

구속조건에 의한 선삭작업의 적응제어 시스템에 관한 연구

이 수 한

기계공학과

(1982. 6.30 접수)

〈요 약〉

구속적응제어 시스템은 수치제어 공작기계의 효율적인 이용을 위한 한 방법이며, 구속 조건과 제어 방법은 시스템의 효율에 큰 영향을 끼친다. 선삭에 대한 본 연구에서는 절삭력, 모터의 동력, 표면 거칠기, 이송 및 주축회전속도 등의 최대 허용치가 구속조건으로 선택되었으며, 경제적 절삭을 위한 제어 방법이 제시되었다. 절삭깊이가 변하는 모델에 대한 전산 시뮬레이션으로 제시된 적응제어에 의하여 성능이 향상됨을 보였다.

A Study on the Adaptive Control Constraints System for Turning Process

Lee Soo Han

Dept. of Mechanical Engineering

(Received June 30, 1982)

〈Abstract〉

An adaptive control constraints system of NC machine is one of the approaches to improve the efficiency of the cutting process. The constraints and the control strategy have great effect on its performance. In this study of turning process, the cutting force, the power of motor, the surface roughness, the feedrate and the spindle speed are selected as the constraints, and an economical control strategy is adduced. The results of the computer simulation by the mathematical model that deals with variable depth of cutting process show that the adaptive control system increases the performance of NC machine tool.

I. 서 론

수치제어 공작기계의 출현은 금속의 절삭가공 기술에 획기적인 발전을 가져왔다. 그러나 초기 설비 투자 및 관리유지비가 기존의 공작기계에 비하여 크다는 문제점을 가지고 있어 시스템의 효율적인 운용이 필요하다. 그러기 위해서는 적절한 절삭조건 하에서 작업이 행해져야 되는 데 통상적으로는 Handbook이나 사용자의 경험에 의하여 절삭 조건이 결정되므로 수치제어 공작기계를 효율적으로 사용

할 수 없다. 그렇게 결정된 절삭조건은 일 단위 공정은 일정한 절삭조건하에서만 가공되므로 동일한 재질의 가공물이라도 전체적으로 균일하지 않는 경우가 흔히 있어 가공시에 기계에 무리를 가져올 수 있고 또한 절삭 깊이가 변하는 공정에서는 기계와 사용자를 보호하기 위해서 최대 깊이를 기준으로 절삭조건이 주어지므로 절삭깊이가 작은 곳에서는 기계를 충분히 이용하지 못한다. 따라서 수치제어 공작기계의 효율적인 사용을 위해서는 가공중에 절삭 현상의 변화들을 검출하여 자동적으로 그 상황에 적당한 절삭조건으로 작동하게 하는 것이 바람

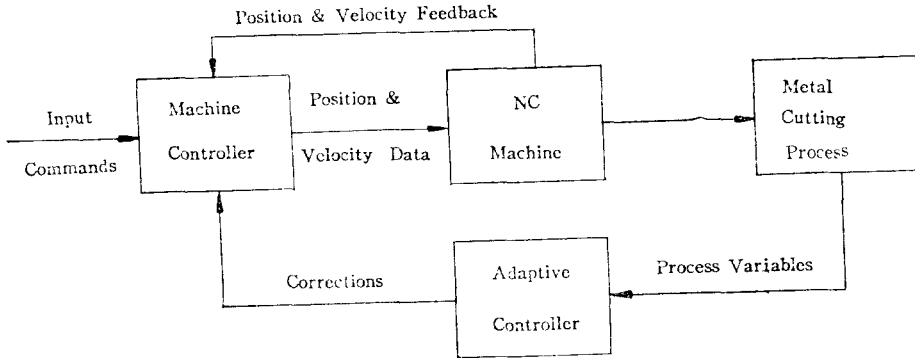


Fig.1. A Schematic Diagram for Adaptive Control System.

적하다. 이러한 것이 공작기계의 적응제어 시스템이다. Fig.1은 적응제어 공작기계의 구성을 보인 것으로 기존 수치제어 공작기계와의 차이는 적응제어 귀환회로가 있는 점이다.

