



자율이동로봇을 위한 초음파 센서 응용기술

최병준*, 김수일*, 김춘승*, 이연정*, 이상룡**

*경북대학교 전자전기공학부, **기계공학부

1. 서론

최근 일본을 선두로 엔터테인먼트 로봇, 가정용 로봇, 휴머노이드 로봇 등 다양한 로봇 제품이 출시되면서 국내외적으로 이들 서비스 로봇에 대한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이들 서비스 로봇의 90% 이상은 바퀴를 이용한 이동 로봇(wheeled robot, 또는 mobile robot)이라 해도 과언이 아니다. 이동 로봇 관련 연구 주제로는 로봇 기구(바퀴 구조 및 몸체), 장애물 인식 및 회피, 지도 생성, 자기위치추정, 주행 제어 등 다양하다. 이동 로봇에 사용되는 센서 시스템은 이들 다양한 연구 주제의 문제해결방식과 결과의 성능을 결정하는데 있어 기본이 되는 중요한 요소라 할 수 있다.

기존 산업계에서 실용화되고 있는 대부분의 이동 로봇은 자계 센서나 적외선 센서를 이용하여 작업장 바타의 유도선 또는 광학 테이프 등으로 이루어진 고정 궤도를 따라서 운행되고 있다. 이러한 방식의 이동 로봇

은 항상 고정 궤도를 감지하면서 주행하므로 위치 제어의 특성이 우수하여 지시된 경로를 정확히 주행할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 서비스 로봇의 작업환경인 사무실이나 가정에서 고정 궤도의 설치는 불가능하므로 작업 환경에 대한 보다 높은 유연성을 가진 자율 이동 로봇의 개발이 필요하다. 따라서, 로봇이 이동할 때 수시로 변하는 주변 환경과 각종 장애물의 상태를 측정할 수 있는 센서 시스템의 개발이 요구된다.

이동 로봇의 장애물 회피 및 주행을 위해서 비전 시스템, 초음파 센서, 레이저 센서, 적외선 센서 등이 사용되고 있다. 표 1에서 언급된 것과 같이 각각의 센서들이 갖는 단점 때문에 완벽한 환경인식, 장애물 회피는 어려운 문제로 남아있어 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[7]-[49]. 본 고에서는 많은 센서들 중에서 조명의 변화에 무관하고 인터페이스가 비교적 간단하며 가격이 저렴한 장점 때문에 이동 로봇의 환경 인식용으로 널리 사용되는 초음파 센서의 응용 기술에 관해서 알아본다.

표 1. 환경 인식관련 센서들의 상대적

센서	장 점	단 점
초음파	조명의 변화에 무관 투명한 물체도 인식 간단한 구조 장거리 인식 가능	넓은 빔 폭 반사파의 산란 잡음 일차원 정보만 제공 느린 반응속도
적외선	낮은 가격 간단한 구조 빠른 반응속도	일차원 정보만 제공 장거리 인식 곤란
비전	이차원 정보 제공 우수한 정밀도	조명의 변화에 민감 투명한 물체 인식 못함 비교적 높은 가격 복잡한 인터페이스 구조 느린 반응속도
레이저	좁은 빔 폭 우수한 정밀도 빠른 반응속도	일차원 정보만 제공 장거리 인식 곤란

2. 초음파 센서의 특성 및 응용

2.1 초음파 센서의 재료적 특성[3]

초음파 센서는 기본적으로 진동자를 초음파 주파수(20kHz~수 GHz)로 진동을 발생시켜 초음파 신호를 송수신 한다. 표 2는 초음파 센서에 사용되는 다양한 진동자의 특성을 나타낸다. 이동 로봇에 사용되는 초음파 센서들은 압전 진동자형이나 정전형(electrostatic type)이 주류를 이룬다.

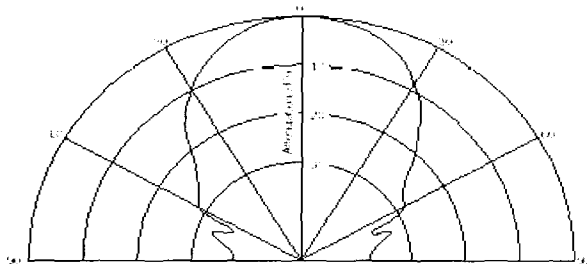
2.2 초음파 센서의 일반적인 특성[1]-[3]

① 지향성이 강하고 빔 폭이 넓다.

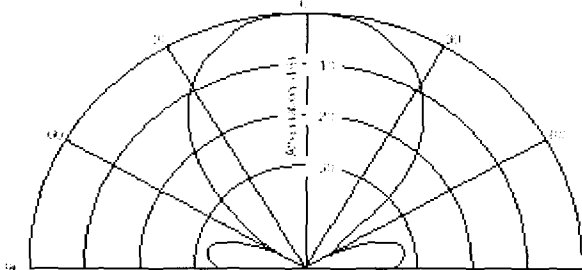
일반적으로 초음파 센서의 지향성은 발생하는 파의 각도와 음압의 관계를 측정하는 것이다. 센서 정면에서의 음압의 크기가 절반(-3dB, 경우에 따라 -6dB) 감쇠하는 시점의 빔 폭의 각도를 센서의 빔 폭이라 한다. 참고로 그림 1은 Murata 사의 제품 MA40B8S/R의 빔 지향성을 보여준다.

표 2. 초음파 센서에 사용되는 진동자의 종류

종류	특징
	수정과 같은 단결정에 고주파 전압을 인가. 재질이 안정되고 온도 계수가 적다. 낮은 주파수의 강한 초음파를 발생하기 위해서 높은 전압이 필요.
고분자 압전막	폴리 불화 비닐리덴(PVDF)의 박막에 고주파 전압을 인가. 얇은 금속판에 붙여서 초고주파 또는 MHz 대 초음파 발생. 박막이므로 다양한 형태로 제작 가능. 순수한 두께 진동을 하므로 깨끗한 초음파를 발생.
전왜 진동자	티탄산 바륨계(BT), 지르콘 티탄산 납계(RZT)등의 자기를 분극해 고주파 전압을 인가. 분말을 이용하여 다양한 형태로 제작 가능. 낮은 전압으로 초음파를 발생할 수 있다. 강력 초음파를 발생할 경우 발열이 크다.
랑즈벡형 진동자	압전 또는 전왜 진동자의 양면에 금속 불록을 고정하여 전체의 공진 주파수로 진동. 견고하며 큰 진폭에 강하다. 160℃의 고온에서 특성의 변화가 없다.
자의 진동자	금속 진동자 또는 페라이트 자기 진동자에 직류 자계와 고주파 자계를 중첩해서 인가. 30kHz이하의 저주파수에서 주로 사용. 효율이 나쁘다.



a) MA40B8 송신용



b) MA40B8 수신용

그림 1. MA40B8S/R 초음파 센서의 빔 지향성

② 매질에 따른 전파 속도가 다르다.

표 3. 매질에 따른 초음파의 전파 속도

전송 매체	전파 속도(20℃ 기준)
공기	343[m/sec]
물	1,480[m/sec]
고체 (철)	5,180[m/sec]
진공	전파하지 않음

③ 공기 중에서 감쇠가 크다.

초음파는 매질에 따라 전파 속도가 다르지만 같은 매질에 대해 먼 곳으로 갈수록 에너지가 작아지고 소멸된다. 또한 주파수가 높아지면 감쇠율도 커지고 전파 거리도 짧아진다. 예를 들면 20℃에서 200kHz 인 경우 공기 중에서 5m 거리에서 60dB 감쇠된다.

