'91 韓國自動制御學術會議論文集 1991. 10.22~24

Servo Systems에 대한 Fuzzy Control Algorithm의 연구

李 壽欽* 鄭 源鎔 李 鉉雨 朴 昌大

慶南大學校 電氣工學科

Development of Fuzzy Control Algorithm for Servo Systems

Lee Soo-heum · Chong Won-yong · Lee Hyun-woo · Park Chang-dae

Dept. of Elect. Eng. Kyung-Nam Univ.

ABSTRACT

This paper discusses the possiblity of applying fuzzy logic controller in a microprocessor - based servomotor controller, such as servomotor position controller, which requires faster and more accurate response compared with other industrial processes. According to the fuzzy control rule made by the analysis of error and error change, one Look-up table that contains various quantized step is made and appropriate initial error change is selected to the good responses.

1. 서 론

서보모터(servomotor)는 많은 자동 제어계에서 프린터(printer), 레코더(recorder) 그리고 로보틱 매니퓰레이터(robotic manipulator) 등 산업 자동화에 많이 사용된다.지금까지는 서보모터(servomotor)가 통상 PID 제어기(controller)에 의해 제어되고 있다. 이러한 알고리즘(algorithm)은 제어계가 요구하는 속도와 정확도에 한계가 없다면 충분히 효과적일 것이다.

제어동작을 최적화하는 통상의 방법은 PID계수를 조정하는 것이지만 환경의 변화 또는 계의 비 선형성에 대처할 능력은 없다. 또한 입-출력 관계를 수학적으로 모델링(modeling)하는데 어려움이 따른다. 만일 모델링(modeling)이 되었다 하더라도 실 시간내에 계산하는 데는 무리가 따른다. 이러한 문제들 때문에 인간의 지능을 제어계에 도입한 퍼지 알고리즘(Fuzzy algorithm)이 보다 효과적일 수 있다. 퍼지 알고리즘(Fuzzy algorithm)은 직관과 경험을 바탕으로 발견을 돕는 결정 집합(decision set) 또는 경험에의한 법칙을 사용한다. 이러한 비 수학적인 제어 알고리즘(algorithm)은 컴퓨터에 의해 쉽게 해석될 수 있다.

따라서 80년대 이후 계통의 자동 제어를 위해, 일반적 응용 가능성이 크고 정확히 모델링할 수 없는 계통을 제어하기 위해 전문가 지식을 기반으로한 FLC(Fuzzy Logic Controller)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FLC에 관한 연구로서 제어 변수의 편차와 그 증분에 대한 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)에 근거하여 제어 입력을 결정하는 MacVicar-Whelan [1]의 연구와 이들이 제시한 제어기 구성과 고전적인 PID제어와의 관계를 설정한 Tang [2]의 연구가 있다. 잘 알려진 위 방식의 문제점은 퍼지 레벨(Fuzzy Level)을 세분화 (r-level) 함에 따라 입력결정에 요구되는 퍼지 규칙(Fuzzy Rule) 의 수가 r^n(n : Fuzzy Logic 에 투입된 변수의 수)으로 추론과정에서 많은 시간이 소요되므로 실 시간 제어에 어려움이 있다는 것이다.

1988년 Haung [3]은 이 문제의 해결을 위해 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)을 정량화하여 룩업(Look-up)화 함으로써 추론과정을 제거하여 이에 필요한 기억용량의 크기(Memory size)를 감소시키는 동시에 실 시간의 가능성을 보였다. 그러나 이 기법은 각 정량화 단계에 대응하는 미리 설정된 제어 입력을 선택함으로 인해 정량화 단계의 세분화 정도와 제어성능이 상충적 관계를 갖는다는 단점이 있다.

이에 대한 개선방안으로 Li [4] 등은 기존의 룩업 테이블(Look-Up Table) 과 미세 제어(Fine Control)를 위한 룩업 테이블(Look-Up Table)을 추가로 사용하여 비교적 시간응답이 빠른 계통으로 간주되는 DC 서보모터(Servo Motor)를 룩업 테이블(Look-Up Table) 방식으로 오버슈트가 없도록 제어하여 그 유용성을 입증하였다. 본 논문에서는 입-출력 및 편차변화의 경향을 분석하여 퍼지(Fuzzy) 제어칙을 만들고 정량화 단계에 변화를 주어 하나의 룩업 테이블(Look-up Table)을 만듬과 동시에 초기 편차 변화를 적절히 선정함으로써 컴퓨터 메모리 용량을 줄이고 양호한 제어 성능을 갖도록하는 FLC의 설계법을 제안하고자 한다.

