

2축 시스템의 비대칭 윤곽제어

심영복*, 정유철**, 이건복***

Asymmetrical Contouring Control of Biaxial System

Young Bok Sim*, Yu Chul Jung**, Gun Bok Lee***

ABSTRACT

An asymmetrical cross-coupled compensator to improve the contouring performance is proposed. This is a refinement of the structure suggested by Koren. The position loop is closed with a proportional controller as in the uncoupled system. An additional input term proportional to the component of the contour error along the corresponding axis is included. The controller gains are chosen to give an appropriate frequency response and an optimum range for the damping ratio. The effectiveness of the proposed controller is studied by means of digital simulations of the dynamics of the drives and the controller for 4 types of command trajectories: straight line contour, cornering contour, circular contour, elliptic contour. Substantial improvement in contouring performance is obtained for a range of contouring conditions.

Key Words: Contour Error(윤곽 오차), Asymmetrical Cross-coupled Control Structure (비대칭형 교차식 제어구조), Biaxial System(2축 시스템), Dynamically Mismatched System(동적 부정합 시스템), Multi-axial Motion Control(다축 모션제어 시스템)

1. 서론

CNC 공작기계, 로봇, 반도체 제조에 이용되는 IC 와이어 본더, 와이어 컷 방전 가공기, 프린터와 같은 다축 모션 제어 시스템에서는 가공이나 운반, 활자인쇄 등의 목적하는 일을 정확히 수행하기 위해서 각 축의 운동을 조화롭게 제어하는 것이 필요하다. 이러한 목적을 위해 가장 널리 사용되는 방식은 각 축의 통합된 운동을 통

하여 형성되는 운동경로를 기구학적으로 각 축이 추적하여야 할 운동경로로 분해하고 이 분해된 경로를 추적하도록 함으로써 전체적으로 원하는 운동이 이루어지도록 하는 제어방식(독립축 제어방식)이다. 이 방식은 고출력 액추에이터나 높은 정밀도를 가진 기계부품의 사용으로 하드웨어 성능이 우수할 경우 각 축에 독립적으로 비례제어나 비례-적분제어 등과 같은 간단한 제어방식을 적용함으로써 상당히 높은 제어성능의 달성이 가능하다. 그러나

* 숭실대학교 산업대학원
 ** 숭실대학교 대학원
 *** 숭실대학교

각 축의 이득이나 시상수와 같은 시스템 파라메타가 일치하지 않을 경우 또는 자유곡선 추적의 경우 또는 고속제어를 수행할 경우에는 원하는 경로와 실제 경로와의 수직거리(윤곽 오차)가 크게 됨으로써 전체적으로 제어 목적을 달성할 수 없게 된다. 이러한 독립축 제어방식의 단점을 보완하기 위하여 제시된 방식이 윤곽오차 제어방식이다. 이 방식은 윤곽오차를 직접 제어기 설계시에 반영함으로써 이동중에 제어가 스스로 이 오차를 줄이는 방향으로 제어작용을 하게 된다. 윤곽오차는 앞서 언급한 바와 같이 각 축의 동특성이 일치하지 않거나 자유경로의 추적 또는 각 축에 서로 다른 외란이 작용하는 등으로 인하여 각 축의 상호작용에 의해 발생하기 때문에 윤곽오차 제어기는 다변수 제어방식을 취하게 되며 추적경로에 종속되는 형태를 갖게 된다.

