세선화 기법을 이용한 전역 토폴로지컬 지도의 작성 및 위치추적

최창혁† · 송재복* · 정우진** · 김문상**

Thinning Based Global Topological Map Building with Application to Localization

Chang-Hyuk Choi, Jae-Bok Song, Woojin Chung and Munsang Kim

Key Words : map building(지도작성), localization(위치추적), topological map(토폴로지컬 지도), thinning(세선화), visibility analysis(가시도 해석), Voronoi diagram(보로노이 선도)

Abstract

Topological maps have drawn more attention recently because they are compact, provide natural interfaces, and are applicable to path planning easily. To build a topological map incrementally, Voronoi diagram was used by many researchers. The Voronoi diagram, however, has difficulty in applying to arbitrarily shaped objects and needs long computation time. In this paper, we present a new method for global topological map from the local topological maps incrementally. The local topological maps are created through a thinning algorithm from a local grid map, which is built based on the sensor information at the current robot position. A thinning method requires simpler computation than the Voronoi diagram. Localization based on the topological map is usually difficult, but additional nodes created by the thinning method can improve localization performance. A series of experiments have been conducted using a two-wheeled mobile robot equipped with a laser scanner. It is shown that the proposed scheme can create satisfactory topological maps.

1. 서 론

지도 작성(map building)은 로봇의 주변환경을 모델링하는 작업을 말하며, 위치추적(localization)은 전역 기준좌표계에 대한 로봇의 위치와 방위를 결정하는 과정을 말한다.

이러한 환경에 대한 모델링 작업에는 두 가지의 큰 기법이 사용되고 있는데, 하나는 격자지도이고, 다른 하나는 토폴로지컬 지도이다. 격자지도는 상대적으로 쉬운 방식을 이용하여 정확한 지도를 작성할 수 있다는 장점이 있으나, 대용량의 메모리를 요하며, 계획을 수립함에 있어서 비효율적이고, 또한 시간을 많이 소요하게 된다는 단점을 가지게 된다. 반면에, 토폴로지컬 지도는 더 효율적으로 계획을 수립할 수 있게 하며, 간결한 지도를 작성할 수 있다는 장점을 가지나, 위치추적에 적용하기 어렵다.

대부분의 경우, 전역 토폴로지컬 지도는 전역 격자지도에 의해 작성되어왔다. 이러한 계층적 기법은 격자지도와 토폴로지컬 지도의 장점을 모두 활용할 수 있지만, 격자지도에서 문제점으로 제시되었던 대용량의 메모리를 요한다는 점을 여전히 남아있게 된다. 더욱이, 이러한 계층적 기법으로 작성된 지도를 갱신하는 작업은 매우 어렵게 된다[1]. 이러한 계층적 기법의 대안으로 보로노이 선도를[2] 이용해 토폴로지컬 지도를 직접 작성하는 기법이 Choset[3]과 Zwynsvoorde[4]에 의해 제시되었다. 그러나 보로노이 선도를 작성하는 것은 임의의 형상을 지닌 물체에 대해 적용하기 어렵게 되고, 또한 많은 계산시간을 요하게 된다는 단점을 가지게 된다.

본문에서는 토폴로지컬 지도의 직접적인 작성을 위한 개선된 방식을 제안하도록 한다. 먼저, 현재 센서값을 통해 국부 격자지도를 작성한다.

† 고려대학교 대학원
E-mail : vision2@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3363 FAX : (02)3290-3757
* 고려대학교 기계공학과
** 한국과학기술연구원(KIST)

이렇게 작성된 격자지도에 보로노이 선도의 대안으로 세선화 기법을 적용하여 국부 토폴로지컬 지도를 작성한다. 마지막으로, 국부 토폴로지컬 지도는 전역 토폴로지컬 지도로 갱신되고, 이러한 작업을 통해 전역 토폴로지컬 지도를 완성하게 된다. 국부 토폴로지컬 지도의 기하학적 정보는 후에 국부 지도를 매칭하는 데에 있어서 표식(landmark)의 역할을 수행하게 된다.

