

딜레노이 메시를 이용한 효율적인 로봇 경로 생성방법

An Efficient Robot Path Generation Using Delaunay Mesh

노 성 우¹, 고 낙 용[†], 김 광 진²

Sung Woo Noh¹, Nak Yong Ko[†], Kwangjin Kim²

Abstract This paper proposes a path planning method of a mobile robot in two-dimensional work space. The path planning method is based on a cell decomposition approach. To create a path which consists of a number of line segments, the Delaunay Triangulation algorithm is used. Using the cells produced by the Delaunay Triangulation algorithm, a mesh generation algorithm connects the starting position to the goal position. Dijkstra algorithm is used to find the shortest distance path. Greedy algorithm optimizes the path by deleting the path segments which detours without collision with obstacles.

Keywords : Delaunay Triangulation(DT), Mesh Generator, Dijkstra Algorithm, Greedy Algorithm

1. 서론

경로계획이란 이동 로봇이 정해진 지도상에서 주어진 초기 위치로부터 목적지까지 찾아가는 경로를 말한다^[1]. 이처럼 주어진 공간상의 시작점에서 목표점까지 경로를 얻는 문제는 이동 로봇 분야에서 다양한 방법으로 연구가 진행되어져 오고 있다^[2].

경로계획 방법은 크게 전역 경로계획(Global Path Planning)과 지역 경로계획(Local Path Planning)으로 나눌 수 있다. 전역 경로계획은 미리 주어진 장애물 지도를 기반으로 출발점에서 목표점까지 장애물과의 충돌을 피하면서 가장 빠르게 갈 수 있는 경로를 찾는 방법이다. 전역 경로계획은 크게 경로 지도(Road Map)방법, 격자 분할(Cell Decomposition)방법, 전위계 방법 (Potential Field Method) 등이 있다.

경로 지도 방법에는 가시성 그래프 검색 알고리즘이 있다. 이 방법은 Kant^[3]가 제안한 방법으로 실제 공간상의 한 점이 여러 장애물을 회피하여 목표점까지 움직이는데 있어 시작점에서 각 장애물의 꼭짓점을 경유하여 목표점까지 이동하는 최단 경로를 구하는 방법이다. 가시성 그래프

의 가장 큰 문제점은 장애물을 꺼안고 이동해야 하는 문제점이 있다.

Cell Decomposition 방법에는 보로노이 다이어그램(Voronoi Diagram)을 이용한 방법이 있으며, 두 장애물에 이르는 거리가 같은 점들로 이루어진 다이어그램이다. 이 방법은 장애물에서 멀리 떨어진 자유공간에 경로를 생성되어진다. 하지만 경로생성의 최적인 조건을 보장하지는 않는다.

전위계 방법은 Khatib^[4]가 제안한 방법이다. 이 방법은 로봇이 움직이는 동안 장애물은 로봇에 척력(Repulsive Force)을 발생하고 목표점은 로봇에 인력(Attractive Force)을 띄게 된다. 또한 합력(Resultant Force)은 장애물의 척력과 목표의 인력의 합으로 나타내게 되는 방식이다. 하지만 이 방법은 경우에 따라 국부 최소(Local Minimum) 문제점이 발생할 수 있다.

지역 경로계획은 지도가 없는 미지의 환경을 이동하거나, 이미 작성된 지도를 이용한 전역 경로계획에 따라서 이동로봇이 이동할 때 지도에 나와 있지 않은 장애물이나 이동 장애물을 피하기 위하여 실시간 센서 정보를 이용하여 국부적으로 경로를 재생성하는 방법이다. 제안된 방법들은 버그 알고리즘(Bug Algorithms), 벡터 필드 히스토그램(Vector Filed Histogram) 등이 있다. 이 방법들은 모두 목적지까지 이동해 가는 도중에 장애물을 만났을 때의 일정한 규칙에 따라 동작을 함으로써 최종적으로 목적지까지 도달하도록 하는 방법이다. 장애물의 배치나 전체 지도

Received: Jan. 28, 2010; Reviewed: Jan. 29, 2010; Accepted: Feb. 01, 2010
 ※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-C1090-1021-0013)

†교신저자 : 조선대학교 제어계측로봇공학과 교수

1 조선대학교 제어계측공학과 석사과정

2 조선대학교 정보통신공학과 박사과정

의 모양을 고려하지 않기 때문에 동작 알고리즘은 단순하나 체계적이고 효율적인 경로를 찾는다고는 보장할 수 없다.

