

## 자율이동로봇의 동특성을 고려한 경로 계획 방법

윤희상, 박대형  
충북대학교

### Path Planning Method for Mobile Robots with Dynamic Constraints

Hee-Sang Yoon, Tae-Hyoung Park  
Chungbuk National University

**Abstract** - 자율이동로봇의 동특성을 고려하여 실용적인 경로를 생성하는 방법을 제안한다. 목표 지점까지 장애물을 회피하고, 자율이동로봇의 속도 및 조향각 등을 고려하여, 최적으로 가까운 경로를 생성하는 방법을 다룬다. 본 논문에서 골격선 그래프를 구성하여 디스트라알고리즘으로 초기 전역 경로를 설정하고, 이를 로봇의 동특성을 고려하여 동적 프로그래밍을 통해 경로를 개선한다. 개선된 경로는 자율이동로봇이 이동하는데 걸리는 시간을 단축한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 성능을 검증한다.

#### 1. 서 론

최근 들어 다양한 형태의 로봇이 개발 되고 있으며, 특히 원하는 목적지 까지 로봇 스스로 찾아가는 자율이동기능은 청소로봇, 안내로봇, 경비로봇 등 많은 로봇에서 핵심적인 기능을 담당하고 있다. 이런 자율이동기능이 적용된 자율이동로봇들의 주행성능을 높이기 위해서, 현재 지점에서 목표 지점까지 최단 시간에 이동할 수 있도록 경로를 생성하는 경로계획 기능이 중요시 된다[1].

자율이동로봇의 경로계획방법은 포텐셜 함수를 이용한 방식, 로드맵방식, 셀분해 방식 등으로 크게 분류할 수 있으며 각 방식에 세부적인 방법들이 연구되어왔다[1]. 그 중 하나로 최근 국부환경에서 일반적으로 사용되는 경로계획방법으로는 Konolig가 제안한 구배법[2]이 있으며, 구배법의 탐색영역을 위상정보를 활용하여 축소하여 개선한 방법[3]이 연구되었다. 또한 세션화 기법을 이용하여 전역경로를 생성하고, 동적프로그래밍을 이용하여 국부환경에서 경로를 개선하는 방법도 연구되었다.[4] 그러나 구배법 및 동적프로그래밍을 사용하는 경로계획방법들은 로봇의 동특성을 고려하지 않은 경로계획방법으로 생성된 경로를 실제 로봇이 이동하지 못하거나 이동속도를 줄여 이동시간이 지체되는 경우가 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 참고문헌 [4]의 동적경로계획방법을 기본으로 사용하고, 여기에 자율이동로봇의 속도 및 조향각 등 동특성 제약조건을 추가하여 이동시간을 단축시키는 경로 생성 방법을 제안한다.

#### 2. 경로 계획 방법

##### 2.1 경로계획문제

본 논문에서는 경로계획을 용이하게 하기 위해 2차원 평면의 컨피그레이션공간상(configuration space)에서 자율이동로봇을 점으로 표현하여 경로는 점의 이동으로 가정한다. 현재 로봇의 위치는  $s \in R^2$ , 목표점  $g \in R^2$ 라 정의하고 시작점과 목표점사이에  $N$ 개의 장애물이 존재할 때 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$O_i = \{(x,y) \mid l_i \leq x \leq r_i, b_i \leq y \leq t_i\}, i=1, \dots, N \quad (1)$$

여기서  $l_i, r_i$ 는 각각 장애물의 좌한 및 우한값 이며,  $b_i$  및  $t_i$ 는 장애물의 하한 및 상한 값이다.

이동경로를  $p$ 로 표현하고 시작점과 목표점 사이의 경유점을  $v_k \in R^2$  ( $k=1, \dots, M$ )라고 할 때 이동경로  $p$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p = \langle v_1, v_2, \dots, v_M \rangle, (v_1 = s, v_M = g) \quad (2)$$

여기서  $v_1 = s, v_M = g$  이다.

이동경로  $p$ 에서 직선으로 연결된 임의의 단일 구간을  $(v_k, v_{k+1})$ 라 할 때, 이 구간의 거리는  $d(v_k, v_{k+1})$ 라하고, 이 구간을 로봇이 통과하는데 걸리는 시간을  $t(v_k, v_{k+1})$ 라 정의하면, 이동경로의 총 길이와 이동시간은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{k=1}^{M-1} d(v_k, v_{k+1}), \sum_{k=1}^{M-1} t(v_k, v_{k+1}) \quad (3)$$

자율이동로봇의 경로계획문제는 거리 우선일 경우 식(3)의  $d$ 를 최소화

화 하며, 이동시간이 우선일 경우  $t$ 를 최소화 하는 이동경로  $p$ 를 찾는 최적화 문제이다.

