

# 반복학습제어를 이용한 커터 런아웃 보상에 관한 연구

황 준\*, 정의식\*\*, 황덕철\*\*\*

## A Study on the Cutter Runout In-Process Compensation Using Repetitive Learning Control

Joon Hwang\*, Eui-Sik Chung\*\*, Duk-Chul Hwang\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the in-process compensation to control cutter runout and improve the machined surface quality. Cutter runout compensation system consists of the micro-positioning servo system with piezoelectric actuator which is embeded in the sliding table to manipulate radial depth of cut in real-time. Cutting force feedback control was proposed in the angle domain based upon repetitive learning control strategy to eliminate chip load variation in end milling process. Micro-positioning control due to adaptive actuation force response improves the machined surface quality by compensation runout effect induced cutting force variation. This result will provide lots of information to build-up the precision machining technology.

**Key Words :** Cutter Runout(커터 런아웃), Repetitive Learning Control(반복학습제어), Cutting Force Feedback Control(절삭력 피드백제어), Micro-Positioning Servo Control(미소변위서보제어), In-Process Compensation(공정중 보상)

### 1. 서론

기계가공분야에 있어서 가공정밀도 향상을 위한 다양한 연구들이 진행되어오고 있다. 한편, 공작기계 사용중에 외란의 형태로 부여되는 각종 영향들은 가공정밀도를 크게 악화시킬 뿐만 아니라, 그 제어도 쉽지 않다. 특히, 기계가공의 핵심부품인 주축의 변형이나 조립상의 부주의로 인해 발생하는 주축 커터 런아웃 현상은 가공정밀도 저하의 주된 요인이 되고 있으며<sup>1)</sup>, Fig.1 에 나타낸 바와 같이 공구에 주기적인 부하변동을 야기 시켜 공구

수명 단축과 제품의 가공표면품위를 악화시키므로써(Fig.2), 제품의 요구정밀도를 충족시키지 못하는 주된 요인이 되고 있다<sup>2)</sup>.

현재, 우리 산업현장에서 이루어지고 있는 이에 대한 해결책으로서는 정지한 주축의 정적 보상, 즉, 주축을 포함한 공구의 선차나 작동시 편심이 발생하지 않도록 주의를 기울이는 등과 같은 시행착오적인 방법이나, 또는 고정밀도의 주축베어링과 공구홀더를 사용하는 정도의 처방책을 마련하는 수준에 있다. 그러나, 실제로 고속, 고정밀도를 요구하는 가공공정에서는 주축 회전시 상기의 정적성

<sup>1)</sup> 2001년 9월 13일 접수

\* 충주대학교 기계설계학과

\*\* 한밭대학교 기계설계공학과

\*\*\* 인천대학교 대학원 기계공학과

분과 함께 순간적인 절삭력 변화나 커터의 미세한 형상 불균일과 공구의 불균일한 마멸 진전 등에 기인하는 소위 사전에 예측이 불가능한 여러 요인들이 중첩되어 복잡한 양상의 커터 런아웃이 발생하게 된다.

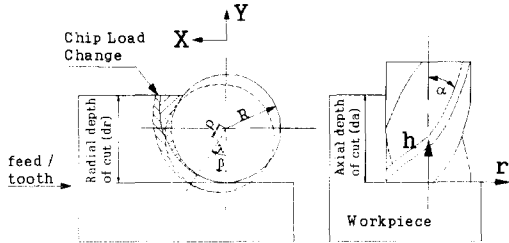


Fig. 1 Schematic diagram of cutter runout and chip load change

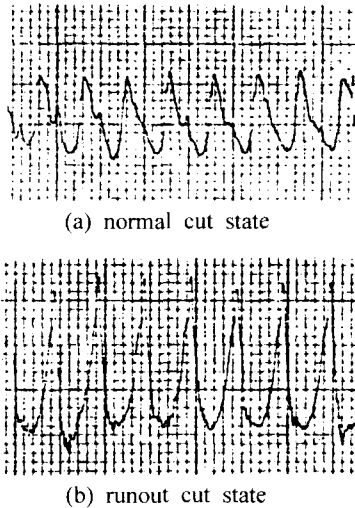


Fig. 2 Comparison of measured surface roughness with respect to runout magnitude  
((a)  $\rho=2 \mu m$ , (b)  $\rho=15 \mu m$ )

