

## 초음파센서의 지향성 및 경면반사현상을 고려한 환경인식

하윤수<sup>†</sup> · 김덕곤<sup>\*</sup>

(원고접수일 : 2006년 8월 21일, 심사완료일 : 2006년 11월 9일)

### Environmental Perception Considering Beam Opening Angle and Specular Reflection of Ultrasonic Sensors

Yun-Su Ha<sup>†</sup> · Duck-Gon Kim<sup>\*</sup>

**Abstract** : To move in unknown or uncertain environment, a mobile robot must collect informations from various sensors and use it to construct a representation of the external world. Ultrasonic sensor can provide range data for this purpose in a simple cost-effective way. However, conventional ultrasonic sensor system for a mobile robot are not sufficient for environment recognition because of their large beam opening angle, specular reflection.

This paper describe on environmental perception algorithm which can solve these problems in case using ultrasonic sensor. The algorithm consist of two parts. One is to solve beam opening angle problem by fusion from multiple ultrasonic sensors. The other is to cope with specular reflection problem in wall line extract, which is based on Hough Transform. Experiments to verify the validity of the proposed algorithm are carried out, and the results are provided at last part in this paper.

**Key words** : Mobile robot(이동로봇), Environmental perception(환경인식), Ultrasonic sensor(초음파센서), Data fusion(데이터 융합), Hough transform(하프변환)

### 1. 서 론

이동로봇의 환경인식시스템에 주로 사용되어지는 센서로는 초음파센서, 스테레오비전, 레이저 레인지센서 등을 들 수 있다. 스테레오비전은 구조적으로 인간의 눈에 가까운 센서지만 인간의 시각과 같이 물체를 정확히 인식하기 위해서는 복잡한 처리과정을 거쳐야하며 실시간 처리가 가능해야한다.

레이저 발진기와 CCD 카메라를 이용한 레이저 레인지 센서는 물체의 2차원 또는 3차원적 형태를 인식 할 수 있고, 또한 수동적 시각센서와 달리 암흑 속에서도 사용 할 수 있는 장점이 있지만 밝은 태양광 아래서는 잡음을 동반할 뿐만 아니라 사용상의 부주의로 인한 인간의 시각에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

한편, 초음파 센서는 물체까지의 거리밖에 측정

<sup>†</sup> 책임저자(한국해양대학교 IT공학부), E-mail:hys@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4347

<sup>\*</sup> 두산엔진(주)

할 수 없지만, 광학 센서로 측정할 수 없는 환경 즉, 암흑 속에서 장거리를 측정하는 경우나 유리 혹은 거울과 같이 광을 투과 또는 반사해 버리는 경우, 가스나 먼지 등으로 인해 광이 산란되는 경우에도 유효하게 활용할 수 있다. 또한 초음파 센서는 다른 센서에 비해 하드웨어적으로 간단하고 시스템 구성비용이 저렴하며 실시간 처리가 가능하다는 장점이 있다. 이와 같은 장점 때문에 초음파센서를 이용한 이동로봇용 환경인식시스템에 관한 많은 연구가 진행되어왔다<sup>[1]-[5]</sup>. 그러나 초음파 센서를 이용한 환경인식 시스템에서 초음파의 경면반사 (specular reflection), 넓은 지향각 (beam opening angle) 으로 인한 영향은 정확한 측정을 어렵게 한다. 이러한 초음파 센서의 문제점을 개선하기 위한 다양한 시도가 있었다<sup>[3],[4]</sup>. 그러나 이들의 경우 센서의 음향 축에 의해 추측되어지는 물체의 반사 점을 인식할 뿐, 경면반사 현상을 고려하지 않으므로 센서의 불확실한 반사 점 인식으로 인해 불확실한 거리정보를 제공하게 된다. 따라서 본 논문에서는 초음파센서를 이용한 환경인식에 있어서 넓은 지향각에 의한 오차를 감소시키는 방안으로, 복수의 센서로부터의 데이터를 기하학적으로 융합하는 알고리즘을 제안하는 동시에 경면반사에 의한 영향을 극복하기 위해 Hough 변환에 근거한 벽면라인검출 알고리즘을 제안한다. 이들에 대한 유효성은 실제 구현된 센서시스템을 이용한 실험을 통하여 검증한다.

