

이동로봇의 주행을 위한 토폴로지컬 지도의 작성

Topological Map Building for Mobile Robot Navigation

최창혁, 이진선, 송재복, 정우진, 김문상, 박성기, 최종석

(Chang-Hyuk Choi, Jin-Sun Lee, Jae-Bok Song, Woo-Jin Chung, Sung-Kee Park Jong-Suk Choi and Munsang Kim)

Abstract : Map building is the process of modeling the robot's environment. The map is usually built based on a grid-based or topological approach, which has its own merits and demerits. These two methods, therefore, can be integrated to provide a better way of map building, which compensates for each other's drawbacks. In this paper, a method of building the topological map based on the occupancy grid map through a Voronoi diagram is presented and verified by various simulations. This Voronoi diagram is made by using a labeled Voronoi diagram scheme which is suitable for the occupancy grid maps. It is shown that the proposed method is efficient and simple for building a topological map. The simple path-planning problem is simulated and experimented to verify the validity of the proposed approach.

Keywords : topological map, occupancy grid map, Voronoi diagram, mobile robot navigation

I. 서론

주변환경에 대한 표현은 자율 이동로봇의 주행에 있어서 매우 중요하다. 주변환경에 대한 일반적인 표현 방식으로 지도를 작성하는데, 이러한 지도에는 격자 지도(grid map)와 토폴로지컬 지도(topological map)가 있다. 격자 지도는 주변환경을 등간격으로 설정된 격자로 표현함으로써 물체의 절대적인 기하학적 위치에 기초하여 공간을 나타낸다. 즉, 각 격자는 대응되는 영역 내에 장애물이 존재하는지의 여부를 표시한다. 반면에, Thrun[1]이나 Kuipers[2]에 의해 제시된 토폴로지컬 지도는 격자 지도에 비해 추상적인 표현법으로서, 어떤 절대적인 기준좌표를 도입하지 않고 주변환경의 특징 간의 관계만을 표현하게 된다. 따라서, 일반적으로 토폴로지컬 지도는 노드와 원호로 구성된 그래프를 통해 표현함으로써 간결한 지도를 얻을 수 있다.

격자 지도는 센서의 불확실성을 감소시키며, 주변환경에 대한 비교적 정확한 모델링을 수행할 수 있다는 장점이 있지만, 메모리를 많이 차지하며, 어떤 기능을 수행하는 데 있어서 많은 시간이 소요된다. 이는 주변환경의 모든 상세한 부분까지 표현하기 위해서는 격자가 그만큼 세밀해야 하기 때문이다. 이에 비하여, 토폴로지컬 지도의 가장 큰 장점이 간결성이다[3]. 즉, 토폴로지컬 지도의 해상도는 주변환경이 얼마나 복잡한가(노드의 개수와 연결 관계)에 직접적으로 연관될 뿐이다. 토폴로지컬 지도는 격자 지도와 비

교할 때, 다음과 같은 세 가지 장점을 갖는다. 첫째, 신속한 계획이 가능하다. 둘째, symbolic planner와 problem-solver와 연결하기 쉽다. 셋째, 인간의 지시 혹은 추론이라는 측면에서 볼 때 더욱 자연스러운 인터페이스를 제공한다. 예를 들어, '이 길로 계속 가다가, 사거리가 만나면 거기서 왼쪽으로 꺾으면 나오는 곳이다'와 같은 표현법이 바로 토폴로지컬 지도인 것이다. 또한, 토폴로지컬 지도에서는 로봇의 정확한 위치를 알 필요가 없으므로, 드리프트(drift)와 미끄러짐(slippage)에 대해서도 우수한 성능을 보인다. 반면에, 격자 지도에서는 이런 현상들을 지속적으로 감지하고, 보정하여야 한다. 물론 토폴로지컬 지도를 사용하게 되면, 순간의 센서 측정치에만 의존하므로 위치추적이 어렵게 된다는 단점도 있다.

