

퍼지 논리형 상호결합 제어를 이용한 서보 시스템의 추적제어

論 文

50D - 8 - 1

Tracking Control of Servo System using Fuzzy Logic Cross Coupled Controller

申 料 眞* · 許 旭 烈**
(Doo-Jin Shin · Uk-Youl Huh)

Abstract - This thesis proposes a fuzzy logic cross coupled controller for a multi axis servo system. The overall control system consists of three elements: the axial position controller, the speed controller, and a fuzzy logic cross coupled controller. In conventional multi axis servo system, the motion of each axis is controlled independently without regard to the motion of other axes, in which the contour error, defined as the shortest distance between the desired and actual contours is compensated only by the position error of each axis. This decoupled control approach may result in degraded contouring performance due to such factors as mismatch of axial dynamics and axial loop gains. In practice, such systems contain many uncertainties. Therefore, the multi axis servo system must receive and evaluate the motion of all axes for a better contouring accuracy. Cross coupled controller utilizes all axis position error information simultaneously to produce accurate contours. However the existing cross coupled controllers cannot overcome friction, backlash and parameter variation. Also, since it is difficult to obtain an accurate mathematical model of multi axis system, here we investigate a fuzzy logic cross coupled controller method. Some simulations and experimental results are presented to illustrate the performance of the proposed controller.

Key Words : Multi-axis servo system, contour error, Fuzzy logic cross coupled controller

1. 서 론

서보 시스템의 제어기는 반도체 산업의 발달로 고성능 마이크로 프로세서 등으로 디지털화 되어가고 있으며, 이로 인해 제어기의 계산 시간과 계산의 복잡도를 간소화시키고 있다. 또한 대부분의 서보시스템은 공작기계, 플로터, XY 테이블 등과 같이 다축의 형태로 이루어져 있으며, 서보시스템의 위치제어는 크게 두 가지로 나눌 수 있다[1]. 첫째는, 점대점(point to point) 제어로서 제어 대상을 처음 위치에서 다른 위치로 이동시키는 것이다. 이 경우 이동계속은 무시되며, 위치오차의 크기가 그 평가기준이 될 수 있다. 둘째는, 추적(tracking) 제어로서 기준궤적을 정확히 따라가는 추적성능을 중요하게 여긴다. 궤적정밀도를 평가하는 지수로는 기준위치와 현재위치의 직선거리인 추적오차(tracking error)와 기준궤적과 현재위치의 최단거리인 윤곽오차(contour error)가 있다. Pool[2] 등은 각 축의 동특성 차이가 윤곽오차의 주된 요인이며, 시스템의 이득 증가와 이송 속도의 감소로 이를 줄일

수 있음을 보였다. Doraiswami, Gulliver[3]는 디지털 필터와 안정화 보상기를 사용함으로써 추적성능이 향상됨을 보였다. 또, Tomizuka[4][5]는 시스템의 극점과 제거 가능한 영점을 상쇄시켜 위상을 영으로 하는 ZPETC(Zero Phase Error Tracking Controller), 학습제어 방식의 일종인 반복제어기(Repetitive Controller) 등을 제안하여 전체적인 추적성능이 향상됨을 보였다. 이와 같이 독립적으로 설계된 제어방식은 한 축의 외란 등이 다른 축에 영향을 미치지 않는다는 장점을 가질 수 있지만, 축 이득간의 불일치 등으로 인하여 윤곽오차가 발생하게 된다. 이런 문제를 해결하기 위하여 Koren[6]은 상호결합제어기(Cross Coupled Controller; CCC)를 제안하였으며 Kulkarni, Srinivasan[7][8], Chuang, Liu[9] 등은 여러 윤곽오차 모델 및 제어법칙을 사용하여 다양한 형태의 상호결합제어기를 제안하였다. 효과적으로 윤곽오차를 보상하기 위해서는 정확한 윤곽오차의 계산이 필요하고 마찰력, 백래쉬, 부하변화 등의 여러 비선형 요소에 강인하며 고속에서도 높은 궤적정밀도를 유지할 수 있는 상호결합제어기가 설계되어야 한다. 그러나 상호 결합된 시스템은 다변수, 시변, 비선형 시스템이기 때문에 기존의 비례 및 비례-미분 제어 등의 선형 제어기법으로는 효과적인 윤곽오차의 보상을 보장하기 어렵다. 본 논문에서는 새로운 윤곽오차 계산법을 제시하고, 퍼지논리에 의한 상호결합제어기를 설계한다. 제안한 서보 제어시스템을 모의실험 및 실제 플랜트인 XY 서보 시스템에 적용하여 그 성능을 검증하였다.