본 연구에서는 기존의 공작기계 시스템을 보다 고능률화, 고정밀도화 하여 생산성을 극대화할 목적으로 엔드밀 가공중 커터 런아웃 현상에 기인하는 절삭력 신호를 측정하여 이를 제어인자로 하는 인프로세스 커터 런아웃 보상 시스템(in-process cutter runout compensation system)을 구성하고, 실시

간 반복학습제어(repetitive learning control) 에 기초한 절삭깊이 제어를 통해 커터 런아웃 현상을 극소화하거나, 혹은 이를 제거하기 위한 연구를 수행하였다. 이러한 연구방향설정은 종래의 연구결과들이 안고 있던 실제 가공공정 적용시 발생하는 예측이 어려운 탄두하중영향과 동적 벤드폭 제약등의 문제점 해결을 포함하고 있다.

## 2. 보상시스템의 설계 및 제작

### 2.1 하드웨어 구성

커터 런아웃 제거를 위한 인프로세스 런아웃 보상시스템은, Fig.3 에 나타난 바와같이, CNC 밀링 머신, 런아웃 신호의 검출 및 변환장치, 마이크로프로세서, 미세위치제어기구 등으로 구성하였으며, 아래에 기술한 바와같이, 시스템 하드웨어를 설계, 제작하고, 제어알고리즘을 개발하였다.

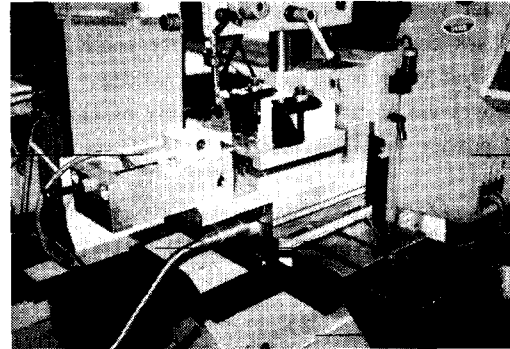


Fig. 3 Photo. of in-process cutter runout compensation system

런아웃 보상을 위한 미세위치제어기구는 기본적으로 런아웃 현상을 담고 있는 가공물 표면, 즉 절삭저항 배분력 방향으로의 절삭깊이(radial depth of cut; Y-방향)를 제어할 수 있도록 설계하였으며, Fig.3 에 나타난 바와같이, 공작물의 미세변위제어를 위해 슬라이딩 테이블(sliding table) 과 압전소자 구동기 및 증폭기(PZT-actuator & amp.), 서보제어기(servo controller)로 구성하였다. 이때, Fig.4에 나타난 바와 같은 압전소자 구동기와 슬라이딩 가이드를 일체화시킨 서보제어기는 X 와 Y의 2축 동시제어가 가능하도록 제작되었으며, 런아웃량에 대응하는 제어신호를 압전소자 구동기에 출력하여 칩부하를 최소화할 수 있는 방향으로 구동함으로써

미소변위제어(micro-positioning control)가 이루어진다. 또한, 본 연구에서는 직선가공시의 커터 런아웃 제어를 위해 원주방향 절삭깊이(dr)의 1축 제어만을 실시하였다.

