

## 외란 관측자를 이용한 2축 동시 가공시의 절삭력 간접 측정

우중원\*, 김태용\*\*, 김종원\*\*\*

\* 서울대학교 대학원

\*\* 서울대학교 제어계측 신기술 연구센터

\*\*\* 서울대학교 기계설계학과

### Abstract

This paper presents an indirect method for on-line measuring the cutting forces in contour NC milling processes by using the current signals of the servo drive motors. A Kalman filter is used for estimating each of the load torques to the x, y-axis servo motors of a horizontal machining center. Then, the load torque induced by the friction force in the guideway is estimated and subtracted from the total external torque, thus resulting in the load torque induced by the cutting force. A series of experimental works on the circular interpolated contour milling process shows good agreement between the cutting forces measured by the dynamometer and those estimated by the method presented in the paper.

### 1. 서론

절삭 공정시의 절삭력 측정 시스템은 절삭력의 제어, 공구 파괴 감출 및 이상 진단에 있어 가장 중요한 센서 시스템 중의 하나이다[2, 8]. 이와 같은 절삭력 측정 시스템 중 가장 정확하며 널리 사용되고 있는 것은 공구 동력계이다. 하지만, 공구 동력계는 비교적 고가이고 과부하에 약하며, 절삭 스트로크의 제한 및 설치 공간 내에서의 배선 문제 등과 같은 이유로 상용화의 목적으로 사용하기에는 부적합하다.

이와 같은 단점을 극복하기 위하여 공작기계의 이송 서보 모터의 전류 감지를 통하여 절삭력을 간접 측정하려는 많은 연구들이 수행되었다[1, 5, 6, 7]. 이들 연구들은 절삭력이 이송 서보 모터의 전류와 정적인 비례 관계를 가진다는 가정하에 절삭력을 간접 측정하였다. 하지만 실제의 경우 이송계의 서보 모터 전류는 테이블과 소재를 포함한 이송부의 가감속에 의한 전류 성분 및 정지 마찰력을 이기기 위한 전류 성분과 같은 동적인 성분이 내재되어 있으므로 절삭력과 전류를 정적인 관계로 파악한 방법을 광범위하게 적용하기에는 한계가 있다. 한 예로서, 머시닝 센터를 이용하여 원호 보간을 하는 원호 밀링 절삭에서의 x축 및 y축 속도는 방향과 크기가 연속적으로 변하며 따라서 이에 따른 가감속 성분이 전류 신호에 내

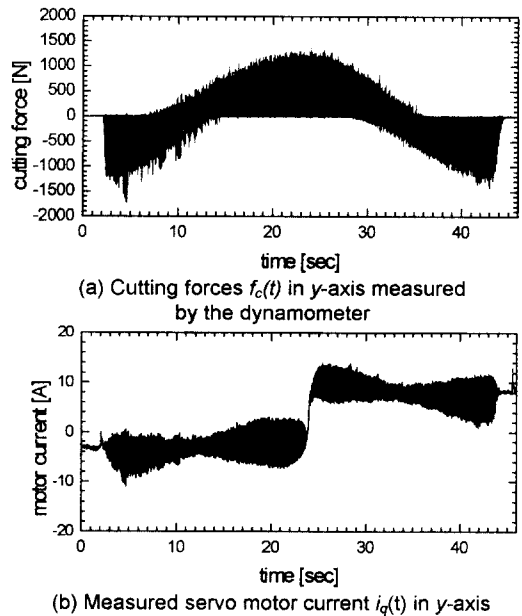


Fig. 1. An example showing the discrepancy between  $f_c(t)$  and  $i_q(t)$  in the case of y-axis on the cutting condition A : circular interpolated contour milling, half immersion, flat end mill (diameter 20 mm, 2 flutes), axial depth-of-cut 2 mm, feedrate 300 mm/min, work material S45C, spindle speed 600 rpm, cutting path radius 35 mm.

제되게 된다. 특히 이송 방향이 바뀌는 구간에서는 마찰력을 이기려는 전류 성분이 커지고 전류의 부호가 갑자기 변화함에 따라서 절삭력과 전류의 정적인 관계가 거의 성립하지 않게 된다. 이와 같은 전형적인 예로서 원호 절삭시의  $x$ 축 절삭력과 이송 서보 모터 전류를 비교하여 Fig.1에 나타내었다.