위치추적에 관한 대부분의 연구에서는 환경에 대한 자세한 정보를 가진 격자지도를 사용하고 있다. Monte Carlo [5], Condensation [6], probability grid [7]와 같은 확률에 근거한 기법들이 여기에 속한다고 하겠다. 토폴로지컬 지도를 이용한 위치추적 기법은 최근에 들어서야 연구되기 시작했다([8], [9]). 그러나 토폴로지컬 지도를 이용한 위치추적에 있어서의 문제점은 로봇이 현재의 상태를 인식함에 있어서 순간적인 센서정보만으로는 부족하다는 데에 있다. 왜냐 하면 토폴로지컬 지도에 있어서의 기하학적 정보가 모호할 수 있기 때문이다. 이러한 위치추적을 수행함에 있어서의 문제점을 극복하기 위해, 토폴로지컬 지도의 정보를 증가하기 위한 방식으로 부가적인 노드를 추가하였다.

노드간의 주행을 수행함에 있어서, 정확한 환경에 관한 모델을 가지고 있지 않기 때문에, wave-front 알고리듬[10]을 사용하여 노드와 노드를 주행하였다. 이러한 방식을 이용함으로써, 이동로봇은 장애물을 회피하면서, 최적의 경로를 통해 다음 노드로 이동할 수 있게 된다.

본문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 세선화 기법을 이용한 국부 토폴로지컬 지도의 작성하고, 이를 전역 토폴로지컬 지도에 갱신하는 방식에 대해 설명하겠다. 3장에서는 토폴로지컬 지도를 이용한 위치추적에 관한 방식과 wave-front 알고리듬을 통한 노드간의 주행에 대해 설명하겠다. 4장에서는 실제 환경에서의 실험을 제시하도록 한다.

2. 토폴로지컬 지도의 작성

2.1 세선화 기법을 이용한 국부 토폴로지컬 지도의 작성

본 연구에서 위치추적과 경로계획을 위해 주로 사용하는 지도는 토폴로지컬 지지도이다. 토폴로지컬 지도에서, 로봇의 주변환경은 노드(node)와 호(arc)의 집합으로 모델링된다. 이렇게 함으로써, 간결성, 빠른 계산시간, 또한 사용자에게 좀더 자연스러운 인터페이스를 제공할 수 있다는 등의 장점을 얻을 수 있다. 예를 들어, '앞에 보이는 골목(노드)을 따라가면(호), 문(노드)이 나온다'와 같은 모델링 기법이 토폴로지컬 지도인 것이다. 그러나 토폴로지컬 지도는 위치추적에는 적절하지 않게 된다. 이것은 토폴로지컬 지도에 있어서의 위치추적은 노드를 표식으로 두고, 노드에 대한 로봇의 상대적인 위치를 결정하는 방식으로 이루어지기 때문이다. 마치, 지하철을 타고 가면서 역과 역 사이에 자신이 어느 곳에 위치하고 있는지를 알지 못하는 것과 같다. 따라서 위치추적의 성능을 높이려면, 이러한 노드 정보를 추가하여야 한다.

2진 격자지도, 혹은 특징 지도(feature map)을 통해 토폴로지컬 지도를 작성하는 방식에서 일반적으로 보로노이 선도를 사용하였다. 그러나 이 방식은 복잡하며, 임의의 형상을 지닌 물체에 대해 적용하기 어렵다는 단점을 가지게 된다. 따라서 토폴로지컬 지도를 작성함에 있어서 본문에서는 영상처리 기법의 일종인 세선화(thinning)를 사용하였다. 이러한 세선화 기법은 보로노이 선도보다 단순한 계산량을 요구하며, 보로노이 선도와 유사한 성능을 보인다는 장점을 가지게 된다.

세선화 기법은 영상처리 알고리듬의 널리 사용되는 기법 중 하나로, 획득한 영상의 골격을 검출하는 기법이다. 이러한 세선화 기법은 두께 정보는 중요하지 않은, 세포의 생물학적 구조를 검출하는 등의 적용 분야를 가지게 된다.

Fig. 1은 세선화 과정의 일례를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 물체가 세선(thin line)으로 표현되더라도 물체의 연결성은 그대로 유지되고 있다. 이동로봇의 경우, 이러한 선은 물체와 충돌하지 않고 주행할 수 있는 경로로 활용할 수 있다. 그림에서의 두 물체는 기하학적으로는 다르지만 위상학적으로는 같은 형태를 가지게 됨을 알 수 있다. 이 때, 비록 세선에 의해 연결되어 있지만, 물체(혹은 구조)의 연결성(connectivity)은 유지되고 있음을 주목하라. 이동로봇의 경우, 세선화를 통해 결과적으로 생성된 선은 다른 장애물, 혹은 물체와 충돌 없이 주행할 수 있는 경로가 된다.

