

모서리 공구경로에서의 윤곽정확도 향상에 관한 연구 A Study on the Improvement of Contouring Accuracy on Corner Tool-paths

*임종협¹, #지성철², 장태성³

*J. Lim¹, #S. Jee(scjee@dku.edu)², T. Jang³

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

Key words : CNC machine tools, Corner tool-path, Contouring accuracy, Corner error

1. 서론

CNC 공작기계를 이용한 고속 고정밀 윤곽가공에 있어 무엇보다도 윤곽정확도가 중요한데 특히 공구경로가 모서리 형상을 갖는 경우 모서리에서의 오차가 크게 발생하여 윤곽정확도가 저하될 수 있다. 모서리에서의 오차를 감소시키기 위해 이송속도를 조절하거나¹ 공구경로를 새롭게 생성하는 방법²이 제안되고 있으나 모서리에서의 오차를 정의하여 직접적으로 제어하는 방법은 다루고 있지 않다. 대부분의 경우 모서리 오차를 모서리 침점과 가장 가까운 피드백 위치와의 차이로 정의하지만 이 방법으로는 모서리에서의 최대 오차값만을 알 수 있다. 다른 방식으로 모서리에서의 오차를 표현하는 방법이 제시된 바 있으나³ 2 차원에 국한하여 정의가 가능하고 측정된 윤곽오차를 확대하여 표현하기 위한 방법으로만 이용되었다.

본 논문에서는 보간기의 출력과 위치 피드백만을 이용하는 실시간 모서리 오차모델을 제시한다. 또한, 제시된 모서리 오차모델의 출력을 각 구동축 제어에 반영하여 모서리에서의 윤곽정확도를 평가한다.

2. 모서리에서의 오차모델

모서리에서의 오차를 정의하기 위한 선행작업으로 현재 공구경로가 모서리인지를 판별하여야 한다. 이를 위해 보간기의 출력 $\mathbf{R}(t)$ 을 아래 식에 대입하여 공구경로의 곡률을 실시간으로 계산한다.

$$\kappa(t) = \frac{|\mathbf{R}'(t) \times \mathbf{R}''(t)|}{|\mathbf{R}'(t)|^3} \quad (1)$$

공구경로에서 곡률이 증가한 후 감소하는 경우를 모서리로 판별하며 이 조건에 따라 각진 모서리와 같이 불연속적으로 방향이 변하는 경로나 타원의 끝부분과 같이 연속적이지만 급격하게 방향이 변하는 경우를 모서리로 판별한다. 즉, Fig. 1 에서와 같이 보간점 $\mathbf{R}(i)$ 에서의 곡률 $\kappa(i)$ 을 계산하였을 때 $\kappa(i-1) < \kappa(i)$ 이고 $\kappa(i) \geq \kappa(i+1)$ 인 경우를 모서리로 판별하고 곡률이 가장 크게 발생하는 $\mathbf{R}(i-1)$, $\mathbf{R}(i)$, $\mathbf{R}(i+1)$ 를 지나는 곡선의 방정식 $\mathbf{r}(t)$ 를 스플라인 보간법을 이용하여 식 (2)와 같이 매개변수 방정식으로 정의한다.

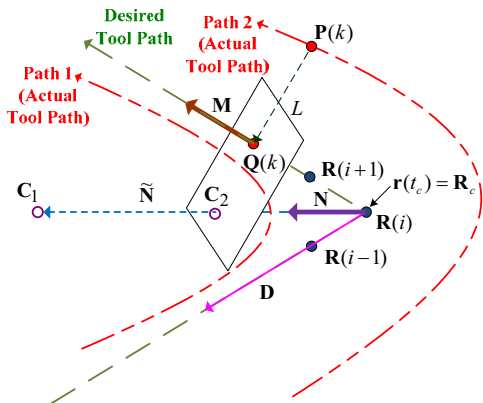


Fig. 1 Corner tool-paths

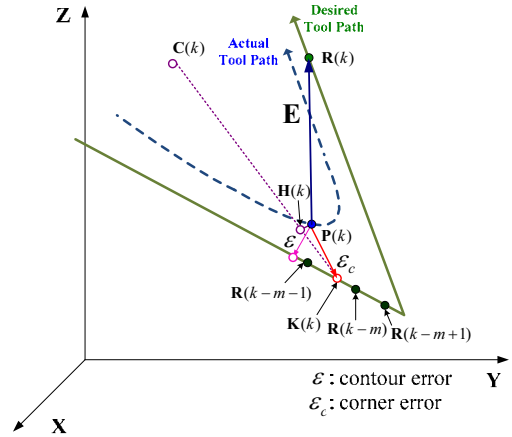


Fig. 2 Proposed corner error model

$$\mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} r_x(t) \\ r_y(t) \\ r_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x + B_x t + C_x t^2 + D_x t^3 \\ A_y + B_y t + C_y t^2 + D_y t^3 \\ A_z + B_z t + C_z t^2 + D_z t^3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