2. Servo Motor의 제어를 위한 F L C 구성

서보 모터(Servo Motor) 의 FLC를 도입할 수 있는 제어규칙의 형태는 다양하나 본 연구에서는 오버슈트 없는 빠른 응답특성을 얻기 위해 PD 형태의 제어규칙을 사용한다. 그러나 PD 형태의 제어규칙에 의한 제어는 어느 정도 정상상태 편차를 갖게 되며, 이를 제거하기 위해서 편차가 미리 규정된 등급의 범위를 미세하게 분류하였다.

일반적으로 FLC를 위한 제어규칙을 구성하기 위해서는 입력 변수와 출력 변수의 선정이 요구되며, PD 형태의 제어규칙의 경우 이들은 편차와 편차의 변화량 및 제어 입력이다. 본 논문에서 고찰한 서보 모터(Servo Motor)는 한 회전당 360개의 펄스(pulse)를 발생하는 증분(Incremental) 형태의 인코더(Encoder)를 갖고 있으며 모터 구동에 필요한 증폭기는 ± 30 [V] 범위의 전압을 발생한다. 따라서 FLC 의 입-출력 변수가 취할 수 있는 범위는 각각 다음과 같이 선정한다.

E = Setpoint - Output ——> -180 ~ 180
CE = E_2 - E_1 ——> - 40 ~ 40 (단, 초기값은 E/2)
U = Control Input ——> - 30 ~ 30

여기서 E_1 은 전단계의 편차이며 E_2 는 현재의 편차를 나타낸다.

2.1 Fuzzy Logic

퍼지(Fuzzy) 부분집합 이론은 매우 복잡한 이론들을 포함하고 있지만, 본 논문에서 사용되어지는 퍼지 제어 알고리즘(Fuzzy control algorithm)에 전개되는 이론은 2 개의 정의 형태로 사용되어지고 있으며, 이러한 2개의 정의는 결정 표(decision table)를 만들기 위함이다.

(1) u (A OR B) = max ($u_A(x)$, $u_B(x)$).
(2) u (A AND B) = min ($u_A(x)$, $u_B(x)$).

2.2 제어규칙의 설계

제어 대상에 인가되는 입력은 매 샘플(Sample) 시각마다 편차와 편차의 변화량으로 부터 결정될 수 있으며 이는 다음과 같은 If - Then 형태의 언어 규칙(Linguistic Rule)에 의해 표현된다.

IF (E = LP and CE = SP) THEN (U = LP)

여기서 LP, SP 등은 언어 값(Linguistic Value) 이고 각 각의 입력 변수에 대해 5단계의 언어 값(Linguistic Value)을 정의한다.

* Large Positive (LP)
* Small Positive (SP)
* Zero (ZE)
* Small Negative (SN)
* Large Negative (LN)

위에서 정의한 언어 값(Linguistic Value)을 사용하여 오버슈트가 없는 응답특성을 갖게 하는 제어규칙은 전형적인 PD 제어기의 응답 형태로부터 구할 수 있으며 이를 나타내면 표 1.과 같다.

표 1. Fuzzy Control Rule.

Error \ Change of Error	LN	SN	ZE	SP	LP
LN	LN	LN	LN	SN	SP
SN	LN	SN	SN	ZE	LP
ZE	LN	SN	ZE	SP	LP
SP	LN	ZE	SP	SP	LP
LP	SN	SP	LP	LP	LP

표 1.의 언어 값 (Linguistic Value(LN, SN, ZE, SL, SN))을 퍼지(Fuzzy)화 하기위해서는 멤버쉽 함수(Membership Function)를 도입해야 하며 여기서는 제어규칙을 룩업 테이블(Look-Up Table)화 하기때문에 Mamdani [5]가 이용한 이산치(Discrete) 형태의 멤버쉽 함수(Membership Function)를 사용한다. 이를 위해 입-출력 변수를 양자화 하면 표2.와 같고, 각 양자화 단계에 해당하는 이산치 멤버쉽 함수(Discrete Membership Function)를 정의하면 표 3.과 같다.