따라서, 본 연구에서는 격자 지도와 토폴로지컬 지도, 이 두 기법을 조합하여 각 기법의 장점만을 활용하도록 한다 [4]. 우선 격자 지도를 확률 기법을 이용하여 작성하고, 이 지도를 임계선(critical line)을 이용하여 인접 지역(coherent region)으로 분리하는 방식을 통해 토폴로지컬 지도를 작성한다. 이 때, 임계선은 현관과 복도와 같은 좁은 통로에 해당된다. 이렇게 함으로써 적절한 크기와 복잡함을 지닌 환경을 모델링하고, 이를 유지하기에 수월하다는 격자 지도의 장점과 신속한 계획과 문제 해결(problem-solving)이 가능한 토폴로지컬 지도의 장점을 모두 활용할 수 있게 된다. 물론 큰 메모리에 대한 요구와 정확한 위치추적과 같은 문제는 여전히 남아 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 토폴로지컬 지도의 기본이 되는 점유 격자지도 기법에 대해서 소개하며, 3장에서는 보로노이 선도 및 레이블드 보로노이 선도를 설명하고, 이를 이용하여 임계점과 임계선을 구한다. 4장에서는 실제 구조화된 환경에 대해 토폴로지컬 지도 작성에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 그 효율성을 검증하기 위해 간단한 전역 경로 계획 문제를 적용하도록 한다.

논문접수 : 2001. 6. 22., 채택확정 : 2002. 4. 8.

최창혁 : 고려대학교 대학원 기계공학과(vision2@korea.ac.kr)

이진선 : 고려대학교 대학원 기계공학과(jinsunl@korea.ac.kr)

송재복 : 고려대학교 대학원 기계공학과(jbsong@korea.ac.kr)

정우진 : KIST 휴먼로봇센터(wjchung@kist.re.kr)

박성기 : KIST 휴먼로봇센터(skee@kist.re.kr)

최종석 : KIST 휴먼로봇센터(cjs@kist.re.kr)

김문상 : KIST 휴먼로봇센터(munsang@kist.re.kr)

※ 본 논문은 서비스로봇 기술개발 사업의 일환으로 한국과학기술 연구원 지원 하에 수행되었습니다.

II. 격자 지도

1. 점유 격자 지도[5]

초음파 센서의 측정값들을 점유 격자 지도를 통해 해석한다는 것은 개별 격자들의 점유 확률을 정의하는 것에 해당한다. 확률을 정의할 격자의 위치는 그림 1과 같이 (r, θ) 로 표현한다.

초음파 센서로부터 거리가 d 로 측정되었을 때, 격자의 점유 확률 밀도 함수(occupancy probability density function)를 다음과 같이 정의한다.

$$p(d | r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-(r-d)^2 / (2\sigma^2)] \quad (1)$$

여기서, σ 는 격자의 크기를 나타낸다. (1)에서 격자의 위치가 d 에 가까울수록 점유 확률이 높아진다는 것을 알 수 있다. 또한, 위치가 d 보다 큰 격자들에 대해서는 물체에 가려서 정보를 알 수 없다고 취급하여 0.5의 확률을 부여하며, 이 확률은 초음파 센서의 중심축에서 일정 각도($\pm\beta$) 이내에서만 부여한다.

2. 베이저안 확률 갱신식

격자의 점유 확률은 시점 t 까지의 모든 측정정보의 집합인 $\{d\}_t$ 에 기초하여 격자가 점유되었을 확률 $P[S = OCC | \{d\}_t]$ 으로 정의된다. 여기서, OCC 는 점유 상태를 나타낸다. $P[S = OCC | \{d\}_t]$ 는 시점 $t-1$ 까지의 격자의 점유 확률 $P[S = OCC | \{d\}_{t-1}]$ 와 시점 t 에서 측정된 확률 밀도 함수인 $P[\{d\}_t | S = OCC]$ 에 기초하여 결정된다. 즉, 베이저안 확률 갱신식(Bayesian probability updating formula)은 각 상태 S (점유 혹은 비점유)에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P[S = OCC | \{d\}_t] = \frac{p(\{d\}_t | S = OCC) \cdot P[S = OCC | \{d\}_{t-1}]}{\sum_S p(\{d\}_t | S) \cdot P[S | \{d\}_{t-1}]} \quad (2)$$

베이저안 확률 갱신식을 이용하면 격자의 과거 점유 확률과 현재 시점에서 측정된 점유 확률 밀도 함수를 근거로 하여, 현재의 점유 확률을 시간에 대해 재귀적(recursive)으로 구할 수 있다. 각 격자의 초기 확률값은 점유 상태를 알 수 없으므로 0.5로 설정한다. 한편, 격자가 점유되어 있지 않을 확률은

