

통신지연을 갖는 CNC 서보 시스템에 대한 모서리 윤곽정확도 향상

Improvement of Corner Contouring Accuracy of CNC Servo Systems with Communication Delay

임종협^{1,✉}, 지성철^{1,✉}

Jonghyup Lim¹ and Sungchul Jee^{1,✉}

¹ 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook Univ.)

✉ Corresponding author: scjee@dku.edu, Tel: 031-8005-3504

Manuscript received: 2010.11.4 / Accepted: 2010.11.22

Contouring accuracy of CNC machine tools is very important for high-speed and high-precision machining. In particular, large contour error may occur during corner tracking. In order to reduce the corner contouring error, acceleration and deceleration control or tool-path planning methods have been suggested. However, they do not directly control the corner contouring error. In the meantime, network servo systems are widely used because of their easiness of building and cost effectiveness. Communication latency between the master controller and servo drives, however, may deteriorate contouring accuracy especially during corner tracking. This paper proposes a control strategy that can accurately calculate and directly control the corner contouring error. A prediction control is combined with the above control to cope with communication latency. The proposed control method is evaluated through computer simulation and experiments. The results show its validity and usefulness.

Key Words: Multi-Axis CNC (다축 수치제어), Servo Drive (서보 드라이브), Communication Latency (통신지연), Corner Contouring Error (모서리 윤곽오차)

1. 서론

고정밀 제품 및 생산성 향상의 요구에 부응하기 위하여 CNC 공작기계가 꾸준히 진보되어 왔으며, 최근 IT 부품의 가공수요 증대에 따라 관련 가공장비의 국산화가 활발히 진행되고 있다. 첨단 IT 부품이나 금형과 같은 고부가가치 제품의 고속 고정밀 가공을 위해 공작기계의 윤곽정확도가 중요한 요소로 간주되는데, 이를 향상시키기 위한 다양한 방법이 연구 개발되고 있다. 특히, 다축 연동 제어기는 윤곽오차를 감소시키는 데 효과적인 제어기로 평가되고 있다.¹⁻³

CNC 공작기계의 윤곽오차는 일반적으로 이송 속도가 커질수록 증가하며 특히 모서리 형상의 공구경로에서 커지게 된다. 모서리 윤곽가공시 요구되는 윤곽정확도를 만족시키기 위해서 이송속도의 가감속을 제어하거나 공구경로를 새로이 정의하는 방법이 있다. Kim 과 Jeon 은 시스템을 근사화하여 모서리 응답을 구하고 모서리에서의 윤곽오차를 예측하여 허용 윤곽오차를 만족하기 위한 속도계획을 생성하는 방법을 제시하였다.⁴ Zhao 등은 모서리에서의 가공시간과 가공오차를 줄이기 위하여 최적의 공구경로를 생성하는 방법을 제안하였다.⁵ 이 방법들은 모서리에서의 윤곽정확도를 향상시킬

수 있지만 미세 금형 등의 고정밀 가공에서 더 높은 윤곽정확도를 얻기 위해서는 다축 연동제어기의 경우와 같이 모서리 윤곽에 대한 오차를 정의하여 직접적으로 제어하는 방법이 필요하다. 한편, 최근 들어 시스템 구축의 용이성과 비용 절감 등의 장점으로 인하여 네트워크 방식의 서보 시스템의 사용이 증가하고 있다. 이 경우 명령과 응답 사이에 통신지연이 발생할 수 있는데 이러한 지연으로 인하여 특히 모서리와 같은 윤곽에 대해 윤곽추적성능이 크게 저하될 수 있는 문제점이 있다.

