 방향을 기술할 수 있는 configuration 공간의 개념을 일반화하여 사각 이동 로봇의 경로를 계획한 경우가 있는데 이 방법은 로봇을 어떤 기준점으로 축소(shrink)시키고 동시에 다른 장애물을 configuration 공간으로 변환시키는 방법을 이용, configuration 공간 상에서의 충돌 회피 경로를 계획하였다.[1] 이 방법은 로봇의 정확한 모델링이 필요하고 자유도가 증가함에 따라 계산량이 방대해지는 결점이 있다. 일반화된 voronoi diagram 으로부터 얻어진 경로를 따라 동작을 계획하기 위한 몇가지 heuristic 기법을 제안한

경우도 있다.[2] 2차원 환경하에서 안전한 경로 생성에는 효과적이거나 자유도가 증가하면 확장이 어렵다는 단점이 있다.

로봇 경로계획시 가장 짧은 경로 혹은 가장 안전한 경로만이 아닌 안전의 정도를 정량화하여 거리와 안전도를 동시에 고려한 방법들이 있다. 짧은 경로보다도 전 경로상에서 충돌 회피가 우선이 되어야한다. 특히 경로 수행시 로봇 동력학의 불확실성과 장애물동 환경의 기하학적 모델링 상의 불확실성때문에 충돌이 없어도 장애물과의 거리에 따라 충돌 정도를 제량화하는 방법이다. variational calculus 및 dynamic programming 기법을 이용하여 경로를 계획하기 위해 로봇의 자유 작업공간을 영역으로 나누고 영역을 그래프로 표현한 다음 거리와 안전도를 비용화하여 경로를 선정한 방법도 있다.[3] 주어진 channel parameter [3] 상황에서는 최적의 경로라 할 수 있으나 그런 상황이 되도록 문제를 다시 만들었으므로 원래 문제의 최적의 해와는 거리가 있고 탐색 대상이 되는 변수의 갯수가 늘어남에 따라 필요한 계산의 양이 기하급수적으로 증가한다.

경로 계획시 고려해야할 변수가 많고 비선형함수로 표현되는 경우 로봇의 최적 경로를 구한다는 것은 매우 어렵다. 이런 경우 하나의 해결책으로 건반적인 최적성이 다소 감소되나 국부적인 경로 계획을 쉽게 수행할 수도 있다. 이런 접근 방식으로 경로 계획시 최적화하길 원하는 요소를 비용화하여 경로를 변화시킴에 따라 정의된 비용이 감소해 가도록 하는 neural optimization network 개념[4]을 이용할 수도 있고 이와 비슷하게 정의하여 optimization 기법을 이용한 방법도 있다.[5]

본 논문의 경로 계획은 크게 두 과정을 거쳐 경로를 선정한다. 먼저 국부적 해를 구할 수 있도록 하기 위해 자유 작업공간을 영역으로 나누고 regional graph를 만든다. 그런다음 로봇의 위치에 따라 장애물과의 충돌 정도를

계량화하기 위해 총돌 벌점함수가 정의되고, 거리와 안전도를 고려한 비용이 정의되며 경로상의 위치들이 비용이 감소하도록 운동 방향이 유도된다. 각 극부영역에 대해서 구한후 전체적인 측면에서 비용이 가장 작은 경로가 선택된다. 본 논문에서는 로봇을 원으로 가정한다. 따라서 2차원 공간상에서 로봇을 한점으로 축소할 수 있고 대신 장애물을 확장시킨다.

