

자동화 장비의 고속 정밀제어를 위한 혼합형 퍼지 제어기

(Hybrid Fuzzy Controller for High Speed and High Precision Control of Auto-Equipments)

조정환

(Jeong-Hwan Cho)

요 약

외란이나 시스템의 파라미터 변동 및 불확실성이 존재하는 자동화 장비의 고속 정밀제어를 위하여 혼합형 퍼지 제어 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 제어영역을 고속제어 영역과 정밀제어 영역으로 분리하였다. 먼저 퍼지 제어방식을 이용하여 고속제어를 수행하고, 오차가 설정된 범위 안에 들어오면 주파수 동기방식에 의해 제어되어 정밀제어를 수행한다.

제안된 방법을 이용하여 용접라인 및 산업용 로봇 매니플레이터, 부품조립 자동화 설비 등의 적용 예로써 서보 제어시스템에 적용하였다. 이론과 실험적인 연구가 수행되었고, 그 결과는 자동화 장비의 위치제어 성능이 개선되었음을 입증한다.

Abstract

This paper proposes the hybrid fuzzy control system for fast response time and precision control of auto-equipments which exist disturbance, parameter alteration of system, uncertainty. The proposed system, which provides the improvement in terms of the control region in high speed and precision control, first used the fuzzy control method for fast response time and when the error reaches the preset value, used the frequency-locked method 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 position control of auto-equipment.

1. 서 론

일반적으로 제어 시스템의 설계에 있어서 최근까지 연구되어온 제어 알고리즘의 대부분은 프로세스의 수학적 모델링에 근거하여 이루어져 왔다. 그러므로 복잡한 동특성을 갖는 시스템이나 외란이 존재하

는 동적인 환경에서는 기존의 제어 이론으로는 강인한 제어기 구성이 용이하지 못하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 인간의 사고능력과 적응능력을 갖는 지능형 제어기의 필요성이 요구 되고 있다.

이러한 필요성에 따라 Zadeh에 의해 퍼지이론이 제안된 이후, 퍼지제어는 지금까지 산업의 여러 분야에서 널리 응용되어 왔다. 일반적으로 퍼지 제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 제어방식으로는 해석할 수 없거나, 입출력 정보가 정성적 이고, 부정

* 정회원 : 김포대학 디지털시스템전공 교수
E-mail : hopesea@unitel.co.kr
접수일자 : 2001년 9월 1일
최종완료 : 2001년 9월 20일

확하고, 불확실한 경우에 기존의 수학적 모델링을 근거로 한 제어기들보다 우수한 제어결과를 나타내는 것을 볼 수 있다[1],[2].

따라서, 퍼지제어는 전문가의 지식과 경험을 바탕으로 제어규칙을 언어적으로 쉽게 표현할 수 있으며 외란에 대해 매우 강인한 특성을 갖는다. 제어대상을 수학적으로 정확히 근사화 할 수 없는 경우에도 제어대상의 입력과 출력 관계만으로 퍼지제어를 수행하여 우수한 성능을 발휘하므로 자동화 장비에 적용이 높아지고 있다. 즉 기존의 정확한 수학적 모델을 기초로 하는 제어로부터 인간의 의사결정(human-decision making)방식을 도입하는 지능제어로의 발전 단계라고 볼 수 있다. 그러나 시스템의 정밀제어를 위해서 추가되는 많은 제어규칙과 추론과정으로 인해 실시간 제어가 불가능하다. 따라서, 이런 문제점들을 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[3],[4].

