

◆ 특집 ◆ 입력성형기법의 응용

공작기계의 서보제어와 입력성형기법

Input Shaping for Servo Control of Machine Tools

김병섭^{1,✉}Byung-Sub Kim^{1,✉}¹ 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 (Department of Ultra-Precision Machines and Systems, Korea Institute of Machinery & Materials)

✉ Corresponding author: bkim@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7109

Manuscript received: 2011.7.15 / Accepted: 2011.7.30

Servo control loops are a core part in the control architecture of machine tools. Servo control loops manage acceleration, velocity and position of all the axes in a machine tool based on commands. The performance of servo control loops sets the basis for quality of production parts and cycle time reduction. First, this paper presents a general control architecture of machine tools and several control schemes in literature, which can be applicable to machine tools control; including Zero Phase Error Tracking Control (ZPETC) and Cross Coupling Control (CCC). After that, modern control strategies to mitigate the problem of high speed machining are reviewed. In high speed machining, high accelerations excite the machine structure up to high frequencies, thereby exciting the structure's modes of vibration. These structural vibrations need to be damped if accurate positioning or trajectory following is required. Input shaping is an attractive option in dealing with structural vibrations. The advantages and drawbacks of using input shaping technique for machine tools are discussed in detail.

Key Words: Servo Control (서보 제어), Machine Tools (공작기계), Tracking Control (추적 제어), Contour Control (윤곽 제어), Input Shaping (입력 성형)

1. 서론

공작기계는 많은 생산 공정의 중심이 되는 중요한 부분으로 생산품의 품질과 비용 절감에 대한 직접적인 요구가 지속되어 오고 있다. 지난 수십 년간에 걸쳐 숙련된 생산 기술자의 부족과 고품질 제품에 대한 수요는 공정 자동화를 위한 공작기계 제어기술 발전의 동력이 되어 왔으며, 1970년대 초반 컴퓨터 수치 제어(Computer Numerical Control: CNC) 공작기계가 나타나면서 생산 시스템에 큰 변화를 이끌어 내었다.

현대적 공작기계의 제어 구조는 크게 Fig. 1에

나타낸 것처럼 적응 제어(Adaptive Control), 보간(Interpolation), 서보 제어(Servo Control)의 3개 레벨로 나눌 수 있다.¹

적응 제어 구간에서는 주어진 조건을 만족시키거나 힘, 파워 따위의 공정 변수들에 의해 만들어지는 비용 함수(Cost Function)를 줄이기 위하여 피드(Feed) 또는 속도 등과 같은 프로그램화 변수들의 값을 설정한다. 가장 많이 사용되는 적응 제어는 적응 제어 최적화(Adaptive Control Optimization)와 제한식 적응 제어(Adaptive Control with Constraint)가 있다.² 공구 상태, chatter 발생, 표면 상태 모니터링과 같은 기술이 적용되는 제어

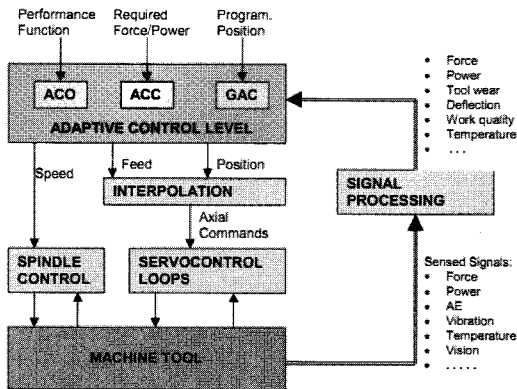


Fig. 1 Control architecture of a modern machine tool (Koren¹)

구간으로 여러가지 센서를 이용한 상태 측정과 신호처리가 이루어진다. 이를 바탕으로 절삭력 제어, 채터 억제, 절삭 온도 및 공구 상태 보정과 같은 기술이 적용된다.

