

CNC 공작기계에서 상호결합제어기를 위한 새로운 윤곽오차모델

이재하*, 양승한**

A New Contour Error Model for Cross-Coupled Controller in CNC Machine Tools

Jae-Ha Lee*, Seung-Han Yang**

Abstract

In the control of CNC machine tools, it is significant for precise machining to reduce the contour error. The object of servo-control is reduction of contour error and tracking error. In past studies, there were two approaches to control a servo-system. One was to eliminate axial tracking errors, and the other was to control contour errors. The Cross-coupled controller(CCC) was introduced from a viewpoint of contour errors. For constructing CCC, it is necessary to make the contour error model. Recently, for machining part with free form surfaces, we propose a new contour error model based on curve interpolator. It is presented here that performance of CCC using proposed model is enhanced. Therefore, we can make more precise parts with the curve interpolator and the new contour error model.

Key Words : cross-coupled controller(상호결합제어), contour error(윤곽오차), tracking error(추종오차), curve interpolator(곡선보간기), parametric curve(매개변수곡선)

1. 서론

Koren은 CNC 공작기계의 제어를 다음의 네 부분으로 나누었다. 서보제어수준과 보간기수준, 오차보정수준(기하학적 오차, 열변형오차, 마모, 공구변형), 그리고 적응제어영역(철삭력, MRR, 이송속도)수준으로 나누었다.⁽¹⁾ 이 중에서 서보제어의 목적은 가공과정에서 윤곽오차와 추종오

차를 감소시키는 것이다. 가공품의 품질과 정밀가공을 위해서는 추종오차보다 윤곽오차가 더 큰 비중을 차지한다. 비록 추종오차가 발생하더라도 윤곽오차가 없다면 가공 윤곽의 정밀도는 높게 된다. 자유곡면의 형상을 더 정밀하게 가공하기 위해서 윤곽오차를 줄여야하며 이는 새로운 서보제어를 요구한다.

윤곽오차의 발생원인으로 각 축의 드라이브 시스템의

* 경북대학교 대학원
** 경북대학교

루프게인이 서로 불일치하거나, 마찰력의 발생, 속도의 변화, 코너이동 등이 있다. 이러한 공작기계의 동작 과정중 발생하는 다축 이송시스템의 윤곽오차를 줄이기 위해 많은 연구가 행해져 왔다. 이전의 연구방법에는 크게 두 가지 방향이 있는데 먼저 한 방향은 각 축의 추종오차를 줄여 윤곽오차를 감소시키고자 하는 것이며 다른 한 방향은 각 축의 제어 시스템들이 서로 결합되어 윤곽오차를 줄이는 제어목적으로 게인값을 조절해주는 것이다.

Koren은 윤곽오차 관점에서 상호결합제어기를 소개했고 이를 이용한 많은 연구가 행해져 왔다. 이와 같은 상호결합제어기를 구성하기 위해서 필요한 것은 윤곽오차모델이다. 직접적으로 윤곽오차를 측정하기가 어렵기 때문에 궤적의 기하적인 관계나 각 서보드라이브의 특성치와 이송속도 등을 이용한 모델이 제시되었다. 각 모델은 매순간의 적절한 윤곽오차를 계산하여 각 축의 서보드라이브의 입력값을 조절하게 된다. 기존의 제안된 모델은 다음과 같다.

Srinivasan은 원하는 궤적과 x축과의 각도와 각 축의 추종오차를 이용한 모델을 제안했다.¹²⁾ 간단한 기하학적관계로부터 수식이 유도되며 적용하기에 용이하나 복잡한 궤적형상의 경우, 정확한 윤곽오차를 계산할 수 없다. Chuang은 각 축의 속도와 추종오차를 이용한 모델을 제시하였다.¹³⁾ 속도의 함수로 나타내어 속도제어기를 이용하게 될 때 많은 이점이 있으나 급격한 속도의 변화, 즉, 코너가공같은 경우, 좋지 않은 결과를 얻을 수 있다. Koren은 근접원의 반지름을 이용한 모델을 이용하였다.¹⁴⁾ Koren의 모델은 원호가공의 경우에 정확한 윤곽오차를 계산할 수 있지만, 자유곡선의 궤적의 경우에는 정확한 계산이 되지 않는다. 또한, 기존의 모든 연구들은 직선 또는, 원호보간기를 기반으로 윤곽오차를 계산하고 상호결합제어를 행하여 왔다.

