

자율 이동 로봇의 경로 계획

이주호, 서삼준, 박기태

고려대학교 공과대학 전기공학과

Path Planning of Autonomous Mobile Robot

Jooho Lee, Samjoon Seo, Gwita Park

Dept. of Electrical Eng., Korea University

Abstract - To make a mobile robot to get to a goal point, path which connects the mobile robot and the goal point is needed and a path planning is necessary. There are various kinds of a path planning. Well known methods are skeleton method, cell decomposition method and potential field method. But each method has both forces and defects. In this paper, we propose a new method of path planning to find a path for mobile robot. It is obtained by modifying a Voronoi diagram. An original Voronoi diagram can make a safe path but its result is not satisfied. First defect of path, sfinded by the original Voronoi diagram, is surplus of safety which make a path longer. Second defect is that the original Voronoi diagram method has a problem of connecting the Voronoi diagram with start/goal point of mobile robot. These defects are removed in proposed algorithm in this paper.

We define a function to show the quality of paths. And by computer simulation, paths are compared and its result are shown.

1. 서 론

최근 자율 이동 로봇(Autonomous Mobile Robot, AMR) 분야는 많은 연구와 개발이 활발히 행하여지는 분야이다. 이러한 근거로 각종 제어와 로봇 관련 학술 회의를 보면 다수의 논문이 AMR에 관해 쓰여지고 발표되고 있는 것을 볼 수 있다. 이렇게 AMR이 각광을 받는 이유는 두 가지로 분류된다. 첫번째 이유는 로봇이 공장이나 기타 여러 분야에서 인간을 대신한다는 면에서 기존의 로봇 형태보다 자율 주행 로봇이 더 많은 유용성을 보인다는 것이다. 두번째 이유는 기술의 속속적인 발전이 새롭고 유용한 자율 주행 로봇의 개발을 가능하게 했다는 것이다.[12]

AMR의 연구 분야는 포텐셜 필드(Potential Field), 골격화(Skeleton) 등의 알고리즘을 이용하여 출발점과 도착점을 연결해 주는 경로를 찾는 경로 계획(Path Planning), 주행 속도, 자세 등을 제어하는 자율 주행 로봇 제어(AMR Control), 다수의 자율 주행 로봇을 제어하는 군제어(Group Control), 초음파 센서, 비전 카메라 등으로부터 입력 받은 센서 데이터를 이용하여 외부 환경을 인식하는 센서 융합(Sensor Fusion), 갑자기 나타난 장애물이나 움직이는 장애물을 피하는 장애물 회피(Obstacle Avoidance) 등이 있으며 이 외에도 많은 연구 분야가 있다.

경로 계획을 통하여 나온 경로는 사용 알고리즘에 따라 다양한 형태로 나오게 된다. 이들은 각각 장점과 단점을 함께 가지고 있는데 본 논문에서는 골격화 알고리즘을 개선하여 사용자가 원하는 안전성을 가지며 골격화 알고리즘의 단점을 제거하는 알고리즘을 제안하기로 한다.

2. 경로 계획

2.1 경로 계획의 정의

로봇은 어떤 환경 하에서 미리 알고 있는 장애물, 또는 미리 알지 못하는 장애물을 피해 안전하게 원하는 목적지까지 움직여야 한다. 경로 계획이란, 장애물을 피해 안전하게 목적지까지 도착할 수 있는 경로를 찾는 것이다. 경로 계획은 모션 계획(Motion Planning)이라고도 하는데 엄격한 의미에서는 경로 계획이 모션 계획의 한 종류라고 할 수 있으나 일반적으로 큰 차이를 두지 않는다. 본 논문에서도 두 단어의 의미를 동일하게 보기로 한다.

2.2 경로 계획의 종류(정보에 따른 분류)

경로 계획은 AMR의 환경 정보에 따라 크게 두 가지 형태로 구분된다. 활동 영역(Configuration Space, Cspace) 안에 있는 장애물의 위치와 모양 등의 정보를 완벽하게 인지하고 경로를 계획하는 전역 경로 계획(Global Path Planning, GPP)과 장애물에 대한 사전 지식 없이 경로를 계획하는 지역 경로 계획(Local Path Planning, LPP)이 있다.

