

# 지역 및 전역 환경에 대한 세션화 기반 위상지도의 작성

## Thinning-Based Topological Map Building for Local and Global Environments

권 태 범, 송 재 복\*

(Tae-Bum Kwon and Jae-Bok Song)

**Abstract :** An accurate and compact map is essential to an autonomous mobile robot system. For navigation, it is efficient to use an occupancy grid map because the environment is represented by probability distribution. But it is difficult to apply it to the large environment since it needs a large amount of memory proportional to the environment size. As an alternative, a topological map can be used to represent it in terms of the discrete nodes with edges connecting them. It is usually constructed by the Voronoi-like graphs, but in this paper the topological map is incrementally built based on the local grid map using the thinning algorithm. This algorithm can extract only meaningful topological information by using the C-obstacle concept in real-time and is robust to the environment change, because its underlying local grid map is constructed based on the Bayesian update formula. In this paper, the position probability is defined to evaluate the quantitative reliability of the end nodes of this thinning-based topological map (TTM). The global TTM can be constructed by merging each local TTM by matching the reliable end nodes determined by the position probability. It is shown that the proposed TTM can represent the environment accurately in real-time and it is readily extended to the global TTM.

**Keywords :** TTM (Thinning-based Topological Map), grid map, position probability

### I. 서론

본 지도작성은 이동로봇의 주행 및 위치추정을 위해 반드시 필요한 요소이다. 이동로봇의 주행을 위한 지도에는 일반적으로 격자지도(grid map)와 위상지도(topological map)의 두 종류가 있다. 격자지도는 전체 환경을 일정한 크기의 작은 격자로 나누어 각 격자가 물체에 점유되어 있는 정도를 확률값으로 나타내는 반면에, 위상지도는 노드와 노드 간의 연결성을 나타내는 에지만으로 환경을 표현한다. 따라서 위상지도는 격자지도에 비해 주어지는 메트릭 정보의 양이 적으므로 위치추정에 어려움이 있을 수 있지만, 노드와 에지의 정보만을 추출하여 지도를 작성하므로 큰 메모리의 사용 없이 전역지도로 손쉽게 확장할 수 있고, 이를 주행경로로 직접 활용할 수 있다는 장점이 있다[1].

위상지도는 여러 방법으로 작성될 수 있지만, 위상정보를 추출하는 관점에서 볼 때 두 가지 방식이 일반적으로 사용된다. Choset은 이동로봇에 장착된 초음파센서에서 얻은 거리데이터를 바로 처리하여 GVG (Generalized Voronoi Graph)라는 위상지도를 작성하였다[2]. Kuipers는 우선 격자지도를 작성한 후에 이로부터 확장 보로노이 선도(extended Voronoi graph)를 계산하여 위상정보를 추출하였다[3]. 그러나 복잡한 실제 환경에서 보로노이 선도를 기반으로 하여 위상지도를 작성하면 그 형상이 매우 복잡하게 표현되어 불필요한 정보가 많이 추출되므로 비효율적이라 할 수 있다.

한편, 추출한 지역(local) 위상정보를 전역 위상지도로 확장하는 방법에도 여러 제안이 있었다. 우선 GVG와 같은 경우

는 로봇이 항상 GVG 에지 위로 주행하기 때문에 추출하는 위상정보를 점진적으로 확장하여 전역 위상지도의 작성이 가능하다. 반면에, Alami는 지역환경에서 추출한 위상정보와 전역환경에 대한 위상정보 중 일치하는 노드와 에지를 찾는 방식으로 전역 위상지도를 작성하였다[4]. Kuipers의 경우는 SSH (Spatial Semantic Hierarchy)라는 계층구조를 개발하여 여러 단계에서 위상정보를 추출하고 결합하여 전역환경에 대한 위상정보 및 기하학적 정보를 작성하였다[5].

본 논문에서는 세션화(thinning) 기법을 적용하여 작성한 위상지도인 세션화 기반 위상지도(Thinning-based Topological Map; TTM)를 작성하는 방법을 제시하였다. 실시간으로 측정되는 거리데이터를 사용하여 확률론적 기법으로 갱신한 격자지도를 기반으로 위상지도를 작성하므로 복잡한 주변환경이나 잡음에 대해 강인하게 대처할 수 있다. 이는 일종의 필터링 과정을 거친 것으로 센서정보를 사용하여 바로 위상정보를 추출하는 경우에 비해 강인하면서도 안정적으로 위상정보를 추출할 수 있다. 특히, 아직 거리센서로 탐지하지 못한 미지의 영역이 있어도 제한된 영역(본 연구에서는 로봇을 중심으로 하는 10m×10m의 사각형 영역)에서 지역 위상지도를 실시간으로 얻을 수 있는 장점이 있다.

