

초음파 센서를 이용한 AGV의 주행 환경 인식과 간단한 벽면 따르기 알고리즘

김성중\*, 이정웅\*\*, 이장구\*\*\*

\*전북대 대학원 제어계측공학과, \*\*전북대 대학원 메카트로닉스공학과, \*\*\*전북대 전자정보공학부

Driving Environment Recognition and a Simple Wall-Following Algorithm for AGV Using Sonar Sensor

Seong-joong Kim\*, Jeong-woong Lee\*\*, Chang-goo Lee\*\*\*  
Chonbuk National University

**Abstract** - This paper presents the method of AGV(Automatic guided vehicle)'s moving environment(plane, corner, edge) recognition using SONAR sensor configuration. As for the SONAR sensor, the Crosstalk effect has been generally considered as an inevitable noisy phenomenon in the indoor environment. However, this effect can be used as a clue for classifying and localizing targets in the indoor environment if those can be controlled and used well. EERUF(error eliminate rapid ultrasonic firing) is a method for firing multiple ultrasonic sensors in mobile robot application and multi-echo mode of POLARIOD Device can reduce the Crosstalk effect. Here, Crosstalk effect was reduced using EERUF and applied to the AGV with a simple wall-following algorithm in the indoor environment. This method was tested by a typical AGV with multi SONAR sensors in the laboratory environment.

**Keywords** - SONAR sensor, Crosstalk, EERUF, multi-echo mode, AGV

1. 서 론

일반적으로 이동로봇의 실내주행에 있어서 거리 측정에 사용되는 초음파 센서의 응용분야는 자기위치 인식, 장애물회피, 목표물 인식 등을 들 수 있다. 이러한 각각의 분야에서 거리 측정을 수행하는데 있어서 발생하는 어려운 문제점중의 하나가 다중반사효과(Crosstalk)다[1]. 다중반사효과란 그림1처럼 물체들에 재 반사되어 원치 않는 2차, 3차 또는 그 이상의 반사를 일으켜 그에 의한 Echo가 수신되는 것을 말한다. 그림1은 다중반사의 발생 경로를 보여주고 있다.

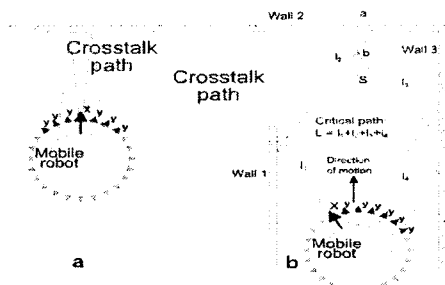


그림1. 다중반사효과의 경로  
Fig1. Crosstalk path

거리 계측을 위주로 하는 초음파 센서의 응용분야에서 다중반사는 치명적인 노이즈로 간주되므로 이를 제거하기 위하여 초음파 센서 주변에 흡음체를 부착하고, 발신 후

되돌아오는 최초의 Echo 이외의 모든 Echo를 배제하는 경우가 대부분이다. 그러나 이러한 다중 반사효과를 유발 할 수 있는 기하학적 조건을 능동적으로 고려해 이용하면 물체와의 거리 이외에도 물체의 개략적인 형상의 인식에도 사용될 수 있는 유용한 정보를 제공할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 초음파 센서가 다중 반사효과가 발생한다는 것을 고려하고 또한 이를 이용하는 EERUF(error eliminate rapid ultrasonic firing)[1] 방법을 적용하여 실내 환경을 효과적으로 인식하고, 이를 속도차 조향 방식인 AGV를 제어 해서 간단한 벽면 따르기 알고리즘을 실현해 보았다. 본 연구에서는 실내공간을 2차원으로 가정하였고 측정의 대상이 되는 목표물의 종류는 그림2 에서와 같이 인공적인 구조물이 가질 수 있는 가장 보편적인 형태인 평면(Plane), 코너(Corner), 에지(Edge)로 제한하였다[2].



