

초음파 센서를 이용한 자율 주행 로봇의 위치 보정용 모델 기반 지도 작성

Model-based Map Building for Localization 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 a model-based map for the localization of an autonomous mobile robot(AMR) from ultrasonic sensor measurements that are acquired when the AMR explores unknown indoors. First, the AMR navigates on unknown space by wall-following and gathers range data from the ultrasonic sensor. Then, the range data are converted to a wall-marked grid map, from which lines representing the walls are extracted using the Hough transform. This process is implemented on an AMR having an ultrasonic sensor, and a preliminary experimental result is presented.

Keywords Autonomous mobile robot, Ultrasonic sensor, Map building, Model-based map, Hough transform

1. 서론

현재까지 개발된 센서의 인지 능력은 인간의 인지 능력과 다르지 못하므로 자율 주행 로봇은 이미 알고 있는 환경에서도 주행에 많은 제약을 받아왔다. 특히 로봇의 위치가 어느 곳에 있는지에 대한 정보는 아직까지도 많이 해결되지 못한 부분이다. 일반적으로 바퀴에 장착된 인코더(Encoder)에 의한 추측 항법(Dead reckoning)에 의해서 대략적 위치를 얻고 있으나, 주행 거리가 길어지면 바퀴와 노면의 미끄러짐에 의해 위치 오차가 누적된다. 그러므로 주위 환경을 센서로 참조하여 정확한 위치를 알아내는 위치 보정(Localization)이 필요하게 된다. 일반적으로 일정한 지점에 랜드마크(landmark)나 비이콘(beacon)을 설치하고, 주행 로봇이 주행 중 이것을 참조하여 추측 항법 오차를 보정하는 방법이 많이 쓰이고 있다. 이 방법은 정확하게 추측 항법의 오차를 보정하지만, 인간이 환경을 변화시킨다는 의미에서 자율 주행 로봇의 진정한 자율성 또는 인공지능이라고 볼 수 없다.

랜드마크나 비이콘을 사용하지 않고 위치를 보정하는 연구는 시각 센서와 거리 센서를 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 시각 센서를 이용한 방법은 각도의 오차를 보정하기에 적합하나 많은 처리 시간이 필요하다. 거리 센서를 이용한 방법은 거리 센서가 장애물 감지용으로 많이 사용되기 때문에 센서를 추가하여 장치할 필요가 없고, 거리라는 처리하기 쉬운 정보를 다룬다는 장점이 있다.

이러한 연구 중에서 거리 센서를 이용한 연구로 Durrant-Whyte, Leonard, Cox^[1,2]는 초음파 센서와 모델 기반 지도를 이용하여 위치를 보정하는 방법을 제시하였다. 이 방법에서는 저장된 모델 기반 지도에서 초음파 센서의 측정값을 예측하고

실제 측정값과 정합, 추측 항법의 오차를 보정하였으며, 예측된 센서 측정값을 실제 측정값과 정합하는 방법으로 확장 칼만 필터(Extended Kalman filter)를 이용하였다. 이와 비슷한 방법으로 Cox^[3]는 적외선 거리 센서를 사용하고, 그리고 Freud, Dierks^[4]는 레이저 거리 센서를 사용하여 측정값과 모델 기반 지도 상의 선분을 최소 자승법(Least square estimation)을 이용하여 직접 정합하는 방법을 취하였다. 이러한 위치보정 방법에 사용되는 모델 기반 지도는 2차원 평면상의 벽면, 구석, 모서리로 구성되어 있고, 이러한 기본적인 환경 구성자들을 각각 평면, 구석, 모서리 세 가지로 구분하여 그 매개변수를 저장한 구조를 가지고 있으며 정확한 위치 정보를 필요로 한다.

본 연구는 초음파 센서를 탑재한 자율주행로봇이 건물 내부로 제한된 작업영역에 대하여 "벽따라가기 (Wall-following)"를 수행하면서 벽면 대상 격자 지도(Wall-marked grid map)를 작성하고, 허프 변환(Hough transform)을 이용하여 모델 기반 지도 요소 중 선분 모델을 추출하는 것을 목적으로 한다. 그리고 이 방법을 실제실험을 통하여 검증하였다.

