

초음파 센서를 이용한 이동로봇용 환경인식 시스템개발에 관한 연구

김 덕 곤¹⁾, 하 윤 수²⁾

A Study on the Development of Environment Perception System for a Mobile Robot Using Ultrasonic Sensors

D. G. Kim , Y. S. Ha

Abstract

To move in unknown or uncertain environment, a mobile robot must collect information 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 describes 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 data from multiple ultrasonic sensors. The other is to cope with specular reflection problem in wall line extract, which is using Hough Transform. Experiments using the system implemented the proposed algorithms have made, and the results are provided at last part in this paper.

Keywords: Mobile robot, Ultrasonic sensor, Beam-opening-angle,
Specular reflection, Sensor data fusion, Hough transform

1) 한국해양대학교 대학원

2) 한국해양대학교 기계·정보공학부

1. 서 론

일반적으로 초음파 센서를 이용한 이동로봇용 환경인식 시스템에서 초음파의 경면반사(specular reflection) 및 넓은 지향각(large beam opening angle)으로 인한 영향은 정확한 환경인식을 어렵게 한다. 이러한 초음파 센서의 문제점을 개선하기 위한 다양한 시도가 있었다^[1~8]. 그러나 이들의 경우 트랜스듀서의 음향 축을 중심으로 물체의 반사 점을 인식 할 뿐 지향각 문제나, 경면반사 현상을 고려하지 않으므로, 확실한 반사 점을 인식할 수 없어 불확실한 거리정보를 제공하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 초음파 센서를 이용한 환경인식에 있어서 넓은 지향각에 의한 오차를 감소시키기 위하여 복수의 트랜스듀서를 이용한 기하학적 데이터융합 알고리즘을 제안한다. 또한, 경면반사에 의한 영향을 최소화하기 위해 Hough변환을 이용한 미지환경인식 알고리즘을 제안하고, 구현된 실제 시스템을 이용한 실험을 통해 그 유효성을 검증한다.

2. 초음파 센서를 이용한 환경인식에 있어서의 문제점

2.1 초음파 센서의 지향성에 의한 오차

초음파 센서에 있어서 트랜스듀서의 반지름을 a , 초음파 파장을 λ 라 하면, 초음파 빔의 편각 θ_0 는 다음 식으로 표현된다.

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

여기서, θ_0 는 구동주파수에 의해 결정되어지는데, 이 각도가 크게되면, 트랜스듀서의 음향축상에서 어느 정도 떨어진 물체에서도 측정이 가능한 반면, 위치 정도가 나빠지게 된다.^[9,10] Fig. 1 은 $\phi/2$ 의 지향각을 갖는 초음파센서를 이용한 임의의 무한 평면에 대한 거리측정 모델을 나타낸 것이다. 수신된 에코 신호는 초음파 빔각 내의 중앙값 dr 를 감지하는 것이 아니라 초음파 빔내의 가장 가까운 거리 ds 를 읽게 된다. 이런 이유 때문에 단일 초음파 센서로 어떤 미지의 환경을 정확히 인식하는데는 어려움이 따르게 된다.

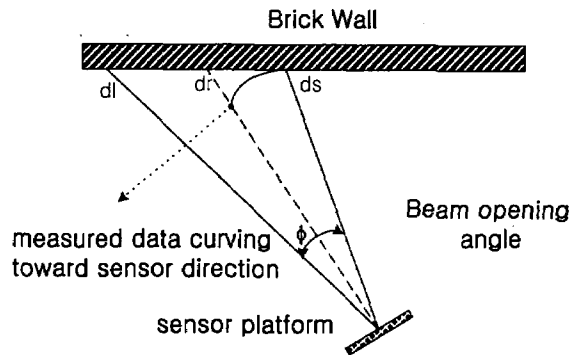


Fig. 1. A model of distant measurement using ultrasonic sensor

2.2 초음파 센서의 경면반사 현상에 의한 오차

초음파를 이용한 환경인식에서 벽면의 거침은 초음파 파장에 비해서 충분히 작기 때문에 벽면에 대해서 초음파 입사각도와 반사각은 같다. 이런 성질을 경면반사(Specular Reflection)이라 하는데 Fig. 2 는 벽면과 구석에 대한 경면반사 현상을 나타낸 것이다.

