

5 축 병렬기구 공작기계에 대한 관성오차 보정 알고리즘 Inertia Compensation Algorithm for a 5-Axis Parallel Machine Tool

*이정승¹, #지성철²

*J. Lee¹, #S. Jee(scjee@dku.edu)²

¹ 단국대학교 대학원 기계공학과, ² 단국대학교 기계공학과

Key words : Parallel machine tool, Dynamic modeling, Load variation, Inertia compensation

1. 서론

병렬기구 공작기계 시스템의 제어에서 각 구동축의 부하변동에 따른 유효관성모멘트의 변화는 제어능성에 큰 영향을 줄 수 있다. 특히 병렬기구는 직렬기구에 비해 상대적으로 복잡한 구조를 가지고 있으며 그 자세에 따라 구동축의 유효관성모멘트가 계속적으로 변화하여 제어오차를 증대시키는 요인이 된다. 유효관성모멘트를 추정하고 이를 제어에 반영하는 연구^{1,2}는 지속적으로 이루어져 왔으나 자세에 따라 구동축의 유효관성모멘트가 크게 변하는 병렬기구를 대상으로 한 연구사례는 없다.

본 논문에서는 병렬기구 공작기계에 대한 실시간 관성보상 알고리즘을 제시한다. 제시된 알고리즘은 병렬기구 공작기계의 자세에 따른 구동축의 유효관성모멘트 변동을 실시간 계산하여 보상함으로써 기존 제어시스템에 있어 부하변동의 영향을 최소화할 수 있다.

2. 대상 기계의 구조

본 논문에서 대상으로 하는 하이브리드 공작기계는 Fig. 1과 같으며 1, 2, 3번 축과 무빙플랫폼으로 구성된 병렬부, A-C 축 회전방식의 직렬부로 이루어져 있다. 능동 관절로 선택된 q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 중에서 병렬부 q_1, q_2, q_3 는 축의 길이방향으로 직선 구동되고, 직렬부 q_4, q_5 는 회전 구동된다.

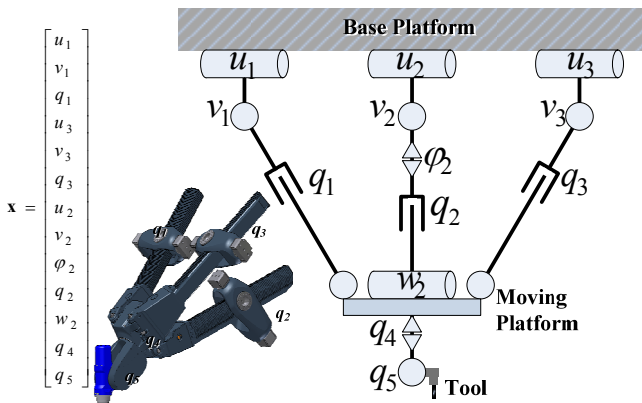


Fig. 1 Schematic of the parallel machine tool

3. 거동 시뮬레이터를 위한 운동방정식 수립

다음 절의 관성보상 알고리즘에 대한 정확한 평가를 위해 병렬기구 공작기계의 질량과 관성모멘트의 효과를 포함하는 거동 시뮬레이터를 구현할 필요가 있다. 일반적으로 뉴턴 운동방정식보다 복잡도가 낮고 에너지를 이용하는 라그랑지(Lagrange) 운동방정식으로 시스템을 모델링하였다.

전체 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$M\ddot{x} + N(x, \dot{x}) = \tau + \left[\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right]^T \lambda \quad (1)$$

여기서, 좌변의 M 은 관성 질량 행렬이며 N 은 관성과 질량을 제외한 링크에 작용하는 모든 힘 및 모멘트를 나타낸다. 우변의 τ 는 외력을 의미하며 두번째 항은 구속력을 나타낸다.

