

자율 이동로봇의 퍼지 제어기에 관한 연구

A Study on Fuzzy Controller for Autonomous Mobile Robot

周 永 焄* · 黃 熹 秀* · 高 在 元** · 金 成 權** · 黃 金 燦*** · 禹 廣 芳***
(Young-Hoon Joo · Hee-Soo Hwang · Jae-Won Ko · Sung-Kwun Kim · Keum-Chan Whang ·
Kwang-Bang Woo)

Abstract - In this paper, the method for navigation and obstacle avoidance of the autonomous mobile robot is proposed. The proposed algorithms are based on the fuzzy inference system which is able to deal with imprecise and uncertain information. The self-tuning algorithm, which adopts the simplex method, modifies the parameters of membership functions of the input-output linguistic variables by changing the support of these fuzzy sets according to the integral of absolute error (IAE) of the system response. The wall-following navigation and obstacle avoidance of the mobile robot are based on range data measured from the internal sensors (encoder) and the outer sensors (sonar sensor). In addition, the algorithm for the obstacle detection proposed in this paper is based on the expert's experience. Finally, the effectiveness of navigation and obstacle avoidance algorithm is demonstrated through simulation and experiment.

Key Words : Autonomous Mobile Robot (자율 이동로봇), Ultrasonic Guided Method (초음파 유도 방식), Dead Reckoning Method (자기유도 주행), Fuzzy Control (퍼지 제어), Self Tuning Control (자기동조 제어), Obstacle Avoidance (장애물 회피)

1. 서 론

*正 會 員 : 延世大 工科大学 電氣工學科 博士課程
**正 會 員 : 三星電子(株) 家電部門 生産技術本部
***正 會 員 : 延世大學校 工科大学 電氣工學科 教授
接受日字 : 1992年 4月 7日
1次修正 : 1992年 6月 29日

자율 이동 로봇트는 주위 환경을 인식하여 로봇트 자신의 판단에 따라 자율적으로 이동하는 능력을 갖는 로봇트이지만, 이를 위해서는 각종 센서를 이용하여 환경 정보를 수집하고, 이 정보를 분

석하여 이동 경로의 결정에 따라 이동 가능한 제어 기구가 필요하다. 현재 많은 연구에도 불구하고 본격적인 실용화가 지연되고 있는 이유로는 1) 목표 지점에서의 정밀 위치 제어가 어렵다는 점, 2) 작업 환경(장애물, 목표물, 작업장 레이아웃)을 정확히 인식할 수 있는 능력이 부족하다는 점, 3) 다양한 환경 변화에 유연하게 대처하는 능력이 부족하다는 점을 들 수 있다. 이동 로봇에서의 이러한 다양한 작업 조건과 환경 조건에 대응하기 위해서는 다음의 3가지 기반 기술의 특성, 즉 자율성, 통신성, 기능성이 고려되어야 한다. 이 가운데 자율성은 이동 로봇의 주행에 대한 유연성을 높이기 위해서는 필수적인 기술로 다각적인 연구가 이루어져야 한다. 이동 로봇은 조작기(manipulator)와는 달리 구동 모터와 바퀴의 회전수만을 계산함으로써 이동하고자 하는 위치와 방향으로 자율 주행할 수는 없다. 그 이유는 측정된 위치가 구동 바퀴의 미끄러짐등에 의해 차이가 발생되기 때문이다. 이것은 바퀴의 회전수와 조향각등을 감지하는 내계 센서(internal sensor) 뿐만 아니라 주위 환경으로부터 직접 위치와 방향을 감지하는 외계 센서(external sensor)를 요구하는 것을 의미한다. 이동로봇은 위치와 주행 방향을 감지하는 방법에 따라 1) 고정 궤도방식(wire guided method, reflective tape method등), 2) 랜드마크(Landmark) 주행방식, 3) 스폿 마크(Spotmark) 주행방식, 4) 레이저 빔 유도 방식, 5) 비전 유도방식(Vision guided method), 6) 초음파 유도 방식(Ultrasonic guided method)등으로 분류된다[1]. 본 연구에서는 이들 중 내계 센서를 이용한 주행 방식인 자기 유도 주행(Dead Reckoning) 및 외계 센서를 이용한 초음파 유도 방식을 이용하여 자율 주행을 위한 퍼지 주행 제어 알고리즘을 연구한다.

이동로봇의 제어에 대해 주행과 더불어 중요한 문제는 장애물 회피 문제이다. 장애물 회피 방법에는 1) 이동로봇의 주행 공간에 대한 전체 모델이 정확하게 알려진 경우에는 배열 공간과 포텐셜법등이 이용되며[2], 2) 미지의 환경에 있는 경우에는 여러 센싱 방법을 사용하여 주행 가능한 환경에 대한 지도를 작성하는데 이용되며[3], 3) 전체 모델은 정확하게 알려지지는 않으나 센서등으로 그 정보를 얻을 수 있는 경우에는 장애물의 감지 방법 및 회피 방법에 따라 여러 방법이 제안되고 있다[4, 5]. 본 논문에서는 초음파 센서의 거리 데이터를 이용하여 이동 로봇이 주행중 장애물을 발견하면, 먼저 통과 가능한 통로를 퍼지 제

어를 통해 선정하고, 선정된 통로 중심까지의 각도를 구하여 이를 입력으로 하고 장애물 회피를 위한 조향각을 출력으로 하는 퍼지 제어를 구성하여 이동로봇이 장애물을 회피하고 주행하도록 하는 장애물 회피 알고리즘을 연구한다.

상기 주행 및 장애물 회피 제어를 위해서는 부정확하고 불확실한 정보를 다룰 능력이 있는 퍼지 제어 이론에 기본을 둔다. 퍼지 제어는 IF~THEN형식의 논리형 제어이고, 인간이 가지는 정성적 지식을 표현 가능하지만, 퍼지 응용 시스템을 개발함에 있어서 가장 시간이 많이 소비되는 작업중의 하나는 입출력 변수의 멤버십 함수를 결정하는 것이며, 제어계가 목표의 사양대로 동작되도록 퍼지 변수 및 규칙수를 조정할 필요가 있다. 최근 퍼지 추론의 실용화가 진전되어 규칙이나 멤버십 함수를 자동으로 동조하는 방법이 제안되고 있다. Sugeno는 전건부는 심플렉스법으로 후건부는 선형식으로 하여 비선형 프로그램 기법을 사용한 동조 방법을 제안하였으며[6], Maeda는 computational flow network를 사용하여 기존의 gradient descent method보다 처리 속도가 빠른 동조 기법을 제안하였으며[7], Nomuro, Akahori 등은 市橋가 제안한 간략 퍼지 추론법을 사용한 다수의 동조 방법을 제안하였다[8, 9]. 본 논문에서는 Akahori[9]가 제안한 방법을 기본으로하여 규칙베이스는 변하지 않는다고 가정하고, 입출력이 모두 멤버십 함수로 표현되는 제어 규칙에서 최적의 멤버십 함수를 오프 라인으로 자동 동조하는 최적화 알고리즘이 제안된다. 제안된 자기 동조 알고리즘은 실험에 의해 얻은 입출력 멤버십 함수의 매개변수의 집합들을 이용하여 출력 오차의 합을 줄이도록 입출력 멤버십 함수의 매개변수의 집합을 반복적으로 바꾸는 심플렉스법에 기본을 둔다.

본 논문에서는 제안한 주행 및 장애물 회피 퍼지 제어 알고리즘은 시뮬레이션, 그리고 실험실에서 실험적으로 구성된 이동로봇(YMR)로 그 실용성을 검증하였다.

