

An Autonomous Mobile Robot Control Method based on Fuzzy-Artificial Immune Networks and RBFN

吳 弘 民* · 朴 晉 玄** · 崔 榮 奎***
(Hong-Min Oh · Jin-Hyun Park · Young-Kiu Choi)

Abstract - In order to navigate the mobile robots safely in unknown environments, many researches have been studied to devise navigational algorithms for the mobile robots. In this paper, we propose a navigational algorithm that consists of an obstacle-avoidance behavior module, a goal-approach behavior module and a radial basis function network(RBFN) supervisor. In the obstacle-avoidance behavior module and goal-approach behavior module, the fuzzy-artificial immune networks are used to select a proper steering angle which makes the autonomous mobile robot(AMR) avoid obstacles and approach the given goal. The RBFN supervisor is employed to combine the obstacle-avoidance behavior and goal-approach behavior for reliable and smooth motion. The outputs of the RBFN are proper combinational weights for the behavior modules and velocity to steer the AMR appropriately. Some simulations and experiments have been conducted to confirm the validity of the proposed navigational algorithm.

Key Words : Autonomous Mobile Robot, Artificial Immune Network, RBFN

1. 서 론

로봇은 산업자동화, 핵 시설물의 모니터링, 군사용 등 많은 분야에서 여러 가지 목적으로 이용되어져 왔으며, 현재 산업 현장뿐만 아니라 일상생활의 편리함을 위해 일반 가정까지 로봇이 사용되기 시작하였고 그 필요성이 점점 대두되고 있다. 이러한 수요에 따라 로봇 매니플레이터와 같은 고정된 위치에서 일정한 작업을 수행하는 로봇에서 스스로 이동하며 사람을 돕는 로봇에 이르기까지 여러 가지 종류의 로봇이 개발되어져 왔고, 앞으로도 보다 많은 연구가 진행될 것이다. 그중 자율이동로봇(autonomous mobile robot: AMR)은 구동 장치가 바뀌어 이루어진 가장 단순한 구조를 많이 취하고 있다.

자율이동로봇은 주어진 임무를 수행하기 위해서 장애물과 충돌하지 않고 주어진 목표점까지 이동할 수 있어야 한다. 이러한 조건들을 충족시키기 위해 많은 주행 알고리즘들이 연구되어져 왔다. 주행 알고리즘은 크게 전역경로계획(global path planning)과 지역경로계획(local path planning) 두 가지로 분류될 수 있다.

전역경로계획에서, 사전에 주어진 정보를 이용하여 지도 생성(map building)을 하고 생성된 공간정보로부터 경로 탐

색을 통하여 최적경로를 만든다. 이 방식은 이미 주어진 환경에서만 경로계획과 주행이 가능하며, 환경이 변화하거나 잘못된 정보를 이용할 경우 장애물과 충돌하거나 목표점에 도달하지 못할 경우가 생길 수 있다. 반면에, 지역경로계획은 주행해야할 환경에 대한 사전 정보 없이 실시간으로 로봇의 센서를 통해 얻은 주위 환경에 대한 정보만을 이용하여 목표점까지 경로계획을 하는 방식이다. 이러한 지역경로계획은 주행 환경의 사전 정보가 정확히 주어지지 않기 때문에 아주 복잡한 환경에서 목표점을 찾아갈 수 없거나 최적경로로 주행할 수 없는 경우가 생길 수 있다. 그럼에도 불구하고 자율이동로봇은 사람의 왕래가 잦거나 물건의 위치가 변화하는 환경에서 높은 대처능력을 가져야 하므로 지역경로계획이 자율이동로봇에 있어서 반드시 갖춰야 할 기능이다.

기존의 지역경로계획으로 O. Khatib는 가상 힘(virtual force)이라는 개념을 도입한 potential field 방법을 제안하였다[1]. 여기서 목표점은 로봇을 끌어당기는 인력을 가지고, 장애물은 로봇을 밀어내는 척력을 발생시키는 원리를 기반으로 하였다. 이러한 potential field 방법에서 로봇이 극부 최소점을 만나면 목표점까지 도달하지 못하거나 주변의 많은 장애물로 인해 생기는 진동(oscillation)이 발생하는 등의 단점을 갖고 있는데, J. Borenstein과 Y. Koren은 VFF(virtual force field), VFH(vector field histogram)을 사용하고 grid map이나 polar histogram을 이용한 개선 방안을 제시하였다[2, 3]. 이외에도 지능제어 방법을 사용한 주행 알고리즘들이 제안되었다[4-6]. 이상과 같은 연구들의 주행 알고리즘은 환경정보를 이용하여 정보를 분석하고, 실행에 옮기는 직렬구조(sensing-modeling-plan-act)의 형태를 가진다. 하지만 이런 구조는 주행 알고리즘의 구성요소 중 한 가지라도 제 기능을

** 非 會 員 : 현대기아자동차(주)연구소 연구원 · 工學碩士
 ** 正 會 員 : 晉州産業大 메카트로닉스工學科 助教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 釜山大 電子電氣情報컴퓨터工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2003年 8月 4日
 最終完了 : 2003年 10月 11日

발휘하지 못하거나, 한 요소라도 훼손될 경우, 전체 시스템에 막대한 영향을 끼치게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 행위기반(behavior-based)방식의 주행 알고리즘들이 연구되기 시작했다.

행위기반방식은 주행알고리즘의 구성요소가 직렬구조가 아닌 병렬구조의 형태를 가진다. 병렬구조를 가지므로 전체적인 시스템의 안정성을 높이고 빠른 응답을 가능하게 했다. 이런 행위기반방식은 퍼지 시스템을 포함한 방식들이 제안된 바 있으며 Ishiguro 등은 인체의 면역망을 기반으로 한 인공면역망(artificial immune network)을 이용하여 행위기반방식의 주행 알고리즘을 제안하였다[7-9]. 이런 방식은 고정된 결합 가중치나 주행환경에 대해 유전알고리즘으로 학습하여 구한 결합 가중치를 이용하여 주행하였다. 그러나 이러한 방식은 주행환경이 변화함에 따라서 장애물과 충돌하거나 목표점에 도달하지 못하는 경우가 생길 수도 있다. 따라서 새로운 주행 환경에 대해서는 매번 결합가중치를 변화 시켜줘야 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 퍼지 시스템을 이용하여 일반적인 주행방식을 구현한 바 있었다[10]. 퍼지 시스템은 전문가적 지식을 손쉽게 구현할 수 있다는 장점을 가지지만, 많은 입력에 대해서는 규칙 설정이 어렵고, 세밀한 보정이 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점들을 보완하고, 단순화된 구조로 보다 유연한 RBFN(Radial Basis Function Network)을 이용하여 결합가중치를 적절히 변화시켜서 주행알고리즘을 구현하였다.

