

# 위상정보를 갖는 구배법에 기반한 이동로봇의 고속 경로계획

## High-Speed Path Planning of a Mobile Robot Using Gradient Method with Topological Information

함종규, 송재복\*, 정우진  
(Jong-Gyu Ham, Jae-Bok Song, and Woo Jin Chung)

**Abstract :** Path planning is a key element in navigation of a mobile robot. Several algorithms such as a gradient method have been successfully implemented so far. Although the gradient method can provide the global optimal path, it computes the navigation function over the whole environment at all times, which result in high computational cost. This paper proposes a high-speed path planning scheme, called a gradient method with topological information, in which the search space for computation of a navigation function can be remarkably reduced by exploiting the characteristics of the topological information reflecting the topology of the navigation path. The computing time of the gradient method with topological information can therefore be significantly decreased without losing the global optimality. This reduced path update period allows the mobile robot to find a collision-free path even in the dynamic environment.

**Keywords :** gradient method, path planning, topological information, mobile robot

### I. 서론

이동로봇이 실제 환경에서 자율주행을 수행하기 위해서는 로봇 스스로 주변환경을 모델링하여 지도를 작성하는 기능, 위치를 추정할 수 있는 기능, 목표점까지 이동하기 위하여 경로를 생성하는 기능 등이 기본적으로 필요하다. 이중 경로 계획은 로봇 스스로 장애물을 회피하며 목표위치까지 도달하기 위한 최적의 경로를 생성하는 것으로, 오랫동안 연구되어 온 중요한 연구 주제이다.

이동로봇의 경로계획에 대한 연구는 크게 로드맵(roadmap) 방식, 셀분할(cell decomposition) 방식, 포텐셜필드(potential field) 방식 등으로 크게 분류할 수 있다[1]. 로드맵 방식의 하나인 가시도 그래프(visibility graph) 방법의 경우 환경 형상에 따라 계산량이 기하급수적으로 증가하여 실제 환경에서 적용하기 어렵고, 셀분할 방식에서는 환경정보를 사전에 완벽히 알아야만 하는 문제 등으로 실제 경로계획에는 적용하기 어렵다. 포텐셜필드 방법의 경우는 경로가 국부최소(local minimum)에 빠지는 문제가 빈번히 발생하므로 목표점까지의 경로생성을 보장할 수 없는 단점이 있다[2].

현재 국부환경에서 일반적으로 사용되고 있는 경로계획법으로 Konolig가 제안한 구배법(Gradient Method, GM)이 있다 [3]. 이 방법은 로봇위치에서 목표위치까지의 최소비용을 계산하여, 전역적인 최적경로를 실시간으로 생성할 수 있으며

국부최소에도 빠지지 않는 장점을 가지고 있다. 그러나 최소비용의 계산에 있어서 실제 로봇이 주행하지 않는 불필요한 영역까지 함께 계산함으로써, 주행함수의 계산시간이 늘어나는 단점을 가지게 된다. 주행함수의 계산시간은 구배법에 있어서 총 시간의 70% 이상을 차지한다. 한편, 주행함수의 계산시간이 증가함에 따라 새로운 경로의 갱신이 늦어지고, 이는 동적 환경에서 실시간으로 최적의 경로를 생성하는 데 있어서 문제점을 초래하여 전체적인 주행 성능을 저하시키게 된다. 따라서 최적경로의 계획에 있어서 주행함수를 계산하여야 하는 영역을 줄일 수 있다면 더욱 빠른 주기로 경로를 생성하는 것이 가능해진다. 만약, 이동로봇이 빠른 경로갱신 주기를 갖게 된다면 동적 환경에서의 장애물 회피가 가능하고, 고속주행을 보장할 수 있는 장점을 갖게 되므로, 이는 매우 중요하다.