보간 구간에서는 원하는 공구 궤적을 얻기 위하여 구동축 간의 좌표화된 운동을 설정한다. 공구 궤적은 적절한 보간 방법에 따라 불연속 점들로 궤적을 나누고 그 점들을 바탕으로 각 축의 운동 명령값들을 생성한다. 대표적인 보간 방법으로는 선형 보간(Linear Interpolation), 원형 보간(Circular Interpolation), 복합 표면 보간(Complex Surface Interpolation) 등이 있으며, 공구 처짐과 같은 기하학적 오차 보정을 위해 온라인(On-line)으로 공구 궤적을 보상하는 경우 실시간 곡선 보간(Real Time Curve Interpolation)이 사용되기도 한다.

서보 제어 구간은 속도, 위치, 가속도에 대한 조건에 맞도록 기계의 축들을 실제로 제어하는 역할을 한다. 많은 경우에 공작기계의 운동축은 2 차 시스템(Second Order System)으로 모델링 될 수 있는데 모델에 맞게 설계된 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어가 널리 사용되고 있다. 공정상의 외란(External Disturbances), 모델의 불확실성(Model Uncertainties), 비선형(Non-linearities) 특성들 때문에 단순한 제어기 보다 좀 더 뛰어난 성능을 발휘하는 현대적 제어기법이 요구되기도 하지만, CNC 기계에 장착되는 제어기가 현대적 제어기법을 수용하는데 있어서 유연성이 떨어지는 경우가 많고 PID 제어기가 사용하기 쉽고 넓은 제어영역을 커버할 수 있으므로 현재까지도 대부분의 공작기계에서는 PID 제어기를 사용하고 있다.

본 논문에서는 PID 제어기 외에 외란이나 모델의 불확실성과 관련된 공작 기계의 제어 문제들을 극복할 수 있는 제어 기법들을 소개한다. 그리고 고속 가공과 정밀 가공에 응용될 수 있는 구조 진동 억제 제어 기법, 특히 입력성형 기법이 공작기계 분야에 어떻게 사용될 수 있는지 장단점을 분석하여 제시한다.

2. 공작기계 이송축의 제어 기법

이송계는 CNC 에서 발생된 이송명령을 바탕으로 각 운동축을 특정 속도로 움직이거나 특정 위치에 이송 테이블을 위치시킨다. 이송계는 다양한 부품으로 이루어져 있는데 Fig. 2 에 나타내었듯이 크게 모터 및 모터 드라이브, 운동 가이드와 테이블로 구성되는 운동 유니트, 위치 센서, 서보 제어기로 나눌 수 있다. 서보 제어기는 넓은 범위의 속도 제어, 외란 존재시의 정밀한 위치 제어, 빠른 응답성, 윤곽 제어를 위한 다수 축간의 정밀 좌표 제어를 수행해야 한다.

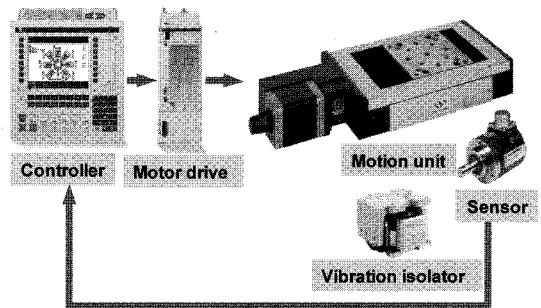


Fig. 2 Feed drive in machine tools

단축용 서보 제어기의 일반적인 구조는 내부 속도 루프(Loop)와 외부 위치 루프의 직렬 형태로 되어있는 경우가 많다. 제어 설계시 위치 제어 루프의 대역폭 크기(Bandwidth), 정상 상태(Steady State)의 위치 정밀도, 외란에 대한 대항성(Disturbance Rejection) 등을 지표로 삼아 제어기를 설계한다. 또한 추종성(Tracking)을 향상시키기 위하여 앞먹임(Feedforward) 제어기를 추가하기도 한다.