기존의 연구에서는 모서리 오차를 대부분 모서리 첨점과 가장 가까운 공구위치와의 거리로 정의한다. 하지만 이 방법으로는 모서리에서 발생하는 윤곽오차의 최대값만 알 수 있으므로, 윤곽정확도를 평가하는 수단이 될 수는 있지만 이를 제어에 직접적으로 반영할 수 없다. 또한 다축 연동제어기에서 제시된 윤곽오차 모델³은 공구위치에서 가장 가까운 기준경로와의 거리를 윤곽오차로 정의하므로 실제 모서리 오차와는 차이가 있다. Ibaraki 와 Matsubara 는 전체 기준경로를 알고 있는 경우 기준경로를 오프셋하여 모서리에서의 윤곽오차를 표현하는 방법을 제시한 바 있으나, 2 차원에 국한하여 정의가 가능하고 측정된 윤곽오차를 확대하여 표현하기 위한 방법으로만 이용되었다.⁶ 또한 통신지연이 존재하는 서보 시스템에 대한 윤곽정확도 관련 연구는 현재까지 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 보간기의 출력과 위치 피드백을 이용하여 모서리 윤곽에 대한 오차를 실시간으로 계산하는 모서리 오차모델과 이 모델의 출력을 바탕으로 모서리 오차가 감소하도록 각 구동축의 제어명령을 보정하는 모서리 제어기를 제시한다. 또한, 통신지연이 존재하는 경우 윤곽추적성능이 저하되는 문제를 해결하기 위하여 예측제어를 함께 적용하였다. 서보 시스템의 모델링을 통해 구한 전달함수를 이용하여 다음 시간단계에서의 공구위치를 예측하고 이 때의 모서리 제어기 출력을 구한다. 이 과정을 지연된 주기만큼 반복하여 몇 주기 후의 모서리 제어기 출력을 예측하여 구할 수 있고 이를 각 구동축의 제어에 반영하여 보정함으로써 통신지연 효과를 해결할 수 있다. 제시된 방법을 통신지연을 갖는 실제 CNC 서보 시스템에 구현하여 모서리 윤곽에 대한 윤곽정확도를 기존의 시스템과 비교 평가하였다.

2. 모서리 윤곽제어

2.1 모서리 오차모델

본 논문에서는 모서리 공구경로에서의 윤곽정확도 향상을 위하여 보간기 출력과 위치 피드백만을 이용하는 실시간 3 차원 모서리 오차모델을 제시한다. 모서리에서의 오차를 정의하기 위한 선행 작업으로 현재 공구경로가 모서리인지를 판별하여야 한다. 주어진 기준 공구경로의 모서리 여부를 판별하기 위하여 보간기의 출력인 기준 위치벡터 $\mathbf{R}(t)$ 를 식 (1)에 대입하여 공구경로의 곡률을 실시간으로 계산하는데, 이 때 이산미분식을 이용한다.

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

기준 공구경로에서 곡률이 증가한 후 감소하는 경우를 모서리로 판별하며 이 조건에 따라 각진 모서리와 같이 불연속적으로 방향이 변하는 경로나 타원의 축 끝점에서와 같이 연속적이지만 급격하게 방향이 변하는 경우를 모서리로 판별한다. 즉, Fig. 1 에서와 같이 이웃하는 세 보간점 $\mathbf{R}(i-1)$, $\mathbf{R}(i)$, $\mathbf{R}(i+1)$ 에서의 곡률 $\kappa(i-1)$, $\kappa(i)$, $\kappa(i+1)$ 을 각각 계산하였을 때 $\kappa(i-1) < \kappa(i)$ 이고 $\kappa(i) \geq \kappa(i+1)$ 인 경우를 모서리로 판별한다. 다만, 이 경우 완만한 곡률의 모서리를 제외하기 위해 $\kappa(i)$ 의 최소값에 대한 조건을 설정할 수 있다. 그리고 곡률이 가장 크게 되는 $\mathbf{R}(i-1)$, $\mathbf{R}(i)$, $\mathbf{R}(i+1)$ 를 지나는 곡선 $\mathbf{r}(t)$ 를 스플라인(spline) 보간법을 이용하여 식 (2)와 같이 매개변수 방정식으로 정의한다.

