

초음파센서 배열을 이용한 이동로봇의 지도작성

°범희락, 조형석
한국과학기술원 정밀공학과

Mobile Robot Map Making using Ultrasonic Sensor Array

°Hee Rak Beom and Hyung Suck Cho
Dept. of Precision Engineering and Mechatronics, KAIST

ABSTRACT

This paper describes a method of producing maps of an indoor environment with an autonomous mobile robot equipped with sonar array. This method uses the certainty grid suitable for accommodation of inaccurate sensor data and real-time navigation. Each grid contains a certainty value that indicates the measure of confidence that an obstacle exists within the grid area. The scheduled firing method is used to eliminate the crosstalk between ultrasonic sensors. The effectiveness of the method is verified by a series of experiments.

1. 서론

이동 로봇에 사용되는 센서로는 크게 internal sensor와 external sensor로 분류할 수 있다. Internal sensor는 이동 로봇의 운동 즉 이동량, 속도, 가속도만을 이용하여 로봇의 위치를 알아 내는 것으로서 엔코더, 타코메터, 가속도계, 자이로스코프등이 있다. 이러한 센서는 로봇의 위치 추정을 위한 것으로서 로봇의 주행 거리가 커지면 오차가 누적되는 단점이 있다. 또한 미끄러짐이 발생하는 경우 커다란 오차를 유발하게 된다. External sensor는 주위 환경에 대하여 로봇의 위치를 상대적으로 측정하여 절대 좌표상에서의 로봇의 위치를 인식하는데 사용될 뿐만 아니라 이동로봇의 주위환경을 인식하는 곳에 사용된다. 이러한 센서에는 카메라, 초음파, 레이저, 광학센서등이 이에 속한다. 이동 로봇이 불확실한 환경하에서 장애물을 회피하면서 목적지에 도달한 후 주어진 작업을 수행하기 위해서는 장애물에 대한 거리 정보를 필요로 한다. 이를 바탕으로 이동로봇이 안전하게 이동할 수 있는 지점들이 새로이 재계획된다. 장애물을 회피하는데 필요한 정보는 형상 인식 분야에서 필요로 하는 상세한 정보를 요구하지는 않는다. 장애물의 위치를 실시간으로 인식하기 위하여 시각 센서(1), 초음파 센서,

레이저 센서(2)와 근접센서(3)등이 많이 쓰인다. 시각 센서는 처리시간이 길다는 단점을 지니고 있다. 그리하여 이동 로봇이 주행하는 환경에 대한 사전정보를 이용하여 대응문제(correspondence problem)의 복잡성을 해결하고 있다. 레이저 센서는 초음파 센서와 같이 T.O.F. (time of flight)방식으로서 장애물까지의 거리를 구한다. 그러나 이방식은 정교한 timing circuit를 필요로 하기 때문에 매우 고가이다. 그리하여 레이저 source와 시각센서를 동시에 사용하여 장애물의 위치정보를 얻는데 많이 사용된다. 근접센서는 초음파 센서에 비하여 angular resolution이 좋다는 장점을 지니고 있으나 미리 설정된 거리내에 존재하는 장애물의 유무만을 알 수 있다는 단점을 지니고 있다. 이동 로봇은 주로 열악한 환경에 사용되는 경우가 많으므로 위와 같은 센서들은 주어진 환경에 따라 사용이 불가피한 경우가 발생할 수도 있다. 본 연구에서 초음파 센서는 가격이 저렴하면서도 실시간으로 장애물의 위치를 알아 낼수 있기 때문에 충돌회피를 위한 장애물 감지용 센서로서 사용될 것이다. 초음파 센서는 전반사(specularity)에 의하여 반사파 신호(echo signal)를 감지할 수 없는 경우가 생길 수 있으며, angular resolution이 좋지 않다는 단점을 지니고 있다. 본 연구에서는 초음파 거리 감지기를 제작하고 전 반사 문제와 angular resolution 문제에 의한 초음파 센서의 단점들을 개선하고자 한다. 이를 위하여 장애물의 존재 가능성이 높은 정도를 표시하는 certainty grid방법을 사용하고 certainty value들로 부터 실제 장애물의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 이와 같이 추정된 장애물의 위치에 대한 정보들은 이동 로봇의 충돌회피에 직접 사용될 것이다.

