

5축 CNC 가공을 위한 연동제어기 Cross-Coupling Controller for 5-Axis CNC Machining

*변제형¹, 이학철², #지성철³, 장태성⁴, 성대중⁴

*J. Byun¹, H. Lee², #S. Jee(scjee@dku.edu)³, T. Jang⁴, D. Sung⁴

¹ 단국대학교 대학원 기계공학과, ² 단국대학교 산업기술연구소, ³ 단국대학교 기계공학과, ⁴ 두산인프라코어(주)

Key words : 5-axis machining, CNC, Cross-coupling controller, Contour error, Tool orientation error

1. 서론

현재 5축 공작기계에 대한 CNC는 실제 가공정밀도와 직접적 관련이 있는 윤곽오차 및 공구방향오차를 제어에 반영시키지 못하는 문제를 안고 있다. 윤곽오차를 직접적으로 제어할 수 있는 연동제어기가 Koren¹에 의해 처음으로 도입된 이래 다양한 형태로 여러 논문들^{2,3}을 통해 제안되었는데, 기존의 연구들은 대부분 2축 또는 3축으로 국한되어 공구방향오차를 고려하지 못하였다. 오직 한 논문³만 윤곽오차와 공구방향오차를 반영한 5축 공작기계의 연동제어기를 다루었으나, 이 논문의 오차 모델은 이송속도가 빠르거나 곡률반경이 작을 때 부정확한 모델 결과를 나타내는 문제점이 있다.

본 논문에서는 실시간으로 정확한 윤곽오차 및 공구방향오차를 계산하여 제어에 반영할 수 있는 5축 연동제어기를 제안한다. 이 제어기는 3차원 윤곽오차 모델⁴에 새로운 공구방향오차 모델을 통합하여 보간기 출력과 위치 및 회전 각도 피드백만을 이용하기 때문에 기존의 독립축 제어기에 통합이 가능하다.

2. 5축 연동제어기

5축 가공에서는 3축 가공에서 발생하는 추종오차와 윤곽오차뿐만 아니라 공구방향오차가 발생하게 된다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 윤곽오차 ϵ 는 기준 공구경로로부터 벗어난 거리로 정의된다. 공구방향오차 ϵ_θ 는 실제 공구위치 $P(k)$ 의 공구방향 $O_p(P_a, P_c)$ 와 기준 공구경로 상에서 $P(k)$ 와 가장 가까운 근사점인 $K(k)$ 에서의 기준 공구방향 $O_k(K_a, K_c)$ 사이의 각도차로 정의할 수 있다. 여기서 점 $K(k)$ 는 윤곽오차 모델⁴로부터 계산되어 공구방향오차 모델과 공유되므로 두 오차 모델은 이러한 관점에서 통합이 가능하다. 공구방향오차는 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_\theta = (\epsilon_a, \epsilon_c)^T = (K_a - P_a, K_c - P_c)^T \quad (1)$$

