

## 이동로봇에서 퍼지제어를 이용한 항법

( Navigation Using Fuzzy Control in Mobile Robot )

차영엽\*, 권대갑\*\*, 이봉구\*

\* 원광대학교 공과대학 기계설계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

**Abstract :** In the mobile robot research, monitoring the present status and self-navigating the robot in various environment are significant. This paper treats a navigation algorithm using a fuzzy logic and a sensor system - laser range finder. The navigation algorithm using a fuzzy logic is achieved by organizing the knowledge base for self-navigation of mobile robot. In order that mobile robot is economically arrived the goal, the knowledge base is applied to acquire the informations of moving distance, direction, and velocity in every cycle time.

### 1. 서론

이동로봇의 경로계획에는 형상공간 방법(configuration space method), 포텐셜 방법(potential approach) 그리고 퍼지이론(fuzzy logic)이나 신경 회로망(neural network) 등의 인공지능을 이용한 알고리즘이 사용되었다. 먼저 형상공간 방법의 경우에 대해서 살펴보면, Lozano-Perez<sup>1)</sup>는 visibility 그래프에 의한 다각형들로 이루어진 환경에서 로봇을 한점으로 간주한 경로계획 문제를 처음으로 다루었다. 그러나 이러한 visibility 그래프는 로봇의 주위환경 뿐만 아니라 로봇의 크기에도 영향을 받는다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 Noborio<sup>2)</sup>는 환경을 quadtree로 모델링 하는 효과적인 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 quadtree는 주위환경의 근사적인 표현일 뿐만 아니라 설정된 좌표계에 의존한다. 결국, 이러한 형상공간 방법은 계산시간을 많이 요구하고 복잡한 환경이나 미지의 장애물이 경로상에 존재하는 경우와 같은 수시로 변화하는 환경에는 부적합하다.

두번째로 포텐셜 방법의 경우에 대해서 살펴보면, Brooks<sup>3)</sup> 와 Adams<sup>4)</sup>는 repulsive force 를 감지된 장애물과 상사(identify) 시키고, 여기에 goal 쪽으로 attractive force 를 첨가하여 그들의 합력벡터(resulting vector)의 방향으로 이동로봇의 경로를 생성을 하였다. Borenstein 과 Koren<sup>5)</sup>은 환경을 square로 분할하고, 각각의 square 를 장애물 probability 로 결합하였다. 그리고 이 장애물 probability 에 기초하여, artificial force 를 계산하였다. 그러나 이 artificial force의 방향과 크기는 많은 양의 계산을 요구하는 식을 풀어서 결정되어야 하는 단점이 있다. 결국 이러한 포텐셜 방법들은 수학적 모델로 표현하

기 힘든 복잡한 환경하에서 이동로봇의 진행방향과 속도를 결정하는데 영향을 끼치는 힘들의 계수를 결정하는데 어려운 단점이 있다.

이와같은 어려움을 극복하기 위하여 퍼지이론과 신경회로망을 이용한 방법들이 제안되었다. Ishikawa<sup>6)</sup>는 건물 내에서 움직이는 이동로봇의 항법을 위하여 효율적인 주행에 관한 지식을 구축한 퍼지이론을 사용하였다. 또한 신경회로망은 Nagata<sup>7)</sup> 와 Kozakiewicz<sup>8)</sup>에 의해 사용되었다. 그러나 이 방법은 작업환경내에 존재하는 모든 상황들이 신경회로망을 히팅(tuning)시키는데 고려되어야 하는 어려움이 있다.

이 논문은 레이저 거리계 센서 시스템에 기초한 퍼지이론을 이용한 항법 알고리즘을 다룬다. 이동로봇이 레이저 탐색(laser scanning)으로부터 얻은 국부적인 거리 정보를 가지고 주위의 환경과 이간을 인식하고 지식 베이스(knowledge base)에 기초한 퍼지제어에 의하여 직진, 우회 또는 통로 없음과 같은 결정을 하여 목표점에 도착하도록 한다. 또한 이동로봇의 실시간 항법을 위해 제안된 퍼지제어에 기초한 경로계획 알고리즘의 결과가 복잡한 환경에서 모의실험을 통하여 보여진다.

