

非線形 시스템의 強靱한 微細制御를 위한 3-D FUZZY-PID 制御器의 設計

이주훈* 홍석교
아주대학교 제어계측공학과

3-Dimensional FUZZY-PID Controller for Robust Fine Control

of Nonlinear System

Joo-Hoon Lee* Suk-Kyo Hong

Dept. of Control and Instrumentation Eng., Ajou Univ.

(ABSTRACT)

In this thesis, the algorithm of Fuzzy Logic Control (FLC) is applied to the Nonlinear system to implement a system response. Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is also used to control the various systems. Look-up table is applied to decide the control input, and the other look-up table is added for saving memories and inference time. Generally, FLC input variables are error(E) and error derivative(ΔE). In this algorithm, another input variable error's second derivative(Δ²E) is added for Robust Fine control.

제1장. 서론

비선형 시스템의 제어에 있어서 주요 오차 원인은 동역학적 비선형성에 있으며 이는 정밀제어의 한계를 가져오게 된다. 불확실한 비선형, 시변시스템을 강인하게 제어하기 위해 Zadeh[1]가 제안한 퍼지 이론을 제어에 적용한 퍼지논리제어기(FLC)가 이러한 시스템에 효과적으로 적용되고 있다. 시스템의 제어에 널리 이용되고 있는 PID 제어방식은 많은 이득 조정방법들이 제안되어 왔지만 속도와 안정도에 한계가 있을 뿐 아니라 불확실한 환경의 변화나 비선형성에 대처하기 어렵다. 이러한 문제들 때문에 언어적인 제어규칙을 이용하는 FLC가 보다 효과적으로 적용될 수 있다.

FLC는 Mamdani와 Assilian[2]이 보일러의 자동제어에 적용한 이후 여러분야에서 도입되고 있다. 제어변수의 오차와 그 증분에 대한 퍼지 규칙에 근거하여 제어입력을 결정하는 Macvicar-Whelan[3]의 연구 및 이들의 방식과 PID 제어와의 관계를 설정한 Tang [4]의 연구는 FLC 설계의 기본적인 방법을 확립하였다. 그러나 이러한 방법들은 퍼지레벨을 세분화할수록 퍼지규칙의 수가 기하급수적으로 늘어 실시간 제어가 거의 불가능하다는 문제를 안고있다. 이에 Haung[5]은 퍼지규칙을 정량화하여 look-up 테이블화 함으로써 번거로운 추론과정을 제거하여 필요한 기억용량을 감소시킴으로써 실시간 제어의 가능성을 보였으나 역시 정량화단계의 세분성에 제어성능이 의존하는 문제가 있다. Li[6]등은 기존의 look-up 테이블에 미세 제어를 위한 look-up 테이블을 추가하여 DC 서보모터에 적용하였다.

본 논문에서는 불확실한 비선형시스템에 적용하기 위한 PID 제어기의 이득값을 퍼지 규칙으로 조정하는 퍼지-PID 제어기를 설계하였다. 빠른 제어응답을 위해 상승시간에도 도달 때까지와 그 이후의 두 부분으로 나누어 각각 별도의 look-up 테이블을 이용하였고 일반적인 속도형제어에 사용되는 오차와 그 증분의 2가지 제어변수, 오차의 2차 증분을 추가하여 미세제어를 추구했으며, 입력계수를 추가함에 따라 발생하는 소오 메모리의 증가는 3-D 제어규칙 테이블 [7]을 적용하여 최소화하였다. 본 제어알고리즘의 성능을 입증하기 위해 Ziegler-Nichols [8,9] 이득조정방법과 이를 이용한 Zafestas[10]의 퍼지-PID제어알고리즘과 비교하였다.

제2장. Ziegler-Nichols PID 제어기

2-1. Ziegler-Nichols 스텝응답 방식

Ziegler and Nichols는 두 가지 고전적인 PID이득 조정 방법을 제시하였고 지금까지도 널리 이용되고 있다. 첫번째 방법은 시스템의 개루프 스텝응답으로부터 두가지 상수를 결정하게되는데 하나는 응답곡선의 최대기울기직선이 시간 축과 만나는 점 L 이고 또 하나는 y축과 만나는 점 a이다. 이 두상수로 부터 각 계수는 제어기에 따라 각각 표 1.과 같이 결정된다.