(a) 평면 (b) 코너 (c) 에지  
그림2. 실내공간의 보편적인 목표물의 종류  
Fig2. General Features of object

2. 본 론

2.1 Sonar Sensor

TOF(Time of flight) 센서의 경우, 하나의 Transducer로 Ultrasound wave의 Transmitter와 Receiver(T/R transducer)의 기능을 할 수 있다. Transducer가 transmitter로 동작할 때는, 펄스(Ultrasound wave) 발생하게 되고, 그러한 후에 receiver 모드에서는 반사되어오는 Ultrasound wave의 echo 신호를 읽어, 그때까지의 시간과 속도에 대한 관계식으로 물체와의 거리를 측정하게 된다. Ultrasound wave는 거리의 제곱으로 비례해서 원추형의 Field of View를 가지면서 퍼져 간다[3][4]. 초음파 신호의 음압의 크기는 아래의 수식으로 표현될 수 있다.

$$P(\theta) = \left| \frac{2J_1(k \cdot a \cdot \theta)}{k \cdot a \cdot \theta} \right| \quad (1)$$

거리와 음압은 거리의 제곱과 반비례하므로 거리가 멀어지면 에너지가 감소하게되어 에너지를 가질 수 있고 또한, 종종 신호를 못 읽기도 하고 다른 센서에서 발생하는 다른 초음파로부터의 반사파의 영향으로 기대치 않은 값이 나오는 경우도 있다. 이러한 초음파 센서의 오류를 줄이는 장치를 개발하기 위해서는 Ultrasound wave의 실제적인 특성을 완벽히 이해하는 것이 중요하다. 초음파 센서의 동작을 연구한 보고서에 의하면[6], POLARIOD 계열의 초음파 센서는 거리(0.12m~6m)와 방사각(-40° ~40°)에서 그림3과 같이 동작을 한다. 그림3에서 보여지는 것처럼 -12° ~12°에서 측정된 데이터가

가장 정확한 거리 측정이 가능하고,  $-17^{\circ} \sim -22^{\circ}$  와  $17^{\circ} \sim 22^{\circ}$  에서도 비교적 신뢰도가 높지만 노이즈의 영향을 받을 수 있다.

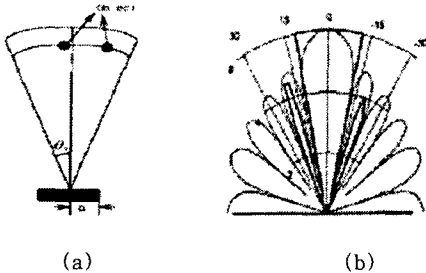


그림3. (a) Field of View (b) 초음파 센서의 빔 패턴  
Fig3.(a) Field of View. (b) the beam pattern of SONAR sensor

## 2.2 AGV의 주행 환경 인식

### 2.2.1 Multi-Echo mode Sonar System

본 논문에서는 주행 환경 인식을 위해서 POLAROID Device를 사용하였다. 이는 초음파 센서(Polaroid 600 Series Instrument Grade Electric Transducer)와 거리 모듈(6500 Series Ranging Module)로 구성되어있다. 이 디바이스의 특징은 부가적인 인터페이스회로가 필요 없고, 최소 0.15m에서 최대 11.5m 까지 거리 측정이 가능하다(5). 회로가 간단하고 오차는  $\pm 1\%$  이내의 정확성 때문에 로봇의 응용분야에 가장 많이 사용된다. 실험을 위해서 다중-에코 모드 초음파 시스템을 구성하였는데, 간단히 그림4와 같이 표현되어질 수 있다. 한 개의 ATC89c2051  $\mu C$  (micro-controller)에 의해서 두개의 ATC89c2051  $\mu C$ 가 동기화 되어서 각각 하나의 초음파 센서와 거리 모듈을 제어해서 측정된 거리 정보를 Master Control Unit에 전달해서 로봇의 주행 환경을 인식한다.