본 논문에서 로봇이 주어진 목표점까지 장애물과의 충돌 없이 안전하게 도달할 수 있는 행위기반방식의 주행알고리즘을 퍼지-인공면역망과 RBFN으로 구현하였다. 퍼지-인공면역망을 이용하여 장애물 회피 행위기(obstacle-avoidance behavior module)와 목표점 도달 행위기(goal-approach behavior module)를 각각 구현하였다. 또한 기존의 방식들은 단지 장애물의 유·무만을 고려하거나[8], 장애물과의 거리 개념을 실수 값을 이용하여 구현하였으나[10], 본 논문에서는 실수 값을 사용한 거리 개념을 퍼지 시스템의 언어적 변수(linguistic variable) 개념으로 바꾸는 퍼지-인공면역망을 사용하여 항체의 구성을 간단히 설계하고 제어의 유연성도 갖도록 하였다. 또한, RBFN과 target switching 방식[11]을 사용하여 제어기의 정밀한 보정과 극부 최소점을 탈출할 수 있도록 설계하였다. 이상과 같은 행위기반 방식의 주행알고리즘으로 사전에 주어진 환경정보가 없는 상황에서 주어진 목표점까지 센서를 통해 얻은 장애물 정보만을 이용하여 실시간으로 안전하게 주행하도록 구현하였고, 다양한 환경에서의 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 주행알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 인공면역망을 이용한 행위기 구성

본 장에서는 제안된 인공면역망의 항원과 항체의 설정에 대해 설명하고, 인공면역망의 행위기 설계에 대하여 설명하고자 한다. 인간의 면역 체계는 신체 외부로부터 들어오는 항원(바이러스, 암세포, 박테리아 등)에 대해 신체를 보호하는 시스템이다. 인간의 면역 체계의 기본 구조는 T-림프구와 B-림프구로 구성되어 있다. 그림 1에서 보여지듯이 B-림프구의 항체(antibody)는 "Y" 형상을 가지고 있고, 항체는 고유

정보를 가진 paratope와 idiotope를 가지고 있다. 항체의 paratope와 항원(antigen)의 epitope는 열쇠와 자물쇠의 관계처럼 서로 일치할 경우 항체에 의해 항원은 억제된다. N. K. Jerne는 면역체계의 network가설을 제안하였다. 그의 연구에 의하면 기본적인 항원과 항체간의 관계뿐만 아니라 서로 다른 항체간에도 상호 작용하는 구조를 발견하였다. 이런 network구조를 이용하여 현재의 인공면역망이 만들어졌다.

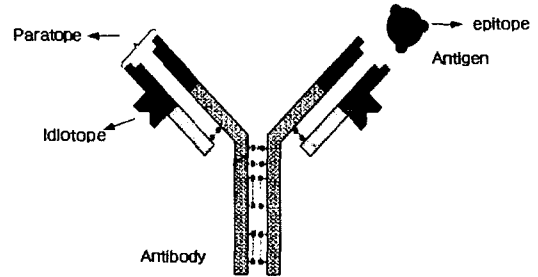


그림 1 항체와 항원의 구조
Fig. 1 Configuration of antibody and antigen

본 장에서는 이러한 인공면역망을 이용하여 장애물 회피 행위기 및 목표점 도달 행위기의 구현에 대한 내용을 다루고자 한다. 인공면역망의 항원은 장애물에 대한 거리정보, 목표점 방향으로 구성된 정보의 조합으로 설정하였다. 항원에 대응해 활성화되는 항체의 개체로는 자율이동로봇의 9개 회전방향각으로 설정하였다. 구현된 인공면역망의 구성 원리는, 일정 주기마다 측정된 거리 정보 및 추정된 로봇의 자세를 바탕으로 한 항원에 대응해 장애물 회피 및 목표점 도달 행위의 목적에 가장 부합하는 항체 즉, 로봇 회전 방향각을 선택하는 것이다.

2.1 제안된 인공면역망의 항원 설정

로봇은 주행 중 많은 정보들이 필요하다. 본 논문에서는 9개의 초음파센서를 통해 얻은 주위환경에 대한 장애물의 정보와 주어진 목표점의 정보를 이용하였다. 두 행위기에 대한 항원의 설정은 표 1과 같다. 항원의 구성 요소는 표 1과 같이 총 10개의 요소로 이루어져 있다. 1~9번째 요소는 9개의 초음파 센서에 의해 측정된 거리정보이며, 초음파 센서에 의한 측정거리를 0.0[m]~2[m]사이의 실수형 값으로 구성된다. 마지막 10번째 요소는 목표점 방향에 대한 정보이며 1~9까지의 정수형 값으로 구성한다. 즉, $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 사이의 각도를 9등분하여 목표점 방향을 적용시키는 것이다. 자율이동로봇이 목표점까지 주행하는 동안 200[msec]의 일정주기마다 9개의 초음파 센서에 의해 측정된 거리 정보와 목표점 정보를 바탕으로 항원을 구성되게 된다.

표 1 항원 구조의 정의
Table 1 Definition of antigen structure

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
초음파 센서의 거리정보 (0.0~2.0)									목표점 방향 (1~9)

2.2 제안된 인공면역망의 항체 설정

장애물 회피 및 목표점 도달 행위에 대한 인공 면역망의 각 항체의 개체는 자율이동로봇의 9개의 회전 방향각 (-90.0°, -67.5°, -45.0°, -22.5°, 0.0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, 90.0°)으로 설정하였다. 입력된 항원에 대해 그에 가장 적합한 항체가 활성화된다. 즉 자율이동로봇이 현재의 주위 환경에 대하여 각 인공 면역망의 설계 목적에 부합하는 최적의 회전 방향각을 선택하는 것을 의미한다. 본 연구에서 사용된 각각의 행위는 9개의 항체중 항원에 대해 가장 적합한 항체가 선택되어 회전 방향각을 출력하게 된다.

기존의 연구에서의 항체의 요소를 결정하는 방식은 장애물의 유무나 장애물의 거리정보를 실수값으로 하였다. 그러나, 장애물의 유무만 판단할 경우 섬세한 제어가 되지 않는 단점이 있고, 실수값을 이용하는 경우 세밀한 제어가 가능하나 행위의 항체설정 시 값의 결정에 있어서 어려움이 있다.

본 연구에서는 퍼지 시스템의 언어적 변수를 이용하여 항체의 설정을 하였다. 장애물의 거리정보를 언어적 변수(distance)를 사용하고 정도의 표현은 'Far(F)', 'Near(N)'로써 언어 해지를 이용하여 표현하였다.