2. 경로 계획 알고리즘

그림 1 과 같은 2차원 이동 로봇 작업 공간상에 다각형 형태의 장애물이 널려 있고 이동 로봇의 초기 위치와 최종 위치가 주어진 경우 총돌 회피가 가능한 경로를 구하는 문제를 생각해 보자. 해를 찾기위해 먼저 기호를 정의한다. 로봇의 위치는 2차원 좌표제로 표현하고 경로는 via 위치의 합으로 결정된다. 근접한 via 위치를 직선으로 연결함으로써 한 경로를 근사화할 수 있다. 이때 i 번째 via 위치는 $P_i(x_i, y_i)$ 로 나타낸다. 또한 다각형의 장애물은 부등식의 합으로 표현할 수 있다. 그러면 위의 문제는 다음과 같이 구체화 할 수 있다. 장애물을 회피하면서 다음과 같이 정의되는 비용 함수를 최소로 하는 via 위치의 집합을 구하면 된다

$$COST = \sum_{i=1}^N L_i^2 \quad (1)$$

이때 L_i 는 i 번째 segment 길이를 의미하고 N 는 via 점의 총 수이다. 구속 조건이 있는 최소화 문제는 각 구속 조건에 벌점을 주어 구속 조건이 없는 최소화 문제로 변환할 수 있다. 그러면 구속 조건이 없는 최소화 문제에서 사용되는 최소화 기법을 사용할 수가 있다. 그래서 위의 문제를 다음과 같은 최소화 문제로 바꿀 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{find } & P_i(x_i, y_i) \quad i = 1, \dots, N \\ \text{to minimize } & COST = C_L + C_S \end{aligned} \quad (2)$$

이때 C_L 과 C_S 는 다음과 같이 표현되는 경로의 길이와 총돌 정도를 표현한다.

$$\begin{aligned} C_L &= \sum_{i=1}^N L_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^N ((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2) \\ C_S &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_i^j \end{aligned} \quad (3) \quad (4)$$

이때 L_i 는 i 번째 segment 길이를 의미하고 N 는 via 점의 총 수이고, M 은 장애물 수이고 C_i^j 는 i 번째 via 위치에서 j 번째 장애물로 인한 총돌 벌점 값이다.

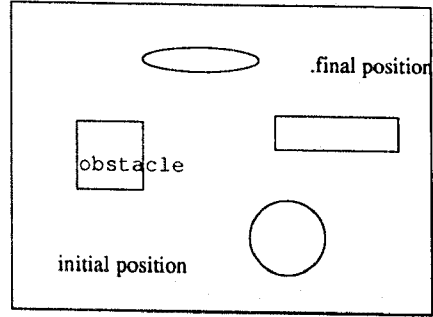


그림 1 초기 위치 및 목표 위치가 주어지고 장애물이 널린 이동 로봇 작업공간

이렇게 정의를 하면 작은 비용은 적은 총돌 가능성과 짧은 거리를 의미하므로 전 경로 즉 각각의 via 점들이 병렬로 공간 이동함에 따라 비용의 시간 변화가 음수를 갖도록 각 via 점들의 이동 방향을 정하면 된다. 비용의 시간 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dCOST}{dt} &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial L_i}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^M \frac{\partial C_i^j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{dx_i}{dt} \\ &+ \left(\frac{\partial L_i}{\partial y_i} + \sum_{j=1}^M \frac{\partial C_i^j}{\partial y_i} \right) \cdot \frac{dy_i}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

그래서 각 좌표의 시간 변화 $\frac{dx_i}{dt}$, $\frac{dy_i}{dt}$ 를 적당히 정하여 $\frac{dCOST}{dt} < 0$ 이 되도록 하면 비용은 시간에 따라 감소하여 평형상태에 도달한다. 이때의 각 via 위치들이 구하고자 하는 경로가 된다.

