

## Autonomous Mobile Robot Navigation using Artificial Immune Networks and Fuzzy Systems

金良炫<sup>\*\*\*</sup> · 李東濟 · 李敏中<sup>\*\*\*</sup> · 崔榮奎<sup>§</sup>  
 (Yang-Hyun Kim · Dong-Je Lee · Min-Jung Lee · Young-Kiu Choi)

**Abstract** - The navigation algorithms enable autonomous mobile robots to reach given target points without collision against obstacles. To achieve safe navigations in unknown environments, this paper presents an effective navigation algorithm for the autonomous mobile robots with ultrasonic sensors. The proposed navigation algorithm consists of an obstacle-avoidance behavior, a target-reaching behavior and a fuzzy-based decision maker. In the obstacle-avoidance behavior and the target-reaching behavior, artificial immune networks are used to select a proper steering angle, make the autonomous mobile robot avoid obstacles and approach a given target point. The fuzzy-based decision maker combines the steering angles from the target-reaching behavior and the obstacle-avoidance behavior in order to steer the autonomous mobile robot appropriately.

Simulation and experimental results show that the proposed navigation algorithm is very effective in unknown environments.

**Key Words** : Autonomous Mobile Robot, Artificial Immune Network, Fuzzy-based Decision Maker

### 1. 서 론

자율이동로봇의 주행 알고리즘은 크게 전역경로계획(global path planning)과 지역경로계획(local path planning)으로 나눌 수 있다. 전역경로계획은 자율이동로봇에게 미리 주위 환경에 대한 정보를 주고 목표점까지의 최단 경로를 생성하는 방법이다. 그러나 이 알고리즘은 주위 환경에 대한 정확한 정보를 필요로 하며 잘못된 정보가 주어졌거나 환경의 변화가 발생한 경우 목표점까지 주행하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 지역경로계획은 자율이동로봇이 주위 환경에 대한 정보를 사전에 전혀 가지고 있지 않은 상태에서 센서를 통해 얻은 정보만을 이용하여 주어진 목표점까지 안전하게 주행할 수 있게 하는 방법이다. 그리고 미리 주위 환경에 대한 정보를 가지고 있더라도 실제 환경에서는 사람이나 물건의 이동과 같은 환경의 변화가 항상 발생할 수 있으므로 지역경로계획은 높은 자율성과 지능을 가진 자율이동로봇의 구현에 있어서 갖춰야 할 필수적인 기능이다.

기존의 지역경로계획에 대한 연구로 O. Khatib는 포텐셜 필드(potential field) 방법을 제안하였다[1]. 포텐셜 필드 방법에서 목표점은 로봇을 끌어당기는 가상 인력을 발생시키고

장애물은 로봇을 밀어내는 가상 척력을 발생시키는 원리를 기반으로 한 가상 힘(virtual force)의 개념을 도입하였다. J. Borenstein과 Y. Koren은 2차원의 격자도(grid map)을 기반으로 가상 힘의 개념을 적용시킨 VFF(virtual force field) 방법을 제안하였다[2]. 또한 이들은 포텐셜 필드개념을 이용한 방법들의 단점으로 장애물이 많은 장소에서의 진동(oscillation) 현상과 국부 최소점이 많이 발생함을 지적하였고 이를 개선한 VFH(vector field histogram) 방법을 제안하였다[3, 4]. VFH 방법에서 2차원 격자도가 로봇 주위를 섹터 모양으로 나눈 1차원 극 히스토그램(polar histogram)으로 변환되고 장애물의 밀도가 계산된 다음 자율이동로봇의 회전 방향각이 결정된다. 이와 같은 방법들은 센서를 통해 환경에 대한 정보를 수집하고 이를 바탕으로 환경에 대한 모델을 작성하여 경로계획을 수립하는 방법들이며 일련의 센싱-모델링-계획-실행순서의 과정을 거쳐 경로계획을 하게된다[5]. 또한 퍼지 시스템이나 신경 회로망을 이용한 경로계획 알고리즘도 제안되었다[6-8]. 퍼지 시스템을 이용한 경로계획의 경우 전문가 지식을 이용해 퍼지 규칙을 생성할 수 있는 장점이 있지만 입력이 많아질 경우 퍼지 규칙 설정에 어려움이 따르고, 신경 회로망을 이용한 경로계획에 있어서는 학습된 곳 이외의 장소에서 목표점까지 도달하지 못하고 장애물과 충돌하는 경우가 문제점으로 지적될 수 있다.

위에서 언급한 센싱-모델링-계획-실행순의 지역경로계획은 많은 계산시간이 필요하고 센서의 노이즈 등에 민감하다는 단점이 있으며, 최근 들어 로봇의 주위 환경 변화에 대한 빠른 반응을 얻기 위해 행위 기반(behavior-based) 경로계획에 대한 관심이 높아지고 있다. 행위 기반 방법은, 로봇의 행

\* 非 會 員 : 三聖電子 메카트로닉스센터연구원 · 工學碩士  
 \*\* 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 博士課程  
 \*\*\* 正 會 員 : (주) IT 커뮤니티 연구실장 · 工博  
 § 正 會 員 : 釜山大 컴퓨터 및 정보통신연구소 전자전자정보 컴퓨터공학부 教授 · 工博  
 接受日字 : 2002年 1月 31日  
 最終完了 : 2002年 7月 3日

위를 환경에 대한 반응으로 정의하고 구현한 여러 행위들의 출력을 조합하여 로봇이 처한 환경에 알맞은 출력을 구한다. Ishiguro 등은 인공 면역망(artificial immune network)을 이용하여 행위기반 경로계획을 제안하였다[9-12]. 이들은 장애물 회피 행위와 목표점 도달 행위에 대해 각각 인공 면역망을 이용하여 알고리즘을 구성하고 두 행위에 일정한 가중치를 곱해 최종 출력을 구하는 경로계획을 제안하였다. 하지만 이들 방법의 경우 로봇의 동작(전진, 후진, 30°회전 등)을 항체로 설정하여 로봇의 움직임이 연속적이지 못하며 한 행위가 완료되어야만 다음의 행위를 위한 계산과정이 시작된다. 그리고 두 행위의 결합을 위한 가중치가 상수로 고정되어 있어 환경에 따라 장애물과 충돌하거나 목표점에 도달하지 못하는 경우가 발생하였으며 로봇의 이동 속도도 일정하게 고정시켰다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하여 자율이동로봇이 목표점까지 안전하게 주행할 수 있게 하였고 보다 안정성 있고 유연한 동작을 할 수 있는 지역경로계획을 구현하였다.

본 논문에서는 행위 기반 지역경로계획을 인공 면역망과 퍼지 시스템을 이용하여 구현하였다. 장애물 회피 행위와 목표점 도달 행위는 각각 인공 면역망을 이용하여 구현하였으며, 항체의 개체 설정 시 로봇의 동작이 아닌 로봇의 회전 방향각으로 설정하여 연속적이고 부드러운 동작이 가능하게 하였다. 또한 기존의 방법은 단지 장애물의 유·무만을 고려하였으나[9-12], 본 논문에서는 항원·항체의 코딩 시 장애물과의 거리 개념을 도입하여 로봇 동작의 유연성과 안정성을 높였다. 행위를 결합하는 방법으로 기존 방법의 경우 고정된 가중치를 이용하여 벡터 합성을 통하여 구하였으나, 본 논문에서는 두 행위에 대한 감독(supervisor) 역할을 하는 행위 결합기를 퍼지 시스템을 통해 구현함으로써 로봇이 처한 환경에 따라 적절한 가중치를 출력해 장애물과 충돌없이 목표점까지 안전하게 도달하도록 하였다. 또한 국부 최소점 상황이 발생하였을 경우를 대비해 target switching법[13]을 적용시켰다. 주행하는 동안의 로봇의 속도도 주위 환경에 따라 적절히 변화시켜 목표점까지 가능한 한 빨리 도달하도록 구현하였다. 이와 같은 지역경로계획의 구성으로 자율이동로봇에게 환경에 대한 정보가 사전에 주어지지 않았더라도 주어진 목표점까지 센서의 정보만을 이용하여 안전하게 도달할 수 있도록 하였다. 그리고 자체 개발한 차륜형 구동방식의 자율이동로봇에 제안된 알고리즘을 적용시켜 다양한 환경에서의 실험을 수행하였고, 그 결과 제안된 알고리즘의 우수성을 검증할 수 있었다.