전역 위상지도의 작성은 지역 위상지도에서 노드의 신뢰성을 정량적으로 계산하기 위하여, 노드의 위치확률(position probability)이라는 개념을 도입하여 신뢰도가 높은 노드를 기준으로 확장하는 방법을 사용하였다. 그림 1은 실험 환경, 거리센서로 작성한 지역 격자지도, 세션화 기법을 사용하여 작성한 지역 TTM 및 전역 TTM의 예로, 본 논문에서 제시하고자 하는 위상지도 작성 기법을 전반적으로 보여주는 예이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 기존에 연구되었던 위상지도 작성 기법의 특징에 대해 간단히 살펴보고, III장에서는 본 연구에서 제안하는 TTM에 대하여 설명한다. IV장에서는 세션화 기법으로 추출한 위상정보의 특징

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 8. 8., 채택확정 : 2006. 4. 4.

권태범, 송재복: 고려대학교 기계공학과

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

※ 이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10336-0) 지원으로 수행되었음.

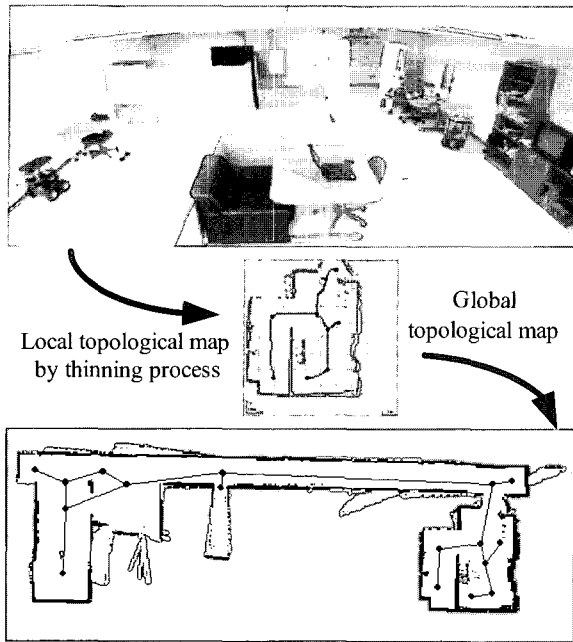


그림 1. 실험환경, 세선화 기법에 의한 지역 위상지도, 지역 위상지도를 확장하여 실시간으로 작성한 전역 위상지도.

Fig. 1. Experimental environments, local topological map built by thinning process and global topological map built in real-time by integrating local topological maps.

및 위상정보의 신뢰도를 정량적으로 표현한 위치확률에 대해 설명한다. V장에서는 위치확률을 사용하여 지역 TTM을 전역 TTM으로 확장하는 방법을 설명하고, 마지막으로 VI장에서 결론과 향후 연구과제를 언급한다.

**II. 관련 연구 고찰**

위상지도를 작성하는 여러 방법 중 가장 대표적인 방법으로 GVG (Generalized Voronoi Graph)가 있는데, 이는  $n$ 차원 공간에서 장애물과의 거리가 동일한 점들의 집합으로, 센서에서 측정된 거리데이터를 직접 사용하여 로봇을 GVG 에지 위로 주행시키면서 위상정보를 추출한다. 센서정보를 별도의 처리 없이 바로 사용하기 때문에 다양한 환경에 대해 지도작성이 가능하고 지도의 확장 또한 쉽지만, 센서의 잡음 및 복잡한 환경에 의한 불필요한 노드가 생성되기 쉬운 단점이 있다. 또한, 로봇이 충분한 정보를 얻기 위해서는 직접 에지 위로 주행하여야 하고, 경계에지(boundary edge) 및 weak meet point 등이 발생하여 주행에 불필요한 정보를 제공하는 단점이 있다. 이를 극복하고자 RGVG (Reduced Generalized Voronoi Graph)를 제안하였지만, 'L' 형상의 복도 구석에서 노드가 생성되지 않는 문제, 일정 길이를 기준으로 에지를 제거하므로 특정한 잡음이 있는 환경에서는 불필요한 에지가 제거되지 않는 문제, 실제로 중요한 에지와 불필요한 에지의 구분이 어려운 문제, 너무 많은 에지를 제거하여 위상정보가 감소하는 문제 등이 있다[7].

