

적응 퍼지제어기를 이용한 서보 제어 시스템의 정밀제어

(High Precision Control of Servo Control System Using The Adaptive Fuzzy Controller)

조 정 환*

(Jeong-Hwan Cho)

요 약

포화, 릴레이, 히스테리시스, 불감대와 같은 비선형성이 존재하는 자동화 시스템의 정밀제어를 위하여 마이크로프로세서를 이용한 적응 퍼지제어 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 제어 영역을 과도상태 영역과 적응제어 영역으로 분리하였다. 먼저 기준 입력신호와 귀환신호의 주파수 차이에 비례하는 출력전압을 발생시켜서 시스템을 구동하는 주파수 동기 방식을 이용하여 신속한 과도응답을 수행하고, 오차가 설정된 범위 안에 들어오면 퍼지 논리를 이용한 적응 퍼지제어 방식에 의해 시스템을 제어하여 정밀제어를 수행한다. 이론과 실험적인 연구가 수행되었고, 그 결과는 서보 제어 시스템의 정밀제어 성능이 개선되었음을 입증한다.

Abstract

This paper proposes the adaptive fuzzy control system using the microprocessor for high precision control of automation systems which exist non-linearities such as saturation, relays, hysteresis, and dead zones. The proposed system, which provides the improvement in terms of the control region in transient and adaptive control, first used the frequency-locked method driving a system to generate a output voltage proportional to the frequency difference of reference input signal and feedback signal for fast transient response, and when the error reaches the preset value, used the adaptive fuzzy control method using fuzzy logic for precision control. The theoretical and experimental studies have been carried out. The presented results from the above investigation show considerably improved performance in the precision control of servo control systems.

Key Words : fuzzy control, frequency-locked loop, servo control, non-linearity

1. 서 론

실제 사용되는 서보 제어 시스템은 시간에 따라

그 특성이 비선형적으로 변화한다. 이와 같이 변화하는 시스템 특성을 미리 결정된 제어 법칙과 선형 모델링(modeling)만으로 정밀제어를 수행하는 것은 매우 어렵다. 따라서 항상 변화하는 시스템 특성을 파악하고 파악된 특성으로부터 새로운 제어규칙을 구성하는 적응제어 기법이 오래 전부터 연구되어 왔다. 즉, 최근까지 연구되어 온 제어 알고리즘의 대부분은 프로세스(process)의 수학적 모델링에 근거하여 이루

* 주저자 : 김포대학 전자정보계열 조교수
Tel : 031-999-4142, Fax : 031-989-4387
E-mail : jhcho@kimpo.ac.kr
접수일자 : 2002년 3월 27일
1차심사 : 2002년 4월 30일
심사완료 : 2002년 5월 16일

어져 왔다. 그러므로 복잡한 동특성을 갖는 시스템이나 비선형 특성이 존재하는 동적인 환경에서는 기존의 제어 이론으로는 강인한 제어기 구성이 용이하지 못하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 인간의 사고능력과 적응능력을 갖는 지능형 제어기의 필요성이 요구되고 있다[1, 2]. 퍼지논리에 기반을 둔 퍼지 제어 기법은 최근 공정제어 또는 가전, 산업전자 분야에서 활발히 연구 및 응용되고 있다. 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 제어방식으로는 해석할 수 없거나, 입출력 정보가 정성적이고, 부정확하고, 불확실한 경우에 기존의 수학적 모델링을 근거로 한 제어기들보다 우수한 제어결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서, 퍼지제어는 전문가의 지식과 경험을 바탕으로 제어규칙을 언어적으로 쉽게 표현할 수 있으며 시스템의 비선형 특성에 매우 강인한 특성을 갖는다[3, 4]. 한편, 오늘날의 서보 제어 시스템은 그 실용성에 의해서 여러 분야에서 이용되고 있다. 특히 자동화 시스템의 성능을 향상시키기 위해 사용되는 서보 제어 시스템은 마이크로프로세서를 적용하여 시스템의 제어성능을 향상시켰다. 하지만 이러한 제어 방식에 있어서 포화(saturation), 릴레이(relay), 히스테리시스(hysteresis), 불감대(dead zone) 등의 비선형 특성들은 그 특성을 정의하기가 어렵고 시간에 따라 변하기 때문에 시스템을 모델링하고 정밀제어를 구현하는데 많은 장애 요인이 되고 결국 제어성능을 감소시키는 요인이 되고 있다[5, 6].