지금까지 다축 시스템의 경로제어성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 이루어졌다. 기본적으로 독립축 제어방식은 각 축의 경로 추적성능을 높임으로써 결과적으로 윤곽오차를 줄일 수 있다는 관점을 기조로 하고 있기 때문에 기본적으로 SISO 시스템의 정적, 동적응답 특성을 향상시킬 수 있는 모든 알고리즘의 적용이 가능하다. 이 분야에서 이정표가 될만한 연구로 Koren⁽¹⁾은 속도루프 전체를 1차 지연형 모델로 단순화하고 정상상태 오차 및 오버슈트의 감소라는 상반된 요구를 적절히 만족하도록 제어게인을 설정하여 위치제어를 수행하였다. Bollinger⁽²⁾ 등은 피드포워드 제어를 통하여 추적오차를 감소시켰으며 모델 오차에 기인한 강인성 저하에도 불구하고 추적오차를 상당히 감소시킬 수 있음을 보여 주었다. Doraiswami⁽³⁾ 등은 서보 보상기와 안정화 보상기의 2자유도 방식을 사용하여 추적성능 및 외란 제거능력 향상을 달성하였으며 고주파 대역의 오차에 대한 강인성을 확보하였다. Tomizuka⁽⁴⁾ 등은 기준 위치 입력(지령 경로)을 미리 알고 있을 경우 알고 있는 범위 만큼을 제어 입력에 반영(preview control)함으로써 추적오차를 크게 감소시킬 수 있음을 보여주었으며 경로가 급격히 변하는 코너 운동의 경우에는 외삽(extrapolation)에 의해 preview의 범위를 확장하였다. 또한 Tomizuka 등은 Feedforward 제어방식의 범주에 속하는 Zero Phase Error 추적제어⁽⁵⁾와 학습제어 방식의 일종인 반복제어(repetitive control)이론⁽⁶⁾을 디지털 제어영역에서 확립하고 이 이론을 공작기계 위치제어 등 모션제어 분야에 응용함으로써 시스템 대역폭 증가에 의한 추적성능 향상에 의해 결과적으로 윤곽오차를 감소시켜 가공성능을 높일 수 있음을 보여

주었다⁽⁷⁾⁽⁸⁾. 그러나 각 축의 추적성능을 독립적으로 외란 제거능력과 대역폭 확장에 의해 달성하고자 하는 노력은 불가피하게 시스템의 안정성과 액추에이터의 포화에 의해 제한될 수밖에 없다는 한계성을 지니고 있다.

한편 윤곽오차 제어는 Koren⁽⁹⁾에 의해 최초로 개념이 확립되고 제시 되었으며 이를 감소시킬 수 있는 제어기법으로서 교차식 제어구조를 사용하였다. (10) (11)에서는 독립축 제어방식과 비교하여 외란이나 각 축간의 동특성이 일치하지 않을 때 윤곽오차를 직접 제어기 설계에 반영함으로써 가장 좋은 윤곽 추적 성능을 기할 수 있음을 수치적으로 그리고 실험적으로 보여 주었다. Kulkarni와 Srinivasan⁽¹²⁾⁽¹³⁾은 윤곽오차의 개선을 위해 기본적으로 각 축에 고정적으로 비례제어를 할당하고 성능평가지수에 윤곽오차를 반영함으로써 최적제어방식에 의해 윤곽오차제어기를 설계하였다. 이들은 다양한 성능 평가지수를 개발 하였으며 적절하게 선택된 성능 평가지수에 따라 효과적으로 제어기를 설계하기 위해 확장된 상태 방정식을 사용하였다. 그러나 Koren의 연구에서는 윤곽오차 제어기의 제어게인을 어떻게 설정할 것인지에 대한 언급이 없이 후속연구의 과제로 남겨 두었으며 Kulkarni는 윤곽오차제어방식을 체계화하고 다양한 제어기 설계방식을 제안하였다는 점에서 높이 평가되고 있으나 제어게인을 설정하는데 있어서 좀더 간단하게 실용성을 높일 필요가 있다는 여지를 남겨두었다.