## 2. 장애물 회피 및 목표점 도달 행위

이 장에서는 자율이동로봇의 주행알고리즘을 구현하기 위해서 인공면역망을 이용한 자율이동로봇의 행위기 구현 방법에 대하여 기술한다.

### 2.1 인공면역망

인간의 면역체계는 생체 내부로 침투한 외부 물질(바이러스, 기생균, 박테리아 등)을 제거하여 생체의 방어 및 유지를 수행하는 시스템이다. 이러한 면역체계는 뇌의 명령에 의해

작용하는 것이 아니라 각각의 면역체계 요소들이 침투한 외부 물질에 대해서 자율적으로 대응한다. 인간의 면역체계의 기본 구성 요소는 T-림프구와 B-림프구로 알려져 있다. 이중 외부의 항원에 대응해 반응하는 림프구는 대부분 B-림프구로써 인간의 골수에서 생성되는 세포이며, 인간의 몸에는 대략  $10^7$ 개의 다른 종류의 B-림프구를 가지고 있다. 그림 1은 항원(antigen)과 항체(antibody)의 관계를 보여준다.

B-림프구의 항체는 그림 1에서 보여지듯이 'Y'형상을 가지고 있고 항체는 고유정보를 갖는 paratope와 idiotope로 구성되어 있다. 항체에 의해 인식되어지는 항원의 일부분을 epitope(항원 결정기)라고 하며 epitope를 인식하는 항체의 일부분을 paratope라 한다. 항원의 epitope와 항체의 paratope는 마치 열쇠와 자물쇠의 관계처럼 서로 일치할 경우 침투한 외부물질에 해당하는 항원은 항체에 의해 억제된다. 이러한 항체와 항원의 관계를 바탕으로 N. K. Jerne 가설에 의해 새로운 인공면역망이 제안되어졌다[14-16]. 그 구조는 기본적으로 항원과 항체의 억제 관계에서 추가로 두 종류 항체들의 idiotope와 paratope를 통하여 서로간의 활성화와 억제 관계를 가진다. 이러한 항체와 항원의 구조를 인공 면역망이라고 한다.

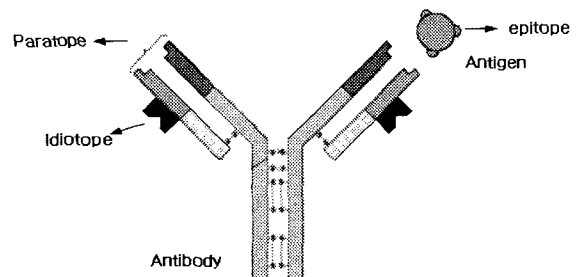


그림 1 항체와 항원의 구조  
Fig. 1 Structure of antibody and antigen

## 2.2 인공 면역망을 이용한 행위 설계

본 논문에서는 2개의 인공 면역망을 사용하여 자율이동로봇이 장애물을 회피하면서 목표점에 도달하도록 하였다. 인공 면역망의 항원은 장애물에 대한 거리정보, 이전의 회전 방향각, 목표점 방향으로 구성된 정보의 조합으로 설정하였다. 항원에 대응해 활성화되는 항체의 개체로는 자율이동로봇에 대한 9개의 회전 방향각으로 설정하였다. 구현된 인공 면역망의 구성 원리는 인간의 몸에 항원이 침입하면 이에 대응되는 항체가 활성화되듯이 일정 주기마다 측정된 거리 정보 및 추정된 로봇의 자세를 바탕으로 항원이 생성되면 자율이동로봇은 생성된 항원에 대응해 장애물 회피 및 목표점 도달 행위의 목적에 부합하는 최적의 항체 즉, 최적의 로봇 회전 방향각을 선택하는 것이다.

### 2.2.1 항원의 설정

본 논문에서는 그림 2와 같이 9개의 초음파 센서를 자율이동로봇 전반부에 22.5. 간격으로 배치하였으며, 1~9번까지 번호를 부여하였다.

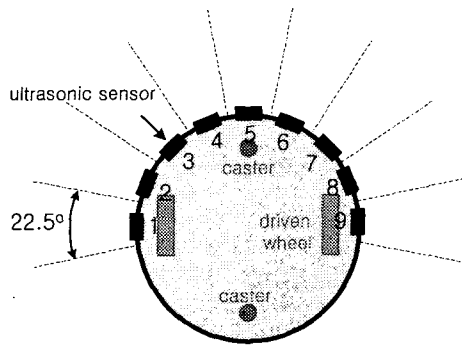


그림 2 초음파 센서의 배치  
Fig. 2 Arrangement of sonar sensors

표 1 항원 구조의 정의

Table 1 Definition of antigen structure

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
초음파 센서의 거리정보 (0.35~2.0)									이전 선택된 회전 방향각 (1~9)	목표점 방향 (1~9)

두 인공 면역망에 대한 항원의 설정은 표 1과 같다. 항원의 구성 요소는 표 1과 같이 총 11개의 요소로 이루어져 있다. 1~9번째 요소는 9개의 초음파 센서에 의해 측정된 거리 정보이며 초음파 센서에 의한 측정거리를 35[cm]~2[m]로 설정하였으므로 0.35~2.0사이의 실수형 값으로 구성된다. 10번째 요소는 이전의 샘플링 시간에 선택된 회전 방향각으로 1~9까지의 정수형 값으로 구성되며 이는 로봇의 급격한 회전 방향 전환 등을 감소시키기 위하여 고려한 항이다. 11번째 요소는 목표점 방향에 대한 정보이며 1~9까지의 정수형 값으로 구성한다. 따라서 자율이동로봇이 목표점까지 주행하는 동안 200[msec]마다 9개의 초음파 센서에 의해 측정된 거리 정보와 엔코더의 feedback 신호에 의해 추정된 로봇 자세를 바탕으로 새로운 항원이 구성되게 된다.

2.2.2 항체의 설정

장애물 회피 및 목표점 도달 행위에 대한 인공 면역망의 각 항체의 개체는 자율이동로봇의 9개의 회전 방향각으로 설정한다. 즉 구현된 인공 면역망에서 각기 목적에 부합하는 최적의 항체가 선택되는 것은 자율이동로봇이 현재의 주위 환경에 대하여 각 인공 면역망의 설계 목적에 부합하는 최적의 회전 방향각을 선택하는 것을 의미한다. 인공 면역망은 각 9개의 항체로 구성되어 있으며 이 항체들의 개체는 9개의 회전 방향각(-90.0°, -67.5°, -45.0°, -22.5°, 0.0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, 90.0°)에 각각 대응된다.

표 2는 장애물 회피 행위에 대한 인공 면역망에서 항체의 paratope 설정을 나타낸다. 항체의 paratope 구성은 항원의 epitope 구성과 유사하나 항원의 epitope의 구성요소들은 입력된 정보임을 뜻하고 항체의 paratope의 구성요소들은 활성

화되는 조건임을 의미한다. 항체의 paratope 구성 요소 중 '2.0'으로 설정된 요소는 장애물과의 거리가 멀수록 그 항체가 활성화된다는 것을 의미한다. 반대로 '0.35'로 설정된 구성요소는 장애물과의 거리가 가까울수록 그 항체가 활성화된다는 것을 뜻한다. '#' (don't care)의 경우는 장애물과의 거리와는 관계가 없는 요소임을 의미한다. 따라서 이러한 물리적 의미를 바탕으로 각 항체의 paratope의 구성 요소를 설정할 때 각 항체의 개체와 대응되는 회전 방향각을 고려하여 인간의 전문가 지식을 항체의 paratope 구성에 적용시켜 각 목적에 부합되게 설정할 수 있다.