본 논문에서 제시하는 방법은 격자 분할^{5,6)} 방법 중의 하나인 딜레노이 삼각화(Delaunay Triangulation; DT) 방법을 이용하여 경로생성 방법을 제시하고자 한다. DT 방식은 다른 경로 생성 방법보다 환경정보에 대해서 훨씬 적은 데이터를 요구한다. 또한 DT을 이용한 방법은 지금까지 제시되어왔던 방법보다 유연하게 경로를 생성할 수 있다.

본 논문은 2장에서 2차원 환경에서의 DT생성 방법에 대해서 나타내었다. 3장에서는 DT를 이용하여 메시 생성(Mesh Generator)알고리즘을 개발하였다. 메시 생성을 적용한 이동 로봇이 다닐 수 있는 경로를 균형 있게 생성한다. 4장에는 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘과 그리드(Greedy) 알고리즘을 이용하여 이동 로봇이 이동할 수 있는 최단거리 및 최적 경로를 보인다. 5장에서는 실험을 통한 경로 계획을 나타내었다. 마지막으로 결론 설명한다.

2. 딜레노이 삼각화

먼저, 이 장에서는 DT에 대해서 살펴본다. 이후 DT 생성 방법에 대해서 살펴본다.

2.1 딜레노이 삼각화 정의

2차원 평면상의 점집합 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 이 존재한다면 점집합 P 의 삼각화를 정의할 수 있다. P 의 점들을 직선으로 연결할 때에 평면성을 만족시키면서 이미 연결된 직선과 새로운 직선이 교차되는 일이 없도록 두 점을 새로운 직선으로 연결한다. 그리고 더 이상 두 점을 연결할 수 있는 직선이 존재하지 않을 경우 이를 점집합 P 의 삼각화라 한다. DT는 일반적인 삼각형과의 차이를 그림 1에서 볼 수 있다. (a)는 일반 삼각형을 나타내었고 (b)는 DT이다.

2차원 평면상의 점집합의 DT는 다음과 같은 성질을 만족하는 삼각형들의 집합이다.

첫째, 삼각형 꼭짓점들의 집합은 2차원 평면상의 점집

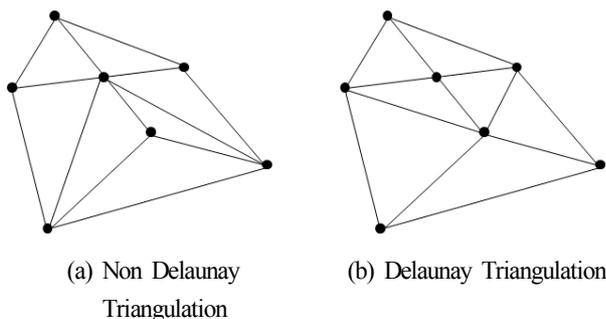


그림 1. 삼각형의 비교

합으로 구성된다. 둘째, 두 삼각형들의 교집합은 공집합 또는 하나의 공유점 또는 고유 모서리이다. 셋째, 그림 2와 같이 삼각형에 외접하는 원 내부에는 어떠한 점도 존재해서는 안 된다.