따라서 본 연구에서는 Koren에 의해 제시된 교차식 제어구조를 갖는 윤곽오차 제어기를 채택하고 제어게인을 설정하는 방법을 단순화하여 실용적으로 용이하게 적용할 수 있는 제어기 설계방식을 제안한다. 즉 현재 상용되고 있는 플로터, X-Y테이블, 공작기계와 같은 모션제어 시스템의 제어기와 용이하게 통합하여 이들의 정밀성과 고속성을 향상시킬 수 있도록 추적오차를 보상하는 비례제어기에 윤곽오차보상기를 추가하여 일반적인 2축 제어시스템에 적용가능하도록 한다. 제어기설계는 윤곽오차를 설정값이하로 감소시킬 수 있도록 정상상태 윤곽오차와 제어이득의 관계를 윤곽오차제어기 설계시에 반영하는 제어기 설계절차를 통해 윤곽오차제어기를 설계한다. 윤곽오차제어방식을 채용함으로써, 추적성능향상 및 높은 동적안정성을 가지는 제어기 설계가 가능하며, 모션제어 시스템의 정밀성과 관계되는 윤곽오차를 개선하는 것이 가능하게 된다. 제어성능은 직선 경로 추적시 윤곽제어성능이 개선되도록 설계된 윤곽오차제어기를 코너 경로 추적, 원호 경로 추적 등에 적용하여 독립축 제어방식과 비교하여 봄으로서 평가한다.

2. 2축 시스템의 동적 모델링

제어알고리즘의 성능 평가를 위한 플랜트 모델로는 CNC머시닝센터의 이송구동장치에 장착되는 고속용(高速用) X-Y테이블을 사용한다. 각 축의 이송구동장치는 3상 AC서보모터, 5mm피치의 볼 스크류, 테이블로 구성되며 이송 서보드라이버는 Yaskawa 속도 서보팩(velocity servo pack)으로서 아날로그 비례-적분(PI) 제어 방식에 의해 속도 피드백 제어를 수행한다. 위치검출은 1회전당 1500개의 펄스를 발생하는 엔코더에 의해 이루어지며 펄스신호를 4배로 체배하여 위치정밀도를 높여 모델링을 수행하였다. 서보드라이버에 표준시험신호로 계단 입력전압을 가하여 5000Hz의 샘플주파수로 1024개의 데이터를 수집하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 실제시스템은 고차의 동특성을 나타내고 있으나 근사적으로 다음과 같이 2차지연형과 1차지연형으로 모델링을 수행하였다.

· 2차지연형 :

$$G_x(s) = G_y(s) \equiv \frac{K_v \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

$$K_v = 4.5, \quad \omega_n = 6389.5(\text{rad/sec}), \quad \zeta = 0.5731.$$

· 1차지연형 :

$$G_x(s) = G_y(s) \equiv \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (2)$$

$$\tau_v = 0.0003.$$

실험응답과 근사적으로 구한 2차 및 1차 지연형 모델의 스텝응답을 Fig. 1에서 비교한다. 위의 1차지연형 모델을 제어기 설계에 이용한다.

3 추적오차(Tracking Error) 및 윤곽오차(Contouring Error)의 정의

Fig. 2는 추적오차 e 와 윤곽오차 ε 의 기하학적 관계를 나타낸다. 추적오차 e 는 지령경로 위치 P_r 과 실제위치 P 의 차(差)를 뜻하며 윤곽오차 ε 은 지령경로 상의 가장 가까운 점 P_c 와 실제위치 P 와의 차이이다. 윤곽오차는 실시간에 계산되어야 하기 때문에 다음과 같은 관계를 통하여 제어기 설계에 반영한다.

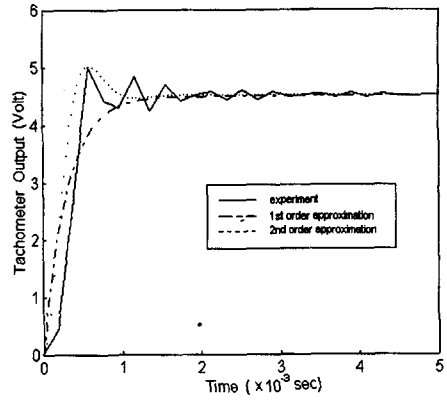


Fig. 1 Experimental Velocity Loop Response to 1 Volt Step Input of V_{ref} and Its Approximated Model Response

