

## 자율 이동 로봇을 위한 지능적 운동 계획 시스템

正會員 金 振 傑\* 正會員 金 楨 燦\*\*

### Intelligent Motion Planning System for an Autonomous Mobil Robot

Jin-Geol Kim\*, Jeong-Chan Kim\*\* *Regular Members*

본 연구는 '92년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

#### 要 約

형상의 제한이 없는 장애물들로 구성된 미지의 2차원 환경에서 주어진 목표점을 향하는 로봇의 효율적인 경로를 생성하기 위한 지능적 운동 계획 시스템을 제안하였다. 지능적 운동 계획 시스템은 지능적인 운동을 만들어 내기 위한 세 가지의 성분으로 이루어져 있으며, 불연속 경계 방식에 기초한 실시간 경로 계획 알고리즘과, 경험적인 지식을 표현하기 위한 퍼지 신경회로망 판단 시스템, 그리고 기억의 손실과 보강 기능이 있는 외부 지도 생성 기술로 나뉘어진다. 먼저 실시간 경로 계획 알고리즘 부분에는 중간 목표점을 생성하기 위한 행동기준 구성 방식을 이용한다. 각 행동양식은 새롭게 제안된 실시간 충돌회피 알고리즘인 불연속경계 방식을 이용하여 독립적으로 중간 목표점을 생성할 수 있다. 중간 목표점을 수행하기 위하여 퍼지 신경회로망 판단 시스템을 이용하였으며 지능적인 판단을 위한 경험적인 규칙들은 퍼지 신경회로망 내에 삽입되어 있다. 마지막 부분은 외부 환경 지도를 생성하기 위한 기억의 손실과 보강기능이 있는 기억 기술로서, 격자 공간 내에서 활성화된 모든 기억 소자들의 활성 값은 점진적으로 감소하며 결국에는 모든 기억이 사라진다. 그러나 기억 소자가 재활성 되었을 때는 퍼지 규칙을 이용하여 더욱 길어진 활성 시간을 갖게 되므로 충분한 이동 후에는 동적인 장애물들이 존재하여도 고정적인 외부 환경 지도를 생성한다. 다양한 예제를 통하여 제안된 지능적 운동 계획 시스템이 여러 형태의 장애물들로 구성된 미지의 환경 속에서 주어진 목표점에 효율적으로 도달할 수 있음을 보였다.

#### ABSTRACT

Intelligent Motion Planning System(IMPS) is presented for a robot to achieve an efficient path toward the given target point in two dimensional unknown environment is constructed with unrestricted obstacle shapes. IMPS consists of three components for making intelligent motion. These components are real-time motion planning algorithm based on a discontinuous boundary method,

\* 仁荷大學校 自動化工學科  
Dept. of Industrial Automation  
\*\* 현대정공 기술연구소 연구원  
論文番號 : 9418  
接受日字 : 1994年 1月 17日

fuzzy neural network decision system for heuristic knowledge representation, and world modeling with forgetting and reinforcing memory cells. First of all, in real-time motion planning algorithm, the behavior-based architectural method is used to generate subgoal. A behavior generates a subgoal independently by using the method of discontinuous boundary in sensed area. The discontinuous boundary method is a new proposed fast obstacle avoidance algorithm. The second component is a fuzzy neural network decision system for accomplishing the subgoal. The heuristic rules are imbedded on the fuzzy neural network to make an intelligent decision. The last one is a forgetting, reinforcing memory technique for the construction of external world map. The activation values of all activated memory cells in grid space are decreased monotonically and after all they are burned out. Therefore, after sufficient journey, robot can have a stationary world map even if the dynamic obstacles exist. Using the IMPS, several simulations show the efficient achievement of target point in unknown environment with obstacles of various shapes.

## I. 서 론

로봇의 지능은 주어진 목적 행동을 성취하는 능력으로 정의되며, 목적 행동을 성취하는 능력의 정도는 주어진 임무와 수행되는 환경에 따라 구분된다. 일반적으로 로봇의 지능을 필요로 할 때는 주어진 임무가 복잡하거나 혹은 환경에 대한 정보가 미약한 경우로, 로봇의 지능적 운동이라는 것은 환경에 대한 정보가 미약해도 주어진 임무를 성취하려는 운동으로 볼 수 있다.

로봇의 경로 계획은 장애물이 있는 환경 내에서 목적점까지의 만족스러운 경로를 생성하는 것으로, 경로 계획기의 성능은 로봇의 안전한 수행을 보장하는 충돌 회피 기능과 효율적인 경로를 생성하는 기능 등으로 평가할 수 있다. 목적점을 향하는 로봇의 진행 경로 상에 존재하는 장애물을 회피하기 위해서는 장애물의 표현 방식과 회피 알고리즘에 따라 다양한 방법을 이용할 수 있다. 장애물을 회피하면서 동시에 목적점을 성취하는 우수한 경로를 생성하기 위해서는 장애물에 대한 충분한 정보를 경로 계획 과정에서 이용해야 된다. 그러나 로봇이 움직이는 주위환경에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 많은 어려움이 있다. 일반적으로, 미지의 환경에서 자유롭게 움직이려는 로봇의 경로를 계획하는 일은 매우 어려운 일이며, 이 과정은 환경에 대한 정보의 처리 과정과 효율적인 경로의 실시간 계획 과정으로 이루어진다.

본 논문에서는 형상의 제한이 없는 장애물들로 구성된 미지의 평면 환경에서 임의로 주어진 목적점까지의 경로를 실시간으로 계획할 수 있는 자유 이동 로

봇의 지능적 운동 계획 시스템(IMPS)을 제안한다.

### 1.1 문제 정의

본 논문에서 다룰 문제는 형상의 제한이 없는 장애물들로 구성된 미지의 평면 내에서 움직이는 한 점으로 표현된 로봇이 현재의 위치에서부터 주어진 목표점까지의 경로를 알아내는 것으로, 로봇의 현재 위치와 함께 감지장비를 이용하여 제한된 감지거리 내에 있는 장애물들의 위치를 알 수 있다고 가정한다. 또한, 목적점을 향해 이동하면서 현재의 위치에서 이용할 수 있는 장애물 형상의 국소적인 정보를 효율적으로 이용하여 목적점까지의 경로 손실을 줄이도록 해야 하며 경로의 계획 과정은 실시간 처리가 가능하여야 한다.

### 1.2 기존 연구

지금까지 알려진 로봇의 경로 계획 방식은 크게 두 분류로 나눌 수 있다. 우선, 장애물 환경에 대한 정보를 갖는 경우로 로봇의 경로 계획이 수행되는 대상공간-예를 들어 로봇의 위치와 자세를 표시하는 매개변수들이 구성하는 공간(Configuration Space) -속에서 장애물의 형태를 표현하고, 장애물이 존재하지 않는 자유공간(Free Space) 속에서 시작좌표와 목적좌표를 연결하는 경로를 구하는 문제로, 무수한 cell들로 분할되어진 자유공간은 그래프 구조를 형성하고 일반적으로 최적화 탐색기법인 A\* 방식을 이용하여 경로를 탐색한다<sup>1,2</sup>. A\* 탐색 방식은 우수한 경로를 산출할 수 있으나 구성해야 하는 정보의 양이 많고 수행 시간이 긴 단점이 있으므로 이동 로봇과 같은 실시간 경로 계획 부분에는 이용이 어렵

다. A\* 탐색 방식을 효율적으로 이용하려면 자유공간을 표현하는 노드의 갯수를 줄여야 하며 이를 위하여 Voronoi Diagram, Visibility Graph 등을 이용한 방식이 있다.

두번째 분류는, 미지의 환경 속에서 로봇트의 경로를 구하는 방식으로 국소탐색기법이 있다. 많이 사용되는 국소탐색기법으로는 가상전위장(Artificial Potential Field) 방식이 있다<sup>[3, 4]</sup>. 로봇트는 가상전위장 U의 영향을 받는 입자로서 구성공간 내의 점으로 표현되며, 대개 로봇트를 목적점에서 당기는 힘을 표시하는 전위함수와 장애물로부터 밀어내는 힘을 표시하는 전위함수의 합인 형태로 자유공간의 가상전위장 형태가 만들어진다. 따라서 경로 계획은 반복의 형태로 진행되고 매 반복마다 현재 상태의 전위함수에 의해 유도되는 가상 힘  $F = -\nabla U(q)$ 들 중에서 가장 좋은 방향으로 일정 양만큼 경로의 갱신이 진행되는 최급강하탐색(Steepest Descent Search) 과정으로 취급될 수 있다. 그러나 실시간 처리를 위하여 고안된 가상전위장 방식은 장애물의 주위에서 발생하는 미는 힘들이 국소 최소점을 만들어 낼 수 있고 장애물 주위에서 떨림이 일어날 수 있는 단점이 있다. 다른 방식의 국소탐색기법으로 인간의 경험에 근거한 알고리즘들이 있다. Oommen<sup>[5]</sup>의 논문은 장애물의 형상에 관한 제약이 있는 알고리즘이며, Robnav<sup>[6]</sup>는 간단하고 빠른 실행 시간을 가지나 오목한 형상의 장애물 안으로 들어가는 경우에 탈출 기능이 없으므로 경로의 무한 순환이 발생한다. 또한 최근에 발표된 알고리즘들인 Bug1, Bug2, Alg1, Alg2<sup>[7]</sup>들은 목적 방향에 존재하는 장애물의 벽을 따라가는 것을 주된 기능으로 하고 지나간 경로를 보관한다. 이 방식은 목적지까지의 경로가 존재한다면 경로의 생성을 보장하는 알고리즘이나 경로의 반복 등으로 인하여 경로의 손실이 많이 발생한다. 이는 알고리즘의 구성이 다양하지 못하여 장애물의 회피하는 좌우 방향의 선택 기준이 없고, 또한 장애물의 정보를 보존하지 않는 방식이다.