따라서, 본 논문에서는 자동화 시스템의 제어성능 향상을 위해 주파수 동기 제어와 적응 퍼지제어를 이용하여 과도응답 특성을 개선하고 정상상태 오차를 감소시켜서 서보 제어시스템의 정밀제어를 제안한다. 먼저, 과도응답 영역에서는 주파수 동기 제어기

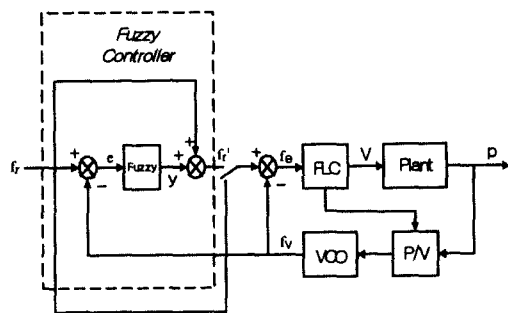


그림 1. 제안된 시스템의 구성도
Fig. 1. Block diagram of the proposed system

(Frequency-Locked Controller : FLC)가 동작하여 기준 입력신호와 귀환신호 사이의 주파수 편차에 직접 비례하는 출력전압에 의해 서보 제어 시스템을 고속으로 구동시킨다. 시스템이 정밀제어 영역에 도달하면 적응 퍼지제어기가 동작하여 비선형 특성을 개선하고 정상상태 오차를 감소시킨다. 시스템의 응답특성과 정확도를 향상시킨 서보 제어 시스템의 정밀 제어를 제안하였고, 실험을 통해 이를 입증하였다.

2. 제안된 제어시스템의 설계

서보 제어 시스템의 정밀제어를 구현하기 위해 주파수 동기 제어기와 적응 퍼지제어기를 설계하여 제안된 시스템은 그림 1과 같이 구성된다.

2.1 적응 퍼지제어기

본 논문에서는 적응 퍼지제어기의 입력변수를 오차(e)와 오차의 변화량(ce)으로 선정하고, 출력변수는 $y(k)$ 로 선정하였으며 아래와 같이 정의한다[3].

$$e(k) = f_r(k) - f_v(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

$$y(k) = F[e(k), \Delta e(k)] \quad (3)$$

$$f_r'(k) = f_r(k) + y(k) \quad (4)$$

여기서, $f_r(k)$ 와 $f_v(k)$ 는 각각 k번째 샘플링시간의 목표값과 플랜트의 출력값이다. $F[e(k), \Delta e(k)]$ 는 퍼지논리에 의한 비선형 함수로서 퍼지화와 퍼지추론, 비퍼지화의 3단계로 구현되며 $y(k) = F[e(k), \Delta e(k)]$ 는 적응 퍼지 제어값이다. 적용된 기준입력 $f_r'(k)$ 는 FLC에 인가된다. 따라서

$$f_e(k) = f_r'(k) - f_v(k) \quad (5)$$

$$\Delta f_e(k) = f_e(k) - f_e(k-1) \quad (6)$$

이고, FLC의 출력은 $v(k)$ 로 플랜트의 입력신호이다. 적응 퍼지제어기의 목적은 플랜트에 비선형 요소가 존재할 때 과도응답의 오버슈트 또는 언더슈트를 보상하기 위해서 기준입력요소를 수정하는 것이다. 이러한 적응 퍼지제어기는 퍼지 제어규칙에 의해서 동작한다. 퍼지 제어규칙은 일반적으로 "If~then~"의

적응 퍼지제어기를 이용한 서보 제어 시스템의 정밀제어

형태를 취하는 n개의 독립적인 제어규칙으로 구성되며, If 부분은 조건(antecedent)을, then 부분은 결과(consequent)를 나타낸다.

$$R_i = \text{If } e \text{ is } E_i \text{ and } \Delta e \text{ is } CE_i \text{ then } y \text{ is } U_i \quad (7)$$

(i = 1, 2, ..., N)

여기서, E_i , ΔE_i , U_i 는 언어적 퍼지변수로서 각각 NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big)의 7개 레벨로 구성되어 있으며, 소속함수는

$$\mu = \{\mu_{NB}, \mu_{NM}, \mu_{NS}, \mu_{ZO}, \mu_{PS}, \mu_{PM}, \mu_{PB}\}$$

이고, 그림 2와 같이 삼각형의 형태로 [0,1]의 구간에서 설정된다.

