

# 이동로봇의 경로추적을 위한 2-입력 2-출력 ANFIS제어기

## 2-Input 2-Output ANFIS Controller for Trajectory Tracking of Mobile Robot

이홍규\*

Hong-Kyu Lee\*

### 요 약

비선형 시스템을 제어하는 효과적인 방법으로 신경망과 연동된 퍼지구조를 적용한 ANFIS 제어기를 이용되고 있다. 전통적인 ANFIS에서는 다차원의 입력에도 불구하고 단일출력에 대한 공정을 모델링하고 제어하는데 사용된다. 멤버십 함수의 파라미터는 최소자승예측과 역전파 알고리즘을 이용하여 조정된다. 이동로봇의 경우에는 좌측과 우측의 바퀴를 각각 구동할 필요가 있다. 본 논문에서는 이동로봇의 궤적을 추적하기 위하여 2-입력 2-출력을 가진 ANFIS제어기를 적용한 제어시스템 구조를 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 구조가 이동로봇에 대한 가능한 제어기임을 확인할 수 있었다.

### Abstract

One approach of the control of a nonlinear system that has gained some success employs a fuzzy structure in cooperation with a neural network(ANFIS). The traditional ANFIS can only model and control the process in single-dimensional output nature in spite of multi-dimensional input. The membership function parameters are tuned using a combination of least squares estimation and back-propagation algorithm. In the case of a mobile robot, we need to drive left and right wheel respectively. In this paper, we proposed the control system architecture for a mobile robotic system that employs the 2-input 2-output ANFIS controller for trajectory tracking. Simulation results and preliminary evaluation show that the proposed architecture is a feasible one for mobile robotic systems.

Key words : 2-input 2-output ANFIS, Trajectory tracking, Mobile robot

### I. 서 론

ANFIS는 90년대 초에 Jang에 의하여 퍼지논리와 신경망의 특성을 혼합한 지능시스템으로 제안된 이후 다양한 분야에서 응용 및 연구가 이루어지고 있다 [1-3]. 멤버십 함수의 파라미터들은 원하는 출력과

실제의 출력사과의 오차를 최소화되도록 최소자승예측(least squares estimation)과 역전파(back-propagation) 알고리즘에 의하여 조정되는데 Fierro는 온라인으로 학습할 수 있는 다층의 전향(forward) 신경망을 이용하여 백스텝핑(back stepping) 추적기법과 토크제어기를 복합한 신경망기반 모델을 개발하였다

---

\* 한국기술교육대학교(Korea University of Technology and Education)

· 제1저자 (First Author) : 이홍규

· 투고일자 : 2012년 6월 28일

· 심사(수정)일자 : 2012년 6월 28일 (수정일자 : 2012년 8월 13일)

· 게재일자 : 2012년 8월 30일

[4]. Velagic은 이동로봇의 경로추적에 다중입력 단일 출력 ANFIS 제어기를 이용하여 로봇의 선형속도와 위치오차의 관계를 적응 학습률을 적용한 역전파 알고리즘으로 온라인 학습을 하고, 직교좌표계의 위치 변화로부터 기구학을 이용하여 두 바퀴의 속도를 계산하는 방법을 제안하였다[5]. 이는 로봇의 경로를 직접 학습하지 않고 PD제어기와 ANFIS제어기를 복합하여 사용하는 방법으로 기구학과 역기구학을 계산하는 과정이 시스템 내에 포함되어야 한다.

ANFIS 제어기를 응용한 분야를 살펴보면 Allaoua가 PSO(particle swarm optimization) 알고리즘과 연계하여 DC모터의 속도제어에 응용하였고[6], Thanh은 잡음이 포함된 이미지 처리에 응용하였고[7], Hayati는 다중게이트를 가진 MOSFET를 설계하는데 응용하였으며[8], Narendra와 Nguyen은 비선형 동역학 시스템의 식별과 제어에 효과적으로 사용될 수 있다는 것을 주장하였다[9,10]. Li는 2차원적인 처리를 할 수 있는 전통적인 퍼지제어기에서 입력을 퍼지화하는 과정을 2차례에 걸쳐 수행함으로써 3차원의 입력을 퍼지화 할 수 있는 방법을 제안하였다[11]. 그러나 출력은 기존의 퍼지제어기와 같이 단일출력을 발생한다.