최근 자유곡선 형태의 가공을 위해 곡선보간기가 사용되고 있는 시점에 본 논문은 곡선보간기를 이용하여 자유곡선을 가공하는 경우를 기반으로 새로운 윤곽오차모델을 제안하여 상호결합제어기를 구성하고자 한다. 이는 최근 자유곡선 가공을 요구하는 상황에서 곡선보간기와 함께 더 정확한 윤곽을 가공하는데 이용될 수 있다. 따라서 본 논문은 윤곽오차의 관점에서 제어기를 설계하기 위해 새로운 윤곽오차모델을 제시한다. 곡선보간기를 기반으로 윤곽오차모델이 얻어지고 제안된 모델을 사용한 상호결합제어기와 기존의 모델의 경우를 비교해 보았다. 또한 제안하는 모델의 경우, 다른 모델들과 달리 2차원에서 유도

된 모델을 사용하기 위해서 기준평면을 매 번 설정할 필요없이 3차원 형상에서도 동일하게 적용될 수 있다.

2. 윤곽오차

2.1 곡선 보간기

기존의 직선, 원호보간기를 통해 자유곡선을 보간할 경우 메모리용량, 이송속도의 변동, 위치정확도면에서 곡선보간기에 비해 효과적이지 못하였다.¹⁵⁾ 최근 컴퓨터 시스템의 발달로 개발자가 원하는 자유곡선은 CAD시스템을 통해 매개변수곡선으로 표현되고 CAM 시스템을 거쳐 가공된다. 원하는 형상의 데이터는 각 좌표의 값이 아닌 자유곡선 $P(u)$ 의 매개변수식으로 표현된다. 식(1)은 Bezier 곡선의 매개변수식이다. n 은 조정점(control point)의 개수-1이며 매개변수식의 차수를 나타낸다. Bezier곡선은 최근 널리 쓰이는 NURBS곡선의 한 형태이며 매개변수곡선의 기본으로 볼 수 있다.

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(u), u \in [0, 1] \quad (1)$$

$$P(u) = x(u)i + y(u)j + z(u)k \quad (2)$$

기존의 직선, 원호보간기와는 달리 곡선 보간기는 식(2)로 주어지므로 각 축의 신호는 $x(u)$, $y(u)$, $z(u)$ 가 된다. 즉, 복잡한 중간과정이 필요없이 주어진 곡선식 자체가 보간정보를 가지고 있게 된다. 여기서 구해야 할 것은 u 값이다. u 값은 샘플링 시간 T 마다 생성되어 각 축의 서보시스템의 입력으로 주어진다. u 값은 구하는 방법으로 여러 가지가 제안되었으나 본 연구에서는 일정한 이송속도 V 를 가지도록 u 값을 구하고자 한다. 다음 식(3)은 일정한 이송속도를 가지도록 u 값을 생성한다.¹⁶⁾

$$u_{k+1} = u_k + \frac{VT}{(x'^2 + y'^2)^{1/2}} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } x' = \frac{dx(u)}{du}, y' = \frac{dy(u)}{du}$$

2.2 기존의 윤곽오차모델

윤곽오차는 원하는 궤적과 실제 궤적사이의 거리 차이로 정의된다. 즉, 원하는 궤적(trajjectory)에 직교(orthogonal)하는 오차 요소를 의미한다. 이 윤곽오차는 실시간으

로 정확하게 측정할 수 없으므로 여러 모델이 제안되어 왔다. Koren은 근접원을 가정하여 원의 반지름을 이용한 모델을 제시했다. 이는 기존의 직선, 원호보간기 기반의 동작기제어에서는 아주 합리적인 모델이 될 수 있다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 각 샘플링 순간마다 근접원을 구하고 곡률과 접선벡터를 구한다. 따라서, 기하적인 관계에 의해 윤곽오차를 표현하면 다음과 같다.

