

서보 제어계 설계지원을 위한 퍼지추론 TOOL의 개발

노 창 주* · 홍 순 일**

The Development of Fuzzy Reasoning Tool for the Support Design of Servo System

C. J. Noh · S. I. Hong

Key words : Fuzzy reasoning tool(퍼지추론 도구), α -cut set decomposition(α -컷집합 분해), Membership function(소속함수)

Abstract

The diffusion of fuzzy logic techniques into real applications requires specific software supports which save development time and reduce the programming effort. But we has been lack of a tool devoted to support the design of fuzzy controllers.

In this paper, on the basis of the general fuzzy set and α -cut set decomposition of fuzzy sets, a set of fuzzy reasoning tool(FRT) devoted to support the design of fuzzy controller for servo systems is developed.

The major features of this tool are:

- 1) It supports users to analyze fuzzy inference status based on input data and expected results by three - D graphic display.
- 2) It supports users to prepare input data and expected result.
- 3) It supports users to tuned scaling factor of membership functions, rules and fuzzy inference.

The paper shows how the suggested design tools are suitable to give a consistent answer to the tuning of fuzzy control system. this FRT is expected to exert good performance and devoted to support which the design of fuzzy controller is illustrated in the servo systems.

1. 서 론

퍼지제어는 1965년 캘리포니아 대학의 Zadeh

교수에 의하여 제창되었으나 이의 공학적인 응용으로서는 런던 대학의 Mamdani교수가 1974년 처음으로 증기기관의 퍼지제어에 성공하였다. 그

* 경희원, 한국해양대학교

** 경희원, 부산공업대학교

후 일본 등 외국에서 이에 대한 관심이 집중되어 가전제품 등에 퍼지제어를 응용하여 실용화 되고 있다.^{1,2)}

퍼지제어는 추론으로 실행하므로 시스템의 간단, 조작의 용이, 적응의 유연성 등의 특징이 있어 종래의 제어기술에서 해결할 수 없었던 문제에 제어기술을 보강하거나 때로는 상호 조합형태로 또는 종래와 동일한 수준의 제어문제를 취급한 경우에도 이용된다. 아울러 퍼지제어의 적용범위는 수학적 모델로 표현할 수 없는 복잡한 플랜트 등 넓은 범위에 걸쳐있다.^{3,4,7)}

퍼지제어 수법은 간단하여 이해하기 쉽지만 현재 요구되는 제어성능을 평가하고, 실현하기 위한 일반적인 설계지침이 없다. 실제 제어기를 설계할 경우 대상시스템의 제어에 있어서 소속함수나 제어규칙의 튜닝(Tuning)에 많은 노력과 시간이 걸린다.^{5,6)} 그러므로, 퍼지제어 기술을 실제 응용에 확산 하려면 개발시간을 절약하고 프로그래밍 노력을 줄이기 위한 적절한 소프트웨어로서 개발지원 TOOL가 요구 되고 있다.

본 연구의 목적은 퍼지제어의 응용 시스템을 효율 좋게 개발하기 위하여 실 시스템 적용 전에 제어성능의 확인 평가를 하기 위한 서보 시스템의 설계지원 TOOL을 개발하는 것이다.

본 연구는 제2장에서 일반적인 퍼지집합 이론에 기초한 범용의 퍼지 추론과 α -컷 분해원리에 의해 퍼지 추론을 행하고 소속함수 입력부, 제어규칙 입력부, 퍼지추론 연산부, 3차원에 의한 시뮬레이션 결과 표시부 등으로 된 퍼지추론 TOOL을 개발하였다. 제3장에서는 직류서보 계의 적용 예로서 소속함수, 제어규칙 및 추론방식 등의 튜닝을 검토한 결과에 대하여 논술하였다. 또한 α -컷분해에 의한 퍼지제어 방식으로 하드웨어화 방법을 검토하였다.

그리고 서보제어계 설계지원을 위한 본 TOOL

은 다음의 특징을 갖는다. 1) 사용자가 입력 데이터와 기대되는 결과에 기초하여 퍼지추론 상태를 해석할 수 있도록 한다. 2) 입출력에 대한 추론결과를 3차원으로 그래픽 하여 그 결과를 보고, 소속함수의 정규화 이득과 출력이득, 제어규칙, 추론방식 등을 튜닝하고 수정할 수 있다. 3) 직류 서보 제어 계의 퍼지제어에 의한 계단 응답과 주파수응답을 그래프로 확인하고 평가할 수 있다.

