

論文2000-37SC-1-2

새로운 윤곽 모델링에 의한 퍼지논리형 상호결합제어기 설계 (Design of the Fuzzy Logic Cross-Coupled Controller using a New Contouring Modeling)

金眞煥*, 李濟熙*, 許旭烈**

(Jin-Hwan Kim, Je-Hie Lee, and Uk-Youl Huh)

요 약

본 논문에서는 2축 서보시스템에 적용하기 위한 새로운 윤곽 모델링을 이용하여 퍼지논리형 상호결합제어기를 제안한다. 일반적인 각 축 독립제어기는 각 축의 동적 변수와 루프 이득의 불일치로 인해 윤곽 성능을 감소시킨다. 실제적으로 이러한 시스템은 많은 불확실성도 보유하고 있다. 상호결합제어기는 정확한 윤곽을 구하기 위해 모든 축의 위치 오차 정보를 동시에 이용한다. 그러나 일반적인 상호결합제어기는 마찰, 백래쉬 그리고 매개변수 변화를 극복하지 못한다. 또한 정확한 다축 시스템의 수학적 모델을 얻기 힘들기 때문에 서보시스템의 퍼지논리형 상호결합제어기를 제안한다. 이와 더불어 새로운 윤곽 오차 벡터 계산법을 제시한다. 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 실험결과를 나타낸다.

Abstract

This paper proposes a fuzzy logic cross-coupled controller using a new contouring modeling for a two-axis servo system. The general 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. The cross-coupled controller utilizes all axis position error information simultaneously to produce accurate contours. However, the conventional cross-coupled controllers cannot overcome friction, backlash, and parameter variations. Also since, it is difficult to obtain an accurate mathematical model of multi-axis system, here we investigate a fuzzy logic cross-coupled controller of servo system. In addition, new contouring error vector computation method is presented. The experimental results are presented to illustrate the performance of the proposed algorithm.

I. 서 론

오늘날 산업분야에서는 고정밀도, 고품질의 제품을 빠른 시간에 생산하기 위하여 생산자동화에 대한 관심

이 날로 커지고 있다. 특히, 공작기계나 산업용 로봇 등의 자동화 실현은 생산라인의 자율적 가동을 가능하게 함으로써 제품의 완성도와 품질이 향상될 뿐만 아니라 사용자를 위협한 작업 환경에서 벗어나게 하여 전체적인 생산성을 증대시킬 것이다. 이러한 서보시스템의 성능은 주로 디지털 서보제어기에 의해 결정되며, 최근 컴퓨터기술과 정보기술의 발전으로 인해 점차 고기능 및 지능화의 방향으로 나아가고 있다.

대부분의 서보시스템은 CNC 공작기계, 플로터, XY 테이블 등과 같이 다축의 형태로 이루어져 있으며, 서보시스템의 위치제어는 점대점(point to point) 제어와 추적(tracking) 제어방법으로 나눌 수 있다^[1]. 특히 정

* 正會員, 斗源工科大學 컴퓨터應用制御科

(Dept. of Computer Applied Control, Doowon College)

** 正會員, 仁河大學校 電子電氣컴퓨터工學部

(Divison of Electrial and Computer Engineering, Inha University)

接受日字: 1998年 11月 23日, 수정완료일: 1999年 12月 14日

밀위치 제어의 경우 후자의 방법을 채택하며 이때의 궤적의 정밀도는 제품의 품질이 결정되는 중요한 요소이다.

다축 시스템의 서보제어기를 설계할 경우 기본적으로 각 축의 위치제어기가 독립적으로 설계된다. 이 방식은 각 축의 위치오차를 줄임으로써 전체적인 궤적정밀도를 향상시킨다는 관점에 의한 것으로 단일 입력력 시스템의 과도 및 정상상태의 특성을 향상시키는 대부분의 제어기법을 적용할 수 있다. Poo^[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 되고 이는 고속일 경우 더 크게 나타난다.