이와 같이 언어적 변수를 사용함으로써 장애물의 거리정보를 이용함에 있어서 실수값을 사용하는 정도의 세밀한 제어가 가능하고, 그 규칙 설정에 있어서 'F', 'N'의 간단한 언어 해지를 사용하므로 간편하게 항체의 규칙설정을 할 수 있다. 그에 해당하는 멤버쉽 함수는 그림 2와 같다.

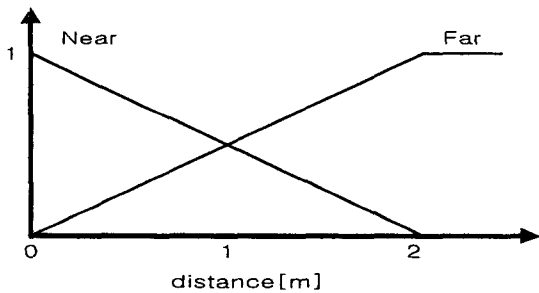


그림 2 장애물 거리입력의 멤버쉽함수
Fig. 2 Membership functions for the distance of obstacle

표 2와 표 3은 각각 장애물 회피 행위기와 목표점 도달 행위에 대한 인공 면역망에서 항체의 paratope 설정을 나타낸다. 항체의 paratope 구성은 항원의 epitope 구성과 구조적인 형태는 같다. 항원의 epitope의 구성요소들은 입력 정보를 의미하고, 항체의 paratope의 구성요소들은 활성화되는 조건임을 의미한다. 항체의 paratope의 요소 중 'F', 'N'은 항원의 실수 거리정보를 멤버쉽 함수의 소속도로 변환하여 사용한다. 즉, 항체의 요소 중 'F'는 장애물과의 거리가 멀수록 그 항체가 활성화된다는 것을 의미한다. 반대로 'N'로 설정된 구성요소는 장애물과의 거리가 가까울수록 그 항체가 활성화된다는 것을 뜻한다. '#' (don't care)의 경우는 항체의 결정에서 장애물과의 거리를 고려하지 않음을 의미한다. 따라서 항체의 paratope의 구성 요소를 설정할 때 인간의 전문가 지식을 항체의 paratope 구성에 적용시켜 각 목적에 부합되게 설정

할 수 있다. 본 연구에서의 항체설정의 규칙은 각각의 행위가 자신의 목적에 부합하도록 설정을 하였다. 즉, 장애물 회피 행위기는 목표점은 고려하지 않고 장애물만을 고려하여 주행하도록 설정하였고, 목표점 도달 행위기는 장애물과는 상관없이 목표점만을 고려하도록 하였다.

표 2 장애물 회피를 위한 항체 paratope의 구성
Table 2 Structure of antibody paratope for obstacle avoidance

	장애물 회피 행위기의 설정									목표점 방향 조건
	거리정보에 대한 조건									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
항체1(-90.0°)	F	#	#	N	N	N	N	#	#	#
항체2(-67.5°)	#	F	#	#	N	N	N	N	#	#
항체3(-45.0°)	#	#	F	#	#	N	N	N	N	#
항체4(-22.5°)	N	#	#	F	#	#	N	N	N	#
항체5(0.0°)	N	#	#	F	F	F	#	#	N	#
항체6(22.5°)	N	N	N	#	#	F	#	#	N	#
항체7(45.0°)	N	N	N	N	#	#	F	#	#	#
항체8(67.5°)	#	N	N	N	N	#	#	F	#	#
항체9(90.0°)	#	#	N	N	N	N	#	#	F	#

표 3 목표점 도달을 위한 항체 paratope의 구성
Table 3 Structure of antibody paratope for goal approach

	목표점 도달 행위기의 설정									목표점 방향 조건
	거리정보에 대한 조건									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
항체1(-90.0°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	1
항체2(-67.5°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	2
항체3(-45.0°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	3
항체4(-22.5°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	4
항체5(0.0°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	5
항체6(22.5°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	6
항체7(45.0°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	7
항체8(67.5°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	8
항체9(90.0°)	#	#	#	#	#	#	#	#	#	9

2.3 인공면역망에 의한 행위기의 출력결정

각 항체에 대한 농도는 N. K. Jerne이 제안한 면역네트워크 가설을 기반으로 Farmer가 제안한 동적 방정식을 이용하여 구한다[7,8]. 이 방정식들은 항원과 항체의 활성화, 항체간의 활성화와 억제를 나타내는 것으로 식 (1) ~ (3)과 같다.

$$m_i = \frac{1}{1 + w_o(M - \sum_{j=1}^N out_j) + w_i(p_{i0} - e_{i0})^2} \quad (1)$$

$$A_i(t) = A_i(t-1) + \left[m_i + \frac{\sum_{j=1}^N m_{ij} a_j(t-1)}{N} \right] a_i(t-1) \quad (2)$$

$$a_i(t) = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - A_i(t))} \quad (3)$$

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 억제관계를 나타내는 계수이다(양수이면 활성화관계, 음수이면 억제관계). p_{ij} 는 i 번째 항체 paratope의 j 번째 구성 요소를 뜻하며, e_j 는 항원 epitope의 j 번째 구성 요소를 나타낸다. 식(1)의 p_{i0} , e_{i0} 는 항체와 항원의 규칙 설정에 있어서 목표점의 방향을 의미한다. 또한 M 은 i 번째 항체 paratope의 구성 요소 중 '#'(don't care)를 제외한 수이며, N 은 설정된 항체 수를 의미한다. out_j 은 j 번째 membership function의 출력값을 의미한다.

식(1)은 항원과 항체간의 활성화 지수를 구하는 식이며, 본 연구에서는 식(1)의 가중치인 w_o 와 w_i 를 모두 1로 설정하였다. 그리고 식(2)의 m_{ij} 는 항체간의 활성화, 억제 계수로 $N \times N$ 의 행렬이며, 표 4와 같이 설정하였다. 실제 항체의 농도값은 시간변화에 대하여 항체의 농도 변화량을 누적한 것과 같으므로 식 (3)과 같이 정의하여 사용하였다.