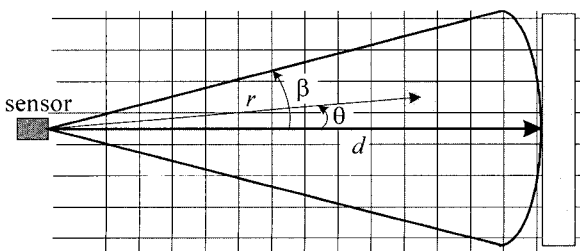


그림 1. 격자를 표현하는 극좌표계.
Fig. 1. Polar coordinates representing grids.

점유되어 있을 확률의 여사건이라는 조건에 의해 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$P[S = EMP | \{d\}_t] = 1 - P[S = OCC | \{d\}_t] \quad (3)$$

여기서, EMP는 비점유 상태를 나타낸다.

III. 보로노이 선도

1. 정의

보로노이 선도(Voronoi diagram)[6]는 물체의 경계로부터 동일한 거리에 있는 점들의 자취이다. 이 선도는 물체들 사이의 공간이 물체 자체보다 더 중요하게 취급되는 자유 공간 데이터 구조의 일종으로, 물체들이 존재하는 평면을 다각형 영역인 보로노이 영역(Voronoi region)으로 분할함으로써 만들어진다. 이 때, 각 영역은 주변의 어떤 점들보다 다각형 내의 기준점에 더 가까운 점들의 집합을 나타내고, 각 영역의 경계(보로노이 에지)는 이웃한 두 점 사이의 거리가 동일한 점들로 구성된다. 즉, 임의의 d 차원 공간 R^d 에 n 개의 점 p_1, p_2, \dots, p_n 이 있을 때, i 번째 점 p_i 에 대한 보로노이 영역 $R(p_i)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$R(p_i) = \{p \in R^d | \|p - p_i\| < \|p - p_j\| \text{ for } i \neq j\} \quad (4)$$

여기서, $\|p - p_{ij}\|$ 는 두 점 p 와 p_{ij} 사이의 Euclidean distance이며, 위의 식의 점 p_i 를 생성자(generator)라고 부른다. R^d 에 존재하는 임의의 한 점 p 를 고려할 때 p 와 p_i 간의 거리가 p 와 p_j 간의 거리보다 짧으면, 점 p 는 p_i 가 속해 있는 보로노이 영역에 속하게 된다. 만일, p 와 p_i 간의 거리가 p 와 p_j 간의 거리와 같으면 점 p 는 보로노이 에지에 속하게 된다.

격자 지도를 토폴로지컬 지도로 변환하는 중간 단계에서, 보로노이 선도는 토폴로지컬 영역의 경계가 되는 임계점(critical point)과 임계선(critical line)을 찾는 데 이용되며, 경로 계획에 있어서는 장애물이 없는 빈 공간을 찾는 데에도 활용된다. 다음은 2차원 평면에서 임의의 점들이 주어졌을 때, 보로노이 선도의 예이다.

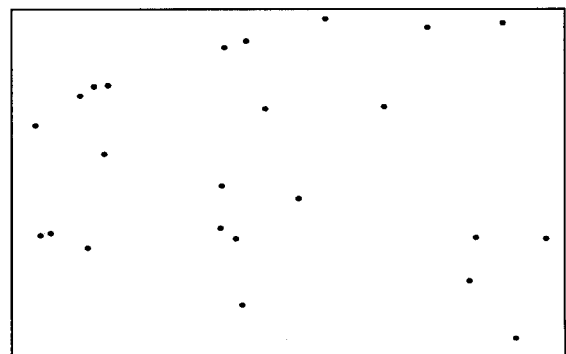


그림 2. R^2 에서의 보로노이 선도.
Fig. 2. Voronoi diagram in R^2 .

