

# 최신 공작기계의 CNC 제어기 동향



지성철

단국대학교 기계공학과



민병권

연세대학교 기계공학부

## 1. 서론

제조업의 경쟁력을 좌우하는 핵심분야인 생산시스템의 자동화 산업에서 컴퓨터 수치제어기(CNC)는 생산과정의 고능률화 및 초정밀화를 위해 필수적인 구성요소로서, 미국, 독일, 일본을 위시한 선진국들도 국가의 기간산업으로 인식하고 첨단화를 통한 국가 경쟁력 제고를 위해 노력하고 있다. CNC는 그 유연성, 컴퓨터의 향상된 계산성능과 가격절하 등으로 인하여 기계가공에 폭 넓게 쓰여져 왔다. CNC 공작기계 시스템의 정확도는 공작기계 하드웨어, 절삭효과, 그리고 컴퓨터 제어 알고리즘 등에 관계가 있으며,<sup>[1]</sup> 이와 같이 시스템의 정확도에 영향을 주는 인자들은 가공된 기계부품에 있어 가장 중요한 품질 기준으로 평가되는 치수정확도와 표면정밀도에 직접적이고 중대한 영향을 미친다.

기계부품의 품질을 향상시키기 위해 기존의 공작기계 하드웨어를 변경하는 것은 시간과 비용이 많이 들고, 많은 노

력을 요한다. 반면에 향상된 제어 소프트웨어의 개발을 통하여 경제적으로 공작기계의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 따라서, 공작기계 시스템의 가공정밀도를 개선하기 위해 정교한 CNC의 개발이 지속적으로 이루어져 왔으며, 근래에는 PC기반의 개방형 CNC가 개발되어 보급되고 있는 상황이다. 본 논고에서는 CNC에 대한 연구개발 동향을 서보제어기와 CNC의 개방화를 중심으로 살펴본다.

## 2. CNC 서보제어기

CNC 시스템의 전형적인 제어 소프트웨어는 서보제어와 보간기 모듈로 이루어지며, 보간기는 기계의 축방향 모션을 조정(coordination)하는 역할을 한다. 절삭 프로세스의 적응제어와 오차보정 모듈은 이들보다 한 단계 높은 수준에 있다. 이와 같은 다단계 수준의 제어구조는 Fig. 1과 같다.<sup>[2]</sup>

