

디지털 후퇴 유한시간 구간 LQ 최적 윤곽제어시스템

심영복*, 이건복⁺

(논문접수일 2006. 9. 8, 심사완료일 2006. 10. 10)

Digital Receding Time Horizon LQ Optimal Contour Control System

Young Bok Sim*, Gun Bok Lee⁺

Abstract

This work is concerned with the development of digital contouring controller for multi-axial servosystems. Digital optimal contouring controller is proposed to coordinate each of the controllers of multiple feed drives and specifically improve the contouring performance. The optimal control formation includes the contour error explicitly in the performance index to be minimized. The contouring control is exercised for straight line and circular contours. Substantial improvement in contouring performance is obtained for a range of contouring conditions. Both steady state and transient error measures have been considered. The simulation study presented has established the potential of the proposed controller to improve contouring performance.

Key Words : Digital contouring control(디지털 윤곽제어), Multi-axial system(다축 시스템), Coordinated motion of each axis(각 축의 조화운동), Contouring Performance(윤곽성능)

1. 서론

CNC 공작기계, 로봇, 반도체 제조에 이용되는 IC와이어 본더, 와이어 커트 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 통하여 형성되는 운동경로를 기구학적으로 각 축이 추적하여야 할 운동경로로 분해

하고 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 각 축의 이득이나 시상수와 같은 시스템 파라메타가 일치하지 않을 경우 또는 고속제어를 수행할 경우에는 원하는 경로와 실제 경로와 실제 경로와의 수직거리

* 숭실대학교 대학원 (ybsim@kkrobotics.com)

주소: 139-743 서울시 상도5동 숭실대학교

+ 숭실대 기계공학부

(윤곽 오차)가 크게 됨으로써 전체적으로 제어목적을 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 제어제인을 설정하여 위치제어를 수행하였다. Bollinger⁽²⁾등은 피드포워드 제어를 통하여 추적오차를 감소 시켰으며 모델 오차에 기인한 강인성 저하에도 불구하고 추적오차를 상당히 감소시킬 수 있음을 보여주었다. 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(지정 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 Tomizuka등은 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).

한편 윤곽오차 제어는 Koren⁽⁹⁾에 의해 최초로 개념이 확립되고 제시되었으며 이를 감소시킬 수 있는 제어기법으로서 교차식 제어구조를 사용하였다. Koren, Lo^(10,11)에서는 독립축 제어방식과 비교하여 외란이나 각 축간의 동특성이 일치하지 않을 때 윤곽오차를 직접 제어기 설계에 반영함으

로써 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 개발하였으며 적절하게 선택된 성능 평가지수에 따라 효과적으로 제어기를 설계하기 위해 확장된 상태 방정식을 사용하였다. Tomizuka⁽¹⁴⁾는 추적오차와 윤곽오차를 동시에 리아푸노프 함수에 포함시키고 리아푸노프 안정성을 충족시키도록 제어기를 설계하였으며 이를 상업용 공작기계에 적용함으로써 기존의 비례제어만에 의한 방식보다 현저하게 윤곽오차를 감소시킬 수 있음을 보여주었다. McNab⁽¹⁵⁾등은 이산시간 영역에서 성능 평가지수에 추적오차와 윤곽오차를 동시에 포함시키고 각 오차의 가중치를 적절하게 선택함으로써 제어기 설계를 최적제어 관점에서 수행하였다. 이들은 특히 유한시간 구간내의 오차를 성능평가지수에 포함시키고 시간이 진행됨에 따라 구간의 최초오차는 버리고 최종오차는 새로이 포함시키는 후퇴-유한시간 구간 최적 제어 방식(A Receding Time Horizon LQ Optimal Control Approach)을 사용함으로써 preview 제어를 통한 윤곽제어를 수행하였다.

본 연구에서는 현재 상용되고 있는 플로터, X-Y테이블, 공작기계와 같은 모션제어 시스템의 제어기와 용이하게 통합하여 이들의 정확성과 고속성을 향상시킬 수 있도록 추적오차를 보상하는 비례제어기에 윤곽오차항과 제어입력항만으로 구성된 성능지수를 이용하여 후퇴-유한시간 구간 최적 제어 방식의 틀 안에서 윤곽오차제어기를 설계한다.

설계된 제어기를 직선운동, 원호운동 등에 적용하여 독립축 제어방식과 비교하여 봄으로써 제어성능을 평가한다..

