

Precise Digital Tracking Control for Multi-Axis Servo System

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

Abstract - In this thesis, a digital tracking controller is proposed for multi-axis position control system. Tracking and contouring error exist when the machine tool moves along a trajectory in multi-axis system. The proposed scheme enhances the tracking and contouring performance by reducing the errors. Also, an optimal tracking controller reduces the tracking error by the state feedback and the 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. Finally, the performance of the proposed controller is exemplified by some simulations and by applying the real XY servo system

Key Words : Multi-axis servo system, contouring error, tracking controller

1. 서 론

현대 산업계에서는 생산 공정에 자동화를 추구하고 있다. 그 대표적인 예로 수치 제어 공작 기기나 다관절 로봇 등 을 생산 라인에 도입하는 것을 들 수 있다. 이러한 자동화된 공작 기계로 제품을 생산하려 할 때 연속된 궤적을 따라 공 구를 이동시켜야 할 경우가 있다. 이러한 연속된 궤적은 2차 원이나 3차원 공간상에 나타나게 되는데 공구가 궤적을 따라 이동하려면 공간상의 궤적을 각 축에 연결된 구동기의 움직 임으로 나타내야 한다. 이때 공구의 움직임을 각 구동기 공 간의 움직임으로 분해되며 이러한 구동기 공간의 움직임을 제어할 경우 각각의 구동기에서 발생하는 오차가 전체적인 추적오차(tracking error)나 윤곽오차(contouring error)를 유발한다. 그러므로 한 축의 오차가 전체적인 움직임에 영향을 미치게 되는데 이러한 현상을 고려하지 않고 각각의 축을 독립적으로만 제어하면 윤곽오차의 발생 등으로 시스템의 성능 저하가 나타나게 된다. 이러한 윤곽 오차를 줄이기 위하여 다축의 제어시에 있어서 축간의 시스템 이득이 일치하지 않 을 때 정상 상태의 오차와 천이 상태의 윤곽 오차가 있음을 발견하고 속도의 감소와 시스템의 이득을 증가시킴으로 해결하였다[1].

Tomizuka 등은 극점-영점 상쇄 방법인 ZPETC 나 LQ 최적 제어기 등을 디지털 추적제어기로 설계하여 추적 정밀 성을 향상시켰다[2][3]. 그러나 상기의 제어 알고리즘들은 단 일 축 제어기를 대상으로 하였으므로 각각의 축이 정확한 위 치 제어를 수행한다 하더라도 정확한 궤적 정밀도를 항상 보 장할 수 없다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 상호결합

제어(Cross Coupled Control) 기법이 제안되었다. 따라서 다 축 서보 시스템인 경우 각 축의 상태들이 서로 관련되어 있 으므로 각각의 축이 따로 제어되는 것이 아니라 서로의 오차 를 보상해 나간다는 장점을 가지고 있다. Koren과 Kulkarni, Srinivasan등은 계산된 윤곽오차를 보정하는데 상호결합 제 어기를 제안하였다[3][4]. 그러나 이러한 상호 결합 제어기의 윤곽 오차의 계산은 직선 궤적을 기반으로 하여 계산되기 때 문에 기준 궤적으로 곡선 궤적이 주어진다면 정밀도가 저하 된다[5]. 서보 시스템이 가지고 있는 주된 비선형 특성은 대 부분 쿨롱마찰력, 정적 마찰력, 점성 마찰력이며 그 외에 구 동기의 포화, 백래쉬, 사구간 등이 있다. 이러한 비선형 마찰 력 중에서 쿨롱 마찰력은 스텝의 외란과 유사하며 많은 하모 닉 성분을 포함하고 있기 때문에 고정밀 위치제어 시스템을 구현하는데 한계를 갖고 있다[6]. 이러한 쿨롱 마찰력을 기계 장치 이동속도의 함수로 모델링하고, 모델링에 근거하여 보상 해 줄 제어입력으로 피드포워드 제어기를 추가하여 쿨롱 마 찰력을 보상하였다. 본 논문에서는 고성능의 추적제어기를 설계하기 위하여 극점배치 기법중 최적 제어기법을 사용하였 으며 정상상태의 오차를 감소시키기 위하여 적분 형태를 포 함하였다 또한 각 축에서 발생하는 위치 오차를 상호결합 제 어기의 입력으로 사용하고 비선형 마찰력을 고려한 피드포 워드 제어기를 추가하여 성능을 개선하였으며 이를 모의 실험 및 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

2. 다축 시스템의 오차

2.1 직선 궤적에서의 윤곽오차

윤곽오차는 현재의 공구의 위치와 원하는 궤적의 방향과 수직으로 발생하는 식 2.1 과 같은 오차인데 일반적으로 각 축의 위치오차와 명령 궤적의 기울기 θ 의 함수로 나타낼 수 있다[1][2].

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

* 正會員 : 仁荷大 工大 電子電氣컴퓨터工學部 博士課程
** 正會員 : 仁荷大 工大 電子電氣컴퓨터工學部 教授 · 工博
接受日字 : 2000年 3月 29日
最終完了 : 2000年 11月 1日

여기서 e_x 와 e_y 각축의 위치오차이고, θ 는 명령궤적의 x 축에 대한 경사각이고, ε 은 윤곽오차이다.

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

여기서 v_x, v_y 는 기준궤적의 x, y 축의 속도성분이다.

