

# 거울반사 탐지를 통한 초음파센서 기반 격자지도 작성

## Grid Mapping based on Ultrasonic Sensors

### Considering Detection of Specular Reflection

○최윤규\*, 송재복\*\*

\* 고려대학교 메카트로닉스학과 (TEL : 02-929-8501; E-mail: bazzi83@korea.ac.kr)

\*\* 고려대학교 기계공학부 (TEL : 02-3290-3363; E-mail: jbsong@korea.ac.kr)

**Abstract:** A mobile robot can represent the environment by building a map. This paper proposes a novel approach to building a grid map with ultrasonic sensors. But the constructed map using ultrasonic sensors does not correspond to the real environment due to incorrect measurements such as specular reflection. In this paper, both the previous range data and the configuration of ultrasonic sensors are used to detect specular reflection. The real experiments show that the mapping method considering detection of specular reflection is able to generate more accurate map for navigation.

**Keywords** Ultrasonic sensor, Specular reflection, Grid map, Bayesian update formula

## 1. 서론

이동로봇이 안정적으로 주행하기 위해서는 레이저스캐너, 적외선스캐너, 비전센서 및 초음파센서 등의 센서를 통해 주변환경을 정확히 인식하여야 한다. 이 중 초음파센서는 다른 센서에 비하여 구동원리가 간단하고, 시스템 구성 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 그리고 레이저스캐너와 적외선센서와 같은 광학센서로 측정할 수 없는 환경에서 유효하게 활용될 수 있다. 그러나 초음파센서는 물체 위치에 대한 방향 불확실성이 크며, 거울반사 현상의 발생으로 인해 정확한 거리 측정이 어려운 단점이 존재한다.

기존에는 이러한 초음파센서의 단점을 보완하기 위해 거리정보의 기하학적 RCD (regions of constant depth) 정보를 이용한 형상 기반 지도작성[1]과 로봇의 주위 환경을 일정한 격자로 나누어 각 격자에 물체가 점유되어 있을 가능성을 확률적으로 표현하는 방법이 제시되었다[2][3]. 특히, 거울반사 현상을 고려하기 위해 격자의 점유확률뿐만 아니라 방향확률도 동시에 평가한 지도작성이 제안되었다[4]. 그러나 제안된 방법들은 거울반사 현상의 발생에 대한 근본적인 해결 방안을 제시하지 못하여 위의 방법들로 작성된 지도는 이동로봇에 사용하기에는 부적합하였다.

본 논문에서는 초음파센서의 거울반사 현상 및 센서로 탐지된 물체의 위치불확실성을 고려하여 실용적으로 사용 가능한 지도를 작성하는 방법을 연구하였다. 실내환경에서 이동로봇이 벽면을 예측하고, 그 벽면을 기준으로 거울반사 현상의 발생 유무를 판단하여, 거울반사 현상에 의한 잘못된 거리정보를 제외한다. 또한,

탐지된 물체의 방향 불확실성을 줄여 장애물이 존재하지 않음에도 불구하고 장애물로 표현되는 영역을 제거하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 그림 1에 보이는 이동 플랫폼인 Mobile Robots사의 Pioneer 3DX와 이동 플랫폼에 장착된 8개의 S600 초음파센서를 사용하였다. 0.15~10m의 탐지거리와 30°의 지향각을 가지는 S600초음파센서의 구성을 통해 거울반사 현상을 탐지하였다.

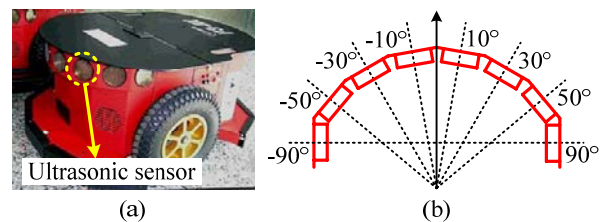


그림 1. 초음파센서가 장착된 로봇: (a) 이동 플랫폼, (b) 초음파센서의 배치.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 초음파센서의 구성을 통해 거울반사 현상을 판단하는 방법에 대해 설명하고, 3장에서는 초음파센서의 거리정보를 베이시안 갱신방법(Bayesian update formula)에 적용하여 격자지도를 작성하는 방식에 관하여 설명한다. 4장에서는 실험을 통해 제안된 방법의 지도작성 성능을 평가하고, 5장에서는 결론과 향후 연구에 대해 언급한다.