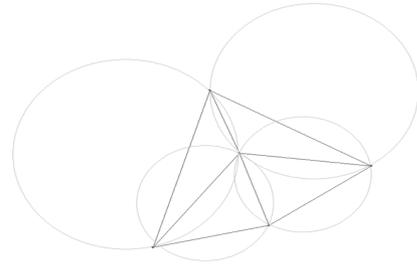


그림 2. 딜레노이 삼각화 정의

2.2 딜레노이 삼각화 생성 방법

모든 점들을 포함하는 초기 삼각형을 시작으로 점들이 하나씩 입력될 때마다 DT를 생성한다. 새롭게 점이 입력되어서 DT를 구성할 때, DT에는 각 삼각형들의 최소각의 최대화라는 특징을 이용해서 각각의 삼각형들이 DT에 포함되는 삼각형인지 검사를 해서 포함되지 않는다면 재구성을 해주어야 한다. 그림 3과 같이 삼각형 $\angle P_1P_2P_3$ 원안에 점 p_i 가 있다고 감지하는 방법을 식(1)에 의하여 결정한다.

$$\begin{vmatrix} P_x & P_y & P_x^2 + P_y^2 \\ P_x & P_y & P_x^2 + P_y^2 \\ P_x & P_y & P_x^2 + P_y^2 \\ P_x & P_y & P_x^2 + P_y^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_x - P_{1x} & P_y - P_{1y} & (P_{1x}^2 - P_{1y}^2) + (P_{1y}^2 - P_{1x}^2) \\ P_x - P_{2x} & P_y - P_{2y} & (P_{2x}^2 - P_{2y}^2) + (P_{2y}^2 - P_{2x}^2) \\ P_x - P_{3x} & P_y - P_{3y} & (P_{3x}^2 - P_{3y}^2) + (P_{3y}^2 - P_{3x}^2) \\ P_x - P_i & P_y - P_i & (P_x^2 - P_y^2) + (P_y^2 - P_x^2) \end{vmatrix} > 0 \quad (1)$$

p_i 가 0보다 크면 삼각형 $\angle P_1P_2P_3$ 안에 있다고 판단한다. 그림4 (a)와 같이 어떤 삼각형면의 내부에 있을 경우 현재의 삼각형 면을 지우고, p_i 에서 면의 각점 p_1, p_2, p_3 로의 선분을 연결하여 그림4 (b)와 같이 3개의 면을 만든다.

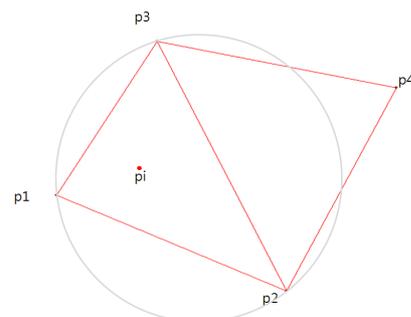


그림 3. 삼각형내부의 점 생성 처리(1)

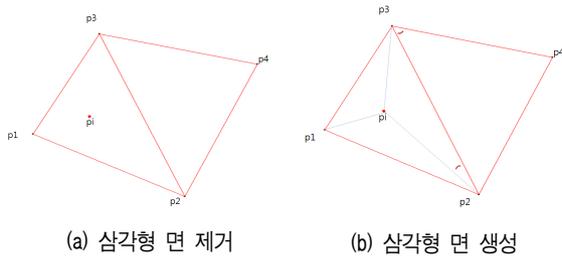


그림 4. 삼각형 내부의 점 생성 처리(2)

그림5의 경우 선분 p_1p_2, p_2p_3, p_3p_1 들이 삼각형에 적합한지 검사를 해야 한다. 선분 p_2p_3 가 적합한지를 검사하면, 삼각형 $p_1p_2p_3$ 과 삼각형 $p_2p_3p_4$ 의 최소각을 비교하여 삼각형 $p_1p_2p_3$ 의 최소각이 작으면, 현재의 선분의 p_2p_3 가 지워지고, 새로운 p_1p_4 가 만들어져야 한다.

각 삼각형들이 외접한 원에 포함이 되었는가를 그림 6 과 같이 비교를 한다. 실제로 그림 5와 같이 삼각형을 생성 하면 삼각형에 외접하는 원안에 삼각형의 점들은 포함 되지 않는다.

그림 7은 DT생성을 나타내었다.

