

# DC Servo Motor용 Fuzzy 제어기의 실현에 관한 연구

이 오 걸\* · 고 태 언\*\* · 이 준 탁\* · 우 정 인\*  
 \* 동아대학교    \*\* 동의대학교

## Implementation of the Fuzzy Controller for DC Servo Motor

O. G. Lee\* · T. E. Go\*\* · J. T. Lee\* · J. I. Woo\*

\* Dong-A Univ.    \*\* Dong-Eui Univ.

### abstract

In this paper, an implementation approach of Fuzzy Position Controller for DC servo motor which requires the faster and more accurate dynamics is presented. The proposed Fuzzy position controller is consists of an adjustment routine obtaining optimal scale factors and a Fuzzy control routine inferencing optimal control signals, using 80286 microprocessor and DT 2801 board. Comparing to conventional PD controllers, the control performances such as reaching time, overshoot, disturbance adaptability and etc. are substantially improved.

### I. 서론

최근 과학의 발달과 더불어 인간이 행하던 제어를 Microprocessor 등의 자동화 설비에 의해 행하고 있으며, 자동화가 가속됨에 따라 제어 대상의 모델화가 어렵고 비선형성이 높을 경우, 더욱 제어하기 어려워 지고, 제어 장치만 복잡하게 된다. 또한, 일반적인 제어에서는 PD제어나, 최적 제어등을 이용하고 있지만, 주위 환경에 따른 외란에 대한 적응성이나 System의 비선형성 때문에 많은 계산 시간이 요구되는 최적제어, MRAC등 복잡한 이론이 부가되어야 하는 문제점을 안고 있다. 1-3)

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서 1965년 Zadeh 교수가 제안한 Fuzzy 집합의 개념과 1973년 Zadeh가 복잡한 System의 해석과 제어에 Fuzzy 집합의 이용 가능성을 제안한 이후, 선형 특성인 System은 물론 비선형 특성 또는 System의 정확한 동특성의 기술이 어려운 System에 대해서도 적용 가능하였다. 4)

그러나, PID등의 고전적 제어기에 비해 비선형 System에서는 유연한 제어성능을 발휘하고 있으나, 제어시 최적 Rule의 선정 및 제어 측정변수의 양자화 Level 선정등에 있어 많은 문제점이 지적되고 있다. 5, 6)

따라서, 본 논문에서는 이상의 문제점을 해결하기 위해, 비선형성에 강한 Fuzzy 제어 이론을 바탕으로 하여, Fuzzy 제어기의 구성은 PC 80286 Micro-Processor 내에서의 Fuzzy 제어 Routine부와 Scale Factor 조정부 및 DT-2801 Data Acquisition Board로 구성되어 실현하였다. 또한, Fuzzy제어에 있어서, 최적 Scale Factor 조정법은 초기 Scale Factor의 값을 변화시켰을때, 오차와 오차의 변화율 및 제어량에 대한 Reaching Time과 Overshoot 및 오차의 자승함으로 된 평가지수의 최적한 값을 각각 구하고자 한

다. 그리고, 최적 Rule의 선정은 기본 Fuzzy Rule을 기초로 하여, 초기의 Fuzzy 제어량을 양으로 증가시켜 Reaching Time을 단축시키고, 정상상태 부근부터는 Fuzzy 제어량을 음으로 증가시켜 Overshoot가 감소 되도록하는 등의 반복학습에 의해 구한다.

이름 DC Servo Motor의 위치제어에 적용하였을 때, 제어 성능 및 외란 특성을 실현 및 시뮬레이션으로 고찰하고, 정상상태의 위치편차라든가 Reaching Time, Overshoot등의 동특성이 종래의 제어기에 비해 강인성있는 우수한 제어기임을 입증하고자 한다.

### II. Fuzzy 제어 Algorithm

Servo System을 제어하기 위한 Fuzzy 제어 System의 일반적인 구성은 그림 1과 같이 사실과 결론을 If-Then 형식으로 서술하는 Fuzzy 제어 Rule부와 Fuzzy 입력으로 부터 명확한 Analog 출력을 연산하는 Fuzzy 추론부, 피제어 프로세스부로 크게 나눌 수 있다.