2. 레이블드 보로노이 선도 (Labeled Voronoi diagram)[7]

보로노이 선도를 이용한 토폴로지컬 지도는 많이 연구되어 있으나[8], 대부분의 경우 계산과정이 복잡하여, 다양한 형태를 지닌 환경에 대해서는 적용하기 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 본 연구에서 사용된 격자 지도의 특성을 잘 살릴 수 있으며, 알고리즘도 비교적 단순한 보로노이 선도 작성 기법으로 레이블드 보로노이 선도를 사용하였다. 레이블드 보로노이 선도는 CA 구조(cellular automata architecture)의 확장을 이용하여 보로노이 선도를 작성하는 기법이다.

CA 구조는 격자 형태로 구성되어 서로 국부적인 연결 관계를 가지고 있으며, 시간에 따라 확장된다. 각 격자들은 제한된 값을 갖고, 확장되면서 확장의 중심이 되는 격자인 소스(source)가 되는 격자의 값에 영향을 받는다. 레이블드 보로노이 선도를 작성하기 위해 사용된 CA 구조에서, 격자 간의 국부적 연결 관계는 그림 3과 같이 그 격자를 둘러싼 4-*nn*(4-nearest neighbors, 또는 Von-Neumann neighborhood라고도 함)으로 제한된다.

이 때, 시간 $t+1$ 에서의 4-*nn*인 $cell(i-1, j)$, $cell(i+1, j)$, $cell(i, j-1)$, $cell(i, j+1)$ 의 값들은 소스인 $cell(i, j)$ 의 값에 영향을 받아 소스와 동일한 값을 가지게 된다. 여기서, $cell(i, j)$ 는 격자지도의 i, j 번째 격자를 의미한다. 확장의 소스가 되는 격자가 하나인 경우, 시간이 증가함에 따라 다이나몬드 형태로 확장이 발생된다. 한편, 소스가 여러 개인 경우에는 각각의 소스들로부터 확장이 동시에 진행되어, 두 소스 셀에서 같은 거리에 있는 중간 지점에서 서로 다른 값의 격자가 만나게 되는데, 이러한 성질을 이용해서 레이블드 보로노이 선도를 작성한다. 단, 소스의 값이 같을 경우에는 중간에서 같은 값의 격자가 만나게 되어 서로 병합된다. 이렇게 CA 구조를 이용한 보로노이 선도는 기존의 방식에서 필요하였던 거리 계산 등의 복잡한 계산이 필요 없고, 알고리즘이 간단하여 속도가 빠르다는 장점이 있다. 그림 4는 소스의 개수에 따른 확장의 단계를 나타낸 것이다.

2.1 레이블드 보로노이 선도에 대한 알고리즘

물체의 경계 검출 및 코딩

점유된 격자는 1, 점유되지 않은 격자는 0으로 값이 정해진 이진 지도(binary map)에 대해 물체의 경계를 검출하기 위해, 각각의 격자에 대해 4-*nn*의 값에 따라 그림 5와 같은 에지 코드(edge-code)를 지정해 준다.

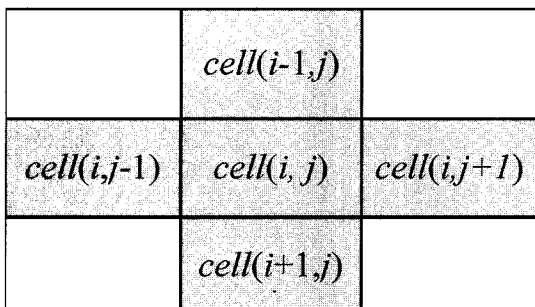
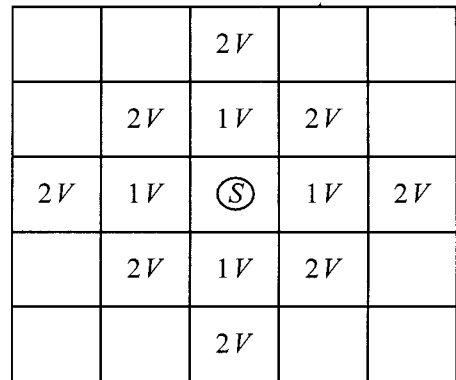
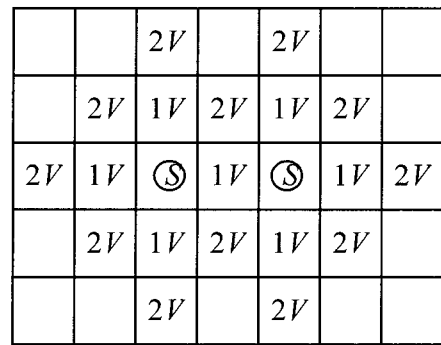


그림 3. 4-*nn*의 표현법.
Fig. 3. Description of 4-*nn*.



tV $V = \text{label value of source cell } S$
 $t = \text{time step}$

(a) CA expansion from a single source



tV $V = \text{label value of source cell } S$
 $t = \text{time step}$

(b) CA expansion from double sources

그림 4. 소스의 개수에 따른 CA 확장.
Fig. 4. CA expansion for the number of source.

