

직류 서보 모터용 퍼지 제어기의 실현에 관한 연구

(Implementation of the Fuzzy Controller for DC Servo Motor)

李五杰* · 宋鎬臣* · 李浚柝** · 禹靖仁***

(Oh-Geul Lee · Ho-Shin Song · Joon-Tark Lee · Jung-In Woo)

요 약

본 논문에서는 신속하고 정확한 동특성 응답이 요구되는 직류 서보 모터의 위치제어용 퍼지제어기의 실현 문제가 다루어 진다. 제안된 퍼지제어기는 PC 80286 마이크로프로세서와 DT 2801 데이터 획득 보드에 의한 최적 스케일 팩터 조정부와 퍼지제어 루틴부로 구성된다. 직류 서보 시스템에의 적용 결과, 종래의 PD 제어기등에 비해 도달시간과 오버슈트, 외란특성등의 제어 성능이 크게 향상된다.

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. Fuzzy position controller implemented with 80286 microprocessor and DT 2801 board consists of an adjustment routine of optimal scale factors and a Fuzzy inference routine of optimal control signals. Comparing to conventional PD controllers, the control performances of proposed Fuzzy controller such as reaching time, overshoot, and disturbance adaptability are substantially improved.

1. 서 론

최근 과학의 발달과 더불어 인간이 행하던 제어를 마이크로프로세서 등의 자동화 설비에

의해 행하고 있으며, 자동화가 가속됨에 따라 제어 대상의 모델화가 어렵고 비선형성이 높을 경우, 더욱 제어하기 어려워 지고, 제어장치만 복잡하게 된다. 특히, 고속이며 고정도를 요구하는 자동화 설비등에 필수적인 직류 서보 모터의 일반적인 제어에서는 PD제어, PID제어, 최적제어 등을 이용하고 있지만, 주위 환경에 따른 외란에 대한 적응성이나 시스템의 비선형

* 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

*** 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

성 때문에 많은 계산 시간이 요구되는 최적제어, 적응제어 등 복잡한 이론이 부가되어야 하는 문제점을 안고 있다.¹⁾

그러나, 1965년 Zadeh 교수가 제안한 퍼지 집합의 개념과 1973년 Zadeh가 복잡한 시스템의 해석과 제어에 퍼지집합의 이용 가능성을 제안한 이후 퍼지 알고리즘은 선형 특성인 시스템은 물론 비선형 특성 또는 시스템의 정확한 동특성의 기술이 어려운 시스템에 대해서도 적용 가능하였다.^{2,3)}

또한, 퍼지제어는 PID제어등의 고전적 제어기에 비해 비선형 시스템에서는 유연한 제어성을 발휘하고 있으나, 최적 Rule의 선정 및 제어 측정변수의 양자화 Level 선정등에 있어 많은 문제점이 지적되고 있다. 또한, 최근 Nobumoto氏 등에 의한 퍼지 하이브리드제어는 과도특성을 개선하기 위한 퍼지제어와 정상특성을 개선하기 위한 PD제어를 병용한 것으로 각각을 단독으로 행한 경우보다 좋은 성능을 나타내고 있다. 그러나 이는 파라메타나 부하 변동에 대한 외란 특성이 나쁘고 오버슈트 및 정상상태에서의 잔류편차가 존재하는 결점이 있다.^{4,5,6)}

따라서, 본 논문에서는 이상에서 지적된 문제점을 해결하기 위해, 퍼지제어 이론을 바탕으로 하여, PC 80286 마이크로프로세서 내에서의 퍼지제어 루틴부와 스케일 팩터 조정부 및 DT-2801 데이터 획득 보드로 구성하여 직류 서보 모터 구동용 퍼지제어기를 실현하였다.

먼저, 최적 Rule의 선정은 기본 퍼지 Rule을 기초로 하여, 초기의 퍼지 제어량을 양으로 증가시켜 오버슈트가 감소 되도록 하는 등의 반복학습에 의해 구한다. 그리고, 최적 스케일 팩터 조정법은 초기 스케일 팩터의 값을 변화시켰을때, 오차와 오차의 변화율 및 제어량에 대한 도달시간과 오버슈트 및 오차의 자승합으로 된 평가지수의 최적한 값으로부터 각각 구하고자 한다.

이를 직류 서보 모터의 위치제어에 적용하였을 때의 제어성능 및 외란 특성을 실험 및 시

뮬레이션으로 고찰하고, 정상상태의 위치편차라든가 도달시간, 오버슈트 등의 동특성이 종래의 제어기에 비해 강인성 있는 우수한 제어기임을 입증하고자 한다.