2. 지향성 및 경면반사에 의한 영향

초음파 센서는, 가격이 저렴하고 시스템의 구성을 소형화할 수 있으며 측정가능 범위가 넓을 뿐 아니라 측정거리 정도가 높고 계산이 간단하여 실시간 처리가 가능하기 때문에 이동로봇 분야에 있어서 널리 이용되어져 오고 있다. 그러나 초음파 센서를 이용한 환경인식에 있어서 정확한 거리정보를 얻기 위해서는 초음파센서의 지향성 및 경면반사에 대한 적절한 대책이 요구되어진다.

2.1 지향성에 의한 오차

일반적으로 초음파의 파동은 센서의 중심점을 기

준으로 동심원상으로 퍼져 나간다.

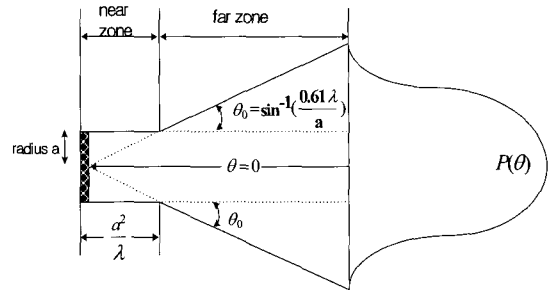


Fig. 1 Modeling for the beam pattern of the ultrasonic sensor

Fig. 1은 초음파센서의 방사현상을 모델링 한 것으로 센서의 반지름을 a, 초음파 파장을 λ 라 하면, Far zone에서 초음파 빔의 편각 θ<sub>0</sub>는 다음 식으로 표현된다.

$$\theta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{0.61\lambda}{a}\right) \tag{1}$$

따라서 θ<sub>0</sub>는 구동주파수에 의해 결정되어지는데, 이 각도가 크게 되면, 센서의 음향축 상에서 어느 정도 떨어진 물체에서도 측정이 가능한 반면, 얻을 수 있는 측정치에 대한 실제 물체의 위치 정도가 나빠지게 된다<sup>[6],[7]</sup>.

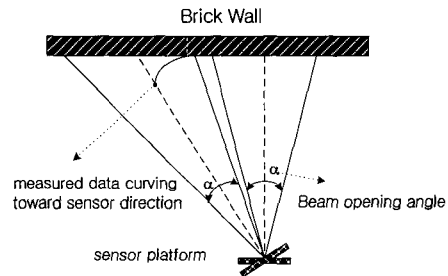


Fig. 2 Measurement error data caused by beam opening angle of ultrasonic sensor

즉, 수신된 Echo 신호의 진폭은 신호의 수신각도에 의해 달라지므로 초음파 센서 모델은 고정된 초음파 지향각 내의 가장 가까운 거리의 검출로 설명되어 질 수 있다. 따라서 단일 초음파 센서를 이

용하여 어떤 무한 평면의 거리를 측정할 경우, 위에서 언급한 초음파 센서의 지향각 문제에 의해 초음파 빔 각 내의 중앙값을 감지하는 것이 아니라 초음파 빔 내의 가장 가까운 거리를 읽게 되므로 Fig. 2와 같은 거리측정 오차가 발생하게 된다.

2.2 경면반사에 의한 오차

거리의 측정 정도를 높게 하기 위해서는, 주파수가 높은 것이 좋지만, 주파수가 높게 될수록 전달 매체 중에서 감쇄가 크게 된다. 따라서 공기 중에서 수 미터의 거리 측정을 위한 이동로봇용 초음파 센서로는 100[kHz]가 한계이며, 현재 널리 이용되고 있는 초음파 센서의 주파수는 40[kHz] ~ 60[kHz] 로 공기 중 파장은 상온에서 약 5[mm]에서 10[mm] 이다<sup>[5]</sup>. 한편, 옥내 벽면의 요철은 0.1[mm]의 거친 평면이다. 따라서 벽면의 거침은 초음파 파장에 비해서 충분히 작기 때문에 벽면에 대해서 초음파 입사각도와 반사각은 같다. 이런 성질을 경면반사라 한다. Fig. 3은 평면과 모서리에 대한 경면 반사현상을 나타낸 것이다. 이러한 경면반사현상은 빔의 입사각의 정도에 따라 기울어진 벽면의 존재를 검출 할 수 없게 한다. 검출 가능한 최대 입사각도는 벽면 재질과 구조에 의해 결정되어지는데 나무 벽면의 경우에는 22.5°, 벽돌로 이루어진 벽면의 경우에는 70°이다<sup>[5]</sup>.