이 분야에 대한 연구는 1963년 R.M. Centner와 J.M. Idelson이 평가기준으로 설정한 성능인수에 의하여 최적절삭을 행하게 한 수치제어 밀링기에서 시작되었다. (1) 그 이후 성능인수를 최대화하는 여러 연구가 수행되었으나 실용화되지는 못했다. (2) (3) (4) (10) 그 이유는 성능인수에 포함된 공구마모율을 가공중에 직접 검출하는 것이 매우 어려웠기 때문이며, 또 비교적 검출하기 쉬운 절삭온도, 절삭분력 등과 공구마모율과의 관계로부터 간접적으로 가공중에 검출할 수도 있었으나 이들과 공구마모율과의 관계가 절삭제에 따라 변하므로 실용화에는 많은 문제점이 있었기 때문이다. 그래서 최근에는 구속조건에 의한 적응제어 시스템의 연구가 주를 이루고 있다. (5) (6) (7) 이 방식은 성능인수의 설정없이 주어진 구속조건 하에서만 수행되므로 최적절삭조건은 구할 수 없으나 적절한 구속조건에 의해서 부최적절삭조건이 구하여 짐이 알려져 있다. (6)

본 연구는 선삭의 적응제어 시스템에 관한 것으로 절삭변수로는 절삭깊이, 이송 및 절삭속도 등이지만 일반적으로 절삭깊이는 가공도면과 기계의 가공 범위에 의해서 결정되므로 이송 및 절삭속도만을 제어변수로 한다. 이때 선정되어야 할 구속조건은 무엇이며, 또 그 제어방법을 어떻게 할 것인가에 주안을 두며, 전산 시뮬레이션에 의해서 제시

된 적응제어 시스템의 성능향상을 검토한다.

II. 구속조건

이송 및 절삭속도를 제한하는 구속조건은 기공의 보호, 공구의 보호 및 가공물의 보호 등의 관점에서 결정되어야 한다. 선삭의 경우에 기계를 보호하기 위해서는 절삭력, 모터의 동력, 기계의 진동, 이송 및 주축회전속도 등이 구속조건이 되고, 공구의 보호를 위해서는 절삭력, 공구온도 및 공구의 진동 등이 구속조건이다. 또 가공물을 보호하기 위해서는 포면 거칠기 및 가공물의 진동등이 구속조건

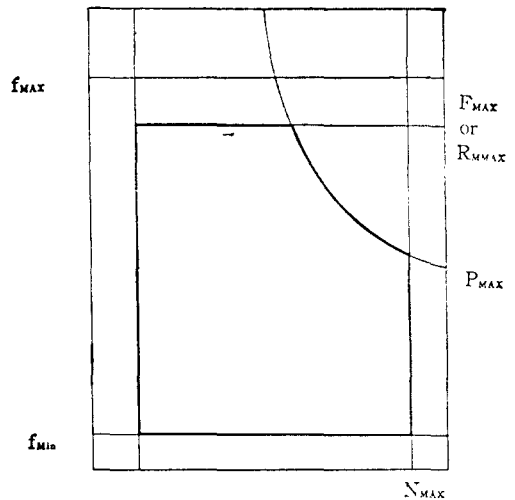


Fig.2. Field of admissible Cutting Conditions.

이 된다. 그런데 진동과 공구온도는 작업중에 안정되게 그 값을 검출하기가 어려워 적응제어 시스템의 실용화 관점에서 부적당할 뿐만 아니라 선삭의 경우 주요한 구속조건이 되지 못한다고 보고되어 있다.⁽⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 절삭력, 모우터 동력, 표면거칠기, 이송 및 주축회전 속도 등은 구속조건으로 선정한다. 절삭작업이 가능한 영역을 Fig. 2에 보였으며, 그 수학적 표현은 아래와 같다.

1. 절삭력 F

$$F = K_p K_o f^c d^e \cos^{(c-e)} \gamma \leq F_{Max} \quad (2-1)$$

윗 식은 A. S. M. E. 의 절삭저항식의 변형으로 K_p , c 및 e 는 공작물의 재질에 따른 정수, K_o 는 작용경사각에 따른 정수, f 는 이송속도 [mm/rev], d 는 절삭깊이 [mm], γ 는 앞날각($^\circ$)이며 F_{Max} 는 최대허용 절삭력 [Kgf]이다.

2. 모우터의 동력 P

$$P = \frac{1}{4500\eta} \cdot K_p K_o f^c d^e V \cos^{(c-e)} \gamma \leq P_{Max} \quad (2-2)$$

윗 식에서 η 는 기계의 효율, V 는 절삭속도 [m/min]이며 P_{Max} 는 최대허용 동력 [hp]이다.