2. 초음파 거리 감지기

초음파 거리 감지기는 크게 트랜스듀서와 트랜스듀서를 구동하기 위한 전기적인 module로 이루어져 있다.

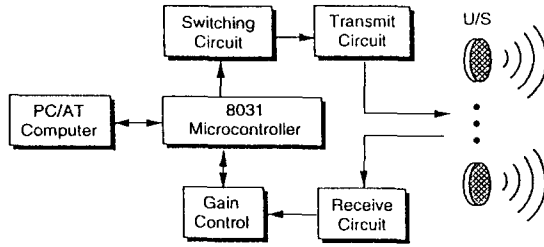


Fig. 1 The block diagram of the ultrasonic range finder.

진기적인 module은 그림 1에서 보는 바와 같이 전송신호를 발생시키는 transmit module과 반사파를 받아들이는 receiver module, 반사파를 증폭시키는 gain control module, 그리고 임의의 센서를 선택하여 구동시키는 switching module로 구성되어 있다. 이러한 module들은 마이크로프로세서와 상위의 PC/AT에 의해 제어 된다. 트랜스듀서로부터 물체까지의 거리는 음속과 전송된 초음파가 다시 트랜스듀서로 되돌아 올 때까지의 시간에 의하여 구해진다. 본 연구에서 사용되는 초음파 거리 감지기는 0.26m에서 10.7m까지의 거리를 감지할 수 있다. 초음파 신호의 거리에 따른 신호의 손실을 보상하기 위하여 증폭기의 이득을 시간에 따라 증가시켜야 한다. 또한 거리 감지 시스템이 noise pick-up을 반사파로 잘못 인식하는 것을 방지하기 위하여 반사파에 적분기를 사용한다. 그리하여 적분기의 출력값이 미리 설정된 threshold 값에 도달하게 되면 반사파가 들어 온 것으로 간주하게 된다.

트랜스듀서

트랜스듀서는 매우 얇은 kapton-film으로 되어 있으며 film은 음전극을 형성해 주기 위하여 금도금한 diaphragm vacuum으로 되어 있다. 양전극은 diaphragm이 공진할 수 있도록 주조된 알루미늄 backplate로 되어 있다(4). 트랜스듀서의 직경은 4cm이며 무게는 8g으로 매우 가볍다. 초음파 거리 감지기는 150volt의 DC바이어스로 된 300volt peak-to-peak의 전압을 트랜스듀서에 가함으로서 트랜스듀서는 49.41kHz의 초음파를 낸다.

Echo Signal

초음파 거리감지기의 성능은 트랜스듀서의 성능과 동작 주파수, 측정거리의 범위에 따라 달라진다. 트랜스듀서의 성능은 트랜스듀서의 크기, beamwidth와 동작 주파수에 따라 달라진다. 트랜스듀서의 radiation 특성을 해석하기 위하여 트랜스듀서를 무한히 큰 방음판에 고정되어 있다고 가정한다. 트랜스듀서의 형상은 그림 2에서 보는 바와 같이 납작한 원형의 피스톤으로 가정한다. 트랜스듀서의 중심축에 대하여 각 θ_α 의 방향으로 반사파가 들어 올 때 반경 a인 트랜스듀서에 입사되는 반사파의 음

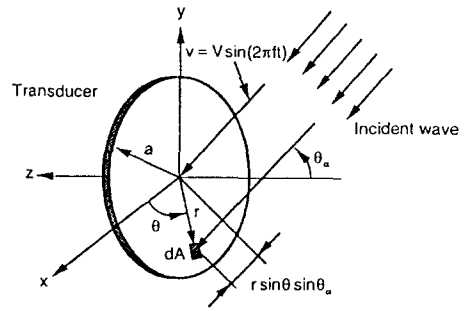


Fig. 2 The piston type transducer.

