

일정절삭력 제어를 위한 이송속도 적응제어 시스템

(A Feedrate Override Adaptive Control System for the Cutting Force Regulation)

김 창 성* (한양대 대학원 기계설계학과), 박 영 전 (한양대 대학원 기계설계학과), 정 성 중 (한양대 기계설계학과)

C.S. Kim* (HanYang Univ. Graduate School), Y.J. Park (HanYang Univ. Graduate School), S.C. Chung (HanYang Univ.)

Keywords : Adaptive Control Constraints (ACC, 구속적응제어), Real-Time (실시간), Feedrate Override (이송속도 Override), Cutting Parameters (절삭계수), PMC Interface, Cutting Force Regulation (일정절삭력)

ABSTRACT : In order to maintain the cutting force at a desired level during peripheral end milling processes in spite of variation of the depth of cut and other machining conditions, a feedrate override Adaptive Control Constraints (ACC) system are developed. Feedrate override was accomplished by a developed MMC board and PMC interface techniques. Nonlinear model of the cutting process was linearized as an adaptive model with time varying parameters. Integral type estimators were introduced for on-line identification of cutting and control parameters in peripheral and milling processes. Zero Order Hold (ZOH) type digital control methodology which uses pole-placement concepts was applied for the ACC system. Performance of the developed ACC system was confirmed on the vertical machining center equipped with FANUC OMC for a large amount of experiments.

1. 서 론

절삭공정에서 적응제어는 구속적응제어 (Adaptive Control Constraints, ACC), 최적적응제어 (Adaptive Control Optimization, ACO), 기하학적적응제어 (Geometric Adaptive Control, GAC) 등의 형태로 수많은 연구가 진행되어 왔다. ACC의 경우에는 전삭력, 공구휜, 전삭동력 등의 값을 일정한 영역의 특징값으로 일정하게 유지하는 구속제어의 형태로 연구되어 왔으나, 선형설치치의 연구로 최적절삭계수의 추정 방식이 아닌 구속조건이 성립이후에 초점이 맞추어져 왔다. ACO의 경우는 전삭이나 인식공정에서 인자비, 재료비 등을 고려한 경제성 향상에 맞추어 연구되어 왔으나 무인화 강항은 또는 미시닝센터를 이용한 절삭공정에서의 생산성은 공구 교환 시간, 팔레트 교환 시간, 공작물 및 공구셋팅 등에 좌우되기 때문에 실용성이 없는 기술로 알려져 있다. 그러나, 정밀도에 대한 요구가 강해지면서 GAC의 필요성^{[1][2][3]}이 인식되고 있으며, 고속 고정형 가공의 경우 일정한 절삭조건하에서 최적절삭계수 추정을 통한 생산성 향상의 방향으로 ACC 연구가 요구되어지고 있는 것이 지금의 상황이다.^{[4][5]}

밀링공정이나 절삭공정에서 ACC 적응제어기법을 도입하여 연구한 예는 대단히 많다. 그 중에서도 Tomizuka 등은 모델추종적응제어 (Model Reference Adaptive Control, MRAC) 기법을 개발하여 전삭과 밀링공정에서 전삭력을 추종제어할 수 있음을 보였고,^[6] Koren 등은 적분제어기를 사용한 가변이득 제어 시스템 (Variable gain control system) 을 도입하여 절삭공정에 응용한 바 있다.^[7] Elbestawi 등은 밀링공정에서 피라미드 적응제어 알고리즘을 응용하여 전삭력 적응제어를 실험하였다.^[8] 그러나 이들 연구의 대부분은 고가 장비의 사용, 공작기계 설계변경의 필요, 전삭력이나 전삭토크의 측정 등에서 발생하는 작업영역의 감소, 강성저하 등으로 인하여 연구결과와 현실화가 불가능하였다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 극복하고 실현화할 수 있는 구속적응제어 기술을 개발함으로써 미시닝센터의 고정형, 고정형 절삭가공에 이용하는 것을 목표로 하여, 실시간 (Real-time) 으로 미시닝센터의 밀링공정에서 최적의 절삭계수를 추정하는 방향으로 일정전삭력제어를 수행하였다. 공칭초기 절삭계수는 한양대학교 생산시스템 및 제어실험실에서 신경회로망 (Neural-Networks) 기법을 이용하여 개발한 절삭계수 모형^[9]을 통하여 선정된 후, 온라인 (On-line) 으로 최적의 절삭계수를 추정하면서 PMC 인터페이스를 통한 이송속도 제어를 이용하여 일정전삭력 제어를 실험하였다. 이송속도 Override 를 채용한 이송속도 제어법을 이용하여 미시닝센터 상에서 구현된 본

