

2자유도를 갖는 서보 시스템의 2축 추적제어 2-axis Tracking Control of Servo System with Two-degree-of-Freedom

이제희*, 박호준*, 허옥열***

*인하대학교 전기공학과

E-mail : *hanwaves@dragon.inha.ac.kr, **uyhuh@dragon.inha.ac.kr

Abstract- This paper describes the servo position control for the 2-axis positioning table. the servo controller consists of conventional feedback loops, disturbance observer. To reduce the contour error, which occurs in the multi-dimensions machines, cross-coupled controller(CCC) is suggested. A weak point of the CCC is their low effectiveness in dealing with arbitrary nonlinear contour such as circles and parabolas. This paper introduces a new nonlinear CCC that is based on control gains that vary during the contour movement. The gains of CCC are adjusted in real time according to the shape of nonlinear contour. The feedback controller based on the disturbance observer compensated for external disturbance, plant uncertainty and bad effectiveness by friction model. Suggested servo controller which improve the contouring accuracy, apply to the 2-axis system. Simulation results on 2-axis table verify the effectiveness of the proposed servo controller.

Keywords- Servo position control, 2-axis positioning table, Cross-coupled controller, Disturbance observer, nonlinear contour

1. 서론

현대의 공작기계, 반도체 제조 설비장치, 로봇 매니퓰레이터, 자동 오류 검사기계와 같은 위치 결정 기계장치의 품질은 서보 제어기 성능에 의존한다. 이러한 기계 시스템은 다축의 형태를 주로 가지며 사용자가 미리 설정한 궤적을 정확히 추적하는 것이 중요하다. 이러한 시스템이 고 성능을 발휘하기 위해서는 서보 제어기의 강인성, 고속, 고 정밀도, 위치, 추적 성능이 요구된다. 그러나 다축시스템은 외부외란, 마찰력, 백래쉬(backlash), 테이블의 비틀림, 서보 제어기와 구동기의 특성 등의 시스템 자체가 가지고 있는 오차발생요인과 서보의 고속운전이나, 감/가속 운전, 이동방향 변경등으로 인해 일어나는 구동중의 오차요인으로 인해 사용자가 원하는 궤적과의 위치 오차가 발생한다. 전형적인 다축 시스템의 서보제어기의 형태는 다른축의 출력 특성에 영향을 미치지 않는 각축의 독립적인 결합기로서 각 축의 서보제어기가 위치오차를 줄임으로써 궤적 정밀도 개선을 담당한다. 전체적인 궤적정밀도를 개선시키기위한 서보 위치 제어기들은 PID제어기, 상태 피드백 제어기 등의 기본적인 제어기를 가진다. 이러한 기본적인 형태에 앞먹임 제어기를 페루프 시스템 앞단에 부가적으로 설계하여 기준궤적을 추적하는 성능을 개선시켰었다. 그러나 이 제어기의 경우는 시스템의 정확한 모델링이 수반되어야한다. 그러나 시스템이 비선형 특성을 갖거나 또는 시간에 따라 변화는 시변특성을 가지고 있기 때문에 모델링하기가 쉽지않다. 또한 이러한 제어기를 다축시스템에의 적용하여 비 선형궤적을 추적할 경우 각 축의 위치 오차는 보상이 되지만 윤곽오차는 감소하지 않는다. 이 문제점을 해결하기위해 각축 상호간의 정보의 교환으로 궤적정밀도를 향상시키는 상호 결합 제어기가 제안되었다. 다축 시스템에 적용되는 상호 결합 제어기는 앞에서 언급한 독립적인 제어기에서 보상할 수 없는 윤곽오차를 줄이는 장점을 가진다. 상호 결합제어기는 궤적오차를 줄일 수 있으므로 궤적 정밀도를 요구하는 공작기계의 적용에 합당하다. 대표적인 상호 결합 제어기는 Koren, Kulkarni, Srinivasan이 제안한 것이 있으며, 이러한 제어기들은 각 축에서 발생하는 궤적 오차를 축 성분으로 분류하여 해당축의 보정신호를 제어기에 더하는 형태

