

## 2축 디지털 윤곽제어

이건복, 고태근  
(송실대, 송실대 대학원)

### Digital Contouring Control of Biaxial System

Lee Gun-Bok, Ko Tae-Geun  
(Soongsil University, Soongsil University Graduate School)

**Abstract** - In this productive system, it needs to control the each axis motion harmoniously to perform accurately for the manufacturing, transporting and printing. Independent Axis Control usually used for this objection. However, if Independent Axis Control mismatched the parameter of each axis system or in the case of free curve tracking or the case of high speed control, there would be big contour error so that cannot achieve control objection. As a result, there is Contour Control method suggested to supply for this defect. This paper carried modeling of biaxial system and implemented Independent Axis Control & Contouring Control on straight line, circular, and coner path by simulation and experiment. If feedrate increased, contour error growed. In consequence, according to this factor, we introduced contouring controller, so we could find the fact that contour error was reduced more than that of independent axis control about each path.

### 1. 서 론

일반적으로 사용되는 생산시스템에서의 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 방식이 독립축 제어방식이다. 이 방식은 각 축의 이동이나 시상수와 같은 시스템 파라메터가 일치하지 않을 경우 또는 자유곡선 추적의 경우 또는 고속 제어를 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 설계시 반영함으로써 이동중에 제어기가 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 추적 경로에 종속되는 형태를 갖게 된다.

윤곽오차 제어는 Koren<sup>[1],[2],[3]</sup>에 의해 최초로 개념이 확립되고 제시되었으며 이를 감소시킬 수 있는 제어기법으로서 교차식 제어구조를 사용하였다. Kulkarni 와 Srinivasan<sup>[4],[5]</sup>은 최적제어방식에 의해 윤곽오차제어기를 설계하였다. Tomizuka<sup>[6]</sup>는 추적오차와 윤곽오차를 동시에 리아프노프 함수에 포함시키고 리아프노프 안정성을 충족시키도록 제어기를 설계하였다. McNab<sup>[7]</sup> 등은 유한 시간 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 각 축의 윤곽오차를 제어기에 반영하는 교차식 윤곽오차제어기를 설

계한다. 이론적 전개는 임의의 자유 운동경로에 적용될 수 있도록 일반적인 관점에서 수행하였기 때문에 운동경로의 형태에 따라 제어기를 새로이 설계할 필요는 없다.

따라서, 설계된 제어기를 직선운동, 원호운동 등에 적용하여 독립축 제어방식과 비교하고 이송속도 가변에 대한 독립축제어를 수행하여 윤곽오차를 비교해 보고 이송속도 가변에 대한 윤곽오차를 비교하여 윤곽오차제어기의 성능을 확인한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 추적오차(Tracking Error) 및 윤곽오차(Contouring Error)의 정의

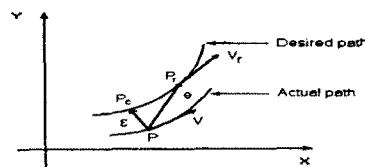


Fig. 2.1 Tracking and Contouring Errors on an Arbitrary Curved Contour

윤곽오차를 제어기 설계에 반영하기 위해서는 윤곽오차항이 제어입력과 함께 포함되어야 한다. Fig. 2.1은 추적오차  $\epsilon$ 와 윤곽오차  $\varepsilon$ 의 기하학적 관계를 나타낸다. 추적오차  $\epsilon$ 는 지령경로 위치  $P_r$ 과 실제위치  $P$ 의 차(差)를 뜻하며 윤곽오차  $\varepsilon$ 은 지령경로 상의 가장 가까운 점  $P_c$ 와 실제위치  $P$ 의 차이다. 윤곽오차는 실시간에 계산되어야 하기 때문에 다음과 같은 관계를 통하여 근사화하여 제어기 설계에 반영한다.

$$\cdot \text{추적오차벡터} : \quad \epsilon = P_r - P \quad (1)$$

$$\cdot \text{윤곽오차벡터} : \quad \varepsilon = P_c - P \quad (2)$$

$$\text{식(1),(2)로부터 윤곽오차벡터는} \quad \varepsilon = P_c - P_r + \epsilon \quad (3)$$

가 된다.

