

연속적으로 변화하는 Traversability를 고려한 Mobile 로봇의 경로계획

이 승 철, 추 형 진  
 중앙대학교 전기공학과

A Mobile Robot Path Planning based on the Terrain with Varing Degrees of Traversability

S. C. Lee, H. J. Choo  
 Dept. of Electrical Eng., Chung-Ang University

**Abstract** - There has been extensive efforts about robot path planning. Some major approaches are the roadmap approach, potential field approach and the cell decomposition approach. However, most of the path planning methods proposed so far based on above approaches consider the terrains filled with binary obstacles, i.e., if there exists an obstacle, robot simply cannot pass the location.

In this paper, A mobile robot path planning method based on the cell decomposition technique for mobile robot that takes account of the terrain with varing degrees of traversability is discussed.

1. 서 론

자율 이동 로봇의 경로계획 알고리즘에 대해서는 로드 맵 방법(roadmap method), 포텐셜 필드 방법(potential field method), 셀 분해법(cell decomposition method)등 여러 가지 방법이 활발하게 진행되어 왔다.[6]

그러나 지금까지의 경로계획 기법들은 대부분 Terrain에서 장애물이 있을 경우는 로봇이 지나갈 수 없고 그렇지 않을 경우에는 로봇이 지나가는데 전혀 장애가 없는 "binary obstacle" 가정에 기초하고 있다. 그러나 실제 환경에서는 로봇이 지나가야 할 경로에는 지나가기에 용이한 경로가 있을 수 있고, 반대로 어려운 경우도 있다.

본 논문에서는 기 제안한 CREEP (Concentric Ripple Edge Evaluation and Progression)알고리즘[1]에 기초하여 mobile robot이 지나가는 경로의 상태에 관해 Traversability라는 개념을 도입하여 로봇 경로 계획에 있어 보다 현실성을 제고하는 연구를 진행하였다.

2. 본 론

2.1 CREEP 알고리즘

로봇의 활동영역(terrain)은 정사각형 셀(cell)들로 구성된 2차원 평면을 모델링 하였고, 셀의 크기는 장애물이 아닌 셀은 로봇이 통과할 수 있게 하기 위해서 로봇의 크기와 같게 하였다. 또한 로봇은 일정한 거리 내에서 장애물을 탐지(sensing)할 수 있다고 가정하였다.

2.1.1 가상 웨이브(Virtual Wave)의 발생 및 전파

셀들로 구성된 2차원 평면공간상에서  $i$  번째 행과  $j$  번째 열에 있는 셀을  $c(i, j)$ 로 표시한다. 하나의 셀은 두 종류로 구분되는 8개의 이웃 셀을 갖는다. 임의의 셀  $c(i, j)$ 와 면을 접하며 이웃해 있는 4개의 셀을 면 이웃 셀(side adjacent cells),  $A^s(i, j)$ 로 정의하고,  $c(i, j)$ 와 점에 의해 이웃해 있는 4 개의 셀을 점 이웃 셀

(point adjacent cells)이라 정의하고  $A^p(i, j)$ 로 표시한다. 예를 들면, 임의의 셀  $c(i, j)$ 를 중심으로 보았을 때,

$$A^s(i, j) = \{c(i, j-1), c(i-1, j), c(i, j+1), c(i+1, j)\}$$

$$A^p(i, j) = \{c(i-1, j-1), c(i-1, j+1), c(i+1, j-1), c(i+1, j+1)\}, \quad (1)$$

$$A(i, j) = A^s(i, j) + A^p(i, j)$$

이다. 여기에서  $A(i, j)$ 는  $c(i, j)$ 의 모든 이웃하는 셀들의 집합이다.

먼저 목표점(goal point)인  $c_g$ 에 웨이브 세기(wave strength: WS) 초기값  $w_s$ 를 부여하면 가상의 웨이브가 목표점에서 발생하여 장애물 셀을 제외한 이웃 셀들에게 값을 부여하면서 동심 구 모양으로 영역전체로 퍼져나간다. 임의의 셀  $c(i, j)$ 에서 이웃 셀로 웨이브가 퍼져나갈 때, WS 값은  $A^s(i, j)$ 에 속한 셀에는 거리 값인 1이,  $A^p(i, j)$ 에는  $\sqrt{2}$ 이 감소 되면서 전파된다. 여기에서 장애물 셀이 아닌 각 셀의 traversability를 1로, 장애물 셀은 0으로 가정한다. 웨이브는 장애물에 부딪힐 때마다 갈라져서 그 장애물을 돌아가서 퍼져나간다. 그래서 목표점에서 로봇까지 경로가 존재하는 한 최소한 하나의 웨이브라도 로봇에게 도착하게 된다. 로봇의 입장에서는 가장 강한 웨이브가 들어오는 방향이 최단경로의 방향이 된다.