④ 주파수가 높을수록 분해능이 높아진다.

초음파의 주파수가 높을수록 빔 폭이 좁아져 물체인식의 분해능이 좋아진다.

⑤ 재질에 따른 반사율의 차이가 크다.

초음파는 고체와 액체에 대해 반사율을 잘하며, 특히 금속, 유리, 종이 등은 거의 100% 가깝게 반사를 한다. 그러나 솜, 유리솜, 기타 흡음제는 초음파를 잘 흡수하므로 반사파의 검출이 어렵다.

⑥ 구조적으로 밀폐형과 개방형이 있다.

초음파 센서는 일반적으로 개방 구조로 되어 있으므로 육외에서 사용할 경우 비 등에 의한 물방울, 흙탕물, 먼지 등의 부착이 문제가 된다. 이와 같은 경우 금속으로 진동체를 밀폐한 구조로 제작된 센서를 사용한다.

⑦ 온도에 따라 음속이 변한다.

일반적으로 공기 중에서 초음파의 전파속도 $V[m/s]$ 는 $V = 331.5 + 0.6t$ 로 주어지며, 여기서 t 는 매질의 온도[℃]이다. 따라서 온도가 높을수록 전파 속도도 빨라진다.

2.3 초음파 센서 제품 비교

이동 로봇에서 널리 사용되는 초음파 센서의 대다수는 Polaroid[4]사와 Murata[5]사 두 회사에서 양산되는 제품이다. 특히 Polaroid사의 경우 센서와 인터페이스 회로 모듈을 모두 판매하며, 센서의 구입이 원활하여 초음파 응용 시스템 개발에 널리 사용되고 있다. 그리고 최근 국내의 Komantech[6]사에서도 초음파 센서가 개발되어 양산되고 있다. 표 4는 각 회사에서 양산중인 센서들의 특성을 비교한 것이며, Komantech사는 40kHz 급 센서만 양산중이다. 센서 선정에 있어 고려되어야할 사항은 성



능면에서는 빔 폭, 송수신검용 여부가 주요 사항이며 개발의 수월성면에서는 제품 수급의 용이성과 인터페이스 회로 제작의 용이성 등을 들 수 있다.

2.4 초음파 센서 인터페이스

초음파 센서 인터페이스는 초음파를 발생시키는 송신 회로와 물체로부터 반사되어 돌아오는 초음파를 수신하는 초음파 수신회로로 구성된다. 초음파 송신회로는 초음파 센서에 진동을 발생시키는 부분으로 전기적으로 초음파를 발진한다. 초음파 발진기에는 여러 가지가 있는데, 초음파 세정기나 초음파 가공기와 같이 수십 W[Watt]에서 수kW의 큰 파워를 필요로 하는 초음파 발진기가 있고 거리 검출, 장애물 검출기와 같이 수mW에서 수십W 정도의 파워를 필요로 하는 초음파 발진기가 있다. 비교적 작은 파워의 초음파 발생회로는 초음파 센서의 구동 전압에 따라 디지털 IC를 이용한 초음파 발생회로와 펄스 트랜스를 이용한 초음파 발생회로로 나눌 수 있다. 구동전압이 낮은 센서의 경우 디지털 IC를 사용한 발진회로가 적합하며, 구동전압이 높은 센서의 경우 펄스 트랜스를 이용한 발진회로가 적합하다[2].

그림 2는 검출 물체에 맞고 반사된 초음파 신호를 수신하는 회로이다. 수신되는 초음파 신호는 극히 미약하기 때문에 일반적으로 수십dB 이상의 고이득 증폭기를 필요로 한다. 증폭기를 통해서 증폭된 고주파 신호는 정류회로를 이용하여 기준전위 보다 낮은 신호성분은 제거되고 검파회로를 이용하여 고주파를 포락선(envelope)으로 변환된다. 초음파는 거리에 따라 신호의 크기가 감소하므로 초음파 송신 후 시간에 따라 수신된 초음파 신호의 증폭비를 다르게 하여야 한다. 따라서, 경과시간 증폭회로를 이용하여 검파된 포락선을 시간에 따라 증폭비를 다르게 하여 변환한다. 검출된 신호의 크기와 검출 시간을 이용하여 검출 물체의 정보를 계산할 수 있다.

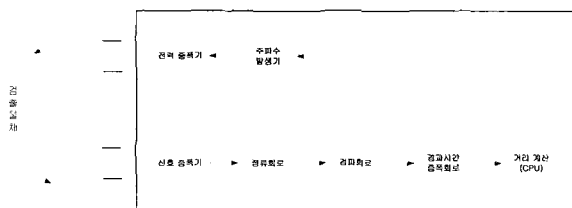


그림 2. 초음파 센서를 이용한 거리 측정 시스템

초음파 센서를 활용한 장애물 인식 연구의 경우에 하나의 초음파 센서로 측정하기가 어려운 장애물의 형상을 다수의 센서를 사용하여 측정하는 경우도 있다. 다수의 센서를 이용하여 송신파의 빔 폭이 작아지는 특성을 이용하거나 송신기 하나에 수신기 여러 개를 이용

하여 벽, 모서리, 코너 등을 구분하기도 한다. 이러한 경우에는 초음파 수신 파형의 형태 및 최대치의 획득과 추가적인 신호처리가 필요하다. 그림 3은 장애물의 형상을 인식하기 위한 다중 초음파 센서를 이용한 시스템의 블록도이다.

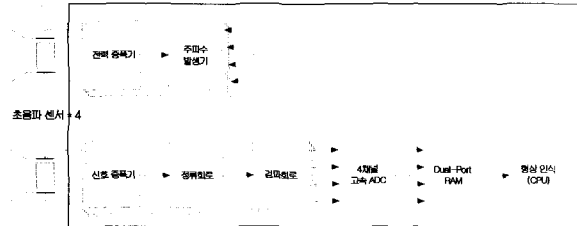


그림 3. 다중 초음파 센서를 이용한 장애물 형상 인식 시스템

2.5 초음파 센서 응용 예

초음파 센서는 비접촉식 거리계, 액면계, 충돌예방 장치, 여균 탐지기, 유량계, 두께계, 지질탐사기, 의료용 진단장치, 세척기 등 다양한 산업 분야에서 응용되고 있다. 한편 이동 로봇에서의 초음파 센서 응용 예는 매우 많으나 그 중 초음파 센서의 개수, 배치 방법 등을 기준으로 비교될만한 몇 가지를 살펴보면 표 5와 그림 4 ~ 그림 11와 같다.

