

# 센서융합을 이용한 부정지형 적응형 이동로봇의 장애물 회피

## Sensor Fusion based Obstacle Avoidance for Terrain-Adaptive Mobile Robot

이상원\*, 육경환, 양현석, 박노철

(Sang-won Lee, Gyung-hwan Yuk, Hyun-seok Yang, and Noh-chul Park)

**Abstract :** The mobile robots to rescue a life in a disaster area and to explore planets demand high mobility as well as recognition of the environment. To avoid unknown obstacles exactly in unknown environment, accurate sensing is required. This paper proposes a sensor fusion to recognize unknown obstacles accurately by using low-cost sensors. Ultrasonic sensors and infrared sensors are used in this paper to avoid obstacles. If only one of these sensors is used alone, it is not useful for the mobile robots to complete their tasks in the real world since the surrounding environment in the real world is complex and composed of many kinds of materials. So infrared sensor may not recognize transparent or reflective obstacles and ultrasonic sensor may not recognize narrow obstacles, for example, columns of small diameter. Therefore, I selected six ultrasonic sensors and five infrared sensors to detect obstacles. Then, I fused ultrasonic sensors with infrared sensors in order that both advantages and disadvantages of each sensor are utilized together. In fusing sensors, fuzzy algorithm is used to cope with the uncertainties of each sensor. TAMRY which is terrain-adaptive mobile robot is used as the mobile robot for experiments.

**Keywords :** mobile robot kinematics, obstacle avoidance, sensor fusion

### I. 서론

로봇에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 가운데 행정 탐사나 재난 지역 구조용 로봇에 대한 연구도 여러 연구자들에 의해 진행되고 있다. 이런 로봇들은 사람이 접근하기 어렵거나 접근할 수 없는 곳에서 다양한 임무를 수행한다. 예를 들면, 건물 붕괴지역이나 화재 지역에서 인명을 탐색하거나 구조하며 화점 탐지 등의 역할을 한다. 이런 건물 붕괴지역등과 같은 곳은 장애물을 구별하기 힘든 3차원의 지형으로 구성되어 있다. 이것을 극복하기 위해서는 장애물을 잘 넘어갈 수 있는 메커니즘뿐 아니라 장애물을 피해갈 수 있는 지능이 필요하다.

이동로봇이 장애물을 피해가기 위해서는 주위 환경을 정확하게 인식하는 것이 필요하다. 주위환경을 정확하게 인식하기 위해서는 일반적으로 거리측정 센서인 초음파센서와 적외선 센서, 레이저 센서를 사용한다. 하지만 각각의 센서는 장단점을 가지고 있어서 하나의 센서만으로는 정확한 거리 값을 얻기 힘들다. 초음파센서는 신뢰 있는 거리 값을 얻을 수 있지만 방향에 대한 정확한 거리 값을 얻을 수 없다. 또한 적외선센서는 정확한 거리 값을 얻을 수 있지만 투명체의 경우는 거리 값을 얻을 수 없다. 따라서 각 센서의 장단점을 융합하여 정확한 주위환경을 인식하도록 하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 저가의 초음파 센서와 적외선 센서를 융합하여 3차원 지형을 극복하거나 피해갈 수 있도록 한다. 정확한 방향에 대한 거리 값을 얻기 위해서 적외선 센서를 사용

하고 적외선 센서가 찾지 못하는 부분을 초음파 센서가 보상하도록 한다. 또한 3차원 지형을 측정하기 위해서 로봇의 앞부분을 측정하여 높이 차를 측정 할 수 있도록 한다. 이런 측정을 통해서 로봇이 장애물을 극복할 것인지 피해갈 것인지를 판단한다. 장애물 회피 알고리즘으로는 퍼지 알고리즘을 사용한다.

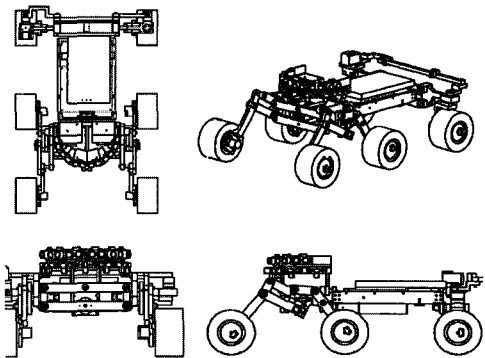


그림 1. TAMRY의 구조.  
Fig. 1. Configuration of TAMRY.

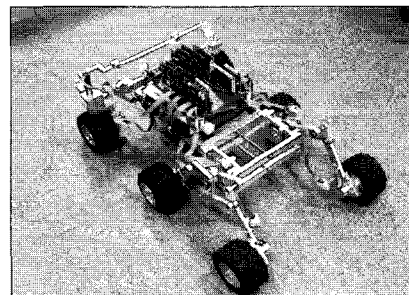


그림 2. TAMRY의 하드웨어 외관.  
Fig. 2. Isometric view of TAMRY in hardware.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 12. 1., 채택확정 : 2006. 12. 22.

이상원, 육경환, 양현석 : 연세대학교 기계공학부

(sangwon79x@hotmail.com/bcuzilovu@yonsei.ac.kr/hsyang@yonsei.ac.kr)

박노철 : 연세대학교 정보저장공학과(pnch@yonsei.ac.kr)

※ 본 연구는 산업자원부 재난극복 이동 기술 개발 및 화점/인명 탐지 기술 개발 과제 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.



그림 3. 부정형 지형 위의 TAMRY.  
Fig. 3. AMRY on the rocks.