그러나, 각 축의 위치오차를 줄였다고 해서 반드시 윤곽오차가 감소되는 것이 아니므로 독립적인 제어나 앞먹임 제어 등으로는 효과적인 윤곽오차의 보상을 기대하기 어렵다. 이런 문제를 해결하기 위하여 Koren^[6]은 상호결합제어기(Cross-Coupled Controller; CCC)를 제안하였는데, 이는 윤곽오차를 각 축 성분으로 분리하여 이에 해당하는 보상신호를 더하는 형태를 취한다. Kulkarni, Srinivasan^{[7][8]}, Chuang, Liu^[9] 등은 이후 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 상호결합제어기는 다변수(multivariable), 시변(time-varying), 비선형(nonlinear) 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. 퍼지제어

는 애매성을 포함한 인간의 경험과 지식을 IF-THEN 형식으로 표현하고, 퍼지추론을 통하여 시스템에 적용하는 방식이다. 이는 정확한 수학적 모델링을 필요로 하지 않고 외란, 부하변화 등의 비선형 특성에 강인하기 때문에 여러 분야에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 제안한 서보 제어시스템을 실제 플랜트인 2축 이송 테이블에 적용하여 그 성능을 검증한다.

II. 시스템의 구성

1. 2축 서보시스템의 구성

전체시스템은 그림 1과 같이 각 축의 서보모터에 부하로 연결된 2축 XY 테이블이다. 각각의 축은 속도제어기, 위치제어기를 가지고있고 상호결합제어기가 각축의 윤곽오차를 보상하도록 구성되어 있다. 위치제어기는 각 축의 위치오차를 보상하여 추적오차를 줄이기 위한 것으로 비례-적분-미분형 제어기를 사용하였다. 그러나, 적분이득이 크게 되면 과절삭의 우려가 있기 때문에 비례이득에 비해 작게 설정하였다. 속도제어기로는 비례-적분형 제어기를 사용하였고, 궤적정밀도의 평가지수인 윤곽오차를 효과적으로 보상하기 위하여 퍼지논리형 상호결합제어기를 설계하였다.

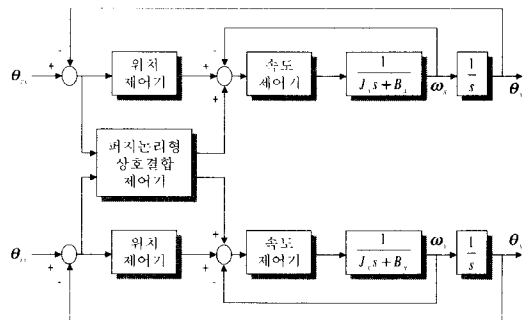


그림 1. 전체시스템의 구성도
Fig. 1. Overall system block diagram.

2. XY 테이블의 모델링

대상시스템은 서보모터와 XY 테이블이 커플링에 의해 연결되어 있으며, 모터의 회전운동이 리드스크류를 통하여 테이블의 직선운동으로 변환된다. 그 구성은 그림 2와 같다.

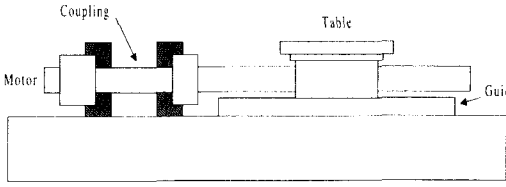


그림 2. 이송 시스템의 구성
Fig. 2. Moving system block diagram.

이러한 이송시스템은 모터와 테이블의 두 가지 관성을 가지며, 시스템의 모델은 커플링을 중심으로 2 관성체로 나타낼 수 있다. 식 (1)과 (2)는 이에 대한 방정식이며, 그림 3은 블록선도이다.

$$T_M = J_M \frac{d^2 \theta_M}{dt^2} + B_M \frac{d\theta_M}{dt} + K_{sh}(\theta_M - \theta_L) \quad (1)$$

$$K_{sh}(\theta_M - \theta_L) = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + B_L \frac{d\theta_L}{dt} - T_d \quad (2)$$

여기서, J_M, J_L 은 모터 및 부하(테이블)의 관성모멘트, B_M, B_L 은 모터 및 부하의 점성 마찰계수, K_{sh} 는 스프링 상수, T_M 은 모터토크 입력, T_d 는 외란, θ_M, θ_L 는 모터 및 부하의 위치 출력이다.

