

다축 CNC 시스템의 윤곽정확도 향상을 위한 실시간 관성보상 알고리즘 Real-time Inertia Compensation Algorithm to Improve the Contouring Accuracy of Multi-Axis CNC Systems

*이정승¹, #지성철², 성대중³

*J. Lee¹, #S. Jee(scjee@dku.edu)², D. Sung³

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

Key words : Multi-axis CNC, Inertia compensation, Disturbance, Contouring accuracy

1. 서론

최근 고성능 CNC 개발에 있어서 윤곽정확도의 중요성이 대두되어 왔으며 다양한 방법으로 윤곽오차 모델을 제시하고 이를 제어에 반영하는 기법들이 연구되고 있다.¹ 이러한 윤곽 제어나 기존 독립축 제어 모두 부하조건에서 부하변동이 발생할 경우 그 영향으로 인해 윤곽오차 및 추종오차가 증가할 수 있다.

실제 CNC 시스템의 제어에 있어서 부하변동으로 인한 유효관성모멘트의 변동은 시스템의 올바른 제어를 방해하고 결과적으로 윤곽오차 및 추종오차를 크게 만드는 요인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 유효관성모멘트를 추정하는 연구는 지속적으로 이루어졌으나, 단순히 유효관성모멘트를 추정하고 이를 제어에 반영하는 방법^{2,3}을 제시하고 있으며 유효관성모멘트의 변동이 윤곽오차에 미치는 영향을 고려하여 이를 관성보상에 반영하는 기법은 연구된 사례가 없다.

본 논문에서는 윤곽오차를 고려한 실시간 관성보상 알고리즘을 제시한다. 제시된 알고리즘은 CNC 시스템의 구동에 있어서 발생할 수 있는 부하변동으로 인한 유효관성모멘트의 변동을 윤곽오차를 고려하여 보상함으로써 기존 제어시스템에 있어 부하변동의 영향을 최소화할 수 있다.

2. 서보모터의 모델링 및 전차수 상태관측기 설계

Fig. 1에 표현된 서보모터를 식 (1) 및 식 (2)와 같이 미분방정식 형태로 표현할 수 있다. 또한 외란토크의 변화는 샘플링 주기 안에서 매우 작으므로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_r = J \frac{d\omega}{dt} + T_d \quad (1)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dT_d}{dt} = 0 \quad (3)$$

여기서, ω 와 θ 는 서보모터의 속도와 위치를 나타내며 T_r 와 T_d 는 각각 지령토크와 외란토크를 나타낸다. J 는 서보모터의 관성모멘트를 나타낸다. 식 (1), (2), (3)을 식 (4), (5)와 같이 상태방정식 형태로 표현할 수 있다. 이를 바탕으로 Fig. 2와 같은 전차수 상태관측기를 설계할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_r \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ T_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

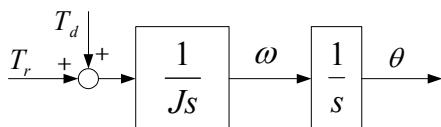


Fig. 1 Modeling of a servo motor

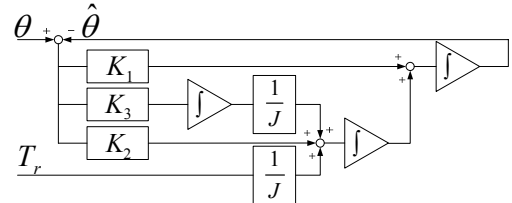


Fig. 2 Full order disturbance observer

설계된 전차수 상태관측기는 서보모터의 입출력 정보를 바탕으로 외란토크를 관측할 수 있다. K_1, K_2, K_3 는 관측기의 이득이며 이는 관측기 극배치를 통해 계산할 수 있다.

3. 유효관성모멘트의 추정

본 논문에서 대상으로 하는 서보모터를 포함하는 속도 제어시스템을 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$s\omega_o(s) = (\omega_i(s) - \omega_o(s)) \left(K_v + \frac{K_v}{T_i s} \right) + T_d(s) \frac{1}{J} \quad (6)$$

여기서, ω_i 와 ω_o 는 시스템의 입력과 출력속도이다. K_v 와 T_i 는 각각 속도루프 이득, 속도루프 적분시상수를 나타내며 \hat{J} 은 서보모터 구동 중에 변동하는 유효관성모멘트이다. 식 (6)으로부터 \hat{J} 를 식 (7)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\hat{J} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T_d(t) dt}{a(t)} \quad (7)$$

결론적으로 설계된 전차수 상태관측기에서 얻은 외란토크와 가속도 값을 이용하여 \hat{J} 를 구할 수 있다. 서보모터를 포함하는 속도 제어시스템은 Fig. 3과 같다.