## 2. 거울반사 현상의 탐지와 불확실성의 고려

초음파센서 기반의 물체 검출은 반사체의 재질이나 음파의 방향과 관련이 있다. 초음파센서는 카펫과 같이

음파를 흡수하는 물체를 탐지하거나 음파의 입사각이 음파의 유효각의 절반보다 더 클 경우에 발생하는 거울반사(specular reflection) 현상에 의해 잘못된 거리정보를 제공한다. 일반적으로 초음파센서는 호의 모양으로 방사되기 때문에 점 혹은 원으로 표현되는 장애물에 대해서는 거울반사가 잘 일어나지 않는다. 하지만 벽면과 같이 선으로 표현되는 장애물에서는 초음파센서가 향하는 방향에 따라 거울반사가 빈번히 발생한다. 거울반사 현상은 다음의 식을 사용하여 판단할 수 있다.

$$\varphi = \alpha + \frac{\theta}{2}, \quad \varphi \geq \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

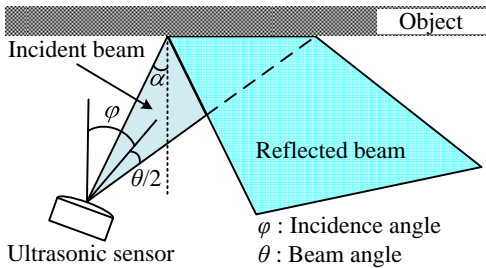


그림 2. 거울반사 현상.

여기서  $\theta$ 는 초음파센서(S600)가 가지는 음파의 유효각으로 30도이며,  $\alpha$ 는 장애물과 입사광으로 생기는 각으로 음파의 입사각( $\varphi$ )을 결정한다. 거울반사 현상은 그림 2와 같이 입사각이 유효각의 절반보다 클 때 발생된다.

다음으로 고려할 사항은 초음파센서가 장애물을 탐지하였을 때 센서값의 각도 불확실성이다. 그림 3(a)는 벽면을 탐지하였을 때 거울반사 없이 이상적으로 얻을 수 있는 거리정보이다. 그러나 벽면은 항상 매끈하지 않기 때문에 초음파센서가 실제로 벽면을 탐지하게 되면, 거울반사가 발생하지 않음에도 불구하고 그림 3(b)와 같이 벽은 초음파센서의 호 영역 어느 한 부분에 탐지된다. 또한 점선의 영역과 같이 벽면 이외의 불필요한 영역을 탐지하기 때문에 센서가 가지는 특징 및 각도 불확실성을 고려해야 한다.

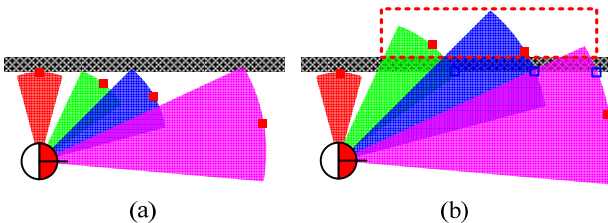


그림 3. 로봇 좌측 방향의 초음파센서: (a) 이상적인 거리정보, (b) 불확실성이 존재하는 실제 거리정보.