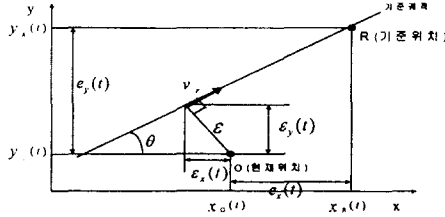


그림 2.1 직선 궤적의 윤곽오차

Fig. 2.1 Contour error for a straight line

2.2 곡선 궤적에서의 윤곽오차

기준 궤적이 그림 2.1과 같이 직선으로 주어지는 경우에는 θ 값이 일정하지만 명령궤적이 그림 2.2와 같이 곡선으로 주어지는 경우에는 움직이는 방향에 따라서 θ 값이 변한다. 이러한 경우에는 윤곽 오차는 식 2.3과 같이 표현할 수 있다 [3][7].

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

$$\varepsilon = -e_x\left(\sin\theta - \frac{e_x}{2R}\right) + e_y\left(\cos\theta + \frac{e_y}{2R}\right) + H. O. T. \quad (2.3)$$

여기서, 서보의 실제 위치 P_x, P_y 는 식 2.4와 같다.

$$P_x = R_x - e_x = R\cos\theta + x_o - e_x$$

$$P_y = R_y - e_y = -R\sin\theta + y_o - e_y \quad (2.4)$$

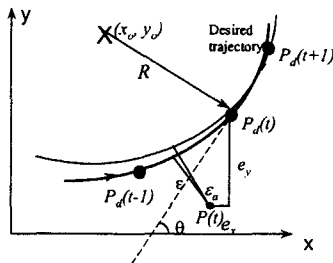


그림 2.2 곡선 궤적의 윤곽 오차

Fig. 2.2 Contour error for a curved contour

3. 제어기의 설계

3.1 XY 테이블의 모델링

XY 테이블은 각 축이 직선운동을 하며, 축간의 결합은 직각으로 되어있기 때문에 직각 좌표계를 사용하는 2 차원 위치 제어시스템이다. 비선형 요소로는 마찰력 및 사구간(dead zone)등을 들 수 있다. 이러한 비선형 요소 중에서 마찰력을 중심으로 모델링 하면 점성, 쿨롱, 최대정지 마찰력 등을 고

려할 수 있으며 각 축에 대한 비선형 마찰력에 대한 기계적 방정식은 식 3.1로 표현되어 진다[4][6].

$$J_x \frac{dv_x(t)}{dt} + B_x w_x = u_x(t) - T_{fx}(t)$$

$$J_y \frac{dv_y(t)}{dt} + B_y w_y = u_y(t) - T_{fy}(t) \quad (3.1)$$

여기서 J_x, J_y 는 관성모멘트, $u_x(t), u_y(t)$ 는 각 축을 구동시키는 서보 모터에 인가되는 입력토크이고, B_x, B_y 는 점성마찰력이고, $T_{fx}(t), T_{fy}(t)$ 는 비선형 마찰력으로 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$T_{fx}(v_x) = \text{sgn}(v_x)a_x$$

$$T_{fy}(v_y) = \text{sgn}(v_y)a_y \quad (3.2)$$

여기서 a_x, a_y 는 쿨롱 마찰력이다.

상태 방정식의 형태로 나타내면 식 3.3과 같이 표현되어 진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\omega}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B_x}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{B_y}{J_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_x \\ \omega_x \\ \theta_y \\ \omega_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_x}{J_x} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_y}{J_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_{fx} \\ 0 \\ T_{fy} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

3.2 디지털 추적제어기의 설계

제어입력과 오차를 최소화시키기 위해서 최적의 상태피드백 이득을 구할 수 있는 LQ(Linear Quadratic) 최적제어기법을 도입한다. 일반적인 최적제어 기법은 크게 레귤레이션 문제와 추적 문제가 있다. 그 중에서 추적문제를 해결하기 위해서는 성능지수에 추적오차 및 제어 입력 u 의 2차 형태의 값을 최소화시키는 문제로 귀결된다. 이러한 LQ문제를 풀기 위해서는 대수 리카티 방정식을 이용하며 여기서 얻어진 최적이득 K 를 상태피드백 제어기의 이득으로 사용한다. 여기서 다루는 2축 시스템의 위치 및 속도의 경우 상태를 엔코더를 통하여 쉽게 검출할 수 있기 때문에 적합하다[2].

전체시스템의 동적 방정식은 식 3.4와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx \quad (3.4)$$

연속형 동적 방정식으로부터 이산 시간의 동적 상태방정식을 식 3.5와 같이 표현할 수 있다.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (3.5)$$

여기서,

$$\Phi = I + A\Delta t$$

$$\Gamma = \Psi \Delta t$$

$$\Psi = \int_0^{\Delta t} e^{As} ds$$

$$= I\Delta t + A\frac{\Delta t^2}{2!} + A^2\frac{\Delta t^3}{3!} + \dots + A^i\frac{\Delta t^{(i+1)}}{(i+1)!} + \dots$$