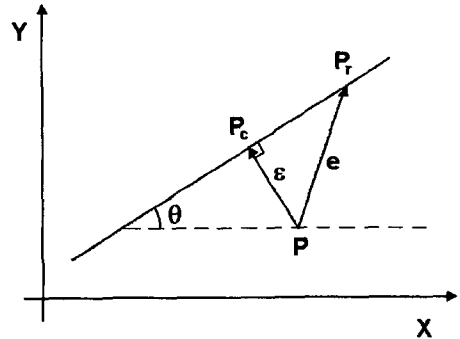


Fig. 2 Tracking and Contouring Error on a Straight Line

$$\text{추적오차벡터 : } e = P_r - P \quad (3)$$

$$\text{윤곽오차벡터 : } \varepsilon = P_c - P \quad (4)$$

윤곽오차벡터의 크기 :

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

식 (5)로부터 윤곽오차벡터

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_y^2 e_x - l_x l_y e_y \\ l_x^2 e_y - l_x l_y e_x \end{bmatrix} \quad (6)$$

이 된다. 여기서, $l_x = \cos \theta$, $l_y = \sin \theta$ 이다.

4. 윤곽제어

서론에서 언급한 바와 같이 지령경로를 추적하기 위해서는 각각의 운동축의 조화로운 제어가 요구된다. 각각의 축을 독립적으로 제어할 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이 추적오차와 윤곽오차가 서로 비례관계에 있는 것이 아니기 때문에 추적오차의 크고 작음이 반드시 윤곽오차의 크고 작음으로 귀결되지 않는다. 따라서 각 축의 독립적인 추적 성능 향상을 통하여 윤곽오차를 줄이기보다는 직접 윤곽오차를 제어기 설계에 반영함으로써 추적오차를 감소시키기 위한 소프트웨어 및 하드웨어적인 노력을 경감하면서도 높은 성능의 경로 추적 목적을 달성할 수가 있게 된다.

본 절에서는 이러한 목적을 위해 비대칭 교차식 구조(asymmetrical cross-coupled structure)를 제어기 구조에 채용하였으며, 성능 평가 척도로서 시스템 사양을 만족시키는 윤곽제어기의 설계방법을 제시한다.

4.1 윤곽제어 시스템

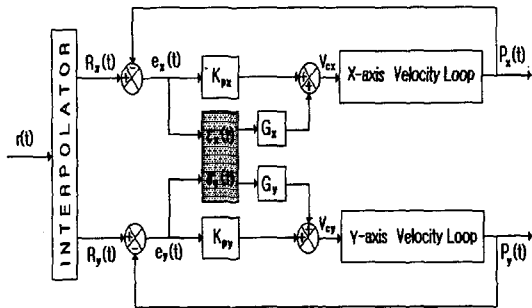


Fig. 3 Structure of an Asymmetrical Contouring Control System

Fig. 3은 2축시스템의 윤곽제어 구조를 나타내는 블록선도이다. 지령경로 $r(t)$ 가 보간기(interpolator)에 의해 각 축의 지령입력 $R_i(t)$ ($i = x, y$)로 분해되며 각 축의 위치 제어루프는 비례제어 보상기 K_{pi} 에 의해 폐루프를 형성한다. 여기에 윤곽 보상기(contouring compensator)가 각 축의 제어루프에 추가됨으로써 윤곽성능을 향상시킨다.

Fig. 3에서 속도제어루프의 입력 V_{ci} ($i = x, y$)는 윤곽제어기가 비대칭형 구조를 가질 때, 다음의 관계가 된다.

$$V_{ci} = K_{pi}e_i + G_i\varepsilon_i \tag{7}$$

$$= K_{pi}(R_i - p_i) + G_i\varepsilon_i, \quad i = x, y$$

여기서, K_{pi} = 비례제어이득

G_i = 윤곽오차제어이득

을 나타낸다.

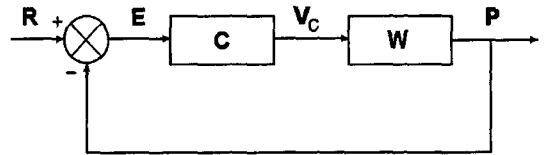


Fig. 4 Block Diagram of the Control Loop

식 (6)을 식 (7)에 대입하여 정리하고 Fig. 4의 제어시스템 블록선도와 비교하면 제어기

$$C = \begin{bmatrix} K_{px} + G_x I_x^2 & -G_x I_x I_y \\ -G_y I_y I_x & K_{py} + G_y I_y^2 \end{bmatrix} \tag{8}$$

로 표현된다.