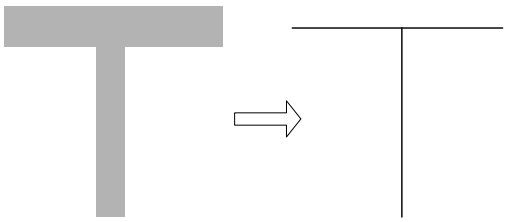


Fig. 1 Example of thinning.

본문에서는 Suen[10]의 세선화 기법을 채택하였다. 이 기법은 오랫동안 다양한 세선화 기법의 근간을 이루고 있는 기법으로 빠르고 단순한 알고리듬을 가진다는 장점이 있다. Fig. 2는 중앙에 위치한 대상 격자 p_1과 이를 둘러싸고 있는 세선화 마스크를 나타낸다.

p_9	p_2	p_3
p_8	p_1	p_4
p_7	p_6	p_5

Fig. 2 Center cell p_1 and its thinning mask.

p_1이 점유되어 있는 격자일 때, 아래의 조건을 그 이웃한 8개의 격자($p_2 \sim p_9$)에 대해 적용한다. 이 때, '1'은 격자의 점유, '0'은 비점유 상태를 나타낸다. 세선화 과정을 통해 다음의 조건을 만족하게 되면, 점유된 격자 p_1은 제거(즉, 비점유 상태로 전환)하게 된다.

[단계 1]

① $2 \le N(p_1) \le 6$,
② $S(p_1) = 1$,
③ $p_2 \cdot p_4 \cdot p_6 = 0$,
④ $p_4 \cdot p_6 \cdot p_8 = 0$

$N(p_1)$: 0이 아닌 격자의 개수 (즉, $N(p_1) = p_2 + p_3 + \ldots + p_8 + p_9$.)

$S(p_1)$: $p_2, p_3, \ldots, p_8, p_9$ 의 과정에서 0에서 1로 변하는 개수

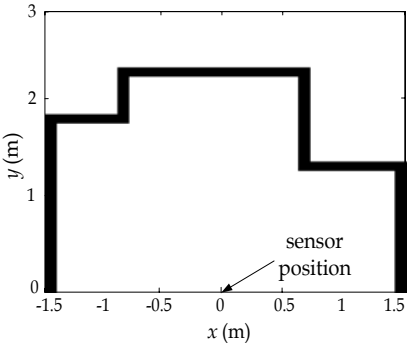
[단계 2]

①과 ②는 [단계 1]과 동일,
③ $p_2 \cdot p_4 \cdot p_8 = 0$,
④ $p_2 \cdot p_6 \cdot p_8 = 0$

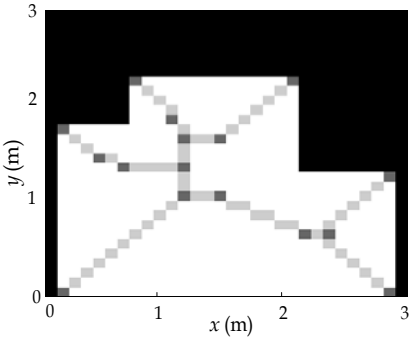
이 때, 단계 1을 모든 격자에 적용한 다음에, 단계 2를 적용하게 된다.

국부적인 환경에 있어서 대표적인 점인 노드는 아크상에서 추출하게 된다. 노드의 개수와 위치는 토폴로지컬 지도의 정확도와 유용성과 직접적인 연관성을 가지므로, 적절한 선정 기준이 매우 중요하게 된다. 본 연구에서는 아크의 끝점, 아크의 기울기가 변하는 코너점, 3개 이상의 아크가 만나는 분기점(branch point)에 노드를 결정하였다.

Fig. 3(a)는 레이저 스캐너를 이용하여 얻은 거리 데이터를 나타낸다. 이 때, 레이저 스캐너는 원점에 위치한다고 가정하였다. Fig. 3(b)은 거리 데이터로부터 작성한 이진지도와 이에 세선화를 적용하여 얻은 토폴로지컬 지도를 나타낸다. 이 때, 레이저 스캐너에 의해 검출된 점의 뒷부분은 물체로 채워져 있다고 가정하였다. 이러한 토폴로지컬 지도는 노드의 위치정보와 노드간의 연결성을 포함하게 된다.