ACC 시스템을 이용하면 Air Cutting 시간을 줄일 수 있고, 프로그램에의 강령부족으로 입력된 낮은 생산성 조건하의 절삭계수나 불안정한 절삭조건을 안정화 및 최적화할 수 있어 고속 및 고정형 절삭을 실현할 수 있다.

2. 구속적응제어시스템

2.1 구속적응제어

절삭공정에서 공구와 공작물 사이의 상대진동에 의하여 야기되는 제더는 가공정도는 물론 공구의 수명을 단축시키고 절삭공정의 일정성을 해치기 때문에 회절에서는 제더방지를 위하여 일정한 절삭계수 영역에서 가공을 수행하고 있다. 이 경우 작업자의 경험에 의하여 선정되는 가공조건은 일정한 절삭조건하에서 단위 시간 당의 전삭량 (MRR, Metal Removal Rate) 을 극대화시키지 못하고 있는 것이 현실이다. 즉, 프로그램에 의하여 입력된 가공조건은 일정한 최적의 MRR 관점에서는 낮거나 높은 것이 현실이며, 이를 최적화하기 위해서는 프로그램 입력치에 관계없이 가공조건에 따라서 절삭계수를 최적으로 제어할 수 있는 실시간 적응제어 기술이 요구된다.^[10]

본 연구에서는 미시닝센터에서 엔드밀링을 이용한 고정생산 가공시 제더를 방지하면서 생산성을 극대화 할 수 있는 최적 절삭조건하에서의 절삭공정 제어를 위하여 절삭계수 (절삭깊이, 스펀들 회전수) 가 변하는 경우에도 전삭력을 일정하게 유지할 수 있는 구속적응제어 기법에 대하여 연구하였다. 절삭 개시전 초기 절삭계수는 공구, 공작물 그리고 공칭 전삭속도가 주어질 경우 기 개발된 신경회로망 기법^[9]에 의하여 최적절삭계수를 선정하고, 절삭깊이가 가공중 바뀌는 경우에도 최적의 절삭조건을 유지할 수 있도록 Fig. 1 과 같은 방법으로 최적 절삭계수를 실시간에 추정하여 전삭력의 구속적응제어를 실험하였다. 일정전삭력제어를 위하여 NC 제어기인 FANUC OMC 의 이송속도 Override 를 사용하였다. OMC 의 경우 적응제어 이송속도는 프로그램에 미리 입력한 이송속도의 0 ~ 150 % 의 16단계로만 변화시킬 수 있는데, 이런 조건에서 최적의 적응제어가 이루어지도록 하기 위해서는 오프라인 공칭초기절삭계수 추정을 위한 신경회로망기법이 필수적이다.^[11]

2.2 구속적응제어 기법

2.2.1 고정제어 기법

엔드밀링 공정에서 이송속도를 이용하여 일정전삭력 구속적

응제이를 실현하기 위해서는 이송속도와 전삭력 사이의 함수관계를 규명하여야 한다. Peripheral 엔드밀링시 축방향 전삭깊이 (Axial depth of cut) 가 일정한 경우 공작물에 걸리는 주전삭력 F 는

$$F = K_s d^\alpha f^\beta s^\gamma \quad (1)$$

로 모형화 할 수 있고, 여기서 K_s 는 비전삭력 (Specific cutting force), d 는 반경방향 전삭깊이 (Radial depth of cut), s 는 주축 회전속도 (Spindle speed, rpm) 그리고 α 와 β , γ 는 지수인자이다. 식 (1) 에서 비전삭력 K_s 는 공작물의 기계적인 성질과 공구의 크기 및 상층에 관한 것들을 대표하며, 축방향 전삭깊이의 변화에 따라 변하게 된다.