표 4 활성화 억제 계수 m_{ij}

Table 4 Stimulation and suppression coefficients m_{ij}

	항체1	항체2	항체3	항체4	항체5	항체6	항체7	항체8	항체9
항체1	0.0	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
항체2	0.3	0.0	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.1
항체3	0.2	0.3	0.0	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.1	-0.1
항체4	0.1	0.2	0.3	0.0	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.1
항체5	0.0	0.1	0.2	0.3	0.0	0.3	0.2	0.1	0.0
항체6	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.0	0.3	0.2	0.1
항체7	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.0	0.3	0.2
항체8	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.0	0.3
항체9	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.0

그림 3은 각 인공면역망에서 최적의 항체(회전방향각)를 선택하는 과정을 흐름도로 나타내었다. 그림 3과 같이 200[msec]를 주기로 새로 생성된 항원은 장애물 회피 행위기 및 목표점 도달 행위기의 항원으로 작용한다. 각 인공면역망은 항체의 농도값을 초기값으로 설정하고, 식 (1) ~ (3)의 항체 농도 변화식에 의해 각 항체에 대한 농도값을 계산하였다. 항체의 농도값이 주어진 임계값보다 커질 때까지 항체의 농도 계산은 반복하여 수행한다.

각 인공면역망에 대한 항체들의 농도값이 임계값보다 커지면 계산과정을 완료하고, 각 항체들의 농도값 중 최대값을 가

진 항체를 선택하게 된다. 본 연구에서는 임계값을 0.95로 설정하였다. 이러한 과정을 거쳐 장애물 회피기 및 목표점 도달 행위기에 대한 최적의 회전 방향각은 최고의 농도값을 가진 항체를 선택하여 구하였다.

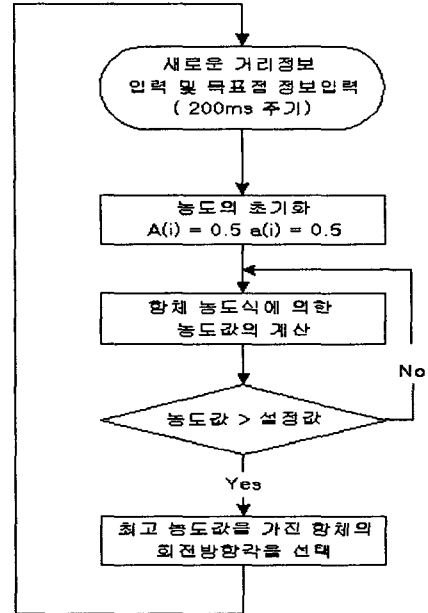


그림 3 각 인공 면역망의 흐름도

Fig. 3 Flowchart for each artificial immune network

3. 행위기 출력의 결합 및 속도 제어

본 논문에서는 RBFN을 이용하여 행위기 출력의 결합과 속도 제어를 동시에 하였다. 본 장에서는 RBFN과 행위기 출력의 결합 및 속도 제어에 대해 먼저 설명하고, 국부 최소점을 대비한 target switching법에 대해 설명할 것이다.

3.1 행위 결합기

자율이동로봇의 주행알고리즘 중 행위 기반 방식에서 일반적으로 주어진 환경에 대한 센서 정보를 입력받아, 각각의 행위기 출력들을 어떻게 처리할 것인가가 중요한 문제이다. 이러한 문제 해결을 위한 기존의 연구는 selection 혹은 switching으로 표현되는 competitive방식이 제안되었으나[12], 주어진 상황에 대한 정보를 충분히 이용하지 못하며, 센서 노이즈 등에 민감하게 반응한다는 단점이 있다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위하여 모든 행위들에 대하여 주어진 환경을 고려하여 적절한 가중치를 출력함으로써 보다 강인하게 동작하는 cooperative방식이 제안되었다[13]. 본 연구에서도 cooperative 방식과 같이 장애물 회피 행위기와 목표점 도달 행위기의 출력을 결합하는 가중치를 RBFN을 이용하여 출력하고, 동시에 로봇의 속도를 제어하도록 구성하여 제어기의 구조로 단순화시켜 설계하였다. 그림 4는 제안된 인공면역망에 의한 자율이동로봇의 전체 주행알고리즘을 나타낸다.

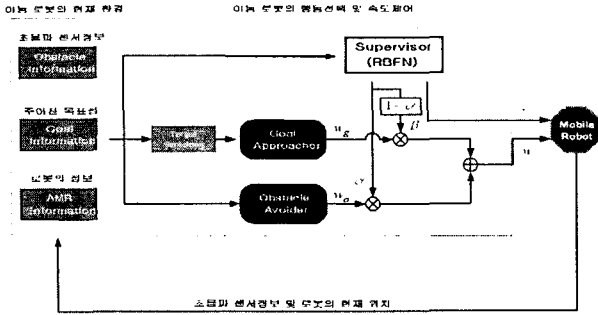


그림 4 전체 주행 알고리즘
Fig. 4 Overall navigation algorithm

3.2 RBFN을 이용한 행위기 출력의 결합 및 속도제어

자율이동로봇이 주어진 목표점까지 안전하게 주행하기 위해서 장애물 회피 및 목표점 도달의 두 가지 조건을 동시에 만족하는 방향으로 이동하여야 한다. 본 연구에서는 cooperative 방식에 따라 환경정보를 이용하여 인공면역망에 의해 구현된 각 행위의 출력을 RBFN에 의해 결정된 가중치와 곱하여 최종 출력을 구하였다. 또한, RBFN을 이용하여 행위의 출력을 결합하는 가중치를 출력함과 동시에 로봇의 속도를 제어하도록 구성하여 기존의 방법에 비하여 제어기 구조가 매우 단순화되도록 설계하였다. Supervisor로 사용된 RBFN은 입력층 3개, 은닉층 125개, 출력층 2개로 설정하였고, basis function으로 Gaussian function을 사용하였다.

RBFN의 입력은 표 5과 같이 3개의 입력 D_f , D_s , D_g 로 설정하였다. D_f 는 로봇 전방에 있는 장애물 중 가장 가까운 장애물과의 거리를 나타내며, D_s 는 로봇 측면에 있는 장애물 중 가장 가까운 장애물과의 거리를 나타낸다. 또한, D_g 는 현재의 로봇의 위치와 목표점 사이에 장애물이 있을 경우 장애물과의 거리를 나타낸다. D_g 는 현재의 로봇 위치와 목표점 사이에만 존재하는 장애물과의 거리이므로, 목표점 뒤에 장애물이 있는 경우에 대해서는 고려하지 않는다. 이는 장애물 앞에 목표점이 주어진 경우에도 목표점까지 주행 가능하도록 하기 위함이다. 출력층의 노드는 표 6과 같이 행위기 결합가중치와 속도값으로 출력된다.