본 논문에서는 많은 수의 센서정보들을 다루기 위하여 많은 수의 입력을 가질 수 있으나 출력이 하나로 제한되는 단점을 해결하기 위하여 출력을 두 개로 할 수 있는 ANFIS 구조를 제안하여 2차원 공간에서 이동로봇의 경로를 추적할 수 있는 새로운 ANFIS 제어기를 제안하였고, 제안한 제어기를 사용하여 동시에 이동로봇의 좌우측 바퀴를 x축과 y축의 정보를 이용하여 각각 구동하는 컴퓨터 모의시험을 통하여 제안한 제어기의 타당성을 확인하였다.

## II. ANFIS 제어기

일반적으로 신경망은 입력을 받아들이는 입력층과 결과를 내보내는 출력층 그리고 신경망의 학습 능력을 향상시키기 위한 은닉층으로 구성된다. 원하는 출력과 실제 출력 사이의 오차를 최소화시키기 위하여 여러 가지 최적화 기법이 사용될 수 있으며, 그중

에서 가장 널리 사용되는 것으로는 경사정보(gradient information)를 이용하는 역전파(back-propagation) 알고리즘을 들 수 있다. 이때 각각의 뉴런(neuron)은 바이어스(bias)와 연결강도(weight)와 같은 정해진 매개변수를 가지고 전달함수(transfer function)에 의한 연산으로 출력의 값이 계산된다. 이렇게 생성된 인공뉴런은 신경망의 기본 구성요소를 이루게 되며, 이러한 뉴런을 연결하여 비 파라미터 매핑(non-parametric mapping)을 수행한다.

일반적인 적응 신경망 퍼지추론 시스템(ANFIS)은 그림 1에서와 같이 두 개의 입력( $x, y$ )과 하나의 출력  $f$ 를 가지고 있다.

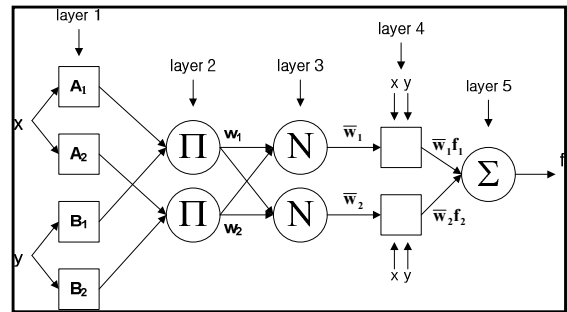


그림 1. ANFIS 구조  
Fig. 1. ANFIS Structure

신경망 적응학습 기법의 기본은 주어진 입출력 데이터를 퍼지추론 시스템이 가장 잘 추적하여 멤버쉽 함수 파라미터를 자동으로 계산하도록 데이터 집합에 대한 퍼지 모델링 절차를 제공하는 것이다. 멤버쉽 함수 파라미터들은 최소자승 예측과 역전파 알고리즘의 조합으로 조정된다. 멤버쉽 함수와 관련되는 이 파라미터들은 신경망의 경우와 유사하게 학습절차를 통하여 변경된다. 이러한 조정은 주어진 파라미터들의 조합에 대하여 퍼지추론 시스템이 어떻게 입출력 데이터를 모델링하는 지에 대한 정도를 나타내는 경사벡터에 의하여 이루어진다. 한번 경사벡터가 구해지면 원하는 출력과 실제출력 사이의 오차를 줄이도록 파라미터들을 조정하기 위하여 여러 가지 최적화 기법들이 사용될 수 있다. 이는 퍼지시스템이 데이터로부터 학습을 할 수 있도록 하는 것이고 모델링이라고 한다. 이러한 접근방법은 멤버쉽 함수의 특성곡선을 조정함으로써 시스템을 조율하는 장점을 가지고 있다.

그림 1의 ANFIS를 구성하고 있는 각 계층(layer)들의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 퍼지추론 시스템은  $x, y$  두 입력에 대하여 출력은  $f$ 로서 Takagi-Sugeno 형태 3에서 다음의 규칙들을 포함하는 것으로 가정한다.