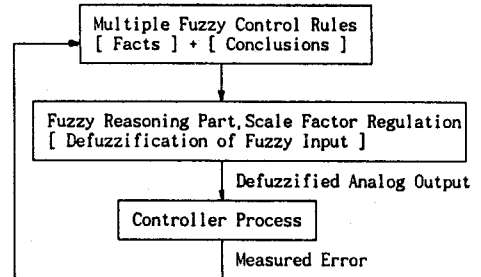


그림.1. 퍼지제어 알고리즘의 블록도

Fig.1. Block Diagram of Fuzzy Control Algorithm

Fuzzy 추론이란, 설정된 Fuzzy 명제로부터 어느 한 명제를 도출하는 것으로서 여기서는 대표점  $y_0$ 를 중력 중심법 1)(the Center of Gravity Method)에 의해 구하는 과정을 말한다. Fuzzy 집합 A의 특성을 나타내는 Membership 함수  $\mu_A$ 는 전체집합 E인 단위 폐구간 [0,1]내의 값에 의해

$$\mu_A : E \Rightarrow [0,1] \\ \mu_A(E) = \begin{cases} 1 : x \in A \\ 0 : x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

로 표현된다.

그런데, 전체집합 E가 다값인 유한집합  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 인 경우, Fuzzy 집합 A는

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (2)$$

로 되고, E가 무한집합인 경우

$$A = \int_E \mu_A(x)/x \quad (3)$$

로 표현된다.

Fuzzy추론에 있어서 중간정도의 애매한 평가를 적극적으로 이용한 대부분의 산업용 System은 Rule형 전향 추론법에 근거하고 있다. 본 논문에서는 Rule형 전향 Fuzzy 추론법을 채용한다. 이는 If - Then 형식의 Rule로 표현되는데, If 뒤에는 전제조건 또는 전건부인 사실과 Then 뒤에는 후건부 또는 조작부인 결론으로 구성된다. 이와 같은 사실과 결론에서 정식화한 Fuzzy 명제의 예는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{array}{l} \text{if th Rule: If } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } B_1 \text{ then } y \text{ is } C_1 \mid A_1 \times B_1 \rightarrow C_1 \\ \text{진 제 : } x_1 \text{ is } A_1' \text{ and } x_2 \text{ is } B_1' \mid A_1' \times B_1' \\ \hline \text{결 론 : } y \text{ is } C_1' \mid C_1' \end{array} \quad (4)$$

단,  $A_1, A_1', B_1, B_1', C_1, C_1'$ 는 전체집합 E의 논의 영역  $X, X', Y, Y'$ 의 부분집합으로 Fuzzy 집합개념에 따른다.

Mamdani의 방법에 따른 Fuzzy 추론의 결론  $C_1'$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$C' = (A' \text{ and } B') \cdot$$

$$(A_1 \text{ and } B_1 \rightarrow C_1) \cup (A_2 \text{ and } B_2 \rightarrow C_2) \cup$$

$$U(A_1 \text{ and } B_1 \rightarrow C_1) = (A' \text{ and } B') \cdot R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_i$$

$$= [A' \cdot (A_1 \rightarrow C_1) \cap B' \cdot (B_1 \rightarrow C_1)] \cup$$

$$\dots \cup [A' \cdot (A_1 \rightarrow C_1) \cap B' \cdot (B_1 \rightarrow C_1)] \quad (5)$$

$$A_1 \times B_1(x_1, x_2) = \mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2) \quad (6)$$