2. 모델 기반 지도

모델 기반 지도는 평면, 구석, 모서리 중 하나의 모델을 표현하는 매개 변수가 저장된 구조이다. 평면 모델의 경우 그림 1 (a)에서처럼 양 끝점의 전역 좌표와 벽 속으로의 법선 각도로 표현된다. 모서리와 구석 모델은 그림 1 (b)에서처럼 위치의 전역 좌표, 모서리와 구석의 구별자로 표현된다.

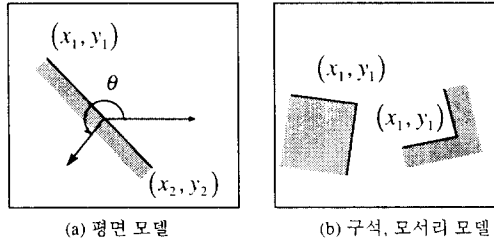


그림 1. 세가지 모델 및 표현 매개 변수
Fig. 1 Three models and each parameters

모델 기반 지도를 작성하기 위하여 Leonard, Durrant-Whyte, Cox는 미지의 환경에서 모델 기반 지도를 작성하기 위하여 초음파 센서의 측정값에서 측정될 수 있는 모든 점을 원호로 표시하고, 이 원호들의 겹치는 모양을 이용하여 모델을 추출하는 방법을 제안하였다. 측정이 되면 직반사된 지점이 그림 2에서처럼 초음파 센서를 중심으로 측정 거리를 반지름으로 하고 빔각도 만큼의 크기를 가진 원호상에 존재하게 되고, 따라서 여러개의 측정 정보를 이용하여 만들어진 원호들의 겹치는 모양으로 모델의 형태를 알 수 있다.

그림 2 (a)의 경우는 평면 모델을 측정한 경우인데, 한 개의 직선에 접하고 서로 겹치는 모양으로 원호가 나타난다. 모서리와 구석을 측정할 경우에는 그림 2 (b)에서처럼 같은 지점에 여러 개의 다른 방향의 측정된 원호가 한 점에 겹치는 모양으로 나타난다. 이러한 겹치는 원호를 군집화한 뒤 그 매개변수를 추정하여 공간상의 모델을 추출할 수 있다.

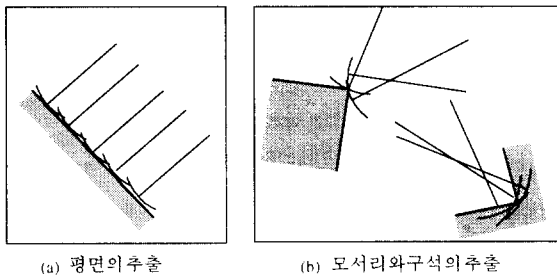


그림 2. 겹치는 원호를 이용한 모델 추출
Fig. 2 Model extraction with intersected arcs

이 방법은 추출될 선분 모델의 길이가 길고 단순한 형태를 가진 환경에는 잘 맞으나, 복잡한 환경에는 원호가 복잡한 형태로 겹치게 되므로 모델을 군집화하고 추출하기가 힘들다.

3. 거리 자료 수집

점유값 격자 지도를 작성하기 위하여 그림 3 (a)와 같은 우수법에 의한 벽따라가기로 주어진 환경을 일주하였다. 각 단계마다 그림 3 (b)와 같이 일정한 각도 간격으로 18 방향의 초음파 센서 측정값을 얻어 낸다. 각 단계마다 로봇의 위치는 바퀴에 붙어 있는 인코더를 이용한 추측항법에 의해 전역 좌표로 구해진다. 이때 센서의 위치와 측정에 의한 환경정보는 모두 추측 항법 위치를 이용하여 전역좌표로 환산된다.

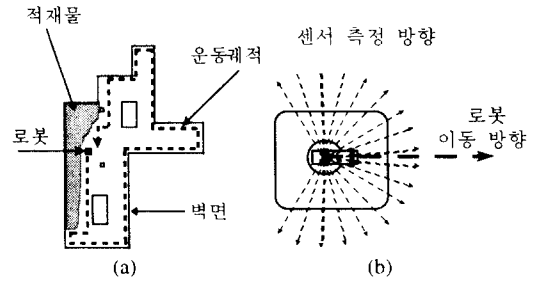


그림 3. (a) 지도 작성환경 및 벽따라가기 궤적
(b) 초음파와 센서 측정 방향

Fig 3. (a) Space for map building and locus of wall-following (b) directions of the ultrasonic sensor measurements

