

자율이동로봇을 위한 동적 경로 계획 방법

Dynamic Path Planning for Autonomous Mobile Robots

윤희상, 유진오, 박태형*
(Hee-Sang Yoon, Jin-Oh You, and Tae-Hyoung Park)

Abstract : We propose a new path planning method for autonomous mobile robots. To maximize the utility of mobile robots, the collision-free shortest path should be generated by on-line computation. In this paper, we develop an effective and practical method to generate a good solution by lower computation time. The initial path is obtained from skeleton graph by Dijkstra's algorithm. Then the path is improved by changing the graph and path dynamically. We apply the dynamic programming algorithm into the stage of improvement. Simulation results are presented to verify the performance of the proposed method.

Keywords : robot path planning, autonomous mobile robots, dynamic programming, path optimization, local search

I. 서론

자율이동로봇은 자신의 위치와 장애물 등 주변의 환경을 인지하여 원하는 지점까지 스스로 이동할 수 있는 로봇이다. 자동화 공장에서 물류처리를 담당하는 무인운반차(Automatic Guided Vehicle, AGV)가 대표적인 예이다. 최근에는 청소로봇, 안내로봇, 감시로봇 등 다양한 서비스 로봇에 자율이동기능이 포함되어 있다.

자율이동로봇의 주행성능을 높이기 위해서, 현재 지점에서 목표 지점까지 최단 시간에 이동할 수 있는 경로를 생성하는 경로계획 기능이 필수적이다. 그림 1은 자율이동로봇을 위한 경로계획 문제의 예를 보여준다. 시작점, 목표점, 장애물의 위치 및 크기 정보가 주어진 상태에서, 시작점에서 목표점에 이르는 최단 경로를 생성하는 문제이다. 무수히 존재하는 이동 가능 경로 중 총 이동거리가 최소화되는 최적 경로를 찾아내는 문제로서, 이에 대한 많은 연구가 수행되었다.

자율이동로봇의 경로계획에 관한 연구는 크게 포텐셜 필드 방식, 셀 분해 방식 및 로드 맵 방식으로 구분한다[1]. 셀 분해 방식 [2]은 전체 영역을 여러 개의 셀(격자)로 분할시키고, 로봇이 이동할 셀의 조합을 선택하여 경로를 생성하는 방법이다. 최단 경로를 구하기 위해서는 셀의 크기가 작아져야 하며, 이 때 계산시간이 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 포텐셜 필드 방식 [3,4]은 공간상의 각 점에 대하여 포텐셜 함수 또는 주행 함수 값을 구하고, 이 값을 최대화 또는 최소화시키는 방향으로 장애물 회피 경로를 생성시키는 방법이다. 작업영역 전체에 대한 그래프 구성이 불필요하며, 온라인의 경로 생성이 가능하다. 그러나 국지적 탐색으로 인하여 최단 거리 경로를 생성하기 어렵다. 로드 맵 방식 [5]은 주어진 환경으로부터 정점(vertex)과 간선

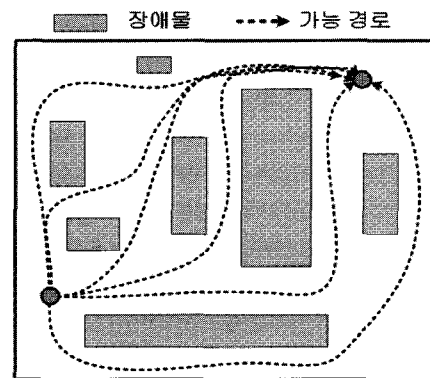
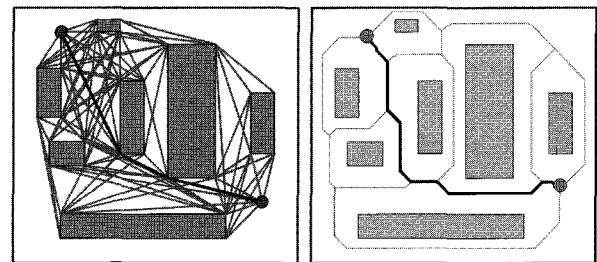


그림 1. 경로계획 문제.
Fig. 1. A path planning problem.



(a) Visibility graph based (b) Skeleton graph based

그림 2. 경로계획 방법.
Fig. 2. Path planning methods.

(edge)으로 구성되는 그래프 지도를 구성하고, 그래프 탐색을 통하여 경로를 생성하는 방법이다. 그래프 지도를 구성하기 위하여 별도의 알고리즘이 필요하나, 최단 거리 경로의 생성 측면에서는 가장 우수한 방법으로 알려져 있다.