표 4. 초음파 센서의 종류 및 사양

제조사	제품명	구조	저항성 (-3dB)	공칭 주파수	공급 전압	직경(㎜)× 두께(㎜)	용도
Polaroid	40KT08/R08	밀폐형	125°	40kHz	15V _{rms}	9.1×4.6	송신/수신
	40KPT18	밀폐형	85°	40kHz	20V _{rms}	18×12	송수신 겸용
	40KT25/R25	밀폐형	30°	40kHz	20V _{rms}	25×12	송신/수신
	40LT10/R10	개방형	72°	40kHz	10V _{rms}	9.7×6.7	송신/수신
	40LT16/R16	개방형	55°	40kHz	20V _{rms}	16.2×12.0	송신/수신
	120KHP25	밀폐형	10°	125kHz	50V _{rms}	25×12.5	송신용
	200KHP18	밀폐형	10°	210kHz	50V _{rms}	18.5×11.2	송신용
	600 series	개방형	12° (-3dB)	50kHz	AC 150V _{peak} DC Bias 150V	41.91×8.33	송수신 겸용
Murata	7000 series	개방형	17° (-3dB)	50kHz	AC 200V _{peak} DC Bias 200V	28.7×16.25	송수신 겸용
	MA40E7S/R	밀폐형	100°	40kHz	80V _{rms}	18×12	송신/수신
	MA40E6-7	밀폐형	75°	40kHz	140V _{rms}	9.9×7.1	송수신 겸용
	MA40E8S/R	개방형	50°	40kHz	20V _{rms}	16×12	송신/수신
	MA40E7	개방형	44°	40kHz	100V _{rms}	16×12	송수신 겸용
MA40S4S/R	개방형	80°	40kHz	20V _{rms}	18×12	송신/수신	

Murata	MA80AI	원회형	7	75kHz	130V _{rms}	47-245	송수신 겸용
	MA200AI	원회형	7	200kHz	130V _{rms}	19-11	송수신 겸용
	MA400AI	원회형	7	400kHz	130V _{rms}	11-105	송수신 겸용
Komantech	PT-R40-18N	직방형	80	40kHz	60V _{rms}	18-12	송신 수신
	PC-R40-18N	직방형	80	40kHz	60V _{rms}	18-12	송수신 겸용
	TR-R40-16P	원회형	55	40kHz	60V _{rms}	16.36-12.06	송신 수신
	AT-R40-16P	원회형	100	40kHz	10V _{rms}	9.95-7	송신 수신
	AT-R40-12P	원회형	85	40kHz	60V _{rms}	12.6-9.2	송신 수신

표 5. 초음파 센서를 이용한 이동로봇

Model	제작	용도	초음파 센서 응용	비고
CAIR 2	KAIST	지능형 이동로봇	21개의 센서를 원형으로 배치하여 다수의 장애물을 동시 발견, 장애물 회피	그림 4
ISSAC	KIST	지능형 이동로봇	9개의 센서를 전방에 원형으로 배치하여 장애물 회피, 물체 추적	그림 5
MORIS	포항공대	사유퍼달, 청소	전방에 8개의 센서를 배치하여 장애물 회피	그림 6
RTAS	KAIST	명인 안내	전방에 8개의 센서를 배치하여 장애물 인식	그림 7
SIAMO	Alcala Univ. Spain	자율 주행 로봇	8개씩 4조의 센서모듈을 직사각형 물체의 각 꼭지점에 배치	그림 8
Brutus	Federal Univ. of Espirito Santo Brazil	자율 주행 로봇	16개의 센서를 원형으로 배치	그림 9
Yamabico	Tsukuba Univ. Japan	자율 주행 로봇	다수의 센서를 이용한 sonar-ring	그림 10
GuideCare	Michigan Univ. USA	명인 안내	전방에 8개와 좌우에 1개씩 배치	그림 11
Hanuri N	한울 로보틱스	자율주행로봇	24개의 센서를 2열 원형으로 배치	그림 12

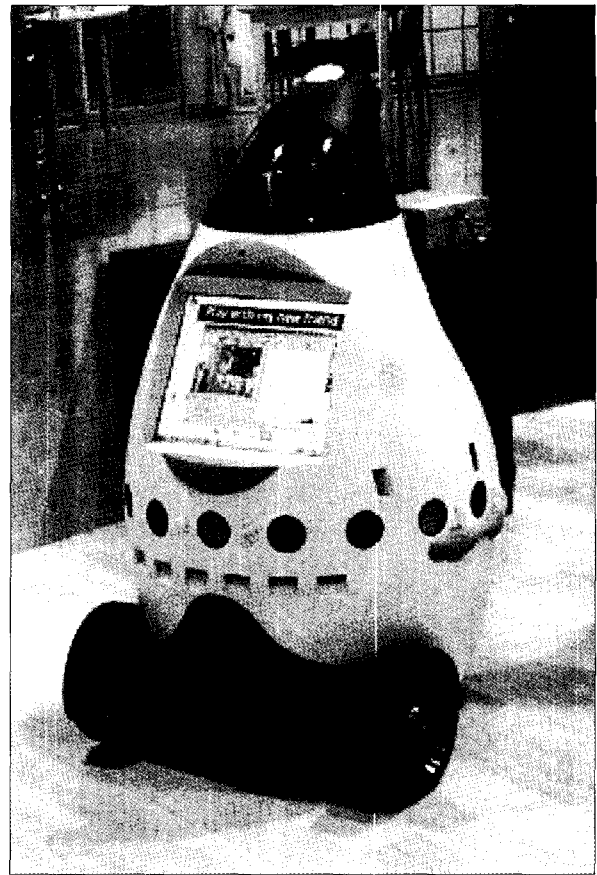


그림 5. ISSAC [2001]

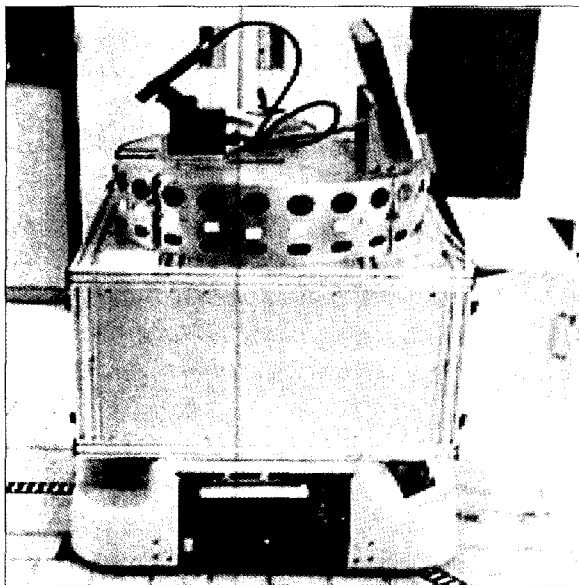


그림 4. CAIR 2 [1993]

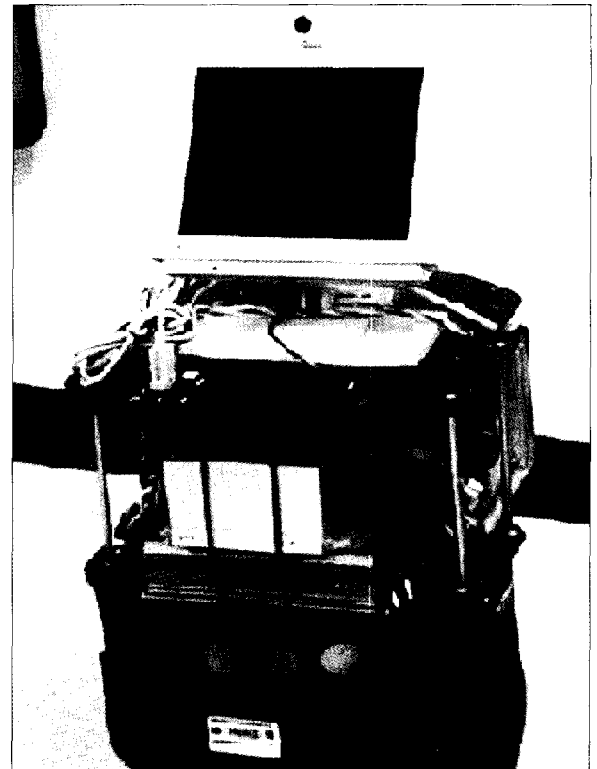


그림 6. MORIS [2000]