##### 2.2 자율이동로봇 동특성 모델

그림 1은 2자유도의 차륜형 자율이동로봇을 나타내고 있다. 여기서 조향각도를  $\theta$ 라 하고 이때의 회전 반경을  $R$ , 곡률을  $C$ 라 하면 다음과 같은 식을 만족한다.

$$R = \frac{L}{\sin\theta}, C = \frac{1}{R} \quad (4)$$

단,  $L$ 은 차량의 축과 축사이의 거리이다. 또한 조향각  $\theta$ 는 기구적인 제약으로 인하여 최대 조향각  $\theta_{max}$ 를 가지며 다음과 같은 제약 조건을 가진다.

$$|\theta| \leq \theta_{max} \quad (5)$$

자율이동로봇의 이동속도가 빨라지면 회전 시 로봇이 미끄러지거나 전복 될 수 있다. 따라서 자율이동로봇의 속도  $v$ 가 증가하면 조향각을 줄여야 하며, 이는 차량 속도에 따른 최대 곡률  $C_{max}$ 를 다음 식으로 유도 할 수 있다.

$$C_{max} = \frac{0.5 \times g}{v^2} \quad (6)$$

따라서 현재 로봇의 속도를 알고 있으면, 로봇이 회전 시 조향 할 수 있는 최대회전조향각이  $\theta_T$ 일 때, 식(4)를 통해 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\theta_T = \sin^{-1} \left( \frac{0.5 \times g \times L}{v^2} \right) \quad (7)$$

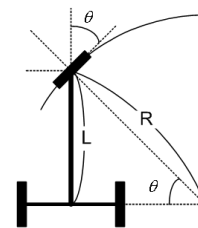
##### 2.3 동적경로계획방법

[4]에서 제안한 동적경로계획방법은 2단계로 이루어져 있으며 전역경로를 생성하고 이를 개선해 나가는 방법으로 짧은 시간에 거리를 최적화하는 방법이다. 동적경로계획방법은 영상처리 기법 중 하나인 세션화 기법을 이용하여 초기 전역 경로를 생성하는 경로 생성 단계와 동적프로그래밍을 이용하여 국부환경에서 경로를 반복적으로 개선해 나가는 경로 개선 단계로 진행된다. 본 논문은 동적경로계획방법에서 경로 생성 단계는 동일하게 적용하고, 2.2절에서 정의한 제약조건들을 경로 개선 단계에서 제약조건으로 사용하여 로봇의 경로를 생성한다.

##### 2.3.1 경로 생성 단계

자율이동로봇의 경로계획에 필요한 골격선 그래프를 생성하기 위한 여러 가지 방법들이 발표되었다. 세션화 알고리즘[5]은 영상처리 과정의 하나인 골격화에 사용되는 방법으로서, 경로계획 문제의 그래프를 구하는 데 효과적으로 적용될 수 있다. 세션화 알고리즘을 적용한 골격선 그래프구성은 그림 2에 나타내었다.

다음으로 세션화 알고리즘으로 구한 골격선 그래프에서 시작점에서 목표점에 이르는 최단 경로를 탐색해야 한다. 골격선 그래프에서 나타나는 노드를 경유점으로 하여 각 노드들 간의 거리를 구하여 디스트라알고리즘을 이용하여 골격선 그래프에서 초기 경로를 생성한다.



<그림 1> 동특성 모델

### 2.3.2 경로 개선 단계

경로 생성 단계에서 생성한 초기 경로는 장애물을 충돌하지 않는 경로를 생성하지만 최적에 가까운 경로는 아니다. 경로 개선 단계에서는 초기 경로를 이동거리와 이동시간 측면에서 경로를 개선하여 좀 더 최적으로 가깝게 개선하는 방법에 대해 다룬다.

경로 개선 단계는 초기 경로에서 각 경유점들의 위치를 바꾸면서 이동 거리를 단축시키는 단계이다. 초기 경로  $p = \langle v_1, \dots, v_M \rangle$  일 때 시작점  $v_1$  및 목표점  $v_M$ 을 제외한 나머지 경유점들의 위치를 변경 시키면서 이동거리를 계산 한다. 경유점들의 위치는 그림 3과 같이 각 경유점들 중심으로  $W \times W$ 개의 정방형 격자를 생성하고 각 격자점들은  $v_k (k=2, \dots, M-1)$  를 중심으로  $v_{k,1}, \dots, v_{k,W^2}$  이라 표시한다. 격자 지도상의 다른 격자점으로 경유점이 변경 될 경우 총 이동거리가 단축 될 수 있다.