추적 제어기의 최적화문제에는 초기값과 최종값을 알아야 하는 2 점 경계치 문제가 있다. 본 논문에서는 기준입력을 상수로 하고, 시간이 무한대 일 때 출력이 기준입력에 수렴하는 성질을 이용하여 오차에 관한 상태방정식을 세운다. 상태방정식의 성능 지수를 최소화 하는 상태되먹임 이득을 구하여 원하는 제어시스템을 구성하게 된다. 또한 제어시스템에 적분동작을 추가하여 서보 시스템에서의 정상상태 오차를 감소시키는 역할을 한다. 적분동작을 취하기 위하여 새로운 상태변수 η 를 다음과 같이 정의한다. 새로운 상태변수 η 를 상태방정식에 추가하기 위하여 식 3.6과 같이 확장된 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\eta(k) = \eta(k-1) + r(k) - y(k) \quad (3.6)$$

제어입력 $u[k]$ 는 다음과 같다.

$$u(k) = -Kx(k) + K_I\eta(k) \quad (3.7)$$

제어대상 시스템과 적분변수 η 를 함께 표현하여 상태를 확장한 전체 확장 시스템은 식 3.8과 같이 표현할 수 있다..

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \eta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ -C\Phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \eta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ -C\Gamma \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(k+1) \quad (3.8)$$

최적의 상태되먹임 이득을 얻기 위해서는 동적 방정식의 대수 리카티 방정식을 풀어야 한다. K 를 구하기 위해 시간이 무한대로 갈때의 오차와 제어입력의 2차형을 최소화하는 문제로 정의할 수 있다.

해를 구하기 위해 최종점을 무한대로 잡는다. 즉, 시간의 인덱스 k 가 무한대라 할 때의 시스템은 식 3.9와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x(\infty) \\ \eta(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ -C\Phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ \eta(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ -C\Gamma \end{bmatrix} u(\infty) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty) \quad (3.9)$$

오차의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_e &= x(k) - x(\infty) \\ \eta_e &= \eta(k) - \eta(\infty) \end{aligned}$$

오차의 동적 방정식은 식 3.10 과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x_e(k+1) \\ \eta_e(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ -C\Phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ \eta_e(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ -C\Gamma \end{bmatrix} u_e(k) \quad (3.10)$$

상기 오차 방정식의 동적 특성을 바탕으로 최적의 제어입력과 추적오차를 최소화시키기 위해 성능지수를 다음과 같이 2차형으로 잡고 에너지를 최소화시키는 상태 되먹임 제어기

의 이득 K 값을 구하게 된다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\langle \xi, Q\xi \rangle + \langle w, R w \rangle] \quad (3.11)$$

이러한 성능 지수를 최소화하는 제어입력 u 를 얻기 위해 상태되먹임 이득 K 를 구하려면 정상상태 리카티 방정식을 풀어야 한다.

$$P(k+1) = Q + \Phi_a^T P(k) \Phi_a - \Phi_a^T P(k) \Gamma_a (R + \Gamma_a^T P(k) \Gamma_a)^{-1} \Gamma_a P(k) \Phi_a \quad (3.12)$$

$$K_a = (R + \Gamma_a^T P(k) \Gamma_a)^{-1} \Gamma_a P(k) \Phi_a \quad (3.13)$$

상기 리카티 방정식의 해는 순환형으로 풀도록 되어 있으며 P 행렬의 값이 일정하게 될 때까지 반복적으로 구해야 한다. 이렇게 구한 K 값으로 식 3.7 과 같은 제어입력을 발생시킨다. 그림 3.1은 단일축의 추적제어시스템을 나타낸 것이다. 각 상태의 상태 되먹임이 이루어지고, 오차의 적분값에 비례하는 제어입력이 일어나고 있음을 알 수 있다.

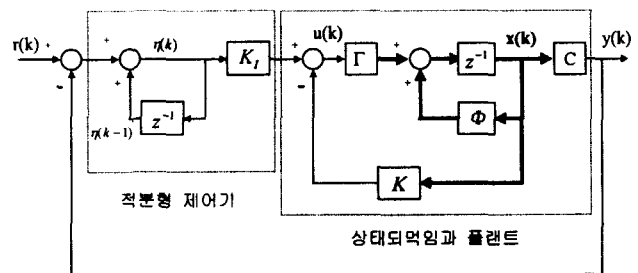


그림 3.1 LQ 서보 제어기의 구성
Fig. 3.1 Structure of the LQ controller

3.3 상호결합 제어기의 설계

다축 시스템에서 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. 상호결합 제어기(cross-coupled controller)를 사용하여 다축 시스템을 제어하려 할 경우 축의 독립적인 추적제어기는 그대로 사용하면서 계산된 윤곽오차에 의하여 그 축에 해당하는 윤곽오차만큼 보상입력을 가하여 줄 수 있다[1][3].

식 3.14는 위치오차와 윤곽오차에 의해 제어입력에 대한 관계식이다. 그림 3.2는 상호결합제어 시스템을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} u_x &= G_{fx} e_x + G_{cccx} \epsilon_x \\ u_y &= G_{fy} e_y + G_{cccy} \epsilon_y \end{aligned} \quad (3.14)$$

여기서 G_{fx} , G_{fy} 는 되먹임 제어기, G_{cccx} , G_{cccy} 는 상호결합 제어기, e_x , e_y 는 각 축의 추적오차이고 ϵ_x , ϵ_y 는 윤곽오차의 성분이다.