압(sound pressure) $P(\theta_\alpha)$ 과 음파가 트랜스듀서의 중심축과 일치하여 들어오는 경우($\theta_\alpha = 0$)의 음압 P_m 와의 비로부터 트랜스듀서의 beamwidth를 구할 수 있다. 트랜스듀서의 beamwidth는 radiation pattern이 $\theta_\alpha = 0$ 일 때의 magnitude보다 3dB 낮은 곳까지의 각으로 정의된다. 그리하여 트랜스듀서의 beamwidth를 구하기 위하여 $P/P_m = -3dB = 1/\sqrt{2}$ 이라 하고 Bessel's function을 3항까지만 전개한 후 근사적인 해를 구하면 $h \sin \theta_\alpha = 1.62$ 이 된다. 여기서 h 는 $2\pi/\lambda_\alpha$ 이며 이는 wave number를 나타낸다. θ_α 는 중심축으로부터 -3dB되는 곳까지의 각으로서 half beamwidth라 한다. 따라서 3dB full beamwidth Ω 는

$$\Omega = 2\theta_\alpha = 2 \sin^{-1}(1.62/\lambda_\alpha a) \quad (1)$$

이 된다. 환경을 구성하고 있는 요소들은 크게 초음파를 반사시키는 물체, 산란시키는 물체와 흡수하는 물체로 분류할 수 있다. 초음파를 반사시키는 물체는 입사각과 반사각이 동일하고 물체의 최소 크기(minimum dimension)가 초음파의 파장보다 큰 경우이며 이러한 물체는 평면파를 발생시킨다. 이에 속하는 물체의 대표적인 형상은 wall이며 산란시키는 물체는 물체의 dimension이 초음파의 파장보다 작은 경우의 물체이며 이러한 물체는 cylindrical wave나 spherical wave를 발생시킨다(7)(8). 이에 속하는 물체의 형상은 edge나 cone 이다.

Threshold값 및 센서배열

거리 감지기의 증폭기의 이득은 시간에 따라 증가시켜주어야만 공기중에서의 감쇄에 의한 신호의 손실을 보상해 줄 수 있다. 또한 echo signal을 감지하기 위하여 거리 감지기의 threshold값을 결정해 주는 것이 필요하다. Threshold값에 따라 초음파 거리 감지기가 트랜스듀서의 중심축에 대하여 경사지게 놓인 물체를 감지할 수 있는 영역은 달라진다. 즉 threshold값을 작게 하였을 경우에 초음파 센서의 중심축에 대하여 많이 기울어진 물체도 감지할 수 있는 반면 noise pick-up에 대한

sensitivity 도 증가한다. Threshold값을 크게 하였을 경우에 noise pick-up에 대한 영향은 줄일 수 있으나 경 사진 물체에 대한 측정 범위는 매우 좁아지게 된다.

본 연구에서는 이동 로봇 전방에 놓여 있는 장애물의 위치를 감지할 수 있도록 하기 위하여 이동 로봇의 전면에 일정한 간격으로 초음파 센서를 배치하였다. 서로 근접한 센서 사이의 각 θ 는 11.25° 로 되어 있으며 센서는 낮은 장애물 까지도 감지할 수 있도록 3가지의 높이로 배열되어 있다. 초음파 센서를 사용하여 장애물의 위치를 감지하기 위한 방법으로 이동 로봇 몸체에 ring형상으로 배열하는 경우와 몇개의 초음파 센서를 DC 모터를 사용하여 scanning하는 경우로 나누어진다. 본 연구에서는 scanning 하는데 걸리는 시간을 최소화 하기 위하여 이동 로봇 전면에 ring형상으로 배열하였다. 위와 같이 배열된 센서는 이동 로봇의 전방에 있는 물체를 감지할 수 있으며 센서가 감지할 수 있는 영역을 기하학적으로 도시하면 그림 3과 같다. 그림 3은 threshold값에 해당하는 beamwidth angle θ_T 를 9° 로 하였을 때의 감지 영역을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 ring 형상으로 배열한 센서들이 장애물을 감지할 수 없는 dead zone이 발생하지 않도록 하기 위하여 본 연구에서는 θ_T 가 9.0° 되도록 threshold 값을 설정해 주었다.

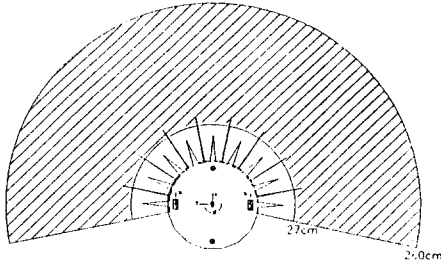


Fig. 3 Scanning area when $\theta_T = 9.0^\circ$.

