

# 지향각이 넓은 저가의 초음파센서를 이용한 이동로봇의 장애물 회피

## Obstacle Avoidance of a Mobile Robot Using Low-Cost Ultrasonic Sensors with Wide Beam Angle

최 윤 규, 최 우 수, 송 재 복\*  
(Yun-Kyu Choi, Woo-Soo Choi, and Jae-Bok Song)

**Abstract:** An ultrasonic sensor has been widely used as a range sensor for its low cost and capability of detecting some obstacles, such as glasses and black surfaces, which are not well detected by a laser scanner and an IR sensor. Although low-cost sensors are preferred for practical service robots, they suffer from the inaccurate and insufficient range information. This paper proposes a novel approach to obstacle avoidance using low-cost anisotropic ultrasonic sensors with wide beam angle. In this paper, obstacles can be detected by the proposed sensor configuration which consists of one transmitter and three receivers. Because even wide obstacles are represented by a point, which corresponds to the intersection of range data from each receiver of the anisotropic sensor, a robot cannot avoid wide obstacles successfully. This paper exploits the probabilistic mapping technique to avoid collision with various types of obstacles. The experimental results show that the proposed method can robustly avoid obstacles in most indoor environments.

**Keywords:** mobile robot, obstacle avoidance, probability-based local map, anisotropic ultrasonic sensor

### I. 서론

이동로봇이 장애물과 충돌하지 않고 안정적으로 주행하기 위해서는 레이저스캐너, 적외선스캐너, 비전센서 및 초음파센서 등의 센서를 통해 주변환경을 정확히 인식하여야 한다. 기존의 장애물 회피에 대한 연구는 주로 성능이 우수한 고가의 센서를 사용하여 알고리즘 연구에 초점이 맞춰져 있었다. 고가의 센서를 사용하면 신뢰성이 있는 주행을 수행할 수 있는 로봇을 개발할 수 있지만, 보급형 로봇과 같이 일반 가정에서 사용되는 로봇에는 비싼 가격으로 인해 적용하기 어렵다. 따라서 로봇이 대중에게 널리 보급되기 위해서는 저가의 센서를 사용하면서도 양질의 서비스를 제공할 수 있는 주행 알고리즘의 개발이 필요하다.

이동로봇이 사용하는 거리센서 중에서 초음파센서는 다른 센서에 비하여 구동원리가 간단하고, 시스템 구성 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 그리고 레이저스캐너나 적외선센서와 같은 광학센서로 측정할 수 없는 환경 (즉, 유리 또는 거울과 같이 빛을 투과시키거나 가스나 먼지 등으로 인해 빛이 산란되는 환경)에서 유효하게 활용될 수 있다. 또한, 조명의 변화에 무관하고, 초음파의 음파가 가지는 지향각 내에서는 사각지대가 존재하지 않기 때문에 책상다리나 같은 얇은 막대를 탐지하는 데에도 유리하다. 그러나 초음파센서는 물체위치에 대한 방향 불확실성이 크며, 거울반사(specular reflection) 현상의 발생으로 인해 정확한 거리의 측정이 어려운 단점이 존재한다[1]. 일반적으로 이동로봇에 사용되는 초음파센서는  $\pm 15^\circ$

정도의 지향각을 가지는 센서를 사용한다. 좁은 지향각을 가지는 초음파센서의 대표적인 예로는 폴라로이드사의 serise600 센서로 많은 연구에 사용되고 있다[2-4]. 그러므로 폴라로이드 초음파센서로 이동로봇의 주변환경을 탐지하기 위해서는 다수의 초음파센서가 필요하다. 이 경우, 센서의 구성이 복잡해지고 구성비용 또한 증가하며, 각 초음파센서에서 발사된 음파간의 간섭(crosstalk) 문제가 발생할 수 있다[5].

본 논문에서는 저가의 이방성 초음파센서(anisotropic ultrasonic sensor)를 이용하여 실용적으로 사용 가능한 장애물 회피방법을 연구하였다. 송신센서 1개와 수신센서 3개의 이방성 초음파센서는 수평방향으로 넓은 지향각을 갖기 때문에 로봇 전방의 넓은 영역을 탐지할 수 있다. 그러나 넓은 지향각의 초음파센서는 장애물의 유무 판단에는 효율적이지만, 장애물의 외형 및 위치정보를 제공하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이방성 초음파센서의 구성을 이용하여 장애물의 위치를 계산하고, 또한 다양한 외형의 장애물을 회피하기 위해 로봇을 중심으로 하는 국부지도를 생성하고 탐지된 장애물의 격자에 확률을 부여하였다. 이렇게 표현된 장애물을 회피 알고리즘에 적용함으로써 이동로봇이 안전하게 장애물을 회피하는 방법을 연구하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II 장에서는 본 연구에서 사용한 이방성 초음파센서의 구성에 대해 설명하고, III 장에서는 장애물의 위치정보를 측정하는 방법에 대해 설명한다. IV 장에서는 확률기반의 국부지도를 장애물 회피에 적용하였으며, V 장에서는 실험을 통해 저가의 초음파센서의 회피성능을 평가하고, 마지막으로 VI 장에서는 결론과 향후 연구과제에 대해 언급한다.