또한, 속도제어루프를 2장에서 언급한 바와 같이 1차형 모델로 근사화하면, 플랜트의 전달함수는 다음과 같다.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{K_{mx}}{s(\tau_x s + 1)} & 0 \\ 0 & \frac{K_{my}}{s(\tau_y s + 1)} \end{bmatrix} \tag{9}$$

여기서, τ_i, K_{mi} 는 속도제어루프 각각의 시정수, 정상상태 이득을 나타낸다. 따라서, 위의 2축 시스템에 대한 폐루프시스템의 특성방정식은 다음을 만족시킨다.

$$\text{특성방정식 : } \det(I + WC) = 0 \tag{10}$$

4.2 비대칭형 윤곽제어기 설계

(Asymmetrical Contouring Controller Design)

전 절에서 언급한 비대칭형 윤곽제어기 구조에 대한 폐루프시스템의 특성방정식은 식 (8), 식 (9), 식 (10)으로부터

$$\begin{aligned} & [s(\tau_x s + 1) + K_{mx}(K_{px} + G_x I_x^2)] \\ & [s(\tau_y s + 1) + K_{my}(K_{py} + G_y I_y^2)] \\ & - K_{mx} K_{my} G_x G_y I_x^2 I_y^2 = 0 \end{aligned} \tag{11}$$

이다. 윤곽제어이득 G_i 는 직선궤적에 대해 일정속도 추적시 정상상태에서 독립축 제어방식과 윤곽오차 제어방식의 윤곽오차의 비를 정의하고, 이 값이 설계 사양에 맞도록 결정한다.

직선궤적의 일정속도 추적시, 정상상태 윤곽오차는 Fig. 4와 식 (5)로부터

$$\|e_{ss}\| = \left| e_{y_{ss}} l_x - e_{x_{ss}} l_y \right|$$

$$= \frac{V l_x l_y \left(\frac{1}{K_{py} K_{my}} - \frac{1}{K_{px} K_{mx}} \right)}{1 + l_y^2 \frac{G_x}{K_{px}} + l_x^2 \frac{G_y}{K_{py}}} \quad (12)$$

와 같으며, 동적 정합 시스템인 경우 즉 $K_{py} K_{my} = K_{px} K_{mx}$ 일때 윤곽오차는 0 이다. 그러나, 동적 부정합 시스템인 경우에는 $\|e_{ss}\| \neq 0$ 이며, G_i 를 크게 할수록 $\|e_{ss}\|$ 는 작아진다. 본 연구에서는 특성방정식에서 우세근의 감쇠비(damping ratio)를 대략 0.6 ~ 0.7 정도가 되도록 선택한다.

식 (12)로부터 독립축 제어방식은 윤곽제어이득 G_x, G_y 가 0 일때를 의미하며 독립축 제어방식과 윤곽오차 제어방식의 윤곽오차의 비 'f'는 다음과 같다.

$$f = \frac{\|e_{ss}\|_c}{\|e_{ss}\|_i} = \frac{1}{1 + l_y^2 \frac{G_x}{K_{px}} + l_x^2 \frac{G_y}{K_{py}}} \quad (13)$$

따라서, 윤곽오차 제어방식을 통해 윤곽오차비 'f'를 제어기 설계시 설정값 이하가 되도록 하므로써 윤곽제어이득 G_i 를 선정한다.