### 2. 퍼지논리를 이용한 항법 알고리즘

#### 2.1. 지도작성

이동로봇이 공장, 빌딩, 발전소등의 실내에서 움직이는 경우, 실내에 있는 여러가지 장애물을 극복한 후에 목표점에 도달할수

있을 것이다. 장애물을 크게 이동 장애물과 고정 장애물로 나눌 수 있다. 이동 장애물은 사람, 동물, 다른 이동로봇 등이 될수 있고, 고정 장애물은 건물의 벽이나 계단과 같은 구조물 뿐만 아니라 기계, 복도에 내놓은 상자, 회분, 쓰레기통 등이 있다. 이러한 여러가지 장애물의 형태를 로봇내부의 컴퓨터에 저장하기에는 큰 메모리 공간이 필요하기 때문에, 전역 경로계획에 사용되는 실내지도를 만들기 위하여 장애물 형태의 간단화가 필요하다. 먼저 3차원 장애물을 단면 데이터만 취하면 2차원으로 저장할수 있다. 실내의 바닥을 x-y 평면으로 가정하면 이 평면에 직각인 z 방향은 높이가 될 것이다. 높이를 가진 3차원 장애물의 단면은 거의 대부분이 일정하다. 그 예외로는 다리를 가진 책상, 의자, 회분 등이 있을수 있다. 이러한 물체들 조치도 주위환경 인식용 센서인 레이저 거리계의 탐색에 의하여 단면이 큰 부분을 택하여 저장할수 있다.

두번째로, 이러한 2차원 단면 데이터 조치도 1차원의 직선 데이터 조합으로 단순화 시킬수 있다. 거의 대부분의 인공 장애물(장애물의 단면이 원형이라고하더라도)은 직선으로 단순화 시킬수 있다. 예로서 육면체의 상자인 경우 단면은 사각형이므로 4개의 직선으로 상자를 단순화 시킬수 있다. 설사 원형단면의 물체라 하더라도 4개 혹은 5, 6개의 직선으로 단순화 시킬수 있다. 이러한 직선은 컴퓨터의 메모리에 4개의 정수 데이터로 저장된다. 즉, 직선의 양 끝점 좌표  $(x_a, y_a), (x_b, y_b)$  가 그것이다. 결국 실내에 있는 3차원 장애물은 직선을 구성하는 양 끝점의 좌표값 4개의 조합으로 저장할수 있게된다. 이러한 방법은 장애물을 지도에 표시하는데 유용할뿐만 아니라, 장애물 데이터 저장 공간을 최소화 하는데도 도움이 된다.

## 2.2. 이동로봇의 경로제어 알고리즘

이동로봇의 전체 경로제어 알고리즘이 Fig.1에 나와있다. 이동로봇의 임무는 사용자가 정해준 몇개의 부 목표점(subgoal)을 거쳐서 최종 목표점(final goal)에 도달하는 것이다. 따라서 사용자는 이동로봇의 현재위치와 몇개의 부 목표점 그리고 최종 목표점 좌표를 이동로봇에 지정해 주어야 한다. 앞에서 거론한 바와 같이 이동로봇이 주행할 실내의 지도가 직선의 조합으로 만들어지면 이동로봇 내부의 컴퓨터 메모리에 이를 저장할수 있다. 이동로봇이 i 번째에 도달해야 할 부 목표점의 좌표  $(x_{s_i}, y_{s_i})$ 와 그 전의 부 목표점의 좌표  $(x_{s_{i-1}}, y_{s_{i-1}})$ 를 이용하면, 그 사이의

거리  $D_{s_i}$ 는

$$D_{s_i} = \sqrt{(x_{s_i} - x_{s_{i-1}})^2 + (y_{s_i} - y_{s_{i-1}})^2} \quad (1)$$

이고, 한 스텝(step) 동안 이동로봇이 레이저 거리계를 이용하여 탐색하고 이동할수 있는 거리를  $D_{step}$  이리하면, i 번째에 도달해야 할 부 목표점과 그 전의 부 목표점 사이의 부-부 목표점(sub-subgoal)의 수  $N_{s_i}$  는

$$N_{s_i} = \text{Int}\left(\frac{D_{s_i}}{D_{step}}\right) + 1 \quad (2)$$

이 된다. 여기서  $\text{Int}()$ 는 괄호안의 정수(integer)부분만을 취한다는 의미이다. 다시말하면 이동로봇은 부 목표점과 다음의 부 목표점을  $N_{s_i}$  개의 부-부 목표점으로 나누어서 이동한다는 의미가 된다. 따라서 i 번째 부 목표점 내의 i 번째 부-부 목표점의 위치  $(x_{s_{i_1}}, y_{s_{i_1}})$ 는