윤곽오차의 성분을 구하기 위해서는 ϵ 의 x 축 성분과 y 축 성분을 이용하여 식 3.15와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= -m_y \varepsilon = m_y^2 e_x - m_x m_y e_y \\ \varepsilon_y &= m_x \varepsilon = m_x^2 e_y - m_x m_y e_x \end{aligned} \quad (3.15)$$

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

각 축에서의 상호 결합 제어입력 값은 식 3.16과 17로 표현되어진다.

$$\begin{aligned} u_{ccc_x} &= m_y^2 G_{ccc_x} e_x - m_x m_y G_{ccc_x} e_y \\ u_{ccc_y} &= m_x^2 G_{ccc_y} e_y - m_x m_y G_{ccc_y} e_x \end{aligned} \quad (3.16)$$

오차의 입력으로부터 발생되는 제어값이 축상호간에 미치는 영향을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_{ccc_x} \\ u_{ccc_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_y^2 G_{ccc_x} & -m_x m_y G_{ccc_x} \\ -m_x m_y G_{ccc_y} & m_x^2 G_{ccc_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

여기서 G_{fx} , G_{fy} 는 추적 제어기
 G_{ccc_x} , G_{ccc_y} 는 윤곽제어기

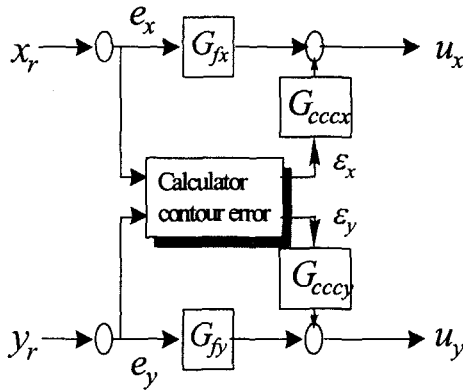


그림 3.2 상호 결합 제어기의 구조
 Fig. 3.2 Structure of Cross Coupled Controller

3.4 비선형 요소의 보상

비선형 마찰력을 보상하기 위해서 구성된 피드포워드 제어기는 모델링된 비선형 마찰력 중에서 쿨롱 마찰력 모델에 근거하여 기준입력의 속도에 의해 보상 제어입력이 가해진다 [6].

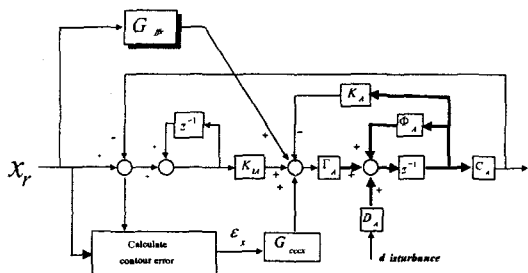


그림 3.3 피드 포워드 제어기의 구조
 Fig. 3.3 Structure of feedforward controller

$$\begin{aligned} G_{fx}(x) &= K_{fx} \operatorname{sgn}(\operatorname{Ref}_{vx}) \\ G_{fy}(x) &= K_{fy} \operatorname{sgn}(\operatorname{Ref}_{vy}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

4. 모의 실험

4.1 단위계단입력의 응답

그림 4.1 은 PI 제어기와 추적제어기의 성능을 비교한 것이다. LQ+Integral 형태의 제어기의 응답이 빠르고 오버슈트가 작은 것을 알 수 있다.

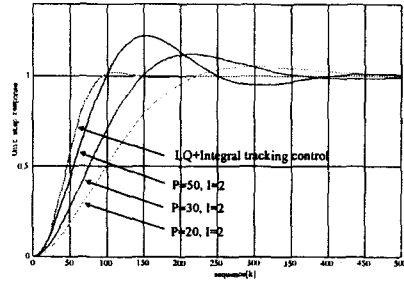


그림 4.1 단위 계단 응답 특성
 Fig. 4.1 Characteristics of unit step response

4.2 원궤적일 경우

기준궤적으로 식 4.1 과 같이 주어진 기준궤적인 원을 추적하는 기계적 시스템의 응답을 모의실험을 통하여 분석하였다.

$$R_x(t) = K_x(1 - \cos \omega t), \quad R_y(t) = K_y \sin \omega t \quad (4.1)$$

그림 4.2 는 상호결합 제어기의 작용에 의해 윤곽 오차가 감소하는 것을 보여준다.

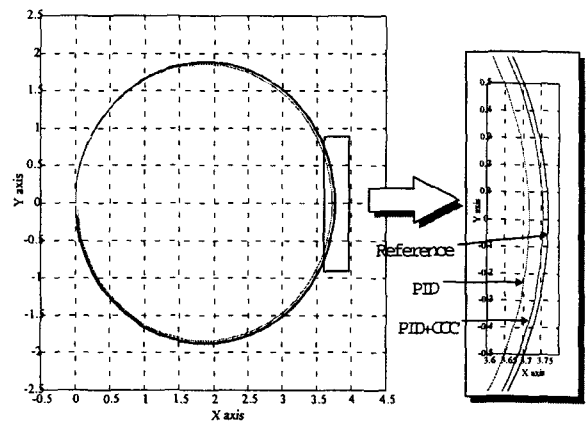


그림 4.2 PID와 PID + CCC 의 비교 (원궤적)
 Fig. 4.2 Comparison of the PID and PID + CCC
 (Circular contour)

그림 4.3은 기준입력에 일치하는 LQ서보 제어기의 출력을 나타낸 것이다. 원 궤적일 경우의 모의 실험 결과에서 보듯이 LQ 서보제어기와 상호결합 제어기의 응답이 우수한 것을 알 수 있다.