규칙1 If  $x$  is  $A_1$  and  $y$  is  $B_1$  THEN  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$  (1)

규칙2 If  $x$  is  $A_2$  and  $y$  is  $B_2$  THEN  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$  (2)

2-1 계층 1

이 계층의 모든 노드  $i$ 는 노드함수 (3)식과 (4)식을 가진 정방형 노드이다. 이 계층에서의 파라미터를 전제(premise) 파라미터라 부른다. (5)식은 벨 형태의 멤버십 함수를 나타내고 있고, 삼각형, 사다리꼴 등 다양한 형태의 멤버십 함수가 사용될 수 있다.

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i=1,2 \quad (3)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad \text{for } i=3,4 \quad (4)$$

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (5)$$

2.-2 계층 2

이 계층에서는 (6)식에서와 같이 입력되는 신호들을 T-놈 연산자라고 부르는 곱하는 동작을 하며, 각 노드의 출력은 각 규칙의 구동강도를 나타낸다.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y), \quad i=1,2 \quad (6)$$

2-3 계층 3

이 계층에서는 (7)식과 같이 각 규칙의 구동강도들

의 합에 대한  $i$ 번째 규칙의 구동강도의 비 즉 정규화된 가중치를 출력하는 층을 나타낸다.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (7)$$

2-4 계층 4

이 계층에 속하는 모든  $i$ 번째 노드에서는 (8)식과 같은 노드 함수를 출력한다. 이 계층에 속하는 파라미터를 귀결(consequent) 파라미터로 불리며 비 퍼지화 과정을 거친다.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (8)$$

2-5 계층 5

이 계층은 단일 노드로 구성되고, 입력되는 모든 신호들의 합을 계산하는 과정으로 비 퍼지화 과정이라고 부르며 crisp값을 출력한다.

$$O_{5,i} = f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (9)$$

하강경사를 이용한 학습에서는 (10)식에서와 같이 ANFIS에 의하여 출력  $f$ 가 계산되거나 예측된다. 여기에서 계산에 사용되는 오차는 다음과 같다.

$$\text{오차}(e) = (f - A_o)/2 \quad (10)$$

여기서  $A_o$ 는 제어대상에 대한 원하는 출력이다. 일반적으로  $f(x, y)$ 는 입력변수  $x$ 와  $y$ 로 이루어진 다항식이고, 이는 전제된 규칙에 지정된 퍼지영역 내에서 시스템의 출력을 나타내는 다른 함수가 될 수도 있다. 혼합학습 절차에는 다음의 표 1과 같은 두 가지 경로가 있으며 파라미터를 계산하는 방법이 소

개되어 있다.

표 1. 혼합학습 절차

Table 1. Hybrid learning procedure

	전향경로	후방경로
전제 파라미터 (비선형)	고정	하강경사
귀결 파라미터 (선형)	최소자승예측 (오프라인 학습)	고정 (역전파)
신호	노드 출력	오차신호

### III. 2-입력 2-출력 ANFIS 제어기

제어기의 설계에 있어서 신경망 블록이 모델의 동역학에 중점을 두는 반면에 불확실성과 불완전성을 다루는 퍼지블록의 파라미터를 사용하지 않는 개념에 의존하여 성공하는 접근방법이 있다. 전통적인 ANFIS [1] 접근방법은 그림 1에 나타난 바와 같이 전제와 귀결 파라미터들과 입출력 데이터들을 이용하여 슈퍼바이저를 두고 학습하는 오프라인 방식과 슈퍼바이저 없이 학습하는 온라인 방식이 있다. 두 방법 모두 학습형태는 전제와 귀결 파라미터 집합들을 예측하기 위하여 전향경로와 역방향 경로를 필요로 한다. 결과적으로 가우시안 형태의 멤버십 함수를 가정했을 때 규칙의 수가  $n$ 으로 정의하는 경우  $2n$ 의 전제 파라미터와  $2n$ 의 귀결 파라미터가 필요하다. 전형적으로 귀결 파라미터들은 전향 경로 동안 순환 최소자승 방법에 의하여 식별되고, 전제 파라미터들은 역방향 경로 동안 경사방법(gradient method)을 이용하여 식별된다. 최소 자승예측 방법으로 다음의 칼만 필터를 이용한다.

$$\left. \begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i) \\ S_{i+1} &= S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}}, \quad i = 0, 1, \dots, P-1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

여기서  $a_i$ 와  $b_i$ 는 [11]의 데이터집합에서 구할 수 있으며,  $S_i$ 는 공분산(covariance) 행렬이고,  $X_i$ 는 귀결

