

◆ 특집 ◆ 고성능 공작기계 수치제어장치

다계통 e-CNC 의 다축 연동제어기 설계 기술

Design Technology of a Multi-Axis Cross-Coupling Controller for a Multi-Path e-CNC

지성철<sup>1,✉</sup>, 이학철<sup>2</sup>, 변제형<sup>2</sup>, 임종협<sup>2</sup>, 이정승<sup>2</sup>, 허경화<sup>3</sup>  
 Sungchul Jee<sup>1,✉</sup>, Hakchul Lee<sup>2</sup>, Jehyung Byun<sup>2</sup>, Jonghyeop Lim<sup>2</sup>, Jungseung Lee<sup>2</sup> and Kyunghwa Huh<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> 단국대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook Univ.)

<sup>3</sup> 두산인프라코어(주) (Doosan Infracore Co., Ltd.)

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

Key Words: CNC (컴퓨터 수치제어), Multi-Path (다계통), Cross-Coupling Controller (연동제어기), Contour Error (윤곽오차), Tool Orientation Error (공구방향오차), CNC Functions (CNC 기능)

1. 서론

공작기계의 고속화와 고정밀화를 위해서는 CNC 와 서보 제어 기술의 뒷받침이 필수적이며 이를 통한 공작기계의 성능 및 부가가치 향상을 위해 지속적인 기술개발 노력이 경주되고 있다. 특히, 5 축 공작기계의 수요가 날로 확산되고 복합 가공기의 필요성이 부각되고 있는 상황에서 다축 동시 제어 기술은 반드시 확보되어야 할 핵심 기술이다.

기존의 서보 제어기는 크게 피드백(feedback) 제어기<sup>1-4</sup>와 피드포워드(feedforward) 제어기<sup>5-8</sup>로 분류할 수 있다. 피드백 제어기는 센서의 신호를 통해 시스템의 물리적 상태를 읽고 입력값과 비교하여 목표로 하는 상태에 빠르고 정확하게 도달할 수 있도록 제어한다. 이것은 지난 결과만을 제어에 반영할 수 있는데 반해 피드포워드 제어는 일종의 예측제어로 선행해석을 통해 앞으로 예상되는 상황을 제어에 반영할 수 있다. 위치 피드백 제어에 속도 및 가속도 피드포워드 명령을 결합한 형태의 제어기는 그 구조가 간단할 뿐만 아니라 동적 응답이 우수하여 현재 CNC 제어에 널리 쓰이고 있다. 그러나 이러한 제어기는 모두

구동축들이 개별적으로 제어되는 독립축 제어기(axis controller)이다. 이는 각 구동축의 위치추종오차(tracking error)만을 대상으로 제어하기 때문에 가공정밀도와 직접적인 연관이 있는 윤곽오차를 제어에 반영하지 못하는 단점이 있다. 이를 개선하기 위한 방안으로 Koren<sup>9</sup>은 각 축의 독립축 제어기와 별도로 윤곽오차를 고려하는 연동제어기(cross-coupling controller)를 추가하는 방법을 제안했으며, 그 후 CNC 공작기계 제어분야에서 여러 개의 축을 동시에 제어함에 있어 다양한 형태로 윤곽오차를 반영하는 연구가 진행되어 왔다.<sup>10-14</sup> 그러나 지금까지 제시된 윤곽오차 모델들은 공구경로의 형상이 복잡하거나 고속가공일 경우에 실제 윤곽오차를 정확하게 반영하지 못하는 단점이 있다. 또한, 연동제어기에 대한 앞선 연구들은 모두 2, 3 축 모션에 국한되며, 최근 각광을 받고 있는 5 축 가공에 대한 연동제어는 Lo<sup>15</sup>의 연구만이 유일한 상태이다. 그러나 이 또한 앞서 언급한 부정확한 윤곽오차 모델을 기반으로 공구방향오차를 추정하여 윤곽오차와 공구방향오차를 정확하게 반영하지 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 실시간으로 정확히 오차를 계산할 수 있는 윤곽오