본 논문에서는 부정지형 적응을 위해 만들어진 TAMRY (Terrain-Adaptive Mobile Robot in Yonsei)를 사용한다(그림 1,2,3). 이 로봇은 6개의 바퀴와 4-bar 링크로 구성된 서스펜션을 장착하고 있다.

II. 센서 융합

1. 센서의 특징

1.1 초음파 센서

초음파 센서는 저렴한 가격과 간단한 작동법, 높은 물체 탐지능력으로 이동 로봇에 많이 사용되고 있다. 초음파 센서는 높은 주파수의 음파를 사용하기 때문에 장거리 측정이 가능하고 높은 신뢰성을 가지고 있는 장점이 있다. 하지만 소리의 전파가 원뿔형태로 전달 되어서 방향에 대한 정확한 거리 값을 얻기 힘들다(그림 4(a),(b)). 또한, 음파의 수직 반사로 인해 실제 거리 값과는 다른 값을 얻을 수 있다(그림 (c),(d)). 실험으로부터 초음파 센서의 출력은 선형(그림 5)이고 음파의 두께는 5.7도임을 알 수 있었다(그림 6).

1.2 적외선 센서

적외선 센서는 저가격의 SHARP 전자의 GP 시리즈를 사용하였다. 이 센서는 적외선을 물체로 쏘고 반사되는 적외선의 입사각을 측정하여 거리를 측정하는 센서이다. 적외선 센서의 장점은 높은 주파수 대역을 가지고 있고 소리에 비해 민감하지 않다. 단점으로는 물체의 색깔이나 재질에 영향이 크다는 것이다. 예를 들면 투명체이거나 검은색 물체일 경우는 정확한 거리 값을 얻을 수 없다. 이 센서의 출력은 비선형 아날로그 전압이다. 센서 테스트를 통하여 센서의 출력을 확인하여 보았다(그림 7,8,9).

2. 거리센서의 실험

2.1 실험 준비

초음파 센서와 적외선 센서의 특성을 확인 하기 위해 실험

표 1. 사용된 초음파 센서의 특징.

Table 1. Features of used ultrasonic sensor.

Model	Devantech SRF04 ultrasonic range finder
Rating voltage	5V
Frequency	40kHz
Max Range	3 m
Min Range	3cm
Sensitivity	Detect 3cm diameter broom handle at > 2m
Echo Pulse	Positive TTL level signal, width proportional to range

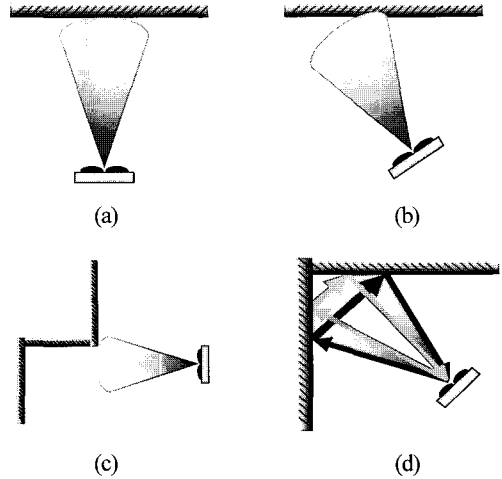


그림 4. 초음파 센서의 특징.  
Fig. 4. Features of ultrasonic sensor.

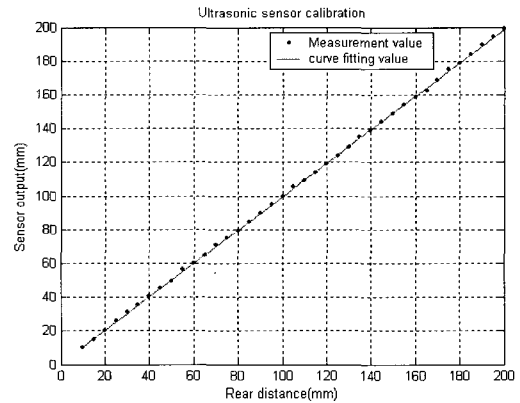


그림 5. 초음파 센서 캘리브레이션 결과.  
Fig. 5. Ultrasonic sensor calibration result.

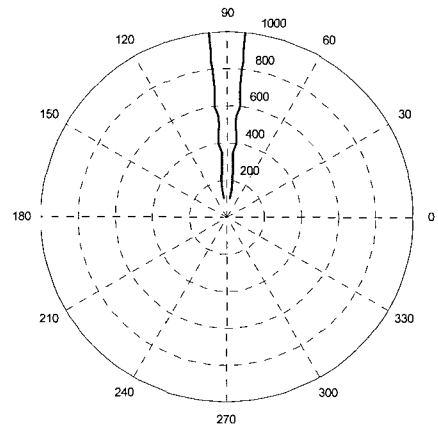


그림 6. 센서의 감지 폭 실험 결과.  
Fig. 6. Experimental result of sensing width.

을 수행하였고 실험 환경은 그림 10과 같다. 100msec 주기로 센서들은 거리를 측정하고 이를 회전시켰다. 2가지의 실험을 하였는데 첫 번째 실험은 한 변이 1220mm인 정사각형 나무 벽을 쌓고 아무런 물체도 두지 않고 각각의 센서로 스캔을

표 2. 사용된 적외선 센서의 특징.

Table 2. Features of used infrared sensor.

