

초음파센서를 이용한 자율 주행 로봇의 경로 계획용 지도작성 Map Building for Path Planning of an Autonomous Mobile Robot Using an Ultrasonic Sensor

이신제*, 오영선*, 한규서**, 김학일*, 김춘우**

*인하 대학교 대학원 자동화공학과

Tel: (032)860-7385; Fax: (032)863-4386; E-mail: sjlee@vision-auto.inha.ac.kr

**인하 대학교 대학원 전기공학과

Tel:(032)860-7401; Fax: (032)860-5822; E-mail: kshan@dragon.inha.ac.kr

Abstracts The objective of this paper is to make the weighted graph map for path planning using the ultrasonic sensor measurements that are acquired when an A.M.R (autonomous mobile robot) explores the unknown circumstance. First, The A.M.R navigates on unknown space with wall-following and gathers the sensor data from the environments. After this, we constructs the occupancy grid map by interpreting the gathered sensor data to occupancy probability. For the path planning of roadmap method, the weighted graph map is extracted from the occupancy grid map using morphological image processing and thinning algorithm. This methods is implemented on an A.M.R having a ultrasonic sensor.

Keywords Autonomous Mobile robot, Ultrasonic sensor, Map building, Path planning, Occupancy grid map, Voronoi graph

1. 서론

자율 주행 로봇이 갖추어야 할 기본적인 기능은 원하는 목표 지점까지 충돌없이 이동할 수 있는 지능적 항법(Intelligent navigation) 능력이다. 지능적 항법을 갖추기 위한 세가지 요소 기술로서 경로계획(Path planning), 실시간 장애물회피(Real-time obstacle avoidance), 위치보정(Localization) 등으로 구성되어 있다. 이 가운데 경로계획과 위치보정은 지도로 표현되는 환경정보를 필요로 한다. 이러한 지도를 로봇 스스로 작성할 필요가 있는데 이런 기능을 지도 작성(Map building)이라고 한다. 논문의 목적은 단일 초음파센서를 이용하여 자율주행로봇의 경로계획을 위한 지도작성과 작성된 지도를 이용하여 경로계획을 구현하는 것이다.

자율 주행 로봇에 사용되는 지도는 격자 지도(Grid map)와 모델 기반 지도(Model-based map)로 분류될 수 있다.^[1] 모델 기반 지도는 공간을 평면, 모서리, 구석등의 모델로 표현한 지도이다. 이런 표현 방법은 공간 내부의 위상학적 정보를 얻기 힘들기 때문에 이동 가능한 공간의 표현이 어렵다. 반면, 공간을 격자로 표현한 격자 지도의 경우 물체의 존재 유무를 잘 표현하고 있으므로 충돌 없는 이동 경로를 얻어 내기 쉽다. 그리고 격자 지도는 센서의 측정시 즉각적인 지도의 정보 수정이 이루어 질 수 있고, 불확실한 센서의 정보로도 물체의 존재 유무를 효율적으로 표시할 수 있다. 이러한 장점 때문에 격자 지도를 이용한 주행 로봇의 주행 계획과 실시간 장애물 회피^[2]는 많은 연구가 이루어지고 있다.

격자 지도는 확실성 격자 지도(Certainty grid map)^[3]와 점유값 격자 지도(Occupancy grid map)^[4]으로 나눌 수 있다. 점유값 격자 지도는 확실성 격자 지도에 비해 계산량이 많고 기억 장소의 크기도 많이 요구된다는 단점이 있으나 베이저안 확률 추론(Bayesian probability reasoning)을 사용하여 물체의 존재 유무를 효율적으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 초음파 센서를 이용하여 점유값 격자 지도를 작성한 뒤, 이 지도를

경로 계획에 사용한다.