### 2.1 거울반사 현상의 탐지

이동로봇은 실내환경에서 지도작성시 주로 벽면을 탐지한다. 따라서 주어진 센서의 구성을 통해 벽면의

기울기를 예측할 수 있다면, 각 센서에서 거울반사 현상의 발생 여부를 판단할 수 있다. 벽면의 기울기를 예측하기 위해서 초음파센서의 이전 거리정보와 현재 거리정보를 이용하여 직선을 추출한다. 추출된 직선의 기울기와 초음파센서의 거리 및 방향정보를 통해 식 (1)을 사용하여 거울반사 현상을 예측한다. 그림 4와 같이 센서가 향하는 방향과 추출된 벽면의 기울기를 통해 거울반사가 발생한 센서와 발생하지 않은 센서를 예측할 수 있다. 만약, 초음파센서로 얻은 이전 거리정보( $t-1$ )와 현재 거리정보( $t$ )를 기반으로 벽면을 추출하였다면, 그림 4(a)와 같은 경우에는 초음파센서의 입사각이 벽면과 수직하므로 거울반사가 발생하지 않는다. 그러나 그림 4(b)와 같은 경우에는 벽면과 초음파센서의 기울기의 차에 의해 입사각이 유효각의 절반보다 커지게 되어 거울반사가 발생하게 된다.

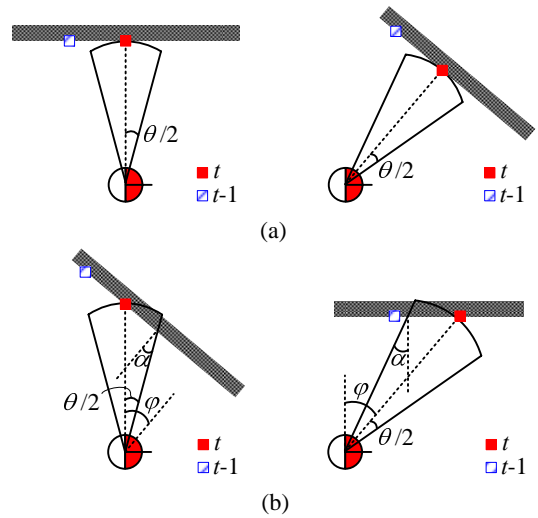


그림 4. 거울반사의 예측: (a) 정상적인 초음파센서, (b) 거울반사가 의심되는 센서.

한편, 위의 방법을 통해 거울반사 현상이 발생하지 않은 센서와 그 센서로부터 추출된 벽면의 정보는 다른 센서들의 거울반사 현상을 판단하는 기준으로 사용될 수 있다. 초음파센서는 거리정보가 불확실하기 때문에 예측된 벽면을 기준으로 각 초음파센서마다 그 벽면을 측정할 수 있는 거리정보의 범위를 설정하여, 실제의 거리정보와 비교한다. 그림 5는 거울반사 현상이 발생하지 않았다고 판단되는 센서( $d_{ref}, \phi_{ref}$ )와 예측된 벽면  $l$ 이 존재할 때  $i$ 번째 센서( $d_i, \phi_i$ )가 거울반사 현상 없이 벽면을 측정하였을 경우의 센서의 최소거리( $d_{min}$ )와 최대거리( $d_{max}$ )를 예측한 것이다.

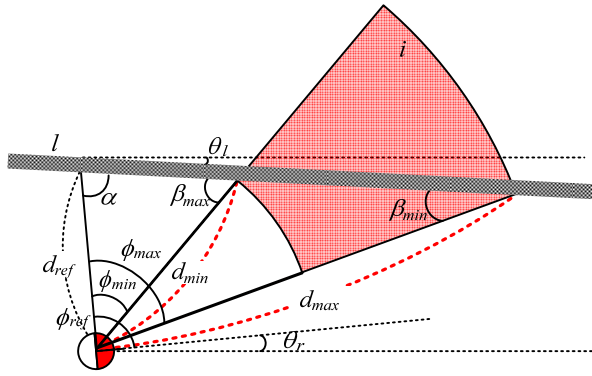


그림 5. 거울반사 현상 탐지를 위한 거리정보의 범위.