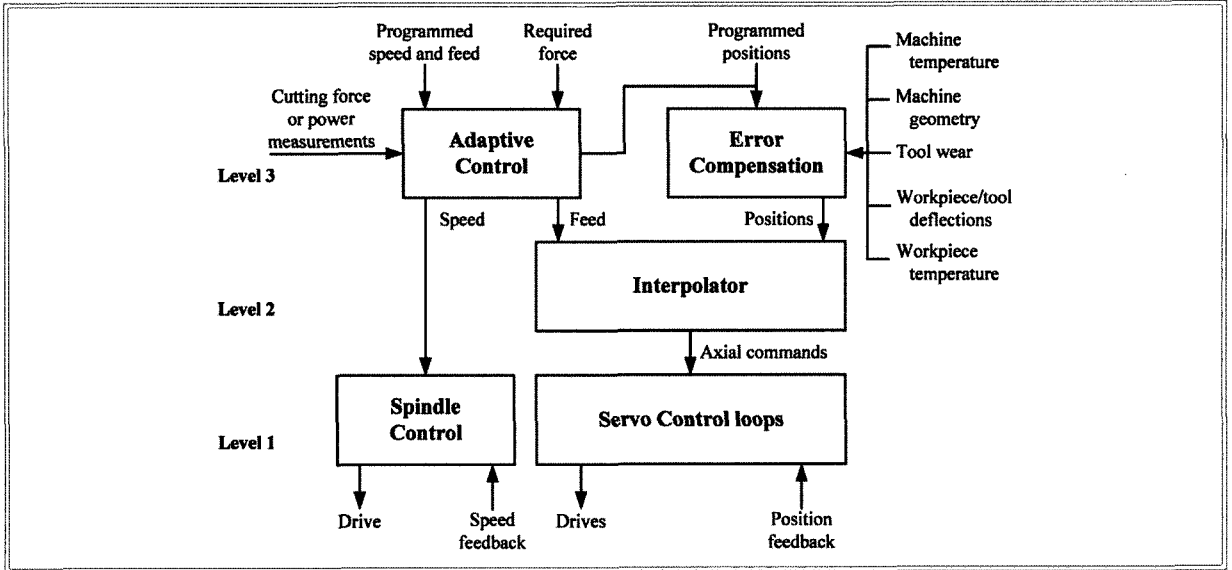


Fig. 1 Hierarchical levels in CNC controllers

공작기계에 대한 기존의 CNC 제어기들은 대부분 입력된 이송속도에 맞춰 개별적인 구동축의 위치추적 성능을 극대화하기 위한 독립축 제어기(axial controller)이다. 이들은 전통적인 비례제어를 비롯한 피드백(feedback) 제어기군(群)<sup>[3~11]</sup>과 피드백제어에 피드포워드(feedforward) 신호를 추가한 형태의 피드포워드 제어기군(群)<sup>[12~19]</sup>으로 대별된다. 이 중 위치 비례제어에 속도/가속도 피드포워드 명령을 결합한 구조의 독립축 제어기는 구동축의 동적 응답을 상당 수준 개선시킴으로써 추종오차(tracking error, Fig. 2의  $E$ )를 줄일 수 있고 그 구조가 간단하므로 CNC에 널리 쓰이고 있다. 이 제어기는 추종오차의 감소를 통해 직선경로에 대한 윤곽오차(contour error, Fig. 2의  $\epsilon$ )를 어느 정도 감소시킬 수 있다. 그러나, 시스템에 큰 외란이 존재할 때 추종성능이 저하되고 공구경로가 곡선일 경우에는 추종오차를 통해 윤곽오차를 제어할 수 없는 취약점과 더불어 더 근본적으로는 추종오차의 감소가 윤곽오차의 감소를 보장해줄 수 없다는 문제점이 있다.

다른 한편으로 윤곽추적 성능을 향상시키기 위해 기존 공구경로로부터 벗어난 거리인 윤곽오차를 구해 이를 바탕으로 구동축들을 연계하여 제어하는 교차축 연동제어기(cross-coupling controller)가 제안되고 있다.<sup>[20~31]</sup> 이 제

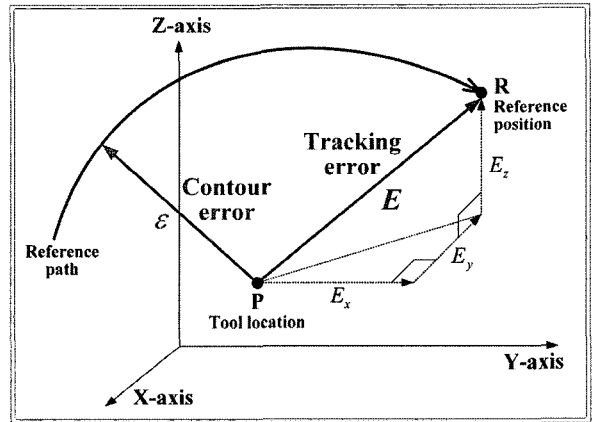


Fig. 2 Tracking and contour errors

어기는 피드백 제어기와 함께 사용되어 윤곽오차를 최소화하는 방향으로 피드백 제어명령을 보정한다. 추종오차를 통해 윤곽오차를 간접적으로 제어하는 독립축 제어기와는 달리, 교차축 연동제어기는 윤곽오차를 직접 반영함으로써 CNC 시스템의 윤곽정확도 향상에 효과적인 것으로 인정되고 있다. 반면에 교차축 연동제어기는 피드백 제어기만을 적용하는 경우와 비교해 추종오차를 다소 증가시키는 경향이 있다.

국외의 대형 CNC 제조업체들은 오래 전부터 다양한 기

능들을 포함하는 고성능 제어기를 꾸준히 개발해오고 있다. 국내에서는 1990년대 이후 다수의 관련 업체들이 CNC 개발을 중단함에 따라 일부 업체만을 중심으로 연구개발이 이루어지고 있다. 전세계 CNC 산업을 주도해온 GE Fanuc은 최신 복합공작기계에 적합한 다축, 다계통(multi-path) 나노 CNC인 Series 30i 모델 A<sup>[32]</sup>를 개발하여 출시하고 있다. 이 모델은 32개의 이송 축과 8개의 스핀들 축을 제어하며, 10계통과 24축을 동시에 제어할 수 있는 GE Fanuc의 최고급 기종이다. 이 CNC의 나노 보간은 16,000,000 pulses/rev의 고분해능 엔코더를 채용한 Fanuc AC 서보모터 *ais* 시리즈와 서보 HRV(High Response Vector) 제어에 의한 코이득 서보시스템(Fanuc servo amplifier *ai* 시리즈)과 더불어 나노 수준의 고속 고정밀 제어를 가능하게 한다.