Kuipers는 감각부(sensorimotor), 행동부(procedures), 위상부(topology), 기하부(geometry)로 구성되는 SSH (Spatial Semantic

Hierarchy)를 연구하여 로봇 주변의 환경에 대한 정보를 계층적으로 표현하였다. 그러나 노드를 추출하기 위한 과정 자체가 GVG와 같은 단점이 있다[8,10]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 우선 지역 격자지도를 작성한 후 이 지도에서 보로노이 선도를 계산하여 주변환경에 대한 골격을 찾아내는 방법을 사용하게 되는데, 이 경우 센서의 측정 범위보다 넓은 공간에서 보로노이 선도를 올바르게 추출하지 못하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 Kuipers는 장애물에서 일정 거리 이내에 있는 보로노이 선도와 장애물로부터 일정 거리에 있는 점들의 집합을 결합하여 확장 보로노이 선도(extended Voronoi graph, EVG)를 작성하였다[3]. 그러나 격자지도에서 확장 보로노이 선도를 계산하는 알고리즘이 복잡하고, 전역 보로노이 선도를 작성하기 위해선 전역 격자지도가 필요한 단점이 있다.

Alami는 레이저센서 정보 중 보이는 영역뿐만 아니라 보이지 않는 영역까지 고려하여 보로노이 선도를 작성하여 지역 위상지도를 작성하고, 이를 전역 위상지도에 결합하는 연구를 하였다[4]. 지역 위상지도의 에지와 노드가 신뢰할 만한 것인지 그렇지 못한 것인지를 판단하여 신뢰할 만한 노드를 기준으로 전역 위상지도의 노드와 에지에 결합하는 방법으로 전역 위상지도를 작성하였다. 그러나 이 연구의 경우 노드와 에지의 신뢰도를 평가하는 구체적인 기준과 방법을 제시하지는 않았다.

**III. 지역 TTM 의 작성**

**1. 세선화 기법을 이용한 에지 추출**

본 논문에서는 격자지도에 세선화(thinning) 기법을 적용하여 보로노이 선도와 유사한 형상을 효율적으로 표현할 수 있는 방법을 제안하였다. 세선화 기법은 주어진 이미지의 골격을 추출하는 방법으로 잘 알려진 영상처리 기법으로, 본 연구에서는 Suen의 세선화 기법을 사용하였다[6].

그림 2는 세선화 기법의 기본 개념을 보여준다. 좌측의 그림은 하나의 교차점을 갖는 'T'형상의 물체이고, 우측의 그림은 세선화 기법을 적용하여 이 물체의 골격을 추출한 결과이다. 추출된 골격은 최소단위의 두께(예, 한 격자 크기)를 가지며, 좌측 그림과 동일한 위치에 교점이 존재하는 특성이 유지된다.

세선화 기법을 적용하기 위해서 우선 센서로부터의 거리 정보와 로봇의 위치정보를 사용하여 격자지도를 작성한다. 격자지도의 각 격자 중 물체가 점유하고 있는 점유격자는 '1'에 가까운 확률값을, 물체가 점유하지 않고 있는 비점유격자는 '0'에 가까운 확률값을 베이지안 갱신기법(Bayesian update

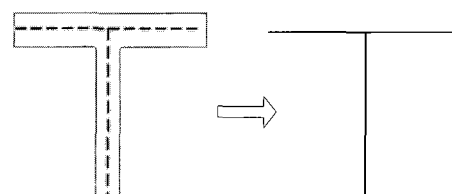


그림 2. 세선화의 개념.

Fig. 2. Concept of thinning.



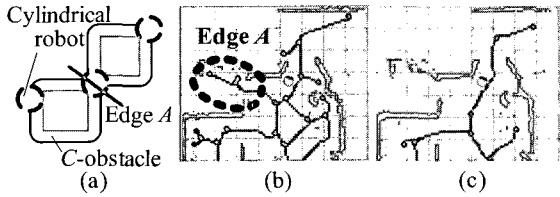


그림 7. C-obstacle를 적용한 주행 가능 경로의 추출 (a) C-obstacle 개념, (b) C-obstacle을 적용하지 않은 경우의 TTM, (c) C-obstacle을 400mm 적용한 경우의 TTM.  
 Fig. 7. Configuration space obstacle for a cylindrical robot and its application to grid map (a) concept of C-obstacle, (b) TTM without C-obstacle, and (c) TTM with C-obstacle of 400mm.