또한 최근에는 각 기본 방식들의 장점을 혼합하여 만든 하이브리드 방식들이 제안되었다. 포텐셜 필드 방식에 전역 탐색 기법을 도입한 구배법(gradient method) [6] 및 구배법의 계산시간 단축을 위하여 그래프 지도를 도입한 방법 [7]도 있다. 또한 로드 맵 방식에 신경망 기법을 도입한 방법

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2007. 9. 27., 채택확정 : 2008. 1. 29.
윤희상, 박태형 : 충북대학교 제어계측공학과
(nada621@chungbuk.ac.kr/taehpark@cbnu.ac.kr)
유진오 : (주)에버테크노(joy9148@hotmail.com)
※ 본 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

[8]도 제안되었다.

본 논문은 최단 거리 경로계획을 목표로 하여 로드 맵 방식 기반의 새로운 경로계획방법을 제안한다. 로드 맵 방식 기반의 방법은 그래프 지도 구성 방법에 따라 다시 가시도 그래프 기반의 방법과 골격선 그래프 기반의 방법으로 구분될 수 있다. 가시도 그래프 기반의 방법 [9]은 그림 2(a)와 같이 장애물의 꼭지점을 정점으로 하고, 가시성(visibility)이 확보된 정점들 사이를 간선으로 하는 그래프를 작성하여 경로를 탐색하는 방법이다. 최단 경로에 근사한 경로를 생성할 수 있으나, 장애물 수의 증가에 따라 그래프 정점 및 간선의 수가 기하급수적으로 증가하여, 장애물이 많은 복잡한 환경의 문제에 적용하기 어렵다.

골격선 그래프 기반의 방법 [10,11]은 그림 2(b)와 같이 장애물들 사이를 지나가는 골격선으로 그래프를 구성하고, 경로를 탐색하는 방법이다. 세션화 알고리즘, 보르노이 알고리즘 등을 적용하여 그래프를 생성할 수 있으며, 디스트라 알고리즘 또는 A* 알고리즘 등을 적용하여 경로를 탐색할 수 있다. 적은 계산 시간으로 그래프의 생성 및 경로 탐색이 가능하나, 총 이동 경로의 단축 측면에서는 효율이 떨어지는 방법이다. 일반적으로 최단 경로는 장애물 사이의 중심선 또는 골격선을 통과하는 것이 아니라, 장애물의 모서리에 근접한 부분을 통과하기 때문이다.

경로의 생성방법은 적은 계산 시간이 소요되는 골격선 그래프 기반의 방법으로 접근하되, 해의 효율을 높이기 위한 단계를 추가시킨다. 한 번의 그래프 구성과 경로탐색으로 최종경로를 생성하는 기존의 정적 경로계획 방법이 아니라, 그래프 구성과 경로탐색을 반복하여 그래프와 경로를 계속 변화시키는 동적 경로계획 방법이다. 제안하는 방법은 경로 생성 단계와 경로 개선 단계로 구성된다. 각 단계는 그래프 구성과 경로 탐색 과정을 포함한다. 경로 생성 단계에서는 기존의 방법과 같이 세션화 알고리즘으로 골격선 그래프를 구성하고, 디스트라 알고리즘을 적용하여 경로를 탐색하여 이동로봇의 초기 경로를 생성한다. 경로 개선 단계에서는 동적 프로그래밍(Dynamic Programming, DP) 알고리즘을 적용하여, 그래프 및 경로를 동시에 개선시킨다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 경로 계획 문제를 정의하며, 3장은 제안된 경로 계획 방법을 설명한다. 4장은 시뮬레이션 결과를 제시하고 제안된 방법의 성능을 평가한다.

II. 경로 계획 문제

자율이동로봇의 경로 계획 문제를 정의한다. 이차원 평면에 존재하는 로봇의 현재 위치를 시작점 $s \in R^2$ 라 정의하고, 도달하고자 하는 목표 위치를 목표점 $g \in R^2$ 라 정의한다. 시작점과 목표점 사이에는 다음과 같이 사각형으로 표현되는 N 개의 장애물 O_1, \dots, O_N 이 존재한다.

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

단, l_i 및 r_i 는 장애물의 좌한 및 우한 값이며, b_i 및 t_i 는 장애물의 하한 및 상한 값이다.