Fig. 2 에 나타낸 전삭력제어 시스템에서 전삭력 오차는 기준 전삭력과 실제전삭력의 차로 정의되며

$$E(i) = F_r(i) - F_c(i) \quad (2)$$

가 된다. 여기서, $F_r(i)$ 는 기준전삭력이고, F_c 는 Δ/D 샘플링된 실제전삭력이다.

실제전삭력과 이송속도와의 관계는 식 (1) 을 변형하여

$$F_c(i) = (K_s d^\alpha f^{\beta-1} s^\gamma) f = K_p f \quad (3)$$

와 같이 전삭조건에 따라서 변동하는 계수 K_p 를 갖는 선형모델로 나타낼 수 있다. Δ/D 샘플링 후 전삭력오차를 제거하기 위해 게인 K_i 와 샘플시간 T 를 갖는 적분제어기

$$U(i) = \frac{K_i T}{1 - z^{-1}} E(i) \quad (4)$$

와 ZOH 및 공작기계 이송계의 동특성을 고려하면,

$$\frac{F_c(i)}{U(i)} = K_m K_p \frac{(1 - e^{-T/r})z^{-1}}{1 - e^{-T/r}z^{-1}} \quad (5)$$

이 된다. 여기서, K_m 은 이송계와 측정장치 게인의 곱, r 는 이송계의 시정수를 나타낸다. 일반적으로 식 (5) 에서 샘플시간 T 는 이송계의 시정수 r 보다 크기 때문에

$$\frac{F_c(i)}{U(i)} = K_m K_p z^{-1} \quad (6)$$

이 된다. 따라서 식 (4) 와 식 (6) 을 이용하면 Fig. 2 의 블록선도를 Fig. 3 과 같이 간략화 할 수 있다.

Fig. 3 으로 부터 기준전삭력과 실제전삭력 사이의 전달함수를 구하면

$$G(z) = \frac{F_c(i)}{F_r(i)} = \frac{K_i T K_m K_p z^{-1}}{1 + (K_i T K_m K_p - 1)z^{-1}} \quad (7)$$

이 되고, 전달함수의 극점은 다음과 같이 된다.

$$z_{pole} = 1 - K_i T K_m K_p \quad (8)$$

식 (8) 로 부터 전삭력제어시스템이 안정한 조건은

$$z_{pole} = |1 - K_i T K_m K_p| < 1 \quad (9)$$

이 됨을 알 수 있다. 식 (9) 에서 T 는 사용자가 설정하는 샘플주기이고, K_m 은 전삭력 측정센서의 게인과 이송계의 이송지령과 실제 이송량 사이의 게인의 곱으로 정의되는 게인이다. 이들 T 및 K_m 이 결정되고, 식 (9) 를 선형화한 전삭력 시스템의 안정성 (Stability) 은 K_p 에 제한을 받게 된다.

$$K_p = K_s d^\alpha f^{\beta-1} s^\gamma \quad (10)$$

로 정의되며 전삭조건에 따라서 K_s , d , s 및 f 가 바뀌면 시간에 따라서 변하게 된다. 그러므로, 전삭공정중에 안정성을 유지하기 위해서는 식 (9) 에서 직진한 K_i 값을 선정하여, 전삭조건에 관계없이 단위원 내에 z_{pole} 이 존재하도록 하여야 한다. Fig. 4 에 고정게인형 적응제어기의 블럭선도를 나타내었다.

2.2.2 K_i 추정기

앞의 2.2.1 절에서는 K_i 를 고정한 후 전삭조건에 따른 식 (8) 의 안정화를 시도하였으나, 심각한 전삭조건 (전삭깊이, 공작물, 이송속도, 스핀들속도 등) 의 변화로, K_p 값이 커지게 되면 일부구간에서 불안정한 현상이 이기된다. 이와같은 현상을 제거하기 위해서는 어떠한 가공조건에서도

$$|z_{pole}| < 1 \quad (11)$$

을 만족하는 제어기를 설계하여야 한다.

K_p 의 변화에 관계없이 식 (11) 를 만족시키기 위해서 $\overline{K_p} = K_m K_p$ 로 정의한 후, Fig. 5 와 같이 적분형 $K_i(i)$ 추정기를 도입하였다.

$$E_i^*(i) = 1 - K_i^*(i) \overline{K_p}(i) T \quad (12)$$

$$K_i^*(i+1) = K_i^*(i) + c E_i^*(i) \quad (13)$$

이어서 $K_i^*(0) = 0$ 이고 c 는 사용자가 설정하는 상수이다.