Siemens의 Sinumerik 840D CNC<sup>[31]</sup>는 최대 10계통과 31개 이송/스핀들 축을 제어하며, 위치에 관련된 오차성분들을 보정 테이블에 저장하여 NC 프로그램의 실행 중에 제어기가 보정값을 취하는 형태의 이른바 sag 오차 보정을 특징으로 한다. 또한 CAD/CAM이 통합된 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 기반의 CNC는 공작기계의

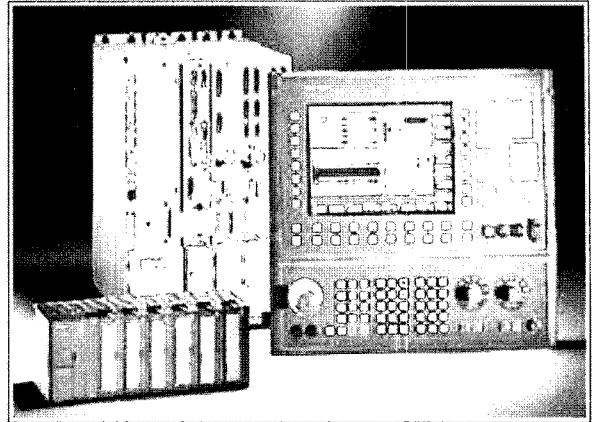


Fig. 4 Siemens Sinumerik-840D

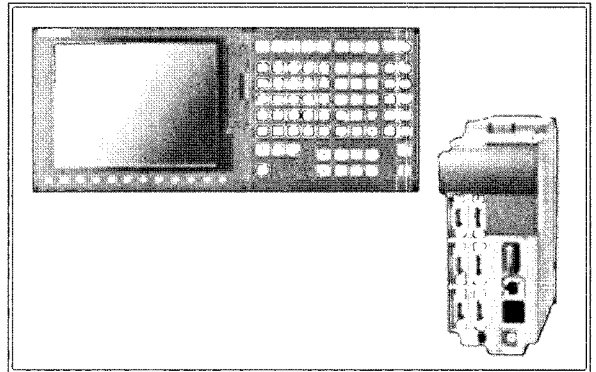


Fig. 5 Mitsubishi CNC 700 series

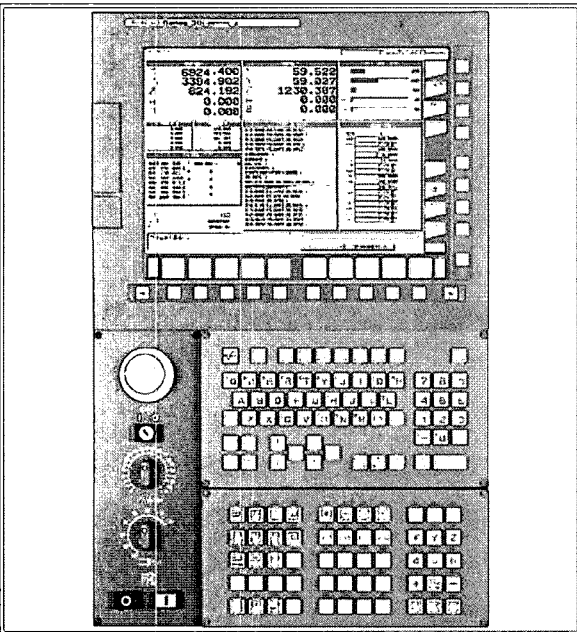


Fig. 3 GE Fanuc series 30i-model A

생산성을 50% 정도까지 향상시켰다고 보고되고 있다.

Mitsubishi Electric의 CNC 700 Series<sup>[34]</sup>는 최대 16축 및 동시 8축 윤곽제어가 가능하며, 나노 보간과 가공면을 매끄럽게 하기 위한 속도제어 기능인 SSS(Super Smooth Surface)와 기계오차 보정을 위한 OMR(Optimum Machine Response) 제어를 특징으로 한다. 그 외에 Heidenhain의 iTNC 530 제어기<sup>[35]</sup>는 5축까지 동시 보간이 가능하며 Siemens 840D 제어기와 유사한 기하학적 오차 보정기능을 제공한다.