장애물에 인공 potential field 를 적용하는 한 방법으로 다음과 같은 것이 있다. 다각형 장애물 내부는 부등식으로 표현이 가능하므로 이 부등식을 3층 neural net 으로 구성하여 입력으로 2차원 위치가 주어지면 장애물과의 총돌 정도를 나타내는 총돌 벌점 함수가 정의된다.[5] 그림 2 는 장애물에 potential field 가 적용된 한 예를 보여주고 있다. 한 위치정보가 주어지면 중간층 각각이 장애물 표현 제한 조건을 만족하는지 여부를 결정하고 중간층 unit 모두가 활성화되면 그 위치는 장애물 내부에 있음을 의미하므로 결국 출력 unit 이 활성화되어 총돌을 의미한다. 장애물과 경로의 총돌 정도를 계산하기 위한 활성화 함수로서 sigmoid 함수를 이용한다. 그 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

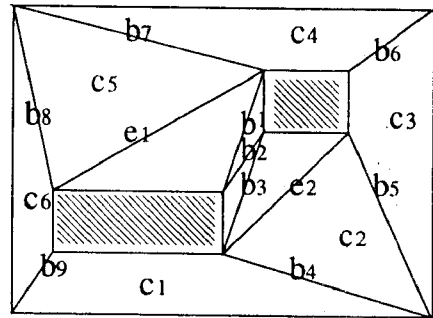
$$f(x) = \frac{A}{1 + \exp\left(-\frac{x}{T}\right)} \quad (6)$$

이때 A 와 T 는 크기와 기울기를 결정하는 상수이다. 이

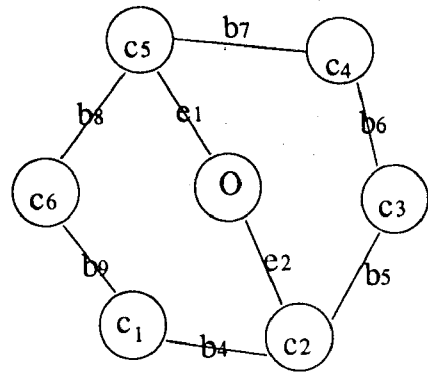
방법은 다각형뿐 아니라 다면체에도 쉽게 확장 적용이 가능하다.

자유 작업공간은 channel 개념 [3] 을 이용하여 몇 개의 node 로 compact 하게 표현할 수 있다. 각 channel 은 두 개의 입구만이 접근 가능한 폐쇄 공간으로 정의되는데 한 channel 의 경계들은 두 개의 입구 변들을 연결하는 두 개의 piecewise 직선들이다. 채널 경계내의 자유 공간은 장애물로 인한 금지 영역이 포함되지 않아야 한다. 채널이 형성되면 자유 공간을 조직적으로 서술하기 위한 그래프를 설정한다. 그림 3은 채널을 구하기위한 경계와 regional graph 를 보여주고 있다. 각각의 node 는 구역화된 자유 공간을 의미하는데 O 는 장애물로 이루어진 convex hull 내의 공간을 의미하고 node C_i 는 O 를 제외한 자유 공간을 의미한다. regional graph 가 결정되면 방향성 있는 graph 를 만들수 있고 초기 위치에서 최종 위치까지 갈 수 있는 경로의 수가 결정된다. 각 경우에 대한 초기경로를 설정하고 각 경우에 대하여 최종 경로를 구하고 비용이 가장 작은 경로를 최종 해로 결정한다. 그림 4는 한 예에 대한 simulation 결과이다. 가로 세로가 각각 100 [m], 100 [m] 인

작업공간을 가정하고 초기위치와 최종 위치를 좌표값 (10,10), (90,90)으로 주었을 경우 두 가지 극부 경로를 구하였다. 장애물에 대한 활성화 함수의 상수 A 와 T 는 각각 1과 0.05로 선택하였다.

