韓國精密工學會 2001年度 春季學術大會論文集 pp.271~274 KSPE 01S060

# 다축 구동 시스템의 교차식 구조를 이용한 최적 위치동기 제어

주백석*, 김성수(고려대 대학원 기계공학과),
홍대희, 박진무(고려대 기계공학과), 조태연(삼성 테크윈)

# Optimal Control for Synchronizing Positions of Multi-Axis Driving System with Cross-Coupled Structure

Baeksuk Chu*, Sungsoo Kim, Daehie Hong, Jinmoo Park, and Tae Yeon Cho

**ABSTRACT**

The present paper deals with the development of digital contouring controller for multiaxial servosystem. Instead of coordinating the commands to the individual feed drives and implementing closed position loop control for each axis, this work is achieved by the evaluation of a optimal cross-coupled compensator aimed specifically at improving contouring accuracy in multi-axial feed drives. The optimal control formulation explicitly includes the contour error in the performance index to be minimized. The contouring control is simulated for straight line. The results show that the proposed controller reduces contouring errors considerably, as compared to the conventional uncoupled control for biaxial systems.

**Key Words** : Contouring Error (윤곽오차), Cross-Coupled Structure (교차식 구조), Optimal Control (최적제어), Performance Index (성능지수), Multi-axial Motion Control (다축 모션 제어)

## 1. 서론

다축 모션 제어 시스템에서는 가공이나 운반 등의 복잡하는 일을 정확하게 수행하기 위해서 각 축의 운동을 조화롭게 제어하는 것이 필요하다. 이러한 목적을 위해 일반적으로 사용되는 전통적인 방법은 각 축의 운동을 독립적으로 해석하여 그 운동 경로를 추적하도록 하는 독립축 제어 방식이다. 이 방식은 각 축에 독립적으로 비례-적분 제어 등과 같은 간단한 제어 방식을 적용함으로써 비교적 높은 제어 성능의 달성이 가능하다. 많은 연구가 이 분야에 관해 선행되었는데 그 대표적인 연구로 Koren[1]의 연구가 있다. 그는 1 차 지연형 속도루프모델에 대하여 정상상태 오차감소 및 오버슈트 억제라는 제어 목적을 적절한 게인 조절을 통하여 달성하였다. Boillinger[2]등은 피드포워드제어를 통해 추적오차를 감소시켰으며 Doraiswami[3]등은 서보 보상기와 안정화 보상기의 2 자유도방식을 사용하여 추적성능 및 외란 제거능력 향상을 구현했다.

그러나 이러한 독립축 제어방식의 경우 각 축의 이득이나 시상수 같은 동력학 거동이 다르거나 비대칭적인 외란이 각 축에 인가되었을 경우에는 원하는 경로와 실제 경로와의 거리가 크게 됨으로써 전체적인 제어 목적을 달성하기 어렵게 된다. 이러한 독립축 제어 방식의 단점을 보완하기 위하여 제시된 방식이 윤곽오차 제어 방식이다. 이 방식은 윤곽오차를 직접 제어기 설계 시에 반영함으로써 이동 중에 제어기가 스스로 이 오차를 줄이는 방향으로 제어작용을 하게 된다. 윤곽오차 제어는 Koren[4]에 의해 최초로 개념이 확립되고 제시되었으며 이를 감소시킬 수 있는 제어기법으로써 교차식 구조를 사용하였다. 그리고 Kulkarni[5]등은 윤곽오차 개선을 위해 최적 제어방식에 의한 윤곽오차 제어기를 선행적으로 연구하였다.