· 윤곽오차벡터의 크기는

$$||\varepsilon|| = \sqrt{(e_x - e_c \tan \theta)^2 + (e_y - e_c \sin \theta)^2} \quad (4)$$

#### 2.2 2축 윤곽제어기

서론에서 언급한 바와 같이 지령경로를 추적하는 데에는 각각의 운동축의 조화로운 제어가 요구된다. 이러한 목적을 위하여 2축 시스템의 교차식 윤곽제어구조의 틀 안에서 윤곽제어기의 설계방법을 제시한다.

Fig. 2.2은 2축시스템의 윤곽제어 구조를 나타내는 블록선도이다. 각축의 사이의 지령경로  $R(k)$ 가 보간기(interpolator)에 의해 각 축의 지령입력  $R_x(k)$ 와  $R_y(k)$ 로 분해되며 각 축의 위치 제어루프는 각각의 비례제어보상기  $K_{px}$ 와  $K_{py}$ 에 의해 폐루프를 형성한다.

여기에 윤곽 보상기(contouring compensator)가 각 축

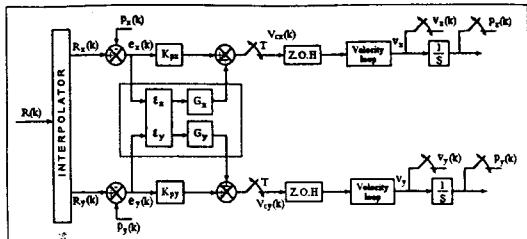


Fig. 2.2 Block Diagram of an Asymmetrical Contouring Control System

의 속도루프에 추가적으로 제어입력  $u_x(k)$ 와  $u_y(k)$ 를 공급함으로써 윤곽성능을 향상시킨다. 윤곽오차제어는 윤곽추적성능을 유지하기 위하여 기존의 독립축제어의 비례제어에 부가하여 사용하게 된다.

Fig. 2.2에서 속도제어루프의 입력  $V_{ci}$ ( $i = x, y$ )를 행렬과 같은 형태로 나타내면

$$\begin{bmatrix} V_{cx} \\ V_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{px} + G_x m_y^2 & -m_x m_y G_x \\ -m_x m_y G_y & k_{py} + G_y m_x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$(m_x = \cos \theta, \quad m_y = \sin \theta)$

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{mx}}{s(\tau_x s + 1)} & 0 \\ 0 & \frac{k_{my}}{s(\tau_y s + 1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cx} \\ V_{cy} \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} V_{cx} \\ V_{cy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\det(I + CW) = 0 \quad (7)$$

(5)식의 C행렬은 제어행렬을 의미하고 (6)식의 행렬 W는 플랜트의 행렬을 의미한다. 따라서 주어진 시스템의 폐루프 시스템의 특성방정식(characteristic equation)은 (7)와 같이 되며 특성방정식을 통하여 윤곽제어 계인을 선정한다. 본 연구에서는 특성방정식에서 우세근의 감쇠비(damping ratio)를 대략 0.6 ~ 0.7 정도가 되도록 선택하였다.

### 2.3 시뮬레이션

시뮬레이션은 직선과 코너, 원의 지령경로에 대해 기존의 서보제어기에 추가적으로 윤곽제어입력을 작용함으로써 얼마나 윤곽추적성능이 향상되는가를 윤곽오차의 관점에서 비교 평가한다. 직선, 원호의 두 가지 경로에 대해 궤적을 추적하면서 윤곽제어를 수행한 경우와 하지 않는 경우의 제어성능을 비교, 평가한다. 시뮬레이션에서 경로 추적 속도는 10m/min을 사용하였고 샘플시간은 1 msec으로 하였으며 식(6)의 동적모델을 1 msec의 계산 스텝으로 시뮬레이션을 수행하였다.

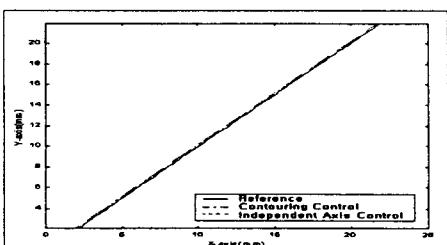


Fig. 2.3 Straight Line Contour. Simulation.