본 연구에서는 이와 같이 이송 서보 모터의 전류와 절삭력을 정적으로 파악하는 데에서 발생하는 모순을 극복하기 위한 방법으로서 칼만 필터를 이용한 외란 관측자를 제시한다. 가공 중의 절삭력은 이송 서보계의 입장에서 파악했을 때 외란으로 간주할 수 있으며, 따라서 위치 명령과 실제 위치 정보 및 이송 서보 모터의 전류 신호를 입력으로 하는 외란 관측자를 구성하면 외란으로서의 절삭력을 추정할 수 있다. 또한 외란 관측자를 칼만 필터를 이용하여 구성함으로써 이송 서보계의 모델링 오차와 전류 및 위치의 측정 오차를 보상할 수 있다.

구성되어진 외란 관측자를 이용하여 추정되는 외란은 절삭력과 이송계의 마찰력의 합력이므로, 순수한 절삭력만을 획득하기 위해서는 마찰력 성분을 제거하여야 한다. 이송계의 마찰력을 해석하기 위하여 많은 연구가 수행되었으나, 실제 마찰력은 기계의 윤활 상태와 이송 속도에 의하여 민감하게 변화하므로[9], 동일한 기계하에서도 일정한 Stribeck 곡선[9]을 얻는 것은 매우 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 마찰력을 보정하기 위하여 절삭하고자 하는 경로와 동일하게 무부하 이송(dry-run)하여 이로부터 얻어진 이송 서보 모터의 전류로부터 순수한 마찰력만을 획득하고 이를 추정되어진 전체 외란에서 제거하는 방법을 이용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 외란 관측자를 구성하기 위하여 이송 서보계의 모델링에 관하여 언급한다. 본 연구에서 대상으로 하는 공작기계는 통일중공업의 수평형 머시닝 센터(MCH-10)로서 제어기는 FANUC의 15M을 이용하는 시스템이다. 3장에서는 이

를 이용하여 칼만 필터를 이용한 외란 관측자를 구성하고, 실험 장치의 구성 및 절삭력 간접 측정 실험 결과를 4장에서 다룬다. 마지막으로 5장은 본 연구의 결론이다.

## 2. 이송서보계의 모델링

칼만 필터를 이용한 외란 관측자를 구성하여 절삭력을 간접 측정하기 위해서는 대상 이송 서보계의 모델이 필요하다. 본 연구에서의 절삭력 간접 측정을 위한 대상은 3축 수평형 머시닝 센터로서, 32비트의 FANUC CNC 15M 모델을 제어기로 가지고 있다.  $x$ ,  $y$  및  $z$ 의 세 이송축은 영구자석 동기형 교류 모터에 의하여 직접 구동되어지는 볼 스크류로 구성되어 있으며,  $x$ 축과  $y$ 축은 서로 같은 서보모터에 의하여 구동되어진다. 각 축에 관한 블록선도는 CNC 제조업체의 기술자료를 기반으로 하여 구성되어질 수 있으며, 이를 Fig.2에 나타내었다. 이로부터 외란  $\tau_d$ 를 입력으로 하고 전류  $i_q$ 를 출력으로 하는 전달 함수를 계산하면 식 (1)과 같이 표현되어진다.

$$G(s) = \frac{1761(s^2 + 89.52s + 2244)(s + 8831)}{(s + 41.13)(s + 91.48)(s^2 + 266.1s + 86930)(s + 589.7)} \quad (1)$$

이송 서보계에 대한 모델을 검증하기 위한 방법으로서  $y$ 축 이송계의 모델로부터 구한 주파수 응답선도를 실험 결과와 비교하여 Fig.3에 나타내었다. 이로부터 모델과 실험 결과로부터 얻어진 주파수 응답이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 이 주파수 응답 선도로부터 이송 서보계의 대역폭이 70Hz인 것을 알 수 있으며, 따라서 절삭 주파수가 70Hz 이하인 경우에 대하여 절삭력 간접 측정이 가능하다.