(a) Laser scanner range data



(b) Collision-free path obtained by thinning and its nodes

Fig. 3 Thinning and local topological map building.

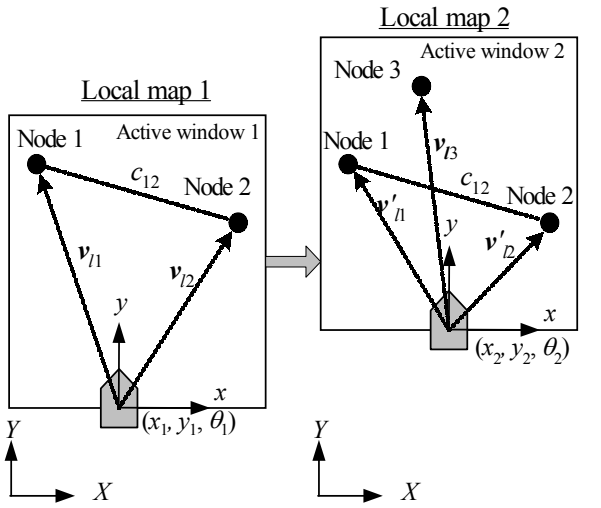
세선화 기법을 사용하면 보로노이 선도에 비해 토폴로지컬 지도에 부가적인 노드를 얻게 된다. 보로노이 선도에서는 3개의 호가 만나는 점(본문에서의 분기점)을 노드로 선정하였으나, 본문에서는 호의 끝점을 노드로 선정하는 것을 통해 부가적인 노드가 생성하였다. 이러한 노드는 위치추적의 성능을 향상시키며, cyclic 환경에서 주행을 돕는 역할을 수행하게 된다.

2.2 전역 토폴로지컬 지도의 작성

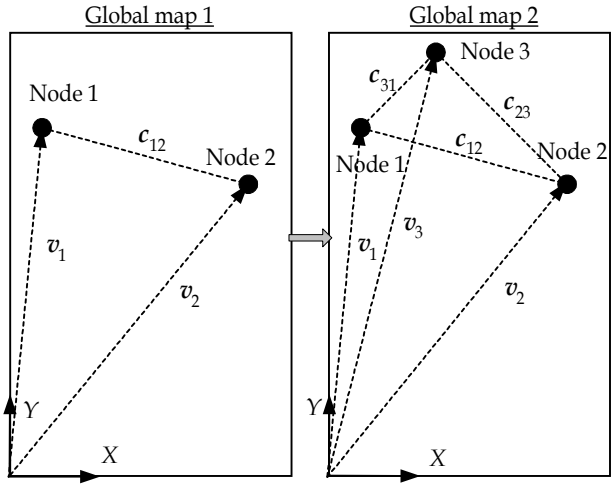
본 절에서는 국부 토폴로지컬 지도를 전역 토폴로지컬 지도로 갱신하는 기법에 대해 설명하도록 한다. 국부 토폴로지컬 지도는 노드의 위치정보와 노드 간의 연결성을 포함하고 있다. 갱신 과정은 국부 토폴로지컬 지도의 노드를 전역 토폴로지컬 지도로 매핑하는 과정이다.

예를 들어, Fig. 4는 매 순간 t_1과 t_2에서의 국부 및 전역 토폴로지컬 지도를 나타낸다. 로봇은 시

간 t_1에서 (x_1, y_1, θ_1)에 위치하는데, active window 1 내부에 node 1과 2를 얻게 된다. 이 국부 토폴로지컬 지도 1은 전역 지도 1로 갱신된다. 그리고 로봇이 시간 t_2에 다음 위치 (x_2, y_2, θ_2)로 이동하여 active window 2 내부에 node 1, node 2, node 3를 얻었다. 이 때, node 1과 node 2는 동일한 노드이고, 단지 node 3만이 새로운 노드이므로 이 노드만 전역 지도에 갱신하게 된다. 이러한 과정을 모든 영역에 대해 수행하도록 한다.



(a) Local topological maps at each instant.



(b) Global topological maps updated at each instant.

Fig. 4 Detected nodes and their vectors and connectivity between nodes at each instant.

