

3 축 연동제어 시스템에 대한 자율동조 Auto-tuning of a 3-Axis Cross-Coupling Control System

*이학철¹, #지성철², 장태성³, 성대중³

*H. Lee¹, #S. Jee(scjee@dku.edu)², T. Jang³, D. Sung³

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

Key words : Auto-tuning, CNC, Cross-coupling controller, Least square method

1. 서론

CNC 공작기계의 서보제어에 위치추적성능을 극대화하기 위한 독립축 제어기와 윤곽추적성능을 향상시키기 위한 연동제어기(cross-coupling controller)가 제안되고 있다.¹ 이러한 제어기의 설정은 가공조건이나 여러 가지 외부 변화에 따라 조정될 필요가 있다. 이를 위해 자율동조 방법이 제시되고 있으며 이미 상용화된 경우도 있다.² 기존의 자율동조 방법은 독립축 제어기에 대해서만 제시되었으며 윤곽추적성능에 대하여는 고려하고 있지 않다. 본 논문에서는 독립축 제어기와 3 축 연동제어기로 구성된 3 축 연동제어 시스템에 대하여 최소자승법(least square method)³을 적용한 자동모델링과 위치추적성능과 윤곽추적성능을 동시에 고려하는 통합적 해석 기법⁴을 적용한 자율동조 방법을 제시하여 가공 및 작동조건 변화에 따른 제어기 설정의 자동조정으로 CNC 공작기계 시스템의 정밀도 향상을 위한 방안을 모색하고자 한다.

2. 시스템의 자동모델링

Fig. 1 에서의 이송 드라이브 시스템(feed drive system)을 다음과 같은 2 차 펄스 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$H(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (1)$$

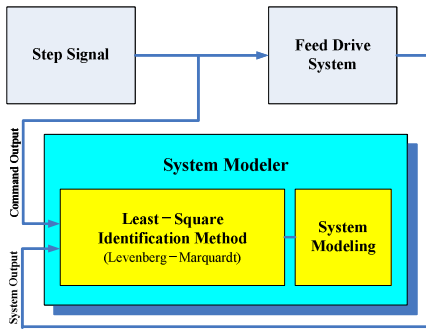


Fig. 1 Schematic of system modeling

위의 식으로부터 시스템의 모델 출력 $y_{\text{model}}(k)$ 을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$y_{\text{model}}(k) = b_1 x(k-1) + b_2 x(k-2) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) \quad (2)$$

여기서, $x(k)$ 는 제어기 출력, $y(k)$ 는 실제 시스템의 출력을 나타낸다. 실제 시스템의 출력과 모델 출력의 차이를 나타내는 식 (3)과 같은 목적함수(object function)를 최소화 하도록 최소자승법을 적용하여 이송 드라이브 시스템의 파라미터 (b_1, b_2, a_1, a_2) 를 구할 수 있다.

$$J_{\text{system}} = \sum_{k=0}^{n-1} \{y(k) - y_{\text{model}}(k)\}^2 \quad (3)$$

식 (3)에서 n 은 시스템 입출력 신호의 샘플링 개수를 나타내며, 목적함수의 비선형 최소화 문제는 최소자승법 중 Levenberg-Marquadt 알고리즘을 이용하여 풀 수 있다.

3. 제시된 자율동조 방법

자동모델링에서 적용한 최소자승법을 3 축 연동제어 시스템에 적용하면 시스템의 입출력 신호를 이용하여 3 축 연동제어 시스템의 제어기 계인을 포함한 전달함수를 구할 수 있다. 본 논문에서는 자동모델링에서 사용한 최소자승법을 이용한 자율동조 방법을 제시한다.