2. 모션제어 시스템의 동적 모델링

X-Y테이블, 공작기계의 이송 구동 장치와 같이 상용(商用)으로 사용되는 모션제어 시스템은 서보드라이버와 구동 모터 그리고 볼 나사, 테이블 등과 같이 기계적 관성을 갖는 부분으로 구성된다. 본 절에서는 속도제어 서보팩과 모터 및 기계적 관성을 일체로 하여 세미클로즈드 루프 제어(semi-closed loop control)를 전제로 하는 동적 모델링을 수행한다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 상용으로 제작되는 속도제어 서보팩(servopack)은 외란 토크의 영향을 고려하여 비례적분제어를 사용한다. 따라서 속도지령입력으로부터 실제 출력속도까지는 아래와 같이 2차형의 전달함수로 표현된다.

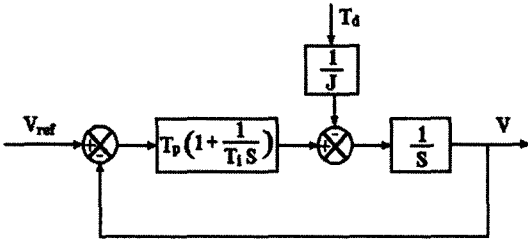


Fig. 1 PI Velocity Control Loop of Each Axis

$$V = \omega_n \frac{(2\zeta - \alpha)s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} V_{ref} \quad (1)$$

여기서

$$\omega_n = \sqrt{\frac{T_p}{T_i}}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_p T_d}{T_i}}$$

$$\alpha = \frac{1}{J\omega_n} \frac{T_d}{V_{ref}}$$

실제로 속도제어루프의 모델은 이송구동시스템의 동적특성과 비례 및 적분제어 상수 T_p 와 T_i 의 적절한 선택에 의해 2차지연형의 속도제어루프는 1차 지연계 이하로 근사화 할 수 있다. 실제 시스템에서는 속도와 위치가 측정 가능한 변수이고 2차 지연형을 제어기 설계에 사용할 경우 관측기가 필요하고 이로 인한 제어기의 복잡성 증가와 성능저하가 초래되기 때문에 본 연구에서는 다음과 같이 1차지연형으로 근사화하여 제어기 설계에 사용한다.

$$G_v(s) = \frac{V}{V_{ref}} = \frac{K}{\tau_v s + 1} \quad (2)$$

여기서 K_V 와 $2\tau_v$ 는 각각 정상상태 이득과 시정수를 나타낸다.

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

윤곽오차를 제어기 설계에 반영하기 위해서는 성능 평가 지수에 윤곽오차항이 제어입력과 함께 포함되어야 한다. Fig. 2는 추적오차 e 와 윤곽오차 ε 의 기하학적 관계를 나타낸다. 추적오차 e 는 지정경로 위치 P_r 와 실제위치 P 의 차(差)를 뜻하며 윤곽오차 ε 은 지정경로 상의 가장 가까운 점 P_c 와 실제위치 P 와의 차이이다. 윤곽오차는 실시간에 계산되

어야 하기 때문에 다음과 같은 관계를 통하여 근사화하여 제어기 설계에 반영한다.

$$\text{추적오차벡터 : } e = P_r - P$$

$$\text{윤곽오차벡터 : } \varepsilon = P_c - P$$

$$\text{단위속도벡터 : } \bar{V} = \frac{\dot{P}_r + \dot{P}}{\| \dot{P}_r + \dot{P} \|} \quad (3)$$

$$\text{평균단위속도벡터 : } \bar{V} = \frac{\dot{P}_r + \dot{P}}{\| \dot{P}_r + \dot{P} \|} \quad (4)$$

식 (3), (4)로부터 윤곽오차벡터

$$\varepsilon = P_c - P_r + e \quad (5)$$

위치 P_c 로부터 P_r 까지 이동하는데 걸리는 시간을 Δt 라고 하고 경로상의 속도를 근사적으로 다음과 같이

$$V_{ave} = \frac{1}{2}(\dot{P}_r + \dot{P}) \quad (6)$$

로 나타내면 윤곽오차벡터 ε 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = e - (P_r - P_c) \approx e - V_{ave} \Delta t \quad (7)$$

Δt 는 ε 의 크기가 최소가 되도록 선택되어야 하므로 식 (7)에서 $\frac{\partial \|\varepsilon_x\|}{\partial(\Delta t)} = 0$ 이 되도록 하는 Δt 를 구하여 다시 식 (9)에 대입하면 윤곽오차 ε 의 근사값을 구할 수 있다. 2차원의 경우 ε 을 구하면 다음과 같다.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} V_y(e_x V_y - e_y V_x) \\ -V_x(e_x V_y - e_y V_x) \end{bmatrix}$$

제어기 설계시에서는 ε 을 지령입력과 상태변수로 나타내어 성능평가지수에 포함시킨다.