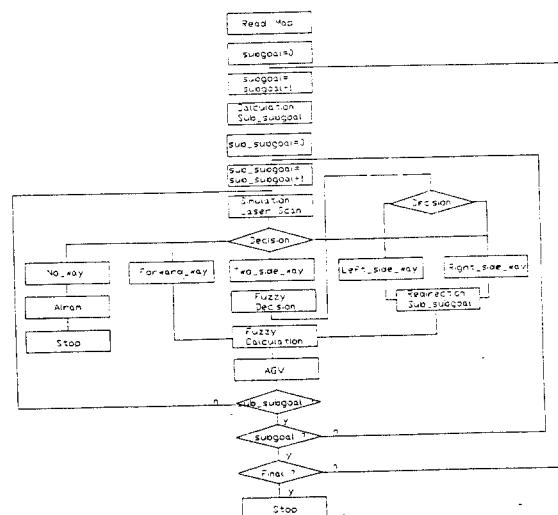


Fig.1 Path control algorithm using the fuzzy logic

$$x_{ss_i} = x_{s_i} + \left( \frac{D_{s_i}}{N_{ss_i}} * j \right) \cos \theta_{s_i}, \quad (3)$$

$$y_{ss_i} = y_{s_i} + \left( \frac{D_{s_i}}{N_{ss_i}} * j \right) \sin \theta_{s_i},$$

$$(단. 1 \leq j \leq (N_{ss_i} - 1) \text{ 인 정수}) \quad (4)$$

여기서

$$\theta_{s_i} = \text{Atan2}(x_{s_i} - x_{s_{i-1}}, y_{s_i} - y_{s_{i-1}}) \quad (5)$$

과 같이 얻을수 있다.

이미 계산된  $N_s$ , 개의 부-부 목표점 좌표들 중에서 첫번째 부-부 목표점 좌표를 받아들이 후, 국부 경로계획이 이루어져야 한다. 전역 경로계획은 이동로봇이 돌아다니는 실내환경의 초기 지도에 의해서 이루어지기 때문에, 초기지도가 만들어진 후의 변화된 실내환경에 이동로봇이 적용하기 위해서는 로봇의 현재위치에서 제한된 영역만을 레이저 거리계로 탐색한 후에 변화된 실내환경의 정보를 이용하여 초기지도를 수정(update) 하고 국부 경로계획도 수립할수 있게 된다. 레이저 거리계의 모의탐색은  $R_{scan}$  을 반지름으로 하는 원 내의 이동 장애물과 고정 장애물을 뿐만 아니라 접하는 것들도 모두 찾아낸 후에, 부-부 목표점을 중심으로  $\pm 90^\circ$  범위 내의 것만 선별하여 국부 경로계획에서 사용한다. 특히 이동 장애물은 레이저 거리계의 탐색을 일정한 시간 간격으로 두번하여 변위가 지나치게 차이가 나는 물체를 선별함으로서 이루어진다.

레이저 거리계의 탐색이 이루어진 후에는 장애물들의 국부 거리정보를 기초로 decision 블록에서 직진통로(forward way), 우회통로(side way) 또는 통로없음(no way) 을 결정한다. 특히 우회통로에서 2개 이상의 통로가 확보된 경우에는 퍼지논리를 이용한 decision 이 이루어져서 가장 경제적으로 부 목표점에 도달 할 수 있는 통로를 선택한다(자세한 사항은 다음의 2.3절에서 다룬다). 물론 이 경우에는 이미 계산된 부-부 목표점의 좌표도 수정된다. 직진통로와 우회통로의 경우에는 이동로봇이 전진할 수 있는 거리와 속도를 퍼지논리에 의해서 결정한 후에 로봇을 구동시킨다(자세한 사항은 다음의 2.3절에서 다룬다). 로봇을 구동시킨 다음 그 위치가 부-부 목표점인지지를 시험하여 만족하지 않으면 레이저 탐색부터 다시 시작하고, 만족하면 부 목표점인지지를 시험한다. 이를 만족하지 않으면 다음의 부-부 목표점을 읽어서 레이저 탐색을 해나가고, 만족하면 최종 목표점인지지를 시험한다. 이를 만족하지 않으면 그 다음 부 목표점을 읽은 후 부-부 목표점들을 계산하고, 만족하면 이동로봇의 운동을 끝마친다.