표 5 행위기 결합 RBFN의 입력
Table 5 Inputs of the behavior-combinational RBFN

입력 1 (D_f)	입력 2 (D_s)	입력 3 (D_g)
초음파 센서(3~7)의 장애물 거리 중 최소값	초음파 센서(1,2,8,9)의 장애물 거리 중 최소값	목표점 방향의 센서의 장애물 거리의 값

표 6 행위기 결합 RBFN의 출력
Table 6 Outputs of the behavior-combinational RBFN

출력 1 (α)	출력 2 (ν)
장애물 회피 행위의 가중치	로봇의 속도

RBFN를 학습시키기 위해 입력1(D_f)는 0.0 ~ 2.0[m], 입력 2(D_s)는 0.0 ~ 1.2[m], 입력3(D_g)는 0.0 ~ 2.0[m]까지 구간을 나누어 학습 데이터를 설정하였다. RBFN의 출력 1인 장애물 회피행위의 가중치(α)의 값은 0 ~ 1사이의 값이며 3가지의 입력 정보를 고려하여 설정하고, 출력 2인 속도값은 입력정보에 대해 식(4)을 기초로 하여 데이터를 설정하였다.

$$v = v_{min} + v_{dev} \left(\frac{D_{minS}}{D_{maxS}} \right) \left(\frac{D_{minF}}{D_{maxF}} \right) \quad (4)$$

여기서, v 는 로봇의 기준 속도이며, v_{min} 은 로봇의 최저속도 0.2[m/s]로 설정하였으며, v_{dev} 는 로봇의 가변속도 0.3[m/s]로 설정하였다. 즉, 로봇의 속도는 0.2 ~ 0.5[m/s]이다. D_{minS} 은 측면의 초음파 센서(1,2,8,9)에 의해 측정된 거리값 중 최소 거리값이며, D_{maxS} 는 측정된 최대 거리값 1.2[m]로 설정하였다. D_{minF} 은 정면의 초음파 센서(3 ~ 7)에 의해 측정된 거리값 중 최소 거리값이며, D_{maxF} 는 측정된 최대 거리값 2[m]로 설정하였다.

위와 같은 정보들을 고려하여 총 125가지의 경우를 학습하였다. 학습 방법은 steepest descent method을 이용하였고 off-line상에서 학습하였다. 학습된 RBFN을 이용하여 주행 제어기의 supervisor를 만들고, 실제 주행 시 매 sampling시간마다 들어오는 정보에 대해 장애물 회피 가중치(α)와 속도를 출력하게 된다. 이 장애물 회피 가중치를 이용하여 식(5)와 같이 목표점 도달 가중치(β)를 구하였다.

$$\beta = 1 - \alpha \quad (5)$$

최종적으로 장애물 회피 행위와 목표점 도달행위의 출력과 가중치를 결합하여 식(6)과 같이 로봇의 최종 회전각을 결정하고 출력된 속도로 주행하게 된다.

$$\theta_{Total} = \alpha \times \theta_{Obstacle} + \beta \times \theta_{Target} \quad (6)$$

단, θ_{Total} 은 최종회전각, $\theta_{Obstacle}$ 은 장애물 회피 회전각, θ_{Target} 은 목표점 도달 회전각이다.

3.3 Target Switching

지역경로계획은 매 시간 계속된 정보만을 이용하여 주행하므로 전체의 주행환경에 대해서 알지 못한다. 이러한 이유로 긴 벽뒤에 목표점이 있거나 U자형 장애물을 만나게 되면 같은 행동을 되풀이하면서 목표점까지 이르지 못하는 경우가 발생한다. 지역경로계획만을 이용하는 주행알고리즘인 경우 이러한 국부 최소점(local minimum) 상황이 발생할 확률이 매우 높다. 따라서 이런 문제에 대처할 수 있는 능력을 가져야 한다.

본 연구에서는 W. L. Xu와 S. K. Tso가 제안한 target switching 방법[11]을 이용하여, 국부 최소점 상황이 발생했을 경우, 자율이동로봇이 이런 상황을 벗어나 목표점까지 안전하게 도달할 수 있도록 하였다. 로봇의 주행 중 목표점 방

향이 $-\pi$ 에서 $+\pi$ 로 변화가 발생하거나 혹은 그 반대의 상황이 발생한 경우 국부 최소점 상황이 발생한 것으로 인지하고, 가상 목표점(virtual target)을 두어 U자형 장애물을 벗어나도록 목표점을 전환하였다. 본 논문에서는 목표점 방향이 $-\pi$ 에서 $+\pi$ 로 전환 시 가상 목표점의 방향을 -30° 로 설정하고, 반대의 경우는 $+30^\circ$ 로 설정하였다. 그리고 목표점의 전환 후, 일정거리 주행 후에 원래의 목표점으로 전환하도록 하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 장에서는 앞에서 제안된 퍼지-인공면역망과 RBFN을 사용한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 병행하였다. 또한 각각의 행위를 인공면역망으로 구하여, 행위 결합기를 퍼지 시스템을 이용한 방식[10]과의 비교를 통하여 제안된 방식의 성능의 우수함과 타당성을 검증하였다.

4.1 주행 시뮬레이션 결과

본 절에서는 퍼지-인공면역망으로 설계된 행위기들의 주행결과를 보이고, 기존의 퍼지 시스템을 이용한 주행 결과와 다양한 환경에서 비교하고자 한다. 주행 시뮬레이션을 위한 개발환경은 Windows 98 SE이며, 프로그램 개발 언어는 델파이를 사용하였다.

시뮬레이션 상의 로봇에 대한 설정치는 표 7와 같다. 주행 알고리즘의 샘플링 시간(sampling time)은 200[msec]로 설정하였다.

표 7 시뮬레이션 상의 로봇에 대한 설정치
Table 7 Specification for the AMR in simulation environment

직 경	0.48[m]
최고 속도	0.5[m/s]
최저 속도	0.2[m/s]
초음파 센서의 거리 측정범위	0~2[m]
초음파 센서의 scan 주기	200[msec]

그림 5 (a)와 (b)는 퍼지-인공면역망을 이용하여 장애물 회피 행위기만을 구현하여 주행시킨 시뮬레이션 결과이다. 그리고, 그림 5 (c)와 (d)는 퍼지-인공면역망을 이용하여 목표점 도달 행위기만을 구현한 결과이다. 각각의 행위기들이 주어진 특성에 따라 주행함을 알 수 있다.

또한 이동로봇의 행동 선택기에 영향을 주는 장애물 회피 행위기와 목표점 도달행위기만을 고려하여 주행할 경우, 목표점에 도달하지 못하고 같은 행동을 반복하거나 한 장소에 정지하는 경우가 발생할 가능성이 있다. 이러한 현상을 앞에서 설명한 국부 최소점 상황이라고 하며, 그림 6은 국부 최소점 상황의 발생 시 virtual target switching을 사용한 제한된 제어기의 목표점까지 주행하는 시뮬레이션 결과이다.