4. 윤곽제어

서론에서 언급한 바와 같이 지정경로를 추적하기 위해서는 각각의 운동축의 조화로운 제어가 요구된다. 각각의 축을 독립적으로 제어할 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이 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 추

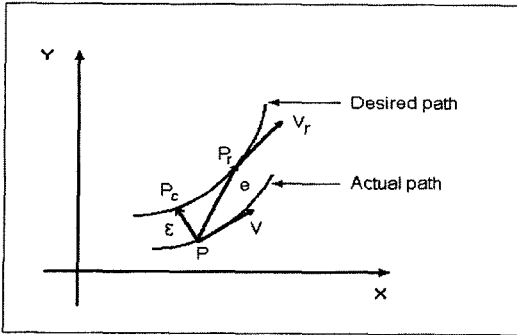


Fig. 2 Tracking and contouring error on an arbitrary curved contour

적 목적을 달성할 수가 있게 된다.

본 절에서는 이러한 목적을 위한 제어기의 구조와 후퇴-유한시간 LQ 최적제어의 틀 안에서 윤곽제어기의 설계방법을 제시한다.

4.1 윤곽제어 시스템

Fig. 3은 다축 시스템의 윤곽제어 구조를 나타내는 블록선도이다. 지령경로 $r(k)$ 가 보간기(interpolator)에 의해 각 축의 지령입력 $R_i(k)$ ($i = x, y, z, \dots, q$)로 분해되며 각 축의 위치 제어루프는 비례제어 보상기 K_{pi} 에 의해 폐루프를 형성한다. 여기에 윤곽 보상기(contouring compensator)가 각 축의 속도루프에 추가적으로 제어입력 $u_i(k)$ 를 공급함으로써 윤곽 성능을 향상시킨다.

Fig. 3에서 속도제어루프로의 입력 $V_{ci}(i = x, y, z, \dots, q)$ 는 다음의 관계가 된다.

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

속도제어루프를 2장에서 언급한 바와 같이 1차형 모델로 근사화하면 제어입력 $V_{ci}(k)$ 와 속도 $v_i(k)$, 위치 $p_i(k)$ 의 동적 관계를 나타내는 이산시간 상태방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} p_i(k+1) \\ v_i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau_{vi}(1 - e^{-T/\tau_{vi}}) \\ 0 & e^{-T/\tau_{vi}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i(k) \\ v_i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{vi}(T_s - \tau_{vi}(1 - e^{-T/\tau_{vi}})) \\ K_{vi}(1 - e^{-T/\tau_{vi}}) \end{bmatrix} V_{ci}(k) \quad (8)$$

여기서 τ_{vi} , K_{vi} 는 속도제어루프 각각의 시정수, 정상상태 이득 그리고 T_s 는 샘플시간을 나타낸다. 각 축을 모두 통합하여 다축시스템 전체의 상태벡터와 제어입력벡터를 다음과 같이 정의한다.

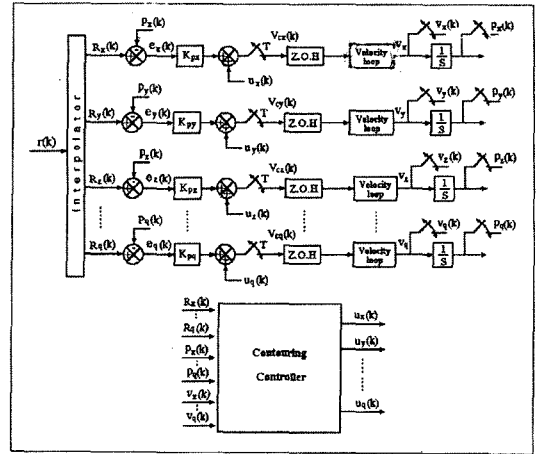


Fig. 3 Block diagram of contouring controller

$$x_p(k) = [p_x(k)v_x(k)p_y(k)v_y(k)\dots p_q(k)v_q(k)]^T \quad (9)$$

$$V_c(k) = [V_{cx}(k)V_{cy}(k)\dots V_{cq}(k)]^T \quad (10)$$

식 (8), (9), (10)와 윤곽오차로부터 통합 상태방정식과 출력 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x_p(k+1) = A_p x_p(k) + B_p V_c(k) \quad (11)$$

$$e(k) = C_p x_p(k) + C_r r(k)$$

여기서 $r(k) = [R_x(k)R_y(k)\dots R_q(k)]^T$ 이다.