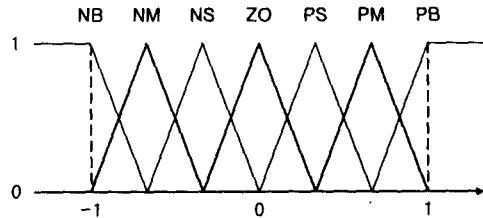


그림 2. 멤버십 함수
Fig. 2. Membership functions

이러한 언어적 제어규칙과 멤버십 함수로부터 출력값을 얻기 위해서는 퍼지추론을 해야한다. 추론방법은 퍼지관계의 합성법칙에 의한 직접법을 사용하였다. i번째 제어규칙의 퍼지관계를 카테시안 곱(catesian product)으로 정의하면

$$R_i = (e_i \times \Delta e_i) \times U_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

$$R = R_1 \vee R_2 \vee \dots \vee R_N = \bigvee_{i=1}^N R_i \quad (9)$$

입력을 e_0 , Δe_0 라고 하면, 출력 U_0 는 이고, 이에 대한 멤버십 함수는

$$U_0 = R \circ (e_0 \times \Delta e_0) \quad (10)$$

$$\mu U_0(u) = \text{MAX}_{e, \Delta e} [\mu R(e, \Delta e, u) \wedge \mu e_0(e) \wedge \mu \Delta e_0(\Delta e)]$$

위식이 퍼지 단일값(singleton) 입력이면

표 1. 적응 퍼지제어를 위한 제어규칙

Table 1. Control rules for adaptive fuzzy control

| $e \backslash \Delta e$ | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | | | | NB | NB | | |
| NM | NB | | | NB | NB | | |
| NS | NB | | | NM | NM | NM | PM |
| ZO | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| PS | NM | | PS | PS | PM | | |
| PM | | | | PM | PB | PB | |
| PB | | | PM | PM | PB | | |

$$\mu U_0(u) = \mu R(e, \Delta e, u) \quad (11)$$

이고

$$\mu R_i(e_0, \Delta e_0, u) = \mu e_i(e_0) \wedge \mu \Delta e_i(\Delta e_0) \wedge \mu U_i(u)$$

라고 정의하면, 추론결과는

$$W_i = \mu E_i(e_0) \wedge \mu \Delta E_i(\Delta e_0) \quad (12)$$

$$\mu U_0(u) = \bigvee_{i=1}^N [W_i \wedge \mu U_i(u)]$$

한편, 제어기 출력을 비퍼지화 방법을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 무게중심법(center of gravity method)을 이용한다

$$y(k) = F[e(k), \Delta e(k)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu U_i(u_i) \cdot u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu U_i(u_i)} \quad (13)$$

2.2 주파수 동기 제어기(Frequency-Locked Controller: FLC)의 설계

제안된 시스템의 주요 구성요소인 FLC는 그림 3과 같이 구성된다. 주파수 오차가 입력되면, D/A(I)($f_e > 0$ 일때)과 D/A(II)($f_e < 0$ 일때)가 마이크로프로세서에 의해서 선택되고 이때의 주파수 오차는 D/A 변환되고 가산기에 의해서 합해져서 $\pm V_0(t)$ 를 출력 한다. FLC의 출력전압 $\pm V_0(t)$ 는 주파수 오차가 선형범위($-f_D < f_e < +f_D$, f_D =최대 선형 양자화 영역)의 주파수에서 존재할 때, D/A 변환기의 최대 출력 전압인 $\pm NP$ (N =multirate sampling number, P =small-voltage step jump) 사이에서 양자화(양자형) 되고, 주파수 오차가 $\pm f_D$ 를 초과 ($f_e < -f_D$, $f_e > +f_D$)해서 변화할 때 FLC의 출력전압은 양

의 최대 출력전압(+NP)과, 음의 최대 출력전압(-NP)을 유지한다(포화형).