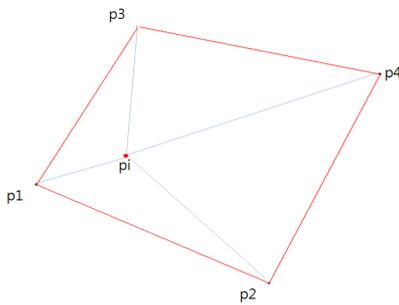


그림 5. 삼각형 내부의 점 생성 처리(3)

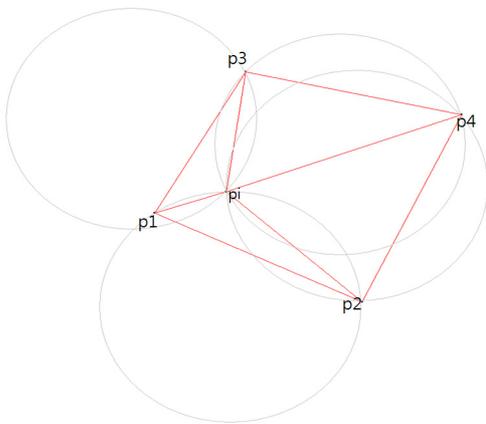


그림 6. 삼각형 내부의 점 생성 처리(4)

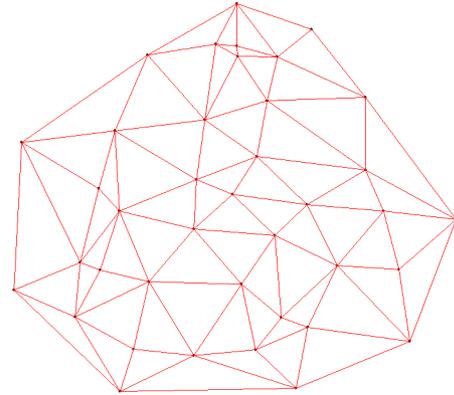


그림 7. 딜레노이 삼각화 형성

3. 메시 생성

DT에서 경로 계획을 세울 경우 삼각형의 크고 작음에 따라 계산의 복잡도가 증가한다. 또한 경로 생성시 유연성이 떨어지게 된다. 그러므로 각각의 삼각형들이 서로 균형 있는 형태를 유지하여 경로 생성에 유연성을 보여 줄 수 있는 방법이다. 그림 8은 메시 생성(Mesh Generator)을 위한 진행절차이다.

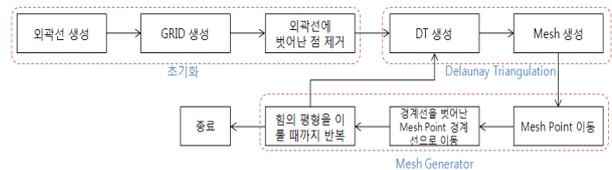


그림 8. 메시 생성 진행절차

3.1 메시 생성 초기화

메시 생성을 위해서는 우선 외곽선을 생성 하고 딜레노이 삼각화의 전체적인 처리를 수행하기 위하여 그림 9와 같이 노드들을 그리드 형식으로 추가한다. 그리고 외곽선 밖에 있는 노드들을 제거를 위해서 다각형 안에 노드들의 존재유무를 판단한다.

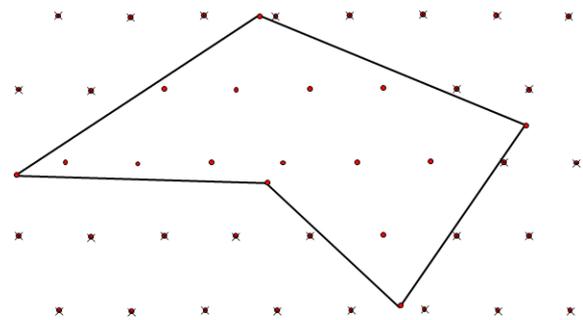


그림 9. 메시 생성 초기화

3.2 Delaunay 삼각형 생성

DT 생성 방법에서 제안한 방식을 이용하여 그림 10과 같이 DT생성을 나타내었다.