단계에서 C-obstacle (Configuration space obstacle)의 개념을 적용하여 이 문제를 해결할 수 있다[11]. 격자지도에 적용하는 C-obstacle 영역은 로봇을 원형이라고 가정할 때 그 반지름 크기만큼 환경 및 장애물로 인식된 부분을 확장함으로써 쉽게 얻어진다. 그림 7(a)에서 보면 장애물로 표현된 두 개의 사각 물체 사이의 빈 공간은 로봇의 폭보다 좁은데, 이때 C-obstacle을 적용한 후 세선화를 수행하면 두 장애물에서 확장된 영역이 서로 겹쳐서 에지 A가 생성되지 않게 된다.

격자지도에 대해 C-obstacle를 적용하는 것은 인식된 환경 중 점유된 격자 주변을 로봇 반경의 크기만큼 확장하는 것이므로, 검출된 환경을 한 꺼풀씩 벗겨 최종적으로 이의 골격을 추출하는 세선화 기법의 특성상 검출된 환경에 대해 C-obstacle을 적용한 결과를 바탕으로 세선화 기법을 적용시킨 결과는 C-obstacle를 적용시키지 않은 격자지도에 대해 세선화 기법을 적용시킨 결과와 주된 형상은 거의 변하지 않는다. 따라서 C-obstacle을 적용하더라도 필요한 에지가 추출되지 않아서 위상정보가 손상되는 현상은 발생하지 않는다.

그림 7(b)와 (c)는 각각 C-obstacle을 적용하지 않은 경우와 반지름이 400mm인 원형의 로봇을 가정하고 C-obstacle을 400mm로 적용한 경우에 대한 실험 결과이다. 그림 7(b)의 경우 격자지도의 구석까지 불필요한 에지와 노드가 생성되어 위상정보가 매우 지지분하지만 그림 7(c)의 경우 로봇의 크기에 해당하는 C-obstacle이 적용되어 실제로 로봇이 주행할 수 있는 영역까지만 노드와 에지가 생성된 것을 볼 수 있다. 예를 들어 에지 A는 C-obstacle을 400mm로 적용시켰을 때 로봇이 지나갈 수 없는 공간으로 인식되어 추출되지 않지만 에지 A를 제외한 전체적인 위상지도의 주된 형상은 변하지 않았음을 알 수 있다.

3. 노드 추출을 통한 지역 TTM의 작성

세선화 과정을 통하여 추출한 에지로부터 그림 8과 같이 말단노드(end node), 분기노드(branch node), 코너노드의 3가지 종류의 노드를 추출한다. 말단노드는 에지의 말단에 생성되며, 복도의 끝 부분과 같은 환경을 나타낸다. 분기노드는 3개 이상의 에지가 만나는 노드에 생성되며, 장애물 등으로 인하여 공간이 여러 부분으로 나누어지는 환경을 나타낸다. 코너노드는 장애물 등에 의해서 에지의 기울기가 크게 변하는 부분에 생성된다. 위상지도는 노드의 좌표와 노드의 연결관계만이 저장되며, 실제의 에지정보는 저장되지 않으므로, 두 노드 사이의 장애물을 피해서 곡선으로 생성되는 에지를 적절

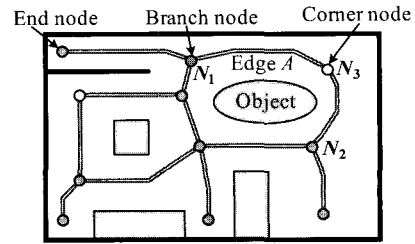


그림 8. TTM의 3가지 종류의 노드.  
 Fig. 8. Three types of nodes in TTM.

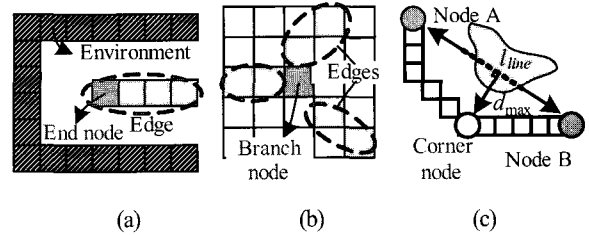


그림 9. TTM에서의 노드 추출.  
 Fig. 9. Node extraction for TTM.

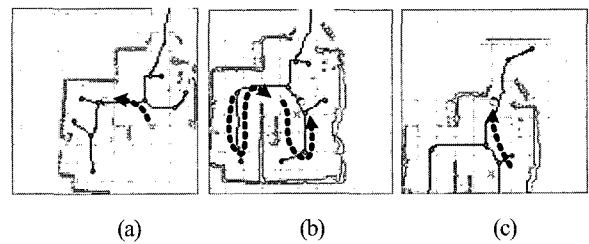


그림 10. 로봇의 주행 중 실시간으로 작성된 지역 격자지도와 TTM.  
 Fig. 10. Local grid map and TTM built in real-time during navigation.