대상 기구는 병렬부를 포함한 하이브리드 구조를 가지므로 운동해석을 위해서는 기구학적인 조건이 필요하다. 병렬부에 8 가지 구속조건³을 정의하고 그 구속조건을 식 (2)와 같이 표현한다.

$$\phi(x) = 0 \quad (2)$$

라그랑지 승수 λ 의 계산을 위해 식 (2)를 각 관절변수에 대해 미분하면 식 (3)과 같이 된다. 미분방정식 형태의 최종 운동방정식 표현을 위해 식 (3)을 시간에 대해 미분하면 식 (4)와 같다. 편의상 식 (4)에서 시간에 대한 미분을 식 (5)와 같이 정의한다.

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \cdot \dot{x} = 0 \quad (3)$$

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \cdot \ddot{x} + \left(\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \right) \cdot \dot{x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \cdot \dot{x} = \Pi(x, \dot{x}) \quad (5)$$

앞서 정의한 식 (2), (3), (4)를 전체 운동방정식에 대입하고 정리하면 최종적인 운동방정식은 식 (6)과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ -\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^T \\ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) & O \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -N(x, \dot{x}) + \tau \\ \Pi(x, \dot{x}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

$$N(x, \dot{x}) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{x}^T \Lambda_1(x) \dot{x} \\ \dot{x}^T \Lambda_2(x) \dot{x} \\ \vdots \\ \dot{x}^T \Lambda_{13}(x) \dot{x} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$(\Lambda_k)_{ij} = \frac{\partial M_{ki}}{\partial x_j} + \frac{\partial M_{kj}}{\partial x_i} - \frac{\partial M_{ij}}{\partial x_k}, \quad (\Pi_k)_{ij} = \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x_i \partial x_j} \quad (8)$$

4. 관성보상 알고리즘

자세에 따라 유효관성모멘트의 변동이 발생하는 하이브리드 공작기계에서 부하변동을 추정하기 위해 전차수 상태 관측기 이론을 적용하였다. 각각의 능동 관절에 대한 구동축의 제어시스템에서 토크 입력과 위치 출력을 바탕으로 부하의란과 구동모터의 가속도 값을 관측하고 시스템의 전달함수를 이용하여 유효관성모멘트 값을 계산할 수 있다.⁴

부하변동을 관측하기 위해 가정한 모터의 시상수는 식

(9)와 같으며, 2 차 시스템으로 가정한 속도제어루프의 시상수는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{motor} = \alpha J \tag{9}$$

$$\tau_{system} = \frac{1}{\xi \omega_n} = \frac{2}{K_v} \tag{10}$$

여기서, α 는 모터의 고유한 상수이며 모터의 토크 상수, 역기전력 상수, 전기자 저항 값으로 결정된다. 전체 시스템에서 볼 때 각각의 시상수는 같은 출력에 대한 것이므로 위의 두 식을 근사적으로 동일시하면 유효관성모멘트 \hat{J} 의 변동을 보상하기 위한 속도제어게인을 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$K_v \approx \frac{\alpha \hat{J}}{2} \tag{11}$$

앞서 수립한 운동방정식을 이용하여 구현된 시뮬레이터를 포함하는 전체 제어시스템의 구조는 Fig. 2 와 같다.

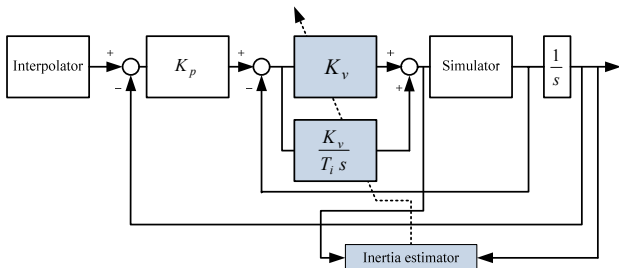


Fig. 2 Structure of the control system

5. 시뮬레이션 결과

제시된 알고리즘을 검증하기 위해 구현된 거동 시뮬레이터에서 공구방향은 음의 Z 축을 향하게 하고 공구 끝점은 Fig. 3 과 같이 반경 50 mm 인 원의 기준궤적을 이송속도 10 m/min, 주기 1 ms 로 고속 보간토록 하였다.