표.2 Quantized Variables (Fuzzy Control)

E	EC	U	Quantized Level
- 180이하	- 40 이하	- 30	- 5
- 72이하	- 20 이하	- 20	- 4
- 30이하	- 10 이하	- 12	- 3
- 12이하	- 5 이하	- 6	- 2
- 5 이하	- 2 이하	- 2	- 1
- 5 초과 ~ 5 미만	-2 초과 ~ 2미만	0	0
5 이상	2 이상	2	1
12이상	5 이상	6	2
30이상	10 이상	12	3
72이상	20 이상	20	4
180이상	40 이상	30	5

표 3. Discrete Membership Function

Linguistic Set	Quantized Levels										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
LP	0	0	0	0	0	0	0	0	.2	.6	1
SP	0	0	0	0	0	0	.4	.8	.8	.4	0
ZE	0	0	0	.2	.6	1	.6	.2	0	0	0
NS	0	.4	.8	.8	.4	0	0	0	0	0	0
NL	1	.6	.2	0	0	0	0	0	0	0	0

표 1.의 언어 규칙(Linguistic Rule)에 의해서 정의한 멤버쉽 함수 (Membe-rship Function)를 도입한후 Braae [6] 등이 제시한 최소 - 최대 합성(Min-Max Composition)을 이용하면 다음과 같은 멤버쉽 함수(Membership Function)를 갖는 퍼지(Fuzzy) 관계를 얻을 수 있다.

$$I = \sum_{1}^{n} (u_n \times U_n) \; / \; (\sum_{1}^{n} u_n)$$

여기서 I는 제어 입력, u는 멤버쉽 함수(Membership Function), n은 규칙 (rule) 수 , U_n은 제어 입력의 대표 값이다. 위의 과정을 통해 표 1.의 언어 규칙(Linguistic Rule)을 룩업 테이블(Look - Up Table)로 만들면 표 4. 와 같다.

표4. Control을 위한 Look - Up Table

E \ EC	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-4	-3	-2	1	3
-4	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-2	0	1	3
-3	-5	-4	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	1	3
-2	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	1	2	3
-1	-5	-4	-3	-2	-2	-1	0	1	2	3	4
0	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	-4	-3	-2	-1	0	1	2	2	3	4	5
2	-3	-2	-1	0	1	2	2	2	3	4	5
3	-3	-1	0	1	2	3	3	3	4	4	5
4	-3	-1	0	2	3	4	4	4	4	4	5
5	-3	-1	2	3	4	5	5	5	5	5	5

전체 제어계를 나타낸 블록(Block) 선도는 그림 1. 과 같다.

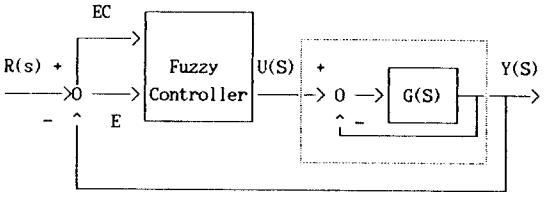


그림 1. Block 선도

3. 시뮬레이션

DC 모터(motor)와 관성부하(antenna dish)를 갖는 다음과 같은 제어 대상에 대해 설계한다.

moment amplification k_T = 1.088 [Nm / A]
electrical amplification k_e = 1.1 [V / rad / sec]
armature properties L_a = 10[m H], R_a = 3.5 [Ω]
inertia moment of the load and the motor J=0.0945[kg-m^2].
이 값들과 외란을 고려하면 제어 대상의 전달함수는 다음과 같다. [4]

$G(S) = 1 / [S (1 + S / 4) (1 + S / 350)]$

기계적 시정수 0.25초에 비해, 전기적 시정수 0.0028초는 무시할 수 있으므로 간단히 하면,

$G(s) = k / s (s + 4)$ 이다.

$G(s)$를 부분분수 전개하면 다음과 같다.

$G(s) = (k / 4) [(1 / s) - 1 / (s + 4)]$.

여기서 샘플링(sampling) 주기 T를 0.25[sec]로 하고 k를 1 로하면(안정하기 위한 k의 범위는 ; $k < 25.31$)
이 시스템(system)의 Z 변환 은
$G(z) = 0.158\ z / [(z - 1) (z - 0.368)]$ 이다.

폐루프 전달함수는 다음과같다.
$M(z) = Y(z) / R(z) = G(z) / [1 + G (z)]$
이때 제어 입력의 합을 R(z)라 하면

$$R(z) = \sum_{n=0}^{k-1} U(n)\, Z^{-n}$$ 이고, 여기서 U(n)은

nT (T = 0.25)에서의 제어 입력이다.
또한

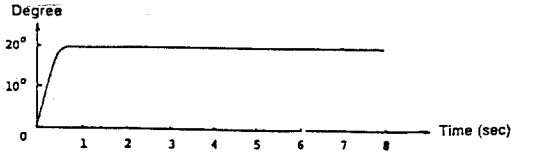
$$Y(z) = \frac{0.158\ z}{(z - 1)(z - 0.368) + 0.158\ z} R(z)$$ 이고,