표 2 장애물 회피 인공 면역망에 대한 항체 paratope의 구성

Table 2 Structure of antibody paratope for obstacle avoidance

	거리정보에 대한 조건									이전의 회전 방향조건	목표점 방향조건
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
항체1( 90.0°)	2.0	#	#	#	0.35	0.35	#	#	#	1	1
항체2( 67.5°)	#	2.0	#	#	#	0.35	0.35	#	#	2	2
항체3( 45.0°)	#	#	2.0	#	#	#	0.35	0.35	#	3	3
항체4( 22.5°)	#	#	#	2.0	#	#	#	0.35	0.35	4	4
항체5( 0.0°)	#	#	#	2.0	2.0	2.0	#	#	#	5	5
항체6(-22.5°)	0.35	0.35	#	#	#	2.0	#	#	#	6	6
항체7(-45.0°)	#	0.35	0.35	#	#	#	2.0	#	#	7	7
항체8(-67.5°)	#	#	0.35	0.35	#	#	#	2.0	#	8	8
항체9(-90.0°)	#	#	#	0.35	0.35	#	#	#	2.0	9	9

목표점 도달 행위에 대한 인공 면역망에서 항체 paratope의 구성도는 표2와 비슷한 형식으로 구성할 수 있다.

2.2.3 항체의 농도 변화식

각 항체에 대한 농도는 N. K. Jerne가 제안한 면역네트워크 가설을 기반으로 Farmer가 제안한 동적 방정식을 이용하여 구한다. 이 방정식은 항원과 항체의 활성화, 항체간의 활성화와 억제를 나타내는 것으로 식 (1)와 같다.

$$\frac{dA_i(t)}{dt} = \left( m_i + \frac{\sum_{j=1}^N m_{ij} a_j(t-1)}{N} \right) a_i(t-1) \quad (1)$$

$$a_i(t) = \frac{1}{1 + e^{(0.5 - A_i(t))}} \quad (2)$$

$$m_i = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{j=1}^9 (p_{ij} - e_j)^2 + w_m (p_{i10} - e_{10})^2 + w_i (p_{i11} - e_{11})^2}{M}} \quad (3)$$

여기서  $a_i(t)$ 는 항체  $i$ 의 농도,  $m_i$ 는 항원과 항체간의 활성화도를 나타내는 계수이며  $m_{ij}$ 는 항체  $i$ 와 항체  $j$ 간의 활성화와 억제 관계를 나타내는 계수이다.  $m_{ij}$ 가 양수이면 두 항체간에 활성화관

계, 음수이면 두 항체간에 억제관계가 성립함을 의미한다.  $p_{ij}$ 는  $i$ 번째 항체 paratope의  $j$ 번째 구성 요소를 뜻하며  $e_j$ 는 항원 epitope의  $j$ 번째 구성 요소를 나타낸다. 또한  $M$ 은  $i$ 번째 항체 paratope의 구성 요소 중 '#'(don't care)를 제외한 수,  $N$ 은 설정된 항체 수를 의미한다. 식 (3)은 항원과 항체간의 활성화 지수를 구하는 식으로  $w_m$ 은 이전의 회전 방향각에 대한 운동량(momentum) 역할을 하는 항에 대한 가중치이며  $w_r$ 는 목표점 방향을 고려한 항에 대한 가중치이다.

본 논문에서는 장애물 회피 인공 면역망에 대해서는  $w_m=0.2$ ,  $w_r=0.0$ 으로 설정하고 목표점 도달 인공 면역망에 대해서는  $w_m=0.2$ ,  $w_r=2.0$ 으로 설정한다. 식 (1)은 항체의 농도 변화량만을 의미하므로 실제 항체의 농도값은 변화량을 시간 변화에 대하여 누적하여 구한다. 그림 3은 각 인공 면역망에 대하여 최적의 항체(회전방향각)를 선택하는 과정을 흐름도로 나타내었다. 흐름도에서와 같이 200 [msec]를 주기로 새로 생성된 항원은 장애물 회피 및 목표점 도달 인공 면역망의 항원으로 작용한다. 각 인공 면역망은 항체의 농도값을 초기값으로 설정하고 식 (1)-(3)의 항체 농도 변화식에 의해 각 항체에 대한 농도값을 계산한다. 항체의 농도값이 주어진 임계값보다 커질 때까지 항체의 농도 계산은 반복하여 수행한다. 각 인공 면역망에 대한 항체들의 농도값이 임계값보다 커지면 계산과정을 완료하고 각 항체들의 농도값 중 최대값을 가진 항체를 선택한다. 본 논문에서는 임계값을 0.95로 설정하였다. 이러한 과정을 거쳐 장애물 회피 및 목표점 도달 행위에 대한 최적의 회전 방향각은 최고의 농도값을 가진 항체를 선택하여 구한다.

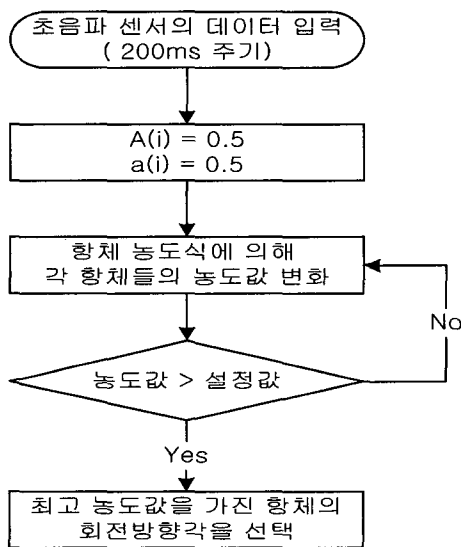


그림 3 각 인공 면역망의 농도 계산 흐름도  
Fig. 3 Flowchart of concentration calculation for each immune artificial networks

### 3. 행위 결합기 및 Target Switching법

이 장에서는 자율이동로봇의 행위들을 퍼지 시스템을 이용

하여 결합하는 방법을 다루고, 자율이동로봇이 국부 최소점 상황을 탈출하기 위한 target switching 방법도 다룬다.

#### 3.1 퍼지 시스템을 이용한 행위 결합기 설계

자율이동로봇이 주어진 목표점까지 장애물과 충돌하지 않고 안전하게 주행하기 위해서는 주행하는 동안 가장 기본적으로 장애물 회피 및 목표점 도달의 두 가지 조건을 동시에 만족하는 방향으로 이동하여야 한다. 하지만, 이 두 가지 조건은 로봇이 목표점까지 주행하는 동안 자주 서로 상충하는 경우가 발생하므로 이 문제에 대한 해결책이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 인공 면역망으로 구현된 각 행위의 출력에 퍼지 시스템을 이용한 행위 결합기에 의해 두 행위에 적절한 가중치를 곱하여 최종 출력을 구한다. 이러한 행위기반 제어 기법에서 행위들에 대한 결합방법은 경쟁(competitive) 방법과 협동(cooperative) 방법이 있다. 경쟁방법에서는 여러 행위들 중 로봇 주위의 환경에 맞는 행위에 높은 가중치를 부여해 하나의 행위만 결정하는 방법이다. 이와 같은 방법의 단점으로는 주어진 상황에 알맞은 행위의 선택이 쉽지 않고 센서 노이즈 등에 민감하게 반응한다는 점이다. 이에 대한 대안인 협동방법은 모든 행위들에 대해 주위 환경에 따른 적절한 가중치를 부여해 벡터 합을 통하여 최종의 행위를 구하는 방법으로 센서 정보가 부정확하더라도 강인하게 동작한다는 장점을 가진다[5,17-19].