이동로봇은 일정 영역을 차지하는 구조물이므로, 이동경로 또한 영역의 이동으로 표현되어야 하나, 경로 계획을 용이하게 하기 위하여 점의 이동으로 표현한다. 이때 장애물과 로봇의 간섭을 고려하기 위하여, (1)의 장애물 영역에 로봇이 차지하는 영역이 포함되어 있다고 가정한다. 로봇의 이동경로 p 는 다음과 같이 시작점과 목표점 사이에 존재하는 경유점 $v_k \in R^2$ ($k = 1, \dots, M$)들의 순열 집합으로 표현될 수 있다.

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

단, $v_1 = s$, $v_M = g$ 이다. 간선 (v_k, v_{k+1}) 을 경유점 v_k 와 v_{k+1} 을 연결하는 직선이라 정의하면, 다음의 장애물 회피 조건이 만족되어야 한다.

$$(v_k, v_{k+1}) \not\subseteq O_i, \forall i \in \{1, \dots, N\}, k = 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

주어진 시작점, 목표점 및 장애물에 대하여 무수히 많은 이동경로가 존재할 수 있으며, 최단 거리의 이동경로를 찾는 것이 본 경로계획 문제이다. 간선 (v_k, v_{k+1}) 의 길이를 $d(v_k, v_{k+1})$ 라 하면, 이동경로의 총 길이는 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^{M-1} d(v_k, v_{k+1}) \quad (4)$$

즉, 자율이동로봇의 경로계획 문제는 (4)를 최소화시키며, (3)의 조건을 만족시키는 (2)의 경로를 찾는 최적화 문제이다.

III. 경로 계획 방법

정의된 경로 계획 문제는 매우 복잡한 최적화 문제로서 제한된 시간 내에 최적의 해를 구하는 해법을 찾는 것은 매우 어렵다. 복잡한 최적화 문제의 해법으로서 널리 사용되는 방법 중에 하나가 국지적 최적화(local optimization) 기법 [12]이다. 초기 해를 적절히 구하고, 이를 반복적으로 개선하여 최적해에 접근시키는 방법이다. 적은 계산 시간으로 합리적인 수준의 해를 구할 수 있으므로, 다양한 응용문제에 적용되고 있는 실용적인 방법이다.

본 논문은 자율이동로봇의 경로 계획 문제에 국지적 최적화 기법을 적용한다. 전체의 단계는 초기 경로를 생성하는 경로 생성 단계와 경로를 개선하는 경로 개선 단계로 구분한다. 경로 생성 단계는, 기존의 경로 계획 방법에 많이 사용되는 골격선 기반의 그래프 탐색 방법을 적용하여 하나의 초기 경로를 생성한다. 경로 개선 단계는 새로이 동적 프로그래밍 기법을 적용하며, 생성된 경로를 반복적으로 개선하여 이동거리를 단축시킨다.

1. 경로 생성 단계

1.1 그래프 구성

시작점, 목표점 및 장애물이 주어진 이차원 공간에서, 다음의 정점의 집합 Γ 과 간선의 집합 Δ 로 구성되는 그래프 (Γ, Δ) 를 구성하는 단계이다.

$$\Gamma = \{n_1, n_2, \dots, n_r\} \quad (5)$$

$$\Delta = \{(n_i, n_j) | i \neq j, n_i, n_j \in \Gamma, (n_i, n_j) \notin O_k, \forall k \in \{1, \dots, N\}\} \quad (6)$$

(6)은 모든 간선과 장애물은 서로 간섭하지 않아야 함을 의미한다.

자율이동로봇의 경로계획에 필요한 골격선 그래프를 생성하기 위한 여러 가지 방법들이 발표되었다. 세션화 알고리즘(thinning algorithm) [13]은 영상처리 과정의 하나인 골격화에 사용되는 방법으로서, 구현이 쉽고 처리 속도가 우수하여, 경로계획 문제의 그래프를 구하는 데 효과적으로 적용될 수 있다. 세션화 알고리즘을 적용하여 그래프를 구성하는 과정은 다음과 같으며, 그림 3은 알고리즘 적용의 예를 보여준다.

S1: 장애물을 포함한 평면을 비트맵 형식의 흑백 영상 데이터 $b(x, y)$ ($1 \leq x \leq B_x, 1 \leq y \leq B_y$)로 변환시킨다. (그림 3(a)) 이 때 장애물 영역 내부의 화소값은 0 (백) 이고, 장애물 영역 외부의 화소값은 1 (흑)로 설정한다, 즉

$$b(x, y) = \begin{cases} 0, & (x, y) \in O_k \quad (k = 1, \dots, N) \\ 1, & (x, y) \notin O_k \quad (k = 1, \dots, N) \end{cases} \quad (7)$$

S2: 좌표 (x, y) 에 대하여, $b(x, y) = 1$ 이고, 인접한 8 개 화소값 으로부터 구한 골격선 계수 [9]가 기준치에 해당하면 $b(x, y) = 0$ 으로 변경한다. x 와 y 를 증가시키며, 모든 화소에 대하여 수행한다.