파라미터의 현재 최소자승 예측결과이다.  $P$ 는 데이터 집합의 수이고, 초기 값으로는  $V_0 = 0$ 와  $S_0 = gI$ 이며 여기서  $g$ 는 양의 큰 수이고, 귀결 파라미터의 수가  $m$ 일 때  $I$ 는  $m \times m$  단위행렬이다. 역방향 경로에서는 경사방법을 이용하여 다음과 같이 측정된 오차를 최소화한다.

$$E = \sum_{i=1}^P E_i = \sum_{i=1}^P (y_i - y_{di})^2 = \sum_{i=1}^P e_i^2 \quad (12)$$

여기서  $y_d$ 는 원하는 출력이고  $y$ 는 실제출력이며,  $e_i = (y_i - y_{di})$ 는 신경망의 오차를 나타낸다. 이로부터 전제 파라미터를 구할 수 있다.

슈퍼바이저가 없는 온라인 학습을 위하여 필터방정식을 수정하고, 과거에 측정된 결과들의 영향을 감소시키기 위하여 기하급수적으로 측정을 감소시키는 방법을 사용한다. 결과적으로 과거에 측정된  $\tau$  샘플 들은 최근에 측정된 가중치의  $\lambda^T$ 배가 되고 망각인자(forgetting factor)는  $0 \leq \lambda \leq 1$  이다. 결과적으로 (11) 식은 (13)식과 같이 변경되고, 귀결 파라미터의 예측 결과가 된다. 또한 온라인 학습에서 오차기준이 되는  $E$ 는 (14)식과 같이 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} X_i &= X_i + S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i) \\ S_{i+1} &= \frac{1}{\lambda} \left[ S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{\lambda + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}} \right], \quad i = 0, 1, \dots, P-1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$E = \sum_{i=1}^P \lambda^{\tau-i} e_i^2 \quad \text{그리고} \quad \tau = \frac{1}{1-\lambda} \quad (14)$$

(14)식으로 표현된 오차함수에서  $\tau$ 보다 오래된 측정들은 0.3보다 작은 가중치를 가진다. 기준이 되는 (4)식은 오프라인 학습의 경우와 같이 경사 방법에 의하여 최소화될 수 있고 전제 파라미터가 결정된다.

본 논문에서는 Jang[1]이 제안한 다중입력 단일출력 ANFIS 제어기의 형태를 이용하여 이동로봇의 주어진 궤적을 입력으로 샘플한 시간에서의  $x$ 축에 대한 궤적과  $y$ 축의 궤적에 대한 학습이 이루어지도록 2-입력 2-출력(2-input 2-output) 형태를 구현하였다. 대부분의 이동로봇이 많은 센서를 사용하고 있기 때

문에 다중입력이 필요하고 로봇을 구동하기 위해서는 좌측과 우측 바퀴의 방향 또는 속도를 동시에 독립적으로 제어해야 하기 때문에 다중출력이 필요하게 된다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

이동로봇의 이동경로는  $10m \times 10m$ 의 공간에 5 종류의 경로들을 설정하고, 제안한 ANFIS 제어기에 의하여 학습하도록 하고 학습된 경로와 원하는 경로 사이의 오차를 분석하는 방법을 사용하였고, MATLAB으로 시뮬레이션을 수행하였다.

5종류의 이동로봇 경로를 학습시키기 위하여 ANFIS 코드는 각각의 연속적인 학습해야 할 경로를 파라미터 파일에 저장하고, 각 경로들은 직교좌표계에서  $x = f(t)$ ,  $y = g(t)$ 의 형태로 표현될 수 있도록 하였다.

2개의 입력과 2개의 출력(2-input 2-output)을 가진 ANFIS 제어기를 이용하여 샘플한 시간에서의 x축에 대한 궤적과 y축에 대한 경로를 추적하도록 하여 학습된 추적경로와 원하는 경로사이의 오차를 분석하였다.