본 논문에서는 협동방법이 적용된 행위 결합기를 퍼지 시스템을 이용하여 설계하였다. 그리고 구현한 행위 결합기의 역할은 장애물 회피 행위 및 목표점 도달 행위에 대한 supervisor 역할을 수행하는 것으로 두 조건에 부합되는 적절한 회전방향각을 구할 수 있는 가중치를 출력하는 것이다. 즉 현재의 로봇 주위 환경에 대한 정보를 바탕으로 장애물 회피 행위 및 목표점 도달 행위 중 어느 행위에 더 많은 비중을 둘 것인가를 판단하는 것이다.

구현된 행위 결합기의 입력은  $D_{mf}$ ,  $D_{ms}$ ,  $D_g$ 로 3개의 입력으로 설정하였다. 여기서  $D_{mf}$ 는 그림 2에서 3, 4, 5, 6, 7번 초음파 센서에 의해 측정된 장애물과의 거리값 중 최소값으로 정하며  $D_{ms}$ 는 1, 2, 8, 9번 초음파 센서에 의해 측정된 장애물과의 거리값 중 최소값으로 정하였다. 즉  $D_{mf}$ 는 로봇 전방에 있는 장애물 중 가장 가까운 장애물과의 거리를 나타내며  $D_{ms}$ 는 로봇 측면에 있는 장애물 중 가장 가까운 장애물과의 거리를 나타낸다.  $D_g$ 는 현재의 로봇의 위치와 목표점 사이에 장애물이 있을 경우 장애물과의 거리를 나타내고 장애물이 없을 경우는 초음파 센서의 최대 측정 거리값으로 설정한다.  $D_g$ 는 현재의 로봇 위치와 목표점 사이에만 존재하는 장애물과의 거리이므로 현재 로봇의 위치를 기준으로 장애물이 목표점보다 먼 경우 즉 목표점 뒤에 장애물이 있는 경우에 대해서는 고려하지 않는다. 이는 장애물 앞에 목표점이 주어진 경우에도 목표점까지 주행 가능하도록 하기 위함이다.

행위 결합기 입력의 소속함수(membership function)는 그림 4와 같이 설정하였다. 그림 4에서 VNER : Very Near, NER : Near, NOR : Normal, FAR : Far, VFAR : Very Far 이다.

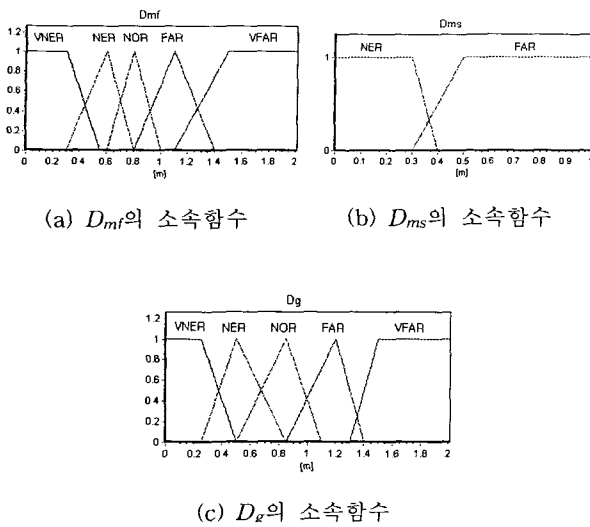


그림 4 입력 변수 소속함수  
Fig. 4 Membership functions of input variables

행위 결합기의 출력은 가중치  $\alpha$ 로 퍼지 추론 방법은 연산량을 줄이고 계산의 편의성을 위해 후건부가 상수값을 가지는 식 (4)와 같은 형태의 simplified 방법을 사용하였다.

$$R_i : \text{If } D_{mf} \text{ is } A_i \text{ and } D_{ms} \text{ is } B_i \text{ and } D_g \text{ is } C_i \text{ then } \alpha = d_i \quad (4)$$

여기서,  $A_i, B_i, C_i$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙의 입력 소속 함수들이다.

제안된 행위 결합기의 퍼지 규칙은 표 3과 같이 설정하였다.

행위 결합기의 출력값을 계산하기 위한 비퍼지화 방법은 식 (5)과 같이 무게 중심법을 사용하였다.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N w_i d_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5)$$

행위 결합기를 통해 가중치  $\alpha$ 가 출력되면 자율이동로봇의 최종 회전 방향각은 식 (6)을 통해 구한다.

$$\vec{\theta}_r = (1-\alpha)\vec{\theta}_o + \alpha\vec{\theta}_g \quad (6)$$

여기서,  $\vec{\theta}_r$ 은 자율이동로봇의 최종 회전 방향각 벡터,  $\vec{\theta}_o$ 는 장애물 회피 인공면역망에 의해 선택된 회전방향각 벡터,  $\vec{\theta}_g$ 는 목표점 도달 인공면역망에 의해 선택된 회전방향각이며  $\alpha$ 는 행위 결합기의 가중치 출력이며 0.0 ~ 1.0 사이의 실수값을 가진다. 식 (5)에서 알 수 있듯이 가중치  $\alpha$ 가 0.0에 가깝게 출력될수록 장애물 회피에 높은 비중을 둬고 1.0에 가까울 경우는 목표점 도달 행위에 높은 비중을 두고 있음을 의미한다.

표 3 제안된 퍼지 규칙

Table 3 Proposed fuzzy rules

$D_{ms} = \text{NER}$					
$D_g \backslash D_{mf}$	VNER	NER	NOR	FAR	VFAR
VNER	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NER	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2
NOR	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2
FAR	0.0	0.2	0.2	0.4	0.4
VFAR	0.0	0.2	0.2	0.4	0.75

$D_{ms} = \text{FAR}$					
$D_g \backslash D_{mf}$	VNER	NER	NOR	FAR	VFAR
VNER	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NER	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2
NOR	0.0	0.4	0.4	0.75	0.75
FAR	0.0	0.75	1.0	1.0	1.0
VFAR	0.0	0.75	1.0	1.0	1.0

### 3.2 Target Switching법

지역경로계획에 의해 목표점까지 자율이동로봇이 주행하는 동안 어떤 환경 하에서는 목표점에 도달하지 못하고 같은 행동을 반복하거나 한 장소에 정지하는 경우가 발생할 가능성이 있다. 이러한 현상이 발생한 경우를 국부 최소점(local minimum) 상황이 발생했다고 하며 주로 그림 5와 같이 U자형의 장애물이 배치된 상황에서 발생한다. 따라서 본 연구에서는 W. L. Xu와 S. K. Tso가 제안한 target switching법[13]을 이용하여 국부 최소점 상황이 발생하였을 경우 자율이동로봇이 이런 상황을 벗어나 목표점까지 안전하게 도달할 수 있도록 하였다. 그림 5는 target switching법이 적용되지 않았을 경우 U자형 장애물이 배치된 환경 하에서 로봇이 주행 중 국부 최소점 상황이 발생한 경우를 나타내었다.

그림 5와 같이 U자형 장애물이 존재하고 U자형 장애물 뒤에 목표점이 주어진 경우를 고려하자.

먼저 출발점(A 지점)에서 로봇은 목표점을 향해 출발한 후 B지점, C지점이 이루는 경로로 주행을 하고, 로봇은 U자형의 장애물을 벗어나지 못하고 계속 맴돌게 된다. 로봇에 대한 목표점 방향을 로봇의 오른쪽 방향에 목표점이 있을 경우 + 부호, 반대의 경우를 - 부호의 각도로 설정하였다고 가정하고 W. L. Xu와 S. K. Tso[13]는 국부 최소점 상황 발생 원인이 C 지점에서 목표점 방향이  $-\pi$ 에서  $+\pi$ 로 변화에 의해 발생한다고 지적하였으며 본 연구에서도 로봇의 주행 중 목표점 방향이  $-\pi$ 에서  $+\pi$ 로 변화가 발생하거나 혹은 그 반대의 상황이 발생한 경우 국부 최소점 상황이 발생한 것으로 인지한다. 국부 최소점이 발생한 경우 그림 6과 같이 가상 목표점(virtual target)을 두어 U자형 장애물을 벗어나도록 유도한다. 본 논문에서는 목표점 방향이  $-\pi$ 에서  $+\pi$ 로 전환 시 가상 목표점의 방향을  $-30^\circ$ 로 설정하고 반대의 경우는  $+30^\circ$ 로 설정하였다. 가상 목표점에 의해 로봇이 U자형 장애물을 벗어난 후 실제의 목표점으로 전환하여 원래의 주어진 목표점까지 안전하게 주행하도록 설정하였다.