또한 그림 3에서 임의의 경유점  $v_k$ 에서 다음 경유점  $v_{k+1}$ 의 각을  $\phi_k$ 라 할 때  $v_k$ 를 중심으로 각 정방형 격자의 각은  $\phi_{k,1}, \dots, \phi_{k,W^2}$ 로 표시한다. 만일  $|\phi_{k,l}| > |\theta_T|$ 가 되면, 조향을 할 수 없게 되므로 속도를 줄여야 하고 이는 총 이동시간에 영향을 준다. 따라서 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$|\phi_{k,l}| \leq |\theta_T|, (\phi_{k,l} = \phi_{k,1}, \dots, \phi_{k,W^2}) \quad (8)$$

만일 경유점  $v_k$ 를 포함하여 모든 정방형 격자에 대해 식(8)의 조건이 만족하지 않으면,  $v_k$ 를 기준으로 새로운 경유점  $v'_k$ 을 추가한다. 이는 최대회전조향각  $\theta_T$ 의 범위 내에서 이동할 수 있는 경로를 생성해 줌으로써 이동로봇의 속도를 감속 없이 이동 할 수 있게 해준다.

격자점을 선택하는 문제는 동적 프로그래밍 알고리즘을 적용한다. DP의 적용을 위해서는 스테이지(stage)와 스테이트(state)로 구성된 탐색 평면이 필요하며, 탐색평면은  $M$ 개의 경유점  $v_1, \dots, v_M$ 을 스테이지로 하고, 각 경유점  $v_k$ 에 대한  $W^2$ 개의 격자점  $v_{k,1}, \dots, v_{k,W^2}$ 을 스테이트로 구성한다. 시작점에서 격자점  $v_{k,\alpha}$ 까지의 최소 누적 거리를  $d_{k,\alpha}^*$  표시하고, 격자점  $v_{k,\alpha}$ 와  $v_{k+1,\beta}$ 사이의 거리를  $d_{(k,\alpha)(k+1,\beta)}$ 라 표시한다.

경로 개선 알고리즘은 다음과 같다.

- S1. 현재 스테이지 카운터  $k=1$ , 경로의 경유점 카운터를  $c=1$ 로 하고,  $v_k = v_c$  최소누적거리  $d_{1,1}^* = 0$ 으로 설정한다.
- S2. 만약 현재 스테이지에서 모든 격자점의  $|\phi_{k,l}| > |\theta_T|$ 를 만족하면, S4로 이동한다.
- S3.  $c$ 를 1증가시켜  $v_k = v_c$ 로 설정하고 S5로 이동한다.
- S4. 새로운 경유점  $v'_k$ 를 구하고, 스테이지 카운터  $k$ 를 1증가시키고 스테이지의 중심점을  $v_k = v'_{k-1}$ 로 설정한다.
- S5. 각 격자점  $v_{k,\alpha}$ 에 대한 최소누적거리  $d_{k,\alpha}^*$ 를 다음과 같이 계산하여 저장한다.

$$d_{k,\alpha}^* = \min_{\beta} (d_{k-1,\beta}^* + d_{(k-1,\beta)(k,\alpha)}) \quad (9)$$

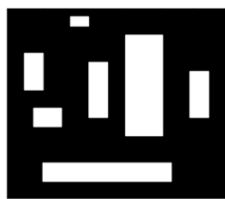
$d_{k,\alpha}^*$ 가 생성되는  $\beta$  값을 지시자  $\pi_{k,\alpha}$ 로 저장한다.

- S6. 경유점 카운터  $c$ 가  $M$ 과 같지 않으면 S2로 이동한다.
- S7.  $M=k$ 로 설정하고 스테이지를  $M$ 부터 2까지 감소시키면서 지시자를 역 추적하며, 각 스테이지의 최적 격자점  $v_k^*$ 을 찾는다. 개선 경로  $p'$ 는 각 스테이지의 최적 격자점으로 다음과 같이 구성된다.