2. 퍼지 제어 Algorithm

서보 시스템을 제어하기 위한 퍼지제어 시스템의 일반적인 구성은 그림 1과 같이 사실과 결론을 If-Then 형식으로 서술하는 퍼지제어 Rule부와 퍼지 입력으로부터 명확한 Analog 출력을 연산하는 퍼지 추론부, 피제어 프로세스부로 크게 나눌 수 있다.

퍼지 추론이란, 몇가지의 퍼지 명제들로부터 어느 한 명제를 도출 해내는 것으로 퍼지관계의 합성규칙에 의한 직접법과 퍼지 진리치를 이용하는 간접법이 있으며 본논문에서는 직접법에 의해 비퍼지한 대표점 y_0 를 중력 중심법⁷⁾에 의해 구하는 과정을 말한다. 퍼지 집합 A의 특성을 나타내는 Membership 함수 μ_A 는 전체집합 E인 단위 폐구간 [0,1]내의 값에 의해

$$\mu_A : E \Rightarrow [0,1] \quad (1)$$

로 표현된다.

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

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

로 되고, E가 무한집합인 경우

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

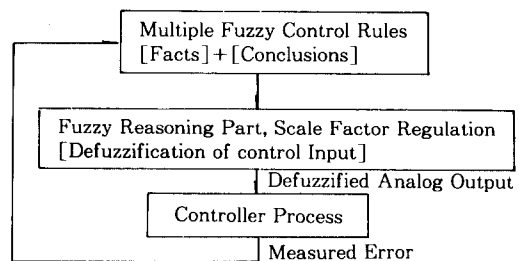


그림 1. 퍼지제어 알고리즘의 블록선도
Fig. 1. Block Diagram of Fuzzy Control Algorithm

로 표현된다.

퍼지추론에 있어서 중간정도의 애매한 평가를 적극적으로 이용한 대부분의 산업 응용 시스템은 Rule형 전향 추론법에 근거하고 있다. 본 논문에서는 Rule형 전향 퍼지 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 퍼지 명제의 예는 식(4)와 같이 표현된다.

i th Rule : If x_1 is A_i and x_2 is B_i then y is C_i	$A_i \times B_i \rightarrow C_i$
전 제 : x_1 is A' and x_2 is B'	$A' B'$
결 론 : y is C'	C'

(4)

단, $A_i, A', B_i, B', C_i, C'$ 는 전체집합 E의 論議 領界(Universe of discourse) X, X' Y, Y의 부분집합으로 퍼지 집합개념에 따른다.

Mamdani의 방법에 따른 퍼지 추론의 결론 C' 는 다음과 같이 구해진다.

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

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

$$\cup (A_n \text{ and } B_n \rightarrow C_n) = (A' \text{ and } B') \circ (R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n)$$

$$= [A' \circ (A_1 \rightarrow C_1) \cap B' \circ (B_1 \rightarrow C_1)] \cup \dots \cup [A' \circ (A_n \rightarrow C_n) \cap B' \circ (B_n \rightarrow C_n)] \quad (5)$$

$$\mu_{A_i} \times \mu_{B_i}(x_1, x_2) = \mu_{A_i}(x_1) \wedge \mu_{B_i}(x_2) \quad (6)$$

식(6)에서 기호 \wedge 는 t norm을 나타낸다.⁸⁾ 그러므로,

$$C_i(y) = \max_{X_1} \max_{X_2} [\mu_{A_i}(x_1) \wedge \mu_{B_i}(x_2) \wedge \mu_{C_i}(y)]$$

$$= \max_{X_1} [\mu_{A_i}(x_1) \wedge \mu_{A'}(x_1)] \wedge \max_{X_2} [\mu_{B_i}(x_2) \wedge \mu_{B'}(x_2)] \wedge \mu_{C_i}(y) \quad (7)$$

로 되고, $A_i, B_i, C_i(i=1,2,\dots,n)$ 는 퍼지 집합으로 각각의 멤버십 함수 $\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_i}(x_2), \mu_{C_i}(y)(i=1,2,\dots,n)$ 를 갖는다.

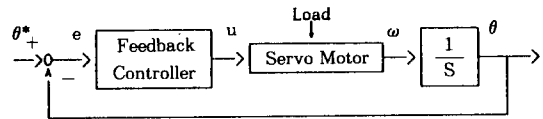
이때 x_1, x_2 의 非 퍼지값 x_{10}, x_{20} 가 주어지면 y의 합성치는 Braae와 Rutherford의 중심법에 의해 y의 추론치 y_0 는 다음과 같이 구할 수 있다.⁸⁾

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(x_{10}) \wedge \mu_{B_i}(x_{20})] \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(x_{10}) \wedge \mu_{B_i}(x_{20})]} \quad (8)$$