* 準 會 員 : 仁 荷 大 工 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 正 會 員 : 仁 荷 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2000年 7月 10日

最 終 完 了 : 2001年 7月 3日

2. 서보시스템의 구성

2.1 전체시스템의 구성

전체시스템은 그림 2.1과 같이 각 축의 모터에 부하로 연결된 XY 테이블의 위치를 제어하기 위하여 각 축의 속도제어기, 위치제어기와 상호결합제어기로 구성되어 있다. 위치제어기는 각 축의 위치오차를 보상하여 추적오차를 줄이기 위한 것으로 비례-적분-미분형 제어기를 사용하였다. 그러나, 적분이득이 크게 되면 과결속의 우려가 있기 때문에 비례이득에 비해 작게 설정하였다. 속도제어기로는 비례-적분형 제어기를 사용하였고, 궤적정밀도의 평가지수인 윤곽오차를 효과적으로 보상하기 위하여 퍼지논리형 상호결합제어기를 설계하였다.

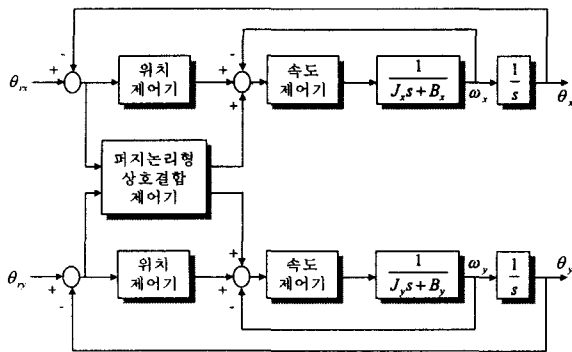


그림 2.1 전체시스템의 구성
Fig. 2.1 Configuration of overall system

3. 상호결합제어기

3.1 추적오차와 윤곽오차

다축 위치 제어시스템에서 궤적정밀도를 평가하는 지수로 는 추적오차(tracking error)와 윤곽오차(contour error)가 있다[10]. 그림 3.1은 추적오차와 윤곽오차를 도해적으로 나타낸 것이다. 추적오차는 기준위치와 현재위치의 직선거리를 말하며, 식 3.1에 의해 계산된다.

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (3.1)$$

여기서, e 는 추적오차이며 e_x, e_y 는 각각 x, y축의 위치오차이다. 추적오차는 구동되는 서보시스템이 갖는 시간지연특성으로 인해 발생하며 각 축의 위치제어기 이득을 증가시킴으로써 보상 가능하다. 이런 추적오차는 기준궤적을 정확히 따라가는지의 정확한 지표가 될 수 없다. 윤곽오차는 가공정밀도를 결정하는 중요한 요소로서, 기준궤적과 현재위치의 최단거리로 나타낸다. 윤곽오차는 축간의 동특성 및 제어이득의 불일치, 부하변화, 각 축의 외란 등에 기인하며 고속으로 비선형 곡선 궤적을 추적할 때 더 큰 윤곽오차가 나타난다.