3. 초음파 노이즈 및 crosstalk

동작환경에서 발생하는 초음파 노이즈

이러한 종류의 노이즈는 초음파센서가 사용되는 환경에 machine tool이나 고압의 공기를 분출하는 장치가 존재할 때 발생한다. 이러한 형태의 노이즈는 연속적이며 그 강도가 매우 강하기 때문에 초음파센서를 사용할 수 없다.

다른 초음파센서로부터 발생하는 노이즈

이러한 종류의 노이즈는 동작환경내에 동일한 주파수를 가진 초음파센서를 장착한 로봇이 여러대 존재하는 경우에 발생한다. 이러한 형태의 노이즈는 비연속적이기 때문에 같은 위치에서 연속적으로 거리를 측정하여 오차가 큰 값을 제거함으로써 해결할 수 있다.

Crosstalk 현상

이것은 동일한 전기적인 module로 여러개의 초음파센서를 구동할 때 발생한다. 즉 어떤 센서에서 발사된 초음파의 반사파가 다른 센서에서 감지되는 경우이다. 이러한 현상은 초음파 센서들을 서로 가깝게 배치하는 경우나 장애물의 형상과 장애물의 배치상태에 따라 발생할 수 있다. 많은 사람들은 crosstalk 현상을 해결하기 위하여 센서에서 발사된 초음파의 반사파가 다른 센서에서 감지 못할 만큼 충분히 기다린 다음에 센서를 동작시키는 방법을 채택하고 있다. 그러나 이방법은 장애물을 감지하는데 너무 많은 시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 장애물이 감지되는 즉시 다른 센서를 동작시키는 방법을 이용하고 있다. 따라서 장애물이 센서 가까이 존재하면 할수록 감지 시간은 짧아진다. 그리하여 배열된 하나의 센서를 동작시키는데 걸리는 최소 감지 시간 T_{min}^s 는 $T_{min}^s = 2d_{min}/v_s = 1.6msec$ 가 되고 최대 감지 시간 T_{max}^s 는 $T_{max}^s = 2d_{max}/v_s = 10.5msec$ 가 된다. 따라서 배열되어 있는 18개의 센서를 모두 동작시키는데 걸리는 최소 최대 감지시간은 189msec와 28.8msec가 소요된다. 여기서 초음파 센서의 최소 감지 거리 d_{min} 는 0.27m로 하였으며 최대 감지거리 d_{max} 는 1.8m로 제한하였다. 그러나 그림 4(a)에서와 같이 센서 S_1 을 동작시킨후 즉시 인접한 센서 S_2 와 S_3 을 동작시키는 경우에 crosstalk현상이 발생할 수 있다. 그리하여 이동로봇의 전면에 부착된 센서들의 동작 순서를 그림 4(b)와 같이 미리 scheduling하여 동작시킴으로써 crosstalk현상을 방지한다.

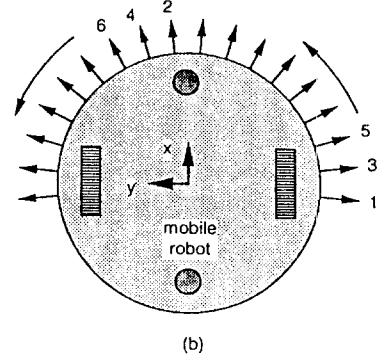
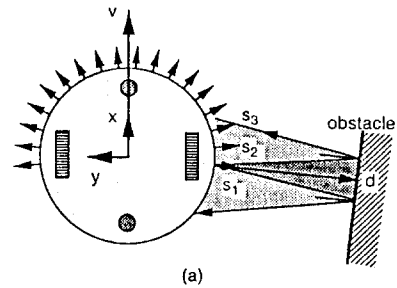


Fig. 4 The crosstalk and the scheduled firing.