식 (1)과 (2)를 상태방정식으로 표현하기 위하여 $x_1 = \theta_M, x_2 = \frac{d\theta_M}{dt}, x_3 = \theta_L, x_4 = \frac{d\theta_L}{dt}$ 이라 하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{sh}}{J_M} & -\frac{B_M}{J_M} & \frac{K_{sh}}{J_M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_{sh}}{J_L} & 0 & -\frac{K_{sh}}{J_L} & -\frac{B_L}{J_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_M + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_L} \end{bmatrix} T_d \quad (3)$$

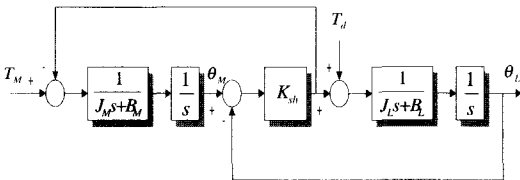


그림 3. 2관성계의 블록선도
Fig. 3. 2-mass system block diagram.

이는 한 축에 대한 시스템의 모델링으로 마찰력, 외란, 부하변화 등 여러 비선형성을 포함하며, 전체시스템은 두 축이 상호 결합된 형태이므로 정확한 모델을 얻기 어렵다.

III. 제어기 설계

1. 상호결합 제어기의 설계

다축 위치 제어시스템에서 궤적정밀도를 평가하는 지수로는 추적오차(tracking error)와 윤곽오차(contouring error)가 있다. 그림 4는 추적오차와 윤곽오차를 도해적으로 나타낸 것이다. 추적오차는 기준위치와 현재위치의 직선거리를 말하며, 식 (4)에 의해 계산된다.

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (4)$$

여기서, e 는 추적오차이며 e_x, e_y 는 각각 x, y 축의 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.

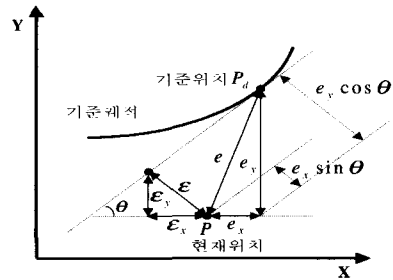


그림 4. 추적오차와 윤곽오차
Fig. 4. Tracking error and contouring error.

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. 기준궤적을 이탈하지 않고 정확하게 추적하려는 다축 서보시스템에서는 추적오차보다 윤곽오차의 감소가 매우 중요하며, 실시간으로 계산되어야 한다. 윤곽오차의 계산은 식 (5)와 (6)에 의해 구할 수 있다.

$$\epsilon = e_y \cos \theta - e_x \sin \theta \quad (5)$$

$$\sin \theta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos \theta = \frac{v_x}{v} \quad (6)$$

여기서, ϵ 은 윤곽오차, θ 는 기준위치에서의 접선과 X축이 이루는 각, v 는 실제속도, v_x, v_y 는 실제속도의

두축 속도 성분이다. 직선궤적일 경우 θ 는 항상 일정하며 위 식에 의해 정확한 윤곽오차의 계산이 가능하다. 그러나, 대부분의 기준궤적은 비선형 곡선이므로 이에 대한 윤곽오차의 계산은 그림 4와 같이 기준위치에서의 접선에 근사화하여 구한다.

만약 기준궤적이 원형 경로라면 식 (7)에 의해 정확한 윤곽오차의 계산이 가능하다.

$$\epsilon_c = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} - R \quad (7)$$

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 (8), (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = x_d - e_x = R \sin \theta + x_0 - e_x \quad (8)$$

$$y = y_d - e_y = -R \cos \theta + y_0 - e_y \quad (9)$$

식 (7)에 식 (8)과 (9)를 대입하면 식 (10)과 같이 된다.

$$\epsilon_c = \sqrt{(R \sin \theta - e_x)^2 + (-R \cos \theta - e_y)^2} - R \quad (10)$$

식 (10)을 실시간으로 계산하기에는 많은 계산량이 필요하므로 간략화 시키기 위하여 다음과 같이 테일러 급수로 확장하면 식 (11)과 같다^[13].

$$\epsilon_c = -e_x(\sin \theta - \frac{e_x}{2R}) + e_y(\cos \theta + \frac{e_y}{2R}) + \text{order}(\frac{e}{R})^2 \quad (11)$$