그림 6은 가상 목표점 방법을 이용한 target switching법을 적용하였을 경우 본 논문의 알고리즘에 의해 국부 최소점 상황을 벗어나는 것을 나타내었다.

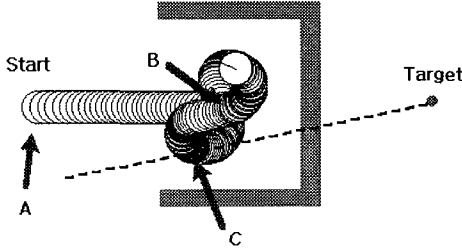


그림 5 국부 최소점 상황  
Fig. 5 Local minimum situation

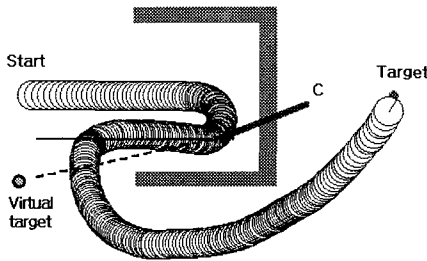


그림 6 국부 최소점 탈출  
Fig. 6 Escape from the local minimum

### 3.3 속도 제어

본 연구에서 자율이동로봇이 주행하는 동안 로봇의 이동 속도를 식 (7)과 같이 변화시켜 좀 더 빠른 시간 안에 목표점까지 도달할 수 있고 가속도를 통한 유연한 동작을 하도록 구현하였다.

$$v = v_{min} + v_{max} \left( 1 - \frac{|\omega|}{\omega_{max}} \right) \left( \frac{D_{min}}{D_{max}} \right) \left( \frac{D_{tr}}{D_{dec}} \right) \quad (7)$$

단,  $D_{tr} \geq D_{dec}$  일 경우  $D_{tr} = D_{dec}$

여기서,  $v$ 는 로봇의 기준 속도,  $v_{min}$ 은 로봇의 최저 허용 속도로 본 연구에서는 0.1[m/s],  $v_{max}$ 는 로봇의 최고 허용 속도를 나타내며 0.5[m/s]로 설정하였다  $\omega_{max}$ 는 로봇의 최고 허용 각속도로 30[%s]로 설정하였으며  $\omega$ 는 현재의 로봇의 기준 각속도이며  $D_{min}$ 은 9개의 초음파 센서에 의해 측정된 거리값 중 최소 거리값이며  $D_{max}$ 는 초음파 센서의 최대 측정 거리로 2[m]로 설정하였다.  $D_{tr}$ 은 현재 로봇의 위치와 목표점까지의 거리이며  $D_{dec}$ 는 로봇이 목표점 접근 시 감속거리를 의미하며  $D_{dec}$ 는 0.5[m]로 설정하였다. 식 (6)에서 첫 번째 괄호 안의 식은 로봇의 주행 안정성을 높이기 위해 현재 로봇의 회전 각속도가 크면 클수록 속도를 줄여 보다 안정된

주행을 보장하였으며, 두 번째 괄호 안의 식은 로봇과 장애물과의 거리가 가까우면 로봇의 속도를 감속함으로써 장애물과 충돌하지 않도록 고려하였다. 끝으로 세 번째 괄호 안의 식은 로봇이 주어진 목표점에 접근 시 속도를 감속하여 보다 유연하고 안전하게 목표점에 도달하도록 설정하였다.

### 3.4 전체 주행 알고리즘 구성

그림 7은 본 논문에서 제안된 지역경로계획의 전체 알고리즘 구성도이다. 자율이동로봇이 주어진 목표점까지 장애물과 충돌없이 안전하게 도달하기 위해서는 목표점까지 주행하는 동안 장애물을 회피함과 동시에 목표점을 향하여 이동하여야 한다. 본 연구에서는 장애물 회피 행위와 목표점 도달 행위를 인공 면역망을 이용하여 구현하였다. 각 인공 면역망에 의해 선택되어진 회전 방향각과 퍼지 시스템을 이용하여 구현한 행위 결합기의 출력 가중치  $\alpha$ 에 의한 벡터 합에 의해 로봇의 최종 회전 방향각을 구한다. 따라서 퍼지 시스템으로 구현된 행위 결합기의 역할은 로봇 주위의 환경을 적절히 판단하여 두 가지 행위를 동시에 만족할 수 있는 가중치  $\alpha$ 를 출력하는 것이다. 즉 장애물과 로봇과의 거리가 가까울 경우는 장애물 회피 행위에 더 많은 비중을 반대의 경우는 목표점 도달 행위에 많은 비중을 두는 것을 기본 원리로 한다. 또한 지역경로계획에 있어서 장애물이 U자형으로 배치된 경우와 같은 상황에서 국부 최소점이 발생할 가능성이 있다. 이러한 국부 최소점 상황에 대처하기 위해 target switching법을 적용하였다. target switching법의 기본 원리는 로봇이 국부 최소점 상황이 발생되었다고 판단하였을 경우 가상 목표점(virtual target)을 두어 국부 최소점을 벗어난 후 원래의 목표점으로 전환하여 실제 목표점을 향해 주행하는 방법이다. 목표점까지 주행하는 동안 속도 제어에 의해 장애물과의 거리가 멀 경우는 빠른 속도로 주행하고 가속도가 크거나 장애물과의 거리가 가까워져 충돌 가능성이 높아지면 속도를 감속하여 보다 유연하고 빠른 주행이 가능하도록 구현하였다.

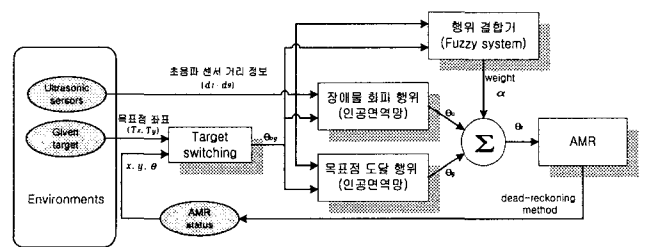


그림 7 전체 주행 알고리즘  
Fig. 7 Overall navigation algorithm

### 4. 자율이동로봇 시스템

본 연구를 위해 자율이동로봇 (Autonomous Mobile Robot : AMR)을 자체 개발하였으며 표4는 그의 사양을 나타낸다.

그림 8은 개발된 자율이동로봇의 전체 하드웨어 시스템 구성도를 나타내었다. 전체 하드웨어 구성은 크게 센서부, 구동부, 주 제어기로 나뉜다. 주 제어기로는 고속의 계산능력을

지님과 동시에 프로그램의 편의성 및 사용자 인터페이스 확장성 등의 요소를 고려하여 Pentium III 950MHz급의 PC를 장착하였다. PC를 주제어기로 선정하여 많은 양의 데이터 인터페이스 및 고속의 연산처리가 가능하도록 하였고 일반 윈도우(Windows) 환경 하에서 프로그램이 가능하므로 복잡한 알고리즘도 보다 쉽고 빠르게 구현하여 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 구동부의 MMC보드와는 ISA bus를 통하여 인터페이스하였다. MMC보드는 로봇의 좌·우측 바퀴 구동용 AC 서보 모터 제어기(controller)와 비전시스템의 pan, tilt 구동용 AC 서보 모터 controller로 위치제어 기준펄스 신호를 출력한다. 센서부는 CAN 통신 보드와 주 제어기(PC) 간에는 PCI bus를 통하여 인터페이스하였고 초음파 센서부의 controller인 80C196KC보드와는 CAN 통신 line을 통하여 명령 및 데이터 전송을 수행할 수 있도록 설계하였다.