를 가진다[1][2][3][4][5]. 상호 결합 제어기에서는 윤곽오차의 모델링이 필요하다. 윤곽 오차 모델링은 기준궤적의 정보에의해 계산되며 구해지는 윤곽오차는 선형궤적에서는 계산오차를 가지지 않는다. 그러나 곡률반경이 작은 비선형 기준궤적에서는 윤곽오차가 선형 궤적과는 달리 정확히 구해지지 않는다. 이러한 이유로 인해 비선형 궤적에서 상호 결합 제어기는 선형 궤적에서보다 낮은 효율성을 가지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보강하기 위해 본 논문에서는 상호결합제어기의 윤곽오차의 모델링부위를 임의의 비 선형궤적에서도 적용할 수 있는 형태로 구성한다. 또한 언급된 2축 위치 서보 시스템에 적용하기위한 상호 결합제어기와 함께 속도 제어 루프에 외란관측자를 구성하여 마찰력, 외부 부하 외란, 시스템의 매개변수 변동과 모델의 불확실성을 포함한 신호를 피드백하여 실제 외란의 영향을 억제함으로써 간단하면서도 피드백 시스템에서의 견실한 제어효과를 가지는 서보 시스템을 구성한다[6][7][8][9].

논문의 구성은 상호 결합제어 시스템의 모델링에 관한 설명에 앞서서 서보 시스템의 성능평가 지수인 추적오차와 윤곽오차에 대한 언급을한다. 외란관측자와 피드백 제어기에대한 제시와 설명이 다음에 이어지며 제시된 서보 제어기의 성능평가는 모의 실험을 통해 뒷부분에서 보여준다.

2. 상호 결합 제어기 모델링

다축 시스템에서의 오차는 위치오차(tracking error)와 윤곽오차(contour error) 2가지로 나뉘어진다. 이 오차들은 궤적정밀도를 평가하는 지수가 된다. 위치오차는 현재위치와 기준 궤적위치와의 직선거리로 나타낸다. 위치오차를 각축의 위치오차로 나타내면 (1)과 같다.

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (1)$$

여기서, e 는 위치 오차이며, e_x , e_y 는 각 축의 위치 오차이다. 윤곽오차는 현재 위치에서 기준 궤적의 최단 거리로 나타낸다. 윤

좌오차는 (2)와 같이 나타난다. 그림1은 위치오차와 윤곽오차를 도해적으로 나타낸 것이다. θ 는 선형 궤적인 직선구동의 경우에는 일정한 값을 유지하며, 비 선형궤적의 경우 이 값들은 계속 변화한다. 특히 기준 궤적이 곡률 반경이 작을 경우에 (3)을 적용한 윤곽오차 모델링은 정확하다고 볼 수 없다.