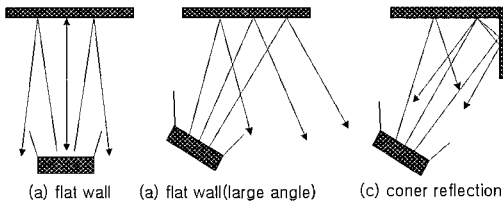


Fig. 3 Specular reflection of flat wall

3. 환경인식 알고리즘

3.1 기하학적 데이터 융합 모델

본 논문에서는 Fig. 4와 같이 두 개의 초음파 센서를 일정한 거리 d를 두고 동일한 축 상에 배

치하고 각각의 센서가 지향하는 중앙선과 두 센서에 의해 생성되는 거리가 평행을 이루는 센서시스템을 대상으로 한다. Fig. 4에서 두 센서 사이에는 기하학적인 관계가 있으므로 입사각이 지향각보다 큰 경우와 작은 경우로 나누어 센서데이터를 기하학적인 방법으로 융합한다.

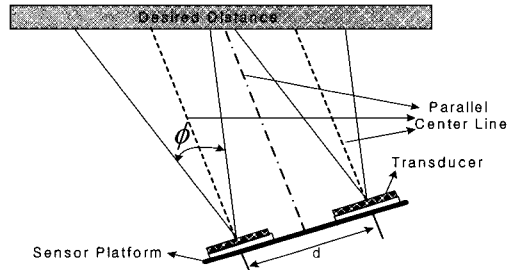


Fig. 4 Arrangement of ultrasonic sensors

3.1.1 입사각이 지향각과 같거나 큰 경우

Fig. 5는 초음파센서를 이용한 거리 측정의 경우 입사각( $\theta$ )이 지향각( $\phi/2$ ) 과 같거나 큰 경우의 기하학적 모델을 나타낸다.

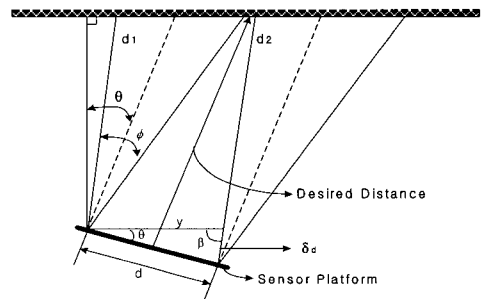


Fig. 5 Geometric model for sensor data

$$fusion(\theta \geq \frac{\phi}{2})$$

Fig. 5에서 두 센서로부터 얻어진 거리의 차는 (2)와 같이 계산된다.

$$\delta_d = |d_2 - d_1| \tag{2}$$

여기서  $d_1, d_2$ 는 두 센서로부터 얻어진 거리 값이다. 또한 Fig. 5에서 두 센서간의 거리를 d, 초음파 지향각을  $\phi$ 로 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$y = \sqrt{d^2 + \delta_d^2 - 2d\delta_d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (3)$$

$$\frac{\delta_d}{\sin\theta} = \frac{y}{\sin(\pi/2 - \phi/2)} \quad (4)$$

그러므로 벽면과 센서가 이루는 각도  $\theta$  에 관하여 정리하면

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\delta_d \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2}\right)}{y} \quad (5)$$

이 된다. 따라서 입사각이 지향각보다 크거나 같은 경우 초음파 센서시스템의 중심점과 벽면사이의 거리는 (6)으로 계산되어 진다.

$$D = \frac{d_{ave} \cos(\theta - \phi/2)}{\cos\theta} \quad (6)$$

여기서  $d_{ave}$  는  $d_1, d_2$ 의 평균값이다.

