韓國精密工學會 2003年度 春季學術大會論文集

윤곽오차 벡터를 이용한 윤곽오차 모델 설계

최정희*, 이명훈*(경북대 대학원 기계공학과), 양승한**(경북대학교 기계공학부)

Design of Contour Error Models using Contour Error Vector

J. H. Choi*, M. H. Lee* (Graduate School., KNU), S. H. Yang(Mechanical Eng. Dept., KNU)

ABSTRACT

The higher precision is demanded in modern manufacturing and it requires the more accurate servo controller. Cross-coupling control (CCC) has been developed to improve contouring motion. In this paper we introduce a new nonlinear CCC that is based on contour-error-vector using a parametric curve interpolator. A vector from the actual tool position to the nearest point on the desire path is directly adopted. The contour-error-vector is determined by constructing a tangential vector of nearest point on desired curve and determining the vector perpendicular to this tangential vector from the actual tool position.

Moreover, the vector CCC can apply directly and easily to free-form curves include convex and concave form. The experimental results on a three-axis CNC machine center show that the present approach significantly improves motion accuracy in multi-axis motion

Key Words : Contour error (윤곽오차), CNC(컴퓨터수치제어), Cross-coupling control (교차축 연동 제어)

1. 서론

공작 기계에 있어서 가공의 정밀도는 추종오차(tracking error)와 윤곽오차(contouring error)에 달려 있다. 종래에는 뒤먹임 제어기(feedback controller)나 앞먹임 제어기(feedforward controller)을 사용하여 각 축을 개별적으로 제어하여 이러한 오차를 줄이려는 연구 활동이 활발했다. Poo et al[1] 은 뒤먹임 제어기와 윤곽오차 사이의 관계를 분석하여 뒤먹임 제어의 게인을 조정함으로써 윤곽 정밀도를 높이는 방법을 제안했다. 앞먹임 제어기는 서보 시스템(servo system)의 뒤처짐(lag)을 효과적으로 줄여 윤곽 오차를 줄여준다는 사실은 서보 제어에 있어서 일반적인 사실이다.[2][3][4] Koren[5]은 처음으로 이러한 앞먹임 제어기와 뒤먹임 제어기에 각 축의 동적 관계를 고려한 상호 결합 제어기(cross-coupling-controller, CCC)를 더하여 윤곽 오차를 줄이는 방법을 제안했다. Koren 과 Lo[6]는 더 나은 오차 보정을 위해 추정 윤곽오차의 크기와 방향을 이용한 가변 게인 교차축 연동 제어기(variable-gain CCC)를 제안했다. 원호 윤곽에 근사하는 추정 윤곽오차 벡터(estimated contouring error vector)에 따라 각축을 보정해 줌으로써 윤곽오차를 감소시키는 방법이다. 이 가변 게인 교차축 연동 제어기는 2 축 시스템을 위해 고안된 것이기 때문에, 다축 공작기계에서는 사용 할 수 없는 단점이 있다. 그리고, 비선형 가공의 경우, 원호로 근사하여 모델링 하였기 때문에, 특히 곡률이 큰 경우에는 윤곽오차를 정확히 계산할 수 없다. 정확한 윤곽오차가 관측되지 않는다면, 윤곽오차량을 줄이는 제어기가 있다 하더라도 다른 결과를 만들어 낸다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 다축 시스템을 위한 윤곽오차 벡터모델(contour error vector model)과 그에 따른 상호 결합제어 알고리즘을 제안한다. 이 새로운 윤곽 오차 벡터모델은 윤곽오차 정의에 따른 벡터를 생성하여 윤곽 오차를 계산하기 때문에 더 정확하다. 윤곽오차 벡터모델을 이용할 경우 다축 시스템에서의 적용이 간편하고, CNC 의 곡선 보간기로부터 형성된 비선형 곡선에 대해 보다 정확한 가공을 할 수 있다. 윤곽오차 벡터모델은 3 축 공작기계를 이용한 자유 곡선에 대한 실험 결과 기존의 모델보다 우수하다.

2. 윤곽오차 벡터 모델 (Contour error vector Model)

원하는 궤적에 직교하는 오차 요소로 정의되는 윤곽오차 벡터를 얻기 위해서 Fig.1 과 같은 윤곽오차 벡터 모델을 제안한다.