GPP는 지식 기반 경로 계획(Knowledge Based Path Planning)이라고도 하며 작업에 필요한 정보를 정확하게 수집하여 작업 수행 전에 경로를 찾는다. 이는 Act-After-Thinking의 과정으로 장점으로는 최적의 경로가 얻어진다는 것이고 단점으로는 GPP의 개루프(Open Loop) 특성 때문에 번화한 환경 또는 센서의 캐릭터 필요한 환경에서는 사용이 어렵다는 것이다.

LPP는 센서 기반 경로 계획(Sensor Based Path Planning) 또는 불완전한 정보 기반 경로 계획이라고 한다. 이는 낭극집 탐색 모델로 쉽게 설명된다. 이는 Act-While-Thinking의 과정으로 장점으로는 환경에 관한 사전 지식이 필요 없다는 것이고 단점으로는 최적의 경로를 얻을 수 없다는 것이다.

2.3 경로 계획의 종류(방법에 따른 분류)

경로 계획은 크게 몇 가지의 유형으로 구분되는데 그 유형에는 골격화(Skeleton), 셀 분해법(Cell Decomposition), 포텐셜 필드(Potential Field) 등이 있다.[1][2][5][6][7][10] 이들의 원리와 특징에 대해서 간단히 알아보기로 하자.

2.3.1 골격화(Skeleton)

골격화의 기본 개념은 Cspace를 줄여서 1차원의 선으로 구성하는 것이다. 골격화의 종류로는 가시도 도표(Visibility Graph)와 보로노이 도형(Voronoi Diagram) 등이 있다.

가시도 도표법은 2차원 상에서 장애물을 다각형으로 보고 출발점과 도착점과 다각형화된 장애물의 꼭지점을 잇는 선을 그어 가시도 도표를 만들어 출발점과 도착점을 잇는 선들의 집합 중 가장 선들의 거리 합이 작은 집합을 경로로 정하는 것이다. 단, 선을 이을 때는 선이 절대로 장애물의 내부를 지나가서는 안된다. 그림 2.1에서 알 수 있듯이 가시도 도표를 사용하여 찾은 경로는 출발점과 도착점을 잇는 최단 경로라는 장점이 있다.

보로노이 도형은 장애물을 둘러싸는 루프(Loop)를 만들고 출발점과 도착점에서 루프까지 이어지는 경로를 추가하면 출발점과 도착점을 잇는 경로를 찾을 수 있다. 그림 2.2는 보로노이 도형으로 찾은 경로의 한 예를 보이고 있다. 보로노이 도형으로 찾은 경로는 선의 갯수가 가시도 도표보다 줄고, 루프가 장애물간에 균등한 거리를 갖도록 구성되어 있다면 로봇이 장애물로부터 멀리 떨어질 수 있는 안전한 경로가

된다.

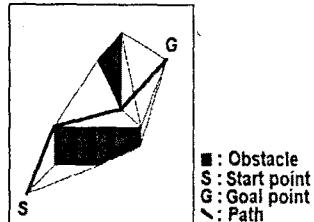


그림 2.1 가시도 도표의 예

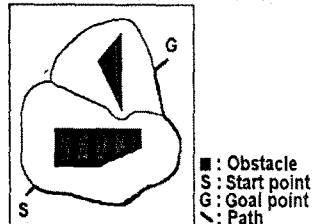


그림 2.2 보로노이 도형의 예

2.3.2 셀 분해법(Cell Decomposition)

셀 분해법은 Cspace를 단순한 셀들의 집합으로 분해하여 가까운 셀들 간의 관계로 경로를 찾는 방법이다. 셀 분해법은 셀을 장애물의 형태에 의존적으로 분해하는 방법과 비의존적으로 분해하는 방법이 있다.

장애물을 형태에 의존적으로 셀을 분해하는 방법은 셀의 형태와 개수를 장애물의 형태에 따라 생성된다. 이렇게 생성된 셀은 전체 갯수는 적으나 셀 분해 과정이 복잡하고 셀 간의 관계가 처리하기 힘들어진다.

