

# 다축 연동제어 시스템에 대한 통합형 자율동조

## Integrated Auto-Tuning of a Multi-Axis Cross-Coupling Control System

이학철<sup>1</sup>, 지성철<sup>1,✉</sup>

Hakchul Lee<sup>1</sup> and Sungchul Jee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook Univ.)

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

Manuscript received: 2009.9.7 / Accepted: 2009.10.5

*Machining systems have been evolved to produce more detailed products of high added value. This has been possible, in large part, due to the development of highly accurate multi-axis CNC machine tools. The conventional CNC of machine tools has individual axis controllers to maximize tracking performance. On the other hand, cross-coupling controllers can be integrated into the conventional CNC to enhance contouring performance. For this multi-axis cross-coupling control system, it is necessary to automatically adjust the controller gains depending on operating conditions and/or other external conditions from an optimization perspective. This paper proposes automatic modeling of feed drive systems that minimizes the difference in behavior between the system model and the actual system. Based on the modeling, an integrated auto-tuning method is also proposed to improve both tracking and contouring accuracy of a 3-axis cross-coupling control system as well as users' convenience. The proposed methods are evaluated by both simulation and experiments.*

Key Words: Auto-tuning (자율동조), Automatic Modeling (자동모델링), CNC (컴퓨터 수치제어), Cross-coupling Controller (연동제어기), Least Square Method (최소자승법)

### 1. 서론

현대의 산업현장에서 추구하는 생산방향이 고정밀화로 변화함에 따라서 제조시스템의 하나인 CNC 공작기계의 제어기에 대해서도 이를 반영하여 지속적인 개발이 이루어져 왔다. CNC 공작기계의 기존 제어기들은 위치추적성능을 극대화하기 위한 독립축 제어기<sup>1-4</sup>가 대부분이었다. 그러나 위치추적성능은 윤곽추적성능을 보장해주지 않는다. 한편, 위치추적성능보다 가공정밀도에 더 많은 영향을 주는 윤곽추적성능을 향상시키기 위해 윤곽오차를 직접 제어하는 다축 연동제어기(cross-coupling controller)<sup>5-11</sup>가 제안되고 있으며 다축 CNC 시스템의 제어성능의 개선을 위하여 위치추적성능과 윤곽추적성능을 동시에 고려하는 통합적

해석기법<sup>12</sup>도 제시된 바 있다. 이러한 독립축 제어기와 연동제어기의 설정은 가공조건이나 기타 외부 조건 변화에 따라 조정될 필요가 있다. 이를 위해 독립축 제어기에 대해서 자율동조 방법<sup>13-16</sup>이 제시되고 이미 상용화 된 경우도 있으나 윤곽추적성능에 대하여는 고려되고 있지 않다. 본 논문에서는 독립축 제어기와 연동제어기로 구성된 다축 연동제어 시스템에 대하여 최소자승법(least square method)<sup>17</sup>을 적용한 자동모델링을 선행과정으로 하며, 자동모델링에서와 같이 최소자승법을 사용하고 위치추적성능과 윤곽추적성능을 모두 고려하는 자율동조 방법을 제시하여 가공 및 작동조건 변화에 따른 제어기 설정의 자동조정으로 CNC 공작기계 시스템의 사용자 편의성과 제어성능의 개선을 위한 방안을 제공하고자 한다.

## 2. 시스템의 자동모델링

시스템의 자동모델링<sup>17</sup>은 자율동조 방법의 선행과정이다. 자동모델링을 이용하여 시스템의 모델을 정확하게 결정함으로써 자율동조의 신뢰도를 높일 수 있다.

본 논문에서는 실제 이송 드라이브 시스템(feed drive system)의 거동과 시스템 모델의 거동 차이를 최소화하기 위해서 최소자승법을 이용한 자동모델링을 제시한다. Fig. 1의 이송 드라이브 시스템은 식 (1)과 같은 전달함수로 나타내어질 수 있다.

$$G(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}} \quad (1)$$

식 (1)로부터 시스템의 모델 출력  $y_{model}(k)$ 을 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$y_{model}(k) = b_1 x(k-1) + b_2 x(k-2) + b_3 x(k-3) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - a_3 y(k-3) \quad (2)$$

여기서,  $x(k)$ 는 제어기 출력,  $y(k)$ 는 실제 시스템의 출력을 나타낸다.

