

퍼지 집합 이론을 응용한 유압 서보 제어계의 자동 이득 조절

이 교 일

서울 대학교 기계설계학과

나 종 국

서울 대학교 기계설계학과

Auto Tuning of the Hydraulic Servo Control System using Fuzzy Set Theory

Kyo Il Lee

and

Jong Kook Nah

Seoul National University

Seoul National University

A b s t r a c t

The Auto Tuning Controller is designed using Fuzzy set theory. And to verify its validity it is Applied to the Auto Tuner of hydraulic Control System. Fuzzy Tuning Procedures are written by linguistic model and translated into C language formation by preprocessor. Then it is executed with state feedback controller in real time. Fuzzy Logic Controller adjusts state feedback gain by proper tuning logic in each step to satisfy the desired maximum overshoot and settling time.

1. 서 론

L.A. Zadeh에 의해 연구가 시작된 퍼지 집합 이론은 경계가 불분명한 물리적 재현상을 수학적으로 나타내고 이를 처리할 수 있는 구조를 갖고 있기 때문에 인공지능, 의학진단, 경제학, 심리학, 언어학 등에 많이 활용되고 있다. 그 중, E.H. Mandani와 S.Assilian에 의해 (1) 스팀 엔진 플랜트의 제어에 적용되어진 퍼지 논리제어기는 자동 제어 이론에 조작자의 휴리스틱스(Heuristics)를 일상 대화적인 방법으로 이식시켜 적용 제어기의 역할을 할 수 있도록 구성되어 있다. 이러한 제어기는 인간의 경험과 지식을 토대로한 제어논리를 갖고 있기 때문에 실제 조작자가 제어계의 현상을 감지하고 논리적으로 판단하여 다음 순간의 제어량을 추론하는 과정을 그대로 제어기가 대신할 수 있다.

본 논문에서는 서보밸브에 의한 유압식 위치제어기를 그 제어 대상으로 선정하였다. 유압식 서보 제어계는 빠른 응답속도와 높은 강성도, 중량비 출력이 큰 장점을 갖고 있으나 서보밸브의 언더랩, 유량 방정식의 재공급 한, 물통 마찰력 등 강한 비 선형성을 갖고 있어서 선형 제어 이론의 적용에 많은 어려움이 있었다(2).

제어기를 설계할때는 이러한 특성을 갖는 유압제어

계를 블록 박스로 간주한다. 그리고 제어기에서는 제어대상의 특성을 파악하기 위하여 단위 입력 변위를 발생시켜 제어대상을 구동하고 이에따른 시간응답을 검출기를 통하여 받아들인다음 적절한 제어논리, 즉 퍼지 이득 조절기를 이용하여 다음 순간의 이득값을 추론한다. 위와 같은 과정을 원하는 응답이 얻어질 때까지 반복하여 그 때의 이득값을 최적 이득값으로 선택한다.

2. 퍼지 집합 이론

(1) 퍼지 집합의 정의

X를 대상체계의 집합이라 하고, x를 X의 원소 ($X = \{x\}$)라 하면 X의 퍼지 부분 집합 A는 x의 각 원소와 연관된 멤버십 함수 (membership function) $\mu_A(x)$ 로 특징 지워진다. 각각의 값 $\mu_A(x)$ 는 [0, 1]의 범위를 가지며 A에 있어서의 x의 멤버십 등급을 나타낸다. 이때 $\mu_A(x)$ 가 1에 가까워 질수록 A에 있어서의 x의 멤버십 등급이 커지게 된다. 만일 $\mu_A(x)$ 의 값은 0과 1로만 제한 한다면 이는 일반 집합의 특성함수가 된다.