S3: 화소값 $b(x, y)$ 가 더 이상 변경되지 않을 때 까지 S2를 반복하여 수행하여 (그림 3(b),(c)), 골격선 만으로 구성된 이진 비트맵 데이터를 구한다(그림 3(d)).

S4: 골격선의 분기점들을 찾아 정점의 집합 Γ 를 구성하고, 분기점 사이의 간선으로 간선 집합 Δ 를 구성한다.

위 알고리즘의 수행에 소요되는 계산 시간은 화소의 총수에 비례하여 $O(B_x B_y)$ 로 표현될 수 있다. 즉 화소의 총수는 평면의 크기 및 개별 화소의 크기에 따라 달라진다.

1.2 경로 탐색

구성된 그래프에 대하여, 시작점에서 목표점에 이르는 최단 경로를 찾는 단계이다. 간선 길이의 총합이 최소화 정점들의 순서 조합을 찾는 문제로서, 전형적인 최단경로문제(shortest path problem)에 해당한다. 최단경로문제는 대표적인 선형정수계획 문제로서, 최적해를 구하는 해법이 널리 알려져 있다. 디스트라(Dijkstra) 알고리즘 [14]은 최단경로 문제의 해를 구하는 대표적인 알고리즘으로서, 구현이 용이하고 최적의 해를 구함이 입증되어 있다. 디스트라 알고리즘을 적용한 경로 탐색 과정은 다음과 같다.

S1: 그래프 (Γ, Δ) 를 구성하는 정점 $n_i (i = 1, \dots, \gamma)$ 에 대하여, 시작점으로부터의 누적거리 σ_i 및 직전에 통과한 정점을 가리키는 포인터 π_i 를 정의하고, 모든 정점에 대하여 $(\sigma_i, \pi_i) = (\infty, 0)$ 으로 초기화 한다. 또한 각 간선 $(n_i, n_j) \in A$ 의 길이 d_{ij} 를 구하여 저장시킨다.

S2: 누적거리 σ_i 가 최소인 정점 n_i 를 찾는다. 정점 n_i 와 간선으로 직접 연결된 모든 정점 n_j 에 대하여, 새로운 누적거리를 다음과 같이 계산한다.

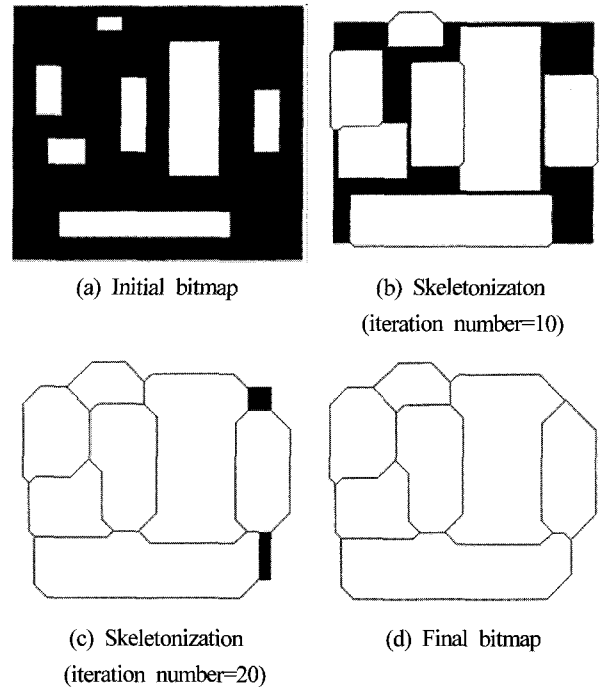


그림 3. 그래프 구성 과정 예.
Fig. 3. Steps of graph generation.

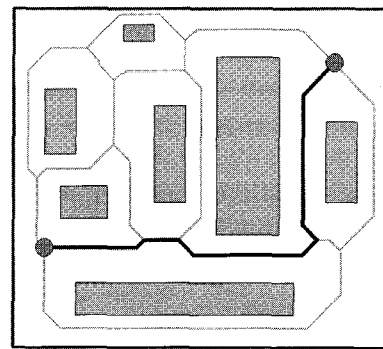


그림 4. 초기 경로 예.
Fig. 4. Initial path.

$$\sigma'_j = \sigma_i + d_{ij} \quad (8)$$

이 값이 기존의 누적거리 σ_j 보다 작으면, 누적거리 및 포인터를 $(\sigma_j, \pi_j) \leftarrow (\sigma'_j, i)$ 로 갱신한다.