한편, 오늘날의 서보 제어시스템은 그 실용성에 의해서 여러 분야에서 이용되고 있다. 특히 자동화 장비의 성능을 향상시키기 위해 사용되는 서보 제어시스템은 마이크로프로세서를 적용하여 시스템의 제어성능을 향상시켰다. 하지만 이때 이용되는 제어방식은 기준신호로서 디지털 신호를 사용하기 때문에 시스템은 복잡해지고 이를 해석하기에는 더욱 어려워진다. 또한 귀환회로에서 위치 검출기의 발생신호가 직접 기준신호와 비교되는데, 이 위치 검출기의 출력신호가 저주파를 발생하므로 응답시간의 증가요인이 되었다. 반면에 응답시간을 빠르게 하기 위해서 기준신호를 증가시키고, 이 기준신호와 신속히 주파수 비교를 할 수 있도록 위치 검출기의 선밀도(line density)를 증가시키면 시스템의 안정도와 위치 검출기의 선밀도는 서로 상관관계에 있기 때문에 위치 검출기의 선밀도가 높으면 시스템은 불안정하게 된다[5],[6].

따라서, 본 논문에서는 자동화 장비의 제어성능 향상을 위해 주파수 동기(Frequency-locked) 제어와 퍼지제어를 이용한 혼합형 퍼지제어 시스템을 제안한다. 전체 제어영역을 고속제어 영역과 정밀제어 영역으로 분리하였다. 먼저 퍼지 제어를 설계하여 고속제어를 수행시켜 응답시간을 감소하였으며, 시스템이 정밀제어 영역에 도달하면 주파수 동기 제어기(Frequency-Locked Controller : FLC)가 동작하여 기준 입력신호와 귀환신호 사이의 주파수 편차에 직

접 비례하는 출력전압에 의해 자동화 장비를 구동시켰다. 또한 FLC의 양자화 기능을 경사가변형(slope-varied type)으로 설계하여, 시스템의 응답시간과 정밀도를 향상시킨 자동화 장비의 고속 정밀 제어를 제안하였고, 실험을 통해 이를 입증하였다.

2. 퍼지제어기의 설계

일반적으로 퍼지제어기는 그림1과 같이 퍼지화도입부(fuzzification interface), 지식베이스부(knowledge base), 의사결정논리부(decision-making logic), 비퍼지화부(defuzzification interface)로 구성되어 있다[7].

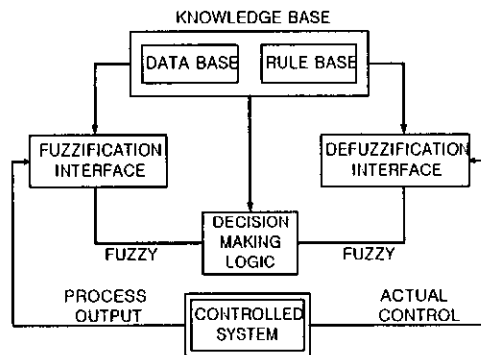


그림 1. 퍼지제어기의 구조.
Fig. 1. Structure of the fuzzy controller

본 논문에서는 제어기의 입력변수를 오차(e)와 오차의 변화량(ce)으로 선정하고, 출력변수는 제어입력(u)로 선정하였으며 아래와 같이 정의한다.

$$e(k) = sp(k) - y(k) \quad (1)$$

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

여기서, $sp(k)$ 와 $y(k)$ 는 각각 k번째 샘플링시간의 목표값과 플랜트의 출력값이다. 퍼지 제어규칙은 일반적으로 "IF~THAN~"의 형태를 취하는 n개의 독립적인 제어규칙으로 구성되며, IF부분은 조건(antecedent)을, THAN부분은 결과(consequent)를 나타낸다.

$$R_i = \text{if } e \text{ is } E_i \text{ and } ce \text{ is } CE_i \text{ than } u \text{ is } U_i \quad (3) \\ (i = 1, 2, \dots, N)$$

자동화 장비의 고속 정밀제어를 위한 혼합형 퍼지 제어기

여기서, E, CE, U 는 언어적 퍼지변수로서 각각 NB(Negative Big), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PB(Positive Big)의 5개로 구성 되어 있으며 전체적인 제어규칙이 표 1에 나타나 있다. 그리고 제어규칙에 대한 멤버십 함수는 표 2에 보여진 것과 같이 각각 사다리형과 삼각형의 형태로 입력력변수에 대해서 전체집합을 9개 레벨로 양자화 하였다. 이러한 언어적 제어규칙과 멤버십 함수로 부터 출력값을 얻기 위해서는 퍼지추론을 해야한다.