이 논문에서는 다축 구동 시스템의 교차식 구조를 가진 최적 제어기법을 이용하여 원하는 궤적과 실제 경로와의 차이 즉, 윤곽 오차를 최소화하고 따라서 각 축간의 위치를 정확히 일치시키는 위치동기 제어를 실현하게 된다. 우선 각 축의 독립적인 궤적 추종을 위해 전통적인 기법인 비례 제어가 사용된다. 그리고 추가적으로 윤곽 제어 성능 향상을 위해 최적 제어기로부터의 입력이 모델에 인가된다. 이 최적 제어기는 성능 지수(performance index)로 윤곽 오차와 제어 입력을 갖게 되며 이러한 전체 제어 시스템의 조화로 인해 정확한 위치동기 제어가 실현된다. 그리고 하드웨어 구성, 모델링, 윤곽 오차 개념 등이 소개되며, 제어 성능은 직

신 경로 추적 시 여기에서 제시된 제어기를 다른 기존 제어 방식과 비교하여 봄으로써 평가한다

## 2. 동역학 시스템 모델링

제어 알고리즘의 성능 평가를 위한 플랜트 모델로는 표면 실장 부품을 PCB 등의 기판 위에 고속으로 장착하는 표면실장장비(chip mounter)의 구동부를 사용한다. 이 장비는 부품의 장착을 위해 두 축의 정밀한 위치동기 제어를 요구한다. 각 축의 이송 구동 장치는 단상 AC 서보모터, 2.5 cm 피치의 볼스크류, 선형 가이드로 구성되며, 이송 서보 드라이버는 SANYO DENKI 속도서보팩이 사용된다 위치 검출은 1 회전 당 2000 개의 펄스를 발생하는 엔코더에 의해 이루어지며 펄스 신호를 4 배로 체배하여 위치 정밀도를 높여 모델링을 수행하였다. 서보 드라이버에 표준 시험 신호로 계단 입력을 가하여 데이터를 수집하였다 그리고 그 실험 데이터로부터 근사적으로 다음과 같은 모델의 파라메타들이 획득되었다

-2 차 지연형 ·

$$G_x(s) = G_y(s) \cong \frac{k_v}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{1}$$

$k_v = 51956$ ((cts/sec)/volt)

$\omega_n = 108.4$ (rad/sec)

$\zeta = 0.7285$

-1 차 지연형

$$G_x(s) = G_y(s) \cong \frac{k_v}{\tau s + 1} \tag{2}$$

$\tau = 0.0155$ (sec)

$k_v = 52778$ ((cts/sec)/volt)

실험 응답과 근사적으로 구한 2 차 및 1 차 지연형 모델의 스텝 응답을 Fig. 1 에서 비교한다. 위의 1 차 지연형 모델을 제어기 설계에 이용한다

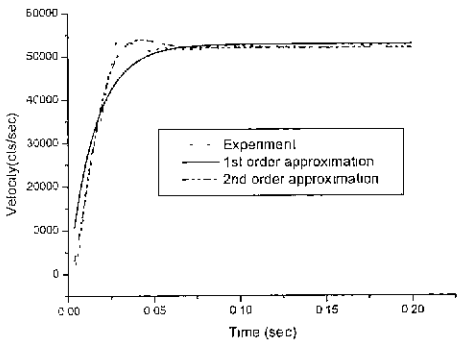


Fig 1 Experimental velocity loop response to 1 volt step input and its approximation model response

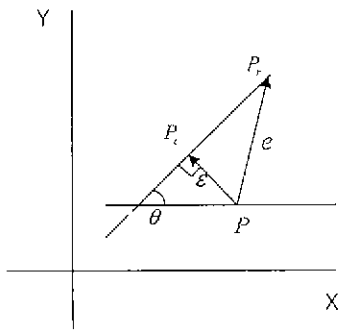


Fig 2 Tracking and contouring error on a straight line

## 3. 윤곽 오차 (Contour Error)의 정의 및 위치 동기 제어와의 관계

Fig 2 는 추적 오차 $e$ 와 윤곽 오차 $\varepsilon$ 의 기하학적 관계를 나타낸다 추적 오차 $e$ 는 지령 경로 위치 $P_r$ 과 실제 위치 $P$ 의 차를 뜻하며 윤곽 오차 $\varepsilon$ 은 지령 경로 상의 가장 가까운 점 $P_c$ 와 실제 위치 $P$ 와 의 차이다 윤곽 오차는 다음과 같은 관계를 통하여 제어기 설계에 반영된다

추적 오차 벡터 $e = P_r - P$ (3)

윤곽 오차 벡터 $\varepsilon = P_c - P$ (4)