그러므로

$$\mu_{C_1'}(y) = \max_{x_1} \max_{x_2} [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2) \wedge \mu_{C_1}(y)$$

$$\wedge \mu_{A_1'}(x_1) \wedge \mu_{B_1'}(x_2)]$$

$$= \max_{x_1} [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_1'}(x_1)] \wedge \max_{x_2} [\mu_{B_1}(x_2)$$

$$\wedge \mu_{B_1'}(x_2)] \wedge \mu_{C_1}(y) \quad (7)$$

Rule i : If  $x_1$  is  $A_i$  and  $x_2$  is  $B_i$  then  $y$  is  $C_i$

$A_i, B_i, C_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )는 Fuzzy 집합으로 각각의 Membership 함수는  $\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_i}(x_2), \mu_{C_i}(y)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )를 갖는다. 이때  $x_1, x_2$ 의 非 Fuzzy값 ( $x_1, x_2$ )이 주어지면  $y$ 의 합성치는 Braae와 Rutherford의 중심법에 의해  $y$ 의 추론치  $y_0$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(x_1) \wedge \mu_{B_i}(x_2)] \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(x_1) \wedge \mu_{B_i}(x_2)]} \quad (8)$$

여기서,  $y_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )는 Membership 함수  $\mu_{C_i}(y)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )가 최대치를 취할때의 값이다.

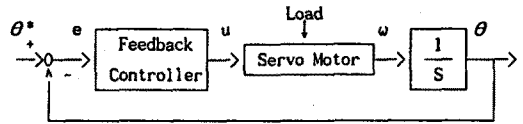
### III. Servo System에의 적용

그림 2와 같은 DC Servo Motor의 Feedback 제어에서 나타난 결과에 근거하여 제어 Rule을 생성시킨다.

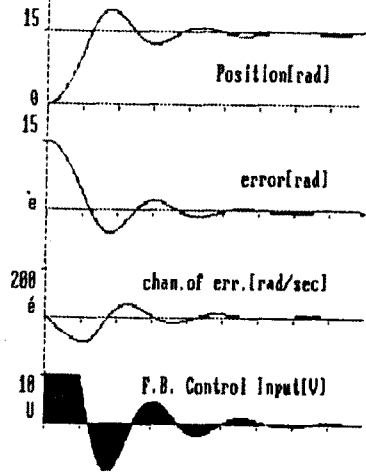
또한, Simulation에 사용한 DC Servo Motor의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_b \theta = U \quad (9)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L = K_T i_a \quad (10)$$



(a) 서보 System  
(a) Servo System



(b) Dynamic Responses

그림 2. 피드백 제어기의 DC 서보 System과 그 응답

Fig. 2. DC Servo System with Feedback Controller and Its Dynamic Responses(200[ms/div])

단,  $\theta^*$  : 각도의 지령치 [rad]

$\theta$  : 각도의 측정치 [rad]

$e = \theta^* - \theta$  : Error

$e' = d/dt(e_{new} - e_{old})$  : Change rate of error 이다.

### IV. Simulation 및 실험결과 고찰

본 Simulation 및 실험에 사용한 DC Servo Motor의 사양은 표-1과 같으며, Fuzzy 제어기를 가진 DC Servo System의 구조는 그림3과 같다.

표 -1. DC 서보 모터의 사양

Table-1. Specification of DC Servo Motor

$R_a = 1.300 [\Omega]$	$L_a = 0.00170 [H]$
$J = 0.00016 [kg \cdot cm \cdot sec^2]$	$B = 0.002727 [kg \cdot cm \cdot sec]$
$K_b = 0.04098 [V \cdot s / rad]$	$K_T = K_T' = 0.086875 [kg \cdot cm / A]$
Rated Voltage $U_n = 15.0 [V]$	Rated Torque $T_n = 2.35 [kg \cdot cm]$
Rated Current $I_n = 5.56 [A]$	Rated Speed $N_n = 3875 \text{ rpm}$
Rated Power $P_n = 60 [W]$	TAMAGAWA SEIKI NO:TS1415R