$$\varepsilon = \sqrt{(P_x - x_0)^2 + (P_y - y_0)^2} - R \quad (4)$$

식(4)을 Taylor 급수진개를 하여 고차항을 생략하면 다음과 같은 윤곽오차모델이 주어진다.

$$\varepsilon = -E_x \left(\sin\theta - \frac{E_x}{2R} \right) + E_y \left(\cos\theta + \frac{E_y}{2R} \right) \quad (5)$$

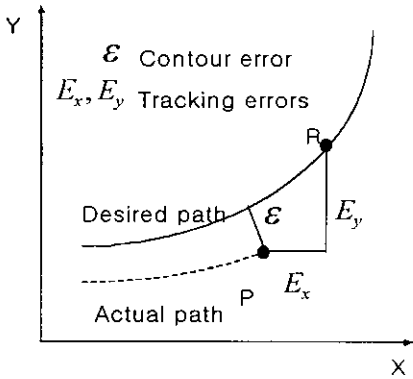


Fig. 1 Contour error and tracking error

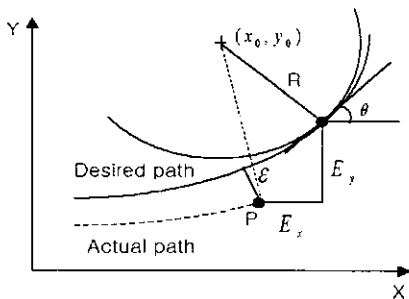


Fig. 2 Error model for a nonlinear contour

2.3 제안하는 윤곽오차모델

CAD시스템을 이용한 자유곡선을 가공하기 위해 최근 곡선보간기를 사용하여 위치정확도를 높이고 있다. 곡선보간기를 사용할 경우 매개변수식을 알고 있기 때문에 이를 이용하여 윤곽오차를 모델링할 수 있다. 즉, 매개변수식을 통해 많은 궤적의 정보를 알 수 있다. Fig. 3에서 P점의 좌표는 엔코더를 통해 알 수 있고 Q점의 좌표, 즉 u값을 구하면 $\dot{\varepsilon}$ 을 얻을 수 있다. 윤곽오차는 $\|\dot{\varepsilon}\|$ 의 크기로 정의할 수 있다. 각 벡터들 간의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(\dot{Q} - \dot{P}) \cdot \dot{Q}^n = 0 \quad (6)$$

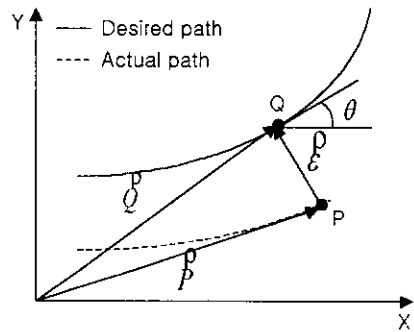


Fig. 3 Proposed contour error model for a free curve

P점의 좌표를 알고 있으므로 식(6)은 u로 이루어진 고차다항식이 된다. Newton-Raphson법을 이용하여 이 다항식의 해를 구하면 Q점의 좌표를 계산할 수 있게 된다. 특별히, 수치해석법을 사용할 때, 초기값과 수렴범위는 샘플링 시간을 고려하여 적절하게 선택해야 한다. $\dot{\varepsilon}$ 는 식(7)과 같이 계산되고 윤곽오차 ε 는 식(8)으로 구해진다. 또한, 주어진 점 Q에서의 단위접선벡터를 구하면 x축과 이루는 각도 θ 를 구할 수 있다.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{Q} - \dot{P} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \sqrt{(Q_x(u) - P_x)^2 + (Q_y(u) - P_y)^2} \quad (8)$$