3. 토폴로지컬 지도를 이용한 위치추적 및 최적 경로계획

3.1 토폴로지컬 지도를 이용한 위치추적

토폴로지컬 지도를 이용하여 로봇의 위치 (x, y)와 방위 (θ)를 결정하기 위해, 본문에서는 변형된 확률기법과 베이지안 갱신식을 이용하였다. 전역 격자지도를 통해 포함된 전 영역을 동일한 크기의 격자로 분해한다. 이 때, 각 격자의 중심위치는 로봇의 위치를 의미한다. 각 격자에서 로봇은 다양한 방위를 취할 수 있으므로, 로봇의 상태 (x, y, θ)의 수는 많이 있게 된다. 이러한 모든 상태에 대해 가능성을 둔 위치추적은 상당한 계산량을 요하게 된다. 따라서, 가능한 모든 상태에서 임의로 선정된 샘플링 과정을 통해 위치추적을 수행하도록 한다.

이러한 과정은 다음과 같은 단계를 갖게 된다.

1) x-y-θ 공간에서 n개의 샘플을 선정한다. 이 샘플은 로봇이 위치할 가능성이 있는 곳을 의미한다.
2) 모든 샘플에 $1/n$의 확률을 동일하게 분포하도록 부여한다.
3) 각 샘플에 대해, 현재 활성창의 크기와 센서의 점유 범위를 고려하여 얻을 수 있는 모든 노드를 구한다.
4) 각 샘플에서 얻은 노드와 센서 위치(샘플의 위치)간의 거리와 각도를 계산한다.
5) 이렇게 계산된 거리와 각도의 값을 실제 값과 비교하여 두 값이 같지 않게 되면, 이 위치는 가능성에서 제외하고, $1/(n\text{-}1)$의 확률을 남은 샘플에 다시 부여한다.
6) 매 순간마다 얻어진 확률을 베이시안 갱신식에 의해 갱신한다.

3.2 최적 경로계획

토폴로지컬 지도상의 임의의 두 점을 주행할 때, 가능한 모든 경로를 얻기 위해, 연결성 정보를 이용하게 된다. 최소 비용(본문의 경우는 최단 거리)를 갖는 경로는 A* 탐색 알고리듬을 통해 얻을 수 있다. 이 때, 각 노드간을 주행할 때 산출되는 비용은 노드간의 거리가 된다.

또한, 전역 최적 경로를 통해 목표점까지 도달하기 위해, Konolige에 의해 제시된 gradient method를 사용하였다. 이 방법을 이용하면, 로봇은 주행중에 장애물에 충돌하지 않는 최적의 경로를 통해 주행할 수 있게 된다. gradient method의 비용은 intrinsic cost (I)와 adjacency cost(A)로 구성되며, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F(P) = \sum_i I(P) + \sum_i A(P_i, P_{i+1}) \qquad (1)$$

intrinsic cost는 '미끄러운 길은 피하라', '물체로부터 떨어져서 이동하라' 등과 같은 사용자에 의해 주어지는 요구사항을 말한다. adjacency cost는 로봇의 이동 거리에 비례하는 값이다. 이 방식을 통해 로봇은 local minima에 빠지지 않을 수 있으며, 정적, 동적 환경 모두 적용할 수 있다. 또한, 주변환경에 대한 정확한 정보 없이도 최소 비용을 갖는 경로를 생성할 수 있게 된다.

4. 실험 결과 및 토의

제안된 알고리듬의 정당성을 증명하기 위해, 전역 토폴로지컬 지도의 작성 및 위치추적에 관한 실험을 수행하였다. 실험에는 레이저 스캐너를 장착한 Pioneer II DX를 사용하였다.

4.1 토폴로지컬 지도작성 실험

실험을 수행한 환경은 20m*10m의 넓이를 가지며, 레이저 스캐너는 미리 정해 놓은 위치에서 거리 데이터를 얻게 된다. Fig. 5은 실험이 수행되는 환경의 격자지도를 나타내며, 이 격자지도는 단지 주변환경을 나타내기 위해 사용되었을 뿐, 실험에서는 전혀 사용되지 않았다.

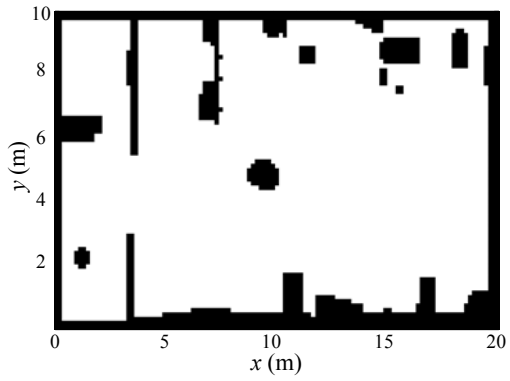


Fig. 5 Global grid map of the environment.

