

## 영역 보로노이 그래프를 기반한 위상 지도 작성

손영준\*, 박귀태\*\*

고려대학교 전기공학과 지능시스템연구소(E-mail: {mukson\*, gtpark\*\*}@elec.korea.ac.kr)

### Topological Map Building Based on Areal Voronoi Graph

Young-Jun Son\*, Gwi-Tae Park\*\*

ISR Lab., Dept. of Electrical Eng., Korea Univ., Seoul, Korea, {mukson\*, gtpark\*\*}@elec.korea.ac.kr

**Abstract** - Map building is essential to a mobile robot navigation system. Localization and path planning methods depend on map building strategies. A topological map is commonly constructed using the GVG(Generalized Voronoi Graph). The advantage of the GVG based topological map is compactness. But the GVG method have many difficulties because it consists of collision-free path. In this paper, we proposed an extended map building method, the AVG (Areal Voronoi Graph) based topological map. The AVG based topological map consists of collision-free area. This feature can improve map building, localization and path planning performance.

나 나머지 문제에 대한 해결 방법을 제시하지는 못하였다.

본 논문에서는 GVG 기반 위상 지도의 문제점을 해결한 영역 보로노이 그래프(AVG: Areal Voronoi Graph) 기반 위상 지도를 제안한다. 기존 GVG 기반 위상 지도가 충돌 회피 경로로 구성된 반면, AVG 기반 위상 지도는 충돌 회피 영역(Collision-Free Area)으로 구성되므로 GVG 기반 위상 지도의 문제점을 해결할 수 있다.

2.1 장에서는 AVG의 개념을 설명하고, 2.2-2.4 장에서는 AVG 기반으로 지도 작성, 위치 추정, 경로 설정을 구현하는 방법을 설명한다.

## 2. 본 론

### 1. 서 론

자율 이동 로봇이 원하는 목적지로 이동하기 위해서는 지도 작성(Map Building), 위치 추정(Localization), 경로 설정(Path Planning)의 기능이 필요하다. 지도 작성은 로봇의 주변 환경을 정해진 모델로 표현하여 기록하는 것이며, 위치 추정은 주변 환경에서 로봇의 위치와 방향을 결정하는 과정이고, 경로 설정은 현재 위치에서 목적지까지 주행 경로를 생성하는 과정이다.

위 기능의 구현 방법은 주변 환경 지도를 어떻게 모델링 하느냐에 크게 영향을 받는다. 주변 환경 지도의 모델은 크게 격자 지도(Grid Map)와 위상 지도(Topological Map)로 나뉜다. 격자 지도는 구현이 쉽고 정확하게 표현할 수 있는 반면, 주변 환경이 넓어질수록 방대한 메모리를 요구하므로 비효율적이다. 위상 지도는 주변 환경에서 특정 정보만을 저장하므로 격자 지도에 비해 훨씬 적은 메모리로 지도를 구성할 수 있다.

대표적인 위상 지도는 보로노이 그래프(Voronoi Graph) [1],[2]를 이용한 위상 지도이다. Choset과 Nagatani는 GVG(Generalized Voronoi Graph)를 이용한 위상 지도를 기반으로 지도 작성, 위치 추정, 경로 설정 방법을 제안하였다[3]. 이 방법은 격자 지도에 비해 훨씬 적은 메모리를 요구하며, 경로 설정을 빠르게 처리한다. 그러나 GVG 기반 위상 지도에서는 다음과 같은 문제점이 발생한다.

- ① 충돌 회피 경로(Collision-Free Path)만으로 구성하므로, 작성한 지도가 실제 환경과 많은 차이가 있다.
- ② 충돌 회피 경로를 우선적으로 지나가므로 최적의 경로를 설정하기 어렵다.
- ③ Weak Meet Point에서 경로가 매끄럽지 않다.
- ④ 로봇의 기구적 크기로 인해 실제로 지나갈 수 없는 경로를 그대로 저장한다.
- ⑤ GVG의 정보는 그래프의 위상과 에지(edge)의 거리뿐이므로 위치 추정이 부정확할 수 있다.

### 2.1 영역 보로노이 그래프 기반 위상 지도

기존 GVG 기반의 위상 지도는 평면에 있는 두 장애물과 같은 거리의 점들로 구성된다. 로봇이 실제로 이동 가능한 영역이 더 있음에도 불구하고 두 장애물 사이의 중점만으로 지도를 구성하므로, 서론에서 제시한 ①에서 ⑤의 문제점이 발생한다. 그림 1은 GVG 기반 위상 지도의 예이다.