4.2 후퇴-유한시간 구간 LQ 최적제어(A Receding Time Horizon LQ Optimal Control)

본 절에서는 전 절에서 확립된 상태방정식과 출력방정식으로부터 LQ최적제어의 관점에서 윤곽제어 입력 $u_i(k)$ 를 구한다. 먼저 식 (9), (10)로부터

$$V_c(k) = -K_p x_p(k) + K_c r(k) + u(k) \quad (12)$$

로 되며 여기서 K_p 와 K_c 는 비례제어 이득 K_{pi} 로 구성되는 적당한 차원의 행렬이고

$u(k) = [u_x(k)u_y(k)\dots u_q(k)]^T$ 이다. 식 (8)을 식 (11)에 대입하여 정리하면 다음의 수정된 상태방정식과 출력방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} x_p(k+1) &= (A_p - B_p K_p) x_p(k) + B_p K_c r(k) + B_p u(k) \\ e(k) &= C_p x_p(k) + C_r r(k) \end{aligned} \quad (13)$$

최소화를 기하고자 하는 성능 평가 지수는

$$J = \varepsilon^2(k+N)S_c + \sum_{i=k}^{k+N-1} [Qe^2(i) + u^T(i)Ru(i)] \quad (14)$$

이며 여기서 첫째항은 S_c 에 의해 최종윤곽오차를 가중하고 팔호안의 첫째항과 둘째항은 Q와 R에 의해 각각 윤곽오차와 윤곽오차 제어 입력을 가중하며 N은 기지의 미래경로입력 범위(preview length)를 나타낸다. 식 (13)의 상태방정식과 출력방정식을 대입하고 최적성의 원리(Principle of Optimality)를 적용하면 최적제어 입력 $u(k)$ 에 대해 다음의 해를 얻을 수 있다.

$$J_{i+1} = x_p^T(i+1)H_{pp}(i+1)x_p(i+1) + 2x_p^T(i+1)H_{pr}(i+1) + H_{rr}(i+1) \quad (15)$$

의 형태로 놓으면

$$J_i = J_{i+1} + Qe^2(i) + u^T(i)Ru(i) \quad (16)$$

이 되고 여기에 식 (17)을 대입하고 정리하면,

$$J_i = \{ (A_p - B_p K_p)x_p + B_p K_c r(i) + B_p u(i) \}^T H_{pp}(i+1) \{ (A_p - B_p K_p)x_p + B_p K_c r(i) + B_p u(i) \} + 2 \{ (A_p - B_p K_p)x_p + B_p K_c r(i) + B_p u(i) \}^T H_{pr}(i+1) + H_{rr}(i+1) + \{ C_p x_p(i) + C_r r(i) \}^T Q \{ C_p x_p(i) + C_r r(i) \} + u^T(i)Ru(i) \quad (17)$$

이 된다. 최적성의 원리로부터

$$\frac{\partial J_i}{\partial u(i)} = 0 \quad (18)$$

이 되고 식 (22)로부터 $i=k$ 일때 최적 제어입력은

$$u(k) = -[B_p^T H_{pp}(k+1)B_p + R]^{-1} B_p^T [H_{pp}(k+1)(A_p - B_p K_p)x_p(k) + B_p K_c r(k) + H_{pr}(k+1)] \quad (19)$$

이 된다.

· 리카티 방정식(Riccati equation) :

$$H_{pp}(i) = (A_p - B_p K_p)^T H_{pp}(i+1)(A_p - B_p K_p) - (A_p - B_p K - p)^T H_{pp}(i+1)B_p [R + B_p^T H_{pp}(i+1)B_p]^{-1} B_p^T H_{pp}(i+1)(A_p - B_p K_p) + C_p^T Q C_p \quad (20)$$

$$H_{pp}(i) = (A_p - B_p K_p)^T [I - H_{pp}(i+1)B_p [R + B_p^T H_{pp}(i+1)B_p]^{-1} B_p^T H_{pp}(i+1) + [C_p^T Q C_p + (A_p - B_p K_p)^T H_{pp}(i+1)[I - B_p [R + B_p^T H_{pp}(i+1)B_p]^{-1} B_p^T H_{pp}(i+1)]B_p K_c]r(i) \quad (21)$$

· 말단 경계조건 :

$$H_{pp}(k+N) = C_p^T S_c C_p \quad (22)$$

$$H_{pr}(k+N) = C_p^T S_c C_r^T(k+N) \quad (23)$$

이상(以上)과 같이 매 시간 스텝마다 N스텝에 걸쳐서 리카티 방정식의 해를 구하여 (15)식에 대입함으로써 윤곽제어 입력 $u(k)$ 를 구한다.