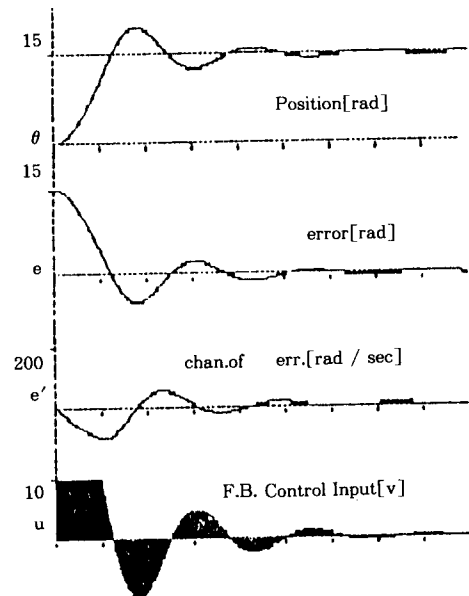
여기서, $y_i(i=1,2,\dots,n)$ 는 멤버십 함수 $\mu_{C'}(y)(i=1,2,\dots,n)$ 가 최대치를 취할 때의 값이다.

3. 서보 시스템의 적용

퍼지제어기를 설계하기 위해 일반적인 Rule의 생성이 전제되어야 한다. 따라서 그림2와 같은 직류 서보 모터의 Feedback 제어시 나타난 결과에 근거하여 제어 Rule을 생성시킨다.⁴⁾



(a) 서보 시스템
(a) Servo System



(b) Dynamic Responses

그림 2. 피드백 제어기의 직류 서보 시스템과 그 응답
Fig. 2. DC Servo System with Feedback controller and Its Dynamic Responses (200[ms/div])

표 1. 기본 규칙표
Table1. Generated Base Rule Table

$\begin{matrix} e \\ u \\ e \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB				NB			
PM				NM			
PS				NS			
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS				PS			
NM				PM			
NB				PB			

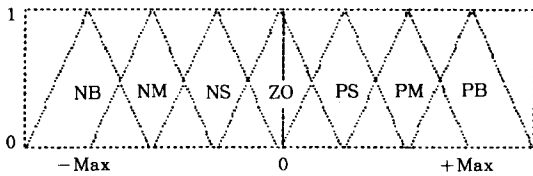


그림 3. e와 e-dot, u의 멤버쉽 함수
Fig. 3. Membership Functions for e, e-dot and u

또한, 시뮬레이션에 사용한 직류 서보모터의 수학적 모델은 다음과 같다.

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

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

단, θ^* : 각도의 지령치[rad]

θ : 각도의 측정치[rad]

$e = \theta^* - \theta$ [rad]

$\dot{e} = de/dt$: Change rate of error

이다. 그림 2(b)로부터 퍼지제어의 기본 Rule은 표1과 같으며, 여기에 사용한 멤버쉽 함수는 그림3과 같다.⁷⁾

멤버쉽 함수는 삼각파 및 사다리꼴등이 있는데 일반적으로 많이 사용하는 삼각파를 이용하였다. 퍼지 제어는 큰 오버슈트없이 목표점에 빨리 도달하지만 목표점의 주위에서 약간의 오차를 항상 가지고 진동이 발생한다는 문제점이 있다. 따라서, 퍼지 제어기의 精度는 적분동작으로 진동을 제거하더라도 PID 제어보다는 좋지 못하다. 또한, 목표점과의 차이가 클 경우에는 퍼지제어가 유리한 반면 목표점에 가까울 경우는 PID제어가 유리하다. 따라서, 어느정도 시간이 지난 후의 진동을 줄이기 위해 퍼지제

어는 평가지수에 의해 최적한 스케일 팩타값을 구하여 제어함으로써 보다 더 정상상태 편차를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 부하 부가시나 외란 등에 견실성을 지닌 제어를 실현 할 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과 고찰

본 시뮬레이션 및 실험에 사용한 직류 서보 모터의 사양은 표2와 같으며, 퍼지 제어기를 가진 직류 서보 시스템의 구조는 그림4와 같다.

그림4는 퍼지 제어기의 블록선로로서 실현을 위하여, PC 80286 마이크로프로세서와 DT 2801 보드를 이용하여 퍼지 제어기를 구성하였으며, 엔코더의 출력 Pulse는 DT 2801 보드의 카운터 및 D/A 콘버터에 의해 컴퓨터의 Memory에 읽어 들이고, 이를 software에 의해 오차와 오차의 변화율을 계산한다. 그리고, 오차와 오차의 변화율에 대한 스케일 팩터 CE와 CCE를 적용한 후 퍼지 Rule의 제어 루틴에서 제어량 U가 계산된다. 그리고, U에 대한 스케일 팩터 CU를 적용한 후, DT 2801 D/A 콘버터에 의해 Power OP AMP의 제어신호로 출력된다. 또한, 외란에 대한 견실성 또는 정상상태