히 나타내기 위해서는 코너노드를 도입하여야 한다. 예를 들어, 저장된 위상정보만으로 추후에 경로를 재생성할 때 그림 8에서 코너노드  $N_3$ 가 없다면 노드  $N_1$ 과  $N_2$ 의 연결관계에 대한 정보만으로는 에지 A처럼 장애물을 회피하는 에지를 생성할 수 없다. 그러나 코너노드  $N_3$ 를 사용한다면 노드  $N_1$ 과  $N_3$ ,  $N_3$ 와  $N_2$ 를 연결하는 직선을 이용하여 에지 A와 유사한 경로를 재생성할 수 있다.

이와 같은 3종류의 노드는 그림 9와 같이 추출된다. 말단노드와 분기노드는 주변 격자들을 관찰하여 추출하는데, 말단노드는 주변의 8개 격자 중 에지를 구성하는 격자가 하나인 경우에, 분기노드는 주변 8개 격자 중 에지를 구성하는 격자가 3개 이상인 경우에 추출된다. 한편, 코너노드는 그림 9(c)에서와 같이 노드 A와 B 사이의 가상직선의 길이를  $l_{line}$ 이라 하고 이 직선에서 가장 거리가 먼 격자까지의 거리를  $d_{max}$ 라 할 때,  $d_{max} > \alpha \cdot l_{line}$ 일 때에 가장 거리가 먼 격자 위치에 생성한다. 본 연구에서는  $\alpha = 0.3$ 으로 설정하였다.

그림 10은 실제 환경에서 Pioneer-3 AT 로봇이 주행을 하면서 지역 격자지도와 TTM을 작성하는 예이다. 격자지도는 SICK LMS200 레이저 스캐너 정보와 로봇의 위치정보를 사

용하여 10m×10m의 사각형 영역에 대해서 작성한다. 로봇이 초기위치에서부터 이동하며 거리센서로 환경을 스캔한 정보로 격자지도를 작성하고 세션화 기법을 적용하여 위상지도를 작성한다. 로봇이 주행을 진행할수록 레이저센서에 탐색된 부분이 증가하여 격자지도 및 위상지도가 표현하는 환경의 영역이 확장됨을 볼 수 있다. 최종적으로 위상정보는 그래프 자료구조를 통해서 각 노드의 위치와 노드간의 연결관계만이 저장된다. 실험에 사용한 한 격자의 크기는 100mm×100mm로 100×100개의 격자를 사용하여 10m×10m의 환경을 표현한다. 세션화 기법을 적용하여 예지와 노드 정보를 추출하는 데 소요되는 시간은 그림 10과 같은 환경에서 일반적인 Pentium 4 노트북을 사용할 때 약 30ms 이내로 이동로봇의 주행에 실시간으로 사용하기에 충분하다.

**IV. 노드의 특성 및 위치확률**

TTM의 노드는 고유한 특성을 가지고 있다. 우선 3개 이상의 예지가 만나는 지점에 생성되는 분기노드는 센서의 잡음이나 환경의 변화에 상대적으로 강인하게 추출된다. 이는 그림 10(a)에서 추출된 분기노드가 환경이 더 많이 탐지된 그림 10(c)에서도 여전히 동일한 위치에서 추출되는 것으로도 확인할 수 있다. 반면에, 예지의 끝 부분에 생성되는 말단노드의 위치는 센서의 가시도 문제와 밀접하게 관련되어 있어서 환경이 센서에 의해 탐지된 정도에 따라 매우 쉽게 변한다.

예를 들어, 그림 11은 로봇이 통로의 끝 부분으로 주행하면서 위상지도를 작성하는 상황이다. 로봇이 노드 A 방향으로 진행하면서 주변의 보이지 않던 부분들이 레이저센서에 탐지되고 새로 갱신된 격자지도에서 세션화 작업이 실시간으로 수행된다. 따라서 말단노드 A는 통로의 끝 부분이 완전히 탐지될 때까지 그 위치가 변하게 된다. 그러나 이 과정에서도 분기노드는 위치가 거의 변하지 않고 강인하게 추출되

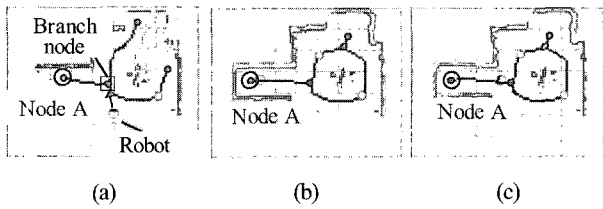


그림 11. 통로의 끝 부분을 탐사할 때의 말단노드 위치 변화.  
Fig. 11. Change in end node position during exploration around dead end of hallway.