(2) 퍼지집합의 연산

퍼지 집합 A와 B가 주어졌을때 A, B의 기본적인 퍼지 연산은 다음과 같다.

i) A의 차집합 \bar{A} 의 퍼지연산은

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

ii) A와 B의 교집합 $A \cap B$ 의 퍼지연산은

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$$

iii) A와 B의 합집합 $A \cup B$ 의 퍼지연산은

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$$

iv) 집합 $U = \{x\}$ 와 집합 $V = \{y\}$ 의 관계는 $U \times V$

의 직교 곱셈이 되고 이는 $R(x,y)$ 로 특징 지워진다. 그리고 이 관계행렬 $R(x,y)$ 의 퍼지 연산은 $\mu R(x,y) = \min(\mu A(x), \mu B(y))$ 로 정의된다.

v) U에서 V로의 퍼지 관계행렬 R과 U의 퍼지 부분 집합 A가 주어지면 퍼지 부분 집합 B는 다음 식으로부터 추론된다.

$$B = A * B$$

또는, $\mu B(y) = \max\{\min(\mu R(x,y), \mu A(x,y))\}$
x

3. 퍼지 집합 이론의 유압 서보 제어계의 응용

유압 장치의 변위를 제어하는 방법중 상태변수양을 측정하여 이에 최적 이득 값을 곱하여 제어입력값으로 사용하는 방법은 제어대상의 모든 모드를 제어기의 정보로 활용하기때문에 높은 안정성과 빠른 응답성을 갖고 있다. 따라서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 만족할 만한 성과를 얻고있다 (3).

그러나 리카티 (Ricatti) 방정식으로부터 유도되는 최적 이득값은 전기 유압식 제어계의 강한 비선형성 때문에 실험에서 얻은 값과는 많은 차이를 보이고 있다. 게다가 입력 가중 행렬 R과 상태변수 가중행렬 Q의 변경에 따른 시간응답의 변화를 예측하기 곤란할 뿐더러 실제 설계 조건과의 관계도 모호하다. 따라서 만족할 만한 결과를 얻기 위하여서는 상태변수 피이드백 제어기의 이득값을 시간응답을 계속하면서 조작자가 조절하거나, 가중행렬 Q, R의 값을 변경하여 계산되는 최적 이득값으로 반복하여 조절해야 하는 어려움이 있다.

본논문의 주목적은 이러한 이득 조정의 어려움을 해결하기위하여 조작자의 역할을 퍼지 논리 제어기가 대신할 수 있는 제어기를 설계하는 것이다. 이에대한 블록선도를 그림 3.1 에 나타내었다.

그림 3.1 퍼지 로직 제어기의 블록선도

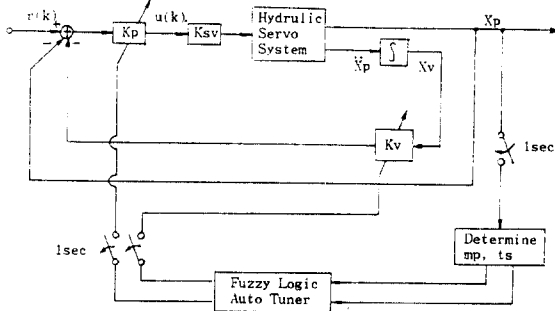


Fig. 3.1 Block Diagram of Fuzzy logic controller

(1) 평가 변수의 퍼지 변수화

본 논문에서는 제어기의 성능을 측정하는 변수로 최

대 과도응답과 정착시간을 택하였다. 이와 함께 개방 이득 (Open loop gain) Kp 와 속도 이득 (Velocity gain) Kv를 조절 변수로 택하였다. 변위이득은 정상 상태 오차를 없애기 위하여 1로 하였다. 이상의 변수들은 퍼지 집합 이론을 응용하기위하여 퍼지 변수로 변환시켜야 한다. 즉 최대 과도 응답 mp, 정착시간 ts, 개방 이득의 변화량 dkp, 속도 이득의 변화량 dkv 들 각각의 부분 집합으로 나누어 준 후 이들에 멤버십값을 적절히 지정하여 준다. 본논문에서 사용한 각 퍼지 변수의 멤버십값은 표 3.1 과 같다. 각 퍼지 변수의 값은 그 변수가 가질수 있는 최대의 값으로 제한하였고 그 멤버십값은 계산의 편리성을 위하여 [0,10]의 정수로 나타내었다.