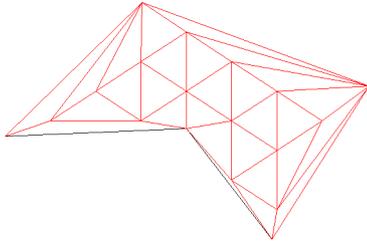


그림 10. 딜레노이 삼각화를 이용한 메시 생성

3.3 메시 포인트 이동

메시 포인트 이동은 각각의 삼각형의 선분에 장력을 발생 시켜서 삼각형의 모양을 균일하게 만들 수 있다. 다음 조건에 의해 메시 포인트가 이동시키는 방법을 나타내었다.

첫째, 각 선분은 양방향으로 힘을 발생한다. 각각의 선분에 양방향으로 장력의 힘을 준다. 그림 11과 같이 삼각형이 커지려는 현상이 발생하게 된다.

둘째, 각 선분은 길이에 반비례하여 힘을 발생한다. 그림 12와 같이 가운데 있는 메시 포인트를 기준으로 위쪽 선분의 길이가 상대적으로 짧고 좌우의 길이는 비슷하므로 메시 포인트는 아래쪽으로 밀리게 된다.

셋째, 기준이 되는 선분의 길이는 전체 선분 길이에 평균이 된다. 각각의 삼각형의 전체 선분의 평균을 L_0 로 놓고 각 선분을 L 로 나타내었을 때, 선분의 힘 벡터는 식2와 같이 된다.

$$\vec{F} = ((L_0/L) - 1) \cdot \vec{Edge} \cdot f_{scal} \quad (2)$$

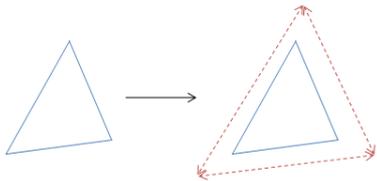


그림 11. 삼각형의 장력의 힘

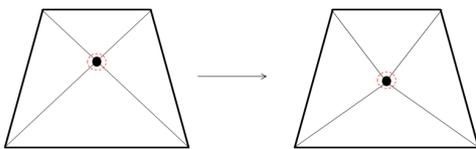


그림 12. 메시 포인트 이동

이는 L_0 가 짧을수록 힘은 커지게 되고, 길어질수록 벡터의 힘은 적어지게 된다. f_{scal} 은 메시 포인트의 이동에 영향을 주게 된다. f_{scal} 이 클수록 메시 포인트의 이동이 커지게 되는데 일반적으로 0.01을 주게 된다. 다음 식3와 같이 L 이 L_0 보다 클 경우에는 삼각형의 선분이 줄어들게 되는 현상이 발생하여 힘 벡터를 0이 되게 한다.

$$(L_0 - L) < 0 \quad (3)$$

넷째, 각 꼭짓점들의 벡터의 합은 0으로 놓는다. 각 외곽선에 꼭짓점들도 메시 포인트가 생성되는데 꼭짓점에 있는 포인트는 선분의 힘에 영향을 받지 않도록 벡터의 힘을 0으로 놓도록 한다. 이는 메시 포인트가 이동시에 균일한 모양을 형성할 때 영향을 주지 않기 때문이다.

다섯째, 모든 삼각형에 선분의 힘을 합한다. 각각의 선분에 걸린 벡터의 합에 대해서 메시 포인트를 이동시키면 그림13과 같이 형성되게 된다.

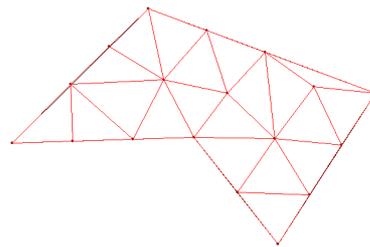


그림 13. 메시 생성을 이용한 딜레노이 삼각화

4. 경로 생성 방법

4.1 인접 행렬 생성

이동 로봇에 경로를 생성하기 위해서는 로봇이 다닐 수 있는 길이 필요하다. 본 논문에서 제시한 DT를 이용하여 각 노드와 노드 사이의 인접 행렬을 생성한다. 그림 14와 같이 삼각형 ABC 무게 중심 P_1 과 삼각형 BCD 무게 중심 P_2 에서 사용하는 인접 선분은 \overline{BC} 이다.