이동 로봇 운동의 영향

실제로 장애물 감지는 이동로봇이 움직이면서 행해 지므로 센서에서 발사된 초음파의 반사파가 들어 오지 못하는 경우가 발생한다. 이동로봇이 직선운동을 하는 경우와 제자리에서 회전운동을 하는 경우에 발사된 초음파의 반사파를 감지하기 위해서는 각각 다음과 같은 조건들을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} v_{\max} &\leq \frac{2d_{\max} \tan \theta_T}{T_{\max}^s} \\ v_{\max} &\leq \frac{\theta_T R}{T_{\max}^s} \end{aligned} \quad (2)$$

실험실에서 제작한 이동로봇 중심에서의 최대 선속도 v_{\max} 는 0.35m/sec 이고 로봇의 반경은 0.3m이므로 항상 위의 조건을 만족한다. 따라서 초음파센서는 이동로봇의 운동에 관계없이 반사파를 감지할 수 있다. 또한 이동로봇의 속도는 초음파의 속도에 비하여 매우 작으므로 속도에 의한 장애물까지의 거리는 보상하지 않고 그대로 사용한다.

4. 센서 data integration

Certainty grid에 의한 방법

초음파 센서는 센서의 uncertainty나 노이즈 때문에 장애물의 위치를 감지하는데 동일한 위치에서 연속적으로 측정된 후 그중에서 편차가 큰 값은 제외하고 유사한값들을 이용하여 장애물의 위치를 추정하고 있다. 또한 초음파 센서는 angular resolution 이 좋지 않기 때문에 장애물에 의하여 반사파가 감지되더라도 장애물이 실제로 beamwidth내에 어디에 존재하는지를 알아내기 어렵다. 이를 해결하는 방법으로써 많은 사람들은 센서 중심축에 대하여 장애물이 존재할 수 있는 가능성을 Gaussian분포로 가정하고 각각의 grid에 장애물이 존재하느냐의 여부는 Bayes formular를 이용하였다. 이 방법은 모든 grid에 대하여 Bayes formular(5)를 적용하기 때문에 실시간으로 장애물의 위치를 추정하는데 어려움이 많다. 본 연구에서는 확률개념과 유사하며 계산이 단순한 certainty grid 개념(6)을 이용하여 장애물의 위치를 보다 빨리 추정하는 방법을 제안한다. 그림 5와 같이 현재 이동 로봇이 좌표계 $\{W\}$ 에 대하여 heading angle θ 를 가지고 (x, y) 의 위치에 놓여 있다고 할 때 좌표계 $\{R\}$ 에 대한 grid j 의 위치 (x_j, y_j) 는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{Bmatrix} x_j \\ y_j \end{Bmatrix}_{\{R\}} = \begin{Bmatrix} R \cos \phi_i + \delta \cos(\phi_i + \beta) \\ R \sin \phi_i + \delta \sin(\phi_i + \beta) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\phi_i = \bar{\varphi}(i-9.5)\pi/180$ 이고 아랫첨자 i ($i=1, 2, \dots$

, 18)는 i 번째 센서를 나타낸다. 또한 $\bar{\varphi}$ 는 11.25° 이며 β 는 $-\theta_T \leq \beta \leq \theta_T$ 사이의 각이다. 마찬가지로 좌표계 $\{W\}$ 에 대한 grid j 의 위치 (x_j, y_j) 는 좌표변환에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} x_j \\ y_j \end{Bmatrix}_{\{W\}} = \begin{Bmatrix} R \cos(\theta + \phi_i) + \delta \cos(\theta + \phi_i + \beta) \\ R \sin(\theta + \phi_i) + \delta \sin(\theta + \phi_i + \beta) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (4)$$

그리하여 grid j 가 이미 가지고 있는 certainty value $C(j)_{t-1}$ 와 현재 i 번째 센서에 의하여 증분되어야 할 certainty value $\Delta C(j)_t$ 에 의하여 grid j 의 certainty value는 다음과 같이 update된다.

$$C(j)_t = C(j)_{t-1} + \Delta C(j)_t \quad (5)$$

certainty value가 크다는 의미는 그 grid의 위치에 장애물이 놓여 있을 가능성이 상대적으로 높다는 것을 나타낸다. grid의 certainty value의 update는 이동로봇과 함께 움직이는 active window에 포함되는 grid에 대해서만 수행된다. active window는 절대좌표 $\{W\}$ 에 대하여 이동 로봇과 똑같이 이동하게 된다.