### 3.1.2 입사각이 지향각보다 작은 경우

Fig. 6과 같이  $\theta$ 가  $\frac{\phi}{2}$ 보다 작은 경우에는 (7)~(9)와 같이 계산되어진다.

$$\frac{\delta_d}{\sin\theta} = \frac{d}{\sin\pi/2} \quad (7)$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\delta_d \sin\pi/2}{d} \quad (8)$$

$$D = \frac{d_{ave}}{\cos\theta} \quad (9)$$

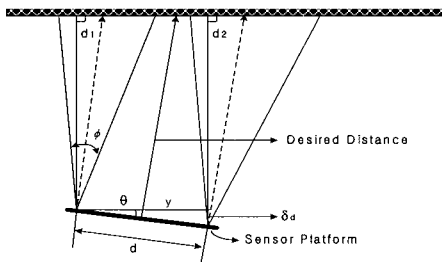


Fig. 6 Geometric model for sensor data

$$\text{fusion}(\theta < \frac{\phi}{2})$$

### 3.2 Hough 변환에 근거한 벽면검출

이동로봇이 초음파 센서를 이용하여 미지의 환경을 탐색할 때 임의의 입사각 이상에서는 벽면의 경면반사현상에 의해 수신파가 돌아오지 않을 수 있다. 이를 임계각이라 하며, 이각을 벗어날 경우 센서 데이터는 실제 환경정보와는 전혀 다른 값을 나타낼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해, 우선 2차원평면에서 초음파 센서들에 의해 받아들여진 한 쌍의 데이터를 전술의 기하학적 융합알고리즘을 이용하여 보다 정확한 벽면거리정보를 구하고, 이를 근거로 Hough 변환을 적용함으로써 미지환경에 대한 벽면라인을 검출하는 환경인식 알고리즘을 제안한다.

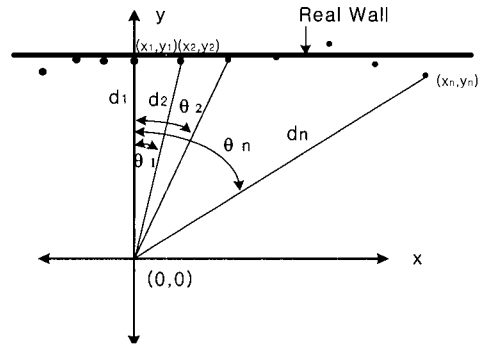


Fig. 7 Data representation on X-Y plane

기하학적으로 융합된 거리정보로부터 벽면 라인을 검출하기 위해 다음과 같은 과정을 거친다. 우선 Fig. 7에 나타난 바와 같이 센서 플랫폼을 중심으로 환경을 스캐닝한 후 얻어진 거리정보  $d$ 를 센서 플랫폼의 회전정보  $\theta$ 와 함께 (10)과 같이 표현한다.

$$\text{Data} = \{(d_1, \theta_1)(d_2, \theta_2) \dots (d_n, \theta_n)\} \quad (10)$$

(10)으로 표현되는 정보는

$$x_i = d_i \cos\theta_i \quad (11)$$

$$y_i = d_i \sin\theta_i \quad (12)$$

에 의해 (13)과 같이 X-Y평면상의 점으로 나타내어진다.

$$\text{Data} = \{(x_1, y_1) (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)\} \quad (13)$$

여기서 초음파센서의 경면반사 현상이 없고 거리 정보 d가 정확하다면 벽면라인은 X-Y평면상의 인접한 두 점들을 연결하는 직선이 된다. 그러나 실제의 경우에는 경면반사의 영향으로 인해 실제 벽면과는 전혀 다른 결과를 얻게 된다. 따라서 본 논문에서는 경면반사의 영향을 최소화하여 근사적인 벽면라인을 검출하기 위해 다음과 같은 단계를 거치게 된다. 첫째, X-Y평면에 나타낸 n개의 점들 중에서 인접한 두 점을 지나는 n-1개의 무한직선을 구하고 이들에 대해 Hough 변환을 적용하고 이로부터 얻어진  $(\rho_1, \alpha_1), (\rho_2, \alpha_2), \dots, (\rho_{n-1}, \alpha_{n-1})$  점들은  $\rho - \alpha$  그리드 평면상에 투영된다. 이 과정을 Fig. 8에 나타낸다.