만약 윤곽오차가 각 축의 위치오차보다 매우 작고 각 축의 위치오차가 원의 반경 R 보다 매우 작다면 고차항은 무시되어 식 (12)와 같이 간략화 시킬 수 있다. 이 식은 비선형 궤적의 윤곽오차를 근사화된 원 궤적을 구하여 계산하는 방법으로 접선에 근사하는 것보다 좀 더 정확한 윤곽오차의 계산이 가능하다. 그러나, 실시간으로 근사화된 원의 반경 등을 구해야 하기 때문에 많은 계산량을 필요로 한다.

$$\epsilon_a = -e_x(\sin \theta - \frac{e_x}{2R}) + e_y(\cos \theta + \frac{e_y}{2R}) \quad (12)$$

본 논문에서는 임의의 궤적을 직선에 근사하여 윤곽오차를 계산하는 새로운 방법을 제시한다. 그림 5에서 보는 바와 같이 현재위치 P 에서 각 축의 방향으로 직선을 연장하여 궤적과 만나는 점이 있다고 가정하고 이 두 점을 A 와 B , 이 점과 현재위치와의 거리를 각각 Δx , Δy 라 한다. 두 삼각형 ABP 와 PP^*C 는 닮은

꼴이므로 식 (13)과 같이 나타낼 수 있고 삼각형 ABP 에서 식 (14)과 성립한다.

$$\Delta x : \epsilon_y = \Delta y : \epsilon_x = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} : \epsilon \quad (13)$$

$$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \epsilon = \Delta x \cdot \Delta y \quad (14)$$

따라서, 전체 윤곽오차 및 각 축의 윤곽오차 크기는 식 (15)~(17)에 의해 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (15)$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta y^2}{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \Delta x \quad (16)$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta x^2}{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \Delta y \quad (17)$$

식 (15)~(17)은 기존의 윤곽오차 계산법과 마찬가지로 곡선궤적을 직선궤적에 근사화 하여 얻은 것으로 실현을 통해 위 계산법의 정확성을 보여준다.

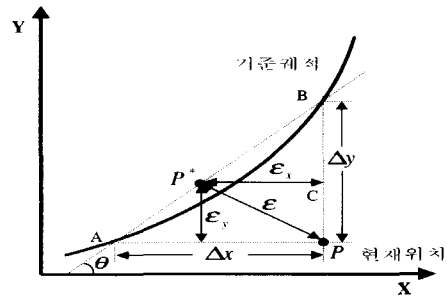


그림 5. 윤곽오차의 제안하는 계산법

Fig. 5. contouring error.

2. 퍼지논리형 상호결합제어기 설계

앞절에서 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, 상호결합된 시스템은 비선형(nonlinear), 다변수(multivariable), 시변(time-varying) 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 상호결합 제어기(Fuzzy Logic Cross-Coupled Controller)를

제안한다. 그림 6은 전체시스템의 구조 가운데 위치제어기의 형태이다. 각 축의 위치제어기는 그대로 둔 채 퍼지논리형 상호결합제어기를 추가하여 외란 및 시스템의 파라미터 변화에 강인한 상호결합제어기를 설계한다.

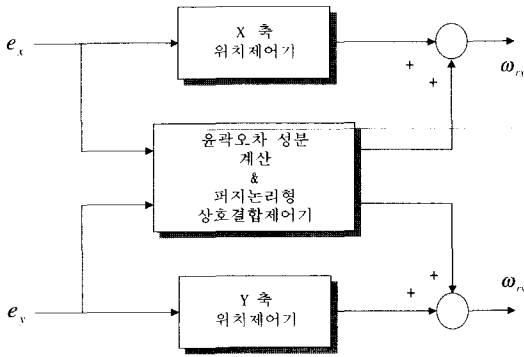


그림 6. 위치제어기의 구조
Fig. 6. Position controller block diagram.

제안하는 퍼지제어기는 식 (18)과 같이 각 축의 윤곽오차와 윤곽오차의 변화를 입력으로 한다.

$$u_i = f(\epsilon_i, \Delta\epsilon_i) \quad i = x, y \quad (18)$$

여기서 $\epsilon, \Delta\epsilon$ 은 윤곽오차 및 윤곽오차의 변화이고, u 는 제어기 출력, f 는 비선형 퍼지제어기를 나타낸다. 이러한 구조를 위치형 퍼지제어기라고 하며, 퍼지 PD 제어라고도 한다.