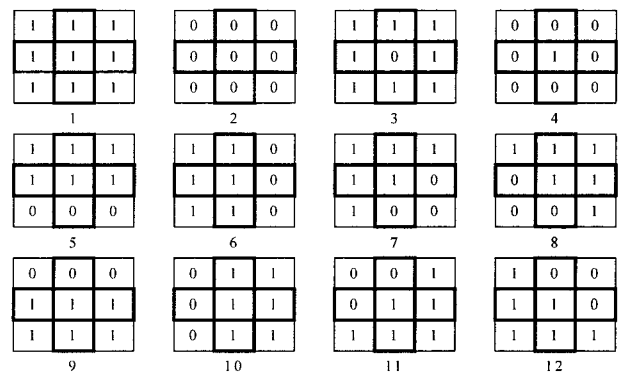


그림 5. 가능한 에지의 형태와 에지 코드값.
Fig. 5. Possible edge forms and edge code values.

에지 코드 1, 2는 에지가 아닌 것으로, 3, 4는 잡음으로 간주한다. 나머지 5부터 12까지는 에지로 간주하여 코딩을 수행한다. 이렇게 코딩된 값은 c 에 저장되어 보로노이 선도를 구축하기 위한 확장에 사용된다.

에지 코드가 5 이상인 격자에 대해서는 $flag$ 를 1로 두어 지도와 같은 크기를 가지는 $flag$ 에 저장한다. 여기서 $flag$ 는

에지 검출로 검출된 물체의 에지가 되는 격자를 표시하는 flag bit을 저장한 $m \times n$ 데이터 행렬을 의미하며, 에지일 때는 flag bit의 값이 1이 된다.

레이블드 보로노이 선도의 작성

1) 시간을 초기화하고 $4-nn$ 을 $n=flag(i-1, j)$, $w=flag(i, j-1)$, $e=flag(i, j+1)$, $s=flag(i+1, j)$ 로 정의하고, 이 값을 비교하여 $c(i, j)$ 의 값을 결정한다. 이때, i 와 j 는 cell의 그것과 동일하다. n, w, e, s 중 하나의 flag만이 1인 경우에 앞에서 정의한 $c(i, j)$ 는 flag가 1인 격자의 에지 코드값을 갖게 된다. 만일, 두 개의 flag가 1인 경우에는 flag가 1인 두 격자의 에지 코드값을 비교하여 두 값이 동일하면 그 값을 $c(i, j)$ 에 넣고, flag(i, j)는 1로 두고, $vor(i, j)$ 에는 이때의 시간을 넣는다. 이때, vor 은 보로노이 선도가 저장되는 행렬로 0으로 초기화된다. 만일, flag가 1인 두 격자의 값이 같지 않으면 $vor(i, j)$ 에 시간만 넣고, flag(i, j)와 $c(i, j)$ 는 그대로 둔다. n, w, e, s 중 3개 이상의 flag가 1인 경우에는 물체의 모서리 부분, 또는 더 이상 확장되지 않는 보로노이 선도상의 격자로 간주하여 $vor(i, j)$ 에 시간을 넣어 준다.

2) 1)의 과정을 모든 격자에 대해 반복하고, 더 이상 확장될 수 있는 격자가 존재하지 않을 때까지 시간을 증가시키면서 1)의 과정을 반복한다. 시간을 증가시키기 전에 이전의 c 와 현재의 c 를 비교하여 변화가 없으면 종료한다.

이렇게 위의 과정을 반복하게 되면 에지가 되는 소스의 확장이 계속되면서, 결국 에지 간의 중점들이 보로노이 선도가 된다.