$$\alpha = \pi - (\phi_{ref} + \theta_r + \theta_l) \quad (2)$$

$$\phi_{min} = \phi_{ref} - (\phi_i + \frac{\theta}{2}), \quad \phi_{max} = \phi_{ref} - (\phi_i - \frac{\theta}{2}) \quad (3)$$

$$\beta_{max} = \pi - (\alpha + \phi_{min}), \quad \beta_{min} = \pi - (\alpha + \phi_{max}) \quad (4)$$

$$d_{min} = \frac{\sin \alpha \cdot d_{ref}}{\sin \beta_{max}}, \quad d_{max} = \frac{\sin \alpha \cdot d_{ref}}{\sin \beta_{min}} \quad (5)$$

여기서  $\theta$ 은 예측된 벽면의 기울기이고  $\theta_r$ 은 로봇의 방위이며,  $\theta_l$ 은 초음파센서의 유효각( $30^\circ$ )을 나타낸다. 그러므로  $i$ 번째 초음파센서의 거리값이 예측한 최소거리( $d_{min}$ )와 최대거리( $d_{max}$ ) 사이에 존재한다면 거울반사 현상 없이 벽면을 탐지하였다고 판단할 수 있다.

## 2.2 초음파센서의 불확실성 고려

2.1절의 그림 3(b)에서 점선의 영역은 초음파센서의 불확실성에 의해 불필요하게 탐지된 영역이다. 이 영역은 장애물의 잘못된 표현으로 생성되어 지도의 질을 저하시킨다. 따라서, 이러한 영역을 탐지하지 않기 위해 유효영역을 수정하여 초음파센서에 의해 탐지되는 영역만을 지도 작성에 반영해야 한다.

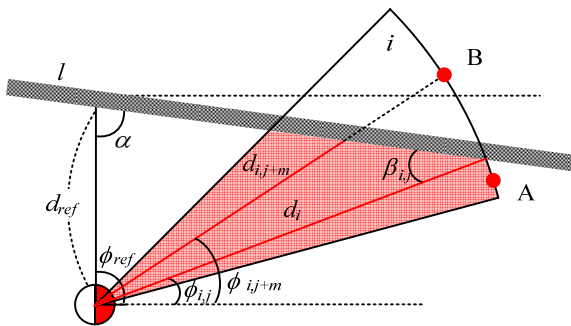


그림 6. 유효한 탐지범위의 설정.

만약, 초음파센서가 그림 6과 같이 벽면을 탐지하였다면 이 초음파센서의 유효범위는 음영을 가지는 벽면 안쪽의 영역이다. 이 영역의 탐지를 위해 유효영역에 해당하는 각도마다 거리정보를 재설정하여, 불필요한

영역의 탐지를 막는다. 이를 위해서는  $i$ 번째 초음파센서의 거리정보( $d_i, \phi_i$ )가 벽면에 접할 때의 초음파센서의 유효각( $\phi_j$ )은 다음의 식을 통해 얻을 수 있다.

$$c = \frac{\sin \alpha \cdot d_{ref}}{d_i}, \quad \beta_{i,j} = \sin^{-1} c \quad (6)$$

$$\phi_{i,j} = (\alpha + \beta_{i,j}) - \phi_{ref} \quad (7)$$

여기서  $c$ 는 거리정보가 벽면에 접하는 각을 구하기 위해 사용되는 매개변수이다. 예를 들어, 그림 6의 A 지점은  $\phi_j$ 보다 작은 각을 가지므로 원래의 거리( $d_i$ )를 유지하지만, B 지점과 같이 큰 각을 갖는 지점의 거리정보는 재설정해주어야 한다. 만약 B 지점이  $\phi_j$ 보다  $m$ 도 큰 각( $\phi_{ij+m}$ )을 가진다면, 식 (4)에 의해 각  $\beta_{ij+m}$ 가 결정되고 식 (5)에 의해 벽면에 접하는 거리( $d_{ij+m}$ )가 결정된다.