이와 같이 대표되는 CNC들은 모두 고속이송시에 윤곽 정확도를 확보하기 위해 짧은 블록처리시간(block processing time)으로 수백에서 1,000 블록 정도를 예견(look-ahead) 제어하는 방식을 채택하고 있다. 이것은 어느 정도 윤곽정확도를 개선시킬 수 있으나, 보간기 수준에

서 구동축의 모션을 조정하는데 그쳐 윤곽추적의 제어라는 관점에서 개회로(open-loop) 시스템에 불과하다고 할 수 있다. 국내외를 막론하고 CNC 제조업체의 상용화된 제품 중에서 현재까지 윤곽추적성능을 직접 고려하여 설계된 CNC는 전무한 실정이다. 일례로 GE Fanuc의 초정밀 나노 CNC에 포함되어 있는 부가기능인 HPCC(High Precision Contouring Control)는 고속가공에서 윤곽오차를 유지하기 위해 공구궤적의 형상에 따라 이송속도의 가감속을 조절하는 수준으로 이것 역시 윤곽추적성능을 직접적으로 제어할 수 없다.

교차축 연동제어기의 경우 1980년대 이후 학계를 중심으로 연구되어져 왔으나, 기 설정된 독립축 제어기의 플랫폼에 독립축 제어기와의 상호영향 등에 대한 포괄적인 해석 없이 결합되어 주로 성능검증에 대한 연구만 이루어진 상황이다. 최근 설계적 관점에서의 연구사례가 소수 발표된 바 있으나,<sup>[28~30]</sup> 윤곽제어 성능만 강조되어 해석되거나 2축 시스템에 국한되었으며,<sup>[28,29]</sup> 거의 유일하게 시도된 3축 시스템에 대한 설계<sup>[30]</sup>에서는 독립축 제어기에 대한 설계 후에 교차축 연동제어기를 설계하는 방식을 취함으로써 두 제어기의 상호작용 및 성능의 연관성을 동시에 고려한 근본적인 접근방법이 될 수 없다. 이것은 기하학적인 윤곽오차에 기반한 교차축 연동제어기의 비선형적인 특성상 체계적인 제어시스템의 해석이 상당히 난해하다는 사실에 기인하며, 이는 현재까지 교차축 연동제어기가 상용화되지 못하고 있는 가장 큰 이유라고 볼 수 있다.

### 3. 제어기 및 사용자 인터페이스의 개방화

앞 절에서 설명한 바와 같이 급변하는 제어기 기술을 CNC에 효율적으로 도입하기 위한 방법으로 개방형 제어기에 대한 연구와 사용자의 접근이 용이한 PC를 기반으로 하는 CNC의 개발이 최근 십여년 동안 활발하게 이루어졌다. 본 절에서는 개방형 제어기의 최근 연구동향에 대하여 소개한다.

개방형에 제어기에 대한 대표적인 연구로는 독일을 중심으로 한 유럽의 OSACA 프로젝트, 일본의 JOP 프로젝트,

미국의 개방형 제어기 사용자 그룹인 OMAC이 있는데 1990년대에 가장 활발한 연구가 이루어져 현재까지 이어져 오고 있으며, 최근에는 중국과 남미 등에서도 비슷한 지역적인 시도가 이루어지고 있다.<sup>[36]</sup>

유럽의 ESPRIT 프로그램의 일환으로서 독일의 Stuttgart 대학을 중심으로 다수의 대학, 연구기관 및 기업체가 참여한 OSACA 프로젝트는 표준적인 개방형 제어기의 구조를 제안하여 CNC는 물론 PLC, 로봇 및 cell-level 제어기를 표준적인 프로세스간 통신 프로토콜을 이용한 구조로 구현하는 것을 목표로 하고 있다. 자동차 산업을 대상으로 OSACA 대응 제어기의 시연이 1998년에 성공한 바 있으며, 그 후 OSACA II, HUMNOS 등의 프로젝트를 통하여 다양한 소프트웨어 모듈을 개발하여 공개하였다. OSACA 프로젝트의 결과는 현재 유사한 조직에 의해서 주도되고 있는 OCEAN 프로젝트로 이어지고 있다. OCEAN은 실시간 Linux와 실시간 CORBA를 이용한 분산제어시스템을 서버 등 고속의 통신이 필요한 제어기 수준까지 적용하는 것을 목표로 하고 있다.<sup>[37,38]</sup>