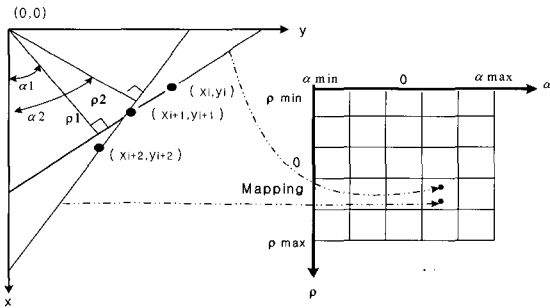


Fig. 8 Hough transform of sensor data

둘째,  $\rho - \alpha$  평면상에 투영된 점들에 대한 밀도가 임의의 문턱치보다 높은 셀을 선택하여 이들로부터 실제 벽면과 근사한 직선을 구한다. 각 셀에 투영된 점의 개수 N이 문턱치 값보다 크거나 같은 셀이 선택되어지면 각 셀에 있어서 평균  $\bar{\rho}, \bar{\alpha}$  는 (14), (15)와 같이 구해질 수 있다.

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i}{N} \quad (14)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i}{N} \quad (15)$$

여기서 문턱치 값은 임계각도, 센서 플랫폼 구동

스텝모터의 분해능, 평면상 셀의 크기 및 스캐닝횟수를 고려하여 실험적으로 결정되는 상수 값이다. 따라서 벽면라인과 근사한 직선은 선택된 각 셀의  $\bar{\rho}, \bar{\alpha}$  로부터 (16)과 같이 구해질 수 있다.

$$y = -\frac{\cos \bar{\alpha}}{\sin \bar{\alpha}} x + \frac{\bar{\rho}}{\sin \bar{\alpha}} \quad (16)$$

Fig. 9는 Hough 변환에 의한 라인 추출 알고리즘의 흐름을 나타낸 것이다.

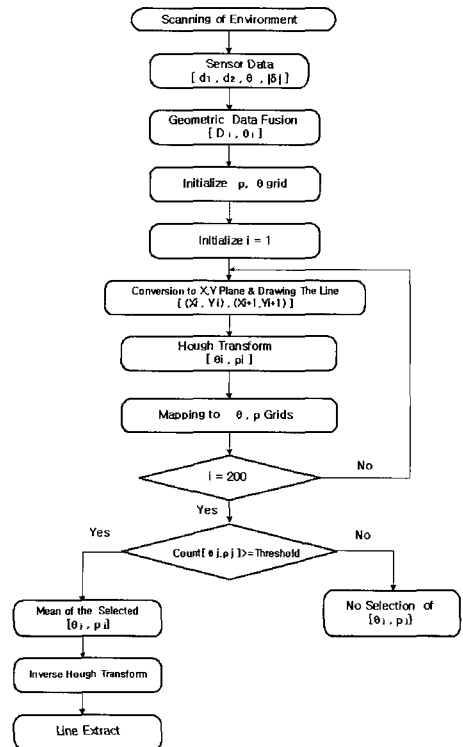


Fig. 9 Line extraction algorithm using Hough transform

## 4. 실험결과

### 4.1 실험장치

Fig. 10은 전술의 환경인식알고리즘에 대한 유효성 검증을 위한 초음파센서 시스템의 외관을 나타낸 것이다. 회전 평판 좌우에 두개의 초음파 센서가 부착되어있고, 그 아래 센서플랫폼을 회전시