이상 본 TOOL은 서보계의 퍼지제어에 적용한 결과 튜닝 파라미터의 적절한 선정으로 양호한 제어성능을 발휘하고 설계 지원 지침이 됨을 확인하였다.

2. 서보 제어용 퍼지추론 TOOL

2.1 퍼지 추론과 연산

본 퍼지 추론 TOOL은 퍼지집합 F에 있어서 소속함수가 $\mu_F = [0, 1]$ 로 정의되는 식을 이용한 범용의 퍼지제어와 약 α -컷으로 분해되어 소속함수가 α -컷 집합 $F_\alpha = \{x \mid \mu_F(x) \geq \alpha\}$, $\alpha \in [0, 1]$ 로 정의되는 식을 이용한 α -컷 퍼지제어의 두 가지로 한다.

Fig. 1은 입출력 스케일링 팩터, 퍼지화부, 퍼지추론, 비 퍼지화부 등으로 구성된 퍼지 제어기의 구성도를 나타낸다.

퍼지 제어기는 입력으로 상태에 관한 정보를 x, y라 하고 출력으로 조작량을 u라 하면 제어규칙 n 개에 대하여 다음과 같이 Modus ponens 추론을 취한다.

$$\begin{array}{l}
 \text{條件命題 : If } x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i, \text{ then } u \text{ is } C_i \\
 \text{事實 : } x \text{ is } x_0, y \text{ is } y_0 \\
 \hline
 \text{結論 : } u \text{ is } C'
 \end{array}
 \tag{2.1}$$

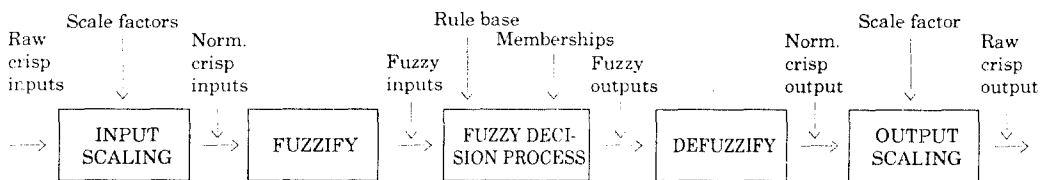


Fig. 1 Architecture of Fuzzy logic controller

단, A_i, B_i, C_i 는 퍼지 집합이다. 비 퍼지한 사실 $[x_0, y_0]$ 에 대하여 제어기 출력 u 의 확정 값을 각 퍼지 집합을 이용하여 추론하는 TOOL을 작성한다.

여기서 제한한 퍼지 추론 TOOL의 연산방식은 전건부 적합도 ω_i 와 각 제어규칙에서 얻은 추론 결과 C_i 는 다음의 곱연산 식(2) 중에서 선택하여 행하고 최종적인 결론 C' 는 각 개별 추론결과 C_i '를 다음의 가산 연산 식(3) 중에서 선택하여 행한다.

곱연산(product) (2)

논리식 : $a \wedge b = \min(a, b)$

대수곱 : $a \cdot b = a b$

한계곱 : $a \odot b = 0 \vee (a + b - 1)$

격열곱 : $a \wedge b = \begin{cases} a & \text{if } b = 1 \\ b & \text{if } a = 1 \\ 0 & \text{otherwise } a, b < 1 \end{cases}$

가산(sum) (3)

논리식 : $a \vee b = \max(a, b)$

대수합 : $a + b = a + b - ab$

한계합 : $a \oplus b = 1 \wedge (a + b)$

격열합 : $a \vee b = \begin{cases} a & \text{if } b = 1 \\ b & \text{if } a = 1 \\ 0 & \text{otherwise } 0 < a, b < 1 \end{cases}$

최종적인 퍼지집합 C' 의 代表값 u 을 구하는 비 퍼지화는 다음 식(4)으로 정의되는 중심법(center of gravity method)을 이용하여 계산된다.

$$u = \frac{\int u C'(u) u du}{\int u C'(u) u d} \quad (4)$$

2.2 퍼지추론 TOOL의 구성과 실행

본 퍼지추론 TOOL은 소속함수 입력부, 제어규칙 설정부, 퍼지추론 연산부와 시뮬레이션 결과 표시부 및 시뮬레이션부 등으로 구성되며 프로그램은 Microsoft C ver. 5.1로 행하고 컴파일은 라지 모델로 행한다. Fig. 2는 퍼지제어 시뮬레이션 알고리즘을 나타내고 Fig. 3은 각 메뉴에 따라 컴퓨터에 의해 실행하는 과정을 나타낸 것으로 각 부분의 설명은 다음과 같다.