### 2.3. 퍼지논리를 이용한 항법 알고리즘

레이저 거리계로부터 얻은 국부 거리정보와 장애물 사이의 통로 인식에 따라서, 이동로봇의 현재위치를 기준으로 레이저 탐색영역 내에 장애물이 완전히 없거나, 장애물이 있더라도 목표점

방향으로 직선통로가 확보된 경우에 decision block 에서는 직진통로(forward open way) 루틴(routine)으로 분기시킨다. 이 경우에 현재 이동로봇의 위치에서 목표점방향으로 가야할 이동거리와 속도가 퍼지 알고리즘에 의해서 결정된다. 이동거리와 속도는 전진방향의 통로폭과 통로의 길이에 따라서 Table 1 과 같은 퍼지 룰(rule)에 의해서 결정된다. Fig.2 는 이들의 멤버쉽 함수(membership function)를 보여준다. 이때 이동로봇의 전진속도는 장애물이 없는 확트인 환경에서는 빨리할 수 있고, 장애물 사이의 직선통로가 좁을수록 느리게 전진해야 한다.

만약 앞에서 거론한 직선통로의 조건을 만족하지 않고 장애물을 사이의 통로가 한 개 이상일 경우에 decision block 에서 우회통로(side open way) 루틴으로 분기한다. 만약 우회통로가 한 개만 있을 경우에는 선택의 여지없이 그 통로로 이동하면 되지만, 두 개 이상일 경우는 그들 중에서 목적지에 가장 빨리 도착할 가능성이 있는 통로 한 개를 선택해야 한다. 먼저 그 통로를 선택하는 방법에 대해서 알아본다. 우회통로 결정에 있어서는 통과 용이성(passability) 과 통과 신속성(rapidity) 이 인자로 사용된다. 통과 용이성은 우회통로의 폭과 이동 장애물의 통로 방향으로의 접근속도에 따라서 결정되고, 통과 신속성은 우회통로폭과 그통로로 접근하기 위한 이동로봇 움직임의 회전각도에 따라 결정된다. 우회통로 결정에 있어서의 통과 용이성과 신속성은 Table 2 와 같은 퍼지 룰(rule)에 의해서 결정된다. Fig.3 은 이들의 멤버쉽 함수를 보여준다.

Table 1. Rule table in the case of forward-open path

Moving Velocity	Forward Open Width			
	ZR	PS	PM	PB
Forward Open Distance	ZR	X	X	X
	PS	X	PS	PS
	PM	X	PS	PM
	PB	X	PS	PM

Moving Distance	Forward Open Width			
	ZR	PS	PM	PB
Forward Open Distance	ZR	X	X	X
	PS	X	PS	PS
	PM	X	PM	PM
	PB	X	PS	PB

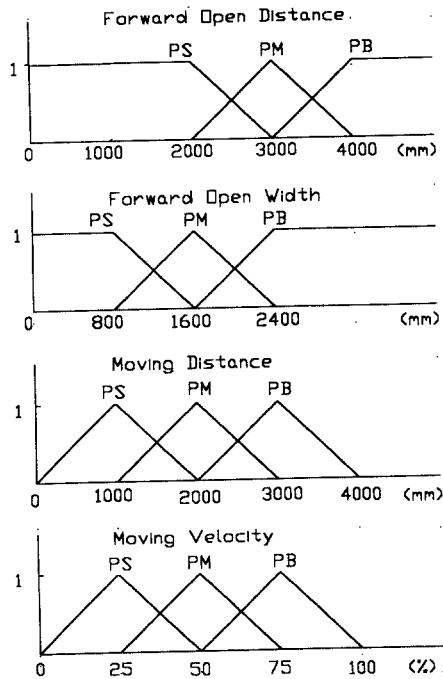


Fig.2 Membership function for moving velocity and distance

이와같이 우회통로가 1개 이상인 경우에서 통과 용이성과 신속성이 퍼지 decision에 의해서 계산되면 장애물의 우측을 통과할 것인지 좌측을 통과할 것인지에 대한 결정이 이루어진다. 그리고 앞에서 거론한 직진통로 경우와 같이 이동로봇의 현재위치에서 우회통로 방향으로 가이드 이동거리와 속도가 퍼지 알고리즘에 의해서 결정된다.