2. 이동 로봇 시스템

본 연구에 이용된 이동 로봇 시스템은 호스트 컴퓨터와 2개의 부시스템으로 나뉘어진다. 부시스템은 이동 로봇 주행 시스템과 초음파 센서 시스템으로 구성된다. 초음파 센서 시스템을 사용하여 벽면 주행 및 장애물 회피에 필요한 외부 환경 정보를 얻는다. 이동 로봇은 기 개발된 TRC

자체중량	49 Kg
크 기	280 X 700 X 750 mm
적재중량	90 Kg
진행속도	0 - 1000 mm/sec
가 속도	0 - 1000 mm/sec ²
구동 방식	속도차 구동 방식

그림 1 (a) 자율 이동 로봇트 제원
Fig. 1 (a) Specification of the YMR

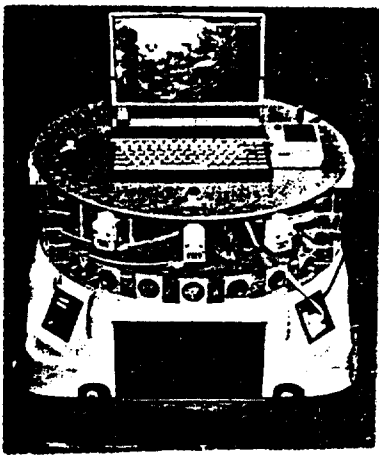


그림 1 (b) 이동로봇트 외관
Fig. 1 (b) Configuration of the YMR

(사)의 본체를 사용하였으며[10], 주위 환경 인식을 위한 센서로는 폴라로이드(사)의 송수신 겸용 초음파 센서를 이용하였다[11]. 또한 이 두개의 부시스템을 제어하기 위해서는 32비트 AT급 노트북을 이용하였으며, 각각의 부시스템은 모토롤라 계열의 마이크로프로세서 68HC11이 장착되었다. 그림 1-a는 로봇트의 제원, 그림 1-b는 로봇트의 외관을 나타낸 것이며, 그림 2는 이동로봇트의 하드웨어 및 소프트웨어 기능을 나타내는 시스템 블록도이다. 이하, 이동 로봇트 시스템과 초음파 시스템에 대해 설명한다.

2.1 이동 로봇트 시스템

이동로봇트의 차륜은 좌우 동륜과 전후 보조륜 등 모두 6개로 구성되고, 동륜은 각기 독립 구동된다. 따라서, 좁은 장소에서 제자리에서의 회전(spinn-turn)의 방향 변화가 가능하다. 2개 동륜의

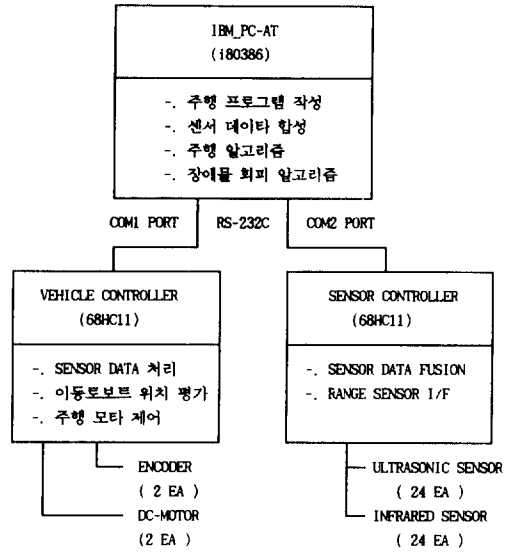


그림 2 이동 로봇트 시스템 블록도
Fig. 2 System diagram of the mobile robot

구동은 직류 모터를 사용하며, 각 모타축에는 이동 위치를 측정하기 위해 회전당 0.012mm의 해상도를 갖는 엔코더가 부착되어 있다. 그림 3은 이동 로봇트의 움직임을 기하학으로 표시한 것이다. 이동 로봇트의 상태 변수(state variable)는 위치 x, y 와 방향 θ 이며, k 번째 제어 구간에서, 엔코더에 의해 측정되는 양 구동륜의 변위 R_{POSk}, L_{POSk} 는 시스템의 입력이다. 한 제어 구간에서의 방향의 편차 $\Delta\theta_k$ 와 회전 반경 R_k 는 식(1)~식(2)와 같다.

$$\Delta\theta_k = \frac{R_{POSk} - L_{POSk}}{d} \tag{1}$$

$$R_k = \frac{d}{2} \frac{R_{POSk} - L_{POSk}}{R_{POSk} + L_{POSk}} \tag{2}$$

여기서 d 는 양 바퀴 사이의 거리이다. 이 변수들을 사용하면 시스템 운동 방정식은 식(3)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + R_k \{ \cos \theta_k \sin \Delta\theta_k + (\sin \theta_k (\cos \Delta\theta_k - 1)) \} \\ y_{k+1} &= y_k + R_k \{ \sin \theta_k \sin \Delta\theta_k - \cos \theta_k (\cos \Delta\theta_k - 1) \} \end{aligned} \tag{3}$$

$\theta_{k-1} = \theta_k + \Delta\theta_k$
식(3)은 $R_{POSk} = L_{POSk}$ 인 경우를 제외하고, 이동 로봇트의 움직임을 정확히 표현한다. 만약 이동 로봇트가 직선 주행할 때, R_{POSk} 가 L_{POSk} 와 같게 된다면, $\Delta\theta_k$ 는 0이 되며, R_k 는 계산되지 않는다.

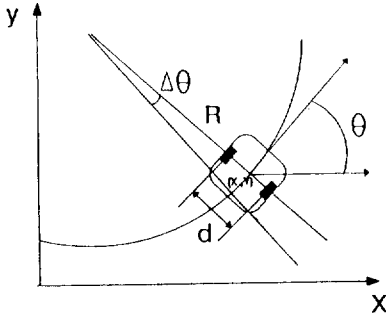


그림 3 이동 로봇의 기하학
Fig. 3 Geometry of the mobile robot

이를 피하기 위하여 식(4)와 같은 삼각함수를 사용하여 식(3)을 식(5)와 같이 근사화시키면 특이성이 제거된다.

$$\begin{cases} \cos x = 1 - 1/2 \cdot x^2 \\ \sin x = x \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k - (d/4) \cdot A \cdot B \cdot \sin \theta_k + (1/2) \cdot A \cdot \cos \theta_k \\ y_{k+1} = y_k + (d/4) \cdot A \cdot B \cdot \cos \theta_k + (1/2) \cdot A \cdot \cos \theta_k \\ \theta_{k+1} = \theta_k + (1/d) \cdot B \end{cases} \quad (5)$$

여기서

$$A = R_{POSk} + L_{POSk}$$

$$B = R_{POSk} - L_{POSk}$$

2.2 초음파 거리 측정 시스템

초음파 거리 측정 시스템은 로봇트가 주행할 때 1) 주행 전방과 측면의 개방된 공간의 거리 측정, 2) 위치 측정등의 두가지 근본적인 중요한 역할을 제공한다. 개방된 공간은 로봇트가 다른 물체와 충돌하는 일이 없도록 하는 방향과 위치의 집합을 결정한다. 위치 측정은 로봇트가 목적 지점과 환경에 관한 지식을 가지고 스스로의 위치를 결정하도록 한다. 불행하게도, 이동 로봇트에 사용되는 센서들은 다양한 환경속에서 가끔 오동작을 한다. 그 결과 보통 여러 센서로부터 측정된 데이터들을 결합하여 감지 시스템의 신뢰성을 향상시키는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 사각형 이동 로봇트상에 원형판을 설치하고, 일정한 각도로 20개의 초음파 거리 센서를 장착하였다. 이동 로봇트상에 장착된 센서 모양은 그림 4에 도시되었다. 로봇트의 좌우면과 평행하게 일정 간격으로 3개씩 6개의 초음파 센서를 설치하고, 15°간격으로 전방 7개, 후진 방향으로 7개를 장착하였다. 연속적으로 획득한 20개의 센서들로부터의 거리 데이터는 센서