본 논문에서는 실시간으로 생성되는 위상정보(topological information)를 활용하여 최적경로가 포함될 수 있는 영역을 예측하고, 축소된 예측영역 내에서 구배법을 적용하는 GM/TI(Gradient Method with Topological Information) 기법을 제안한다. 여기서 위상정보는 격자지도를 대상으로 세션화 기법을 이용하여 작성되는 위상지도에서의 노드의 위치와 이들의 연결관계를 의미한다[4]. 로봇의 주행 시에 주행지도의 전체 영역이 아닌 축소된 계산영역 내에서 구배법을 수행함으로써 주행함수의 계산시간이 대폭 줄어들어 기존의 구배법에 비하여 빠르게 최적경로를 생성한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 구배법을 간략히 소개하며, 3장에서는 세션화 알고리즘을 사용하여 위상정보를 얻는 방법에 대하여 설명한다. 4장에서는 위상정보를 활용하여 검색영역을 축소하는 방법과 고속 경로계획을 하였을 때의 장점을 소개한다. 5장에서는 실제환경에서의 경로와 수행시간 등의 실험결과를 고찰하며, 6장에서 결론을 도출한다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005.8.3., 채택확정 : 2005.12.30.

함종규 : 고려대학교 메카트로닉스 협동과정 대학원

(maze09@korea.ac.kr)

송재복, 정우진 : 고려대학교 기계공학과

(jbsong@korea.ac.kr/smartrobot@korea.ac.kr)

※ 이 연구는 산업자원부 지원으로 수행하는 21C 프론티어 연구개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업)의 일환으로 수행되었음.

**II. 구배법**

Konolige에 의하여 제안된 구배법(Gradient Method, GM)은 장애물 위치, 바닥의 미끄러짐 정보와 같은 환경특성에 따라 결정되는 고유비용(intrinsic cost)과 목표위치, 로봇위치 간의 주행거리에 따라 결정되는 근접비용(adjacency cost)을 합하여 주행비용(navigation cost)을 구하고, 이를 바탕으로 각 위치에서의 주행함수(navigation function)를 계산한다. 그리고 주행함수가 감소하는 방향을 따라서 목표위치까지의 경로를 구하게 되는데, 이 경로가 최소비용을 갖는 최적경로에 해당하게 된다.

근접비용과 고유비용을 계산한 뒤에, 현재위치에서 목표위치로 가는 경로를 결정하는 방법으로 주행함수의 개념을 사용한다. 경로  $P$ 는 로봇 자체의 반경만큼 장애물을 확장한 지도내의 경로점의 수열이다.

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \tag{1}$$

여기서,  $p_i$ 는 경로상의 경로점(waypoint)를 의미하며,  $N$ 은 시작점(새로운 주행비용의 계산시마다 로봇의 현재위치가 새로운 경로의 시작점이 됨)과 목표점을 포함한 경로상의 모든 경로점의 개수를 나타낸다. 마지막 점인  $p_N$ 은 목표점(goal)에 해당한다. 또한, 경로  $P$ 의 비용함수  $F(P)$ 는 다음과 같다.

$$F(P) = \sum_{i=1}^N I(p_i) + \sum_{i=1}^N A(p_i, p_{i+1}) \tag{2}$$

여기서,  $I(p_i)$ 는 점  $p_i$ 에서의 고유비용이고,  $A(p_i, p_{i+1})$ 는 점  $p_i$ 에서  $p_{i+1}$ 까지의 이동에 대한 근접비용이다. (2)는 경로  $P$ 를 통하여 목표점에 도달하는 경우의 비용을 나타내는데, 시작점에서 목표점까지 주행하는 경로는 다수개가 존재할 수 있으므로 이들 경로 중에서 최적의 경로를 선택하는 것이 필요하다. 이를 위하여 다음과 같이 주행함수(navigation function)를 정의한다.

$$N_k = \min_{P_k} F(P_k) \tag{3}$$

여기서  $P_k$ 는 점  $k$ 에서 시작하는 경로를 나타낸다.  $N_k$ 는 점  $k$ 에서의 주행함수로, 그 값은 점  $k$ 에서 시작하는 다수의 경

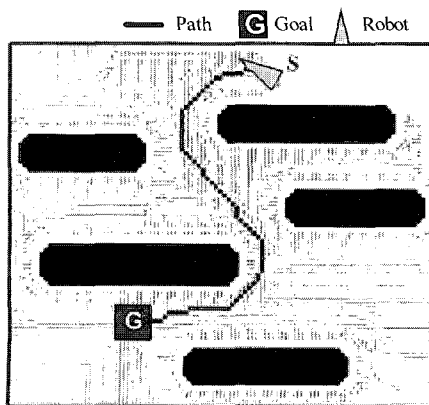


그림 1. 구배법으로 구한 최적경로.  
Fig. 1. Optimal path found using GM.