실제 시스템의 출력과 모델 출력의 차이를 나타내는 목적함수의 식 (3)을 최소화하도록 최소자승법을 이용하여 이송 드라이브 시스템의 파라미터( $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ )를 구할 수 있다.

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

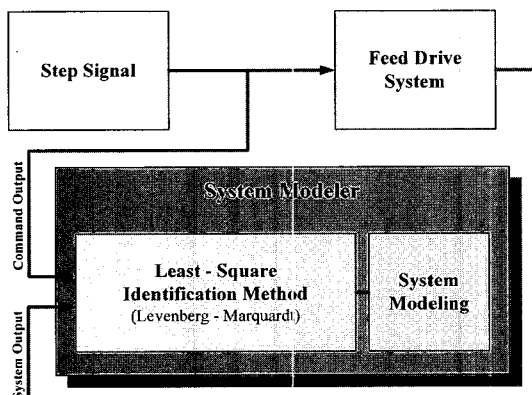


Fig. 1 Schematic of system modeling

식 (3)에서  $n$ 은 시스템 입출력 신호의 샘플링 개수를 나타내며, 목적함수의 비선형 최소화 문제는 최소자승법 중 하나인 Levenberg-Marquardt 알고리즘<sup>18,19</sup>을 이용하여 풀 수 있다.

## 3.3 축 연동제어 시스템의 자율동조

본 논문에서 제시된 자율동조 방법은 최소자승법을 이용한다. 기존에 제안되었던 자율동조 방법은 대부분 별도의 신호발생기를 이용한 릴레이 피이드백(relay feedback) 방법<sup>14,15</sup>을 이용하고 있다. 또한 비례 제어기 신호를 이용하는 방법도 제안되었으며 이는 별도의 신호발생기를 이용하지 않는 장점이 있으나, 제어기 신호에 대한 제한으로 자율동조를 수행하기 전에 비례 제어기 게인의 설정을 통해 시스템의 출력이 저감쇠(under-damped) 응답을 보이도록 비례 제어기 신호를 조정해주어야 한다는 단점이 있다. 반면에 본 논문에서 제시된 방법은 자동모델링에서 사용한 최소자승법을 동일하게 사용할 수 있고, 목적함수를 사용하므로 제어하고자 하는 오차를 직접 반영할 수 있는 장점이 있다. 또한, 별도의 신호발생기를 필요로 하지 않으며 제어기 출력과 실제 시스템의 출력을 이용하여 다양한 시스템의 특성에 따라 능동적으로 최적의 모델을 설정할 수 있다.

제시된 자율동조 방법은 Fig. 2와 같이 독립축 제어기에 위치비례 제어기  $K_{pi}(i=x, y, z)$ 와 연동제어기  $C(z)$ 에 식 (4)와 같은 PID 제어기를 적용한 3축 연동제어 시스템을 대상으로 하였다.

$$C(z) = \text{diag}(C_x(z), C_y(z), C_z(z)) \quad (4)$$

여기서,  $C_x(z)$ ,  $C_y(z)$ ,  $C_z(z)$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i(z) = C_{pi} + C_{Ti} \frac{Tz}{z-1} + C_{Di} \frac{z-1}{Tz} \quad (i=x, y, z) \quad (5)$$

자동모델링으로부터 구한 시스템 모델에 대하여 자율동조 방법을 적용하는데, 이것은 Fig. 3에서와 같이 크게 3 단계로 구분될 수 있다. 즉, 자동모델링을 통해서 구한 이송 드라이브 시스템의 모델과 독립축 제어기인 위치비례 제어기로 이루어진 페루프 1에 대한 적용으로, 위치추적성능을 극대화하기 위한 독립축 제어기에 대하여 최소 성

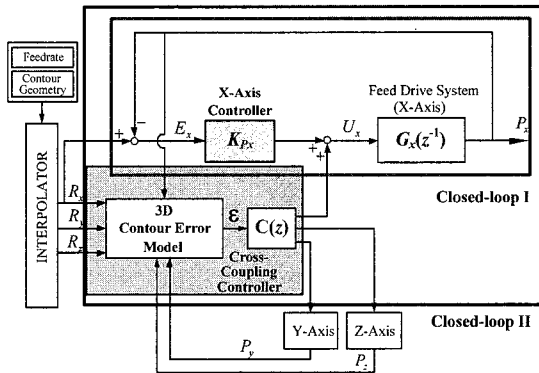


Fig. 2 Three-axis cross-coupling control system

능사양만을 만족하도록 자율동조 방법을 적용하여 독립축 제어기의 비례 게인을 설정하는 1 단계, 페루프 I 과 연동제어기를 포함하는 페루프 II 에 대하여 윤곽오차를 고려한 자율동조 방법을 적용하여 연동제어기의 게인을 설정하는 2 단계, 마지막으로 페루프 II 에 대하여 최종적으로 독립축 제어기의 게인을 다시 설정하는 3 단계의 과정으로 구분할 수 있다.