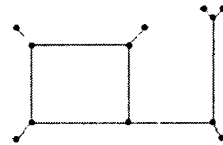


그림 1. GVG 기반 위상 지도의 예

본 논문에서 제시하는 AVG 기반 위상 지도는 로봇이 실제로 이동 가능한 영역으로 구성된다. GVG 기반 위상 지도가 두 장애물 사이의 중점 집합인 충돌 회피 경로로 구성되는 반면, AVG 기반 위상 지도는 로봇이 실제로 이동 가능한 영역의 집합인 충돌 회피 영역으로 구성된다. 그림 2는 AVG 기반 위상 지도의 예이다.

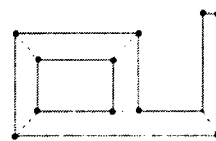
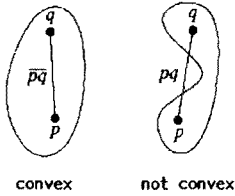


그림 2. AVG 기반 위상 지도의 예

Choi와 Song등은 지역 격자 지도에서 Thinning 알고리즘[4],[5]을 사용하여 쉽게 GVG를 생성하였다[6]. 그러

AVG 기반 위상 지도는 로봇이 실제로 이동 가능한 영역을 Convex 영역 단위로 구성한다. 각 Convex 형태의 영역이 노드(Node)를 구성하고, 영역 사이의 인접 관계가 에지(Edge)를 구성한다. Convex 형태의 도형 내에서는 모든 두 점 사이의 경로가 연결되므로 경로 설정할 때 문제가 없다. 그림 3은 Convex 도형의 예이다.



convex not convex  
그림 3. Convex 도형의 예

### 2.2 지도 작성

AVG 기반 위상 지도를 작성하기 위해서 우선 지역 격자 지도(Local Grid Map)를 Inverse / Erosion 처리를 한다. 지역 격자 지도를 Inverse 하여 장애물이 없는 영역을 처리 대상으로 하고, Erosion 하여 로봇의 실제 충돌 회피 영역을 얻는다. 로봇의 반지름은  $r$ 이고,  $z$ 를 로봇이 통로를 지날 때 필요한 안전거리 변수,  $c$ 를 격자 셀의 한 변의 길이라고 했을 때, 로봇이 지나갈 수 있는 통로의 최소 폭의 셀 개수  $x$ 는 다음과 같다.

$$\min(x) > \frac{2r + z}{c}$$

따라서 Erosion 수행 횟수는  $\text{int}(x/2) + 1$  이 된다. 다음, 생성된 충돌 회피 영역에서 선 성분을 추출(Line Segmentation)하여, 점과 선의 그래프를 생성한다. 그리고 생성된 그래프에 Convex Grouping[7] 알고리즘을 적용하여 Convex 도형 단위로 세분화하고 위상 지도 그래프를 작성한다. Convex Grouping 알고리즘은 전체 도형 그래프를 Convex 요소로 나눌 수 있다. 위에서 설명한 AVG 기반 위상 지도를 작성하는 과정은 그림 4와 같다.

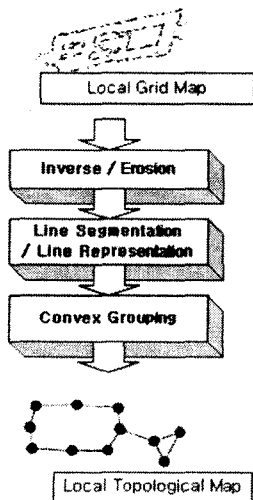


그림 4. AVG 기반 위상 지도 작성 과정

위와 같이 지도를 작성하여 서론에서 제기한 GVG 기반 위상 지도의 문제점을 해결할 수 있다. 첫째, 충돌 회피 경로가 아닌 충돌 회피 영역을 저장하므로 실제 주변 환경에 더 가까운 지도 정보를 얻을 수 있다. 둘째, Thinning 알고리즘 대신에 Erosion 처리를 함으로써 로봇이 지나갈 수 없는 좁은 통로를 배제한다.

아래 그림 5는 AVG 기반 위상 지도를 작성하는 과정을 보여준다.