일본의 개방형 제어기 개발은 OSEC과 JOP(현재는 FAOP)라는 단체를 중심으로 주도되었는데 대표적인 성과는 1999년에 JOP에서 발표한 CNC용 표준 데이터 구조인 PAPI 규격이다.<sup>[39,40]</sup> PAPI는 이후 JIS 규격으로 승인이 되었는데, OSACA가 개방형 제어기 구조를 개발하는 데 주력하였다면, PAPI는 CNC 개발사에 중립적인 데이터 교환을 위한 map이다. 따라서, PAPI map을 이용하는 CNC와 HMI는 그 종류에 관계없이 데이터를 교환할 수 있는 기능을 가지고 있다. 그러나, 현재 일본의 CNC 제조업체는 내부적으로 제어기의 파라미터나 변수를 PAPI API에 맞게 설계하지 않고 wrapper 방식으로 접근하는데 그치고 있어 상업적으로 통용되는 개방형 구조로 보기는 어렵다.

미국의 자동차 업체인 GM의 Power Train 부서를 포함하여 미국의 제조업체를 중심으로 구성되어진 OMAC은 제어기 최종수요자의 이익을 대변하기 위해(즉, 제어기의 호환성 확보를 통한 제어기 업체간의 기술 및 가격 경쟁을 유도하는 것을 주목적의 하나로 하는) 설립된 개방형 제어기 사용자 그룹이다.<sup>[41]</sup> 이는 미국이 영향력 있는 CNC 업체를 보유하지 않고 있는 데도 기인하지만, 제어기의 주요 수

요자인 GM, Boeing, P&G, Nabisco 등 초대형 제조업체의 관점에서 개방형 구조를 통한 제어기의 표준화를 제시하고, 포장 산업에 CNC 도입을 선도하는 등 개방형 제어기 개발에 많은 영향을 미치고 있다. OMAC은 산업용 제어기의 모든 동작을 외부에서 제어 감시할 수 있는 독자적인 OMAC API를 발표하였으며, 포장 산업에서 표준적으로 사용할 수 있는 언어를 독자적으로 개발하고 있다. 최근에는 ISA와 조직을 통합하였다. CNC와 관련해서는 API 외에도 STEP-NC, HMI Working Group(WG)이 활발히 활동하고 있다.<sup>[42]</sup>

위의 세 집단은 약 십년 전부터 다양한 종류의 활동을 통하여 궁극적으로 전세계의 제어기를 개방형으로 설계하고 호환성을 갖게 하고자 많은 노력을 취해왔다.<sup>[43]</sup> 그러나 소개한 바와 같이 세 지역에서의 개방형 제어기의 개발 목적이 다소 차이가 있고, 특히 기업간의 이해관계가 매우 복잡하게 작용하여 10년이 지난 지금에도 기술외적인 이유에 의해서 진정한 의미의 개방형 제어기는 상용화되지 못하고 있는 실정이다.<sup>[44]</sup>

따라서 최근에는 모든 부품이 호환되는 CNC 제어기의 표준화가 어렵다면 사용자 인터페이스 부분에 있어서라도 호환성을 갖게 하려는 노력이 계속되고 있다. OMAC을 중심으로 한 Common HMI API WG는 유럽의 OSACA 및 일본의 JOP와 정기적인 모임을 통하여 세 그룹의 데이터 모델을 XML 형태로 통일하려는 작업을 진행하고 있으며 이를 위한 OSACA와 JOP의 API 형식과 비교 결과는 Working Group의 홈페이지([http://omac.org/wgs/MachTool/HMI-API/HMI-API\\_default.htm](http://omac.org/wgs/MachTool/HMI-API/HMI-API_default.htm))를 통하여 찾아볼 수 있다. Common HMI API WG가 추구하는 목표는 향후 모든 제어기 내부의 데이터 구조와 변수명을 표준화시키는 것으로 이를 위해 STEP-NC의 규격을 참조하고 있으며, OPC를 이용한 CNC의 데이터 전송에 대해 논의가 진행 중이다.<sup>[45]</sup>