독립축 제어기의 자율동조를 위한 최소자승법의 목적함수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서  $r(k)$  는 기준입력인 기준 공구위치를 나타내며,  $p(k)$  는 시스템의 출력인 실제 공구위치를 나타낸다. 이것은 다시 식 (7)과 같이 위치추종오차인  $e(k)$  로 표현할 수 있다. 식 (6)과 식 (7)의  $e_{desired}$  는 독립축 제어기에 요구되는 제어성능을 나타내며 위치추종오차를  $e_{desired}$  에 가깝게 최소화하도록 자율동조 방법을 수행함을 뜻한다.

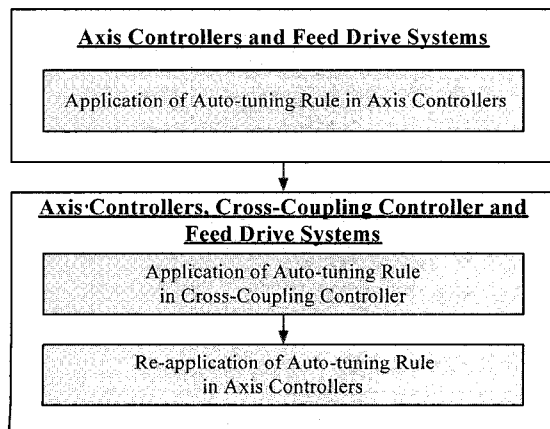


Fig. 3 Steps of the proposed auto-tuning

$$J_T = \sum_{k=0}^{n-1} \{r(k) - p(k) - e_{desired}\}^2 \quad (6)$$

$$J_T = \sum_{k=0}^{n-1} \{e(k) - e_{desired}\}^2 \quad (7)$$

연동제어기의 자율동조를 위한 최소자승법의 목적함수도 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $k(k)$  는 실제 공구위치  $p(k)$  와 가장 가까운 공구경로 상의 점으로서 지나간 시간 단계의 기준 공구위치 중의 한 점에 대응한다. 식 (8)은 다시 식 (9)와 같이 윤곽오차인  $\epsilon(k)$  으로 표현할 수 있다.

$$J_C = \sum_{k=0}^{n-1} \{k(k) - p(k) - \epsilon_{desired}\}^2 \quad (8)$$

$$J_C = \sum_{k=0}^{n-1} \{\epsilon(k) - \epsilon_{desired}\}^2 \quad (9)$$

위의 목적함수에서  $\epsilon_{desired}$  는 연동제어기에 요구되는 윤곽추적성능을 의미한다. 식 (7)와 식 (9)의 목적함수에 대해 최소자승법을 적용하여 목적함수를 최소화함으로써 제어기 게인을 구할 수 있다. 독립축 제어기의 경우 페루프 I 에 대해서만 먼저 고려되었기 때문에 최종적으로 페루프 II 에 대해서도 독립축 제어기에 자율동조를 다시 한번 적용한다. 위치추종오차  $e(k)$  와 윤곽오차  $\epsilon(k)$  이 목적함수에 직접 반영됨으로써 제시된 자율동조 방법은 위치추적성능과 윤곽추적성능을 모두 고려할 수 있다. 자율동조의 과정은 Fig. 3 과 같은 단계, 그리고 Fig. 4 와 같은 흐름으로 진행된다. 제시된 자율동조 방법에는 기준입력과 시스템 모델의 출력, 위치추종오차와 윤곽오차가 필요하다. 제시된 자율동조는 제어기의 초기 게인을 임의의 값으로 설정하고 제어하고자 하는 오차에 대한 성능요구조건을 입력하면서 시작된다. 위치추종오차 또는 윤곽오차가 요구된 성능에 도달하지 못하면 오차와 성능요구조건과의 차이를 구하고, 그 차이의 제곱의 합을 구하여 저장한다. 이와 같이 저장된 값은 자율동조에 필요한 목적함수를 나타내며 이 값에 최소자승법을 적용하여 주어진 성능조건을 만족하도록 게인을 구한다. 이렇게 구한 게인으로 설정된 제어기를 이용하여 다시 오차를 구하고 성