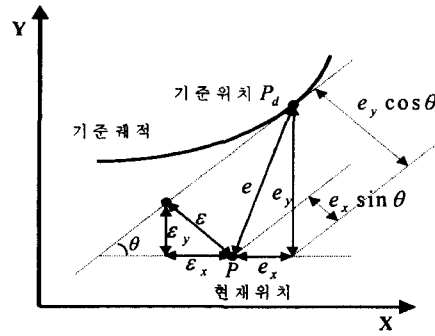


그림 3.1 추적오차와 윤곽오차
Fig. 3.1 Tracking & Contouring error

기준궤적을 이탈하지 않고 정확하게 추적하려는 다축 서보시스템에서는 추적오차보다 윤곽오차의 감소가 매우 중요하며, 실시간으로 계산되어야 한다. 윤곽오차의 계산은 식 3.2, 3.3에 의해 구할 수 있다.

$$\epsilon = e_y \cos \theta - e_x \sin \theta \quad (3.2)$$

$$\sin \theta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos \theta = \frac{v_x}{v} \quad (3.3)$$

여기서, ϵ 은 윤곽오차, θ 는 기준위치에서의 접선과 X축이 이루는 각, v_x, v_y 는 각 축의 속도성분이다. 직선궤적일 경우 θ 는 항상 일정하며 위 식에 의해 정확한 윤곽오차의 계산이 가능하다. 그러나, 대부분의 기준궤적은 비선형 곡선이므로 이에 대한 윤곽오차의 계산은 그림 3.1과 같이 기준위치에서의 접선에 근사화하여 구한다.

만약 기준궤적이 원형 경로라면 식 3.4에 의해 정확한 윤곽오차의 계산이 가능하다.

$$\epsilon_c = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} - R \quad (3.4)$$

여기서, (x, y) 는 현재위치, (x_0, y_0) 는 원의 중심이며, R 은 원의 반경이다. 또한 기준위치가 (x_d, y_d) 라면 현재위치는 식 3.5, 3.6과 같이 표현된다.

$$x = x_d - e_x = R \sin \theta + x_0 - e_x \quad (3.5)$$

$$y = y_d - e_y = -R \cos \theta + y_0 - e_y \quad (3.6)$$

식 3.4에 식 3.5와 3.6을 대입하면 식 3.7과 같이 된다.

$$\epsilon_c = \sqrt{(R \sin \theta - e_x)^2 + (-R \cos \theta - e_y)^2} - R \quad (3.7)$$

본 논문에서는 임의의 궤적을 직선에 근사하여 윤곽오차를 계산하는 새로운 방법을 제시한다. 그림 3.2에서 보는 바와 같이 현재위치 P에서 각 축의 방향으로 직선을 연장하여 궤적과 만나는 점이 있다고 가정하고 이 두 점을 A와 B라하고, 이 점과 현재위치와의 거리를 각각 $\Delta x, \Delta y$ 라 한다. 두 삼각

형 ABP와 PP^{*}C는 닮은꼴이므로 식 3.8과 같이 나타낼 수 있고, 삼각형 ABP에서 식 3.9가 성립된다.

$$\Delta x : \epsilon_y = \Delta y : \epsilon_x = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} : \epsilon \quad (3.8)$$

$$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \epsilon = \Delta x \cdot \Delta y \quad (3.9)$$

따라서, 전체 윤곽오차 및 각 축의 윤곽오차 크기는 식 3.10~3.12에 의해 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (3.10)$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta y^2}{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \Delta x \quad (3.11)$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta x^2}{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \Delta y \quad (3.12)$$

식 3.10~3.12는 기존의 윤곽오차 계산법과 마찬가지로 곡선계적을 직선계적에 근사화하여 얻은 것으로 모의실험 및 실험을 통해 제안된 계산법의 정확성을 검증하였다.