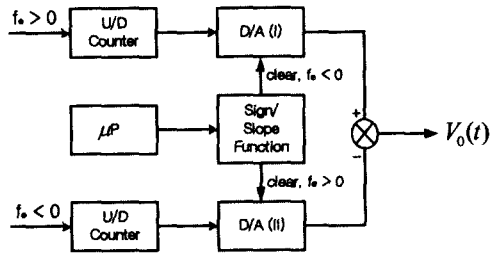


그림 3. 주파수 동기 제어기의 구성도
Fig. 3. Block diagram of the FLC

즉 FLC의 출력 특성은 그림 4와 같이 양자형(동기 과정)과 포화형(비동기 과정)으로 나타나며, 특히 비동기 과정에서는 그림 5와 같이 주파수 오차의 크기에 따라서 양자화 레벨을 3부분으로 구분한다. 즉 R=1 : ($f_e \leq |2f_D|$ 일 때), R=3 : ($f_e \leq |4f_D|$ 일 때), R=5 : ($f_e \leq |6f_D|$ 일 때) 으로 가변 경사형으로 양자화 되도록 설계하여 신속하게 포화상태의 최대 출력전압을 발생시켜 전동기가 최대속도로 동작하여 응답시간을 감소시킨다.

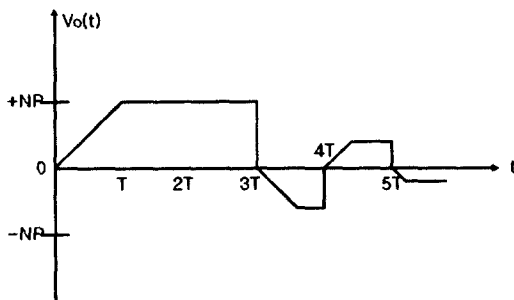


그림 4. 주파수 동기 제어기의 출력특성
Fig. 4. Output characteristic of the FLC

이러한 과정에서 FLC의 출력특성은 다음과 같이 마이크로프로세서의 부호기능에 의해서 제어된다.

$$\text{Sgn} [f_e(nT)] = \begin{cases} +1, & f_e > 0 \text{ (Positive FLC 동작)} \\ 0 & f_e = 0 \text{ (Frequency-Locked)} \\ -1, & f_e < 0 \text{ (Negative FLC 동작)} \end{cases} \quad (14)$$

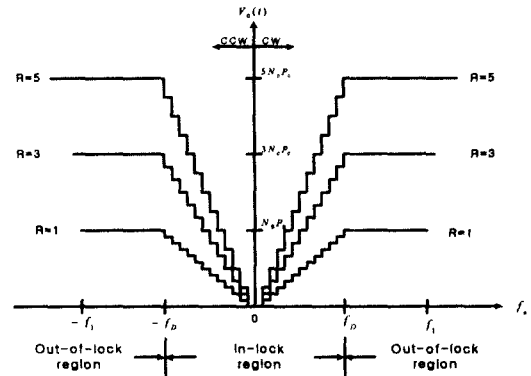


그림 5. FLC의 가변 경사형 양자화 과정
Fig. 5. Process of slope-varied quantization of the FLC

2.3 제안된 시스템의 동작

제안된 시스템은 그림 1과 같이 스위치(S)에 의해 제어모드가 FLC 모드에서 적용 퍼지제어 모드로 전환된다. FLC모드에서는 FLC만이 동작하여 기준주파수(fr)와 귀환주파수(fv)를 비교기에서 비교하여 주파수 오차(fe)를 발생시켜 전동기를 정회전, 역회전 시키면서 목표값을 추적한다. 제어 시스템이 목표값에 도달하기 직전 주파수 오차가 $f_e < |f_D|$ 이면 제어시스템이 적용제어 영역에 도달한다. 스위치가 fr'로 전환되어 적용 퍼지제어기와 FLC가 동작하여 위치검출기의 귀환주파수가 증가하여 fr=fv (lock state)가 되면 그때 출력전압 Vo(t)는 "0"가 되어서 전동기는 정지한다. 이것은 곧 플랜트가 위치명령과 일치된 위치에 도달한 것을 의미한다. 한편, 전동기 축에 부착된 위치검출기인 옵티컬 인코더와 위치/전압 변환기(Position/Voltage transducer)에 의해서 전동기 회전에 비례하는 전압을 발생시키고 또한 위치/전압 파라미터를 조정하여 안정도를 개선한다. 즉, 과도응답 영역에서는 위치/전압변환기가 민감하게 작용하여 목표값에 신속히 접근하고, 적용 퍼지제어 영역에서는 응답시간과 안정도를 확보하는 범위 내에서 둔감하게 작용하여 오버슈트를 방지한다.