Model	Distance Measuring Sensor GP series (SHARP)
Rating voltage	4.5 to 5.5 Volt
Dissipation current	MAX 35mA
Output type	Analog output
Operation temperature	-10 to +60°C
GP2D120	4 to 30cm
GP2D12	10 to 80cm
GP2Y0A02YK	20 to 150cm

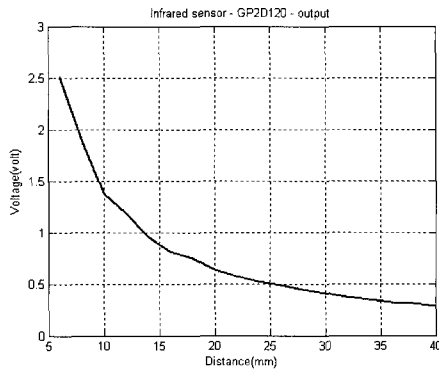


그림 7. GP2D120의 거리 대 출력 전압.  
Fig. 7. Analog output voltage vs. distance of GP2D120.

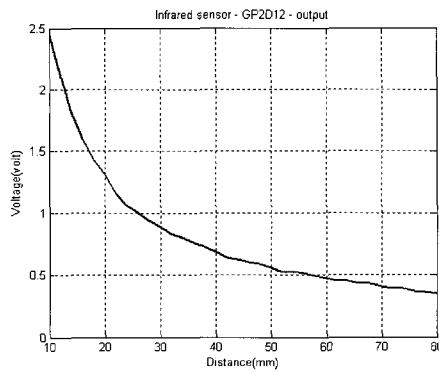


그림 8. GP2D12의 거리 대 출력 전압.  
Fig. 8. Analog output voltage vs. distance of GP2D12.

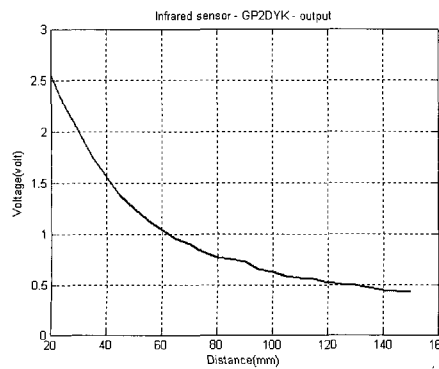


그림 9. GP2DYK의 거리 대 출력 전압.  
Fig. 9. Analog output voltage vs. distance of GP2DYK.

하였다. 이것은 초음파센서와 적외선 센서의 특징과 정확성을 확인하기 위한 실험이다. 두 번째 실험은 벽안에 지름 6, 22, 25, 122mm의 장애물을 놓고 각각의 센서를 이용하여 스캔을 하였다.

2.2 실험 결과

초음파 센서와 적외선 센서를 100msec의 주기로 측정하였으며 센서를 180deg/sec의 속도로 한 바퀴 회전하여 2초 동안 200개의 데이터를 얻었다.

2.2.1 초음파센서

장애물 없이 초음파 센서를 이용하여 스캔 한 결과는 그림 그림 11(a)과 같다. 그림 11(a)에서 보는 바와 같이 소리의 전파 형태와 소리의 수직반사 현상으로 정확한 방향에 대한 거리 값은 얻을 수 없었다. 또한 장애물을 설치하고 스캔 하였을 경우 지름 6mm 이하의 물체는 측정하지 못하였다(그림 11(b)).

2.2.2 적외선 센서

장애물이 없을 때 적외선 센서를 이용하여 벽을 스캔 한

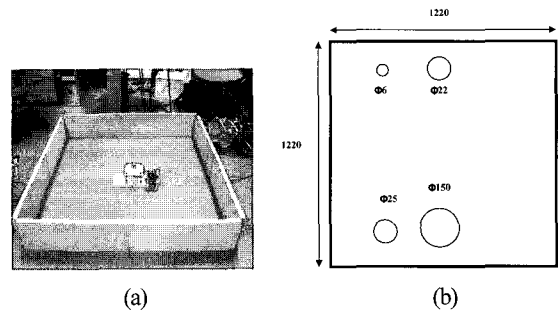


그림 10. 실험 셋업.  
Fig. 10. Experimental setup.

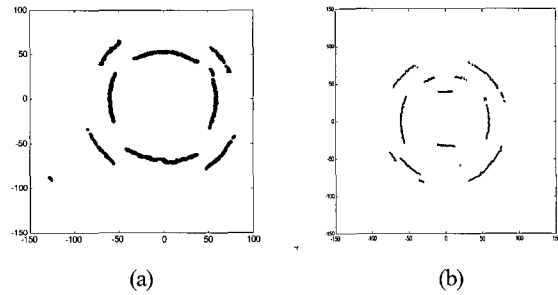


그림 11. 초음파 센서 실험 결과.  
Fig. 11. Experimental results of ultrasonic sensor.

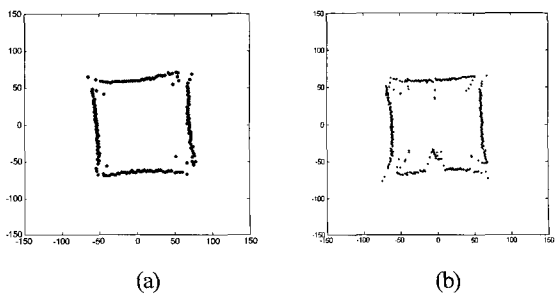


그림 12. 적외선 센서 실험 결과.  
Fig. 12. Experimental results of infrared sensor.

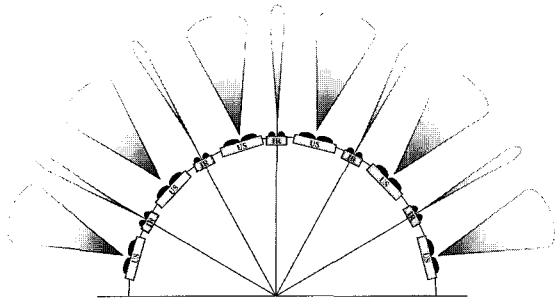


그림 13. 센서 배치.  
Fig. 13. Arrangement of sensors.