곡선 $\mathbf{r}(t)$ 에서 가장 큰 곡률을 갖는 t 를 t_c 로 정의하고 $\mathbf{r}(t)$ 를 모서리의 침점 \mathbf{R}_c 로 정의한 후 \mathbf{R}_c 에서의 주법선벡터를 벡터 \mathbf{N} 으로 정의한다. 그리고 $\mathbf{R}(i)$ 에서 $\mathbf{R}(i-1)$ 방향으로 향하고 추종오차의 크기를 갖는 벡터 \mathbf{D} 를 정의한다. 피드백 위치 경로가 Fig. 1의 Path 1과 같이 기준 공구경로의 오목한 쪽에 있는 경우를 안쪽, Path 2와 같이 볼록한 쪽에 있는 경우를 바깥쪽으로 구분하여 피드백의 위치에 따라서 다른 방법으로 모서리 오차를 정의할 위한 중심점 \mathbf{C} 를 구한다.

피드백 위치가 기준 공구경로의 안쪽에 있는 경우 중심점 \mathbf{C} 를 식 (3)과 같이 정의하며 일반적으로 모서리 오차가 추종오차 보다 크게 발생하지 않으므로 \mathbf{R}_c 에서 $\tilde{\mathbf{N}}$ 만큼 이동한 중심점 \mathbf{C} 는 피드백 경로 안쪽에 위치하게 된다.

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_1 = \mathbf{R}_c + \tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{R}_c + 2\mathbf{N}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{D}) \quad (3)$$

피드백 위치가 기준 공구경로의 바깥쪽에 있는 경우 피드백의 위치에 따라 중심점 \mathbf{C} 의 위치가 이동한다. 피드백 위치에서 가장 가까운 기준 위치 $\mathbf{Q}(k)$ 와 이 점에서의 공구 경로 진행방향을 법선벡터 \mathbf{M} 으로 갖는 평면 L 을 정의하고 평면 L 과 점 \mathbf{R}_c 에서 벡터 \mathbf{N} 방향으로 정의되는 직선이 만나는 점을 중심점 \mathbf{C} 로 정의한다.

$$L: ax + by + cz + d = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_2 = \mathbf{R}_c + \mathbf{N}t \quad (5)$$

$$t = -\frac{aR_{cx} + bR_{cy} + cR_{cz} + d}{aN_x + bN_y + cN_z} \quad (6)$$

현재의 공구위치 $\mathbf{P}(k)$ 에서 모서리 오차 ϵ_c 는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 중심점 \mathbf{C} 와 각각의 보간점에 직선을 연결하였을 때 $\mathbf{P}(k)$ 와의 거리가 가장 가까운 직선에 해당하는 보간점을 $\mathbf{R}(k-m)$ 으로 정의한다. 중심점 \mathbf{C} 와 $\mathbf{R}(k-m)$, $\mathbf{R}(k-m-1)$ 로 정의된 평면과 \mathbf{C} , $\mathbf{R}(k-m)$, $\mathbf{R}(k-m+1)$ 로

정의된 평면에 $\mathbf{P}(k)$ 로부터 수직인 교점을 정의한다. $\mathbf{P}(k)$ 와 의 거리가 짧은 교점을 $\mathbf{H}(k)$ 로 정의하고 중심점 \mathbf{C} 에서 $\mathbf{H}(k)$ 의 방향으로 향하는 벡터와 기준 공구경로와의 교점 $\mathbf{K}(k)$ 를 구한 후 $\mathbf{K}(k)$ 와 $\mathbf{P}(k)$ 의 차이를 모서리 오차 ϵ_c 로 정의한다.

$$\epsilon_c = \mathbf{K}(k) - \mathbf{P}(k) \tag{7}$$

제시된 모서리 오차를 다음과 같은 PID 형태의 모서리 제어기에 적용하여 각 구동축의 제어명령을 보정한다.

$$S(z) = S_P + S_I \frac{Tz}{z-1} + S_D \frac{z-1}{Tz} \tag{8}$$

3. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제시된 모서리 오차모델의 타당성과 윤곽 제어 성능평가를 위해 식 (9)와 같은 전달함수를 갖는 서보 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 3 차원 공구경로에 대하여 모서리 제어가 가능하지만 오차모델의 평가를 위하여 기준 공구경로를 2 차원 평면에서 45°의 모서리 형상으로 설정하였다. 각 축의 시스템 파라미터를 동일하게 설정하여 Table 1에 정리하였고 이송속도는 2 m/min, 초기 가속시간은 0.5 sec, 제어주기는 0.001 sec로 하였다.