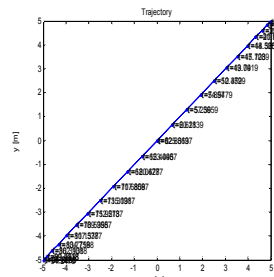
제어기는 5개의 가우시안 멤버십 함수를 이용하여 구현하였고, 학습 횟수는 5, 10, 20, 50, 100, 500 등으로 변경이 가능하도록 설정하여 학습 횟수에 따른 오차의 변화를 비교분석할 수 있도록 하였다. 제어기는 배치학습 절차에 따라 이전에 미리 학습하지 않은 경로를 사용하였다. 원하는 위치궤적( $x_d, y_d$ )과 학습된 위치궤적( $x_a, y_a$ ) 사이의 오차( $\Delta x, \Delta y$ )를 고려하여  $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 을 오차의 기준으로 분석하였고, 이러한 위치오차는 실제적인 로봇시스템에서 불완전한 시스템의 동력학 특성에 기인하는 위치오차를 교정하는데 사용될 수 있다.

그림 2는 학습되지 않은 로봇의 원하는 경로를 직교좌표계에 표현한 그림으로서 시간에 따른 이동경로와 샘플된 위치를 나타낸다. 시간이 표현된 위치가 학습을 위하여 샘플된 위치들이다. 각각의 경로의 추적오차는  $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 을 나타내고 있다. 실험에서는 모두 학습 횟수가 20인 경우이다. 학습 횟수에 따

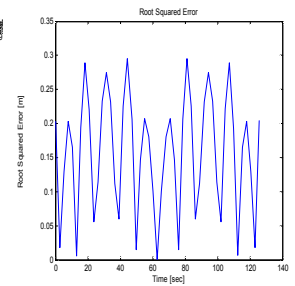
른 오차의 분석은 표 3에 나타내었으며 각 학습 횟수 별로 모든 샘플에서 구한 오차를 평균하여 얻은 결과이다.

실험결과 경로의 형태에 따라 시간에 따른 오차의 형태와 크기가 다르게 나타났는데 이는 일정시간간격으로 샘플을 하였기 때문에 각 구간에서의 속도가 다르기 때문인 것으로 분석된다.

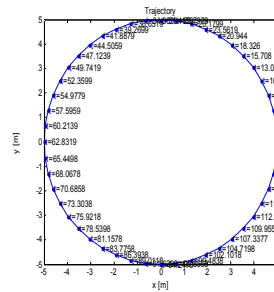
학습 횟수를 변화시키면서 실험을 수행한 결과 학습 횟수가 증가함에 따라 오차의 평균값은 학습횟수의 증가율보다 크게 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.