S3: 모든 정점이 최소의 누적거리를 갖는 정점으로 선택될 때까지, S2를 반복하여 수행한다.

S4: 목표점으로부터 포인터를 역으로 추적하여 경로를 생성한다. 경로에 포함된 정점이, (2)에서 정의한 경유점이 되며, 이로부터 초기 경로 $p = \langle v_1, \dots, v_M \rangle$ 를 구성한다.

그림 4는 경로탐색으로 생성된 초기 경로의 예를 보여준다. 그래프 정점의 총수가 γ 이고 간선의 총수가 δ 인 경우, 디스트라 알고리즘의 계산시간은 $O(\gamma \log_2 \gamma + \delta)$ 이며[14], 본 경로탐색 알고리즘의 계산시간과 동일하다. 정점 및 간선의 총 수는 평면 내에 존재하는 장애물의 수량 및 배치에 따라 달라진다.

2. 경로 개선 단계

장애물을 포함한 전체 평면의 골격선으로 그래프를 구성하고, 이 그래프 상에서의 최단 경로가 초기 경로이다. 즉, 초기 경로를 구성하는 경유점들은 반드시 골격선에 포함되어 있어야 한다. 그러나 경유점들이 골격선에서 벗어난 위치에 존재하는 것이, 경로 단축에 유리할 수 있다. 경로 개선 단계는 초기 경로를 구성하는 경유점들의 위치를 변경하여, 이동거리의 총합을 단축시키는 단계이다.

본 논문은 골격선 그래프 상에 생성된 경로를 개선시키기 위하여 격자지도(grid map)를 도입한다. 초기 경로 $p = \langle v_1, \dots, v_M \rangle$ 를 구성하는 경유점 중 시작점 v_1 및 목표점 v_M 을 제외한 나머지 경유점 v_2, \dots, v_{M-1} 에 대하여, 각 경유점을 중심으로 한 평면에 $W \times W$ 개의 정방형 격자를 그림 5와 같이 구성한다. 이 때 경유점 $v_k (k=2, \dots, M-1)$ 를 중심으로 한 격자점들을 $v_{k,1}, \dots, v_{k,W^2}$ 이라 표시한다. 경유점이 격자지도 상의 다른 격자점으로 변경되는 경우, 전체 이동거리가 단축될 수 있다.

격자지도에서 최적의 격자점을 선택하는 문제 또한 최적화 문제로서, 동적 프로그래밍(Dynamic Programming, DP) 알고리즘을 적용한다. DP는 최적성의 원리 [8]에 의하여 최적성이 입증된 최적화 기법으로서, 광범위한 범주의 최적화 문제에 널리 활용되고 있다[15-17]. DP의 적용을 위해서는 스테이지(stage)와 스테이트(state)로 구성된 탐색평면이 필요

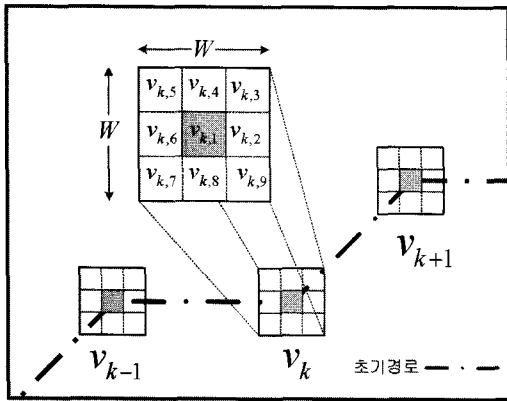


그림 5. 경로 개선을 위한 격자지도.

Fig. 5. Grid map for path improvement.

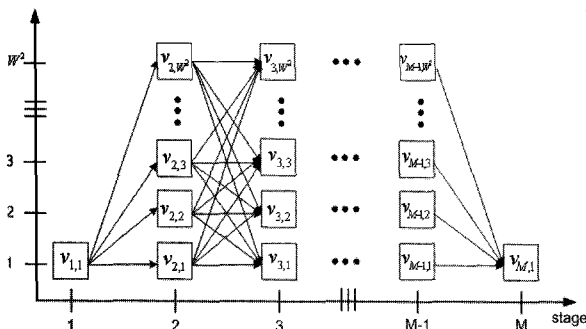


그림 6. 동적 프로그래밍을 위한 탐색평면.

Fig. 6. Search plane for dynamic programming.

하며, 그림 6은 그림 5의 격자그래프로부터 구성된 탐색평면을 보여준다. 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 하는 탐색평면이다. 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: 스테이지 $k=1$ 에 대하여 최소누적거리 $d_{1,1}^*=0$ 으로 설정한다.