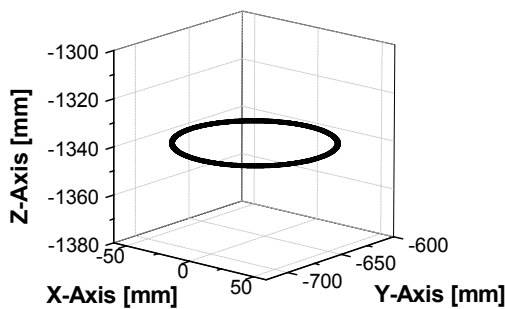


Fig. 3 Reference path

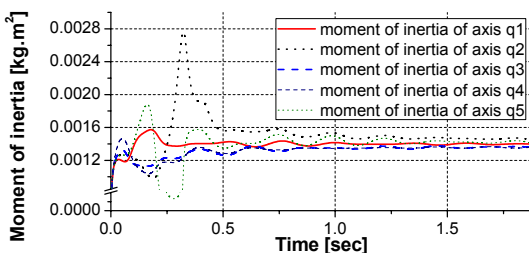


Fig. 4 Estimated moment of inertia

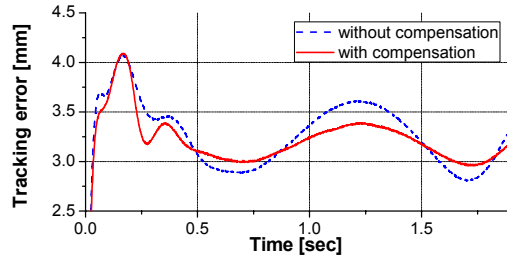


Fig. 5 Tracking error

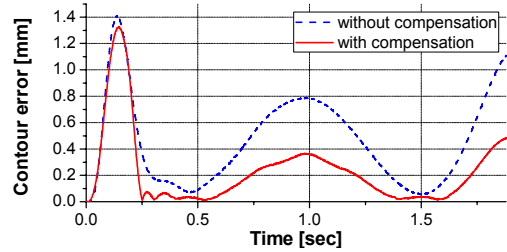


Fig. 6 Contour error

Fig. 4 와 같이 추정된 유효관성모멘트로부터 2 번 축과 5 번 축에서 상대적으로 변동이 크게 나타남을 알 수 있다. 기준궤적을 추종하기 위한 각 축의 기준입력을 살펴보면 병렬부에서 서로 대칭인 1, 3 번 축에 비해 2 번 축의 움직임이 약 2.5 배 정도 크며, 직렬부에서는 4 번 축에 비해 5 번 축의 움직임이 3.8 배 정도 크다. 움직임이 큰 축에서 상대적으로 부하변동이 크게 되고 이로 인해 제어오차가 크게 발생할 수 있다. Fig. 5 에 비교한 추종오차 결과로부터 제시된 알고리즘이 초기 가속구간 이후에 관성변동으로 인한 오차의 변화폭을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 6 의 윤곽오차 결과에서 제시된 알고리즘이 보상이 없을 때와 비교하여 윤곽정확도를 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 병렬기구 동작기계에 대한 실시간 관성 보상 알고리즘을 제시하였다. 라그랑지 운동방정식을 이용하여 구속조건이 포함된 거동 시뮬레이터를 구현하고 시뮬레이션을 수행한 결과, 제시된 알고리즘이 병렬기구의 자세에 따라 변동되는 유효관성모멘트의 영향을 고려하여 보상함으로써 관성변동으로 인한 추종오차의 변화폭을 줄이고 윤곽정확도를 개선할 수 있음을 확인하였다.

후기

이 논문은 지식경제부 지원의 전략기술개발사업에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. 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.
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. 고동주, 나승표, 김태정, "5 축 병렬기구 동작기계의 기구식 수립," 한국정밀공학회, 한국정밀공학회 2009 년도 추계학술대회논문집, pp. 565-566, 2009.
4. 이정승, 지성철, 성대중, "다축 CNC 시스템의 윤곽정확도 향상을 위한 실시간 관성보상 알고리즘," 한국정밀공학회, 한국정밀공학회 2009 년도 추계학술대회논문집, pp. 15-16, 2009.