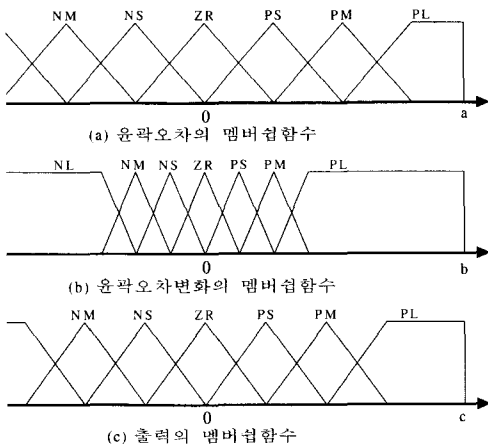


그림 7. 변수들의 멤버쉽함수
Fig. 7. Membership functions of the variable.

우선, 퍼지제어기의 입력인 윤곽오차와 윤곽오차의 변화를 퍼지공간으로 이동(mapping)시키기 위하여

멤버쉽함수를 설정해야 한다. 그림7과 같이 각 변수들은 7개씩의 멤버쉽함수를 갖고 있으며, 계산량이 적고 비교적 간단한 삼각형과 사다리꼴 모양을 혼합하여 사용하였다. 여기서, NM, PS 등은 negative medium, positive small ...을 의미한다.

퍼지제어기의 설계중 제어규칙의 결정은 가장 중요하다. 제어규칙의 형태는 다음과 같다.

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

여기서 A_1, A_2, B 는 각각 윤곽오차, 윤곽오차변화, 제어기 출력의 멤버쉽함수이다. 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 표 1과 같다.

표 1. 퍼지제어규칙
Table 1. Fuzzy control rule.

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	NM	NS	ZR	PS	PM
	ZR	NL	NM	ZR	PS	PM	PL
	PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
	PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
	PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL

위의 퍼지규칙에 의한 출력의 추론법은 Mamdani의 max-min법을 사용하였고, 식 (19), (20)과 같이 표현된다.

$$\mu_B(u) = \max [\min(w, c)] \quad (19)$$

$$w = \min(\mu_{A_1}(\epsilon), \mu_{A_2}(\Delta\epsilon)) \quad (20)$$

여기서, $\mu_B(\cdot)$ 는 후건부 멤버십 함수, w 는 추론값, c 는 후건부 퍼지집합의 중심값 그리고 μ_A 는 전건부 멤버십 함수이다.

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

일반적으로 퍼지제어기의 형태는 식 (21)과 같이 입-출력 관계에 따라 세 가지가 있다. 첫째는 오차만이 제어기의 입력이 되어 출력이 계산되는 비례제어, 둘째는 오차와 오차변화가 입력이 되어 출력이 계산되는 비례-미분제어, 셋째는 오차와 오차변화가 입력이 되어 출력변화가 계산되는 비례-적분제어이다.

$$\begin{aligned} u &= f(e) \\ u &= f(e, \Delta e) \\ \Delta u &= f(e, \Delta e) \end{aligned} \quad (21)$$

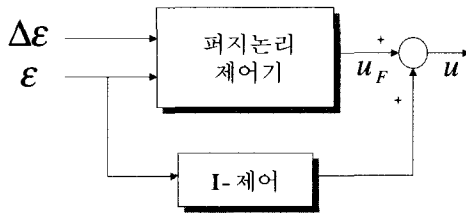


그림 8. 퍼지제어기의 구조
Fig. 8. Fuzzy controller block diagram.

논문에서는 빠른 응답을 얻기 위하여 비례-미분 형태의 퍼지제어기를 사용하였고, 정상상태에서의 성능 향상을 위하여 적분제어항을 추가하였다. 그 구조는 그림 8과 같고, 최종 제어기의 출력은 식 (22)와 같다.