## 3. 베이지안 갱신방법을 이용한 격자지도 작성

격자지도 작성은 베이지안 갱신 방법(Bayesian update formula)을 적용하여 수행된다[3]. 시간  $t_0$ 에서  $t$ 까지 로봇의 위치상태( $x_{0:t}$ )와 장애물까지의 거리정보( $z_{0:t}$ )가 주어져 있을 때, 격자지도의  $i$ 번째 격자  $m_i$ 가 점유되어 있을 확률은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$p(m_i | x_{0:t}, z_{0:t}) = \frac{p(m_i | x_{0:t-1}, z_{0:t-1})p(m_i | x_t, z_t)}{[1 - p(m_i | x_{0:t-1}, z_{0:t-1})][1 - p(m_i | x_t, z_t)]} \quad (8)$$

이때, 현재  $t$ 에서 측정값에 의해 격자  $m_i$ 가 점유되어 있을 확률  $p(m_i | x_t, z_t)$ 은 역센서 모델(inverse sensor model)로 계산할 수 있다. 역센서 모델은 로봇의 위치상태와 측정값을 통해 격자의 점유확률을 구할 수 있는 모델로, 위치추정 등에서 로봇의 위치와 지도가 주어졌을 때 얻을 수 있는 측정값의 확률인 센서모델  $p(z_t | x_t, m)$ 과는 반대 개념이다. 본 논문에서는 그림 7과 같이 정의된 역센서 모델을 사용하여 지도를 작성하였다.

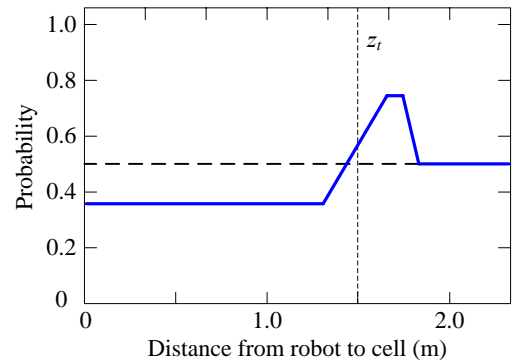


그림 7. 격자지도 작성에 사용되는 역센서모델.

#### 4. 실험 및 고찰

본 장에서는 제안한 방법을 통하여 거울반사 현상에 영향을 덜 받는 지도의 작성이 가능함을 실험을 통해 확인한다. 실험은 실내환경을 잘 반영하는 복도와 넓은 공간에서 수행하였다.

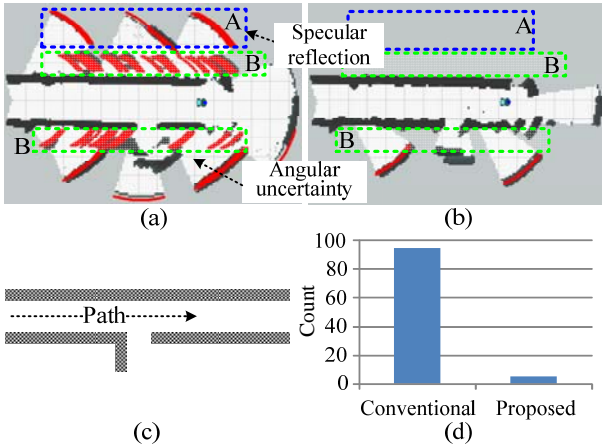


그림 8. 실내환경(복도)에서의 지도작성: (a) 거울반사 현상을 고려하지 않고 작성된 지도, (b) 제안된 방법으로 작성된 지도, (c) 실험환경, (d) 결과 비교.