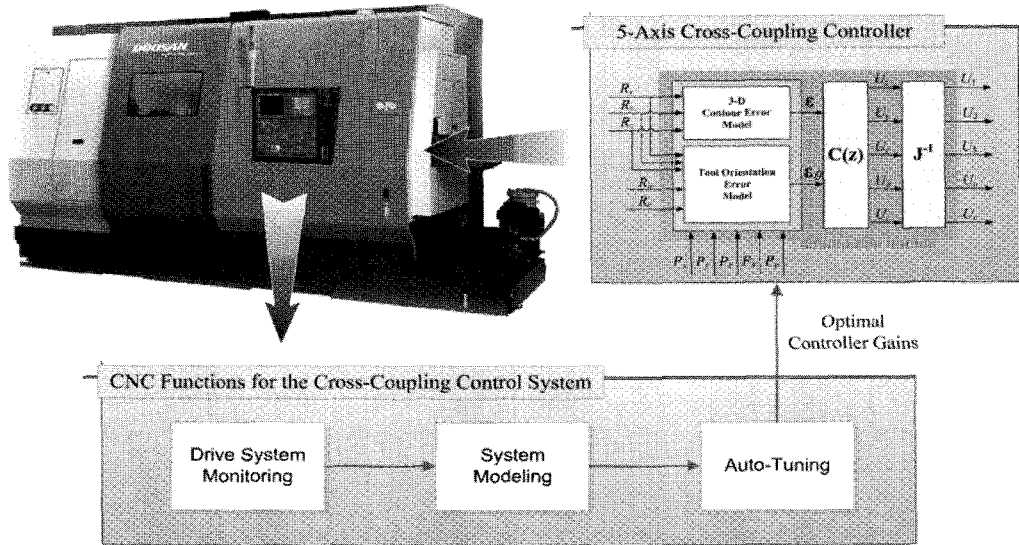


Fig. 1 Cross-coupling controller and CNC functions for multi-axis CNCs

차 모델<sup>16</sup> 과 공구방향오차 모델<sup>17</sup> 을 적용한 다축 CNC 연동제어기를 소개한다. 또한, 연동제어기의 성능을 극대화하고 연동제어기 사용자의 편의성을 제고하기 위한 기능으로 구동계 모니터링, 자동모델링, 독립축 제어기와 연동제어기에 대한 통합형 자율동조 방법을 소개한다.

Fig. 1 은 본 논문에서 제시하는 다축 연동제어기와 각종 기능들과의 관계를 개략적으로 나타낸 것이다. 구동계 모니터링 기능은 CNC 제어기로부터 보간기 출력, 엔코더 신호와 같은 구동계 관련 정보들을 읽어 오고 사용자가 직접 확인해 볼 수 있도록 그래픽화된 화면을 제공한다. 자동모델링 기능은 구동계 정보를 전달받아 CNC 동작기계 시스템의 구동계 부분을 정확하게 모델링 한다. 통합형 자율동조 기능은 자동모델링에서 모델링된 구동계 모델을 이용하여 독립축 제어기와 연동제어기의 최적의 게인을 설정한다. 이로써 다축 연동제어 시스템의 성능을 최적화 할 수 있다.

2. 다축 연동제어기

5 축 가공에서는 Fig. 2 와 같이 추종오차와 윤곽오차 그리고 공구방향오차가 발생하게 된다. 공구의 경로가 곡선인 경우 위치추종오차의 제어만으로는 윤곽정확도와 공구방향정확도를 보장할 수 없다. 본 장에서는 윤곽오차 모델 및 공구방향오

차 모델과 이에 기반한 다축 연동제어기에 대해 소개한다.

연동제어기에 적용된 윤곽오차 모델과 공구방향오차 모델을 Fig. 3 에 나타내었다. 현재 공구위치  $P(k)$  에서 가장 가까운 기준 공구경로상의 3 개 기준점인  $R(k-d-1)$ ,  $R(k-d)$ ,  $R(k-d+1)$  로 공간상의 원을 형성하고  $P(k)$  와 가장 가까운 기준 공구경로상의 점  $K(k)$  의 좌표를 구한 후,  $P(k)$  와  $K(k)$  사이의 벡터로 윤곽오차  $\epsilon$  을 정의한다. 공구방향오차  $\epsilon_\theta$  는  $K(k)$  에서의 기준 공구방향  $O_k(K_a, K_c)$  와  $P(k)$  에서의 실제 공구방향  $O_p(P_a, P_c)$  사이의 각도 차로 정의한다.