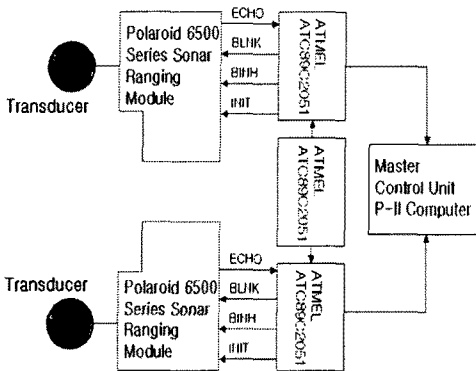


그림4. 다중-에코 모드 초음파 시스템  
Figure4. Multi-echo mode SONAR system

거리 모듈은 BLNK(External blanking input)의 인가되는 신호 의해서 다중-에코 모드로 동작하며 물체의 간격을 7.5cm까지 구분이 가능하다. 한가지 알아두어야 할 기구 적인 제한사항이 있는데, 센서로부터 신호가 인가되면 2.38ms동안 내부적인 blanking 신호에 의해서 거리 측정을 할 수 없다. 왜냐하면 transmitter가 신호를 16개의 고주파 펄스를 발생시킨 후 receiver 모드로 변하기 전에, transmitter의 에너지가 완전히 소멸될 시간이 필요한데 그 시간이 2.38ms이다(5). 따라서 이 모듈은

40.5cm보다 작은 거리는 측정이 불가능하다. 그림5는 다중-에코 모드의 타이밍 도를 보여주고 있다.

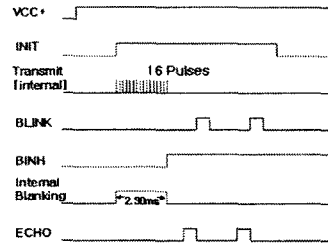
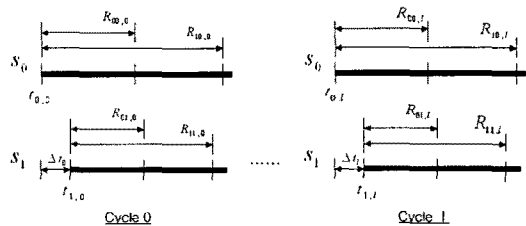


그림5. 다중-에코 모드 타이밍도  
Fig5. Multi-Echo mode timing diagram

### 2.2.2 Multi-echo mode를 이용한 환경 인식

EERUF(Error eliminating rapid ultrasonic firing.) 방법은 J.Borenstein과 Y.Kohen에 의해서 소개되고 발전되었다(1). 이 방법은 연산속도가 빠르고, 정확한 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그림6은 EERUF의 방법과 Polaroid Device의 다중-에코 모드를 적용하였고 초음파 센서 두 개를 이용하여 자기의 초음파 신호에 의한 거리( $R_{00}, R_{11}$ )와 다중반사효과에 의한 거리( $R_{01}, R_{10}$ )를 측정하는 방법을 보여 주고 있다. 이때 정보의 정확성을 위하여 충분히(10회 이상) 측정을 하고 그중 최대·최소 값을 버리고 중간 값들의 평균값으로 대표 값을 정한다(표1).



$S_k$ : 초음파 센서,  
 $\Delta t_i$ : 지연시간,  
 $t_{k,j}$ :  $k$  사이클에서 초음파신호가 발생한 시간,  
 $R_{k,j}$ :  $k$  센서에서 발생한 신호를  $j$  센서에서 측정된 거리  
 $C_1$ : 초음파 신호 발생 사이클

그림6. 다중-에코 모드 거리정보  
Fig6. Multi-echo mode distance information

표1. 다중-에코 모드를 이용하여 측정된 거리

	Cycle 0		Cycle n	
	1st echo	2nd echo	1st echo	2nd echo
$S_0$	$R_{00,0}$	$R_{10,0}$	$R_{00,n}$	$R_{10,n}$
$S_1$	$R_{01,0}$	$R_{11,0}$	$R_{01,n}$	$R_{11,n}$