그림 8(c)와 같이 폭이 2m인 복도를 10m 주행하여, 거울반사 현상이 고려되지 않은 방법과 비교를 하였다. 그림 8(a)는 거울반사 현상이 고려되지 않은 방법으로 작성한 지도로 A 지역에서는 거울반사 현상으로 B 지역에서는 센서의 각도 불확실성으로 인해 잘못 맵핑된 부분이다. 하지만 제안한 방법은 그림 8(b)와 같이 실제 환경과 매우 유사하게 작성될 수 있었다. 그림 8(d)는 거울반사 현상이 지도작성에 반영된 횟수로 총 768번의 확률갱신 중 각각 95번과 5번의 거울반사 현상이 반영되었다.

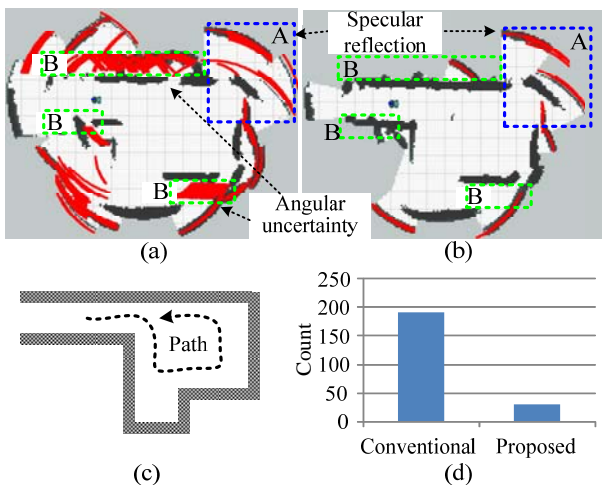


그림 9. 실내환경에서의 지도작성: (a) 거울반사 현상을 고려하지 않고 작성된 지도, (b) 제안된 방법으로 작성된 지도, (c) 실험환경, (d) 결과 비교.

그림 9는 그림 9(c)와 같은 공간을 약 22m 주행하여 작성된 지도를 비교하였다. 거울반사 현상을 고려하지 않은 방법의 지도는 A 지역에서 거울반사 현상이 발생하였으며, B 지역에서는 각도 불확실성으로 잘못 맵핑되었고, 이전에 작성된 격자가 확률갱신 후에 지워졌다. 그러나 제안된 방법의 지도작성은 이러한 문제점을 대부분 해결할 수 있었다. 거울반사 현상이 지도에 반영된 횟수는 총 1792번의 확률갱신 중에 각각 192번과 30번으로 그림 9(d)와 같았다. 하지만 실내환경의 모퉁이 부분에서는 서로 인접한 벽에 음파의 반사가 여러 번 발생하는 다중경로 반사(multiple reflection paths)로 인해 제안된 방법에서도 거울반사 현상이 종종 나타났다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 초음파센서에서 발생하는 거울반사 현상을 탐지하여 지도작성에 반영하는 방법을 제안하였다. 초음파센서의 기하학적인 구성과 이전정보를 사용하여 거울반사 현상이 발생하지 않는 센서를 예측하여, 그 센서를 기준으로 다른 초음파센서들의 거울반사 현상을 탐지하였다. 또한, 초음파센서의 유효영역을 재설정하여 불필요한 영역을 탐지하는 문제점을 해결하여 지도의 정확성을 향상 시켰다. 마지막으로, 비교실험을 통해 제안된 방법의 지도작성의 성능을 파악하였다.

본 연구에서는 여전히 다중경로 반사 등 부정확한 거리정보로 인해 정확한 지도작성을 수행하지 못하였다. 따라서 추후에는 모퉁이 등을 정확히 반영하여 정확하게 지도를 작성할 수 있는 기술을 개발할 예정이다.

#### 후기

이 연구는 지식경제부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술 개발사업)의 일환으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, "Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation," Kluwer Academic Publisher, 1992.
- [2] H. P. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 116-121, Mar., 1985.
- [3] D. W. Cho and H. P. Moravec, "A Bayesian Method for Certainty Grids," *AAAI Spring Symposium on Robot Navigation*, pp. 55-60, Mar., 1990.
- [4] 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.