3. 실험장치의 구성

Fig. 6 은 PMC 인터페이스¹⁶⁾를 통한 이송속도 Override 를 이용하여 이송속도를 제어하는 경우 실험장치의 개략도이며, Fig. 7 은 이송속도 Override 가 수행되는 것을 보여준다. 실험장치 및 조건은 Table 1 과 같으며 Fig. 8 은 전체 시스템을 보여준다.

4. 실험 결과

안정전삭력 적응제어 실험은 제어변수 K_i 를 고정시킨 상태와 추정기를 채용한 상태로 구분하여, 같은 실험조건하에서 각각 샘플시간을 달리하여 실험을 수행하였다. 또한 전삭깊이를 달리 실험함으로써 전삭깊이 변화에도 전삭력 안정제어기가 달성되는지 확인하였다. 이와 같은 실험방식으로 변수를 고정시킨 방식과 추정기를 채용한 방식의 차이점을 규명하였으며, 또한 샘플시간을 달리하였을 때 각각의 장단점을 밝힘으로써 상황에 따라 사용자가 최선의 조건을 선정할 수 있도록 하였다.

4.1 고정 변수 하에서의 실험

4.1.1 극점의 영역은 -0.5 와 0.5 사이로 고정시켰을 때

원하는 극점을 -0.5 와 0.5 사이로 한정시키고 샘플시간을 0.1, 0.075, 0.05 초로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 주축의 회전속도를 600 rpm, 공칭 이송속도는 200 mm/min 로 하였고, 공구인원은 4 개이기 때문에 샘플시간 0.1 초는 주축이 1 회전 하였을 경우, 0.075 초는 주축이 3/4 회전하였을 경우, 그리고 0.05 초는 주축이 1/2 회전하였을 경우를 나타낸다.

샘플시간을 0.1 초로 고정시킨 경우에는 측정된 전삭력이 기준 전삭력 800 N 에 근사한 경향을 나타내나, 샘플시간이 0.075 초나 0.05 초 일때 안정전삭력제이가 보다 더 잘 이루어지고 있는 것을 알 수가 있었다.¹⁰⁾ Fig. 9 는 K_f 를 3.3 으로 고정시키고, 샘플시간이 0.075 초인 경우를 나타내며, 초기전삭시 전삭력이 800 N 에 미치지 못하는 것은 전삭깊이가 기준치보다 너무 작아서, 이송속도를 최대 150 %, 300 mm/min 으로 증가시키도 전삭력이 기준 전삭력에 이르지 못하기 때문이다. 그러나 이것은 시론에서도 언급하였듯이 적응제어 시스템을 이용함으로써 단위시간당의 전삭량 (MRR) 을 극대화할 수 있음을 실증하고 있다. Fig. 10 에서 K_f 는 5.0 이며 샘플시간이 0.05 초로 기준 전삭력의 제이가 잘 이루어지고 있는 것을 보여준다.

적용제어 시스템에서 평균전삭력을 개선하고 이송속도 제어를 위한 개선시간 등을 감안하여 선정되는 T 는 디지털제어기에서 안정성에 영향을 주며, 특히 전삭공정중 변화가 발생하는 K_f 개수의 추정주기를 제한한다. 또한 T 가 작을수록 K_f 개수 추정속도가 빠르게 진행되며 갑작스런 가공조건의 변화에 대해서 좋은 제어효과를 볼 수 있다.

4.1.2 극점의 영역은 0.0 과 1.0 사이로 고정시켰을 때

원하는 극점을 0.0 과 1.0 사이로 한정시키고 그외의 조건은 4.1.1 의 실험조건과 동일하게 취하였다. Fig. 11 은 K_f 가 2.5, 샘플시간이 0.05 초인 경우이다. 최대 전삭깊이를 4 mm 로 증가시킨 경우에도 안정한 극점에 위치할 수 있도록 개수를 선정 한 결과, Fig. 12 에서 볼 수 있듯이 전삭깊이가 급격히 변했음에도 불구하고 기준 전삭력 800 N 을 잘 충족함을 볼 수 있다.