결과는 그림 12(a)와 같다. 초음파 센서에 비하여 방향에 대한 정확한 거리 값을 얻을 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 장애물을 두고 스캔 하였을 경우에 6mm 이하의 물체도 측정할 수 있었다.

2.3 거리측정 센서의 융합

실험결과로부터 적외선 센서의 거리 값의 정확성은 믿을 수 있었다. 그렇지만 적외선 센서의 최대 측정 거리가 1400mm 이므로 그 이하의 경우는 적외선 센서의 값을 사용하지만 그 이상의 경우는 초음파 센서를 사용한다. 그리고 적외선 센서가 투명체를 측정할 경우는 측정이 불가능하므로 이 경우는 초음파센서의 값을 사용한다. 또한 초음파 센서의 단점인 소리의 전파형태를 이용하여 적외선 센서들 사이에 초음파 센서를 장착하여 측정하지 않는 부분이 없도록 하였다.

그림 13에서 보는 바와 같이 초음파센서를 전방을 중심으로 30도 간격으로 5개를 배치하고 그 사이에 초음파센서를 6개 배치한다.

III. 시스템 구성

1. 이동로봇 기구학

그림 14와 같이 TAMRY는 바퀴마다 모터가 장착된 6개의 바퀴로 구성되어 있으며 이 중 후륜에 해당하는 2개의 바퀴만이 조향이 가능하다. 이 2개의 뒷바퀴는 같은 링크에 연결되어 있어서 조향을 할 때 같은 각도로 회전을 하기 때문에 로봇의 회전 중심이 무한대에 있다. 따라서 그림 14의 점선으로 표시된 것과 같이 하나의 가상의 조향 바퀴가 2개의 뒷바퀴 사이에 있다고 가정하고 앞 바퀴와 중간 바퀴 사이에 가상의 바퀴가 있다고 가정하고 기구학 해석을 하였다.

1.1 조향 기구학

조향 바퀴의 속도가 주어졌을 때 미끄러짐을 최소화 하기 위해서 조향 바퀴의 속도에 따른 각 바퀴의 속도를 얻어야 한다. 또한 로봇의 속도를 얻어야 한다. 따라서 조향에 대한 기구학 식을 얻을 필요성이 있다. 로봇의 회전 반경은

$$R_1 = \frac{l_1}{\tan \alpha} \tag{1}$$

이다. 여기서  $l_1$  은 앞 바퀴와 중간 바퀴 사이의 거리이고,  $\alpha$  는 조향 바퀴의 회전각이다. 로봇 중심의 각속도는  $v_r$ ,  $R_2$  으로 구해 진다.

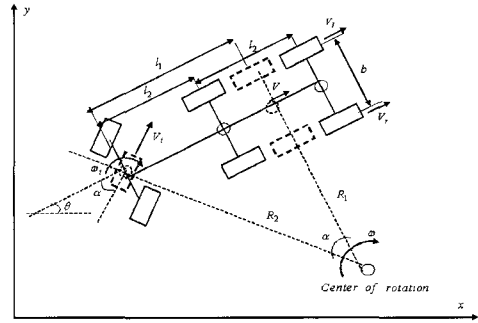


그림 14. TAMRY의 기구학적 구성.  
Fig. 14. TAMRY kinematic configuration.

$$\omega = \frac{V_t}{R_2} = \frac{r\omega_t}{\sqrt{R_1^2 + l_1^2}} \tag{2}$$

여기서,  $R_2 = \sqrt{R_1^2 + l_1}$

위 식으로부터 이 얻어진다.

$$v = R_1 \omega \tag{3}$$

$$v_r = \left( R_1 - \frac{b}{2} \right) \omega \tag{4}$$

$$v_l = \left( R_1 + \frac{b}{2} \right) \omega \tag{5}$$

(1)을 (3)에 대입하여 로봇의 속도를 얻을 수 있다.

$$v = R_1 \omega = \frac{l_1}{\tan \alpha} \omega = \frac{l_1}{\tan \alpha} \frac{r\omega_t}{\sqrt{R_1^2 + l_1^2}} \tag{6}$$

1.2 순 기구학

주어진 입력과 변수에 따라서 로봇이 어떻게 이동하여 어느 위치에 있을지 알기 위하여 순 기구학을 구할 필요성이 있다.

모델은 자코비안 행렬로부터 얻어질 수 있다.

$$\dot{p} = J(p)\dot{q} \tag{7}$$

이 자코비안 행렬은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{p} = f(p) + \sum_{i=1}^n q(p_i)\dot{q}_i \tag{8}$$

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{9}$$

여기서  $v$  는 로봇의 속도이고  $\omega$  는 회전각속도 이다. (9)는 다음의 식으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{10}$$

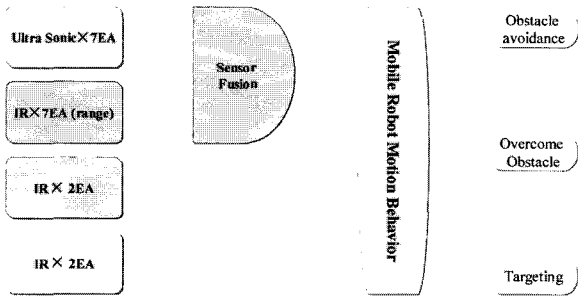


그림 15. 장애물 회피를 위한 초음파 센서와 적외선 센서의 통합.

Fig. 15. Integration of ultrasonic and infrared sensor for obstacle avoidance.