3. 상호결합제어기

상호결합제어기는 각 축의 추종오차보다 윤곽오차를 감

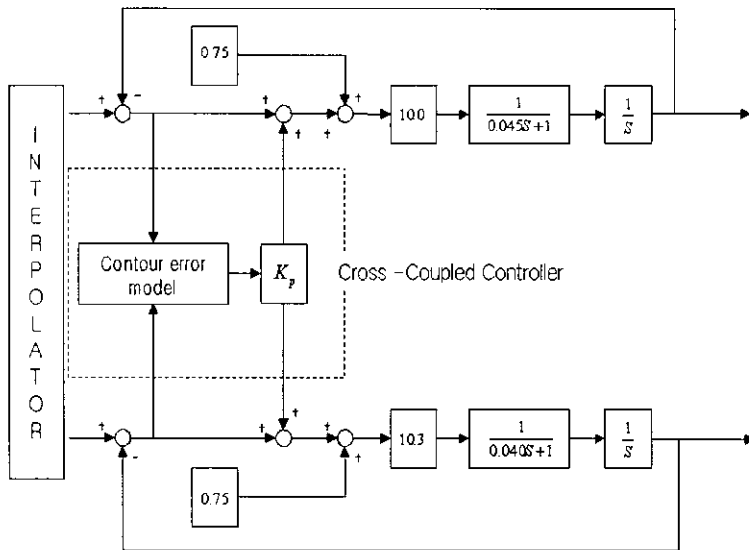


Fig. 4 The structure of the cross-coupled controller

소시키는 것을 제어 목적으로 한다. 상호결합제어기는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 각 축의 제어루프에 교차되어 있으며 윤곽오차를 계산하여 그 결과를 각 루프에 더해주게 된다. 즉, 샘플링 순간의 추종오차와 기하학적인 관계를 통해 계산된 곡률, 접선벡터 등을 이용해 윤곽오차를 계산한다. 이 윤곽오차를 각 축의 성분으로 나누어 서보드라이브 입력값을 조절하게 된다. 곡선보간기에서 출력되는 값은 각 축의 서보드라이브의 입력이 되며 피드백되는 값과의 차는 추종오차로 윤곽오차모델의 입력이 된다.

상호결합제어기의 제어방법으로 P제어기, 또는 PI, PID, 퍼지, 뉴럴네트워크 제어기가 사용될 수 있다. 즉, 상호결합제어기도 여러 제어방법으로 각 축의 제어기로의 입력값을 제어할 수 있다. 본 논문의 방향은 윤곽오차모델의

성능을 비교하기 위한 것이므로 상호결합제어기의 제어 방법은 기본적인 P제어기를 이용하였다. 본 논문에서 사용한 게인값과 특성치는 Table 1과 같다.

4. 모의실험 결과

본 연구에서 사용한 곡선은 4개의 조정점을 가진 Bezier 곡선이다. Fig. 5에서 보는 것과 같은 자유곡선과 직선의 경우를 적용했다. 먼저 곡선보간기를 이용하여 샘플링 시간마다 서보 드라이브에 입력할 지령(reference word)을 생성한다.

이 때 이송속도와 샘플링시간은 각각 $V=100$ [mm/sec], $T=0.01$ [sec]이며 곡선 보간기를 통해 총 110개의 Knot점 데이터를 얻을 수 있었다. 제안하는 모델을 이용하여 윤곽오차를 계산하기 위해 사용한 수치해석법의 초기값과 수렴범위는 샘플링 시간을 고려하여 결정하여야 한다.

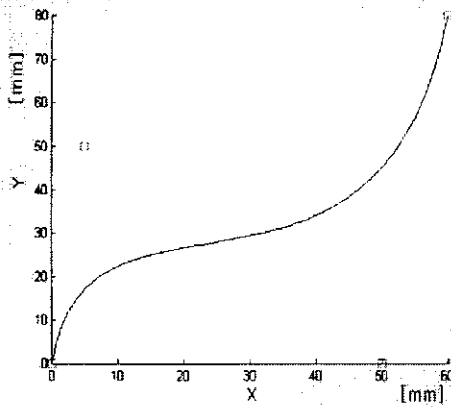
Koren의 모델의 경우는 수치해가 아니므로 제안하는 모델보다 수렴시간이 짧다. 제안하는 모델의 경우, 수렴범

Table 1 Data of controller using in this paper⁽⁴⁾ (Koren, 1991)

