

초음파 격자 지도를 이용한 위상학적 지도 작성 기법 개발

Topological Modeling using Sonar Grid Map

최진우¹, 최민용¹, 정완균¹

Jinwoo Choi¹, Minyong Choi¹, Wan Kyun Chung¹

Abstract This paper presents a method of topological modeling using only low-cost sonar sensors. The proposed method constructs a topological model by extracting sub-regions from the local grid map. The extracted sub-regions are considered as nodes in the topological model, and the corresponding edges are generated according to the connectivity between two sub-regions. A grid confidence for each occupied grid is evaluated to obtain reliable regions in the local grid map by filtering out noisy data. Moreover, a convexity measure is used to extract sub-regions automatically. Through these processes, the topological model is constructed without predefining the number of sub-regions in advance and the proposed method guarantees the convexity of extracted sub-regions. Unlike previous topological modeling methods which are appropriate to the corridor-like environment, the proposed method can give a reliable topological modeling in a home environment even under the noisy sonar data. The performance of the proposed method is verified by experimental results in a real home environment.

Keywords : Topological Modeling, Sonar Sensors, Grid map

1. 서론

이동로봇이 주어진 환경에서 성공적으로 작업을 수행하기 위해서는 로봇의 센서를 통해 인식 가능한 환경 지도 작성에 필수적이다. 이를 위해 많은 연구자들이 다양한 지도 작성 알고리즘들을 개발하여왔다¹⁾.

이동로봇의 지도 작성 기법은 크게 기하학적(metric) 방법과 위상학적(topological) 방법으로 나누어질 수 있다. 기하학적 방법은 환경의 구성 요소들을 기준 좌표계에 대해 절대적인 수치로 표현하는 방법이다. 격자 지도²⁾와 형상 지도³⁾가 기하학적 지도 작성 기법의 대표적인 예이다. 이러한 기하학적 지도는 물건을 정확한 위치에 놓는 등의 정

확한 작업을 수행하기에 적합하다.

이와는 달리, 위상학적 기법은 환경의 구성 요소들 간의 관계를 노드와 에지를 이용한 그래프로 표현하는 방식이다^{4,5)}. 위상학적 지도는 환경 정보를 축약된 형태로 추출하여 표현함으로써, 많은 양의 정보를 낮은 계산량으로 다룰 수 있는 장점이 있다. 또한, 공간의 특성에 따른 연결 관계를 나타내어 주는 특성이 있어, 상위 지능의 의미론적 정보와 결합될 수 있다.

본 논문은 가정 환경에서 초음파 센서만을 이용한 지도 작성 기법을 제안한다. 제안된 방법은 기하학적 지도 작성 기법과 위상학적 지도 작성 기법을 융합한다. 기하학적 지도로는 환경에 대한 격자 지도를 이용한다. 격자 지도는 센서 정보를 누적함으로써 센서 자체의 부정확성을 극복하고 전체 환경에 대한 신뢰할만한 환경 모델을 제공해 줄 수 있다. 위상학적 지도는 이러한 환경의 격자 지도를 세부 영역으로 구분함으로써 작성된다. 제안된 지도 작성 기법에서는 특정 지점을 노드로 인식하는 일반적인 위상학적 기법과는 달리 방과 같은 세부 공간을 노드로 인식한다. 이러한 기법은 특히 가정환경에서 위상학적 지도 작성

Received : Feb. 16. 2011; Reviewed : Apr. 25. 2011; Accepted : Apr. 25. 2011

※ 본 논문은 지식경제부 ‘산업원천기술개발사업’의 일환인 “노약자를 위한 감성교감 및 이동보조 서비스 로봇 개발” 과제(10038574), 교육과학기술부와 한국연구재단의 <실감교육 인체감응술루션> 글로벌프런티어 연구개발사업(한국연구재단-M1AXA003-2010-0029748), 교육과학기술부와 한국연구재단의 도약 연구 지원 프로그램(R17-2008-021-01000-0), 한국과학기술원 국방무인화 기술 특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.

¹ 포항공과대학교 기계공학과

기법을 적용함에 유용하다. 왜냐하면, 가정 환경은 복도 끝 혹은 교차 지점 등만이 중요 지점인 복도 환경과는 달리, 환경의 모든 지점이 작업에 중요하기 때문이다.