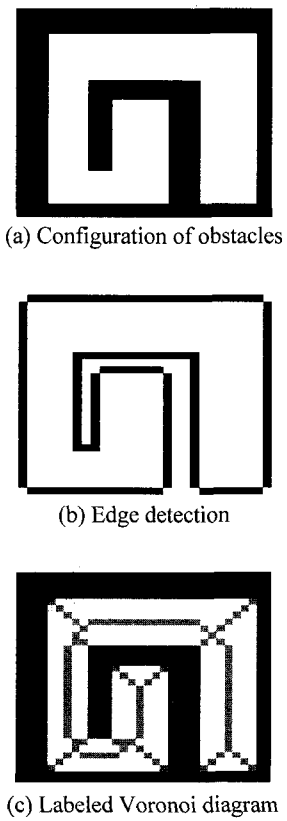


그림 6. 시뮬레이션 결과.
Fig. 6. Simulation results.

2.2 시뮬레이션 결과

위에서 설명한 알고리즘의 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다. 그림에서 검은색은 물체(점유된 격자)이고, 회색이 그 결과로 생성된 보로노이 선도이다.

3. 임계점과 임계선

자유 공간을 분할하는 첫 단계가 바로 임계점(critical point)을 찾는 것이다. 임계점은 물체와 물체 사이의 거리를 국부적으로 비교하였을 때 최소가 되는 보로노이 선도상의 점이다. 이때, 임계점은 두 개의 기준점(물체와 물체 사이의 거리가 최소가 되는 경계점)을 가지게 된다. 그림 7 (b)에서 1번 임계점은 국부적으로 물체와 물체 사이의 거리가 최소인 보로노이 선도상의 점임을 알 수 있다. 임계선(critical line)은 임계점과 그 임계점의 선정하는 데에 사용된 두 기준점을 연결함으로써 생성되는 선이다. 이 선을 기준으로 자유 공간들이 토폴로지컬 영역으로 분할된다. 그림 7 (b)에서 점선이 임계선이다.

IV. 시뮬레이션 및 실험

1. 토폴로지컬 지도 작성

점유 격자 지도 기법을 이용하여 작성한 격자 지도로부터 토폴로지컬 지도를 작성하는 과정에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 각 그림은 임의로 제작한 이진 지도(binary map), 이진 지도의 에지, 레이블드 보로노이 선도, 임계점과 그에 따른 임계선, 그리고 최종적인 토폴로지컬 그래프이다.

에지 검출은 앞에서 제시한 8가지의 경우에 대해 수행하였으며, 이 값은 에지 코드값을 그 요소로 하는 행렬 c 의 값과 동일하다. 이렇게 검출된 각 에지가 되는 셀에서 동시에 셀 확장이 시작되어 (c)와 같은 보로노이 선도를 작성하게 된다. 이는 임계점과 임계선이라는 과정을 통해 토폴로지컬 영역으로 분리되며, 이 영역의 중점을 연결하여 토폴로지컬 그래프를 작성하게 된다. 이렇게 함으로써 각 특징 있는 영역간의 연결 관계를 가시적으로 알 수 있게 되며, 전역 경로 계획과 같은 실제 문제 해결에 직접적으로 사용할 수 있게 된다.

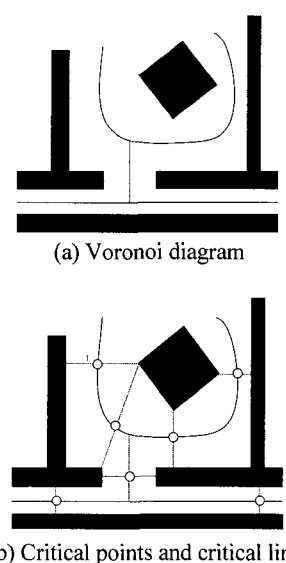
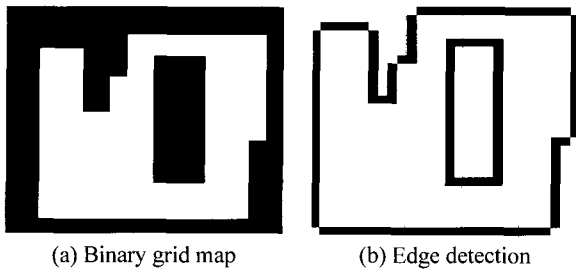
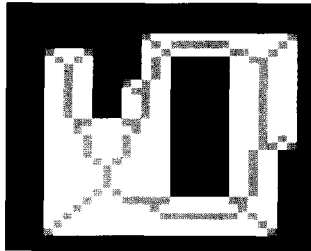


그림 7. 임계점과 임계선의 추출.
Fig. 7. Extraction of critical points and critical lines.