$$T(s) = \frac{K_v s + \frac{K_v}{T_i}}{s^2 + K_v s + \frac{K_v}{T_i}} \tag{9}$$

2 차원 평면에서 공구경로와 피드백 위치경로를 이용하여 모서리 오차를 정확히 계산한 값과 제시된 오차모델 출력의 차이를 비교하였다. Fig. 3의 결과에서와 같이 새롭게 제시된 모서리 오차모델이 모서리 공구경로에서의 오차를 효과적으로 나타냄을 알 수 있다. Fig. 4와 5에서는 독립축 제어기만을 사용한 경우와 모서리 오차모델에서 구한 오차 값을 이용하여 각 구동축을 제어하는 경우의 성능을 비교하였다. 공정한 비교를 위하여 독립축 제어기 계인과 시스템 파라미터는 동일한 값으로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 제시된 모서리 오차모델을 사용하여 제어하는 경우 독립축 제어기만 사용한 경우보다 윤곽정확도가 향상됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 모서리 공구경로에서의 윤곽정확도 향상을 위하여 새로운 모서리 오차모델을 제시하였다. 제시된 모서리 오차모델은 보간기 출력과 피드백 위치만을 입력으로 하여 실시간으로 모서리 오차를 계산하므로 모서리 오차를 제어기에 적용할 수 있으며 모서리 공구경로에서의 오차를 효과적으로 표현함을 확인하였다. 또한, 모서리 오차를 각 구동축 제어에 반영함으로써 모서리 공구경로에서의 윤곽정확도가 향상됨을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

Table 1 System parameters

Parameters		X- and Y-axis	
Velocity-loop gain [Hz]	K_v		40
Velocity-loop integral time constant [msec]	T_i		20
Axial controller gain	K_p		40
Corner controller gains	S_P		200
	S_I		100
	S_D		3

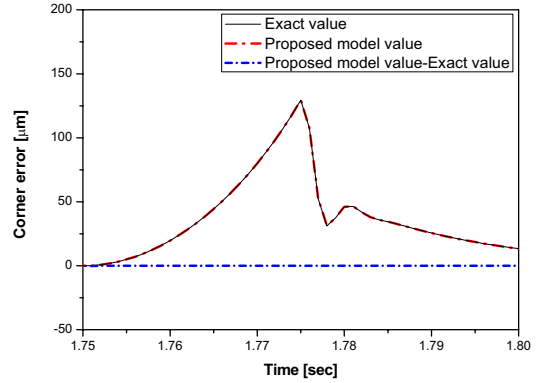


Fig. 3 Comparison of the error models

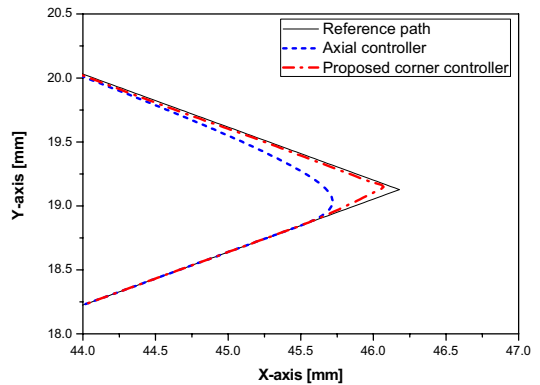


Fig. 4 Comparison of the corner motion

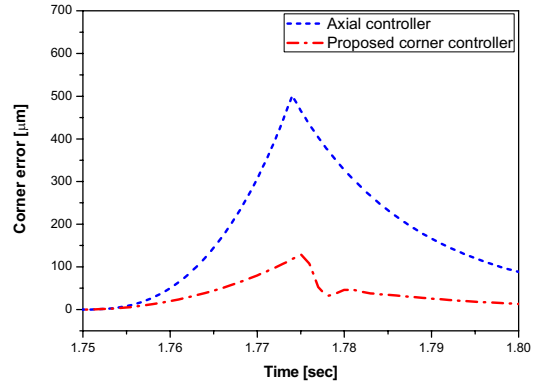


Fig. 5 Comparison of the corner accuracy

후기

이 논문은 지식경제부 지원의 부품소재기술개발사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Kim, H. and Jeon, D., "Study on the Velocity Trajectory for High Speed and High Precision Machining of CNC Machines," Journal of the KSPE, Vol. 16, No. 12, pp. 14-23, 1999.
2. Zhao, Z., Wang, C., Zhou, H. and Qin, Z., "Pocketing toolpath optimization for sharp corners," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 192-193, pp. 175-180, 2007.
3. Soichi, I. and Atsushi, M., "On the magnification of two-dimensional contouring errors by using contour-parallel offsets", Precision Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 322-326, 2009.