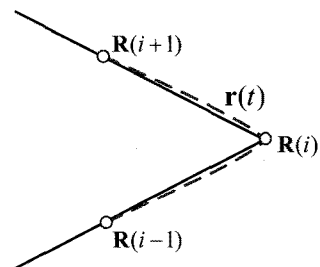


Fig. 1 Reference path and spline interpolation

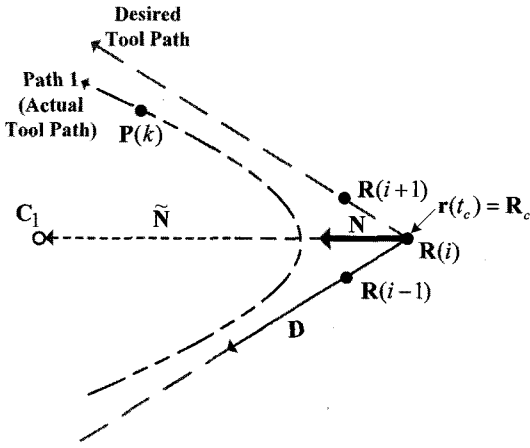


Fig. 2 Definition of the center point (concave case)

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

현재의 기준 공구경로가 모서리로 판별되면 모서리 오차를 정의하기 위하여 경로의 중심점 $C(k)$ 를 구한다. 편의상 공구위치가 Fig. 2의 path 1과 같이 기준 공구경로의 오목한 쪽에 있는 경우를 안쪽, Fig. 3의 path 2와 같이 기준 공구경로의 볼록한 쪽에 있는 경우를 바깥쪽으로 구분하여 현재의 피드백 위치에 따라 모서리 오차를 정의한다. 공구위치가 기준 공구경로의 안쪽에 있는 경우 중심점 C 는 다음과 같이 정의된다. Fig. 2에서와 같이 곡선 $r(t)$ 에서 가장 큰 곡률을 갖는 t 를 t_c 로 정의하고 $r(t_c)$ 를 모서리의 접점 R_c 로 정의한 후 R_c 에서의 주법선벡터를 N 으로 정의한다. 그리고 $R(i)$ 에서 $R(i-1)$ 방향으로 향하고 추종오차의 크기를 갖는 벡터 D 를 정의한다. 공구위치가 기준 공구경로의 안쪽에 있는 경우 중심점 C 를 식 (3)과 같이 정의하며 일반적으로 모서리 오차가 추종오차 보다 크게 발생하지 않으므로 R_c 에서 \tilde{N} 만큼 이동한 중심점 C 는 실제 공구경로의 안쪽에 위치하게 된다.

$$C = C_1 = R_c + \tilde{N} = R_c + 2N(N \cdot D) \quad (3)$$

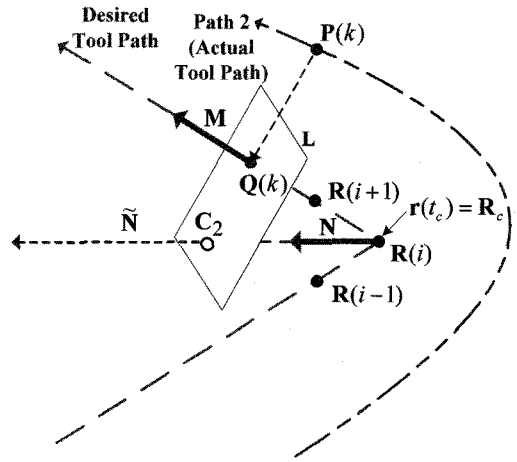


Fig. 3 Definition of the center point (convex case)

공구위치가 기준 공구경로의 바깥쪽에 있는 경우에는 공구위치에 따라 중심점 C 의 위치가 이동한다. Fig. 3에서와 같이 공구위치에서 가장 가까운 기준 위치 $Q(k)$ 와 이 점에서의 기준 공구경로 진행방향을 법선벡터 M 으로 갖는 평면 L 을 식 (4)와 같이 정의하고

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

평면 L 과 점 R_c 에서 벡터 N 방향으로 정의되는 직선이 만나는 점을 중심점 C 로 정의한다.