기존의 몇 연구 그룹들이 환경을 세부 공간으로 구분하는 지도 작성 기법을 개발하였다. Thrun은 Voronoi diagram을 바탕으로 격자 지도를 세부 공간으로 구분하여 위상학적 그래프 모델을 추출하였고, 이를 효과적인 경로생성에 적용하였다⁶⁾. Lee는 센서 정보의 고유치 비율(Eigen value ratio)을 이용하여 환경을 노드 영역과 에지 영역으로 구분하였다⁷⁾. Buschka와 Saffiotti는 fuzzy morphological opening 기법과 watershed 알고리즘을 이용하여 격자 지도로부터 방 등의 공간을 추출하였다⁸⁾. 이와 유사하게 Zivkovic⁹⁾와 Brunskill¹⁰⁾ 등에 의해 제안된 그래프 분할 기법을 적용하여 격자 지도로부터 세부 영역을 추출한 방법들도 존재한다. Mozos와 Burgard는 레이저 거리 측정 센서 데이터를 AdaBoost 학습 알고리즘에 적용하여 전체 환경을 문, 방, 복도 영역으로 구분하기도 하였다¹¹⁾. 유사한 방법으로 Friedman은 레이저 센서를 이용해 작성된 격자지도에 Voronoi Random Fields를 적용하여 환경을 구분하였다¹²⁾. Huh는 좁은 통로를 통해 영역을 구분함으로써 전체 환경을 수 개의 노드로 인식하기도 하였다¹³⁾. 위 방법들과는 달리 비전 센서를 이용한 위치 표시(place labeling) 방법¹⁴⁾이 이용되었고, 하이브리드 지도의 전역 위상학적 지도 작성을 위한 비전 정보에 따른 노드 구성 방법도 제안되었다¹⁵⁾.

이렇게 기존에 제안된 방법들이 존재하지만, 이 방법들을 가정 환경에서 초음파 센서를 이용하여 적용하기에는 여전히 어려움이 존재한다. 왜냐하면 이 방법들은 복도 환경에 적합하거나, 혹은 영역을 구분하는데 좁은 통로 만이 이용되었고, 또한 많은 기법들이 상대적으로 오류 정보 가득 레이저 센서 데이터에 의존하기 때문이다. 언급한 바와 같이, 가정 환경은 복도 끝 혹은 교차로와 같은 특정 지점이 중요한 복도 환경과 달리, 방 등의 영역을 하나의 공간으로 인식할 수 있어야 한다. 따라서 복도 환경에 적합한 기법을 가정 환경에 적용하기 어려움이 있다. 또한, 레이저 센서 데이터는 초음파 센서에 비해 오류 정보의 비율이 적어, 복잡한 잡음(noise) 제거 과정이 없이도 충분한 정확도를 제공한다. 그리고, 한 번에 많은 정보를 획득할 수 있어, 정보를 누적할 필요가 없이 현재의 센서 정보만으로 공간에 대한 충분한 정보를 얻을 수 있다. 하지만, 초음파 센서는 오류 정보가 많고, 센서 정보가 sparse하다는 단점이 있어, 레이저 센서에 적합하게 개발된 방법을 적용하기에 쉽지 않다(그림 1).

본 논문에서는 이러한 초음파 센서의 단점을 극복하여 sparse하고 부정확한 초음파 센서 정보에 적합한 위상학적

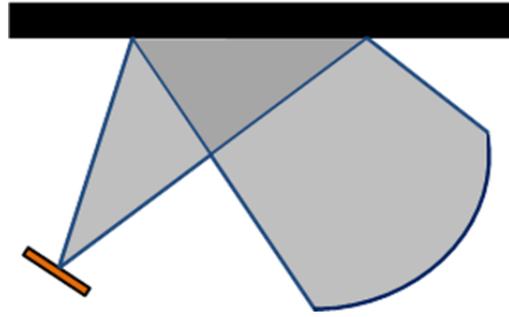


그림 1. 초음파 센서의 넓은 빔폭으로 인한 부정확성

지도 작성 기법을 제안한다. 먼저, 격자 지도를 이용함으로써, 초음파 센서 정보의 sparse한 한계를 극복하였다. 여러 위치에서 얻어진 센서 정보를 누적해 격자 지도를 작성함으로써 센서 정보의 부족을 극복하였다. 또한, 초음파 센서의 오류 정보를 제거할 수 있도록 격자 지도 정보의 신뢰도를 측정한다. 격자 지도 정보의 신뢰도는 격자 지도 상에서 상대적으로 정확한 정보만을 추출하여 준다. 이러한 과정을 통해, 초음파 센서 정보의 부정확성과 sparse한 단점을 극복하고 가정 환경에 적합한 지도 작성 기법을 제안한다.

제안된 방법은 우리의 기존 방법을 기본으로 개발되었다¹⁶⁾, ¹⁷⁾. 하지만 기존 방법은 격자 지도에 셀 분할 기법(cell decomposition)을 적용하여, 그 결과가 일관성이 없다는 단점이 있다. 이는 격자 지도 상의 기준 좌표계 위치에 따라, 셀 분할 결과가 달라질 수 있기 때문이다. 또한 셀 분할 과정은 셀의 최소 크기에 대한 역치(threshold)가 요구된다. 이 역치 값에 따라, 격자 지도의 일부 영역이 위상학적 모델에서 제외될 수 있다. 본 논문은 이러한 기존의 방법의 단점을 극복하고, 격자 지도 상의 전체 비점유(empty) 격자가 위상학적 모델에 포함되며 그 결과가 일관성 있도록 한다.