윤곽 오차 벡터의 크기 ·

$$\begin{aligned} \|\varepsilon\| &= \left|(e_y - e_x \tan\theta)\cos\theta\right| \\ &= \left|e_y \cos\theta - e_x \sin\theta\right| \end{aligned} \tag{5}$$

위 식으로부터 유도된 윤곽 오차 벡터는 다음과 같다

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x \sin^2\theta - e_y \cos\theta \sin\theta \\ e_y \cos^2\theta - e_x \sin\theta \cos\theta \end{bmatrix} \tag{6}$$

그런데 2 축 서보 드라이브 구동 시스템의 위치 동기 제어는 2 차원 평면상의 윤곽 오차의 특수한 형태이다. 즉, 그림 Fig. 2 에서 X 축과 Y 축의 동기 제어는 X 축과 Y 축이 똑같이 움직이는 경로를 추종해야 하므로 그림에서 $\theta = 45°$ 인 직선을 추종하는 윤곽 제어 문제로 바꾸어 생각할 수 있다 따라서 이와 같은 관계에 의해 위치 등기 제어 문제는 윤곽 제어 문제로 바뀌게 된다

## 4. 최적 윤곽 제어기 설계

이 절은 윤곽 제어 성능을 개선 시키기 위한 제어 알고리즘 개발에 관한 것이다 여기에 제시된 최적 제어 문제는 그 성능 지수(performance index)가 앞 절에서 소개된 윤곽 오차와 교차식 제어 입력 신호인 $u_x$ 와 $u_y$ 의 2 차식 함수(quadratic

function)로써 이루어져 있다.

### 4.1 윤곽 제어 구조

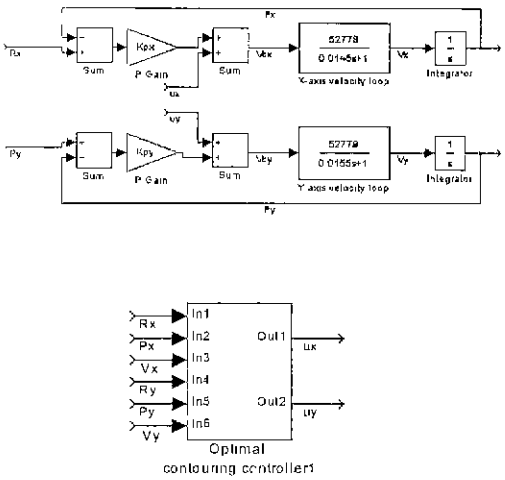


Fig 3 Block diagram of controlled feed drive including optimal cross coupled control action

Fig 3 은 다축 구동 시스템의 윤곽 제어 구조를 보여주고 있다. 이 그림에서 각 축의 위치 루프 보상은 비례 제어기 $K_{pi}(i=x,y)$ 에 의해 전통적인 방법으로 구현되며 윤곽 제어 성능을 향상시키기 위해 각 축의 속도 루프에 추가적인 제어 입력 $u_i(i=x\ y)$ 가 첨가된다

그림에서 속도 루프의 입력, $V_{ci}(i=x,y)$ 는 다음과 같은 형태를 갖는다

$$\begin{aligned} V_{ci}(k) &= K_{pi}e_i + u_i(k) \\ &= K_{pi}(R_i(k)-p_i(k)) + u_i(k),(i=x,y) \end{aligned} \tag{7}$$

그리고 각 축의 상태 벡터와 제어 입력 벡터 또 전체 상태 변수 표현은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$x_p(k)=\begin{bmatrix} p_x(k) & v_x(k) & p_y(k) & v_y(k) \end{bmatrix}^T \tag{8}$$

$$V_c(k)=\begin{bmatrix} V_{cx}(k) & V_{cy}(k) \end{bmatrix}^T \tag{9}$$

$$x_p(k+1)=A_p x_p(k)+B_p V_c(k) \tag{10}$$

$$\varepsilon(k)=C_p x_p(k)+C_r R(k) \tag{11}$$

지령궤적, $R(k)=\begin{bmatrix} R_x(k) & R_y(k) \end{bmatrix}^T$ (12)