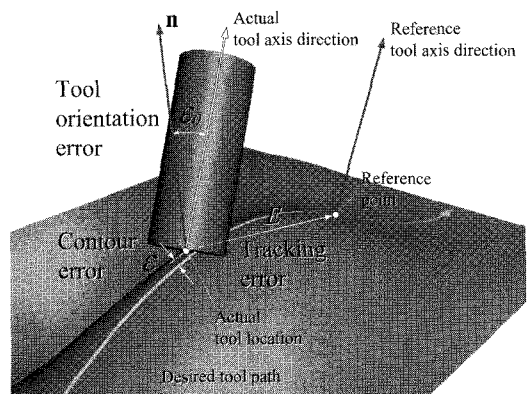


Fig. 2 Tracking, contour and tool orientation errors

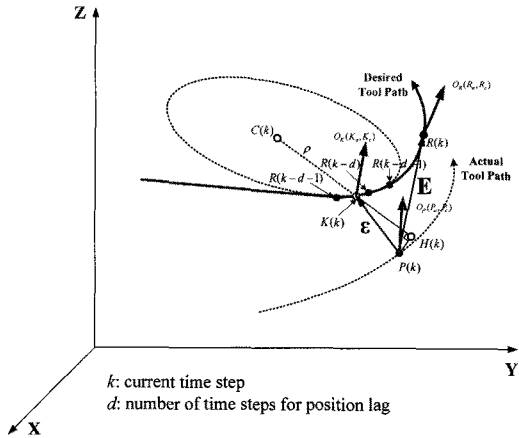


Fig. 3 Developed contour error model and orientation error model

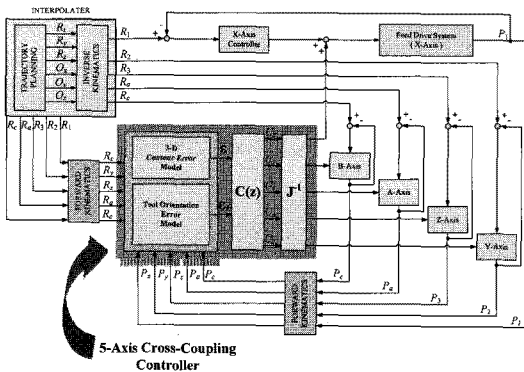


Fig. 4 Structure of the 5-axis cross-coupling system

본 논문에서 적용한 윤곽오차 모델과 공구방향 오차 모델은 작동조건에 관계 없이 기존의 모델보다 월등한 정확도를 나타낸다. 각 오차모델들은 보간기의 출력과 공구의 위치 및 각도 피드백 정보만을 입력으로 하여 실시간으로 계산할 수 있으며 기준계적에 대한 수식이 필요 없기 때문에 기존의 서보 제어 모듈과 손쉽게 통합이 가능하다.

Fig. 4는 윤곽오차 모델과 공구방향오차 모델을 바탕으로 하는 다축 연동제어기를 기존 독립축 제어기에 통합한 다축 연동제어 시스템의 구조를 나타낸다. 여기서 연동제어기에는 PID 제어 범칙을 적용하였다.

### 3. 다축 연동제어기를 위한 CNC 기능

#### 3.1 구동계 모니터링

CNC 시스템을 이용하는 사용자의 편의성을 위하여 GUI(graphic user interface) 프로그램을 제작하였다. 일반적으로 GUI 프로그래밍은 실시간성을 보장하지 않으므로 제어의 실시간성을 보장하기 위하여 RTX(real-time extension)기반의 다중 쓰레드(multi-thread)를 이용한 GUI 프로그램을 작성하였다.

프로그램은 Fig. 5와 같이 실시간으로 시스템을 제어하는 RTSS 프로세스(process)와 GUI 부분을 담당하는 Win32 프로세스로 구성하였다. 그리고 공유 메모리(shared memory)를 생성하여 각 프로세스의 데이터를 교환하도록 하였다.