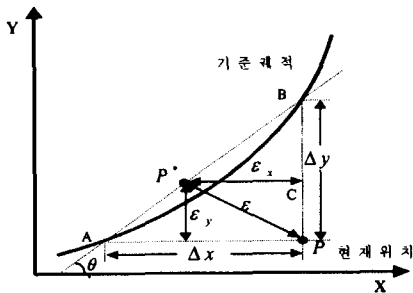


그림 3.2 제안하는 윤곽오차의 계산법

Fig. 3.2 Calculation method of proposed algorithm

3.2 퍼지논리형 상호결합제어기 설계

제안한 윤곽오차의 계산법에 의해 각 축의 윤곽오차 성분 ϵ_x , ϵ_y 를 계산한 후, 이를 보상하기 위하여 상호결합제어기를 설계한다. 기존의 상호결합제어기는 일반적으로 비례제어기 형태를 취함으로써, 각 축의 윤곽오차 성분에 적절한 이득 값을 곱하여 제어기 출력을 계산하였다. 그러나, 상호 결합된 시스템은 비선형, 다변수, 시변 시스템이므로 모델링이 쉽지 않아 안정도 해석이 어렵기 때문에 적당한 이득 값을 선정하기란 쉽지 않다. 이와 같이 여러 불확실성이 내재하여 정확한 수학적 모델링을 얻기 어려운 시스템을 효과적으로 제어하기 위하여 본 논문에서는 퍼지논리에 의한 상호결합제어기(Fuzzy Logic Cross Coupled Controller)를 제안한다. 그림 3.3은 전체시스템의 구조 가운데 위치제어기의 형태이다. 각 축의 위치제어기는 그대로 둔 채 퍼지논리형 상호결합제어기를 추가하여 외란 및 시스템의 파라미터 변화에 강인한 상호결합제어기를 설계한다.

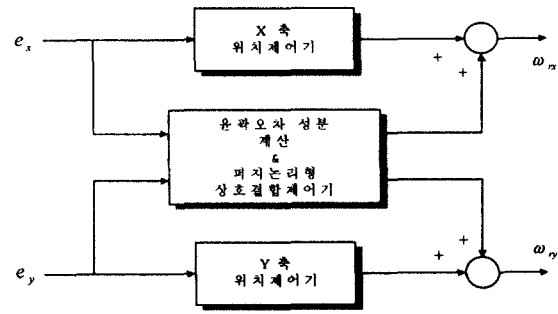


그림 3.3 위치제어기의 구조

Fig. 3.3 Structure of position controller

제안하는 퍼지제어기는 식 3.13과 같이 각 축의 윤곽오차와 윤곽오차의 변화를 입력으로 한다.

$$u = f(\epsilon_i, \Delta \epsilon_i) \quad i = x, y \quad (3.13)$$

여기서 ϵ , $\Delta \epsilon$ 은 윤곽오차 및 윤곽오차의 변화이고, u 는 제어기 출력, f 는 비선형 퍼지제어기를 나타낸다. 이러한 구조를 위치형 퍼지제어기라고 하며, 퍼지 PD제어라고도 한다. 퍼지제어기의 설계중 제어규칙의 결정은 가장 중요하다. 제어규칙의 형태는 다음과 같다.

$$IF \epsilon \text{ is } A_1 \text{ and } \Delta \epsilon \text{ is } A_2 \text{ then } u \text{ is } B$$

여기서 A_1 , A_2 , B 는 각각 윤곽오차, 윤곽오차변화, 제어기 출력의 멤버십함수이다. 만약 오차가 양(+)이면 기준입력이 실제출력보다 큰 경우이고, 오차가 음(-)이면 기준입력이 실제출력보다 작은 경우이다. 따라서, 오차를 영에 수렴시키기 위하여 전자일 경우는 제어기 출력을 양(+)으로 후자일 경우는 제어기 출력을 음(-)으로 하며 그 크기는 오차의 크기에 비례하는 형태가 된다. 오차변화는 현 상태의 오차와 전 상태의 오차 차이로 정의한다. 첫째, 오차가 양(+)일 경우 오차변화가 양(+)이면 기준입력에 벗어나는 상태이고, 오차변화가 음(-)이면 기준입력에 접근하는 상태이다. 둘째, 오차가 음(-)일 경우는 반대가 된다. 따라서, 접근하는 상태이면 제어기 출력을 작게 하고, 벗어나는 상태이면 제어기 출력을 크게 한다. 이러한 제어규칙을 표로 작성하면 표 3.1과 같다.