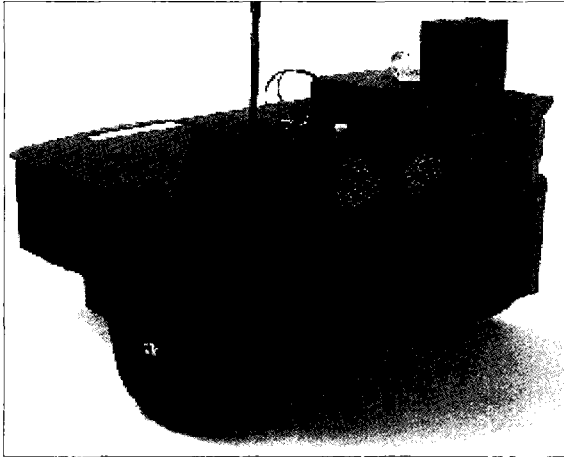


그림 7. RTAS



그림 10. Yamabico [2000]

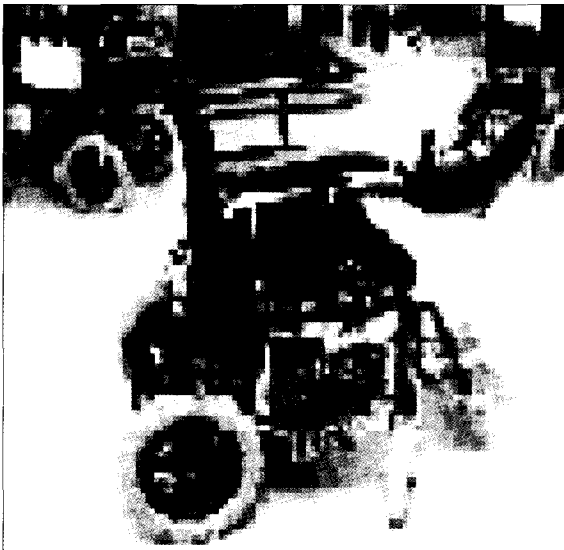


그림 8. SIAMO [2001]

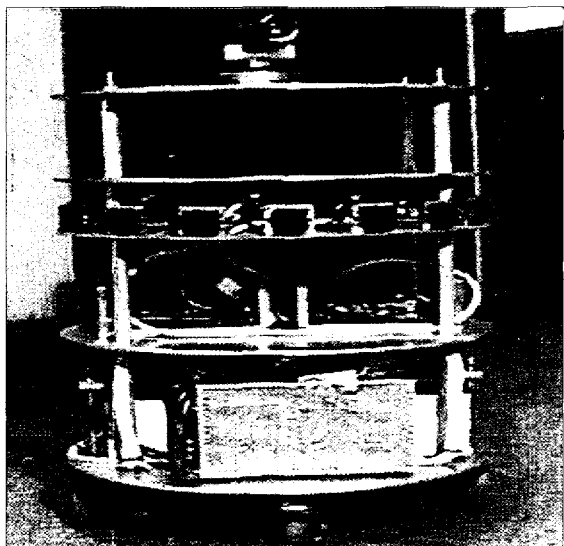


그림 9. Brutus [2000]



그림 11. GuideCane [2001]



그림 12. Hanuri-N [2001]

3. 이동로봇에서의 초음파센서 응용기술 동향

앞서 언급한 대로 초음파센서는 값이 싸며 사용하기 쉽다는 점과 레이저 센서와 비전 센서보다 소모전력이 적고 신호처리장치가 비교적 간단하다는 장점을 지니고 있다. 이러한 장점들 때문에 이동로봇이 주변환경에 대한 인식을 하거나 지도를 작성하는데 있어서 초음파센서가 상대적으로 다른 센서에 비해 많이 사용된다. 따라서 장애물과의 거리 측정이나 즉각적인 반응에 의한 장애물 회피 등에는 매우 유리하다. 그러나 초음파 센서는 넓은 빔 폭 때문에 각 정밀도(angular resolution)가 나쁘다는 주요 단점을 가지고 있다. 그래서, 정밀한 장애물 형상 인식이나 지도 작성 등에는 어려움이 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다수의 센서를 이용하거나 다른 종류의 센서와 함께 사용하는 방법들이 연구되어지고 있다. 본 장에서는 이동 로봇에서의 다양한 초음파 센서 응용기술을 거리 측정, 물체 인식, 장애물 회피 및 주행, 지도 생성, 자기 위치 추정, 다른 센서와의 융합으로 나누어 살펴본다.

3.1 거리 측정 (distance measurement)

초음파 센서를 이용한 주변 환경 인식 방법 중에서 물체와의 거리측정이 기본을 이룬다. 이동로봇이 주행하기 위해서는 주위 물체들간의 거리 측정을 하여야 하

는데, 여러 가지 거리측정 방법중 대표적인 방법이 초음파센서와 반사 물체간의 비행시간(TOF: time of flight)을 측정하는 것이다. 거리측정에 사용하는 간단한 수식은 $d=(c \times \text{TOF})/2$ 이다. 여기서 c 음파 속도이고, d 는 측정거리이다.

기본적인 TOF 측정 방법은 초음파 신호를 송신 후 물체에 반사되어 돌아오는 반사파의 크기가 일정한 문턱값(threshold level)을 가질 때까지의 시간으로 TOF를 결정하는 방법이다. 그림 13에서 t_0 가 TOF에 해당한다[7].

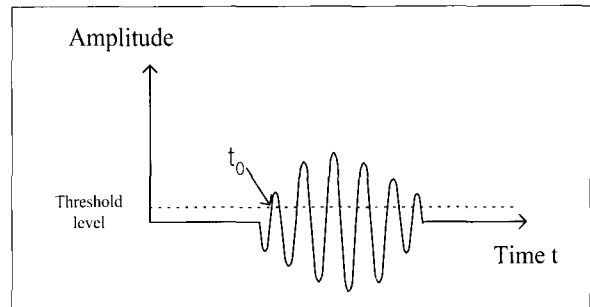


그림 13. 수신신호의 TOF 측정

그러나 이와 같은 거리 측정방법은 공기중의 매질의 영향, 온도, 주파수 증가에 따른 감쇠, 물체의 초음파 흡수 등의 영향으로 적절한 크기의 문턱값을 정하기가 어렵고 잡음에 민감하고 정확도가 떨어질 수 있다. 거리측정에 정확성을 기하기 위해서는 사용 환경에서 음파의 속도를 측정하기 위한 도구 등과 반복 측정을 통하여 문턱값을 보정하여야 한다.

한편 정밀한 거리 측정을 위한 여러 신호처리 방법들이 있으며 주요한 몇 가지를 살펴보면 다음과 같다. Correlation 방법은 송신 신호를 기준으로 수신 신호와의 norm 오차를 최소화하거나 송수신 신호간의 cross-correlation이 최대화하는 시간을 계산하여 TOF 시간을 측정하는 방법이다[8]. 송신파를 FSK(binary frequency shift-keyed) 신호로 변조하고 수신파의 서로 다른 두 주파수의 신호에 대한 위상정보를 이용하여 TOF 시간을 측정하는 방법이 있다[9]. 또한, 기본적인 문턱값을 이용한 방법과 DFT(discrete Fourier transform)을 이용하여 파장 내의 위상 차를 계산하는 방법(phase shift method)을 함께 사용한 방법도 있다[10]. 최근에는 실시간성을 고려하여 주파수 변조 송신과 correlation 방법을 결합한 방법도 발표된 바 있다[11].