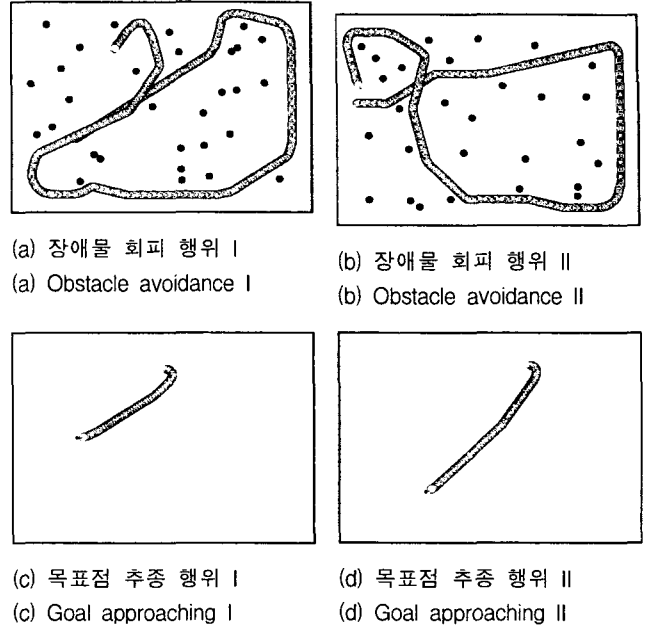


그림 5 각각의 행위기의 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation results of each behavior module

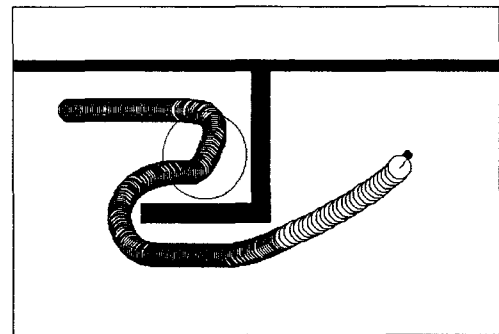


그림 6 국부최소점이 발생하는 환경
Fig. 6 Environment with local minimum situation

원이 있는 부분은 로봇이 국부 최소점에 빠진 상황으로 제어기의 목표점을 전환하는 부분이다. 제안된 알고리즘을 국부 최소점 상황이 발생 시에도 잘 탈출함을 알 수 있다.

그림 7은 제안된 주행 알고리즘과 기존의 퍼지 제어 시스템을 이용한 방식과의 비교 시뮬레이션 결과이다. 주행결과를 비교하기 위해서 속도를 0.3[m/sec]로 고정하여 주행하였다.

그림 7의 (a)와 (b)는 12×10 [m]의 복잡한 주행환경에서 퍼지 시스템과 제안된 주행 알고리즘에 의한 비교이다. 퍼지 시스템의 주행 거리는 24.17[m]이고, 제안된 주행 알고리즘은 23.27[m]를 주행하였다. 제안된 주행 알고리즘이 퍼지 시스템에 비하여 목표점까지 더 짧은 거리를 주행함을 알 수 있다. 이로써 행위 결합기가 적절한 출력을 결정하여 잘 주행하게 함을 알 수 있다. 그림 7의 (c)와 (d)는 14×12 [m]의 단순한 주행환경에서의 비교결과이다. 퍼지 시스템을 이용한 방식은

15.41[m]의 거리를 주행하였고, 제안된 방식은 15.29[m]의 거리를 주행하였다. 단순한 주행 환경에 의하여 주행 거리는 많은 차이가 나지 않으나, 로봇의 이동 경로가 부드럽고 불필요한 행동들을 하지 않음을 확인할 수 있었다. 그림 7의 (e), (f), (g), (h)는 14 × 12[m]의 복잡한 주행환경에서의 퍼지 시스템과 제안된 주행 알고리즘의 주행 결과를 나타낸다. 퍼지 시스템을 이용한 그림 7의 (e), (g)의 주행 거리는 11.93[m], 32.21[m]이며, 제안된 주행 알고리즘에 의한 그림 7의 (f), (h)의 주행 거리는 11.21[m], 31.31[m]이다. 제안된 주행 알고리즘이 로봇의 이동 경로가 부드럽고 불필요한 행동들을 하지 않음을 확인할 수 있고, 주행거리에서도 기존 퍼지 시스템 방식보다 짧은 거리를 주행함을 알 수 있다.

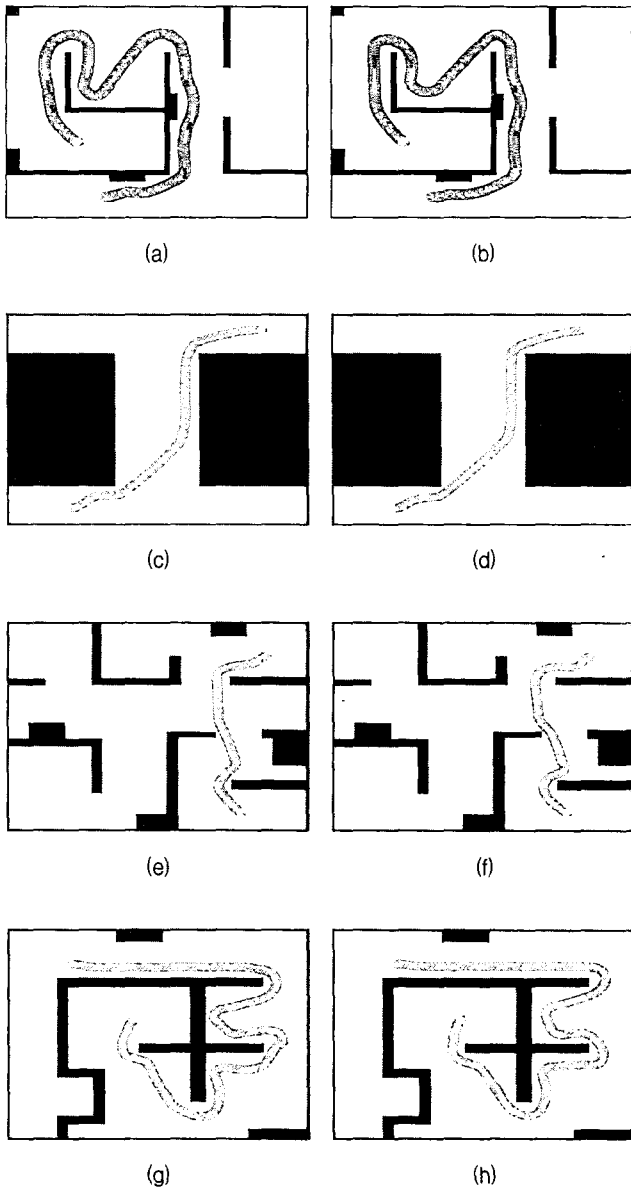


그림 7 복잡한 실내 환경에서의 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation results under the complex indoor environment

4.2 주행 실험 결과

실험에서 그림 8과 같은 원통형의 차륜형 자율이동로봇을 이용하였다. 또한 실험에 사용된 자율이동로봇에 대한 속도와 센서의 설정값은 표 8과 같다.