3. 표면거칠기 R_M

많은 실험 결과 정상상태로 절삭이 행해 질 때 표면거칠기는 아래와 같이 표시할 수 있다.⁽¹²⁾

$$R_M = \frac{f^2}{8R} \leq R_{MMax} \quad (2-3)$$

윗 식에서 R 은 노오즈반경 [mm]이며, 첨자 Max 는 최대 허용치를 나타낸다.

4. 이송속도 f

$$f_{Min} \leq f \leq f_{Max} \quad (2-4)$$

5. 주축회전속도 N

$$N_{Min} \leq N \leq N_{Max} \quad (2-5)$$

혹은

$$\frac{100V_{Min}}{\pi D} \leq N \leq \frac{100V_{Max}}{\pi D} \quad (2-6)$$

윗 식에서 D 는 가공물의 외경 [cm]이다.

III. 제어방법

설정된 구속조건 내에서 절삭작업을 행할 경우, Fig. 3-a에서 C_1 은 공구의 가치가 기계의 가치이나 노동비에 비하여 비교적 큰 경우의 최소 가치선이다. 이때의 최적 절삭점은 P_1 이다. 즉, 아래의 성능인수 H [mm³/W]를 최대화하는 점이다.

$$H = \frac{1000fd}{K_1 + \frac{K_1\tau + K_2}{W_0} \cdot TWR} \quad (3-1)$$

윗 식에서 TWR 은 공구마모율 [mm/min], W_0 는 최대허용 공구마모량 [mm], K_1 은 작업자의 직, 간접비 [W/min], K_2 는 공구비 [W/edge]이며 τ 는 공구 교환시간 [min]을 나타낸다.

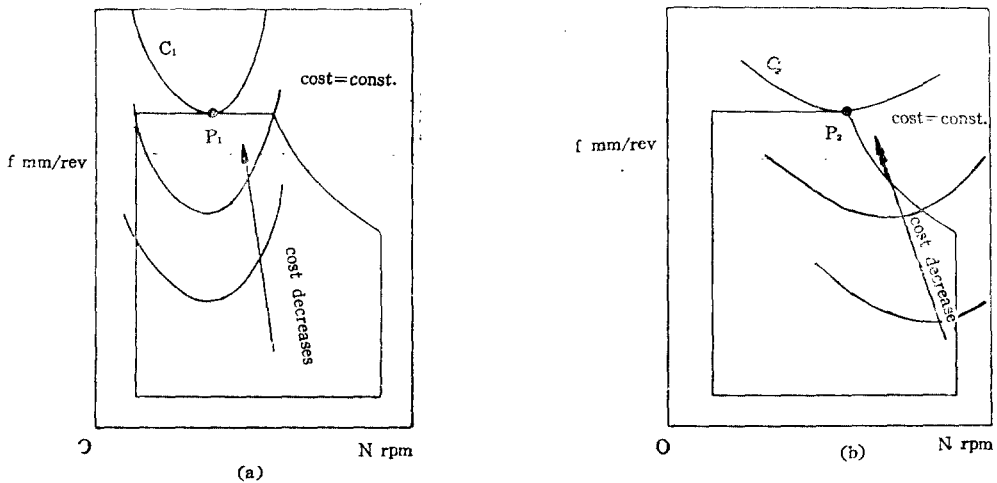


Fig. 3. Optimum cutting condition.