3.2 물체인식 (object recognition)

일반적으로 이동 로봇 주변 장애물에는 위치 및 형태가 고정되어 있는 고정 장애물과 시간에 따라 위치 및



형태가 변화할 수 있는 시변 장애물로 분류할 수 있다. 로봇이 자율적으로 주어진 임무를 수행하기 위해서는 장애물들의 기하학적 형태 및 작업 환경정보에 대한 인식이 무엇보다 중요하다. 초음파 센서를 이용한 로봇 주위의 물체(환경) 인식에 있어서는 단일 초음파 센서나 다중초음파 센서를 이용한 방법들이 연구되어지고 있다. 이러한 물체(환경) 인식은 로봇의 자율이동을 위한 지도생성, 자기위치추정, 장애물 회피 연구 등에 있어서도 공통적으로 중요한 연구 주제이다.

실내 환경에서 주요 인식 대상으로는 그림 14과 같은 벽, 코너, 모서리, 원기둥 같은 실내 구조물과 더불어 장애물이 될 수 있는 의자, 병, 캔 등이 있다. 실내 구조물이나 장애물을 인식하는데 있어 가장 큰 문제는 초음파의 넓은 빔폭과 느린 전파속도라 할 수 있다. 즉, 넓은 빔폭으로 인하여 평면(벽)과 코너가 구별되지 않거나 장애물 폭의 측정에 오차가 발생하며, 보다 정확한 장애물 형태 구분을 위하여 여러 번의 측정을 할 경우 느린 전파속도로 인하여 측정 시간이 길어지는 문제가 발생하는 것이다.

이를 해결하기 위하여 여러 방법이 시도되어 왔다. 하나의 초음파 센서를 사용한 연구는 인식 대상에 따라 달라지는 수신 신호 파형의 여러 특징값을 이용하여 신경회로망 학습 방법으로 물체를 분류하는 경우가 많다 [12][13]. 여러개의 센서를 이용한 경우에는 가운데 하나의 송수신 겸용 센서와 좌우에 두 개의 수신 센서를 이용한 경우[14], 가운데 하나의 송수신 겸용 센서와 송신부와 수신부를 좌우에 각각 하나씩 갖는 경우[15], 두 개의 송수신 겸용 센서를 사용한 경우[16]으로 나누어진다. 이와 같이 다중 센서를 사용한 경우에는 센서 배열과 대상 물체와의 기하학적 관계로부터 반사파에 대한 TOF 정보만을 이용하여 인식하거나 수신파의 envelope와 전압 크기를 함께 이용하여 보다 높은 인식률을 얻는 것이 주요 연구 주제이다.

한편, 2차원의 센서 배열(예 8 x 8)을 이용하거나 1차원 센서 배열(예 1 x 8)을 스캔하여 얻어진 거리 정보로부터 신경회로망 학습 방법 등을 통하여 원기둥, 정육면체, 사각블록, 구 등의 3차원 물체 인식에 관한 연구도 이루어지고 있다[17].

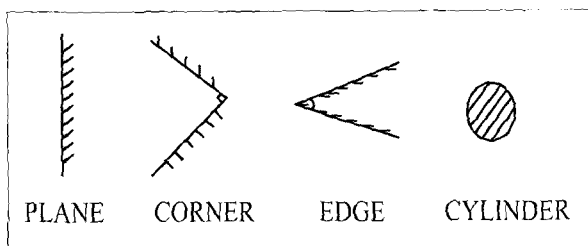


그림 14. 실내 환경에서 주요 인식 대상의 기본 형태

3.3 장애물 회피 및 주행 (obstacle avoidance and navigation)

서비스 로봇의 활동영역에는 장애물이 존재하며, 로봇이 임무를 완수하기 위하여 장애물 회피는 불가피하다. 로봇의 장애물 회피 경로계획(collision-avoidance path planning)에는 크게 전역 경로계획(global path planning)과 국지적 경로계획(local path planning)이 있다. 전역 경로계획 문제는 환경에 대한 정보가 주어진 경우에 최단거리경로 등 오프-라인으로 최적 해를 구하는 문제이고, 국지적 경로계획 문제는 미지의 환경에서 센서로 장애물을 인식하여 온-라인으로 장애물 회피 경로를 계획하는 문제이다. 장애물회피 경로계획에 관한 연구는 visibility graph 방법, voronoi diagram 방법, cell decomposition 방법, configuration space 이용 방법, potential field 방법 등 매우 많다. 초음파 센서를 이용한 로봇의 장애물 회피 경로계획은 국지적 경로계획 문제에 해당하며 대부분 potential field 방법을 기본틀로 하고 있다.

벽 따르기(wall following)은 이동 로봇의 주행과 장애물 회피에 있어서 중요하면서도 가장 기본적인 방법이다. 벽 따르기는 로봇이 벽면과 일정한 거리를 유지하면서 이동하는 것이다[18]. 초음파 센서를 원형을 배치하고 센서 배열의 수신 정보로부터 벽의 적인 정도를 판단하여 단순한 벽뿐 아니라 그림 15와 같이 꺾여 있는 벽면도 따라갈 수 있도록 한 경우도 있으나, 이 경우에는 우측에 있는 장애물을 고려하지 않을 경우 좁은 통로 등은 지나 갈 수 없는 단점이 있다[19]. 우측에 있는 장애물과 초음파 센서 값의 부정확성을 고려하여 로봇의 주위환경을 신경망회로의 역전파 학습기법을 사용하여 인식하는 알고리즘이 연구된 바도 있다[20]. 이러한 방법은 긴 복도를 따라 움직이면서 청소나 문서 전달 등을 목적으로 하는 서비스 로봇에 기본적으로 사용되는 방법이다.

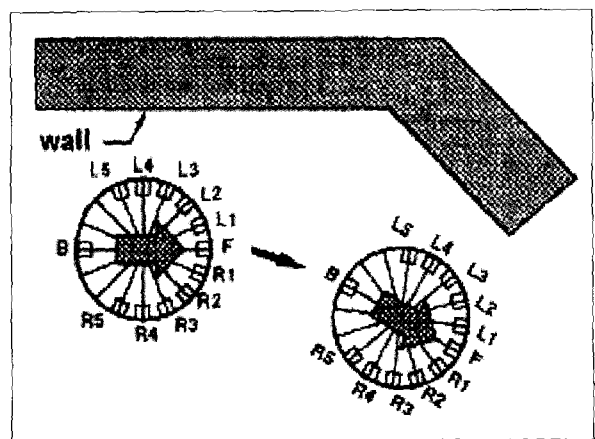


그림 15. 벽 따르기 주행 예

벽 따르기 방법은 벽이라는 환경의 제한이 있어 보다 복잡한 작업환경에서의 자율 이동에 적용하기는 어려움이 따르므로 장애물 회피 및 경로계획을 위하여 여러 방법들이 연구되어 왔다. 초음파 센서를 이용하여 장애물 회피에 많이 이용되었던 방법들 중에 가장 기본적인 방법으로는 모서리 감지 방법이 있다. 이 방법은 초음파 센서를 이용하여 장애물의 모서리 부분을 인식하고 모서리가 한 장애물의 끝 부분일 것이므로 모서리 좌우로 회피해 가는 방법이다. 하지만, 정확한 모서리 정보를 획득하기 위하여 로봇이 장애물 앞에 정지해야 하는 단점이 있으며, 실시간 장애물 회피가 어려우며 초음파 센서 정보가 정확하지 않을 때는 불체와 충돌할 수 있다[21].