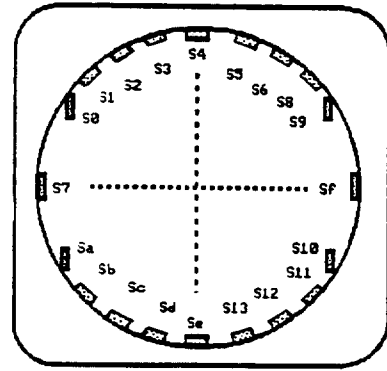


그림 4 초음파 센서 배치도
Fig. 4 Configuration of the ultrasonic sensors

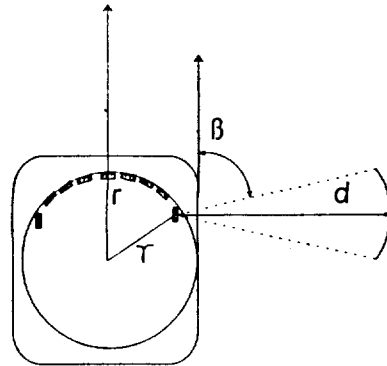


그림 5 센서 투영도
Fig. 5 Projection of the sensor

거리 측정 제어기 버퍼에 저장된다. 각 센서 s에 대한 측정거리 d는 그림 5와 같이 이동로봇트의 현재 위치(x, y, a)를 사용하면 식(6)과 같이 외부 좌표(x_s, y_s)로 투영될 수 있다.

$$x_s = x + r \cos(\gamma + a) + d \cos(\beta + a)$$

$$y_s = y + r \sin(\gamma + a) + d \sin(\beta + a) \quad (6)$$

여기서 r은 로봇트 원점에서 센서까지의 거리, gamma는 로봇트 축에서 센서까지의 각도이며, beta는 로봇트 축에 대한 센서의 방향을 나타낸다. 이런 거리 데이터들은 주행과 장애물의 감지 및 회피를 위한 기초 데이터로서 사용된다.

3. 자기 동조 퍼지 제어 알고리즘

3.1 퍼지 추론

본 절에서는 전진부와 후진부가 모두 멤버십 함

수로 표현되는 퍼지 추론 방법에 대해 설명한다. 지금 입력을 x_1, x_2 , 출력을 y 라하면 퍼지 추론의 제어 규칙은 다음과 같이 표시할 수 있다. 예제에서는 2개의 퍼지 규칙을 사용한다.

Rule 1 : if x_1 is small₁ and x_2 is medium₂, then y is medium

Rule 2 : if x_1 is large₁ and x_2 is small₂, then y is large

입력 데이터 x_1', x_2' 이 입력되면 규칙의 등급은 식(7~8)과 같이 전건부 등급의 최소값에 의해 주어진다.

$$W_1 = \min(\text{small}_1(x_1'), \text{medium}_2(x_2')) \quad (7)$$

$$W_2 = \min(\text{large}_1(x_1'), \text{small}_2(x_2')) \quad (8)$$

직접법의 경우 출력 멤버십 함수는 식(9)로 주어진다.

$$B(z) = \max(W_1 \cdot \text{medium } y(z), W_2 \cdot \text{large } y(z)) \quad (9)$$

여기서 z 는 비퍼지화 적분을 위한 변수이다. 퍼지 추론의 출력 값 y 는 연속형인 경우는 식(10), 이산형인 경우는 식(11)과 같다.

$$y = \frac{\int B(z) \cdot z dz}{\int B(z) dz} \quad (10)$$

$$y = \frac{\sum_k B(z_k) \cdot z_k}{\sum_k B(z_k)} \quad (11)$$

3.2 자기 동조 알고리즘

이동로보트의 주행을 위한 퍼지 제어 규칙의 입출력 변수의 멤버십 함수를 오프 라인으로 자기 동조하기 위해 식(12)와 같은 퍼지 추론의 입출력 관계를 정의한다.

$$y = f(\underline{X}; g; \underline{fn}) \quad (12)$$

여기서 $\underline{X} = (x_1, x_2)$ 는 입력 변수로 각각 이동로보트가 주행할 기준선과의 거리차(d)와 각도차(θ), y 는 출력 변수로 이동로보트의 조향각(steering angle), $g = (g_1, g_2, g_3)$ 는 각각 동조될 입출력 변수 x_1, x_2, y 의 규격화 정수, $\underline{fn} = (f_{11}, f_{12}, \dots, f_{31}, f_{32})$ 은 각각 동조될 입출력 멤버십 함수의 매개 변수들이다. 제안된 알고리즘의 목적은 실험에 의해 얻은 매개변수의 출력오차가 $g = g_{opt}, \underline{fn} = \underline{fn}_{opt}$ 에서 최소가 되도록 하는 규격화 정수 및 멤버십 함수의 매개변수를 구하는 것이다. 본 논문에서는 최적화법의 하나인 심플렉스법을 이용해서 퍼지 변수의

매개 변수들을 자동 동조하는 방법을 제안한다. 기본적인 심플렉스와 퍼지 제어 이론을 융합하기 위하여 식(13)과 같은 형식의 제약 조건을 설정한다.

Find $X = (g_{opt}, \underline{fn}_{opt})$ which minimizes

$$P(x_k) = \sum_q |y^q - y^r| \quad (13-a)$$

subject to

$$0 \leq W_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13-b)$$

$$f_{j1} \leq f_{j2} \quad j = 1, 2, 3 \quad (13-c)$$

여기서 X 는 동조하고자 하는 매개변수, $P(X_k)$ 는 목적함수, y^q 는 퍼지 추론에 의한 시스템 출력, y^r 은 시스템의 요구 출력, 그리고 W_i 는 식(7, 8)에서 정의되는 전건부의 적합도, f_{j1}, f_{j2} 는 각각 입출력 멤버십 함수의 매개변수들이다. 일반적으로, 식(13-a)를 구하기 위하여 식(13-b), (13-c)와 같은 부제약을 만족하는 최적화 기법은 컴플렉스 방법으로 불리워진다. 심플렉스란 n 차원 공간에서 $n+1$ 개의 점의 집합에 의해 구성된 기하학적인 형상이다. 그래서 2차원에서는 3각형, 3차원에서는 4각형이다. 심플렉스의 기본적인 움직임은 반사(reflection), 축소(contraction) 및 확장(expansion)으로 알려진 3가지 작용에 의해 얻는다[13]. 지금 $m \geq n+1$ 개의 정점을 가지는 심플렉스를 고찰한다. 각 정점을 좌표 $X_k = (g^k, \underline{fn}^k), k=1, 2, \dots, m$ 으로 표시하고, 정점 X_k 에서의 목적함수값은 식(13-a)의 $P_k = P(X_k)$ 와 같이 시스템 응답의 절대 오차의 합(IAE)으로 한다. m 개의 정점의 목적함수 P_1, P_2, \dots, P_m 중에서 최대 목적함수 값을 가지는 정점을 X_m 로 한다. 심플렉스법은, 최종적으로는 m 개의 정점을 전부 최적해로 수렴시킨다. 이를 위해 목적함수값이 최대가 되는 정점 X_m 를 버리고 새로운 정점 X'_m 을 구하는 반사 과정은 식(14)와 같다.

$$X'_m = (1+\alpha) \cdot X_g - \alpha \cdot X_m \quad (14)$$

$$X_g = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{k=1, k \neq m}^m X_k$$

