

Fuzzy 제어를 이용한 외란부가 Servo System 제어

김 태우, 이 오걸, 정 영환, 이 준택
동아대학교

Control of Disturbance Added Servo System Using Fuzzy Controller

Tae-Woo Kim*, Oh-Gul Lee, Hyeng-Hwan Chung, Joon-Tark Lee,
Dong-A University

Abstract

A servo system requires faster and more accurate dynamic responses. Generally a PD control is mainly used to obtain the precision, and in the other hand a fuzzy control to improve the transient response and to cope with the nonlinearity of systems. Recently hybrid control, which is attempted to combine the advantages of PD control and a Fuzzy control was proposed, but this technique requires complicate design procedures. Therefore in this paper, a Fuzzy controller with a series of membership functions, and various sampling periods and rules, was designed on the basis of Lyapunov stability theory and auto tuning methods of input scale factors. And also it was showed to have the excellent adaptive performances against internal-external disturbances and the usefulness of this controller from the results of simulations.

1. 서론

1970년대 Microprocessor의 급격한 발전과 더불어 Microprocessor Based Controller는 Analog Controller에 비해 부하외란, Process의 비선형성 및 Plant parameter 등의 환경 변화에 대응할 수 있는 지능 제어 Algorithm의 실현이 가능하다. 그러나, 종래의 Digital 제어 Algorithm은 Process의 정확한 수학적 모델이 전제되어야 하고, 제어 환경의 변화나 system의 비선형성을 추종하려면, 많은 계산 시간을 요하는 최적제어, MRAC등 복잡한 이론이 부가되어야 한다. 따라서, 피제어 Process에 대한 실시간 제어는 사실상 불가능하게 된다.¹⁻⁴⁾

이러한 문제의 해결책으로 1965년 Zadeh 교수에 의해 제안된 Fuzzy Set의 개념은 인간의 직관과 경험적 지능, 종래의 제어 기법을 이용한 총체적 제어 시스템의 구성을 가능하게 하였다. 1974년 Mandani의 Steam Engine 제어용 Fuzzy Controller를 선두로 Fuzzy System의 산업화가 가속되고 있다. Fuzzy 제어는 정량적 명제로 구성된 간단한 언어적 제어 Rule을 Software로 실현하여 Fuzzy 추론을 실행하는 것으로 비선형 시스템은 물론, 외란 부가 시스템에서도 적응력이 우수하고, 계산시간의 단축으로 인한 실시간 제어도 가능하다.⁵⁻¹⁰⁾ 특히, 속응력과 정확성이 요구되는 Servo System을 PD제어 하는 경우 정상편차는 적지만 부하변동에 의한 과도응답이 악화되는 문제점이 있다. 또한, Fuzzy 제어는 부하변동에 대해 과도특성은 양호 하지만 정상편차가

존재하는 걸림이 있다. 최근 이와 같은 단점을 상호보완하기 위해 PD 제어와 Fuzzy 제어를 결합한 Hybrid 제어가 제안되고 있으나 실현을 위한 설계가 복잡 해진다. 따라서, 본 논문에서는 Fuzzy 제어기의 Scaling Factor의 Auto Tuning과 Lyapunov의 안정성 이론에 기초하여 Sampling 주기와 Membership 함수의 종류, Width, Rule 수 등을 변화시켰을 때의 제어성능 및 외란 특성에 대해 연구하고자 한다.

2. Fuzzy 제어 Algorithm

Servo System을 제어하기 위한 Fuzzy 제어 시스템의 일반적인 구성은 Fig.1과 같이 사실과 결론을 if-then 형식으로 서술하는 Fuzzy 제어 Rule 부와 Fuzzy 입력으로부터 명확한 Analog 출력을 연산하는 Fuzzy 추론부, 피제어 프로세스로 크게 나눌 수 있다.

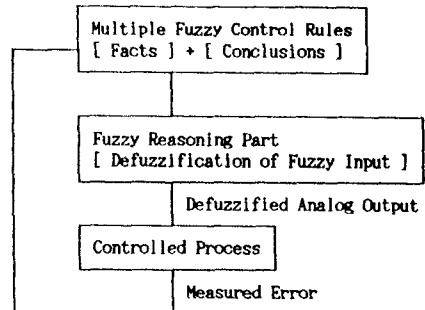


Fig. 1 Block Diagram of Fuzzy Control Algorithm

2.1 Fuzzy 추론

Fuzzy 추론이란, 설정된 Fuzzy 명제로 부터 어느 한 명제를 도출하는 것으로 여기선 대표점 y_0 를 중력 중심법 (the Center of Gravity Method)에 따라 구하는 과정을 말한다. Fuzzy 집합 A의 특성을 나타내는 Membership 함수 μ_A 는 전체집합 U인 단위 폐구간 [0,1]내의 값에 의해 ⁶⁾

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

로 표현된다.