위의 퍼지규칙에 의한 출력의 추론법은 Mamdani의 max-min법을 사용하였고[11], 식 3.14, 3.15와 같이 표현된다.

$$\mu_B(u) = \max [\min(w, \mu_B(u))] \quad (3.14)$$

$$w = \min(\mu_{A_1}(\epsilon), \mu_{A_2}(\Delta \epsilon)) \quad (3.15)$$

추론된 퍼지값을 실제 제어조작량으로 바꾸는 방법에는 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 무게중심법을 사용하였다[11].

표 3.1 퍼지제어규칙

Table 3.1 Fuzzy rule base

제어기출력	$\Delta \epsilon$						
	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
ϵ	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR
	NM	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
	NS	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
	ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
	PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
	PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
	PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL

일반적으로 퍼지제어기의 형태는 식 3.16과 같이 입-출력 관계에 따라 세 가지가 있다. 첫째는 오차만이 제어기의 입력이 되어 출력이 계산되는 비례제어 형태, 둘째는 오차와 오차변화가 입력이 되어 출력이 계산되는 비례-미분제어 형태, 셋째는 오차와 오차변화가 입력이 되어 출력변화가 계산되는 비례-적분제어 형태이다.

$$\begin{aligned}
 u &= f(\epsilon) \\
 u &= f(\epsilon, \Delta \epsilon) \\
 \Delta u &= f(\epsilon, \Delta \epsilon)
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

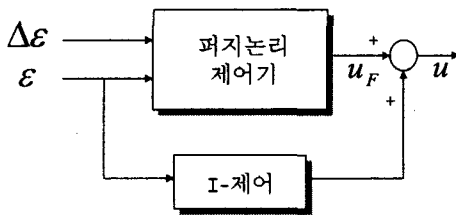


그림 3.4 사용된 퍼지제어기의 구조

Fig. 3.4 Structure of proposed fuzzy controller

본 논문에서는 빠른 응답을 얻기 위하여 비례-미분 형태의 퍼지 제어기를 사용하였고, 정상상태에서의 성능 향상을 위하여 적분 제어항을 추가하였다. 그 구조는 그림 3.4와 같고, 최종 제어기의 출력은 식 3.17과 같다.

$$u = u_F + K_I \cdot \int \epsilon
 \tag{3.17}$$

여기서, u_F 는 퍼지제어기 출력, K_I 는 적분항의 일정 상수 값이다.

4. 실험 결과

4.1 실험장치의 구성

실험에 필요한 장치는 크게 대상플랜트인 XY 테이블, 각 축의 구동기인 AC 서보모터, 모터 드라이브용 인버터, 제어를 실현하는데 필요한 DSP 보드, 그리고 데이터의 수집 및 개발에 필요한 IBM-PC로 구성되어 있다. XY 테이블은 직각 좌표계를 사용하는 위치 제어시스템이며, 리드스크류에 의해 모터의 회전운동이 XY 테이블의 직선운동으로 변환된다. XY 테이블의 이동 가능한 면적은 500×500 [mm]이며, 각 축의 회전당 이송거리는 10 [mm]이다.

4.2 윤곽오차 계산법의 실험결과

그림 4.1은 본 논문에서 제안하는 윤곽오차 계산법의 성능을 평가하기 위하여 실제 XY 테이블에 적용한 실험결과이다. 기준궤적으로 반경이 10 [mm]인 원을 사용하였고, 식 3.4에 의해 다른 비선형 궤적과는 달리 정확한 윤곽오차의 계산이 가능하기 때문에 여러 계산법의 비교가 가능하다. 실험결과와 같이 제안하는 계산법이 기존의 계산법인 식 3.2와 비교했을 때 정확한 계산이 가능함을 보여주고 있으며 계산법의 절대오차 평균값이다.