4.2 추정기를 채용한 경우의 실험

앞의 4.1 절에서는 전삭공정의 극점이 안정하게 될 수 있도록 하기 위하여 제어개인 K_f 를 초기추정과 실험을 통하여 5 ~ 1.67 사이의 값으로 선정하였다. 그러나, 실제 전삭공정에서 이와 같은 K_f 추정은 별도의 초기 추정과정을 요구하며, 때로는 부정확하게 규명되는 경우도 발생한다. 본 절에서는 디지털제어기가 K_f 값을 자동으로 선정할 수 있도록 추정기를 채용한 실험을 수행하였다.

앞서와 마찬가지로 주축 회전속도가 600 rpm 인 경우는 샘플시간을 0.1, 0.075, 0.05 초로 변화시키면서 실험을 하였고, 주축의 회전속도가 800 rpm 인 경우는 샘플시간을 0.075, 0.0563, 0.0375 초로 변화시키면서 실험을 하였다. 800 rpm 인 경우의 샘플시간 0.075 초는 주축이 1 회전하였을 경우, 0.0563 초는 주축이 3/4 회전하였을 경우, 그리고 0.0375 초는 주축이 1/2 회전하였을 경우를 나타낸다.

실험 결과는 Table 2 와 같이 CASE I, CASE II, CASE III 그리고 CASE IV로 조건에 따라 구분하여 나타내었다. 전삭깊이가 급격히 증가하거나, 주축 회전속도 등이 증가하더라도 추정기의 채용으로 K_f 의 초기추정 없이도 비교적 안정한 안정전삭력의 제이가 가능하다는 것을 입증하였다. 또한 샘플시간에 따른 정단점은 다음에 같다.

(1) 샘플시간이 주축 1회전과 같을 때

전삭력이 변동 없이 일정하게 나타난다. 단, 주축이 1 회전 한 후의 전삭력은 이하하이 제어를 하기 때문에 가공조건의 급격한 변화가 발생할 경우 민감도가 낮아질 수 있다.

(2) 샘플시간이 주축 3/4 회전과 같을 때

주축이 3/4 회전한 경우는 전삭력이 1 회전 한 경우에 비하여 일정치 않으나 기준 전삭력을 근사하게 따라가고 있다. 민감도 면에서는 1 회전의 경우 보다 나아진 것을 볼 수 있다.

(3) 샘플시간이 주축 1/2 회전과 같을 때

주축이 1/2 회전한 경우는 전삭력의 형태가 선형적이지 못하고 변동이 많은 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 전삭력의 변동도 거의 일정하게 기준 전삭력 범위 내에서 유지되는 것을 확인할 수 있으므로 안정전삭력제어의 관점에서 보면 좋은 결과이다. 또한 샘플시간이 작아지므로 민감도가 매우 큼을 볼 수 있는데, 이것은 돌발적인 가공조건의 변화에도 빠른 추종제어를 가능하게 한다.

5. 결론

구속적용제어 이론을 머시닝센터의 엔드밀링 공정에 적용하여 가공조건의 급격한 변화에도 이송속도 Override 를 이용, 전삭력을 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.

이송속도 Override 는 PMC 인터페이스를 이용하여 NC 장치의 선개변경없이 수행하였으며, 실시간으로 전삭개수를 선정하기 위하여 직분 형태의 추정기를 제시하였다. 적용제어 상태에서의 가공시 전삭력이 기준전삭력의 약 5% 범위내에서 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있는데, 이는 고정상 고정산정 가공이 가능함을 보여준다. 또한, 신경회로망 기법을 이용한 공정 초기 전삭개수 추정시스템과 통합된 ACC 시스템은 작업자의 능력에 관계없이 고정상상 머시닝센터의 최저이용을 위한 지능화기술 개발에 기여할 수 있다.

앞으로는 이송속도에 의한 적응제어 뿐만 아니라 주축 회전 속도에 따른 적응제어로의 확대가 필요하며, 이송계의 미선형성에 대한 고려가 필요하다. 또한, 정면성에 대한 요구가 강해짐에 따라 기하학적적용제어 (GAC) 의 필요성이 인식되고 있는 상황이므로 본 ACC 시스템에 GAC 시스템을 접목시킬 필요가 있으며, 코너링, 3차곡면 등으로 확장하고, Air Cutting 시 이송속도 급속화와 전삭개시 Triggering 및 충돌방지 기술 등이 필요하다.

