

음향학에 기반한 자율이동로봇의 초음파 확률격자지도 작성

이유철*(포항공대 대학원), 이세진(포항공대 대학원), 임종환(제주대), 조동우(포항공대)

Sonar Map Construction Based on Acoustics Theory for Autonomous Mobile Robots

Y. C. Lee(POSTECH), S. J. Lee(POSTECH), J. H. Lim(Jeju Univ.), D. -W. Cho(POSTECH)

ABSTRACT

The sonar sensors can be divided into a piezo type and an electrostatic type according to a principle of an operating system. The electrostatic type of a sonar sensor is used for map building in this paper. If we know the characteristics of sonar sensor, we can derive the ultrasonic pressure equation from an acoustics theory. We, therefore, developed Ultrasonic Pressure Probabilistic Model (UPPM) to consider the sound pressure in the probability updating process. In this paper, we found that the quality of the resulting probability map is considerably improved, through combining the UPPM with the grid-based mapping algorithm.

Key Words : Ultrasonic Pressure(초음파 압력), Acoustics(음향학), Grid-based Mapping(격자지도작성), Mobile Robot(이동로봇)

1. 서론

초음파 센서는 조명의 변화에 무관하고 구조가 간단하며 비용이 저렴하고 장거리의 인식도 가능하기 때문에 자율이동로봇의 환경인식에 많이 사용되고 있다. 그러나 초음파 센서는 음파의 지향각이 넓어 물체 위치에 대한 방향 불확실성이 크며, 정반사 특성에 따른 거울반사(Specular Reflection)효과에 의해 잘못된 물체 존재정보를 제공하는 경우가 많아 그 불확실성이 매우 크다. 이러한 초음파 센서 정보의 불확실성을 보완하기 위해 확률개념을 이용한 격자지도를 개발하였다.[1]

확률격자지도는 즉각적인 지도 갱신 및 수정이 용이하며 물체의 형상에 관계없이 물체의 존재 여부를 효율적으로 표현할 수 있다. 하지만 실제 적용에 있어서 초음파 센서의 거울반사효과에 의한 다중반사경로현상(multi-path effect)으로 인해 베이시안 모델(Bayesian model) 역시 지도의 질이 심각하게 떨어지는 문제점이 발생하였다.[2] 이를 해결하기 위해서 각 격자에 점유확률뿐만 아니라 물체의 방향확률을 동시에 평가하여 거울반사효과가 발생할 확률까지 고려한 방향확률지도작성 모델(Orientation model)을 제안하였다.[3] 이는 실제 환경 적용에서 초음파센서의 거울반사효과에도 불구하고 양질의

지도 형성이 가능함이 입증되었다.

그러나 방향확률지도 작성 모델 역시 근본적으로 거울반사효과에 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.[4] 데이터 연관필터는 측정된 초음파 데이터 사이의 연관성을 평가하여 동일한 물체에 의해 발생하였을 가능성이 있는 가를 판별하는 것이다. 이를 통해 거울반사효과에 의한 잘못된 데이터의 가능성이 높은 경우에는 필터링 하여 양질의 데이터만을 얻을 수 있게 되었다.

확률격자지도는 격자의 크기가 작아질수록 더욱 양질의 지도를 얻을 수 있어야 한다. 하지만, 방향확률지도작성 모델의 경우 격자의 크기가 작아질수록 갱신되는 지역이 작아져 물체가 탐지되었음에도 지도에 표시하지 못하는 문제가 발생하게 되었다. 이를 보완하기 위해 음향학 이론에 따른 초음파 센서의 확률적인 모델을 만들게 되었다. 이 모델을 초음파압 확률모델(Ultrasonic pressure probabilistic model)이라고 한다. 초음파압 확률모델은 실제 사용되는 초음파 센서의 특성치를 반영한 것으로써 초음파 센서가 물체를 탐지하는 과정을 사실대로 반영한 모델이다.