로  $P_k$  중에서 최소비용을 갖는 경로의 비용으로 부여된다. 즉 로봇이 어떤 점에 있을 때 이 점에서의 주행함수는 이 점에서 목표점까지 도달할 수 있는 최소비용을 의미한다.

앞서 정의한 근접비용은 두 점 사이의 이동에 관련된 경로 비용으로, 대부분의 경우 이동거리에 비례하여 경로비용을 부여한다. 즉, 목표점을 한 점으로 설정하면, 목표점으로부터의 거리에 비례하여 증가하는 비용이 각 셀에 부여된다. 이때, 각 셀에 부여할 비용을 계산하기 위하여, 목표점으로부터 주변의 셀로 확장해 나가면서 거리를 산출하여야 하는 체계적인 방법이 필요한데, 이를 위하여 본 연구에서는 Konolige에 의해서 제안된 LPN 알고리즘을 사용하였다. LPN 알고리즘은 셀과 셀 사이의 거리를 유클리드 거리(Euclidean distance)로 계산하며, 상하좌우 및 대각선의 8방향으로 확장하여 근접비용을 갱신해 나가는 방법이다.

주어진 환경지도 상의 각 셀에 대하여 계산한 주행비용에 기초하여 시작점에서 목표점까지의 경로를 생성하게 되는데, 그 방법으로 주행비용이 가장 빠르게 감소하는 방향으로 모든 셀에 대하여 구배(gradient)를 생성한다. 그림 1에서 장애물에서는 로봇을 밀어내는 방향으로, 목표점에서는 끌어당기는 방향으로 기울기가 생성된 것을 볼 수 있다. 이와 같이 지도전역에 대하여 생성된 기울기에 대하여, 목표점에서 로봇위치까지 급격히 감소하는 기울기를 검색하며 경로를 생성하여 로봇을 주행시키면, 지도상에 나타나는 장애물을 회피하면서 목표점까지 최소의 비용으로 도달하는 최적경로가 생성된다.

**III. 위상 정보**

세선화 알고리즘(thinning algorithm)은 영상의 골격을 추출하는 방법으로 널리 알려진 영상처리 기법이다. 주어진 격자 지도의 격자를 이미지의 셀로 나타낸 지도 이미지에 적용함으로써 GVG(Generalized Voronoi Graph)와 유사한 에지(edge)와 노드로 구성되는 위상지도(topological map)를 얻을 수 있다.

그림 2는 세선화 알고리즘을 이용하여 위상에지를 얻는 예를 보여준다. 좌측에 나타난 그림은 하나의 교차점을 갖는 물체의 형상이다. 세선화 알고리즘을 적용하여 이 모습의 골격을 추출하면 우측 그림과 같이 나타난다. 여기서 추출된 골격은 최소단위의 두께(예, 한 격자 크기)로 표현되며, 좌측 그림과 동일한 위치에서 교점을 가짐으로써 그 특성이 유지되는 가장 단순한 모습을 알 수 있다. 이러한 세선화 과정을 통하여 에지의 끝에 해당하는 말단노드(end node)와 3개

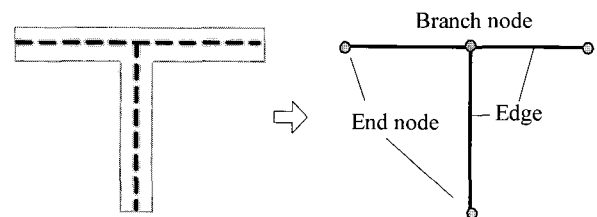


그림 2. 세선화 알고리즘을 이용한 위상에지와 노드의 추출 과정.

Fig. 2. Extraction of topological edges and nodes by thinning algorithm.

이상의 에지의 교점에 해당하는 분기노드(branch node)를 추출할 수 있다.

그림 3은 주어진 환경에 대하여 세선화 기법을 적용하여 위상지도를 작성하는 절차를 나타낸 것이다. 우선 주어진 격자지도에서 로봇이 주행할 수 있는 비점유격자를 대상으로 골격을 추출한다. 이를 위해서 벽 및 장애물 등의 점유격자의 경계로부터 시작하여 빈 공간을 매 단계마다 한 격자 두께씩 제거하여 나간다. 이 과정을 반복하면 최종적으로 벽이나 장애물로부터 동일한 간격에 있는 위상에지를 추출할 수 있다.