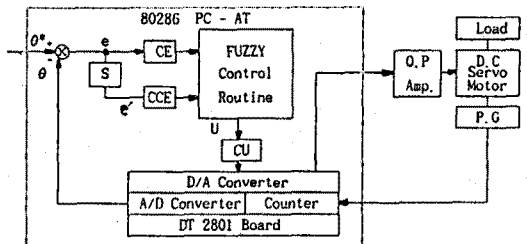


그림 3. 퍼지 제어기를 부가한 DC 서보계의 블록도

Fig. 3. Block Diagram of DC Servo System with Fuzzy Controller

그림3은 Fuzzy 제어기의 블록도로서 실험을 위하여, PC 80286 Micro Processor와 DT 2801 Board를 이용하여 Fuzzy 제어기를 구성하였으며, Encoder의 출력 Pulse는 DT 2801 Board의 Counter 및 D/A Converter에 의해 컴퓨터의 Memory에 읽어 들이고, 이를 Software에 의해 오차와 오차의 변화율을 계산한다. 그리고, 오차와 오차의 변화율에 대한 Scale Factor CE와 CCE를 적용후 Fuzzy Rule의 제어 Routine에서 제어량 U가 계산된다. 그리고, U에 대한 Scale Factor CU를 적용한후, DT 2801 D/A Converter에 의해 Power OP AMP.의 제어신호로 출력된다. 또한, 외란에 대한 견실성 또는 정상상태의 잔류편차 등의 문제점을 보상하는 방법으로 Scale Factor를 적용하여 고전제어 방식인 PD 제어와 비교 고찰하였다.

오차 상승합과 Overshoot 및 Reaching Time에 대한 평가지수들을 이용하여 최적의 Scale Factor를 구할 수 있으며, 그 값은 표-2와 같다.

표-2. 최적 스케일 팩터 값  
Table-2. Optimal Values of Scale Factors

Scale Factor		
CE	CCE	CU
0.30	0.80	1.20

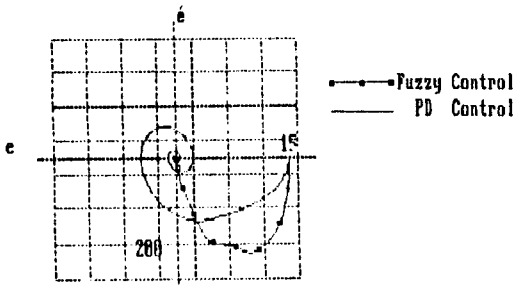


그림.4.  $e$ 와  $e'$ 의 위상면 궤적  
Fig.4. Phase Plane Trajectory of  $e$  and  $e'$

Table-3. Identification of Fuzzy Rule Using Phase Plane  
표-3. 위상면을 이용한 퍼지규칙 조정

$e \backslash e'$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB							
PM							
PS					PS		
ZO			NS	ZO	PS		PB
NS							
NM					PS		
NB						PM	

그림4는  $e$ 와  $e'$ 의 위상면 궤적으로서 Feedback제어시는 원점을 돌면서 Overshoot가 일어나는 것을 볼 수 있으나, Fuzzy제어시는 Overshoot없이 바로 원점에 수렴하였다.

표3-a는 동특성 위상면에 의한 기본 Rule이며, Reaching Time을 단축시키기 위하여  $e=ZO$ ,  $e'=NM$ 일때  $u=PS$ 를  $e=PS$ ,  $e'=NM$ 일때  $u=PS$ 로하고,  $e=PS$ ,  $e'=NB$ 일때  $u=PM$ 을  $e=PM$ ,  $e'=NB$ 일때  $u=PM$ 으로 Rule을 수정하였으며, Overshoot를 개선하기 위하여  $e=ZO$ ,  $e'=PS$ 일때  $u=PS$ 를  $e=ZO$ ,  $e'=NS$ 일때  $u=ZO$ 로 Fuzzy제어 Rule을 개선하여 제어하였다.