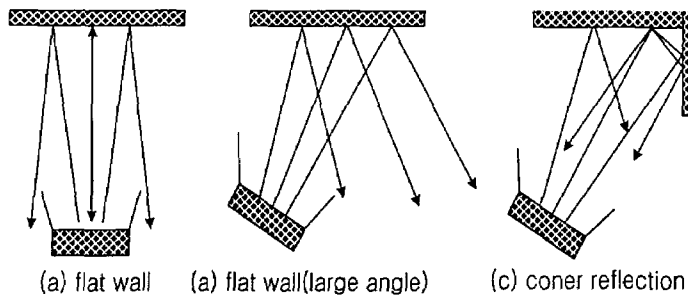


Fig. 2. Specular reflection of flat wall

초음파 센서의 이런 성질로 인해, 초음파 센서를 이용한 곡면환경을 측정할 경우 트랜스듀서의 음향 축 상에서 물체까지의 거리는 다중 반사에 의해 정확히 측정하기 어렵고 또한, 기울어진 벽에 대해서 초음파 센서의 큰 입사각에 의해 그 벽면을 관측을 어렵게 한다.

3. 초음파 센서 시스템의 구성

3.1 하드웨어의 구성

본 논문에서는 옥내 환경을 주행하는 실험용 이동로봇의 환경인식시스템에 있어서 전술의 지향각 및 경면반사에 의한 영향을 최소화하는 초음파 센서 시스템의 구성 및 인식 알고리즘을 개발하는 것을 최종목표로 하고 있다. Photo. 1 은 본 연구에서 개발한 초음파 센서 시스템의 외관을 나타낸 것이다. 회전 평면 좌우에 두개의 초음파 트랜스듀서가 부착되어있고, 그 아래에 트랜스듀서를 회전시키기 위한 스텝 모터, 초음파 센서 구동 드라이버, 각도 측정의 위한 포텐쇼미터, 거리정보를 보여주는 LCD, 데이터를 처리하는 CPU 보드로 구성되어져있다.

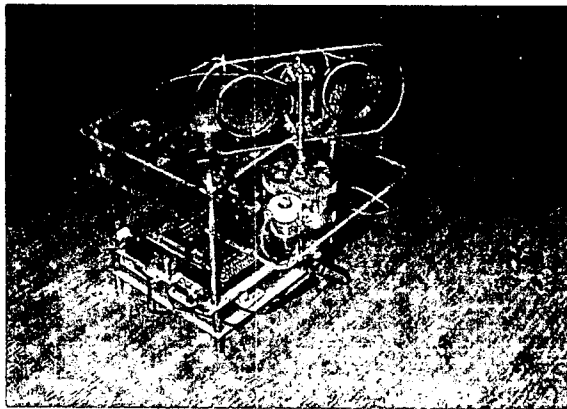


Photo. 1. Configuration of ultrasonic sensor system

본 연구에서 사용되어진 초음파 센서에는 구동 주파수 50kHz, 측정 레인지 12[Cm]~106[Cm], 오차범위 $\pm 1\%$ 를 가지는 Polaroid사의 6500 series 가 사용되었으며 이로부터 얻어진 데이터들을 처리하는 Micro-Processor 에는 80C196KC^[11] 가 사용되었다. 또한, 초음파센서가 부착된 회전판의 구동에는 H-546 Step Motor가 사용되었으며, 이의 회전각 검출을 위해 Potentiometer를 사용하였다. Fig. 3 는 Micro-Processor 80C196KC 를 중심으로 한 초음파 센서시스템의 데이터 처리 블록선도를 보여주고 있다.