표 3.1 퍼지 변수의 멤버십 함수

		<u>mp</u>					
Degree-is		6	6				
	varWuniv----#	90	10	105	120	130	140
v1	6	0	0	0	1	5	10
l	6	0	0	1	6	10	2
m	6	0	1	5	10	5	1
s	6	0	3	10	3	0	0
pz	6	5	10	5	1	0	0
nz	6	10	5	1	0	0	0

		<u>ts</u>					
Degree-is		6	6				
	varWuniv----#	40	50	60	100	200	500
v1	6	0	0	0	1	5	10
l	6	0	0	1	5	10	5
m	6	0	1	5	10	5	1
lf	6	1	5	10	5	1	0
f	6	5	10	5	1	0	0
vf	6	10	5	1	0	0	0

		<u>dkp</u>						
Degree-is		7	7					
	varWuniv----#	-500	-100	-10	0	10	100	500
pb	7	0	0	0	0	0	3	10
pm	7	0	0	0	1	4	10	6
ps	7	0	0	0	7	10	3	0
zr	7	0	1	2	10	2	1	0
ns	7	1	3	10	7	0	0	0
nm	7	6	10	4	1	0	0	0
nb	7	10	3	0	0	0	0	0

		<u>dkv</u>						
Degree-is		7	7					
	varWuniv----#	-500	-100	-10	0	10	100	500
pb	7	0	0	0	0	0	3	10

pm	7	0	0	0	1	4	10	6
ps	7	0	0	0	7	10	3	0
zr	7	0	1	2	10	2	1	0
ns	7	1	3	10	7	0	0	0
nm	7	6	10	4	1	0	0	0
nb	7	10	3	0	0	0	0	0

Table 3.1 Membership function of fuzzy variables

퍼지 변수는 물리적 의미를 갖는 6-7 개의 부분집합으로 나누었고 이의 의미는 다음과 같다.

A) mp

- a) vl : very large maximum overshoot.
- b) l : large maximum overshoot.
- c) m : medium maximum overshoot.
- d) s : small maximum overshoot.
- e) pz : positive zero maximum overshoot.
- f) nz : negative zero maximum overshoot.
- g) any : don't care for maximum overshoot.

B) ts

- a) vl : very long settling time
- b) l : long settling time
- c) m : medium settling time
- d) lf : less fast settling time
- e) f : fast settling time
- f) vf : very fast settling time
- g) any : don't care for settling time

C) dkp, dkv

- a) pb : positive big gain change
- b) pm : positive medium gain change
- c) ps : positive small gain change
- d) zr : zero gain change
- e) ns : negative small gain change
- f) nm : negative medium gain change
- g) nb : negative big gain change

(2) 추론 논리 체계의 구성

논리 체계를 구성할 때에는 그 제어계의 특성을 잘 알고 있는 전문가가 추론의 인과 관계를 규정하고 이에 상응하는 추론 프로그램을 작성 하여야한다. 작성된 프로그램은 전처리기 (Preprocessor) 에 의하여 C 언어 형식으로 번역되어 관계 행렬을 만들게 된다. 이러한 정보가 데이터베이스로 기억되어 있고 여기에 입력 정보가 주어지면 추론 논리로 이 정보를 분석하여 적절한 결과를 얻는다. 결국 추론의 정당성은 이러한 추론 논리의 정확성에 기인하는 것이므로 이의 구축이

추론 체계의 핵심이라 할수있다.

본 이득 조절기를 구성할때는 사전 실험을 통하여 각 이득값에 따르는 시간응답을 분석하고 이에 판단을 근거로 이드값을 결정하는 논리 체계를 유도해 내었다.