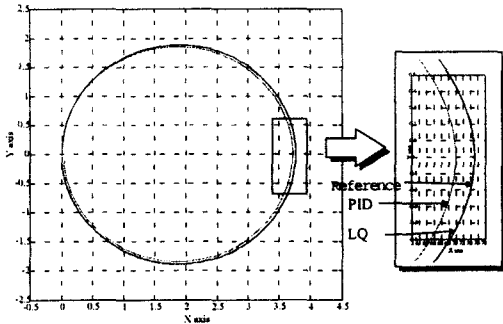


그림 4.3 PID와 LQ 의 비교 (원궤적)
 Fig. 4.3 Comparison of the PID and LQ
 (Circular contour)

4.3 사각형 궤적일 경우

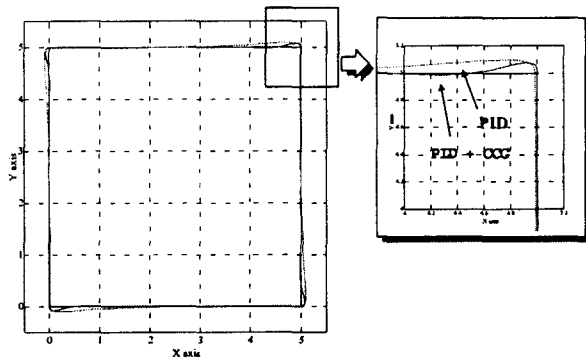


그림 4.4 PID와 PID + CCC 의 비교
 Fig. 4.4 Comparison of the PID and PID
 + CCC (Rectangular)

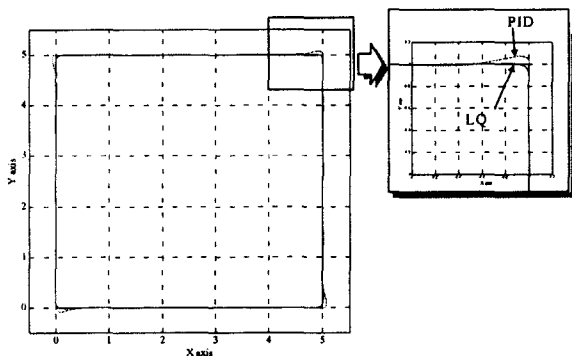


그림 4.5 PID와 LQ 의 비교 (사각형 궤적)
 Fig. 4.5 Comparison of the PID and LQ
 (Rectangular contour)

그림 4.4와 4.5는 사각형을 기준궤적으로 하였을 경우의 모의 실험 결과이다. 기준궤적의 모서리부분을 확대한 응답특성을 보면 PID 제어기의 응답 특성에 오버슈트가 있고, 정상상태 도달시간이 길지만 상호결합 제어기를 추가하였을 경우 정상상태 도달속도가 빨라지는 것을 알 수 있다.

5. 실험 및 결과

5.1 실험장치의 구성

실험장치의 전체적인 구성은 그림 5.1 과 같다. 실험에 필요한 장치는 크게 대상플랜트인 XY 테이블, 각 축의 구동원인 AC서보 모터, 모터드라이브용 인버터, 그리고 제어기를 구현하는데 필요한 DSP보드 그리고 데이터 수집 및 개발에 필요한 IBM-PC로 되어 있다.

XY 테이블은 직각 좌표계를 사용하는 위치제어시스템이고, AC 서보모터를 각 축의 구동기로 하며 리드 스크류에 의하여 모터의 회전운동을 XY테이블의 직선운동으로 바꾸어 준다. 전체 시스템의 구성 및 장치는 그림 5.1과 같으며, 실험에 사용된 XY 테이블의 사양은 다음과 같다.

표 5.1 XY 테이블의 사양
 Table 5.1 Specification of XY table

항목	X 축	Y축
구동모터정격	200 [W]	100 [W]
통전방식	120도 PWM방식	120도 PWM방식
엔코더펄스수	1000 펄스 * 4 > 4000펄스	1500 펄스 * 4 > 6000펄스
분해능	2.5 [μ m]	1.67 [μ m]

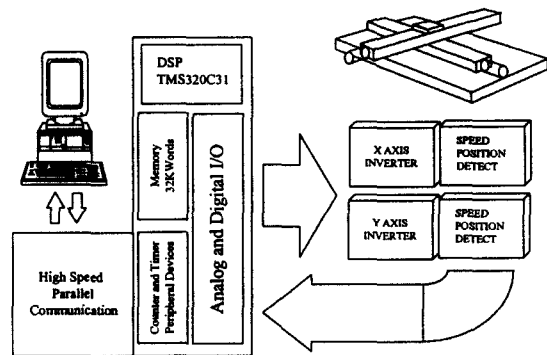


그림 5.1 실험장치 구성도

Fig. 5.1 Configuration of experimental equipments

5.2 실험 결과

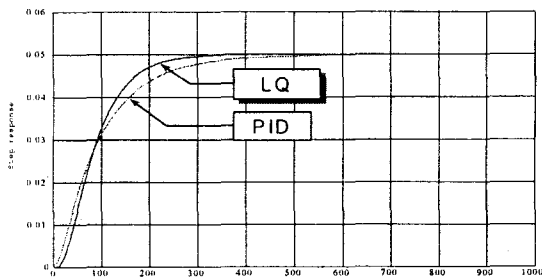
그림 5.2 는 각 축의 테스트 함수로 위치 스텝입력을 가하였을 경우의 응답특성이다. 그림 5.2(a),(b) 는 X축과 Y축 각각에 스텝 입력을 가했을 경우 LQ 서보 제어기와 이득 값이 다른 PID 제어기와의 비교를 한 결과 파형이다. 스텝응답 파형에서 볼 수 있듯이 LQ 제어기가 PID 보다 상승시간과 정

상 상태 도달 시간이 더 빠른 것을 알 수 있다.