장애물을 형태에 비의존적으로 셀을 분해하는 방법은 단순한 모양을 하고 있는 작은 크기의 셀로 Cspace를 분해하여 각각의 셀들이 장애물을 포함하고 있는지 여부에 따라 종류를 구분 짓고 이 셀들을 종류에 따라 재구성하여 단순화시킨다. 셀의 모양과 위치가 장애물에 독립적이어서 데이터 처리에 용이하다.

2.3.3 포텐셜 필드(Potential Field)

Cspace에서 장애물이 점유한 부분은 높은 포텐셜을 부여하고 도착점이 있는 곳에는 낮은 포텐셜을 부여한 후 포텐셜 분포를 보면 장애물을 제외한 모든 Cspace에서 도착점으로 기울어져 내리가는 형상을 하고 있다. 따라서 로봇은 시작점에서 음의 기울기를 따라 내리가면 도착점에 도착하게 되고 이러한 경로 계획법을 포텐셜 필드라고 한다. 음의 기울기를 따라가므로 높은 포텐셜이 부여된 장애물과의 충돌이 자연스럽게 회피된다. 포텐셜 필드는 경우에 따라 도착점이 아닌 곳에서 부분 최소점(Local Minima)이 존재하여 로봇이 도착점에 다다르지 못하게 된다. 또한 장애물의 모양에 따라 포텐셜 필드를 구하기 힘들게 되는 경우가 있다.

제3장 수정된 골격화 알고리즘에 의한 경로 계획

3.1 골격화의 문제점

골격화 알고리즘에는 가시도 도표와 보로노이 도형이 있다는 것을 앞장에서 알아보았다. 그러나 이들은 실제 적용 시 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 가시도 도표는 최단거리 경로를 찾을 수 있다는 장점이 있지만 경로가 장애물의 꼭지점을 잇는 직선으로 안전성이 떨어지고 예리한 코너가 경로 중에 발생하여 실제 로봇의 주행을 어렵게 만든다. 또한 경로를 찾을 때 가능성 있는 경로의 조합이 많아진다. 이를 문제점을 개선하기 위한 연구도 많이 진행되어 장애물을 확장시키거나 두 꼭지점의 중간점을 이용하는 방법이 있으나 아직히 문제를 가지고 있다. 보로노이 도형은 가시도 도표의 단점인 안전성 문제가 해결되어 있고 가능성 있는 경로의 조합의 갯수도 가시도 도표보다 훨씬 적다. 하지만 필요 이상의 안전도를 갖기 때문에 그림 3.1과 같이 직접 갈 수 있는 경로가 있는 데도 멀리 돌아서 가는 경로를 생성한다. [3][4]

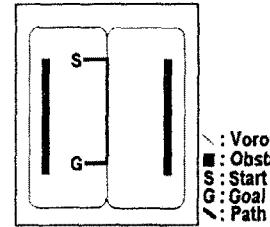


그림 3.1 골격화의 문제점 예 1

또한 출발점과 도착점이 보로노이 도형에서 떨어져 있는 경우, 경로를 생성할 때 출발점과 도착점을 보로노이 도형에 연결해야만 하는 과정이 필요하다. 따라서 일반적인 경우 출발점과 도착점에서 거리가 가장 가까운 보로노이 루프를 잇는 경로를 찾거나 사용하고 있으며 이 경우 그림 3.2와 같이 경로가 생성되고 최대 3번의(보로노이 도형 찾기, 출발점에서 보로노이를 잇는 경로 찾기, 도착점에서 보로노이를 잇는 경로 찾기) 과정을 수행하여 완성된 경로를 만든다.