제안된 지도 작성 기법은 크게 두 단계의 과정을 통해 수행된다. 첫 번째 단계는 지역 격자 지도 내의 주행 가능한 지역에 대한 초기 그래프 모델 작성이다. 이 과정은 지역 격자 지도 내에서 신뢰할 만한 영역만을 추출하고, 추출된 영역에 대한 초기 그래프 모델을 생성한다. 두 번째 단계는 normalized graph cut과 convexity 조건을 이용한 새로운 세부 영역 추출이다. 이 과정에서 전체 환경은 수 개의 convex한 세부 영역들로 나누어진다. 제안된 convexity 조건은 매 시점마다 추가적인 세부 영역 추출이 필요한지를 판단함으로써, 위상학적 지도 작성이 가능하도록 한다. 위의 두 과정을 통해, 제안된 지도 작성 기법은 격자 지도로부터 위상학적 지도를 추출해 준다. 이렇게 얻어진 세부 영역들은 하나의 그래프 모델로 표현되어, 전체 환경을 위

상학적 지도로 표현해 줄 수 있다. 작성된 위상학적 지도는 공간의 연결관계를 나타내어 주기 때문에, 경로 생성에 적용될 수 있을 뿐 아니라, 공간에 대한 의미론적 정보를 부여함으로써 상위 지능과의 연계를 위한 기본 구조 (framework)가 될 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 지역 격자 지도로부터 초기 그래프 모델 생성 기법을 설명한다. 3장은 초기 그래프 모델로부터 세부 영역 추출 기법을 설명한다. 4장은 실험 결과를 보여주며, 5장의 결론이 뒤따른다.

2. 초기 그래프 모델 작성

언급한 바와 같이, 제안된 지도 작성 기법은 초음파 센서 격자 지도를 바탕으로 개발된다. 따라서, 지도작성을 위해 로봇은 가장 먼저 현재 로봇 위치 주변을 이동하며 센서 정보를 획득하고 지역 격자 지도를 작성한다. 격자 지도 작성을 위한 로봇의 위치는 로봇의 바퀴 정보로부터 얻어진다고 가정한다. 격자 지도 작성 방법 자체의 성능 향상은 본 논문의 주요 목적이 아니므로 격자 지도 작성에는 기존의 방법이 이용되었다¹⁸⁾.

2.1 신뢰 영역 추출

작성된 격자 지도는 로봇의 주변 환경에 대한 정보를 제공하여준다. 특히, 장애물의 존재 여부를 알려줌으로 로봇이 주행 가능한 영역을 효과적으로 추출해 준다. 하지만, 초음파 센서의 특성으로 센서 정보의 누적이 충분하지 못한 영역에 대한 격자 지도 정보는 잡음 정보를 포함할 수밖에 없다. 따라서, 제안된 지도 작성 기법에서는 지역 격자 지도 내에서 신뢰할 만한 영역을 먼저 추출하고 이에 해당하는 격자 지도 정보만을 위상학적 지도 작성에 사용한다. 지역 격자 지도 내 신뢰 영역 추출을 위해서는, 경계선 추적(boundary tracing) 기법과 점유(occupied) 격자의 신뢰도가 사용된다.

먼저, 격자 지도상에서 점유 격자와 비점유 격자를 구분

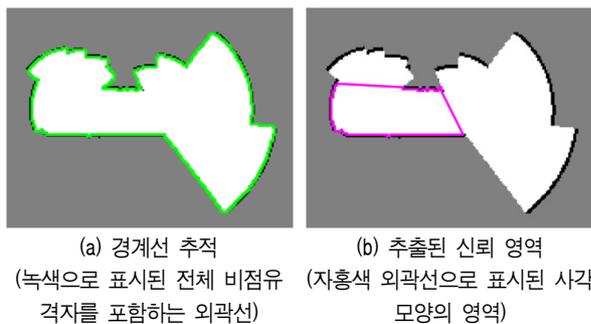


그림 2. 신뢰 영역 추출 과정

하여 비점유 영역만을 얻을 수 있도록 경계선 추적 기법을 적용한다. 그림 2(a)와 같이 경계선 추적을 통해 모든 비점유 격자를 포함하는 외곽선(contour)을 얻는다.

다음으로, 각 점유 격자에 대한 신뢰도가 측정된다. 이를 위해서는, 초음파 센서의 음압 모델이 사용된다 (1).

$$P_s(r, \theta) = \frac{\beta f a^4}{r^2} \left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 r 과 θ 는 각각 초음파 센서의 송신부로부터 각 격자까지의 거리와 각도이다. 그리고 a 는 초음파 송신부의 반지름, f 는 초음파의 진동 주파수, J_1 은 1종 베셀함수이고, β 는 초음파 센서에 따른 비례상수이고, $k=2\pi/\lambda$ 파장(wavelength)이다. 이 변수들에 대한 설명은 참고문헌¹⁹⁾에서 찾아볼 수 있다. 이 초음파 센서의 음압 모델은 센서의 송신부에서 발사된 초음파 데이터 S 에 의해 전달되는 음압에 대한 함수이다. 초음파 센서의 음압 모델은 센서 정보를 평가하는 기준으로 사용될 수 있다. 상대적으로 음압이 높은 센서 정보에 의해 인식된 격자 정보는 낮은 음압의 센서 정보에 의해 인식된 격자 정보에 비해 정확성이 높다고 볼 수 있는 것이다.