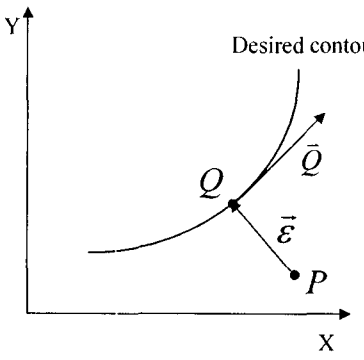


Fig. 1 The cntour-error-vector model

새로운 윤곽오차 모델은 매개 변수 곡선 보간기에 기반을 두고 있다. 매개변수 보간기는 Bezier, B-spline, NURBS 곡선 등에 적용할 수 있으며, u 라는 매개 변수로 계산되어지므로 2D 에서 3D 로의 확장이 용의 하다. 이에 관한 여러 연구가 있었지만, 원하는 자유곡선의 데이터는 각 좌표의 값 대신 자유곡선 f(u)의 매개변수 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$f(u) = x(u)\vec{i} + y(u)\vec{j}(0 \le u \le 1) \tag{1}$$

u 는 각 샘플링 시간(T)마다 계산되어 각 축의 서보 시스템에 입력된다. 본 논문에서는 u 를 일정한 속도(v)로 증가하도록 하여 계산하였다.

$$u_{k+1}=u_k+\frac{vT}{\left[\left(\frac{dx}{du}\right)^2+\left(\frac{dy}{du}\right)^2\right]^{1/2}} \tag{2}$$

식 (2)에서 u_k 는 k 번째 샘플링 시간의 u 값이다.

윤곽오차 벡터 모델은 다른 어떠한 근사 방법도 사용하지 않고 윤곽오차를 윤곽 벡터로 정의한다. Fig.2 에서 P 는 실제 공구의 위치이고, Q 는 P 에서 궤적에 수선을 그렸을 때 원하는 궤적의 접선과 직교하는 점(Q)이다. 이는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{\varepsilon} = \vec{Q} - \vec{P} \tag{3}$$

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

실제 공구의 위치 P 는 엔코더를 통해 받은 값으로 알 수 있다. Q 의 좌표는 매 샘플링 시간마다 u 를 구하면 알 수 있다. u 는 윤곽오차 벡터 $\vec{\varepsilon}$ 과 궤적의 접선 벡터 $\vec{Q}$ 가 직교하므로, 아래 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\vec{\varepsilon} \cdot \vec{Q} = 0 \tag{4}$$

식 (4)에 (3)을 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\vec{Q} - \vec{P}) \cdot \vec{Q} = 0 \tag{5}$$

식 (5)의 해를 찾게 되면 윤곽오차를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 수치 해석적 방법인 이분법을 사용하였다. 실시간 계산을 위해서 u 의 범위를 정하는 것이 중요한데, 현재 위치에서 기준 입력의 u 점과 그전에 구한 윤곽오차 점에서의 u 점으로 제한했다.

새로운 윤곽 오차 모델은 Fig.2 와 같이 구성되어 있다. (R_x, R_y, R_z)는 각축의 기준 위치 이고, (P_x, P_y, P_z)는 공구의 실제 위치, (K_{px}, K_{py}, K_{pz})는 위치 제어기, K_c는 상호 결합 제어기의 게인이다.

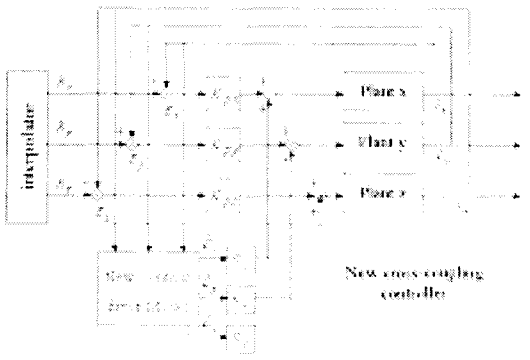


Fig.2 The new cross-coupling controller

3. 실험 결과

3.1 실험을 통한 Koren 의 CCC 와 윤곽 오차 벡터 모델의 비교

이 실험에서 사용된 실험장치는 PC, DAC(Digital Analog Converter), Counter, AC 서보 드라이브, AC 모터, 그리고 3 축 LM 가이드로 구성하였다. Fig.3.은

실제 시스템의 사진이며, Table. 1 은 시스템의 특성치를 보여준다.