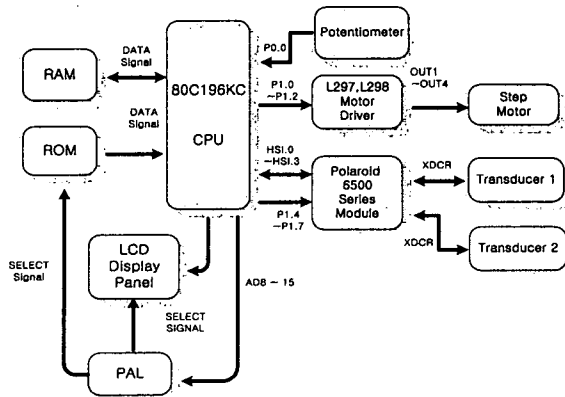


Fig. 3. The schematic diagram for data processing using 80C196KC

3.2 초음파 센서 데이터 융합

본 논문에서는 환경에 관한 정확한 거리를 측정하기 위해서 두개의 센서를 서로 다른 위치에 배치하여 이로부터 데이터를 수학적으로 융합하도록 한다. Fig. 4 는 본 논문에서 제안한 초음파 센서시스템에 있어서 센서의 배치도를 나타낸 것이다.

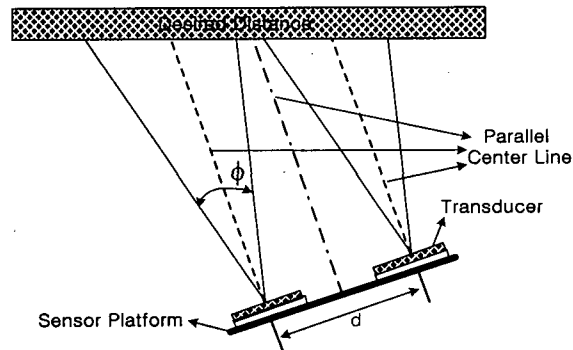


Fig. 4. Arrangement of sensors

두 개의 초음파 센서를 일정한 거리 d 을 두고 동일한 위치에 배치함으로써 각각의 센서가 지향하는 중앙선과 두 센서에 의해 생성되는 거리는 평행을 이루게 된다. 이들은 하나의 트랜스듀서로 송·수신을 겸하게 되고 각각은 순차적으로 초음파를 방사여

혼선(Cross talk)문제가 생기지 않도록 하고 있다. 본 논문에서는 입사각이 지향각 보다 큰 경우와 작은 경우로 나누어 이들에 대해 두 센서들로부터의 데이터들을 기하학적 방법으로 융합함으로써, 정확한 거리 정보를 구하고자 한다.

3.2.1 입사각이 지향각 보다 큰 경우

초음파 센서를 이용한 거리측정의 경우 입사각(θ)이 지향각($\frac{\psi}{2}$) 보다 클 때 Fig. 5 와 같이 모델 되어질 수 있다. 여기서 θ, ψ 는 각각 초음파 센서의 입사각과 방사각, d_1, d_2 는 두 센서에서 받은 거리, D 는 센서플랫폼 중심에서 벽면까지의 거리, δ_d 는 두 센서가 받은 거리 차 그리고, d 는 센서간의 거리를 나타낸다.

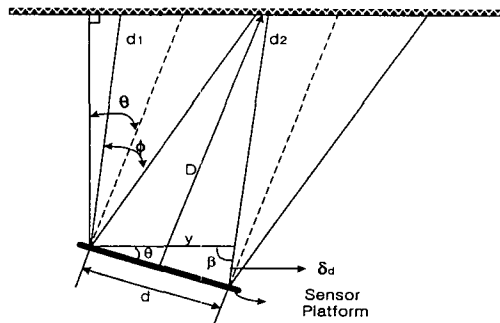


Fig. 5. Geometric model for sensor data fusion ($\theta > \frac{\psi}{2}$)

여기서 입사각 θ 는 기하학적 관계를 이용하여 다음과 같이 구해 질 수 있다.

$$y^2 = x^2 + \delta_d^2 - 2d \delta_d \cos(\pi/2 - \psi/2) \dots\dots\dots(3)$$

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

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\delta_d \cdot \sin(\pi/2 - \psi/2)}{y} \dots\dots\dots(5)$$

따라서 계측하고자하는 거리 D 는 다음과 같이 추정되어 진다.