로봇트의 경로계획에 관한 기존의 연구 결과를 종합해볼 때, 장애물의 형상제한이 없는 탐색 방식은 많은 기억용량과 수행시간이 필요하였고, 또한 빠른 수행시간을 갖는 경로 계획 알고리즘들은 오목한 장애물 환경에서 갇히거나 혹은 경로의 손실이 많이 발생함을 알 수 있었다.

### 1.3 지능 시스템

Albus<sup>[8]</sup>는 지능을, 모르는 환경에서 주어진 최종

목표를 성취하기 위하여 수행되는 중간 목표들의 성공 확률을 높이는 적절한 행동을 할 수 있는 능력으로 정의하였고, 지능의 수준은 지능 시스템이 갖고 있는 계산 능력과 지능 시스템의 각 성분 안에서 사용되는 알고리즘들의 복잡한 정도 및 기억하고 있는 정보의 질로써 구분하였다.

지능 시스템은 현재의 이용할 수 있는 모든 정보를 이용하여 외부에서 주어진 최종 목표의 성취에 가장 도움이 되는 현재의 중간 목표점을 생성하며 이를 성취하는 과정의 반복으로 결국에는 주어진 임무를 완수한다. 지능 로봇트는 외부를 인식할 수 있는 다양한 감지장비를 갖고 있고 이를 이용하여 외부 환경의 정보를 수집, 보관하며 이는 행동을 평가, 판단하는 모듈과 함께 지능 시스템의 핵심적인 구성 성분을 이룬다. 지능 시스템은 기본적으로 실시간 제어 시스템의 기능을 포함하며 감지 기능과 행동을 계획하고 수행하는 기능을 갖고 있다. 지능적인 행동을 계획하기 위해서는 기억과 사고의 기능을 필요로 하며, 기억 기능을 수행하는 부분은 외부 환경의 상태에 대한 정보를 저장하고 있으며 정보의 관리 기능을 포함한다. 사고 기능을 수행하는 부분은 주어진 행동을 평가, 판단할 수 있으며 이는 지식 베이스에 의존하여 수행된다. 높은 차원의 사고 기능으로는 내부의 지식 베이스를 수정하고 생성하는 기능을 말할 수 있다.

지능 시스템과 기존의 제어 시스템과의 차이점은 기존의 제어 시스템이 복잡한 외부 환경 속에서 주어진 목적을 수행하기 위한 만족스러운 외부 환경의 정보들을 얻지 못하는 것에 기인한다. 외부 환경에 대한 충분한 정보를 이용할 수 있다면 행동 계획 부분이 명확하게 표현될 수 있다. 그러나 외부 환경의 정보가 미약하다면 구성이 안된 애매한 상황에서는 우수한 행동을 만들기가 어려워진다. 따라서 지능 시스템에서는 행동 계획 시에 좋은 행동을 만들어 내는 다양한 경험적인 규칙들을 이용한다.

### 1.4 지능적 운동 계획 시스템

Fig. 1은 본 논문에서 제시하는 지능적 운동 계획 시스템의 전체 구성을 보여 준다. 지능적 운동계획 시스템은 지능적인 운동을 만들어 내기 위한 세가지의 성분으로 구성되었다. 세 가지의 성분으로는 실시간 경로 계획 알고리즘 부분과 퍼지 신경회로망 판단 시스템 및 기억 부분이다. 실시간 경로 계획 알고리즘 부분에는 중간 목표점을 생성하기 위한 행동기준 구성방식을 이용한다. 각 행동 양식은 불연속 경계

방식을 이용하여 독립적으로 중간 목표점을 생성하는 능력이 있다. 불연속 경계방식은 새로운 실시간 충돌 회피 알고리즘이다. 판단 과정은 다양한 경험적인 규칙들 중에서 가장 적절한 한 개의 퍼지 규칙을 선택하는 퍼지 신경회로망 판단 시스템을 이용한다. 마지막 성분으로 기억 부분은 외부 환경 지도를 생성하기 위한 기억의 손실과 보상기능이 있는 기억 모델을 이용한다. 각자 공간 내에서 활성화된 모든 기억 소자들의 활성 값은 점진적으로 감소하며 결국에는 모든 기억이 사라진다. 그러나 기억 소자가 재 활성화 되었을 때는 퍼지 규칙을 이용하여 더욱 길어진 활성화 시간을 갖는다. 따라서 충분한 이동 후에는 불적인 장애물들이 존재하여도 고정적인 외부 환경 지도를 생성할 수 있는 특징이 있다.

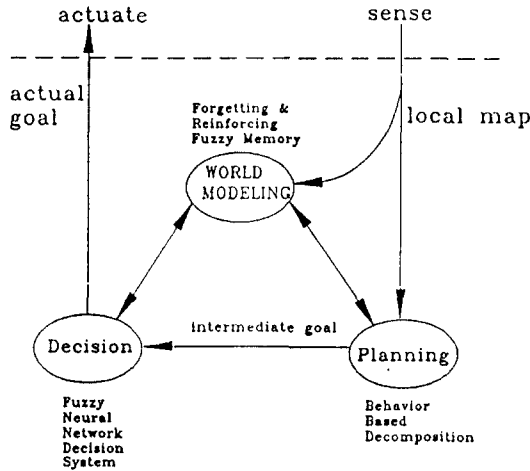


그림 1. 지능적 운동 계획 시스템  
Fig 1. Intelligent Motion Planning System

## II. 행동기준 경로 계획

로봇의 경로 계획은 주어진 목적 행동을 성취하려는 과정으로 이루어진다. 이동 로봇에게 주어질 수 있는 목적 행동에는 주어진 목적점까지 이동하려는 행동과 환경 내에 빠짐없이 이동하려는 행동 등이 예로써 들 수 있다. 주어진 목적 행동의 난이도와 환경의 상태에 따라서 목적 행동을 완성하기 위한 다양한 세부 행동들이 필요하다. 행동기준 경로 계획 방식은 목적 행동을 세부의 행동 양식으로 분해하여 성

취하는 방식이다. 본 논문에서 로봇에게 주어진 목적 행동은 외부 환경과의 충돌 없이 주어진 목적점까지 이동하는 것이고, 세부의 행동 양식으로 목적추적 행동, 장애추적 행동, 진진추적 행동, 및 반사 행동으로 구성한다. 각 행동양식은 독립적으로 로봇을 이동시킬 중간 목표를 생성하는 능력이 있으며, 장애물을 회피하고 최종 목적점까지의 경로를 만들어 내도록 하는 실시간 경로 계획 알고리즘이 사용된다. 본 상에서는 실시간으로 이용할 수 있고 경로의 손실이 적은 새로운 경로 계획 방식인 불연속 경계 방식을 제안하고, 각 행동 양식을 논한다.

### 2.1 불연속 경계 방식

불연속 경계 방식의 기본 과정은 장애물들 사이에서 경계를 알아내는 것이며, 목적점을 향해 이동하는 로봇의 경로를 막는 감지된 장애물의 불연속 경계점을 찾아내는 것이다. 장애물의 불연속 경계점을 검출하는 과정은 중간 목표의 선택을 위하여 다양한 행동 양식들의 내부에서 이용된다.

#### 2.1.1 불연속 경계점의 검출

불연속 경계점은 감지기의 한 방향 성분에서 감지된 장애물 좌표값과 수위 방향 성분에서 감지된 장애물 좌표값의 거리 차이가 충돌회피상수 보다 크거나 감지거리 내에서 아무런 장애물 정보를 얻지 못할 때 현재 방향 성분이 감지된 장애물의 경계점으로 정의한다. 충돌회피상수는 로봇과 장애물과의 충돌을 방지하기 위하여 장애물의 경계에서 최소한 떨어져야 하는 값으로, 로봇의 최소 이동 너비로 정한다.