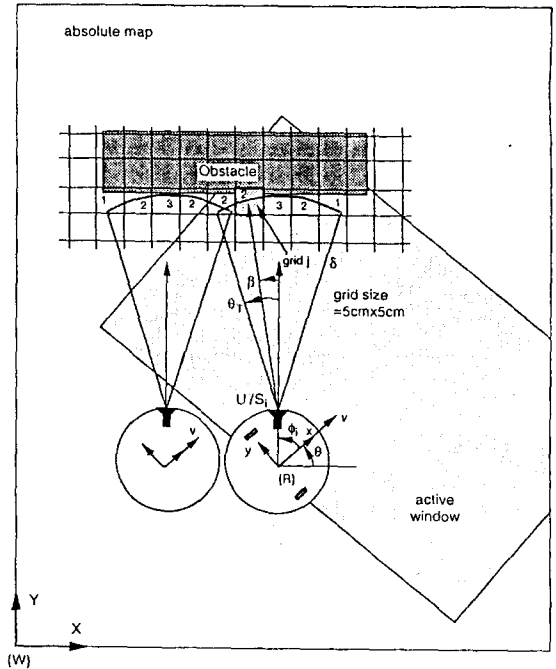


Fig. 5 Certainty grid and active window.

Certainty grid update 실험

앞의 방법을 이용하여 그림 6에서 보여준 3.2mx7.1m의 공간에 장애물들을 이미 알고 있는 위치에 설치한 후 실험하였다. 실험에 사용된 동작 공간은 벽들로 둘러싸여 있으며 한개의 열려 있는 문을 가지고 있

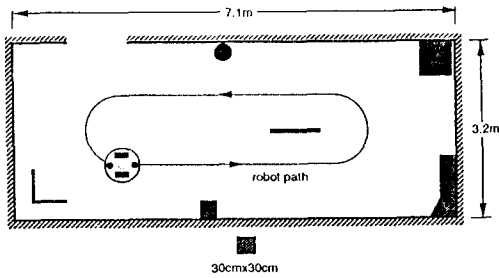
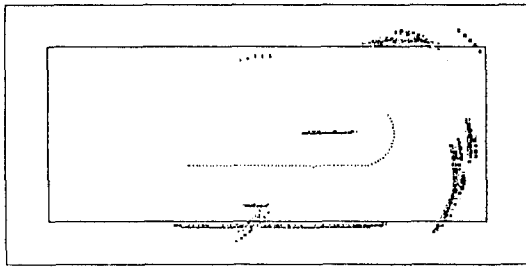
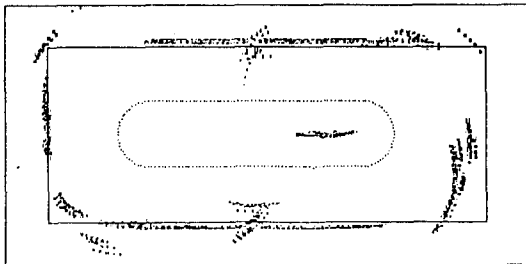


Fig. 6 The mobile robot workspace for experiments.

다. 작업 공간에 별도로 wall, corner, cylinder와 직육면체의 장애물들을 설치하여 실험하였다. 그리고 이동 로봇의 경로는 2개의 직선경로와 2개의 원호경로로 이루어져 있다. 이동 로봇의 현재위치 (x,y)는 20msec 마다 dead reckoning 방법에 의하여 계산된다. 이동 로봇이 미끄럼에 의하여 계획된 경로를 이탈하지 않도록 이동 로봇의 속도를 정하였다. 그림 7(a)는 출발점에서 부터 이동 로봇을 실제로 구동하면서 장애물들을 감지하고 감지된 장애물의 위치에 해당하는 grid의 certainty value들을 update하여 도시한 결과이다. 이 실험에서는 이동 로봇의 속도를 0.05 m/sec로 하였다. 그림에서의 dot들은 이동 로봇이 움직인 궤적을 나타내며 그 위치에서 감지된 장애물들이 놓여 있는 위치에 해당하는 grid의 certainty 값을 보여주고 있다. 그림 7(b)는 이동 로봇이 전체경로를 따라 움직였을때의 certainty value를 보여 주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 The experimental results of certainty grid update, $v=0.05\text{m/s}$.