## 3. 칼만필터를 이용한 외란관측자의 구성

동적 시스템의 상태 변수를 출력만을 이용하여 추정된

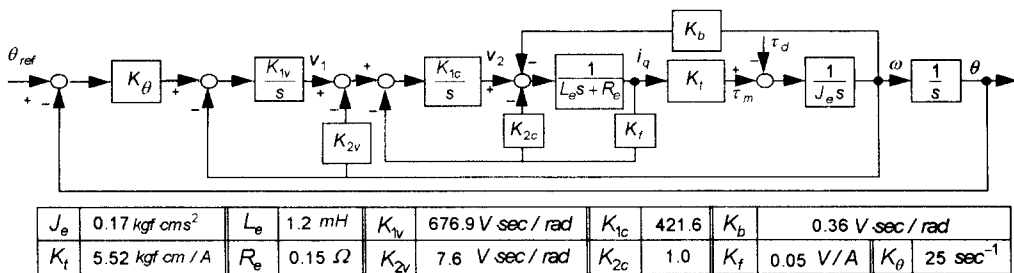


Fig. 2. Block diagram of the feed drive system of the machining center

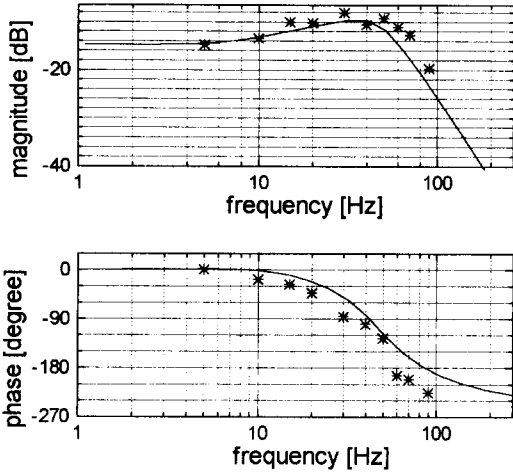


Fig. 3. Frequency response of the y-axis feed drive system  $i_q(s) / \tau_d(s)$

경우에 상태 변수 관측자를 사용하게 된다. 이와 같은 개념을 확장하여 외란을 상태 변수로 선정할 경우에는 외란을 관측할 수 있는 외란 관측자를 구성할 수 있다. 또한 대부분의 경우에는 동적 시스템의 모델링 오차 및 측정 잡음이 존재하므로 효율적인 외란 추정을 위하여는 모델링 및 측정 오차로부터 발생하는 오차를 최소화하는 확률적인 이론이 필요하다. 칼만 필터는 잡음이 존재하는 환경하에서 오차를 최소화하는 선형적인 최적화 알고리즘이다.

절삭력을 외란으로 간주하고 외란을 상태 변수로 선정할 경우, 이의 동특성을 기술해 주어야 한다. 본 연구에서는 절삭력의 변화가 샘플링 시간 주기에 비하여 충분히 느리다고 가정하였으며, 따라서 외란의 동특성은 다음과 같이 기술되어진다.

$$\frac{d\tau_d}{dt} = 0 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 외란과 이송계의 동특성이 포함된 전체 시스템의 상태 변수 방정식을 기술할 수 있으며, 이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -K_{1v} & -K_{1v}K_{\theta} & 0 \\ K_{1c} & 0 & -K_{1c} & -K_{1c}K_{2v} & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_e & -(R_e + K_{2c})/L_e & -K_b/L_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_t/J_e & 0 & 0 & -1/J_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [K_{1v}K_{\theta} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = [v_1 \ v_2 \ i_q \ \omega \ \theta \ \tau_d]^T, u = \theta_{ref}$$

위의 상태 변수 방정식에서 입력변수  $u$ 는 위치명령  $\theta_{ref}$ 이며, 상태 변수로는 속도 제어 루프의 내부 변수  $V_1$ , 전류제어루프의 내부변수인  $V_2$ , 서보 모터 전류인  $i_q$ , 서보 모터의 각 속도  $\omega$ , 서보모터의 각위치  $\theta$ 와 외란 토크  $\tau_d$ 이고, 출력  $y$ 는 서보모터의 각위치  $\theta$ 와 전류  $i_q$ 이다.