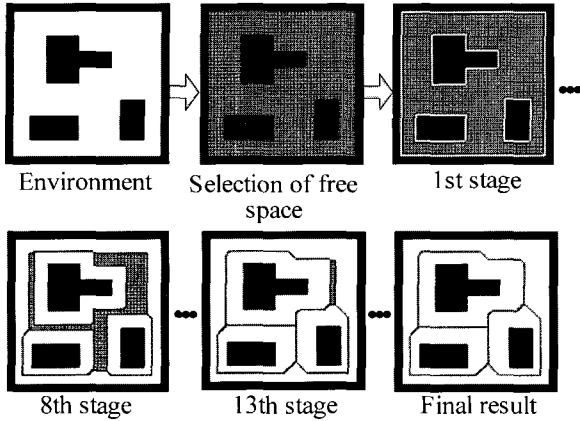


그림 3. 세선화 과정을 통한 격자지도로부터 위상지도의 작성.  
Fig. 3. Building of topological map from grid map through thinning process.

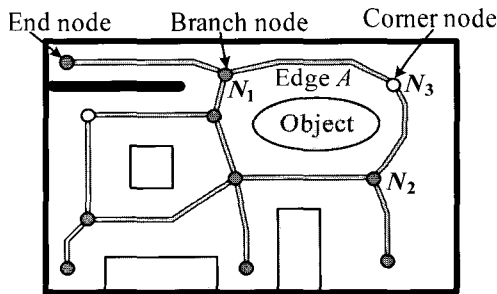


그림 4. 에지와 노드로 구성된 위상지도.  
Fig. 4. Topological map composed of edges and nodes.

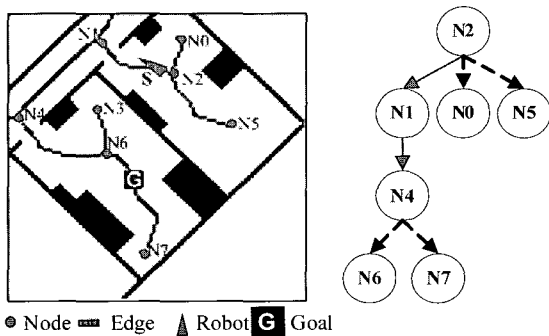


그림 5. 전형적인 사무실 환경에서의 노드의 연결관계.  
Fig. 5. Connectivity of nodes in typical office environment.

이러한 과정을 통하여 얻은 위상에지로부터 그림 4에서의 같이 말단노드, 분기노드 및 코너노드를 추출한다. 그림 5는 복도와 연결된 방으로 구성된 환경에서 구해진 위상정보의 구성을 보여준다.

IV. GM/TI 에 기반한 고속 경로계획

그림 1에서 보듯이 기존의 GM을 사용하여 경로를 생성할 경우, 로봇의 주행경로와는 직접 상관 없는 부분에 대해서도 주행비용의 계산이 수행된다. 이렇게 불필요한 계산에 의하여 경로생성의 갱신주기가 증가되어 동적 환경에서 지속적인 최적경로의 생성, 동적 장애물의 회피 및 로봇의 고속주행 등이 어려워진다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 위상정보를 활용하여 최적경로가 생성될 수 있는 영역을 예측하여 주행비용의 계산이 필요한 계산영역을 설정한다. 여기서 위상정보란 앞에서 정의한 바와 같이 노드의 위치와 노드간의 연결관계이다.

그림 6은 그림 5의 사무실 환경으로부터 위상정보를 얻어 경로의 시작점과 목표점과의 연관관계에 의하여 경로가 생성될 수 있는 영역을 예측하고, 예측된 계산영역에 구배법을 적용하는 최적경로를 생성하는 과정을 보여준다. 그림 6(d)에서 보듯이 전체 환경 대신에 점선으로 표시된 사각형의 계산영역에 대해서만 주행비용을 계산하게 된다. 구체적인 과정은 다음과 같다.