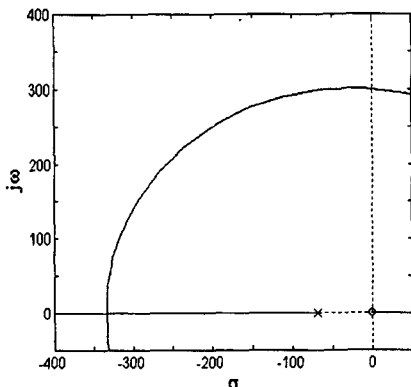


Fig. 5 Root Locus Plot for Contouring Control Gain

윤곽제어기는 Fig. 5에 보인 근궤적선도(root locus plot)를 이용하여 위에서 언급한 두가지 조건이 만족되도록 설계한다. Fig. 5에서 보인 근궤적선도는 X-Y테이블에서 X축서보와 Y축서보의 개루프 이득이 50% 차이가 있는 동적 부정합시스템에 대해 도시한 것이다.

5. 시뮬레이션에 의한 성능 평가 및 고찰

본 절에서는 앞에서 이론적으로 확립된 윤곽제어 알고리즘을 모션제어 시스템 중 가장 널리 사용되고 있는 2축 제어 시스템에 적용한다. 직선과 원, 코너, 타원의 네가지 지령경로에 대해 기존의 서보제어기에 추가적으로 윤곽제어기를 적용함으로써 얼마나 윤곽추적성능이 향상되는가를 윤곽오차의 관점에서 비교 평가한다. 시뮬레이션에서 경로 추적 속도는 30m/min을 사용하였고 샘플시간은 1msec으로 하였으며 식 (1)의 동적모델은 0.1msec의 계산시스템으로 4차 Runge-kutta법으로 적분하였다.

시뮬레이션은 동특성이 일치하지 않는 동적 부정합 시스템(dynamically mismatched system)에 대해 행하였으며, 부정합의 크기는 X, Y축의 개루프 이득의 차이가 50%가 되도록 선정하였다. 시뮬레이션 결과로부터, 윤곽성능 비교시 기준경로에 대해 공작물의 위치를 설정하여 윤곽오차의 크기를 overcutting시를 정(+)으로, undercutting일 때를 부(-)로 표시하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 직선경로 추적시 두 축의 동특성이 일치하지 않는 경우 독립축 제어방식과 윤곽제어기를 추가한 경우의 경로 추적결과이다. Fig.6 과 Fig.7 에서 동특성이 일치하지 않을 때(50% parameter mismatch) 독립축제어방식은 정상상태 윤곽오차가 존재하

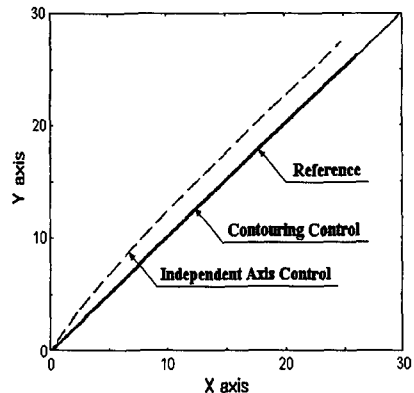


Fig. 6 Straight Line Contour Response with Mismatched System

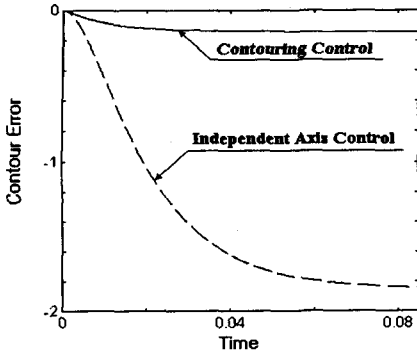


Fig. 7 Contour Error of Straight Line Path for Independent Axis Control and Contouring Control

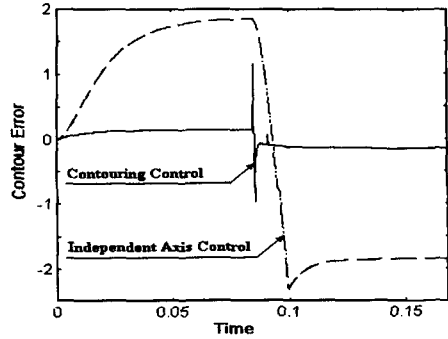


Fig. 9 Contour Error of Corner Path for Independent Axis Control and Contouring Control