3. 실험 및 결과

서보 제어 시스템의 정밀제어를 위해 제안된 제어 시스템은 8086 마이크로프로세서에 의해 제어되며,

적응 퍼지제어기를 이용한 서보 제어 시스템의 정밀제어

사용된 전동기는 Lead-screw를 결합하여 회전운동을 직선운동으로 변환시켰다. 회전각 θ 에 대한 Lead-screw의 이동거리

$$L = \frac{4}{2\pi} [\text{mm/revolution}] \quad (15)$$

이며, 전동기의 회전위치를 결정하는 인코더는 증가형 오퍼컬 인코더 방식으로 1회전당 120개의 펄스를 발생하며, VCO의 감도 $K_v = 26.97$ [kHz/V]이다. Lead가 0~500 [mm]까지 변화할 때 이에 대응하는 VCO 출력 주파수는 제어 시스템의 변환요소 (conversion factor)로서 작용한다.

$$\begin{aligned} \text{Conversion factor} &= \frac{500[\text{mm}]}{48.56[\text{kHz}]} \\ &= 10.3[\text{mm/kHz}] \end{aligned} \quad (16)$$

따라서 위식을 만족하는 위치/전압변환기의 이득 $K_p=36$ [mV/cm]이며, 결과적으로 $K_v \cdot K_p$ 에 의해서 제안된 시스템의 변환요소를 결정할 수 있다. 또한 사용된 DC 서보 전동기의 기계적 시정수 $\tau_m = 250$ [ms], 서보 증폭기와 전동기의 이득 $K_m = 45.781$ [rad/sec/V] = 2.916 [cm/sec/V]이고, 전동기의 최대 속도 $W_m = 228.91$ [rad/sec] = 14.58 [cm/sec]이다. 그리고 주파수 오차 선형범위 f_D 에 대응하는 목표값의 최대 선형 변동 범위 $\theta_D = \pm 8$ [cm]이다. 따라서, $f_D = K_v \cdot K_p \cdot \theta_D = (0.036) \cdot (26.97) \cdot (8) = 7.767$ [kHz]이고 D/A 변환기의 최대 출력 전압은 5[V]이므로, $N = 3846$, $P = 1.3$ [mV]이다.

이와 같은 파라미터에 의해서 실험한 결과가 그림 6과 그림 7에 나타나 있다. 그림 6은 정상상태의 위치 명령을 426 [mm]로 입력했을 때의 위치응답 곡선이다. 기준 주파수는 35.714 [kHz]에서 77.087 [kHz]로 변환되며, 먼저 FLC만으로 동작하였을 때의 응답특성(점선)을 살펴보면 과도응답 특성 영역인 $t = 2.7$ [sec]까지 전동기가 최대 속도로 동작하고 $f_r = f_v$ 가 되는 $t=3.2$ [sec]에서 목표값인 426 [mm]에 도달하고 전동기는 정지한다. 이때 최대 오버슈트는 3.29 [%]이다. 한편 제안된 제어시스템에 의해서 실험한 결과 응답특성(실선)을 살펴보면 과도응답 특성 영역에서 $t = 2.3$ [sec]까지 전동기가 최대 속도로 동작하여 정밀제어 영역에 도달하며, $f_r = f_v$ 가 되는 $t=2.7$ [sec]에서 목표값에 도달한다. 최대 오버슈트는 1.27 [%]이다.

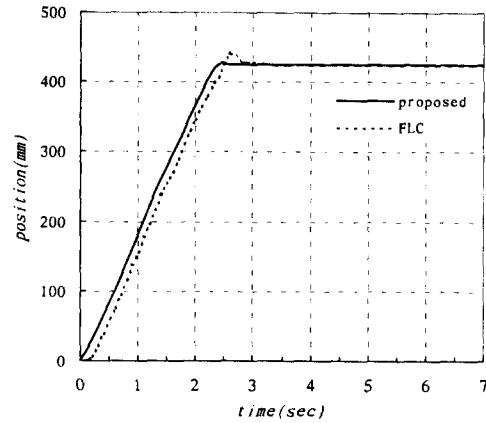


그림 6. 위치명령 (426mm)에 대한 응답
Fig. 6. Response to position command (426mm)