로봇의 감지장비를 이용하여 감지반경 내에 있는 장애물들과의 거리를 파악할 수 있고 감지기는 감지를 수행하는 기준축 좌우 방향으로 감지를 수행한다. 이동 로봇에서 사용되는 감지기의 종류로 많은 경우에 초음파 감지기를 이용하는데 초음파 감지장비는 실제로 정보의 손실과 가상의 장애물을 형성할 수 있으며 반복적인 감지에 의해 확실값(Certainty Value)을 개선하는 방식<sup>10)</sup>을 이용하면 근사한 정보를 얻어낼 수 있다. 벽면의 위치를 보다 정확히 감지하기 위해서는 감지기에 대하여 기울어져있는 벽면의 각도와 벽면까지의 거리를 고려해야 하고 벽면의 경사가 끝부분 좌우의 단위 회전에 의한 벽면 상의 거리가 길어질수록 감지기의 단위 회전 값을 조밀하게 조성할 필요가 있다. 각 방향 성분들에서 검출된 감지된 거리와 로봇의 위치 정보를 이용하여 고정

된 외부좌표계에 대한 장애물의 좌표를 알아낼 수 있다.

### 2.1.2 중간 목표점의 설정

로봇의 초기 위치에서 감지를 수행하는 기준축은 목적점의 방향과 일치하도록 한다. 감지의 기준축 방향에 장애물이 존재하고 감지 범위 내에서 로봇을 감싸고 있는 폐쇄 공간이 발생하지 않는다면 기준축의 양쪽 방향에 대하여 불연속 경계점이 발생하며, 두 불연속 경계점 중에서 로봇의 현재 위치로부터의 거리와 목적점까지의 거리 합이 작은 곳이 새로운 중간 목표점으로 선택된다.

Fig. 2는 불연속경계점이 결정되는 상황을 나타낸다. S점에서 G점을 향하는 로봇에 의해 감지된 장애물은 빗줄기면 위의 점으로 표시되었다. 0점은 감지의 기준축 방향이며 기준축의 좌우 방향으로 감지각을 증가시키면서 감지정보를 수집한다. (A) 경우에는 G점을 향하는 진행 방향에 장애물이 존재하여 점2와 점-5에서 불연속 경계점이 발생되고 점2를 중심으로 자유이동지역이 결정된다. (B)는 감지 반경 내에 두개의 장애물이 존재하는 경우로 기본적으로 (A)의 경우와 동일한 방식에 의해 점1에서 자유이동지역이 결정된다. 만약 감지의 기준 방향에서 장애물이 검출되지 않았고 주위의 감지된 장애물이 충돌회피상수 이상의 거리에 떨어져 있을 때에는 감지의 기준축 방향에서 자유이동지역이 결정된다. 중간 목표점의 설정을 위해서 로봇이 이용할 수 있는 정보가 현재 감지 범위 내의 장애물 정보만일 경우 로봇은 장애물들을 형태와 목표점의 방위 및 현재의 진행 방향 등을 고려해야 한다. 중간 목표점의 설정을 위한 기본 과정으로는 먼저 감지기의 기준축을 결정하고 이를 중심으로 감지 반경 내의 장애물 정보를 수집한 후 자유이동지역을 알아낸다. 만약 결정된 자유이동지역이 만족스럽지 않은 경우에는 감지의 기준 방향을 변화시킨 후 새로운 자유이동지역을 결정한다. 로봇이 자유이동지역으로 이동하는 것은 장애물을 회피하는 일이며, 가까운 좌우의 불연속 경계를 고르는 일은 충돌 회피에 소모되는 경로의 손실을 줄이려는 행동이다. 이 방식은 감지 범위 안에 존재하는 독립된 장애물의 경우에는 만족스러운 로봇의 경로를 만든다. 그러나 다양한 장애물 환경에서 감지의 기준 방향을 항상 목적점의 위치 방향으로 할 수는 없다. 이는 오목한 장애물의 형상에서 비효율적인 운동을 발생할 수 있으며 상황에 따라서 감지의 기준 방향이 변해야 된다. 또한 보다 우수한 경로를 선택

하기 위해서는 감지된 장애물의 정보를 효율적으로 보관하며 이를 이용해야 한다. 로봇의 중간 목표점을 결정하기 위한 행동의 양식은 감지를 수행하는 기준축에 따라 목적추적기능, 경계추적기능, 전진추적기능으로 구분되고 각 기능은 독립적으로 로봇의 이동 방향을 결정지을 수 있다.

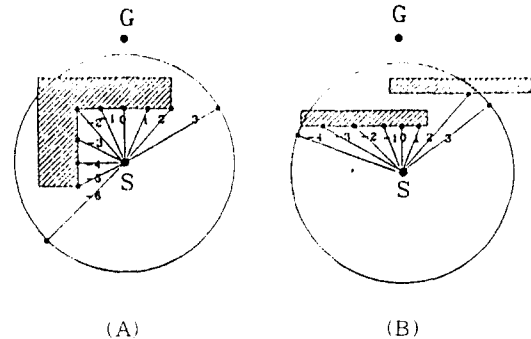


그림 2. 불연속 경계 방식  
Fig 2. Discontinuous Boundary Method

### 2.2 행동 양식(Behavior Pattern)

로봇은 언제나 하나의 행동 양식을 수행한다. 각 행동 양식이 결정되어 실행되기까지는 감지된 외부 정보를 저장하고 기억을 갱신하는 과정이 선행된다. 여러 종류의 행동 양식들은 수직적 혹은 수평적으로 기능이 분리될 수 있으며 상호의 선제권이 결정되어야 한다<sup>[11]</sup>. Brooks는 성능의 수준에 따라 8가지의 독립적인 행동들을 구분하여 상위 수준의 행동은 필요에 따라 하위 수준의 기능을 포함하도록 하는 포함(Subsumption)구조를 제안하였다<sup>[12]</sup>. 이 방식은 각 행동 양식을 중심으로 하여 구성되었으므로 행동기준(Behavior-Based)구조라고 불린다. 행동기준 구성 방식에는 각 행동 양식이 서로 독립적으로 기능을 수행하며 상호의 우선권이 결정되어 있다. 행동 양식의 구분에 대한 초기의 논문인 Brooks의 구성은 임무의 수행을 담당하는 행동이 구체적이지 않았고, Noreils<sup>[13]</sup>는 기능적(Functional)인 수준과 제어수준 및 계획의 수준으로 구분하여 다양성과 현실성이 우수한 방식을 제안하였다. 또한 퍼지 알고리즘을 사용한 방식으로는 Maeda<sup>[14]</sup>의 논문이 있다. Kweon<sup>[15]</sup>과 Watanable<sup>[16]</sup>의 논문에서는 충돌방지기능을 수행하는 반사(Reflexive)행동과 임무의 수행을 담당

하는 목적적인(Purposive)행동과 이들을 연결하는 적응(Adaptive)행동으로 구분하여 동적인 환경에서도 주어진 임무를 효과적으로 수행하였다. 근접충돌 회피를 위한 방식으로 가상전위장 방법을 사용한 한 논문으로는 Hohenstein<sup>[17]</sup>, Adams<sup>[18]</sup>의 논문들이 있으며 Brooks의 포함 구조를 기초로 한 반사운동의 행동 양식으로는 Payton<sup>[11]</sup>과 Soldo<sup>[19]</sup>의 논문이 있다.

본 논문이 제안하는 행동양식은 크게 두개의 수준으로 구분된다. 상위수준의 행동양식에는 주어진 목적점까지의 충돌이 없는 좋은 경로를 만들도록 하는 행동들로부터 우수한 경로의 조건이 까다로우며 상위 수준의 행동들은 다양하고 복잡해지며, 하위수준에는 로봇의 충돌을 방지하는 감각적인 반사기능으로 구성된다. 상위 수준에서 이용하는 행동양식은 목적추적 행동과 경계추적 행동 및 전진 추적 행동들로 구성된다. 목적추적 행동(Target Tracking Behavior)은 주어진 목적점의 방향으로 민감하게 움직이도록 하며 장애물의 구성이 단순하다면 목적점까지의 빠른 경로를 생성한다. 그러나 목적점의 방향으로 너무 민감하게 움직이며 오복한 환경에서는 경로의 손실이 발생하게 된다. 경계 추적 행동(Boundary Tracking Behavior)은 로봇의 전진 방향을 심하게 가로막는 장애물의 경계를 따라 움직이는 행동으로 장애물이 목적점의 방향으로 진행 중에 있는 로봇의 경로를 막았을 때 이를 우회하는 행동이다. 전진추적 행동(Forward Tracking Behavior)은 갇혀 있는 장애물의 환경 속에서 이를 탈출하도록 하며, 목적점을 향하는 경로의 손실은 있으나 발생할 수 있는 로봇의 반복적인 축소 순환 행동에 대비한 행동 양식이다.

Fig. 3은 제안된 행동기준 경로계획 방식의 구성을 나타낸다. 전체구성의 핵심부분인 행동결정기(Behavior Decision Module)에서는 각 추적기들을 이용하여 중간목표점을 생성한다. 중간목표점을 결정하는 과정은 다음과 같다.

[과정 1]

로봇의 전진 방향과 감지기의 기준축방향을 최종목표점 방향과 일치하게 한다.