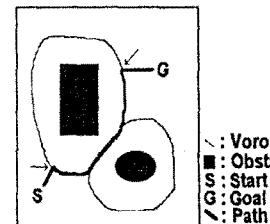


그림 3.2 골격화의 문제점 2

3.2 보로노이 도형법의 개선

보로노이 도형의 단점을 개선하는 방법을 제안하고 개선된 점을 알아보기로 한다.[8]

3.2.1 골격화

주어진 Cspace를 골격화하여 보로노이 도형을 만들기로 한다. 이 때 골격화 알고리즘으로 임상 치과 기법에서 많이 쓰이고 있는 Zhang-Suen의 세선화 기법을 사용하기로 한다.[11] 보로노이 도형을 만드는 기준의 방법은 n개 이상의 장애물과 거리가 같은 점들의 집합을 찾는 방식을 주로 사용하였다. 이를 대신하는 방법으로 본 논문에서 사용되는 Zhang-Suen의 세선화 기법은 반복 작업으로 어떤 셀이 특정한 조건에 맞으면 그 셀을 제거시키는 과정으로 대상물을 세선화 시킨다. Zhang-Suen의 세선화 기법은 다음에 열거된 것과 같은 특징을 가지고 있으며 특히 2번의 특징은 세선화된 결과가 보로노이 도형이 되도록 하여 준다. 그림 3.3은 그 적용 예를 보여준다.

① Zhang-Suen 세선화의 특징

- ① 이어져 있는 대상물을 끊지 않는다.
- ② 세선화 된 결과는 대상물의 중심에 위치한다.
- ③ 한 번의 반복 작업으로 대상물의 바깥쪽이 한 셀씩 감소한다.



그림 3.3a 세선화되기 전의 모습



그림 3.3b 세선화 된 후의 모습

3.2.2 세선회를 이용한 보로노이 도형의 구현

세선화를 Cspace에 적용하여 보로노이 도형을 구하려면 Cspace를 격자화된 셀 구조로 바꾸어야 한다. 이 때 한 셀의 크기는 작으면 작을 수록 정밀한 결과를 얻을 수 있지만 연산량이 많아지므로 적당한 크기로 한 셀의 크기를 정하고 Cspace에서의 장애물의 유무에 따라 맵핑(Mapping) 시킨다. 비장애물 셀들을 대상으로 보고 격자화된 Cspace를 Zhang-Suen의 세선화 기법으로 세선화 시키면 Zhang-Suen 세선화 기법의 특징 첫번째와 두번째 특징에 의해 보로노이 도형이 만들어진다. 이때 기준의 보로노이 도형이라면 두께가 1인 선만 남을 때까지 세선화를 행하여야만 하지만 본 논문에서는 세선화 알고리즘의 만족도를 더우며 같이 적용하기로 한다. 로봇을 원형으로 보았을 때 반지름을 r 이라고 하고, z 를 로봇이 통로를 지날 때 필요한 안전 거리 변수, c 를 셀의 한 변의 크기라고 했을 때 로봇이 지나갈 수 있는 통로의 최소폭의 셀 깃수 x 는 다음과 같다.(그림 3.4 참조)

$$\min(x) > \frac{2r+z}{c}$$

Zhang-Suen의 세선화 기법의 세번째 특징에 의해서 세선화 알고리즘의 최소 반복 횟수는 $\text{int}(x/2) + 1$ 로 정해진다. 이렇게 정해진 반복 횟수는 어느 정도 폭 이하의 통로에서는 보로노이 도형을 1차원적인 선으로 생성시키지만 어느 폭 이상에서는 필요한 정도의 안전도를 보장하는 2차원적인 보로노이 도형을 생성하므로 앞에서 보로노이 도형의 첫번째 문제점으로 제시한 필요 이상의 안전도 문제를 해결할 수 있다.