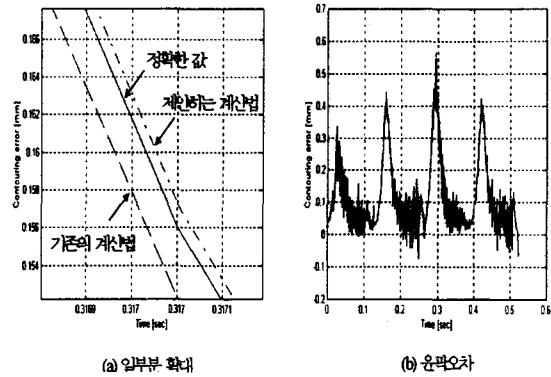


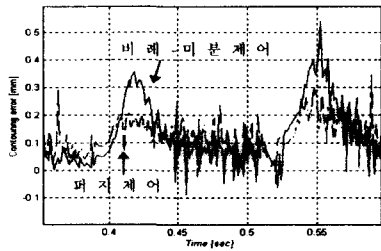
그림 4.1 윤곽오차 계산법의 실험결과

Fig. 4.1 Experimental results of proposed Cal. method

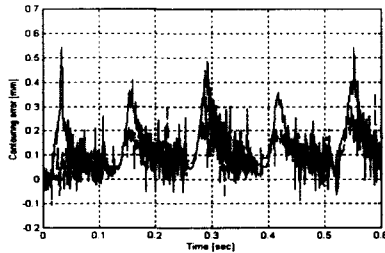
구분	기존의 계산법	제안하는 계산법
절대오차	2.3 [μ m]	1.7 [μ m]

4.3 퍼지논리형 상호결합제어기의 실험결과

그림 4.2는 본 논문에서 제안하는 퍼지논리형 상호결합제어기의 성능을 평가하기 위하여 실제 XY 테이블에 적용한 실험결과이다. 기준궤적으로 반경이 10 [mm]인 원을 사용하였다. 기존의 비례-미분제어에 비해 퍼지논리에 의한 상호결합제어기를 설계할 경우 효과적으로 윤곽오차가 감소됨을 볼 수 있다.



(a) 일부분 확대



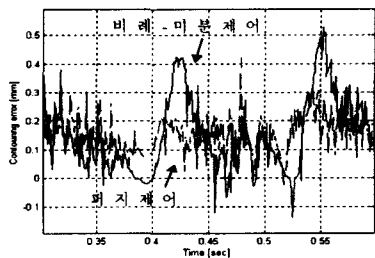
(b) 윤곽오차

그림 4.2 제안한 제어기의 실험 결과

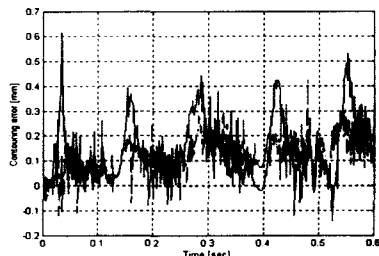
Fig. 4.2 Experimental results of proposed controller

4.4 직류외란 인가시 실험결과

그림 4.3은 제안하는 퍼지 논리형 상호결합제어기의 성능을 평가하기 위하여 실제 XY 테이블에 적용한 실험결과이다. X축의 한 방향으로 직류외란 88.2 [N]의 힘을 인가했을 경우이다. 기존의 비례-미분제어에 비해 퍼지 논리에 의한 상호결합제어기를 설계할 경우 효과적으로 윤곽오차가 감소됨을 볼 수 있다.



(a) 일부분 확대



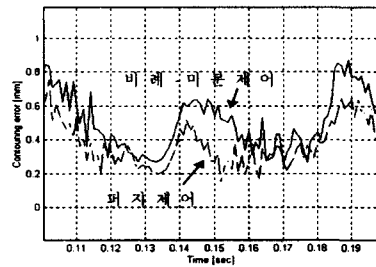
(b) 윤곽오차

그림 4.3 직류 외란 인가시 실험 결과

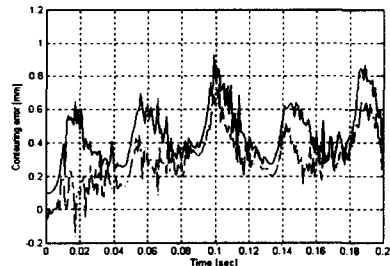
Fig. 4.3 Experimental results at input DC disturbance

4.5 고속에서의 실험결과

그림 4.4는 본 논문에서 제안하는 퍼지 논리형 상호결합제어기의 성능을 평가하기 위하여 실제 XY 서보 시스템에 적용한 실험결과이다. 기준궤적으로 반경이 10 [mm]인 원을 사용하였고, 궤적의 이송속도를 3배 증가시켰을 경우이다. 기존의 비례-미분제어에 비해 퍼지논리에 의한 상호결합제어기를 설계할 경우 효과적으로 윤곽오차가 감소됨을 볼 수 있다.