표 4 자율이동로봇의 사양  
Table 4 Specification of the AMR

직 경	0.45[m]
높 이	0.98[m]
무 게	약 42[kg]
구동 방식	차륜형
초음파 센서 수	9개

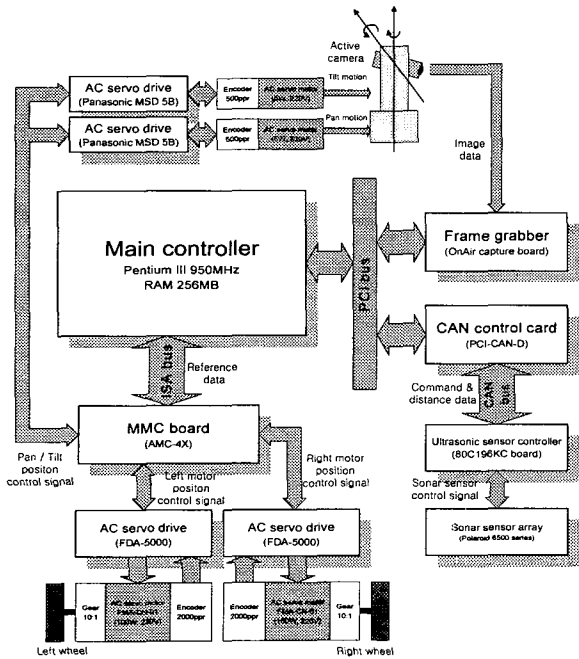


그림 8 자율이동로봇 하드웨어 시스템 전체 구성도  
Fig. 8 Overall system description of the hardware for the AMR

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션 및 실험 시 조건은 다음과 같다.  
· 자율이동로봇에게 환경에 대한 정보가 사전에 전혀 주어지지

않고 다만 목표점의 좌표만 주어진다.  
· 자율이동로봇의 출발점을 전역 좌표계의 기준점으로 설정한다.

5.1 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션 상의 자율이동로봇에 대한 설정치는 표 5와 같다. 초음파 센서의 scan 주기가 200[msec]이므로 200[msec]마다 전체 주행 알고리즘에 의해 좌·우측 바퀴 모터의 기준 속도값이 계산되어진다. 먼저 제안된 알고리즘이 실제 자율이동로봇에 적용 시 알고리즘 계산 속도 상의 문제를 검토하기 위해 전체 주행 알고리즘의 계산 시간을 측정하였다.

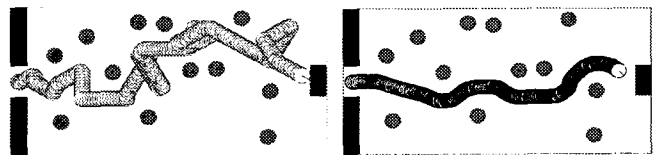
Pentium III 700Mhz의 CPU와 256MB의 RAM이 장착된 PC에서 제안된 알고리즘의 계산 시간은 약 2~4[msec]로 측정되었다. 전체 알고리즘의 계산 주기가 200 [msec]이므로 실제 자율이동로봇에 충분히 적용 가능함을 확인하였다.

표 5 시뮬레이션 상의 로봇에 대한 설정치  
Table 5 Specification for the AMR in the simulation environment

직 경	0.45[m]
최고 허용 속도 $U_{max}$	0.5[m/s]
최저 속도 $U_{min}$	0.1[m/s]
초음파 센서의 거리 측정범위	0.35~2.0[m]
초음파 센서의 scan 주기	200[msec]

5.1.1 원형 장애물이 배치된 경우

그림 9 (a)와 그림 10 (a)는 기존의 알고리즘인 인공면역망을 이용하여 장애물 회피 행위와 목표점 도달 행위를 구현하고 일정한 가중치로 두 행위를 결합한 경우에 대한 시뮬레이션 결과이며 그림 9 (b)와 그림 10 (b)는 본 논문에서 제안된 알고리즘에 의한 시뮬레이션 결과이다. 그림 9 (a)의 경우 로봇의 이동 경로가 부드럽지 못하고 목표점 근처에서 목표점 방향이 아닌 다른 방향으로 이동하는 행동을 보여준다. 그림 9 (b)의 제안된 알고리즘에 의한 결과는 로봇의 이동 경로가 부드럽고 기존의 불필요한 행동들이 개선되었음을 확인할 수 있다. 그림 10 (a)의 경우 로봇이 목표점에 도달하기 위해 많은 장소를 반복 주행하였으나 그림 10 (b)는 비교적 짧은 경로로 목표점까지 안전하게 도달함을 확인할 수 있다.



(a) 기존의 방법 (b) 제안된 방법

그림 9 원형 장애물이 배치된 환경 I  
Fig. 9 Environment I with circular obstacles

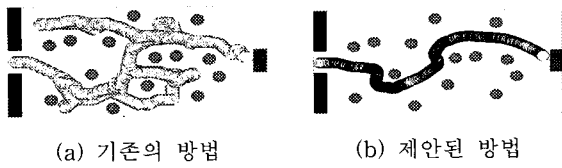


그림 10 원형 장애물이 배치된 환경 II  
Fig. 10 Environment II with circular obstacles

5.1.2 U자형의 장애물이 배치된 경우

그림 11은 7.5[m]×5[m]의 영역에 장애물을 U자 형태로 배치한 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 일반적으로 U자 형태로 장애물이 배치된 환경에서는 주행 중 국부 최소점 상황이 발생하기 쉬우므로 target switching법에 의해 국부 최소점 상황을 벗어나 안전하게 목표점까지 도달함을 확인할 수 있다.

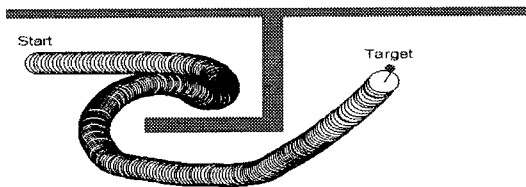


그림 11 U자형 장애물이 배치된 환경  
Fig. 11 Environment with U-shaped obstacles

5.1.3 일반적인 환경에서의 시뮬레이션

그림 12는 실제 자율이동로봇이 사용될 장소인 일반적인 건물 내의 다양한 실내 환경에 대한 시뮬레이션 결과이다. 제안된 알고리즘에 의해 일반 복도나 장애물이 복잡하게 배치된 실내 환경에서도 장애물과 충돌없이 목표점까지 안전하게 주행함을 확인할 수 있다. 장애물과의 거리를 고려하고 행위 결합기의 적절한 가중치 출력에 의해 로봇의 이동 경로가 부드럽고 안전하게 목표점까지 도달하였다. 로봇의 이동 속도도 장애물과의 거리와 로봇의 각속도에 따라 적절히 변화됨을 보여준다. 그림 12 (c)의 환경에서 로봇이 주행 중 원안의 영역에서 국부 최소점이 발생할 수 있으나 target switching법에 의해 국부 최소점을 벗어나 목표점까지 안전하게 주행하는 것을 확인할 수 있다.

5.2 실험 및 결과

제안된 알고리즘의 실제 상황에서의 실용성을 보이기 위해 개발된 자율이동로봇에 적용시켜 다음과 같은 실험을 하였다. 실험 시 로봇에 대한 각종 설정치는 시뮬레이션 시 사용한 표 5와 같다.