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

3.2.2 입사각이 지향각 보다 작은 경우

식(5)에 의해 계산되어진 벽면의 기울기 θ 가 $\frac{\psi}{2}$ 보다 작은 경우에는 Fig. 6 에 나타난 모델에 의해 거리 D는 다음과 같이 계산되어진다.

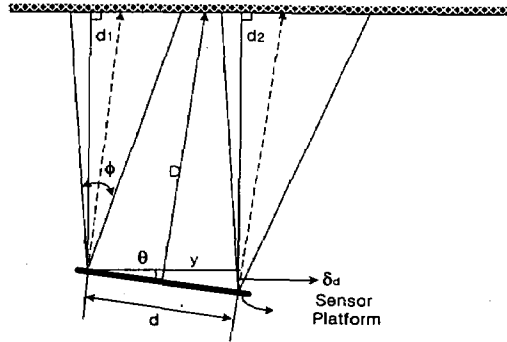


Fig. 6. Geometric model for sensor data fusion ($\theta < \frac{\psi}{2}$)

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

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

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

3.3 Hough 변환을 이용한 환경인식 알고리즘

본 논문에서는 초음파 센서들에 의해 받아들여진 한 쌍의 거리 데이터를 이상과 같이 융합함으로써 얻어진 벽면 거리정보와 포텐쇼미터로부터 얻어지는 센서플랫폼의 회전 정보를 이용하여 벽면정보를 나타내는 2차원 평면상의 점으로 변환하고, 이들 점들을 잇는 직선들에 대해 Hough변환을 적용함으로써 미지의 환경에 대한 벽면라인을 검출하고자 한다.

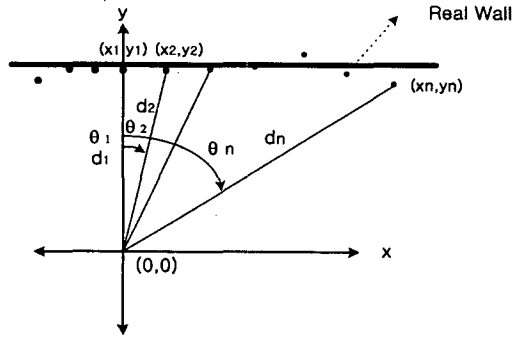


Fig. 7. Data representation on X-Y plane

Fig. 7 은 임의의 벽면에 대해 센서플랫폼을 중심으로 스캐닝 한 후에 얻어진 데이터를 2차원 평면에 나타낸 것이다. θ_1 에서 θ_n 까지의 범위를 스캐닝했을 때 데이터 집합을 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 $X_i = d_i \sin \theta_i$, $Y_i = d_i \cos \theta_i$ 이므로 거리 및 회전 정보는 X-Y 평면상의 점 집합

$$\text{Data} = \{ (x_1, y_1) (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n) \} \dots \dots \dots (11)$$

으로 나타내어질 수 있다.

이와 같이 얻어진 점들을 연결하면 경면반사의 영향으로 인해 실제 벽면과는 전혀 다른 결과를 얻게 된다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 X-Y 평면에 나타낸 n 개의 점들에 대해, 인접한 두 점을 지나는 무한 직선(n-1)을 구하고 이들 각 직선에 대해 Hough 변환을 적용한다.