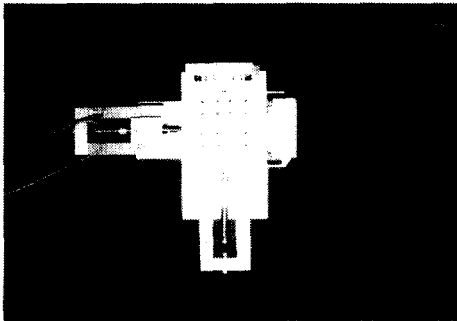


Fig. 4 Micro-positioning device which is embedded piezoelectric actuator

절삭력의 측정은 밀링기의 주축단에 고정 설치한 엔코더에서 발생하는 동기화 펄스신호에 의해 회전각 영역(angle domain)에서 공구 1회전당 100개의 데이터를 샘플링 하였으며, 이러한 회전각 영역에서의 절삭력 측정은 주축회전속도에 관계없이 적용적으로 커터 런아웃에 기인하는 절삭력 변화를 정확히 검출할 수 있는 장점이 있다. 또한, 절삭력 신호는 런아웃 현상에 대한 정확한 정보를 얻기 위하여 스피들 회전주파수(5Hz) 부근의 4~6Hz로 대역통과필터(band-pass filter)를 설정하여 검출하였으며, 이를 제어인자로 하는 Fig.5의 절삭력 피드백 제어시스템을 구성하여 런아웃 보상을 실시하였다.

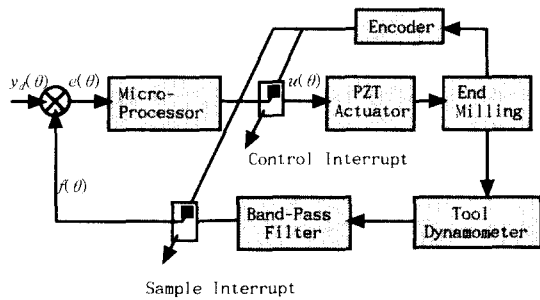


Fig. 5 Block diagram of cutting force feedback control system

## 2.2 제어알고리즘 구성

본 연구에서의 제어목적은 런아웃량에 대응하는 절삭력 변화를 실시간으로 보상하는데 있다. 이는 Fig.5에 나타낸 바와 같이, 런아웃에 대응하는 오차신호(error signal),  $e(\theta)$ 를 영(zero) 또는 최소화시키는 것을 의미한다. 즉,

$$e_{ss} = \lim_{\theta \rightarrow \infty} e(\theta) = 0 \quad (1)$$

이때,  $y_d(\theta) = 0$  for all  $\theta$ .

반복학습제어의 이용은 커터 런아웃에 의해 일어나는 절삭력 변화가 주기적이라는 사실에 착안하여, 현재 주기의 기준입력은 정상상태 오차가 영이 되도록 이전 주기에서의 오차신호에 따라 수정된다. 이와 같은 내부모델원리에 바탕을 둔 반복학습 제어기는 커터 런아웃 발생과 같은 주기적 외란을 수반하는 반복오차 성분을 제거하기 위한 기계가공 프로세스의 제어에 매우 효과적인 것으로 알려지고 있다. 이산시간 학습제어기의 전달함수는 다음과 같다.<sup>3)</sup>

$$\frac{u(\theta)}{e(\theta)} = \frac{1}{(1-q^{-N})} \frac{P_c(q^{-1})}{Q_c(q^{-1})} \quad (2)$$

여기서,  $\frac{1}{(1-q^{-N})}$ 은 동적 플랜트의 비점근적 안정부를 나타내며,  $N$ 은  $360^\circ$  스피들 회전의 1주기에 대한 공구의 회전각을 나타낸다. 또한, 개루프에 대한 극영점 소거법(pole-zero cancellation type)의 제어기는 다음과 같다.

$$P_c(q^{-1}) = K_r^{-N+1} \cdot P_p(q^{-1}) \quad (3)$$

$$Q_c(q^{-1}) = q^{-1} \cdot Q_p(q^{-1}) \quad (4)$$

여기서,  $K_r$ 은 제어기와 가공프로세스 사이의 동적소거를 통합하는 피드포워드루프의 정상상태 이득인 학습이득을 나타내며,  $P_p(q^{-1})$ 와  $q^{-1} \cdot Q_p(q^{-1})$ 은 학습제어기에서 볼 수 있는 개루프 플랜트 전달함수에 대한 분모와 분자 다항식이