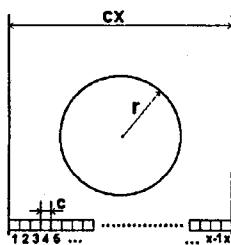


그림 3.4 통로 폭과 AMR

이렇게 필요한 정도의 안전도만 확보하면서, 경로 또한 최단 경로에 가깝도록 나온 보로노이 도형은 단순히 장애물을 회피시켜 가시도 도표로 찾는 것과는 다르다. 장애물을 회피시켜 가시도 도표로 찾은 방법은 경로가 장애물의 회장으로 없어지는 경우가 있는 등 여러가지 문제점이 있으나 제안된 보로노이 도형으로 찾은 경로는 x-p 이하의 통로에서는 경로가 항상 통로 중심에 생긴다. 따라서 그림 3.1과 같은 경로는 그림 3.5와 같이 개선되어 짐을 알 수 있다. 또한 원하는 만큼의 안전도를 제안된 보로노이 도형 기법에서는 확보할 수 있으나 단순한 장애물 회장인으로는 불가능하다. 이 밖에도 반복 횟수를 제한하는 이유는 완전한 보로노이 도형을 얻으려면 상당한 반복을 행하여야 하므로 LPP에는 적용하기가 힘들어 지는데 때문이다. LPP의 경우는 원칙적으로 라인으로 경로를 탐색해야만 하기 때문에 경로 계획 처리 시간이 걸어지는 압된다. 그럼 3.6은 제안된 방법에 의해 찾은 보로노이 도형과 통로 폭과의 관계를 나타내는 애이다.

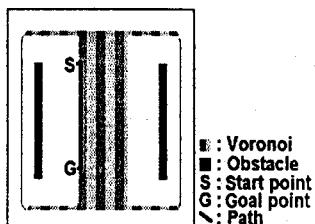


그림 3.5 개선된 보로노이 도형

$x_C > P.W.$ $x_C = P.W.$ $x_C < P.W.$

— — —

— : wall of corridor

—; modified voronoi

PW : passage width

그림 3.6 개선된 보로노이 도형과 통로
폭과의 관계

3.2.3 가상 장애물(Virtual Obstacle)

앞에서 AMR의 출발점과 도착점이 보로노이 도형의 루프와 떨어져 있는 경우의 문제점을 대해 기술하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 가상 장애물을 제안한다. 세선화에 앞서서 출발점과 도착점 둘레에 한 칸 걸어서 장애물을 임의로 위치시킨다. 이러한 과정을 거친 후 세선화를 행하면 보로노이 도형은 Zhang-Suen 세선화의 첫번째 특징에 의해 출발점과 도착점을 지나게 된다. 가상 장애물은 그림 3.7과 같이 출발점과 도착점 주위에 위치시키면 되고 가상 장애물이 있는 경우와 없는 경우의 보로노이 도형의 차이는 그림 3.8에 잘 나타난다. 가상 장애물을 사용함으로서 루프와 출발점, 도착점이 별도의 처리 과정 없이 연결되었다. 가상 장애물의 형태를 결정하는 문제는 4장에서 다시 다루기로 한다.

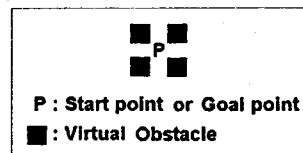


그림 3.7 가상 장애물의 형태

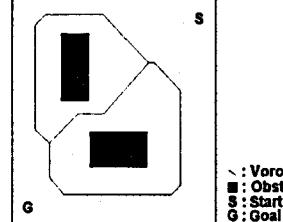


그림 3.8a 기존 복로노이 도형의 예

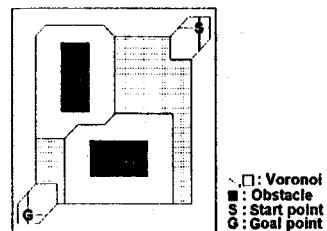


그림 3.8b 가상 장애물을 도입하여
만든 보로노이 도형의 예

3.2.4 탐색(Search)

보로노이 도형에서 춤발점과 도착점을 연결하는 경로는 대부분의 경우 2개 이상의 경로가 나온다. 이 때 가장 거리가 짧은 경로를 찾아주는 탐색 과정이 필요하게 된다. 탐색 알고리즘의 종류로는 깊이 우선

탐색(Depth First Search), A*, 거리 변환(Distance Transform, DT) 알고리즘 등이 있다. 이 들은 각각 알고리즘 성격에 맞는 상황에서 가장 좋은 경로를 탐색하게 하여 준다. 본 논문에서는 탐색 알고리즘으로 거리 변환을 사용하기로 한다. DT는 숫자를 확산시키며 최단거리 경로를 찾는 알고리즘으로 다른 탐색 알고리즘에 비해 우수한 특징을 가지고 있다. DT의 경로 탐색 과정을 정리하면 다음과 같다.