이로부터 구해진 점 $(\rho_1, \alpha_1) (\rho_2, \alpha_2) \dots (\rho_{n-1}, \alpha_{n-1})$ 은 각각 ρ - α 그리드 평면상에 투영되고, 점들에 대한 밀도가 높은 셀을 선택하여 이들로부터 실제 벽면과 근사한 직선은 구해진다. 이 과정을 Fig. 8 에 나타낸다. 각 셀에 투영된 점의

갯수 $N \geq \text{Threshold}$ 인 셀이 선택되어지면 이들 각 셀에 있어서 평균 $\overline{\rho}, \overline{\alpha}$ 는 식 (12)에 의해 구해질 수 있다.

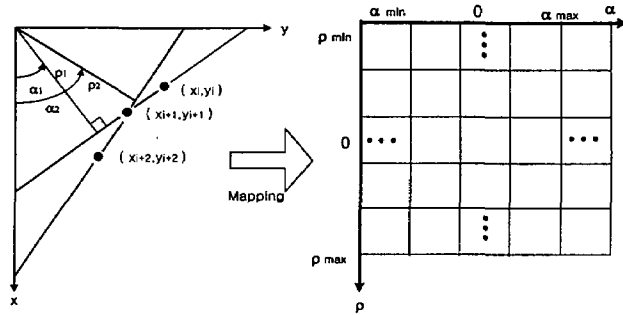


Fig. 8. Hough transform

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i}{N}, \quad \bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i}{N} \dots\dots\dots(12)$$

여기서, Threshold 는 초음파 센서에 있어서 경면반사가 일어나지 않는 임계각도, 센서 플랫폼 구동 스텝모터의 분해능, ρ - α 평면상 셀의 크기 및 스캐닝 횟수에 따라 결정되는 상수이다. 따라서, 벽면 라인과 근사한 직선은 선택된 각 셀의 $\bar{\rho}, \bar{\alpha}$ 로부터 식 (13)과 같이 얻어 질 수 있다.

$$y = -\frac{\cos \bar{\alpha}}{\sin \bar{\alpha}} x + \frac{\bar{\rho}}{\sin \bar{\alpha}} \dots\dots\dots(13)$$

4. 실험 결과 및 검토

4.1 데이터 융합알고리즘에 대한 검증 실험

본 논문에서는 제안한 데이터 융합 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 두개의 초음파 센서를 사용해서 얻어진 거리 데이터와 이를 제안한 융합알고리즘에 적용시킨 후, 거리 데이터를 비교하는 실험을 실시하였다. 무한 평면에 대하여 초음파 센서 시스템을 100[Cm] 지점에서 센서 플랫폼을 중심으로 $\pm 45^\circ$ 범위 내에서 $0^\circ \rightarrow +45^\circ \rightarrow 0^\circ \rightarrow -45^\circ \rightarrow 0^\circ$ 로 회전시키면서 1.8° 간격으로 초음파를 방사하여 거리 데이터를 얻었다. 이때, 두 초음파 센서의 중심간의 간격은 3[Cm]로 설정하였으며, 초음파 센서간의

혼선(Crosstalk) 현상을 방지하기 위해 순차적으로 초음파를 방사하고, 스텝모터가 회전 할 때 초음파 센서가 동작하지 않도록 하였다.