국부 토폴로지컬 지도는 미리 정해놓은 위치(15개)에서 레이저 스캐너를 이용하여 작성되었으며, 이렇게 작성된 국부지도는 지속적으로 전역 토폴로지컬 지도로 갱신되었다.

이렇게 작성된 최종적인 전역 토폴로지컬 지도를 Fig. 6에서 도시하고 있다. 이 때, 토폴로지컬 지도는 노드의 위치정보와 노드간의 연결성 정보만을 포함한다.

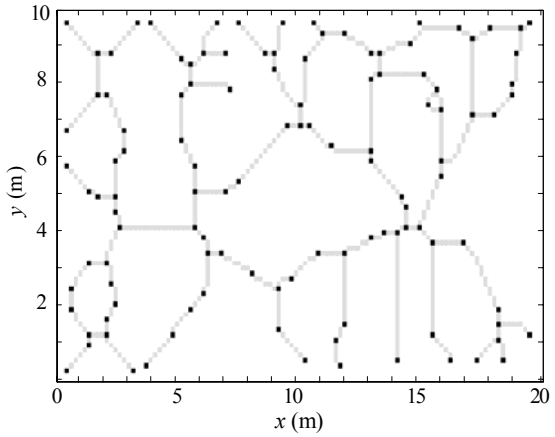


Fig. 6 Final global topological map.

4.2 전역 위치추적 실험

위의 절에서 작성된 전역 토폴로지컬 지도를 이용하여, 전역 위치추적 실험을 수행하였다. 실험에서, 전역 토폴로지컬 지도가 점유하고 있는 영역을 10cm*10cm의 격자로 분해하였으며, 선택된 샘플의 개수는 5,000개 이다. Fig. 7은 초기에 생성된 x-y-θ 공간에서의 샘플의 분포를 나타낸다. 로봇은 각 점에서 위치와 방위를 갖게 된다.

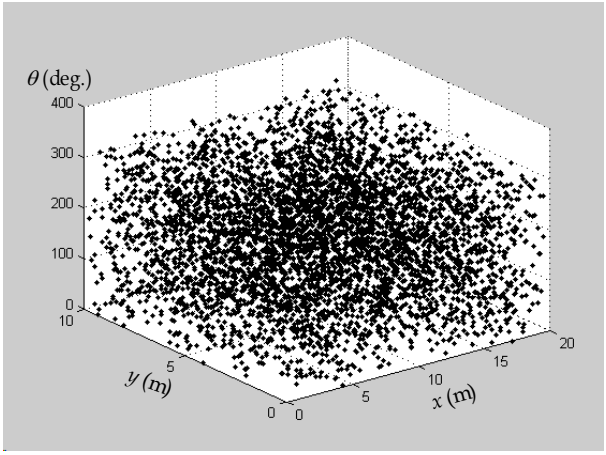
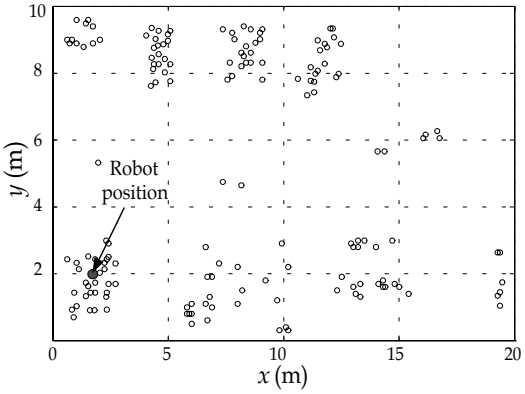
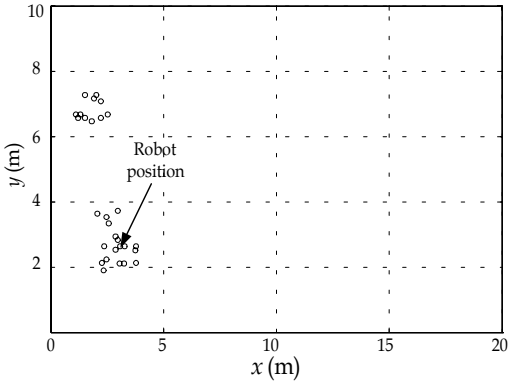


Fig. 7 Initial position and orientation of the robot in the x-y-θ space.