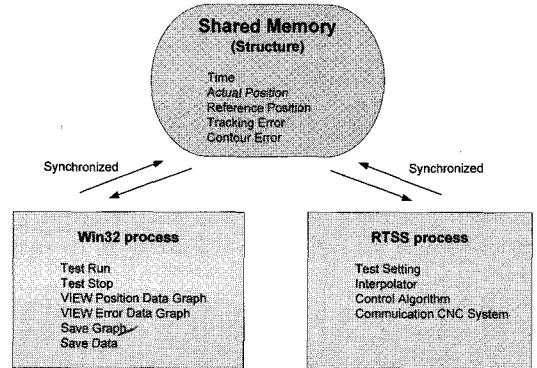


Fig. 5 Structure of the monitoring program for a feed drive system

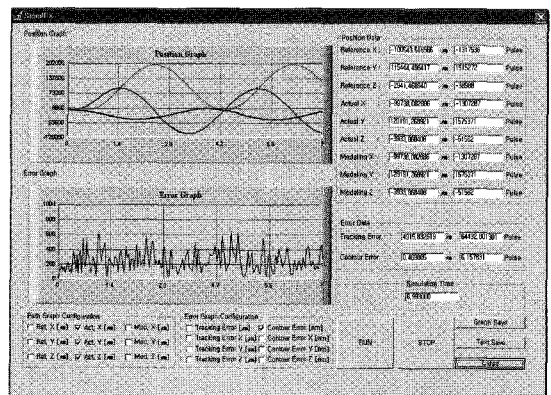


Fig. 6 Graphic user interface

Fig. 6은 작성된 프로그램의 실행결과를 나타내는데, 이 프로그램을 통해 시스템을 구동하고 보간기와 제어기의 출력 및 엔코더 신호를 획득하여 공구의 위치와 윤곽오차 및 공구방향오차 등의 정보를 그래픽하게 보여주거나 저장할 수 있다. 또

한 저장된 입출력 데이터를 이용해 다음 절에 기술한 자동모델링 기능을 실행하여 시스템의 전달 함수를 구하고 자율동조 기능을 통해 구한 최적화된 계인으로 제어시스템을 설정하는 것이 가능하다.

### 3.2 자동 모델링

자동모델링은 자율동조기능의 선행과정으로서 정확한 시스템의 모델을 결정함으로써 자율동조기능의 신뢰도를 높일 수 있으며, 또한 모델링 결과를 제어시스템 설계에 활용할 수 있다. 최소자승법을 이용한 자동모델링 방법을 Fig. 7 과 같이 제시한다.

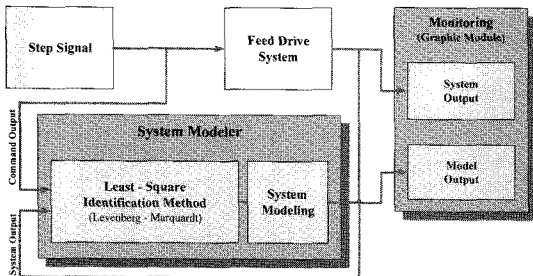


Fig. 7 Schematic of system modeling

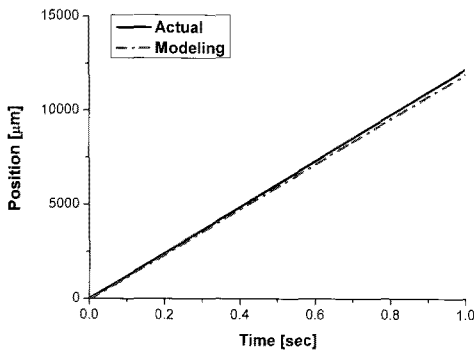


Fig. 8 Comparison of model and actual system outputs

제시된 자동모델링 기능의 성능을 확인하기 위해 계단 입력에 대하여 자동모델링을 수행하여 구동 시스템 모델을 구하였다. 시스템 모델의 계단 입력에 대한 출력과 실제 이송 드라이브 시스템의 출력을 비교한 결과, Fig. 8 과 같이 실제 시스템의 거동을 잘 표현할 수 있음을 확인하였다.

### 3.3 자율동조 방법

제시된 다축 연동제어 시스템에서 원하는 정확도를 얻기 위해서는 가공 곡면의 형상과 이송속도 등 가공조건에 따른 최적의 제어기 계인을 설정하여야 한다. 하지만 다양한 가공조건에 대해 적합한 제어기 계인을 설정하는 것은 쉽지 않기 때문에 사용자가 보다 쉽게 최적의 제어기 계인을 찾을 수 있는 기능이 필요하다. 이를 위해 독립축 제어기와 연동제어기의 최적의 계인을 자동으로 설정할 수 있는 통합형 자율동조 기능을 제시한다.

