

## 초음파 확률격자지도에 기반을 둔 자율이동로봇의 위치추정

### Sonar Grid-map based Localization for Autonomous Mobile Robots

이유철<sup>†</sup>, 이세진<sup>\*</sup>, 조동우<sup>\*\*</sup>, 강철웅<sup>\*\*\*</sup>, 임종환<sup>\*\*\*\*</sup>

Yu-Cheol Lee, Se-Jin Lee, Dong-Woo Cho, Chul-Ung Kang, Jong-Hwan Lim

**Abstract** - Exploration involving mapping and localization in an unknown environment is an important task in mobile robots. For this, robot must be able to build a reliable map of surroundings and to estimate the position of it. In this paper, we developed technique for grid-based localization of a mobile robot with ultrasonic sensors using EKF(Extended Kalman Filter). We also describe the information about landmarks detected in the environment. Finally, the robot experiments show the efficiency of our approach in the real environment.

**Key Words** : EKF Localization, Grid-based Mapping, Sonar, Mobile Robot

#### 1. 서론

이동로봇이 미지의 환경에 적응하며 움직이기 위해서는 주위환경을 인식하는 지도작성기술과 자신의 위치를 추정할 수 있는 기술이 필요하다.[1,2] 이를 위해서는 주위환경에 대한 정보를 받아들일 수 있는 센서가 필요하다. 이동로봇에 적용되는 센서는 비전(vision)센서, 초음파(sonar)센서, 레이저(laser) 센서 및 적외선(infrared) 센서 등 다양한 종류가 있다. 비전센서는 절대적 위치를 비교적 정확하게 인식할 수 있는 반면에 데이터의 처리량이 방대하며 주위 환경의 광도에 매우 민감하다. 레이저 센서는 빔 폭(beam width)이 좁고 방향에 대한 불확실도가 거의 없어 물체 위치의 측정이 매우 용이하지만 장비의 가격이 상대적으로 고가이며 인체에 대한 유해성도 가지고 있다. 반면에 초음파 센서는 조명의 변화에 무관하고 구조가 간단하며 장거리 인식도 가능할 뿐만 아니라 상용화 측면에서 볼 때 가격이 비교적 저가이며 안전하기 때문에 사용하기에 적합하다.

그러나 초음파 센서는 빔 폭이 넓고 음파의 거울 반사 효과(specular reflection effect)에 대한 문제를 갖고 있기 때문에 측정값의 신뢰도가 낮다.[1] 따라서 초음파센서의 불확실성을 해결하기 위한 방법으로는 크게 형상(Feature)을 이용하는 방법과 격자(Grid)를 이용하는 방법이 있다.

우선 형상기반 방식으로 Leonard는 한 위치에서 얻은 여러 개의 초음파 거리 정보(densely sonar data)로부터 동일거리영역(RCD: Region of Constant Depth)을 분류하는 방법을

제안하였다[3]. RCD는 초음파 센서의 거리 및 방향 불확실도를 최소화시킬 수 있는 것으로서 격자 형태가 아닌 구체적인 물체의 형상으로 지도를 작성할 수 있는 도구가 된다. 또한 RCD 추출 후 선과 점을 사용하여 형상 기반의 지도작성 및 위치를 추정하는 기술을 수행하였다. 하지만, 형상기반 지도는 복잡한 형태의 물체를 표현하기가 애매하며, 한번 만들어진 형상은 지워지지 않는 결점을 가지고 있다.

다른 방법으로 격자기반 방식이 있다. 처음 Moravec이 제안한 방법으로써 주위환경을 수많은 격자로 나눈 후, 각 격자에 물체가 있을 확률을 부여하여 주위환경을 표현하였다.[4] 격자지도는 물체의 형상이 복잡하여도 표현하는데 제한이 없다. 또한, 부여된 확률값은 새롭게 갱신되기 때문에 동적인 환경에 적용하기가 수월하다. 하지만, 로봇의 위치를 추정하기 위해서는 표지물(Landmark) 사용이 불가피한데 격자지도는 표지물을 찾고 만들기가 어렵다. 이런 점으로 인해 주위 환경에서 표지물을 먼저주고 자신의 위치를 찾는 연구를 Lim과 Kang은 제안하였다.[5] 이는 격자지도로 로봇위치추정 기술에 활용했다는 점에서 그 성과가 크겠지만, 지도 작성에 있어서는 시뮬레이션 결과를 활용했다는 점에서 미지의 환경에서는 사용되기에는 부족하다. 따라서 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 실제 미지의 환경을 격자지도로 표현하고, 이것을 활용하여 정확한 인식마크(landmark)를 찾는 연구를 하였다. 이렇게 찾아낸 인식마크를 확장칼만필터(Extended Kalman Filter)에 적용하여 로봇의 위치를 추정하는 기술을 제안하였으며 실험적으로 그것의 성과에 대하여 검증하였다.