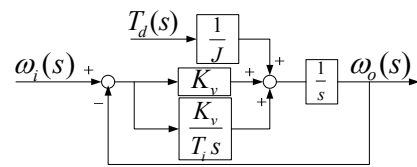


Fig. 3 Velocity control loop

4. 윤곽정확도 향상을 위한 관성보상기

부하로 인해 시스템의 속도가 변화하면 그 변화량을 이용하여 위치 변화량을 계산할 수 있다. 외란토크로 인한 속도 변화량은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\omega_d = \alpha T_d \quad (8)$$

여기서, α 는 전기자 저항, 토크상수, 역기전력상수로 이루어진 서보모터 고유의 상수이다. 식 (8)을 적분하면 식 (9)와 같이 \hat{J} 의 변동에 따른 위치 변화량을 계산할 수 있다.

$$\Delta P_d = \alpha \int_{t_1}^{t_2} T_d dt = \alpha \int_{t_1}^{t_2} \hat{J} a dt \quad (9)$$

본 논문에서 사용된 윤곽오차 모델¹에서 윤곽오차의 크기는 식 (10)과 같다. 여기서, P 는 현재 위치, K_{gi} 는 기준 궤적에서 현재 위치와 가장 가까운 위치를 나타낸다.

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_i (P_i - K_{gi})^2} \quad (i = x, y, z) \quad (10)$$

P_i 를 \hat{J} 의 변동과 무관한 성분 P'_i 과 \hat{J} 의 변동에 따른 위치 변화량 ΔP_{di} 로 나누어 식 (11)과 같이 표현할 수 있고

$$P_i = P'_i + \Delta P_{di} \quad (11)$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하면 식 (12)와 같다. 또한 식 (12)에서 ΔP_{di} 를 제거하면 \hat{J} 의 변동과 무관한 윤곽오차를 식 (13)과 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_i (P'_i + \Delta P_{di} - K_{gi})^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon' = \sqrt{\sum_i (P'_i - K_{gi})^2} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)의 윤곽오차 정보를 바탕으로 목적함수 S 를 식 (14)와 같이 표현하고 최소자승법을 통해 윤곽오차를 최소화하는 계수 A_i 를 구할 수 있다.

$$S = \sum_{j=1}^3 \varepsilon'_j{}^2 - \sum_i [(P_i + A_i \Delta P_{di} - K_{gi})^2] \quad (14)$$

서보모터의 시상수와 속도 제어시스템의 시상수는 각각 식 (15) 및 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{motor} = \alpha J \quad (15)$$

$$\tau_{system} = \frac{1}{\xi \omega_n} = \frac{2}{K_v} \quad (16)$$

서보모터는 속도 제어시스템에 포함되어 있고 식 (15)와 식 (16)은 같은 제어시스템의 출력에 대한 것이므로 이 두 식을 근사적으로 동일시 할 수 있다. 식 (14)를 통해 구한 A_i 와 식 (9)의 ΔP_{di} 를 이용하여 식 (17)과 같이 \hat{J} 와 비례하게 K_v 를 조정할 수 있다.

$$K_v \approx \frac{\alpha A J}{2} \quad (17)$$

결과적으로 조정된 K_v 를 통해 부하변동으로 인한 윤곽오차를 최소화하는 관성보상이 이루어진다. 식 (17)로 계산된 이득은 실시간으로 시스템에 입력되며 이와 같은 관성보상 알고리즘의 구조는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

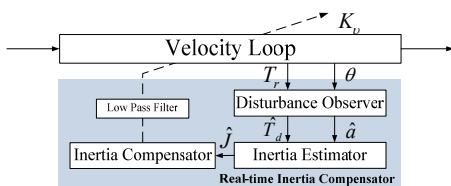


Fig. 4 Schematic of real-time inertia compensation

5. 실험결과

제시된 실시간 관성보상 알고리즘을 검증하기 위해 구동모터와 부하모터를 커플링으로 체결한 Fig. 5와 같은 3축 CNC 테스트 베드에 구현하였다. 구동모터는 반경이 50 mm 이고 X, Y 축으로 각각 45°씩 기울어진 3차원 원의 기준궤적을 1 m/mim 의 이송속도로 추종하는 동시에 부하모터는 구동모터 운동 방향의 법선 방향으로 Fig. 6과 같은 형태로 최대 2.5 Nm 의 토크로 구동되도록 하였다.