여기서 $\alpha \geq 1$ 이며, 정점 X'_m 를 얻기 위한 반사계수(하중치)이고, X_g 는 X_m 를 제외한 모든 정점의 중심이다. 식(14)에 의해 새롭게 설정된 정점 X'_m 에서의 평가치가 X_m 에서의 평가치보다도 적게 되도록 하중치 α 를 조정하면서 탐색 조작을 반복한다. 최종적으로는 m 개의 정점이 전부 최소치로 수렴한다. 탐색의 종료는 다음의 심플렉스의 각 정점의 평가치의 표준편차가 식(15)와 같이 $\epsilon(10^{-6})$ 이 하일 때로 한다. 여기서 평가치의 평균치는

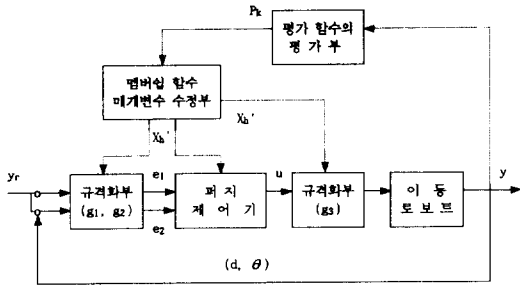


그림 6 자기 동조 제어기 구성도
Fig. 6 Block diagram of fuzzy control of self tuning algorithm

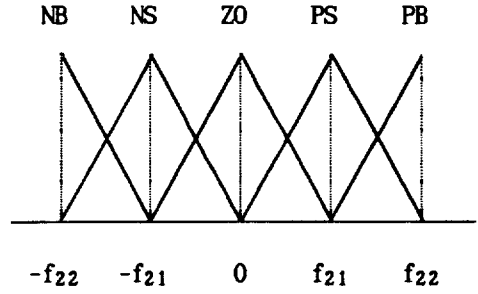


그림 8 입력 퍼지 변수 x_2
Fig. 8 Membership functions x_2 of input variable

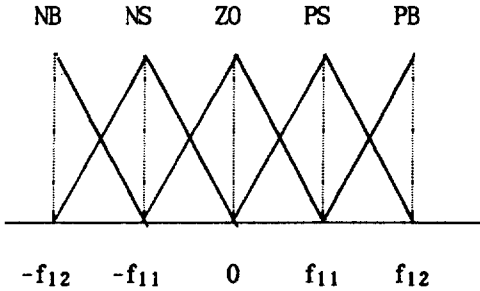


그림 7 입력 퍼지 변수 x_1
Fig. 7 Membership functions x_1 of input variable

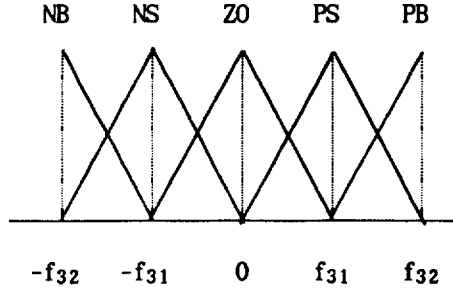


그림 9 출력 퍼지 변수 y
Fig. 9 Membership function y of output variable

표 1 자기 동조 알고리즘
Table 1 Flow of the self tuning algorithm

1. 동조될 매개변수의 초기데이터 $X^k = (g_1^k, g_2^k, g_3^k, f_{11}^k, f_{12}^k, f_{21}^k, f_{22}^k, f_{31}^k, f_{32}^k)$ 를 입력하고 하중치 α 의 초기값은 1.3으로 한다. 여기서 $k=1, \dots, m$ 이며, 최소 $m+1$ 개 이상으로 한다.
2. 각 정점 X_k 를 이용, 제어 프로그램을 시작하여 평가함수 P_k 를 구한다.
3. 평가치중 최대인 평가치를 갖는 정점 X_h 를 식(14)를 이용하여 새로운 매개변수 X_h' 을 구한다.
4. 새로운 매개변수 X_h' 를 이용, 제어프로그램을 시작하여 평가함수 P_h' 를 구한다.
5. 만약 $P_h' \leq P_h$ 이면, X_h 를 X_h' 으로 바꾸고 완료 판정을 행한다. 완료가 되지 않으면 3단계로 간다. 만약 $P_h' > P_h$ 이면 하중치 α 를 변경한 후, 새로운 X_h' 를 구하여 3단계로 간다.
6. 만약 하중치 α 를 바꾸어도 개선된 점 X_h' 를 얻을 수 없다면, 반사 과정은 점 X_h 대신에 두번째 가장 높은 평가치를 갖는 점으로 교체한 후 3단계로 간다.

$P_{ave} = \sum_k P_k / m$ 으로 한다.

$$[1/m \cdot \sum_{k=1}^m (P_k - P_{ave})^2]^{1/2} \leq \epsilon \quad (15)$$

자기 동조 기법의 구성도를 그림 6에 나타낸다. 제어 동작을 실행하고 제어 대상의 출력으로부터 평가부에서 목적함수 P_k 가 계산된다. 이 P_k 에 의해 매개변수 수정부에서 새로운 정점 X_h' 가 계산

된다. 다음 동조 매개변수를 X_h' 에 설정하고 재차 제어 동작을 실행한다. 제어 동작의 실행, 제어 결과의 평가, 매개변수의 수정을 반복하는 것의 해 최적 퍼지 추론의 매개변수를 구할 수 있다. 지금 식(12)의 제어 규칙을 고찰한다. 단 여기에서는 퍼지 변수들은 그림 7, 8, 9에서와 같이 입출력 변수 각각 5종류로 한다. 그림 7, 8, 9에서와 같

표 2 퍼지 제어 규칙 테이블
Table 2 Table of the fuzzy rules

조향각 (y)		방향각(θ)				
		NB	NS	ZO	PS	PB
거	NB	PB	PB	PS	ZO	NS
	NS	PB	PS	PS	ZO	NS
리	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	PS	PS	ZO	NS	NS	NB
차	PB	PS	ZO	NS	NB	NB

이 전체 집합을 입력변수 d 에 대해서는 $[-f_{12}, f_{12}]$, 입력변수 θ 에 대해서는 $[-f_{22}, f_{22}]$, 출력 변수 y 에 대해서는 $[-f_{31}, f_{31}]$ 로 규격화한다. 각각의 변수를 규격화하기 위한 계수를 규격화 정수라 하고 g_1, g_2, g_3 로 표시한다. 퍼지 변수를 이용한 제어 규칙은 표1의 규칙 테이블로 표현 가능하다. 표2는 25개의 제어규칙을 나타내고 있고, 규칙 테이블의 멤버십 함수의 매개변수 $f_{11}-f_{32}$ 와 규격화 정수 g_1, g_2, g_3 는 초기 데이터 집합 $X^k = (g_1^k, g_2^k, g_3^k, f_{11}^k, f_{12}^k, f_{21}^k, f_{22}^k, f_{31}^k, f_{32}^k)$ 로 부터 심플렉스법을 이용하여 동조한다. 여기서 2개의 근접한 퍼지 집합의 멤버십함수의 최대 중복은 0.5이며, 3개의 퍼지 집합은 중복되지 않도록 퍼지 집합의 대(support)를 조정한다. 이것은 Matsumoto[12]가 제안한 멤버십 함수의 최적 배열(optimal arrangement)에서 보여준다. 여기서 하중치 α 는 최적인 규격화 정수 및 멤버십함수의 매개변수를 동시에 수정하기 위해 도입된다. 자기 동조 알고리즘은 표1과 같다.