실제 공작기계에서는 PID 제어기와 더불어 단순한 형태의 가속도/속도 앞먹임 제어기를 사용하는 경우가 대부분이라고 할 수 있으며, 이외에 특

별히 운동 제어 분야에서 많이 응용되고 있는 앞머신 제어기로는 ZPETC(Zero Phase Error Tracking Controller)³ 를 들 수 있는데 ZPETC 는 영점(Zero) 과 극점(Pole) 의 상쇄를 이용하여 위상 처짐이 0 (Zero Phase)이 되도록 하는 구조를 갖고 있다.

윤곽 정밀도는 다축 이송의 중요한 성능 지표로 윤곽 오차를 줄이기 위한 대표적인 제어 기술로는 Cross-Coupling Control(CCC)를 꼽을 수 있다. 이 제어 기법은 Koren^{4,5} 에 의해 제안되었으며 모든 축으로부터 오는 되먹임(Feedback) 센서 신호를 이용하여 윤곽 오차에 대한 최적의 보상이 되도록 각축에 교정 신호를 발생한다.

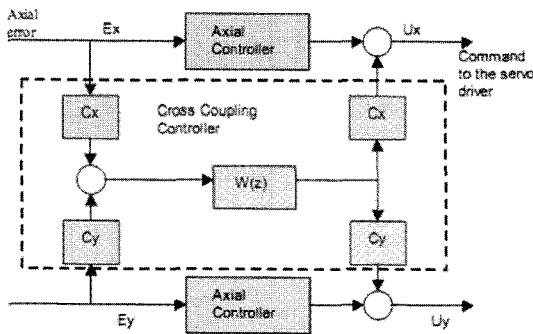


Fig. 3 Cross Coupling Controller

밀링머신에서 수행된 실험을 통하여 제어기 성능에 대해 다음과 같은 결과가 보고된 바 있다.¹

- ZPETC 은 원과 같은 비선형 윤곽을 추종할 능력을 보였지만 모델에 매우 민감하여 모델이 부정확한 경우에 외란에 대한 대항성이 좋지 않음.
- PID 제어기는 천이 상태(Transient State)에서 큰 오버슈트(Overshoot)를 보였으며 이송속도가 클 경우에 추종 오차(Tracking Error)가 커짐.
- CCC 는 선형과 원형 절삭에 있어서 다른 제어기보다 뛰어난 성능을 보임.

또한, 탁상형 밀링머신에서 수행된 실험에서도 CCC 는 H_{∞} 제어기와 함께 2 축 원형보간 운동시 윤곽 오차를 줄이는데 ZPETC, PID 보다 뛰어난 성능을 보였다.⁶

대부분의 이러한 제어 기법들은 제어 게인(Gain)값들이 고정되어 있으며 특정 플랜트 모델을 대상으로 작동되도록 설계된다. 서보 제어기의 게인값들이 기계 상황에 맞도록 계속하여 수정되도록 하는 적응제어 기법도 많이 연구되고 있으며 마찰과 절삭력과 같은 시간 종속적 변수 및 비선

형성의 영향을 줄이는데 효과적으로 사용될 수 있다.⁷

3. 고속 기계가공과 제어

밀링 작업은 자동차와 항공 산업에서 절대적으로 많이 사용되는 공정이다. 특히, 항공 산업에서는 알루미늄, 타이타늄 합금 블록에서 원재료의 95% 이상을 밀링 작업으로 제거하여 가볍고 큰 구조체를 만드는 경우도 있다. 이러한 경우에 가공 시간을 줄이기 위하여 재료 제거율(Material Removal Rate: MRR)을 최대화하는 것이 중요해진다. MRR 은 칩두께, 절삭속도, 이송속도 등과 같은 절삭 변수들과 직접적인 관련이 있으며 이들 절삭 변수들은 기계 성능과 구조, 공구 수명과 같은 요소들에 의해 제한을 받는다. 고속 가공(High Speed Machining)이라고 일반적으로 받아들여지는 영역은 주축 속도가 10,000 ~ 40,000 rpm 이상이다. 고속 가공에서는 증가된 주축 속도에 비례하여 이송 속도가 커져야 하는데, 높은 가속 프로파일(Profile)이 필요한 공구 경로를 사용하여 짧고 반복적인 부품을 가공하는 경우에 문제를 발생시킬 수 있다. 일반적인 저속 CNC 기계의 제어기 주파수 대역은 약 10~25 Hz 이며, 중력가속도 (9.8 m/sec^2) 혹은 그 이상의 가속 능력을 내려면 위치 제어 루프의 주파수 대역이 100 Hz 정도로 커져야 한다.