### II. 초음파 센서의 구성

수평방향으로는  $140^\circ$ , 수직방향으로는  $25\sim 30^\circ$ 의 범위로 음파가 방사되는 이방성 초음파센서는 일반 초음파센서보다

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 7. 17., 수정: 2009. 8. 17., 채택확정: 2009. 9. 20.

최윤규: 고려대학교 메카트로닉스학과 석사과정(bazzi83@korea.ac.kr)

최우수: 고려대학교 메카트로닉스학과 석사(dhdpp@korea.ac.kr)

송재복: 고려대학교 기계공학부(jbsong@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부/한국산업기술진흥원의 융복합형 로봇전문 인력 양성사업의 지원으로 “자율지능형 머니플레이션 연구센터”를 통하여 수행되었음.

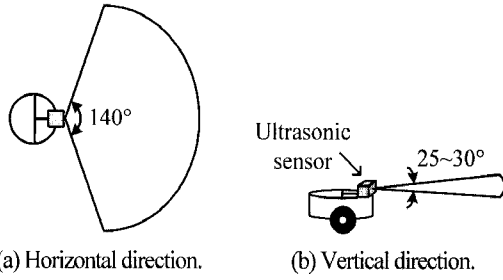


그림 1. 이방성 초음파센서의 음파 방사.

Fig. 1. Ultrasonic emission of anisotropic ultrasonic sensor.

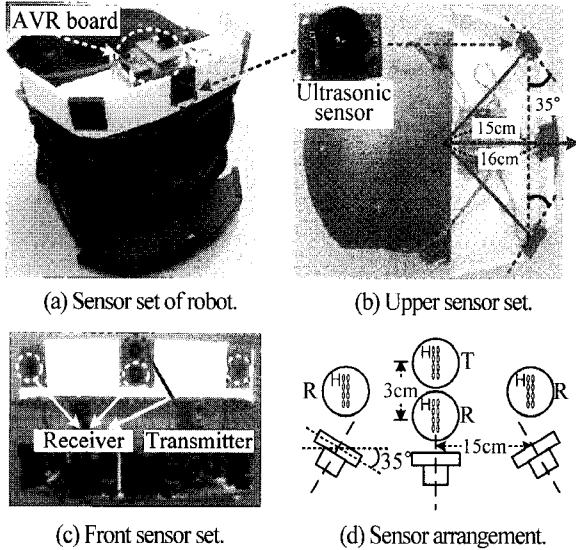


그림 2. 초음파센서 구성.

Fig. 2. Anisotropic ultrasonic sensor configuration.

넓은 수평 지향각을 가지므로 보다 넓은 영역의 탐지가 가능하나, 탐지된 장애물의 위치정확도는 부정확한 단점을 지닌다. 그러므로 이방성 초음파센서는 장애물의 위치 탐지보다는 주로 장애물 유무판단 용도로 사용된다.

본 논문에서는 로봇 전방의 환경을 효과적으로 탐지하기 위해 송신센서 1개와 수신센서 3개의 이방성 초음파센서(tri-aural ultrasonic sensor)를 조합하여 사용한다. 그림 2(a)는 본 연구에서 사용된 이동 플랫폼인 Mobile Robots사의 Pioneer 3DX와 하기소닉사의 이방성 초음파센서(HG-M40AI)이다. 이 초음파센서는 0.25~2.5m의 탐지거리를 가지며, 초음파센서 중에서도 매우 저렴한 편이다. 이방성 초음파센서를 그림 2(b)-(d)와 같이 한 개의 송신센서를 중앙에 배치하고, 중앙 및 양 측면에 수신센서를 배치하였다. 그리고 양 측면의 수신센서는 간섭신호를 방지하기 위해 바깥으로 35° 기울여 배치하였다.

**III. 장애물의 위치측정**

이동로봇의 장애물회피는 회피 알고리즘뿐만 아니라, 센서를 통해 장애물의 위치를 정확히 파악하는 능력에 따라서도 성능이 결정된다. 따라서 센서의 특성을 고려하여 정확한 거리정보를 얻어올 수 있도록 하여야 한다. 초음파센서는 일반적으로 40~50kHz의 주파수로 방사되며, 음파의 속도는 매질과 주변온도에 따라 달라지는 특성을 지닌다. 그리고 초음파

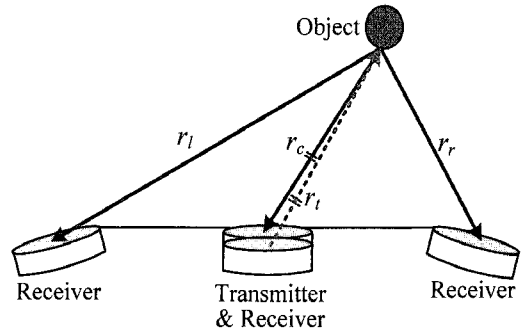


그림 3. 이방성 초음파센서를 사용한 장애물의 거리 측정.

Fig. 3. Distance to reflecting objects in configuration of anisotropic ultrasonic sensors.