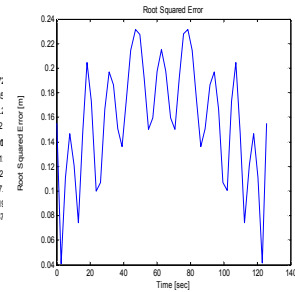
경로 1



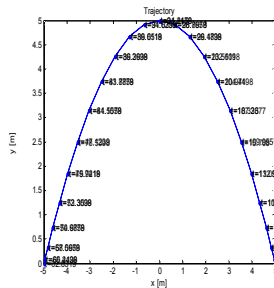
경로 1 추적오차



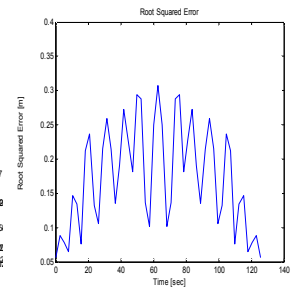
경로 2



경로 2 추적오차



경로 3



경로 3 추적오차

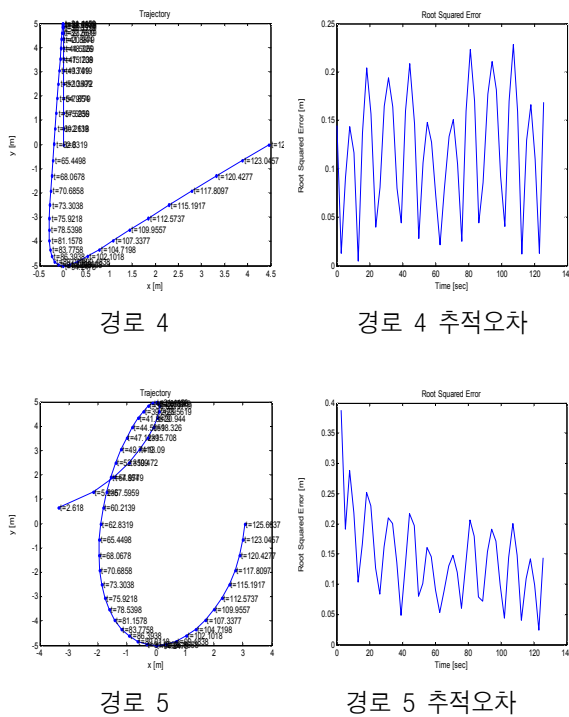


그림 2. 실험횟수별 경로들과 시간별 추적오차  
Fig. 2. Desired trajectories and tracking error

또한 50회 미만의 경우에는 감소폭이 비교적 작았으며, 100회 이상에서는 오차의 감소폭이 매우 크게 나타났다.

본 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 다중입력 다중출력의 ANFIS 제어기의 타당성을 확인할 수 있었으며 다중출력을 필요로 하는 많은 응용분야에 활용될 수 있을 것이다.

표 2. 학습 횟수 별 평균오차(RMSE) (단위 : m)

Table 2. RMSE with epoch (unit : m)

학습횟수	경로1	경로2	경로3	경로4	경로5
5	0.1911	0.1753	0.2020	0.1655	0.1422
10	0.1881	0.1723	0.1983	0.1633	0.1400
20	0.1808	0.1650	0.1894	0.1580	0.1345
50	0.1421	0.1280	0.1442	0.1299	0.1060
100	0.0287	0.0236	0.0208	0.0670	0.0217
500	0.0011	0.0012	0.0068	0.0095	0.0052

V. 결 론

두 개의 입력과 하나의 출력을 가진 ANFIS 제어

기를 기반으로 출력을 두 개로 할 수 있는 ANFIS 구조를 제안하여 2차원 공간에서 이동로봇의 경로를 추적할 수 있는 새로운 ANFIS 제어기를 제안하였고, 실험을 통하여 제안한 제어기의 타당성을 확인하였다.

앞으로 연구해야할 분야로는 제어기가 국부해로 수렴되는 것을 방지하고 오차를 최소화하기 위하여 최적화 기법인 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 ANFIS 제어기에 결합시켜 파라미터들을 조정하는 방법에 대한 연구이다.

참 고 문 헌

- [1] J.S.R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, 1993.
- [2] J.S.R. Jang and C.T. Sun, "Neuro-Fuzzy Modelling and Control", *Proceeding of IEEE*, vol. 83, no. 3, pp. 378-406, 1995.
- [3] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to modeling and Control", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, no. 1, Feb. 1985, pp. 116-132.
- [4] R. Fierro and F.L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot using Neural Networks", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 389-400, 1998.
- [5] J. Velagic, N. Osmic and B. Lacevic, "Neural Network Controller for Mobile Robot Motion Control", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 3, no. 7, pp.427-432, 2008.
- [6] B. Allaoua, A. Laoufi, B. Gasbaoui and A. Abderrahmani, "Neuro-Fuzzy DC Motor Speed Control Using Particle Swarm Optimization", *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, issue 15, pp. 1-18, Dec. 2009.
- [7] N.M. Thanh and M.S. Chen, "Image Denoising Using Adaptive Neuro-Fuzzy System", *International Journal of Applied Mathematics*, vol. 36, no. 1, pp. 11-15, 2007.
- [8] M. Hayati, M. Seifi and A. Rezaei, "Double Gate MOSFET Modeling Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Nanoscale Circuit Simulation", *ETRI Journal*, vol. 32, no. 4, pp. 520-539, Aug. 2010.

- [9] K.S. Narendra and K. Pathasrathy, "Identification and Control of Dynamic Systems using Neural Network", *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 1, no. 1, pp.4-27, 1990.
- [10] D.H. Nguyen, and B. Widrow, "Neural Networks for Self-Learning Control Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 10, no.3, pp. 18-23, 1990.
- [11] H. X. Li, "Three-dimensional Fuzzy Logic System for Modeling and Control", *Systems, Man and Cybernetics Society eNewsletter*, issue 27, June 2009.

### 이 홍 규 (李弘珪)



1977년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1979년 8월 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1989년 8월 : 서울대학교 전자공학과 (공학박사)

1979년 3월 ~ 1992년 2월 : 국방과학연구소 선임연구원

1992년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 교수

관심분야 : 뉴로-퍼지시스템, 유전자 알고리즘, 로봇틱스, 전자전