모서리 인식 방법의 단점을 줄이기 위한 방법으로 로봇주위 환경의 정보를 확률 값으로 표현하는 certainty grid 방법과 potential field 방법을 결합한 이른바 VFF(virtual force field) 방법이 있다. Certainty grid는 로봇의 작업 환경을 바둑판 모양의 격자(셀)로 나누고 각 셀에 확신도 값(certainty value)을 부여한다. 확신도 값은 각 셀이 장애물 영역이라는 것에 대한 확신의 정도를 나타낸다. 로봇이 이동하며 장애물을 감지할 경우 측정된 거리의 셀들에 대한 확신도 값을 증가시킨다. 그러나, 초음파 센서의 빔 폭을 고려하여 중심축에서 측정된 거리에 있는 셀과 중심축에서 멀리 있는 셀의 확신도 값을 가우스 함수 등을 이용하여 차등을 주어 증가시킨다. 이와 같이 장애물 환경에 대해 certainty grid를 만들어 가면서 로봇의 장애물 회피 경로 계획은 potential field 방법과 유사한 방법을 사용한다. 즉, 최종 목표 지점과 로봇의 현재 위치와의 오차에 비례하는 흡인력 벡터와 장애물 셀과의 거리에 반비례하고 확신도 값에 비례하는 반발력 벡터의 합력 벡터의 방향으로 로봇을 이동하는 방법이다[22].

그러나 VFF 방법에서는 discrete하게 나누어진 셀의 중심 좌표 값을 이용하여 로봇의 현재 위치를 계산하므로 인접한 셀이라도 합력(반발력)의 크기 변화가 심하여 로봇의 이동 방향이 급격하게 변화하는 문제점이 있다. 예를 들어 양쪽이 벽으로 이루어진 복도와 같은 곳을 주행할 때 약간의 오차에 의해서도 로봇이 똑바로 전진하지 못하고 좌우로 진동할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 이른바 VFH(virtual field histogram)방법이 개발되었다[23]. VFH 방법은 기본적으로 VFF 방법과 유사하나 로봇이 진행할 방향을 몇 개의 섹터(sector)로 나누고 각 셀의 확신도 값으로부터 계산되는 각 섹터의 장애물 밀도(POD: polar obstacle density)를 이용하는 것이 다르다. 급격한 섹터 간의 장애물 밀도의 변화에 대한 영향을 줄이기 위하여 주위 몇 개의 섹터에 대한 평균값을 취한 이른바 smoothed POD를 사용한다. 로봇의 이동 방향은 주어진 문턱값보다 작은 smoothed POD

값을 갖는 방향으로 정해진다. 이러한 VFH 방법은 맵인 안내용 로봇에 적용되기도 하였다[24].

3.4 지도생성 (map building)

초음파 센서를 이용한 지도작성 방법으로는 크게 격자지도 방법과 모델기반지도 방법이 있다. 격자지도 방법은 앞서 설명한대로 공간을 일정한 크기의 격자(셀)로 나누고 각 셀이 장애물 영역인지에 대한 확신도 값을 부여하는 certainty grid 방법을 기본으로 한다[25][26][27](참조 그림 16). 대표적인 것으로는 히스토그램 격자(histogram grid) 방법이 있다. 히스토그램 격자 방법은 실시간 처리를 위하여 간략화된 방법을 사용하는데, 초음파 센서에 의해 장애물이 검출된 경우 센서의 중심 축 상에 있는 한 셀의 확신도 값만 증가시킨다. 그리고, 그 셀에 이르는 선상에 있는 셀에는 장애물이 없다는 것을 의미하므로 확신도 값을 감소시킨다. 추가적으로 지도 상에 센서 오차 등에 의하여 낮은 확신도 값을 갖는 셀들이 존재하게 되는데 이를 고르게 해주기 위하여 저역필터와 유사한 GRO(growth rate operator)를 사용한다.

모델기반지도는 공간을 평면, 코너, 모서리 등의 모델로 표현해서 그것을 기반으로 지도를 구성하는 방법이다[28]. 이 경우는 대부분 한 벽면이나 코너에 대한 여러 번의 측정 값을 이용하여 평면, 코너, 모서리를 구분한다. 한 평면의 경우라도 측정된 여러 선분 조각들이 직선으로 연결되지 않는 방향으로 놓이게 되는데 이들 선분 조각들을 평면을 나타내는 하나의 선분으로 정합하는 방법을 사용한다[29][30].

또 다른 방법으로는 작업 영역의 부분 부분에서 얻은 초음파 센서 정보를 신경회로망을 이용하여 분류하고 각 상황에 따른 이른바 상황 지도(situation map)를 만들어 작업 영역의 비장애물 지역(free space)을 표현하는 방법도 있다[31]. 최근에는 지역 히스토그램 격자지도로부터 직선 선분을 추출하여 직선 선분들로 구성된 모델 기반 지도를 생성하는 격자지도 방법과 모델기반 지도 방법을 혼합한 직선선분 지도 생성방법도 발표된 바 있다[32].



그림 16. 격자 지도 예



3.5 자기위치 추정 (localization)

로봇이 자신의 위치를 파악하는 것은 장애물 회피와 경로 계획에 있어서 매우 중요한 문제로 연구되고 있다. 위치 추정은 크게 상대위치 추정과 절대 위치 추정으로 나뉘어진다. 상대위치 추정은 이동로봇의 운동 즉 이동량, 속도, 가속도만을 이용하여 로봇의 위치를 알아내는 것으로 엔코더, 타코미터, 가속도계, 자이로스코프 등의 로봇 내부 센서의 정보만을 사용하는 방법이다. 하지만 상대위치 추정은 센서의 오차, 외란 등에 의한 오차가 누적되는 단점이 있다. 그래서 주기적으로 절대 위치 추정을 하여 위치를 보정할 필요가 있다. 초음파 센서를 이용한 절대위치 추정 방법으로는 지도 매핑법이 있다. 지도 매핑법이란 그림 17과 같이 센서를 이용하여 만든 지역지도와 이미 알고 있는 전역지도를 서로 비교함으로써 로봇이 전역지도의 어느 부분에 있는지 알아내는 절대위치 추정방법이다. 여기서 지역지도를 만들 때 선분 조각으로 만드는 방법[33], 벽, 코너, 모서리로 만드는 방법[34], 또는 부분적인 지역의 특징 즉 landmark를 이용하는 방법[35][36][37] 등이 있다.

한편, 자기위치 인식은 지도 생성과 불가분의 관계라 할 수 있다. 즉 로봇이 이동하면서 지도 생성을 할 때 자기위치가 정확히 인식되어야 지도가 정확히 만들어지고, 정확한 지도를 생성해야 정확한 자기위치를 추정할 수 있는 것이다. 따라서 이 두 가지를 동시에 하는 경우에 대한 연구도 진행 중이며, 이 경우 로봇의 불확실한 위치를 엔코더 센서와 초음파 센서 정보로부터 확장 칼만필터(extended Kalman filter)를 이용하여 추정하는 것이 주류를 이루고 있다[38][39].