표 1. 고속제어를 위한 제어규칙
Table 1. Control rules for a high speed control

e \ ce	ce				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

표 2. 양자화된 멤버십 함수 테이블
Table 2. Quantized membership function table

e \ ce	ce								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
PB	0	0	0	0	0	0	0	0.6	1
PS	0	0	0	0	0	0.6	1	0.6	0
ZE	0	0	0	0.1	1	0.1	0	0	0
NS	0	0.6	1	0.6	0	0	0	0	0
NB	1	0.6	0	0	0	0	0	0	0

추론방법은 퍼지관계의 합성법칙에 의한 직접법을 사용하였다. i번째 제어규칙의 퍼지관계를 카테시안 곱(catesian product)으로 정의하면

$$R_i = (e_i \times ce_i) \times U_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

$$R = R_1 \vee R_2 \vee \dots \vee R_N = \bigvee_{i=1}^N R_i \quad (5)$$

입력을 e_o, ce_o 라고 하면, 출력 U_o 는

$$U_o = R \circ (e_o \times ce_o) \quad (6)$$

이고, 이에 대한 멤버십 함수는

$$\mu U_o(u) = \text{MAX}_{e, ce} [\mu R(e, ce, u) \wedge \mu e_o(e) \wedge \mu ce_o(ce)] \quad (7)$$

식(7)이 퍼지 단일값 singleton 입력이면

$$\mu U_o(u) = \mu R(e, ce, u) \quad (8)$$

이고, 식(4),(5)에 의해 식(8)은

$$\mu R_i(e_o, ce_o, u) = \mu e_i(e_o) \wedge \mu ce_i(ce_o) \wedge \mu U_i(u) \quad (9)$$

라고 정의하면, 추론결과는

$$W_i = \mu E_i(e_o) \wedge \mu CE_i(ce_o) \quad (10)$$

$$\mu U_o(u) = \bigvee_{i=1}^N [W_i \wedge \mu U_i(u)] \quad (11)$$

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

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu U(u_i) \cdot u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu U(u_i)} \quad (12)$$

이와 같이 설계된 퍼지제어기는 정밀제어 구현을 위해서 추가되는 많은 제어규칙과 멤버십 함수, 그리고 추론과정으로 인한 응답시간의 증가요인이 발생한다. 그래서 제어규칙을 정량화하고 추론과정을 통해 얻은 출력값들을 룩업 테이블(lookup table)로 작성하면 추론하는 동안 소요되는 시간을 단축시킬 수 있어 실시간 제어를 할 수 있다. 반면에 정상상태 오차가 발생한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 목표값 근처에서 정밀제어를 실행해야 한다[1].

본 논문에서는 표 3과 같이 퍼지변수를 양자화 시키고, 표 1과 표 2를 이용하여 표 4와 같은 룩업 테이블을 작성하여, 퍼지제어를 통해 고속제어를 수행

하여 신속히 목표값에 접근할 수 있도록 하였다. 그리고 정상상태 오차를 감소시키기 위해 FLC를 설계하여 정밀제어를 수행하였다.