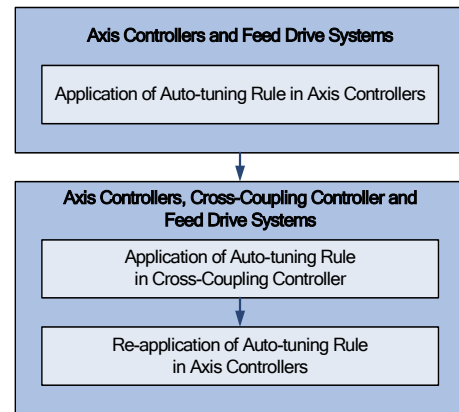


Fig. 2 Flow of the proposed auto-tuning

3 축 연동제어 시스템에 대한 자율동조를 위해 Fig. 3 에서와 같이, 모델링에서 얻어진 이송 드라이브 시스템과 독립축 제어기로 구성된 페루프 I 에서는 위치추종성능을 고려하고, 페루프 I 에 연동제어기를 포함한 페루프 II 에서는 윤곽추종성능을 고려한다. 이렇게 두 개의 페루프에 대하여 자율동조를 Fig. 2 와 같은 절차로 적용하며, 이 때 자율동조를 위해 필요한 시스템 모델의 출력 $P_{\text{model}}(z)$ 은 식 (4)와 같이 페루프 I 과 페루프 II 의 모델 출력의 합으로 나타낼 수 있다.

$$P_{\text{model}} = P_{\text{model I}} + P_{\text{model II}} \quad (4)$$

모델의 출력은 지난 시간 단계에서의 입출력 신호를 이용하여 현재 시간 단계에서의 시스템 출력을 예측한 것으로 전달함수를 이용하여 구할 수 있다. 페루프 I 을 식 (5)와 같이 전달함수를 이용하여 나타내며 식 (6)은 페루프 I 의 모델 출력을 나타낸다. 시스템 모델의 출력 식 (6)과 실제 시스템의 출력의 차이를 식 (7)과 같이 최소자승법의 목적함수로 나타낸다.

$$P(z) = \frac{G_1(z)G_2(z)}{1 + G_1(z)G_2(z)} R(z) \quad (5)$$

$$P_{\text{model I}}(z) = G_1(z)G_2(z)[R(z) - P(z)] = G_1(z)G_2(z)E(z) \quad (6)$$

$$J_T = \sum_{k=0}^{n-1} \{ p(k) - p_{\text{modelI}}(k) \}^2 \quad (7)$$

페루프 II 도 페루프 I 과 같이 전달함수를 이용하여 시스템 모델의 출력 $P_{\text{modelII}}(z)$ 를 식 (8)과 같이 유도할 수 있으며, 이를 이용하여 페루프 II 에 대한 목적함수도 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{\text{modelII}}(z) = G_3(z)G_2(z)\varepsilon(z) \quad (8)$$

$$J_C = \sum_{k=0}^{n-1} \{ p(k) - p_{\text{modelII}}(k) \}^2 \quad (9)$$

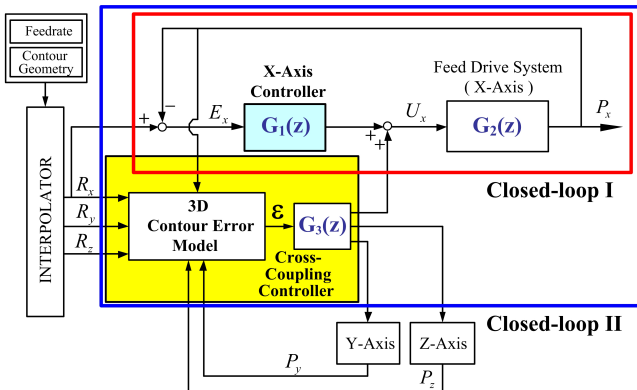


Fig. 3 Three-axis cross coupling control system

식 (7)과 (9)의 목적함수에 대해 최소자승법을 적용하여 목적함수를 최소화하여 제어기 계인을 구할 수 있다. 독립축 제어기의 경우 페루프 I 에 대해서만 고려되었기 때문에 페루프 II 에 대해서 독립축 제어기에 자율동조를 다시 한번 적용한다. 식 (6)과 (8)의 위치추종오차 $E(z)$ 와 윤곽오차 $\varepsilon(z)$ 가 시스템 모델 출력의 구성 성분으로 목적함수에 반영됨으로써 자율동조 방법은 위치추적성능과 윤곽추적성능을 동시에 고려할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

계단입력(step input)에 대해 최소자승법을 이용하여 이송 드라이브 시스템의 자동모델링을 수행하였으며, Table 1의 결과에서 볼 수 있듯이 최소자승법을 이용하여 실제 시스템과 상당히 유사한 모델을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of system parameters

	b_1	b_2	a_1	a_2
Actual system	0.002368	0.002336	-1.96079	0.960789
Model	0.002369	0.002337	-1.96082	0.960871