센서에서 장애물까지의 거리는 음파의 비행시간(time of flight, TOF)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c = c_0 + 0.6T \tag{1}$$

$$r = \frac{1}{2}ct + e \tag{2}$$

여기서,  $c_0$ 는 공기중의 음파의 전달속도(331m/s)이며,  $T$ 는 공기의 섭씨온도이다.  $r$ 은 장애물까지의 거리이고,  $t$ 는 음파가 방사되어 수신될 때까지의 비행시간이며,  $e$ 는 잡음을 나타낸다. 본 연구에서는 초음파센서가 그림 2와 같이 구성되어 있기 때문에 좌측, 중앙, 그리고 우측의 수신센서는 이를 고려하여 장애물까지의 거리를 측정하여야 한다.

$$c \cdot t_c = r_l + r_c \tag{3}$$

$$r_l = ct_l - r_l + e \tag{4}$$

$$r_r = ct_r - r_l + e \tag{5}$$

여기서,  $r_l$ 는 송신센서로부터 장애물까지의 거리이며,  $r_c$ ,  $r_r$  그리고  $r_r$ 은 장애물로부터 중앙, 좌측 그리고 우측 수신센서까지의 거리이다. 또한,  $t_c$ ,  $t_l$  그리고  $t_r$ 은 중앙, 좌측 그리고 우측의 수신센서에 도달할 때까지의 비행시간이다. 송신센서는 25~30°의 수직방향으로도 음파가 방사되기 때문에 중앙의 수신센서와의 vertical offset은 무시될 수 있다. 그러므로 중앙의 수신센서는 그림 3에서 알 수 있듯이 송신센서로부터 장애물까지의 거리( $r_l$ )와 장애물에서 수신센서의 거리( $r_c$ )는 동일하다. 따라서, 식 (2)를 적용하여 장애물까지의 거리를 얻을 수 있다. 그러나 양 측면의 수신센서는 위치가 다른 중앙의 송신센서로부터 방사된 음파를 수신하기 때문에 좌우측의 수신센서는 왕복거리에서 송신센서부터 장애물까지의 거리( $r_l$ )의 차를 이용하여 식 (4), (5)와 같이 장애물까지의 거리를 구하여야 한다.

초음파센서를 이용하여 장애물까지의 거리는 음파의 전달속도와 시간을 통해 구할 수 있지만, 로봇으로부터 장애물이 존재하는 각도 정보는 알 수 없다. 따라서 본 논문에서는 세 개의 초음파 수신센서에서 얻은 거리정보의 교점을 삼각측량으로 계산하여 장애물의 위치로 인식하고 장애물의 위치각도를 구하였다. 그림 4(a)는 실제 로봇이 탐지 가능한 영역을 나타낸 것으로, 장애물 탐지가 가능한 수신센서에 의해 세 부분으로 구분할 수 있다. 그림 4(b)는 세 개의 수신센서

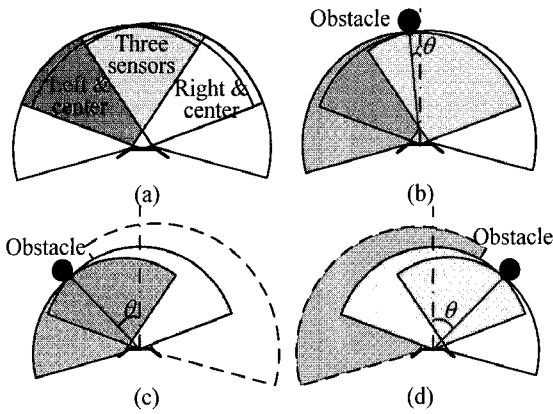


그림 4. 초음파센서의 교점을 이용한 장애물 탐지: (a) 세 부분의 탐지 영역, (b) 세 수신센서를 사용한 탐지, (c) 좌측, 중앙의 수신센서를 사용한 탐지, (d) 우측, 중앙의 수신센서를 사용한 탐지.

Fig. 4. Obstacle detection using the intersection of ultrasonic sensors: (a) three parts of sensing area, (b) obstacle detected by three sensors, (c) obstacle detected by left and center sensors, and (d) obstacle detected by right and center sensors.

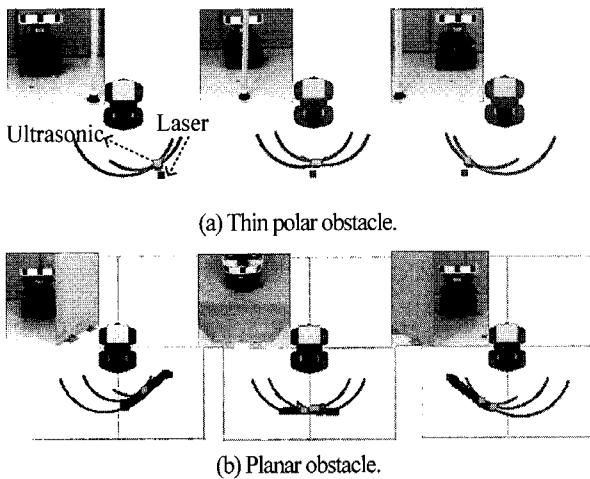


그림 5. 초음파센서와 레이저스캐너의 장애물 측정데이터의 비교.