5. 2축 시스템의 윤곽오차 제어

본 절에서는 앞에서 이론적으로 확립된 윤곽제어 알고리즘을 모션제어 시스템 중 가장 널리 사용되고 있는 2축 제어 시스템에 적용한다. 직선과 원의 두가지 지정경로에 대해 기존의 서보기제어에 추가적으로 윤곽제어기를 적용함으로써 얼마나 윤곽추적성능이 향상되는가를 윤곽오차의 관점에서 비교 평가한다.

5.1 2축 시스템의 동적 모델

제어알고리즘의 성능 평가를 위한 플랜트는 CNC머시닝센터의 이송구동장치에 장착되는 고속용(高速用) X-Y테이블을 사용한다. 각 축의 이송구동장치는 3상 AC 서보모터, 5mm피치의 볼 스크류, 테이블로 구성되며 이송 서보드라이버는 Yaskawa 속도 서보팩(velocity servo pack)으로서 아날로그 비례적분(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. 4에서 보는 바와 같이 실제 시스템은 고차의 동특성을 나타내고 이쓰나 근사적으로 다음과 같이 2차지연형과 1차지연형으로 모델링을 수행하였다.

· 2차지연형 :

$$G_x(s) = G_y(s) \cong \frac{K_v \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (24)$$

· 1차지연형 :

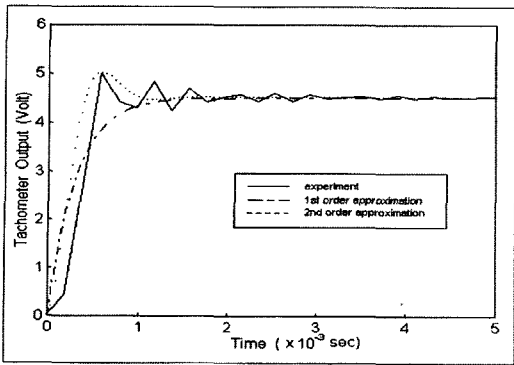


Fig. 4 Experimental velocity loop response to 1 volt step input of v_{ref} and its approximated model response

$$G_x(s) = G_v(s) \cong \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (25)$$

$$\tau_v = 0.0003$$

실험응답과 근사적으로 구한 2차 및 1차 지연형 모델의 스텝응답을 Fig. 4에서 비교한다. 1차지연형 모델은 식 (8)를 이용하여 이산시간 상태방정식을 변환한 후 제어기 설계에 이용된다.

5.2 시뮬레이션에 의한 성능 평가

직선, 원호의 두 가지 경로에 대해 궤적을 추적하면서 과도상태오차와 정상상태오차의 관점에서 윤곽제어를 수행하지 않는 경우와 제어성능을 비교, 평가한다. 시뮬레이션에서 경로 추적 속도는 30m/min을 사용하였고 샘플시간은 1msec으로 하였으며 식 (24)의 동적모델은 0.2msec의 계산 스텝으로 4차 Runge-kutta법으로 적분하였다.

Fig. 5, 6은 각각 직선경로 추적시 두 축의 동특성이 일치하는 경우와 일치하지 않는 경우 독립축 제어방식과 윤곽제어를 추가한 경우의 경로 추적결과이다. 동특성이 일치할 경우(Parameter Match) 예상되는 바와 같이 두가지 제어방식 모두 윤곽오차가 발생하지 않는다(Fig. 5 (a), (b)). 동특성이 일치하지 않을 때(50% Parameter Mismatch) 독립축 제어방식은 정상상태 윤곽오차가 존재하나 윤곽오차 제어에 의해 정상상태오차가 1/10이하로 현저하게 감소되었음을 알 수 있다(Fig. 6 (a), (b)).