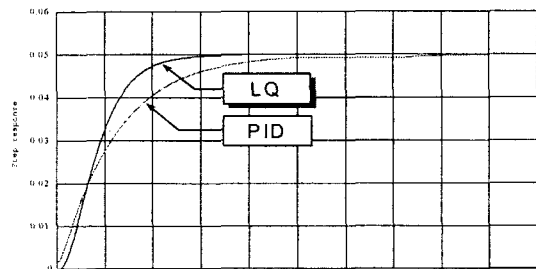
그림 5.3은 반경 5[cm]의 원 궤적의 경우 실험 결과이다. 그림 5.3 (a)는 PID 제어기와 LQ 서보 제어기와 비교를 한 결과 파형으로 LQ 서보 제어기가 PID 제어기보다 응답이 우수함을 알 수 있다. 그러나 모터의 회전 방향이 바뀌어 속도가 작을 때 비선형 특성이 나타남을 알 수 있다. 또 윤곽 오차의 감소를 위해서 상호결합제어 입력을 가하여 나타난 실험 결과를 표 5.2에 비교하였듯이 약 62[%]정도의 성능 개선 효과를 볼 수 있으며 또한 저속 부분의 비선형 특성이 개선되는 것을 볼 수 있다. 그림 5.4는 한 변의 길이가 5 [cm]인 사각형 궤적의 경우 실험 결과로서 원궤적 경우와 마찬가지로 저속인 부분에서 비선형 특성이 나타남을 알 수 있다. PID 제어기의 경우 대비하여 LQ 서보 제어기의 경우 정상상태의 도달이 빠르고 정상상태 오차가 작은 것을 알 수 있다. 그러나 모서리 부분의 응답 특성이 저하되고 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 모서리의 응답특성은 상호 결합 제어기의 추가로 특성이 향상되는데 그림 5.4 (b)에 나타나 있다. 실험 결과에서와 같이 모서리 부분의 오차가 적은 것을 알 수 있다. 그림 5.4 (c), (d)는 추적 및 윤곽 오차를 나타낸 것으로 윤곽오차의 감소가 뚜렷함을 알 수 있다. 표 5.3에서 비교하였듯이 약 60[%]의 오차 개선 효과가 있다.

그림 5.5는 비선형 마찰력을 보상하기 위해 구성한 피드 포워드의 성능에 대한 실험 결과 파형으로써 표 5.4에서 알 수 있듯이 피드 포워드 제어기가 있는 경우가 없는 경우에 대비하여 성능이 개선됨을 알 수 있다.

5.2.1 스텝 응답



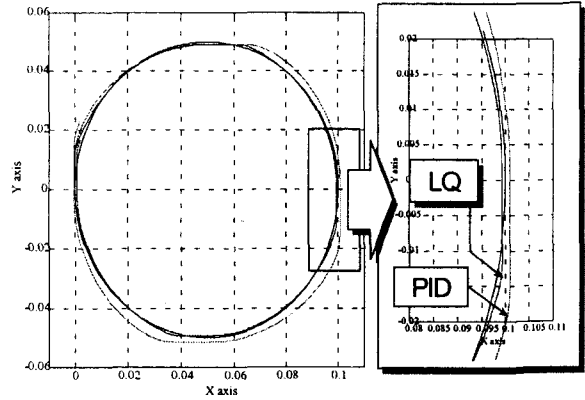
(a) X 축
(a) X axis



(b) Y 축
(b) Y axis

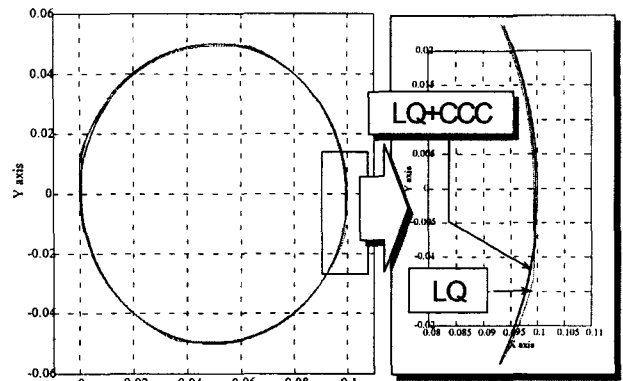
그림 5.2 스텝 응답 특성
Fig. 5.2 Characteristics of step response