### 4.2 최적 제어 접근

이 절에서는 다축 윤곽 추종에 대한 최적 제어 기법을 수식화 하겠다 앞 절에서 다룬 제어 구조에 최적 제어 개념을 적용시켜 최소화 되어야 할 성능 지수를 다음과 같이 정하였다

$$J=\sum_{k=0}^{\infty}\left[r_1\varepsilon^2(k)+r_2(u_x^2(k)+u_y^2(k))\right] \tag{13}$$

첫째 항은 측정된 윤곽 오차이고 반면에 둘째 항은 윤곽 제어 입력을 나타내며 $r_1, r_2$ 는 weighting factor 이다 그리고 이 식에 대한 algebraic Riccati equation 을 이용하여 최적 제어 입력을 구하면 다음과 같다

$$\begin{aligned} u_x(k) &= K_p\varepsilon_x(k)+K_{D1}V_x(k)\sin^2\theta \\ &\quad -K_{D2}V_y(k)\sin\theta\cos\theta \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} u_y(k) &= K_p\varepsilon_y(k)-K_{D1}V_x(k)\sin\theta\cos\theta \\ &\quad +K_{D2}V_y(k)\cos^2\theta \end{aligned} \tag{15}$$

$K_p$ , $K_{D1}$ , $K_{D2}$ 는 $\theta$ 에 독립적인 상수들이며 성능지수, $J$ 의 weighting factor, $r_1$ , $r_2$ 에 의존하는 값들이다. 위 제어 입력을 살펴 보면 다음과 같은 관계에 있다.

$$u_y(k)=-\frac{\cos\theta}{\sin\theta}u_x(k) \tag{16}$$

이 형태로부터 최적 윤곽 제어기에 의한 입력은 지령 궤적에 수직 방향으로 작동함을 알 수 있다. 따라서 이 최적 제어기의 가장 큰 효과는 윤곽 정밀도 즉, 지령 궤적의 수직 방향 오차 요소를 줄이는데 있다고 하겠다 그리고 X 축과 Y 축의 동력학이 완전히 일치하는 경우에는

$$K_{D1}=K_{D2} \tag{17}$$

와 같은 관계가 있으며 이것은 각 축의 제어 거동이 정확히 윤곽 오차 요소에 기초한 PD 제어와 같게 된다고 볼 수 있다

## 5. 성능 평가

이 절에서는 앞에서 이론적으로 제시된 윤곽 제어 알고리즘을 2 축 위치 동기 제어 시스템에 적용한다 2 축 서보의 동기 제어는 2 차원 평면상에서 $\theta$ = 45° 인 직선을 추종하는 윤곽 제어 문제로 바꾸어 설명할 수 있으므로 $\theta$ = 45° 직선 경로에 대해 시뮬레이션을 수행한다 그리고 기존의 서보제어기에 추가적으로 윤곽 제어기를 적용함으로써 얼마나 윤곽 추적 성능이 향상되었는가를 윤곽 오차의 관점에서 비교 평가한다 시뮬레이션에서 경로 추적 속도 및 가속도는 각각 2.5m/sec 와 2 2G 로 하였으며 샘플 시간은 1msec 로 하였다 시뮬레이션은 각 축의 동특성이 일치하지 않는 동적 부정합 시스

템(dynamically mismatched system)에 대해 행하였으며 부정합의 크기는 이 실험의 대상인 표면실장장비가 고정밀도를 요구하는 시스템이므로 우선 독립축 제어만을 실행했을 때 윤곽오차가 지령 경로 구간동안 대략 0.07mm 정도가 되도록 조정하였다. 1차 시스템으로 모델링 하였을 때 시상수가 대략 6%정도 차이가 나도록 하면 그 결과가 Fig. 4 와 Fig 5 에 나타난다.

이 그림들은 각각 직선경로 추적 시 독립축 제어방식과 교차식 구조만을 추가한 경우 그리고 교차식 최적제어방식을 추가한 경우의 경로 추적 결과이다. 교차식 구조만을 추가한 경우는 독립축 제어방식에 비해 2 배에서 10 배 이상 윤곽오차를 감소시켰고, 교차식 최적제어방식을 추가한 경우는 거의 100 배 이상의 윤곽오차 감소에 효과를 보였다.