추측 항법에 의한 위치는 초기 위치를 기준으로 주행할수록 누적되는 오차를 가진다. 본 연구에서 얻은 실험 결과에서도 같은 현상을 볼 수 있는데, 그림 4 (a)는 추측항법 위치 정보가 누적된 오차에 의하여 오른쪽 방향으로 치우친 것을 보여준다. 이러한 오차는 실제 바퀴의 크기가 추측항법 계산에 쓰인 크기와 다르기 때문에 발생하는 로봇 자체의 오차와 바퀴와 노면과의 미끄러짐에 의해 발생하는 환경적인 오차로 나누어 생각할 수 있다. 로봇 자체의 오차는 결정적인 (Deterministic) 오차이며, 환경적인 오차는 불확실한 (Stochastic) 오차이다. 이 중에서 결정적인 오차는 로봇의 이동 특성을 분석하여 해결할 수 있다. 실험에 의해 직선으로 주행할 때 생기는 비틀어지는 각도가 거의 일정함을 알아 내었고 로봇의 위치를 보정하였다. 그림 4 (b)는 보정된 로봇의 추측항법 위치이다.

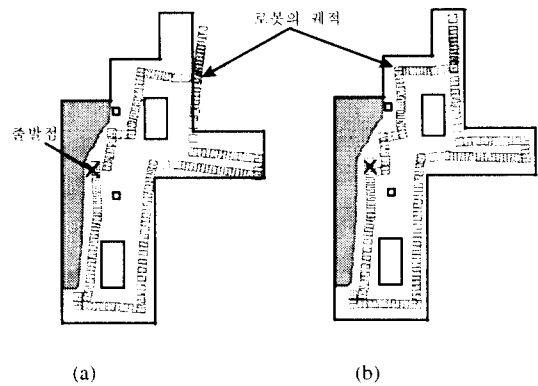


그림 4. 위치 보정 결과

- (a) 위치 보정 전 로봇 주행 궤적
- (b) 위치 보정 후 로봇 주행 궤적

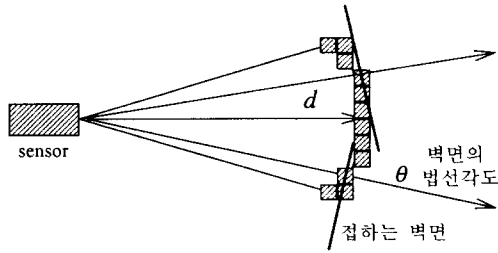
Fig 4. Result of robot position correction

- (a) before the correction
- (b) result of correction

4. 모델 기반 지도 작성

4.1 벽면 대상 격자 지도

각각의 위치에서 얻어진 거리 데이터를 이용하여, 주행공간을 나타내는 2차원 격자상에서 벽면으로 예상되는 셀로 표시한다.



θ : 셀의 방향 (접하는 직선의 법선 방향), d : 측정 거리

그림 5. 벽면 후보 셀들

Fig. 5 Wall marked cells

모든 측정은 음파의 직반사(Specular reflection)에 의하여 측정되었다고 가정하면, 음파가 반사된 지점들은 그림 5에서 처럼 원호 상에 있게 되므로 이 위치의 모든 셀들을 벽면이 예상되는 셀로 표시한다. 그리고 각각의 셀들에 원호에 접하는 벽면, 즉 측정되었다고 여겨지는 벽면의 법선 방향을 저장한다. 셀의 위치와 법선 방향 성분을 이용하여 허프 변환에 사용한다. 그림 6은 작성된 벽면 대상 격자 지도이다. 일반적으로 허프 변환¹⁵⁾에서 사용하는 셀들의 기울기 변화량 (gradient) 대신 셀의 법선 방향 성분을 사용함으로써, 음파의 특성을 활용할 수 있다. 이 방법은 다른 방향에서 여러 번 측정된 셀의 정보를 저장할 수 있고, 잘못된 측정값에 의한 선분을 제거할 수 있는 장점이 있다.