1) 소속함수 입력부 : 입력 최대수 10, 출력 최대수 5, 라벨수 7, 요소수 10, α -레벨 양자화 최대

수 100 및 그래프 표시부 등으로 구성하였다. 대집합(x)은 0에서 100까지 정수 값으로 이산화하고 소속함수 등급은 0.0에서 1.0 범위의 실수 값으로 한다. 여기서 설정한 소속함수 데이터는 텍스트파일로 저장된다.

2) 제어규칙 설정부 : 제어규칙의 수는 최대 25로 하고 화면의 표시에 따라 소속함수 화일명, 규칙수, 출력수 순으로 라벨 번호를 입력하고, 수정은 에디터 상에서 할 수 있다.

3) 퍼지추론 및 시뮬레이션 결과 표시부 : 소속함수 및 제어규칙을 구성한 후 메뉴에 따라 각종 연산방식으로 추론연산한 결과의 입출력 관계를 확인하기 위해 3차원 입체표시 프로그램으로 작성한다. 여기서 그래픽으로 된 시뮬레이션 결과를 보고 추론 값의 움직임이나 제어규칙의 형상 등을 시각적으로 파악하여 소속함수의 스케일링 팩터와 제어규칙의 튜닝을 할 수 있다.

4) 응답 시뮬레이션부 : DC 전동기의 퍼지 제어에 의한 계단응답과 주파수응답을 표시한다.

3. 퍼지추론 TOOL의 서보 제어에 적용

여기서는 본 퍼지추론 TOOL를 직류서보 제어에 적용하여 그 실용성을 검토한다. 퍼지 제어기는 목표 값에서의 편차 $e = \theta_r - \theta_o$ 와 한 샘플링 주기 간의 편차 변화분 Δe 의 2개가 입력되어 조작량 u 가 출력된다.

시뮬레이션에 사용된 전동기는 저항과 인덕턴스로 계산한 이득정수 $K_m = [10.0 \text{ rad/sec}]$, 시정수 $T_m = 0.04 [\text{sec}]$ 이고 제어기의 샘플링 시간은 $0.004 [\text{sec}]$ 이다. 제어규칙은 입력수 5명제, 출력수 7명제 로 하여 25개의 제어규칙으로 하고 소속함수는 삼각형법으로 한다.

임의의 시간 $t = n \times \Delta T$ (ΔT 는 샘플링 시간)에서, 목표 값에서의 편차 e_n , 1샘플링 주기후의 편차변화분 $\Delta e_n = e_n - e_{n-1}$ 이 입력되면 조작량 u_n 는 다음과 같이 된다.

$$u_n = K_0 y(x_1, x_2) \quad (5)$$

여기서, $x_1 = e_n / K_1$, $x_2 = \Delta e_n / K_2$ 이면 $u = K_0 y(x_1, x_2)$ 이다. 단, x_1, x_2 을 정규화 한 입력변수로 하면