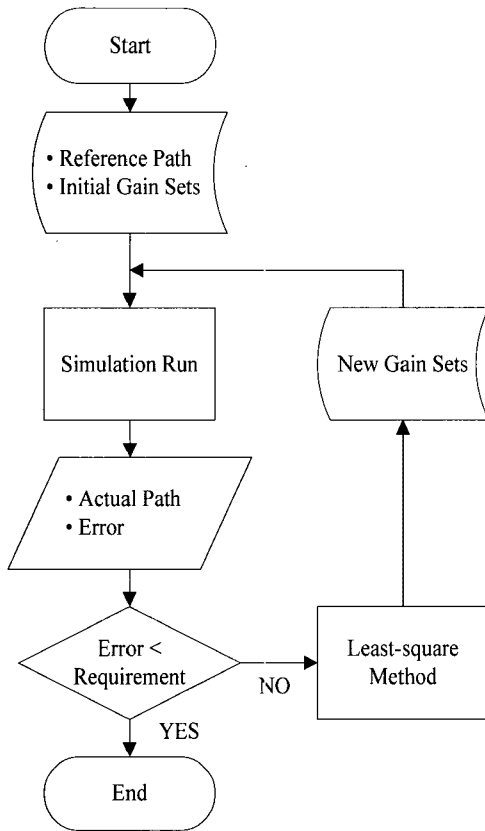


Fig. 4 Flow of the proposed auto-tuning

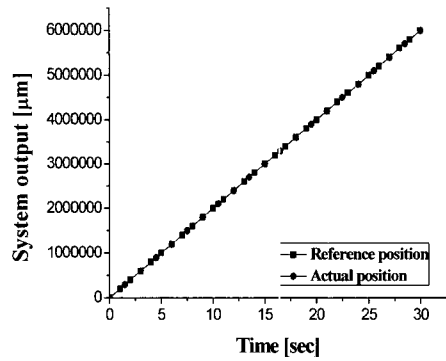


Fig. 6 Comparison of model and actual system outputs

Table 1 Comparison of system parameters

|       | Actual system    | Model       |
|-------|------------------|-------------|
| $a_1$ | -2.76677172968   | -2.76677173 |
| $a_2$ | 2.544638512325   | 2.54463851  |
| $a_3$ | -0.77786678264   | -0.77786680 |
| $b_1$ | 0.0000019669985  | 0.000001967 |
| $b_2$ | 0.00000739321135 | 0.00000739  |
| $b_3$ | 0.00000173484178 | 0.00000173  |

능요구조조건과 비교한다. 이러한 과정을 오차의 값이 성능요구조조건을 만족할 때까지 반복한다.

#### 4. 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험 결과

경사입력(ramp input)을 기준입력으로 하며 Fig. 5 와 같은 전달함수를 갖는 이송 드라이브 시스템에 대하여 최소자승법을 이용한 자동모델링을 수행하였다. 본 논문의 대상인 3 축 시스템은 각 축 이송 드라이브의 동특성이 동일하게 설정되었다. Table 1 의 결과에서와 같이 시스템 모델과 실제 이송 드라이브 시스템이 유사함을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 Fig. 6 에서와 같이 자동모델링을 이용하여 얻은 모델의 거동이 실제 이송

드라이브 시스템의 거동에 근사함을 확인할 수 있다.

제시된 자율동조 방법은 자동모델링에서 얻은 이송 드라이브 시스템의 모델을 이용하여 윤곽추적성능과 위치추적성능의 최적화를 위해 제어기 게인을 설정한다. 따라서 실제 이송 드라이브 시스템의 출력과 모델에서의 출력의 유사함은 물론, 목적함수에 직접 반영되는 값인 위치추종오차와 윤곽오차도 실제 이송 드라이브 시스템과 시스템 모델이 유사할 필요가 있다.

이를 위해서 Fig. 7 과 같은 반지름 100 mm, 이송속도 3 m/min 인 3 차원 원호보간에 대해 Fig. 2 와 같은 구조의 3 축 연동치어 시스템을 대상으로 모델과 실제 시스템의 윤곽오차와 위치추종오차를 비교하였다. 시스템 모델과 실제 시스템의 거동이 유사함은 Fig. 8 과 Fig. 9 의 결과로 입증할 수 있다.