S2: 스테이지를 $k=2, \dots, M-1$ 로 증가시키면서, 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 β 값을 지시자 $\pi_{k,\alpha}$ 로 저장한다.

S3: 최종 스테이지 $k=M$ 에 대하여, 시작점부터 목표점까지의 최소누적거리 $d_{M,1}^*$ 를 (9)와 같이 구하고 지시자 $\pi_{M,1}$ 을 저장한다.

S4: 스테이지를 $k=M, \dots, 2$ 로 감소시키면서 지시자를 역 추적하며, 각 스테이지의 최적 격자점 v_k^* 을 찾는다. 개선 경로 p' 는 각 스테이지의 최적 격자점으로 다음과 같이 구성된다.

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

S5: 개선 경로의 경유점을 중심으로 다시 격자지도를 구성하여, 일정값 이상의 경로 개선이 없을 때 까지 S1-S4의 과정을 반복한다.

그림 7은 위의 알고리즘을 적용하여 경로가 개선되는 과정의 예를 보여준다. 반복횟수가 증가함에 따라 경로가 개선되어 총 이동거리가 단축됨을 알 수 있다.

S1-S4의 DP 수행에 소요되는 계산시간은 스테이지 수에 스테이트 수의 제곱을 곱한 값에 비례한다. 경로 개선 단계의 알고리즘에 설정된 스테이지의 수는 경유점의 수 M 이

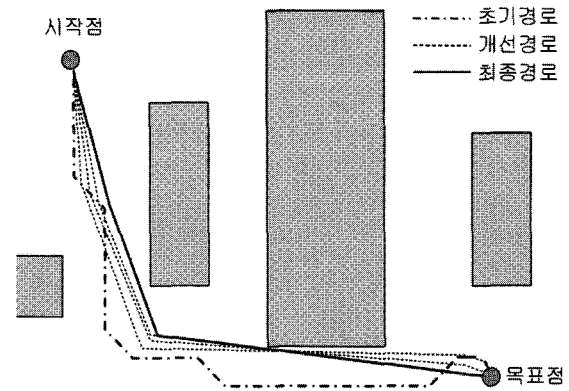


그림 7. 경로 개선 예.

Fig. 7. Example of path improvement.

며, 스테이트의 수는 각 격자그래프에 포함된 격자점의 수 W^2 이다. 따라서 계산시간은 $O(MW^4)$ 으로 표현될 수 있다. 경유점의 수 M 은 그래프 정점의 수에 비하여 훨씬 작은 값이며, 격자 수 W 는 약 3~5 정도의 값으로 설정되므로, 충분히 빠른 시간 내에 계산될 수 있다. 또한 S5의 반복횟수는 수 회 내지 수십 회 이내로서 전체 계산 시간에 큰 영향을 미치지 못한다.

전체 경로 계획 알고리즘에 있어서, 경로 생성 단계에서 소요되는 계산시간은 장애물의 수량에 가장 크게 영향을 받으며, 경로 개선 단계에서 소요되는 계산 시간은 설정된 격자의 수에 가장 큰 영향을 받는다. 전체 알고리즘의 계산 시간은 경로 생성 단계의 계산 시간 $O(\gamma \log_2 \gamma + \delta)$ 과 경로 개선 단계의 계산 시간 $O(MW^4)$ 중 큰 값으로 표현될 수 있으며, 주어진 장애물들의 수량 및 배치, 설정된 격자의 수에 따라 달라진다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안한 경로계획 방법의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 알고리즘은 IBM-PC Pentium IV급(2.8 GHz) MS-Windows XP상에서 Microsoft Visual C++을 사용하여 프로그램으로 구현되었다.

13,000(mm)x10,000(mm) 크기의 평면에 다양한 크기의 장애물 5-230개를 배치하여 경로를 생성하였다. 경로 생성 단계의 그래프 구성 단계에서 필요한 비트맵 데이터의 총 화소 수는 $B_x \times B_y = 640 \times 480$ 로 설정하였다. 경로 개선 단계에 사용되는 격자 지도의 단위격자의 크기는 100(mm)x100(mm)로 설정하였으며, 격자 수 $W \times W$ 는 3x3로 설정하였다. 주어진 조건에 따라 다소 차이가 있으나 약 30 회 정도 반복 한 후 개선 과정이 종료되었다. 격자수가 증가하는 경우 반복 횟수는 단축되나 계산시간이 증가하므로, 실험을 통하여 적절한 값을 선택하였다.