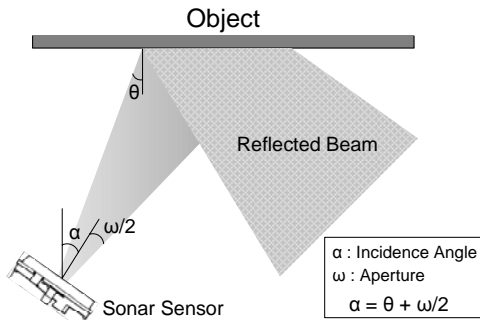


Fig. 1 Specular reflection effect of a sonar sensor

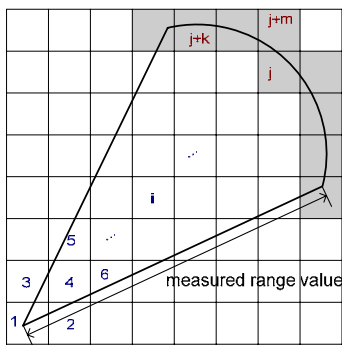


Fig. 2 Footprint of a sonar beam

본 논문에서는 개발된 초음파 압력 확률모델을 방향확률지도작성 모델에 적용하여 그 타당성을 실험을 통하여 검증하였다.

2. 초음파 센서와 확률지도

2.1 초음파 센서의 특징

초음파 센서는 반사파를 감지하므로 천 재질과 같이 음파를 흡수하는 물체는 그 원리상 감지가 어렵다. 또한, 거울반사효과가 발생할 때로써 그림 1 과 같이 음파를 흡수하는 재질이 아님에도 불구하고 전방의 최 근접 물체를 감지하지 못하는 경우이다. 거울반사란 정반사를 의미하는데 초음파의 경우 파장이 길기 때문에 생활주변의 대부분의 물체에 대해서 정반사가 일어난다. 따라서 물체의 표면 거칠기에 따라 다소 차이가 있으나 음파의 입사각 (α)이 음파의 유효구경(ω)의 절반보다 크면 송신된 음파는 반사 후 수신부에 도착하지 못 하게 되어 센서는 물체를 감지할 수 없게 된다.[5]

거울반사효과는 전방의 물체를 감지하지 못하는 문제뿐만 아니라 다중경로효과를 발생시킨다. 즉, 거울반사효과가 한번 이상 일어난 정보가 송신기에 들어온 것을 다중경로현상이라 한다. 이런 다중경로현상은 실제 베이시안 모델을 이용하여 초음파 지도를 형성하는 경우에 물체의 점유영역을 제대로

재구성하지 못하는 현상을 발생시키는 가장 큰 원인이 된다.

2.2 확률지도작성

베이시안 확률지도란 그림 2 와 같이 주위환경을 2 차원 또는 3 차원의 작은 그리드로 나눈 후 각 그리드에 물체가 존재할 확률을 평가하여 나타내는 방법이다. 각 그리드의 확률평가 방법을 간략히 소개하면 다음과 같다. 초음파 센서의 음파가 지나간 궤적을 그림 2 에 나타낸 바와 같이 부채꼴 모양이라 가정하면 그 내부의 그리드 들이 확률 갱신의 대상이 된다. 갱신 대상 그리드의 번호는 센서의 위치로부터의 거리에 따라 부여된 것이며 1 부터 $j-1$ 번까지는 음파가 지나간 부분이므로 점유확률이 떨어지게 되고 j 부터 $j+m$ 번째 그리드는 이들 중 어디에선가 음파가 반사되었을 것이므로 점유확률이 올라가게 된다. 점유확률의 갱신 정도는 센서로부터의 거리 및 각도에 따라 베이즈의 조건 확률 이론으로 평가된다.[1]