Controller	Kp	Ti	Td	Tp
P	1/a			4L
PI	0.9/a	3L		5.7L
PID	1.2/a	2L	L/2	3.4L

표 1. Ziegler-Nichols 스텝응답 방법에 따른 PID 계수 (Table 1. PID parameters according to Ziegler-Nichols Step Response Method)

Tp는 응답곡선의 최대 주기를 나타내며, 제어입력의 변화량은 식(2-1)로 부터 얻게된다.

$$\Delta U_k = K_p [(E_k - E_{k-1}) + (T/T_i) E_k + (T_d/T) (E_k - 2E_{k-1} + E_{k-2})] \quad (2-1)$$

Ek, Ek-1, Ek-2는 각각 시간 k, k-1, k-2에서의 오차이다. 이 방법은 시스템의 모델링이 곤란한 경우에도 적용할 수 있지만 제어성능은 그만큼 떨어지는 문제가 있다.

2-2. Ziegler-Nichols 주파수응답 방식

Ziegler와 Nichols가 제안한 또 다른 방법은 임계이득 kc와 임계주기 tc에 의해 각 계수가 결정되는 것으로 시스템의 모델링이 가능한 경우에 적용될 수 있다. 제어대상 PID 제어기를 포함한 전달함수가 식(2-2)과 같을때

$$T(s) = \frac{K \times K_p \{ 1 + \tau_{is} + (\tau_{is})^{-1} \}}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)} \quad (2-2)$$

계수조정은 다음과 같은 방법으로 한다.

1) 식(2-2)에서 우선 적분항과 미분항을 제거하면 식(2-3) 형태의 특성 방정식을 구할 수 있다.

$$A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4 = 0 \quad (2-3)$$

A1=T1T2T3, A2=T1T2+T1T3+T2T3, A3=T1+T2+T3, A4=1+Kkp이고

2) Routh의 테이블로부터

$$k_c = (A_2 \times A_3 / A_1 - 1) / K \quad (2-4)$$

$$t_c = 2\pi [A_2 / (1 + K \times k_c)]^{1/2} \quad (2-5)$$

3) kc와 tc로부터 표 2.와 같이 계수를 정하게 된다.

Controller	Kp	Ti	Td	Tp
P	kc/2			tc
PI	0.4kc	0.8tc		1.4tc
PID	0.6kc	tc/2	tc/8	0.85tc

표 2. Ziegler-Nichols 주파수응답 방법에 따른 PID 계수 (Table 2. PID Parameters According to Ziegler-Nichols Frequency Response Method)

이 방법의 경우 스텝응답 방법에 비해 향상된 제어성능을 얻을 수 있지만 계수를 결정하는 kc와 tc를 구하기 위해서는 시스템의 모델링이 가능해야하므로 근사적으로 비선형, 시변 시스템에 적용할때는 그 성능에 한계를 갖을 수 밖에 없으며, 모델링이 되었다 하더라도 더욱 정밀한 제어를 위해서는 추가조정을 필요로 한다.

제3장. Fuzzy-PID 제어기

3-1. 제어 규칙의 설계

본 알고리즘에서는 응답속도와 정상상태오차를 줄이는 것을 우선으로하고 아울러 오버슈트를 억제하도록 제어규칙을 설계한다. 또한 퍼지논리를 적용함에 따라 생기는 추론시간 문제를 해결하기 위해 다음과 같이 단계를 나누어 구성한다.

1 단계) 응답의 90%에 도달하기전까지는 미분항을 제외한 Fuzzy -PI 제어를 적용하여 제어규칙의 수를 감소시킴으로써 빠른 제어를 실현한다.

2 단계) 90%에 도달하면서 settling-time을 줄이고 오실레이션을 감소시키기 위해 미분항을 첨가한다.