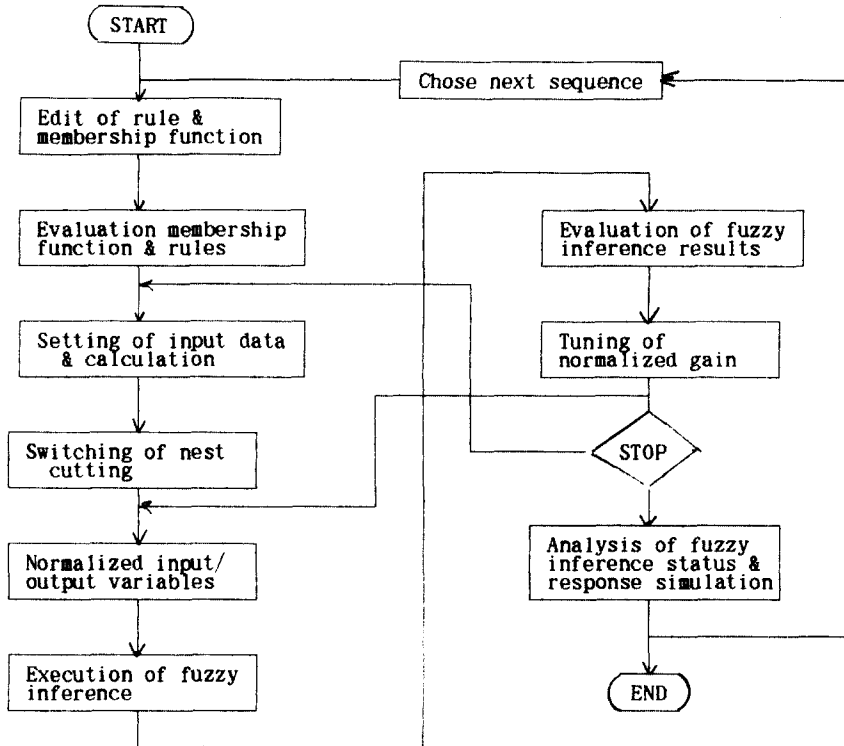


Fig 2. Simulation algorithm for fuzzy control

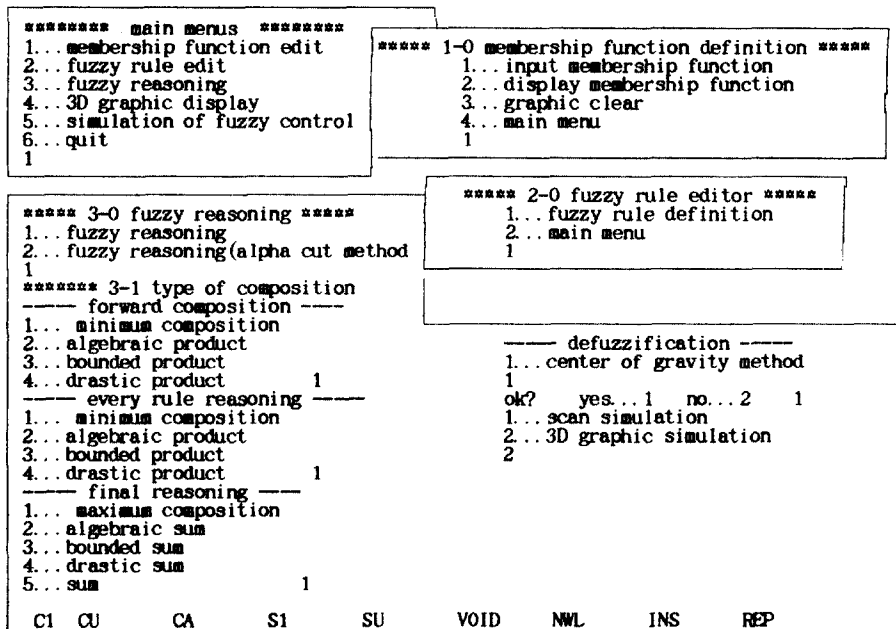


Fig 3. Fuzzy inference processing using tool

K_1, K_2 는 정규화 한 이득이고, $y(x_1, x_2)$ 를 정규화 한 조작량으로 하면 K_0 은 출력이득이다.

3. 1 소속함수의 튜닝(Tuning)

여기서는 min-max연산을 행하고 소속함수의 스케일링 팩터의 정규화 이득 K_1 을 0.5~10.0까지 K_2 를 0.1~2.0까지 변화시킬 때, Fig.4 정정시간을 나타내고 Fig. 5 제어면적의 변화모양을 나타낸 것이다. 단, 이때 출력 정규화 이득 $K_0=15$ 로 일정히 하였다.

그 결과 그림에서 정정시간과 제어면적은 K_1 이 5.0을 초과하거나 K_2 가 1.6을 초과하면 둘다 거의 같은 모양으로 변화되어 그 값들이 증가하고 있음을 알 수 있다. 제어면적과 정정시간은 K_2 의 영향은 그다지 크지 않고 K_1 을 변화시키는 편이 변화에 큰 영향을 주는 것이 확실하다.