제안된 방법의 성능을 비교 평가하기 위하여 다른 경로 계획 방법을 구현하였다. 기존에 발표된 대표적인 경로계획 방법인 골격선 그래프를 사용하는 방법과 가시도 그래프를 사용하는 방법 각 하나 씩을 구현하였다. 골격선 그래프를 사용한 방법 중 세선화를 적용한 방법은 본 논문의 초기 경로 생성 단계에서 이미 구현되었다. 세선화 알고리즘으로 골격선 그래프를 구성하고, 디스트라 알고리즘으로 최단 경로를 탐색하였다. 가시도 그래프를 사용하는 방법은 별도로 구현되었다. 모든 장애물의 네 꼭지점을 정점으로 하고, 가시거리에 있는 정점과 정점 사이를 간선으로 하는 그래프를 구성하였다. 구성된 그래프에 디스트라 알고리즘을 적용하여 최단 경로를 탐색하였다.

표 1은 각 방법으로 생성된 경로의 총 이동거리를 비교하여 보여 준다. 장애물의 수가 다른 다양한 경로 계획문제에 적용하여 결과를 비교하였다. 제안 방법은 골격선 방법의 결과를 개선시키는 방법으로서, 평균 13% 정도의 경로 단축 효과가 있음을 확인하였다. 가시도 방법은 경로 단축 효과가 매우 뛰어난 방법으로 알려져 있다. 제안 방법을 적용한 경우, 가시도 방법을 적용한 경우 대비 평균 1.4% 정

도의 총 이동거리만 증가하였음을 볼 수 있다. 제안한 방법은 가시화 방법과 근사한 수준의 경로 단축 효과를 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 장애물의 수와 경로 단축효과는 큰 상관관계가 없었다.

표 2는 각 방법으로 경로를 생성하는 데 소요되는 계산 시간을 비교하여 보여 준다. 골격선 방법에 비하여 가시도 방법의 계산시간이 장애물의 수에 의거 매우 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 이는 장애물 각 꼭지점을 연결하는 간선의 수가 장애물의 수에 따라 기하급수적으로 증가하기 때문이다. 제안 방법의 계산시간은 골격선 방법의 계산시간과 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. 이는 골격선 방법에 추가된 경로 개선 단계의 DP 알고리즘이 전체 계산시간에 별

표 1. 총 이동거리 비교.

Table 1. Comparison of total distance.

장애물 개수	총 이동거리 [mm]			개선율 [%]	
	가시도 방법	골격선 방법	제안 방법	가시도 방법 대비	골격선 방법 대비
5	611	767	642	-5.07	16.30
10	912	977	890	2.14	8.90
20	1024	1236	1037	-1.27	16.10
35	732	963	767	-4.78	20.35
55	1058	1199	1056	0.19	11.93
80	915	1114	939	-2.62	15.71
110	1062	1209	1062	0	12.16
145	900	1032	912	-1.33	11.63
185	1106	1239	1110	-0.36	10.41
230	1155	1294	1165	-0.87	9.97
평균				-1.40	13.35

표 2. 계산 시간 비교.

Table 2. Comparison of computational time.

장애물 개수	계산 시간 [sec]		
	가시도 방법	골격선 방법	제안 방법
5	0.56	0.52	0.56
10	1.08	0.75	0.80
20	8.75	1.05	1.11
35	22.70	1.44	1.50
55	46.52	2.13	2.20
80	89.19	2.75	2.85
110	150.97	3.78	3.86
145	275.56	4.83	4.92
185	418.58	5.94	6.00
230	594.56	7.59	7.69

영향을 주지 않음을 의미한다.

결과적으로 본 시뮬레이션 결과는 제안된 방법이 경로 단축을 측면에서는 가시도 방법에 근사하고, 소요 계산시간 측면에서는 골격선 방법에 근사한 방법임을 입증한다.

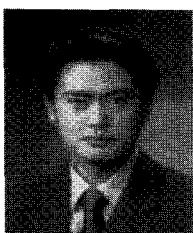
V. 결론

자율이동로봇의 효율적인 경로 계획을 위하여, 기존의 로드 맵 방식에 셀 분해 방식을 추가한 새로운 방법을 제안하였다. 기존의 방법들이 그래프 생성 후, 그래프를 고정 시킨 상태에서 경로를 탐색하는 정적 계획 방법인데 반하여, 본 제안 방법은 생성된 그래프 및 경로를 동시에 변경시키는 과정이 추가된 동적 계획 방법이다. 또한 한 번 경로를 생성하고 종료되는 것이 아니라, 생성된 경로를 계속 개선시켜 나가는 방법이다. 이를 위하여 동적 프로그래밍 기법을 적용하였다. 기존 방법 대비 상대적으로 적은 계산 시간으로 상대적으로 짧은 이동거리의 경로를 생성함을 비교 시뮬레이션으로 확인하였다.