- 1) 그림 5와 같이 주어진 격자지도에서 세선화 기법을 적용하여 위상에지 및 노드의 위상정보를 구한다.
- 2) 시작점 및 목표점에 가장 근접한 노드(이 경우 N2 및 N6)를 찾고, 두 노드 사이의 연결 관계를 파악한다. (이 경우 N2→N1→N4→N6)
- 3) 그림 6(a) - (c)와 같이 우선 시작점에서 목표점을 포함하는 계산영역을 설정한 후, 이를 조금씩 확장하여 연결된 모

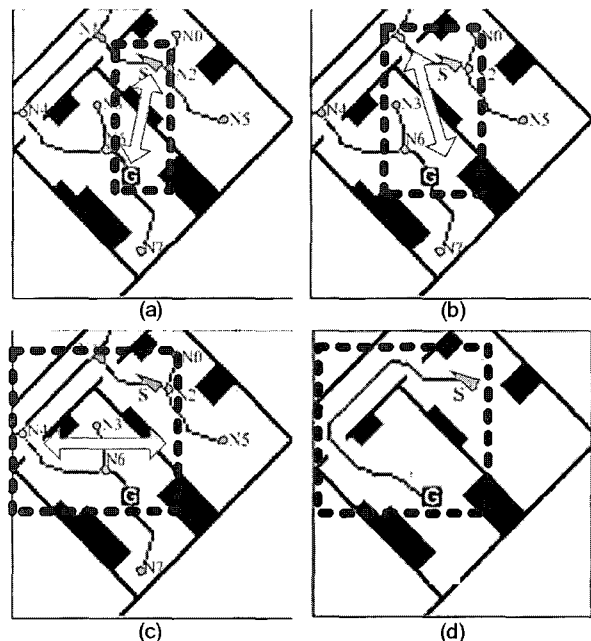


그림 6. 고속 경로계획을 위한 계산영역의 축소과정.  
Fig. 6. Reduction of computation space for GM/II.

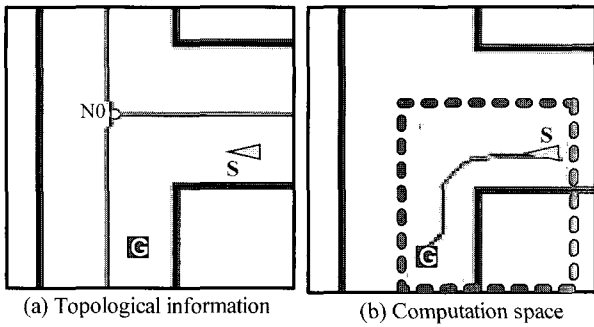


그림 7. 위상정보가 불충분할 경우의 GM/TI의 수행.  
 Fig. 7. GM/TI in case of insufficient topological information.

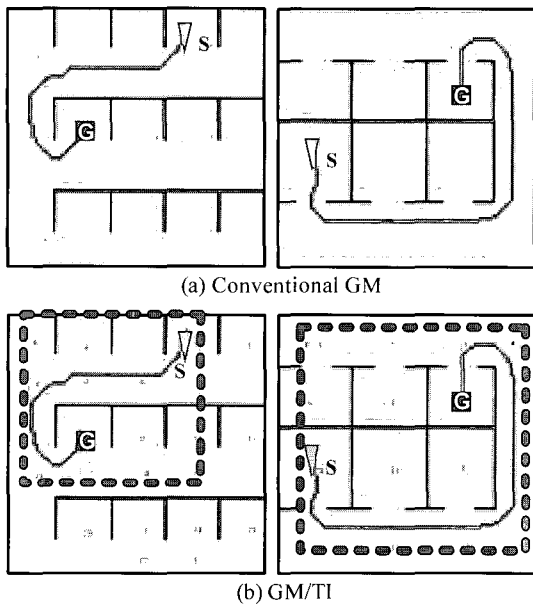


그림 8. GM과 GM/TI에 의해서 생성된 경로.  
 Fig. 8. Paths generated by conventional GM and GM/TI.

든 노드(이 경우 N2, N1, N4, N6)가 포함되는 계산영역을 설정한다. 이때 그림 7(a)와 같이 위상정보가 충분하지 않다면, 연결노드의 개수가 적기 때문에 계산영역이 최적경로를 생성하기에는 불충분하게 된다. 그림 7(b)에서 보듯이 시작점, 목표점, 및 연결 노드들을 포함하는 정사각형으로 계산영역을 설정함으로써, 계산영역이 축소되더라도 가능하면 그 축소 정도를 작게 하여 충분한 계산영역을 확보한다.

4) 그림 6(d)과 7(b)에서 보듯이 축소된 영역 내에서만 주행비용을 계산하고 구배법을 적용하여 최적경로를 생성한다.