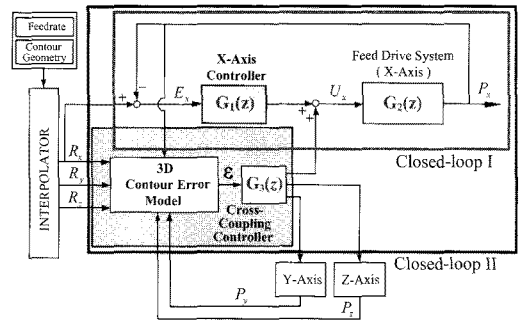


Fig. 9 3-axis cross-coupling control system

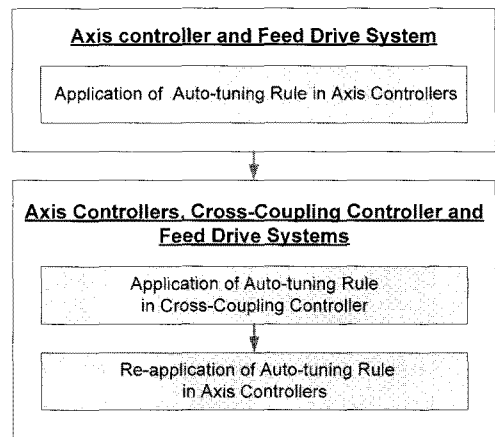


Fig. 10 Flow of the proposed auto-tuning

자율동조를 이용한 계인 설정을 위하여 연동제어 시스템을 Fig. 9 와 같이 편의상 이송 드라이브 시스템과 독립축 제어기로 구성된 페루프 I, 연동제어기와 페루프 I 을 포함하는 페루프 II 로 구분한다. 계인의 설정은 Fig. 10 에 나타낸 바와 같이 페루프 I 에서 독립축 제어기 계인을 설정하고 페루프 II 에서 연동제어기 계인을 설정한 후 설정된 연동제어기 계인에 대하여 위치추종오차를 최소화하는 독립축 제어기 계인을 재설정하는 순서로 자

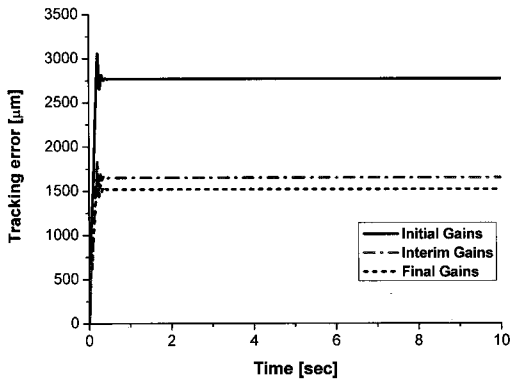


Fig. 11 Auto-tuning result for tracking error

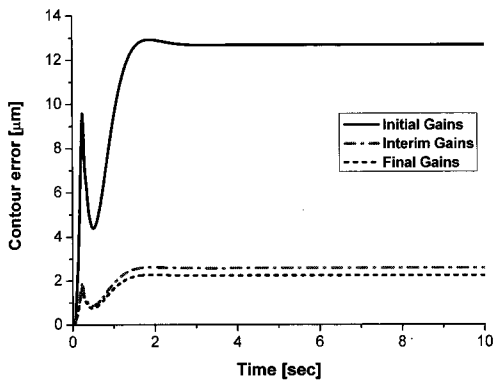


Fig. 12 Auto-tuning result for contour error

율동조 과정을 진행하며 오차를 줄이기 위해 제어기 게인을 설정하는 과정을 반복하여 최적의 게인을 구한다.

제시된 통합형 자율동조 기능의 성능을 검증하기 위해 연동제어 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 자율동조 기능을 수행하여 출력된 게인을 제어기에 반영하여 테스트한 결과, 위치추종오차와 윤곽오차가 현저히 줄어든 것을 Fig. 11 과 Fig. 12 에서 각각 확인할 수 있다.

#### 4. 다축 연동제어기의 평가

##### 4.1 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제시된 다축 연동제어기의 성능 평가를 위해 먼저 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 기준 공구경로는 Fig. 13 과 같이 설정하였고, 이송속도는 2m/min, 가속시간은 0.15sec, 제어주기는 1ms 로 설정하였다.