만약 장애물 사이에 직진통로 뿐만 아니라 우회통로도 존재하지 않는 경우에 decision block에서는 통로 없음 (no way) 루틴으로 분기시킨다. 이때는 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다. 먼저 장애물 사이에 이동로봇이 통과 가능한 통로가 없더라도 불연속 구간이 있는지를 찾아보고 앞에서 거론한 비와 같이 그 불연속 구간의 폭으로 이동로봇이 통과할 수 있다면 이동로봇은 그 감춰진 통로로의 우회명령이 주어진다. 그리고 이동로봇은 그 방향으로 이동시킨 다음 다시 국부 거리정보를 얻어서 이전의 step에서 가정한 불연속 구간이 통과 가능한 통로 인지를 확인하여 이동한다. 만약 이러한 불연속 구간도 없는 경우에 이동로봇은 더이상 목표점으로 전진할수 없기 때문에 통로 없음 명령 (no\_way 명령)이 주어지고 실행을 중단한다.

통로 없음 명령이 주어진 후에 실행을 중단하기 전에 몇 가지의 다른 방법을 생각할 수 있다. 그 첫번째는 목표점 방향과 반대쪽에 통로가 있는지를 조사하는 것이고. 두번째는 통로를 막고있는 것 중에서 moving 장애물이 있는지를 살펴보는 것이다.

Table 2. Rule table in the case of side-open path

Passability		Side-way Width			
		ZR	PS	PM	PB
Obstacle Approaching Velocity	NM	X	PM	PB	PB
	ZR	X	PS	PM	PB
	PM	X	ZR	ZR	PS
	PB				

Rapidity		Side-way Width			
		ZR	PS	PM	PB
Angle Difference	ZR	X	X	X	X
	PS	X	PM	PB	PB
	PM	X	PS	PM	PB
	PB	X	PS	PS	PM

전자는 레이저 거리계의 탐색범위를 목표점을 중심으로  $\pm 180^\circ$ 로 확장하여 이동로봇의 모든 방향으로 통로가 있는지를 검색한 다음 통로가 발견되면 전방의 장애물을 피해나가는 방법이다. 후자는 이동로봇의 현재위치에서 일정시간 간격으로 두번 이상의 레이저 탐색을 수행하여 장애물의 위치변화가 있는지를 확인하여 만약 위치 변화가 있으면 그것을 이동 장애물로 확정하고 경고음을 낸 뒤에 그 장애물이 이동하여 통로가 확보됨 것을 확인하고 주행하는 방법이다. 만약 위에서 거론한 두가지 조건 중에서 하나도 만족하지 않는 경우 실행을 중단한다.

### 3. 모의 실험

앞에서 거론한 퍼지논리에 기초한 모의실험 결과가 Fig.4에 나와있다. 여기서는 벽과 장애물로 이루어진 가상의 실내환경이 보여진다. 그리고 두 종류의 센서 데이터가 얻어진다고 가정한다. 그들 중에서 하나는 이동로봇의 위치추정을 위한 것이고, 다른 하나는 장애물을 피하기 위하여 이동로봇 주위의 국부적인 환경을 인식하기 위한 것이다. 전자의 센서로는 바퀴 회전용 엔코더가 사용되고, 후자의 센서로는 앞쪽에서 거론한 레이저 거리계가 사용된다고 가정하였다. 이 모의실험에서 이동로봇의 주행을 위한 한 주기시간은 3 초로 하였고, 레이저 거리계의 주사 범위는 반경 3m로 고정하였다. 이 모의실험 결과는 매 1 초