다음은 위와 같은 분석결과로 도출된 이득 조절 논리 문장이다.

```

-----
' Fuzzy inference logic for hydraulic controller
-----
'
' Fuzzy logics for tuning open loop gain kp
' -----
If mp is nz then if ts is any then set dkp to pb
If mp is pz then if ts is vf then set dkp to zr
If mp is pz then if ts is or(f,or(lf,m)) then set
dkp to ps
If mp is pz then if ts is or(l,vl) then set dkp to
pm
If mp is s then if ts is or(vf,f) then set dkp to
ns
If mp is s then if ts is or(or(lf,m),or(l,vl))
then set dkp to nm
If mp is m then if ts is or(vf,f) then set dkp to
ns
If mp is m then if ts is not(or(vf,f)) then set
dkp to nm
If mp is or(vl,l) then if ts is any then set dkp
to nb
'
' Fuzzy logics for tuning velocity gain kv
' -----
If mp is nz then if ts is or(vf,f) then set dkv to
ns
If mp is nz then if ts is not(or(vf,f)) then set
dkv to nb
If mp is pz then if ts is vf then set dkv to zr
If mp is pz then if ts is f then set dkv to ps
If mp is pz then if ts is or(lf,m) then set dkv to
nm
If mp is m then if ts is not(or(lf,f)) then set
dkv to ps
If mp is l then if ts is not(or(lf,f)) then set
dkv to pm
If mp is vl then if ts is any then set dkv to pb
If mp is or(pz,s) then if ts is or(vl,l) then set
dkv to nb
-----

```

4. 퍼지 논리 제어기의 제작

퍼지 논리 제어기를 이용하여 유압 서보 제어기의 이득을 조절하는 제어기의 전체 구조도는 그림 4.1에 개략적으로 표시되어 있다.

그림 4.1 실험 장치의 구조도

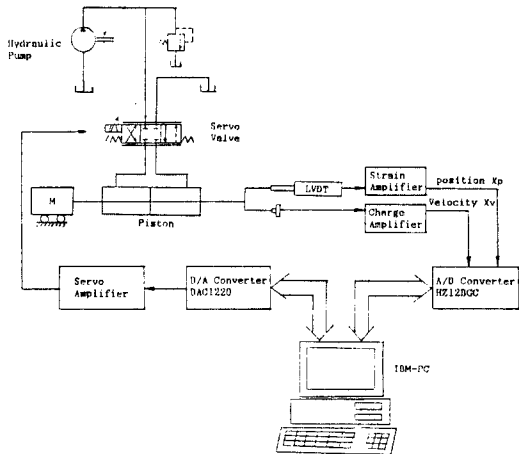


Fig. 4.1 Schematic Diagram of Experiment Equipments

(1) 유압 서보 상태 변수 피드백 제어기

전체 제어계를 2차로 모델링하였을때의 상태변수 변위와 속도들 직선 변위차계(LVDT)와 가속도계를 사용하여 검출하고 여기에 퍼지 논리 제어기에서 주어지는 이득을 곱하여 제어 입력으로 사용한다 (식 4.1).

$$u(k+1) = Kp(r(k) - KvXv(k) - Xp(k)) \quad \text{--(식 4.1)}$$

이 프로그램은 수행속도를 고려해서 어셈블리어로 작성하였고 샘플링 간격은 2msec로 설정하였다. 각 변수는 16비트의 고정 소수점 실수를 사용하였으며 -8에서 8까지의 값을 가질수있다. 속도와 변위량은 A/D 변환기 HZ1200를 사용하여 12비트 디지털 양으로 변환하여 입력하고 계산된 제어량은 다시 D/A 변환기 DAC1220LCN을 거쳐서 아날로그 양으로 출력된다.