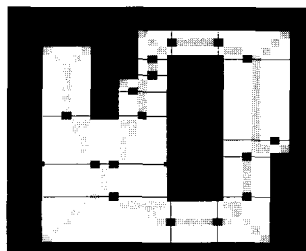


(a) Binary grid map

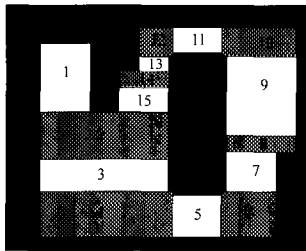
(b) Edge detection



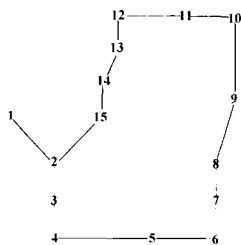
(c) Labeled Voronoi diagram



(d) Critical points and critical lines



(e) Topological region



(f) Topological graph

그림 8. 토폴로지컬 지도를 작성 시뮬레이션 결과.

Fig. 8. Simulation results for constructing topological map.

2. 경로 계획 시뮬레이션 및 실험

작성된 토폴로지컬 지도의 효율성을 검증하기 위해, 간단한 전역 경로 계획을 수행하였으며, 실제로 주행실험을 수행하였다.

그림 9는 초음파 센서를 통해 얻은 2진 지도와 토폴로지컬 지도를 보여준다. 각 노드는 토폴로지컬 영역의 중점으로, 토폴로지컬 지도에는 각 노드간의 연결 관계와 인접한 노드까지의 거리 정보를 포함하도록 하였다.

그림 10은 위에서 구한 토폴로지컬 지도를 이용해 경로계획을 수행한 결과이다. 효율성을 검증하기 위해, 출발 노드(S)에서 도착 노드(F)까지 여러 경로를 가질 수 있는 환경에서 실험을 수행하였다. 저장된 각 노드간의 연결 관계를 통해 출발 노드에서 도착 노드까지의 모든 가능한 경로를 찾아내고, 이렇게 찾아낸 모든 경로에 대해 노드간의 거리를 비용으로 두고, A*와 같은 간단한 알고리즘을 통해 최적 경로를 생성하였다. 결과를 통해, 로봇이 현재 위치에서 목표하는 위치까지 도달하는 경로를 알고 있다고 하더라도, 최대 26m까지 주행하게 되지만, 최단 거리(12m)를 찾을 수 있게 된다(그림 10 (a) 참조). 그림 10 (b)는 이렇게 생성된 경로를 로봇이 직접 추종하는 실험을 수행한 결과이다. 로봇은 전역 경로계획에 따라 설정된 노드를 따라가게 된다.

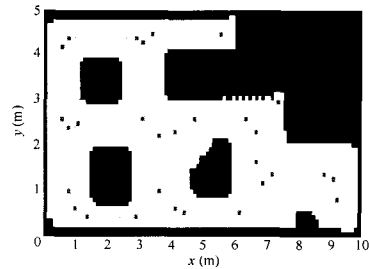
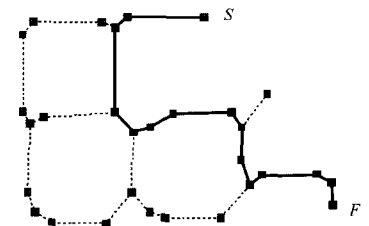
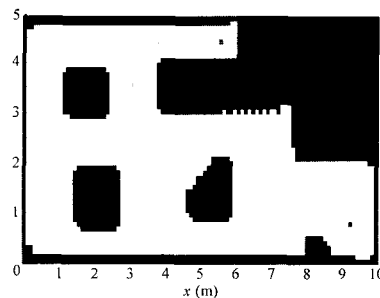


그림 9. 이진지도와 토폴로지컬 지도작성 실험 결과.