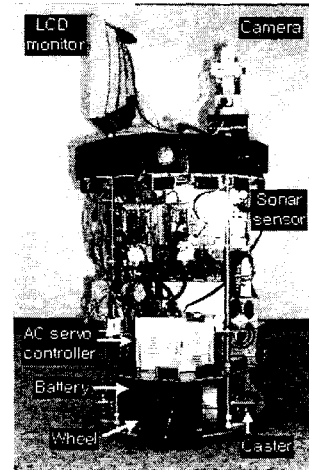


그림 8 자율이동로봇의 구조
Fig. 8 Structure of the AMR

표 8 실험 시 자율이동로봇의 사양
Table 8 Specification for the AMR in experiments

직 경	0.45[m]
높 이	0.98[m]
무 게	약 42[kg]
구동 방식	차륜형
초음파 센서 수	9개
최고·저 속도	0.1 ~ 0.2[m/sec]
최대 가속도	0.5 [m/sec ²]
초음파 센서 측정 거리	0.15 ~ 2.0[m]
초음파 센서 scan 주기	200[msec]

절대 좌표의 설정은 초음파 센서로부터 들어온 거리정보와 좌·우측 모터의 엔코더로부터 들어온 신호를 이용하여 계산하였다. 그리고 자율이동로봇의 실험을 위하여 환경 및 좌표 대한 설정값의 조건은 다음과 같다.

- 주행 전 환경에 대한 정보는 없고 단지 초음파 센서 정보와 목표점 좌표만을 주어 로봇을 주행하였다.
- 로봇의 출발점은 절대좌표의 기준점인 (0,0)으로 설정하였다.
- 로봇의 목표점은 절대좌표를 기준으로 하여 (X_t , Y_t) 값으로 주었다.
- 현재의 로봇좌표에서 목표점 거리가 0.2[m] 이내로 들어오면 목표점에 도달한 것으로 간주하고 로봇을 정지하도록 설정하였다.

1) 실내 환경 I에서의 주행

본 논문에서 제안한 주행알고리즘을 이용하여 일반적인 실내 환경에서의 주행을 검증하였다. 그림 9의 (a)는 로봇이 주행한 실내 환경이다. 주행에 있어서 초기 위치를 (0, 0)로 정하고, 주어진 목표점으로 주행하도록 하였다. (b)는 로봇이 주행할 때 엔코더와 초음파센서로부터 얻은 정보를 실험이 끝난 후 off-line에서 다시 표현한 것이다. Grid-map에서 장애물의 점들을 나타내기 위해 9개 방향의 초음파 센서의 거리정보를 모두 표시하였고, 센싱 최대값인 2[m]이상 일 때는 표시하지 않았다. 그림 10의 (c)와 (d)는 실내환경 I에서 자율이동로봇이 주행 시에 변화한 선속도 값과 각속도 값을 각각 나타내었다.

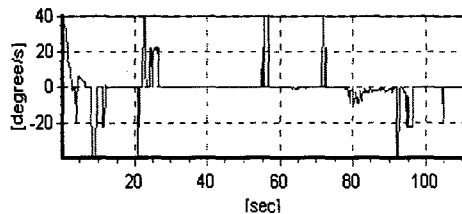
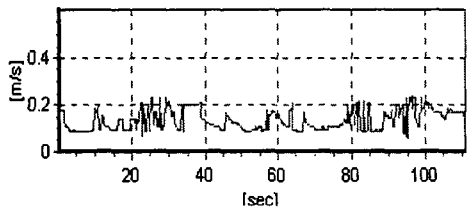
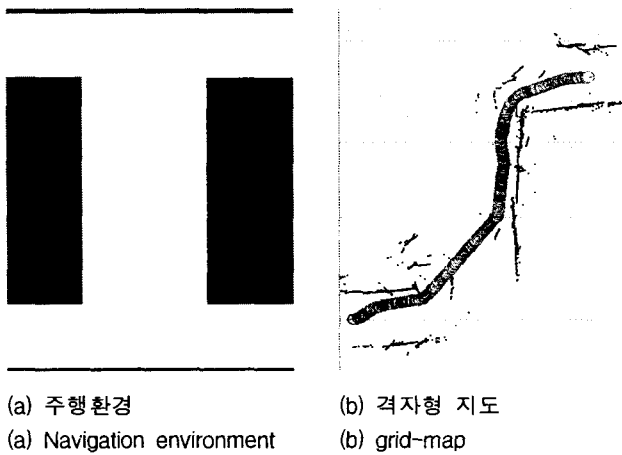


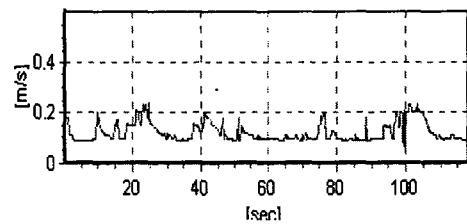
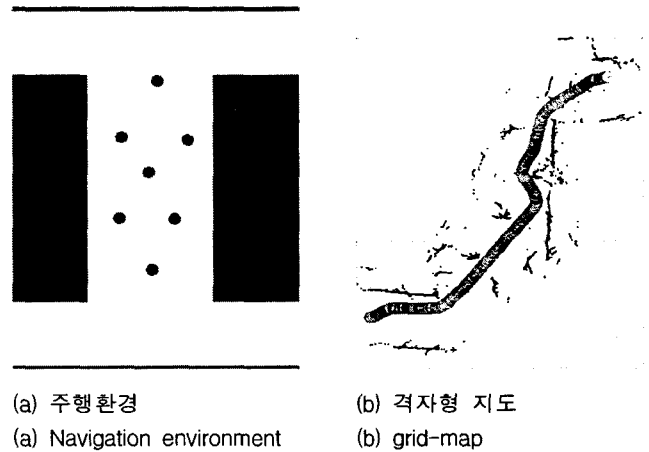
그림 9 실내 환경 I에서의 주행
Fig. 9 Navigation in indoor environment I

전체 주행에서 자율이동로봇은 목표점에 110[sec]동안 도달하였고, 장애물이나 벽면에 충돌 없이 주행하였다. 그리고

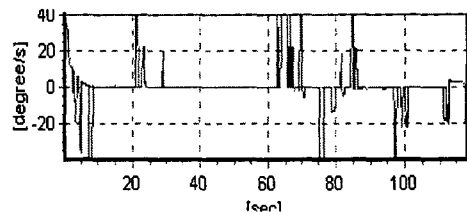
인공 면역망으로 구성된 각 행위기로부터 결정된 로봇의 회전각들을 환경의 변화에 따라 적절한 가중치로 조합하여 안전하게 주행하게 함을 확인할 수 있다. 또한 로봇이 벽면에 가까이 있는 경우에는 속도를 감속하고, 장애물이 없는 부분에서는 속도를 가속하여 총 주행시간을 줄이며 부드러운 주행을 하게 함을 볼 수 있다.