또한, 미세 제어를 위해 입력의 증분을 제어량으로하는 속도형 제어에서 입력변수로 쓰이는 오차와 오차의 증분에 2 단계에서는 오차의 2차증분을 추가하였다. FLC의 입-출력 변수는 다음과 같다.

$$E_k = \text{setpoint } R - \text{output } Y \quad (3-1)$$

$$\Delta E_k = E_{k-1} - E_k \quad (3-2)$$

$$\Delta^2 E_k = \Delta E_{k-1} - \Delta E_k \quad (3-3)$$

$$\Delta U_k = E_k (KpT/Ti) + \Delta E_k Kp + \Delta^2 E_k (KpTd/T) \quad (3-4)$$

T는 샘플링 시간을 나타내며, FLC에서는 매 샘플링 시간마다 E, ΔE, Δ²E의 언어 변수에 의해 표현되는 「 IF - THEN - 」 형태의 언어 규칙으로부터 Kp, Ti, Td의 언어변수가 추론됨으로써 제어입력이 결정된다. 언어변수를 이용하여 제어 규칙표를 구성하면 표 3, 표 4와 같다. 표 4에서 2/4 분면과 4/4 분면은 Ti에 적용시에는 부호가 반대된다.

		ΔE		
		PL	PS	ZO
E	ZO	NL	NS	ZO
	PS	NS	ZO	PS
	PL	ZO	PL	PL

표 3. 1 단계에서의 제어 규칙 (Table 3. Control Rule of Stage 1)

		ΔE				Δ²E			
		PL	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NL
E	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL
	PM	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL
	PS	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL
	PZ	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL
	NZ	PS	PM	PL	PL	PL	PL	PL	PL
	NZ	PZ	PS	PM	PL	PL	PL	PL	PL
	NS	NZ	PZ	PS	PM	PL	PL	PL	PL
	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PL	PL	PL
	NL	NL	NL	NS	NZ	PZ	PS	PM	PL
	NL	NL	NL	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM
	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL
	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL

표 4. 2 단계에서의 제어 규칙 (Table 4. Control Rule of Stage 2)

표 4와 같은 3-D 테이블을 이용할 경우 필요한 메모리를 N³에서 (N-1)(2N-3)으로 줄일 수가 있게된다. [7] 변수의 세분화에 따른 소요메모리는 표 5와 같다.

No. of Quantization Levels	Memory locations required		
	Standard N³	3D (N-1)(2N-3)	%Memory Saved
8	512	91	82.2
10	1000	153	84.7
12	1728	231	86.6
14	2744	325	88.2
16	4096	435	89.4
20	8000	703	91.2

표 5. PID look-up 테이블에 소요되는 메모리 (Table 5. Memory space required for PID look-up table)

표 5로부터 3개의 입력 변수를 사용하더라도 3-D 테이블을 적용할 경우 메모리와 속도에 큰 부리를 주지 않고도 변수를 세분화 할 수 있음을 알 수 있다.

3-2. 입-출력 변수의 퍼지화 (fuzzify)

제어규칙의 언어변수를 퍼지화하기 위해서는 멤버십 함수를 도입한다. 여기서는 추론과정을 컴퓨터로 처리하기 쉽도록 Mamdani[2]가 제안한 이산형 멤버십함수를 이용하며 이

를 위해 단계별 입-출력 변수를 표 6, 표 7과 같이 정량화 하고, 각 정량화 단계에 해당하는 이산치 멤버십 함수는 표 8, 표 9와 같이 정의 할 수 있다.

E(*)	ΔE(*)	ΔU	Level
40<E	20<ΔE	4	4
20<E	10<ΔE	3	3
1<E	5<ΔE	2	2
1<E	.05<ΔE	1	1
0<E	0<ΔE	0	0
		-1	-1
		-2	-2
		-3	-3
		-4	-4

표 6. 변수의 양자화 - 1 단계 (Table 6. Quantized Variables - Stage 1)

E(*)	ΔE(*)	Δ²E(*)	ΔU	Level
12.5<E	6.25<ΔE	3.125<Δ²E	4	4
6.25<E	3.125<ΔE	1.5<Δ²E	3	3
3.125<E	1.5<ΔE	.75<Δ²E	2	2
1.5<E	.75<ΔE	.375<Δ²E	1	1
0<E	0<ΔE	0<Δ²E	0	0
-75<E	-3.75<ΔE	-1.7<Δ²E	-0	-0
-1.5<E	-75<ΔE	-3.75<Δ²E	-1	-1
-3.125<E	-1.5<ΔE	-75<Δ²E	-2	-2
-6.25<E	-3.125<ΔE	-1.5<Δ²E	-3	-3
-12.5<E	-6.25<ΔE	-3.125<Δ²E	-4	-4

