

다축 서보시스템의 상호결합 제어

강 명구⁰, 이 제희, 허 옥열^{*}

인하대학교 전기공학과, *과학기술연구원 제어 신기술연구센터 참여교수

Cross-Coupled Control for Multi-axes Servo System

Myung-Goo Kang⁰, Je-Hie Lee, Uk-Youl Huh^{*}

Abstract

In this paper, Cross-Coupled Controller proposed for multi axes servo system. Tracking error and contouring error exist when a machine tool moves along the trajectory in multi axes system. The proposed scheme enhances the contouring performance by reducing contour error.

Feedforward compensator reduces the effects of a nonlinear disturbance such as friction or dead zone.

The proposed control scheme reduces the contour error which occurred when the tool tracks the reference trajectory. Simulation results show that this scheme improves the contouring performance along the reference trajectory in XY-table.

그러나 위의 제어알고리즘들은 단일 축 제어시에는 좋은 성능을 발휘하였으나 다축 제어시에는 축 상호간에 서로 미치는 영향을 고려하지 못하였기때문에 추적성능이나 윤곽성능이 떨어졌다. 그래서 다음의 상호결합제어(Cross-Coupled Control)의 연구가 진행되었다. Sarachik 와 Ragazzini(1957)는 Master/Slave Cross-Coupled 구조, Master 축의 상태에 의해서 Slave 축의 기준입력을 발생하였다. Koren (1980) 과 Kulkarni Srinivasan(1985)는 계산된 윤곽오차를 보정하는데 사용하여 상호결합제어를 구성하였다.

이제서는 XY 테이블을 대상으로 각 축에는 일반적인 PI 제어를 사용하면서 각 축에서 발생하는 위치오차로 윤곽오차를 발생하여 상호제어의 입력으로 사용하고, 비선형 마찰력을 고려한 피드포워드 제어를 추가하여 오차를 감소시키고자 한다.

1. 서론

현대 산업계에서는 생산공정에 자동화를 추구하고 있다. 그 대표적인 예로 수치제어 공작기구나 다관절 로봇 등 생산라인에 도입하는 것을 들 수 있다. 이러한 자동화된 공작기계로 제품을 생산하려 할 때 연속된 궤적(Trajectory)을 따라 공구를 이동시켜야 할 경우가 많이 있다. 이 연속된 궤적은 2차원이나 3차원 공간상에 나타나게 되는데 공구가 궤적을 따라 이동하려면 공간상의 궤적을 각 축에 연결된 구동기(Actuator)의 움직임으로 나타내야 한다. 이때 필연적으로 전체적인 움직임이 각 구동기 공간의 움직임으로 분해된다. 이러한 구동기 공간의 움직임을 제어할 경우 각각의 구동기에서 발생하는 오차가 전체적인 추적오차나 윤곽오차를 유발한다. 그러므로 어느 한 축의 오차가 전체적인 움직임에 영향을 미치게 되는데 이러한 현상을 고려하지 않고 각각의 축을 독립적으로만 제어하면 시스템의 성능저하가 나타나게 된다.

윤곽오차를 줄이기 위한 배경으로 Poo(1972)는 다축의 제어시 축간의 시스템이득이 일치하지 않을때 정상상태의 오차와 천이상태의 윤곽오차가 있음을 발견하고 속도의 감소와 시스템의 이득을 증가시킴으로 해결하였다. Tomizuka(1988)는 Preview, 극점-영점 상쇄방법인 ZPETC 나 LQ 최적제어기등을 디지털 추적제어를 설계하여 추적 정밀성 향상시켰다. Doraiswami 와 Gulliver(1984)는 건설한 서보제어기 설계하여 정상상태 추적오차를 감소시켰다[1].

2. 윤곽오차

윤곽오차(contour error)는 현재의 공구의 위치와 원하는 궤적의 방향과 수직으로 발생하는 식(2.1)과 같이 오차인데 일반적으로 각축의 위치오차와 명령궤적의 기울기 θ 의 함수로 나타낼 수 있다[1][2].