그런데, 전체집합 U가 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, U가 무한집합인 경우

$$A = f_v \mu_A(X)/X \quad (3)$$

로 표현된다.

이상에서의 기본적인 Fuzzy 집합의 개념에 근거하여 Fuzzy 명제로 부터, 어느 한 명제를 도출하는 추론법에는 전제 조건족으로 부터 결론족을 추론하는 Rule형 전향추론법과 Fuzzy관계방정식의 모델화에 기초한 Fuzzy Expert System으로 불리는 후향 추론법이 있다. 그러나, 중간정도의 애매한 평가를 적극적으로 이용한 대부분의 산업용시스템은 Rule형 전향 추론법에 근거하고 있다. 본 논문에서는 Rule형 전향 Fuzzy추론법을 채용한다. 이는 if - then 형식의 Rule로 표현되는데 if 뒤에는 전제조건 또는 전건부인 사실과 then 뒤에는 후건부 또는 조작부인 결론으로 구성된다. 이와 같은 사실과 결론에서 정식화된 기술인 Fuzzy 명제의 예는 식 (4)와 같이 표현된다.

Rule : If X is A then y is B	A → B
사실 : X is A'	A'
결론 : y is B'	B'

(4)

단, A,A',B,B'는 전체집합 U의 논 의 명제 X,X',Y,Y'의 부분집합으로 Fuzzy 집합개념에 따른다.

Mandani의 방법에 따른 Fuzzy 추론의 결론 B'는 다음과 같이 구해진다.(3.10)

$$\mu_{A \rightarrow B}(x,y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \mu_A(x) \odot \mu_B(y) \quad (5)$$

$$\mu_{B'}(y) = \vee (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A \rightarrow B}(x,y)) = \odot [\mu_{A'}(x) \odot (\mu_A(x) \odot \mu_B(y))] \quad (6)$$

단, \wedge 는 Min 또는 t norm을 나타내고, \vee 는 Max 또는 s norm (or t conorm)을 나타낸다.

그리고, B'의 대표점 y_0 는 U가 무한집합일 경우,

$$y_0 = \frac{\int_U y \cdot \mu_{B'}(y) dy}{\int_U \mu_{B'}(y) dy} \quad (7)$$

로 되고, U가 유한집합일 경우

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_{B'}(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{B'}(y_i)} \quad (8)$$

로 표현되며 이는 Defuzzification 연산치이다.

2.2 Membership 함수의 발생 Algorithm

기본적 Membership 함수를 발생시키기 위한 모형은 Fig.2와 같다.

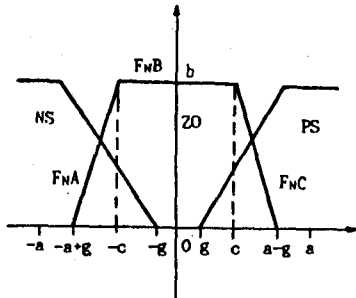


Fig.2 Algorithm for Generation of Triangular or Trapezoidal M.F.

Fig.2는 $-a+g \leq x < -c$ 의 부분과 $-c \leq x < c$ 부분, $c \leq x < a-g$ 의 3부분으로 구분된다.

3. Servo system에의 적용

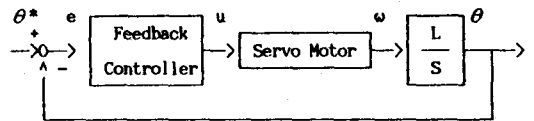
3.1 Rule의 생성 Algorithm 및 Membership 함수

Fuzzy Controller를 설계하기 위해 일반적인 Rule의 생성이 전제되어야 한다.