이때  $R_{00}$ 는  $r_0$  값과 같고,  $R_{11}$ 는  $r_1$  과 같다.  $R_{01}$ 와  $R_{10}$ 는 원래 같은 값으로 나와야 하는데, 약간의 오차로 같은 값이 나오질 않는다. 따라서  $r_2$ 는 식(2)와 같이  $R_{01}$ 과  $R_{10}$ 이 조합으로 결정된다. 표2는 50회 측정을 해서 값들을 기록하였다. 예제의 경우 센서의 Field of view가 가장 좁아서, 세 특징면 중에서 제일 어렵다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 r_0 &= R_{00} \\
 r_1 &= R_{11} \\
 r_2 &= (R_{01} + R_{10}) / 2
 \end{aligned} \tag{2}$$

그림7은 위에서 실험한 세 환경을 간단히 도식화한 그림이다. S'는 가상의 초음파 센서라고 가정을 한다.

표2. 측정 거리 값과 Field of View와 standard deviation

Feature	Measure (R)	Field of View (degree)	std (mm)
평면	r <sub>0</sub>	-12.6~13.5	1
	r <sub>1</sub>	-13.5~13.5	1
	r <sub>2</sub>	-13.5~13.5	2
코너	r <sub>0</sub>	-11.7~9.9	2
	r <sub>1</sub>	-8.1~10.8	2
	r <sub>2</sub>	-11.7~10.8	3
에지	r <sub>0</sub>	-8.1~8.1	2
	r <sub>1</sub>	-9.9~5.4	2
	r <sub>2</sub>	-9.9~8.1	3

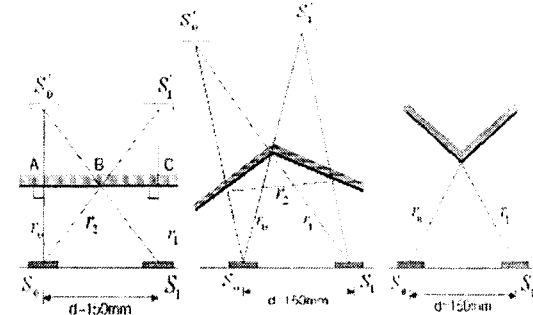
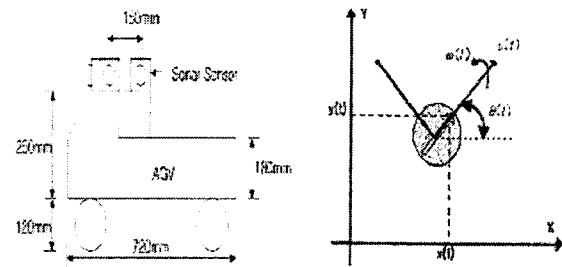


그림7. 평면, 코너, 에지의 특징 측정  
Fig7. Measure the features

2.3 벽면 따르기 알고리즘

2.3.1 로봇의 기구학

이 논문에서 실험한 AGV(Automatic guided vehicle)의 기구학적인 모델은 그림8과 같다. 그림8(a)는 AGV의 규격(폭:460mm)을 보여주고 있고, 초음파 센서는 전방에 6개가 설치되어 있어서 전방과 양쪽 측면의 벽 정보를 받아들인다. 구동부는 두 개의 BLDC 모터를 전륜에 설치해서 AGV를 구동하고, 조향은 두 모터의 속도 차를 이용하여 AGV의 진행 방향을 결정하는, 2륜 속도차 방식을 이용했다.