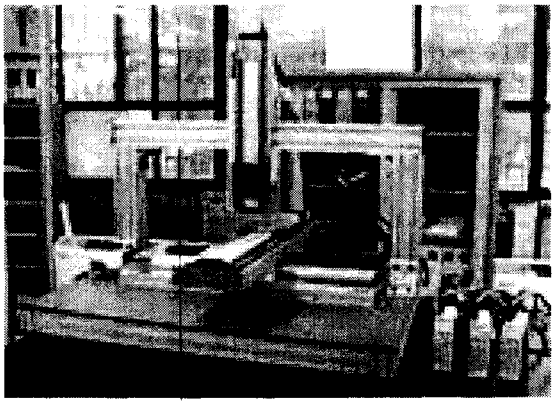


Fig. 3 Experimental Setup

Table.1 Experimental system

System	PC	DAC	Counter	Encoder
Spec.	Pentium 166	10V 12bit	32bit	10000 pulse/rev

복잡한 형상의 곡선도 쉽게 표현하기 위해서 실험에 사용된 보간기는 매개 변수식으로 이루어져 있다.

먼저 제안한 윤곽오차 벡터 모델을 기존의 CCC 와 비교하기 위해 fig.3 과 같은 Bezier 곡선을 사용했다. 제어점(control point)은 (0,0), (10,50), (30,10), (50,40) 이고, 매개 변수식은 다음과 같다.

$$x = 25u^3 - 90u^2 - 15u$$

$$y = 160u^3 - 270u^2 + 150u \qquad (6)$$

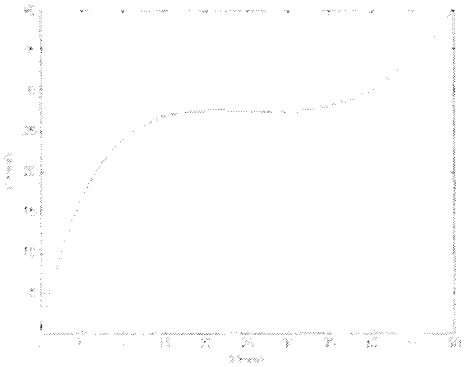


Fig. 4 The desired contour

상호 결합 제어기에서는 P 제어기, PI 제어기, PID 제어기 등 다양한 제어기를 쓸 수 있지만, 본 연구에서는 P 제어기만 사용하였다.

Fig. 5 는 가변게인 교차축 연동 제어 모델과 윤곽오차 벡터 모델의 윤곽오차를 비교한 실험의 결과이다. 이송속도는 3m/min 이고, 윤곽오차의 단위는 μm 이다.

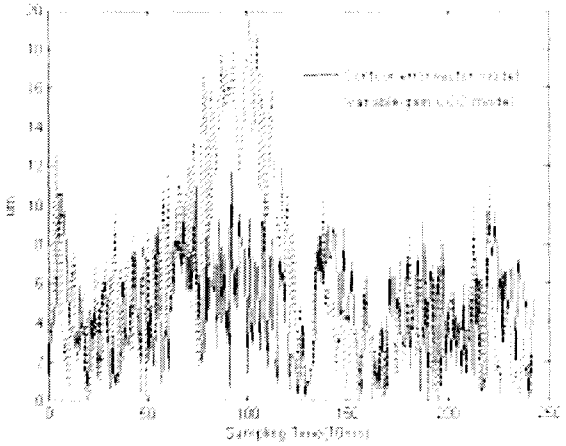


Fig.5 Comparison of contour error models

실제 실험 결과는 양과 음의 값을 모두 포함하고 있지만, 오차량은 크기 값이므로, 두 모델의 비교를 용이하게 하기 위해 모두 절대값으로 변환해 주었다.

Table. 2 Experimental result (unit : μm)

	Max	Mean	RMS
Contour error Vector model	12.6	4.8	3.0
Variable-Gain CCC model	19.5	5.9	4.8

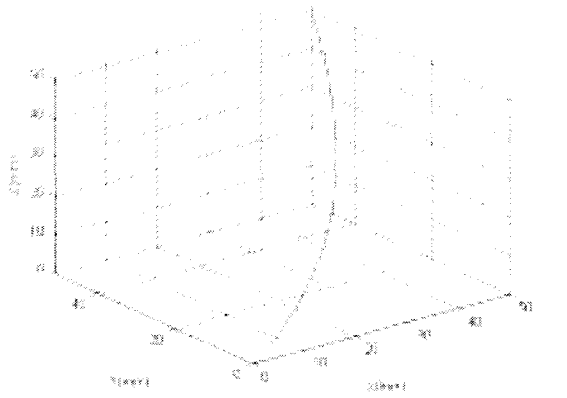
각 모델별로 상호 결합 제어기를 실행한 결과는 위의 Table 2 와 같고, 이 결과를 통해 본 논문에서 제안한 윤곽오차 벡터 모델은 곡선의 곡률에 크게 영향을 많이 받지 않을 뿐만 아니라, 윤곽오차의 정의에 가장 충실한 모델이기 때문에 기존의 CCC 비해 윤곽오차가 줄어 들었다.