Fig. 5. Comparison of ultrasonic sensor data with laser scanner data.

표 1. 각 센서로 탐지된 장애물의 위치비교.

Table 1. Comparison of detected object pose.

	Left object	Center object	Right object
Laser	0.73m, 35°	0.63m, 2°	0.74m, -36°
Ultrasonic	0.71m, 35.3°	0.61m, 2°	0.72m, -34.2°

의 교점을 이용하여 장애물을 탐지한 그림이고, 그림 4(c)와 (d)는 각각 좌우측의 수신센서와 중앙의 수신센서의 교점을 이용하여 장애물을 탐지한 그림으로 로봇과 장애물 사이의 각도를 쉽게 구할 수 있다.

이방성 초음파센서를 이용하여 탐지된 장애물의 위치 정확도를 측정하기 위해 그림 5와 같이 다른 형태의 장애물을 레이저 스캐너를 사용하여 탐지한 결과와 비교하였다. 앞서 언급하였듯이, 이방성 초음파센서는 수신센서의 교점으로 장애물을 점으로 표현하게 된다. 그림 5(a)와 같은 얇은 봉의

장애물은 점으로 표현이 가능하므로, 표 1의 결과와 같이 레이저스캐너의 측정 결과에 비하여  $\pm 2\text{cm}$ ,  $\pm 2^\circ$  내외의 거리 및 각도 오차를 가져 성능이 비교적 우수하였다. 그림 5(b)와 같이 넓은 평판의 장애물은 레이저의 경우 장애물의 형상 등을 표현할 수 있으나, 이방성 초음파센서의 경우 모든 장애물을 단지 한 점으로 표현되기 때문에 장애물의 외형 전부를 표현할 수 없었다. 위 결과에서 알 수 있듯이, 이방성 초음파센서는 책상 다리와 같은 얇은 봉의 장애물 탐지에는 비교적 정확한 위치정보를 제공하나, 넓은 면적을 갖는 장애물에 대해서는 정확한 위치와 외형을 파악하기 어렵다. 따라서 넓은 외형을 가지는 장애물을 회피할 때에는, 센서에 의해 감지된 점 이외의 부분에 대해서는 장애물이 없는 것으로 판단되어 잦은 충돌이 발생할 수 있으므로 이러한 문제점을 보완하기 위해 확률 기반의 국부지도의 사용을 제안한다.

IV. 확률 기반의 국부지도를 이용한 장애물 회피

1. 확률 기반의 국부지도를 이용한 장애물 표현

이동로봇이 주변에 존재하는 장애물을 탐지하고 회피하기 위해서는 로봇 주변의 환경을 잘 인식할 수 있어야 한다. 초음파센서의 음파는 호의 형태로 방사되기 때문에 호 전체를 장애물로 판단하는 방법과, III 장에서 제안한 수신센서들의 교점으로 장애물을 판단하는 방법이 있다. 전자의 경우, 장애물이 로봇과 근접해 있을 때에는 장애물의 형태에 상관없이 로봇 전방이 장애물로 판단되기 때문에 로봇이 전진할 수 없는 문제점이 발생한다. 후자의 경우, 책상다리와 같은 얇은 장애물은 안전한 회피가 가능하나, 넓은 면적을 갖는 장애물에서는 충돌이 발생하였다. 따라서 로봇이 주변환경을 인지하고, 충돌 없이 장애물을 회피하기 위해 다음의 방법을 제안한다.

로봇이 이동하며 이방성 초음파센서로 탐지한 장애물을 여러 번 측정하여 얻은 교점들을 수집하면, 장애물의 대략적인 외형과 주변환경을 추정할 수 있다. 그림 6은 로봇이 약 50cm 이동하였을 때, 수신센서를 통해 생성된 교점을 수집하여 로봇의 주변환경을 모델링한 것이다.

그러나 수집된 교점 중에는 잘못된 측정, 또는 이전 시간에 동적 장애물을 탐지하여 생성되었지만 현재에는 존재하지 않는 교점 등이 존재할 수 있다. 이러한 교점의 불확실성을 고려하여 수집된 교점에 각각 확률을 부여하였다.

본 논문에서는 격자지도를 작성하는 데 사용하는 기법[6]의 사용으로 장애물을 표현하여 회피 알고리즘에 적용하였다. 장애물의 표현은 먼저 로봇을 중심으로 국부지도를 생성하고, 초음파 탐지영역의 격자를 베이지안 갱신방법(bayesian

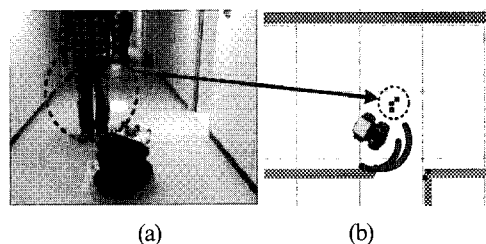


그림 6. 환경 모델링: (a) 주변환경, (b) 수집된 교점들.  
Fig. 6. Environment modeling: (a) environment, and (b) collected intersection points.