Fig. 14 와 Fig. 15 의 결과에 볼 수 있듯이 새롭게 제시된 다축 연동제어기를 적용하는 경우, 독립축 제어기뿐만 아니라 기존의 다축 연동제어기보다 윤곽오차 및 공구방향오차가 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

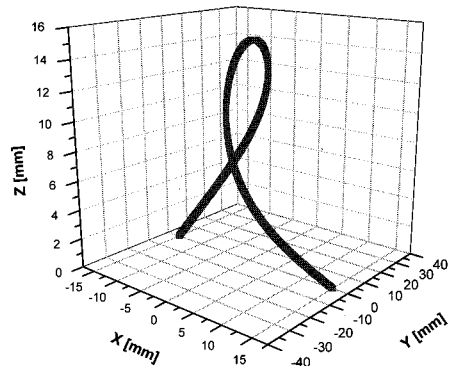


Fig. 13 Reference path

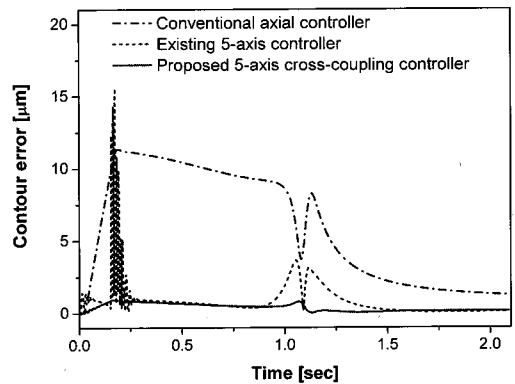


Fig. 14 Comparison of the contouring accuracy

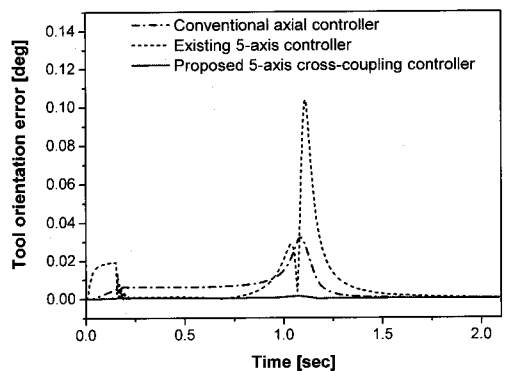


Fig. 15 Comparison of the tool orientation accuracy

## 4.2 상용화된 CNC 시스템에서의 검증

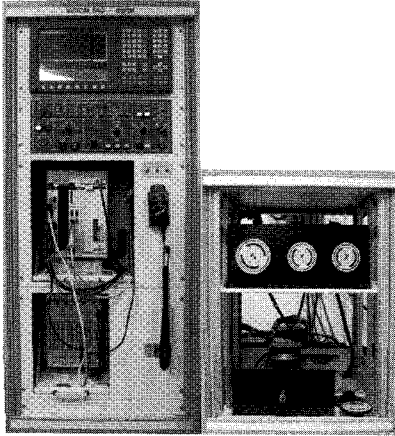


Fig. 16 3-axis CNC Testbed

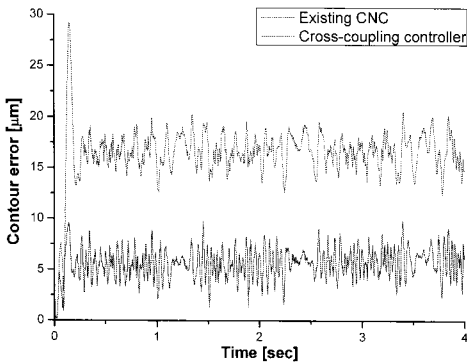


Fig. 17 Performance comparison of the existing CNC and the proposed cross-coupling controller

다축 연동제어기를 Fig. 16 과 같이 상용화된 CNC 시스템을 기반으로 구축된 3 축 CNC 테스트 베드에 탑재하여 성능을 평가하였다. 이송속도 4 m/min, 제어주기 2ms 의 조건에서 반경이 50mm 인 나선형 곡선을 가공하는 구동 테스트를 수행하였다. Fig. 17 과 같이 다축 연동제어기 사용시 기존 CNC 로 구동하는 경우와 비교하여 윤곽정확도가 크게 개선됨을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 다축 CNC 시스템에서 위치추종 오차만을 제어하는 기존 제어기들의 문제점을 해결하고 공작기계의 성능을 향상시키기 위해 윤곽