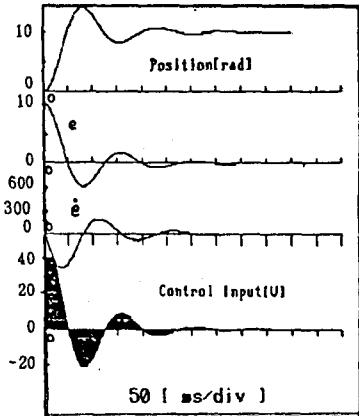
따라서, Fig.3과 같은 DC Servo Motor의 Feedback 제어시 나타난 결과에 근거하여 제어 Rule을 생성시키며, DC Servo Motor와 같이 제어대상의 구조적 성질 및 Parameter의 모든 값을 알고있을 경우에는 Lyapunov 함수를 이용하여 안정성을 가진 Rule을 결정할 수가 있다. 또한, 시뮬레이션에 사용한 DC Servo Motor의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$L_s \frac{di_a}{dt} + R_s i_a + k_b \theta = U \quad (9)$$

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



(a) Servo System



(b) Dynamic Responses

Fig.3 DC Servo System with Feedback Controller and Its Dynamic Responses

단,

θ^* : 각도의 지령치 [rad]

θ : 각도의 측정치 [rad]

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

$\dot{e} = d/dt(e_{now} - e_{old})$: Change rate of error

이다. 한편 목표치에 대한 위치편차율 $e = \theta^* - \theta$ 또한,

조작량 u 는 e 및 \dot{e} 의 상태보다 퍼지 추론을 이용하여 결정되므로, 다음과 같은 비선형함수로 표시된다.

$$u = g(e, \dot{e}) \quad (11)$$

따라서, 식(9)와(10)에서 폐루프계가 안정하게 되도록 퍼지 제어 규칙을 결정해야 한다. 따라서, 다음과 같은 Lyapunov 함수를 고찰 하므로서 안정성을 판별할 수가 있다.

$$V(e, \dot{e}) = \frac{1}{2}(e^2 + \dot{e}^2) \quad (12)$$

여기서, $e = \dot{e} = 0$ 이되는 $V(e, \dot{e}) > 0, V(0, 0) = 0$ 이다. 식(12)를 시간미분하면,

$$\frac{dV}{dt}(e, \dot{e}) = (e\dot{e} + \dot{e}\ddot{e} - \frac{B}{J}\dot{e} + \frac{K}{J}u)$$

$$\dot{e} = V(e, \dot{e}) = e - \frac{B}{J} \dot{e} + \frac{K}{J} u \quad (13)$$

로 된다. 따라서, 제1, 제2상항($e > 0$)에 있어서는

$$\dot{e} > \frac{J}{B} e + \frac{K}{B} u \quad (14)$$

로 되며, 제3, 제4상항($\dot{e} < 0$)에 있어서는

$$\dot{e} < \frac{J}{B} e + \frac{K}{B} u \quad (15)$$

이 성립하면 $\dot{V} < 0$ 으로 되고, Lyapunov의 안정성 정리에 의해 폐루프계가 안정하게 된다. 여기서, 위치편차 e 와 속도편차 \dot{e} 에서 전진부의 언어값 으로서 PB-NB를 설정한다. Fig.3(b)로부터 overshoot와 undershoot를 제거하기 위해 발생된 제어 Rule은 Table 1과 같다.

Table 1 Generated Rule Table

	e							
	u	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB						NB		
NM						NM		
NS						NS		
ZO		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS						PS		
PM						PM		
PB						PB		

여기서 사용된 약어는 다음과 같다

- NB : Negative Big
- NM : Negative Medium
- NS : Negative Small
- ZO : Zero
- PS : Positive Small
- PM : Positive Medium
- PB : Positive Big

4. Simulation 결과 및 고찰

Simulation에 사용한 DC Servo Motor의 사양은 Table 2와 같으며, Fuzzy 제어 System의 구조는 Fig.4와 같다.

Table 2. Specification of DC Servo Motor

$R_a = 7.5 [\Omega]$	$L_a = 0.013 [H]$
$J = 0.0004 [Kg \cdot cm \cdot sec^2]$	$B = J/0.05128 [kg \cdot cm \cdot sec]$
$K_b = 0.17 [V/rad \cdot s^2]$	$K_t = K_i = 1.65 [kg \cdot cm/A]$
Rated Voltage $U = 40 [V]$	

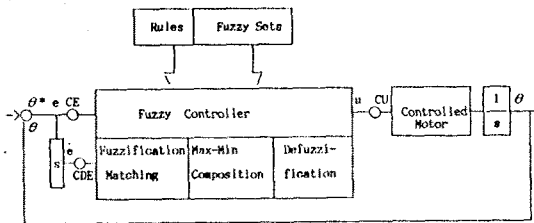
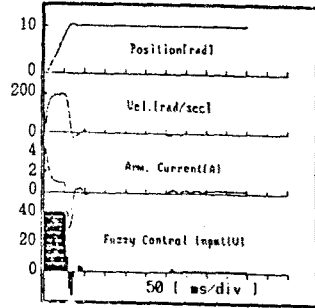