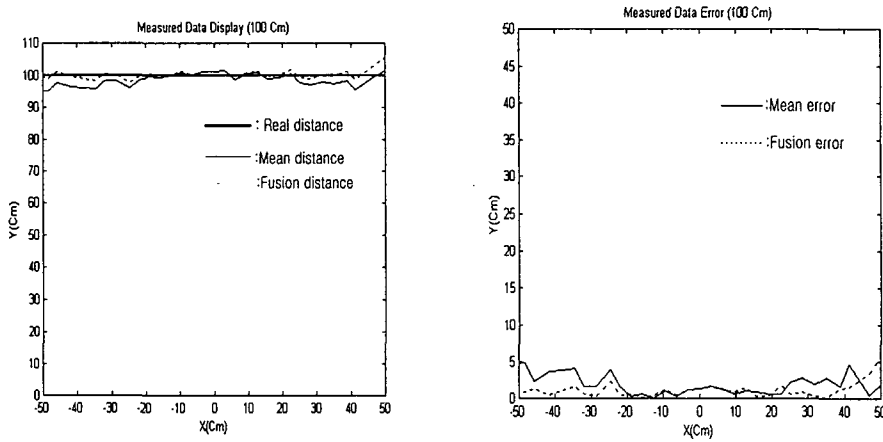


Fig. 9. Results of sensor data fusion

Fig. 9 는 두 센서로부터 얻어진 측정값을 단순히 평균한 값과 제안한 융합알고리즘을 적용시켜 얻은 결과와 그 오차를 나타내고있다. 이 그림으로부터 두 센서 데이터를 평균한 값 보다 제안한 융합방법에 의해 얻어진 결과가 절대적인 환경에 근접함을 볼 수 있다. 이는 제안한 데이터 융합방법이 초음파 센서의 넓은 지향각에 의한 오차를 줄이는데 기여하고 있음을 입증하고있다.

4.2 벽면라인 검출 실험 결과

본 논문에서는 Hough 변환을 이용한 벽면라인 검출 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 한 변의 길이가 190[Cm] 인 사각 및 삼각의 격자형 환경에서 벽면라인검출 실험을 실시하고 그 결과를 최소 자승법을 이용한 경우와 비교 검토하였다.

이를 위해 센서 플랫폼을 $0^\circ \rightarrow +180 \rightarrow 0 \rightarrow -180 \rightarrow 0^\circ$ 의 순으로 회전시키면서 1.8° 간격으로 초음파를 방사하여 두 초음파 센서로부터 얻어진 데이터를 융합한 후 Hough 변환알고리즘을 적용하였다. 이때 Threshold 값은 8로 결정되었다. Fig. 10 의 (a)는 사각형환경에 대한 라인 추출결과를 나타낸 것이다. 융합된 거리데이터는 경면반사가 일어나지 않는 범위 내에서는 비교적 정확한 값을 보이고 있지만 곡면부에서는 큰 오차를 보이고 있다. 여기서 최소 자승법을 이용한 라인추출은 각각

의 벽면에 대해 영역을 분할하고 그 영역에서 실제환경과 융합된 거리정보간의 오차가 최소가 되도록 1차로 근사화시켜 얻어졌다. 그 결과 실제 환경과는 많은 오차가 발생함을 볼 수 있다. 그러나, 제안한 알고리즘에 의해 얻어진 라인 추출 결과는 실제 환경과 매우 유사함을 알 수 있다. (b)는 초음파의 다중반사가 매우 심한 삼각 환경에 대한 실험결과를 나타낸 것으로, 이 경우에도 제안한 알고리즘이 초음파 센서의 경면반사에 의한 오차를 줄이는데 효과가 있음을 알 수 있다.