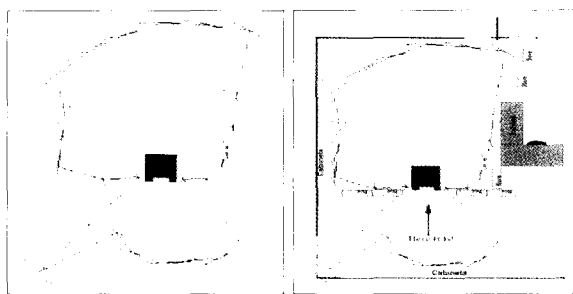


그림 17. 지도 매핑법 예

3.6 초음파 센서와 다른 센서와의 융합 (sensor fusion)

앞에서 언급한 것과 같이 센서의 종류에 따라 각각이 장단점을 가진다. 따라서 보다 정확한 환경인식을 위하여 초음파 센서의 단점을 보완할 수 있는 다른 센서, 예를 들면 비전 센서나 적외선 센서 등을 함께 사용하고 이들 센서로부터의 정보를 융합하는 방법이 연구되어지고 있다. 엄밀히 말하면 센서 융합과 센서 조합은

구분되어야 한다. 센서 융합의 경우는 동일한 측정량(거리, 각도 등)에 대하여 특성이 다른 두 개 이상의 센서로부터의 정보를 가공하여 보다 정확한 측정값을 구하는 것이고, 센서 조합의 경우는 특성이 다른 두 개 이상의 센서를 상호 보완적으로 상황에 따라 적합한 하나의 센서만을 사용하는 경우를 말한다.

초음파 센서와 다른 센서와의 센서 조합에 관한 연구들을 살펴보면 다음과 같다. 비전의 경우 하나의 센서를 가지고는 거리의 정보를 전혀 얻을 수 없다는 단점이 있어 두 개 비전 센서를 보통 사용하지만, 그렇게 되면 처리해야 할 데이터 양이 증가하여 처리하는데 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 그래서 거리정보를 빨리 간단하게 얻을 수 있는 초음파 센서를 하나의 비전 센서와 같이 사용하는 경우가 있다[40]. 또한, 비전 센서를 주 센서로 사용하여 장애물 인식을 하는 경우에도 정지 장애물 인식은 상대적으로 정도가 좋은 비전 센서를 사용하나 움직이는 장애물의 인식을 위해 처리 속도가 빠른 초음파 센서를 같이 사용하기도 한다[41][42]. 통상적인 초음파센서의 측정범위가 약 0.3m-10m인 반면 적외선 센서의 경우에는 3m이하의 범위에서 높은 정확도를 가진다. 이 두 센서간에 측정범위가 다른 것을 이용하여 각각의 센서가 정확히 측정할 수 없는 범위의 주변환경에 대한 보다 정확한 정보를 획득할 수도 있다[43][44]. 또한 최근에는 전방향 비전 센서에서 얻어지는 방사형의 환경에 대한 방향 정보와 전방향 초음파 센서 모듈에서 얻어지는 방사형의 환경에 대한 거리 정보를 이용하여 환경 인식을 하는 연구도 발표된 바 있다(참조 그림 18)[45].

센서 융합은 센서 정보의 불확실성에 대한 표현, 주변 환경에 대한 모델, 그리고 융합기법에 따라 다양하게 구별될 수 있다. 이 중 융합 기법에 관해 살펴보면, 융합기법에는 가장 간단하고 직관적인 방법인 가중평균기법(weighted average), MLE(maximum likelihood estimation), Bayesian 기법[46], 칼만필터 기법[47], 직관적 규칙 기법[48] 및 퍼지 기법[49] 등이 있다.

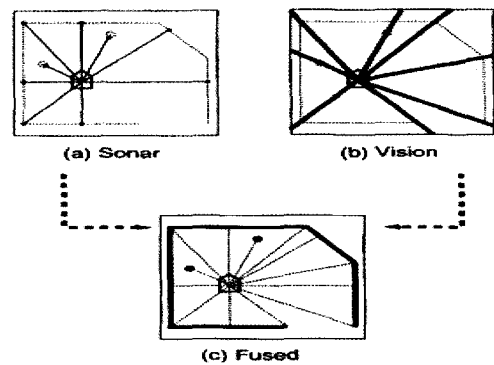


그림 18. 초음파 센서 정보와 비전센서 정보의 융합 예

4. 결론

본 고에서는 서비스 로봇 또는 이동 로봇에 있어서 초음파 센서의 응용 기술에 대하여 살펴보았다. 초음파 센서는 다른 센서에 비하여 저가이고 거리측정을 위한 회로가 간단하며 장거리 측정이 가능하다는 장점이 있어 자율 이동 로봇에 필수적인 센서라 할 수 있을 정도로 많이 사용되어 왔다. 그러나 초음파 센서는 넓은 빔폭, 초음파의 전파속도에 따른 느린 측정시간, 다중 반사되거나 반사신호가 없을 수도 있는 등 여러 단점도 가지고 있다. 기존의 많은 연구에서는 이러한 초음파 센서의 단점을 극복하고 보다 정확한 측정을 통하여 보다 정확한 환경인식을 위하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나, 아직 정형화된 실험 환경에서의 결과가 많으며 실제 서비스 로봇의 작업 환경인 가정, 사무실 등에서의 자율 이동을 위해서는 아직 많은 과제들이 남아 있다. 앞으로 초음파 센서 배열과 신호처리 알고리즘 이용하거나, 장애물의 재질 등을 고려하거나, 서로 다른 주파수 또는 부호화된 초음파 신호를 이용하거나 센서 융합 등을 통하여 보다 정밀한 물체인식과 지도 생성 등이 연구되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

[초음파 센서 특성 및 제품관련]

1. 유갑상, "비접촉식 수위계용 초음파 레벨센서의 특성 고찰," 월간제어계측, pp. 22-29, July, 1999
2. 이종락, 초음파와 그 사용법, 세화출판사, 1997
3. 초음파연구회, 쉬운 초음파의 응용, 기전연구소, 1992
4. www.polaroid-oem.com.
5. www.murata.com.
6. www.komantech.com.

[거리 측정 관련]

7. D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini and A. Taroni, "Digital Time-of-Flight Measurement for Ultrasonic Sensors," IEEE Trans. on Instrument and Measurement, vol. 41, pp. 93-97, Feb. 1992.
8. M. Parrila, J. J. Anaya and C. Fritsch, "Digital Signal Processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurement," IEEE Trans. on Instrument and Measurement, vol. 40, pp. 759-763, Aug. 1991.
9. D. Webster, "A Pulsed Ultrasonic Distance Measurement System based upon Phase Digitizing," IEEE Trans. on Instrument and Measurement, vol. 43, pp. 578-582, Aug. 1994.

10. F. E. Gueuning, M. Varlan, C. E. Eugene and P. Dupuis, "Accurate Distance Measurement by an Autonomous Ultrasonic System Combining Time-of-Flight and Phase-Shift Methods," IEEE Trans. on Instrument and Measurement, vol. 46, pp. 1236-1240, Dec. 1997.
11. A. Carullo and M. Parvis, "An Ultrasonic Sensor for Distance Measurement in Automotive Applications," IEEE J. of Sensors, vol. 1, pp. 143-147, Aug. 2001.

[물체 인식 관련]

12. W. W. Strenilein, P. Gaudiano and A. Carpenter, "A Neural Network for Object Recognition through Sonar on a Mobile Robot," Procs. IEEE ISIC / CIRA/ISAS Joint Conf., pp. 271-276, Sep. 1998.
13. C. Barat, N. A. Oufroukh, "Classification of indoor environment using only one ultrasonic sensor," Procs. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., pp. 1750-1755, May 2001.
14. H. Peremans, K. Audenart, and J. M. V. Campenhout, "A High-Resolution Sensor Based on Tri-aural Perception," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 9, no. 1, pp. 36-48, 1993.
15. 한영준, 한헌수, "2쌍의 초음파센서를 이용한 측정면의 위치 측정 및 종류 분류 기법," ICASE Magazine (제어·자동화·시스템공 논문지), vol. 4, pp. 747-752, Dec. 1998.
16. B. Barshan, B. Ayrulu and S. W. Utete, "Neural Network-Based Target Differentiation Using Sonar for Robotics Applications," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 16, pp. 435-442, Aug. 2000.
17. S. Watanabe, M. Yoneyama, "An Ultrasonic Visual Sensor for Three-Dimensional Object Recognition Using Neural Networks," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 8, pp. 240-249, Apr. 1992.