3. 혼합형 제어시스템의 설계

3.1 제안된 시스템의 구성과 동작특성

자동화 장비의 위치제어를 실현하기 위해 제안된 시스템은 그림 2와 같이 구성된다, 기준주파수(f_r)와 귀환주파수(f_v)는 비교기에서 비교되어 주파수 오차(e)를 발생한다.

$$e(\text{Hz}) = f_r - f_v \quad (13)$$

주파수 오차(e)와 오차의 변화량(ce)는 퍼지제어기에서 실행되어, 그 출력값이 전동기를 정전(Clock Wise: CW), 역전(Counter Clock Wise: CCW)시키면서 목표값을 추적한다. 전동기 측에 부착된 위치검출기인 옵티컬 인코더와 위치/전압 변환기(Position/Voltage transducer: P/V transducer)에 의해서 전동기 회전에 비례하는 전압을 발생하고 그 전압은 다시 VCO에 의해서 귀환주파수로 변하면서 기준주파수와 비교기에서 다시 비교된다.

표 3. 양자화된 변수
Table 3. Quantized variables

E [KHz]	CE [KHz]	U [V]	Quantized level
40이상	0.4이상	5	5
40	0.4	4	4
30	0.3	3	3
20	0.2	2	2
10	0.1	1	1
0	0	0	0
-10	-0.1	-1	-1
-20	-0.2	-2	-2
-30	-0.3	-3	-3
-40	-0.4	-4	-4
-40이하	-0.4이하	-5	-5

표 4. 룩업 테이블
Table 4. Lookup table

ce \ e	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-5	-5	-4	-4	-3	-1	0	1	1	2	2
-4	-5	-5	-5	-4	-3	-1	0	1	1	2	2
-3	-5	-5	-5	-4	-3	-1	0	1	2	2	2
-2	-5	-5	-4	-4	-3	-1	1	2	3	3	3
-1	-5	-5	-4	-3	-2	0	1	2	3	3	4
0	-5	-4	-4	-2	-2	0	1	3	4	4	4
1	-4	-4	-3	-2	-1	0	2	3	4	4	4
2	-4	-4	-3	-2	-1	1	2	3	5	4	5
3	-3	-4	-2	-2	0	1	2	3	5	4	5
4	-2	-3	-2	-1	0	1	3	3	5	5	5
5	-2	-3	-1	-1	0	1	3	3	5	5	5

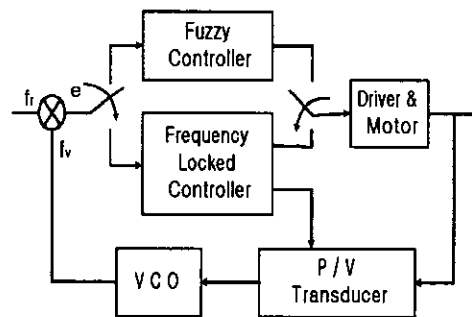


그림 2. 제안된 시스템의 구성도
Fig. 2. Block diagram of the proposed system

일련의 이러한 과정을 통해서 f_v 는 f_r 과 같아지도록 증감하며 주파수 오차가 "0"에 가깝도록 접근한다. 이때 실시간 제어를 위해서, 퍼지제어기가 목표값에 신속히 도달할 수 있도록 제어규칙을 둔감제어로 설정해 주었다. 그리고 제어 시스템이 목표값에 도달하기 직전에 주파수 오차가 $e < |10 \text{ kHz}|$ 이내 일 경우에는 주파수 동기 제어기가 동작하여 정밀제어를 실행한다. 주파수 동기 제어기가 동작하고 위치검출기의 귀환주파수가 증가하여 $f_r = f_v$ (lock state)가 되면 그때 출력전압 $V_o(t)$ 는 "0"가 되어서 전동기는 정지한다. 이것은 곧 전동기가 위치명령과 일치된 위치에 도달한 것을 의미한다. 제안된 제어시스템은 다양한 위치명령을 지정하고, 이 명령에 추

자동화 장비의 고속 정밀제어를 위한 혼합형 피지 제어기

종할 수 있도록 프로그래머블 카운터와 12Bit D/A 변환기를 사용하였으므로 고분해능과 정밀제어를 실현한다.