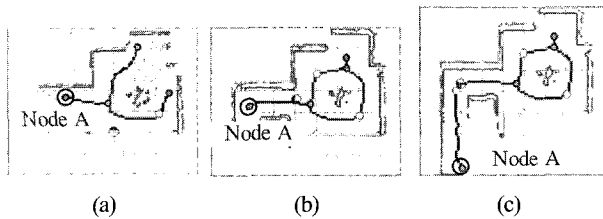


그림 12. 두 통로가 연결된 부분을 탐사할 때의 말단노드 위치 변화.  
Fig. 12. Change in end node position during exploration around connecting area of two hallways.

는 것을 볼 수 있다. 그림 12는 로봇이 접근하면서 새로 탐지한 부분이 통로의 끝 부분이 아니고 새로운 통로가 연결되는 부분일 때 말단노드의 위치 변화를 보여준다. 이 경우 로봇이 접근하며 새로운 영역이 탐지됨에 따라 말단노드는 새로운 통로 안쪽으로 계속하여 이동하게 된다.

이때 새로운 환경이 격자지도에 실시간으로 반영되면서 노드를 추출하기 때문에 노드의 신뢰도에 대한 판단이 필요하다. 즉, 위상지도를 작성하는 과정에서 생성된 말단노드에 있어서, 그 말단노드의 주변환경이 더 많이 탐색되어도 말단노드의 위치에 변동이 없다면, 해당 말단노드의 위치는 신뢰할 수 있다. 이를 정량적으로 판단하기 위해서 위치확률(position probability)을 정의하였는데, 이는 부분적으로 작성된 위상지도의 말단노드의 존재성 및 위치에 대한 신뢰도를 의미하며, 0에서 1사이의 값을 가진다. 위치확률은 거리기반 위치확률(distance-based position probability)과 각도기반 위치확률(angle-based position probability)로 나눌 수 있고, 계산 방법은 참고문헌에 설명되어 있다[12].

**V. 전역 TTM의 작성**

전역 TTM은 다음의 두 가지 방법으로 작성할 수 있다. 첫째는 전역 격자지도를 작성한 후에 이 전역지도에 대하여 TTM을 작성하는 방법이다. 그림 13(a)가 40m×20m의 건물 한 층에서 이 방법으로 작성한 전역 TTM이다. 이 경우 환경이 크고 복잡할 때 전역 격자지도에서 세션화 기법을 수행하는 데 시간이 많이 소요되며, 전역 격자지도를 저장하고 있어야 한다는 단점이 있다. 두 번째 방법은 지역 TTM을 점진적으로 확장하여 전역 TTM을 작성하는 것이다. 이 경우 전역 격자지도를 저장하지 않은 상태로 실시간으로 전역 위상지도를 작성할 수 있는 장점이 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 제한된 크기의 영역에 세션화 기법을 적용하기 때문에 영역의 경계에 해당하는 부분에서 정보가 부족한 현상이 발생한다. 그림 13(b)는 그림 13(a)의 사각형 영역을 로봇이 주행하면서 작성한 지역 위상지도로 A와 B에서 작성한 지역 TTM이 동일하다. 두 그림을 비교하면 경계 부분에서의 정보 부족이 어떠한지 쉽게 알 수 있다. 이런 현상은 복도나 넓은 공간과 같이 세션화를 적용하는 영역 내에 신뢰할 만한 노드가 추출되지 않는 경우에 발생한다. 이런 환경에서는 지역 TTM을 확장하여 전역 위상지도를 작성할 수 없다. 그러므로 정확한 전역 TTM을 작성하기 위해

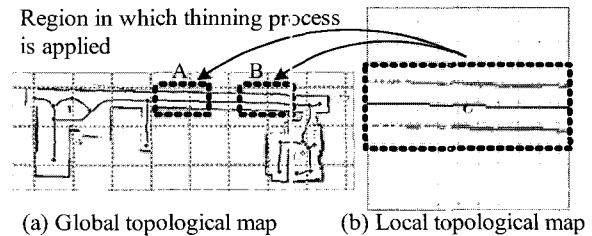


그림 13. 세션화 영역의 크기에 따른 전역 및 지역 TTM의 불일치.  
Fig. 13. Inconsistency between local and global TTM due to size of thinning region.