#### 저자 소개

- † 浦項工大 機械工學科 碩士課程
- \* 浦項工大 機械工學科 博士課程
- \*\* 浦項工大 機械工學科 正教授 · 工博
- \*\*\* 濟州大 工大 機械工學科 助教授 · 工博
- \*\*\*\* 濟州大 工大 機械工學科 正教授 · 工博

#### 2. 초음파 확률격자지도

초음파 확률격자지도는 주위환경을 격자무늬로 나눈 후, 각 격자에 물체가 있을 가능성을 확률로 표현한 지도이다. 이는 즉각적인 지도 갱신 및 수정이 용이하며 물체의 형상에

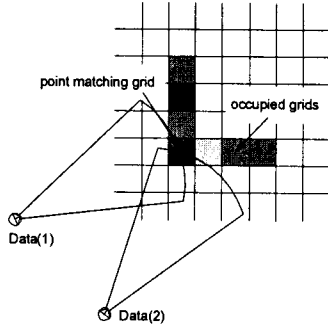


그림 1 인식마크  
Fig. 1 Representation of landmark

관계없이 물체의 존재 유무를 효율적으로 표현할 수 있다. 하지만 실제 적용에 있어서 초음파 센서의 거울반사효과에 의한 다중반사경로현상(multi-path effect)으로 인해 초기 초음파 확률지도 방법인 베이시안 모델(Bayesian model)에서는 지도의 질이 심각하게 떨어지는 문제점이 발생하였다.[2] 이를 해결하기 위해서 주위환경을 각 격자에 점유확률뿐만 아니라 물체의 방향확률을 동시에 평가하여 거울반사효과가 발생할 확률까지 고려한 방향확률지도작성 모델(Orientation model)을 제안하였다.[1] 이는 실제 환경 적용에서 초음파 센서의 거울반사효과에도 불구하고 양질의 지도 형성이 가능함이 입증되었다.

그러나 방향확률지도 작성 모델 역시 근본적으로 거울반사 효과에 의해 발생한 잘못된 정보를 걸러낼 수 는 없다. 따라서 잘못된 초음파 거리 데이터를 확률갱신 이전에 판단하여 필터링 할 수 있는 데이터 연관필터(Data association filter)를 제안하였다.[6] 데이터 연관필터는 측정된 초음파 데이터 사이의 연관성을 평가하여 동일한 물체에 의해 발생하였을 가능성이 있는 가를 판별하는 것이다. 이를 통해 거울반사 효과에 의한 잘못된 데이터의 가능성이 높은 경우에는 필터링 하여 양질의 데이터만을 얻을 수 있게 되었다.

하지만, 이전 방향확률지도작성 모델의 경우 격자의 크기가 작아질수록 갱신되는 지역이 작아져 물체가 탐지되었음에도 지도에 표시하지 못하는 문제가 발생하게 되었다. 이는 초음파 확률지도의 기본이론인 격자가 작아질수록 표현되는 지도의 질은 좋아져야 한다는 것에 반하는 것이다. 따라서 이를 보완하기 위해 음향학 이론에 따른 초음파압 확률모델(Ultrasonic pressure probabilistic model)을 만들게 되었다. 초음파압 확률모델은 실제 사용되는 초음파 센서의 특성치를 반영한 것으로써 초음파 센서가 물체를 탐지하는 과정을 사실대로 반영한 모델로써 격자의 크기가 작아질수록 더욱 양질의 지도를 얻을 수 있으며, 또한 동적환경에서의 적용된 지도를 얻는데 더욱 수월해 졌다.

### 3. 로봇위치추정

초음파 확률격자지도를 이용하여 로봇의 위치를 추정하기 위해서는 정확한 인식마크(landmark)를 찾는 기술과 그것을 확장칼만필터에 적용하기 위한 수학적 모델이 필요하다.