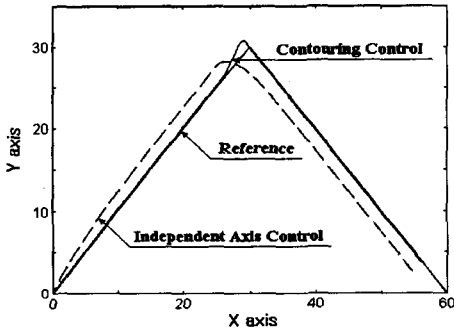


Fig. 8 Corner Contour Response with Mismatched System

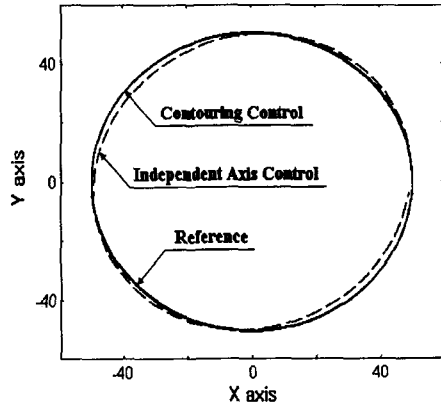


Fig. 10 Circular Contour Response with Mismatched System

나 윤곽오차 제어에 의해 정상상태오차가 1/10 이하로 현저하게 감소되었음을 알 수 있다

Fig. 8과 Fig. 9는 두 축의 동특성이 일치하지 않는 경우 독립축 제어방식과 윤곽오차 제어방식의 90° 코너경로 추적 결과를 나타낸다. 윤곽오차제어를 적용함으로써 추종성능 향상가능성 및 높은 동적 안정성을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 두 축의 동특성이 일치하지 않는 경우 독립축 제어방식과 윤곽오차 제어방식의 원호경로 추적결과를 나타낸다. 독립축 제어방식의 경우 예상되는 바와 같이 동특성의 차이로 인하여 형상이 일그러지는 것을 알 수 있으며 윤곽오차제어를 통하여 이러한 현상을 제거할 수 있음을 보여주고 있다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 동특성이 불일치하는 경우에도 윤곽오차가 독립축 제어방식과 비교하여 현저하게(약 1/5이하) 감소하였음을 알 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 두 축의 동특성이 일치하지 않는 경우 독립축 제어방식과 윤곽오차 제어방식의 타원경로

추적결과를 나타낸다. 타원상의 점에서의 접선벡터와 그 점과 실제위치점이 이루는 방향이 수직일 때 가장 가까운 점이기 때문에 3장에서 언급한 윤곽오차의 정의를 만족하므로 제시된 윤곽오차 제어방식을 그대로 적용하고, 윤곽오차는 대수적으로 풀기 어려운 4차방정식의 형태를 취하므로, 시뮬레이션한 후 수치해석적인 방법으로 실제의 윤곽오차를 구한 결과 Fig. 13에서의 같이 윤곽오차가 독립축 제어방식과 비교하여 감소하였음(약 1/4이하)을 알 수 있다.

6. 결론

2축 제어시스템에 일반적으로 적용할 수 있는 윤곽오차 제어 방식을 제안하였다. 제어기 설계는 윤곽오차를 설정값이하로 감소시킬 수 있도록 정상상태 윤곽오차와 제어이득의 관계를 반영하는 설계절차를 제안하였다.

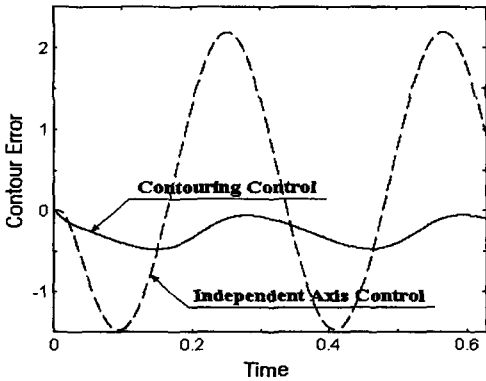


Fig. 11 Contour Error of Circular Path for Independent Axis Control and Contouring Control