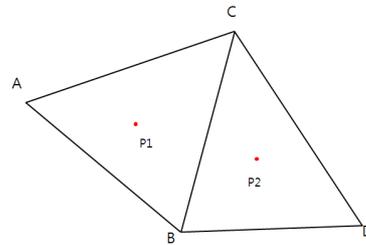


그림 14. 삼각형의 인접선분

모든 딜레노이 삼각형들의 인접 선분들을 찾아서 각각의 삼각형 무게 중심의 노드들의 인접행렬을 표현 한다. 또한, 각각의 노드들의 연결된 정보와 연결된 거리정보도 가질 수 있도록 테이블을 생성한다.

그림15는 노드들 간의 인접 행렬을 이용한 경로생성을 표현한 그림이다.

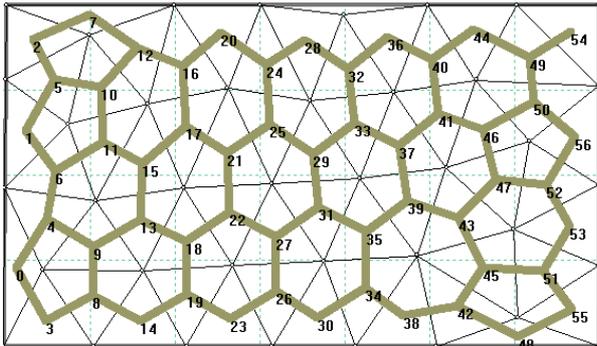


그림 15. 인접행렬을 이용한 경로 생성

4.2 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘

그래프에서 최소비용의 경로는 다익스트라 알고리즘을 이용하여 구할 수 있다. 다익스트라 알고리즘을 기술하기 전에 몇 가지 정의가 필요하다⁷⁾.

$D(v)$: 출발점(u)에서 노드($node$) v 까지의 최소 비용

$p(v)$: 출발점에서 노드 v 까지 가는 최소비용 경로에서 노드 v 의 바로전의 노드

N' : 만약 출발점에서 노드 v 까지 가는 경로가 최소비용이라는 것을 알면 노드 v 는 N' 에 속한다. 즉 노드의 부분 집합이다. 노드의 전체집합은 N 이다.

다익스트라 알고리즘은 다음과 같다.

초기화 :

$N' = u$

모든 노드 V 에 관하여

만약 노드 v 가 노드 u 의 이웃노드이면

$Then D(v) = c(u, v)$

아니면 $D(v) = \infty$

반복시작

$D(w)$ 가 최소가 되는 N' 에 없는 노드 w 를 찾아서

N' 에 노드 w 를 추가

노드 w 의 모든 이웃 노드 v 에 관하여 $D(v)$ 를 갱신

$D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w, v))$

$N' = N$ 이 될 때까지 반복

다익스트라 알고리즘을 적용하기 전에 DT와 메시 생성을 이용하여 인접행렬을 만든다. 그리고 시작노드 0에서 도착노드 54를 지정하면 다익스트라 알고리즘에 의해 그림 16과 같이 경로가 생성되어 진다.