$$u = u_F + K_I \int \varepsilon \quad (22)$$

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

IV. 성능평가

1. 실험장치의 구성

전체적인 실험장치의 구성은 그림 9와 같다. 실험에 필요한 장치는 크게 대상플랜트인 XY 테이블, 각 축

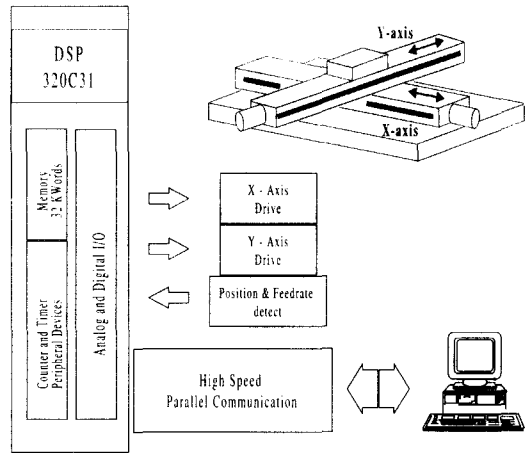


그림 9. 실험장치의 구성도
Fig. 9. Experimental system block diagram.

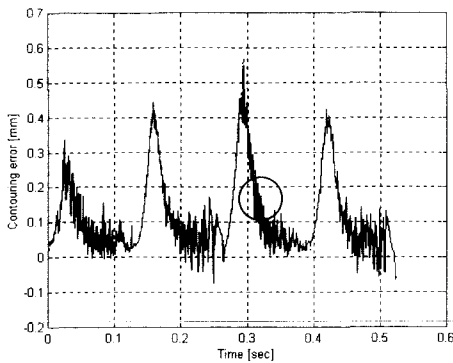
의 구동기인 AC 서보모터, 모터 드라이브용 인버터, 제어기를 실현하는데 필요한 DSP 보드, 그리고 데이터의 수집 및 개발에 필요한 IBM-PC로 구성되어 있다.

XY 테이블은 직각 좌표계를 사용하는 위치 제어 시스템이며, 리드스크류에 의해 모터의 회전운동이 XY 테이블의 직선운동으로 변환된다. XY 테이블의 이동 가능한 면적은 500×500 [mm]이며, 각 축의 회전당 이송거리는 10 [mm]이다.

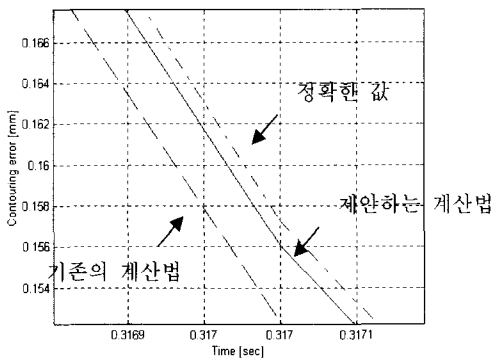
각 축의 구동기인 AC 서보모터는 영구자석형 동기 모터(permanent magnet synchronous motor)로 Y 결선으로 되어있고, 모터의 축에 직결하여 광학식 증분형 엔코더(optical incremental encoder)가 장착되어 있다.

2. 실험결과

그림 10은 논문에서 제안하는 윤곽오차 계산법의 성능을 평가하기 위하여 실제 XY 테이블에 적용한 실험 결과이다. 기준궤적으로 반경이 10 [mm]인 원을 사용하였고 식 (7)에 의해 다른 비선형 궤적과는 달리 정확한 윤곽오차의 계산이 가능하기 때문에 여러 계산법의 비교가 가능하다. 실험결과와 같이 제안하는 계산법이 기존의 계산법인 식 (5)와 비교했을 때 정확한 계산이 가능함을 보여주고 있다. 표 2는 윤곽오차 계산법의 절대 오차 비교이다.



(a)



(b)

그림 10. 윤곽오차값 비교

(a) 전체계적, (b) 전체계적 한부분 확대계적

Fig. 10. Comparison of the contouring errors.

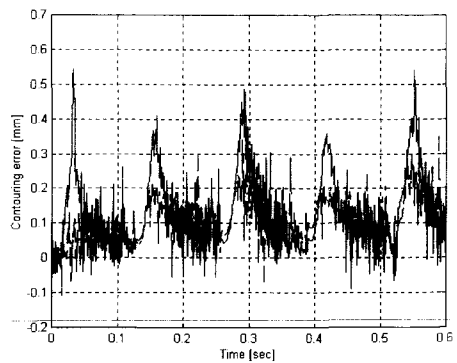
(a) Full scope, (b) Zoom-in scope

표 2. 계산법의 절대오차 비교

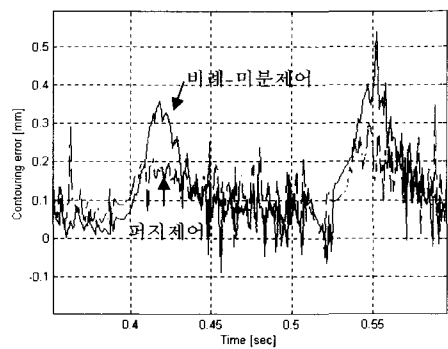
Table 2. Comparison of the absolute errors.