Fig.4 Block Diagram of DC Servo System with Fuzzy Controller

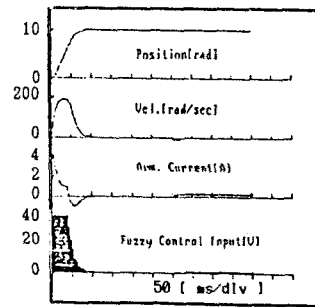
CE 및 CDE, CU는 각각 오차 e , 오차의 변화율 \dot{e} , 제어입력 U 에 대한 가중계수로써 설정되는 값이다.

Fig.5는 샘플링 주기 T_s 로 5[ms]로 하고, Table 1의 Rule을 이용한 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이 때 제한 입력 U_{max} 는 DC 4 [V]로 하였고, 0.3[sec] 이후에서 $R = 5[\Omega]$ 로 하고, $T_1 = 0.5 \cdot \sin 377t$ 내.외부의란을 부가하였다.

- Rule 1 : If e is ZO and e' is NS then u is NS
- Rule 2 : If e is ZO and e' is ZO then u is ZO
- Rule 3 : If e is PS and e' is PS then u is PS
- Rule 4 : If e is PS and e' is ZO then u is PS



(a) $c=1.5, 4$ Rules



(b) $c=0.5, 7$ Rules

Fig.5 Dynamic Responses for Rule-Based Fuzzy Controller

Fig.5(a)와 (b)는 각각 4개의 Rule을 적용한 결과로써 Fuzziness 정도를 나타내는 c 를 0.5에서 1.5로 증가시켰을 때 정정시간이 70[ms]에서 60[ms]로 약 10[ms] 짧아지게 되나 약간의 overshoot가 발생되고, Fuzzy집합이 Crisp집합으로 가까워지게 특수화되는 경우 overshoot는 더욱 커지게 된다. 또한, Rule수가 많아지면 overshoot는 감소되나 정정시간 및 입력이 약간 증가하며, 정상상태에서 잔류편차량이 감소됨을 알 수 있다.

여기서 c 를 감소시켜도 Rule수가 적은 경우 불안정하며 Rule수가 증가하더라도 c 가 증가하면 Bang-Bang 제어에 응용되는 Crisp 집합에 가깝게 되어 불안정하게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 Fuzzy제어기의 Scale Factor의 Auto Tuning과 Membership 함수의 종류, Width, Rule수 등이 변화된 Fuzzy 제어기는, 종래의 이론에 근거한 최적 제어기나 PD와 Fuzzy이론을 이용한 Hybrid 제어보다도, 정정시간 및 overshoot의 면에서 우수한 동특성을 나타내는 것으로 확인되었다. 내,외부 외란 부가시는 샘플링 주기가 적절하면 Rule 수의 변화에 큰 영향을 받지 않고, MRAC나 외란적용 최적제어 없이도 외란 적응력이 우수하였다. 그러나, 샘플링 주기가 어느 정도 이상 증가하면 Rule 수를 증가 시키더라도 시스템은 불안정하게 되었다.

그러나, 향후 입력 Scale Factor 및 Rule의 최적화를 위한 실시간 학습법 등이 연구과제로 남아있다.

참 고 문 헌

1. Witold Pedrycz, Fuzzy Control and System, John Wiley and Sons, N.Y., 1989
2. 菅野道夫, Fuzzy 制御, 日刊工業新聞社, 1988
3. 寺野壽郎 外, Fuzzy System 入門, Ohm社, 1988
4. Mikio Maeda et alii, Design of the Self Tuning Fuzzy Controller. Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, pp.393-396, 1990
5. 朴政用, 崔恒輔 譯, 퍼지시스템의 응용입론, 大英社, 1990
6. 水本雅晴, Fuzzy論理と 近似的 推論, 數理科學別冊, vol.10, pp.101-112, 1988
7. Shoji Miyamoto et alii, Predictive Fuzzy Control and Its Control to Automatic Train Operation System, Analysis of Fuzzy Information, vol.2, pp.59-72, 1987
8. Shin-ichi Yamada et alii, A Tuning Method for a Fuzzy Controller, proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, pp.397-400, 1990
9. Okihito Ishizuka et alii, Optimum Control Based on Fuzzy Inference and Its Simulation, Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, pp.61-64, 1990
10. Madan M, Gupta et alii, Approximate Reasoning in Expert System, Elsevier Science publishers B.V., 1985