여기서,  $\dot{q} = [v \ \omega]^T$

바퀴의 각속도는  $\omega_i$  이고  $\alpha$  는 조향각으로 정의한다(조향 바퀴 속도  $v_i = r\omega_i$ ). 그림 14로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$v = v_i \cos \alpha = r\omega_i \cos \alpha \tag{11}$$

그리고

$$\dot{\alpha} = w_\alpha \tag{12}$$

또한, 각속도는

$$\dot{\theta} = \frac{v}{R_1} = \frac{v_i \cos \alpha}{R_1} = \frac{v_i}{R_2} = \frac{v_i \sin \alpha}{l_1} \tag{13}$$

여기서,  $\cos \alpha = \frac{R_1}{R_2}$

(10)에 위 식들을 대입하면 (14)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \alpha & 0 \\ \sin \theta \cos \alpha & 0 \\ \frac{\sin \alpha}{l_1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ w_\alpha \end{bmatrix} \tag{14}$$

(14)를 적분하여 정리하면 로봇의 위치를 얻을 수 있다.

$$P = \int_0^t \dot{p} dt = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^t V_i \cos \theta \cos \alpha \\ \int_0^t V_i \sin \theta \cos \alpha \\ \int_0^t \sin \alpha / l_1 \end{bmatrix} \tag{15}$$

여기서  $x_0, y_0, \theta_0$  는 로봇의 초기 위치이다. (15)로부터 속도와 조향각에 따른 로봇의 이동 경로를 알 수 있다.

2. 로봇 시스템 구조

초음파 센서와 적외선 센서의 센서융합의 결과는 로봇 행동 결정을 위한 부분으로 전달 된다. 로봇행동 결정단계는 목표물 찾기와 장애물 회피, 장애물 극복 등 3가지 행동을 결정하게 된다(그림 15). TAMRY의 시스템 구조는 그림 16에

나타나 있다. 모든 센서의 값은 ARM processor (260MHz 클럭 (clock)이상)를 이용하여 얻어 지고 이 값들은 센서융합과정을 통한다음 로봇행동결정단계를 거치고 로봇의 속도와 조향각을 출력하게 된다. 이 출력 값은 SPI(Serial Peripheral Interface) 통신을 이용하여 Master AVR에 전달이 되고 Master AVR은 TWI(Two Wire Interface)를 통해 각 바퀴의 AVR로 속도 값과 조향각을 전달한다.

IV. 퍼지 제어기

퍼지 제어기는 Zadeh[19]교수가 소개한 퍼지셋 이론을 기반으로 한다. 최근에 퍼지 제어기는 많은 지하철의 속도 제어나 높은 불확실성과 복잡성이 있는 부분에서 많이 응용되고 있는 제어기 이다. 퍼지 제어기는 복잡한 제어가 필요한 이동로봇에 적용이 될 수 있다[14].

1. 퍼지 제어기 설계

퍼지제어기의 입력은 다양한 센서들의 값이 사용 되었고, 입력의 개수는 6개이다. 장애물과의 거리에 대한 입력 5개  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  와 로봇의 방향에 대한 입력 1개  $h_a$  이다. 조향각  $s_i$  값이 퍼지제어기를 통해 출력된다.

우선, 퍼지제어기가 알 수 있는 값으로 변환하기 위해서 실제 값은 퍼지셋 값으로 변환 하는 작업이 필요한데 이것을 퍼지화라고 한다. 다음으로 퍼지 추론 엔진에 이 값들이 전달 되고 If-Then 규칙들을 통해서 로봇의 행동이 결정되고 이것을 실제 값으로 출력하기 위한 비퍼지화 단계를 거쳐서 로봇의 행동이 결정된다.

1.1 퍼지화

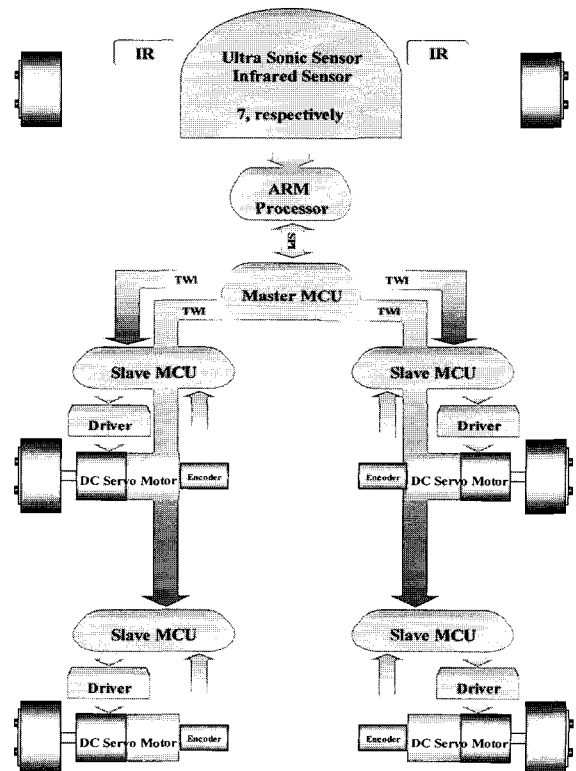


그림 16. 이동 제어를 위한 하드웨어 구조.

Fig. 16. Hardware architecture for motion control.