한편, 위치/전압 변환기의 파라미터를 조정하여 정밀운전과 안정도를 개선한다. 즉, 고속제어 영역에서는 위치/전압변환기가 민감하게 작용하여 목표값에 신속히 접근하고, 정밀제어 영역에서는 응답시간과 안정도를 확보하는 범위 내에서 둔감하게 작용하여 오버슈트를 방지한다. 또한 위치/전압변환기가 제어 전압의 작은 변동에 의해서도 매우 높은 주파수로 변할 수 있기 때문에 옵티컬 인코더만으로 귀환주파수 발생에 의존하는 방식보다는 응답시간을 감소시키고, 고정밀도에 도달할 수 있다. 또한 상대적으로 옵티컬 인코더의 선밀도가 낮아도 위치/전압 변환기의 감도 특성에 의해서 넓은 주파수 범위로 변할 수 있으므로 양호한 안정도를 갖는다.

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

제안된 시스템의 주요 구성요소인 FLC는 그림 3과 같이 구성된다. 주파수 오차가 입력되면, D/A(I)($e > 0$ 일때)과 D/A(II)($e < 0$ 일때)가 마이크로프로세서에 의해서 선택되고 이때의 주파수 오차는 D/A 변환되고 가산기에 의해서 합해져서 $\pm V_o(t)$ 를 출력 한다.

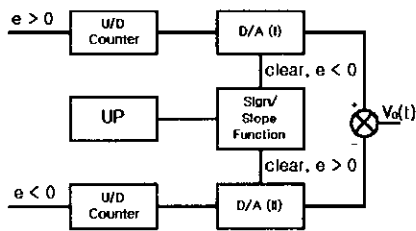


그림 3. 주파수 동기 제어기의 구성도
Fig. 3. Block diagram of the FLC

FLC의 출력전압 $\pm V_o(t)$ 는 주파수 오차가 선형범위 ($-f_D < e < +f_D$, f_D =최대 선형 양자화 영역 주파수)에서 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 ($e < -f_D$, $e > +f_D$)해서 변화할 때 FLC의 출력전압은 양의 최대 출력전

압(+NP)과, 음의 최대 출력전압(-NP)을 유지한다(포화형). 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 $R=1 : (e \leq |2f_D|$ 일때), $R=3 : (e \leq |4f_D|$ 일때), $R=5 : (e \leq |6f_D|$ 일때) 으로 경사가변형으로 양자화 되도록 설계하여 신속하게 포화상태의 최대 출력전압을 발생시켜 전동기가 최대속도로 동작하여 응답시간을 감소시킨다. 이러한 과정에서 FLC의 출력특성은 다음과 같이 마이크로프로세서의 부호기능에 의해서 제어된다.

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

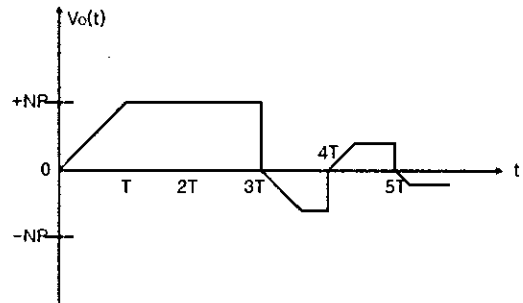


그림 4. 주파수 동기 제어기의 출력특성
Fig. 4. Output characteristic of the FLC

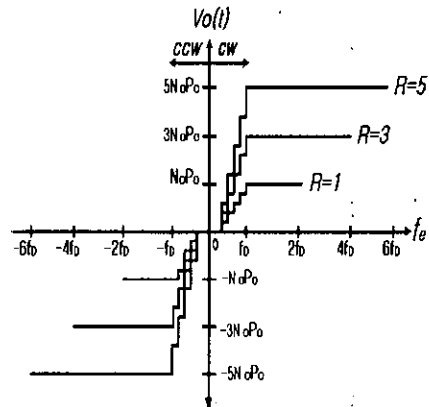


그림 5. FLC의 경사가변형 양자화 과정
Fig. 5. Process of slope varied quantization of the FLC

4. 실험 및 결과

자동화 장비의 제어성능을 향상시키기 위해 제안된 혼합형 제어 시스템은 8086 마이크로프로세서에 의해 제어되며, 사용된 전동기는 Lead-screw를 커플링(coupling)하여 회전운동을 직선운동으로 변환시켰다. 회전각 θ 에 대한 Lead-screw의 이동거리