이러한 초음파 센서의 음압 모델을 이용하여 모든 점유 격자에 대한 신뢰도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Conf}(x, y) = \sum_{m(x, y) \in \text{Occ}(s)} P_s(r, \theta) \quad (2)$$

여기에서 x 와 y 는 격자 지도 상의 각 격자의 위치를 나타내며, $\text{Occ}(s)$ 는 센서 데이터 S 에 의해 장애물이 존재하는 위치라고 결정되는 격자들의 집합이다. 만일 한 격자가 음압이 높은 센서 데이터에 의해 지속적으로 장애물이 존재한다고 판단되면 해당 격자는 높은 신뢰도를 갖게 될 것이다. 반면, 음압이 낮은 센서 데이터에 의해 수 차례만 장애물이 존재한다고 판단된 격자는 낮은 신뢰도를 갖게 될 것이다. 이러한 낮은 신뢰도를 가진 격자는 높은 신뢰도를 가진 격자에 비해 부정확한 잡음 정보일 가능성이 높다. 각 점유 격자에 대한 신뢰도를 측정 한 후, 모든 격자의 평균 신뢰도 값 보다 큰 신뢰도를 가진 격자를 신뢰 격자로 분류한다. 그리고, 기존의 외곽선에서 신뢰도가 낮은 격자들을 제외하고, 그림 2(b)와 같이 신뢰 격자들만으로 연결된 새로운 외곽선을 얻는다. 이렇게 새롭게 얻어진 외곽선으로 표현된 영역을 신뢰 영역으로 간주하고, 신뢰 영역 내의 격자들만을 이용하여 위상학적 지도 작성을 수행한다.

2.2 초기 그래프 모델 작성

위상학적 지도 작성은 전체 격자 지도 정보 중, 얻어진

신뢰 영역만을 이용한다. 이를 위해, 신뢰 영역에 대한 초기 그래프 모델이 먼저 작성된다. 초기 그래프 모델에서는 신뢰 영역 내의 각 비점유 격자가 노드가 되며 각 격자의 인접성을 따라 에지가 결정된다. 즉, 두 개의 비점유 격자가 서로 인접해 있는 경우, 초기 그래프 모델에서 해당되는 두 노드는 하나의 에지로 연결된다. 반대로, 서로 인접하지 않은 노드에 대해서는 에지를 연결하지 않게 된다. 그리고, 두 노드 간의 유사성을 나타내는 에지의 가중치 (weight) 값은, 에지가 연결된 경우 1로, 에지가 연결되지 않은 경우 0으로 설정함으로써 전체 노드에 대한 유사 행렬 (similarity matrix)을 얻을 수 있다.

이러한 과정을 통해 얻어진 초기 그래프 모델은 모든 비점유 격자들에 대한 정보를 그래프 구조로 표현해 줌으로써, 로봇이 주행 가능한 영역(비점유 격자)에 대한 대략적인 연결 관계를 표현해줄 수 있게 된다.

3. 세부 영역 추출 기법

격자 지도 정보로부터 위상학적 지도 작성을 위해, 제안된 지도 작성 방법에서는 normalized graph cut과 convexity 조건을 이용한다. 이 과정을 통해 세부 영역을 추출하고, 추출된 세부 영역은 convex한 공간이 될 수 있도록 한다.

3.1 Normalized graph cut

주어진 환경에서 convex한 세부 영역을 추출하기 위해서는 현재 로봇이 인식한 공간(신뢰 영역)이 하나의 convex한 공간으로 간주될 수 있는지, 아니면 두 개의 서로 다른 공간으로 나누어 져야 하는지를 판단해야 한다. 이를 위해, 제안된 방법에서는 얻어진 신뢰 영역을 시험적으로 두 개의 임시 영역으로 나눈다. 두 개의 임시 영역을 구하기 위해서는 신뢰 영역에 대한 초기 그래프 모델과 normalized graph cut이 이용된다.

Normalized graph cut은 그래프의 분할을 이용한 집단화 (clustering) 기법이다^[20]. Normalized graph cut에는 노드 (vertex)와 에지의 조합으로 구성된 그래프 구조, $G(V, E)$, 가 사용된다. 각 에지는 두 노드, V_i 와 V_j 사이의 유사 값을 표현해주는 ω_{ij} 를 가진다. 이러한 그래프 구조 상에서 normalized graph cut은 N_{cut} (3) 값이 최소가 되도록 하는 그래프 분할을 구한다.

$$N_{cut} = \frac{\sum_{i \in C_1, j \in C_2} \omega_{ij}}{\sum_{i \in C_1, j \in V} \omega_{ij}} + \frac{\sum_{i \in C_1, j \in C_2} \omega_{ij}}{\sum_{i \in C_2, j \in V} \omega_{ij}} \quad (3)$$

이 식에서 C_1 과 C_2 는 서로 다른 집단을 나타낸다.