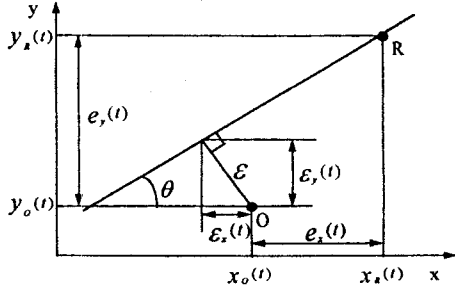
$$\epsilon(t) = e_y(t) \cos \theta - e_x(t) \sin \theta \quad (2.1)$$

여기서 $e_x(t)$ 와 $e_y(t)$ 각축의 위치오차이고, θ 는 명령궤적의 x 축에 대한 경사각이고, ϵ 는 윤곽오차이다.

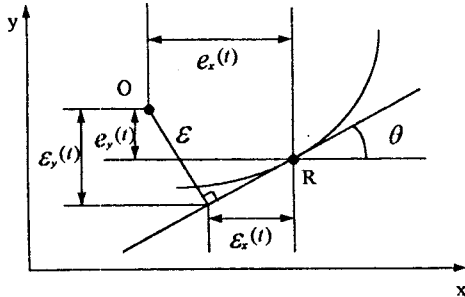
윤곽오차를 인으려면 명령궤적과 x 축과의 경사가 θ 를 알아야 한다. 그런데 단일 명령궤적이 그림(1)과같이 직선으로 주어지는 경우에는 θ 값이 일정하지만 명령궤적이 그림(2)와 같이 곡선으로 주어지는 경우에는 움직이는 방향에 따라서 θ 값이 변한다. 이러한 경우에는 기준궤적의 접선을 취하여 x 축과의 경사가 θ 의 값을 알아낸다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (2.2)$$

여기서 v_y , v_x 는 기준궤적의 y , x 축의 접선의 배터성분이다.



그림(1) 직선궤적의 윤곽오차



그림(2) 곡선궤적의 윤곽오차

3. XY 테이블의 모델링

XY 테이블은 각 축이 서로 직각으로 직선운동을 하는 2차원 위치 제어 시스템으로 직각좌표계를 사용한다. 이 XY테이블은 서로 직각으로 연결되어있기 때문에 쉽게 분해될 수 있다. 그래서 각 축의 관성 및 마찰력을 일반적인 기계적 방정식으로 나타내면 식(3.1)과 같다[6].

비선형 요소로는 마찰력 및 사구간(Dead zone)등을 들 수 있다. 여기서는 대표적인 비선형요소인 마찰력을 중심으로 모델링하여 보상하는 기법을 소개하고자 한다. 마찰력은 점성(viscous), 컬롱(Columb), 쿠퍼대정지(Stiction) 마찰력 등이 있다. 비선형 마찰력을 고려한 기계적 방정식은 다음과 같다[4].

$$J_x \frac{dv_x(t)}{dt} = u_x(t) - F_{fx}(t) \quad (3.2)$$

$$J_y \frac{dv_y(t)}{dt} = u_y(t) - F_{fy}(t)$$

여기서 J_x, J_y 는 관성모멘트, $u_x(t), u_y(t)$ 는 각 축을 구동시키는 서보모터에 인가되는 제어입력 전압이고, $F_{fx}(t), F_{fy}(t)$ 는 비선형 마찰력으로 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$F_{fx}(v_x) = B_x v_x + \text{sgn}(v_x) \alpha_x \quad (3.3)$$

$$F_{fy}(v_y) = B_y v_y + \text{sgn}(v_y) \alpha_y$$

여기서 B_x, B_y 는 점성마찰력이고 α_x, α_y 는 쿨롱마찰력이다.