Fig. 2.3, 2.5, 2.7은 직선, 코너, 원호에 대한 시뮬레이션 추적 결과를 나타내고 있고 Fig. 2.4, 2.6, 2.8은 각 궤적에 대하여 윤곽오차를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 윤곽제어를 수행할 때 독립축제어시 보다 윤곽오차가 감소함을 알 수 있었다(약 1/4이하).

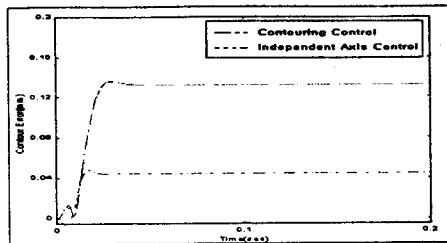


Fig. 2.4 Comparison to Contour Error. Simulation. (Straight Line)

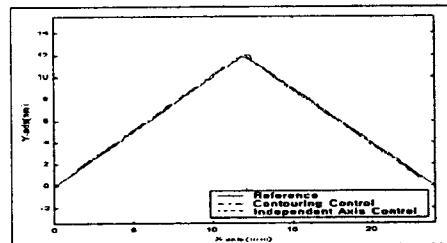


Fig. 2.5 Corner Contour. Simulation

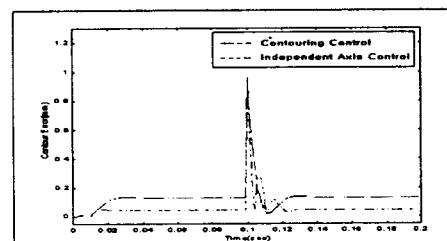


Fig. 2.6 Comparison to Contour Error. Simulation. (Corner)

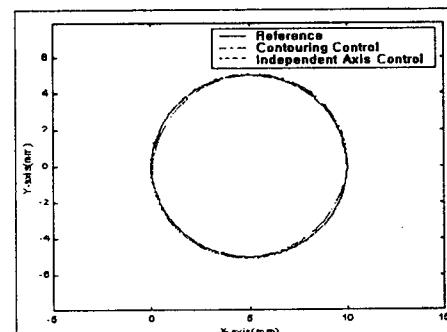


Fig. 2.7 Circle Contour. Simulation

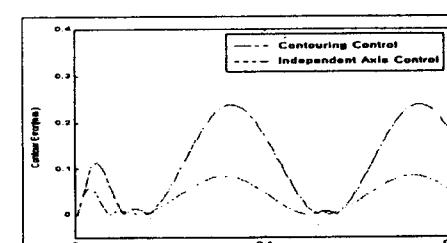


Fig. 2.8 Comparison to Contour Error. Simulation. (Circle)

## 2.4 실험

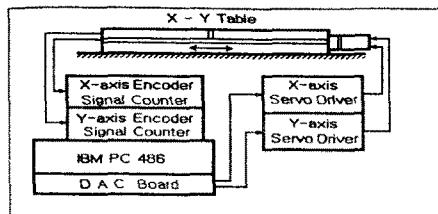


Fig. 2.9 Experimental Device

Fig. 2.9은 실험장치를 나타낸다. 고속용 X-Y 테이블은 각축은 AC 서보모터로 구동되고 각축의 이송거리는 엔코더카운터를 통해서 센싱된다. 각축의 제어입력은 디지털-아날로그 컨버터를 이용하여 AC서보드라이버로 가한다. 각각의 궤적에 대한 위 시뮬레이션과 거의 근사하게 나타났다. 약간의 오차는 모델링오차에서 기인한다고 보고 실험은 이송속도가 변에서의 독립축제어를 실시하였다.

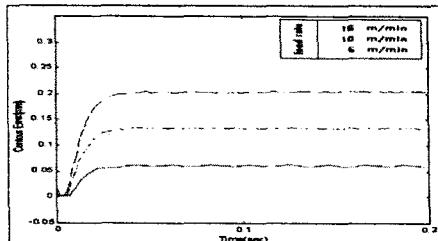


Fig. 2.10 Comparison to Contour Error.  
Independent Axis Control(S-Line).  
Experiment(Variable Feedrate).