위의 시스템에 모델링 오차에 의한 시스템 잡음  $\xi$ 와 측정 잡음  $\eta$ 를 추가하면 전체 상태 변수 방정식은 다음과 같아진다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \Gamma\xi \\ y &= Cx + \eta \end{aligned} \quad (4)$$

이 때,  $\xi$ 와  $\eta$ 는 각각  $Q$ 와  $R$ 을 분산행렬로 가지는 백색잡음으로 가정하였으며,  $\Gamma$ ,  $\xi$ 와  $\eta$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} K_{\theta}K_{1v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\xi = [u_{noise} \ \tau_{noise}]^T, \eta = [i_{q,noise} \ \theta_{noise}]$$

여기서

- $u_{noise}$  : 제어입력의 시스템 잡음
- $\tau_{noise}$  : 외란토크의 시스템 잡음
- $i_{q,noise}$  : 모터전류의 측정 잡음
- $\theta_{noise}$  : 모터각위치 측정 잡음

이와 같은 시스템에 대한 칼만 필터 알고리즘은 아래와 같다[3].

$$\begin{aligned} \bar{x}_{n+1} &= A\bar{x}_n + Bu_n \\ \hat{x}_n &= \bar{x}_n + L(y_n - C\bar{x}_n) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $L$ 은 칼만 필터 게인이며 아래의 대수 리카티 방정식으로부터 결정된다.

$$\begin{aligned} L &= PC^T R^{-1} \\ AP + PA^T + \Gamma Q \Gamma^T - PC^T R^{-1} CP &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

#### 4. 실험

절삭력 간접 측정을 위한 실험 장치의 구성도는 Fig 4와 같다. 이송 서보 모터의 전류 측정은  $x$ 축 및  $y$ 축 서보 모터의  $u, v$  상을 홀센서를 이용하여 측정하였으며, 이를 d-q 변환하여 각 축 이송 서보 모터의  $i_q$ 를 측정하였다. 또한 측정되어진 전류의 증폭 및 필터링은 이를 위하여

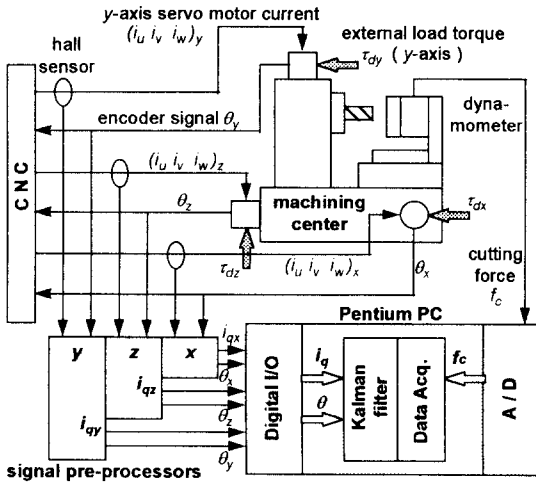


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

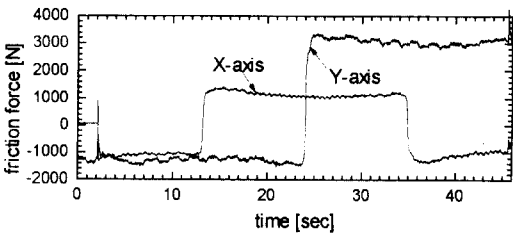


Fig. 5 Estimated friction forces  $f_f(t)$  in x and y-axis by the Kalman filter (under air cutting condition)

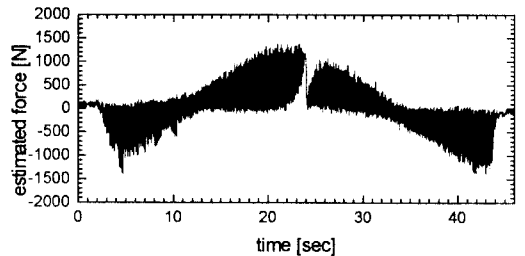
전용으로 개발되어진 신호 처리 장치를 이용하였다. 이 신호 처리 장치의 기능은 서보 모터의 전류 측정을 위한 홀 센서의 신호 증폭, 노이즈 필터링 및 서보 모터의 엔코더 신호 카운팅이며 이들 신호를 PC와의 디지털 통신을 이용하여 전달한다. 각 신호의 샘플링 시간 주기는 1.0ms 이다.