[과정 2]

감지기기준축의 좌우방향으로 감지를 수행하여 양쪽 방향에서 불연속경계점을 찾아낸 후, 로봇의 현재 위치까지의 거리와 최종목표점까지의 남은 거리의 합이 적은 불연속경계점을 선택한다.

[과정 3]

로봇의 전진방향 벡터와 위치에서 불연속경계점까지의 벡터를 구하고 두 벡터의 내적값이 양이면 이 불연속경계점을 중간목표점으로 정한다.

[과정 4]

과정 3에서 내적값이 양수가 아니면 계산된 불연속경계점을 무시하고, 감지기 기준축상에 접해있는 장애물의 좌우 경계선 벡터를 구한 후 로봇의 진행방향 벡터와의 내적이 큰 장애물 경계 벡터 방향을 따라 한쪽 방향으로 감지를 수행하여 새로운 불연속경계점을 찾아낸다.

[과정 5]

과정 4에서 계산된 불연속경계점이 이미 수행된 중간목표점과 일치할 경우 로봇의 전진방향을 감지기의 기준축으로 과정2를 수행하여 새로운 불연속경계점을 구하고 이를 중간목표점으로 한다.

결과적으로 행동결정기 내부에서 목적추적기는 과정 1, 2에서 수행되고, 경계추적기는 과정 4, 전진 추적기는 과정 5에서 수행된다. 행동결정기에서는 중간목표점을 선택하고 이를 평가하여 수행해야할 실제적인 목표점을 생성하고 동작실행기와 연결된다. 동작실행기는 실제적인 중간 목표의 달성을 위하여 각 환성기(Actuator)의 동작 명령을 작성하고, 각 환성기 하나의 제직제어기를 관할하며, 반사운동기와 연결되어 있다. 또한 기억 부분과 연결되어 현재의 결정된 경로 정보를 전달한다. 따라서 동작실행기의 임무는 실제적인 중간 목표까지의 안전한 경로를 성취하는 기능을 수행한다. 각 환성기에 연결된 제직제어기는 주어진 동작 명령을 수행하는 서보제어기이다. 행동 양식의 하위의 수준에 있는 반사(Reflexive)운동은 장애물과의 근접 제한거리 안에 있는 로봇을 안전한 위치로 움직이는 행동이며 상위 수준의 어떤 행동 양식보다 항상 먼저 실행될 수 있는 운동의 선제권을 갖는다. 반복적으로 성취되는 상위 수준의 행동 중에서 발생할 수 있는 장애물과의 근접상황시에 로봇의 안전한 경로를 생성하기 위하여 장애물 주위에서 벌어지려는 행동이며, 목적점까지의 효과적인 경로를 알아내기 위한 상위 수준의 지능적 동작 계획과는 달리 근접된 지역의 환경 정보만을 이용하여 빠른 시간의 응답을 발생한다. 반사운동을 수행하기 위한 감지기의 종류로는 접촉 감지기(Touch Sensor)와 근거리를 감지하는 적외선 감지기 및 초음파 감지기와 많이 쓰인다.

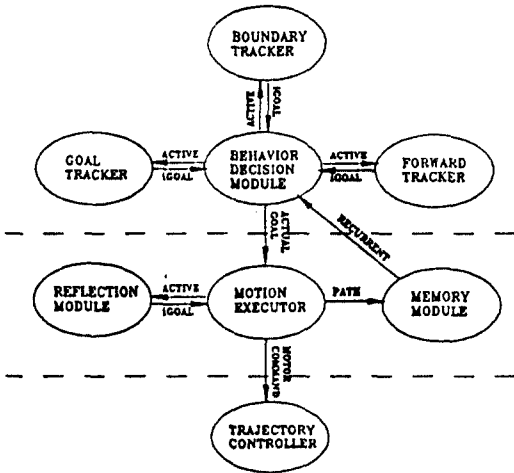


그림 3. 행동기준 경로 계획  
Fig 3. Behavior-Based Path Planning

### 2.2.1 목적추적기(Goal Tracker)

최종 목표점 방위각에서 얻은 감지반경 내의 거리 정보가 존재하지 않을 경우, 즉 목표 방향에 장애물이 존재하지 않을 때는 해당 방위각으로 일정한 거리(최대 감지거리에서 충돌회피사수를 뺀 거리)만큼 떨어진 위치에 중간 목표점을 정하면 현재의 위치에서 중간 목표점까지의 경로는 로봇이 현재의 감지반경에서 최종 목표점을 향해 움직일 수 있는 가장 짧은 직선 성분의 경로가 된다. 그러나, 감지기의 최종 목표점 방위각에 장애물이 있을 때는 좌우 방향의 장애물 끝점이나 혹은 최대 감지거리의 경계면에서 발생하는 불연속 경계점들 중에는 목적점까지의 거리와 현재점으로부터의 거리 합이 적은 불연속 경계점이 중간 목표점으로 결정된다.

제안된 목적추적기는 두가지의 성질을 가지고 있다. 첫째로, 로봇의 현재 위치에서부터 목적추적기에서 생성된 중간목표점까지의 벡터와 전진방향 벡터와의 내적이 음수이면, 현재의 감지반경 안에는 오목한 장애물 꼭지점이 존재한다. Fig. 4(A)는 로봇은 현재위치(S)에서 최종목표점(G)의 방향으로 감지반경(S를 둘러싼 원)내의 목표점(T)을 가로막는 장애물 경계선들(직선 AB와 직선 BE)로 구성되었다. 이 경우 목적추적기를 이용한 불연속경계점은 점 A와 점E가 되며, 점A가 점E보다 최종 목적점까지의 거리가 짧으므로 점A가 중간목표점으로 선택된다. 다음으로 벡터 ST와 벡터 SA와의 사이각이 벡터

ST에 수직인 벡터 SD보다 크므로 벡터 ST와 SA의 내적이 음수가 되며, 현재의 감지반경 내에는 장애물의 오목한 꼭지점 B가 존재한다. Fig.4(B)는 장애물 벡터 C점이 중간목표점으로 선택되는 경우로, 로봇의 후면방향인 시계방향의 원호 AD상에 중간목표점이 생성되기 위해서는 직선 BC와 직선 SD를 지나가는 직선과 직선 BC와 직선 SA를 지나가는 직선이 필요하며 이 직선들은 감지 반경내에서 오목한 꼭지점을 생성한다.

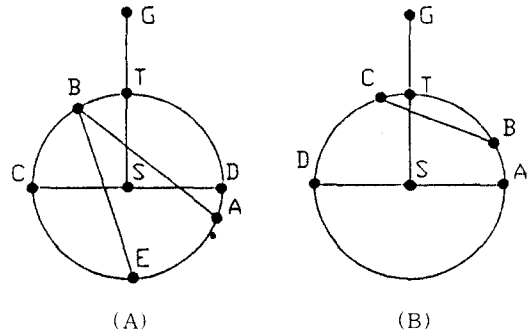


그림 4. 목적 추적기  
Fig 4. Goal Tracker

둘째로, 목적추적기는 오목한 장애물 형상이 없는 곳에서 감지반경 내의 최단 경로를 생성한다. 로봇의 감지 범위 내에서는 사방이 갠 폐쇄 공간이 발생하지 않는다고 가정하면 목적추적기는 감지된 장애물의 범위 내에서 불연속 경계점을 생성한다. 또한 첫번째 성질로써 감지반경 내에 오목한 장애물이 존재하지 않는다면 앞 평면에서 중간 목표점이 발생함을 알 수 있고, 이때 감지반경 내에서 목적점까지의 최단 경로는 목적 방향을 가로막는 장애물의 꼭지점을 연결하는 직선 경로이다. 현재의 위치에서 목적 방향을 가로막는 감지반경 내의 장애물 꼭지점들 중에서 경로점의 선택은 현재점부터의 거리와 목적점까지의 거리 합이 적은 꼭지점의 위치가 되므로 목적점을 성취하기 위한 경로는 감지반경내의 최단거리가 된다.

위의 사항을 정리하면 목적추적기는 서로 연결되지 않은 불록한 장애물들로 구성된 환경에서 감지의 반경이 충분히 크다면 목적점까지의 최단 경로 생성이 가능함을 말하며, 최대 감지거리의 크기에 따라 생성되는 경로의 모양이 차이가 있음을 말한다.