(2) 퍼지 이득 조절기

1) 논리 분장 번역 전처리기 (Preprocessor)

논리분장 형식으로 기술된 추론논리를 실행가능한 프로그램으로 변환시키는 부분으로 관계행렬을 만드는 프로그램과 입력 정보로부터 출력 정보를 추론하는 프로그램을 만들어낸다. 예를 들어

" If mp is or(v1,1) then if ts is any then set dkp to nb"

라는 논리분장이 주어지면 이를 번역하여 다음과 같은 두가지 프로그램을 만들어낸다.

a) 관련 행렬을 작성하는 프로그램

```
pxd = fuzor(mp,v1, mp,1);
```

```
pyd = ts.any;
```

```
mr3( pxd, pyd, dkp.nb, &rp[0][0][0][0] );
```

b) 추론 프로그램

```
infr3( dx, dy, &ap[0][0], &rp[0][0][0][0] );
```

위에서 작성된 프로그램은 다시 C 컴파일러에 의하여 수행가능한 프로그램으로 바뀐다. 추론 논리의 형식은 사용자가 이해하기 쉽도록 일상용어와 가깝게 설계하였으며 이의 구조는 실제 추론 논리문과 의미가 없는 형식문으로 구분할 수 있다. 위의 예에서 "If", "is", "then", "if", "is", "then", "set" 등은 실제로는 아무런 역할도 하지 않는 형식상의 단어이며 이에 반해 "mp", "or(v1,1)", "any", "dkp", "nb" 등은 퍼지 논리체계의 요소를 나타낸다. 즉 "mp", "ts", "dkp"는 퍼지변수이며 "or(v1,1)", "any", "nb"는 이에 상응하는 부분집합이다. 이들자로는 기본적인 퍼지연산 "not", "and", "or"를 사용하여 표현할 수 있고 이는 다시 20단계까지 중첩이 가능하다.

2) 물리량의 퍼지 변수화

실제 계측된 물리량은 퍼지변수가 아니지만 추론하는 과정에서 퍼지 변수로 변환 되어야 한다. 실제로 계측량 자체의 오차를 고려하면 이러한 퍼지변수로의 변환 과정이 의미를 갖는다. 물리량을 퍼지양으로 변환시키는 방법에는 정규 분포함수를 이용하는 수가 있으나 본 논문에서는 계산량이 방대해지는 것을 피하기 위하여 각 구간별로 미리 계산하여 놓고 이를 그대로 대입한다.

3) 이득값의 추론

관계 행렬 rp[][][], rv[][][]와 퍼지 변수로 변환된 정보를 이용하여 다음 단계의 이득값을 추론해 낸다. 여기서는 독립 변수가 두개이므로 2차를 확장하여 3차의 추론 공식 (식 4.2)를 이용한다.

$$\mu C(z) = \mu A(x) * (\mu B(y) * (\mu R_{A,B,C}(x,y,z))) \quad \text{--(식 4.2)}$$

이의 max-min 곱 형태는 다음과 같다.

$$dkp(k) = \max_x [\min_y (\min(fdx, \max(\min(fdy, Rmp,dx,dkp))))]$$

$$dkv(k) = \max_x [\min_y (\min(fdx, \max(\min(fdy, Rmp,dx,dkv))))]$$

4) 추론된 퍼지양의 물리량화

일단 계산된 이득의 변화량은 퍼지변수이므로 이를 실제 제어기에 적용하려면 다시 물리량으로 변환시켜야한다. 이때 적용하는 원칙은

a) 각 원소의 값을 비교하여 그 값이 가장 큰 원소와 대응하는 물리량을 선택한다.

b) 단일 두개이상의 원소값이 같으면 이득의 변화량이 작은쪽을 선택한다.

(3) 퍼지 논리 제어계의 순서도

다음에 제어계의 전체적인 순서도를 나타내었다.