$$C = C_2 = R_c + Nt \quad (5)$$

여기서,

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

중심점 C 를 구한 후 현재의 공구위치 $P(k)$ 에서 모서리 오차 ϵ_c 는 Fig. 4와 같이 정의하여 나타낼 수 있다. 중심점 C 에서 각각의 보간점에 직선을 연결하였을 때 $P(k)$ 와의 거리가 가장 가까운 직선에 해당하는 보간점을 $R(k-m)$ 으로 정의한다. 여기서, m 은 뒤쳐진 공구위치에 해당하는 시간 스텝(step)의 수를 의미한다. 중심점 C 와

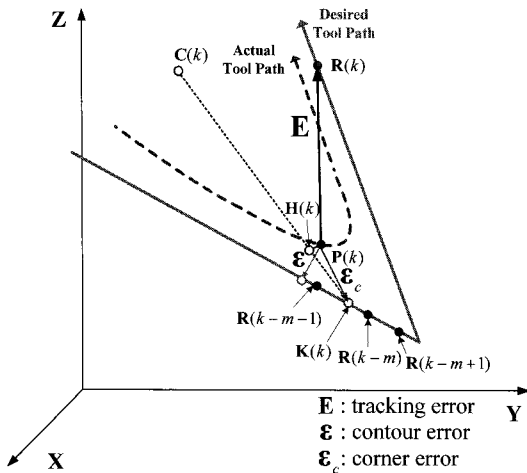


Fig. 4 Proposed corner error model

$R(k-m)$, $R(k-m-1)$ 로 정의된 평면과 C , $R(k-m)$, $R(k-m+1)$ 로 정의된 평면에 $P(k)$ 로부터 수직인 점을 각각 정의한다. 이 중 $P(k)$ 와의 거리가 짧은 점을 $H(k)$ 로 정의하고 중심점 C 에서 $H(k)$ 의 방향으로 향하는 벡터와 기준 공구경로와의 교점 $K(k)$ 를 구한 후 $P(k)$ 에서 $K(k)$ 에 이르는 벡터를 모서리 오차 ϵ_c 로 정의한다.

$$\epsilon_c = \begin{pmatrix} \epsilon_{cx} \\ \epsilon_{cy} \\ \epsilon_{cz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_x - P_x \\ K_y - P_y \\ K_z - P_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

2.2 모서리 제어기

상용 다축 CNC 서보 시스템에서는 각 구동축이 개별적으로 제어되는 독립축 제어구조를 갖는다. 제시된 모서리 오차모델은 보간기의 출력과 피드백 위치만을 입력으로 하여 실시간으로 모서리 오차를 계산하므로 기존의 제어시스템에 통합이 가능하다. 즉, 다축 연동제어 시스템³ 에서와 같이 기존 독립축 제어기에 Fig. 5 와 같은 형태로 모서리 제어기를 통합한다.

보간기로부터 각 축의 기준위치 R_x, R_y, R_z 와 피드백 위치 P_x, P_y, P_z 를 모서리 오차모델에 입력하고 모서리 오차모델의 출력 ϵ_c 로부터 각 축에 대한 모서리 제어명령을 구하여 각 독립축의 제어명령에 결합하여 보상함으로써 모서리 윤곽에서의 윤곽정확도를 향상시킬 수 있다. 모서리 제어기에

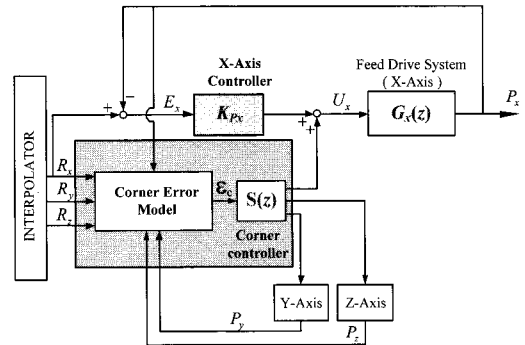


Fig. 5 Structure of the corner control system

식 (8)과 같이 비례미분적분(PID) 제어법칙을 적용하였으며, I 는 3×3 단위행렬을 나타낸다.

$$S(z) = \left[S_p + S_i \frac{Tz}{z-1} + S_d \frac{z-1}{Tz} \right] I \quad (8)$$