4. 상호결합 제어기의 설계

다중시스템에서 원하는 궤적을 따라 공구를 움직이려고 할때 공구 공간상의 움직임을 각 축의 구동기 공간의 움직임으로 변환하여야 한다. 이렇게 구동기 공간으로 변환된 움직임을 제어하기 위해서는 각각의 축에 제어기를 설치해야 한다. 또한 전체적인 움직임을 고려하여 불대 축 상호간에 미치는 영향도 고려해야 한다. 상호결합 제어기(Cross-Coupled Controller)를 사용하여 다중 시스템을 제어하려 할때는 축의 독립적인 제어기를 그대로 사용하면서 윤곽오차에 의하여 해당축에 윤곽오차만큼 보상해 줄 수 있다[1].

4.1 상호결합 제어기

다음 식(4.1)은 위치오차와 윤곽오차에 의해 제어입력을 발생시키는 기본식이다. 그림(3)은 전체시스템을 블럭다이어그램으로 나타낸 것인데 스케줄링은 기준궤적의 발생, 샘플링시간 설정 그리고 x축과의 경사각 등을 계산한다.

$$u_x = G_{fx} e_x + G_{cax} \epsilon_x \quad (4.1)$$

$$u_y = G_{fy} e_y + G_{cay} \epsilon_y$$

여기서 G_{fx}, G_{fy} 는 피입력 제어기, G_{cax}, G_{cay} 는 상호결합 제어기, e_x, e_y 는 각 축의 추적오차이고 ϵ_x, ϵ_y 는 윤곽오차의 성분이다.

윤곽오차의 성분을 구하기 위해서는 ϵ 의 x축 성분과 y축 성분을 이용해서 식(4.2)와 같이 구하면 된다.

$$\epsilon_x = -m_y \epsilon = m_y^2 e_x - m_x m_y e_y \quad (4.2)$$

$$\epsilon_y = m_x \epsilon = m_x^2 e_y - m_x m_y e_x$$

여기서 $m_x = \cos \theta, m_y = \sin \theta$ 이다.

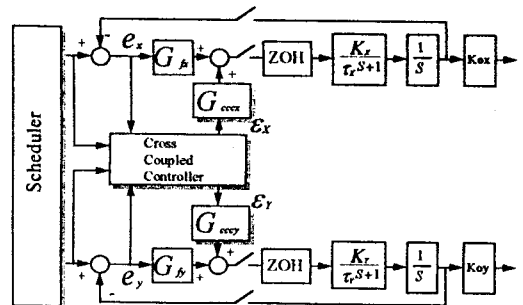
이렇게 구해진 윤곽오차 성분은 각 축의 상호결합 제어기의 오차 입력으로 들어가며 전체적으로는 피드백 제어기의 제어입력과 합쳐진다.

$$G_{cax} \epsilon_x = G_{cay} \epsilon_y = G_{cax} \epsilon \quad (4.3)$$

그러므로 각 축에 들어가는 제어입력 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_x = (G_{fx} + m_y^2 G_{cax}) e_x - (m_x m_y G_{cax}) e_y \quad (4.4)$$

$$u_y = (G_{fy} + m_x^2 G_{cay}) e_y - (m_x m_y G_{cay}) e_x$$



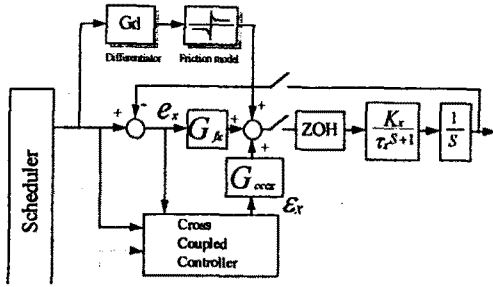
그림(3) 전체 시스템 구성도

4.2 비선형요소의 보상

이러한 비선형 마찰력을 보상하기 위해서 구성된 피드포워드 제어기는 모델링된 비선형 마찰력중에서 쿨롱마찰력에 근거하여 기준입력의 속도에 의해 보상제어입력이 가해진다[6].

$$G_{ffk}(\dot{x}) = K_{ffk} \operatorname{sgn}(\operatorname{Ref}_{in}) \quad (4.5)$$

$$G_{ffv}(\dot{x}) = K_{ffv} \operatorname{sgn}(\operatorname{Ref}_{in})$$



그림(4) 피드포워드 제어기 구성도

5. 모의 실험

기준궤적으로 식(6.1)과 같이 주어진 원을 추적하는 기계적 시스템의 응답을 모의실험을 통하여 알아본다.