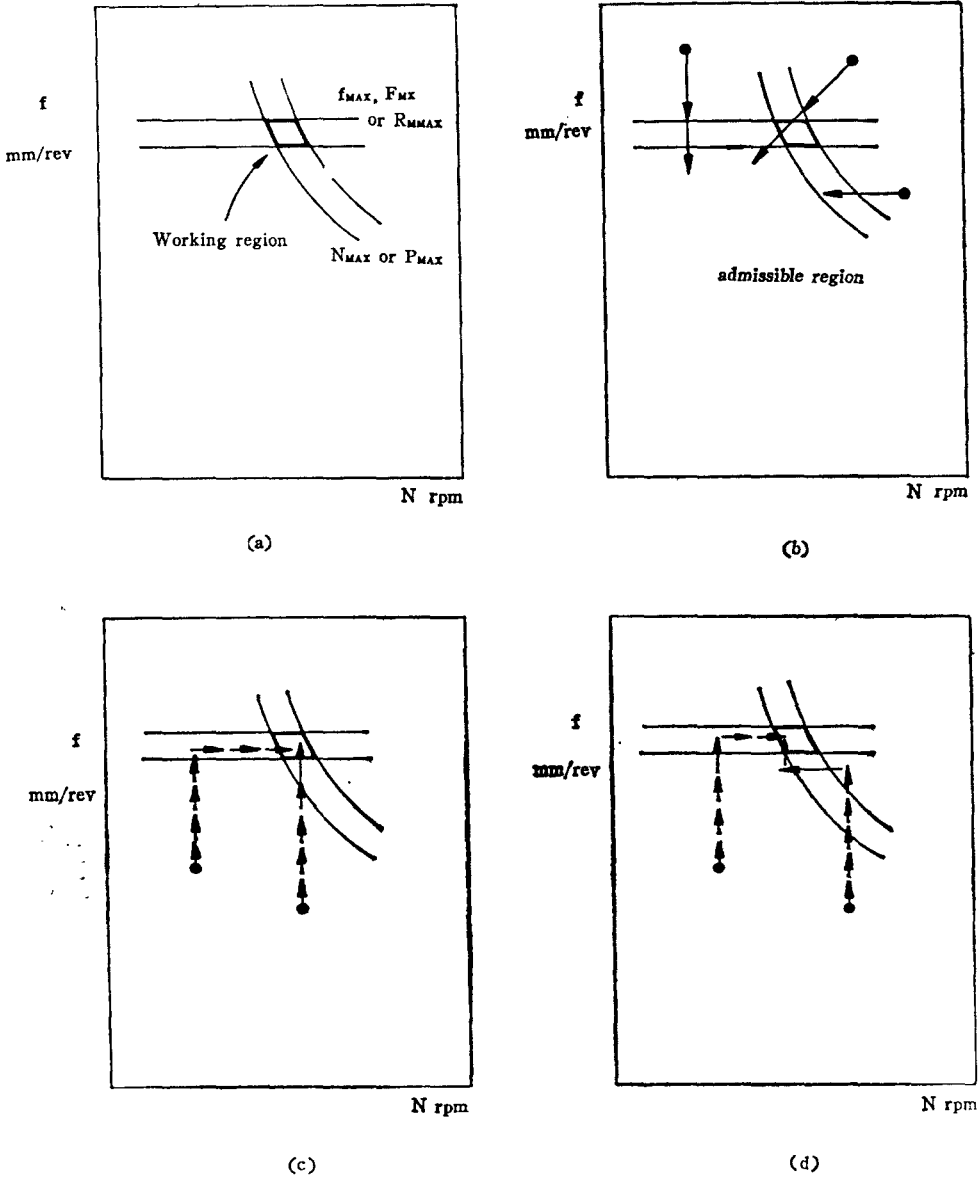


Fig. 4. Examples of Seeking the working region

그런데 잇 식의 최대화를 위해서는 공구마모율을 절삭중에 검출하여야 되지만 아직은 만족스럽게 검출할 수가 없는 실정이다. 그러나 이 분야의 연구에서 가정하여 왔듯이 공구의 비용이 비교적 크지 않다면⁽⁶⁾ Fig. 3-b의 C_2 가 최소 가격선이며 최적 절삭점은 P_2 이다. 실제로 공구의 비용이 문제가 되는 것은 절삭속도가 매우 클 때 인데 이런 경우는

구속조건에 의해 제한을 받으므로 P_2 점이 부최적 절삭조건이 된다. 절삭시에 최적점 P_2 는 절삭깊이, 재질의 경도 등의 변화에 의하여 이동하므로 안정되게 제어하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 제어기에 software 혹은 hardware로 쉽게 장착할 수 있게 아래와 같은 방법으로 한다.

i) 절삭력을 검출할 때에 발생하는 떨림과 Noise 등을 고려하여 Fig.4-a에 보였듯이 폭을 가진 제어 영역을 설정한다.

ii) Fig.4-b에 보인 것과 같이 구속 조건을 벗어난 경우에는 이송과(혹은) 절삭속도를 급격히 감소시킨다.

iii) 안전 영역에서는 Fig.4-c에서와 같이 이송속도를 경계치까지 제어한 후에 절삭속도를 제어한다.

Fig.4-d는 절삭영역을 찾아가는 예를 보인다.