경로 계획^[5]은 로드맵 방법(Roadmap method), 셀 분할법(Cell decomposition), 포텐셜 필드법(Potential field method)으로 크게 나눌 수 있는데, 이중 로드맵 방법은 로봇이 이동 가능한 모든 경로를 찾아내어 그중에서 최적의 경로를 추출하는 방법이다. 이 방법은 찾아낸 이동 가능한 경로들을 재 사용할 수 있는 장점이 있다. 로드맵 방법에는 가시도 법(Visibility graph method)과 보로노이 그래프 방법(Voronoi graph method)이 있는데, 이중 보로노이 그래프 방법은 가시도 법보다 경로의 조합이 적고, 경로가 장애물 간의 균등한 거리에 유지되므로 안전한 경로를 산출할 수 있다. 그러나 필요 이상의 안전도 때문에 불필요한 우회 경로를 생성한다.

일반적으로 경로 계획은 완전한 환경 정보를 가진다는 가정하에서 연구되어 왔다. 그러나 불완전한 센서 정보만으로 작성된 지도에서 경로 계획을 하는 연구도 진행되어왔다. 이러한 연구중에서 보로노이 그래프를 이용한 방법은 지도의 잡음에 강하게 대처하고 안전성이 크기 때문에 많이 연구되어왔다. Choset^[6]는 초음파 센서에 의해 측정된 지점들을 물체의 표면점으로 등록하여 보로노이 그래프를 추출하였다. 그러나 이방법은 센서의 측정 오류에 민감하게 영향을 받는다. Ibarra-Zannatha^[8]는 격자 지도에서 세선화(thinning)를 사용하여 보로노이 그래프를 추출한 뒤, 시작점에서 목표점까지 셀을 추적하는 방식으로 경로를 산출하였다. 그러나 셀을 추적하는 방법은 그래프에서 경로를 산출할 때 많은 기억 장소와 계산량이 요구된다.

본 논문에서는 단일 초음파센서를 탑재한 자율주행로봇이 건물 내부로 제한한 작업영역에 대하여 "벽따라가기(Wall-following)"를 하면서 점유값 격자지도(Occupancy grid map)를 작성하고, 이를 디지털 영상으로 변환한 후, 수리형태학적 영상처리(Morphological image processing)와 세선화를 적용하여 보로노이 그래프를 추출하고, 가중치 그래프 지도(Weighted graph map)로 전환하여 이를 이용하여 경로계획을 수행하는

일련의 과정을 설명한다. 이 방법은 보로노이 그래프를 가중 값 그래프로 전환하면서 보로노이 그래프의 단점인 우회 경로를 없앨 수 있다. 본 논문은 제안한 지도작성 및 경로계획 알고리즘들을 모의실험 및 실제실험을 통하여 검증하였다.

2. 점유 격자 지도의 작성

점유값 격자 지도를 작성하기 위하여 그림 1 (a)와 같은 우수법에 의한 벽따라가기로 주어진 환경을 일주하였다. 각 단계마다 그림 1 (b)와 같이 일정한 각도 간격으로 18 방향의 초음파 센서 측정값을 얻어 낸다. 각 단계마다 로봇의 위치는 바퀴에 붙어 있는 인코더(Encoder)를 이용한 추측항법(Dead reckoning)에 의해 전역 좌표로 구해진다. 이때 센서의 위치와 측정에 의한 환경정보는 모두 추측 항법 위치를 이용하여 전역좌표로 환산된다.

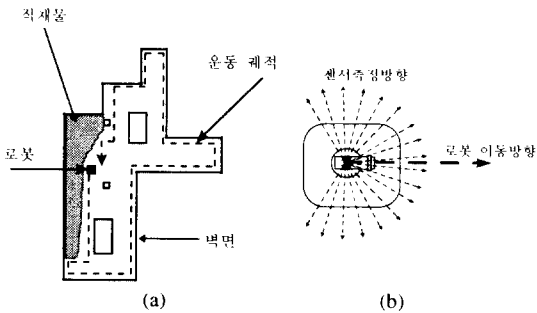


그림 1. (a) 지도 작성환경 및 벽따라가기 궤적
(b) 초음파 센서 측정 방향

Fig 1. (a) space for map building and locus of wall-following
(b) directions of firing of the ultrasonic sensor

얻어낸 초음파 센서의 측정값들을 점유값 격자 지도로 해석하기 위하여 격자 상 한 셀의 측정에 의한 점유확률을 다음과 같이 정의한다. 측정에 의하여 점유값이 계산될 셀의 위치는 그림 2에서처럼 센서를 중심으로 하고 센서의 방향을 0도로 하는 극소 좌표(r, θ)로 표현된다.