update formula)에 적용하여 확률갱신을 수행하였다. 시간  $t_0$ 에서  $i$ 까지 로봇의 위치상태( $x_{0:t}$ )와 장애물까지의 거리정보( $z_{0:t}$ )가 주어져 있을 때, 국부지도의  $i$ 번째 격자  $m_i$ 가 점유되어 있을 확률은 다음 식으로 계산할 수 있다. 이 때, 확률계산 시간을 줄여 실시간 장애물회피가 가능하도록 국부지도의 크기는  $3m \times 3m$ 로 정의하였다.

$$p(m_i | x_{0:t}, z_{0:t}) = \frac{p(m_i | x_{0:t-1}, z_{0:t-1})p(m_i | x_t, z_t)}{[1 - p(m_i | x_{0:t-1}, z_{0:t-1})][1 - p(m_i | x_t, z_t)]} \quad (6)$$

현재  $t$ 에서 격자  $m_i$ 가 가지는 확률은 이전의 상태에 의해 격자가 가지고 있는 확률  $p(m_i | x_{0:t-1}, z_{0:t-1})$ 과 현재 측정값에 의해 격자가 점유되어 있을 확률  $p(m_i | x_t, z_t)$ 의 관계를 통해 얻어진다. 이때, 현재 로봇의 위치상태와 측정값을 통한 격자의 점유확률은 역센서 모델(inverse sensor model)로 계산할 수 있다. 역센서 모델은 위치추정 등에서 로봇의 위치와 지도가 주어졌을 때 측정값의 확률을 결정하는 센서모델  $p(z_t | x_t, m)$ 과는 반대 개념이며, 역센서 모델을 정의하는 이유는 센서로부터 얻은 장애물의 위치정보는 센서가 가지는 불확실성에 의해 실제 장애물의 위치와 차이가 있을 수 있기 때문이다. 예를 들어, 초음파센서를 통해 장애물까지 1m의 거리정보( $z_t$ )를 얻었다면, 실제 장애물은 1m 거리의 격자에 존재할 확률이 가장 높지만 센서가 가지는 오차에 의해 실제 장애물은 0.9m 또는 1.1m 거리 등 1m 거리 주변의 격자에 존재할 수도 있다. 특히, 본 논문에서는 수신센서의 교점을 이용하므로 거리 및 각도에 대한 오차가 더욱 커질 수 있기 때문에 오차에 대한 모델링이 필요하다. 따라서 초음파센서가 가지는 지향각  $p(\theta)$ 과 거리정보  $p(r)$ 를 고려하여 다음의 식과 같이 역센서 모델을 정의하였으며, 이는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(m_i | x_t, z_t) = p(\theta) \cdot p(r) \quad (7)$$

$$p(\theta) = \begin{cases} p_{min} & (0 \leq \theta_i < \theta_t - \epsilon_\theta, \theta_i > \theta_t + \epsilon_\theta) \\ (1 - ((\theta_i - \theta_t) / \epsilon_\theta)^2) \cdot p_{init} & (\theta_t - \epsilon_\theta \leq \theta_i \leq \theta_t + \epsilon_\theta) \end{cases} \quad (8)$$

$$p(r) = \begin{cases} p_{min} & (0 \leq r_i < z_t - \epsilon_r) \\ p_{min} + \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(r_i - z_t)^2}{2\sigma^2}\right) & (z_t - \epsilon_r \leq r_i < z_t + \epsilon_r) \end{cases} \quad (9)$$

여기서,  $p_{init}$ ,  $p_{min}$ 은 국부지도가 가지는 초기확률(0.5)과 최소확률(0.2)이다. 또한,  $z_t$ 와  $\theta_t$ 는 장애물로 표현된 교점이 로봇으로부터 위치한 격자의 거리 및 각도 정보이며,  $r_t$ 와  $\theta_t$ 는  $i$ 번째 격자가 로봇으로부터 위치한 거리 및 각도 정보이다.  $\epsilon_r$ 은 초음파 탐지영역의 empty region과 occupied region을 결정해 주며,  $\epsilon_r$ 에 따라  $\sigma$ 를 설정하여 occupied region의 폭을 설정해 주었다.  $\epsilon_\theta$ 는 초음파센서의 지향각 내에서 확률 갱신할 각도범위를 정해준다. 거리정보에 대한 확률모델은 empty region에서는 일정 확률이 균등(uniform distribution)하게 분포하지만, 장애물을 탐지하였다고 판단되는 occupied region에서는 가우시안 분포(gaussian distribution)의 확률을 식 (9)와 같이 부여하여 그림 7(a)와 같이 나타내었다. 지향각을 고려한 확률모델에서는 장애물이라 간주되는 해당격자 주변의 격자가 가지