N_{cut} 을 최소화 함으로 normalized graph cut은 서로 다른 집단 간의 유사 값(similarity)을 최소화 함과 동시에 같은 집단에 해당되는 노드 간의 유사 값을 최대화 하는 결과를 제공한다. 이 방법은 집단의 수를 미리 정해주어, 임의의 k 개의 집단으로 나누는 그래프 분할을 제공하여 줄 수 있다. 제안된 방법의 경우, 두 개의 임시 영역을 구하기 위해 집단의 수는 2로 정해주게 된다.

이렇게 신뢰 영역에 대한 초기 그래프 모델에 normalized graph cut 기법을 적용하여, 두 개의 임시 영역이 효과적으로 얻어질 수 있다. 그리고 얻어진 임시 영역에 convexity 조건을 적용하여 세부 영역을 추출한다.

3.2 Convexity를 이용한 세부 영역 추출

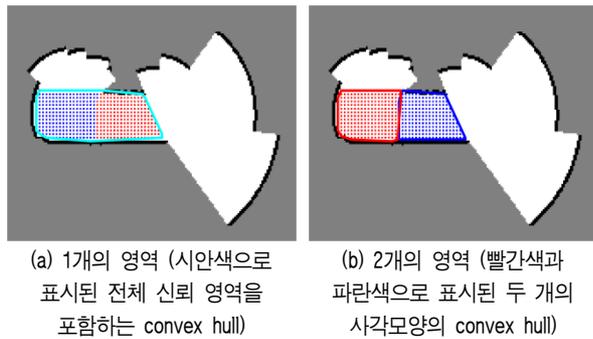
Normalized graph cut을 이용해 얻어진 두 개의 임시 영역을 이용하여 세부 영역 추출을 수행하기에 앞서, 로봇은 현재 얻어진 신뢰 영역을 하나의 convex한 영역으로 간주하는 것이 합당한 지, 혹은 두 개의 공간으로 나누어 새로운 세부 영역을 추출하는 것이 합당한 지를 판단해야 한다. 만약, 현재 신뢰 영역을 하나의 convex한 영역으로 간주하는 것이 합당하다면, 추가적인 세부 영역 추출 없이 계속적으로 격자 지도 작성을 수행하게 된다. 반대로 세부 영역 추출을 수행한다면, 두 개의 임시 영역 중 하나를 세부 영역으로 추출하고, 나머지 공간에 대해서 계속적으로 격자 지도 작성을 수행하게 된다. 이러한 과정을 판단하기 위해 제안된 지도 작성 방법에서는 convexity 조건이 이용되었다.

Convexity를 정량적인 조건으로 이용하기 위해 신뢰 영역에 대한 convexity 값을 다음과 같이 정의하였다. 먼저, 신뢰 영역을 하나의 영역으로 간주한 경우와, 두 개의 영역으로 간주한 경우에 대해 각각 convex hull을 구하였다(그림 3). 이 convex hull들은 신뢰영역 내의 격자들을 이용하여 얻어졌으며, 계산의 효율성을 위해 격자의 수는 1/4로 다운 샘플링(down sampling)하여 이용되었다. 그리고, 각 경우 대한 convexity 값을 영역의 크기 대비 convex hull 내의 점유 격자 수로 정의하였다(4, 5).

$$C_{1cluster} = \frac{\# \text{ of occupied grid} \in CH1}{\# \text{ of grid} \in CH1} \quad (4)$$

$$C_{2clusters} = \frac{\sum_{i=1}^2 \# \text{ of occupied grid} \in CH2(i)}{\sum_{i=1}^2 \# \text{ of grid} \in CH2(i)} \quad (5)$$

여기에서 CH1은 신뢰 영역을 한 개의 영역으로 간주한 경우의 convex hull(그림 3(a))이고, CH2(i)는 신뢰 영역을 두 개의 영역으로 간주한 경우에 얻어진 두 개의 convex



(a) 1개의 영역 (시안색으로 표시된 전체 신뢰 영역을 포함하는 convex hull)
 (b) 2개의 영역 (빨간색과 파란색으로 표시된 두 개의 사각모양의 convex hull)

그림 3. Convexity 계산을 위한 convex hull (빨간색과 파란색 격자는 두 개의 임시 영역을 나타냄)

hull(그림 3(b))이다.

이 convexity 값이 0인 경우, 해당 영역은 완전한 convex 영역이 되며, 이 값이 커질수록 해당 영역 내에 더 많은 concave한 구역이 존재함을 의미한다. 이렇게 구해진 두 개의 convexity 값들을 이용하여 다음 조건이 만족된 경우에 새로운 세부 영역 추출한다(6).

$$C_{1cluster} > c_t \ \& \ C_{2clusters} < 0.5 \times C_{1cluster} \quad (6)$$

첫 번째 조건은 현재의 신뢰 영역이 하나의 convex 영역으로 간주될 수 없음을 의미한다. 이 때 사용된 는 역치 값으로, 해당 영역을 하나의 convex 영역으로 간주할 수 있는 최대 점유 격자 비율의 허용치를 의미하며, 그 값은 0.15가 사용되었다. 두 번째 조건은 현재의 신뢰 영역이 normalized graph cut에 의해 충분히 효과적으로 나누어졌는지를 확인하기 위해 사용되었다. 이 두 가지 조건이 모두 만족되면, 새로운 세부 영역이 추출되며, 그렇지 못한 경우, 로봇은 새로운 세부 영역 추출 없이 계속적으로 격자 지도를 작성해 나가게 된다. 조건이 만족되었을 때, 추출되는 새로운 세부 영역은 두 개의 임시 영역 중, 현재 로봇의 위치로부터 거리가 더 먼 임시 영역이 된다. 그리고 이렇게 추출된 세부 영역은 로봇이 해당 세부 영역을 다시 주행하지 않는 한, 이후의 추가적인 세부 영역 추출에는 사용되지 않는다.