	기존의 계산법	제한하는 계산법
절대오차	2.3 μm	1.7 μm

그림 11은 본 논문에서 제안하는 퍼지논리형 상호결합제어기의 성능을 평가하기 위하여 실제 XY 테이블에 적용한 실험결과이다. 기준궤적으로 반경이 10 [mm]인 원을 사용하였고, 네 번의 과도상태가 나타난다. 이는 각 축의 이송방향 변경시점인 모서리 부분이며 마찰력을 비롯한 여러 비선형 요소의 영향으로 인해 발생한다. 기존의 비례-미분제어에 비해 퍼지논리에 의한 상호결합제어기를 설계할 경우 효과적으로 윤곽오차가 감소됨을 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 11. 윤곽오차특성(퍼지논리형 상호결합과 비례-미분제어기)

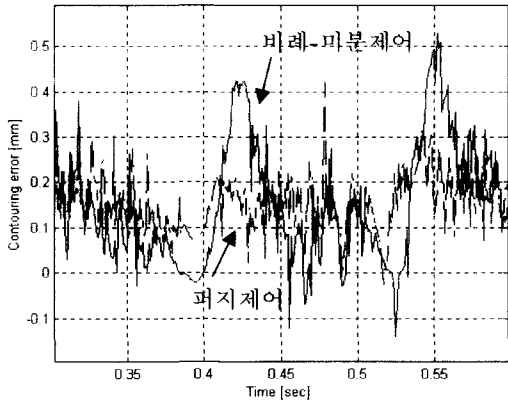
(a) 전체계적, (b) 전체계적 한부분 확대계적 (기준궤적: 반경 10mm 원)

Fig. 11. Contouring errors(Fuzzy-logic CCC and PD controller).

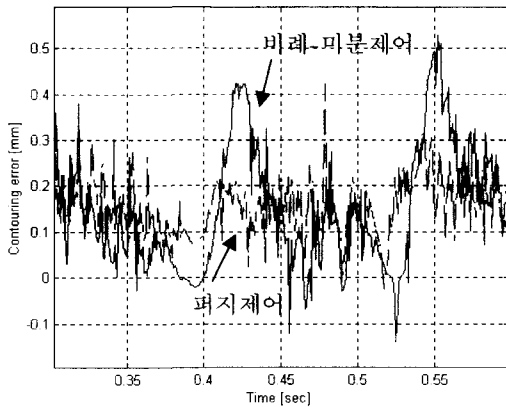
(a) Full scope, (b) Zoom-in scope

(Reference trajectory: 10 mm radius circle)

그림 12는 퍼지논리형 상호결합제어기의 외란에 대한 둔감성을 평가하기 위하여 실제 XY 테이블에 적용한 실험결과이다. 기준궤적으로 반경이 10 [mm]인 원을 사용하였고, X축의 한 방향으로 직류외란 88.2 [N]의 힘을 인가했을 경우이다. 네 번의 과도상태가 나타나며 마찰력을 비롯한 여러 비선형 요소의 영향을 많이 받는 모서리 부분이다. 기존의 비례-미분제어에 비해 퍼지논리에 의한 상호결합제어기를 설계할 경우 효과적으로 윤곽오차가 감소됨을 볼 수 있다.