Erkokmaz 와 Altintas^{8,9} 는 2 차 모델을 바탕으로 고속 가공에 대한 제어기 설계 방안을 제시하였는데 극점 위치 제어기(Pole Placement Controller)에 절삭력, 드라이브 변수들의 변화에 대응하기 위한 외란 제거기를 포함했다. ZPETC 를 사용하여 주파수 대역을 30 Hz 정도로 늘렸으며 코너 부위에서 마찰에 기인한 추종 오차를 줄이기 위하여 예측되는 마찰력을 선보정하는 앞머신 마찰 보상기(Feed Forward Friction Compensation)를 추가적으로 사용하였다. 실험을 통하여 윤곽 정밀도 및 고속 가공시 전체적인 성능에 영향을 미치는 제어 요소들의 공헌도를 분석하여 제시하였다.

고속 기계가공시의 높은 가속도는 기계 구조를 고주파수 영역까지 가진하여 기계의 진동 모드들이 영향을 받는다. 이 같은 구조 진동은 정밀한 위치 제어 및 쾌적 추종성을 확보하기 위하여 감쇠되어야 한다. 구조 진동을 회피하기 위하여 많은 기법들이 제안되었는데 Iwasaki¹⁰ 의 초기값 보상(Initial Value Compensation), Chen¹¹ 의 가속도 되먹

입(Acceleration Feedback), Jones¹²와 Fortgang¹³의 입력 성형(Input Shaping), Erkorkmaz¹⁴의 노치 필터(Notch Filter) 응용 기법 등이 있다.

4. 공작기계에서의 입력 성형 기법

많은 종류의 기계에 있어서 이송 운동의 주파수가 기계의 고유 진동수와 일치하면 진동이 발생한다. 기계적인 구성 요소가 고강성이라 하더라도 서보 펌프 제어기가 그 자체의 진동 주기를 덧 붙이는 경우도 있을 뿐만 아니라 일반적으로 기계 구조의 고강성화는 질량 및 비용 측면에서 한계가 존재한다. 기계에 들어가는 제어 명령을 적절한 방법으로 성형하여 원하지 않는 기계의 구조 진동이 발생하지 않도록 하는 것이 입력 성형 기법이다.¹⁵

입력 성형 기법은 입력 명령의 특정 성분에 의해서 유발된 진동이 다른 성분에 의해 유발된 진동에 의해 서로 상쇄되도록 한다.

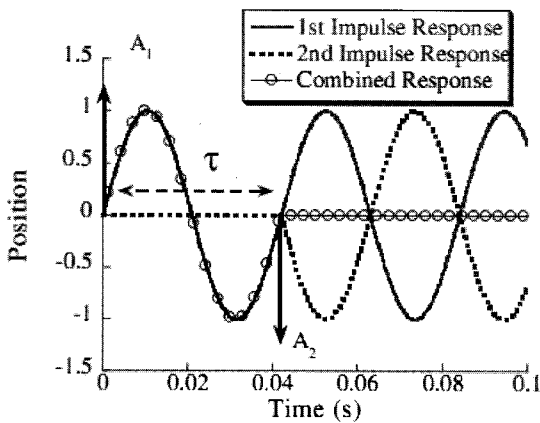


Fig. 4 Destructive interface of dynamic response (Fortgang¹³)

예를 들어, 비감쇠 2 차 시스템(Undamped Second Order System)에 단위 임펄스(Unit Impulse) A₁이 주어졌을 때 그 응답이 Fig. 4의 실선과 같이 나타난다고 하면, 반대방향에 같은 크기로 A₂가 주어지면 그 응답은 점선처럼 나타나게 된다. A₁과 A₂가 모두 시스템에 입력으로 주어질 때, A₂의 적용 시점을 조정하여 A₁의 동적 응답을 A₂의 동적 응답으로 상쇄하도록 하면 시스템의 모든 진동이 없어질 수 있는데 이러한 원리를 이용하는 것이 입력 성형 기법(Input Shaping)이다.