(a) (b)  
그림8. AGV의 기구학적 모델  
Figure8. Schematic model of the AGV

그림8(b)는 AGV의 이동하는 위치를 보여주고 있다. 전체

좌표계에서 AGV의 위치는 x(t)와 y(t)로 나타내어지고 v(t)는 진행속도, w(t)는 회전각속도, θ(t)는 로봇의 진행각도를 나타낸다. 일반적으로 2차원 공간의 시간 t<sub>n</sub>에서의 AGV의 위치는 식(3)과 같이 표현된다(7).

$$x(t_n) = x(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} v(t) \cdot \cos(\theta(t)) dt$$

$$y(t_n) = y(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} v(t) \cdot \sin(\theta(t)) dt \quad (3)$$

v(t) : 진행속도 (Translation velocity)  
w(t) : 각속도 (Rotational velocity)  
θ(t) : 진행방향 (Orientation)

매우 짧은 시간에서의 로봇의 선가속도와 각 가속도를 일정한 상수로 간략화하면 로봇의 궤적은 직선과 일정한 반지름을 갖는 원호의 조합으로 나타내어질 수 있다(8). 즉, 각속도가 0이 아니면 로봇은 식(4)처럼 원호운동을 하게된다.

$$(F_x^i - M_x^i)^2 + (F_y^i - M_y^i)^2 = \left(\frac{v_i}{w_i}\right)^2 \quad (4)$$

$$M_x^i = -\frac{v_i}{w_i} \cdot \sin(\theta(t_i))$$

$$M_y^i = -\frac{v_i}{w_i} \cdot \cos(\theta(t_i))$$

2.3.2 벽면 따르기

벽면 따르기 알고리즘은 매 100ms마다 각각의 초음파 센서로부터 읽은 거리를 버퍼에 저장했다가 10개의 데이터가 들어오면, 그중 가장 큰 값 두개와 작은 값 두 개를 버리고 나머지 중간 값의 평균으로 거리 값을 계산해서 출력 값을 결정한다. 기본적으로 좌측 벽을 따라서 이동하도록 하였으며, 좌측 벽으로부터 50cm~55cm의 거리를 유지하도록 하였다. AGV의 속도는 직진의 경우 20cm/s로 주행을 했으며 방향 전환에서는 15cm/s의 속도를 유지한다. 그림9는 좌수법을 기본으로 하는 Wall-Following 알고리즘을 보여주고 있다. 50cm~55cm의 떨어진 좌측 평면을 감지했을 경우 AGV는 자세를 보정하면서 20cm/s로 직진을 하고, 좌측 에지를 발견했을 경우는 15cm/s로 서서히 좌회전을 하고 에지를 벗어나서 평면을 만나면, 다시 일정한 거리를 유지하면서 20cm/s로 직진을 한다. 그리고 좌전방의 코너에 접해서는 충동을 회피하기 위해서 1m 앞에서 우측으로 15cm/s로 회전을 하다가 평면에 접하게 되면 20cm/s로 직진을 하게된다.

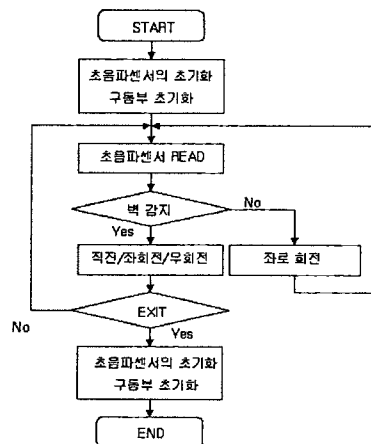


그림9. 벽면-따르기 알고리즘  
Figure9. Wall-following algorithm

### 3. 실험 결과

그림10은 POLAROID DEVICE 이용하여 벽과의 거리정보를 읽고 이를 분석한 결과(평면, 코너, 에지)를 이용하여 Wall-Following 알고리즘을 적용한 결과이다.