서보 제어계는 정정시간과 제어면적이 둘다 적

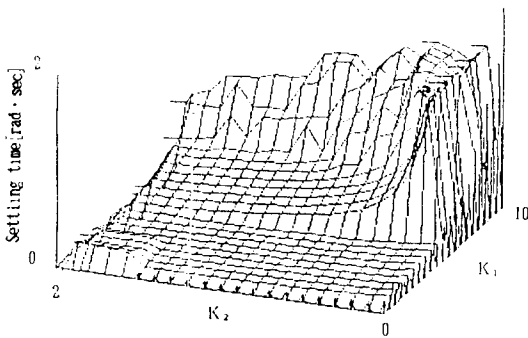


Fig. 4. $K_1 - K_2$ versus settling time

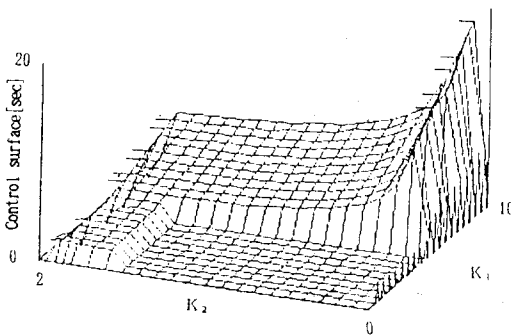


Fig. 5. $K_1 - K_2$ Versus control action surface

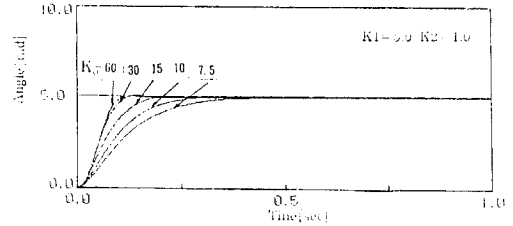


Fig. 6 Step responses with variable K_0 as parameter

은 것이 희망하는 것이므로 이 결과로부터 여기서 선정한 서보계는 $K_1 \leq 5.0, K_2 \leq 1.6$ 범위로 정규화 이득을 조정하면 양호한 것이 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 $K_1=5.0, K_2=1.6$ 에 고정하고, K_0 을 7.5~60까지 변화시킬 때 전동기 위치 제어시의 계단 응답 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림에서 K_0 을 크게 하면 속응성이 증가하는 것은 확실하나 너무 크게 하면 응답이 편차의 미소한 변화에 대하여도 너무 민감하게 되어 정상상태에서 조작량이 "0"으로 된다. 때문에 직류 전동기 PWM 제어 시 스위칭 소자 특성을 고려하여 $K_0=15$ 정도가 적합함을 알 수 있다.

3. 2 퍼지추론 연산법의 검토

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 min-max, 한계급-한계합으로 연산할 때의 입출력 관계를 나타낸 것이다. 여기서, min-max 합성은 다른 연산방법에 비해서 선형에 가까운 매우 원만한 형상이고 한계급-한계합 합성에서는 컵형상의 경사곡면으로 비 선형이 됨을 알 수 있다.

이것은 한계급 연산에서는 소속함수의 폭이 좁아지는 것처럼 연산과정이 반영되어 제어 규칙표상의 퍼지 라벨로 표시된 애매한 값의 일치 정도가 적게 되기 때문이라 생각된다.

Fig. 9는 α -레벨 양자화 수를 8단계로 변화한 하여 추론연산한 경우 입출력 관계를 나타낸 것이고 α -컷 분해 수를 증가하면 추론결과가 어느 정도 좁은 폭을 취하는 것이 가능하므로 연속한 경사면의 형상이 되는 것으로 생각된다.