Ⅴ. 전산 Simulation 결과

1. 수학적 모형

본 연구에서는 SM45C를 공구형상이 (-6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.8)인 P20E 공구로 절삭할 경우를 모형으로 삼았으며, 그 때의 최대 표면거칠기는 0.056mm, 최대허용 절삭력은 250kgf, 모터의 최대동력은 10hp, 모터 효율은 0.8, 최대허용 회

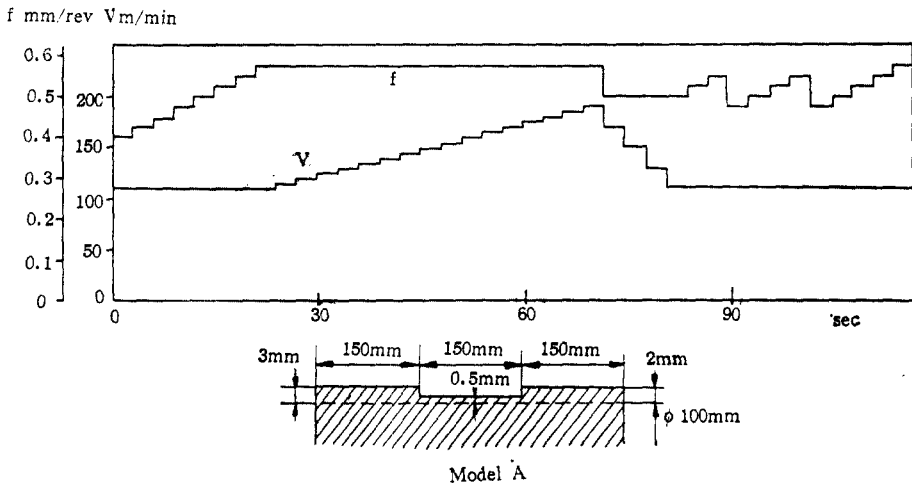


Fig 5. Variation of cutting conditions in model A

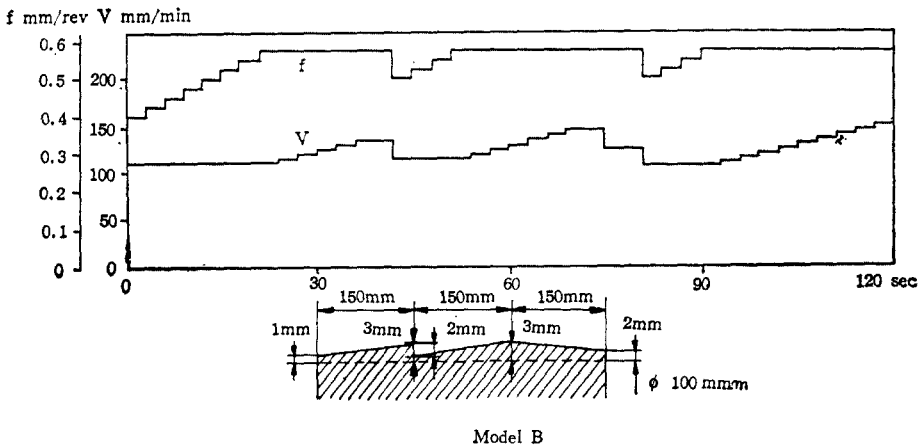


Fig. 6. Variation of cutting conditions in model B

전수는 1000rpm이고 최대 허용 이송속도는 2mm/rev으로 가정한다. 이를 조건으로 부터 수학적 모형은 아래와 같이 표시 할 수 있다.

$$F = 161 \cdot f^{0.75} d^{1.1} \leq 250 \quad (4-1)$$

$$P = 0.045 \cdot f^{0.75} d^{1.1} V \leq 10 \quad (4-2)$$

$$f = \sqrt{6.4 \cdot R_{1/Max}} \leq 0.6 \quad (4-3)$$

$$N = \frac{100 \cdot V}{\pi D} \leq 1000 \quad (4-4)$$

적용제어 시와 비제어 시의 작업효율을 비교하기 위해서는 성능인수를 계산해야 한다. 본 연구에서는(3-1)식의 $K_1=150$, $K_2=300$, $W_0=0.27$, $\tau=2$ 로 가정한다. 또 공구마모율은 일정한 절삭조건하에서 시간이 대해서 선형적이라고 알려져 있으므로⁽¹⁾ 참고문헌(3)과 (10)의 실험 Data에서 측면 마모가 0.3mm 일 때를 공구수명으로 볼 때 절삭시간 T 를 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$T = 1.2 \times 10^7 \cdot \frac{W - 0.03}{W_1 - 0.03} \cdot V^{-2.773} f^{-0.728} d^{-0.717} \quad (4-5)$$