일반적으로 고유 진동수 ω 와 감쇠 계수(Damping Coefficient) ζ 로 운동 특성이 정의될 수 있는 단순 2 차 시스템을 대상으로 입력 형성기가 설계된다. 임펄스 배열이 단순 2 차 시스템에 주어지면 임펄스에 의한 잔여 진동은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(\omega, \zeta) = e^{-\zeta\omega t} \sqrt{C(\omega, \zeta)^2 + S(\omega, \zeta)^2} \tag{1}$$

여기서

$$C(\omega, \zeta) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega t_i} \cos(\omega_d t_i), \tag{2}$$

$$S(\omega, \zeta) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega t_i} \sin(\omega_d t_i)$$

A_i는 임펄스의 크기, t_i는 임펄스 작용 시간, $\omega_d = \omega\sqrt{1-\zeta^2}$ (Damped Natural Frequency).

식 (1)이 0 이 되기 위해서는 식 (2)가 동시에 독립적으로 0 이 되어야 하며 임펄스 2 개를 사용하여 위의 식들을 0 으로 만드는 경우에,

$$\begin{aligned} 0 &= A_1 + A_2 e^{\zeta\omega t_2} \cos(\omega_d t_2), \\ 0 &= A_2 e^{\zeta\omega t_2} \sin(\omega_d t_2) \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)의 해는 다음과 같이 얻어진다.¹⁶

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & 1+K \\ 0 & 0.5T_d \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서

$$\begin{aligned} K &= \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right), \\ T_d &= \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}} \end{aligned} \tag{5}$$

식 (4)와 (5)에 의해 만들어지는 입력 성형기(Input Shaper)를 Zero Vibration(ZV) 입력 성형기라 부른다.

실제 시스템을 대상으로 입력 성형기의 설계를 할 때 고유 진동수 ω 와 감쇠 계수 ζ 를 100% 정

확히 알 수 없으므로 오차를 감안하여 입력 성형기의 강건함을 증가시키고자 식 (1)의 미분이 0 이 되도록 하는 제한식을 부가하여 입력 성형기를 설계하기도 한다. 이런 입력 성형기를 Zero Vibration and Derivative(ZVD)라 하며 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{D} & \frac{2K}{D} & \frac{K^2}{D} \\ 0 & 0.5T_d & T_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서

$$D = 1 + 2K + K^2 \quad (7)$$

ZVD 의 잔여 진동 크기를 노멀라이즈(Normalize) 된 주파수와 감쇠 계수에 대하여 그림으로 표시하면 Fig. 5 처럼 나타내지며 ZVD 는 ZV 에 비하여 약 5% 정도 향상된 주파수 둔감성을 갖는다.¹⁶ 그림에서 알 수 있듯이 입력 성형 기법은 감쇠가 존재하는 시스템에서 완벽한 무진동을 만들어 주지 않으며 감쇠 계수가 작은 경우에 보다 큰 진동 감쇠 효과를 나타낸다.