표 7. 변수의 양자화 - 2 단계 (Table 7. Quantized Variables - Stage 2)

Linguistic Variables	Quantized					Levels			
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
PL	0	0	0	0	0	.1	.4	1	
PS	0	0	0	0	.3	.8	.6	.2	0
ZO	0	0	0	.2	1	.2	0	0	0
NS	0	.2	.6	.8	.3	0	0	0	0
NL	1	.4	1	0	0	0	0	0	0

표 8. 이산치 멤버십 함수 - 1 단계 (Table 8. Discrete Membership Function - Stage 1)

Linguistic Variables	Quantized					Levels			
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
PL	0	0	0	0	0	0	0	.4	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	.4	.6
PS	0	0	0	0	.1	.8	.6	.2	0
PZ	0	0	0	0	.1	.2	0	0	0
NZ	0	0	0	.2	1	0	0	0	0
NS	0	.2	.6	.8	1	0	0	0	0
NM	.6	.8	.4	0	0	0	0	0	0
NL	1	.4	0	0	0	0	0	0	0

표 9. 이산치 멤버십 함수 - 2 단계 (Table 9. Discrete Membership Function - Stage 2)

3-3. Defuzzify

추론된 제어 입력의 언어변수를 시스템에 가해주기 위해서는 전압으로 바꾸어 주어야 하는데, 이러한 과정을 defuzzify라하며 본 알고리즘에서는 가장 널리 쓰이는 무게 중심법(COG)을 채택한다. 일반적으로 무게중심법은 식(3-1)과 같이 정의 한다.

$$I = \frac{\sum (\mu_n \times U_n)}{\sum \mu_n} \quad (3-1)$$

여기서 I는 제어입력, U는 정의 역, n은 적용규칙, μ는 멤버십 함수를 나타낸다. 표 3과 표 4의 언어적 제어 규칙을 테이블로 만들면 표 10, 표 11과 같다.

		ΔE				
		4	3	2	1	0
E	0	-4	-3	-2	-1	0
	1	-3	-2	-1	0	1
	2	-2	-1	0	1	2
	3	-1	0	1	2	3
	4	0	1	2	3	4

표 10. 1 단계제어를 위한 테이블 (Table 10. Table for Stage 1 Control)

< 참고 문헌 >

[1] L.A.Zadeh, "Fuzzy Sets", Information Control, Vol.8, pp338-353, 1965.
 [2] E.H.Mamdani and S.Assilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", Intl. J.Man-Machine Stud., Vol.7, ppl-13, 1975.
 [3] P.T.Macvicar-Whelan, "Fuzzy Sets for Man-Machine Interaction", Intl.J.Man-Machine Stud., Vol.8, pp687-689, 1976.
 [4] K.I.Tang, "Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller Designs", IEEE Trans. on SMC, Vol.SMC-17, No.6, Nov/Dec., 1987.
 [5] F.H.Haung, "Efficient Computer Implementation of a Rule-Based Three-Term Controller", Proc. of the 27th conf. on Decision and Control, Dec., 1988.
 [6] Y.F.Li, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Control Systems Magazine, April, 1989.
 [7] G.M.Abdelnour, C.H.Chang, F.H.Huang, and J.Y.Cheung, "Design of a Fuzzy Controller Using Input and Output Mapping Factors", IEEE Trans. on SMC, Sep/Oct., Vol.21, No.5, pp952-960, 1991.
 [8] J.G.Ziegler and N.B.Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. ASME, 64, pp759-768, 1942.
 [9] K.J.Astrom and T.Hagglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", Instrument Society of America, 1989.
 [10] S.Zafestas and N.P.Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control", Trans. on Industrial Elec., Vol.37, pp365-371, 1990.