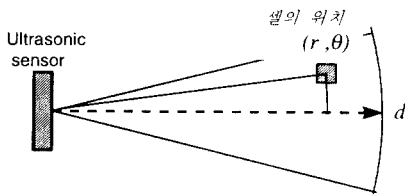


그림2. 확률값이 수정될 대상 셀의 극좌표 위치
Fig 2. Polar coordinates of the cell whose probability will be updated

초음파 센서가 거리 d 를 측정하였을 때, (1)로 표현되는 식으로 셀의 점유 확률 밀도 함수를 정의한다. 센서에서 d 사이에 있는 셀들은 물체가 존재할 확률이 적고, 셀의 위치가 d 에 가까울수록 셀이 점유되었을 확률이 높기 때문이다. 그리고 r 축상 위치가 d 보다 큰 셀들에 대해서는 물체에 가려서 정보를 알 수 없다고 여겨 0.5의 확률을 부여한다. 그리고 초음파 센서의 지향성 특징 때문에 이러한 확률 밀도 함수를 중심축에서 일정한 각도 이내에서만 정의한다. 그림 3 (a)와 (b)는 제안된 확률 밀도 함수를 표현한 것이다.

$$p(d|r, \theta) = \frac{a \exp\left[-\frac{(r-d)^2}{(-2\sigma_d^2 d^2)}\right]}{2\pi\sigma_d} + p_{\min} \quad (1)$$

$$a = 2\pi\sigma_d(p_{\max} - p_{\min})$$

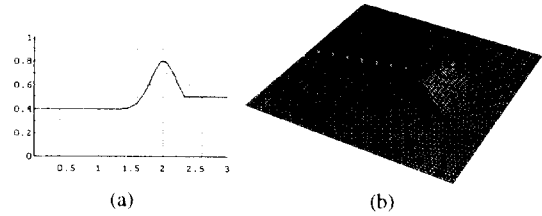


그림 3. 본 연구에서 제안된 측정에 의한 셀의 점유 밀도 함수
(a) r 축으로의 점유 확률 분포 함수의 그래프 ($d=2m$, $p_{\max}=0.8$, $p_{\min}=0.4$, $\sigma_d=10cm$)
(b) 점유 확률 밀도 함수의 2 차원 그래프

Fig 3. The occupancy probability density function of a measurement proposed on this paper

(a) Plot of occupancy probability density function on r axis ($d=2m$, $p_{\max}=0.8$, $p_{\min}=0.4$, $\sigma_d=10cm$)
(b) 2 dimensional figure of occupancy probability density function

Elfes가 제안한 베이지안 확률 갱신식을 사용하면 여러 개의 측정값으로 셀의 점유 확률을 재귀적으로 얻어낼 수 있다. 셀의 점유 확률은 현재 시점 $t+1$ 까지의 모든 측정 정보 집합 $\{d\}_{t+1}$ 에 대한 셀이 점유 되었을 확률 $P[S = OCC|\{d\}_{t+1}]$ 으로 정의된다. 여기서 S 는 셀의 점유 상태를 나타내며, 점유 상태 OCC , 비점유 상태 EMP , 두 가지 상태로 분류된다. $P[S = OCC|\{d\}_{t+1}]$ 는 이전 시점 t 까지 셀의 점유 확률값 $P[S = OCC|\{d\}_t]$ 와 $t+1$ 시점의 측정 확률 밀도 함수값 $p[d_{t+1}|S = OCC]$ 을 이용하여 베이지안 조건 확률 수정식 (Bayesian probability updating formula)인 (2)로 표현된다.

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

여기에서 S 가 EMP 일 경우는 (3)으로 구할 수 있다.