4. 주행 및 장애물 회피를 위한 퍼지 제어 알고리즘

4.1 벽면 주행을 위한 퍼지 제어기

퍼지 이론을 이용하여 이동로봇을 제어하는 연구가 몇가지 진행되고 있다[5, 14]. 그들 대부분은 제어 규칙이 실험이나 경험에 의해 얻어지며, 입력력 변수의 멤버십 함수도 실험에 의해 얻어지므로 반복 실험에 의한 시간이 요구된다. 본 절에서는 자율 이동로봇에 장착된 초음파 센서에 의

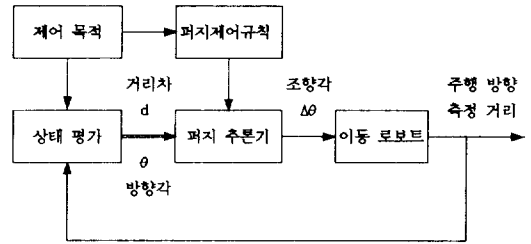


그림 10 벽면 주행을 위한 퍼지 제어 블록도
Fig. 10 Block diagram of fuzzy control for wall following navigation

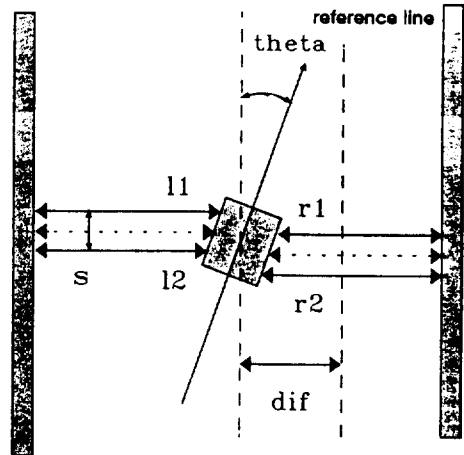


그림 11 벽면 주행을 위한 모델
Fig. 11 Model for wall following navigation

한 거리데이터를 기초로 하여 기준 경로로부터의 거리차 d 와 기준 경로와의 각도차 θ 에 의해 주행 경로를 찾는 벽면 주행 알고리즘을 논한다. 주위에 이용 가능한 대상이 있는 곳에서는 그 물체의 면을 이용하여 벽면 주행을 하였다. 그리고 벽면 주행 방법으로는 우측 벽과 일정한 간격으로 주행하는 우측 벽면 주행(right wall follow), 좌측 벽과 일정한 간격으로 주행하는 좌측 벽면 주행(left wall follow)와 좌우측 벽의 중간으로 주행하는 중간 벽면 주행(middle wall follow)등이 있다. 사용된 센서는 이동 로봇의 좌우측에 부착된 4개의 초음파 센서(S_0, S_n, S_p, S_m)로 해당 벽면과의 거리 l_1, l_2, r_1, r_2 를 이용하였다. 그림 10은 벽면 주행을 위한 퍼지 제어기 블록도이며, 그림 11은 벽면 주행을 위한 모델이다. 식(16)~(18)은 각각 우측 벽면, 좌측 벽면, 좌우측 벽면 주행시 입력 변수 θ 를 거리 데이터로부터 구하는 식을 나타낸다.

$$\theta = \arctan(r_1 - r_2) / s \quad (16)$$

$$\theta = \arctan(l_1 - l_2) / s \quad (17)$$

$$\begin{cases} d_1 = r_1 - r_2 \\ d_2 = l_2 - l_1 \\ \theta = (\arctan(d_1/s) + \arctan(d_2/s)) / 2 \end{cases} \quad (18)$$

여기서, θ 는 이동 로봇의 주행 방향, r_1, r_2 는 초음파 센서 S_9, S_{10} 에서 측정된 거리 데이터, l_1, l_2 는 초음파 센서 S_0, S_8 에서 측정된 거리 데이터, d 는 기준선과의 오차이며, s 는 우측의 초음파 센서 S_9 와 S_{10} , 좌측의 초음파 센서 S_0 와 S_8 사이의 거리이다. 기준선과 로봇과의 거리차 d 의 언어 변수는 Negative Big, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Big으로, 주행 방향 θ 에 대한 언어 변수는 Left Big, Left Small, Zero, Right Small, Right Big 등으로 각각 5개로 퍼지 분할하였으며, 퍼지 제어기 출력인 조향각 $\Delta\theta$ 는 Left Big, Left Small, Zero, Right Small, Right Big으로 하였다. 입출력 변수의 멤버십 함수는 그림 7, 8, 9와 같이 삼각형을 사용하였으며, 퍼지 규칙은 표2와 같이 25개로 하였다. 본 연구에서 25개의 제어 규칙은 경험에기본을 두어 정하였으며, 멤버십 함수의 매개변수는 3절에서 제안한 자기 동조 알고리즘에 의하여 오프라인으로 구하였다.

4.2 자기 유도 주행을 위한 퍼지 제어기

주위에 벽면이 없는 경우, 이동 로봇 내부에 있는 좌표계에 의존한 목적지로의 자기 유도 주행을 위한 퍼지 제어 알고리즘은 다음과 같다. 이동 로봇은 k 샘플링 구간에서의 현재의 로봇 위치 (X_p, Y_p, θ_p) 와 주어진 목적지의 좌표 (X_c, Y_c) 를 가지고 로봇이 움직여야 할 방향각 $\theta_m(k)$ 를 식 (19)를 이용하여 결정하고 퍼지제어기를 통해 목적지로 주행하기 위한 조향각 $\Delta\theta$ 를 구한다. 이때 퍼지 제어기의 입력 변수는 방향각 $\theta_m(k)$ 이며, 그림 12와 같이 Left Big, Left Small, Zero, Right Small, Right Big 등 5개로 퍼지 분할하였으며, 출력인 조향각 $\Delta\theta$ 는 그림 13과 같이 Right Big, Right Small, Zero, Left Small, Left Big 등 5개로 분할하였다. 퍼지 제어 규칙은 식 (20)과 같이 한다. 여기서 입출력 멤버십 함수의 규격화 정수 g_1, g_2 와 매개변수 m_1, m_2, m_3, m_4 는 3절에서 제안한 자기동조 방법을 사용하여 오프라인으로 동정한 다.

$$\theta_m(k) = \arctan\left(\frac{Y_p(k) - Y_c}{X_c - X_p(k)}\right)$$

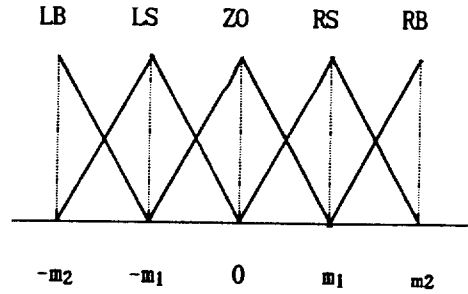


그림 12 입력 퍼지 변수 θ_m
Fig. 12 Membership functions θ_m of input variable

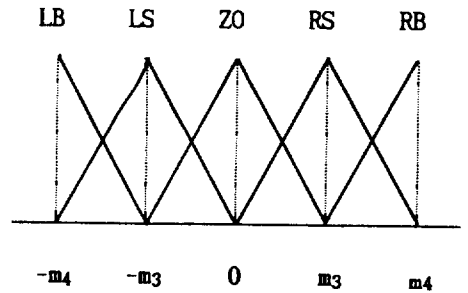


그림 13 출력 퍼지 변수 $\Delta\theta$
Fig. 13 Membership functions $\Delta\theta$ of output variable

$$-\theta_p(k) \quad (19)$$

R_1 : IF θ_m is Left-Big Then $\Delta\theta$ is Right-Big.

R_2 : IF θ_m is Left Then $\Delta\theta$ is Right.

R_3 : IF θ_m is Medium Then $\Delta\theta$ is Medium.

R_4 : IF θ_m is Right Then $\Delta\theta$ is Left.