이 결과 8단계 α -컷에서는 Fig. 7의 범용의 퍼지제어와 비교하여 거의 동일하게 선형성을 나타낸다. 특히 α -레벨집합에 의한 추론은 소속함수

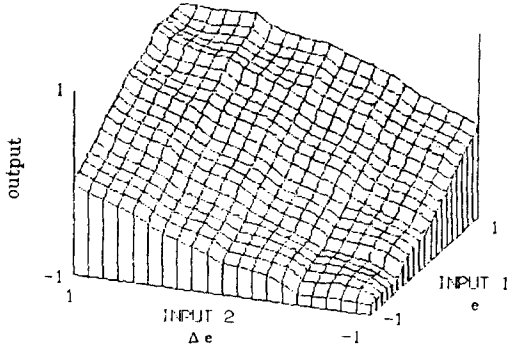


Fig. 7 Input output relationship by min-max summation

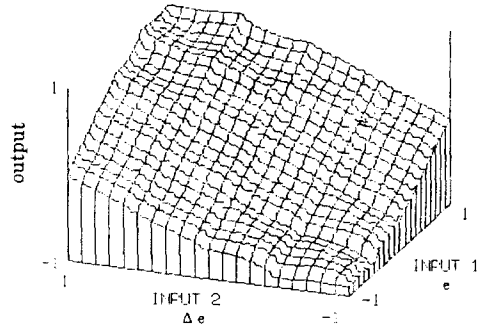


Fig. 9 Input output relationship by eight-cut quantization sets

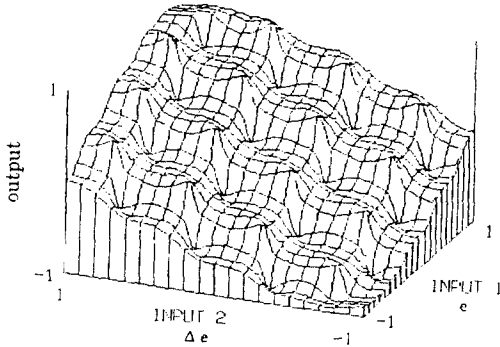


Fig. 8 Input output relationship by bounded product-bounded summation.

를 2진값으로 수량화하여 연산을 행하기 때문에 하드웨어화가 비교적 용이하고 각 α -레벨 집합군에 있어서는 병렬처리 할 수 있어서 고속연산이 가능하다.

4. 결 론

퍼지제어기 설계시 아직 완전한 설계지침이나 소프트웨어가 확립되어 있지 않고 파라미터가 많은 것이 제어계 설계자에 시행착오에 의한 조정을 요구한다.

본 연구에서는 일반적인 퍼지 집합과 α -컷 분해원리에 의한 퍼지추론 계산에 기초하여 퍼지제어 시스템의 개발지원을 위한 퍼지추론 TOOL을 개발하고, 실 서보 시스템에 적용하여 제어성능의 평가, 검토를 수행하였다.

그 결과, 본 연구에서 제안한 퍼지추론 TOOL은 튜닝 파라미터의 조정에 유효한 것으로 확인되었고 퍼지 제어기 설계시 파라미터의 튜닝에 관한 간단한 지침을 나타내었다. 또한 퍼지 제어기를 하드웨어화 할 경우 α -레벨 집합을 이용하는 방법에 관한 지침을 나타내었다

시뮬레이션에 의해 직류전동기의 위치제어에서 퍼지 제어기는 능숙하게 조절되고, 양호한 제어성능을 나타내는 것이 확인되었다. 본 퍼지추론 TOOL은 퍼지제어 시스템의 개발지원 TOOL로서 유용함을 구명하였다.

5. 후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.

參考文獻

- 1) 宮本健二, "FUZZY制御とその應用", 計測と制御, Vol.25, No.5, pp.458~465, 1986
- 2) Tomoyoshi Takeuchi, et al., "A Calculation Method for Fuzzy Control by α -cut Decomposition and Its Hardware Implementation", The Fuzzy Symposium, Jun.12~14, 1991, Nagoya, Japan
- 3) Spyros Tzafestas, et al., "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.37, No.5, pp.365~371, Oct. 1990.

- 4) A. Boscolo and F. Drius, "Computer Aided Tuning and Validation of Fuzzy System", IEEE International Conf. on Fuzzy systems, pp.561~566, 1992.
- 5) 林眞司, "ファジィ制御の チューニング方法", 第6回 ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.189~192, 1990.
- 6) C. J. Harris and C. G. Moore, "Phase Plane Analysis Tools for a class of Fuzzy Control Systems", IEEE International Conf. on Fuzzy Systems, pp.511~518, 1992.
- 7) Fabrizio Russo "A User - friendly Research Tool for Image Processing with Fuzzy Rules", IEEE International Cont. on Fuzzy Systems, pp.561~566, 1992.