5.2.2 원궤적일 경우의 응답



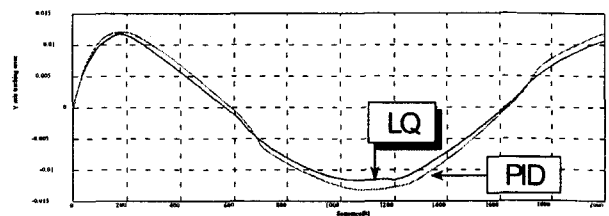
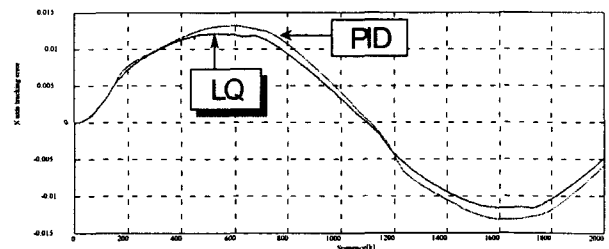
(a) PID와 LQ의 비교

(a) Comparison of the PID and LQ



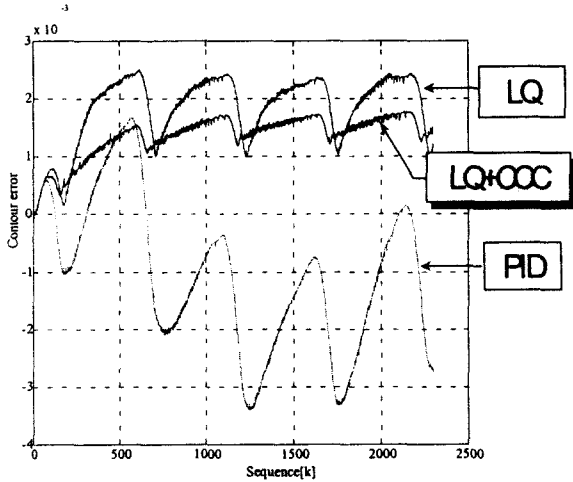
(b) LQ와 LQ + CCC의 비교

(b) Comparison of the LQ and LQ + CCC



(c) 추적 오차

(c) Tracking error

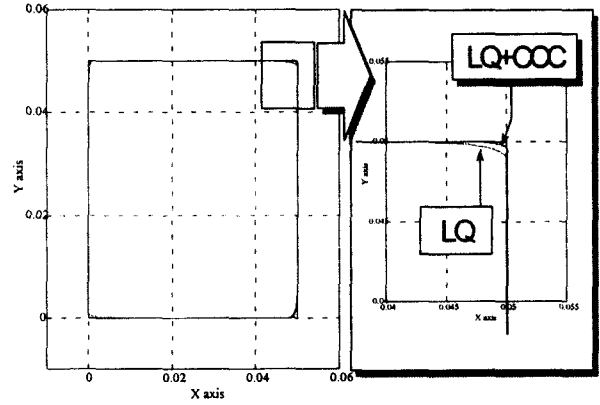


(d) 윤곽 오차
(d) Contour error

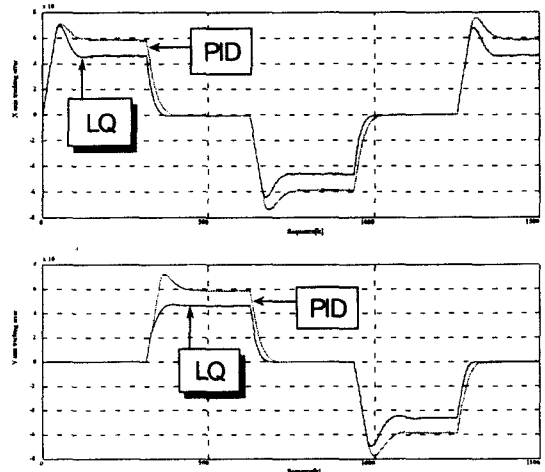
그림 5.3 추적 및 윤곽 오차의 비교 (원계적)
Fig. 5.3 Comparison of the tracking and contour errors

표 5.2 오차 평균값의 비교
Table 5.2 Comparison of average errors (Circular contour)