R_5 : IF θ_m is Right-Big Then $\Delta\theta$ is Left-Big.

$$(20)$$

4.3 장애물 회피를 위한 퍼지 제어

이동 로봇의 자기 유도 주행이나 벽면 주행시 가장 문제가 되는 것은 주행 경로상에 나타나는 장애물이다. 장애물은 크게 두가지로 분류되는데 하나는 주행 경로상에 위치한 고정 장애물이고 다른 하나는 주행 경로상에 갑자기 나타나는 이동 장애물이다. 고정 장애물은 회피할 경로의 폭이 이동 로봇 자체의 폭보다 어느정도 큰 경우는 문제가 되지 않으나 작은 경우에는 이동 로봇이 비껴갈 공간이 없다는 문제가 발생한다. 이동 장애물의 경우는 고정 장애물과 달리 장애물에 대한

정보가 위치와 속도 벡터로 주어지기 때문에 장애물의 인식과 회피 알고리즘이 매우 복잡하고 또한 퍼지 제어 규칙도 매우 많아지게 된다. 여기에서는 규칙에 기본을 둔 퍼지 제어를 이용한 고정 장애물의 회피 알고리즘을 제시한다. 주행중 이동로봇이 센서에 의해 장애물을 감지하면 이동로봇은 통과 가능한 개방된 통로를 선택하기 위해 센서로 주위 환경을 감지한다. 통과 가능한 통로가 여러개인 경우에는 규칙에 기본을 둔 퍼지 추론에 의하여 가장 적합한 통로를 선택한다. 그다음, 선택된 통로 중심의 중앙으로 이동로봇을 주행시키기 위한 조향각 퍼지 추론에 의하여 결정한다. 따라서 장애물 회피 주행에는 2단계의 퍼지 추론을 이용한다. 각각은 다음과 같다.

4.3.1 장애물 감지 및 주행 통로의 선택

주행중 이동로봇의 전방 장애물에 관한 정보는 2절에서 설명한 바와 같이 이동로봇 전방에 15° 각도로 배치된 7개의 초음파 센서로부터 얻는다. 그림 14는 이동로봇이 주행중 장애물을 발견한 것을 도식화한 것이다.

여기서 S_0 , S_9 는 좌, 우측 벽면과의 거리 측정을 위한 센서, $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_8$ 는 선방 장애물을 감지하기 위한 센서, L_1, L_2 는 각 통로의, 넓이이며, θ_{m1}, θ_{m2} 는 각 통로의 방향을 나타낸다. 이때 장애물 감지 센서는 이동로봇의 왼쪽, 오른쪽, 중앙 방향의 장애물을 감지하도록 1) 센서군 1(S_{1c}): 1, 2, 3 2) 센서군 2(S_{2c}): 3, 4, 5, 3) 센서군 3(S_{3c}): 5, 6, 8등 3개의 센서군으로 분류한다. S_{1c} 이 감지되면 주행 경로상의 왼쪽, S_{2c} 가 감지되면 중앙, S_{3c} 가 감지되면 오른쪽 방향에 장애물이 있는 것으로 간주한다. 이동로봇은 주행중 각 센서군에 의해 감지된 장애물의 크기와 각 통로의 폭 및 현재의 진행 방향에서 좌우 통로 중심까지의 각도 θ_{m1}, θ_{m2} 를 구한 후, 이를 입력변수로 하는 퍼지 추론을 통해 장애물 회피 주행에 가장 적합한 통로를 선택한다. 이동로봇의 진행 방향을 0으로 하고, 식(21)~(23)과 같이 통로의 중심까지의 각도 θ_m 를 구한다.

- 1) 센서군 S_{1c} 가 감지될 때
 - $L = \text{distance}_9$
 - $\theta_m = \arctan((L/2)/\text{distance}_3)$ (21)
- 2) 센서군 S_{2c} 가 감지될 때
 - $L = \text{distance}_0$

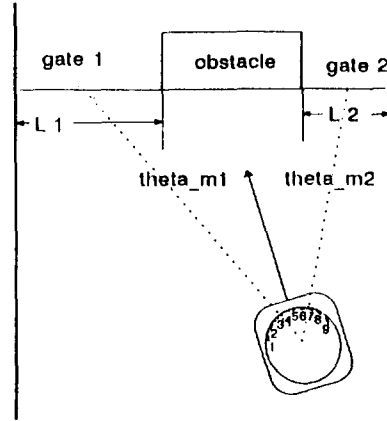


그림 14 이동로봇에 의한 장애물의 감지
Fig. 14 Geometry of the obstacle and the mobile robot

$$\theta_m = \arctan((L/2)/\text{distance}_5) \quad (22)$$

3) 센서군 S_{3c} 가 감지될 때

$$\begin{aligned} L_1 &= \text{distance}_0 \\ \theta_{m1} &= \arctan((L_1/2)/\text{distance}_5) \quad (23) \\ L_2 &= \text{distance}_9 \\ \theta_{m2} &= \arctan((L_2/2)/\text{distance}_3) \end{aligned}$$

여기서, distance_9 는 S_9 의 측정값(오른쪽 벽면과의 거리), distance_0 는 S_0 의 측정값(왼쪽 벽면과의 거리), distance_3 는 S_3 의 측정값, distance_5 는 센서 S_5 에서의 거리 데이터이다. θ_m 값은 이동로봇의 진행방향을 0으로 한 경우이므로 현재의 진행방향을 고려하면 식(24)와 같다. 이때 장애물이 감지되지 않으면 θ_m 은 0이 된다.

$$\theta_m = \theta_m - \text{Heading degree} \quad (24)$$

이동로봇이 주행중 장애물이 나타나면 이동로봇이 통과 가능한 통로가 좌우에 각각 위치하게 된다. 이때 이동로봇은 통과할 통로를 선택해야 하는데, 이는 각 통로 중앙까지의 각도 θ_{m1} 과 통로의 폭 L 을 입력 변수로 하고, 적합도 α 를 출력 변수로 하는 퍼지 추론을 통해 수행된다. 그림 14에서와 같이 장애물의 왼쪽 통로를 통로-1, 오른쪽 통로를 통로-2라 하면, 통로-1에 대한 적합도 α_1 과 통로-2에 대한 적합도 α_2 를 각각 구해서 적합도 α 값이 큰 통로를 선택한다. 적합도 α 는 이동로봇이 통과할 수 있는 적합도를 나타내며 제어 목적은 각 통로의 α 값을 결정하는데 있다. 이때 사용된 제어 규칙은 식(25)과 같다.

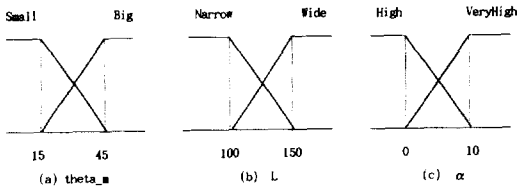


그림 15 통로 선택을 위한 퍼지 언어 변수
 Fig. 15 Membership functions of fuzzy control for gate selection

R_1 : If Theta $_m$ is Small then α is Very High.
 R_2 : If L is Wide then α is High. (25)

여기서, θ_{m} 은 로봇 주행 방향과 통로 중심과의 각도차, L 은 통로의 넓이이며, α 는 통로 선택 계수를 나타낸다. 통로를 선택하는데 두가지만을 고려하였는데 로봇과 통로의 각도차가 클수록 가장 높은 α 값을 주고 넓은 통로에 높은 α 값을 주었다. 만약 목표점을 주었다면 목표지점과 로봇의 각도차도 통로를 선택하는데에 고려할 수 있을 것이다. 그림 15에서와 같이 입력 변수 θ_{m} 은 Small, Big, 거리 L 은 Narrow, Wide로 퍼지 분할 하였으며, 출력 변수 α 는 High와 Very High로 분할하였다.