베이시안 모델은 점유확률과 비점유확률을 독립적으로 간주함에서 나타난 문제를 해결하였을 뿐만 아니라 확률지도 작성의 이론적 바탕을 정립한 모델로 평가되고 있다. 하지만 이 모델은 실제 적용에 있어서 형성된 지도의 질이 크게 떨어지는 현상이 나타났다.[2] 이것은 실제 초음파센서는 거울반사현상에 의한 다중반사경로효과가 발생하여 잘못된 거리정보가 제공되는 경우가 자주 발생하는데 반해 베이시안 모델이 이를 고려하지 못하고 있기 때문이다. 예를 들어 그림 2 서 i 번째 그리드에서 거울반사가 일어났다면 그 이후의 그리드들($i+1$ 부터 $j+m$ 그리드)은 더 이상 확률갱신이 필요 없음에도 불구하고 베이시안 모델은 거울반사 유무에 무관하게 확률갱신을 하기 때문에 실제 물체가 존재하는 부분의 그리드들의 점유확률이 과다하게 낮아지는 결과를 초래한다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 Lim 과 Cho 는 각 그리드의 방향확률을 평가하여 거울반사현상의 발생을 어느 정도 예측하는 방향확률모델을 개발하였다.[2] 방향확률모델은 거울반사효과가 발생하였을 가능성이 높은 정보는 점유확률 값의 갱신에 있어 변화의 폭을 작게 하고 그렇지 않은 경우에는 크게 함으로써 거울반사에도 불구하고 양질의 지도 형성이 가능함을 보였다.[2]

그러나 이 모델 역시 거울반사현상의 발생가능성 정도에 따라 확률갱신 폭을 조절하는 것으로서 그 영향을 줄여줄 뿐이지 근본적인 해결책을 제시하고 있지는 못하다. 즉, 환경에 따라 거울반사현상이 나타나는 비율이 높아지면 질수록 지도의 질이 나빠질 수밖에 없다. 따라서 이런 점을 보완하기

위해서 초음파 센서의 거리 데이터 상호간의 연관성을 평가를 통해 각 데이터 별로 거울반사현상의 발생 유무를 판단하여 잘못된 데이터를 사전에 필터링 하는 방법을 강구하게 되었다.

2.3 데이터 연관필터

전술한 바와 같이 초음파센서는 그 특성상 거울 반사효과가 일어날 수밖에 없으며, 방향확률을 고려한 확률지도 모델도 거울반사효과가 일어난 정보를 원천적으로 없앨 수는 없다. 만일 거울반사효과가 일어난 정보를 필터링 하여 확률갱신에 원천적으로 사용하지 않을 수 있다면 더 좋은 질의 지도를 그릴 수 있을 것이다. 따라서 거울반사와 같이 잘못된 정보를 차단하는 필터링 방법을 개발할 필요가 있으며 이를 위해 다음과 같은 데이터 연관성을 고려한 필터를 개발하였다. [4]

데이터 연관성 필터(DAF)의 기본 개념은 다음과 같다. 동일 물체에 의해 발생된 데이터들끼리는 그 물체의 형상에 따른 일련의 연관성이 존재할 것이며, 거울반사에 의한 잘못된 데이터는 다른 데이터들과의 연관성이 존재할 가능성이 떨어진다는 것이다. 따라서 센서로부터 거리 데이터가 수집되면 개별 데이터에 대해 수집된 데이터 및 이전 데이터들과의 상호 연관성을 평가하여 일정한 연관성이 존재하는 데이터만을 확률 갱신에 이용함으로써 거울반사효과에 의한 잘못된 데이터를 필터링 할 수 있다. 또한 서로 연관성이 존재하는 데이터들은 클러스터로 만들어 다음 단계에 수집된 데이터들의 연관성 평가에 이용한다.

3. 음향학에 기반한 초음파센서 확률모델

초음파 센서가 확률격자지도에 사용되기 위해서는 초음파 센서의 확률 모델이 필요하다. 이전 확률격자지도에서는 부채꼴 모양의 단순화된 초음파 센서의 확률모델을 사용함으로써, 그리드의 크기가 작아질수록 갱신되는 지도의 크기가 작아지는 문제가 발생하게 되었다. 또한, 한번 점유지역으로 갱신된 확률값이 잘 떨어지지 않아 물체가 움직이는 동적인 환경에서는 활용되기 어려운 문제점을 가지고 있었다. 이런 점을 보완하기 위해서 음향학에 기반한 초음파 센서의 확률 모델을 개발하게 되었다.