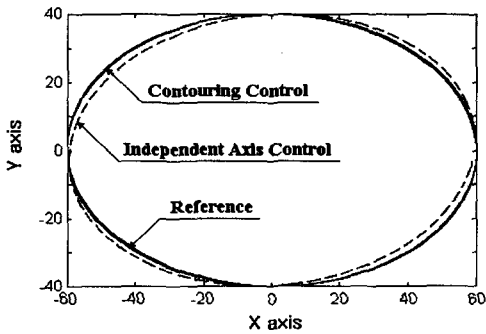


Fig. 12 Elliptic Contour Response with Mismatched System

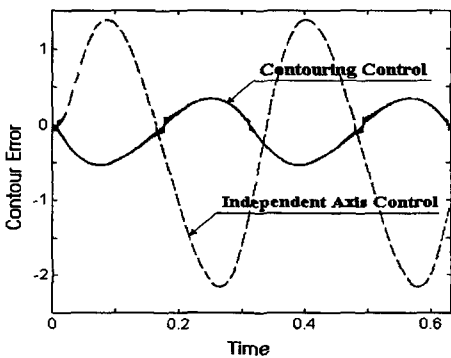


Fig. 13 Contour Error of Elliptic Path for Independent Axis Control and Contouring Control

제시된 윤곽오차 제어방식에 의한 직선경로 및 코너경로, 원호경로, 타원경로의 경로추적 시뮬레이션을 통하여 윤곽추적성능을 현저히 향상시킬 수 있음을 입증하였다. 윤곽추적성능은 윤곽제어이득을 적절히 조정함으로써

서 개선 가능함을 보였다. 즉, 설계절차에서 제시된 직선 궤적추적시의 윤곽제어이득을 일반곡선추적에도 그대로 사용하므로서 윤곽추적성능 향상이 가능함을 보였다.

앞으로의 연구는 본 연구에서 확립된 일반적인 제어알고리즘을 3차원 윤곽 추적제어 및 다축 모션제어 시스템에 적용하거나, 실제 실험을 통해 윤곽오차 제어방식의 제어성능을 확인, 평가하는 것이 필요하다고 본다.

참고 문헌

1. Koren, Y., *Computer Control of Manufacturing System*, McGraw Hill Book Company, 1983.
2. Bollinger, J. G., et al, "Digital Controls of Feed Drives - State of the Art and New Developments", *Annals of the CIRP*, Vol.29, 1980.
3. Doraiswami, R., and Gulliver, A., Mar., "A Control Strategy for Computer Control of Machine Exhibiting Precision and Rapidity", *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 106, 1984.
4. Tomizuka, M., et al, "Experimental Evaluation of the Preview Servoscheme for a Two-axis Positioning System", *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 106, 1989.
5. Tomizuka, M., "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control", *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 109 March, pp. 65~68, 1987.
6. Tomizuka, M., Chew, K.K., "Digital Control of Repetitive Error In Disk Drive System", *Proc. of ACC*, pp. 540~543, 1989.
7. Jwu-Sherg Hu, Tomizuka, M., "Adaptive Asymptotic Tracking of Repetitive Signals - A Frequency Domain Approach", *Proc. of ACC.*, pp. 2621~2627, 1991.
8. Tung, E.D., Tomizuka, M., Urushisaki, Y., "High Speed End Mill Boring and Corner Cutting", *Proc. of Acc.*, pp. 2894~2898, 1994.

9. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems", ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol 102, pp. 285~272, 1980.
10. Koren, Y. and Lo, C.C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring", Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 371-374, 1991.
11. Lo, C. C. and Koren, Y., "Evaluation of Servo-Controllers for Machine Tools", ACC/WALL, pp. 370~374, 1992.
12. 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.
13. Kulkarni, P.K. and Srinivasan, K., "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms", ASME J. of Dynamics Systems, Measurement and Control, Vol 112, pp. 225~232, 1990.
14. 심영복, 정유철, 이진복, "2축 시스템의 비대칭 윤곽제어", 한국정밀공학회 96년도 추계학술대회 논문집, pp. 277-282, 1996.