4.3.2 장애물 회피 주행 제어 기법

4.3.1절에서 감지한 개방된 통로의 중앙을 향해 주행하기 위해 식(19)에서 구한 θ_{m} 을 입력 변수로 하는 퍼지 추론을 통해 실제의 조향각 $\Delta\theta$ 를 구한다. 제어 목적은 이동 로봇을 통로 중앙으로 조향하는 것이다. 이때의 제어 규칙은 식(20)과 같다. 입력 변수의 퍼지 분할, 규칙화 정수 및 매개변수 동조는 4.2절에서 제안한 방법과 동일하다. 그림 16은 이동로봇이 주행중 장애물 감지 및 회피를 위한 알고리즘 흐름도를 나타낸다.

5. 시뮬레이션 및 실험 결과 고찰

본 연구에서 제안된 퍼지 제어 이론을 이용한 이동 로봇의 자율 주행 및 장애물 회피 알고리즘은 실험에 들어가기 전에 자체 개발한 시뮬레이션 프로그램으로 시뮬레이션을 행한 다음 YMR로 그 실용성을 실험을 하였다. 2절에서 설명한 이동 로봇의 기하학은 시뮬레이션에 이용된다. 본 실험 순서는 다음과 같다. 제어 규칙 베이스는 변하

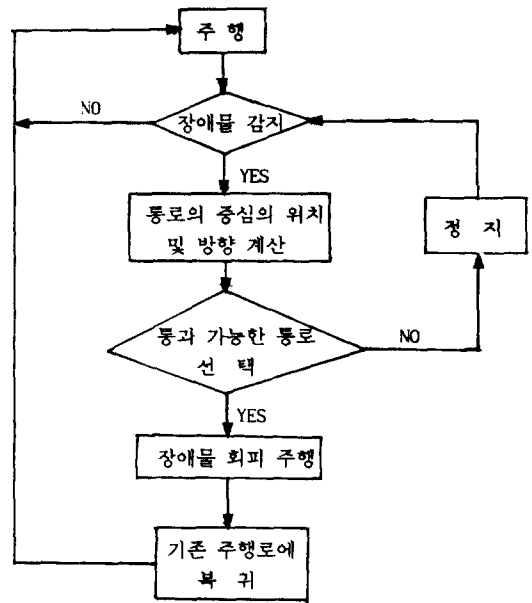


그림 16 이동로봇의 장애물 회피 알고리즘 흐름도
 Fig. 16 Flowchart for obstacle avoidance of the mobile robot

지 않는다고 가정하고 입출력 함수가 모두 멤버십 함수로 표현되는 제어규칙을 설정한다. 여기서는 벽면 주행을 위한 제어 규칙은 표 2를 이용하고, 자기유도주행을 위한 제어 규칙은 식(20)을 이용한다. 그리고 본 제어 규칙을 이용하여 퍼지 제어기의 입출력 변수의 매개변수를 자동 동조하기 위한 규칙화 정수 및 멤버십 함수의 매개변수 등은 미리 실험에 의하여 데이터를 구한다. 3절에서 제안한 자기동조 알고리즘에 의해 최적의 매개변수를 구한다. 마지막으로 그 결과를 이동로봇 YMR로 실험하여 실용성을 입증한다.

5.1 자기동조 시뮬레이션

주행을 위한 퍼지 제어 규칙을 입출력 변수는 각각 5개로 하여 멤버십함수의 매개변수를 실험에 의해 구한다. 벽면주행을 위해 측정된 매개변수의 데이터집합은 3개의 입출력 규칙화 정수와 6개의 입출력 멤버십함수의 매개변수 ($g_1, g_2, g_3, f_{11}, f_{12}, f_{21}, f_{22}, f_{31}, f_{32}$), 자기유도주행을 위한 데이터 집합은 2개의 입출력 규칙화 정수와 4개의 입출력 멤버십 함수의 매개변수 ($g_1, g_2, m_1, m_2, m_3, m_4$)들이며 각각 100개의 실험 데이터를 사용했다. 동조후의 데이터와 비교하기 위해 각각 벽면 주행 및 자

표 3 벽면 주행을 위한 멤버십 함수 데이터
Table 3 Parameters of membership functions for wall following navigation

	g_1	g_2	g_3	f_{11}	f_{12}	f_{21}	f_{22}	f_{31}	f_{32}	IAE
동조 전	170.00	2.00	3.00	2.00	3.00	1.00	3.00	2.00	3.00	21.555
동조 후	185.82	4.12	4.60	1.91	3.73	2.09	4.07	2.17	3.84	8.925

표 4 자기유도 주행을 위한 멤버십 함수 데이터

Table 4 Parameters of membership functions for dead reckoning navigation

	g_1	g_2	m_1	m_2	m_3	m_4	IAE
동조 전	4.0	6.0	2.0	4.0	1.9	5.4	39.1046
동조 후	8.39	9.02	2.20	4.07	1.99	3.79	4.9301

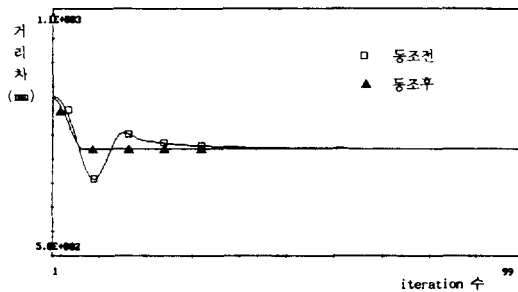


그림 17 이동로봇의 벽면 주행 궤적
Fig. 17 Navigation trajectory of wall following navigation

기 유도 주행을 위한 초기 실험 데이터들 중 1개와 3절에서 제안한 자기동조 알고리즘에 의해 제어 결과의 목적함수 식 13과 같이 주행선과 기준선과의 오차의 합(IAE)이 최소로 되도록 동조한 후의 매개변수는 각각 표3, 표4와 같다. 그림 17은 이동로봇의 초기 위치를 기준선과 300[mm], 기준 방향과 20°로 놓고 주행 시킨 경우의 동조전과 동조후의 벽면 주행 궤적을 나타낸 것이다. 표3, 표4에서와 같이 실험에 의해 구한 매개변수들로 자기 동조한 후의 매개변수의 평균치가 벽면 주행을 경우 21.555에서 8.925, 자기 유도 주행을 경우 39.1046에서 4.9301로 향상됨을 알 수 있다.

5.2 주행 및 장애물 회피 실험 결과

제안된 주행 및 장애물 회피 알고리즘의 실용성

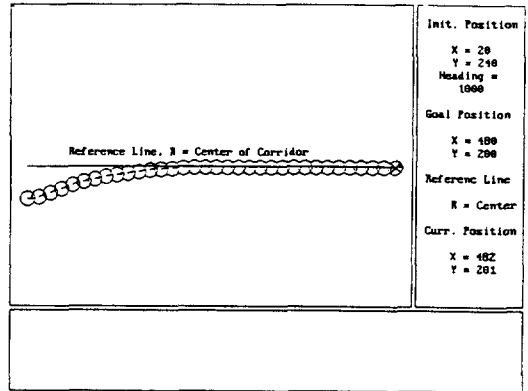


그림 18 통로 가운데 주행 시뮬레이션 결과
Fig. 18 Result of simulation for middle wall follow

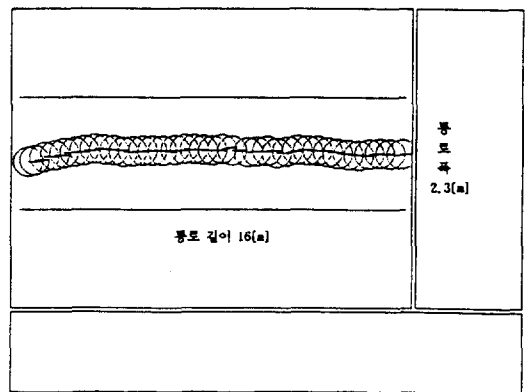


그림 19 통로 가운데 주행 실험 결과
Fig. 19 Result of experiment for middle wall follow

을 보이기 위해 2가지 주행 실험을 하였다. 하나는 벽면과 일정 간격을 따라 주행하도록 하는 벽면 주행 실험 및 주행중 장애물을 감지하면 장애물을 회피하여 주행하는 장애물 회피 실험을 하였다. 벽면과의 거리 및 장애물 감지에 이용된 센서는 초음파 센서이며, 장애물 회피 주행을 위한 자기유도 주행에 이용된 센서는 구동 모터에 부착된 엔코더이다.