(a)

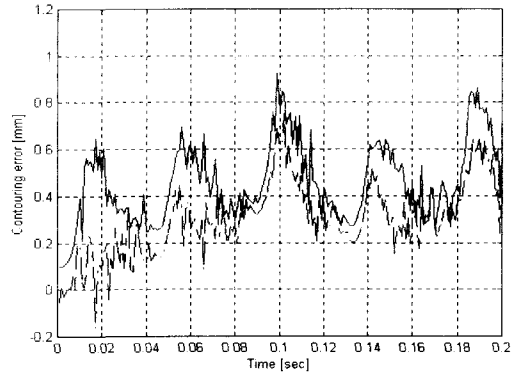


(b)

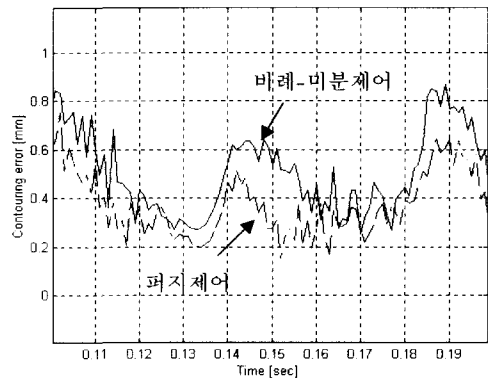
그림 12. 윤곽오차특성(퍼지논리형 상호결합과 비례-미분제어기)(a) 전체 궤적, (b) 전체 궤적 한부분 확대 궤적(기준궤적: 반경 10 mm 원, 직류외란 88.2 N인가)

Fig. 12. Contouring errors(Fuzzy-logic CCC and PD controller)(a) Full scope, (b) Zoom-in scope (Reference trajectory : 10 mm radius circle, 88.2 N DC disturbance applied).

그림 13은 퍼지논리형 상호결합제어기의 성능을 평가하기 위하여 XY 테이블의 이송속도를 3배 증가시켰을 경우이다. 이송속도를 증가시켰을 경우 관성 및 마찰력 영향으로 인해 저속에서 보다 윤곽정밀도가 떨어진다. 전체 궤적의 윤곽정밀도를 볼때 윤곽오차는 증가하였지만 비례-미분제어에 비해 퍼지논리에 의한 상호결합제어기를 설계할 경우 효과적으로 윤곽오차가 감소됨을 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 13. 윤곽오차특성(퍼지논리형 상호결합과 비례-미분제어기)(a) 전체 궤적, (b) 전체 궤적 한부분 확대 궤적(기준궤적: 반경 10 mm 원, 이송속도증가)

Fig. 13. Contouring errors(Fuzzy-logic CCC and PD controller)(a) Full scope, (b) Zoom-in scope (Reference trajectory : 10 mm radius circle, with increased feedrate).

VII. 결론

본 논문에서는 대상시스템인 XY 테이블의 윤곽 정밀도 향상을 위한 서보시스템에 관한 연구를 수행하였다. 다축 위치 제어시스템은 마찰력, 백래쉬, 부하변화 등 많은 비선형 요소를 포함하고 있어 이를 보상하기 위한 많은 연구가 수행되어왔다. 그러나 대부분의 제어기법들은 수학적 모델에 기반을 두고 있기 때문에 비선형 시스템의 보상에 한계가 있다. 이런 문제를 극복하여 서보시스템의 궤적정밀도 향상을 위해 퍼지논리형 상호결합제어기를 설계하였다. 제안하는 제어기는 실현을 통하여 직류외란을 인가할 경우, 파라미터가 변경될 경우, 고속일 경우 등에서 기존의 제어기법보다 뛰어난 추적성능을 보였다. 또한, 궤적정밀도의 평가지수가 되는 윤곽오차의 새로운 계산방

법을 제시하였다. 이 방법은 기존의 것과 마찬가지로 직선에 근사화 하는 방법으로 정확한 윤곽오차의 계산이 가능함을 보였다.

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 I 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] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338~353, 1965.
- [11] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I, II", *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 20, No 2, pp. 140~148, 1990.
- [12] 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.
- [13] Y. Koren, C. C. Lo, "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring", *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No 1, pp. 371~374, 1991.

저 자 소 개

金眞煥(正會員) 第35卷S編第7號參照

1991년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년~1997년 인하대학교 산업과학기술연구소 선임연구원, 1997년~현재 두원공과대학 컴퓨터응용제어과 조교수

李濟熙(正會員)

1991년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1997년~1998년 인하대학교 산업과학기술연구소 선임연구원, 1998년~현재 두원공과대학 컴퓨터응용제어과 전임강사

許旭烈(正會員)

1974년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년~1986년 미국 일리노이 대학교 방문교수, 1981년~현재 인하대학교 전기공학과 교수