2) 실내 환경 II에서의 주행

실내 환경 II는 실내환경 I과 전체적으로 동일한 환경에 원형 장애물을 7개 더 배치하여 구성되었으며, 환경의 변화에도 로봇이 잘 반응하여 적절히 주행할 수 있는지를 확인하기 위해 실험하였다. 그림 10의 (a)는 실험환경을 나타낸 것이고, (b)는 주행 후 저장된 정보를 다시 표현한 것이다. 또한 그림 (c)와 (d)는 실험 환경에서 주행한 선속도와 각속도의 변화를 표현한 것이다.



(c) 선속도 그래프
(c) Linear velocity graph



(d) 각속도 그래프
(d) Angular velocity graph

그림 10 실내 환경 II에서의 주행
Fig. 10 Navigation in indoor environment II

전체 주행에서 자율이동로봇은 총 118[sec]만에 목표점에 도달하였고, 벽면이나 장애물과의 충돌 없이 주행하였다. 그리고 원형장애물들이 배치된 변화된 환경에서도 목표점 도달 행위와 장애물 회피행위를 가중치 조절을 통해 적절히 결합함으로써 로봇이 안전하게 목표점에 도달함을 보여주었다. 그리고 원형장애물이 배치된 위치에서 속도를 감속하여 장애물과의 충돌을 방지하였고, 진행방향에 장애물이 없는 경우에는 좌·우측의 위치에 장애물이 있어도 속도를 줄이지 않고 주행함으로써 안전하게 주행함을 알 수 있다. 본 실험 결과를 통해 실제 복도 환경에서 장애물이 복잡하게 존재하는 경우에도, 본 논문의 알고리즘에 의해 로봇은 부드럽고 안전한 경로를 통해 장애물과의 충돌 없이 목표점에 도달함을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구는 퍼지-인공면역망과 RBFN에 기초한 행위 기반 방식의 지역경로계획을 이용하여 자율이동로봇이 주행환경에서 주어진 목표점까지 장애물과의 충돌 없이 안전하게 도달하는 것을 목표로 하였다.

인공 면역망을 이용한 행위가 장애물의 유무나 거리 정보를 실수값으로 이용한 기존의 연구에 비해 퍼지의 언어적 변수를 이용하여 행위를 구성하였고, 행위의 출력을 회전방향각으로 설정하였다. 그로 인해 기존의 방식보다 행위의 규칙 설정을 간단하게 할 수 있다는 장점을 가지며, 부드럽고 안전한 경로로 주행하도록 하여 주행 안정성을 높였다. 행위의 출력은 cooperative방식을 사용하여 구하며 그에 필요한 행위결합기를 RBFN으로 구현하였고, 로봇 주위 환경에 대한 정보를 기반으로 행위 결합기의 결합 가중치를 적절히 변화시켰다. 따라서 기존의 예기치 못한 동작이나 불필요한 경로를 주행하는 단점을 개선할 수 있었다. 자율이동로봇의 속도제어기는 일반적으로 따로 설계되어져 있으나, 본 논문에서는 행위결합기와 속도제어기를 통합해서 사용하여 그 구조를 단순하게 만들었다. 그리고 target switching방법을 적용시켜 국부 최소점 상황을 극복할 수 있도록 하였다.

앞으로의 연구 과제로 지도작성(map building)이나 경로탐색 등을 통한 전역경로계획과의 결합에 대한 연구가 계속되어야 하고, 인공면역망에서의 파라미터 설정에 있어서 최적화 방법에 대한 연구도 필요하다.

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, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, pp. 278-288, 1991.
- [4] 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.
- [5] W. Li, "Fuzzy logic based robot navigation in uncertain environments by multisensor integration," *Proc. of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 259-264, 1994.
- [6] K. Pal Prabir and Kar Asim, "Mobile robot navigation using a neural net," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1503-1508, 1995.
- [7] A. Ishiguro, R. Watanabe, and Y. Uchikawa, "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.
- [8] A. Ishiguro, R. Watanabe, and Y. Uchikawa, "Emergent construction of behavior arbitration mechanism based on the immune system," *Proc. of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 481-486, 1998.
- [9] D. Dasgupta, *Artificial Immune Systems and Their Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1999.
- [10] 김양현, 이동제, 이민중, 최영규, "인공면역망과 퍼지 시스템을 이용한 자율이동로봇 주행," *대한전기학회 논문지*, 제 51D권 8호, pp. 402-412, 2002.
- [11] W. L. Xu and S. K. Tso, "Sensor-based fuzzy reactive navigation of a mobile robot through local target switching," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 29, no. 3, pp. 451-459, 1999.
- [12] F. Michaud, G. Lachiver, and Chon Tam Le Dinh, "Fuzzy selection and blending of behaviors for situated autonomous agent," *Proc. of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 1, pp. 258-264, 1996.
- [13] J. Yen and N. Pfluger, "A fuzzy logic based extension to Payton and Rosenblatt's command fusion method for mobile robot navigation," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 25, pp. 971-978, 1995.
- [14] J. S. R. Jang, C. T. Sun and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall, 1997.

저 자 소 개



오 홍 민 (吳 弘 民)

1975년 7월 15일생. 2001년 부경대 전기공학과 졸업. 2003년 부산대 대학원 전기공학과(석사). 현재 현대기아자동차(주) 연구소 전장시스템 연구원

Tel : 051 - 207 -4070

E-mail : hong1918@hanmail.net



박 진 현 (朴 晉 玄)

1967년 3월 2일생. 1992년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~1999년 부산정보대학 전기전자계열 전임강사. 1999년~현재 진주산업대학교 메카트로닉스공학과 조교수.

Tel : (055) 751-3386,

Fax : (055) 751-3389

E-mail : jh-park@jinju.ac.kr



최 영 규 (崔 榮 奎)

1957년 6월 18일생. 1980년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1990~1991년 CALTECH Visiting Scholar. 1998~1999년 Univ. of Southwestern Louisiana Visiting Scholar. 현재 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수.

Tel : (051) 510-2371

Fax : (051) 513-0212

E-mail : ykichoi@pusan.ac.kr