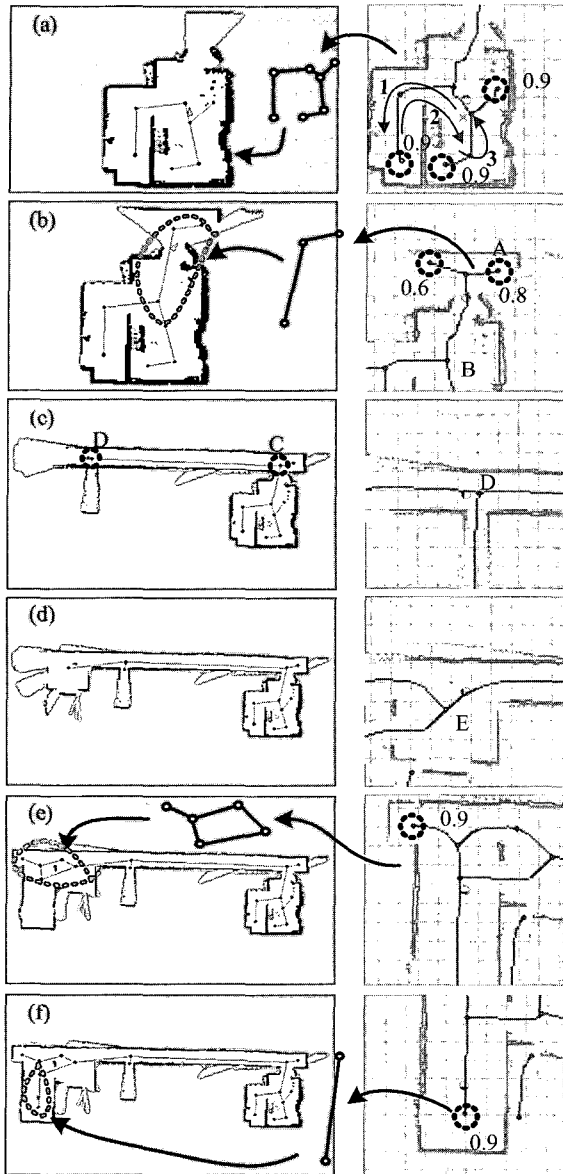


그림 14. 실제 환경에서 실시간으로 지역 TTM을 확장하여 전역 TTM을 작성하는 과정. 각 단계의 왼쪽 그림은 전역 TTM이고 오른쪽 그림은 지역 TTM을 나타냄.

Fig. 14. Process of merging local TTM of the real environment into global TTM in real time. The left figure of each step represents the global TTM and the right figure shows the local TTM at each step.

서는 지역 TTM에서 위치확률이 높은 말단노드와 분기노드의 연결관계만을 결합시켜야 한다.

그림 14는 지역 TTM을 확장하여 실시간으로 전역 TTM을 작성하는 과정이다. 각 단계의 좌측 그림은 전역 TTM을 나타내며, 우측 그림은 지역 TTM을 나타낸다. 점선으로 표시된 원은 위치확률이 계산되는 노드를 나타내며, 옆의 숫자는 위치확률이다. 지역 TTM의 분기노드와 위치확률이 기준치(본 실험에서는 0.8) 이상인 말단노드의 연결관계가 전역 TTM으로 확장된다. 각 단계에 대한 설명은 아래와 같다.

(a) 로봇이 초기위치에서 경로 1, 2, 3을 따라 주행하며 환경

에 대한 격자지도 및 TTM을 작성한다. 위치확률이 0.8 이상인 말단노드와 분기노드의 연결관계가 전역 TTM에 반영된다.

(b) 위치확률이 0.8 이상인 말단노드 A와 분기노드 B의 연결관계가 전역 TTM에 반영된다.

(c) 복도 주행 중에는 위치확률이 높은 노드가 존재하지 않기 때문에 전역 TTM이 확장되지 않는다. 따라서 신뢰할 만한 노드 중 마지막에 본 분기노드 C의 위치를 또 다른 신뢰할 만한 노드 D가 나타날 때까지 기억한다. 두 노드의 연결관계가 전역 TTM에 반영되고, 다시 노드 D의 위치를 기억한다.

(d) 신뢰할 만한 노드인 분기노드 E가 생성되면 노드 D와 노드 E의 연결관계가 전역 TTM에 반영된다.

(e) 새로 추출된 위치확률이 0.8 이상인 말단노드와 분기노드의 연결관계가 전역 TTM으로 확장된다.

(f) 위치확률이 0.8 이상인 모든 말단노드와 분기노드의 연결관계가 전역 TTM에 반영되면 지도 작성이 완료된다.