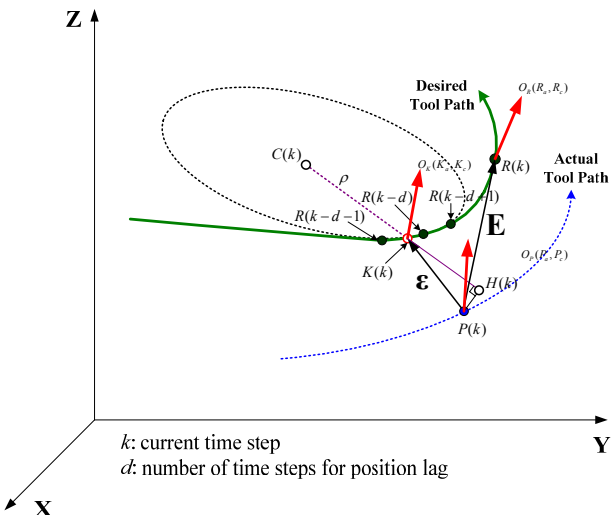


Fig. 1 Contour error and tool orientation error

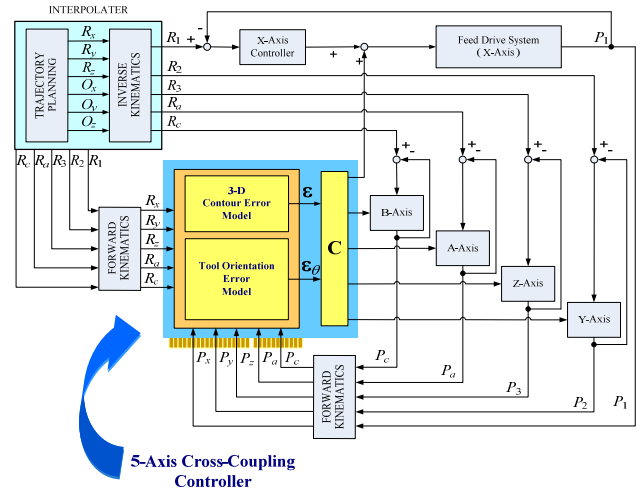


Fig. 2 Schematic of the proposed 5-axis cross-coupling controller

여기서, K_a, K_c 는 점 $K(k)$ 에서의 기준 공구방향 성분을 나타낸다. 점 $K(k)$ 와 주변 보간점들이 이루는 거리관계와 점 $K(k)$ 의 공구방향과 주변 보간점들의 공구방향이 이루는 협각이 서로 비례하도록 K_a, K_c 를 결정할 수 있다. 이는 실제 공구위치 $P(k)$ 와 가장 가까운 보간점 $R(k-d)$ 에서의 공구방향 벡터에 로드리게스 회전 공식(Rodrigues' rotation formula)을 적용하여 얻을 수 있다.

Fig. 2는 앞서 설명한 윤곽오차 모델과 공구방향오차 모델을 기반으로 하는 연동제어기를 기존의 5축 제어기에 통합시킨 새로운 제어시스템의 구조를 나타낸다. 윤곽오차 모델은 보간기로부터 얻은 기계좌표계의 기준 공구위치점 R_1, R_2, R_3 와 위치 피드백 P_1, P_2, P_3 를 정기구학 행렬을 통해 공구좌표계 상의 R_x, R_y, R_z 와 P_x, P_y, P_z 로 각각 변환하여 윤곽오차를 계산한다. 공구방향오차 모델은 기준 회전 각도 R_a, R_c 와 각도 피드백 P_a, P_c 를 이용하여 공구방향오차를 계산한다. 연동제어기에는 PID 제어 법칙을 적용하여 $C^i(z)\mathbf{I}$ ($i=1,2,3,a,c$) 형태의 제어기를 사용한다. 여기서 \mathbf{I} 는 5×5 단위행렬이며 $C^i(z)$ 는 식 (2)와 같다. 독립축 제어기로는 게인이 K_p 인 비례제어를 사용한다.

$$C^i(z) = C_p^i + C_i^i \frac{Tz}{z-1} + C_D^i \frac{z-1}{Tz} \quad (2)$$

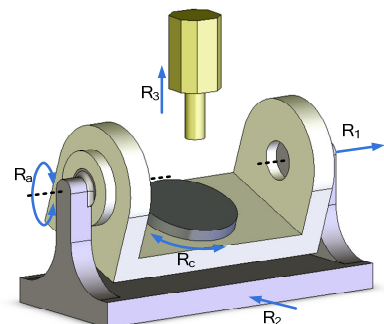


Fig. 3 Mechanical configuration of a 5-axis machine tool

3. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 새롭게 제안한 공구방향오차 모델의 타당성과 5 축 연동제어기의 성능 평가를 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3 과 같이 틸팅 회전테이블(Tilting-rotary table)을 포함하는 기계구조에 대하여 기계좌표계와 공구좌표계 사이의 변환행렬을 구성하였고, 연동제어기 출력값에 5 축 기계구조가 반영되어 각 서보 드라이브에 전송될 수 있도록 역 자코비안(Jacobian) 행렬을 구성하였다. 기준 공구경로는 식 (3)과 같이 매개변수 방정식으로 정의하였고 시뮬레이션에 사용된 조건들은 Table 1 과 같으며, 이송속도는 2 m/min, 가속시간은 0.15 sec, 제어주기는 0.001 sec 로 하였다.

$$\begin{cases} R_x(u) = 15u \\ R_y(u) = 80u^3 - 80u \\ R_z(u) = -6.4u^6 + 12.8u^4 - 21.4u^2 + 15 \end{cases} \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (3)$$