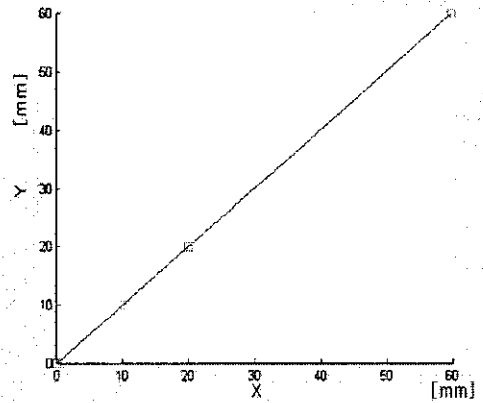
Content	Value
Cross-Coupled Controller Gain(K_p)	1
Disturbances	0.75
Time constants of Motor	x-axis : 0.045 y-axis : 0.040
Open loop gain	x-axis : 10.3 y-axis : 10.0

Table 2 Result of contouring error in each model

	Line path		free-form path	
	Koren	Proposed	Koren	Proposed
Mean(mm)	0.0014	0.0014	0.39	0.19

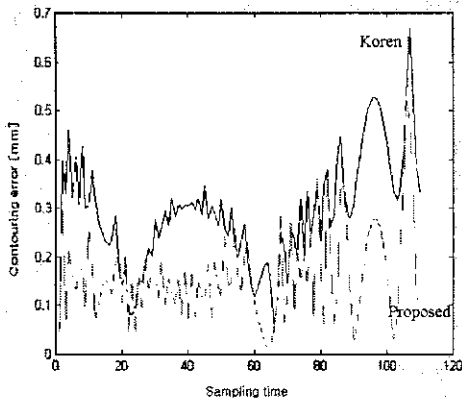


(a) free-form path

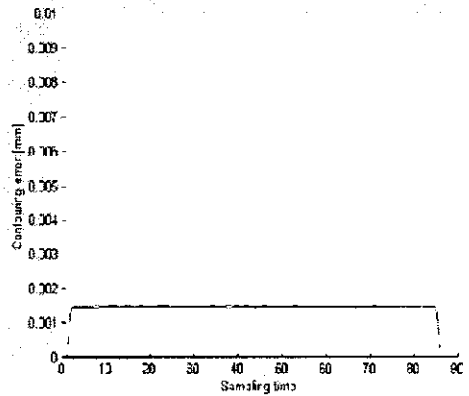


(b) line path

Fig. 5 Desired path



(a) free-form path

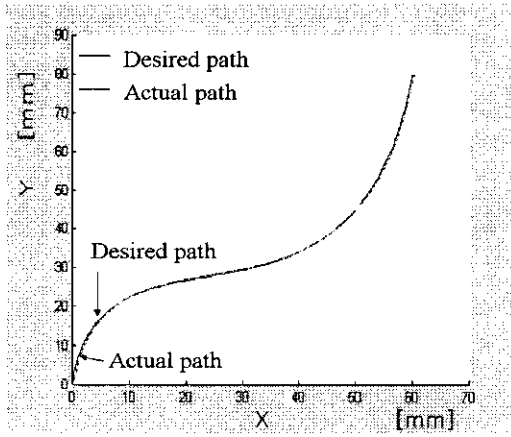


(b) line path

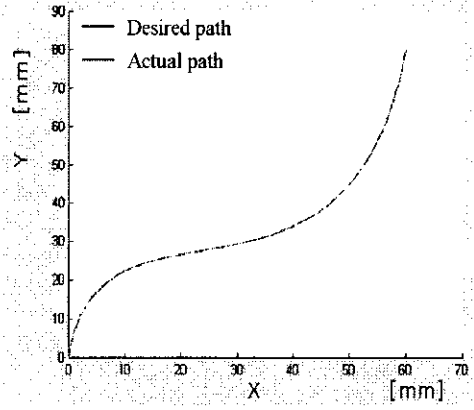
Fig. 6 After control, result of contouring error in each model

위를 조절하여 0.01[sec]이내에 계산될 수 있도록 한다. 또한, 시뮬레이션은 Matlab v5.3에서의 결과이므로 실제 실험장치 구성시 C/C++을 사용하면 더 빠르게 계산될 수 있다. 본 연구에서 각 샘플링 시간 T_{i-1} , T_i 에서 주어진 곡선의 변화는 크지 않다. 만약 곡선의 변화가 심하다면 곡선보간기를 거칠 때 더 짧게 구간이 나누어질 것이다. 따라서 초기값으로 샘플링 시간 T_{i-1} 의 파라미터 값 u_{i-1} 으로 하고 수렴속도를 위해 수렴범위는 $10e-3$ 으로 계산하였다. 제안하는 윤곽오차모델의 타당성을 알아보기 위하여 Koren의 모델과 비교해 보았다. 계산된 윤곽오차는 상호결합제어기를 통해 각 축에 입력을 좌우하게 된다.