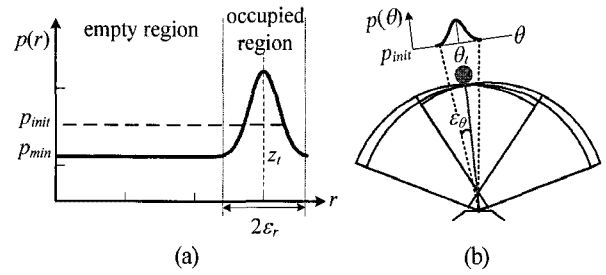
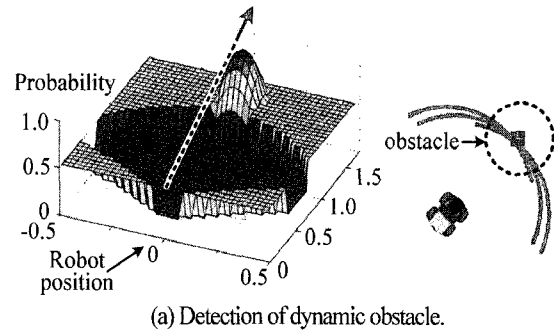
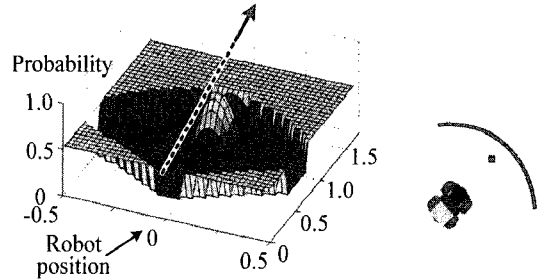


그림 7. 국부지도 작성에 사용되는 역센서모델: (a) 거리에 대한 확률분포, (b) 각도에 대한 확률분포.

Fig. 7. Inverse sensor model: (a) probability distribution for range data, and (b) probability distribution for angle data.



(a) Detection of dynamic obstacle.



(b) Initialization of probably map over time.

그림 8. 확률 기반의 국부지도에 의한 장애물의 표현.

Fig. 8. Obstacle modeling based probability map.

는 확률을 식 (8)을 사용하여 그림 7(b)와 같이 나타내었다.

초음파센서의 지향각 내의 격자들은 식 (6)에 의해 확률이 갱신되어, 실제 장애물이 존재하는 격자에 대해서는 지속적인 탐지가 이루어져 높은 확률이 부여된다. 본 논문에서는 생성된 국부지도에서 초기 확률보다 큰 점유확률을 가지는 격자를 장애물로 간주하여 표현하였다.

그림 8(a)는 1.5m 거리의 동적 장애물을 탐지하였을 때 생성된 국부지도와 그 결과 얻어진 장애물을 표현하였다. 역센서 모델에 의해 네 개의 격자는 초기 확률인 0.5보다 큰 값을 가져 장애물로 표현되었다. 로봇이 0.5m를 이동하여 시간이 경과한 경우, 동적 장애물이 사라져 그림 8(b)와 같이 수신센서는 교점을 생성하지 못하게 된다. 국부지도는 베이시안 갱신방법이 적용되어 탐지영역 내의 격자들이 가지는 확률은 감소하여 결국 하나의 격자만 장애물로 표현되었다.

## 2. 확률 기반의 국부지도를 이용한 장애물 회피

확률기반의 국부지도의 사용을 통해 표현된 장애물은 장애물회피 알고리즘에 적용된다. 본 논문에서는 장애물회피 알고리즘으로 DWA (Dynamic Window Approach)를 사용하였다

[4]. DWA는 로봇이 움직일 수 있는 속도영역에서 로봇과 충돌하는 장애물을 회피하면서 목표점으로 이동하는 방법이다. 로봇의 현재 속도를 기준으로 단위 시간 동안 최고 가속도에 의해 변화될 수 있는 속도영역 내에서 아래의 식의 결과가 최대가 되는 선속도와 각속도를 선택하며 수행한다.

$$w^* = \alpha_{head} \cdot w_{head} + \alpha_{speed} \cdot w_{speed} + \alpha_{clear} \cdot w_{clear} \quad (10)$$

여기서,  $\alpha$ 는 각 함수의 가중치를 나타내며,  $w_{head}$ 는 로봇의 방향정보로 로봇이 목표점을 향할 때 큰 값을 가지며,  $w_{speed}$ 는 로봇의 속도정보로 로봇의 속도가 증가할수록 커진다. 그리고  $w_{clear}$ 는 주변 장애물이 고려된 정보로 장애물과 충돌을 예상하여 회피할 수 있는 속도에서 큰 값을 가진다. 본 논문에서 제안한 국부지도의 사용으로 표현된 장애물은  $w_{clear}$ 에 영향을 주게 된다. 목적함수( $w^*$ )가 최대가 되는 속도를 로봇이 선택함으로써 목표점으로 빠르고, 안정적으로 움직이게 된다. 한편, 제안된 방법으로 국부지도를 생성하고, 장애물 회피 알고리즘에 적용하는 데 소요된 시간은 약 25ms로 실시간 적용이 가능하였다.