3 차원 공간상에 원점을 지나는 직선을 설정하고 이 직선 외의 한 점에서 원점으로 이송하는 경우에 대하여 모델링된 시스템에 자율동조 방법을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 위치추종오차는 원점과의 거리를 윤곽오차는 직선과의 거리로써 구한다. 독립축 제어기와 3 축 연동제어기 초기 계인을 임의의 값으로 설정하였으며 독립축 제어기의 경우 4 번의 자율동조 과정을 거친 후에 연동제어기의 경우에는 11 번의 과정을 거친 후에 제어기 설정을 마쳤다. Fig. 4는 3 축 연동제어 시스템에 자율동조 방법을 적용하는 과정에서 위치추종오차와 윤곽오차의 변화를 초기상태와 중간상태 그리고 최종 결과를 비

교한 것이다. 시뮬레이션 결과, 제시된 방법이 3 축 연동제어 시스템을 자율동조 시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

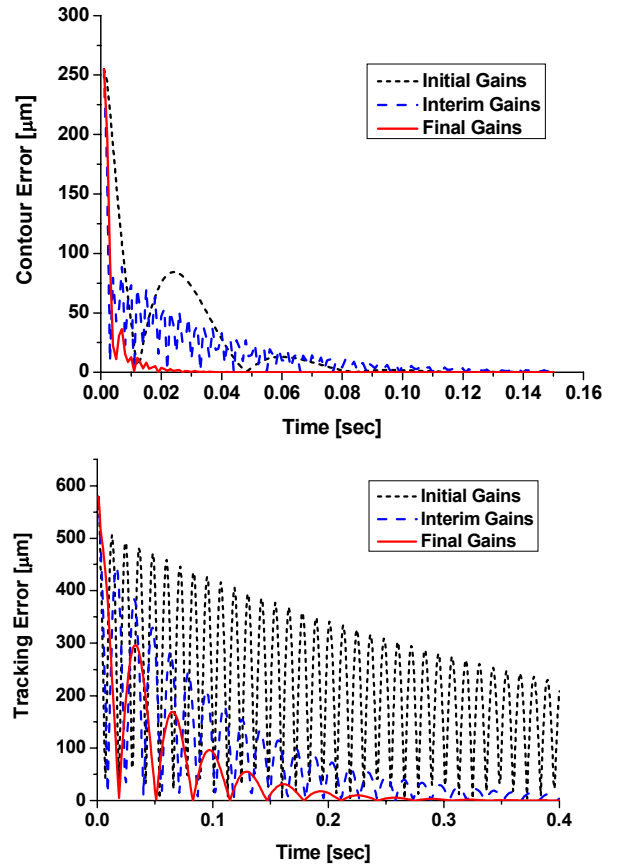


Fig. 4 Auto-tuning results for contour and tracking errors

5. 결론

본 논문에서는 최소자승법을 이용한 시스템 모델링과 이를 바탕으로 3 축 연동제어 시스템에 대해 윤곽오차와 위치추종오차를 고려한 통합적 해석 기법에 기초한 자율동조 방법을 제시하였다. 본 연구의 결과는 다축 CNC 공작기계의 여러 가지 작동조건에 대한 제어시스템의 최적화라는 관점에서 사용자의 편의성과 공작기계 시스템의 정밀도 향상에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 앞으로 제시된 자율동조 방법을 실제 시스템에 구현하여 실효성을 평가할 계획이다.

후기

이 논문은 산업자원부 지원의 부품소재기술개발사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Koren, Y. and Lo, C. C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," Annals of the CIRP, **40**, 371-374, 1991.
2. Compumotor Division of Parker Hannifin Corporation, Servo Tuner User Guide: Servo Tuning Software for 6000 Series Controllers, 8-38, 1994.
3. Ljung, L., System Identification Toolbox for Use with MATLAB, The Mathworks, Inc., 1993.
4. Jee, S. and Lee, H., "An Integrated Approach to the Analysis and Design for a Three-Axis Cross-Coupling Control System," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, **8**, 59-63, 2007.