키기 위한 스텝 모터, 초음파 센서 구동 드라이버, 각도 측정의 위한 포텐쇼미터, 거리정보를 보여주는 LCD, 데이터를 처리하는 CPU 보드로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용되어진 초음파 센서로는 측정범위 25[cm]~1,000[cm], 오차범위  $\pm 1(\%)$ , 지향각  $12(^{\circ})$ 를 갖는 Polaroid사의 6500 series이며, 이로부터 얻어진 데이터의 처리에는 마이크로프로세서 80C196KC 가 사용되었다. 또한 센서가 부착된 회전판의 구동에는 H-546 스텝모터가 사용되었으며, 이의 회전각 검출을 위해 포텐쇼미터를 사용하였다. 두 센서간의 간격은 3[cm]이며, 초음파 센서간의 혼선현상을 방지하기 위해 순차적으로 초음파를 방사하고, 스텝모터가 회전 할 때 초음파 센서가 동작하지 않도록 하였다. 또한 초음파 센서의 방사 주파수는 13[Hz]로 구동되도록 하여 감지거리를 40[cm]~646[cm]로 제한하여 실험하였다. 본 실험에 사용된 플라로이드형 센서의 구동주파수가 50[kHz], 반지름이 20[mm]이므로

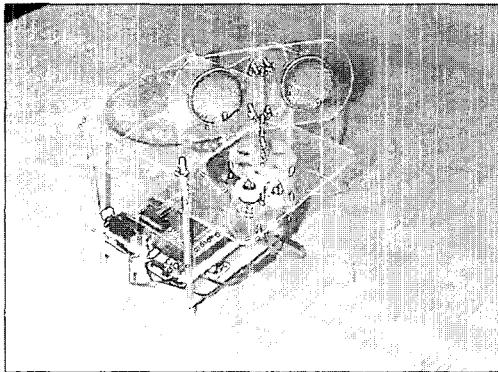


Fig. 10 Configuration of ultrasonic sensor system

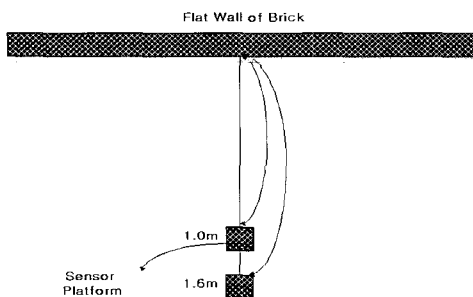


Fig. 11 Experimental environment to verify validity of the proposed data fusion algorithm

Fig. 1에서의 초음파의 파장  $\lambda$ 와 방사각  $\theta_0$ 는 각각 6.88[mm]와  $12(^{\circ})$ 가 된다.

4.2 기하학적 데이터 융합 알고리즘에 대한 검증

본 논문에서 제안한 기하학적 데이터 융합 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 두개의 초음파센서로부터 얻어진 데이터들로부터 융합알고리즘 적용 전, 후의 거리 값을 비교하는 실험을 실시하였다. Fig. 11은 실험을 위한 환경을 나타낸 것으로, 무한 평면에 대하여 초음파 센서 시스템을 100[cm] 지점과 160[cm]지점에서 센서플랫폼의 중심으로  $\pm 45(^{\circ})$ 범위 내에서 0  $\rightarrow$  +45  $\rightarrow$  0  $\rightarrow$  -45  $\rightarrow$  0 로 회전시키면서  $1.8(^{\circ})$ 간격으로 방사하여 얻어진 데이터를 얻게 된다.

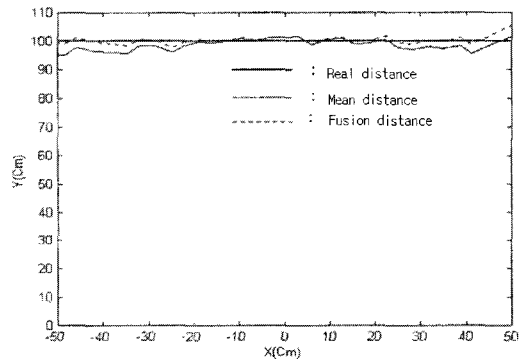


Fig. 12 Experimental result of distance measurement at 100[cm]

Fig. 12는 100[cm]거리에 있는 합판 벽면에 대하여 초음파를 방사하여 두 센서로부터 얻어진 거리의 평균값과 제안한 융합알고리즘에 의해 구해진 값을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 두 센서 데이터를 단순 평균했을 때와 제안한 알고리즘을 이용했을 때 모두 (0,0)부근, 즉 센서플랫폼의 중심에서의 오차의 크기는 비슷하지만 중심에서 멀어질 수록 제안한 알고리즘을 이용한 경우가 오차가 적음을 알 수 있다. Fig. 13은 160[cm] 지점에서의 거리측정결과를 나타낸 것으로, 100[cm]에서의 결과와 유사함을 알 수 있다. 이는 제안한 알고리즘이 초음파 센서의 넓은 지향각에 의한 오차를 줄이는데 기여함을 입증하고 있다.