**V. 실험 및 고찰**

**1. Wandering**

저가의 이방성 초음파센서를 사용하여 장애물의 회피 성능을 파악하기 위해서 wandering 기법을 사용하였다. Wandering은 일정한 공간에서 목적지 없이 임의로 주행하다가 장애물을 탐지하는 순간에 로봇의 행동을 결정하여 이동하는 기법으로, 센서의 특성을 가장 잘 반영하기 때문에 다른 센서를 사용한 장애물 회피와 비교를 쉽게 할 수 있다. 본 실험에서는 이방성 초음파센서의 장애물 회피 성능을 파악하기 위해 고가의 적외선 스캐너와 이방성 초음파센서보다 비싼 폴라로이드 초음파센서와 각각 비교하였다. 적외선 스캐너는 주변 환경을 1.8°의 간격으로 스캔할 수 있어서 장애물을 많은 점으로 표현할 수 있으며, 폴라로이드 초음파 센서는 측정된 거리를 중심으로 지향각이 ±15°의 호 형태로 표현된다. 이방성 초음파 센서는 본 논문에서 제안한 방법인 수신센서들의 교점을 확률 기반의 국부지도에 적용하여 장애물을 표현하였다.

실험은 4m × 6.5m의 공간에서 60cm × 80cm의 평판을 장애물로 사용한 환경과 지름 4cm의 원형막대와 지름 30cm의 휴지통을 장애물로 사용한 환경에서 각각 비교하였다.

장애물 회피의 성공은 로봇이 장애물을 탐지하고 회피를

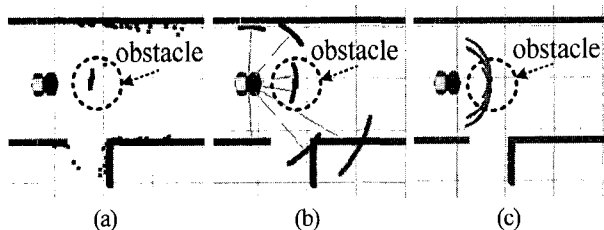
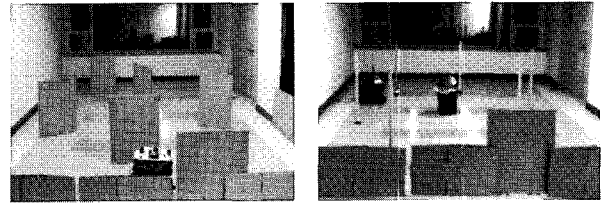


그림 9. 탐지된 장애물의 표현: (a) 적외선스캐너, (b) 8개의 폴라로이드 초음파센서, (c) 이방성 초음파센서.

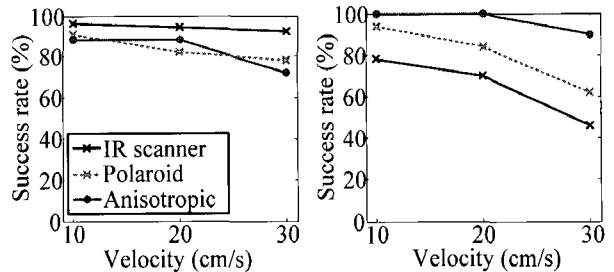
Fig. 9. Detected obstacles: (a) IR scanner, (b) 8 Polaroid ultrasonic sensors, and (c) anisotropic ultrasonic sensors.



(a) Planar obstacles. (b) Obstacles of slender rods.

그림 10. 실험 환경.

Fig. 10. Experimental environments.



(a) Planar obstacles. (b) Obstacles of slender rods.

그림 11. 회피 성공률.

Fig. 11. Success rate of obstacle avoidance.

시도하였을 때, 장애물과 충돌하지 않고 성공적으로 회피한 경우로 정의하였다. 그림 11은 장애물 회피 성공률에 대한 그래프로, 로봇이 장애물을 탐지하고 회피 시도를 50번하였을 때 성공한 횟수를 세어 성공률을 계산한 것이다. 적외선 스캐너는 넓은 평판과 같은 장애물의 외형 표현이 가능하여 다른 거리센서에 비해 회피 성공률이 높았지만, 책상 다리와 같은 얇은 장애물은 스캔 간격으로 생기는 사각지대로 인해 회피 성공률은 가장 낮았다. 8개의 폴라로이드 초음파 센서를 사용하였을 때는 평판과 얇은 장애물 모두 비교적 높은 성공률을 얻었으며, 이방성 초음파 센서는 넓은 영역 안의 장애물을 점으로 표현하기 때문에 얇은 장애물의 회피에 매우 높은 성공률을 얻었다. 또한, 평판과 같은 장애물의 회피에서도 확률 기반의 국부지도의 사용으로 성능이 다른 고가의 센서에 비해 성능이 많이 저하되지는 않았다.

**2. 전역 DWA**

이방성 초음파센서를 사용하여 장애물을 효과적으로 회피하며, 원하는 목표점까지 주행할 수 있는지를 파악하기 위해 전역 DWA를 구현하였다. 전역 DWA는 최적의 경로를 계획하는 구배법(gradient method)에 의해 생성된 경로를 바탕으로 경유점(waypoint)을 설정하고, 각 경유점 사이를 로봇이 움직일 수 있는 속도 영역에서 속도를 결정하며, 장애물을 회피하는 DWA를 사용하여 주행함으로써 국부 최소를 회피하며 목표점까지 주행하는 기법이다[7]. 본 실험에서는 이동로봇이 목적지에 정확히 도착하는지를 판단하기 위해 이동 플랫폼에 추가적으로 장착한 적외선센서를 사용하여 MCL기법의 위치추정을 수행함으로써 로봇은 자신의 위치를 알고 있다고 가정하였다[6].