### 2.2.2 경계추적기(Boundary Tracker)

목적추적기는 주어진 환경이 볼록체(Convex)만으로 구성되었을 때에는 목적점까지의 우수한 경로를 생성하나 오목한 형상의 장애물이 존재하면 경로의 반복 등으로 인한 경로의 손실이 발생할 수 있다. 로봇이 주행하는 공간은 많은 경우에 오목한 형상이 주어질 수 있으므로 이에 대처할 수 있는 새로운 행동 방식이 필요하다. 목적추적기를 적용할 때 현재의 지점에서부터 새로이 생성된 중간 목표점까지의 방향 벡터와 현재의 진행 방향 벡터가 이루는 사이각이 좌우 90도를 넘을 때 앞의 장애물은 오목한 꼭지점을 갖고 있는 장애물의 경우이다. 이런 경우에 목적추적기는 진행 방향의 반대 방향에 중간 목표점을 생성하므로 이를 개선하는 방법이 경계추적기가 된다. 이 방식은 장애물의 경계선을 따라서 한쪽 방향으로 감지하는 방식으로, 이전에 수행된 중간 목표지점에서부터 로봇의 전진 방향으로 장애물의 경계선 상에서 새로운 중간 목표점을 생성한다. 새로운 불연속 경계점이 생성되지 않는 경우, 즉 걸릴된 중간 목표점이 이전의 위치와 동일한 경우는 현재의 불연속 지점과 연결된 장애물의 다른 경계면이 로봇의 현재 위치에서는 보이지 않는 지역 안에 있는 경우이므로, 이러한 경우에는 새로운 장애물의 경계면이 보일 때까지 조금씩 앞으로 이동해야 한다. 경계추적기에 의해 생성되는 경로는 목적점을 가로막는 장애물의 경계면을 따라가는 '벽따기'의 과정으로 볼릴 수 있다. 경계추적기는 로봇의 현재 진행 방향 앞에 존재하는 돌출된 장애물을 회피하는 기능을 가지며, 목적추적기에서 얻은 중간 목표점이 만족스럽지 못한 경우에 실행된다.

### 2.2.3 전진추적기(Forward Tracker)

경계추적기는 돌출된 장애물을 회피하는 행동을 만드나 간헐 형상의 장애물 공간에 들어가 전진 방향이 막히는 경우 진행 방향의 후면에 중간목표점을 생성할 수 있으며, 진행 방향을 가로막는 장애물의 연속된 경계면이 현재의 위치를 침하게 감싸는 경우에는 전진추적기를 이용한다.

목적추적기는 최종 목표점의 방향을 기준으로 좌우의 불연속 경계점 중에서 중간 목표점을 선택하였으나, 전진추적기는 전진 방향각을 기준으로 하여 중간 목표점을 결정한다. 이 규칙은 로봇이 경로의 손실은 있어도 목표점까지의 경로가 존재한다면 최종 목표점까지의 경로를 생성하도록 로봇을 유도

하는 규칙이다.

## III. 행동의 판단

본 장에서는 중간 목표점의 실행을 위한 세부 행동의 결정 과정으로 퍼지 신경회로망 판단 시스템을 제시한다. 2장에서 서술한 세 종류의 추적기를 이용하여 선택된 중간 목표점을 성취하는 행동양식은 벽방향 보폭이동, 목표점 주위이동, 목표방향 보폭이동, 및 전진방향 보폭이동으로 구분되며, 결정된 새로운 중간 목표점과 함께 이전에 수행된 중간 목표점을 이용한다. 결정된 중간 목표점을 성취하는 행동 양식의 결정은 평가와 판단의 과정이며, 유사한 상황에서 대처하는 인간의 경험을 근거로 하여 구성한다. 여러 가지의 경험적인 요소들은 퍼지 규칙으로 표현되고 이를 보다 유용하게 이용하기 위하여 신경망 구조의 형식을 취하였다. 신경망 구조의 특징은 비선형 사상(Mapping)의 능력과 병렬처리 및 학습의 기능이 대표적이며 퍼지 논리는 소속함수를 이용하여 인간의 사고 양식을 보다 직설하게 표현할 수 있는 장점이 있다<sup>29, 30)</sup>. 퍼지 신경망에 관하여 현재까지 많은 논문이 발표되어 있고<sup>31, 32)</sup>, 특히 Lin<sup>33)</sup>은 5개의 층구조를 형성하여 역전파법(Back Propagation)과 경쟁 학습법(Competitive Learning)을 혼합한 학습 방식을 재현하였다.

본 논문에서는 행동 판단을 위한 경험적인 지식 베이스는 퍼지 규칙으로 표현되어 신경망 구조 내의 내부 노드간의 연결을 초기에 결정짓도록 하였다. Fig. 5는 본 논문에서 제안한 새로운 퍼지 신경망의 구조이다. 이의 기능으로 입력 변수로써 현재의 위치와 새로운 중간 목표점과의 거리값(X1)과 중간 목표점간의 변화된 거리값(X2)의 상태에 따라 수행해야 할 세부 행동인 벽방향 보폭이동(Y1), 목표점 주위이동(Y2), 목표 방향 보폭이동(Y3) 및 전진방향 보폭이동(Y4)중의 하나를 결정하는 것이다. 제안된 퍼지 신경회로망 판단 시스템의 전체 구조는 4개의 층(Layer)으로 이루어지고 첫번째 층에는 입력 변수를 나타내는 입력 층이고 네번째 층은 출력 층이다. 두 번째 층의 노드들은 입력 변수들이 사용하는 소속함수들을 나타내며 각 노드들은 반드시 한 개의 입력 변수와 연결되어 입력 변수의 특징을 구분 짓는 역할을 한다. 소속함수의 형태는 흔히 삼각형상이나 종형이며, 한 개의 변수에 해당하는 모든 소속함수들은 입력 변수가 가질 수 있는 범위를 빠짐없이 포함하여



야 한다. 입력 X1과 연결되어 있는 두번째 층의 노드들은 가까움과 중간 및 먼 거리를 나타내는 종형의 소속함수들이다. 또한 X2와 연결되어 있는 노드들은 거의 변화가 없음을 나타내는 소속함수와 조금 변화, 보통 변화 및 큰 변화를 나타내는 소속함수들이다. 세번째 층의 노드들은 퍼지 규칙들을 나타낸다. 한 개의 퍼지 규칙 노드는 한 개 이상의 소속함수를 나타내는 전층의 노드들과 연결되어 있으며 동일한 입력 변수에 대하여 두개 이상의 노드와 연결될 수 없다. 두번째 층에서 세번째 층으로의 연결은 퍼지 규칙의 조건부를 이룬다. 세번째 층에 있는 노드들의 최대 갯수는 각 입력 변수들이 사용하는 소속함수 갯수들의 곱과 같다. 또한 각 노드의 출력값은 두번째 층과 연결된 노드들의 곱의 값을 갖고 이는 현재의 입력 변수들에 대한 퍼지 규칙의 연관 강도를 0과 1 사이의 값으로 표현한다. 실질적인 판단 내용이 되는 세번째 층의 출력값은 퍼지 규칙의 결론부로서 오직 한 개의 출력만을 선택해야 하므로 모든 퍼지 규칙들 중에서 연관 강도가 제일 큰 규칙은 1의 출력력을 갖고 나머지는 모두 0의 출력력을 갖는다. 이 과정은 WTA (Winner Take All)의 과정으로 불린다.

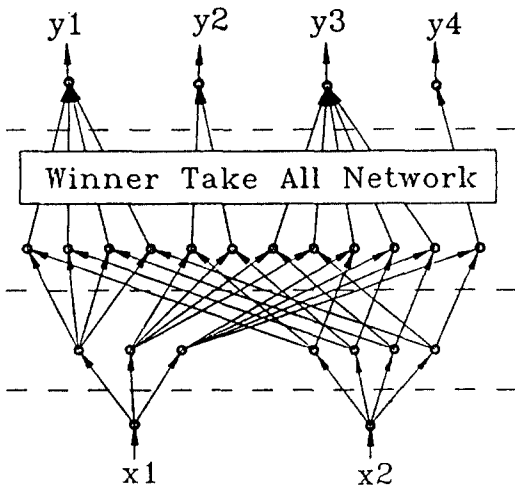


그림 5. 퍼지 신경회로망 판단 시스템  
Fig 5. Fuzzy Neural Network Decision System

### 3.1 역방향 보폭이동(Y1)

역방향 보폭이동은 결정된 중간 목표점이 로봇의 현재 위치와 가까이 있을 때 이전 중간 목표점과의 거리 차이에 관계없이 취하는 행동으로, 로봇의 진행 방향으로 장애물과의 거리를 유지하면서 장애물의 경계면을 따라 보폭 단위의 이동을 수행한다. 보폭의 크기는 로봇이 보유하고 있는 감지자료의 처리 속도 및 최대 감지거리에 따라 결정된다.

### 3.2 목표점 주위이동(Y2)

목표점 주위이동은 결정된 중간 목표점을 최대한으로 이용하는 과정으로 새로운 중간 목표점과 로봇의 현재 위치와의 거리가 적당히 떨어져 있고 이전 중간 목표점에서 새로운 중간 목표점까지의 거리 차이가 없거나 혹은 작은 경우에 실행된다. 목표점 주위이동의 실행 과정은 현재의 위치점과 새로운 중간 목표점에서 주어진 충돌회피상수를 반지름으로 하는 원을 잇는 직선과의 접선점으로 이동하는 것이다. 중간 목표점은 장애물의 경계면에 있는 점이므로 회피반경을 고려한 자유이동지역으로 이동하는 것이 로봇의 안전에 도움이 된다. 충돌회피상수가 너무 크면 경로의 손실이 발생하며 로봇의 최소 이동 너비와 장애물과의 유지 거리를 고려해서 결정한다.