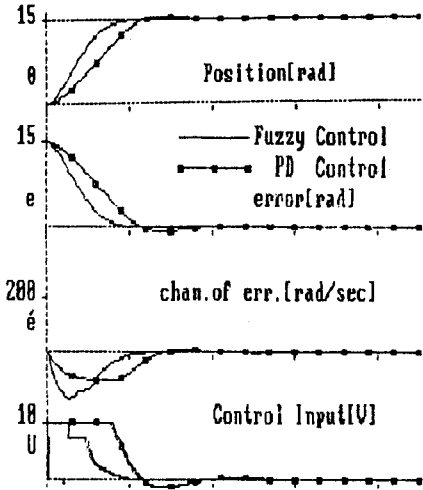


그림.5. PD제어와 Fuzzy제어시 시뮬레이션 결과 (무부하시)[200ms/div]

Fig.5. Simulation Results at PD and Fuzzy control without Load

그림5는 PD제어와 Fuzzy제어시의 무부하 응답의 시뮬레이션 결과로 PD제어에서는 Fuzzy제어보다 Overshoot 및 정상상태 편차가 크게 나타나고 Reaching Time도 25[ms]정도 늦어졌다.

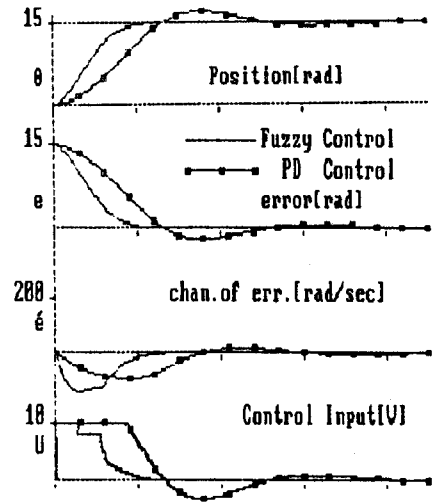
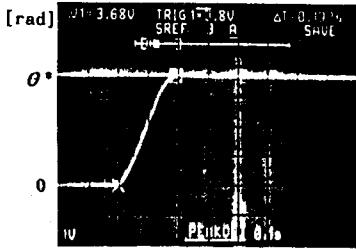


그림.6. PD제어와 Fuzzy제어시 시뮬레이션 결과 (부하시)[200ms/div]

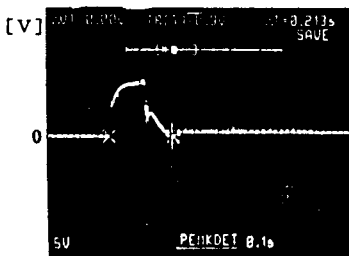
Fig.6. Simulation Results at PD and Fuzzy control with Load

그림6은  $1.175[Kg \cdot cm^2]$ 의 부하를 부가했을때 PD제어와 Fuzzy제어의 응답이다. PD 제어의 Reaching Time은 무부하 때보다 50[ms]정도 늦어졌으며, Overshoot도 1.94[rad]으로 더 증가되었다. Fuzzy 제어인 경우 정상상태에서 약간의 오차를 항상 갖고 있었지만, 이를 최소화하기 위하여

Fuzzy Rule과 표3의 최적한 Scale Factor를 적용한 결과 PD 제어보다 정상상태 편차는 거의 무시할 수 있을만큼 감소되었고, Reaching Time도 25[ms]이상 단축되었으며, Overshoot도 거의 없이 Set Point에 도달하였다.



(a)  $\theta$  파형  
(a) Waveform of  $\theta$   
(4[rad/div], 100[ms/div])



(b) 제어전압 U의 파형  
(b) Waveform of Control Voltage U  
(5[v/div], 100[ms/div])

사진 .1. 퍼지 제어시 실험 결과(부하시)  
Photo.1. Experimental Results at at Fuzzy Control with Load

사진1은 Fuzzy 제어시 실험결과로서, 부하를 부가한 경우 Reaching Time은 192[ms]로 무부하시 보다는 7[ms]정도 늦지만 PD제어보다는 100[ms]이상 빠른 응답을 보이며, Overshoot는 0.16[rad]으로 무부하 보다 0.13[%]정도 증가하였으며, 정상상태의 편차도 -0.10[rad]으로서 무부하 보다는 약간 증가하였지만 PD제어보다는 아주 미소하였다.

즉, Fuzzy 제어의 특성상 정상상태의 잔류편차가 존재하지만 Scale Factor를 조정하므로써 정상상태의 오차를 거의 Zero로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 Reaching Time과 Overshoot도 현저히 감소시킬 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통하여 입증하였다.