표 2. DC 서보 모터의 사양
Table 2. Specification of DC Servo Motor

$R_a = 1.300[\Omega]$	$B = 0.002727[\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}]$
$J = 0.00016[\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^2]$	$k_T = k_e = 0.086875[\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{A}]$
$K_a = 0.04098[\text{V} \cdot \text{s}/\text{rad}]$	Rated Torque $T_n = 2.35[\text{kg} \cdot \text{cm}]$
Rated Voltage $U_n = 15.0[\text{V}]$	Rated Speed $N_n = 3875 \text{ rpm}$
Rated Current $I_n = 5.56[\text{A}]$	TAMAGAWA SEIKI NO :
Rated Power $P_n = 60[\text{W}]$	TS1415N1
$L_a = 0.00170[\text{H}]$	

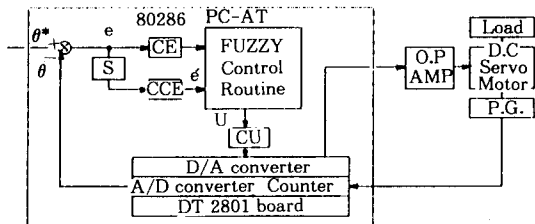
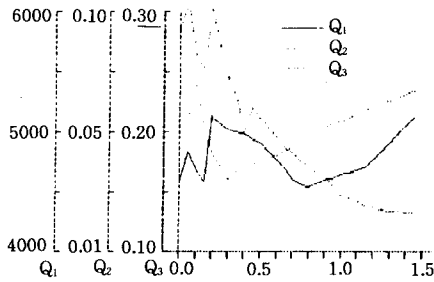
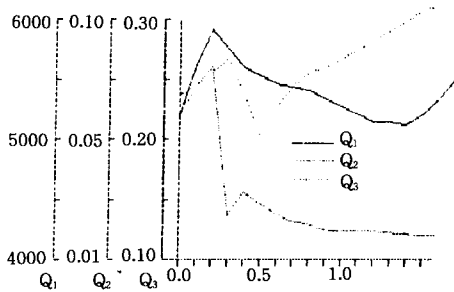


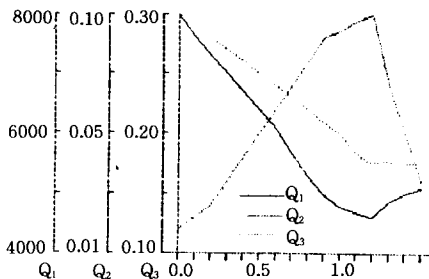
그림 4. 퍼지 제어기를 부가한 직류 서보계의 블록도
Fig. 4. Block Diagram of DC Servo System with Fuzzy Controller



(a) CE의 변화에 대한 Q_1, Q_2, Q_3 의 곡선
(a) $Q_1, Q_2,$ and Q_3 Curves at Various CE



(b) CCE의 변화에 대한 Q_1, Q_2, Q_3 의 곡선
(b) $Q_1, Q_2,$ and Q_3 Curves at Various CCE



(c) CU의 변화에 대한 Q_1, Q_2, Q_3 의 곡선
(c) $Q_1, Q_2,$ and Q_3 Curves at Various CE, CCE and CU

그림 5. CE, CCE, CU의 변화에 대한 Q_1, Q_2, Q_3 의 곡선
Fig. 5. $Q_1, Q_2,$ and Q_3 Curves at Various CE, CCE and CU

의 잔류편차 등의 문제점을 보상하는 방법으로 스케일 팩터를 적용하여 고전제어 방식인 PD 제어와 비교 고찰하였다. 각 스케일 팩터 CE와 CCE 및 CU는 퍼지 제어가 시스템의 최적 성능을 발휘하도록 다음과 같은 3가지 평가지수들을 이용할 수 있다.^{2, 3)}

첫째 시스템 출력과 목표점 θ^* 사이의 제곱 오차의 합은

$$Q_1 = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

이고, 둘째 시스템의 목표점에 상대적인 오

표 3. 최적 스케일 팩터 값
Table 3. Optimal Values of Scale Factors

Scale Factor		
CE	CCE	CU
0.30	0.80	1.20

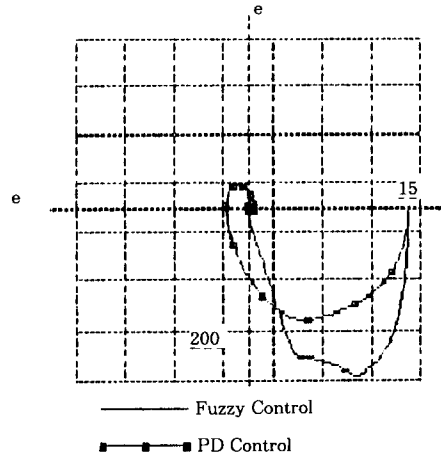


그림 6. e 와 \dot{e} 의 위상면 궤적
Fig. 6. Phase Plane Trajectory of e and \dot{e}

버슈트량은

$$Q_2 = (\text{Sup} \theta(t) - \theta^*) / \theta$$

이며, 셋째 시스템의 응답이 목표점과 동일한 순간 즉, 도달시간은

$$Q_3 = \min[t \mid \theta(t) = \theta^*]$$

로서, 각 스케일 팩터를 가변했을 때 평가지수의 변화를 그림 5에 나타내었다.