그림 4는 제안된 세부 영역 추출의 과정을 보여준다. 처음 두 과정(그림 4(a)-(b))에서는 세부 영역 추출을 위한 조건이 만족되지 않아, 로봇은 계속적으로 격자 지도 작성을 수행한다. 그림 4(c)에서 조건이 만족되어, 두 임시 영역 중 로봇과 거리가 더 먼 빨간색 영역이 새로운 세부 영역으로 추출되었다. 이렇게 추출된 세부 영역은 이후 단계인 그림 4(d)에서는 녹색 영역으로 표시되어, 추가적인 세부 영역 추출에는 사용이 되지 않았다.

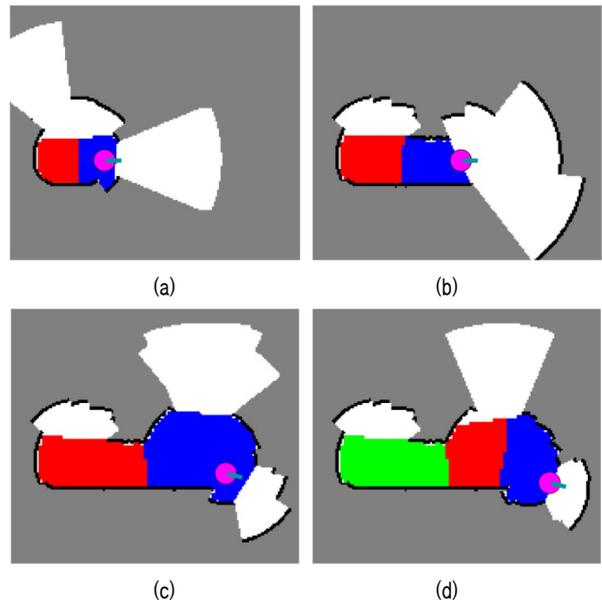
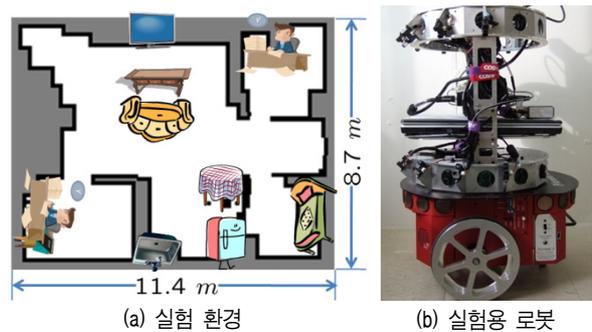


그림 4. 세부 영역 추출 과정

4. 실험 결과

제안된 지도 작성 기법의 성능을 검증하기 위해, 실제 가정 환경에서 실험이 수행되었다(그림 5(a)). 이 가정 환경은 11.4m × 8.7m의 크기로, 3개의 방과 1개의 주방, 그리고 몇 가지 가구가 놓인 거실로 구성되어 있다. 실험은 12개의 MURATA MA40B8 초음파 센서가 장착된 PIONEER-DX 로봇을 이용하여 수행되었다(그림 5(b)). 로봇은 조종자에 의해 수동으로 이동되었으며, 약 0.15 m/s의 속도로 벽 추종(wall following) 경로를 따라 주행하였다. 전체 환경을 1바퀴 주행하는 동안 약 15분의 시간이 소요되었다. 로봇은 이동하는 동안 4Hz의 주기로 초음파 센서 데이터를 획득하며 격자 지도를 작성하였다.

그림 6은 제안된 알고리즘을 통해 얻어진 세부 영역 추출 및 이에 해당하는 위상학적 그래프 모델에 대한 결과를 보여준다. 로봇이 이동함에 따라 격자 지도를 작성하고 작