차분 방정식으로 표시하면

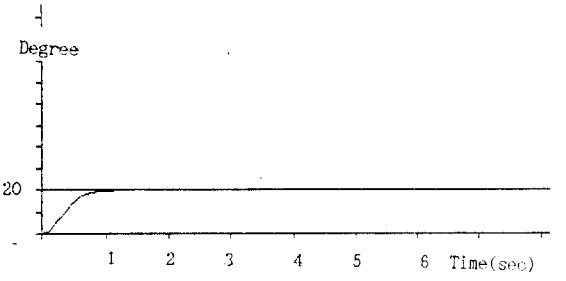
$$Y(k) = 1.21Y(k-1) - 0.368Y(k-2) + 0.158 \sum_{n=0}^{k-1} U(n)\, R\,(k-n-1)$$

이다. 단, $R(k-n-1) = \begin{cases} 1, & k - n - 1 \geq 0 \\ 0, & k - n - 1 < 0 \end{cases}$

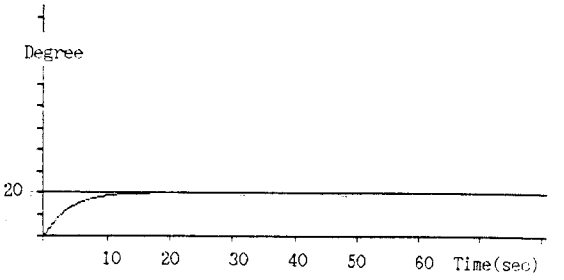
계통의 응답특성은 그림 2. 와 같으며 오버슈트 없이 목표값을 잘 추종함을 알 수 있다.



(A)



(B)



(c)

그림 2. 문헌(4)의 응답 (A), 본 알고리즘에 의한 응답 (B), 제어 대상만의 응답 (C)

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다. 퍼지(Fuzzy) 제어는 알고리즘을 형성하는 자세한 수학적인 모델링을 요구하지 않으므로 더 많은 적용 능력을 가지고 있고, 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)을 정량화하여 룩업 테이블(Look-Up Table)화 함으로써 서보 모터(Servo Motor)의 위치 제어에 대한 실 시간 제어의 가능성을 보였다. 또한 오버슈터(Overshoot)를 억제 하고 정상편차를 감소시키기 위해 편차(error)가 적절한 범위내에 들어 왔을시는 별도의 룩업 테이블 (Look-up Table (fine control))이 필요하나, 본 논문에서는 하나의 룩업 테이블(Look-up Table)을 사용하고 초기 편차 변화율을 적절히 선정(편차의 1/2) 함으로써 컴퓨터 메모리 용량을 감소시키는 동시에 실 시간 제어의 가능성을 보였다.

그러나 룩업 테이블(Look-up Table)의 적절한 수정, 최적 제어칙의 발견, 정상 편차의 제거방법 등이 앞으로의 과제로 남는다.

참 고 문 헌

[1] P. J Macvicar - Whelan," Fuzzy sets for man-machine interaction, " Intl. J. Man - Machine Stud, vol. 8, pp 687 - 697, 1976.

[2] K. l. Tang," Comparing Fuzzy Logic with classical controller designs," IEEE Transactions on SYSTEMS, Man and CYBERNETICS, vol. SMC - 17, No. 6, NOVEMBER /DECEMBER 1987.

[3] F. H. Haung," Efficient Computer implementation of a rule - based three - term controller, " proceedings of the 27th conference on decision and control. December 1988.

[4] Y. F. Li," Development of fuzzy Algorithms for servo systems, " IEEE Control Systems Magazine, April 1989.

[5] E. H. Mamdani," Application of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant, " Proc. IEEE, vol. 121, pp. 1585 - 1588, 1974.

[6] Braae, M, and Rutherford, d. a, " theoretical and Linguistic aspects of the fuzzy logic controller, " Automatica, vol. 13, pp. 553 - 577.

[7] D. Rutherford and G. Z. Carter, " A Heuristic Adaptive Controller for a Sinter plant," Proc. 2nd IFAC Symp, Johannesburg, 1976.

[8] J. J. Ostergaard, " Fuzzy Logic Control of a Heat Exchanger Process," Internal Report 7601,Electric Power Engineering Dept, Tech.Univ.of Denmark, 1976.

[9] L. A. Zadeh," Fuzzy Sets," Inform. Contr, vol. 8, pp. 338 - 353, 1965.