$$L = \frac{0.04}{2\pi} (\text{cm/revolution}) \quad (15)$$

이며, 전동기의 회전위치를 결정하는 인코더는 증가형 옵티컬 인코더 방식으로 1회전당 120개의 펄스를 발생하며, VCO의 감도 $K_v = 26.97[\text{KHz/V}]$ 이다. Lead가 0~50[cm]까지 변화할 때 이에 대응하는 VCO 출력 주파수는 제어 시스템의 변환요소(conversion factor)로서 작용한다.

$$\begin{aligned} \text{Conversion factor} &= \frac{50[\text{cm}]}{48.56[\text{KHz}]} \\ &= 1.03[\text{cm}/[\text{KHz}]] \end{aligned} \quad (16)$$

따라서 (16)을 만족하는 위치/전압변환기의 이득 $K_p=36[\text{mV}/[\text{cm}]]$ 이며, 결과적으로 $K_v \cdot K_p$ 에 의해서 제안된 시스템의 변환요소를 결정할 수 있다. 또한 사용된 DC 서보 전동기의 기계적 시정수 $\tau_m = 250 \text{ ms}$, 서보 증폭기와 전동기의 이득 $K_m = 45.781 (\text{rad/sec/V}) = 2.916 (\text{cm/sec/V})$ 이고, 전동기의 최대 속도 $W_m = 228.91 (\text{rad/sec}) = 14.58 (\text{cm/sec})$ 이다. 그리고 주파수 오차 선형범위 f_D 에 대응하는 목표값의 최대 선형 변동 범위 $\theta_D = \pm 8 (\text{cm})$ 이다. 따라서, $f_D = K_v \cdot K_p \cdot \theta_D = (0.036) \cdot (26.97) \cdot (8) = 7.767 \text{ KHz}$ 이고 D/A 변환기의 최대 출력 전압은 5[V]이므로, $N = 3846$, $P = 1.3[\text{mV}]$ 이다.

이와 같은 파라미터에 의해서 실험한 결과가 그림 6과 그림 7에 나타나 있다. 그림 6은 정상상태의 위치 명령을 225[mm]로 입력 했을때의 위치응답 곡선이다. 기준 주파수는 35.714[KHz]에서 58.224[KHz]로 변환되며, 초기에는 고속제어 영역에서 $t = 1.9[\text{sec}]$ 까지 전동기가 최대 속도로 동작하여 정밀제어 영역에 도달하며, $f_r = f_v$ 가 되는 $t = 2.2[\text{sec}]$ 에서 목표값인 225[mm]에 도달하고 전동기는 정지한다. 이때 최대 오버슈트는 2.17[%]이다.

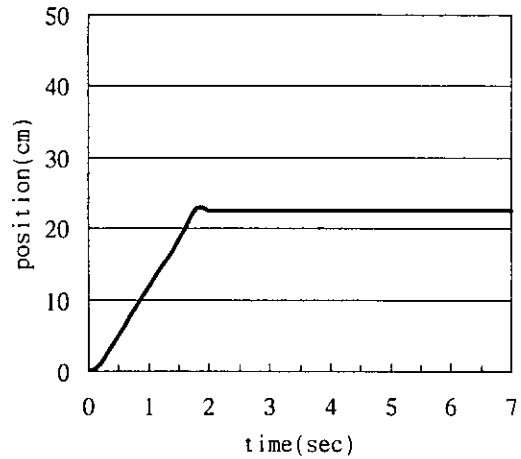


그림 6. 위치명령 (225 (mm))에 대한 위치응답
Fig. 6. Position response to the position command (225 (mm))

그림 7은 위치명령 주파수를 35.714[KHz]에서 71.831[KHz]로 입력 했을 때의 위치응답곡선으로 $t = 2.9[\text{sec}]$ 까지 전동기가 최대 속도로 동작하여 정밀제어 영역에 도달하며, $t = 3.2[\text{sec}]$ 에서 목표값인 372[mm]에 도달하고 전동기는 정지한다.