그림 8은 동일한 환경에 대하여 본 연구에서 제안한 GM/TI와 기존의 구배법(GM)을 사용한 경로계획에서 생성된 경로를 비교한 것이다. 그림 8(b)에서 위상정보를 활용하여 경로가 생성될 수 있는 영역을 예측하여 축소시킨 계산영역을 점선 사각형으로 표시하였다. 그림 8과 같은 환경은 로봇과 목표점이 벽이나 칸막이 등의 장애물에 둘러싸여 국부최소(local minimum)에 빠지기 쉬운 환경이다. 일반적으로 구배법은 국부최소에 빠지지 않는다는 장점이 있는데, 그림에서 확인하듯이 고속 경로계획을 하여도 국부최소에 빠지지 않으며 기존의 구배법을 이용하여 얻은 경로와 동일한 경로를

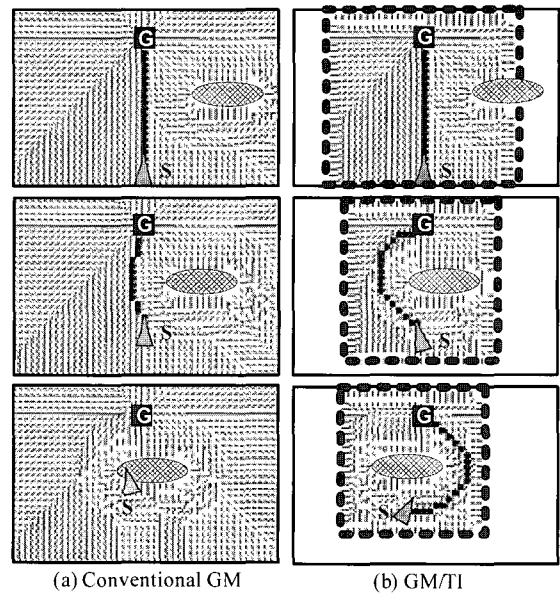


그림 9. 경로생성 주기에 따른 이동장애물의 충돌 여부. (b)에서는 우회 경로가 생성되어 충돌 회피 가능.  
 Fig. 9. Collision with moving obstacle depending on path planning period. Detour path to avoid moving obstacle can be generated in (b).

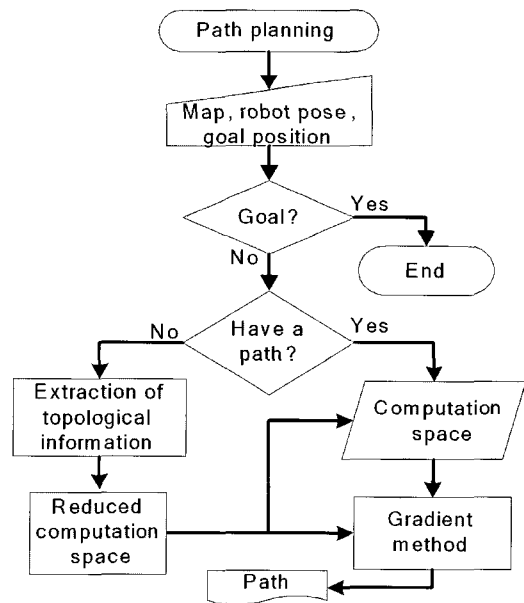


그림 10. GM/TI의 경로계획 순서도.  
 Fig. 10. Flowchart of path planning through GM/TI.

연계 됨을 알 수 있다.

경로계획에서 계산량 감소는 주행제어기의 계산 부담을 경감시키는 물론이고, 동적 환경에서의 안전한 주행을 위하여 매우 중요한 요소이다. 이에 그림 9와 같은 이동장애물이 있는 환경에서 경로생성 주기가 로봇의 주행에 미치는 영향을 알아 보았다. 로봇은 경로생성 주기 동안은 환경의 변화와 무관하게 그 이전 주기에 생성된 경로로 주행하게 된다. 이때 경로생성 주기가 길거나 로봇의 속도가 빨라서 로봇이

이 주기 동안에 주행하는 거리가 길어진다면, 변화하는 환경에 적절히 대처하지 못하게 된다.