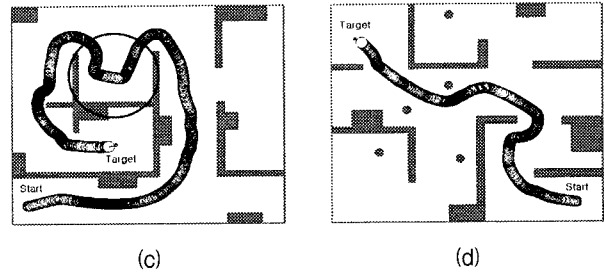
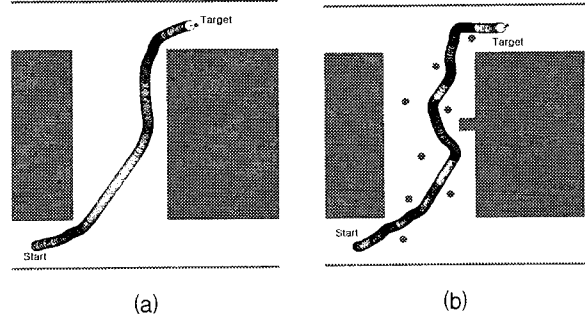


그림 12 일반적인 환경에서의 시뮬레이션 결과  
Fig. 12 Simulation results in general environments

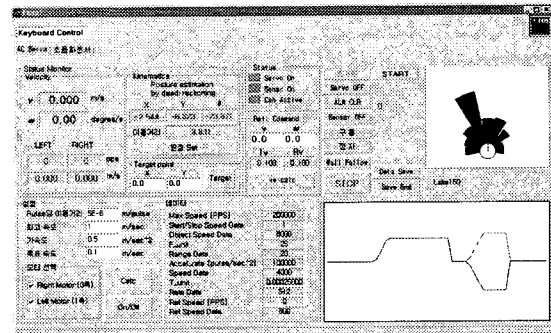


그림 13 실험 프로그램 윈도우  
Fig. 13 Program window for experiment

그림 13은 본 논문에서 제시된 알고리즘의 적용·실험을 위해 코딩된 프로그램 윈도우를 나타낸 것이다. 초음파 센서의 제어 프로그램은 196 C-language와 196 어셈블리어를 사용하였다.

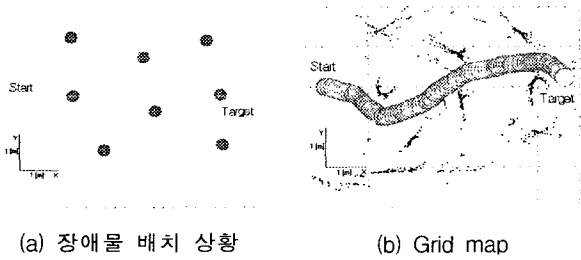
자율이동로봇의 실제 주행 결과는 로봇이 목표점의 좌표를 명령받고 목표점까지 주행하는 동안 200[msec]마다 9개의 초음파 센서의 데이터와 로봇의 위치, 방향각 및 속도 등의 파라미터들을 데이터 파일로 저장을 한 다음, 주행 완료 후 off-line 상으로 저장한 결과들을 나타내었다.

5.2.1 원형 장애물이 배치된 경우

그림 14는 6.5[m]×5[m] 영역의 실내에 지름 35[cm]의 원형 장애물 8개를 자유롭게 배치한 경우에 대한 실험 결과이다. 두 실험에서 목표점의 좌표는 x=5.8[m], y=0.0[m]이다. 그림 14의

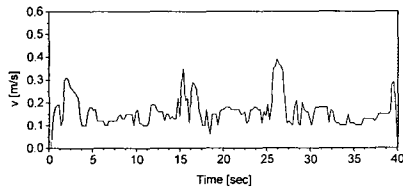


실험에서 주행 시간은 40.267[sec]이며 주행 거리는 6.37[m]이다. 그림 14 (b)의 grid map은 주행 중 저장된 데이터들을 이용하여 주행 후 off-line상으로 작성된 map이다. 실험 환경에서와 같이 원형 장애물이 복잡하게 배치된 환경에서도 장애물과의 거리 개념을 적용한 인공 면역망과 행위 결합기에 의해 부드럽고 안전한 경로로 목표점까지 도달함을 확인하였다. 로봇의 이동 속도로 장애물과의 거리와 각속도에 따라 적절히 가감속되는 것을 알 수 있다.

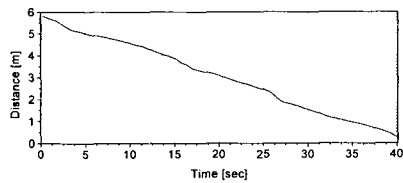


주행 알고리즘을 적용한 주행 실험 결과이다. 그림 16의 실험은 실제 복도 환경에 8개의 지름 35[cm]의 원형 장애물과 사각형의 장애물을 배치한 경우에 대한 실험 결과이다. 그림 16 (a)는 실제 복도 환경에 장애물 배치한 모습을 나타낸다. 그림 16 (b)는 주행 중 측정된 초음파와 센서 데이터를 이용해 off-line상에서 작성한 격자도이다. 로봇의 주행 시간은 앞의 실험에 비해 장애물이 많이 존재하므로 82.913[sec]가 걸렸으며 주행 거리는 15.24[m]이다. 본 실험 결과를 통해 실제 복도 환경에서 장애물이 복잡하게 존재하는 경우에도 본 논문의 알고리즘에 의해 로봇은 목표점까지 부드럽고 안전한 경로를 통해 장애물과의 충돌없이 도달함을 확인하였다. 로봇의 이동 속도도 앞의 실험에 비해 장애물의 배치가 많으므로 최고 약 0.4[m/s]의 속도로 주행하고 로봇의 회전 각속도나 장애물의 배치 환경에 따라 적절히 감속함을 확인하였다.

그림 17은 장애물이 배치된 복도 환경에서의 실제 주행 모습을 나타낸다.

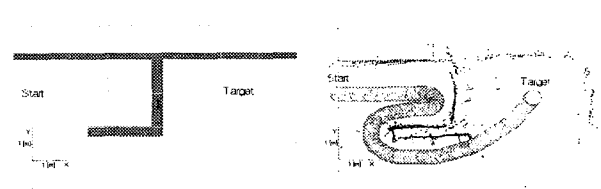


(c) AMR의 속도



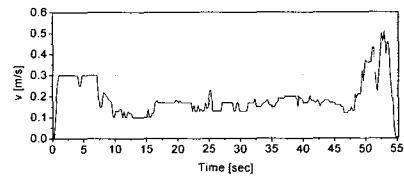
(d) AMR과 목표점과의 거리

그림 14 원형 장애물이 배치된 환경에서의 실험 결과  
Fig. 14 Experimental result in environment with circular obstacles

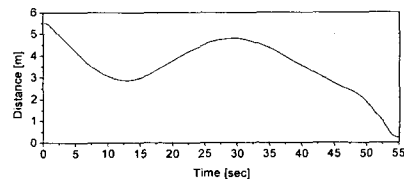


(a) 장애물 배치 상황

(b) Grid map



(c) AMR의 속도



(d) AMR과 목표점과의 거리

그림 15 U자 형태로 장애물을 배치한 환경에서의 실험 결과  
Fig. 15 Experimental result in environment with U-shaped obstacles

5.2.2 U자형의 장애물이 배치된 경우

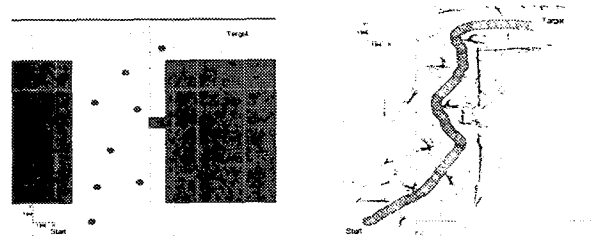
다음 실험은 7.5[m]×5[m] 영역의 실내에 국부 최소점이 발생할 가능성이 높은 형태인 U자형으로 장애물을 배치한 환경에서의 주행 실험이다.

본 실험에서 목표점의 좌표는 x=5.5[m], y=0.0[m]이며 그림 15 (a)는 장애물 배치 형태를 나타낸 그림이다.

그림 15의 실험에서 주행 시간은 55.185[sec]이며 주행 거리는 10.5[m]이다. 실험 결과와 같이 U자형 장애물에서 국부 최소점 상황이 발생하지 않고 벗어나 목표점까지 안전하게 주행하는 것을 확인하였다.