참고문헌

1. 정성중, 1988, "기하학적 적응제어에 의한 엔드밀링머시닝의 인내면 오차 규명", 대한기계학회 논문집, 제 12 권, 제 1 호, pp.226-234.
2. S.C. Chung, C.W. Lee and J.S. Kim, 1988, "Geometric Adaptive Straightness Control System for the Peripheral End Milling Process", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 27, No.4, pp. 417-430.
3. S.C. Chung and C.W. Lee, 1990, "Geometric Adaptive Straightness Control System for the Peripheral End Milling Process with Large Error Sources", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 30, No. 3, pp.447-465.
4. 정성중, 1988, "공작기계의 자동화를 위한 적응제어 기술의 개발 동향", 대한기계학회지, 제 28 권, 제 3 호, pp. 167-170.
5. 정성중, 박영진, 김승진, 김정성, 양종대, 1994, "고정밀 고정상상 머시닝센터 개발을 위한 전삭상태 및 일면형 적응제어 기술", 제 2 회 G 7 첨단생산시스템 Workshop.
6. M. Tomizuka, J.H. Oh, and D.A. Dornfeld, Nov. 1983, "Model Reference Adaptive Control of the Milling Process", ASME winter annual meeting, Control of Manufacturing Process and Robotic Systems.
7. A.G. Ulsoy, Y. Koren and F. Rasmussen, 1983, "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.105, pp.107-112.
8. M. A. Elbestawi, Y. Mohamed, and L. Liu, Dec. 1990, "Application of Some Parameter Adaptive Control Algorithms in Machining", Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, pp. 611-617, Vol. 112.

9. 정성중, 1992, "적응제어 수치제어 시스템의 개발 (I) - 신경회로망 기법에 의한 전사계수의 실시간 선정", 대한기계학회 논문집, 제 16 권, 제 7 호, pp. 1223-1233.
10. 정성중 등, 1994, "고정밀·고속생산 머시닝센터 중 오차보정 기능 및 적응제어 기능의 개발", G7 프로젝트 중간보고서, 세원중공업(주).