③ DT 알고리즘

① 격자화된 Cspace와 같은 크기의 메모리 공간을 만든다.

② 장애물이 점유된 셀에 해당하는 메모리에는 입력이 가능한 가장 큰 수를 입력시키고 도착점에는 1을 입력하고 나머지 부분에는 Cspace의 전체 셀의 개수를 입력한다.

③ 메모리의 한 셀씩을 주변의 4-neighbor 또는 8-neighbor와 비교하며 자신의 숫자 보다 작은 숫자가 있으면 그 숫자에 1을 더해 자신의 메모리 셀을 갱신한다. 단, 장애물일 때는 다음 셀로 넘어간다. 이 과정을 식으로 표현하면 다음과 같다.(4-neighbor의 경우)

$\text{if } (C(x, y) \neq \text{장애물})$

$$C(x, y) = \min(C(x+1, y) + 1, C(x-1, y) + 1, \\ C(x, y+1) + 1, C(x, y-1) + 1, C(x, y))$$

④ 숫자의 변경이 출발점에 해당하는 메모리 셀에서 일어났는지를 검사하고 일어나지 않았다면 ③의 과정으로 돌아간다.

⑤ 출발점에서부터 1씩 작은 숫자를 따라 도착점까지 도달하여 최단 경로를 결정한다.

이상의 과정을 그림 3.9로 나타내었다.

본 논문에서는 보로노이 도형에 DT 알고리즘을 적용하기 위해 보로노이 도형 이외의 부분은 모두 장애물이라 가정하고 DT를 행한다.

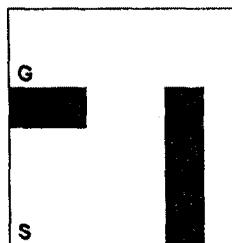


그림 3.9a 실제 장애물의 배치

36	36	36	36	36	36	36
1	36	36	36	36	36	36
B	B	36	36	B	36	
36	36	36	36	B	36	
36	36	36	36	B	36	
36	36	36	36	B	36	

그림 3.9b 메모리를 실제 환경에 맞춰 초기화

2	2	3	36	36	36
1	2	3	36	36	36
B	B	3	36	B	36
36	36	36	36	B	36
36	36	36	36	B	36
36	36	36	36	B	36

그림 3.9c 숫자 비교가 3회 반복되었을 때

2	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6
B	B	3	4	B	6
5	4	4	4	B	36
5	5	5	5	B	36
6	6	6	6	B	36

그림 3.9d 출발점 셀에 숫자 변화가 일어 났을 때

2	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6
B	B	3	4	B	6
5	4	4	4	B	36
5	5	5	5	B	36
6	6	6	6	B	36

그림 3.9e 최종적으로 생성된 경로

3.2.5 유선화(Smoothing)

로봇이 경로를 따라서 움직일 수 있기 위해서는 경로가 비교적 부드럽게 변해야 한다. 본 논문에서 세선화의 결과로 얻은 2차원 보로노이 도형을 탐색해서 얻은 경로는 다소 부드럽지 않은 형태를 하고 있는 경우가 많다. 이상적인 경우는 이 경로를 원호와 직선 구간으로 재구성 하여야 하겠지만 여기서는 다음의 단순한 과정에 의해 경로를 유선화 시킨다.