3.1 초음파 압력식

초음파 센서에서 발산한 초음파가 물체를 통해 반사되어 나오는 압력은 물체 탐지의 유무를 결정하는 중요한 요소가 된다. 따라서 임의의 지점에서의 초음파 압력을 구할 수 있다면 물체의 유무의 판단을 하는 확률지도에 유용하게 쓰일 수 있을 것

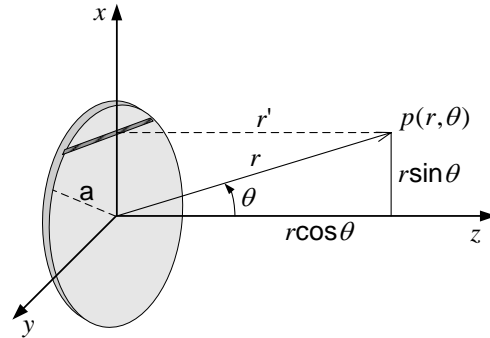


Fig. 3 Geometry of sonar sensor based on acoustics

이다. 우선 초음파 압력식을 구하기 위해서는 사용된 초음파 센서의 종류를 알아야 한다. 일반적으로 사용되는 초음파 센서는 압전방식과 정전기방식이 있다. 이 논문에서 사용한 초음파 센서는 정전기식 방식으로 그림3 과 같다. 이때 초음파 센서의 임의의 점 $p(r, \theta)$ 의 초음파압력은 음향학 이론에 따라 식(1)과 같이 유도될 수 있다.

$$p(r, \theta, t) = \frac{1}{2} \rho_0 c U_0 \frac{a}{r} ka \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] j e^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

식(1) 에서 a 는 초음파 센서의 반지름, ρ_0 는 매질(공기)의 밀도, c 는 음속, U_0 는 입자속도의 크기, k 는 각속도를 음속으로 나눈 것으로서 ω/c 이며, J_1 은 Bessel 함수이다. 식(1)을 통하여 사용한 초음파 센서의 크기 및 물성치를 알면 임의의 지점에서 초음파 압력을 구할 수 있다. 그리고 식(1)은 각 부분별로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$A_{ixs_part} = \frac{1}{2} \rho_0 c U_0 \frac{a}{r} ka \quad (2-a)$$

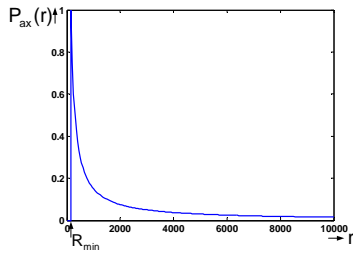
$$D_{irectivity_part} = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (2-b)$$

$$H_{armonic_wave} = j e^{j(\omega t - kr)} \quad (2-c)$$

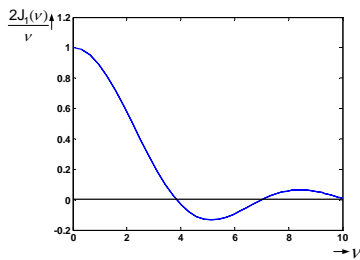
식(2-a)는 거리에 따른 초음파 압력의 변화를 나타내며, 식(2-b)는 각도에 따른 초음파 압력의 변화를 나타낸다. 이두식을 이용하여 초음파 센서의 확률모델을 만들었다. 이때, 발산한 초음파의 주파수에 따라 나타나는 진동은 식(2-c)에 나타나며 초음파 센서의 확률모델에서는 초음파 압력의 크기만을 고려하기 때문에 배제하였다.