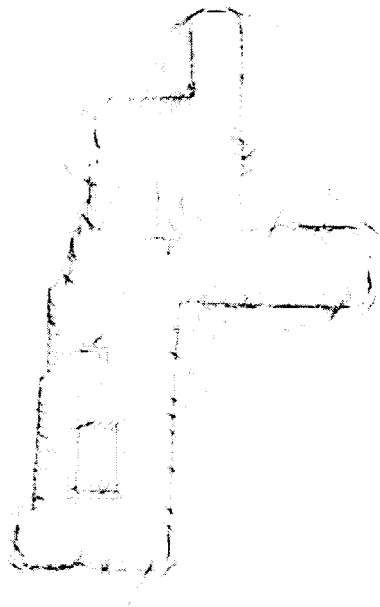


그림 6. 벽면 대상 격자 지도

Fig. 6 Wall marked grid map

4.2 허프 변환을 이용한 직선상 셀 검출

셀의 방향과 위치의 정보를 가지고 있으므로 허프 변환을 통한 직선 검출이 가능하다. 셀을 지나가는 벽면상의 직선은 식

(1)처럼 극 좌표로 표현된다.

$$r = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (1)$$

θ 는 셀 (x_i, y_i) 에 저장된 법선 각도이고 r 은 이 직선에서 원점까지의 수직 거리이다. 이 직선은 셀의 위치 (x_i, y_i) 을 지나므로 r 은 $r = x_i \sin \theta + y_i \cos \theta$ 으로 구할 수 있다. 이 직선은 θ 와 r 만으로 표현이 가능하므로 이 직선 위의 셀들은 같은 θ 와 r 값을 가진다. 직선을 분리하기 위하여 θ 와 r 을 일정한 간격으로 양자화(Quantization)한 극좌표 매개변수 행렬 (Parameter matrix)에 셀의 갯수를 저장한다.

지도를 작은 영역으로 분리하여 각각 허프 변환을 적용한다. 그림 7은 분리된 영역의 벽면 예상 격자와 그것의 매개변수 행렬의 영상이다. 분리된 영역의 크기는 $7m \times 7m$ 로 하였으며, 한 셀의 크기는 $10cm \times 10cm$ 로 잡았다. 그러므로 70×70 의 격자로 표현되며, 매개 변수 행렬은 θ 축을 0에서 359도까지 1도씩 나타내고 r 축을 $-10m$ 에서 $10m$ 까지 $0.1m$ 간격으로 표현된다. 매개변수 행렬에서 셀의 갯수가 많을수록 직선 성분이 존재할 가능성이 큼을 의미한다.

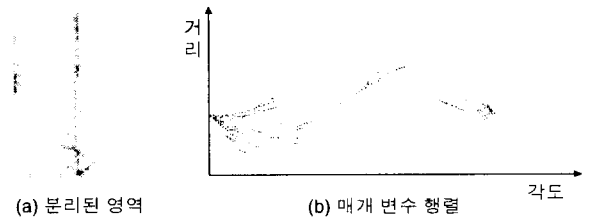


그림 7. 분리된 영역과 매개 변수 행렬의 예

Fig. 7 A clipped area and its parameter matrix

4.3 검출된 직선의 선분화

허프 매개변수 행렬에 저장된 직선 자료를 이용하여 같은 직선 위의 셀들을 적절히 군집화하고, 군집화된 셀들에서 선분의 끝 점을 찾아 내어 선분 모델을 추출한다. 그림 6과 그림 7 (a)에서 벽면 대상 격자 지도 내에서 보면, 같은 매개 변수를 갖는 셀들이 연속적으로 존재하지 않는다. 이것은 초음파 센서가 조밀하게 측정하지 못하기 때문이다. 그러므로 일정한 규칙을 사용하여 서로 떨어진 셀들을 적절하게 군집화하여 선분으로 추출하여야 한다.

이 규칙에서는 가장 가까운 셀들 간의 거리가, 로봇이 측정하기 위하여 이동한 평균 거리인 $0.6m$ 이하이면 같은 선분 위의 셀로 판단하고, 그렇지 못하면 분리된 선분 위의 셀로 판단한다. 선분으로 분리하기 위하여 셀의 x, y 좌표 중에서 변화가 큰 변수의 크기 순서로 정렬한다. 정렬된 순서에서 한 셀과 다음 셀 간의 거리를 구해 로봇이 이동한 거리보다 큰지 작은지를 판단하여 셀을 군집화한다. 군집화된 셀들의 갯수가 미리 설정한 문턱값보다 크면 선분으로 저장한다. 시작셀과 끝셀을 선분의 시작점과 끝점으로 저장하고, 선분의 법선 방향 각도로는 셀들의 θ 값을 저장한다.