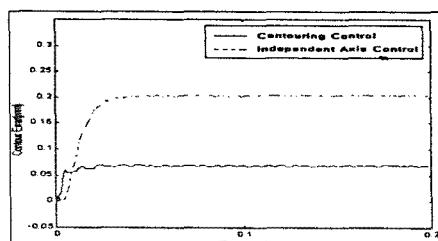


Fig. 2.11 Comparison to Contour Error.  
Experiment(15m/min).  
Straight Line Contour.

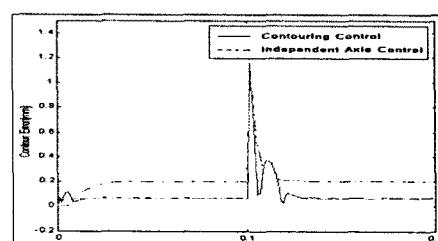


Fig. 2.12 Comparison to Contour Error.  
Experiment(15m/min).  
Corner Contour.

Fig. 2.10은 직선의 경우 이송속도를 증가시켰을 경우의 윤곽오차의 실험결과를 나타낸 것이다. 즉, 이송속도가 변에 따른 윤곽오차의 증가를 보여주고 있다. 마찬가지로 코너와 원의 경우에도 이송속도가 증가할 때 윤곽

오차가 증가한다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이 고속제어시스의 윤곽오차의 증가를 보여주고 있다.

이러한 이송속도 과라메타에 대해서 윤곽제어를 실시하였는데, Fig. 2.11는 직선의 경우, Fig. 2.12에서 코너궤적의 경우, Fig. 2.13은 원호궤적에 있어서의 독립축제어와 윤곽제어를 비교한 것이다.

각각의 궤적에 대한 윤곽제어를 실시한 결과 독립축제어시보다 감소하였다(약 1/4이하).

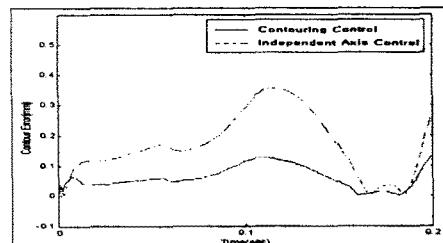


Fig. 2.13 Comparison to Contour Error.

Experiment(13.2m/min).  
Circle Contour.

## 3. 결 론

2축 제어시스템에 일반적으로 적용할 수 있는 교차식 윤곽오차 제어방식을 사용하여 그 제어성능이 향상되었음을 알 수 있었다. 또한 직선경로 및 원호경로의 경로 추적 실험을 통하여 윤곽추적성능을 현저히 향상시킬 수 있음을 입증하였다. 계속되는 연구로서 자유곡선 추적이거나 윤곽오차제어에 미분 및 적분제어를 도입함으로써 제어성능을 더욱 정교하게 향상시키는 것과 본 연구에서 확립된 일반적인 제어알고리즘을 3차원 윤곽 추적제어에 적용해 보는 것이 필요하다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems", ASME J. of Dynamic Systems, Meas. and Con., Vol 102, pp 285~272
- [2] Koren, Y. and Lo, C.C., "Variable-Gain Cross- Coupling Controller for Contouring", Annals of the CIRP, Vol. 40, pp 371-374, 1991
- [3] Lo, C. C. and Koren, Y., "Evaluation of Servo-Controllers for Machine Tools", ACC/WALL, pp 370~374, 1992
- [4] Kulkarni, P.K. and Srinivasan, K., "Optimal Contouring Control of Multi-Axis Feed Drive Servomechanisms", ASME J. of Eng. for Industry, Vol. 111, pp. 140~148, 1989
- [5] Kulkarni, P.K. and Srinivasan, K., "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms", ASME J. of Dyn. Sys. Mea. and Con., Vol 112, pp. 225~232, 1990
- [6] Chiu, T. C. and Tomizuka, M., "Coordinated Position Control of Multi-Axis Mechanical Systems", ASME, Dynamic Systems and Control, DSC-vol. 55-1, pp. 159~166, 1994
- [7] McNab, R.T. and Tsao, T.C., "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, 1994
- [8] Lee Gun-Bok, Sim Young-Bok, Jung You-Chul, "Asymmetrical Contouring Control of Biaxial System", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol 14. No. 8, pp. 65~72, August, 1997