그림 13(a)는 전역 격자지도에 세선화 기법을 적용하여 비실시간으로 작성한 TTM으로서, 거리센서로 탐지한 범위 내에서는 가장 정확한 TTM이라 할 수 있다. 그림 14(f)의 전역 TTM의 노드의 위치와 노드간의 연결관계를 그림 13(a) 위상지도의 노드의 위치와 노드간의 연결관계를 비교할 때 거의 동일함을 볼 수 있다. 따라서 제안한 방법이 전역 TTM을 비교적 정확히 작성한다고 할 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 세선화 기법을 사용하여 실시간으로 지역 TTM을 작성하는 방법을 제안하였다. 또한, 위치확률로 노드의 신뢰도를 평가하여 넓은 환경에 대한 전역 TTM을 실시간으로 작성하는 방법을 제안하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

1) 격자지도에 세선화 기법을 적용하여 실시간으로 정확한 위상지도를 작성할 수 있었다. 다른 방식에 비하여 위상지도를 작성하는 데 소요되는 시간을 획기적으로 감소시킬 수 있었다.

2) 다른 위상지도 작성 방법들이 환경의 복잡함 때문에 발생하는 불필요한 위상정보를 처리하기 위해 별도의 처리과정을 필요로 하는 반면에, 제안한 TTM에서는 C-obstacle을 적용하는 것만으로도 의미 있는 위상정보를 추출할 수 있다. 또한 거리레이터로부터 직접 위상지도를 작성하지 않고, 거리레이터를 확률적으로 처리하여 작성한 격자지도를 바탕으로 위상지도를 작성하기 때문에 센서의 잡음에도 강인하다.

3) 위치확률이 높은 말단노드와 위치가 강인한 분기노드를 사용함으로써 지역 TTM으로부터 보다 정확한 전역 TTM을 작성할 수 있었다. 이 방식은 다른 방식의 위상지도에도 적용이 가능하다.

현재는 TTM이 환경을 얼마나 정확히 모델링 하는지에 대한 정량적인 판단을 할 수 있는 기법을 연구하고 있다.

참고문헌

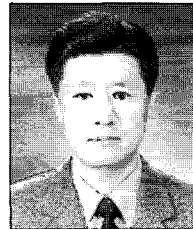
[1] S. Thrun, "Learning maps for indoor mobile robot navigation," *Artificial Intelligence*, vol. 1, pp. 21-71, 1999.  
 [2] H. Choset and J. Burdick, "Sensor-based exploration: the

- hierarchical generalized voronoi graph," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 2, pp. 96-125, 2000.
- [3] P. Beeson and B. Kuipers, "Towards autonomous topological place detection using the extended voronoi graph," *Proc. of IEEE Int. Con. on Robotics and Automation*, pp. 4384-4390, 2005.
- [4] D. V. Zwynsvoorde, T. Simeon, and R. Alami, "Incremental topological modeling using local voronoi-like graphs," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Con. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 897-902, 2001.
- [5] E. Remolina and B. Kuipers, "Towards a formalization of the spatial semantic hierarchy," *Proc. of 4th Symposium on Logical Formalizations of Commonsense Reasoning*, 1998.
- [6] G. A. Baxes, "Digital image processing," *John Wiley & Sons*, 1994.
- [7] H. Choset and K. Nagatani, "Topological simultaneous localization and mapping (SLAM): Toward exact localization without explicit localization," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 2, pp. 125-137, April, 2001.
- [8] J. Modayil, P. Beeson, and B. Kuipers, "Using the topological skeleton for scalable global metrical map-building," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Con. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1530-1536, 2004.
- [9] A. Elfes, "Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation," *IEEE Journal of Computer*, vol. 22, no. 6, pp. 46-57, 1989.
- [10] E. Remolina and B. Kuipers, "Towards a general theory of topological maps," *Artificial Intelligence*, vol. 152, pp. 47-104, 2004.
- [11] J. C. Latombe, "Robot motion planning," *Kluwer Academic Publishers*, 1991.
- [12] T. B. Kwon, J. B. Song, and S. Y. Lee, "Improved exploration algorithm using reliability index of thinning based topological nodes," *Proc. of 2005 Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, pp. 250-255, 2005.



#### 권태범

1977년 8월 15일생. 2003년 고려대학교 기계공학과(공학사). 2003년~현재 동 대학원 기계공학과 석박사통합과정 재학 중. 관심분야는 이동로봇의 지도작성 및 위치추정.



#### 송재복

1960년 8월 5일생. 1983년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 이동로봇의 주행, 햅틱스, 지능로봇 시

스템의 설계 및 제어.