퍼지화는 실제 값을 퍼지셋의 값으로 맵핑(mapping) 하는 것으로 정의 된다[14]. 대부분의 퍼지 로직 시스템은 삼각형이나 가우스, 사다리꼴의 소속함수로 투영이 된다. 본 논문에서는 삼각형과 사다리꼴 소속함수만을 사용한다. 삼각형 소속 함수는 다음의 식으로 표현된다.

$$\mu_{A^i}(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) \dots \left(1 - \frac{|x_1 - x_n^*|}{b_n}\right) & \text{if } |x_i - x_i^*| \leq b_i, i=1,2,\dots,n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

TAMRY의 소속함수는 그림 17에 나와 있다.

1.2 퍼지 추론 엔진

퍼지 추론 엔진은 If-Then 규칙으로 구성되어 입력의 정보를 출력의 소속함수로 바꾸어주는 역할을 한다. 여기서 사용된 퍼지규칙은 14개의 규칙으로 구성되어 있다(표 3). 이것은 퍼지 시스템의 심장이라 할 수 있고, 퍼지 규칙의 표현은 다

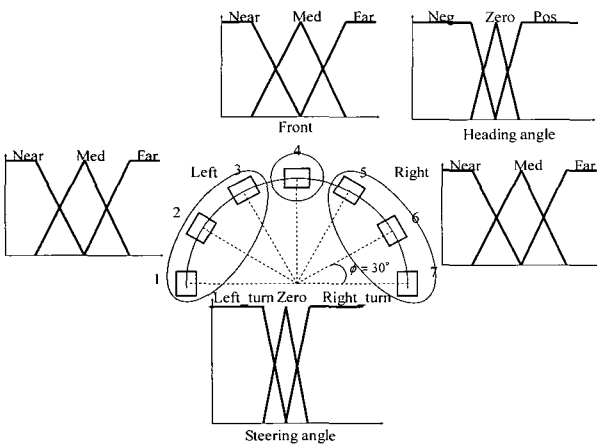


그림 17. TAMRY에 사용된 멤버쉽 함수.  
Fig. 17. Membership function of TAMRY.

표 3. 퍼지 룰.

Table 3. Fuzzy rules.

Rule No.	Input				Output	Behavior
	L	M	R	H		
1	N	N	N	NC	TR	OA
2	M	N	M	NC	TR	OA
3	N	N	M	NC	TR	OA
4	M	M	N	NC	TL	OA
5	M	N	N	NC	TL	OA
6	N	N	F	NC	TR	OA
7	N	F	N	NC	GS	WF
8	F	N	N	NC	TL	OA
9	F	F	N	NC	GS	WF
10	F	N	F	NC	TR	OA
11	N	F	F	NC	GS	WF
12	F	F	F	NA	TL	TA
13	F	F	F	ZA	GS	TA
14	F	F	F	PA	TR	TA

음과 같다.

$$Ru^{(l)} : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^l, \text{ THEN } y \text{ is } B^l$$

데이터를 통합하는 과정이 필요한데 여기서 사용되는 퍼지추론엔진은 Product-Minimum 추론엔진을 사용한다.

표 3에 사용된 기호들은 다음을 의미한다. Input은 fuzzy 제어기의 입력에 해당하는 값들을 말하며 L: left sensor, M: middle sensor, R: right sensor, H: heading angle을 의미한다. Output은 fuzzy 제어기의 출력에 해당하는 값을 말하며 ST: steering angle을 의미한다. Behavior은 로봇의 행동을 의미하며 OA: obstacle avoidance, TA: target approach, WF: wall following을 의미한다. Rule에 사용된 기호들은 N: near, M: middle, F: far, NC: not consider, ZA: zero angle, PA: positive angle, NA: negative angle, GS: go straight, TL: turn left, TR: turn right를 의미한다. 여기서 ZA와 NA, PA는 지정한 방향과 로봇의 현재 방향과의 각도 차이를 의미한다.

총 14개의 퍼지 룰이 의미하는 것은 기본적으로 3가지의 행동 전략이다. 첫 째는 길이 다 막혔을 경우에는 오른쪽으로 회전하여 출구를 모색한다. 둘째는 장애물이 멀리 있는 쪽으로 회전한다. 셋 째는 좌, 우측에만 장애물이 가까울 경우에는 장애물을 따라서 직진한다. 이상의 3가지 행동 전략을 많은 실험을 통해 룰의 수를 줄여서 14개의 룰만 남긴 것이 표 3의 형태이다.

1.3 비퍼지화

비퍼지화는 퍼지 추론엔진으로 부터의 출력을 실제 값으로 변환하기 위한 단계이다. 일반적으로 많이 사용하는 비퍼지화 방법으로는 무게중심법(CoG), 평균 중심 비퍼지화, 최대값 비퍼지화 등의 방법이 있는데 여기서는 (17)의 무게중심 비퍼지화 방법을 사용한다.

$$y^* = \frac{\int V y \mu_{B'}(y) dy}{\int V \mu_{B'}(y) dy} \quad (17)$$

V. 2 차원 장애물 회피

1. 시뮬레이션

퍼지 알고리즘을 이용하여 제어입력을 생성하는 주기를 100msec로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 18, 19에 있다. 5개의 센서를 장착하였고 이것들은 30도 각도로 배치되어 있다. 그림 18, 19(a)의 선은 로봇의 이동 경로이고 목표물의 방향과 진행 방향의 오차 값은 그림 18, 19(b)에 나타나 있다. 그림 18, 19(c)는 조향각의 변화를 나타낸 것이다.