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

$$p[d_{t+1}|S = EMP] = (p_{\max} + p_{\min}) - p[d_{t+1}|S = OCC]$$

(2)를 정리하면

$$P[S = OCC|\{d\}_{t+1}] = \frac{p[d_{t+1}|S = OCC]P[S = OCC|\{d\}_t]}{\left(\frac{p[d_{t+1}|S = OCC]P[S = OCC|\{d\}_t]}{p[d_{t+1}|S = OCC]P[S = OCC|\{d\}_t] + (p_{\max} + p_{\min} - p[d_{t+1}|S = OCC])(1 - P[S = OCC|\{d\}_t])} \right)} \quad (4)$$

으로 정리된다. 베이지안 확률식은 이전 셀의 점유 확률과 현재 측정 점유 밀도 확률을 이용하여 현재의 점유 확률을 재귀적으로 얻을 수 있다는 장점이 있다. 셀의 초기 확률값은 점유 상태를 알 수 없으므로 0.5로 한다.

그림 4는 작성된 점유값 격자 지도이다. 바깥 검은 영역은 수정되지 않은 부분이고 안쪽에 수정된 셀값은 검은 부분일수록 점유 확률값이 높은 부분이다.

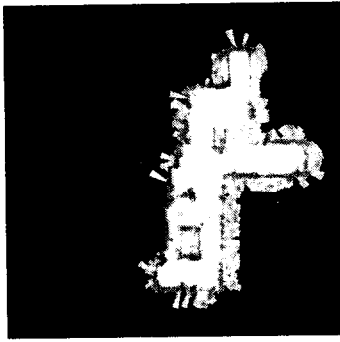


그림 4. 작성된 점유값 격자 지도
Fig 4. The constructed occupancy grid map

3. 보로노이 그래프를 이용한 가중값 그래프의 작성

점유값 격자 지도는 점유 정도를 연속적인 확률로 가지고 있기 때문에 경로 계획을 위하여 문턱값을 설정하여 이분 평가한다. 그림 5는 그림 4의 점유값 격자 지도의 이진 영상이다. 문턱 확률값은 지도의 영상 히스토그램의 극소점 중 하나로 정하였다.

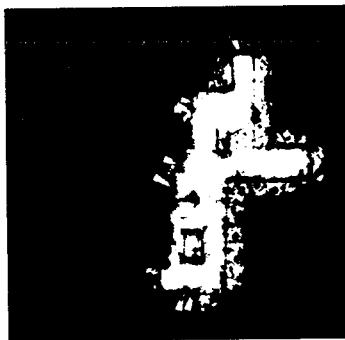


그림 5. 이진화된 지도 영상 (문턱 확률값; 0.6)
Fig 5. Binarized map image (thresholding probability = 0.6)

이 지도에서는 초음파 센서가 벽면을 측정하지 못하여 발생한 오류에 의한 점유셀들이 존재한다. 오류가 있는 점유셀들을 분리하기 위하여 수리 형태학적 영상 처리 기법인 열기(Opening)^[9]를 사용하여 오류 점유셀들을 분리한다. 그림 6은 그림 5를 로봇 크기의 원형 구조 요소(Structuring element)를 이용하여 열기 처리한 후의 영상이다. 오류에 의한 측정 영역이 분리되어 나타남을 알 수 있다.

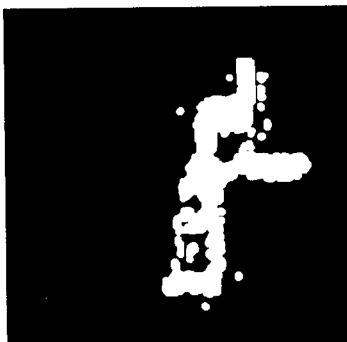


그림 6. 열기 처리후 지도 영상
Fig 6. map image after opening

분리된 오류 점유셀을 제거하기 위하여 로봇이 위치한 곳을 씨앗점(seed point)으로 하는 씨앗점 채우기(seed filling)^[10]를 수행한다. 열기에서 실제 비점유 영역과 오류 비점유 영역을 끊어 놓았으므로, 씨앗점 채우기를 하면 실제적인 비점유 영역만이 남게 된다. 그 다음 작은 점유 오류들을 없애기 위하여 작은 원형 구조 요소를 사용하여 닫기(Closing)^[9]를 수행한다. 그림 7은 씨앗점 채우기와 닫기 처리를 한 후의 영상이다.