[장애물 회피 및 주행 관련]

18. P. van Turenout and G. Honderd, "Wall-following control of a mobile robot," Procs. IEEE International Conf. on Robotics and Automation, vol. 1, pp. 280-285, 1992
19. Y. Ando and S. Yuta, "Following a wall by an autonomous mobile robot with a sonar-ring," Procs. IEEE International Conf. on Robotics and



Automation, vol. 3, pp 2599-2606, May 1995.

20. 홍기범, 홍석교, "초음파센서를 이용한 이동로봇의 간단한 벽면 따르기 알고리즘," Proc. of the 13th KACC, pp. 760-763, Oct. 1998.
21. J. Borenstein and Y. Koren, "Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 19, pp. 1179-1187, Sep. 1989.
22. P. Veelaert W. Bogaerts, "Ultrasonic Potential Field Sensor for Object Avoidance," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 15, pp. 774-778, Aug. 1999.
23. J. Borenstein and Y. Koren, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 7, pp. 278-288, Jun. 1991.
24. I. Ulrich and J. Borenstein, "The GuideCane Applying Mobile Robot Technologies to Assist the Visually Impaired", IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics Part a : System and Humans, vol. 31, pp 131-136, May 2001.

[지도 생성 관련]

25. J. Borenstein and Y. Koren, "Histogramic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance", IEEE Trans. on Robotics Automation, vol. 7, pp. 535-539, Aug. 1991.
26. 범희락, 조형식, "초음파센서 배열을 이용한 이동로봇의 지도작성", 한국자동제어학술회의논문집, pp 119-124, 1993.
27. M. Kulich, P. Štěpan and L. Přeučil, "Feature Detection and Map Building Using Ranging Sensors", IEEE, pp. 201-206, 1999.
28. Ö. Bozma and R. Kuc, "Building a Sonar Map in a Specular Environment Using a Single Mobile Sensor", IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence, vol. 13, pp. 1260-1269, Dec. 1991.
29. J. L. Crowley, "World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging", IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 674-680, 1989.
30. J. Gasos and A. Martin, "A Fuzzy Approach to Build Sonar Maps for Mobile Robots", Computers in Industry, vol. 32, pp. 151-167, 1996.
31. A. Kurz, "Constructing Maps for Mobile Robot Navigation based on Ultrasonic Range Data", IEEE Trans. on System, Man, Cybernetics Part

B : Cybernetics, vol. 26, pp. 233-242, Apr. 1996.

32. 홍현주, 권석근, 노영식 "초음파 센서를 이용한 이동로봇의 직선선분 지도 작성", Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, vol 7, pp. 783-789, Sep. 2001.

[자기위치 추정 관련]

33. M. Drumheller, "Mobile Robot Localization Using Sonar," IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence, vol. PAMI-9, pp. 325-332, Mar. 1987.
34. L. Kleeman and R. Kuc, "An Optimal Sonar Array for Target Localization and Classification", Procs. 1994 IEEE International Conf. on Robotics Automation, Dan Diego, CA, pp. 3130-3135, May 1994.
35. J. H. Ko, W. J. Kim, and M. J. Chung, "A Method of Aucostic Landma가 Extration for Mobile Robot Navigation", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 12, pp. 478-485, 1996.
36. J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons", IEEE Trans. on Robotics Automation, vol. 7, pp. 376-382, Jun. 1991.
37. F. J. Zhao, H. J. Guo and K. Abe, "A Mobile Robot Localization Using Ultrasonic Sensors in Indoor Environment", IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp 52-57, 1997.
38. W. D. Rencken, "Concurrent Localization and Map Building for Mobile Robots Using Ultrasonic Sensors", Procs. IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robot and System, pp 2192-2197, July. 1997.
39. G. C. Anousaki and K. J. Kyriakopoulos, "Simultaneous Localization and Map Building for Mobile Robot Navigation", IEEE Robotics and Automation Magazine, pp 42-53, september. 1999.

[센서 융합 관련]

40. T. Chou, C. Wykes, "An Integrated vision/ultrasonic sensor for 3D target recognition and measurement", IRA97, Conf. Publication No. 443, IEEE 1997, pp. 189-193, Jul. 1997.
41. A. Dhya, A. Kosaka and Avinash Kak, "Vision-Based Navigation by a Mobile Robot with Obstacle Avoidance Using Single-Camera

- Vision and Ultrasonic Sensing”, IEEE Trans. on Robotics Automation, vol. 14, pp. 969-978, Dec. 1998.
42. 최우창, 류춘우, 김학일, “다중센서를 이용한 자율주행로봇의 위치보정 및 장애물 회피”, Proc. of the 13th KACC, pp. 1016-1019, Oct. 1998.
43. A. Curran, K. J. Kyriakopoulos, “Sensor-based self-localization for wheeled mobile robots”, Proc. IEEE International Conf. on Robotics Automation, pp. 8-13, 1993.
44. L. Yenilmez and H. Temeltas, “Real time multi-sensor fusion and navigation for mobile robots”, Mediterranean Electrotechnical Conf., 9th, Vol. 1, pp. 221-226, 1998.
45. T. Yata, A. Ohya, S. Yuta, “Fusion of omni-directional sonar and omni-directional vision for environment recognition of mobile robots,” Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation. ICRA '00., vol. 4, pp. 3925-3930, 2000
46. H. F. Durrant Whyte, “Sensor Models and Multisensor Integration”, The International Journal of Robotics Research, vol. 7, no. 6, pp. 97-113, 1988.
47. W. Wen and H. F. Durrant-Whyte, “Model based Multi-sensor Data Fusion”, Proc. IEEE International Conf. on Robotics Automation, pp. 1720-1726, May 1992.
48. A. M. Flynn, “Combining Sonar and Infrared Sensors for mobile Robot Navigation”, The International Journal of Robotics Research, vol. 7, pp. 5-14, 1988.
49. 김완주, 지능로봇 시스템을 위한 센서 데이터 융합의 퍼지적 접근, KAIST 박사학위논문, 1994



학회발간 논문집 재고정리 안내

회원님 귀중
안녕하십니까.

회원 여러분의 발전과 행운을 기원합니다. 우리 학회에서는 학회의 학술사업을 더욱 활성화하고 회원님들께 보다 충실한 서비스를 제공하기 위하여 최선의 노력을 하겠습니다.

이번에 우리 학회는 출판물 재고정리를 하고자 하오니 아래 목록을 보시고 필요하신 논문집이 있으시면 신청하여 주시기 바랍니다.

<목 록>

- ⊙ 제어·자동화·시스템 공학 논문지 : 권당 2,000원
- ⊙ Transaction on Control, Automation and Systems Engineering : 권당 2,000원
- ⊙ ISIE2001(3권) : 권당20,000원(총60,000원)
- ⊙ KACC('95년-2000년) : 권당 20,000원
- ⊙ ICCAS CD(2001년) : 개당 50,000원

-자료 요청시에는 먼저 재고가 있는지 확인해 주신 후

- 1) 수신자명
- 2) 우편번호
- 3) 주소
- 4) 해당자료 권 호(행사명,연도)
- 5) 연락처를 명기하여 연락해 주십시오.

<연락처>

E-mail: finance@icase.or.kr

Tel: 02-508-5801

Fax: 02-555-4746