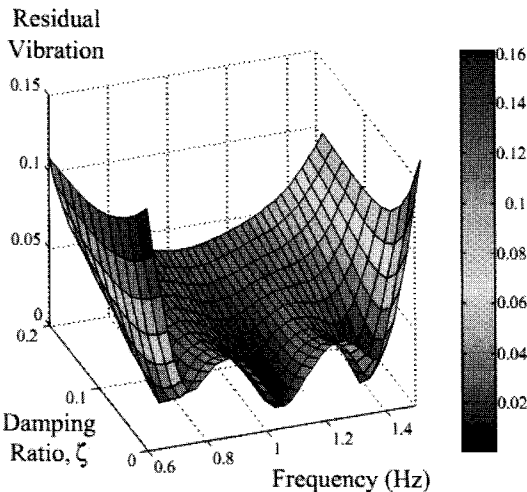


Fig. 5 Robustness of ZVD to frequency and damping errors (Singh¹⁶)

입력 성형기는 잔여 진동 최소화를 목적으로 안정한 시스템(Stable System)에 적용되며 참조 명령(Reference Command)을 실시간 성형 혹은 시간 지연 필터링을 하여 Fig. 6 과 같이 컨벌루션(Convolution)된 명령이 제어하고자 하는 대상 기계의 서보 제어 루프에 들어가도록 구현된다.

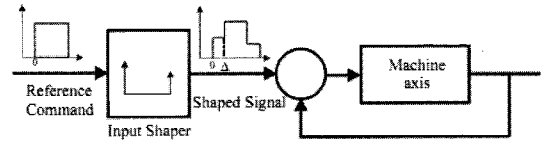


Fig. 6 Input shaping a pulse input (Peláeza¹⁵)

입력 성형 과정은 요구되는 명령 궤적을 변경하기 때문에 입력 성형 기법이 추종 오차를 오히려 크게 만들 수도 있다. 그러나 이것은 위치가 특정 시간 함수로 표시되어야 하는 시간적 궤적(Temporal Trajectory)에만 해당되며 궤적 자체의 모양이 중요한 공간적 궤적(Spatial Trajectory)에는 적용되지 않는다. 공작 기계의 경우 대부분 공간적 궤적에 의한 부품의 형상 가공이 가장 중요하므로 문제가 되지 않는다.

공작 기계는 보통 다축으로 구성되며 이들이 서로 다른 크기의 입력 성형기를 필요로 할 경우에 각 축의 시간 지연이 동기화 되지 못하면 결과적으로 공간 궤적의 모양에 나쁜 영향을 미치게 된다. 이 경우 가능한 한 가지 해결책은 설계된 각 축의 입력 성형기를 모두 컨벌루션하여 하나의 입력 성형기로 만들어서 모든 축에 적용하는 것이다. 이렇게 하면 전체적인 시간 지연이 커지기는 하지만 동기화 문제는 간단하게 해결할 수 있다.

입력 성형기를 사용하면 잔여 진동의 감소로 많은 경우에 추종 오차를 작게 만들지만 입력 성형기를 거친 참조 명령은 필터를 거쳤기 때문에 당연히 원래의 모습과 차이를 보인다. 날카로운 모서리를 나타내는 공구 궤적이 필요한 경우 입력 성형기를 통해서 참조 명령을 직접 처리하지 않고 참조 명령의 가속도나 속도 프로파일을 처리하여 보다 좋은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 7 은 ESTII 마이크로 밀링머신을 사용하여 공작물의 표면 가공을 한 후 입력 성형 기법 적용 전과 후의 표면 정도를 실측하여 비교한 그림이다. Fortgang¹³ 은 가속도 프로파일을 입력 성형기로 처리하여 표면 가공을 수행하였는데 약 58%의 표면 프로파일 변화를 감소시켰다. 실험 결과에서 보이는 표면의 고주파 성분은 절삭 프로세스와 공구의 런아웃(Runout)에 기인한 것으로 추정된다.