그림 5는 CE, CCE, CU를 가변할 때 평가지수의 변화곡선으로서, (a)는 오차 자승합의 평가지수 Q_1 이 0.8에서 최소가 되었으며, 오버슈트의 평가지수 Q_2 는 1.2에서 최소로 되고, 도달시간의 평가지수 Q_3 는 0.3에서 최소로 되었다. CE의 값은 초기 응답에 대해 가장 많은 영향을 미치므로 도달시간이 최소로 되도록 하기 위해 0.3을 선택하였다. (b)는 오버슈트량이 최소가 되도록 하기 위하여 회전각 θ 의 변화에 가장 영향이 많은 Q_2 의 값이 최소가 되는 값으로 0.8을 선택하였다. (c)는 전체의 오차량을 줄이기 위해 CU의 값은 평가지수 Q_1 의 변화가 최소가 되는 1.2의 값을 선택하였다.

표 4. 위상면을 이용한 퍼지규칙 조정
Table 4. Identification of Fuzzy Rule Using Phase Plane

표 (4.b) 초기 퍼지 규칙
Table(4.a) Inital Fuzzy Rule

$\begin{matrix} \cdot & e & \\ e & \cdot & \\ u & & \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB							
PM							
PS				NS			
ZO			NS	ZO	PS		PB
NS							
NM				PS			
NB					PM		

표 (4.b) 개선된 퍼지 제어 규칙
Table(4.b) Modified Fuzzy Rule

$\begin{matrix} \cdot & e & \\ e & \cdot & \\ u & & \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB							
PM							
PS							
ZO			NS	ZO	PS		PB
NS				ZO			
NM					PS		
NB						PM	

이상의 평가지수들을 이용하여 최적의 스케일 팩터를 구할 수 있으며, 그 값은 표3과 같다.

그림6은 e 와 \dot{e} 의 위상면 궤적으로서 Feedback제어시는 원점을 돌면서 오버슈트가 일어나는 것을 볼 수 있으나, 퍼지제어시는 오버슈트없이 바로 원점에 수렴하였다.

표4는 동특성 위상면에 의한 기본 Rule이며, 도달시간을 단축시키기 위하여 $\dot{e}=ZO$ 이고 $e=NM$ 일때 $u=PS$ 를 $e=PS$ 이고 $\dot{e}=NM$ 일때 $u=PS$ 이고 $\dot{e}=NB$ 일때 $u=PM$ 를 $e=PM$ 이고 $\dot{e}=NB$ 일때 $u=PM$ 으로 Rule을 수정하였으며, 오버슈트를 개선하기 위하여 $e=ZO$ 이고 $\dot{e}=PS$ 일때 $u=NS$ 를 $e=ZO$ 이고 $\dot{e}=NS$ 일때 $u=ZO$ 로 수정하여 표4와 같이 퍼지제어 Rule을 개선하여 제어하였다.

일반적으로 P제어는 위치편차의 크기와 비례상수 K_p 의 값에 비례하여 제어전압 u 를 결정하기 때문에 K_p 의 크기에 따라 제어에 큰 영향을 미치므로 K_p 값을 어느정도 이상 증가

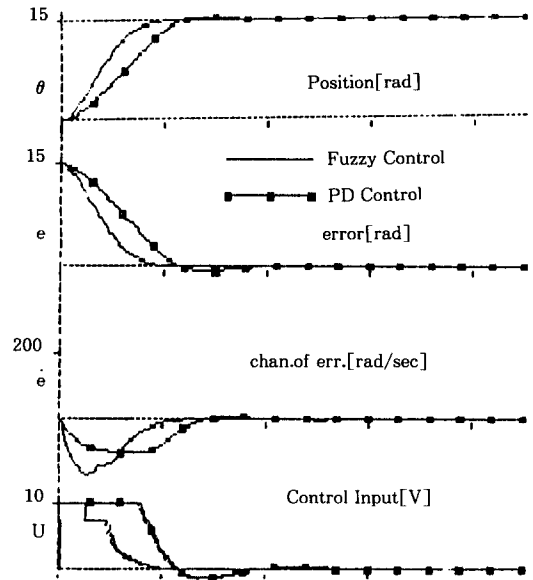


그림 7. PD제어와 퍼지제어시 시뮬레이션 결과(무부하시)[200ms/div]
Fig. 7. Simulation Results at PD and Fuzzy Control without Load