Fig. 9. Experimental results for binary map and its corresponding topological map building.



(a) All possible paths and optimal path



(b) Experimental results for navigation from node S to F

그림 10. 노드 S에서 F까지 주행 시 최적 경로 검색 및 모든 가능한 경로에 관한 주행 실험결과.

Fig. 10. Experimental results for finding all possible paths and optimal path and navigation.

V. 결론

본 연구에서는 점유 격자 지도에 기초하여 간단하게 토폴로지컬 지도를 작성하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 즉, 주어진 격자 지도에 대해 보로노이 선도, 임계점과 임계선의 과정을 통해 토폴로지컬 지도를 얻는 방법을 개발하였다. 중간 과정인 보로노이 선도는 격자 형태로 작성되어 실제 중간 기점으로도 활용할 수 있게 된다. 작성된 토폴로지컬 지도는 경로 계획, 문제 해결 등의 작업에 있어서 격자 지도보다 더 효율적으로 적용할 수 있으며, 격자 지도와의 연계를 통해 두 지도의 장점을 모두 활용할 수 있게 되었다. 개발된 방식의 효율성을 간단한 경로 계획 문제를 실제 실험을 통해 구현함으로써 검증하였다.

앞으로는 동적 환경에 대한 지도작성을 연구할 것이며, 토폴로지컬 지도에 기초한 위치추적 문제의 해결 방식에 대한 연구를 진행 중이다.

참고 문헌

[1] S. Thrun, "Learning Maps for Indoor Mobile Robot Navigation," *Artificial Intelligence*, vol. 1, pp. 21-71, 1999.
 [2] B. Kuipers and Y. T. Byun, "Robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of

Spatial Representations," *IEEE J. of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 8, pp. 47-63, 1991.
 [3] B. S. Ryu and H. S. Yang, "Integration of reactive behaviors and enhanced topological map for robust mobile robot navigation," *IEEE Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 29, no. 5, pp. 237-250, 1999.
 [4] S. Simhon and G. Dudek, "A global topological map formed by local metric maps," *IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robot and Systems*, pp. 1708-1714, 1998.
 [5] A. Elfes, "Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation," *IEEE Computer*, vol. 22, issue 6, pp. 46-57, 1989.
 [6] 박종현, 송재복, 한창수, "로봇공학," 역서, 도서출판 기술, 1994.
 [7] P. G. Tzionas, A. Thanailakis, and P. G. Tsalides, "Collision-free path planning for a diamond-shaped robot using two-dimensional cellular automata," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 13, issue 2, pp. 237-250, 1997.
 [8] H. Choset and J. Bardick, "Sensor based planning, Part I : The generalized voronoi graph," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1649-1655, 1995.



최 창 혁

1973. 7. 14일생. 1996년 국민대 자동차 공학과 졸업. 홍익대 대학원 석사(1999). 1999-현재 고려대 대학원 박사과정. 관심 분야는 이동로봇, 제어 응용.



이 진 선

1975. 8. 31일생. 2001년 고려대학교 전기전자공학공학과 졸업. 2001년-현재 동대학원 석사과정 관심 분야는 메카트로닉스, 이동로봇.



정 우 진

1970. 11. 20일생. 1993년 서울대 기계설계학과 졸업. 동경대 기계정보공학과 석사(1995). 동대학원 박사(1998). 1998-현재 KIST 선임연구원. 관심 분야는 이동로봇 위치추정 및 주행제어, 논홀로노믹 시스템 제어, 다지 로봇손.



박 성 기

1964. 5. 2일생. 1987년 서울대 기계설계학과 졸업. 동대학 기계공학과 석사(1989). KAIST 자동화 및 설계공학과 박사(2000). 2000-현재 KIST 연구원. 관심 분야는 Computer vision, Robot

vision, Intelligent robot.



최 종 석

1970. 8. 18일생. 1994년 KAIST 졸업. 동대학 전기전자공학과 석사(1996). 동대학원 박사(2001). 2001-현재 KIST 연구원. 관심 분야는 Mobile robot control, Robot soccer, Humanoid robot.

송 재 복

1999년 5권 3호 p. 289 ~ 292 참조.

김 문 상

1999년 5권 3호 p. 346 ~ 349 참조.