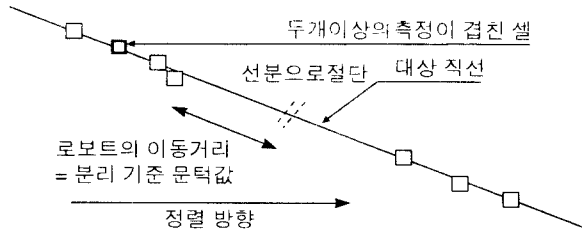


그림 8. 직선에서 선분의 추출
Fig. 8 Extraction of line segments from a line

선분을 추출하는 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

- ① 매개변수 θ 와 r 이 같은 모든 셀에 대하여 $[(\theta + 45^\circ) / 90^\circ]$ 값이 짝수일 경우 셀의 위치 중 x 의 크기를 가지고 셀을 정렬한다. 홀수일 경우 y 의 크기를 가지고 정렬한다.
- ② 정렬된 셀 중 처음셀을 시작셀로 삼는다.
- ③ 정렬된 순서대로 셀 간의 거리차를 구하여 분리 기준 문턱값(thresholding value for separation)보다 크면 끊어진 것으로 간주한다.
- ④ 끊어짐이 발생하면 끊어진 끝점을 선분의 끝셀로 저장하고, 셀의 갯수가 일정 갯수 이상일 때 선분으로 저장한다.
- ⑤ 끊어진 다음셀을 시작셀로 삼아 ③ 부터 검색을 다시 시작한다.
- ⑥ 다른 매개 변수를 가지는 셀들에 대해서도 같은 검색 방법으로 선분을 추출한다.

4.4 선분 추출 결과

그림 9는 그림 6의 격자지도를 허프변환하여 전체 영역의 선분을 검출한 결과이다. 거리 측정이 많이 얻어진 평면은 선분으로 검출되었으나, 측정이 부족한 곳은 검출되지 않았다. 이것은 매개변수 행렬에서 선분으로 인식하기 위한 문턱값을 낮추어 개선할 수도 있겠다.

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 단일 초음파 센서의 측정값으로 모델 기반 지도의 요소 중 하나인 선분(평면 성분)을 추출하였다. 초음파 센서의 측정값을 격자 형태의 정보로 저장한 뒤, 허프 변환을 사용하여 선분을 추출하였다. 그리고 이러한 알고리즘들을 자율 주행 로봇을 이용한 실제 실험으로 얻어 내었다.

본 연구 결과의 문제점은 지도 작성시 발생하는 불확실한 위치 오차는 보정하지 못한다는 것이다. 추측항법의 오차는 본 연구에서처럼 예측할 수 있는 것도 있으나, 바퀴와 노면과의 미끄러짐에 의한 불확실한 오차도 존재한다. 이러한 오차를 보정하기 위해서는 랜드마크나 비이콘 등의 전역적 참조 정보를 이용하거나, 같은 지점을 여러 번 측정하여 얻은 센서 정보를 이용하여 통계적으로 위치를 보정하는 방법들이 있을 것이다. 그리고 향후 구석 및 모서리 모델까지 추출하여 선분 모델과 정합하면 완전한 모델 기반 지도를 작성할 수 있을 것으로 기대된다.



그림 9 추출된 선분들
Fig. 9. Extracted line segments

참고 문헌

- [1] John J. Leonard, Hugh F. Durrant-Whyte, *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*, Kluwer Academic Publisher, 1992.
- [2] John J. Leonard, Hugh F. Durrant-Whyte, Ingemar J. Cox, "Dynamic Map Building for an Autonomous Mobile Robot," *International Journal of Robotics Research*, pp. 286-298, 1992.
- [3] Ingemar J. Cox, "Blanche-An Experiment in Guided and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp. 193-204, 1991.
- [4] E. Freund, F. Dierks, "Laser Scanner Based Free Navigation of Autonomous Vehicles," *Control Eng. Practice*, pp.299-304, 1994.
- [5] Rafael Gonzalez, Richard E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing, 1992.