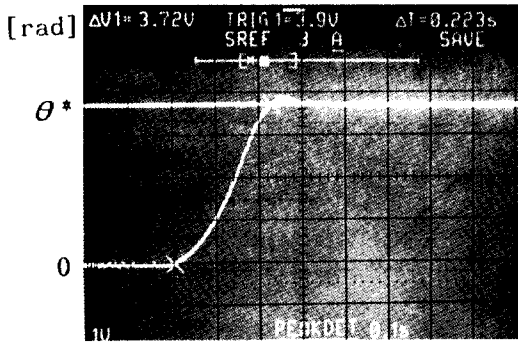
시키면 오버슈트가 크게되는 등의 과도응답이 악화된다. 그러므로 여기에 적절한 PD제어와 퍼지제어를 제안하여 다음에 나타낸다.

그림7은 PD제어와 퍼지제어시의 무부하 응답의 시뮬레이션 결과로 PD제어에서는 퍼지제어보다 오버슈트 및 정상상태 편차가 크게 나타나고 도달시간도 25[ms]정도 늦어졌다.

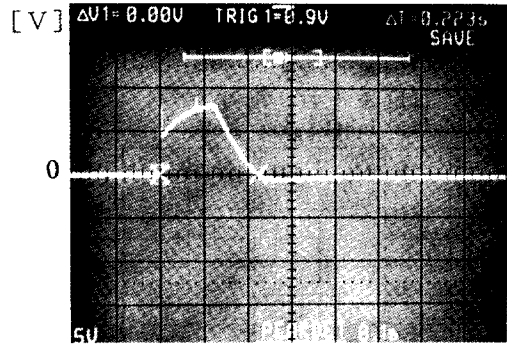
사진1(a)는 무부하시 PD제어의 위치응답 파형이며, 목표점은 15[rad]으로 하고, 비례상수 $k_p=1/(1.50*0.4)$, $k_d=0.001$ 로 하였다. 여기서 오버슈트는 4.73[%]로 나타났으며, 도달시간과 정상상태 편차도 시뮬레이션과 거의 동일하게 나타났다.

사진1(b)는 제어전압 파형으로 정지시 음으로는 최대 1.5[V] 정도가 부가되었으며, 정상상태의 잔류전압도 존재하고 있다.

사진2는 퍼지제어의 실험 결과로서, PD제어보다 도달시간은 185[ms]로 38[ms]이상 단축되었고, 오버슈트도 0.14[rad]으로 3.8[%]이상 감소되었다. 또한 정상 상태 편차도 -0.67[%]로 PD제어시보다 상당히 감소되어 퍼지제



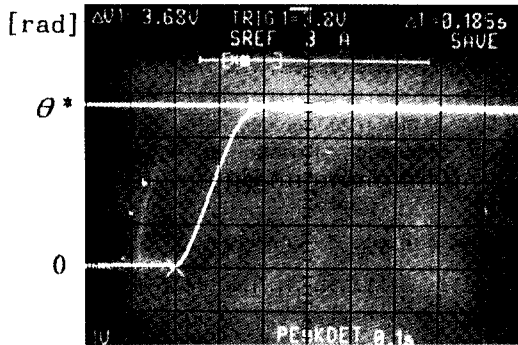
(a) θ 파형
 (a) Waveform of θ
 (4[rad/div], 100[ms/div])



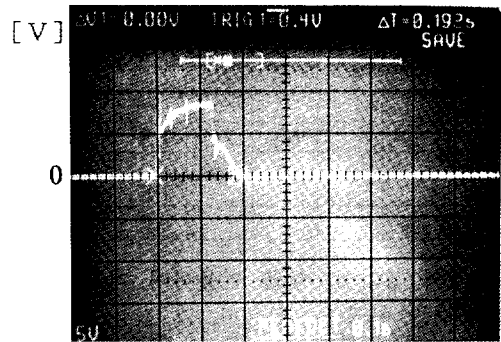
(b) 제어전압 U의 파형
 (b) Waveform of Control Voltage U
 (5[v/div], 100[ms/div])

사진 1. PD제어시 실험 결과(무부하시)

Photo.1. Experimental Results at PD Control without Load



(a) θ 파형
 (a) Waveform of θ
 (4[rad/div], 100[ms/div])



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

사진 2. 퍼지제어시 실험 결과(무부하시)

Photo.2. Experimental Results at Fuzzy Control without Load

어가 우수함을 입증하였다.