Fig. 7은 각각 두 축의 동특성이 일치할 경우 독립축 제어방식과 윤곽오차제어방식의 원호경로 추적오차를 나타낸다. 독립축제어방식의 경우에는 동특성이 일치할 경우에도 윤곽

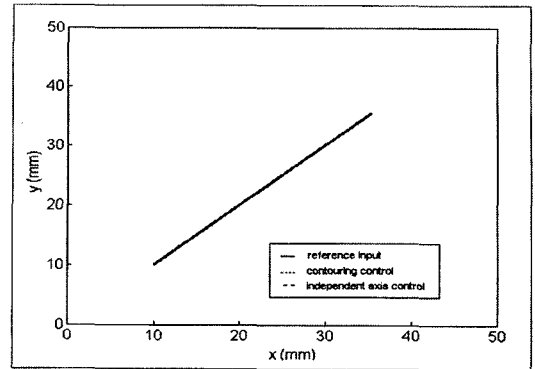


Fig. 5 (a) Straight line contour response for independent axis control and contouring control with matched dynamics

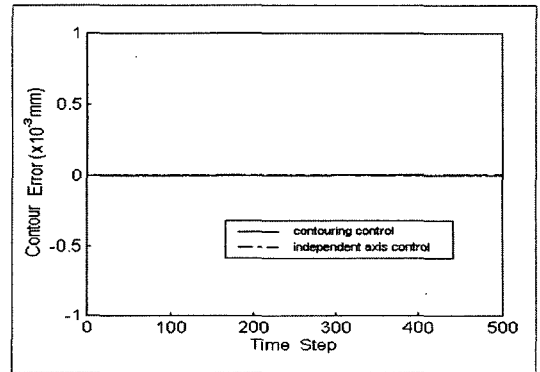


Fig. 5 (b) Straight line contour error response for independent axis control and contouring control with matched dynamics

오차가 발생하나(Fig. 7 (a)) 윤곽오차제어를 통하여 직선경로와 마찬가지로 윤곽오차가 현저하게 감소하였음을 알 수 있다(Fig. 7 (b), (c)).

Fig. 8은 각각 두 축의 동특성이 일치할 경우 독립축 제어방식과 윤곽오차제어방식의 원호경로추적결과를 나타낸다. 독립축 제어방식의 경우 예상되는 바와 같이 동특성이 차이로 인하여 타원형에 가깝게 형상이 일그러지는 것을 알 수 있으며(Fig. 8 (a)) 윤곽오차제어를 통하여 이러한 현상을 제거할 수 있음을 보여주고 있다(Fig. 8 (b)). Fig. 8 (c)에서 보는 바와 같이 동특성이 불일치하는 경우에도 윤곽오차가 독립축 제어방식과 비교하여 현저하게(1/20이하)감소하였음을 알 수 있다.

Fig. 9는 성능평가지수에서 윤곽오차의 가중치(S와 Q)의

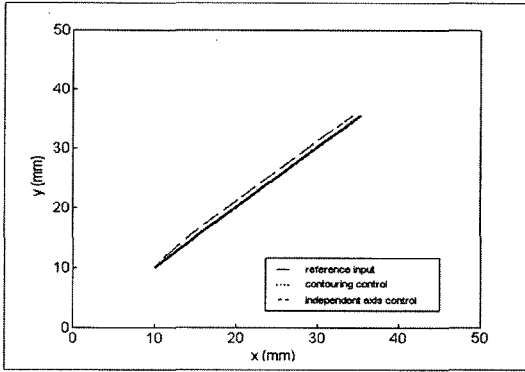


Fig. 6 (a) Straight line contour response for independent axis control and contouring control with mismatched dynamics

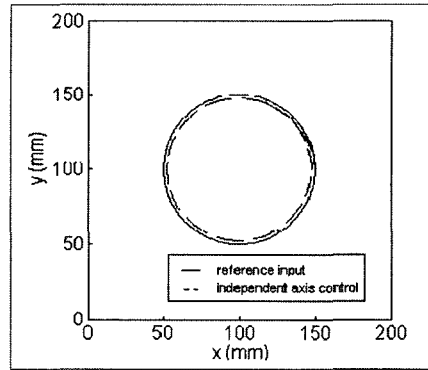


Fig. 7 (a) Circular contour response for independent axis control with matched dynamics

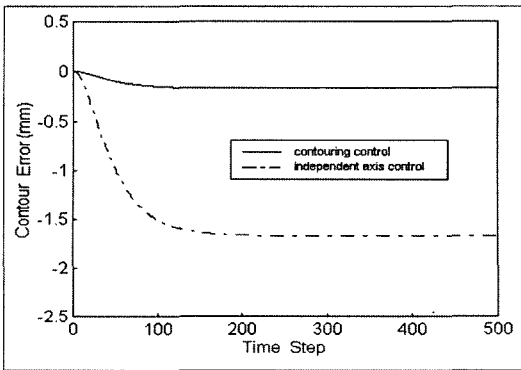


Fig. 6 (b) Straight line contour error response for independent axis control and contouring control with mismatched dynamics