3. 통신지연에 대한 예측제어

3.1 통신지연을 갖는 서보 시스템

최근 시스템 구축의 용이성과 비용 절감 등의 장점으로 인하여 네트워크 방식의 서보 시스템의 사용이 증가하고 있다. 기존의 시스템은 상위 제

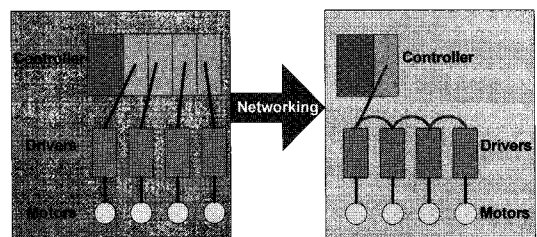


Fig. 6 Advantage of a network servo system

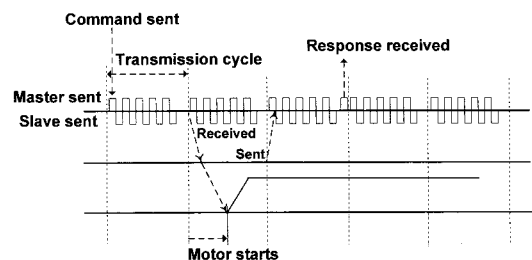


Fig. 7 Communication latency in a servo system

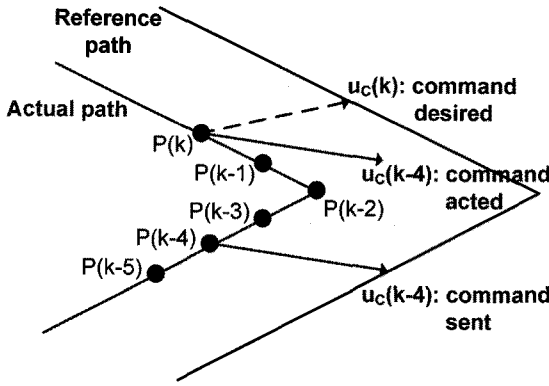


Fig. 8 Problem due to communication latency

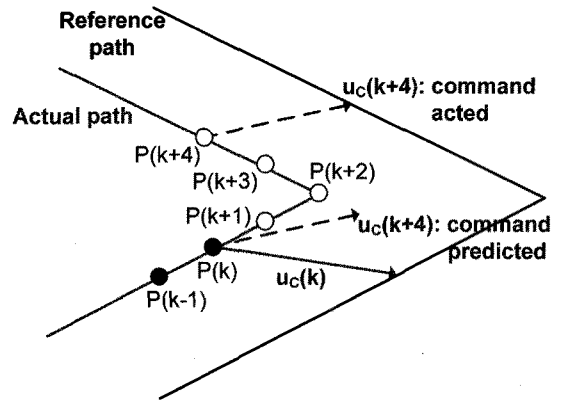


Fig. 9 Prediction of desirable control command

여기와 입출력 기기간에 많은 배선이 필요하지만 Fig. 6 과 같이 네트워크 방식을 채용하면 상위 제어기와 서보 드라이브 사이를 통신케이블로 간단하게 접속할 수 있다. 본 논문은 메카트로링크 (Mechatrolink) 통신방식의 서보 시스템을 대상으로 한다.

필드 네트워크 방식 중의 하나인 메카트로링크 통신을 이용한 서보 시스템에서는 상위 제어장치와 서보 드라이브의 지령과 응답 사이에 Fig. 7 과 같이 통신지연이 발생한다. 이러한 통신지연으로 인하여 상위 제어기에는 1.5 스텝 정도 전의 피드백 위치가 입력이 되고 상위 제어기 출력은 2.5 스텝 정도 후에 서보 드라이브에 전달되게 된다. 따라서, 메카트로링크 통신방식에서 제시된 모서리 제어를 상위 제어장치를 통해 구현하는 경우 총 4 스텝의 통신지연이 발생한다. 그 결과, 현재의 피드백 위치 $P(k)$ 에서 각 구동축을 모서리 제어기의 출력 $u_c(k)$ 로 보상하여 제어함에 있어서 통신지연으로 인하여 Fig. 8 에서와 같이 4 스텝 전의 출력인 $u_c(k-4)$ 로 보상되므로 윤곽추적성능이 저하될 수 있다.