$$\varepsilon = -e_x \sin \theta + e_y \cos \theta \quad (2)$$

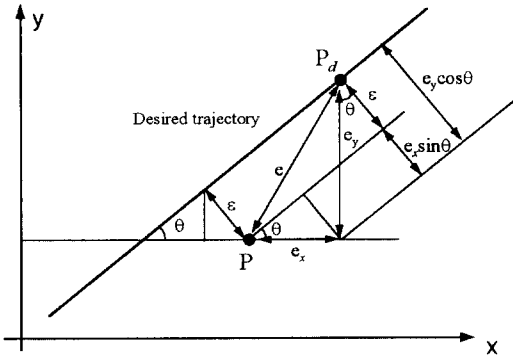


그림 1 위치오차와 윤곽오차

$$\sin \theta = \frac{e_y}{e} \quad \cos \theta = \frac{e_x}{e} \quad (3)$$

윤곽오차는 시스템들의 매개변수의 불일치, 부하의 변화, 각축의 외부 외란에 기인한다. 특히 빠른 속도를 가지면서 비 선형 궤적형태를 움직일때와 구동기의 마찰력- 특히, 고정마찰력(stiction friction)-으로 인해 큰 윤곽오차의 발생요인이 된다. 예로 들면, X-Y의 2축 테이블에서 X축이 약간의 움직임을 가질 때 Y축은 작은 속도를 가지고 이동하므로 Y축방향의 마찰력은 X축 방향의 마찰력보다는 상당히 커진다. 이러한 각 축의 마찰력의 차이는 기준궤적에서의 이탈을 가져온다. 이러한 윤곽오차를 감소시키는 것이 각 축의 위치 오차의 감소보다는 중요하다. 위치오차와 윤곽오차와의 상관관계는 각 축의 위치 오차를 줄였다해도 궤적정밀도가 개선되었다고 말할 수 없는 것이다. 궤적정밀도를 중요시 여기는 공작기계에서는 윤곽오차를 줄이는 것이 가공오차에 직접적으로 연관되기 때문이다. 상호결합제어를 설계하는 주된 목적은 궤적 정밀도의 향상에 있다. 그림 2는 전형적인 상호 결합제어를 나타낸 것이다. 상호 결합 제어기에서는 각 축에서 측정되는 위치 정보를 통해서 실 시간으로 윤곽오차 모델을 구성하여 제어 입력을 계산하며, 속도 제어기의 입력이 되는 제어입력은 위치 제어기를 거친 제어입력에 상호결합 제어기의 제어입력이 더해지는 형태로 구성된다.

(4)는 (2), (3)에 의해 나타내어진다.

$$\varepsilon = \frac{-e_x e_y + e_y e_x}{e} \quad (4)$$

(5)는 윤곽오차를 각축의 위치오차에 대해 표현한다. 여기서 C_x , C_y 는 궤적의 기하학적 함수로써 궤적마다 다르게 표현된다.

$$\varepsilon = -e_x C_x + e_y C_y \quad (5)$$

$$C_x = \frac{e_y}{e} \quad C_y = \frac{e_x}{e} \quad (6)$$

그림2에서 보는 바와 같이 상호 결합 제어기를 두 형태로 나누

어 본다면 윤곽오차를 생성시키는 부분과 각 축의 제어 입력을 계산하는 부분이다. 일반적인 비 선형 궤적에서의 윤곽오차 모델을 구하기 위해서는 그림 3과 같은 임의의 비선형 궤적과 이에 근사하는 원 궤적을 도입한다.

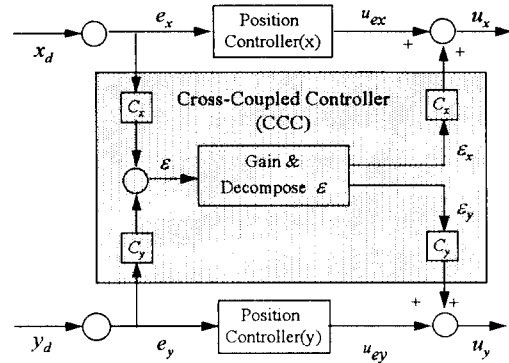


그림 2 전형적인 상호결합제어기

이때의 윤곽오차는 (7)과 같이 나타내어진다.

$$\varepsilon = \sqrt{(P_x - x_0)^2 + (P_y - y_0)^2} - R \quad (7)$$

P_x , P_y 는 현재 서보의 실제위치인 P 의 각 축성분이다.

$$P_x = R_x - e_x = R \sin \theta + x_0 - e_x \quad (8)$$

$$P_y = R_y - e_y = -R \cos \theta + y_0 - e_y \quad (9)$$

(7)에 (8), (9)를 대입하면 (10)과 같다.

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

그러나 (10)은 실제 실현시키는데 많은 계산이 요구되므로 윗식을 간단화시키기위해 테일러 급수로 확장한다.