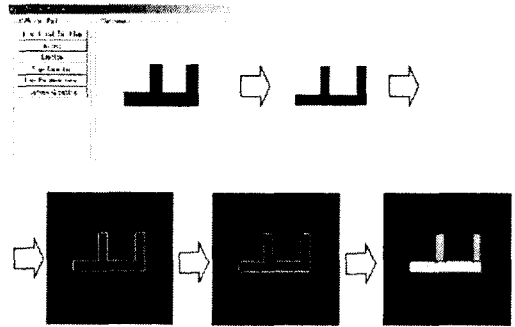


그림 5. AVG 기반 위상 지도 작성 과정의 예

### 2.3 위치 추정

AVG 기반 위상 지도를 이용하여 위치 추정을 수행하는 방법은 기존 GVG 기반 위상 지도를 이용한 방법과 유사하다. 즉, 축적된 지역 격자 지도로부터 작성된 지역 위상 그래프를 전역 위상 그래프와 비교하여 현재의 위치와 방향을 결정한다. 그러나 GVG 기반 위상 지도는 충돌 회피 경로만을 저장하므로, 그림 6과 같이 폭이 다른 통로에서도 같은 그래프를 생성한다. 따라서 그래프의 위상은 같으나 통로의 폭이 다른 곳에서는 위치 추정 오류를 발생할 수 있다. 반면에 AVG 기반 위상 지도는 충돌 회피 영역을 저장하므로, 이와 같은 문제를 해결할 수 있다.

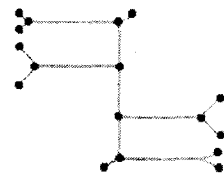


그림 6. GVG 기반 위상 지도  
(통로의 폭이나 영역의 넓이 등을 반영하지 못한다.)

### 2.4 경로 설정

GVG 기반 위상 지도에서는 경로 설정을 다음과 같이 수행한다. 우선, 현재 위치에서 가까운 노드나 에지로 이동하고, 목표점에서 가장 가까운 노드나 에지까지 충돌 회피 경로를 따라 이동한 후, 목표점으로 이동한다. 이와 같은 방법은 시작점에서 목표점까지 최단 경로를 설정하기 어렵다. 반면에 AVG 기반 위상 지도는 충돌 회피 영역으로 구성되므로, 목표점까지 최단의 경로를 설정할 수 있다.

AVG 기반 위상 지도를 이용하여 경로 설정하는 방법은 다음과 같다. 우선, 현재 위치한 영역 노드에서 목표

영역 노드까지 가장 가까운 영역 노드의 집합을 찾는다. 그리고 영역 노드 사이의 접선을  $n$ 등분하여 각 점을 지나는 모든 경로를 비교하여 가장 짧은 경로를 찾는다.

GVG 기반 위상 지도를 이용한 경로 설정과 AVG 기반 위상 지도를 이용한 경로 설정의 차이는 그림 7에서 확인할 수 있다.

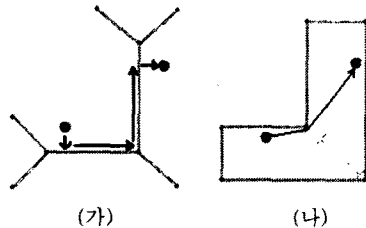


그림 7. GVG 기반 위상 지도의 경로 설정(가)과 AVG 기반 위상 지도의 경로 설정(나)

### 3. 결 론

본 논문에서는 GVG 기반 위상 지도의 문제점을 해결한 영역 보로노이 그래프(AVG) 기반 위상 지도를 제안하였다. 기존 GVG 기반 위상 지도가 충돌 회피 경로로 구성된 반면, AVG 기반 위상 지도는 충돌 회피 영역으로 구성되므로 GVG 기반 위상 지도의 여러 가지 문제점을 해결할 수 있었다.

본 논문의 예제 환경은 단순한 복도 환경이지만, 작업 환경이 더욱 넓어지고 복잡해질수록 제한한 위상 지도의 효율성은 더욱 증가할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] K. Onishi and N. Takayama, "Construction of Voronoi Diagram on the Upper Half-plane", IEICE Transactions on Fundamentals, Vol. E79-A, No. 4, pp. 533-539, Feb. 1995.
- [2] P. J. McKerrow, "Introduction to Robotics", Addison Wesley, 1991.
- [3] Howie Choset and Keiji Nagatani, "Topological Simultaneous Localization and Mapping(SLAM): Toward Exact Localization Without Explicit Localization", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 2, pp. 125-137, April. 2001.
- [4] G. A. Baxes, "Digital Image Processing", John Wiley & Sons, 1994.
- [5] Rafael C. Gonzalez and Paul Wintz, "Digital Image Processing", Addison-Wesley, pp. 398-402, 1987.
- [6] Chang-Hyuk Choi, Jae-Bok Song, Woojin Chung, and Munsang Kim, "Topological Map Building Based on Thinning and Its Application to Localization", Proc. of IEEE, pp. 552-557, Oct. 2002.
- [7] David W. Jacobs, "Robust and Efficient Detection of Salient Convex Groups", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 18, No. 1, pp. 23-37, Jan. 1996.