3.2 3 축 시스템에서의 윤곽오차 벡터 모델

3 축에서도 2 축과 마찬가지로 위치제어기와 상호결합제어기는 P 게인만 사용하였다.

3 차원 형상으로는 매개변수를 이용한 3 차 방정식을 사용했다. 그 식은 아래 (7)식과 같고, Fig.6 에서 보여지는 바와 같다.

$$x = 50u - u^3$$
$$y = 50u^2$$
$$z = -50u - u^3 \quad (7)$$



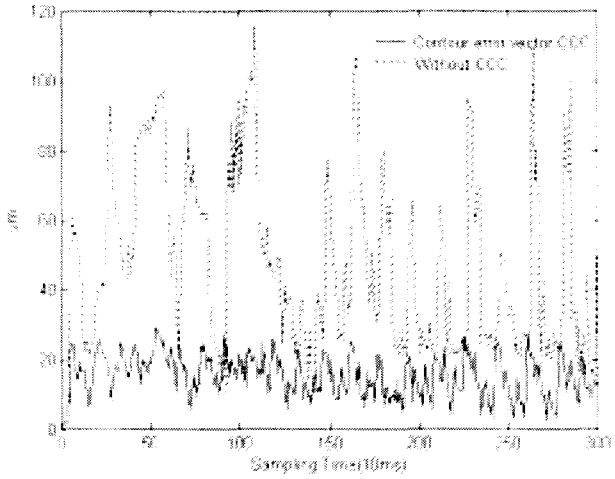


Fig.6 The desired contour for 3-axis motion control sys.

Fig.7 Comparison of contour error for 3-axis motion control system

Fig.7 과 Table.3 에서 보는 바와 같이 3 축 시스템에서도 윤곽오차 벡터 모델이 적용될 수 있음을 알 수 있고, 윤곽오차 또한 위치제어기만을 이용한 제어보다는 크게 정밀도가 향상되었다.

Table. 2 Experimental result (unit : μm)

	Max	Mean	RMS
Contour error vector model	115.4	15.4	6.1
Without CC	28.8	46.64	25.4

4. 결론

본 연구는 다축 CNC 시스템에서의 비선형 형상 가공을 위해 정확한 윤곽오차를 계산해 낼 수 있는 새로운 윤곽오차 벡터 모델 제안하였다. 기존의 윤곽오차 모델은 2 축 시스템에서만 적용될 수 있는 단점을 가지고 있고, 추종오차를 이용하여 간접적인 방법으로 윤곽오차를 계산해 내므로 비선형 곡선에서 그 정확도가 떨어졌다. 그러나, 새로운 윤곽오차 벡터 모델은 곡률의 영향을 많이 받지 않으며, 3 축 시스템에서도 쉽게 적용됨을 실험을 통해 보였다. 최근 매개변수를 이용한 복잡한 곡선의 가공이 요구되는 만큼 본 논문에서 제안한 윤곽오차 벡터 모델을 이용함으로써 향상된 성능의 윤곽추적이 가능하다.

참고문헌

1. A poo. J. G. Bollinger, and W. Younkin, "Dynamic error in type contouring system," IEEE Trans. Ind. Applicat. Vol. IA-8, pp. 477-484, 1972.
2. M. Tomizuka, "Zero phase error tracking algorithm for digital control," ASME Trans. J. Dyn. Syst., Meas. Contr. Vol. 109, pp 65-68, 1987.
3. J. Z. Xia and C. H. Menq, "Precision tracking control of nonminimum phase systems with zero phase error," Int. J. Contr. vol. 61, pp. 428-439, 1999.
4. S. S. Yeh and P. L Hsu, "An optimal and adaptive design of the feed-forward motion controller," IEEE/ASME Trans. Mechatron., vol. 4, pp. 428-439, 1999
5. Y. Koren, "Cross-coupled biaxial computer for manufacturing systems," ASME Trans. J. Dyn. Syst., Meas. Contr., vol 102, no. 4, pp. 265-272, 1980.
6. Y. Koren and C. C. Lo, "Variable gain cross coupling controller for contouring," CIRP Proc.-Manufacturing Systems, vol. 40, pp. 371-374, 1991.