3.2 예측제어

본 논문에서는 위에 언급한 통신지연 문제를 해결하기 위해 Fig. 9 와 같은 방법을 적용한다. 즉, 현재 피드백 위치 $P(k)$ 에서 4 스텝 후의 피드백 위치 $P(k+4)$ 를 예측하여 $P(k+4)$ 에서의 모서리 제어기 출력 $u_c(k+4)$ 를 구한 후 현재 스텝에서 각 구동축의 제어명령을 $u_c(k)$ 가 아닌 $u_c(k+4)$ 로 보상하여 통신지연 효과를 극복하도록 한다.

적용 대상인 서보 시스템에서는 각 구동축에 대해 비례적분(PI) 제어방식의 속도제어 루프를 가지며 제어명령 입력과 위치 출력의 관계는 다음과 같은 형태의 전달함수로 모델링할 수 있다.

$$\frac{P(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^2 + b_2 z + b_3}{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3} \quad (9)$$

여기서, a_1, a_2, a_3 와 b_1, b_2, b_3 는 시스템의 속도제어 게인, 적분 시상수, 샘플 주기와 이송나사 피치에 의해 정해지는 상수이다. 식 (9)로부터 시스템의 모델 출력 $p_m(k+1)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_m(k+1) = b_1 u(k) + b_2 u(k-1) + b_3 u(k-2) - a_1 p(k) - a_2 p(k-1) - a_3 p(k-2) \quad (10)$$

식 (10)에서 $u(k)$ 는 제어기의 출력이며, $p(k)$ 는 실제 시스템의 출력을 나타낸다. 즉, 실제 시스템의 출력과 제어기의 출력을 이용하여 시스템의 모델 출력을 구함으로써 다음 스텝의 위치를 예측할 수 있다. 그리고 그 다음 스텝의 위치를 시스템의 모델 출력 $p_m(k+1)$ 과, 시스템의 모델 출력을 이용하여 구한 제어기의 출력 $u_m(k+1)$ 을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_m(k+2) = b_1 u_m(k+1) + b_2 u(k) + b_3 u(k-1) - a_1 p_m(k+1) - a_2 p(k) - a_3 p(k-1) \quad (11)$$

제어기의 출력 $u(k)$ 는 독립축 제어기(axial controller)의 출력 $u_A(k)$ 와 모서리 제어기의 출력 $u_C(k)$ 의 합이다. 따라서 $u_m(k+1)$ 는 시스템의 모델 출력을 이용하여 구한 독립축 제어기의 출력 $u_{A_m}(k+1)$ 과 역시 시스템의 모델 출력을 이용하여 구한 모서리 제어기의 출력 $u_{C_m}(k+1)$ 의 합으로 다음과 같다.

$$u_m(k+1) = u_{A_m}(k+1) + u_{C_m}(k+1) \quad (12)$$

위와 같이 시스템의 모델 출력을 구하는 과정을 반복하여 4 스텝 후의 공구위치를 예측하고 그 위치에서의 모서리 제어기의 출력 $u_C(k+4)$ 를 구한다. 독립축 제어기는 서보 드라이브 내에서 실행되므로 통신지연에 관한 문제가 없다. 상위 제어장치에서 계산되는 모서리 제어기의 출력에 대해 현재 스텝에서 실제 시스템의 지연된 위치출력을 이용하여 구해지는 $u_C(k)$ 대신, 4 스텝 후의 모서리 제어기 출력의 예측 값인 $u_{C_m}(k+4)$ 를 서보 드라이브로 전송하는 예측제어를 실행한다.