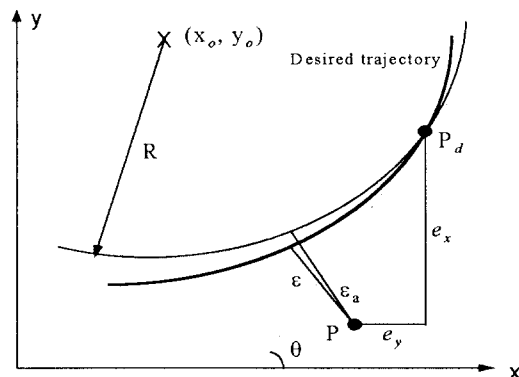


그림3 비 선형 궤적에서의 윤곽오차와 근사윤곽오차

$$\varepsilon = -e_x \left(\sin \theta - \frac{e_x}{2R} \right) + e_y \left(\cos \theta + \frac{e_y}{2R} \right) + \text{high order} \left(\frac{e}{R} \right) \quad (11)$$

만약 윤곽오차가 축의 위치오차보다 매우 작고, R 이 축의 위치 오차보다 상당히 크다고 가정하면 고차항은 무시할 수 있다. 그러므로 근사화된 윤곽오차는 (12)와 같다.

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

$$C_x = \sin\theta - \frac{e_x}{2R} \quad C_y = \cos\theta + \frac{e_y}{2R} \quad (13)$$

R이 무한대인 직선 궤적을 그린다면 e_a 는 직선궤적의 윤곽오차 모델과 같아진다. 임의의 비선형 기준 궤적에 적용하기 위해 2차 함수형태의 $y=ax^2$ 의 포물선형태로 가정하였을 경우 위식에 $\sin\theta$, $\cos\theta$ 와 R은 다음과 적용되된다.

$$\sin\theta = \frac{ax^2}{\sqrt{x^2/4 + a^2x^4}} \quad (14)$$

$$\cos\theta = \frac{x/2}{\sqrt{x^2/4 + a^2x^4}} \quad (15)$$

$$R = \frac{1}{ax} [x^2/4 + a^2x^4]^{1.5} \quad (16)$$

이렇게 구해진 윤곽오차 성분은 각 축의 상호결합제어기의 오차 입력으로 입력되며 전체적으로는 피드백 제어기의 제어 입력과 합쳐진다.

3. 2자유도를 갖는 서보 시스템

2축 서보 시스템의 각축의 속도 제어 루프에 외란관측자를 구성한다. 외란관측자는 외부에서 인가되는 외란뿐만 아니라 시스템에 내재된 마찰력과 모델링 오차를 외란으로 관측하여 보정신호를 되먹임한다. 그림4는 2축 시스템의 채택되는 외란관측자의 구성을 나타낸 것이다.

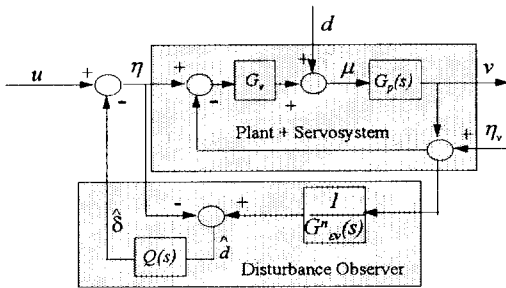


그림 4 외란 관측자의 구성

관측자에 의해 추정된 외란을 \hat{d} 로 정의하면 (17)과 같이 표현된다.

$$\hat{d} = \frac{1}{G_{ev}^n(s)} v - \epsilon \quad (17)$$

외란을 억제하기 위한 저역 통과 필터로서의 $Q(s)$ 를 결정하기 위해서 Butterworth 필터의 설계방법을 이용한다. 전체 2축 서보 시스템의 구성도는 그림 5와 같다. 그림 5는 상호결합제어기와 외란 관측자 등을 포함한 2축 서보 시스템의 블록선도이다. 아래 첨자 x, y 는 각각의 축을 의미한다. 그림에서의 G_{ux} ,와

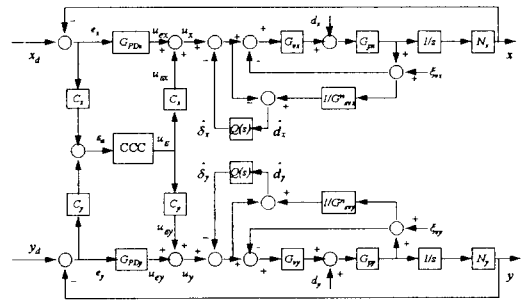


그림 5 제안된 2축 서보 시스템

G_{vy} 는 속도제어 루프에 적용된 비례제어기, G_{PDx} , G_{PDy} 는 위치 PD(proportional-derivative) 제어기를 나타낸다. 위치제어기의 출력인 제어입력 u_{ex} , u_{ey} 는 (18), (19)와 같다.