그림 4.2 퍼지논리 제어계의 순서도

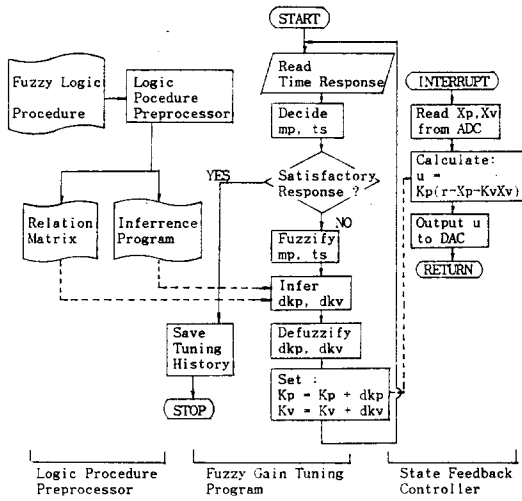


Fig. 4.2 Flowchart of Fuzzy Logic Controller

5. 실험과 그 결과

4.장에서 제작된 상태변수 피드백 제어기와 이득 조절기를 IBM-PC의 MACRO ASSEMBLER와 MicroSoft C Compiler Ver3.00을 사용하여 실현화하여 실험실내의 기존 유압 서보 장치를 제어하였다. 실험은 공급 압력 Ps와 부하질량 M을 변화시키면서 제어기의 성능을 확인하는 순서로하였다.

(1) 실험에 사용한 장비

- a) 유압 펌프 : 종축 피스톤형 (Axial Piston) 이고 최대 토출압력은 140 바, 토출 유량은 회전수 1800 rpm에서 분당 80리터이다.
- b) 서보 밸브 : MOOG 76-104 형으로 최대 허용 전류는 40 mA이다.
- c) 스트레인 증폭기 : PLT-50S 형으로 LVDT에서 계속된 스트레인양을 전압으로 변환시킨다.
- d) 차지 증폭기 (Charge Amp.) : Type 2635, 증폭 계수는 3.16mV/unit
- e) 서보증폭기: Moog 서보 증폭기, 계수는 40mA/5v
- f) A/D, D/A 변환기 : 12비트의 분해능을 갖고 있으며 각각 HZ12BGC, DAC1220LCN을 사용하였다.
- g) 컴퓨터 : IBM-PC/XT Main Memory 640KB

(2) 실험 결과

그림 5.1 이득 조절과정, 경우 1



Fig. 5.1 Tuning process, case1

M=100Kg, Ps=17.5bar, Kp(0)=5000, Kv(0)=-3000

초기에는 과도한 Kp, 음부호의 Kv로 인하여 심한 발진 현상을 보였으나 Kp의 감소, Kv의 증가에 따라 mp와 ts는 계속 원하는 방향으로 감소하였다.

그림 5.2 이득 조절과정, 경우 2



Fig. 5.2 Tuning process, case2

M=100Kg, Ps=17.5bar, Kp(0)=5000, Kv(0)=0

경우 1에서 Kv(0)만 0로 변경하였으며 변하는 추세도 경우 1과 비슷하였다. 8 step만에 원하는 결과를 얻었으며 조절후의 Kv값은 경우 1과 차이를 보인다.

그림 5.3 이득 조절과정, 경우 3

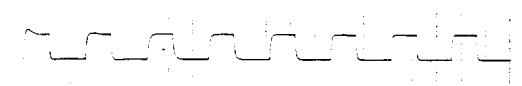


Fig. 5.3 Tuning process, case3

M=50Kg, Ps=50bar, Kp(0)=0, Kv(0)=3000

초기에는 오버 댐프된 응답을 보이고 이 Kv감소, Kp증가로 원하는 방향으로 수렴해간다. mp는 처음에 증가한후 계속 1.07 정도를 유지하고 ts는 점점 감소한다.

그림 5.4 이득 조절과정, 경우 4

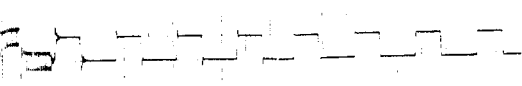


Fig. 5.4 Tuning process, case4

M=50Kg, Ps=50bar, Kp(0)=3000, Kv(0)=-2000

처음의 발진현상이 Kv가 증가함에 따라 사라지고 약간의 과도응답은 Kp를 조금씩 감소시켜 원하는 목표치로 수렴하였다.