4. 모서리 윤곽제어 방법의 평가

4.1 제시된 실시간 모서리 오차모델의 검증

본 논문에 제시된 실시간 모서리 오차모델의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 10 과 같이 3 차원 평면상에서 내각이 45° 인 모서리를 갖는 기준 공구경로에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이송속도가 1 m/min 인 경우 실제 모서리 오차와 제시된 모서리 오차모델의 출력을 Fig. 11 에 비교 하였으며, 이 결과로부터 제시된 오차모델은 실제 오차값과 거의 일치하는 수준의 정확도를 나타냄을 확인할 수 있다.

4.2 제시된 모서리 제어기의 성능

제시된 모서리 제어기의 모서리 윤곽추적성을 기존 제어시스템과 비교하고 통신지연 존재 유무에 따른 모서리 제어기의 성능을 평가하기 위해 Fig. 10 의 공구경로에 대해 세 가지의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 각 경우의 윤곽정확도를 Fig. 12 에 함께 나타내었다. 실선은 독립축 제어기의 결과이며, 점선과 일점쇄선은 각각 통신지연이 없는 경우와 통신지연이 존재하는 경우에 대한 모서리 제어기의 결과이다. 이 예로부터 모서리 제

어를 통해 윤곽정확도가 기존 독립축 제어방식에 비해 크게 개선될 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 통신지연 효과에 의해 모서리 제어기의 지

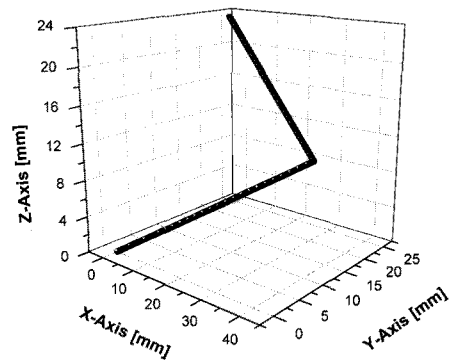


Fig. 10 Reference tool path

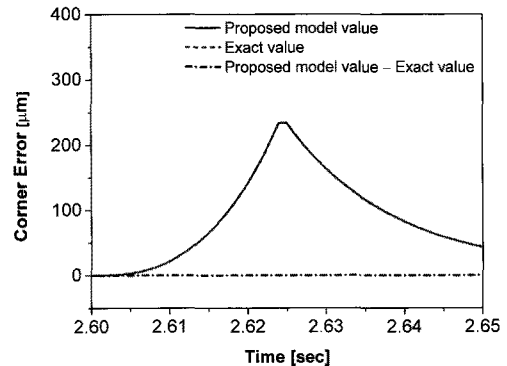


Fig. 11 Evaluation of the proposed corner error model

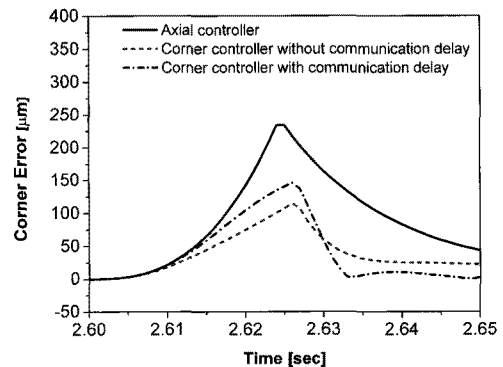


Fig. 12 Simulation result of corner errors

령이 서보 시스템에 느리게 반영되어 특히 모서리 점점 부근에서의 윤곽정확도가 저하될 가능성이 있음을 알 수 있다.

4.3 CNC 시스템에서의 구현 결과

제시된 모서리 제어기와 예측제어 방법을 Fig. 13 과 같이 구축된 PC 기반의 개방형 3축 CNC 테스트 베드에 구현하여 실제적인 성능을 평가하였다. 시뮬레이션에서와 같이 기준 공구경로가 45°의 모서리를 포함하도록 설정하고 제어주기는 1 ms, 이송속도는 1 m/min, 모서리 점점에서의 가감속도는 33.33 mm/s²으로 하였다. 기존의 독립축 제어기만 사용하는 경우와 모서리 제어기를 예측제어와 함께 적용한 경우의 결과를 Fig. 14 에 비교하였다. 모서리 오차의 최대값이 23.09 μm 에서 8.75 μm 로 감소하여 모서리 제어기 및 예측제어를 적용하는 경우 윤곽정확도가 크게 향상됨을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 모서리 형상의 공구경로에 대한 윤곽정확도 향상을 위하여 모서리 오차모델과 이