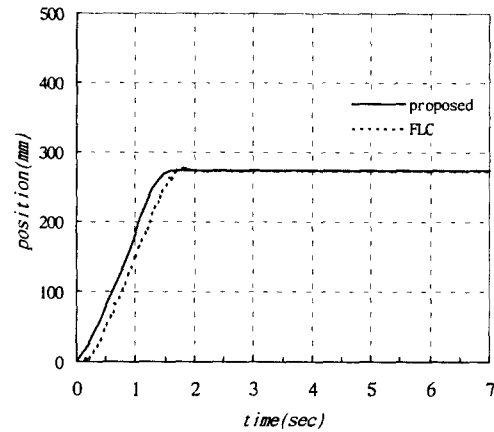


그림 7. 위치명령 (273mm)에 대한 응답
Fig. 7. Response to position command (273mm)

그림 7은 위치명령 주파수를 35.714 [kHz]에서 62.228 [kHz]로 입력했을 때의 위치응답곡선으로 FLC만으로 실험을 하였을 때의 응답특성(점선은 $t = 1.7$ [sec]까지 전동기가 최대 속도로 동작하여 $t=2.1$ [sec]에서 목표값인 273[mm]에 도달하고 전동기는 정지한다. 제안된 제어시스템에 의해서 실험한 응답 특성(실선)을 살펴보면 과도응답영역인 $t = 1.3$ [sec]까지 전동기가 최대 속도로 동작하여 정밀제어 영역에 도달하며, $t=1.5$ [sec]에서 목표값인 273[mm]에 도달한다. 따라서 이러한 과정의 실험결과를 분석하

면 제안된 제어시스템을 사용할 경우에 정상상태오차를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 과도응답특성도 개선할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 서보 제어 시스템의 정밀제어를 위해서 마이크로프로세서를 이용한 적응 퍼지제어기를 설계하였다. 시스템의 정밀제어에 중요한 영향을 미치는 비선형성을 개선하기 위하여 제안된 시스템의 제어영역을 과도응답 영역과 적응제어 영역으로 분리하였다. 과도응답 특성을 개선하여 서보 제어 시스템이 신속하게 목표값에 도달하도록 주파수 동기 제어를 설계하였고, 오차가 설정된 범위 안에 들어오면 정밀제어를 수행하기 위하여 시스템은 적응 퍼지 제어기에 의해서 제어된다. 이때, 출력전압의 양자화 기능을 가변 경사형으로 설계하여 응답특성을 향상시켰으며, 또한 귀환회로에 위치/전압변환회로를 설계하여 서보 제어시스템이 저속 동작 시에도 고주파의 귀환신호를 발생시켜 기준 입력신호와 신속히 주파수 비교를 하여 응답시간을 감소시켰다.

제안된 제어기법은 부품조립, CNC, 반도체 장비 등의 정밀 위치제어가 필요한 자동화 시스템에 적용될 수 있으며 이러한 시스템의 고성능화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문은 2002학년도 김포대학 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- (1) J. Campos, F.L. Lewis, "Deadzone compensation in discrete time using adaptive fuzzy logic", IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol.7, no.6, pp697-707, Nov. 1999.
- (2) Yu W.S. Sun C], "Fuzzy model based adaptive control for a class of nonlinear systems", IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol.9, no.3, pp413-425, June 2001.
- (3) C.C.Lee, "Fuzzy logic in control system: fuzzy logic controller part I, II", IEEE Trans. Sys Man and Cybern., Vol.20, no.2, pp.404-435, Feb. 1990.
- (4) Wei. Li, M.Jamshidi, "Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral Derivative Controller", IEEE Trans. Fuzzy System, Vol.6, no.4, pp449-463, Nov. 1998.
- (5) P. V. Kokotovic, "Discrete-time adaptive control of plants with unknown output dead-zone", Automatica, Vol.31, no.2, pp.287-291, Feb. 1995.
- (6) M.F.Lai, G.C.Hsieh, "Variable slope pulse pump controller for stepping position servo control system using frequency-locked technique", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.42, no.3, pp.290-299, June 1995.
- (7) K. Fischle, D. Schroder, "An improved stable adaptive fuzzy control method", IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol.7, no.1, pp27-40, Feb. 1999.

◇ 저자소개 ◇

조 정 환 (趙正煥)

1963년 12월 12일생. 1988년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1990년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1995년~현재, 한양대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 1990~1991년 LG전자중앙연구소. 1991~1996년 한국생산기술연구원. 1996~현재, 김포대학 전자정보계열 조교수. 공업계측제어기술사.