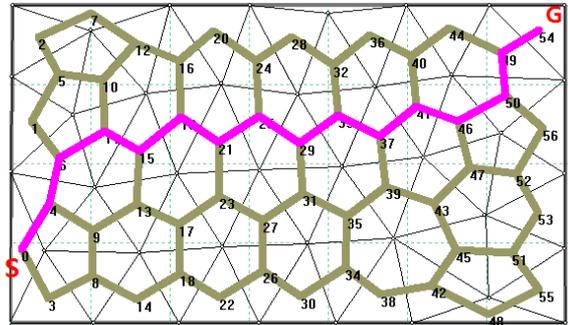


그림 16. Dijkstra 알고리즘을 이용한 경로생성

4.3 그리디(Greedy) 알고리즘

다익스트라 알고리즘을 적용하여 그림 17과 같이 점선으로 표시된 최단 거리가 형성 되었다. 하지만 그리디 알고리즘을 적용하여 나타내면 더 짧은 경로를 생성 할 수 있다. 다음 그림 17과 같이 점선으로 표시된 최단거리는 다익스트라 알고리즘을 적용하여 나타낸 방식이다. 하지만 그림 17에서와 같이 진행 단계를 거쳐 지나가면 다익스트라에서 주어진 경로보다 더 짧은 경로 획득이 가능하다. 그림 17 (a)와 같이 먼저 시작점에서 다음 노드까지를 직선으로 연결 한다. 이때 장애물과 직선과의 서로 만나는 지를 확인을 하면 된다. ①번일 때는 장애물과 만나지 않고 ②번③번도 만나지 않는다. ④번은 장애물과 만나게 되어서 ③번 위치에 생성된 노드와 연결하게 된다. (b)(C)의 그림도 마찬가지로 시작점을 ③번 위치에 노드에서 시

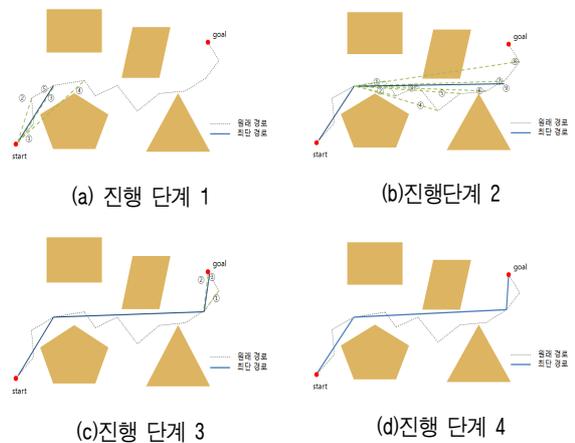


그림 17. 그리디 알고리즘을 적용한 경로생성

작점을 잡고 (a)에서 수행했던 방법대로 하게 되면 (b)의 그림처럼 나오게 된다. (C)의 그림도 같은 방법으로 적용하게 된다. 결과적으로 (d)의 그림같이 총 4개의 노드 점을 가지고 경로계획을 수행하게 된다.

5. 실험 및 고찰

5장에서는 제안된 로봇의 경로계획 알고리즘의 특징과 효과를 보여 준다. 본 시뮬레이터는 2차원 환경에서 폴리곤 형식의 장애물과 불규칙적인 지형을 나타내었다. 경로 계획 알고리즘은 시작점에서 도착점까지 경로를 알려준다. 먼저 다익스트라 알고리즘은 최단거리를 나타 내었고, 그리디 알고리즘은 생성된 경로에 최적인 상태를 나타내었다. 그림18 (a)에서의 실험환경은 불규칙적인 지형에 200 개의 노드, 278개의 DT, 41개의 규칙적인 장애물을 이용하였다. 그림18 (b)에서는 직사각형의 지형에 262개의 노드와 345개의 DT, 다양한 형태의 장애물을 구성하였다.

실험결과는 그림 18 (a)경우 다익스트라 알고리즘을 이용할 경우 노드의 방문 횟수가 41번, 그리디 알고리즘은 6 번으로 나타났다. 그림 18 (b)경우 다익스트라 알고리즘은 방문 횟수가 49번, 그리디 알고리즘은 6번으로 나타났다. 따라서 경로계획의 알고리즘은 다익스트라 알고리즘을 사

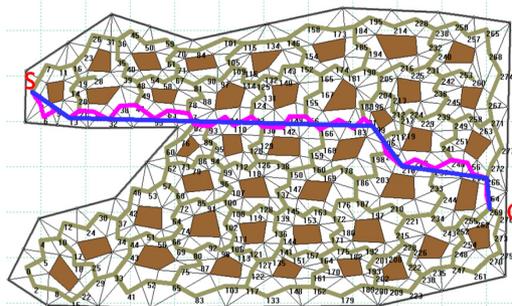
용한 후 그리디 알고리즘을 적용할 경우 적은 노드를 가지고 효과적인 경로 계획을 할 수 있다.