에 기반한 모서리 제어기를 제시하였다. 제시된 모서리 제어기는 보간기의 출력과 피드백 위치만을 입력으로 하여 실시간으로 모서리 오차를 계산하므로 기존 서보 제어시스템과의 통합이 가능하다. 이와 더불어, 여러 가지 장점으로 인하여 사용이 증가하고 있는 네트워크 방식의 서보 시스템에서 상위 제어기와 서보 드라이브 사이에 통신 지연이 존재하는 경우 모서리에서의 윤곽추적성능이 저하되는 문제를 해결하기 위하여 예측제어를 적용하였다. 서보 시스템의 전달함수를 이용하여 지연된 통신주기만큼 미리 반복하여 모서리 제어기 출력을 구하고 이 예측된 값을 시스템의 제어에 반영하였다.

제시된 오차모델의 출력을, 기준 공구경로와 피드백 위치경로를 이용하여 모서리 오차를 정확히 계산한 결과와 비교하여 제시된 오차모델의 정확성을 입증하였다. 또한, 통신지연을 갖는 실제 서보 시스템에 제시된 방법을 예측제어와 함께 적용하여 제시된 방법이 모서리 윤곽에서 기존 CNC 시스템의 윤곽정확도를 2 배 이상 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 제시된 방법은 미세 금형 등의 고정밀 가공에 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 향후 제시된 모서리 제어기에 피드포워드 제어 및 다축 연동제어 등을 통합하는 방법을 포함하여 모서리 윤곽정확도의 추가적인 개선 방안에 대해 연구할 필요가 있다.

후 기

이 연구는 2009 년도 단국대학교 대학원 연구 보조장학금의 지원으로 이루어진 것임.

참고문헌

1. Koren, Y. and Lo, C. C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 371-374, 1991.
2. Chiu, G. T.-C. and Tomizuka, M., "Coordinated Position Control of Multi-Axis Mechanical Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 120, No. 3, pp. 389-393, 1998.
3. 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.

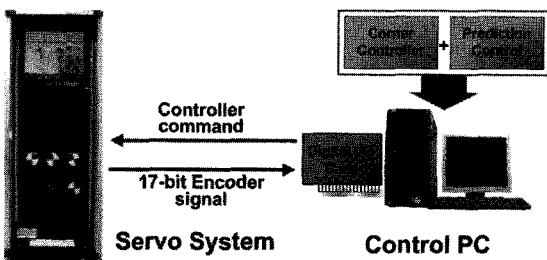


Fig. 13 3-axis CNC testbed

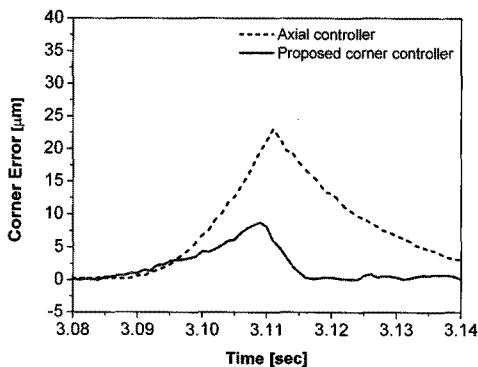


Fig. 14 Experimental result of corner errors

4. Kim, H.-S. and Jeon, D.-Y., "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.
5. Zhao, Z. Y., Wang, C. Y., Zhou, H. M. and Qin, Z., "Pocketing Toolpath Optimization for Sharp Corners," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 192-193, pp. 175-180, 2007.
6. Ibaraki, S. and Matsubara, A., "On the Magnification of Two-Dimensional Contouring Errors by Using Contour-Parallel Offsets," Precision Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 322-326, 2009.