측정되어진 외란으로부터 순수한 절삭력만을 측정하기 위하여 무부하 이송시의 x, y 축 이송 서보 모터 전류 신호와 식(3)의 이송계 모델을 이용한 외란 측정자로부터 추정되어진 마찰력  $f_f(t)$ 을 Fig.5에 나타내었다. 이 경우의 절삭조건은 z 축을 구동하지 않는 비절삭인 점을 제외하면 Fig.1의 절삭조건 A와 동일하다.

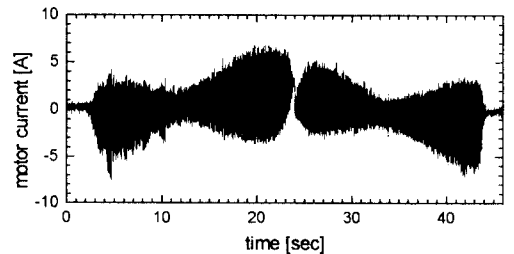
이와 같이 얻어진 마찰력  $f_f(t)$ 을 절삭중에 얻어진 이송모터 전류로부터 추정되어진 전체 외란 토크  $\tau_d(t)$ 로부터 제외하면 순수한 절삭력  $f_c(t)$ 만을 얻을 수 있다. 이를 위하여 Fig.1의 절삭 조건 A와 같은 조건하에서 절삭 실험을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 전류로부터 외란 측정자를 이용하여 전체 외란 토크  $\tau_d(t)$ 를 추정하였다. 전체 외란 토크  $\tau_d(t)$ 로부터 앞에서 얻어진 마찰력 성분

$f_f(t)$ 을 제외하여 순수한 절삭력  $f_c(t)$ 를 추정하였으며 이중 추정되어진 y 축의 절삭력을 Fig.6 (a)에 나타내었다.

외란 측정자를 이용하여 추정되어진 절삭력[Fig.6(a), Fig.7(a)]을 공구 동력계로 측정한 절삭력[Fig.1(a), Fig.7(c)]과 비교하였을 때, 단순히 전류와 비례하는 것으로 가정하여 추정되어진 절삭력[Fig.6(b), Fig.7(b)]에 비하여 절삭력 추종 능력이 월등하다는 것을 알 수 있다. 향상된 절삭력 추종 능력에도 불구하고, 외란 관측자를 이용할 경우에도 여전히 남아 있는 문제점으로는 이송 방향이 바뀔 경우의 절삭력 측정이다. Fig.6(a) 및 Fig.7(a)의 외란 측정자를 이용하여 간접 측정된 절삭력 신호를 Fig.1(a) 및 Fig.7(c)의 공구 동력계를 이용하여 측정된 절삭력과 비교해 볼 때 이송 방향이 바뀌는 부분에서 추정된 절삭력에 공백이 존재함을 알 수 있다. 이는 이송 방향이 변화하는 매우 느린 속도 구간에서 이송 속도를 검출하기 위한 엔코더의 해상도가 너무 작으며(2500pulse/rev), 백 래쉬 등을 보정하기 위한 보상 회로가 존재하기 때문에 식(3)으로 표시된 선형식이 유효하지 않기 때문이라고 추정된다. 결과적으로 이송 서보 모터 전류 검출을 이용한 절삭력 간접 측정의 경우에는 이송 방향이 변화하는 구간에서 실제 절삭력과 불일치가 불가피하다.