이상의 노력이 아직까지 상업화에는 결실을 보지 못하고 연구차원에서만 성과를 보여주고 있지만 개방형 제어기에 요구되는 성능을 충실히 따르는 일부 PC를 활용한 제품도 제작되고 있다. 그 예로서, Roy-G-Biv사는 상당수의 상용 CNC에 직접 연결하여 common HMI를 구현할 수 있는 제어용 소프트웨어를 상용화하였으며,<sup>[46]</sup> MDSI에서는

상당수의 API에 사용자가 직접 접근할 수 있고 HMI를 직접 설계할 수 있는 PC기반 개방형 제어기를 상용화하였다.<sup>[47]</sup> 또한, PC기반의 사용자 및 네트워크 인터페이스는 이제 거의 모든 CNC 회사가 제공하고 있다. 이러한 기술은 향후 산업계의 환경 변화에 따라 표준화가 가능한 구조를 가지고 있어 궁극적으로 모든 부품 및 소프트웨어의 호환이 가능한 개방형 제어기가 개발될 수도 있다는 기대를 갖게 한다.

## 4. 결론

CNC를 이용한 가공정밀도 향상에 대한 노력은 국내에서 계속되고 있다. 정밀함을 요하는 금형 등 제품의 가치는 가공된 정밀도에 따라 그 부가가치의 차가 크기 때문이다. 특히 최근에는 작고 복잡한 형상의 부품에 대한 요구가 급격히 증대되고 있으며, 이러한 부품의 가공에 있어 고정밀도를 효율적으로 실현할 수 있는 방법 중의 하나가 바로 정교한 서보와 다축제어기의 개발이다. 국외의 대형 CNC 업체들은 오래 전부터 다양한 기능들을 포함하는 고성능 제어기를 꾸준히 개발해오고 있는 반면, 국내에서는 일부 업체만이 연구개발을 진행하고 있다. 개방형 CNC 제어기의 사용이 국내외에서 활성화되고 IT 기술이 CNC에 본격적으로 도입되기 시작하는 현상은 국내 CNC 산업의 재도약의 좋은 계기가 될 수 있다. 국내 일부 기업 및 연구기관의 필드버스와 PC기반 제어기 관련 기술은 이미 국제적인 수준을 갖추고 있으나 국제무대 특히 국제표준화와 관련된 분야에 있어서의 활동은 아직 미진하다. 현재 다수의 국내 제조업체들이 노후된 기존 CNC 시스템을 교체해 공작기계를 재구성하려는 움직임을 보이는 시점에서, 이 분야에서 외국제품과의 기술격차를 줄이고 우리나라의 산업경쟁력 강화와 대외무역적자의 개선을 위해서는 서보 및 제어 기술 개발에 대한 장기적이고 지속적인 국가적 차원의 지원이 시급하고 산·학·연의 공동 노력이 절실히 요구된다. 또한 발달된 통신 인프라를 활용하여 개방형 CNC 분야 및 IT 활용문제에서 국제협력이 좀 더 관심을 기울일 필요가 있을 것이다.

---



---

**참고 문헌**


---



---

1. Koren, Y., Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-Hill, 1983.
2. Koren, Y., "Control of Machine Tools," ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 749-755, 1997.
3. Bin, H. Z., Yamazaki, K. and De Vries, M. F., "A Microprocessor-Based Control Scheme for the Improvement of Contouring Accuracy," Annals of the CIRP, Vol. 32, pp. 275-279, 1983.
4. Doraiswami, 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, pp. 56-62, 1984.
5. 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, Houghton, Michigan, pp. 447-453, 1984.
6. Makino, H. and Ohde, T., "Motion Control of the Direct Drive Actuator," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 375-387, 1991.
7. 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, Anaheim, California, pp. 123-128, 1986.
8. Pritschow, G. and Philipp, W. "Direct Drives for High-Dynamic Machine Tool Axes," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 413-416, 1990.
9. Schepper, F. and Yamazaki, K., "Application of ASIC-Technology to Mechatronics Control: Development of the Flexible Servo Peripheral Chip," Annals of the CIRP, Vol. 37, pp. 389-392, 1988.
10. 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.
11. Yamazaki, K., "Development of Flexible Actuator Controller for Advanced Machine Tool and Robot Control," Annals of the CIRP, Vol. 36, pp. 285-288, 1987.
12. Haack, B. and Tomizuka, M., "The Effect of Adding Zeros to Feedforward Controllers," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 6-10, 1991.
13. Masory, O., "The Effect of a Velocity Feed Forward Loop on Contour Accuracy," Proceedings of the 7th International Motor Conference, pp. 418-428, 1985.
14. Pak, H. A., "Adaptive Matching and Preview Controllers for Feed Drive Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 316-320, 1991.
15. 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, pp. 349-354, 1987.
16. Tomizuka, M., Chen, M. S., Renn, S., and Tsao, T. C., "Tool Positioning for Noncircular Cutting with Lathe," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 109, pp. 176-179, 1987.
17. Tomizuka, M., "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 109, pp. 65-68, 1987.
18. Tomizuka, M., "Synchronization of Two Motion Control Axes under Adaptive Feedforward Control," Proceeding of the ASME: Adaptive and Learning Control, DSC-Vol. 21, pp. 1-8, 1990.
19. Weck, M. and Ye, G., "Sharp Corner Tracking Using the IKF Control Strategy," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 437-441, 1990.
20. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and