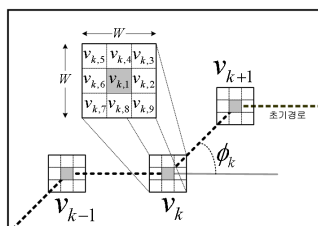
$$p' = \langle v_1, v_2^*, \dots, v_{M-1}^*, v_M \rangle \quad (10)$$

- S8. 개선 경로의 경유점을 중심으로 다시 격자지도를 구성하여, 일정값 이상의 경로 개선이 없을 때 까지 S1-S7의 과정을 반복한다.

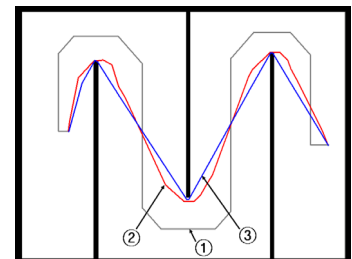
위의 알고리즘을 사용하여 경로를 개선하면 최대회전조향각 범위 내에서 최단 경로를 생성하게 된다.



<그림 2> 골격선 그래프 구성



<그림 3> 격자지도 예



<그림 4> 경로비교

### 3. 시뮬레이션

제안한 경로계획 방법의 성능을 평가하기 위해서 시뮬레이션을 수행 하였다. 먼저 자율이동로봇의 이동속도는  $1m/sec$ , 가속도는  $0.1m/sec^2$ 이며 최대 조향각  $|\theta_{max}| = 45^\circ$ 로 설정하였다. 비교방법으로는 경로 생성 단계 에서 사용하는 골격선 그래프를 이용하여 생성한 경로, 조향각을 고려하지 않고 동적경로계획법으로 거리를 단축시킨 방법, 마지막으로 조향각을 고려한 제안방법을 이동거리 및 이동시간에 대하여 비교하였다.

그림 4는 시뮬레이션한 맵에서 각각의 방법에 의해 생성된 경로를 나타낸다. 먼저 ①은 골격선 그래프로 구한 경로이며, ②는 조향각을 고려하지 않고 거리를 최소화한 경로이다. ③은 제안한 방법에 의해 생성된 경로이며, ②의 경로에 비해 완만하게 (smooth)경로가 생성된 것을 볼 수 있다.

표 1은 그림 4에서 각 방법에 의해 생성된 경로의 이동거리와 이동시간을 나타내고 있다. 이동 거리는 두 방법에 비해 동적경로계획방법이 가장 짧은 거리의 경로를 생성한다. 그러나 이동시간을 보면 제안방법이 다른 두 방법 보다 더 빠른 것을 확인할 수 있다. 이는 자율이동로봇의 동특성을 고려하여 속도에 따른 최대조향각의 범위 안에서 경로를 생성 하였기에 시간을 단축 할 수 있었다.

따라서 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 방법이 경로의 거리와 시간을 모두 단축시키는 것을 확인할 수 있다.

<표 1> 경로 비교

	골격선그래프	동적경로계획	제안방법
이동 거리 [m]	672	434	456
이동 시간 [sec]	693	495	461

### 4. 결 론

본 논문은 자율이동로봇의 경로계획방법을 제안하였다. 제안방법은 자율이동로봇의 동특성을 고려하여 그래프 생성 후 경로를 개선하는 과정이 포함된 방법이다. 초기 경로는 센서화 기법으로 골격선 그래프를 작성하여 생성하고, 이를 로봇의 이동속도에 따른 최대회전조향각을 고려하여 동적 프로그래밍으로 경로를 개선하였다. 기존 동적경로계획방법에 비해 이동 시간을 단축 할 수 있었으며 시뮬레이션을 통해 성능을 확인 하였다.

제안한 방법은 다양한 환경과 특성이 다른 이동로봇의 경로계획 시스템에서 이동시간을 단축시키는데 효과적으로 적용할 수 있으리라 기대 된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J. Latombe, Robot Motion Planning, Kluwer academic publishers, 1996.
- [2] Kurt Konolige, "A gradient method for realtime robot control," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems, pp.639-646, 2000.
- [3] 함중규, 송재복, 정우진, "위상정보를 갖는 구배법에 기반한 이동로봇의 고속 경로계획," 제어자동화시스템공학논문지, 제12권, 제5호, pp.444-449, 2006.
- [4] 윤희상, 유진오, 박태형, "자율이동로봇을 위한 동적 경로 계획 방법," 제어로봇시스템학회논문지, 제14권, 제4호, pp.392-398, 2008.
- [5] E. R. Davies, Machine Vision, 3rd Edition, Morgan Kaufmann publishers, 2004.
- [6] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, et al, Introduction to Algorithms, 2nd Ed., The MIT Press, 2001.