(a) 실험 환경 (b) 실험용 로봇

그림 5. 실험 환경 및 실험용 로봇

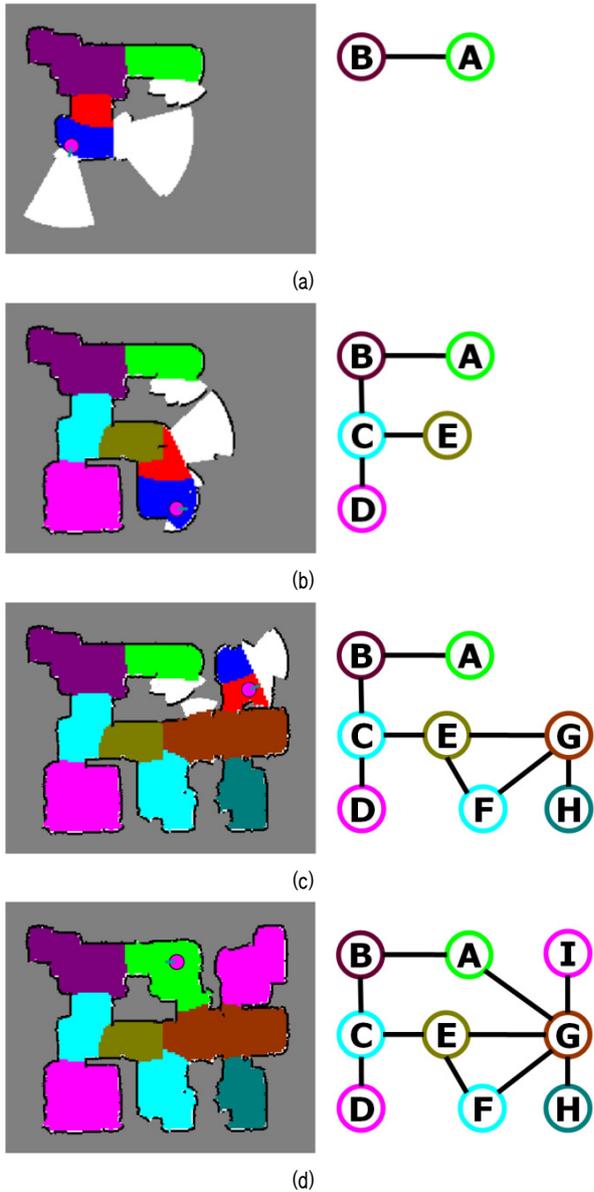


그림 6. 세부 영역 추출 및 위상학적 그래프 모델

성된 격자 지도를 이용하여 세부 영역 추출을 수행하는 과정이 그림 6(a)에서 그림 6(d)까지 시간 순서에 따라 차례로 나타나있다. 얻어진 세부 영역들은 서로 다른 색깔로 표현되어 있다. 그리고, 각 그림에서 파란색 영역과 빨간색 영역은 각 과정에서 얻어진 두 개의 임시 영역으로, 이 두 개의 임시 영역은 아직 새로운 세부 영역으로 추출되지 않았으므로, 그래프 모델에는 포함되지 않았다.

최종적으로 얻어진 세부 영역과 위상학적 그래프 모델은 그림 6(d)에 나타난다. 결과에 나타난 바와 같이, 3개의 방이 노드 D, H, I로 얻어졌으며, 각 방은 영역의 경계가 되는 방문을 기준으로 정확히 나누진 것을 확인할 수 있

다. 또한, 부엌이 노드 F로 구분되었으며, 거실과 복도는 공간의 특성과 가구의 배치를 고려하여 5개의 convex한 세부 영역으로 나누어진 것을 결과에서 확인할 수 있다. 그리고, 그림 6(d)의 오른쪽 그래프는 전체 환경에서 얻어진 세부 영역들 간의 연결 관계를 정확히 표현해주는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 추출된 세부 영역들의 convexity 값을 보여준다 (4). 결과에서 보여주는 바와 같이, 모든 추출된 세부 영역들은 식 (6)에서 사용된 역치 값 0.15보다 작은 값을 갖는다. 이는 모든 세부 영역들이 convex한 영역으로 추출되었음을 증명한다.

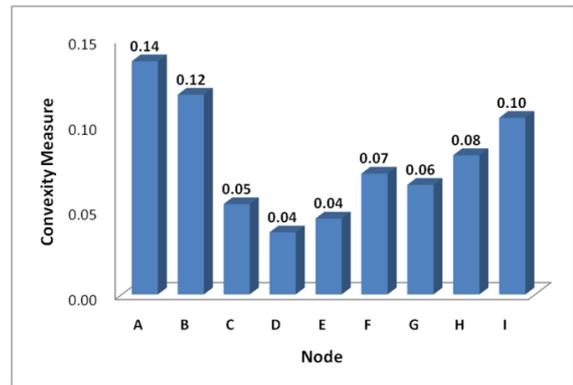


그림 7. 추출된 세부 영역들의 convexity

5. 결론

본 논문은 초음파 격자 지도를 이용한 위상학적 지도 작성 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 부정확하고 sparse한 초음파 센서 정보의 단점을 극복하여 안정적으로 구현 가능한 위상학적 지도 작성 기법이 되도록 하였다.

본 논문이 기여하는 바는 다음과 같다. 먼저, 기존의 위상학적 지도 작성 기법들과는 달리, 초음파 센서만을 이용하여 가장 환경에서 세부 영역을 기반으로 한 위상학적 지도 작성 기법을 제안하였다. 또한, 초음파 센서의 부정확성을 극복하기 위해 격자 지도 상의 잡음 정보를 효과적으로 제거하여, 신뢰할 수 있는 데이터만을 이용한 초기 모델 작성이 가능하도록 하였다. 마지막으로, normalized graph cut과 convexity 값을 이용하여 자율적인 세부 영역 추출이 가능하도록 하였다. 이렇게 얻어진 세부 영역을 위상학적 지도의 노드로 인식하고, 각 세부 영역 간의 연결 관계로부터 에지를 구성함으로써 전체 환경에 대한 성공적인 위상학적 지도 작성이 가능하였다.