그림 10은 GM/TI에 기반한 고속 경로계획의 경로생성 순서도이다. 이 순서도에서는 경로 재생성에 있어서 위상정보에 의하여 결정되는 계산영역을 매번 새로이 정하지 않게 하여 수행시간을 더욱 단축시켰다. 즉, 현재 단계에서 경로를 갱신할 때, 이전 단계에서 축소된 계산영역이 있다면 이를 그대로 활용한다. 그러나 새로운 장애물이 출현하여 이전의 계산영역에서는 경로를 생성할 수 없다면, 새로이 추출한 위상정보에 기초하여 계산영역을 새로이 설정한 후에 경로를 갱신한다. 따라서 전체적으로 빠른 경로 재생성이 가능하게 된다. 또한, 기존의 계산영역에서 반복적인 경로 재생성이 수행된다 하더라도 전체 영역에 대하여 계산을 수행하는 기존의 GM에 비하여 적은 계산량으로 최적의 경로를 생성할 수 있게 된다.

V. 실험 및 결과

그림 11과 같은 실험환경(10m×10m)을 대상으로 주행실험을 수행하였다. 주어진 격자지도의 한 격자는 10cm × 10cm이므로, 이 환경은 100×100개의 점유격자로 구성되어 있다. 주어진 격자지도로부터 세션화 기법을 적용하여 실시간으로

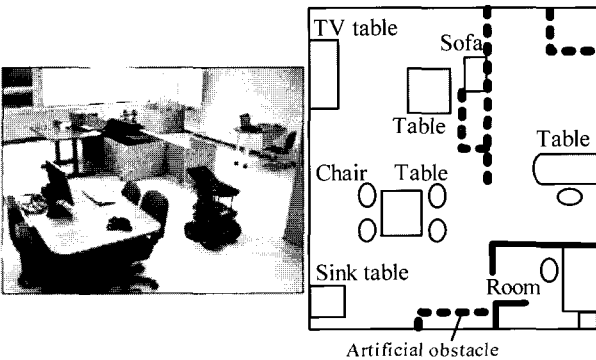


그림 11. 실험 환경.  
Fig. 11. Environment for experiments.

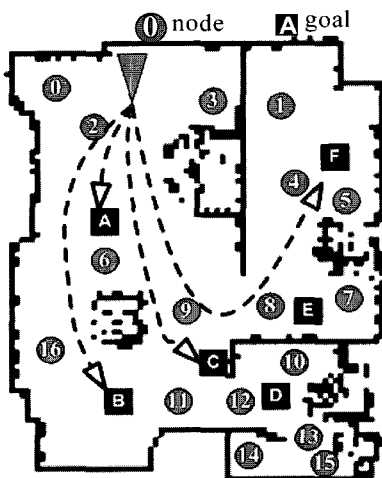


그림 12. 실험 조건.  
Fig. 12. Experimental conditions.

위상정보를 얻는다. 그림 12에서와 같이 로봇의 시작점에서 A~F의 목표점까지 기존의 GM과 제안한 GM/TI를 이용하여 경로계획을 실행하였으며, 각각의 경우에 대한 생성경로와 수행시간을 비교하였다.

그림 13은 기존의 GM과 본 논문에서 제안하는 GM/TI에서 생성된 경로를 비교한 실험 결과이며, 표 1은 각각의 목표점까지의 경로의 생성에 소요되는 시간을 정리한 표이다.

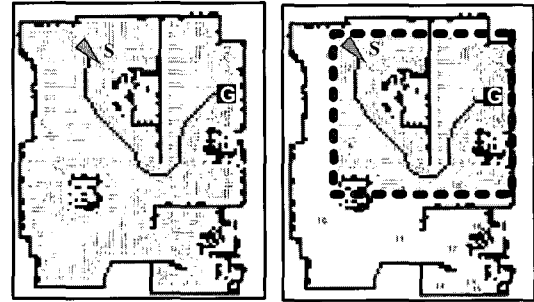


그림 13. 실험 결과: GM(좌측) 및 GM/TI(우측).  
Fig. 13. Experimental results: GM(left) and GM/TI(right).

표 1. GM과 GM/TI의 경로생성 수행시간의 비교.

Table 1. Computation time of path for GM and GM/TI.