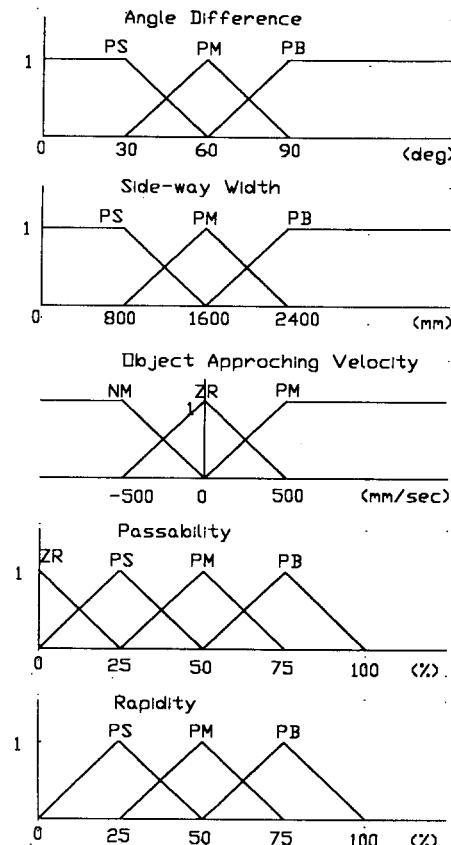


Fig.3 Membership function for passability and rapidity

미다 이동로봇의 경로를 원으로 표시한 것이다. 5개의 부 목표 점 명령이 주어진 경우에 이동로봇의 항법 결과를 보여주고 있다. 여기서 이동로봇은 좁은통로, 넓은통로, 그리고 여러개의 우회통로 후보를 가지는 경우의 복잡한 환경에서 다수의 목표점을 성공적으로 통과함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

이 논문은 레이저 거리계 센서 시스템에 기초한 퍼지이론을 이용한 항법 알고리즘을 다룬다. 이동로봇이 레이저 탐식으로부터 얻은 국부적인 거리 정보를 가지고 주위의 환경과 여건을 인식하고 지식 베이스에 기초한 퍼지제어에 의하여 직진, 우회 또는 통로 없음과 같은 결정을 하여 목표점에 도착하도록 하였다. 또한 이동로봇의 실시간 항법을 위해 제안된 퍼지제어에 기초한 경로계획 알고리즘의 결과가 복잡한 환경에서 모의실험을 통하여 보여졌다.

#### 참고문헌

- [1] Lozano-Perez T. and Wesley M.A., "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles", Commun. ACM, pp.560-570, 1979..
- [2] Noborio H., Naniwa T. and Arimoto S., "A fast path planning algorithm by synchronizing modification and search of its

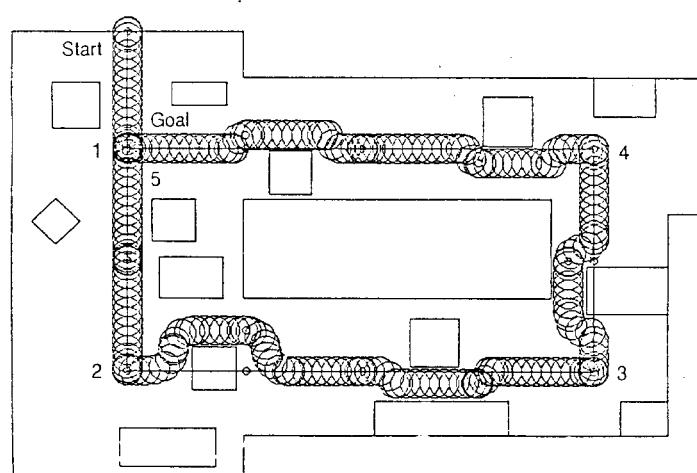


Fig.4 Navigation result of the mobile robot

- path-graph". Proc. IEEE Intern. Workshop on Artificial intelligent for Industrial Application, pp.351-357. 1988.
- [3] Brooks, R. Solving the find path problems by good representation of free space, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., 13(3), pp.190-197, 1983.
- [4] Adams M.D. and Probert P.J., "Towards a real-time navigation strategy for a mobile robot", Proc. of the IEEE Intern. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.743-748. 1990.
- [5] Borenstein J. and Koren Y., "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots", IEEE Trans. on Robotics and Automation, No.3, pp.278-298. 1991.
- [6] Ishikawa, S. A method of indoor mobile robot navigation by fuzzy control, in Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.1013-1018. 1991.
- [7] Nagata, S., Sekiguchi, M. and Asakawa, K. Mobile robot control by a structured hierarchical neural network, IEEE Contr. Syst. Mag., 10(3), pp.69-76, 1990.
- [8] Kozakiewicz, C. and Ejiri, M. Neural network approach to path planning for two dimensional robot motion, in Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.818-823, 1991.
- [9] Y.Y. Cha and D.G. Gweon, Real-Time Control Using Explicit Dynamic Solutions of a Two-Motion-Modes Mobile Robot, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of System and Control Engineering, 208, pp.157-167, 1994.
- [10] Y.Y. Cha, D.G. Gweon and D.G. Lee, "An active range sensor for free ranging mobile robot", Int. Symp. on Robotics and Manufacturing, Maui, USA, August 15-17, pp.35-40, 1994.