$$R_x(t) = K_x(1 - \cos \omega t) \quad (5.1)$$

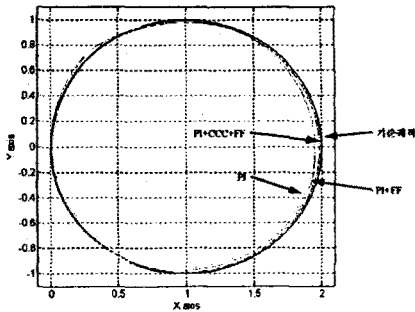
$$R_y(t) = K_y \sin \omega t$$

여기서 $K_x = K_y = 1$, 샘플링 시간 $\Delta t = 0.01$ 초이다.

피드백 제어기인 G_k 와 G_b 는 일반적인 PI 제어기를 사용하였으며, $K_p = 30$, $K_I = 2$ 이다.

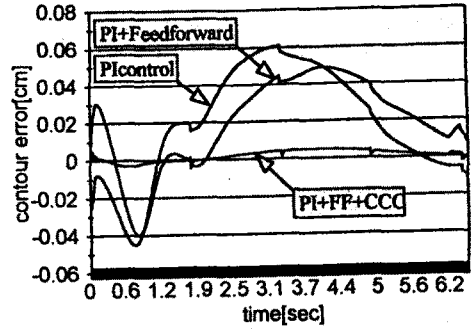
그림(5)는 기준궤적을 따라가는 공구의 움직임を示 나타내 준 것이다.

그림(6)과 <표1>은 윤곽오차를 나타낸 것인데 제한된 상호결합 제어기 + 피드포워드 제어기의 성능이 우수함을 나타낸다.



제어기	윤곽오차	오차평균값
PI	11.97	0.0184
PI+Feedforward	16.14	0.0248
PI+Feedforward+CCC	1.57	0.0024

<표1> 원에 대한 윤곽오차



그림(6) 윤곽오차

6. 결론 및 향후과제

이상과 같이 계산된 윤곽오차에 의한 보정입력을 사용한 상호결합 제어기의 제어 입력이 시스템에 가해지기 때문에 윤곽오차를 더 많이 감소시킬 수 있었다. 또 피드포워드 제어기에 의해서 모델링된 마찰력성분을 보상함으로써 외란에 둔감함을 보였다.

그러나 상호결합 제어기는 궤적의 기용기에 따라 이득이 변하는 시변(time varying)시스템이다. 시행착오에 의해서 제어기를 튜닝할 수도 있지만 좀 더 체계적인 해석 및 설계 방법이 요구되며 안정도의 판별에 관한 연구가 진행되어야 한다.

7. 참고문헌

- [1] K. Srinivasan and P. K. Kulkarni "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanism" - Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. ASME, Vol. 112, pp225-232, JUNE 1990
- [2] Hua-Yi Chuang and Chang-Huan Liu "Cross-Coupled Adaptive Control for Multiaxis Machine Tools" - Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. ASME, Vol. 113, pp451-457, JUNE 1990
- [3] P. K. Kulkarni and K. Srinivasan "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Feed Drive Servomechanisms" - Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. ASME, Vol. 111, pp140-148, MAY 1989
- [4] Brian Armstrong-Helouvy, Pierre Dupont and Carlos Canudas De Wit "A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction" - Automatica. Vol. 30, No. 7, pp. 1083-1138, 1994
- [5] Y.Koren and C.C.Lo "Advanced Controllers for Feed Drives" - Annals of the CIRP Vol. 41/2/1992 pp. 689-698
- [6] Ho Seong Lee and Masayoshi Tomizuka "Design of Friction Compensated and Robust Digital Tracking Controllers for High Accuracy Positioning Systems" - Japan-U.S.A. SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION pp. 155-162, 1994