집합 P를 순서가 있는 경로상에 존재하는 점들의 좌표라고 하면

$$P = \{(x_i, y_i) | i = 1 \text{ to endnum}, p_i = \text{motion on the path}\}$$

D를 P의 원소 중 일정한 간격을 두고 추출한 집합이라고 정의하면

$$D = \{(x_j, y_j) | j = 1 \text{ to } \frac{\text{endnum}}{z}, z = \text{interval}, d_j = p_{iz}\}$$

이 때 D의 원소를 내분하여 구성한 유선화된 모션들의 집합 S는 다음과 같다.

$$S = \{(x_m, y_m) | m = 1 \text{ to } 2 * \frac{\text{endnum}}{z},$$

$$0 < a < z, a \neq (z - a)\}$$

$$S_{2n-1} = \frac{ad_{2n-1} + (z-a)d_{2n}}{z}, S_{2n} = \frac{(z-a)d_{2n-1} + ad_{2n}}{z}$$

그림 3.10은 경로를 $z=5, a=4$ 로 하여 유선화 시킨 예이고 그림 3.11은 DT를 이용하여 그림 3.8에서 경로를 찾은 후 유선화 시킨 것이다.

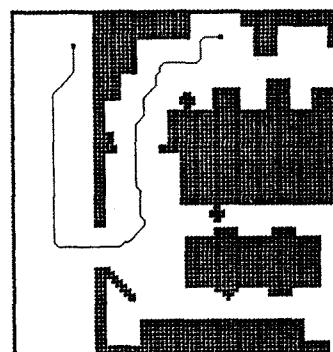


그림 3.10a 유선화 처리가 되기 전의 경로

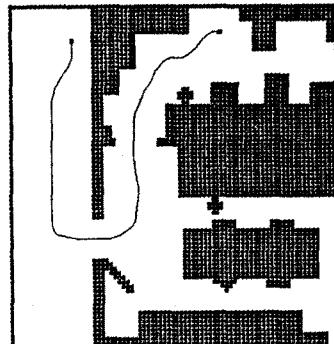


그림 3.10b 유선화 처리가 된 후의 경로

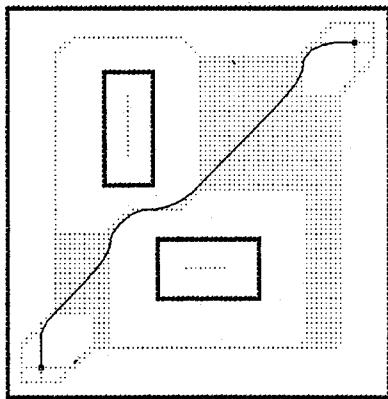


그림 3.11 DT로 경로 탐색 후 유선화된 예

3.2.6 경로의 평가

제안된 경로 계획을 통해 나온 경로가 기존의 경로 계획에 의해 나온 경로보다 우수한지를 평가하기 위해 다음과 같은 함수를 정의하기로 한다.

$$J = \sum_{q=\text{Start}}^{\text{Goal}} \frac{1}{D(q)}$$

($D(q)$ =q점에서 장애물까지의 거리들의 합)

$D(q)$ 는 q 를 중심으로 하는 한정된 영역 내에 존재하는 장애물들까지의 거리들의 합으로 정의되며 J 가 AMR이 지나가야 할 경로가 얼마나 짧으면서 안전한지를 평가할 수 있는 합수가 되도록 한다. 그림 3.12와 그림 3.13에서 기존의 보로노이 도형에 의해 구한 경로와 본 논문에서 제안한 개선된 보로노이 도형으로 구한 경로의 평가 지수를 비교하였다. 기존의 방법으로 찾은 경로는 J 가 각각 621.0, 187.2이고 개선된 방법에 의해 찾은 경로는 J 가 각각 591.9, 927로 나와 후자가 더 우수한 경로임을 알 수 있다. (J 가 작을수록 좋은 경로임.)