- Control, Vol. 102, pp. 265-272, 1980.
21. Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Feed Drive Servomechanisms," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 140-148, 1989.
  22. Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 225-232, 1990.
  23. Chuang, H.-Y. and Liu, C.-H., "Cross-Coupled Adaptive Feedrate Control for Mutiaxis Machine Tools" ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 451-457, 1991.
  24. Koren, Y. and Lo, C. C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 371-374, 1991.
  25. Erkokmaz, K. and Altintas, Y., "High Speed Contouring Algorithm for CNC Machine Tools," Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 64, pp. 463-469, 1998.
  26. Chiu, G. T.-C. and Tomizuka, M., "Coordinated Position Control of Multi-Axis Mechanical Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 120, pp. 389-393, 1998.
  27. Lee, H. C. and Jeon, G. J., "Real-time Compensation of Two-dimensional Contour Error in CNC Machine Tools," Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 623-628, 1999.
  28. Yeh, S. S. and Hsu, P. L., "Theory and Application of the Robust Cross-Coupled Design," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 121, pp. 524-530, 1999.
  29. Shih, Y.-T., Chen, C.-S., and Lee, A.-C., "A Novel Cross-Coupling Control Design for Bi-Axis Motion," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp. 1539-1548, 2002.
  30. Yeh, S. S. and Hsu, P. L., "Analysis and Design of Integrated Control for Multi-Axis Motion Systems," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, pp. 375-382, 2003.
  31. Jee, S. and Koo, T., "3-Axis Coupling Controller for High-Precision/High-Speed Contour Machining," Transactions of the KSME, A, Vol. 28, pp. 40-47, 2004.
  32. <http://www.fanuc.co.jp/en/product/cnc/30i31i32i/index.html>
  33. Siemens AG, SINUMERIK 840D/840Di/810D Advanced Programming Guide, 2004.
  34. K. Kuchiki and M. Kachi, "A Nanometer Control CNC System for Machine Tools," Mitsubishi Electric ADVANCE, Vol. 106, pp. 5-9, 2004.
  35. Heidenhain, iTNC 530 Catalog, 2005.
  36. Pritschow, G. et al., "Open Controller Architecture - Past, Present and Future," Annals of the CIRP, Vol. 50, pp. 1-8, 2001.
  37. Pritschow, G. et al., "Open System Controllers - A Challenge for the Future of the Machine Tool Industry," Annals of the CIRP, Vol. 42, pp. 449-452, 1993.
  38. <http://www.osaca.org/>
  39. <http://www.mstc.or.jp/faop/>
  40. Japan FA Open System Promotion Group, PAPI, MSTC, 1999.
  41. GM Powertrain, Open, Modular Architecture Controls at GM Powertrain, 1996.
  42. <http://omac.org/>
  43. Koren, Y. et al., Open Architecture Control Systems - Summary of Global Activity, ITIA Series, Vol. 2, 1998.
  44. Katz, R. et al., Open Architecture Control Technology Trends, ERC/RMS Report #35, The University of Michigan, 2000.
  45. [http://omac.org/wgs/MachTool/HMI-API/HMI-API\\_default.htm](http://omac.org/wgs/MachTool/HMI-API/HMI-API_default.htm)
  46. <http://www.roygbiv.com/>
  47. <http://www.mdsi2.com/>