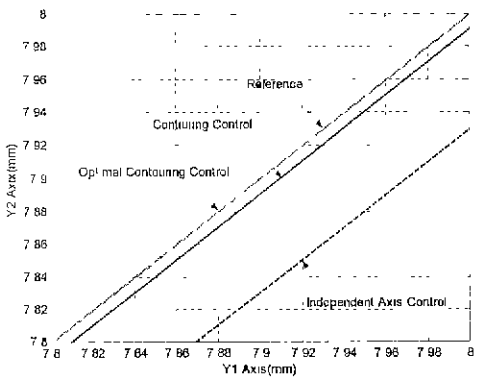


Fig 4 Straight-line contour response for independent axis control, contouring control, and optimal contouring control

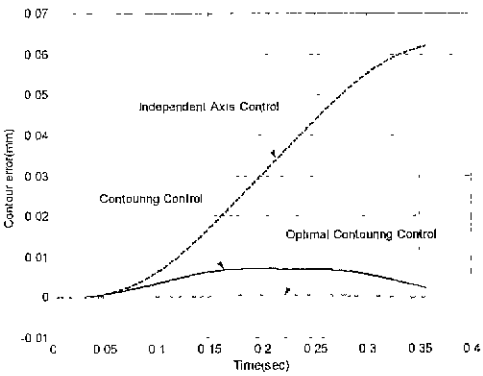


Fig 5 Contour error of straight-line path for independent axis control, contouring control and optimal contouring control

이 최적 윤곽 제어 기법의 핵심은 적절한 성능지수와 weighting factor 의 선택에 있다. 예를 들어 weighting factor 를 크게 했을 경우 윤곽 오차의 크기는 작아지나 응답이 매우 진동하게 된다. 따라서 그 선택에 있어서는 시스템의 정밀도와 응답 속도 및 안정도 사이에 적절한 절충이 필요하다.

## 6. 결론

다축 구동 시스템의 윤곽제어 성능 개선을 위해 교차식 최적제어 기법이 제시되었다. 그리고 그것을 통하여 위치동기제어의 성능을 향상시킬 수 있었다. 최적제어기의 성능지수로서 윤곽오차와 최적제어 입력이 사용되었다. 제시된 제어기는 2 축 구동 시스템의 1 차 동역학 모델에 기초한 시뮬레이션에 의해 평가되었다. X-Y 평면상에서 45° 직선경로를 따르는 궤적을 비교해보았을 때 독립축 제어에 비해 윤곽오차 감소 효과가 두드러짐이 입증되었다. 성능조절에 필요한 설계 변수들은 윤곽오차와 제어입력 사이의 상대적 비중으로 인하여 제한되는 것으로 나타났다.

앞으로의 연구로는 첫째, 각 축의 비대칭 요인으로 더 다양한 외란이 시스템에 인가되었을 때의 윤곽 보정 성능을 확인해보고, 둘째, 본 연구에서 확립된 일반적인 제어 알고리즘을 실제 실험을 통해 윤곽오차 제어방식을 통한 위치동기제어의 성능을 확인, 평가하는 것이 필요하다고 본다.

## 참고문헌


1. Koren, Y, Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw Hill Book Company, 1983
2. Bollinger, J. G, "Digital Controls of Feed Drives – State of the Art and New Developments," Annals of CIRP, Vol. 29, 1980
3. Doraiswami, R. and Gulliver, A , "A Control Strategy for Computer of Machine Exhibiting Precision and Rapidity"," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 106, 1984
4. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, pp. 265-272, 1980
5. Kulkarni, P. K and Srinivasan, K., "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Feed Drive Servomechanisms," ASME J of Eng For Industry, Vol 111, pp. 140 - 148. 1989
6. Gun Bok Lee, "A Receding Time Horizon Optimal Feedrate Control with Cross-Coupled Structure for Multiaxial Systems," KSME International Journal Vol 11, No 5, pp. 419 – 427, 1997