제어기	윤곽오차 [cm]
PID	0.0021
LQ + CCC	0.06013
비 교	61.90 %

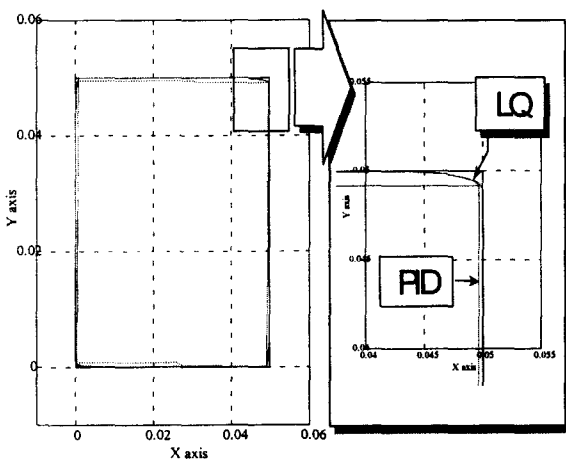


(b) LQ와 LQ + CCC 의 비교
(b) Comparison of the LQ and LQ + CCC

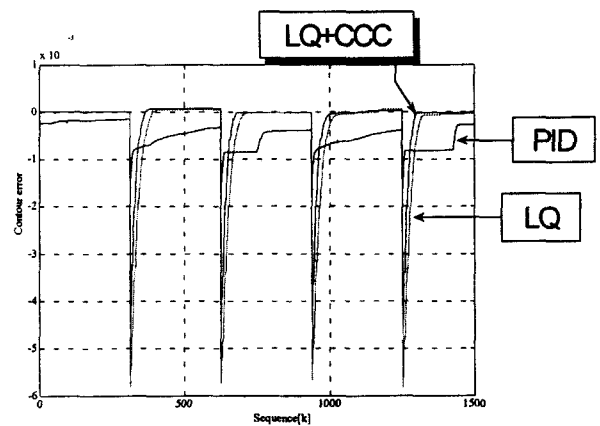


(c) 추적 오차
(c) Tracking error

5.2.3 사각형 궤적의 응답



(a) PID와 LQ 의 비교
(a) Comparison of the PID and LQ



(d) 윤곽 오차
(d) Contour error

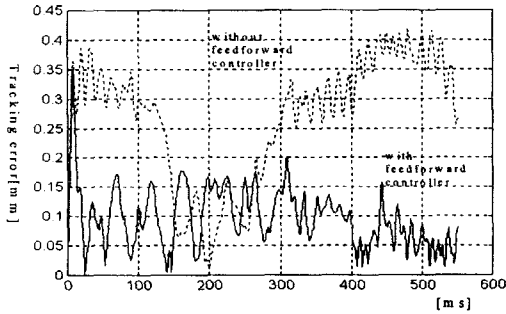
그림 5.4 추적 및 윤곽 오차 비교 (사각형계적)
Fig. 5.4 Comparison of the tracking and contour errors

표 5.3 오차 평균값의 비교

Table 5.3 Comparison of average errors (Rectangular contour)

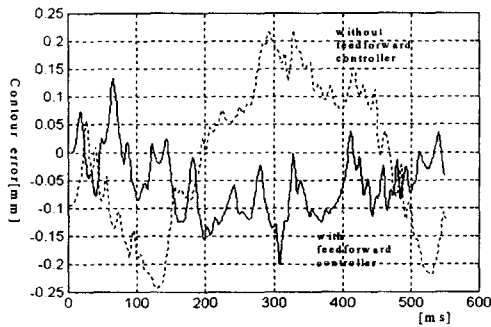
제어기	윤곽오차 [cm]
PID	0.0028
LQ + CCC	0.0017
비교	60.71 %

5.2.4 피드 포워드 제어기의 특성



(a) 추적 오차

(a) Tracking error



(b) 윤곽 오차

(b) Contour error

그림 5.5 피드 포워드 제어기의 성능

Fig. 5.5 Performance of feedforward controller

표 5.4 오차 평균값의 비교

Table 5.4 Comparison of average errors

제어기	추적오차 [mm]	윤곽오차 [mm]
feedforward 없는 경우	0.268	0.114
feedforward 있는 경우	0.097	0.068
비교	36.38 %	59.66 %

6. 결 론

본 논문에서는 추적성능과 윤곽성능을 향상시키기 위해서 최적의 디지털 추적 제어기와 상호결합 제어기를 설계하였다. 추적 제어기의 설계시 적분동작을 최적화 과정에 도입하여 확장된 동적상태 방정식을 가지고 리카티 대수방정식을 풀어 최적의 추적 제어기를 구성하였다. 또한 위치오차 정보와 기준궤적의 발생 정보를 이용하여 윤곽오차를 계산하고

각 축의 윤곽오차 성분을 추출해 낸 후 계산된 윤곽오차 성분을 상호결합 제어기의 입력으로 사용하여 보정입력을 각 축의 제어입력에 추가했다. 그 결과 추적오차 및 윤곽오차를 확연하게 감소시킬 수 있었다. 또 피드포워드 제어기에 의해서 모델링된 마찰력성분을 보상함으로써 외란에 둔감함을 보였다. 그런데 상호결합 제어기는 궤적의 기울기에 따라 이득이 변하는 시변 시스템이다. 상호결합 제어기의 제어이득의 선정에 있어서 시행 착오에 의해서 제어기를 조정할 수도 있지만 보다 체계적인 해석 및 설계 방법이 요구되어 진다.

참 고 문 헌

[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, pp.225-232, June, 1990

[2] M.Tomizuka and D.Janczak, "Linear quadratic design of decoupled preview controllers for robotic arms," Int. of Robotics Res.,vol.4,no1,pp.67-74, 1985

[3] Y. Koren and C.C. Lo, "Advanced controllers for feed drives," Annals of the CIRP, Vol. 41/2/1992, pp. 689-698

[4] P.K. Kulkarni and K. Srinivasan, "Optimal contouring control of multi-axis feed drive servomechanism." Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, ASME, Vol.111, pp.140-148, May, 1989

[5] H.Y. Chuang and C.H. Liu, "Cross-coupled adaptive control for multi-axis machine tools," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, ASME, Vol.113,pp.451-457,June, 1990

[6] H.S.Lee and M.Tomizuka, "Design of friction compensated and robust digital tracking controllers for high accuracy positioning systems," Proc. of Japan symposium on flexible automation, pp. 155- 162, 1994

[7] 이재희, 서보 시스템의 추적 성능 향상에 관한 연구, 인하대학교 공학박사 학위 논문, 1997

저 자 소 개

신 두 진 (申 斗 眞)
전기학회 논문지 제 49권 제 8호 참조
Tel : 032-860-7394, Fax : 032-864-6442
E-mail : djshin@inhavision.inha.ac.kr

허 옥 열 (許 旭 烈)
전기학회 논문지 제 49권 제 8호 참조
Tel : 032-860-7394, Fax : 032-864-6442
E-mail : uyhuh@inha.ac.kr