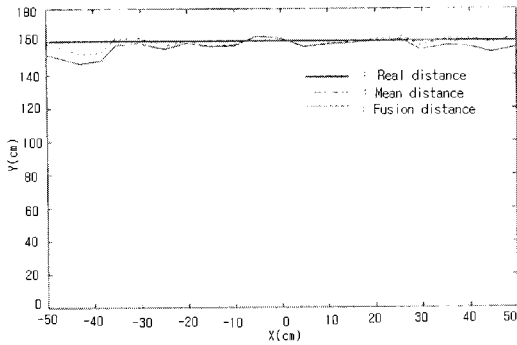


Fig. 13 Experimental result of distance measurement at 160[cm]

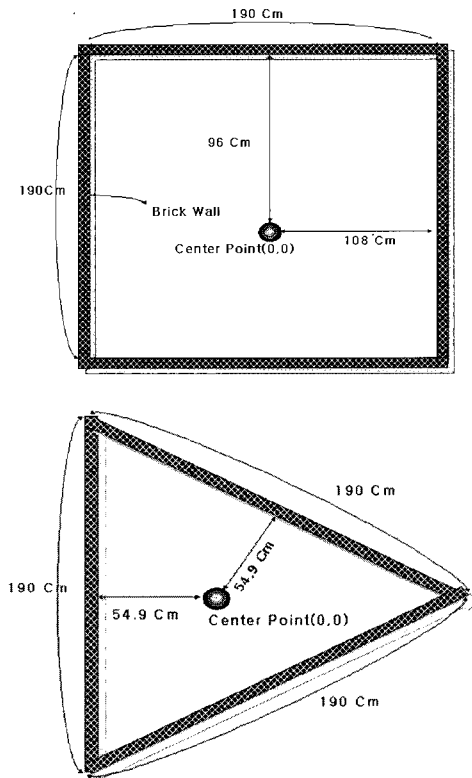


Fig. 14 Environments for line extract experiment

4.3 격자형 환경에서의 벽면라인 검출

Fig. 14는 폐쇄된 격자공간의 벽면라인 검출에 있어서 Hough 변환을 이용한 검출알고리즘의 유효성 검증실험을 위한 환경을 나타낸 것이다. 실험에 있어서 센서플랫폼을 0 → +180 → 0 → -180

→ 0순으로 회전시키면서 1.8[°] 간격으로 초음파를 방사하였다. 두 초음파센서로부터의 거리데이터는 1차적으로 전술의 기하학적융합방법에 의해 융합된 후, Hough 변환에 근거한 벽면라인 검출 알고리즘에 적용되며, 그 결과는 최소자승법에 근거한 벽면라인 검출 알고리즘의 결과와 비교되어진다.