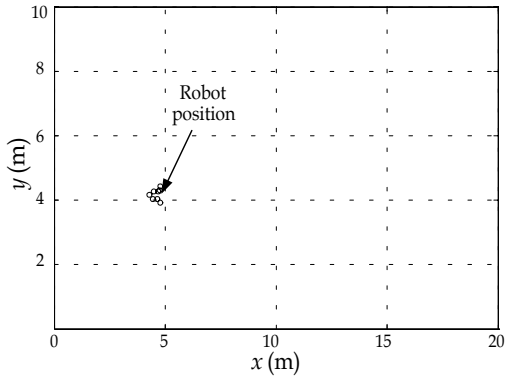
Fig. 8는 로봇의 위치가 수렴해가는 과정을 나타낸다. 초기에 로봇의 상태는 (20, 20, 270°)이고, 연속적으로 이동했다. 로봇이 이동하는 중에, 위치추적은 새로운 센서 데이터에 대해 지속적으로 수행되었으며, 따라서 확률은 베이지안 갱신식에 의해 갱신되었다. 결과를 통해, 로봇의 위치는 시간이 지남에 따라 한 점으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.



(a) After 2 time steps.



(b) After 7 time steps.



(c) After 11 time step.

Fig. 8 Convergence of the robot position with time.

5. 결론

본문에서는 레이저 스캐너를 장착한 이동로봇에 대해 빠르고, 단순한 지도작성과 위치추적의 방식을 제안하였다. 로봇은 미리 정해진 각 위치에서 센서 데이터를 수집하고, 이를 통해 국부 격자지도를 작성한다. 그리고 나서, 세선화를 적용하여 국부 토폴로지컬 지도를 작성하여, 이를 전역 격자지도로 갱신하게 된다. 또한, 이렇게 작성된 지도를 이용하여 전역 위치추적을 수행할 수 있게 되었다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있게 되었다.

1. 세선화를 이용한 전역 격자지도의 작성은 단순한 기법을 통해서도 보로노이 선도와 유사한 결과를 얻을 수 있게 되었다.
2. 세선화를 통해서도 전역 격자지도를 점진적으로 작성할 수 있게 되었다.
3. 부가적인 노드 정보를 통해, 토폴로지컬 지도를 이용한 위치추적을 수행할 수 있게 되었다.

후 기

이 연구는 서비스로봇 기술개발 사업의 일환으로 한국과학기술연구원의 지원하에 수행되었으며, 이에 관계자께 감사 드린다.

참고문헌

(1) S. Thrun, 1999, “Learning Maps for Indoor Mobile Robot Navigation,” *Artificial Intelligence*, Vol. 1, pp. 21-71.
(2) P. J. McKerrow, 1991, *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley.
(3) H. Choset, S. Walker, K. Eiamsa-Ard and J. Burdick, 2000, “Sensor-Based Exploration: Incremental Construction of the Hierarchical Generalized Voronoi Graph,” *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 19, No. 2, pp. 126-148.
(4) D. V. Zwynsvoorde, T. Simeon, and R. Alami, 2001, “Incermental Topological Modeling using Local Voronoi-like Graphs,” *Proc. of IROS*, pp.897-902.
(5) F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, 1999, “Monte Carlo Localization for Mobile Robots,” *Proc. of ICRA*, pp. 1322-1328.
(6) P. Jensfelt, J. D. Austin, O. Wijk, and M. Anderson, 2000, “Feature Based Condensation for Mobile Robot Localization,” *Proc. of ICRA*, pp. 2531-2537.
(7) W. Burgard, D. Fox, D. Henning, and T. Schmidt, 1996, “Position Tracking with Position Probability Girds,” *Proc. of the 1st Euromicro Workshop*, pp. 2-9.
(8) H. Choset, and K. Nagatani, 2001, “Topological Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Toward Exact Localization without Explicit Localization,” *Trans. on Robotics and Automation*, pp. 125-137.
(9) I. Ulrich, and I. Nourbakhsh, 2000, “Appearance-based Place Recognition for Topological Localization,” *Proc. of ICRA*, pp. 1023-1029.
(10) K. Konolige, 2000, “A Gradient Method for Real-time Robot Control,” *Proc. of IROS*, pp.639-646.
(11) G. A. Baxes, 1994, “*Digital Image Processing*,” John Wiley & Sons.