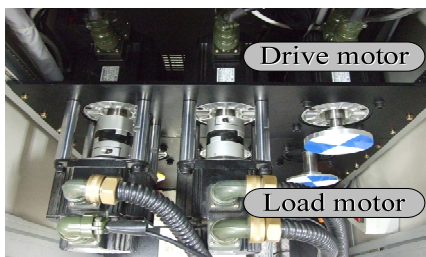


Fig. 5 3-axis CNC test bed

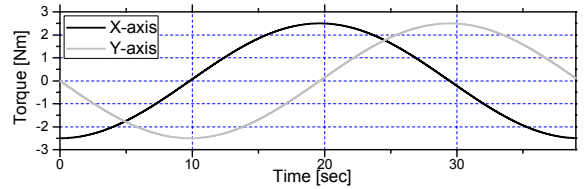


Fig. 6 Observed disturbance torque

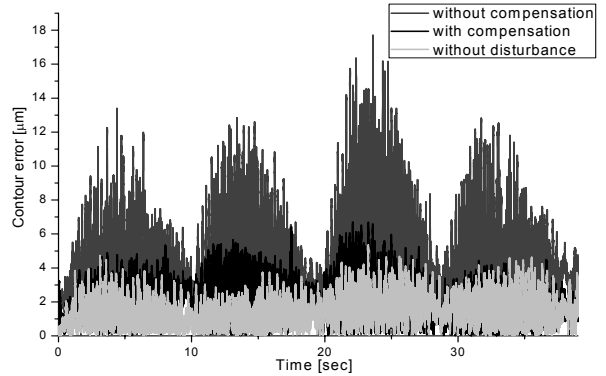


Fig. 7 Comparison of contour errors

Table 1 Result of 3D circle test

		Contour error [μm]	RMS	Maximum
With disturbance	Without compensation		4.51	17.70
	With compensation		2.45	6.71
Without disturbance			1.41	5.35

Fig. 7은 부하가 있을 때 관성보상의 유무에 따른 윤곽오차와 부하가 없을 때의 윤곽오차를 비교한 그래프이다. 실험결과는 Table 1에서 비교하였다. 부하조건에서 관성보상이 없을 경우 윤곽정확도가 크게 저하되는 반면 부하조건에서 관성보상을 수행할 경우 관성보상이 없을 경우와 비교하여 윤곽오차의 제곱 평균값과 최대값 모두 크게 감소하는 경향을 보여 관성보상이 효과적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 윤곽오차를 고려한 실시간 관성보상 알고리즘을 제시하였다. 또한 3축 CNC 테스트 베드에서의 구현을 통한 실험 결과, 제시된 알고리즘이 부하조건에서 유효관성모멘트가 변동할 때 이로 인한 영향을 최소화시켜 관성보상이 효과적으로 이루어졌음을 확인하였다. 제시된 알고리즘은 직교 기계는 물론 구조와 공구 자세에 따라 각 구동축들의 관성모멘트가 크게 변화하는 병렬 및 하이브리드 기계에도 활용 가능할 것으로 판단된다.

후기

이 논문은 지식경제부 지원의 부품소재기술개발사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Jee, S. and Lee, H., "Integrated Controller Design for Multi-Axis CNC Systems," Journal of the KSPE, Vol. 23, No. 5, pp. 92-102, 2006.
2. Awaya, I., Kato, Y., and Miyake, I., "New Motion Control with Inertia Identification Function using Disturbance Observer," IECON '92, Vol. 1, pp. 77-81, 1992.
3. Choi, J. and Lee, S., "Inertia Identification Algorithm for High Performance Speed Control of Electric Motor," Journal of Power Electronics, Vol. 10, No. 5, pp. 436-442, 2005.