3.2 초음파 센서의 확률모델

식(2)에서 보는 것과 같이 센서의 중심에서 벗어날수록 초음파 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 식(2-a)에서는 초음파 압력이 거리값에 반비례



(a)



(b)

Fig. 4 Ultrasonic pressure probabilistic model

하는 특징을 알 수 있었으며, 식(2-b)에서는 초음파 센서의 중심에서 작게 기울수록 초음파 압력이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이들을 이용하여 다음과 같은 확률모델을 만들었다.

$$P_{ax}(r) \approx \frac{1}{r}, \quad R_{\min} \leq r < R_{\max} \quad (3-a)$$

$$H(\theta) = \left| \frac{2J_1(v)}{v} \right|, \quad v = ka \sin \theta \quad (3-b)$$

이때, 거리값에 따른 $P_{ax}(r)$ 은 그림 4의 (a)와 같이 표현되며, 각도에 따른 $H(\theta)$ 는 그림 4의 (b)와 같이 나타낸다.

$$P(r, \theta) = P_{ax}(r)H(\theta) \quad (4)$$

최종적으로 임의의 위치 (r, θ) 에 있는 물체를 탐지할 확률은 (4)와 같이 표현되며, 이를 확률격자지도 작성모델에 적용하였다.

4. 실험결과 및 결론

실험에 이용된 로봇은 ActiveMedia Robotics사의 Pioneer 3-DX이다. 그리고 Polaroid 600 series의 16개 초음파 센서가 균일한 간격(22.5°)으로 장착된 초음파 링을 제작하여 로봇 위에 설치하였다. 이때 초음파 센서는 유효측정구경은 22.5°, 최소측정거리는 10cm 그리고 최대측정거리는 10m이다. 그리고, 실험 환경은 그림 5와 같이 천소재의 소파, 탁자, 의자, 책장, 옷장 등으로 구성하였다. 그리고 로봇경로는 화살표 방향으로 한 바퀴 움직였다.

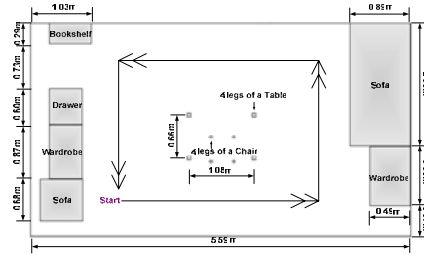


Fig. 5 Configurations of objects for the experiment

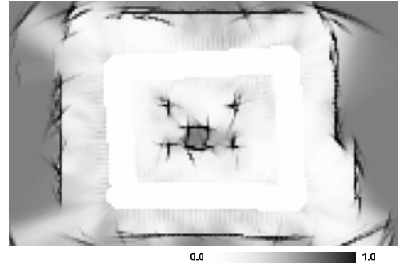


Fig. 6 Constructed grid map from the experimental data

그림 6은 실험의 결과를 나타낸다. 한 격자의 크기는 4cm이며 초음파 센서의 유효구경은 22.5°로 하였다. 총 수집된 데이터의 개수는 529 위치에서 8464개이다. 물체가 없는 지역은 확실하게 확률이 떨어졌고, 물체가 있는 점유지역은 확실하게 확률이 올라간 것을 알 수 있다. 이로써 초음파 압력 확률모델의 효과를 검증하였다.

후기

본 연구는 2005년도 정보통신부의 “홈 서비스 로봇의 위치인식, 지도형성 및 주행기술개발” 사업의 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

참고문헌

1. D. W. Cho and H. P. Moravec, “A Bayesian Method for Certainty Grids,” AAAI Spring Symposium on Robot Navigation, Stanford, CA, pp.57-60, Mar. 1989.
2. J. H. Lim and D. W. Cho, “Multipath Bayesian Map Construction Model from Sonar Data,” ROBOTICA, Vol.14, pp.527-540, 1996.
3. 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.
4. 이유철, 임종환, 조동우 “데이터 연관 필터를 이용한 자율이동로봇의 초음파지도 작성,” 한국전기학회지, 제 54D 권, 제 9호, 2005.
5. R. Kuc and V. B. Viard, “A Physical Based Navigation Strategy for Sonar-Guided Vehicles,” The International Journal of Robotics Research, vol. 10, No. 2, pp.75-87, 1991.