이렇게 작성된 위상학적 지도는 상위 지능의 알고리즘과 연계하여, 각 세부 영역에 대한 의미론적 정보를 부여

함으로 인간-로봇 상호작용(human-robot interaction)의 기본 구조로 사용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] S. Thrun, "Robotic mapping: a survey", in Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium, edited by G. Lakemeyer and B. Nebel, Morgan Kaufmann, 2002.
- [2] A. Elfes, "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation", IEEE Computer, Vol.22, No. 6, pp.46-57, 1989.
- [3] J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, "Simultaneous Map Building and Localization for an Autonomous Mobile Robot", in Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1442-1447, 1991.
- [4] H. Choset and K. 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, 2001.
- [5] T. B. Kwon and J. B. Song, "Real-time building of a thinning-based topological map", Intelligent Service Robotics, Vol.1, No.3, pp.211-220, 2008.
- [6] S. Thrun, "Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation", Artificial Intelligence, Vol.99, No.1, pp.21-77, 1998.
- [7] K. Lee, N. L. Doh and W. K. Chung, "An Exploration Strategy using Sonar Sensors in Topological Environments", Intelligent Service Robotics, Vol.3, No.2, pp.89-98, 2010.
- [8] P. Buschka and A. Saffiotti, "A Virtual Sensor for Room Detection", in Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.637-642, 2002.
- [9] Z. Zivkovic, B. Bakker and B. Krose, "Hierarchical Map Building and Planning based on Graph Partitioning", in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.803-809, 2006.
- [10] E. Brunskill, T. Kollar and N. Roy, "Topological Mapping Using Spectral Clustering and Classification", in Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3491-3496, 2007.
- [11] O. M. Mozos and W. Burgard, "Supervised learning of topological maps using semantic information extracted from range data", in Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2772-2777, 2006.
- [12] S. Friedman, H. Pasula and D. Fox, "Voronoi Random Fields: Extracting the Topological Structure of Indoor Environments via Place Labeling", in Proc. of International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.2109-2114, 2007.
- [13] J. Huh, W. S. Chung, S. Y. Nam and W. K. Chung, "Mobile Robot Exploration in Indoor Environment Using Topological Structure with Invisible Barcodes", ETRI Journal, Vol.29, No.2, pp.189-200, 2007.
- [14] P. Viswanathan, D. Meger, T. Southey, J. J. Little and A. Mackworth, "Automated Spatial-Semantic Modeling with Applications to Place Labeling and Informed Search", in Proc. of Canadian Conference on Computer and Robot Vision, pp.284-291, 2009.
- [15] S. Park, M. Park and S. K. Park, "Object-Spatial Layout-Route based Hybrid Map and Global Localization for Mobile Robots", International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol.7, No.4, pp.598-614, 2009.
- [16] J. Choi, M. Choi and W. K. Chung, "Incremental Topological Modeling using Sonar Gridmap in Home environment", In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3582-3587, 2009.
- [17] J. Choi, M. Choi, S. Y. Nam and W. K. Chung, "Autonomous topological modeling of a home environment and topological localization using a sonar grid map", Autonomous Robots, Vol.30, No.4, pp.351-368, 2011.
- [18] K. Lee and W. K. Chung, "Effective maximum likelihood grid map with conflict evaluation filter using sonar sensors", IEEE Transactions on Robotics, Vol.25, No.4, pp.887-901, 2009.
- [19] L. Kleeman and R. Kuc, "Sonar sensing", in Handbook on Robotics, edited by B. Siciliano and O. Khatib, Springer, 2008.
- [20] J. Shi and J. Malik, "Normalized Cuts and Image Segmentation," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, Issue8, pp.888-905, 2000.



최진우

2003년 포항공과대학교 기계공학
학과 (학사)
2005년 포항공과대학교 기계공학
학과 (석사)
2005~현재 포항공과대학교 기계공학과 박사과정

관심분야 : Mapping, Localization



최민웅

2003년 포항공과대학교 기계공학
학과 (학사)
2005년 포항공과대학교 기계공학
학과 (석사)
2005~현재 포항공과대학교 기계공학과 박사과정

관심분야 : State estimation, Localization



정완균

1981년 서울대학교 기계설계학
(학사)
1983년 한국과학기술원 기계공학
(석사)
1987년 한국과학기술원 로봇공학
(박사)

1987년~1993년 포항공과대학교 기계공학과 조교수
1988년 CMU 방문 교수
1995년 U.C. Berkeley visiting scholar
1993년~2000년 포항공과대학교 기계공학과 부교수
2000년~현재 포항공과대학교 기계공학과 교수
관심분야 : SLAM, Navigation, Underwater robots,
Surgical robots, Robust controller