$$u_{ex} = K_{ppx}e_x + K_{dx}\dot{e}_x \quad (18)$$

$$u_{ey} = K_{ppy}e_y + K_{dy}\dot{e}_y \quad (19)$$

K_{ppx} , K_{ppy} 는 비례이득, K_{dx} , K_{dy} 는 미분항 이득이다.

$$u_{ex} = -K_p C_x^2 e_x + K_p C_x C_y e_y \quad (20)$$

$$u_{ey} = -K_p C_x C_y e_x - K_p C_y^2 e_y \quad (21)$$

(20), (21)은 상호 결합제어기의 출력되는 제어입력으로써 각축의 위치오차로 표현된다. C_x , C_y 는 궤적의 형태에 따라 설정되는 변수이며, K_p 는 상호 결합제어기의 비례이득이다.

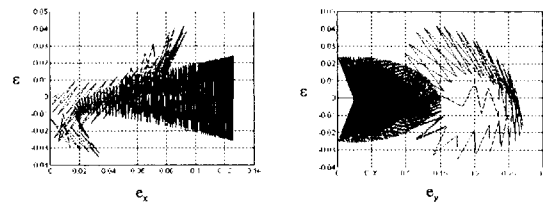
각각의 축의 제어입력은 (22), (23)이다.

$$u_x = u_{ex} + u_{ey} \quad (22)$$

$$u_y = u_{ey} + u_{ex} \quad (23)$$

4. 서보 제어기 성능평가를 위한 모의실험

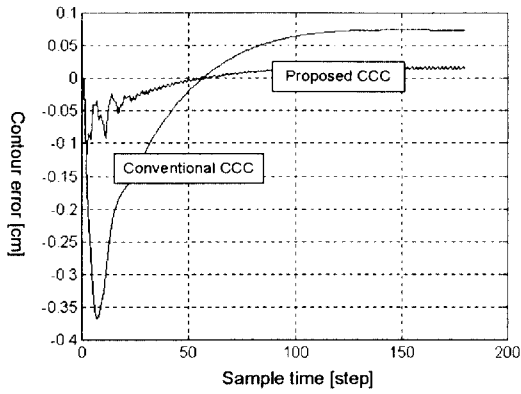
서보 제어기를 적용할 2축 위치 결정 테이블은 각 축이 직선 운동을 하며, 축간의 결합은 작고로 되어있기 때문에 직각 좌표계를 사용하는 2 차원 위치 제어시스템이다. 테이블의 축은 서로 수직이기 때문에 각각 독립적인 움직임으로 쉽게 분해될 수 있다. 다축 시스템의 각 축간에 동적 특성은 일치하지 않으므로 각각의 축에 같은 기준입력을 주더라도 출력으로 얻어지는 결과가 서로 일치하지 않는다는 것이다. 즉, 직선을 기준 궤적으로 주었을 때 어떤 축의 응답은 빠르고, 다른 축의 응답은 느리다면 정확하게 직선이 추적하지 못한다.



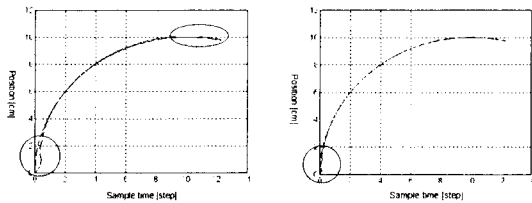
(a) (b)

그림6 윤곽오차와 위치오차와의 관계

(a) x축 (b) y축 오차특성



(a)