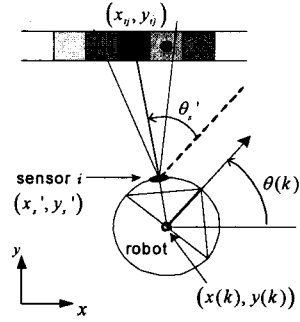


그림 2 초음파 센서의 위치  
Fig. 2 Global and local sensor locations

이 장에서는 보다 정확한 인식마크를 선택하는 방법과 로봇의 위치를 추정하기 위한 수학적 모델을 제안하였다.

#### 3.1 인식마크(Landmark) 선정

로봇의 위치 추정기술의 성공의 여부는 얼마나 정확한 인식마크를 선택하느냐에 있다. 따라서 보다 정확한 인식마크를 선택하기 위하여 확률격자지도의 점유확률과 초음파 빔형상이 마주치는 점을 이용하였다. 초음파 확률지도에서 점유확률이 높다는 것은 물체가 있을 가능성이 높다는 것을 말해준다. 또한 두개 이상의 초음파 빔이 마주치는 곳은 초음파 센서가 탐지하기 쉬운 물체가 존재함을 말해준다. 이런 특징들을 반영하여 그림 1과 같이 높은 점유확률에 해당하며 점 형상이 만들어지는 격자를 인식마크로 정의하였다.

#### 3.2 로봇의 위치 예측 모델

2차원 평면에서 로봇의 위치는  $(x, y, \theta)$ 로 표시되며, 이는 로봇의 위치와 방향을 나타낸다. 이와 같은 좌표계를 사용했을 때,  $k$ 번째 스텝에서 로봇의 위치는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X(k) = [x(k), y(k), \theta(k)]^T \quad (1)$$

그리고 로봇의  $k$ 번째 스텝에서 제어입력은 식 (2)와 같이 이동거리  $d(k)$ 와 회전각도  $\Delta\theta(k)$ 로 구성된다.

$$U(k) = [d(k), \Delta\theta(k)]^T \quad (2)$$

이를 이용하여 우리는  $k+1$ 번째 스텝에서 로봇의 위치를 식 (3)에서와 같이 예측할 수 있다.

$$X(k+1) = f(X(k), U(k)) + u(k), \quad u(k) \sim \mathcal{N}(0, Q(k)) \quad (3)$$

여기서  $u(k)$ 은 공분이  $Q(k)$ 이고 평균이 0인 가우시안 노이즈이며, 추측항법(dead reckoning)의 오차를 의미한다. 또한 로봇의 위치상태함수(state transition function)  $f(X(k), u(k))$ 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$f(X(k), U(k)) = \begin{bmatrix} x(k) + d(k) \cos \theta(k) \\ y(k) + d(k) \sin \theta(k) \\ \theta(k) + \Delta\theta(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

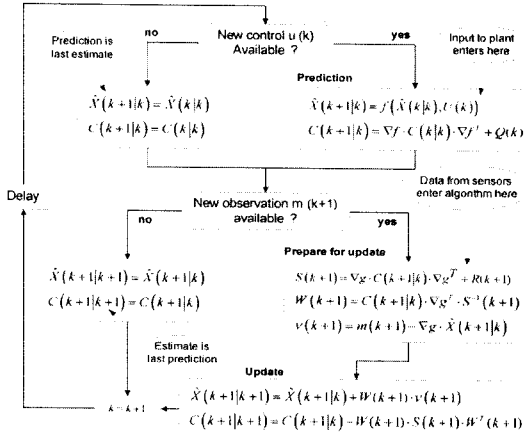


그림 3 확장칼만필터 알고리즘의 순서도  
Fig. 3 Flowchart of EKF algorithm

위치상태함수는 그림 3에서  $k$ 번째 스텝에서  $k+1$ 번째 스텝의 로봇 위치를 예측하는데 사용된다. 또한, 로봇의 불확실성은 공분산으로 표현되는데 이때는 위치상태함수의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)이 사용된다.