그림8은 1.175[kg · cm]의 부하를 부가했을 때 PD제어와 퍼지제어의 응답이다. PD제어의 도달시간은 무부하때보다 50[ms]정도 늦어졌으며, 오버슈트도 1.94[rad]으로 더 증가되었다. 퍼지제어인 경우 정상상태에서 약간의 오차를 항상 갖고 있었지만 이를 최소화하기 위하여 표4(b)의 Rule과 표3의 스케일 팩터를 적용한 결과 PD제어보다 정상상태 편차는 거의 무시할 수 있을만큼 감소되었고, 도달시간도 25[ms]이상 단축되었으며, 오버슈트도 거의 없이 목표점에 도달하였다.

사진3은 PD제어로서 무부하보다 오버슈트가

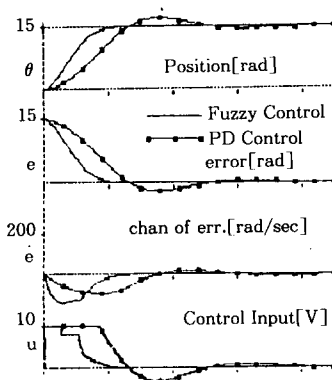
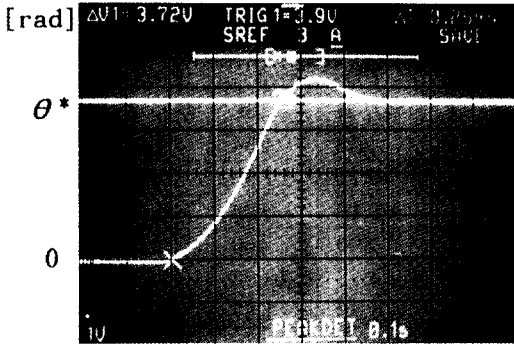
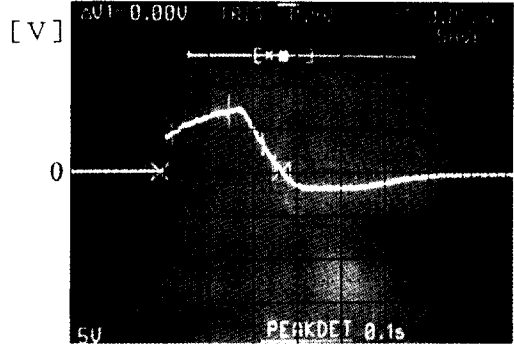


그림 8. PD제어와 퍼지제어시 시뮬레이션 결과(무부하시)[200ms/div]

Fig. 8. Simulation Results at PD and Fuzzy control with Load

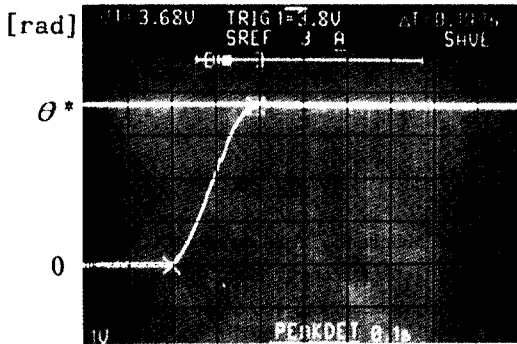


(a) θ 형 파형
(a) Waveform of θ
(4[rad/div], 100[ms/div])

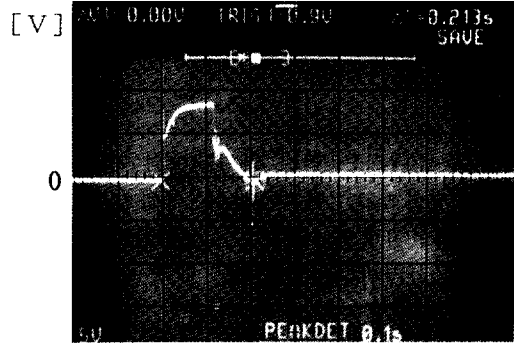


(b) 제어전압 U의 파형
(b) Waveform of Control Voltage U
(5[v/div], 100[ms/div])

사진 3. PD제어시 실험 결과(부하시)
Photo.3. Experimental Results at PD Control with Load



(a) θ 형 파형
(a) Waveform of θ
(4[rad/div], 100[ms/div])



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

사진 4. 퍼지 제어시 실험 결과(부하시)
Photo.4. Experimental Results at Fuzzy Control with Load

8[%]정도 증가되고 도달시간도 30[ms]정도 늦어졌으며, 제어전압도 크게 변동되었다.