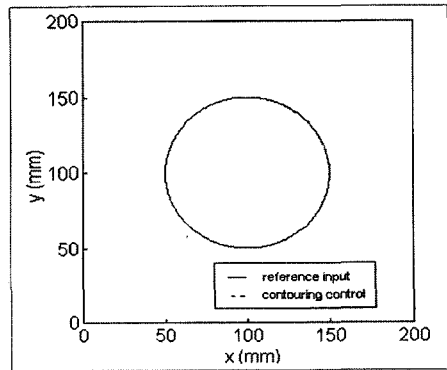


Fig. 7 (b) Circular contour response for contouring control with matched dynamics

변화에 따른 윤곽오차의 변화를 나타낸다. 예상되는 바와 같이 가중치가 증가함에 따라 윤곽오차가 점점 감소하고 있다. 따라서 가중치의 적절한 선택에 의해 원하는 정도의 윤곽추적 성능을 달성할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

다축 제어시스템에 일반적으로 적용할 수 있는 윤곽오차 제어 방식을 제안하였다. 제어기 설계는 직접 윤곽오차를 성능평가지수에 포함시키고 유한시간 구간에서 최적성의 원리에 의해 윤곽제어입력을 구하는 후퇴-유한시간 구간 LQ 최적제어(A Receding Time Horizon LQ Optimal Control)의 틀 안에서 수행하였다.

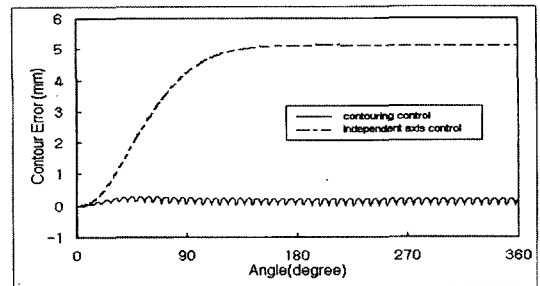


Fig. 7 (c) Circular contour error response for independent axis control and contouring control with matched dynamics

제시된 윤곽오차 제어방식에 의한 직선경로 및 원호경로의 경로추적 시뮬레이션을 통하여 윤곽추적성능을 현저히 향상시킬 수 있음을 입증하였다. 윤곽추적성능은 성능평가

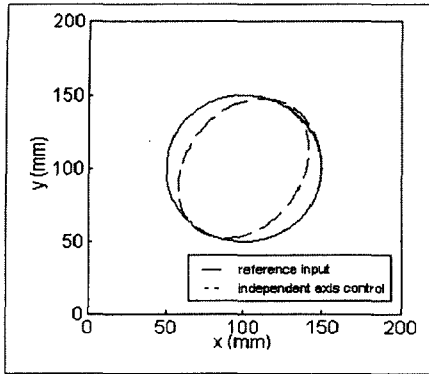


Fig. 8 (a) Circular contour response for independent axis control with mismatched dynamics

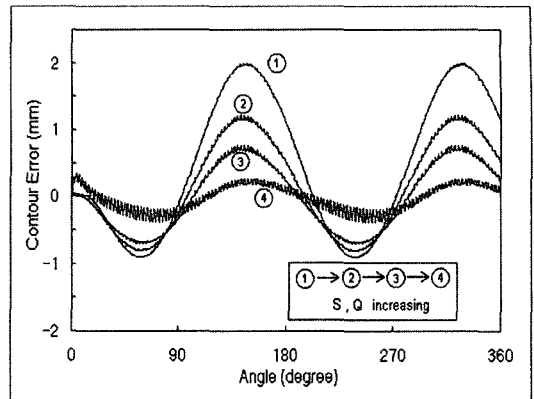


Fig. 9 Circular contour error response for different weighting values (S, Q)

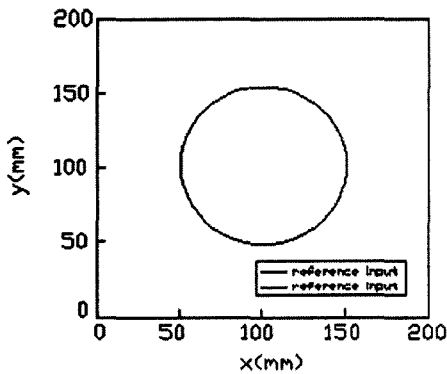


Fig. 8 (b) Circular contour response for contouring control with mismatched dynamics

수정된 성능평가지수(Modified Performance Index)를 사용하여 윤곽오차제어에 미분 및 적분제어를 도입함으로써 제어성능을 더욱 정교하게 향상시키는 방법이 요구된다. 또한 본 연구에서 확립된 일반적인 제어알고리즘을 3차원 윤곽추적제어에 적용하거나 실제 실험을 통해 윤곽오차 제어 방식의 제어성능을 평가하는 것이 필요하다고 본다.