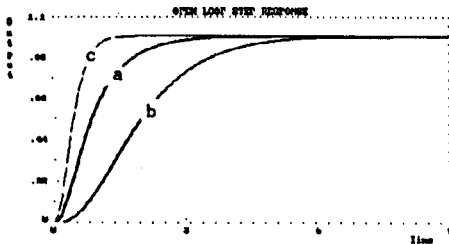


그림 1. 시스템의 개루프 스텝응답곡선
 (Fig 1. Open-Loop Step Response Curve of System)

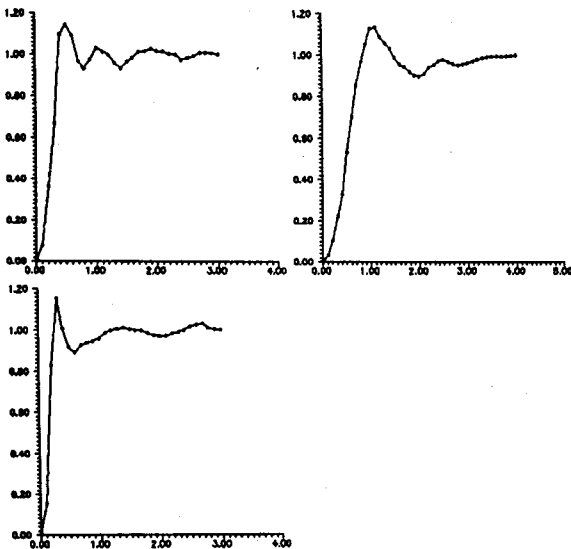


그림 3. Ziegler-Nichols 주파수응답 방식에 의한 응답곡선
 (Fig 3. Response Curve of Ziegler-Nichols Frequency Response Method)

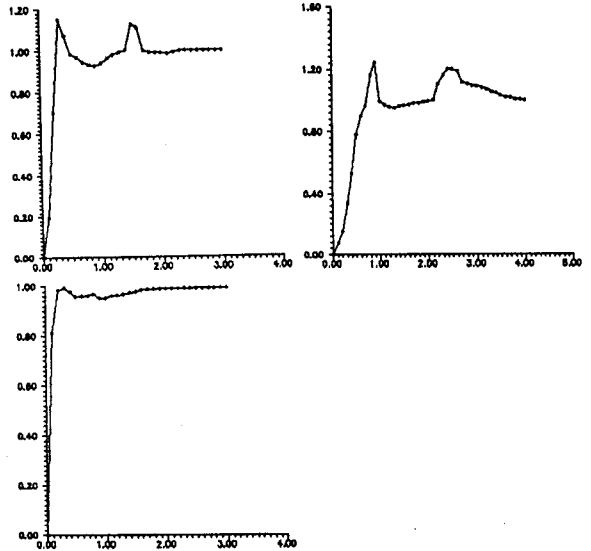


그림 4. 퍼지 Ziegler-Nichols 방식에 의한 응답곡선
 (Fig 4. Response Curve of Fuzzy Ziegler-Nichols Method)

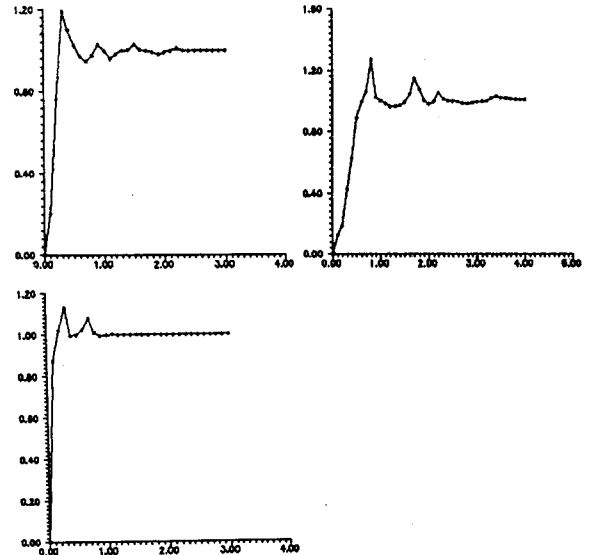


그림 5. 3-D 퍼지-PID 방식에 의한 응답곡선
 (Fig 5. Response Curve of 3-D Fuzzy-PID Method)