먼저, 주어진 궤적이 직선인 경우에는 Fig. 6의 (b)에서 보는 바와 같이 두 모델 모두 동일한 윤곽오차 값이 나왔으며 상호결합제어기를 통한 최종적인 윤곽오차는 거의 없었다. 주어진 궤적이 곡선인 경우, 실제 궤적과 원하는 궤적을 나타내면 Fig. 7과 같다. 하지만, 그 차이를 시각적으로 비교할 수 없기 때문에 Koren의 윤곽오차모델을 이용하여 윤곽오차를 계산하였다. 각 모델을 통해 상호결합제어를 행한 결과, 주어진 궤적에 대한 윤곽오차를 계산하여 도시하면 Fig. 6의 (a)에서 보는 것과 같다. 결과적으로 Table 2에 제시된 바와 같이, 직선궤적일 때 윤곽오차는 두 모델 모두 거의 생기지 않았으며 자유곡선궤적일 때



(a) Koren's model



(b) Proposed model

Fig. 7 Trajectories of path by Koren model and Proposed model

Koren의 모델은 0.39mm, 제안한 모델은 0.19mm의 윤곽오차가 생겼다. 즉, 제안된 모델을 이용하여 기존의 모델보다 더 정확하게 윤곽오차를 모델링할 수 있었고 이를 통해 상호결합제어기의 성능이 향상됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 곡선보간기를 가진 CNC에서 새로운 윤곽오차모델을 제안하였고 기존의 모델과 비교 검토하였다.

- (1) 상호결합제어기는 윤곽오차모델에 의존적이기 때문에 그 성능은 모델의 성능에 달려있다. 만약 원하는 궤적의 곡선식이 주어져 있다면 기하학적인 관계에 의해 정확하게 윤곽오차를 구할 수 있었다. 계산된 윤곽오차를 상호결합제어기를 이용하여 제어한 결과 Koren의 모델의 경우 0.39mm이지만 제안하는 모델의 경우에는 0.19mm로 더 작은 윤곽오차가 생겼다. 즉, 실제 발생하는 윤곽오차를 정확하게 모델링함으로써 상호결합제어 성능을 높일 수 있었다.
- (2) 원하는 궤적이 직선일 경우에는 계산된 윤곽오차가 동일했으며 상호결합제어기를 통해 제어된 후 최종적인 윤곽오차는 거의 없었다.(0.0014mm) 즉, 제안하는 모델을 통해 상호결합제어기의 성능을 높일 수 있음을 보였다.
- (3) 또한 제안된 모델은 3차원으로 확장이 가능하며 다른 부가적인 계산과정 없이 적용될 수 있다.

참고 문헌

- (1) Koren, Y., "Control of Machine Tools", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 749~755, 1997.
- (2) K. Srinivasan and P. K. Kulkarni, "Cross-coupled control of biaxial feed drive servomechanisms", ASME Trans, Journal of Dynamic Systems, Measurement and control, Vol. 112, No. 2, pp. 225~232, June, 1990.
- (3) H. Y. Chuang and C. H. Liu, "Techniques in Cross-coupled digital adaptive feedrate control for multiaxis machine tools", ASME Trans, Journal of Dynamic Systems, Measurement and control, Vol. 113, pp. 451~457, September, 1991.
- (4) Koren, Y., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring", Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 371~374, 1991.
- (5) Yang, D. C. H. and Kong, T., "Parametric Interpolator versus Linear Interpolator for Precision CNC Machining", Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 3, pp. 225~233, 1994.
- (6) M Shpitalni, Koren, Y. and C. C. Lo, "Realtime curve interpolators", Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 11, pp. 832~838, 1994.