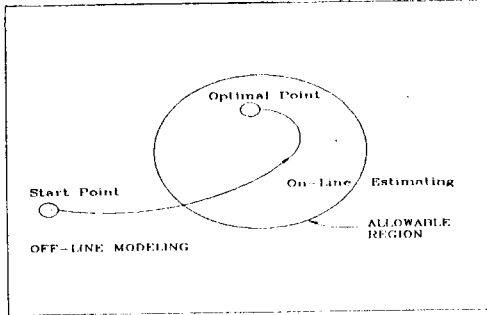


Fig. 1 Schematic diagram of the real-time optimal adaptive control

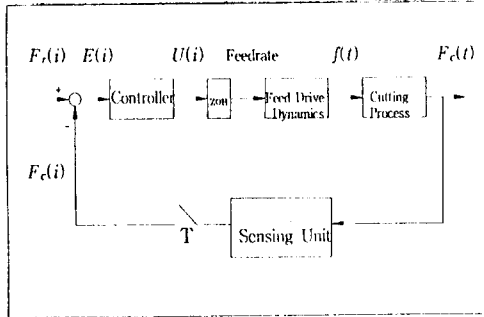


Fig. 2 Cutting force control system

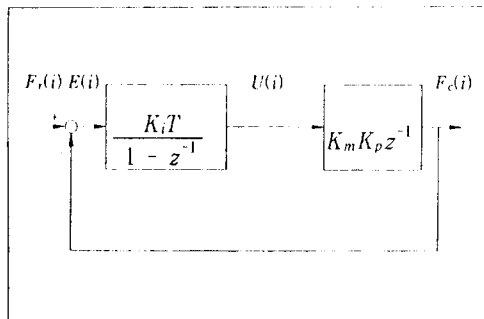


Fig. 3 Digital control system for cutting force regulation

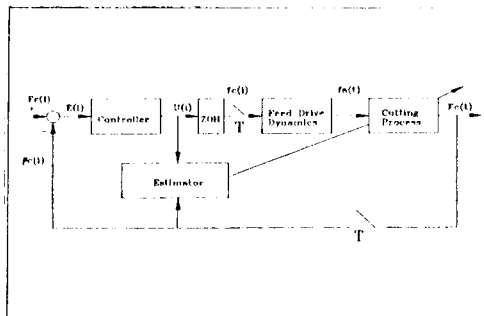


Fig. 4 Block diagram of the fixed type adaptive controller

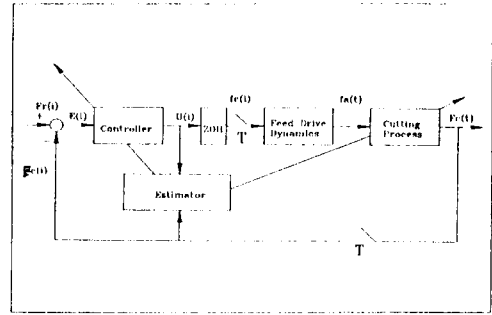


Fig. 5 Block diagram of the K_i estimator type adaptive controller

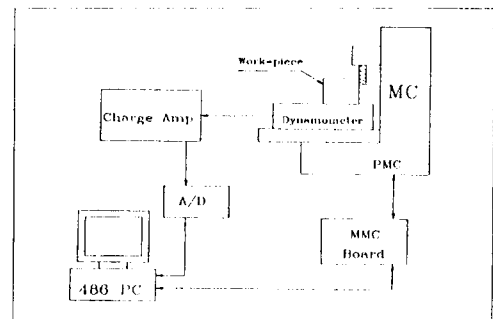


Fig. 6 Schematic diagram of experimental set up

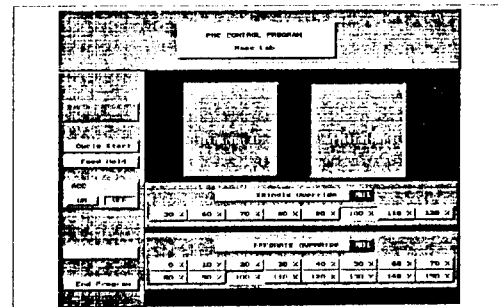


Fig. 7 Status of feedrate override control

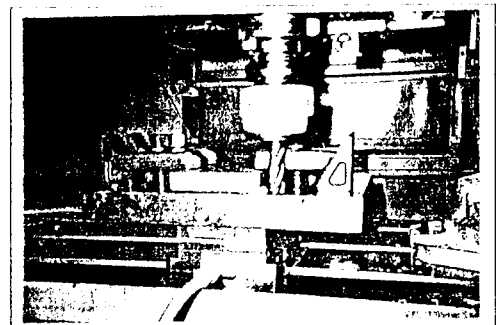


Fig. 8 Experimental set-up

Table 1 Experimental equipments and conditions

Equipments & Conditions	Specifications	Remarks
Machine Tool	VMC-430 with FANUC 0MC	Hwacheon Machinery, Inc.
Tools	Flat End Mill	Diameter : 16 mm Length : 96 mm Teeth : 4 $\frac{1}{2}$ Material : H.S.S.
Workpieces	SB40	Width : 16 mm
Force Sensor	9257B	KISTLER
Charge Amp.	5019A	KISTLER
Cutting type	Peripheral Milling End Milling	
Reference force	800 N	
Nominal feedrate	200 mm/min	
Spindle speed	600, 800 rpm	
PMC interface	MMC Board	MASC-LAB. Hanyang Univ.
μ -computer	IBM PC 486	DX/2, 66MHz
A/D Board	AD1200	Real Time Devices, Inc.

Table 2 Experimental Environment & Results

Case	Conditions for variable gain methods			Results
	Spindle speed (rpm)	Radial depth of cut (mm)	Sample time (sec)	
CASE I	600	1, 2, 3	0.1	<Fig. 13>
			0.05	<Fig. 14>
CASE II	600	1, 2, 4	0.1	<Fig. 15>
			0.05	<Fig. 16>
CASE III	800	1, 2, 3	0.075	<Fig. 17>
			0.0375	<Fig. 18>
CASE IV	600	1~4.5	0.1	<Fig. 19>
			0.05	<Fig. 20>