### 3.3 목표방향 보폭이동(Y3)

로봇의 현재 위치점과 중간 목표점까지의 거리 차이는 적당하나 새로운 중간 목표점이 이전의 목표점과 적지 않은 거리 차이가 있을 때 새로운 중간 목표점을 완전히 믿을 수는 없다. 따라서 목표점 방향으로 보폭이동만을 수행한다. 이 과정은 로봇의 성급한 이동을 방지하여 경로의 손실을 줄이려는 행동이다.

### 3.4 전진방향 보폭이동(Y4)

생성된 중간 목표점의 위치가 감지 구역의 가장자리 부분일 때, 즉 로봇의 현재 위치점과 중간 목표점과의 거리 차이가 클 때 이전의 목표점과의 이동거리와 관계없이 현재의 중간 목표점을 이용하지 않는 규칙이다. 중간 목표점을 이용하지 않는다면 로봇이 이동해야 할 기본 방향으로 전진방향을 택하였다. 따라서 로봇은 이동하고 있는 방향으로 보폭이동을 한다.

#### IV. 기억의 손실과 보강

기억 기능은 사고 기능과 함께 지능 시스템의 핵심 부분을 이룬다. 기억 부분에서는 보다 우수한 사고를 수행하도록 도움을 주는 환경 정보를 지정하며 이를 관리하는 기능이 있어야 한다. 본 장에서는 퍼지 논리를 이용하여 외부 환경 지도의 생성을 위한 기억의 손실과 보강기능이 있는 기억모델을 제시한다.

##### 4.1 기억기능

로봇이 미지의 환경 속에서 주어진 목표점까지의 효율적인 경로를 생성하려면 감지된 외부 환경의 정보와 함께 지나온 경로의 기억이 필요하다. 만약 로봇이 지나간 경로를 기억하지 않는다면 경로의 반복이 생길 수 있으며, 또한 국소지역의 형상 정보만을 이용하면 경로의 손실이 생기고 오목한 형상의 장애물 안에서 갇힐 수 있다. 따라서 효율적인 경로를 만들기 위해서는 로봇의 일정한 이동 간격마다 현재의 경로 및 장애물 환경에 대한 정보를 저장해야 한다. 동적인 장애물이 있는 환경에서 로봇이 외부 환경의 지도를 생성하기 위해서는 일반적으로 많은 기억용량이 필요하다. 그러나 실제로 기억용량의 크기에는 제한이 따르므로 효율적인 기억 방식이 개발되어야 한다. 특히 동적인 환경에서는 움직이는 물체와 고정적인 외부 환경을 함께 다룰 수 있는 기능이 요구된다. 이러한 동적인 환경을 다루기 위한 기억 방식으로 기억의 손실과 보강의 기능을 이용한다. 기억의 손실 기능은 시간이 흐름에 따라 기억의 강도가 약해지며 결국 기억 공간에서 사라짐을 말한다. 따라서 외부 모델링을 위한 모든 기억은 결국 손실된다. 그러나 고정된 환경은 로봇의 충분한 이동에 의하여 새 기억의 과정을 기친다. 새 기억 시에 기억의 평균 활성화시간이 이전보다 좀더 길어진다면 새 기억의 횟수가 적은 이동 장애물보다는 고정적인 환경정보가 더욱 많이 남아 있게 된다. 이로써 한정된 주행범위 내부를 충분히 감지한 후에는 고정된 외부 환경의 지도를 생성할 수 있다. 로봇이 외부 환경 지도를 생성하기 위한 방식으로는 Elfes<sup>26)</sup>, Crowley<sup>27)</sup> 등의 논문이 있으며, 특히 Crowley는 감지된 장애물의 경계점들을 다수의 직선식으로 구성하여 장애물의 형상을 수식적으로 보관하는 간접적인 방법이었다. 본 논문에서는 로봇의 이동공간을 고정된 간격을 갖는 격자공간으로 다루며 장애물의 경계를 격자점

들으로써 표현하는 직접적인 방식을 이용한다. 따라서 정확한 감지가 수행된다면 이용할 수 있는 기억용량이 클수록 구성되는 지도의 정확도가 높아진다.

##### 4.2 기억 모델

로봇이 움직이는 전체 공간은 여러 개의 기억 소자들로 이루어진 Fig. 6과 같은 격자 공간으로 표시된다.  $i$ 번째 행과  $j$ 번째의 열에 위치한 기억 소자는 기억의 활성값을 나타내는 무게치인  $W_{ij}$ 와 연결되었다.

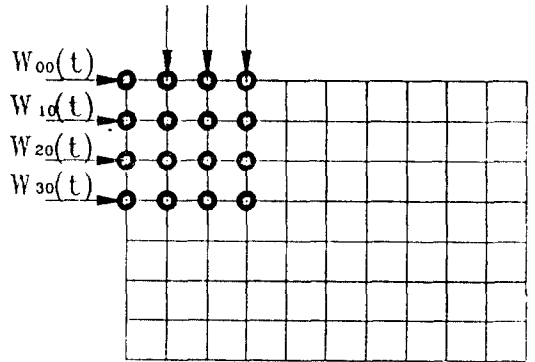


그림 6. 격자형 기억 공간  
Fig 6. Grid Type Memory Space

기억 소자는 활성화 되었을 때 가장 큰 기억 활성값을 갖고 기억 활성값은 시간이 흐를수록 단조 감소하며 기억 활성의 임계치 이하에 있을 때 기억 소자는 소멸된다. 이 과정은 기억의 손실 과정이며 활성값의 감소 형태로는 아래의 식으로 표현한다.

$$W_{ij}(t) = \exp(-t-t_0)/(M_{ij}(k))^2, t \geq t_0 \quad (1)$$

기억 소자는  $t_0$ 의 시간에서 활성화되며 평균 활성화 시간을 나타내는  $M_{ij}(k)$  값을 갖고 있다.  $k$ 는 기억 소자의 새 활성화 횟수이며 평균 활성화시간은 기억의 반복에 따라 길어진다. 또한 기억의 반복이 일어나는 순간에 존재하는 기억 활성 상태에 따라 기억 소자의 평균 활성화시간은 영향을 받는다. 식(2)는 기억의 반복이 발생한 기억 소자에서의 평균 활성화시간은 0과 1 사이의 값을 갖는 활성화특함수  $G(W)$ 에 의해 기억 보강의 정도가 결정됨을 말한다.

$$M_{ij}(k+1) = M_{ij}(k)(1 + G(W_{ij}(t))) \quad (2)$$

활성이득함수의 형태는 재 활성화되는 기억 소자에서 발생하는 기억 보강의 강도를 결정하고 퍼지 규칙으로 표현된 간단한 경험적인 규칙들을 이용하였다. 활성이득함수 G를 결정하는 입력 변수는 현재의 활성이득이며 소속함수로 Fig. 7의 형태를 이용한다. Fig. 7은 소속함수의 종류로 아주 적음(VS: Very Small), 적음(SM: Small), 보통(MD: Medium), 큼(LR: Large), 아주 큼(VL: Very Large)의 형태를 보여 준다.

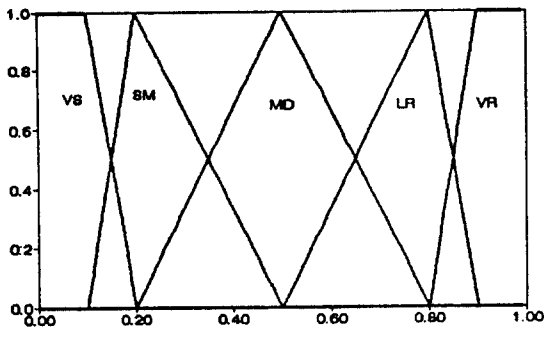


그림 7. 소속함수  
Fig 7. Membership Functions

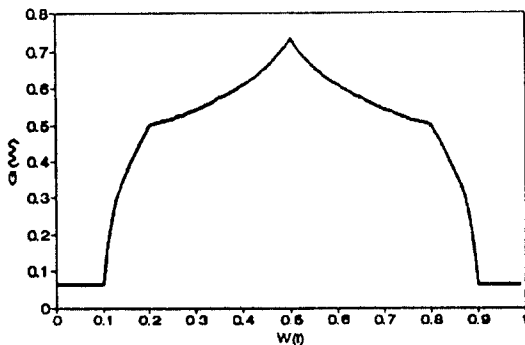


그림 8. 활성이득함수  
Fig 8. Activation Gain Function

기억 소자의 활성화 상태에 따라서 재 활성화의 이득을 결정하기 위하여 다음과 같은 5개의 퍼지 규칙들을 이용한다. Fig. 8은 활성이득함수의 형태를 보여주고 있다.

- ① 활성이득이 아주 적을 때는 기억의 활성이득이 아주 적다.
- ② 활성이득이 적을 때는 활성이득이 보통이다.
- ③ 활성이득이 보통일 때는 기억의 활성이득이 크다.
- ④ 활성이득이 클 때는 기억의 활성이득이 보통이다.
- ⑤ 활성이득이 아주 클 때는 기억의 활성이득이 아주 적다.