그림에서의 작은 사각형은 하나의 grid를 표시하며 grid의 색깔이 검을수록 큰 certainty value를 갖는다. 그림에서 보는 바와 같이 초음파 센서는 센서의 중심축에 대하여 직각으로 놓인 벽모양의 장애물들은 잘 감지할 수 있으며 corner나 cylinder와 같은 장애물들도 감지할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 직육면체의 모서리 부분과 같은 edge모양의 장애물들은 반사파의 크기가 작아 감지할 수 없음을 보여준다. 그림 8과 그림 9는 이동 로봇의 속도를 각각 0.1m/sec 와 0.15m/sec로 하였을 때의 certainty value를 update한 결과를 표시한다. 그림에서 알 수 있듯이 cylindrical 형태의 장애물 감지는 이동 로봇의 속도에 영향을 받으며 wall이나 coner는 속도에 관계없이 감지할 수 있다.

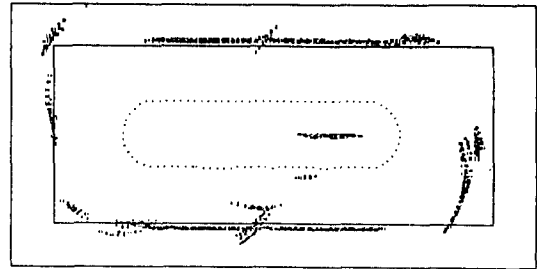


Fig. 8 The experimental results of certainty grid update, $v=0.10\text{m/s}$.

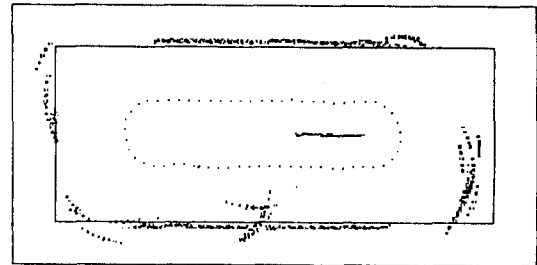


Fig. 9 The experimental results of certainty grid update, $v=0.15\text{m/s}$.

5. 결론

초음파 감지 시스템을 구성하여 정지된 상태에서 시스템에 대한 calibration을 수행한 후 정지상태와 이동 중에 장애물 감지 실험을 수행하였다. 또한 여러개의 초음파 센서를 사용할때 발생할 수 있는 crosstalk현상을 방지하기 위하여 각각의 센서들을 미리 계획된 순서에 따라 동작시켰으며 이동 중에 일어날 수 있는 여러가지 요인들을 분석하여 이동 로봇의 속도를 정하여 실험하였다. 동일한 장애물을 다른 위치에서 측정하였을 경우의 측정 데이터들의 합성은 certainty value를 사용하여 실시간으로 이루어지도록 하였다. 일련의 장애물 감지 실험 결

과로써 제작한 초음파 거리 감지 시스템은 장애물을 실시간으로 감지할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 edge나 cone모양의 장애물과 같이 반사파를 산란시키는 물체나 의복과 같이 초음파를 흡수하는 물체를 제외하고 장애물까지의 거리정보를 실시간으로 얻을 수 있으며 장애물 회피용으로 사용하기에는 비교적 정확한 거리정보를 얻을 수 있다. 그러나 초음파 센서의 specularity문제 때문에 반사파가 감지되지 않는 경우가 발생하므로 레이저 센서나 시각센서들이 서로 보완적으로 사용되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] R.A. Jarvis, "A perspective on range finding techniques for computer vision", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-5, no.2, pp.122-139, 1983.
- [2] S.Singh and P. Keller, "Obstacle detection for high speed autonomous navigation", in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.2798-2805, 1991.
- [3] A.M. Flynn, "Combining sonar and infrared sensors for mobile robot navigation", *Int. J. Robotics Research*, vol.7, no.6, Dec. 1988.
- [4] Polaroid Corporation, *Ultrasonic ranging system*, 1988.
- [5] A. Elfes, "Sonar-based real-world mapping and navigation", *IEEE J. Robotics and Automation*, vol.RA-3, no.3, pp.249-265, June 1987.
- [6] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robot", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, Sept./Oct. 1989.
- [7] R.Kuc and M.W.Siegel, "Physically-based simulation model for acoustic sensor robot navigation", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-9 ,no.6, pp.766-778, Nov. 1987.
- [8] R. Kuc and B. Barshan, "Navigating vehicles through an unstructured environment with sonar", in *Proc. IEEE Int. Robotics and Automation*, pp.1422-1426, 1989.