사진4는 퍼지제어시 실험결과로서, 부하를 부가한 경우 도달시간은 192[ms]로 무부하시 보다는 7[ms]정도 늦지만 PD제어보다는 100 [ms]이상 빠른 응답을 보이며, 오버슈트는 0.16[rad]으로 무부하 보다 0.13[%]정도 증가하였으며, 정상상태의 편차도 -0.10 [rad]으로서 무부하보다는 약간 증가하였지만 PD제어보다는 아주 미소하였다.

즉, 퍼지제어의 특성상 정상상태의 잔류편차가 존재하지만 스케일 팩터를 조정하므로써 정상상태의 오차를 거의 Zero로 줄일 수 있을뿐

만 아니라 도달시간과 오버슈트도 현저히 감소시킬 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통하여 입증하였으며, 부하를 부가했을 때에도 아주 견실성있는 제어기 특성을 얻을 수 있었다. 이상의 결과를 표5와 표6에 나타내었다.

이상에서 PD제어만인 경우 오버슈트가 나타나고 도달시간과 정상상태 편차도 어느정도 감소되었으나, 퍼지제어에서는 오버슈트가 약 1.0[%] 이하로 거의 나타나지 않았으며, 도달시간도 PD제어보다 25[ms] 이상 단축되었다. 퍼지제어에서는 제어상의 특성 때문에 정상상태 편차가 존재하지만 스케일 팩터의 조정에 의해 충분히 보상할 수 있었으며, 특히 외란이나 부

표 5. 시뮬레이션 결과
Table 5. Simulation Results

제 어	PD Control		Fuzzy Control	
	무부하	부 하	무부하	부 하
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
 R.T.[ms] : Reaching Time
 S.T.[ms] : Settling Time
 S.E.[rad] : Steady State Error
 O.P.[%] : Overshoot Percentage
 S.P.[%] : Steady State Error Percentage

하의 가변시에는 아주 양호한 제어 특성을 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 먼저 퍼지제어의 기본 알고리즘을 제시하고, 퍼지제어의 특성상 부하변동 등의 비선형성에 대해서는 강인성이 뛰어나지만 정상상태의 잔류편차를 갖고 있는 단점이 있으므로 이를 보상하기 위하여 퍼지제어의 이론을 바탕으로 하여 PC 80286 마이크로프로세서 내에서의 퍼지제어 루틴부와 스케일 팩터 조정부 및 DT-2801 데이터 획득 보드로 시스템을 구성하여 직류 서보 모터용 퍼지 제어를 실현하였다.

또한, Feedback 제어시 오차와 오차의 변화율에 대한 위상면 궤적에서 표1의 퍼지제어 Rule을 기초로 하여 기본제어 Rule을 만든 후 도달시간을 단축시키기 위하여 초기의 제어량을 양으로 증가시키고, 오버슈트를 감소시키기 위하여 정상상태의 제어량을 음으로 증가시키면서 이를 반복 실행하여, 최적한 제어 Rule을 구하였으며, 스케일 팩터 CE, CCE 및 CU를 Zero부터 증가시키면서, 각각의 평가지수 Q_1, Q_2, Q_3 의 값이 최소가 되는 최적한 값을 구하였다.

이상의, 실험 및 시뮬레이션을 행한 결과, 퍼지제어자가 PD제어에 비해, 오버슈트, 도달시간

표 6. 실험 결과
Table 6. Experimental Results

제 어	PD Control		Fuzzy Control	
	무부하	부 하	무부하	부 하
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

및 정상상태 오차가 현저히 감소되었으며, 특히 부하를 부가한 경우에도 강인성이 크게 향상되는 등 우수한 동특성 응답이 얻어짐을 확인할 수 있었다.

그러나, 향후 시스템의 제어 Rule을 최적화하기 위하여 Self Organizing 기능을 부가한 제어방법 및 뉴로-퍼지에 의한 제어방법이 연구 과제로 남아있다.

참 고 문 헌

- 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 Pedryca, "Fuzzy Control and Fuzzy Systems", John Wiley and Sons, N.Y., 1989.
- 3) Mikio Maeda, et. all. "Design of the Self Tuning Fuzzy Controller", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, pp. 393-396, 1990.
- 4) Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller-Part I", IEEE Trans., vol.20,no.2, pp404-417 March/April.1990.
- 5) 松永信智, 川路茂保, "DC 모터의 퍼지-하이브리드 제어", 電學論D, vol.111, no.3, pp.195-200, 1991.
- 6) Y.F,Li and C.C, Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE, Control Systems Magazine, pp.65-72, April.1989.
- 7) 禹精仁, 李浚柝 外, "Lyapunov함수를 이용한 Servo System의 퍼지제어", 한국 퍼지학회 추계학술대회 논문집, pp.169-182, 1991.
- 8) M. Braae and D.A.Rutherford, "Fuzzy Relations in a Control Setting", Kybernetes, 7, pp.185-188, 1978.