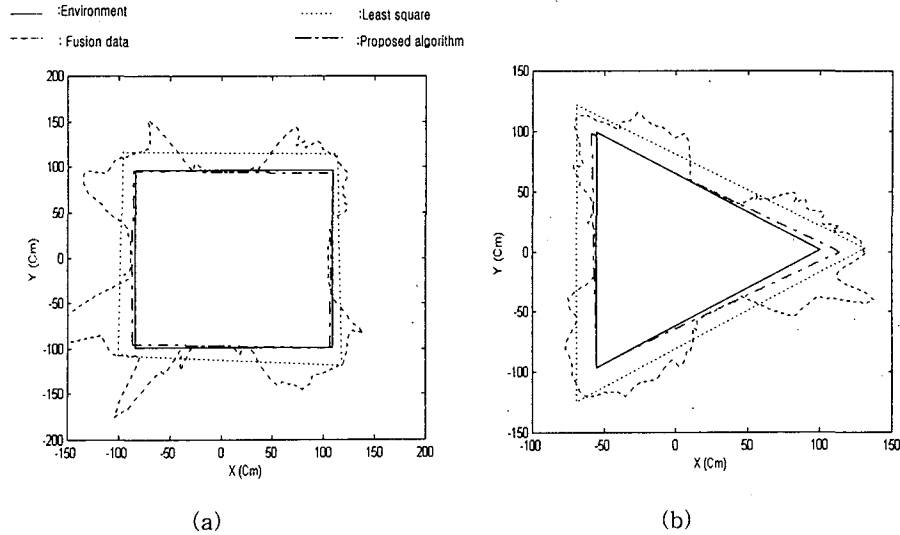


Fig. 10. Results of line extract experiments

5. 결 론

본 논문에서는 초음파 센서를 이용한 이동로봇용 환경 인식 시스템구성시 초음파 센서의 넓은 지향각에 의한 거리오차를 보정하기 위해 복수의 초음파 센서를 이용하여 이로부터 얻어진 데이터를 기하학적 융합 알고리즘을 제안하였다. 또한 벽면라인 검출에 있어서 경면반사에 의한 영향을 줄이기 위해 Hough 변환을 이용한 벽면라인 검출 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법에 대한 유효성검증을 위한 실험을 실제 환경에서 실시한 결과 데이터 융합에 의해 넓은 지향각에 의한 오차를 줄임으로서 보다 정확한 벽면과의 거리 정보를 얻을 수 있다. 또한 Hough 변환 알고리즘을 이용한 라인 검출 알고리즘은 단순하면서도 경면반사에 의한 영향을 줄이는데 매우 효과가 있음을 알 수 있었다. 이러한 사실로부터 본 논문에서 제안한 알고리즘은 초음파를 이용한 이동로봇

의 환경인식 및 기타 계측분야에 응용이 기대 된다.

참고문헌

- [1] Yoshiaki Nagashima and Shin'ichi Yuta "Ultrasonic Sensing for a Mobile Robot to Recognize an Environment", *Yamabico Symposium*, pp.23~30, July 1992.
- [2] 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, June 1990.
- [3] Borenstein, J. and Koren Y. "Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robot Obstacle Avoidance ", *IEEE Transaction on Robotics and Automation* , Vol. 11, No. 1, pp.132-138, Feb. 1995.
- [4] Young Joon Han and Hern Soo Hahn "2쌍의 초음파 센서를 이용한 측정 면의 위치측정 및 종류 분류 기법", *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp.747~753 Dec. 1998.
- [5] Young Joon Han and Hern Soo Hahn "Localization and Classification of Target Surfaces using Two Pares of Ultrasonic Sensors", *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 12, No. 6, Dec. 1998.
- [6] J. M. Manyika and H. F. Durrant-Whyte "A Tracking Sonar Sensor For Vehicle Guidance", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 424-429, 1993.
- [7] Roman kuc and M.W.siegel, " Physically Based Simulation Model for Acoustic Sensor Robot Navigation", *IEEE Trans on Patten Analysis Machine Intelligence*, Vol. 9, No. 6. Nov. 1987.
- [8] R. C. Luo and M. G. Kay " Multisensor Integration and Fusion in Intelligent System", *IEEE Trans. Sys. Man Cybern.*, Vol. 19, 901-931, Dec. 1989.
- [9] P.M. Morse and K.U. Ingard, *Theoretical Acoustics*. New York: McGraw Hill, 1968.
- [10] J. L.Crowley, " Dynamic World Modeling for an Intelligent Mobile Robot Using a Rotating Ultrasonic Ranging Device", *Proc. IEEE. Rob. Automation.*, Louis, MO, pp.128-135. 1985.
- [11] 차영배 著, *Micro Controller 80196*, 다다미디어, 1997.