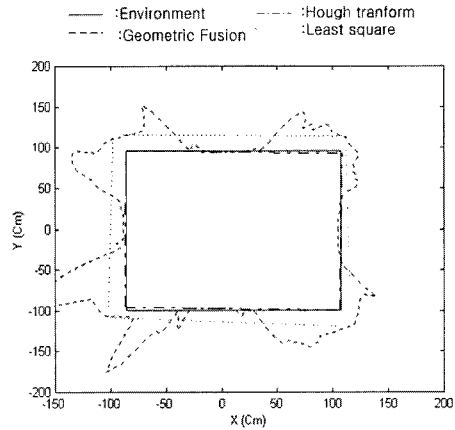


Fig. 15 Results of line extract experiment I

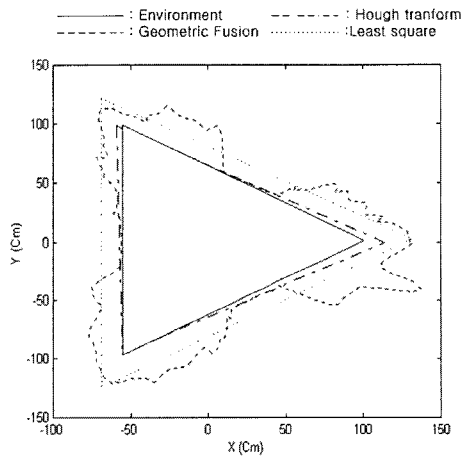


Fig. 16 Results of line extract experiment II

Fig. 15는 사각형환경에 대한 라인 추출결과를 나타낸 것으로, 실선은 실제 환경을, 파선은 기하학적융합방법에 의해 얻어진 거리정보를, 일점쇄선은 파선으로 표시되는 거리정보에 제안된 라인 추출알고리즘을 적용한 결과를, 점선은 최소자승법에 근거한 라인추출결과를 나타낸다. 최소자승법에

의한 라인추출은 사각형의 각각의 벽면에 대해 영역을 분할하고 그 영역에서 오차가 최소가 되도록 1차로 근사화시켜 얻어졌다. 그 결과 실제 환경과는 많은 오차가 발생함을 볼 수 있다. 반면 본 논문에서 제안하고 있는 Hough 변환에 근거한 라인추출결과는 실제 환경과 매우 유사함을 알 수 있다. 또한 Fig. 16은 삼각형 환경에서 동일한 방법으로 실험한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과 역시 제안한 알고리즘에 의해 얻어진 결과가 최소자승법을 이용한 경우보다 우수한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 이는 Hough 변환에 근거한 라인 추출 알고리즘이 초음파 센서의 경면반사에 의한 오차를 줄이는데 유효함을 입증한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 초음파 센서를 이용한 이동로봇용 환경인식시스템 구성 시 초음파센서의 넓은 지향각 및 경면반사에 의한 오차에 관하여 기술하였으며, 지향각에 의한 오차를 보정하기 위하여 두 개의 초음파 센서를 이용하여 이로부터 얻어진 데이터를 기하학적으로 융합하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 경면반사에 의한 영향을 최소화하기 위하여 Hough 변환에 근거한 벽면라인 추출알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 유효성 검증을 위한 실제 환경에서의 실험이 행해졌으며, 그 결과 지향각 및 경면반사에 의한 영향을 감소시킬 수 있음이 입증되었다.

## 참고문헌

- [1] H. P. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.166-121, 1985.
- [2] J. M. Manyika and H. F. Durrant-Whyte, "A Tracking Sonar Sensor for Vehicle Guidance" Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 1, pp.424-429, 1993.
- [3] Billur Barshan and Roman Kuc, "Differentiating Sonar Reflections from Corners and Planes by Employing an Intelligent Sensor" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, No. 6, pp.560-569 June 1990.
- [4] Yoshiaki Nagashima and Shin'ichi Yuta "Ultrasonic Sensing for a Mobile Robot to Recognize an Environment", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and System, pp.805-812, 1992.
- [5] Charles C. Chang, Kai-Tai Song, "Ultrasonic Sensor Data Integration and It's Application to Environment Perception", Journal of Robotic Systems vol. 13, no.10, pp.663-667, 1996.
- [6] P. M. Morse and K. U. Ingard, "Theoretical Acoustics." New York: McGraw Hill, 1968.
- [7] J. L. Crowley, "Dynamic World Modeling for an Intelligent Mobile Robot Using a Rotating Ultrasonic Ranging Device" Proc. IEEE. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.128-135, 1985.

## 저 자 소 개



**하윤수 (河潤秀)**

1962년 4월생, 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1990년 동 대학원 졸업(공학석사), 1996년 일본 쓰쿠바대학 대학원 졸업(공학박사), 1996~현재 한국해양대학교 IT공학부 부교수



**김덕곤 (金德坤)**

1972년 3월생, 1999, 2001년 한국해양대학교 제어계측공학과 및 동대학원 석사과정 졸업, 2000.11~현재 두산엔진(주) 근무