### V. 예 제

본 장에서는 제안된 지능적인 운동 계획 시스템을 이용하여 임의로 구성된 세 종류의 환경 속에서 다양하게 주어지는 목적점까지의 경로를 알아본다. 다양한 형태의 장애물들은 30x30m의 공간 안에 놓여있고 로봇은 10m의 최대 감지거리와 1°의 감지기 단위 회전각도 및 1m의 보폭 이동 거리와 1m의 충돌회피상수를 갖도록 하였다. 또한 기억공간은 30개의 열과 30개의 행으로 구성하였고 감지된 장애물 정보를 그림상에서 점으로 표시하였다.

임의의 형태를 갖는 고정된 장애물로 구성된 각 예제는 동일한 조건으로 80386 DX/40 상에서 수행되었고 최종 경로는 1분 이내의 수행 시간으로 얻을 수 있었다. 예제 1, 2는 흩어진 장애물들로 구성된 환경이며 장애물들의 크기에 비하여 감지거리가 충분하였으므로 목적추적기의 성능만으로도 우수한 경로가 생성되었다. 그림상에서 점으로 표시되어진 기억된 장애물 경계점은 실제의 장애물 위치와 차이가 있으며 이는 기억공간의 밀도를 증가시킴으로 줄일 수 있다. 예제 3, 4에서 로봇의 경로가 오목한 장애물속으로 들어가지 않는 이유는 오목한 장애물 내부의 모든 경계가 감지되었으므로 우수한 불연속경계점을 찾을 수 있었기 때문이다. 예제 5에서 S점을 출발한 로봇은 G점을 향하여 장애물의 경계가 검출될 때까지 목적추적기를 이용하여 직선운동을 하며 목적방향을 가로막은 벽면을 감지한 후 로봇의 좌측방향 경로를 결정하고 장애물의 경계를 따라 올라가게 된다. 이때 로봇의 전진방향과 목적방향과의 사이각이 점차 증가하면서 목적추적기는 로봇의 후면에 중간목적점을 생성하려하므로 돌출된 장애물을 통과하기 위하여 장애물의 경계면을 따라 검색하는 경계

추적기를 이용하게 된다. 예제 6은 로봇의 목적방향을 가로막는 장애물을 넘은 후 오목한 장애물 속을 돌아나오는 경로의 예이다. 로봇은 첫번째 장애물의 경계까지 접근한 후 경계추적기를 이용하여 이를 회피하고 두개의 장애물 사이로 빠지게된다. 만약 오목한 장애물 내부의 모든 경계가 감지된다면 로봇의 경로는 오목한 형상속으로 들어가지 않게된다. 그러나 그림처럼 경로의 반복이 생긴 오목한 장애물 형상의 입구에 세로로 세워진 장애물의 바닥부분이 로봇의 감지거리 밖에 있으므로, 로봇은 이 장애물의 밑방향으로 최종목적점을 향하여 통과하려고 더욱 깊게 들어오게되며, 결국 아래부분이 막힌 장애물을 감지한 후 경계추적기를 이용하여 이를 빠져나오게 된다. 운동 계획의 수행 결과로 장애물의 형상이 감지반경 안에 충분히 들어 있다면 만족스러운 경로를 얻을 수 있었다.

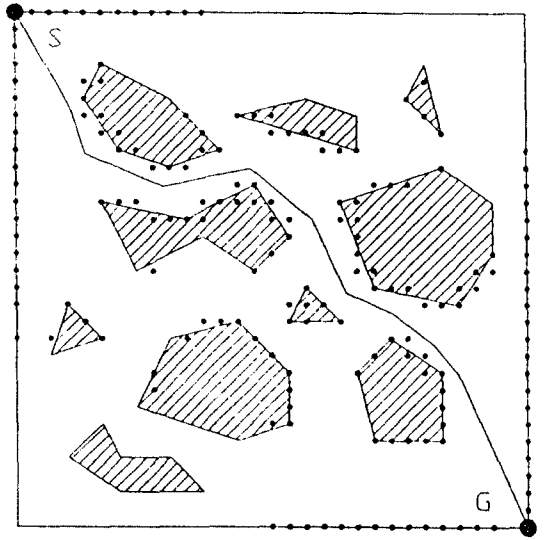


그림 10. 예제 2  
Fig 10. Example 2

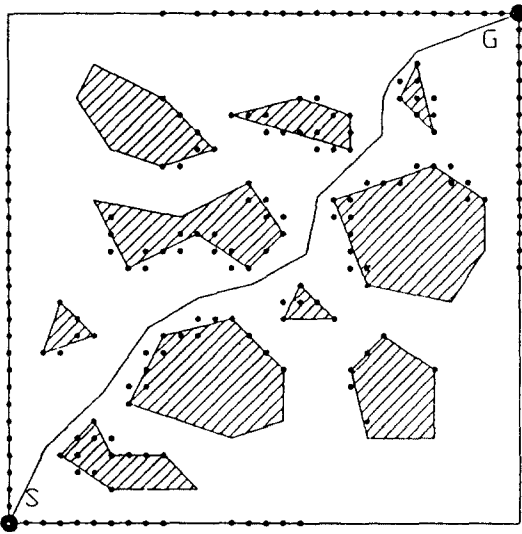


그림 9. 예제 1  
Fig 9. Example 1

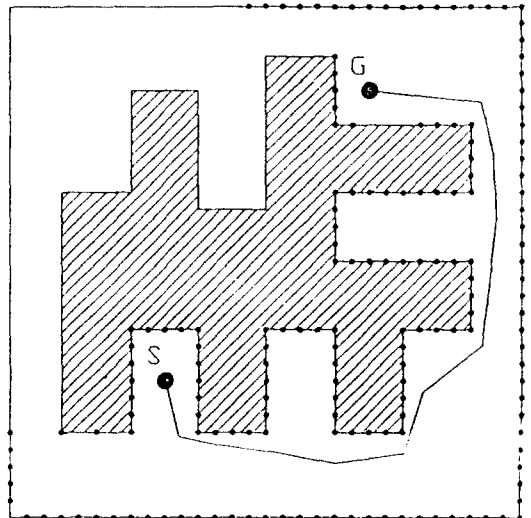


그림 11. 예제 3  
Fig 11. Example 3

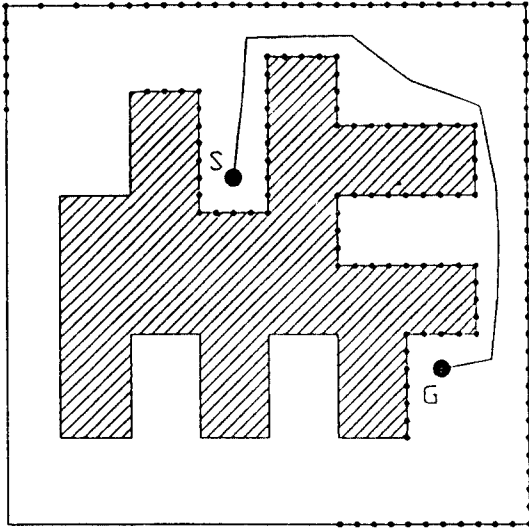


그림 12. 예제 4  
Fig 12. Example 4

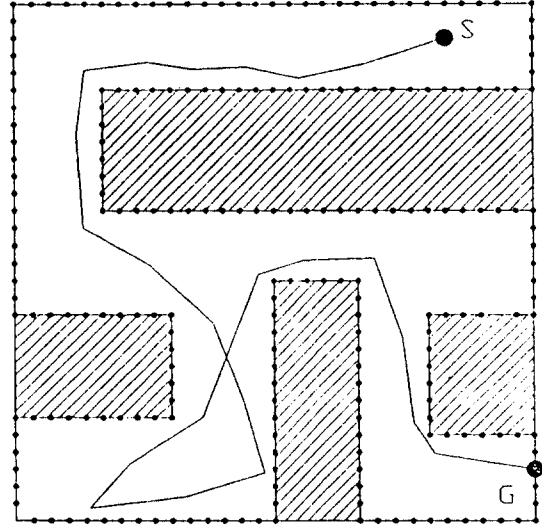


그림 14. 예제 6  
Fig 14. Example 6

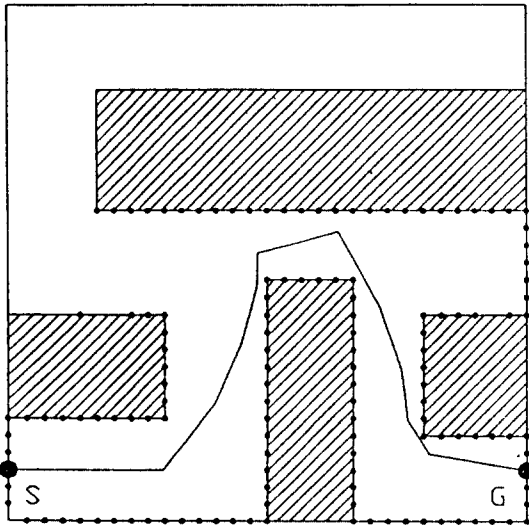


그림 13. 예제 5  
Fig 13. Example 5

## VI. 결 론

본 논문에서는 형상의 제한이 없는 장애물들로 구성된 미지의 평면에서 주행하는 이동 로봇트의 지능적 운동 계획 시스템을 제시하였다. 제안된 지능적 운동 계획 시스템은 기본적으로 대수식을 이용하지 않은 규칙 기반 운동 계획 방식으로, 실시간 운동 계획 알고리즘 부분과 퍼지 신경회로망 판단부분 및 동적인 외부 모델링을 위한 기억의 손실과 보상기능이 있는 기억부분으로 구성되었다.