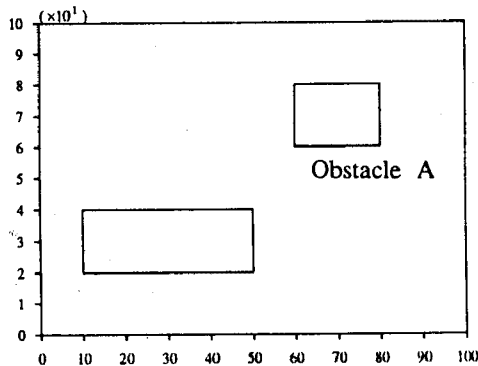


a)

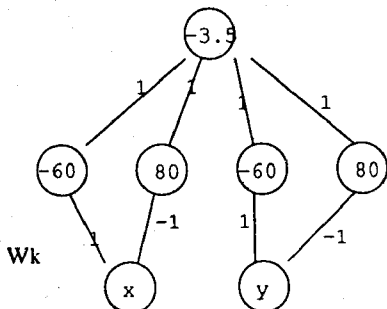


b)

그림 3 a) 자유 공간을 구역화하기 위한 기초
b) Regional graph



a)



W_k : k th constraint constant

b)

그림 2 a) 예를 든 장애물

b) 3층 neural net에 의해 표현된 장애물 A

3. 결론

본 논문은 경로의 길이와 안전도를 고려한 이동 로봇의 경로 계획 문제를 다루었다. 경로 선정은 두 과정을 거쳐 이루어진다. 먼저 자유 작업공간을 영역으로 나누어 regional graph 를 만들고 장애물에 인공적으로 potential field 를 가하여 거리와 충돌 정도를 적당한 가중치를 주어 비용 함수를 정의한다. regional graph 의 각 경로에 대하여 초기 경로를 주고 각 경로에 대하여 neural optimization 기법을 이용하여 수정된 경로를 얻는다. 본 접근 방식은 작업 공간을 compact 한 형태로 표현하여 경로 계획에 필요한 search 노력을 상당히 줄여 준다. 좀더 전체적인 측면에서 경로에 대한 비용이 최소가 되도록 전 경로에 대한 수정을 동시에 취했다. 로봇의 자유도가 증가함에도 쉽게 확장이

참고 문헌

가능하다. 고려하고자 하는 요소를 정의되는 비용함수에 추가로 계속 더해가기만 하면된다. 본 알고리즘은 계산을 쉽게함으로써 경로 계획을 할수 있다는 가능성을 보여주었고 있다. 그러나 극부 최적이라는 문제가 여전히 남아있어서, 이런 문제등을 해결하기 위해서는 고차원적인 경로 계획 알고리즘이 결부되어 사용되어야만 할 것이다.

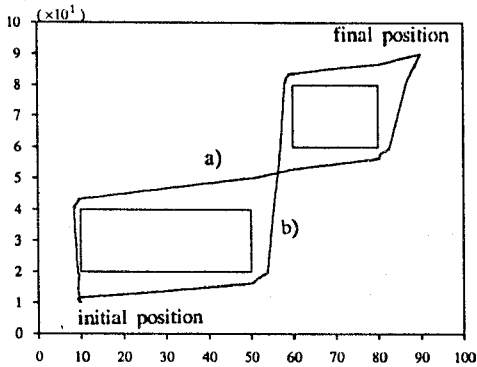


그림 4 점으로 표현된 이동 보트의
극부적으로 구한 두 경로

- [1] T. L.-Perez and M. A. Wesley, "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles", *Comm. of ACM*, vol.22, no.10, 1979.
- [2] O. Takahashi and R. J. Schilling, "Motion planning in a plane using generalized Voronoi diagrams", *IEEE Tran. R & A.*, vol.5, no.2, 1989.
- [3] S.-H. Suh and K. G. Shin, "A variational dynamic programming approach to robot- path planning with a distance-safety criterion", *IEEE J. of R & A.*, vol.4, no.3, 1988.
- [4] D. W. Tank and J. J. Hopfield, "Simple neural optimization networks : an A/D converter, signal decision circuit, and a linear programming circuit", *IEEE Tran. cir. & Sys.*, vol.33, no.5 1986.
- [5] J. Park and S. Lee, "Neural computation for collision-free path planning", *Joint conf.*, Washington, 1990.