(a) 일부분 확대



(b) 윤곽오차

그림 4.4 고속에서의 실험 결과

Fig.4.4 Experimental resultsof high speed

5. 결 론

본 논문에서는 대상시스템인 XY 서보 시스템의 추적성능 향상을 위한 디지털 제어기에 관한 것이다. 다축 위치 제어 시스템은 마찰력, 백래쉬, 부하변화 등 많은 비선형 요소를 포함하고 있어 이를 보상하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 대부분의 제어기법들은 수학적 모델에 기반을 두고 있기 때문에 비선형 시스템의 보상에 한계가 있다. 이런 문제를 극복하여 서보 시스템의 궤적정밀도 향상을 위해 퍼지 논리에 의한 상호결합제어기(Fuzzy Logic Cross Coupled Controller)를 제안하였다. 제안하는 퍼지 제어기는 모의실험과 실험을 통하여 직류 외란을 인가할 경우, 파라미터가 변경될 경우, 고속일 경우 등에서 기존의 제어기법보다 뛰어난 추적성능을 보였다.

또한, 궤적정밀도의 평가지수가 되는 윤곽오차의 새로운 계산방법을 제시하였다. 이 방법은 기존의 것과 마찬가지로 비선형 곡선궤적을 직선에 근사화 하는 방법으로 정확한 윤곽오차의 계산이 가능함을 보였으며 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] Y. Dote, "Servo Motor and Motion Control Using Digital Signal Processors", Prentice Hall, pp. 90~92, 1990.

[2] A. N. Poo, J. G. Bollinger and G. W. Younkin, "Dynamic Errors in Type 1 Contouring Systems", *IEEE transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-8, No. 4, pp. 477~484, 1972.

[3] R. Doraiswami, A. Gulliver, "A Control Strategy for Computer Numerical Control Machine Exhibiting Precision and Rapidity", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 106, pp. 56~62, 1984.

[4] M. Tomizuka, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 109, pp. 65~68, 1987.

[5] M. Tomizuka, T. C. Tsao, K. K. Chew, "Discrete-Time Domain Analysis and Synthesis of Repetitive Controllers", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 111, pp. 353~358, 1989.

[6] Y. Koren, "Cross-Coupled Biaxial Computer Controls for Manufacturing Systems", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, No. 4, pp. 265~272, 1980.

[7] K. Srinivasan, P. K. Kulkarni, "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, No. 2, pp. 225~232, 1990.

[8] P. K. Kulkarni, K. Srinivasan, "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Feed Drive Servomechanisms", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 111, pp. 140~148, 1989.

[9] H. Y. Chuang, C. H. Liu, "Cross-Coupled Adaptive Feedrate Control for Multiaxis Machine Tools", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp. 451~457, 1991.

[10] Y. Koren, C. C. Lo, "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring", *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No 1, pp. 371~374, 1991.

[11] E. H. Mamdani, S. Assilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, No 1, pp. 1~13, 1975.

저 자 소 개



신 두 진 (申 杜 眞)

1989년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년~1998년 LG전자 선임연구원. 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 032-860-7394

E-mail : g1982554@inhavision.inha.ac.kr



허 옥 열 (許 旭 烈)

1951년 12월 31일 생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년~1986년 미국 일리노이대 방문교수. 1981년~현재 인하대 전자전기컴퓨터 공학부 교수.

Tel : 032-860-7394

E-mail : uyhuh@inha.ac.kr