위치추적성능과 윤곽추적성능의 최적화를 위해 독립축 제어기와 연동제어기에 각각 제시된 자율동조 방법을 적용하였으며, 최소자승법이 각각 6

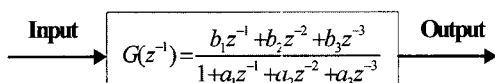


Fig. 5 Feed drive system

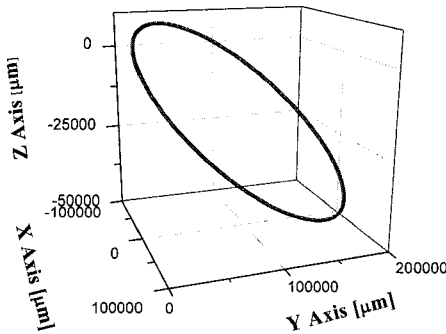


Fig. 7 Reference path

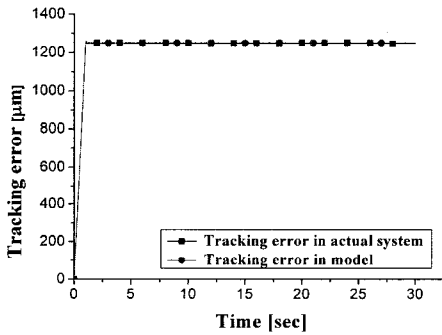


Fig. 8 Comparison of model and actual system tracking error

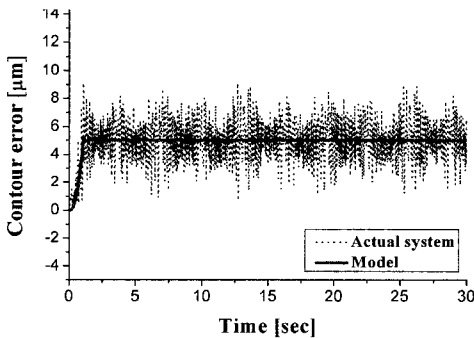


Fig. 9 Comparison of model and actual system contour error

회색 반복되어 구해진 독립축 제어기의 비례 게인  $K_p$ 의 변화는 Table 2와 같고, 연동제어기의 게인  $C_p, C_i, C_d$ 의 조합의 변화는 Table 3과 같다. 여기서, 독립축 제어기와 연동제어기에서 요구되는 제어성능인 위치추종오차  $e_{desired}$ 와 윤곽오차  $\epsilon_{desired}$ 는 각각  $1000 \mu m$ 와  $2 \mu m$ 로 설정하였다.

Table 2 Axis controller gain sets

| Gains ( $K_p$ ) | X-axis | Y-axis | Z-axis |
|-----------------|--------|--------|--------|
| Initial (1st)   | 40     | 40     | 40     |
| Interim (3rd)   | 44.365 | 44.094 | 44.247 |
| Final (6th)     | 49.872 | 49.865 | 49.814 |

Table 3 Cross-coupling controller gain sets

| Gains         |       | X-axis | Y-axis | Z-axis |
|---------------|-------|--------|--------|--------|
| Initial (1st) | $C_p$ | 0      | 0      | 0      |
|               | $C_i$ | 0      | 0      | 0      |
|               | $C_d$ | 0      | 0      | 0      |
| Interim (3rd) | $C_p$ | 53.170 | 52.902 | 52.020 |
|               | $C_i$ | 64.211 | 63.920 | 61.003 |
|               | $C_d$ | 0.012  | 0.008  | 0.003  |
| Final (6th)   | $C_p$ | 79.202 | 73.330 | 71.101 |
|               | $C_i$ | 110.3  | 109.1  | 108.7  |
|               | $C_d$ | 0.009  | 0.010  | 0.009  |

먼저, 자동모델링으로부터 얻어진 이송 드라이브 시스템의 모델을 이용하여 자율동조 방법에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 최종 게인에 대한 위치 추적성능과 윤곽추적성능이 요구되는 제어성능에 가깝게 나타남을 알 수 있다.