후기

본 연구는 숭실대학교 교내연구비지원에 의해 수행됨.

참고 문헌

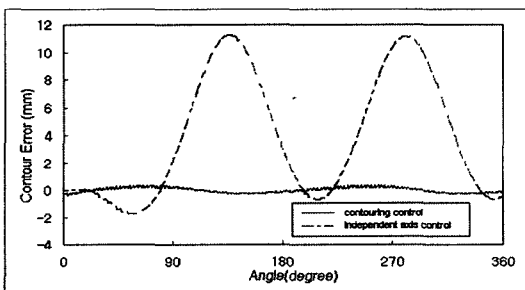


Fig. 8 (c) Circular contour error response for independent axis control and contouring control with mismatched dynamics

- (1) Koren, Y., 1983, *Computer Control of Manufacturing System*, McGraw hill Book Company.
- (2) Bollinger, J. G., Stute, G., Van Brussel, H. and Dinsdale, J., 1980, "Digital Controls of Feed Drives - State of the Art and New Developments," *Annals of the CIRP*, Vol. 29. pp.497~506.
- (3) Doraiswami, R. and Gulliver, A., 1984, "A Control Strategy for Computer Control of Machine Exhibiting Precision and Rapidity," *ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 106, pp. 56~62.
- (4) Tomizuka, M., StuDornfeld, D., Bian, X-Q. and Cai, H-G. 1984, "Experimental Evaluation of the Preview Servo Scheme for Two Axis Welding Table," *ASME*,

지수에 포함되는 가중치와 예견경로의 범위 등의 설계변수의 선택에 의해 적절히 조정될 수 있음을 지적하였다. 계속 연구로서 확장상태방정식(Augmented State Equations)과

- Journal of Dynamic Systems, Meas. and Control*, Vol. 106, No. 1, pp. 1-5.
- (5) Tomizuka, M., 1987, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," *ASME, J. of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 109, pp. 65~68.
- (6) Tomizuka, M. and Chew, K. K., 1989, "Digital Control of Repetitive Error In Disk Drive System," *Proc. of ACC.*, pp. 540~543.
- (7) Hu, J. S. and Tomizuka, M., 1991, "Adaptive Asymptotic Tracking of Repetitive Signals- A Frequency Domain Approach," *Proc. of ACC.*, pp. 2621~2627.
- (8) Tung, E. D., Tomizuka, M. and Urushisaki, Y., 1994, "High Speed End Mill Boring and Corner Cutting," *Proc. of Acc.*, pp. 2894~2898.
- (9) Koren, Y., 1980, "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," *ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol 102, pp. 285~272.
- (10) Koren, Y. and Lo, C. C., 1991, "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 371~374.
- (11) Lo, C. C. and Koren. Y., 1992, "Evaluation of Servo-Controllers for Machine Tools," *ACC/WALL*, pp. 370~374.
- (12) Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., 1989, "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Feed Drive Servomechanisms," *ASME, J. of Eng. for Industry*, Vol. 111, pp. 140~148.
- (13) Kulkarni, P. K. and Srinivasn, K., 1990, "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms," *ASME, J. of Dynamics Systems, Measurement and Control*, Vol. 112. pp. 225~232.
- (14) Chiu, T. C. and Tomizuka, M., 1994, "Coordinated Position Control of Multi-Axis Mechanical Systems," *ASME, Dynamic Systems and Control*, DSC-Vol. 55-1, pp. 159~166.
- (15) McNab, R. T. and Tsao, T. C., 1994, "Multi-Axis Contour Tracking : A Receding Time Horizon Linear Quadratic Optimal Control Approach," *ASME, Dynamic Systems and Control*, DSC-Vol. 55-2, pp. 895~902.
- (16) Jung, Y. C. and Lee, G. B., 2001, "Controller Auto-tuning Scheme Improving Feedback System Performance in Frequency Domain," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 26~30.