표 - 4. 시뮬레이션 결과  
Table-4. Simulation Results

제어	PD Control.		Fuzzy Control.	
	무부하	부하	무부하	부하
R.T.	225	275	200	210
O.V.	0.67	1.94	0.16	0.18
S.E.	-0.14	-0.30	-0.07	-0.10
S.T.	350	500	250	280
O.P.	4.46	12.93	1.06	1.20
S.P.	-0.93	-2.00	-0.47	-0.67

O.V. [rad]:Overshoot, S.E.[rad]:Steady State Error  
R.T. [ms]:Reaching Time O.P. [%]:Overshoot Percentage  
S.T. [ms]:Settling Time S.P. [%]:Steady State Error

표 -5. 실험 결과  
Table-5. Experimental Results

제어	PD Control		Fuzzy Control	
	무부하	부하	무부하	부하
R.T.	223	254	185	192
O.V.	0.71	1.96	0.14	0.16
S.E.	-0.17	-0.28	-0.10	-0.12
S.T.	350	460	220	230
O.P.	4.73	13.07	0.93	0.8
S.P.	-1.33	-1.87	-0.67	-0.80

## VI. 결론

본 논문에서는 먼저 Fuzzy 제어의 기본 Algorithm을 제시하고, Fuzzy 제어의 특성상 부하변동 등의 비선형성에 대해서는 강인성이 뛰어나지만 정상상태의 잔류편차를 갖고있는 단점이 있으므로 이를 보상하기 위하여, Fuzzy 제어의 이론을 바탕으로 하여 PC 80286 Micro-Processor 내에서의 Fuzzy제어 Routine부와 Scale Factor 조정부 및 DT-2801 Data Acquisition Board로 시스템을 구성하여 DC Servo Motor용 Fuzzy 제어를 실현하였다.

또한, Scale Factor CE, CCE 및 CU를 Zero부터 증가시키면서, 각각의 평가지수  $Q_1, Q_2, Q_3$ 의 값이 최소가 되는 최적한 값을 구하였으며, Feedback 제어시 오차와 오차의 변화율에

대한 위상면 궤적에서 표-1의 Fuzzy제어 Rule을 기초로하여 기본제어 Rule을 만든후 Reaching Time을 단축시키기 위하여 초기의 제어량을 양으로 증가시키고, Overshoot를 감소시키기 위하여 정상상태의 제어량을 음으로 증가시키면서 이를 반복 실행하여, 최적한 제어 Rule을 구하였다.

이상의, 실험 및 시뮬레이션을 행한 결과, PD 제어에 비해, Overshoot, Reaching Time 및 정상상태 오차가 현저히 감소되었으며, 특히, 부하를 부가한 경우에도 강인성이 크게 향상되는 등 우수한 동특성 응답이 얻어짐을 확인할 수 있었다.

그러나, 향후 System의 제어Rule을 최적화하기 위하여 Self Organizing 기능을 부가한 제어 방법 및 Neuro-Fuzzy에 의한 제어법이 연구 과제로 남아있다.

## 참고 문헌

1. E. H. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis," IEEE Trans. Comput., vol. C-26, pp.1182-1191, Dec.1977.
2. Witold Pedrycz, Fuzzy Control and System, John Wiley and Sons, N.Y., 1989
3. Mikiyo Maeda et alli, Design of the Self Tuning Fuzzy Controller, Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, pp.393-396, 1990
5. 禹 精仁, 李 浚坡 外, Fuzzy 제어를 이용한 외란부가 Servo System 제어, 대한전기 학회 하계학술대회 논문집, pp. 699-702, 1991
6. Shoji Miyamoto et alli, Predictive Fuzzy Control and its Control to Automatic Train Operation System, Analysis of Fuzzy Information, vol.2, pp.59-72, 1987
7. Shin-Ichi Yamada et alli, A Tuning Method for a Fuzzy Controller, proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, pp.397-400, 1990