2.1.2 웨이브 세기 값 (Wave Strength Value)의 부여

임의의 셀  $c(i, j)$ 는 그 주위의 8개의 셀중에서 이미 WS 값을 갖고 있는 셀로부터 WS 값을 받을 수 있다. 그러나 간접적으로 장애물에 의해 막혀있는 셀들(indirectly obstructed cells)인  $A^p(i, j)$ 로부터는 값을 받을 수 없다. 예를 들면, 임의의 셀  $c(i, j)$ 가 이웃 셀들로부터 WS 값을 받으려고 할 때  $c(i, j+1)$ 가 장애물 셀이라면,

$$A^p(i, j) = \{c(i-1, j+1), c(i+1, j+1)\} \quad (2)$$

이 된다. 그리고 주어진 임의의 셀  $c(i, j) (c(i, j) \neq c_g, c(i, j) \notin W)$ 의 WS 값  $w(i, j)$ 는

$$w(i, j) = \max \{ ((w(l, m) - 1) \forall c(l, m) \in A^s(i, j)), ((w(l, m) - \sqrt{2}) \forall c(l, m) \in A^p(i, j) - A^s(i, j)) \} \quad (3)$$

과 같이 계산된다. 여기에서  $W$ 는 이미 WS 값을 받은 셀들의 집합이고,  $c(i, j)$ 에  $w(i, j)$ 를 주는  $c(l, m)$ 은  $c(i, j)$ 의 부모 셀(parent cell)이라 하며  $p(i, j)$ 로 표시한다.

### 2.1.3 리플 Number의 부여

가상 웨이브는 점 이웃 셀 방향으로 빠르지만 웨이브 세기가 많이 감소되는 작은 값을 가지고 퍼져나가고, 면 이웃 셀 방향으로 느리지만 큰 웨이브 세기가 값을 가지고 퍼져나간다. 이렇게 웨이브가 퍼져나갈 때 장애물을 만나면 웨이브는 갈라져서 퍼져나간다. 그래서 장애물이 아주 많은 환경에서는 수많은 웨이브가 영역 전체에서 다른 속도로 퍼져나갈 것이다. 만약 다른 속도의 웨이브들이 임의의 셀  $c(i, j)$ 에 도착할 때, 보통 가장 빠르지만 제일 약한 웨이브가 맨 처음 도착할 것이다. 이때 더 강한 웨이브가 더 늦게  $c(i, j)$ 에 도착하면  $w(i, j)$ 는 갱신되어야 한다. 결국 약한 WS 값을 받았던  $w(i, j)$ 로부터 이미 WS 값을 받은  $A(i, j)$ 에 속한 모든 셀들의 WS 값을 갱신되어야 한다. 이렇게 영역 전체에 걸쳐 강하지만 더 늦게 도착하는 웨이브가 이미 부여된 WS 값을 덮어쓰는 것을 막기 위해, 즉 웨이브의 전파 속도를 어떤 상황에서도 일정하게 해주기 위해 다음의 식에 의해 각각의 셀에 리플 숫자(ripple number)를 부여한다.

$$w_g - s - 1 < w(i, j) \leq w_g - s \quad (4)$$

여기에서  $s \geq 1$  인 정수이고,  $c(i, j)$ 와  $w(i, j)$ 가 주어졌을 때, 만약 위의 조건을 만족하면 리플 숫자  $r(i, j)$ 는  $c(i, j)$ 와 관련된다. 이때 식 (4)를 만족하는 WS 값을 가진 셀들은 리플 집합(ripple set)(또는 줄여서 리플(ripple) )  $R(s)$ 의 원소(element)가 된다. 그리고  $R(0) = \{c_g\}$ 가 된다.  $R(s)$ 에 속하는 임의의 셀의 WS 값을 계산하기 위해서는  $R(s-1)$ 과  $R(s-2)$ 에 속한 모든 셀들은 이미 그들의 WS 값을 부여받았어야 하고 고정되어 있어야 한다. 이러한 순차적인 WS 값과 리플 숫자의 부여를 확장(expansion)이라고 정의한다. 같은 리플에 속하는 셀들 사이에 WS 값을 구하는 우선 순위가 없으므로, 같은 리플에 속하는 모든 셀의 WS 값은 병렬로 계산될 수 있다. 그리고 로봇이 향해갈 때 WS 값의 갱신은 단지 리플  $R(s)$  ( $s \geq$  현재 경로를 가로막는 새롭게 발견된 장애물의 리플 숫자)에 속하는 셀만 하면 된다. 이러한 명백한 국부적 경로수정은 계산시간을 크게 줄일 수 있다.