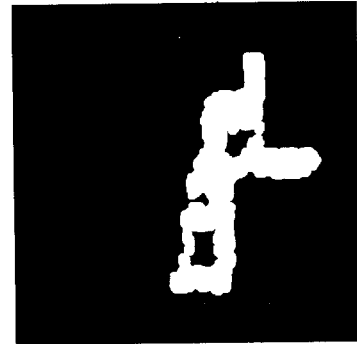


그림 7. 씨앗점 채우기 후 영상
Fig 7. map image after seed filling

분리된 영역의 정보를 압축하기 위하여 3x3 크기의 셀들을 하나의 셀로 통합한다. 3x3 셀 안의 모든 셀들이 점유 셀이라면 새로운 셀은 점유 셀이 되고, 한 개라도 비점유 셀이 있으면 새로운 셀은 비점유 셀이 된다. 그림 8은 셀을 통합한 후의 영상이다.

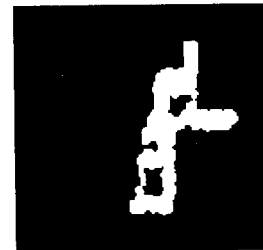


그림 8. 셀 통합 후 영상
Fig 8. Image after cell merging

그림 8의 셀이 통합된 지도 정보에서 수리 형태학적 세선화(thinning)^{[9][11]} 처리를 하여 보로노이 그래프를 추출한다. 세선화 과정은 그림 9 (a)-(h)의 구조 요소를 사용하여 영상에 변화가 없을 때까지 깎아내기(Erosion)를 수행하는 것이다.

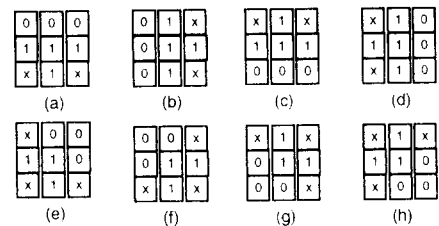


그림 9. (a)-(h) 세선화에 사용한 구조 요소^[11] (1: 비점유 셀, 0: 점유 셀, x: 무시되는(don't care) 셀.)

Fig 9. (a)-(h) The structuring elements for thinning^[11] ('1': empty cell, '0': occupied cell, 'x': don't care)

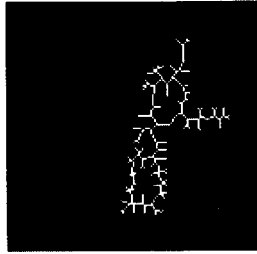


그림 10. 그림 8을 세선화하여 추출한 보로노이 그래프
Fig 10. Extracted Voronoi graph by thinning from Fig. 8

그림 10은 그림 8을 세선화한 후 영상이다. 세선화된 지도를 가중값 그래프 지도로 만들기 위하여 갈림점 추출을 한다. 추출된 보로노이 그래프 위의 셀에 대하여 주위 8 개 셀들의 변화량을 센다. 변화량은 갈림길 갯수의 2배에 해당한다. 그러므로 갈림길의 갯수를 알 수 있는데, 구해진 갈림길의 갯수가 3 개 이상이면 갈림점으로 등록한다.

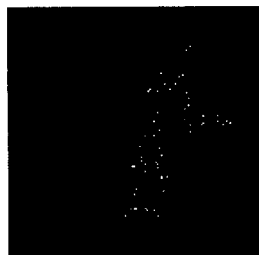


그림 11 그림 10의 보로노이 그래프에서 추출된 갈림점
Fig 11. Extracted connection points from the Voronoi graph of Fig 10

가중값 그래프를 작성하기 위하여 갈림점들을 가중값 그래프의 연결점(node)으로 등록한다. 등록된 연결점 사이의 연결성을 찾기 위하여 추출된 갈림점들 사이의 거리와 연결성 여부를 검사한다. 그림 8에서 두 연결점 사이의 선분 위의 셀들을 Bresenham 알고리즘^[11]을 사용하여 찾아낸다. 선분 위의 셀 중 비점유 셀이 존재하면 두 연결점이 연결 되지 않는 것으로 간주한다. 연결된 것으로 판단할 경우 두 연결점 사이의 거리를 두 갈림점 사이의 거리로 하여 가중값 그래프의 연결 링크로 저장한다. 모든 갈림점 쌍에 대하여 검색이 끝난 후, 거리값이 없는 행렬의 원소는 무한대의 거리값을 저장한다.