오차와 공구방향오차를 직접적으로 제어에 반영하는 다축 연동제어기를 제시하였다. 본 논문에서 적용한 윤곽오차 모델과 공구방향오차 모델은 기존의 오차 모델과 비교하여 월등한 윤곽정확도 및 공구방향정확도를 나타낼 뿐만 아니라, 보간기 출력과 피이드백 정보만을 이용하여 보편적인 독립축 제어기의 출력을 보상하는 형태를 이루고 있어서 부가적인 장치 없이 기존의 서보 제어 모듈에 쉽게 통합될 수 있는 장점을 갖는다.

또한, 다축 연동제어기를 지원하는 CNC 기능들을 제시하였다. 구동계 모니터링은 서보 시스템의 구동 중에 실시간으로 각종 구동계 관련 정보를 획득하고 결과를 화면상에 출력하여 사용자에게 편의성을 제공할 수 있다. 자동모델링은 구동계 모니터링을 통해 획득된 데이터 이용하여 CNC 이송 드라이브 시스템을 모델링 한다. 시스템 모델링 결과는 통합형 자율동조 기능으로 전달되어 주어진 작동조건에서 서보 시스템에 대한 최적의 게인을 찾아 연동제어 시스템을 최적화 시킬 수 있다.

본 논문에서 제시한 다축 연동제어기와 이를 지원하는 CNC 기능들을 통해 기존 서보 제어 모듈의 성능을 크게 개선시키고 사용자의 편의성도 제고할 수 것으로 사료되며, 향후 다축 연동제어 알고리즘을 다계통 복합제어 e-CNC 에 구현할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부에서 추진하는 10 대 부품소재기술개발사업의 하나로 수행되고 있는 “다계통 e-CNC 모듈개발” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Bin, H. Z., Yamazaki, K. and Vries, M. F., “A Microprocessor-Based Control Scheme for the Improvement of Contouring Accuracy,” Annals of the CIRP, Vol. 32, pp. 275-279, 1983.
2. Daraiswami, R. and Gulliver, A., “A Control Strategy for Computer Numerical Control Machine Exhibiting Precision and Rapidity,” ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 106, Issue 1, pp. 56-62, 1984.

3. Johnson, W. C., Shrinivasan, K. and Kulkarni, P., "Digital Control Algorithms for Electrical Machine Tool Feed Drives," Proceedings of the 12th North American Manufacturing Research Conference, pp. 447-453, 1984.
4. 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, pp. 355-358, 1989.
5. Haack, B. and Tomizuka, M., "The Effect of Adding Zeros to Feedforward Controllers," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, Issue 1, pp. 6-10, 1991.
6. Masory, O., "The Effect of a Velocity Feed Forward Loop on Contour Accuracy," Proceedings of the 7th International Motor Conference, pp. 418-428, 1985.
7. Pak, H. A., "Adaptive Matching and Preview Controllers for Feed Drive Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, Issue 2, pp. 316-320, 1991.
8. Tsao, T. C. and Tomizuka, M., "Adaptive zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 109, Issue 4, pp. 349-354, 1987.
9. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 102, Issue 4, pp. 265-272, 1980.
10. Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Optimal Contouring Control of Multi-Axis Feed Drive Servomechanisms," Trans. of the ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 140-148, 1989.
11. Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, Issue 2, pp. 225-232, 1990.
12. 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.
13. Koren, Y. and Lo, C. C., "Advanced Controllers for Feed Drives," Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 2, pp. 689-698, 1992.
14. Chuang, H. Y. and Liu, C. H., "Cross-Coupled Adaptive Feedrate Control for Multiaxis Machine Tools," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, Issue 3, pp. 451-457, 1991.
15. Lo, C. C., "A Tool-Path Control Scheme for Five-Axis Machine Tools," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, No. 1, pp. 79-88, 2002.
16. 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.
17. Jee, S., Lee, H., Byun, J., Sung, D. and Jang, T., "Modular Cross-Coupling Controller for 5-Axis Machine Tools," International Conference on Smart Manufacturing Application, pp. 209-213, 2008.