그림 2는 로봇의 위치 예측 다음 단계로, 초음파 센서에서 들어온 데이터와 인식마크를 정보를 비교하는 단계를 설명하고 있다. 이는  $n$ 번째 센서의 정보를 평가하기 위한 것으로 식 (5)에 정의하였다.

$$m_s(k) = g_s(X(k), T) + h_s(k), \quad h_s(k) \sim N(0, R(k)) \quad (5)$$

$$T = \{(x_j, y_j) | 0 \leq j \leq r\} \quad (6)$$

식 (6)에서와 같이  $T$ 는 센서  $s$ 에서 탐지 가능한 인식마크 격자가  $n$ 개 있음을 나타낸다. 그리고  $h_s(k)$ 는 공분이  $R(k)$ 이고 평균이 0인 가우시안 노이즈이며, 센서의 감지 측정 오차를 의미한다. 그리고 센서의 위치는 센서의 지역좌표  $[x'_s, y'_s, \theta_s]$ 로 표현되며 기하학 관계를 이용하여 로봇의 전체좌표로는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x_s(k) \\ y_s(k) \\ \theta_s(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) + x'_s \cos(\alpha(k)) - y'_s \sin(\alpha(k)) \\ y(k) + x'_s \sin(\alpha(k)) - y'_s \cos(\alpha(k)) \\ \alpha(k) + \theta_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

초음파 센서의 특성상 가장 가까운 인식마크를 탐지하게 될 것이다. 따라서 개의 탐지 가능한 인식마크 중 센서로부터 가장 가까운 곳에 위치하는 거리를 정의할 수 있으며 식 (8)과 같다.

$$g_s(X(k), T) = \left\{ \min \sqrt{(x_s(k) - x_{j_s}(k))^2 + (y_s(k) - y_{j_s}(k))^2} \mid 1 \leq j_s \leq n \right\} \quad (8)$$

이때, 탐지 가능한 인식마크가 없을 경우에  $g_s(X(k), T)$ 는 초음파 센서의 최대측정거리가 된다. 그리고 총  $n$ 개의 초음파 센서에 대하여 통합한 정보를 이용하여 그림 4에서와 같은 갱신과정을 가지며, 칼만게인(Kalman gain)  $W(k+1)$  값을 바탕으로 로봇의 위치를 추정하게 된다.



그림 4 실험 결과지도  
Fig. 4 Experimental result maps

#### 4. 실험결과 및 결론

실험에 이용된 로봇은 ActiveMedia Robotics사의 Pioneer 3-DX이다. 그리고Polaroid 600 series의 16개 초음파 센서가 균일한 간격(22.5°)으로 장착된 초음파 링을 제작하여 로봇 위에 설치하였다. 이때 초음파 센서는 유효측정구경은 22.5°, 최소측정거리는 10cm그리고 최대측정거리는 10m이다. 그리고, 실험 환경은 그림 5와 같이 천소재의 소파, 탁자, 의자, 책장, 옷장 등으로 구성하였다. 그리고 로봇경로는 화살표 방향으로 한 바퀴 움직였다. 총 사용된 초음파 센서의 정보는 2519개의 로봇위치에서 40304개의 초음파 데이터이며, 같은 환경을 4회전 하였다. 결과지도는 그림 4와 같다. 여기서 (a) 결과는 EKF를 사용하지 않은 경우이다. (b)의 EKF를 사용한 결과와 비교하였을 때 로봇 주행 에러가 축적되어 하나의 물체를 여러곳에 그리게 됨을 볼 수 있다. 이로써 본 논문에서 제시한 격자지도 기반의 EKF 알고리즘이 효과가 있음을 실험적으로 검증할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년도 정보통신부의 "홈 서비스 로봇의 위치인식, 지도형성 및 주행기술개발" 사업의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] J. H. Lim and D. W. Cho, "Specular Reflection Probability in the Certainty Grid Representation," Transactions of ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, vol. 116, pp.512-520, 1994.
- [2] 임중환, "초음파센서를 이용한 자율이동로봇의 지도형성, 탐사 및 위치평가," 박사학위논문, 포항공과대학교, 1994.
- [3] Leonard, J. J., "Direct Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation," Kluwer Academic, 1990.
- [4] H. P. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar," IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, pp.116-121, March 1985.
- [5] J. H. Lim and C. U. Kang, "Grid-based Localization of a Mobile Robot Using Sonar Sensors," KSME International Journal, vol. 16, No. 3, pp.302-309, 2002.
- [6] 이윤희, 임중환, 조동우, "데이터 연관 필터를 이용한 자율이동로봇의 초음파지도 작성", 한국전기학회지, Vol 54D, No 9, pp. 539-546, 2005.