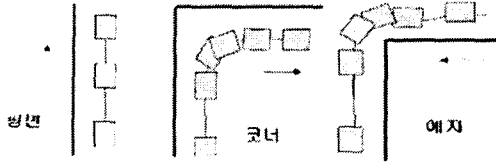


그림10. 세 특정 공간에서의 주행  
Fig10. Drive in the plan, corner and edge

벽면 따르기 알고리즘대로 평면과 코너, 에지 에서 잘 따라감을 볼 수 있다. 그림11은 실내 복도에 그림과 같이 구성을 하고 벽면 따르기 알고리즘을 적용해 넓은 공간에서 주행해 본 결과이다. 평면의 경우에는 거리 정보의 변화가 거의 없기 때문에 20cm/s로 직진을 했고, 코너나 에지의 경우는 거리 정보가 평면에 비해서 크게 변하기 때문에 15cm/s로 서서히 주행을 하면서 방향전환을 하였다.

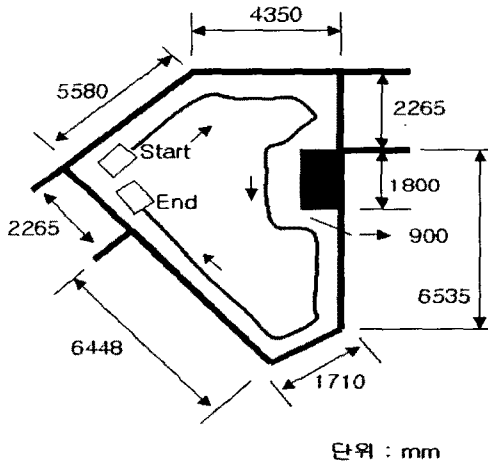


그림11. 실내 공간에서의 벽면 따르기  
Figure11. Wall-following in the indoor environment

### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 초음파 센서의 응용분야에서 노이즈로 간주되어 배제하였던 초음파의 다중반사현상을 분석, 이를 이용하여 목표물의 특징을 인식하고, 벽면 따르기 알고리즘을 이용하여 AGV를 주행시켜 보았다. 다중-에코 모드의 이용은 다중반사현상을 제거하는 효과를 가지고 있기 때문에 노이즈에 대한 강인한 특성을 보인다. 이번 연구의 핵심인 다중반사현상에 의한 Multi-Echo mode의 패턴 분석은 각각의 목표물에 대한 기하학적 특징 분석으로 형태의 특징적인 패턴을 추출해낼 수 있었다. 이번 연구는 목표물의 인식 분야에서 일반적으로 고려하는 평면, 코너, 에지 라는 단순한 형상을 갖는 물체만을 고려했지만, 추후 연구는 좀더 복잡한 구조물을 인식 가능토록 해야 할 것이다. 그리고 AGV가 좌수법을 기본으로 하는 벽면 따르기 알고리즘으로 간단하게 주행을 했

지만, 복잡한 환경에서의 원활한 자율 주행을 위해서는 전체적인 주행 환경의 인식과 현재 자기의 위치를 인식할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Johann Borenstein and Yoram Koren, "Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robot Obstacle Avoidance", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.11, No.1, 1995, pp132-138.
- [2] H.Peremans and Van Campenhout, "A high resolution sensor based on tri-aural perception.", in IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.9, No.1, 1993, pp36-48.
- [3] Roman Kuc and M.W.Siegel, "Physically based simulation model for acoustic sensor robot navigation.", in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-9, No6, November 1987, pp766-777.
- [4] J.Leonard and Durrant-Whyte, "Directed SONAR sensing for mobile robot navigation.", Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [5] POLAROID, Technical Specification for 600 Series Instrument Grade Electrostatic Transducer.
- [6] Stephen Campron and Penelope Probert, "Advanced Guided Vehicle (Aspected of the Oxford AGV Project)", 1994.
- [7] 홍기범 and 홍석교, "A simple Wall-Following Algorithm for Mobile Robot Using Sonar Sensors.", KACC, October 1998, pp760-763.
- [8] W.Burgard, D.Fox and S.Tunn, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance.", IEEE, Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.1, 1992, pp280-285.