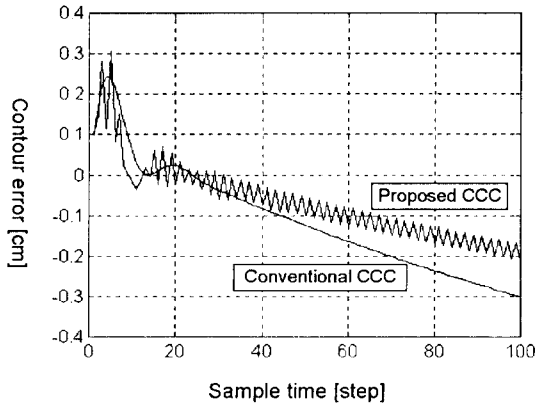
(b)

(c)

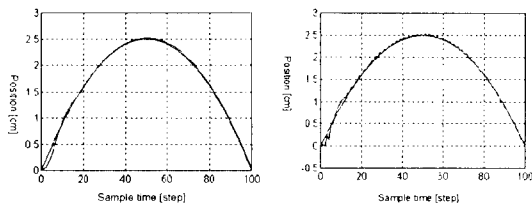
그림 7 비 선형 궤적($x^2+y^2=10^2$)에서의 제안된 CCC와 기존CCC의 성능 비교

(a) 윤곽오차특성

(b) 기존제어기추적성능, (c) 제안된 제어기 추적성능



(a)



(b)

(c)

그림 8 비 선형 궤적($y = ax^2$, $a = 0.001$)에서의 제안된 CCC와 기존 CCC의 성능 비교

(a) 윤곽오차특성

(b) 기존제어기 추적성능, (c) 제안된 제어기 추적성능

그림 6는 위치오차와 윤곽오차의 상관관계를 나타내기 위한 그림이다. 위치제어기로는 PD제어기를 사용하며 원의 궤적을 추적할 때의 오차 특성을 나타내었다. 각축의 위치오차가 줄어들더라도 궤적정밀도가 개선되지 않음을 알 수 있다. 또한 각 축의 동적특성이 다르므로 각축의 오차 특성이 다르게 나타난다. 그림 7과 8은 기존 궤적이 비선형 궤적으로 주어질 때의 서보 제어기의 추적 성능을 나타낸 것이다. 그림7에서 평균 윤곽오차는 기존의 제어기보다 0.242[cm]감소하며, 2차함수 형태의 궤적을 그리는 그림 8의 경우에도 제안된 상호결합제어기가 보다 나은 궤적 정밀도를 보인다.

5. 결론

본 논문에서는 임의의 비선형 궤적에 대해서 궤적 정밀도를 향상시키는 상호 결합제어기를 설계하였다. 제안된 상호결합 제어기는 비 선형 궤적에서 기존의 상호결합 제어기 보다 좋은 궤적 정밀도를 보였다. 이와 더불어 마찰력 보상, 외부외란, 모델의 불확실성에 대해서도 높은 추적 성능을 발휘하는 외란관측자를 구성하여 제어기의 성능을 한층 높인다.

참고문헌

- [1] K. Srinivasan, et al., "Cross-coupled control of biaxial feed drive servomechanism," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 112, pp. 225-232, 1990.
- [2] H. Y. Chuang, et al., "Cross-coupled adaptive control for multiaxis machine tools," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 113, pp. 451-457, 1990.
- [3] P. K. Kulkarni, et al., "Optimal contouring control of multi-axial feed drive servomechanisms," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 111, pp. 140-148, 1989.
- [4] Y. Koren, "Cross-Coupled Biaxial Computer Controls for Manufacturing Systems", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, pp. 265-272, 1980.
- [5] Y. Koren, et al, "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring", *Annals of the CIRP*, vol., 40, no. 1, pp. 371-374, 1991.
- [6] K. Ohnishi, "Advanced motion control in robotics," in *proc. IECON '89*, Philadelphia, pp. 356-359, 1989.
- [7] T. Umeno and Y. Hori, "Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design," *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol 38, no. 5, pp. 363-368, 1991.
- [8] T. Umeno and Y.Hori, "Robust DC servo system design based on the parameterization of two degrees of freedom control system," in *proc. IECON '89*, vol. 2, pp. 313-318, 1989.
- [9] K. Ohishi, "Microprocessor-controlled DC motor for load insensitive position servo system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 34, pp. 44-49, 1987.