제안 방법의 결과는 다양한 종류의 자율이동로봇의 경로 계획시스템에 적용될 있다. 특히 복잡한 작업환경에서 실시간으로 최단 경로를 생성하여야 하는 이동로봇에 효과적으로 적용될 수 있으리라 기대한다. 추후 연구를 통하여, 이동 로봇의 동력학적 특성을 고려한 경로계획 문제의 새로운 해법을 제시하고자 한다.

참고문헌

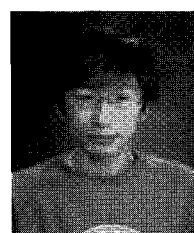
- [1] H. Choset, K. M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavraki, S. Thrun, *Principles of robot Motion*, MIT Press, 2005.
- [2] A. Elfes, "Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation," *IEEE Trans. on Computer*, vol. 22, no. 6, pp. 46-57, 1989.
- [3] R. Brooks, "Solving the find path problems by good representation of free space," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-13, no. 3, pp. 190-197, 1983.
- [4] K. P. Valavanis, T. Hebert, R. Kolluru, N. Tsourveloudis, "Mobile robot navigation in 2-d dynamic environments using an electrostatic potential field," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 30, no. 2, pp. 187-196, 2000.
- [5] N. Amato, Y. Wu, "A randomized roadmap method for path and manipulation planning," *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp. 113-120, 1996.
- [6] Kurt Konolige, "A gradient method for realtime robot control," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, pp. 639-646, 2000.
- [7] 함중규, 송재복, 정우진, "위상정보를 갖는 구배법에 기반한 이동로봇의 고속 경로계획," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 12 권, 제 5 호, pp. 444-449, 2006.
- [8] N. G., "Path planning in a 2-D known space using neural networks and skeletonization," *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 3, pp. 2001-2005, 1997.
- [9] N. S. Rao, S. S. Iyengar, "Autonomous robot navigation in unknown terrains: incidental learning and environmental exploration," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, no. 6, pp. 1443-1449, 1990.
- [10] S. Simhon, and G. Dudek, "A global topological map formed by local metric maps," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, pp. 1708-1724, 1998.
- [11] B. S. Ryu, and H. S. Yang, "Integration of reactive behaviors and enhanced topological map for robust mobile robot navigation," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 29, no. 5, pp. 237-250, 1999.
- [12] Z. Michalewicz, D. B. Fogel, *How to Solve It: Modern Heuristics*, Springer-Verlag, 2000.
- [13] E. R. Davies, *Machine Vision*, 3rd Edition, Morgan Kaufmann publishers, 2004.
- [14] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, et al, *Introduction to Algorithms*, 2nd Ed., The MIT Press, 2001.
- [15] T. H. Park, and B. H. Lee, "An approach to robot motion analysis and planning for conveyor tracking," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 22, no. 2, pp. 378-384, 1992.
- [16] T. H. Park, and N. Kim, "A dynamic programming approach to PCB assembly optimization for surface mounters," *Int. J. of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 192-199, 2007.
- [17] 이시웅, 최재각, 남재열, "동적 프로그래밍에 기반한 윤곽선 근사화를 위한 정점 선택 방법," 전자공학회는 문지, 제 41 권, 제 3 호, pp. 121-127, 2004.



윤희상

2004년 충북대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2006년 동 대학원 제어계측공학과(석사). 2006년~2007년 충북대 부설 유비쿼터스 바이오정보기술 연구센터 주임연구원. 2007년~현재 충북대 제어계측공학과 박사과정. 관심분야는 로

보틱스, 영상처리, 임베디드시스템 등.



유진오

2005년 충북대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2007년 동 대학원 제어계측공학과(석사). 2007년~현재 (주)에버테크노 연구원. 관심분야는 무인운반로봇, 반도체장비, 임베디드시스템 등.

**박 태 형**

1988년 서울대 제어계측공학과 졸업.
1992년 동 대학원 제어계측공학과(석사). 1994년 동 대학원 제어계측공학과(박사). 1994년~1997년 삼성 테크윈(주) 정밀기기연구소 선임 연구원. 1997년~현재 충북대 전기전자컴퓨터공학부 교

수. 2000년~2001년 Univ. of Toronto 방문교수. 관심분야는 로보틱스 및 자동화, 전자조립 및 검사 시스템 등.