### 6.1 불연속 경계 방식

새롭게 개발된 실시간 운동 계획 알고리즘으로 장애물과의 충돌을 막고 로봇트에게 주어진 목적 행동을 우수하게 성취하기 위하여 장애물의 핵심적인 형상 정보를 제공하는 방식이다. 장애물의 불연속경계 점은 목적지점을 향해 이동하려는 로봇트의 거리감 지장비에 의해 입력된 장애물의 위치 값들을 이용하여 계산될 수 있으며, 이 점은 로봇트가 이동해야 하는 중간 목표점의 대상으로 로봇트의 목적방향을 막고 있는 장애물의 모이는 끝점이다. 이 과정을 성공적으로 실현하기 위해서는 충분한 감지거리 내의 정확한 거리 측정이 가능해야 되므로 빠르고 정확한 감지 방식이 더욱 연구되어야 한다. 또한 충돌을 방지

하는 강인한 경로의 생성을 위한 반사운동기의 내부 구성이 설계되어야 한다.

### 6.2 퍼지 신경회로망 판단 시스템

충돌 없는 목적 경로의 생성을 위한 행동 세부 사항을 경험적인 퍼지 규칙들을 이용하여 결정하였다. 신경망 구조 내에 삽입된 퍼지 규칙들은 WTA(Winner Take All)과정에 의해서 현재의 상황에 제일 근사한 규칙이 선택된다. 제안된 퍼지 신경망 구조는 다양한 규칙 기반 속에서 한 개의 규칙을 선택하는 판단 과정을 수행하며, 이용되어진 퍼지 규칙들의 적합성을 평가하고 이를 근거로 하여 퍼지 규칙 내의 소속함수 및 연결강도의 학습 방식이 개발되어야 한다.

### 6.3 기억의 손실과 보강기능이 있는 동적인 외부 모델링

머지의 환경에서 동적인 장애물을 제외한 고정적인 외부 환경 지도를 생성할 수 있는 기억 방식으로 격자 구조의 기억 공간 내에서 저장되는 모든 외부 정보는 일정한 기억 활성시간이 지나면 기억 기능이 손실되며, 재 기억이 진행된 기억 정보는 길어진 활성시간을 갖도록 구성하였다. 기억 활성 시간의 조정은 생물학적인 특성을 고려하여 보다 세밀하게 구성되어야 하며, 기억된 외부정보를 효율적으로 이용하는 세부적인 행동양식들의 개발이 추후 연구되어야 할 과제이다.

### 參 考 文 獻

1. K. Kondo, "Motion Planning with Six Degrees of Freedom by Multistrategic Birectional Heuristic Free-Space Enumeration," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.7, no.3, June 1991
2. J. C. Latombe, Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, 1992
3. Y. Koren, and J. Borenstein, "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobil Robot Navigation," Prec. of the IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 1398-1404, 1991
4. R. Volpe, P. Khosla, "Manipulator Control with Superquadric Artificial Potential Functions : Theory and Experiments," IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber., Vol. 20, No 6, 1423-1436, November/December 1990
5. B. J. Oommen, S. S. Iyengar, N. S. V. Rao, and R. L. Kashyap, "Robot Navigation in Unknown Terrain Using Learned Visibility Graph. Part I : The Disjoint Convex Obstacle Case," IEEE Jour. of Rob. & Auto., Vol. 3, No. 6, 672-681, December 1987
6. D. F. Cahn, and S. R. Phillips, "ROBNAV : A Range Based Robot Navigation and Obstacle Avoidance Algorithm," IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber., 544-551, September 1975
7. A. Sankaranarayanan, and M. Vidyasagar, "Path Planning for Moving a Point Object Admst Unknown Obstacles in a Plane : The Universal Lower Bound on Worst Case Path Lengths and a Classification of Algorithms," IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 1734-1741, 1991
8. J. S. Albus, "Outline for a Theory of Intelligence," IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber., Vol. 21, No 3, 473-509, May/June 1991
9. R. Kuc, "Physically Based Simulation Model for Acoustic Sensor Robot Navigation," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 6, 766-778, November 1987
10. H. Chung, Y. S. Choi, and J. G. Lee, "Path Planning for a Mobil Robot with Grid Type World Model," IEEE Inter. Conf. on Intell. Rob. and Sys., 439-444, July 1992
11. D. W. Payton, "An Architecture for Reflexive Autonomous Vehicle Control," IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 1838-1845, 1986
12. R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobil Robot," IEEE Jour. of Rob. & Auto., Vol. 2, No. 1, 14-23, March 1986
13. F. R. Noreils, and R. Prajoux, "From Planing to Execution Monitoring Control for Indoor Mobil Robots," Prec. of the IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 1510-1517, 1991
14. Y. Maeda, M. Tanabe, M. Yuta, and T. Takagi, "Hierarchical Control for Autonomous Mobil Robots with Behavior-Decision Fuzzy

- Algorithm." IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 117-122, 1992
15. In So Kweon, Y. Kuno, M. Watanabe, and K. Onoguchi, "Behavior-Based Intelligent Robot in Dynamic Indoor Environment," Prec. of the IEEE Inter. Conf. on Intell. Rob. and Sys., 1339-1346, July 1992
  16. M. Watanabe, K. Onoguchi, I. Kweon, and Y. Kuno, "Architecture of Behavior-Based Mobil Robot in Dynamic Environment," IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 2711-2718, 1992
  17. A. A. Holenstein, and E. Badreddin, "Collision Avoidance in a Behavior-Based Mobil Robot Design," IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 898-903, 1991
  18. M. D. Adams, H. Hu, and P. J. Probert, "Towards a Real-Time Architecture for Obstacle Avoidance and Planning in Mobil Robots," IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 584-589 1990
  19. M. H. Soldo, "Reactive and Preplanned Control in a Mobil Robot," IEEE Inter. Conf. on Rob. and Auto., 1128-1132, 1990
  20. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller-Part I," IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber., Vol. 20, No. 2, 404-418, March/April 1990
  21. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller-Part II," IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber., Vol. 20, No. 2, 418-435, March/April 1990
  22. L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex System and Decision Processes," IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber., Vol. 3, No. 1, 28-44, January 1973
  23. H. Okada, N. Watanabe, etc., "Knowledge Implementation Multilayer Neural Networks with Fuzzy Logic," Inter. Conf. on Fuzzy Logic & Neural Networks, 99-102, 1992
  24. T. Shibata, T. Fukuda, "Skill Based Control by Using Fuzzy Neural Network for Hierarchical Intelligent Control," IEEE Inter. Joint Conf. on Neural Networks, Vol 2, 81-86, 1992
  25. C. T. Lin, and C. S. G. Lee, "Neural Network Based Fuzzy Logic Control and Decision System," IEEE Trans. on Computers, Vol. 40, No. 12, 1320-1336, December 1991
  26. A. Elfes, "Sensor-Based Real-World Mapping and Navigation," IEEE Jour. of Rob. & Auto., Vol. 3, No. 3, 249-265, June 1987
  27. J. L. Crowley, "Navigation for an Intelligent Mobil Robot," IEEE Jour. of Rob. & Auto., Vol. 1, No. 1, 31-41, March 1985
  28. A. Meystel, Autonomous Mobil Robots-Vehicles with Cognitive Control, World Scientific Series in Automation, Vol. 1, World Scientific Publishing Co. Ltd., 1991



金 振 傑 (Jin-Geol Kim) 正會員  
 1955年 7月 4日生  
 1978년 2월 : 서울大學校 電氣工學科 (工學士)  
 1984년 8월 : 美國 IOWA대 電氣및 컴퓨터工學科 (工學碩士)  
 1986년 2월 : 美國 IOWA대 數學科 (理學碩士)

1988년 5월 : 美國 IOWA대 電氣및 컴퓨터工學科 (工學博士)  
 1988년 8월 ~ 現在 : 仁荷大學校 自動化工學科 教授



金 楨 燦 (Kim Jeong-Chan) 正會員  
 1968년 10월 18일생  
 1991년 2월 : 인하대학교 자동화공학과 졸업 (공학사)  
 1993년 2월 : 인하대학교 자동화공학과 졸업 (공학석사)  
 현재 : 현대정공 기술연구소 연구원  
 ※ 관심분야 : Man Machine Interface, Intelligent System