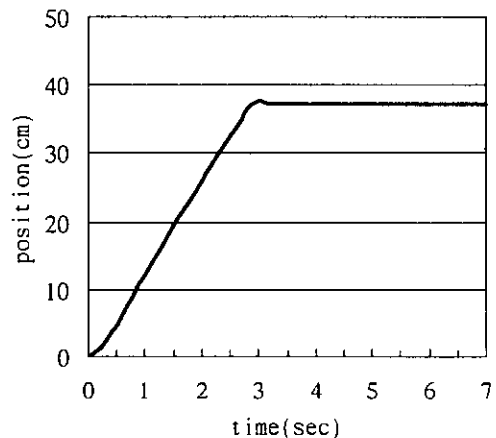


그림 7. 위치명령 (372 (mm))에 대한 위치응답
Fig. 7. Position response to the position command (372 (mm))

5. 결론

본 논문에서는 자동화 장비의 제어성능 향상을 위

자동화 장비의 고속 정밀제어를 위한 혼합형 퍼지 제어기

해서 마이크로프로세서를 이용한 혼합형 퍼지제어 시스템을 설계하였다. 제안된 시스템은 제어영역을 고속제어 영역과 정밀제어 영역으로 분리하였다. 고속제어를 위하여 자동화 장비가 신속하게 목표값에 도달하도록 퍼지제어기를 설계하였고, 오차가 설정된 범위 안에 들어오면 정밀제어를 위해 주파수 동기 방식에 의해 제어된다. 이때, 출력전압의 양자화 기능을 경사가변형으로 설계하여 응답특성을 개선하였으며, 또한 귀환회로에 위치/전압변환회로를 설계하여 자동화설비 시스템이 저속 동작 시에도 고주파의 귀환신호를 발생시켜 기준 입력신호와 신속히 주파수 비교를 하여 응답시간을 감소시켰다. 12 bit의 D/A변환기와 프로그래머블 카운터를 사용하여 자동화 장비의 고속 정밀 제어를 동시에 실현하였다.

제안된 제어기법은 부품조립 및 용접라인, 산업용 로봇 매니플레이터와 같은 자동화 설비 계통에 있어서 정확한 수학적 모델을 모르더라도 구조 변경 없이 쉽게 적용 될 것으로 판단된다.

본 논문은 2001학년도 김포대학 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Y.F.Li, C.C.Lau, "Development of fuzzy algorithms for servo systems", IEEE contr. syst. mag., vol.9, pp.65-72, Apr. 1989.
- (2) M.Jamshidi, et al., Fuzzy Logic and Control, Prentice hall Inc., International ed., 1993.
- (3) J.H.Kim, et al., "Fuzzy precompensated PID controllers", IEEE Trans. control sys. tech., Vol. 2, no.4, pp 406-411, Dec. 1994.

- (4) A.R.ubai, et al, "Experimental verification of a hybrid fuzzy control strategy for a high-performance brushless DC drive system", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.37, no.2, pp.533-512, Mar 2000.
- (5) J.C.Li, G.C.Hsieh, "A phase/frequency-locked controller for stepping servo control systems" IEEE Trans Ind. Electron., Vol.IE-39, no.2, pp.112-119, Feb. 1992.
- (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) 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.

◇ 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 디지털시스템전공 교수. 공업계측제어기술사.