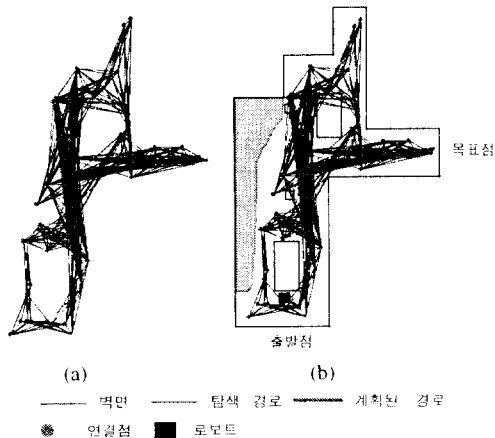


그림 12. (a) 작성된 가중값 그래프
(b) 가중값 그래프를 이용한 경로 계획의 예
Fig. 12. (a) The constructed weighted graph
(b) Example of the path planning using the weighted graph

얻어진 가중값 그래프를 이용하면 최단 경로 찾기 알고리즘으로 경로를 즉시 즉시 구해낼 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 미지의 환경을 탐색하여 얻은 초음파 센서 측정값으로 점유값 격자 지도를 작성하였다. 격자 지도를 이용한 보로노이 그래프 방법의 단점인 거리 계산량이 많은 것을 가중값 그래프 형태의 지도를 이용하여 보완하였고, 격자 지도를 이용한 보로노이 그래프 경로 계획 방법의 단점인 거리 계산량이 많은 것을 가중값 그래프 형태의 지도를 이용하여 보완하였고, 일반적인 보로노이 그래프 방법의 단점인 필요없는 우회 경로를 줄일 수 있었다.

본 연구 결과의 문제점은 가중값 그래프 지도 작성시 추출된 갈림점의 갯수가 필요 없이 많이 발생하는 것이다. 향후 알맞은 갯수의 갈림점을 추출할 수 있는 효율적인 알고리즘의 연구가 필요하겠다.

참고 문헌

- [1] John J. Leonard, Hugh F. Durrant-Whyte, *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*, Kluwer Academic Publisher, 1992.
- [2] John Borenstein, Yoram Koren, "Histogramic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance.", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, pp. 535-539, 1991.
- [3] H. Moravec, A. Elfes, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar." *Proc. IEEE Int. conf. Robotics and Automation*, pp. 116-121, 1985.
- [4] Alberto Elfes, "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation." *IEEE Computer*, pp. 46-57, 1989.
- [5] Latombe, Jean-Claude, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [6] H. Choset, J. Burdick, "Sensor Based Planning Part I: The Generalized Voronoi Graph.", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1649-1655, 1995.
- [7] H. Choset, J. Burdick, "Sensor Based Planning Part II: Incremental Construction of the Generalized Voronoi Graph.", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1643-1648, 1995.
- [8] J.M. Ibarra-Zannatha, J.H.Sossa-Azuela, H. Gonzalez-Hernandez, "A new Roadmap Approach to Automatic Path Planning for Mobile Robot Navigation.", *IEEE Int. Conf. on Sys., Man and Cyb.*, pp. 2803-2808, 1994.
- [9] Rafael Gonzalez, Richard E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing, 1992.
- [10] F. S. Hill Jr., *Computer Graphics*, Macmillan Publishing Company, 1990.
- [11] Roland T. Chin, Hong-Khoon Wan, D. L. Stover, R. D. Iverson, "A One-Pass Thinning Algorithm and Its Parallel Implementation.", *IEEE. Computer Vision, Graphics and Image Processing*, pp. 30-40, 1987.