Path	GM (ms)	GM/TI (ms)	Path	GM (ms)	GM/TI (ms)
A	96	44	D	124	57
B	108	48	E	104	49
C	100	48	F	106	53

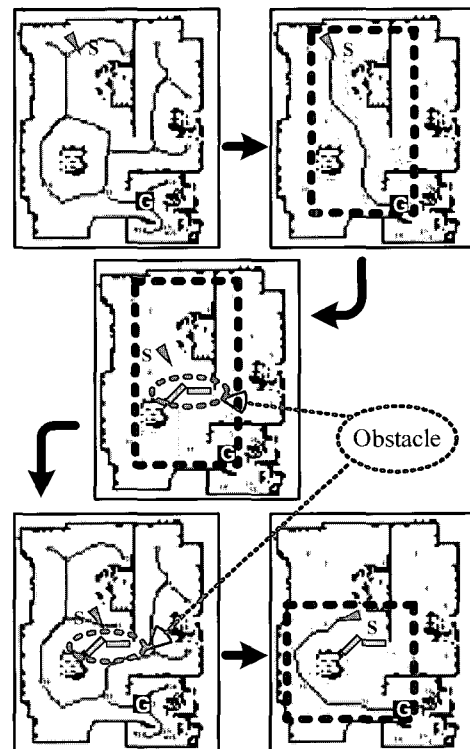


그림 14. 경로 재생성시 계산영역의 재설정.  
Fig. 14. Reconstruction of computation space during re-path planning.

위 실험결과에서 알 수 있듯이 두 방법에 의해 생성된 경로의 차이는 거의 없지만, 수행시간은 GM/TI가 기존의 GM보다 45~50% 정도 감소하였다. 이때, GM/TI의 수행시간에는 위상정보를 얻는 데 소요되는 약 25ms의 시간이 포함되어 있다.

그림 10의 과정에서 보듯이 실제 위상정보의 계산은 매번 새로이 수행하는 것이 아니라, 초기 경로계획 이전에 한번만 수행하거나 또는 새로운 장애물에 의하여 기존의 계산영역에서 경로가 생성되지 않는 경우에만 수행하게 된다. 그림 14는 그림 10에서의 과정에 의해서 지도에 없던 새로운 장애물이 출현하여 기존의 위상정보로부터 얻은 계산영역으로는 경로가 생성되지 못하자, 새로이 위상정보를 얻고 이에 따라 계산영역을 새로이 설정하는 과정을 보여준다. 이와 같이 고속 경로계획으로 인하여 실제 수행주기를 70% 이상 빠르게 향상시키는 결과를 얻게 되었다.

## VI. 결론

본 논문에서는 기존의 구배법의 수행시간을 획기적으로 감소시킬 수 있도록 위상정보를 활용한 구배법인 GM/TI (Gradient Method with Topological Information)을 제안하였다. 또한, 이러한 위상정보를 주어진 격자지도로부터 실시간으로

추출하는 방법도 제시하였다.

시작점과 목표점 사이의 환경의 정보를 반영한 위상정보를 활용하여 구배법에서의 주행함수가 계산되는 영역을 축소함으로써, 경로계획에 소요되는 계산시간을 50% 이상 감소시킬 수 있었다. 이와 같이 경로갱신 주기의 감소로 인하여, 이동장애물의 움직임이 경로갱신에 신속히 반영되어 동적 환경에 효과적으로 대처할 수 있게 되었으며, 이동로봇의 고속주행도 가능해졌다.

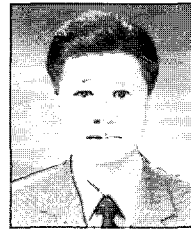
## 참고문헌

- [1] J. Latombe, *Robot Motion Planning, 4th Edition*, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [2] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, Sacramento, 1991.
- [3] K. Konolige, "A gradient method for real-time robot control," *Proc. of International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 639-646, 2000.
- [4] B. Y. Ko, J. B. Song, and S. Lee, "Real-time building of a thinning-based topological map with metric features," *Proc. of International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1524-1529, 2004.



**함종규**

1977년 9월 10일생. 2004년 한국외국어대학교 디지털정보공학과(공학사). 2006년 고려대학교 메카트로닉스학과(공학석사). 현재 삼성전자 근무 중. 관심분야는 주행알고리즘 개발.



**송재복**

1960년 8월 5일생. 1983년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 이동로봇의 주행, 로봇 팔의 설계 및 제어, 햅

틱스.



**정우진**

1970년 11월 20일생. 1993년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1995년 일본 동경대학대학원 기계정보공학전공(공학석사). 1998년 동 대학원(공학박사). 1998년~2005년 KIST 선임연구원. 2005년~현재 고려대학교 기계공학과 조교수. 관심분

야는 이동로봇의 주행, 논홀로노믹 시스템의 설계 및 제어.