2. 실험

그림 20, 21은 5.1절의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실험 로봇인 TAMRY에 제어 알고리즘을 구현하여 실험으로 검증한 것이다. 그림 20은 로봇 전방의 좌, 우측에 장애물이 놓여 있을 때 이를 감지하여 회피하는 것을 실험한 것이고, 그림 21은 유사한 형태의 장애물이 연속적으로 나타났을 때에도 위와 같이 성공적으로 회피하는 것을 확인한 실험이다. 실험과 시뮬레이션에서 사용한 장애물의 형태가 다르게 보이는 것은 시뮬레이션의 표현 방법의 차이 때문이다. 시뮬레이션

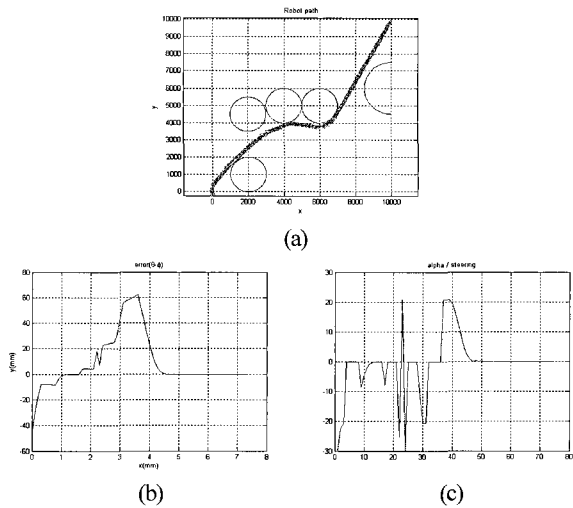


그림 18. 퍼지 알고리즘을 사용한 시뮬레이션 결과 1.  
Fig. 18. Simulation results using Fuzzy algorithm CASE#1.

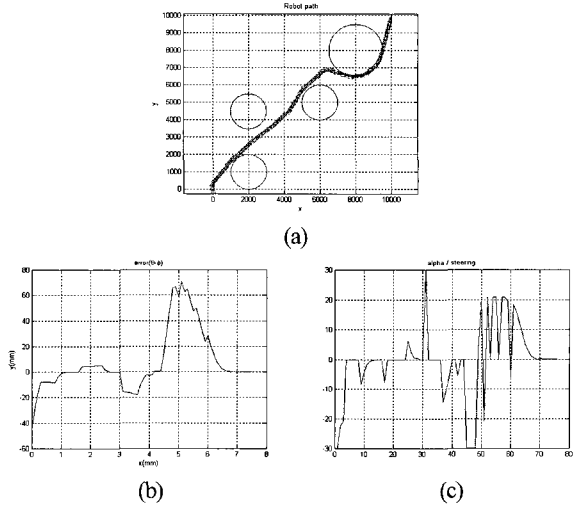


그림 19. 퍼지 알고리즘을 사용한 시뮬레이션 결과 2.  
Fig. 19. Simulation results using Fuzzy algorithm CASE#2.

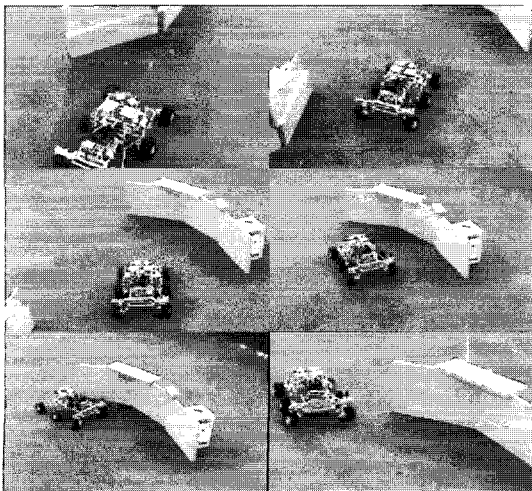


그림 20. 장애물 회피 실험 1.  
Fig. 20. Experiment of avoiding obstacles type 1.

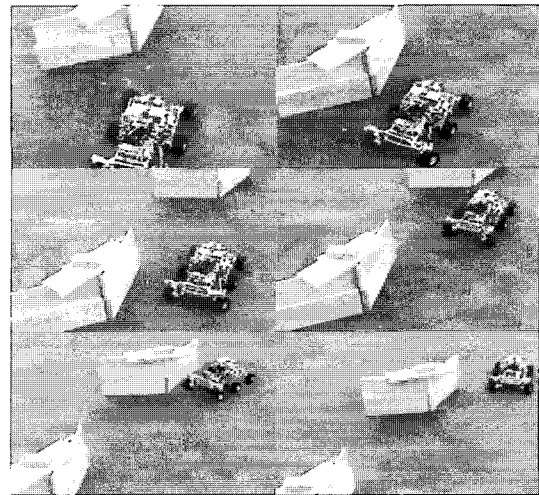


그림 21. 장애물 회피 실험 2.  
Fig. 21. Experiment of avoiding obstacles type 2.

과 실험에서 검증하고자 한 것은 진행방향을 가로막는 장애물에 대하여 성공적으로 장애물을 인식하여 회피한 후에 다시 로봇이 처음에 향하던 방향으로 진행을 하는가 이다. 5.1 절의 두 시뮬레이션은 모두 성공적으로 회피하며 초기의 방향으로 복귀하는 결과를 보여주고 있다.

그림 20과 그림 21의 두 종류의 장애물에 대한 실험에서 시뮬레이션의 결과와 같이 장애물을 성공적으로 인식하며 퍼지 제어기의 추론에 따라 회피하며 장애물 회피 이후에 로봇이 초기에 향하던 방향으로 주행을 하고 있는 것을 확인할 수 있다.