그림 5.5 이득 조절과정, 경우 5

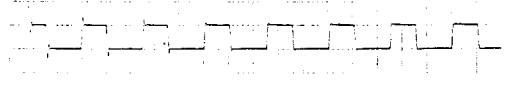


Fig. 5.5 Tuning process, case5

M=50Kg, Ps=17.5bar, Kp(0)=5000, Kv(0)=0

공급 압력이 작아 Kp 값이 커도 발진이 심하지않고 Kp, Kv가 변함에 따라 원하는 응답을 보인다.

그림 5.6 이득 조절과정, 경우 6

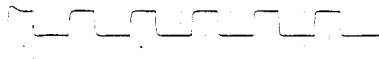


Fig. 5.6 Tuning process, case6

M=50Kg, Ps=35bar, Kp(0)=0, Kv(0)=3000

초기의 오버 댄프된 응답이 Kp증가, Kv감소에 따라 Ts가 점차감소된다.

(3) 실험 결과 분석

제어기를 시험하기 위하여 단위 계단 입력 (크기 1cm, 길이 1sec)을 인가하고 매 단계마다 이득이 변해가는 추세와 이에 따른 응답의 변화 과정을 관측하면서 제어기의 특성을 파악하였다.

1) 최종적으로 조절된 이득의 값은 초기치에 많은 영향을 받는다. 이는 유압 서보 제어계가 본래 안정성이 크고 정상상태 오차가 없는 특성을 갖고 있기 때문에 거의 최적인 상태가 여러 지점에 존재하기 때문이다.

2) 요구하는 사양으로의 수렴과정은 초기이득의 값에 크게 좌우된다.

3) 미세한 조정을 하는 단계에서는 추론논리문의 영향에 따라 이득이 극한값으로 발산하는 경우도있다.

4) 조건을 여러가지로 바꾸어 실험하여도 항상 30 단계 이내에서 수렴한다.

5) 제한조건을 엄격하게 설정하면 최적 이득값을 찾지 못하고 목표점 부근에서 계속 반복한다. 이는 추론논리문 자신을 수정하는 기능은 기능을 추가하면 해결되리라 본다.

6. 결론

본 논문에서는 퍼지집합이론을 응용하여 유압 서보 제어계 피이드백 이득 값을 조절함으로써 제어대상의 조건이 바뀌어도 최적의 상태로 제어할 수 있음을 보였다. 제어기를 설계하는 방법이 수학적 모델링을 필요로 하지 않아서 어느 제어 대상이라도 추론 논리문만 그 대상에 맞게 교체하면 그 대로 사용할 수 있다. 그리고 제어기의 작동원리가 사람의 판단과 추론작용을 모방하였기 때문에 전문가의 지식을 그대로 이식할 수 있는 구조를 갖고 있다. 본 실험의 결과로 인공 지능 기법을 다이나믹 시스템의 제어에 응용하는 가능성을 보였고 그 효용성을 입증하였다. 본 논문에서는 기본적인 추론 기능을 시뮬레이트 하였는데 여기에 자기 학습 기능을 부가한다면 더욱 완벽한 제어가 가능하리라 생각된다. 또한 본 논리제어기의 구조는 제어 대상계통을 블랙 박스로 간주하고 단지 입력력 신호의 시간 응답만을 제어기의 정보로 사용하도록 되어있어

기존의 물리적 지식을 응용하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 평가 변수를 수식을 사용하여 표현할 수 있도록 하고 실제 제어량도 함수의 형태로 계산한다면 이러한 필요성을 만족시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. E.H. Mamdani and S. Assilian, "A case study on the application of fuzzy set theory to automatic control", Preprints of the stochastic control symposium, 1974.
2. 임 현준, "유압 시스템에 있어서 선형 시스템 이론 적용의 한계", 서울 대학교, 1986.
3. 이 동권, "유압 서보 시스템의 위치 제어를 위한 관측-제어기의 실현화 연구", 서울 대학교, 1986.
4. L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Information and Control, 8, 338-353, 1965.
5. Constantin Virgil Negoita, "Expert systems and fuzzy systems", 47-68, The Benjamin Co., 1985.