벽면 주행은 왼쪽 벽면 주행(left.wall.follow(x)), 오른쪽 벽면 주행(right.wall.follow(x)) 및 통로 가운데 주행(middle.wall.follow) 등이 있으나, 통로 가운데 주행을 보기로 실험하였다. 주행 실험에 사용된 입력력 멤버십 함수의 매개변수는

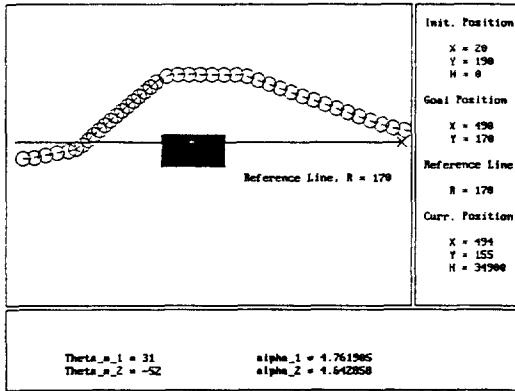


그림 20 장애물 회피 주행 시뮬레이션 결과
Fig. 20 Result of simulation for obstacle avoidance navigation

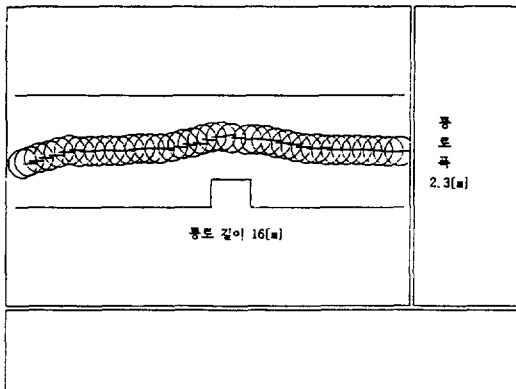


그림 21 장애물 회피 주행 실험 결과
Fig. 21 Result of experiment for obstacle avoidance navigation

5.1절에서 동조된 매개변수를 이용하였다. 그림 18은 가운데 벽면 주행 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 제안된 알고리즘은 수렴성이 양호함을 볼 수 있다. 주행 환경은 폭이 2.3m인 통로이며, 이 통로의 중심을 주행하도록 제안된 퍼지 제어 알고리즘으로 실험하였다. 초기에 이동로봇을 기준선과 300[mm], 기준 방향과 -20° 로 하여 주행 실험한 결과를 그림 19에 도시하였다. 그림에서와 같이 제안된 제어 알고리즘은 기준선에 빨리 수렴함을 볼 수 있다. 자기 유도 주행은 장애물 회피 주행과 같으므로 실험의 중복을 피하기 위해 장애물 감지 및 회피 주행 실험을 하였다. 장애물 감지방법은 4.3.1절에서 제안한 방법을 사용하고,

통로 결정에 이용되는 퍼지 변수들은 실험에 의해 구하였다. 그리고 주행 통로 결정 후, 이동로봇의 장애물 회피 주행을 통로 가운데 임의의 목표점을 설정하여 자기 유도 주행 방법을 사용하여 회피 주행을 하였다. 장애물 회피 주행 실험에 사용된 입출력 변수의 매개변수는 5.1절에서 동조된 매개변수를 이용하였다. 그림 20은 제안된 장애물 회피 퍼지 알고리즘에 의한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과이다. 먼저 이동 로봇은 통로 가운데를 따라 주행하다가 장애물에 1.5m이내로 접근하게 되면 통과 가능한 통로를 선택하고 장애물을 회피한 후에는 다시 통로 가운데 주행을 하도록 하였다. 시뮬레이션과 동일한 프로그램으로 폭이 2.3m정도인 복도에서 실험한 결과는 그림 21에 나타내었다. 그림 21은 통로 가운데를 따라가다가 장애물을 발견하여 회피한 후 다시 주행로로 복귀하는 실험 결과를 도시하였다. 실험 결과 바퀴와 바닥과의 마찰, 초음파 센서의 거리측정시 오차로 인해 약간의 요동이 있었으나 곧 수렴함을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 이동로봇이 내제 센서의 엔코더와 외제 센서인 초음파 센서들의 거리 데이터에 기본하여 실시간으로 벽면 주행 및 장애물 회피와 목적 지점으로의 자기 유도 주행을 행할 수 있는 퍼지 제어 알고리즘과 제안된 퍼지 제어기의 입출력 멤버쉽 함수의 매개변수를 자기 동조하는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 멤버쉽 함수의 매개변수의 동조는 실험에 의해 구해진 매개변수들의 성능지수(performance)에 비해 많이 향상되었으며, 주행 및 장애물 회피를 위해 제안된 퍼지제어 알고리즘에 적용하여 그 실용성을 보였다. 본 연구에서는 이동로봇의 퍼지 제어 변수들을 오프라인으로 구하였으나, 향후 변하는 주행 환경에 유연하게 대응 가능한 온라인 자기 동조 기법에 대한 연구와 자율 주행을 위한 제어 규칙 베이스의 자동 생성에 관한 연구도 함께 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Masaharu Takano, "Study on Mobile Robot Navigation Control by Internal and External Sensor Data with Ultrasonic Sensor," IEEE RSJ international Workshop on Intelligent

- Robots and Systems, pp. 456~463, Sep. 1989.
- [2] C.W. Warren, "Global Path Planning using Artificial Potential Fields," Proc. IEEE int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 316~321, 1989.
- [3] A. Elfes, "Sonar Based Real World Mapping and Navigation," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, 1987.
- [4] A. Kato, "Obstacle Avoidance Based on Approximate Reasoning for Mobile Robots," IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 115~121, Sep, 1989.
- [5] Shigeki Ishikawa, "A Method of Indoor Mobile Robot Navigation by Using Fuzzy Control," IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 1013~1018, 1991.
- [6] T. Takagi, and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modelling and Control," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-15, No. 1, pp. 116~132, 1985.
- [7] A. Maeda, and M. Funabashi, "A Self-Tuning Algorithm for Fuzzy Membership Functions Using Computational Flow Network," 4th IFSA '91 Brussels, pp. 129~132, 1991.
- [8] H. Nomura, and N. Wakami, "A Self Tuning Method of Fuzzy Control by Descent Method," 4th IFSA '91. Brussels, pp. 155~159, 1991.
- [9] H. Akahori, and S. Kondo, "Self-tuning Method of Fuzzy Reasoning by Optimization technique and its Application to vehicle control," 5th Fuzzy System Symposium, pp. 77~81, June, 1989.
- [10] Transitions Reaserch Cooperation, "Labmate User Manual," 1991.
- [11] Polaroid Corporation, "Polaroid Ultrasonic Ranging System Handbook Application Notes, Technical Papers," Polaroid Corporation, 1989.
- [12] H. Matsumoto, "Optimum Control Based on Fuzzy Inference and Its Simulation," Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Network, pp. 61~64, July, 1990.
- [13] S.S. Rao, "Optimization Theory and Applications." A Halsted Press Book
- [14] K. Suzuki, and Y. Fujii, "Self Tunning Fuzzy Control of a Mobile Robot," IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 108~114, Sep. 1989.