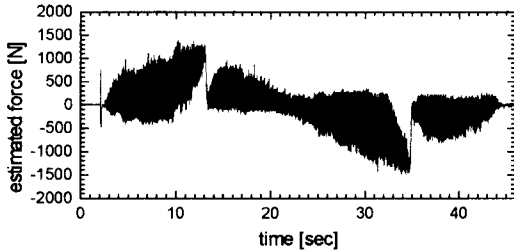


(a) Estimated y-axis cutting force (based on the Kalman filter method)

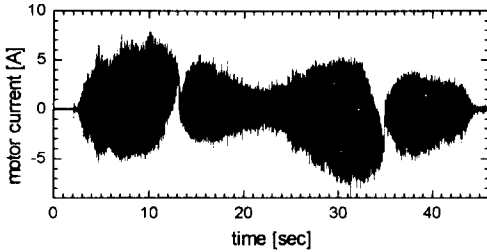


(b) Motor current signal (y-axis) with the friction induced current simply subtracted (not using the Kalman filter)

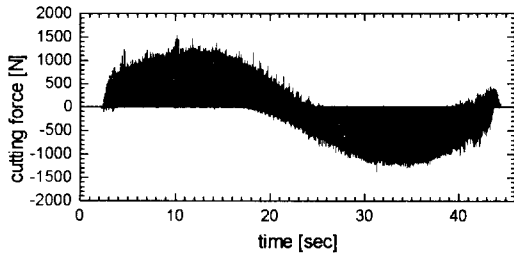
Fig.6 Estimated y-axis cutting force based on the Kalman filter method (cutting condition A in Fig.1)



(a) Estimated x-axis cutting force (based on the Kalman filter method)



(b) Motor current signal ( $x$ -axis) with the friction induced current simply subtracted (not using the Kalman filter)



(c) Cutting force  $f_c(t)$  in  $x$ -axis measured by the dynamometer

Fig.7 Estimated x-axis cutting force based on the Kalman filter method (cutting condition A in Fig.1)

## 5. 결론

본 연구에서는 2축 동시 가공 원호 절삭의 경우에 대하여 보다 정확한 절삭력 검출이 가능한 새로운 방법론으로서 칼만 필터를 이용한 외란 관측자를 제시하였다.

본 연구에서 대상으로 사용한 머시닝 센터의 CNC의 경우, 절삭력이 CNC에 외란으로 작용하는 것으로 가정하여 이송 시보 모터의 전류 검출을 통하여 70Hz 이내에서 외란 관측자를 이용한 절삭력 검출이 가능하였다. 절삭력 검출의 실제적인 예를 위하여 2축 동시 가공 원호 절삭에 대한 절삭력 간접 측정 실험을 수행하였으며, 외란 관측자를 이용한 절삭력 간접 측정이 전류와 비례하는 절삭력을 가정하는 간접 측정에 비하여 보다 정확한 절삭력을 나타내었다.

본 연구에서 제시한 절삭력 측정 방법은 현 시점에서는 이송 방향이 변화하는 경우에 대하여 정확한 절삭력을 검출해내지 못하는 단점을 가지고 있지만, 그 외의 구간에서 정확한 절삭력을 검출할 수 있으므로 절삭 공정 모니터링 및 다축 가공 절삭력 제어등의 다양한 분야에 응용이 가능하다.

## 참고 문헌

- (1) Altintas, Y., 1992, Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurement, ASME Journal of Engineering for Industry, 114 : 386 - 392.
- (2) Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ketteler, G., König, W., Teti, R., 1995, Tool Condition Monitoring (TCM) - The Status of Research and Industrial Application, CIRP Annals, 44/2.
- (3) Chui, C.K., Chen, G., 1987, Kalman Filtering with Real-time Applications, Springer-Verlag, London.
- (4) FANUC Ltd., 1992, FANUC AC Servo Amplifier Maintenance Manual, B-65005E, FANUC Ltd.
- (5) Lee, J.M., Choi, D.K., Kim, J., Chu, C.N., 1995, Real-time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process, CIRP Annals, 44/1 : 59 - 62.
- (6) Mannan, M.A., Broms, S., 1989, Monitoring and Adaptive Control of Cutting Processes by Means of Motor Power and Current Measurement, CIRP Annals, 38/1 : 347-350.
- (7) Stein, J.L., Colvin, D., Clever, G., Wang, C.H., 1986, Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 108 : 279 - 288.
- (8) Tlustý, J., 1994, Automatic Supervision in Milling, Automatic Supervision in Manufacturing (ed. Szafarczyk, M.), Springer-Verlag, London.
- (9) Weck, M., 1984, Handbook of Machine Tools : Volume 2, John Wiley & Sons, New York.