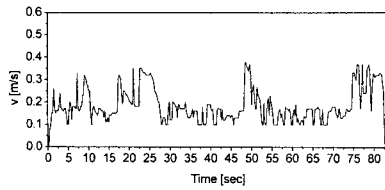
5.2.3 일반적인 실내 환경에서의 주행 실험

다음 실험은 본 논문에서 제시한 알고리즘의 실제 환경에서의 실용성을 검증하기 위하여 실제 실내 환경에서 본 논문의

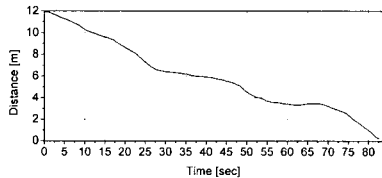


(a) 장애물 배치 상황

(b) Grid map



(c) AMR의 속도



(d) AMR과 목표점과의 거리

그림 16 일반적 실내 환경에서의 주행실험 결과

Fig. 16 Experimental result for navigation in general indoor environment

기존의 인공 면역망을 이용하여 구현한 주행 알고리즘에 비해 장애물과의 거리 개념을 도입하여 항원과 항체의 요소를 설정하였고 항체의 개체를 로봇의 동작이 아닌 로봇의 회전방향각으로 설정하여 기존의 방법에 비해 보다 부드럽고 안전한 경로로 주행하도록 하여 주행 안정성을 높였다. 또한 로봇 주위 환경에 대한 정보를 기반으로 한 행위 결합기의 출력 가중치  $\alpha$ 를 변화시킴으로써 기존의 예기치 못한 동작이나 불필요한 경로를 주행하는 단점을 개선하였음을 확인하였다. 주행하는 동안 로봇의 주행 속도를 변화시켜 보다 목표점까지 빠르고 부드러운 주행 동작을 구현하였다. 또한 target switching법을 적용시켜 국부 최소점 상황을 극복할 수 있도록 하였다.

마지막으로 장애물이 복잡하게 배치된 실제 환경에서의 실험을 통해 본 논문에서 제시한 알고리즘의 실제 적용가능성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 500-505, 1985.
- [2] J. Borenstein and Y. Koren, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1398-1404, 1991.
- [3] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, pp. 1179-1187, 1989.
- [4] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 7, pp. 278-288, 1991.
- [5] C. Ye and D. Wang, "A novel behavior fusion method for the navigation of mobile robots," *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 5, pp. 3526-3531, 2000.
- [6] H. R. Beom and H. S. Cho, "A sensor-based obstacle avoidance controller for a mobile robot using fuzzy logic and neural network," *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1470 -1475, 1992.
- [7] A. Ramirez-Serrano and M. Boumedine, "Real-time navigation in unknown environments using fuzzy logic and ultrasonic sensing," *Proc. of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 26-30, 1996.
- [8] K. P. Prabir and K. Asim, "Mobile robot navigation using a neural net," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1503-1508, 1996.
- [9] A. Ishiguro, Y. Watanabe and Y. Uchikawa, "An immunological approach to dynamic behavior control for autonomous mobile robots," *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 495-500, 1995.
- [10] A. Ishiguro, Y. Shirai, T. Kondo and Y. Uchikawa,

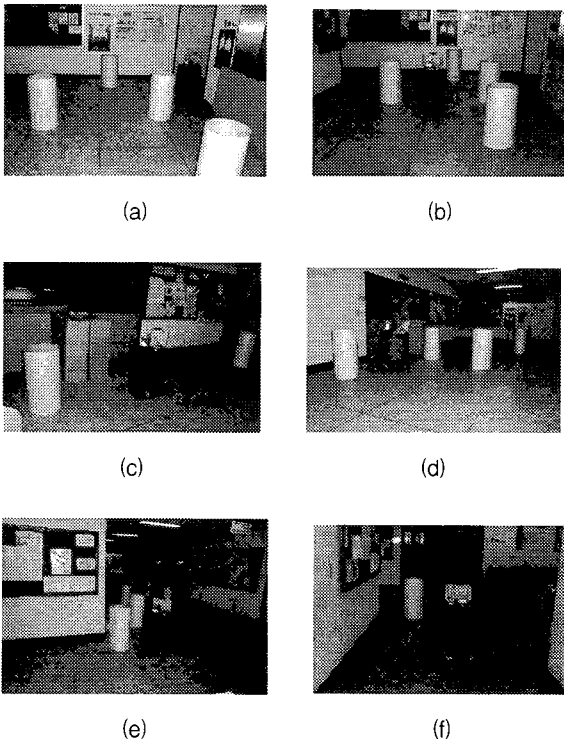


그림 17 일반적 실내 환경에서의 주행 실험 사진

Fig. 17 Pictures of navigation experiment in general indoor environment

6. 결 론

본 논문은 인공면역망과 퍼지 시스템을 이용한 지역경로계획에 관한 내용으로 연구의 목표는 자율이동로봇이 주어진 목표점까지 안전하게 장애물과의 충돌없이 도달하는 것으로 하였으며 이를 위하여 자체 개발한 자율이동로봇 시스템 구성 및 주행 알고리즘에 관한 연구 내용을 제시하였다.

"Immunoid: an architecture for behavior arbitration based on the immune networks," *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 1730-1738, 1996.

- [11] A. Ishiguro, T. Kondo, Y. Watanabe and Y. Uchikawa, "Dynamic behavior arbitration of autonomous mobile robots using immune networks," *Proc. of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, vol. 2, pp. 722-727, 1995.
- [12] 이동제, 이민중, 최영규, "인공 면역망과 인터넷에 의한 자율 이동로봇 시스템 설계," 대한전기학회논문지, 50D권, 11호, pp. 522-531, 2001.
- [13] W. L. Xu and S. K. Tso, "Sensor-based fuzzy reactive navigation of a mobile robot through local target switching," *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 29, no. 3, pp. 451-459, 1999.
- [14] N. K. Jerne, "The immune system," *Scientific American*, vol. 229, no. 1, pp. 52-60, 1973.
- [15] N. K. Jerne, "Towards the network theory of the immune system," *Ann. Immunol. (inst. Pasteur)*, vol. 125C, pp. 373-389, 1974.
- [16] N. K. Jerne, "Idiotypic networks and other preconceived ideas," *Immunological Rev.*, vol. 79, pp. 5-24, 1984.
- [17] Ronald C. Arkin, *Behavior-Based Robotics*, The MIT Press, 1998.
- [18] D. Kortenkamp, R. Bonasso and R. Murphy, *Artificial Intelligence and Mobile Robots*, The MIT Press, 1998.
- [19] K. Y. Im and S. Y. Oh, "An extended virtual force field based behavioral fusion with neural networks and evolutionary programming for mobile robot navigation," *Proc. of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*, vol. 2, pp. 1238-1244, 2000.



**이 동 제(李 東 濟)**

1975년 2월 28일 생. 1998년 부산대 전기공학과 졸업. 2000년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 051-510-1445, Fax :051-513-0212

E-mail : leedongje@hanmir.com



**이 민 중(李 敏 中)**

1970년 10월 14일생. 1996년 부경대 전기공학과 졸업, 1998년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 2001~2002년 부산대 BK21 지역육성사업단에서 Post-Doc. 현재 (주)IT 커뮤니티 연구실장.

Tel : 051-510-1445 Fax :051-513-0212

E-mail : mnjlee@hanmail.net



**최 영 규(崔 榮 奎)**

1957년 6월 18일 생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공박). 1990~1991년 CALTECH Visiting Scholar. 1998~1999년 Univ. of

Southwestern Louisiana Visiting Professor. 현재 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수

Tel : 051-510-2371, Fax : 051-513-0212

E-Mail : ykchoi@pusan.ac.kr

**저 자 소 개**



**김 양 현(金 良 炫)**

1974년 12월 6일 생. 2000년 부경대 전기공학과 졸업. 2002년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 삼성전자 메카트로닉스 센터 연구원.

Tel : 031-200-2208, Fax : 031-200-2420

E-mail : pioneer196@hanmail.net