## 2.2 Traversability의 고려

### 2.2.1 Traversability

지금까지의 로봇 경로 계획 알고리즘에서는 모든 경로의 난이도를 같다고 보고, 지나갈 수 있는 경우와 지나갈 수 없는 장애물의 두 가지로 경로를 정의하였다. 그러나, 이러한 경로의 정의는 실제적인 로봇 경로 계획 적용에 있어 현실성이 결여된 문제점을 드러낸다. 예를 들어 옥외의 경우 진흙길이나 풀밭길이나 아니면 기울기가 있는 언덕이나에 따라 그 지나갈 수 있는 용이성(traversability)은 다르게 표현되어야 할 수 있다. 본 연구에서는 경로의 상태에 따라 그 지나갈 수 있는 정도를 traversability라고 하고, 그 범위는 0과 1사이로 정의한다. 즉 장애물의 경우에는 0, 잘 지나갈 수 있는 경우에는 1이라 하고 이 사이의 범위에 따라 그 경로의 상태를 표현하게 된다.

### 2.2.2 Traversability에 따른 웨이브 세기와 리플 숫자의 변화

이전의 알고리즘에서는 장애물 셀을 제외한 셀의 traversability를 1이라고 보고 면이웃 셀방향으로 진행할 경우 WS값을 1감소 시켰고, 점 이웃(point adjacent)방향으로 진행할 경우에는  $\sqrt{2}$ 를 감소시켰다.

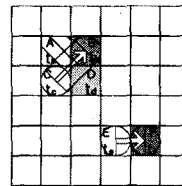
그러나 1보다 작은 traversability를 가진 경우를 생각할 때에는 traversability가 낮다는 것은 그만큼 진행하기 힘들다는 것을 나타낸다. 그러므로 웨이브가 진행할 때 그 만큼 웨이브 세기값이 많이 감소해야 한다. 그리고 그에 따라 ripple의 진행도 그만큼 더디게 된다. 예전의 WS를 계산하던 식에서 이 부분을 넣어주면 다음과 같은 식(5)가 된다.

$$w(i, j) = \max \left[ \left( (w(l, m) - 1 - K(1 - \text{trav}(i, j))) \right) \right. \\ \left. \begin{array}{l} \forall c(l, m) \in A'(i, j), \\ ((w(l, m) - \sqrt{2} - K(1 - \text{trav}(i, j))) \\ \forall c(l, m) \in A''(i, j) - A'(i, j)) \end{array} \right) \quad (5)$$

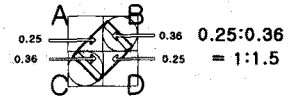
여기서  $\text{trav}(i, j)$ 는 셀  $c(i, j)$ 에서의 traversability이고  $K$ 는 상수이다.

위의 식(5)에서 보면  $K(1 - \text{trav}(i, j))$ 라는 항이 새로 추가 되었다. 이 항이 traversability에 따라서 WS값을 감소 시켜준다. 식에서 알 수 있듯이 만약 traversability가 1라면  $K(1 - \text{trav}(i, j))$ 부분이 0이 되어 예전 식과 같게 된다. 만약 traversability가 0일 때는 그 셀은 장애물이 되기 때문에 웨이브 세기 값을 계산할 필요가 없게 된다. traversability는 0에서 1사이의 값을 가지기 때문에  $(1 - \text{trav}(i, j))$ 의 값을 현장에 따라 조율하기 위한 weighting 값으로  $K$ 를 넣어 주었다. 가상웨이브가 퍼져나갈 때 웨이브의 전파속도를 일정하게 해주기 위해서 각각의 셀에 리플 Number를 부여하였다. 상기 식을 이용하여 WS값을 계산하고 리플 숫자의 정의를 그대로 이용하면 리플의 숫자가 하나만 나타나는 데 이것은 셀 하나에 여러 개의 리플이 중복되고 그 중에 가장 큰 리플만 나타난 것이 된다.