실험환경은 20m × 11m의 공간으로, 로봇을 최대 30cm/s의 속도로 주행하게 하였다. 구배법에 의해 생성된 로봇의 경로는 실선으로 표현하였으며, 이동로봇의 궤적은 점선으로 표

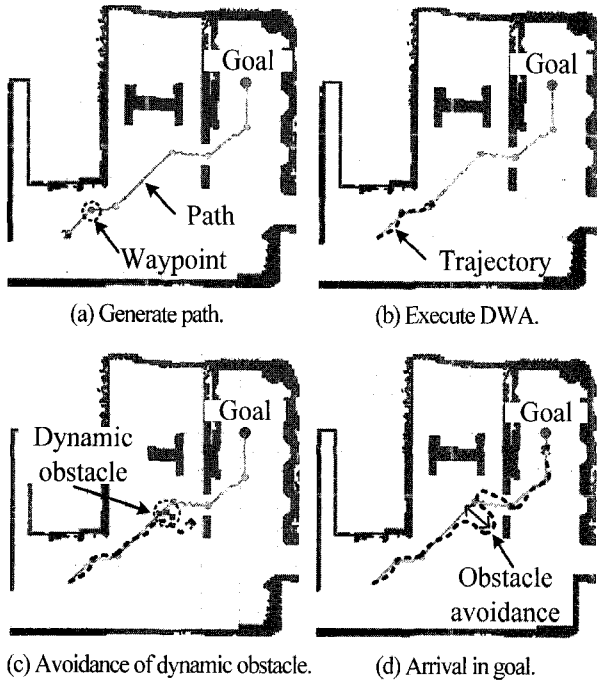


그림 12. 전역 DWA.  
Fig. 12. Global DWA.

현하였다. 그림 12(c)는 이동로봇이 동적 장애물이 존재하는 상황에서도 부드럽게 회피하는 것을 보여주며, 그림 12(d)는 이동로봇이 동적 및 정적 장애물을 회피하여 성공적으로 최종 목적지에 도착한 것을 보여준다.

**VI. 결론**

본 논문에서는 저가의 이방성 초음파센서를 사용하여 로봇이 장애물을 회피하는 방법을 개발하였다. 1개의 송신센서와 3개의 수신센서만으로 장애물까지의 거리를 측정하고, 수신센서에서 얻어지는 호의 교점으로부터 장애물의 위치를 추정하였다. 이 방식은 가는 장애물에는 잘 적용되지만, 넓은 장애물도 단지 하나의 점으로만 표시하여 장애물 회피가 실패하는 원인이 되었다. 이를 보완하기 위해 지도작성에 사용하는 확률 이론을 장애물 회피에 적용하여 장애물 회피 성능을 상당히 향상시킬 수 있었다. 또한, 다른 고가센서와의 비교 실험을 통해서 저가의 이방성 초음파센서로도 실용적으로 사용이 가능한 장애물 회피 성능을 얻을 수 있었다.

본 연구에 사용한 이방성 초음파센서는 짧은 유효거리와 넓은 지향각으로 인해 위치추정 및 지도작성에는 어려움이 존재한다. 따라서 추후에는 저가의 적외선센서 등의 융합을 통해 저가 센서 기반의 주행 기술을 개발하도록 할 예정이다.

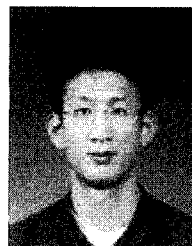
**참고문헌**

- [1] E. Lawrence, R. Austin, B. Alan, and V. James, "Fundamentals of Acoustics," New York: Wiley, 2000.
- [2] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram - Fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, Jun. 1991.
- [3] R. Simmons, "The curvature-velocity method for local obstacle avoidance," *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 3375-3382, Apr. 1996.
- [4] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 23-33, 1997.
- [5] J. Borenstein and Y. Koren, "Error eliminating rapid ultrasonic firing for mobile robots obstacle avoidance," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 1, pp. 132-138, Feb. 1995.
- [6] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, "Probabilistic Robotics," The MIT Press, London, 2005.
- [7] O. Brock and O. Khatib, "High-speed navigation using the global dynamic window approach," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 341-346, May 1999.



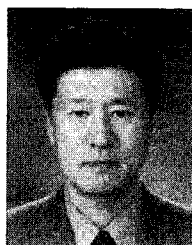
**최윤규**

2008년 고려대학교 컴퓨터정보학과(이학사). 2008년~현재 고려대학교 메카트로닉스학과 석사과정 재학중. 관심분야는 이동로봇의 자율주행.



**최우수**

2007년 고려대학교 제어계측공학부(공학사). 2009년 고려대학교 메카트로닉스학과 석사(공학석사). 2009년~현재 LG전자에서 근무 중. 관심분야는 이동로봇.



**송재복**

1983년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 Design and Control of Safe Manipulators, Mobile Robotics, Haptics.