다음으로, 제안된 자율동조 방법을 통해 구한 제어기 게인의 설정을 Fig. 12와 같이 구성된 PC 기반의 개방형 3축 CNC 연동제어 시스템에 구현하였다. 실험은 무부하 상태에서 서보 드라이브 시스템에 의한 가상 이송 상황을 고려하여 진행하였다. Fig. 12에 나타난 바와 같이, 상위장치인 제어 PC와 서보 드라이브와의 통신에는 디지털 시

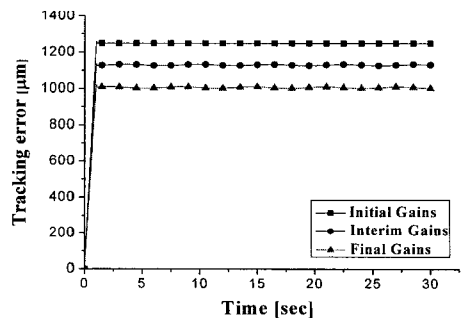


Fig. 10 Simulation result of tracking error

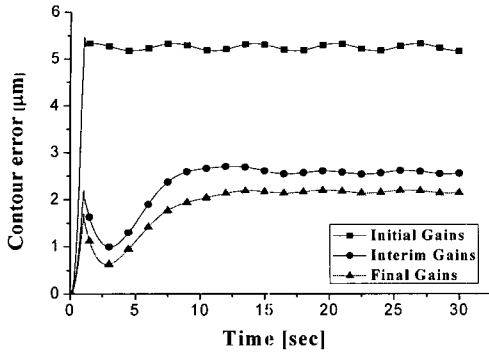


Fig. 11 Simulation result of contour error

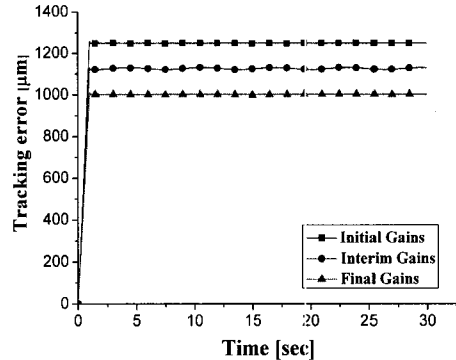


Fig. 13 Auto-tuning result of tracking error

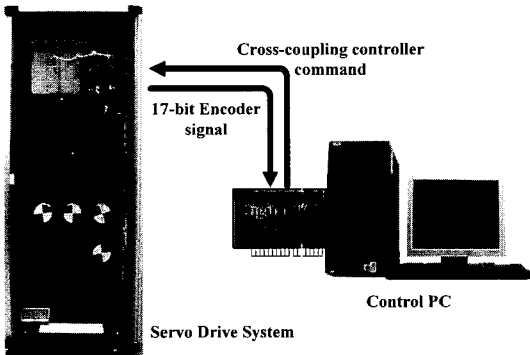


Fig. 12 Structure of the 3-axis CNC test-bed

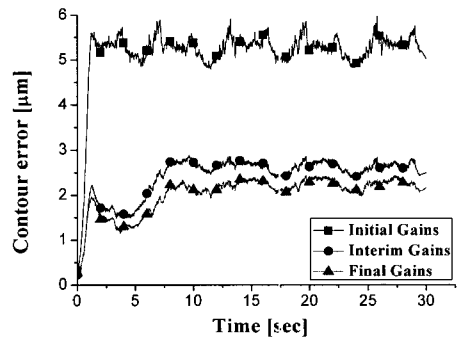


Fig. 14 Auto-tuning result of contour error

리얼 통신 방식이 적용되었다. 실험에서 사용된 서보 드라이브는 위치제어 모드만 사용할 수 있도록 제작 설정되었기 때문에 상위장치로부터의 연동제어기 명령을 디지털 입출력 카드의 속도 피드포워드(feedforward) 지령 채널을 통해 서보 드라이브로 전송 처리하였다. 이것은 서보 드라이브의 속도제어 루프 내에서 속도지령을 보상하게 된다. 기준궤적과 이송속도, 각 축의 제어기 계인은 시뮬레이션과 동일하게 적용하였으며 각 축의 서보 모터의 엔코더 신호를 측정하여 위치추종오차와 윤곽오차가 성능조건에 만족하는지를 검증하였다. 실험 결과를 Fig. 13 과 Fig. 14 에 나타내었으며, 결과값의 정확한 관찰을 위해 측정된 위치추종오차와 윤곽오차에 Savitzky-Golay 스무싱 필터(smoothing filter)<sup>20</sup> 를 적용하였다. 사용된 필터는 2 차 필터이며 100 개의 샘플개수를 이용하였다. Fig. 13 과 Fig. 14 에서 최종 계인의 위치추종오차와 윤곽오차가 요구된 제어성능에 가깝게 최소화되었음을 볼 수 있으며 시뮬레이션의 결과와 일치된 경향을 보임을 확인할 수 있다.