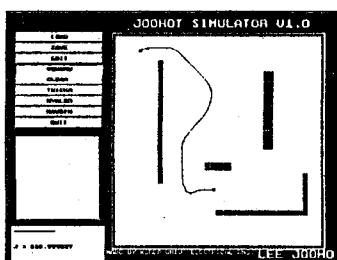


그림 3.12a 기존의 보로노이 방법으로 찾은 경로의 J

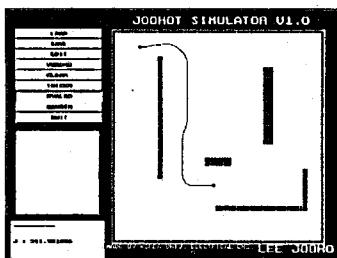


그림 3.12b 기존의 보로노이 방법으로 찾은 경로의 J

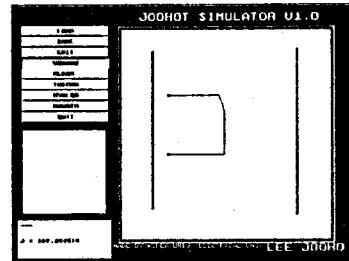


그림 3.13a 기존의 보로노이 방법으로 찾은 경로의 J

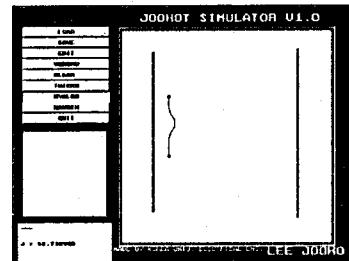


그림 3.13b 기존의 보로노이 방법으로 찾은 경로의 J

4. 결론

새로운 경로 계획 알고리즘을 제안하였고 그 구현 방법과 개선된 내용에 대해 알아보았다. 이들의 장점을 다시 정리하면 첫번째, 세선화 처리시 반복 횟수를 제한하여 필요 이상의 안전도를 갖는 경로를 찾지 않아 필요한 만큼의 안전성을 갖으며 최단 거리에 가까운 경로를 찾을 수 있게 하였고 반복 횟수를 제한함으로 처리 속도를 향상시켜 LPP에 사용이 용이하게 하였다. 가장 장애물을 도입하여 세선화 작업만으로 출발점과 도착점을 연결하는 보로노이 도형을 찾을 수 있으므로 3단계 과정을 1단계 과정으로 줄여 처리 속도를 향상시켰고 경로의 평가를 위해 평가 합수를 정의하여 기존의 경로와 개선된 경로와 비교 하여 보았다.

참고 문헌

- [1] F. Aurenhammer, Voronoi diagram-A survey of fundamental geometric data structure, ACM Comp. surveys, vol. 23, no. 3, pp. 345-405, 1991.
- [2] R. A. Brooks, Solving the find-path problem by good representation of free space, IEEE Trans. on Syst., Man, Cybern., vol. 13, no. 3, pp. 190-197, 1983.
- [3] H. Choset and J. Burdick, Sensor based planning, part I: The generalized voronoi graph, IEEE Conf. on Robotics and Automat., pp. 1649-1655, 1995.
- [4] H. Choset and J. Burdick, Sensor based planning, part II: Incremental construction of the generalized voronoi graph, IEEE Conf. on Robotics and Automat., pp. 1663-1668, 1996.
- [5] J. Guldner, V. I. Utkin, H. Hashimoto and F. Hamashima, Tracking gradients of artificial potential fields with non-holonomic mobile robots, submitted to ACC, 1995.
- [6] K. Hwang and N. Ahuja, Gross motion planning-A survey, ACM Comp. surveys, vol. 24, no. 3, pp. 219-291, 1992.
- [7] Khosla and R. Volpe, Superquadric artificial potentials for obstacle avoidance and approach, IEEE Conf. on Robotics and Automat., pp. 1778-1784, 1988.
- [8] J. H. Lee, S. J. Seo and G. T. Park, Modification of distance transform in AMR global path planning, Proc. of Korean Robotics and Automat., pp. 181-184
- [9] T. Lozano-pérez, A simple motion-planning algorithm for general robot manipulators, IEEE J. of Robotics and Automat., vol. RA3, no. 3, pp. 224-238, 1987.
- [10] A. Meystel, A. Guez and G. Hillel, Minimum time path planning for a robot, IEEE Conf. on Robotics and Automat., pp. 1670-1677, 1986.
- [11] T. Y. Zhang and C. Y. Suen, A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, Commu. ACM, vol. 22, no. 3, pp. 236-249, 1984.
- [12] Y. F. Zheng, Recent trends in mobile robots, World Scientific, 1993.