Peláeza¹⁵ 는 입력 성형 기법이 직교형 기계(Cartesian Machine)에 적용되었을 때 거의 모든 이송 속도에서 2 차원 원형과 사각형 궤적을 추종하는데 성능 향상을 보임을 실험을 통하여 입증하였다. 또한 ZVD 가 진동 감소 효과 및 모델링 오차

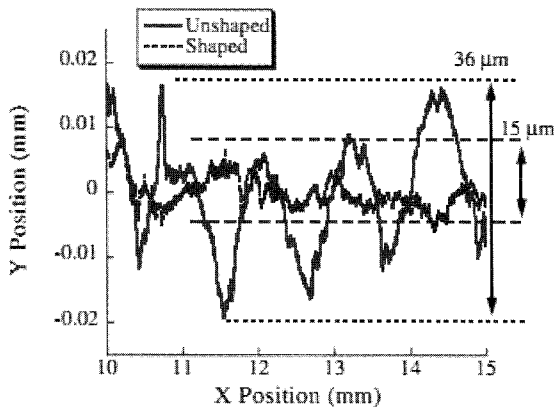


Fig. 7 Physical part surface with and without input shaping (Fortgang¹³)

에 대한 강건성에서 균형을 이루고 있다고 평가하였다.

5. 결론

서보 제어 루프는 공작 기계의 핵심으로 가공품의 질과 양을 결정짓는 주요 인자이다. 본 논문에서는 공작기계의 제어 구조를 소개하고 PID 제어기 이외에 외란이나 모델의 불확실성에 대응하여 보다 나은 성능을 보이는 여러 가지 제어 기법을 소개하였다. 또한 고속 기계 가공시 필요한 제어 기법, 특히 입력 성형 기법을 소개하고 공작 기계 적용 사례 및 적용 방법을 제시하였다.

참고문헌

1. Koren, Y., "Control of Machine Tools," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, No. 4B, pp. 749-755, 1997.
2. Sathyanarayanan, G., "Adaptive Control of Grinding - Technology and Research," *SME, Technical Paper: MR86-638*, 1986.
3. Tomizuka, M., "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 109, No. 1, pp. 65-68, 1987.
4. 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.
5. Koren, Y. and Lo, C. C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," *Annals of CIRP - Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 1, pp. 371-374, 1991.
6. Kim, B.-S., Ro, S.-K. and Park, J.-K., "Development of a 3-axis desktop milling machine and a CNC system using advanced modern control algorithm," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 1, pp. 39-47, 2010.
7. Yao, B., "Advanced Motion Control: An Adaptive Robust Control Framework," *Proceedings of 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 565-570, 2004.
8. Erkorkmaz, K. and Altintas, Y., "High Speed CNC System Design, Part I: Jerk Limited Trajectory Generation and Quintic Spline Interpolation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 9, pp. 1323-1345, 2001.
9. Erkorkmaz, K. and Altintas, Y., "High Speed CNC System Design, Part III: High Speed Tracking and Contouring Control of Feed Drives," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 11, pp. 1637-1658, 2001.
10. Iwasaki, M., Hirose, N., Kawafuku, M. and Hirai, H., "Residual Vibration Suppression Using Initial Value Compensation for Repetitive Positioning," *Proceedings of 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 571-576, 2004.
11. Chen, Y. and Tlustý, J., "Effect of Low-Friction Guide-Ways and Lead-Screw Flexibility on Dynamics of High-Speed Machines," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 353-356, 1995.
12. Jones, S. D. and Ulsoy, A. G., "Approach to Control Input Shaping with Application to Coordinate Measuring Machines," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 121, No. 2, pp. 242-247, 1999.
13. Fortgang, J., Singhose, W., De Juanes Marquez, J. and Perez, J., "Command Shaping for Micro-Mills and CNC Controllers," *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 7, pp. 4531-4536, 2005.
14. Erkorkmaz, K. and Altintas, Y., "Precision Tracking Controller Design for High Speed Feed Drives," *Proceedings of ASME International Mechanical*

- Engineering Congress & Exposition, pp. 657-668, 2005.
15. Peláeza, G., Pelaeza, Gu., Perezb, J.M., Vizánb, A. and Bautistab, E., "Input Shaping Reference Commands for Trajectory Following Cartesian Machines," Control Engineering Practice, Vol. 13, No. 8, pp. 941-958, 2005.
 16. Singh, T. and Singhose, W., "Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures," Proceedings of the American Control Conference, Vol. 3, pp. 1717-1731, 2002.