이로써 자동모델링은 실제 시스템의 거동과 유사하도록 이송 드라이브 시스템을 모델링할 수 있음을 확인하였으며, 자동모델링을 기반으로 한 통합형 자율동조 방법의 적용으로 실제 시스템의 제어기를 요구되는 성능 조건에 맞춰 자동으로 설정할 수 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는, 최소자승법을 이용한 자동모델링을 통해 실제 이송 드라이브 시스템의 거동과의 차이를 최소화 하도록 시스템의 모델을 설정하였다. 또한, 3 축 CNC 시스템의 정밀도 개선을 위하여 자동모델링과 동일한 최소자승법을 사용하며 자동모델링을 기반으로 하는 통합적 자율동조 방법을 제안하였다. 자율동조 방법을 통하여 요구되는 제어성능을 만족하는 제어기 계인을 도출하였으며 이를 별도의 컴퓨터 시뮬레이션과 PC 기반의 개방형 CNC 시스템에 각각 구현하였다. 시뮬레이션과 실험의 결과비교를 통해서 자동모델링이 실

제 이송 드라이브 시스템에 가까운 시스템 모델을 얻을 수 있음을 검증하였으며, 이러한 모델을 이용한 실험에서 제시된 자율동조 방법이 실제 시스템을 자율동조시킬 수 있음을 입증하였다.

본 논문의 결과는 여러 가지 가공조건에 따른 제어기 개인의 능동적 설정을 통하여 다축 CNC 동작기계의 최적화 관점에서 사용자의 편의성과 다축 CNC 시스템의 제어성능의 개선에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

## 후 기

이 연구는 2008 학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었음.

## 참고문헌

- Makino, H. and Ohde, T., "Motion Control of the Direct Drive Actuator," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 375-387, 1991.
- Ono, Y. and Kuwahara, H., "The New Design of Motor, Position Sensor and Position Control System for Direct Drive Manipulators," *Proceedings of the ASME, Robotics: Theory and Applications*, pp. 123-128, 1986.
- Pritschow, G. and Philipp, W., "Direct Drives for High-Dynamic Machine Tool Axes," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 413-416, 1990.
- Schepper, F. and Yamazaki, K., "Development of an ASIC Performing High Speed Current Loop Processing of Servo Motor Control for Mechatronics Applications," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 355-358, 1989.
- Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, No. 4, pp. 265-272, 1980.
- Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Feed Drive Servomechanisms," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, No. 2, pp. 140-148, 1989.
- Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, No. 4, pp. 225-232, 1990.
- 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.
- Koren, Y. and Lo, C. C., "Advanced Controllers for Feed Drives," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 2, pp. 689-698, 1992.
- Lee, Y. and Jee, S., "Adaptive Cross-Coupling Control for High-Speed Nonlinear Contour Machining," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 11, pp. 108-114, 2000.
- 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.
- Jee, S. and Lee, H., "Integrated Controller Design for Multi-Axis CNC Systems," *Journal of the KSPE*, Vol. 23, No. 5, pp. 93-102, 2006.
- Ziegler, J. G. and Nichols, N. B., "Optimum Settings for Automatic Controllers," *Transactions of the ASME*, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- Astrom, K. and Hagglund, T., "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins," *Automatica*, Vol. 20, No. 5, pp. 645-651, 1984.
- Astrom, K. and Hagglund, T., "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning," *Instrument Society of America*, 1995.
- Yu, C. C., "Autotuning of PID Controllers: Relay Feedback Approach," *Springer-Verlag*, 1999.
- Ljung, L., "System Identification Toolbox for Use with MATLAB: User's Guide," *The Mathworks, Inc.*, 1993.
- Levenberg, K., "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares," *The Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 2, No. 2, pp. 164-168, 1944.
- Marquardt, D., "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441, 1963.
- Savitzky, A. and Golay, M. J. E., "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures," *Analytical Chemistry*, Vol. 36, No. 8, pp. 1627-1639, 1964.