6. 결론

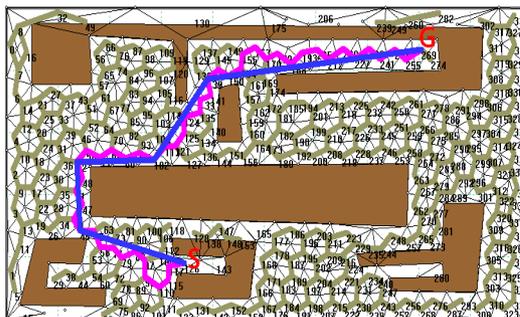
본 연구에서는 DT를 이용하여 로봇의 경로생성의 효율적인 방법을 제안하였다. DT를 이용하여 로봇의 패스를 만들고 메시 생성을 통하여 경로생성의 유연함을 보였다. 또한, 다익스트라 알고리즘을 적용하여 최단거리 경로 생성을 수행하였다.

기존에 제시되었던 셀분할 형식의 방법을 탈피하여 임의의 폴리곤을 형성 할 수 있는 외곽선을 만들었고 규격화 되어 있는 장애물이 아닌 다양한 형태의 폴리곤으로 형성 할 수 있었다. 또한 사용자가 외곽선과 장애물의 배치와 개수에 따라 DT를 형성할 때 노드의 추가를 선택 할 수 있기 때문에 로봇이 다닐 수 있는 경로의 유연성이 확보되었다. 그리고 메시 생성을 이용하여 보다 더 나은 경로가 형성됨을 보였다. 추가적으로 다익스트라 알고리즘을 적용하여 시작점과 목표점까지 갈수 있는 최단거리의 경로를 보였지만 경로의 이동 시 지그재그 형식으로 로봇의 경로가 생성되었다. 하지만 그리디 알고리즘을 적용하여 노드의 경우하는 점이 많이 줄어들고 동시에 경로의 형태가 많이 유연해짐을 확인할 수 있었다.

향후 시뮬레이터를 적용하여 실제로 로봇이 이동할 때 시작점에서 도착점까지 이동시에 장애물과 충돌위험이 없는지 확인하고 실제 로봇에 적용할 예정이다.



(a) 불규칙적인 지형에 규칙적인 장애물



(b) 규칙적인 지형에 불규칙적인 장애물

그림 18. 경로 계획의 예

참고문헌

- [1] N.C. Tsourveloudis, K.P. Valavanis, and T. Hebert, "Autonomous Vehicle Navigation Utilizing Electrostatic Potential Fields and Fuzzy Logic," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.17, No.4, pp.490-497, August 2001.
- [2] D. Kortenkamp, R.Peter Bonasso, and R. Murphy, Artificial Intelligence and Mobile Robot, The MIT Press, March 1998.
- [3] N.S.V. Rao, "On fast planning of suboptimal paths amidst polygonal obstacles in plane," Theoretical Computer Science, Vol.140, pp.265-289, April 1995.
- [4] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.1, pp.90-98, 1986.

- [5] H. Choset, K.M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W.Burgard, L.E. Kavraki, and S. Thrun, Principles of Robot Motion, MIT Press, June 2005.
- [6] R. Siegwart and I.R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robot, MIT Press, 2004
- [7] F.K James, H.E Huan and A Soloman, "Global optimal path planning for mobile robot based on improved Dijkstra algorithm and ant system algorithm," Journal of Central South University of Technology. Vol.13, No.1, 2006.



고 낙 용

1985 서울대학교 제어계측공학과(공학사)
 1987 서울대학교 대학원 제어계측공학과(공학석사)
 1993 서울대학교 대학원 제어계측공학과(공학박사)

1997~1998, 2004~2005 미국 Carnegie Mellon Univ.

Visiting research scientist

1992년~현재 조선대학교 제어계측로봇공학과 교수

관심분야 : 지상로봇과 수중로봇의 자율주행

E-mail : nyko@chosun.ac.kr



노 성 우

2007 조선대학교 제어계측공학과(공학사)
 2007~현재 조선대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정

관심분야 : Robotics, Microprocessor

E-mail : nswking0212@naver.com



김 광 진

2003 조선대학교 제어계측공학과(공학사)
 2006 조선대학교 대학원 제어계측공학과(공학 석사)
 2006~현재 조선대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정

관심분야 : Robotics, Microprocessor

E-mail : softy119@gmail.com