### 2.2.3 주변셀에 의한 Traversability의 변화



a)



b)

그림 1. 로봇진행시 주변셀을 통과하는 모습 (A, B, C, D - 셀 이름,  $t_a, t_b, t_c, t_d$  - 각 셀의 traversability)

위의 그림 1 a)과 같이 로봇이 서로 다른 traversability를 가진 셀들을 지나갈 때는 모든 셀들의 traversability의 영향을 받게 된다. 그림에서 보듯이 C셀에서 B셀로 지나갈 때 A셀과 D셀도 통과한다. 그러므로 traversability를 계산할 때에 A, B, C, D 모든 셀의 traversability를 고려해주어야 한다. 또한 E셀에서 F셀로 진행할 때도 E와 F의 Traversability를 동시에 고려해야 한다. 위의 그림에서 보면 로봇이 지나가는 면적이 C셀과 B셀이 A셀과 D셀보다 약 1.5배 정도 크다(그림 b)). E셀과 F셀의 경우는 지나가는 면적이 같다.(셀안에 선으로 된 부분) 확장(expansion)시 WS계산에 쓰이는 traversability는 아래 식(6)과 같이 웨이브가 진행하는 방향의 모든 셀들의 traversability의 산술평균을 이용해서 구한다.

### 3. 결 론

$$\text{trav} = \frac{1 \times t_a + 1.5 \times t_b + 1.5 \times t_c + 1 \times t_d}{5}$$

, for point adjacent cell

$$= \frac{e+f}{2}$$

, for side adjacent cell

(6)

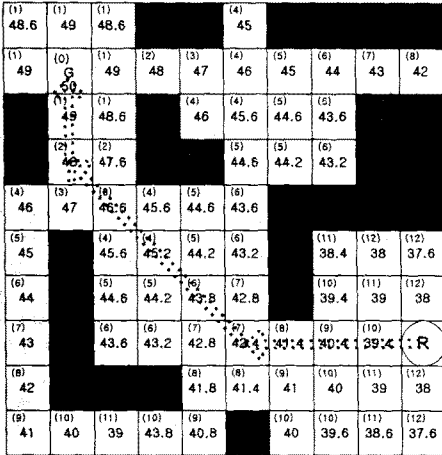
여기서  $t_a, t_b, t_c, t_d, t_e, t_f$ 는 각 셀의 traversability이다.

본 논문에서는 로봇의 경로계획에서 경로에 traversability를 고려하여 보다 현실성 있는 경로 계획을 세우는 것에 대해서 제안하였고, 이것을 CREEP이론에 적용하였다. 현재 변화하는 traversability에 의한 리플의 진행 특성과 국부적 경로수정(local update)의 적용 방안에 대하여 연구가 진행 중에 있다.

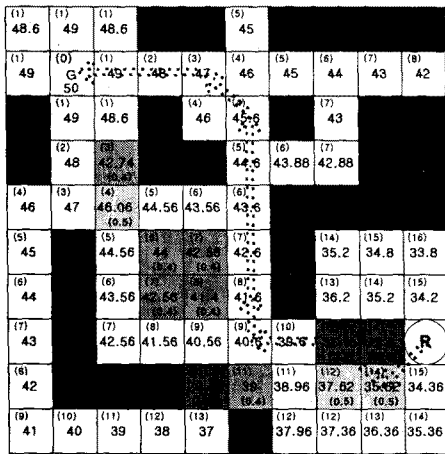
본 연구는 중앙대학교 학술 연구비 지원에 의해 수행되었음.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 이승철, 양원영, 김용환 "능률적인 3차원 경로계획 알고리즘 개발에 관한 연구," 대한 전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 1208-1211, 1996년 7월.
- [2] 이주호, 서삼준, 박귀태, "자율 이동 로봇의 경로계획," 대한 전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 866-870, 1995년 7월.
- [3] Brooks, R. A., "Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-13, No. 3, March/April 1983.
- [4] Chavex, R. and Meystel, A., "Structure of Intelligence for an Autonomous Vehicle," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics*, pp. 584-591, 1984.
- [5] Koren Y. and Borenstein J., "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation," *Proceedings of the 1991 IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, Sacramento, California, pp. 1398-1404, April 1991.
- [6] Latombe, J., *Robot Motion Planning*, Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [7] Borgefors, G., "Distance Transformations in Arbitrary Dimensions," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 27, pp. 321-345, 1984.
- [8] Zhu, D. and Latombe, J.C., "New Heuristic Algorithm for Efficient Hierarchical Path Planning," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No.1, pp.9-20, Feb. 1991.



a) Terrain with Binary Traversability의 경우



b) Terrain with Varing Degrees of Traversability의 경우(K=2)

그림 2. 셀 확장 예

위의 그림 2 a)는 이전에 binary traversability 즉 traversability가 장애물에는 0, 나머지는 1일때에 확장 알고리즘에 의한 셀 확장과 그에 따른 경로를 나타내었고 b)에서는 여러 가지 traversability가 있을 경우에 제안된 식에 의한 셀 확장과 그에 따른 경로를 나타내었다. 그림에서 보아서 알 수 있듯이 traversability가 고려되었을 때 traversability가 나쁜 곳을 회피해서 가는 것을 볼 수 있다.