윗 식에서 W_1 는 0.3mm이며 0.03은 초기 마모치로 가정한 값이다. 따라서 공구마모율 TWR 은 아래와 같다.

$$TWR = \frac{dW}{dT} = 2.25 \times 10^{-8} \cdot V^{2.773} f^{0.728} d^{0.717} \quad (4-6)$$

그러므로,

$$H = \frac{1000 \cdot f V d}{150 + 5 \times 10^{-8} \cdot V^{2.773} f^{0.728} d^{0.717}} \quad (4-7)$$

이다.

2. Simulation 결과

제어간격을 3초로 하고 제어영역을 최대 허용치의 90%와 100% 사이로 하여 Fig.5와 Fig.6의 A, B와 같이 절삭깊이가 변하는 가공물을 대상으로 Simulation 한 결과 A의 경우 H 의 평균값은 706.9 mm^3/W 였으며 B의 경우 H 의 평균값은 800.3 mm^3/W 였다. 반면에 Handbook⁽¹⁾에서 추천한 값인 초기치에 의한 단순 절삭시에 A에 대한 H 의 평균값은 528.6 mm^3/W 였으며 B에 대한 H 의 평균값은 564.7 mm^3/W 였다. 따라서 적용제어의 경우가 A, B 각각에 대하여 약 34%, 40%의 성능향상을 보였다.

Fig.5와 Fig.6은 적용제어시에 시간에 대한 이송 및 절삭속도의 변화를 보인다.

V. 결 론

적용제어 공작기계의 실용화를 위해서는 연속적용제어 시스템이 바람직하며 그 때의 연속조건으로선삭의 경우 절삭력, 모우더의 온도, 표면거칠기, 이송 및 주축회전속도 등이 추천된다. 제어방식으로는 본문에서와 같이 간단한 방식으로 할이 바람직하다. 본문의 연속조건과 제어방식을 절삭깊이가 변하는 두 모션이 적용하여 절삭 Simulation 한 결과 약 34%, 40%의 성능 향상이 가능하였다.

참 고 문 헌

- 1) R.M. Centner & J.M. Idelson, "Adaptive Controller for a Metall Cutting Process," IEEE on Appl. & Ind. Vol. 83, No.72, pp. 154-161(1964)
- 2) H. Takeyama, H. Sekikuchi and K. Takeda, "One Approach of Optimizing Control in Metall Cutting," Annulus of CIRP, Vol. 18, pp. 345-351(1970)
- 3) J. Huh, "A Study on the Adaptive Control System for Turning Process," Ph. D. Thesis of KAIS (1980)
- 4) S.H. Lee, "A Study on the Adaptive Control System for Turning Process Using Axial Force," MS Thesis of KAIS (1980)
- 5) T. Sata, "Adaptive Control of Machine Tools," Report of Tokyo Univ. (1971)
- 6) R. Bedini, G.G. Lisini and P.C. Pinotti, "Experiments on Adaptive Control of a Milling Machine," ASME J. of Eng. for Ind. pp. 239-244(1976)
- 7) A. Ledergerber, "Adaptive Control for Turning Operations," Proc. of the 12th MTDR Conf., pp. 7-13(1972)
- 8) D.A. Milner, "Adaptive Control of Feed Rate in the Milling Process," Int. J. of MTDR, Vol. 14, pp. 187-197 (1974)
- 9) H. Takeyama, Y. Doi, Y. Mitsuoka and Sekiguchi, "Sensors of Tool Life for Optimization of Machining," Advances in MTDR

- Part 2, pp.191—208(1967)
- 10) J.S. Kim, "A Study on the Adaptive Control System for Turning Process Using Cutting Temperature," MS Thesis, KAIS (1979)
- 11) Machinability Data Center, Machining Data Handbook, 2nd Ed. Met. Cut Research Associates Inc.(1972)
- 12) H. Takeyama and T. Ohno, "Study on Roughness of Turning Surfaces," Bull. Japan Soc. Precis. Eng. 1, p.274(1966)