**IV. 결론**

센서융합을 이용한 부정형 지형 적응형 이동 로봇의 장애물 회피 시뮬레이션을 퍼지 알고리즘을 이용하여 수행하였으며 이를 TAMRY에 구현하여 실험으로 확인하였다. 센서융합은 초음파 센서와 적외선 센서의 장단점을 모두 활용하여 정확한 장애물 감지를 위해 고안되었다. 본 연구에 사용되는 센서들은 모두 정확하지 않은 정보를 제공할 수 있는 가능성이 있으므로 이에 적합한 이론인 퍼지제어 이론을 사용하여 두 종류의 저가형 센서를 사용한 장애물 회피 임무를 수행하도록 하였다. 장애물의 고저차를 고려하지 않은 2차원 지형에 대하여 시뮬레이션과 TAMRY를 사용한 실험이 성공적으로 수행되었으며 이를 토대로 추후에는 TAMRY가 극복 가능한 장애물의 경우에 회피하지 않고 넘어갈 수 있도록 3차원 지형에서의 장애물 회피에 대한 연구를 수행할 것이다.

**참고문헌**

- [1] H. R. Everett, *Sensors for mobile robot*, A K Peters, pp. 5-57, 1995.
- [2] J. Y. Kim, "Design and implementation of a mobile robot with terrain-adaptive mechanism for three-dimensional unstructured environment," 2005.
- [3] *Autonomous Mobile Robot*.
- [4] K.-H. Kim, "Environment recognition with multiple sensors and mobile robot navigation based on the fuzzy via-point selection

method," 2004.

[5] J. Gu, M. Meng, A. Cook, and P. X. Liu, "Sensor fusion in mobile robot: Some perspectives" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation*, Shanghai, P.R.China. June 10-14, 2002.

[6] C. Goulrey and M. Trivedi, "Sensor based obstacle avoidance mapping for fast mobile robots," *IEEE*, 1994.

[7] R. C. Luo, T. Y. Lin, T. Y. Hsu, and P. K. Wang, "Multisensor controlled obstacle avoidance and navigation of interlligent security robot," *IEEE*, 2005.

[8] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, and D. Wehe "Mobile robot positioning-sensors and techniques," *Invited paper for the Journal of Robotic System*, vol. 14, no.4, pp. 231-249.

[9] J. Vazquez and C. Malcolm, "Fusion of triangulated sonar plus infrared sensing for localization and mapping," *International Conference on Control and Automation*, Budapest, Hungary. June 27-29, 2005.

[10] H. Chung, L. Ojeda, and J. Borestein, "Sensor fusion for mobile robot dead-recking with a precision-calibrated fiber optic gyroscope," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 21-26, 2001.

[11] Z. yi, H. Y. Khing, C. C. Seng, and Z. X. Wei, "Multi-ultrasonic sensor fusion for mobile robots," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000*, October 3-5, 2000.

[12] J. Z. Ssiadek and Q. Wang, "Autonomous vehicle navigation in 3-D enviroment" *IEEE*, 1999.

[13] B. Kimiaghalam, A. Homaifar, and B. Suttikulvet, "A multy-layered multi fuzzy inference systems for autonomous robot navigation and obstacle avoidance," *IEEE International Fuzzy Systems Conference*, 2001.

[14] S. Thongchai and K. Kawamura, "Application of fuzzy control to a sonar-based obstacle avoidance mobile robot" *IEEE International Conference on Control Application*, September 25-27, 2000.

[15] H. Seraji, "Terrain-Based Robot Navigation Using Multi-Scale Traversability Indices", *IEEE International Fuzzy Systems Conference*, 2001.

[16] H. Roth and K. Schilling, "Control strategies for mobile robots based on fuzzy logic," *IEEE*, 1995.

[17] M.-S. Lee, M.-J. Jung, and J.-H. Kim, "Evolutionary programming-based fuzzy logic path planner and follower for mobile robots," *IEEE*, 2000.

[18] A. Zhu and S. X. Yang, "A fuzzy logic approach to reactive navigation of behavior-based mobile robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 2004.

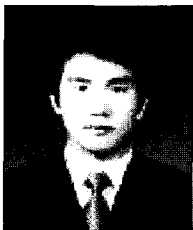
[19] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.

[20] Y. Zhao and S. L. Bement, "Kinematics, dynamics and control of eheeld mobile robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, France, May 1992.

[21] R. HoseinNezhad, B. Moshiri, and M. R. Asharif, "Sensor fusion for ultrasonic and laser array in mobile robotics" *IEEE*, 2002.

[22] J. Vazquez and C. Malcolm, "Fusion of triangulated sonar plus infrared sensing for localization and mapping," *International Conference on Control and Automation*, 2005.

[23] A. M. Sabatini, V. Genovese, and E. Guglielmelli, "A low-cose composite sensor array combining ultrasonic and infrared proximity sensors," *IEEE*, 1995.



**이 상 원**

2005년 계명대학교 기계공학부 졸업. 2005년~현재 연세대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 메커니즘 설계, 필드 로봇의 장애물 인식, 회피, 극복.



**육 경 환**

2004년 연세대학교 기계공학부 졸업. 2004년~현재 연세대학교 대학원 기계공학과 석박사통합과정 재학중. 관심분야는 필드 로봇의 제어, 장애물 극복 메커니즘, 장애물 인식, 회피, 극복.



**양 현 석**

1984년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1988년 MIT 기계공학과(공학석사). 1993년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~1994년 MIT 박사후과정. 1994년~현재 연세대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 여자유도 로봇의 위치/힘 제어, 필드

로봇 제어.



**박 노 철**

1986년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1988년 연세대학교 기계공학과(공학석사). 1997년 연세대학교 기계공학과(공학박사). 2000년~현재 연세대학교 정보저장협동과정 교수. 관심분야는 인공근육의 위치/힘 제어, 필드 로봇, NFR

시스템.