Fig. 4 는 새롭게 제안하는 공구방향오차 모델이 기존의 5 축 공구방향오차 모델³ 보다 정확함을 나타내는데, 이는 수치해석 방법의 결과와 각 오차 모델값의 차이를 비교한 것이다. Fig. 5 와 6 은 서로 다른 제어기의 윤곽오차와 공구방향오차를 비교하였다. 공정한 성능 비교를 위해 독립축 비례제어기 계인과 연동제어기 계인 각각에 대해 동일한 값을 사용하였다. 그 결과, 새롭게 제안한 5 축 연동제어기가 독립축 제어기뿐만 아니라 기존의 5 축 연동제어기보다 월등한 제어성능을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 5 축 CNC 가공에서 윤곽오차 및 공구방향오차를 직접적으로 제어하는 5 축 연동제어기를 제시하였다. 새롭게 제안한 공구방향오차 모델은 실시간으로 실제 공구위치와 가장 가까운 점을 구하는 알고리즘을 윤곽오차 모델과 공유한다. 따라서 두 모델이 쉽게 통합될 수 있을 뿐만 아니라 보간기 출력과 서보 시스템의 위치 피드백과 회전 각도 피드백만을 모델의 입력으로 하기 때문에 부가적인 장치 없이 기존의 CNC 제어루프에 통합이 가능하다는 장점을 갖는다. 또한, 새롭게 제안한 5 축 연동제어기는 기존의 오차 모델보다 정확하게 실제 오차를 반영하므로 제어성능에 있어서도 월등한 윤곽정확도와 공구방향정확도를 나타내었다.

후기

이 논문은 지식경제부 지원의 부품소재기술개발사업에 의하여 연구되었음.

Table 1 System parameters

Parameters	X-axis	Y-axis	Z-axis	A-axis	C-axis
Open-loop gain [sec ⁻¹]	25.40	25.17	25.37	0.0051	0.0101
Time constant [msec]	5.76	5.77	5.50	5.85	5.75
Axial controller gain	3.2			16070	8101
Cross-coupling controller gains	C _P	22.5		112491	56709
	C _I	17.6		78744	39696
	C _D	0.0008		4.0175	2.0253

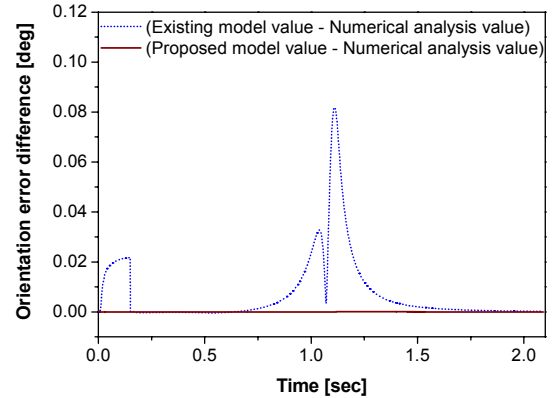


Fig. 4 Comparison of the tool orientation error models

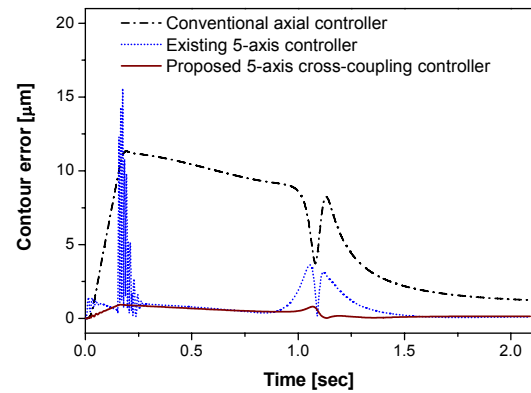


Fig. 5 Comparison of the contouring accuracy

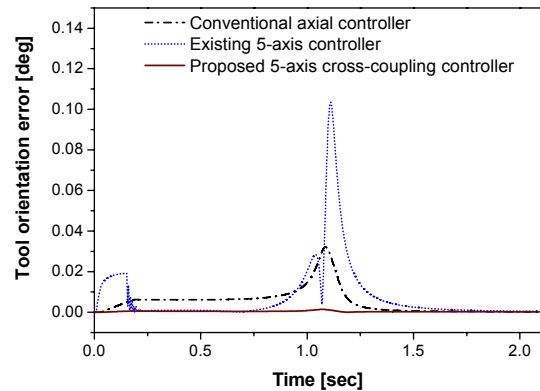


Fig. 6 Comparison of the tool orientation accuracy

참고문헌

1. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 102, No. 4, pp. 265-272, 1980.
2. Erkokmaz, K. and Altintas, Y., "High Speed Contouring Algorithm for CNC Machine Tools," Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 64, pp. 463-469, 1998.
3. Lo, C. C., "A Tool-Path Control Scheme for Five-Axis Machine Tools," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, No. 1, pp. 79-88, 2002.
4. Jee, S. and Koo, T., "3-Axis Coupling Controller for High-Precision/High-Speed Contour Machining," Transactions of the KSME, A, Vol. 28, No. 1, pp. 40-47, 2004.