다. 즉,

$$\frac{f(\theta)}{e(\theta)} = \frac{q^{-1}P_p(q^{-1})}{Q_p(q^{-1})} \quad (5)$$

그리고, 절삭력의 기준입력과 측정출력에 대하여 정의된 폐루프시스템의 특성방정식은 다음과 같다.

$$Q_p(q^{-1}) \cdot P_p(q^{-1})[(1 - q^{-N}) + K_r \cdot q^{-N}] = 0 \quad (6)$$

여기서, 학습이득이

$$0 < K_r < 2 \quad (7)$$

를 만족하도록 선택하여야만 학습제어하에서 폐루프시스템의 점근안정성이 보장된다.

이상에서 구성한 인프로세스 런아웃 보상시스템과 제어 알고리즘의 유용성을 확인하기 위해 절삭실험을 실시하였으며, 이때 런아웃에 기인하는 절삭력 변동성분과 이를 제어하기 위해 출력된 제어신호를 Fig. 6에 나타내었다.

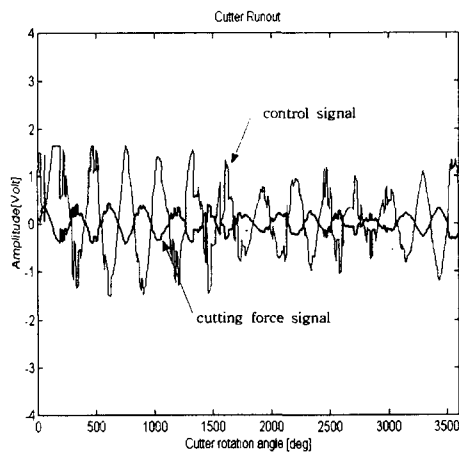


Fig. 6 Variation of cutting force & control signal under cutter runout state (fr=300 mm/min, dr=1.0 mm)

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 제어신호는 절삭력의 변동에 대해 역방향으로 생성하도록 하였으며, 이는 런아웃 현상으로 인한 절삭깊이의 변화에 대응하는 절삭력 변동성분을 보상하기 위함이다.

따라서 이러한 절삭력 변화를 실시간으로 검출하여 슬라이딩 테이블의 미세위치를 제어함으로써 런아웃 보상이 이루어질 수 있으리라 판단된다.

### 3. 실험결과 및 고찰

엔드밀 가공시 발생하는 런아웃 현상을 규명하기 위하여, Table 1에 나타낸 실험조건으로 절삭실험을 행하고, 이때 측정된 절삭력 신호의 주파수 분석결과로부터 런아웃 발생이 절삭력의 주파수 성분 변화에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다.

Table 1 Experimental cutting conditions

Cutting Variables	Cutting Conditions
Cutting tool	φ10 mm, 4-flute, 30° helix angle
Workpiece material	UHMW Polyethylene
Axial depth of cut (da)	14.0 mm
Radial depth of cut (dr)	1.0 mm
Feed rate (fr)	150, 300 mm/min
Feed direction	down cut
Spindle speed (n)	300 - 600rpm
Cutter runout magnitude(ρ)	16 μm

Figure 7 과 Fig.8 은, 정상가공과 런아웃 발생시, 검출된 절삭력 신호와 이를 주파수 분석한 결과를 나타내었다. 동일 절삭조건에서 16 μm의 커터 런아웃이 존재하는 조건일때(Fig.8) 절삭력 신호는 정상시(Fig.7)에 비하여 진폭이 크게 (약 2.5배 이상) 증대하며, 반복 주기적으로 변동하고 있다.

이와같은 절삭력의 변동은 공구의 매 회전주기마다 커터 런아웃량에 대응하는 절삭깊이의 증가분이 침부하의 변화를 일으키기 때문으로 판단된다. 또한, 절삭력의 주파수 분석 결과를 보면, 정상가공시 공구회전주파수(spindle rotating frequency:  $f_n=5\text{Hz}$ )에 비해 절삭날 통과주파수성분(tooth passing frequency:  $f_t=20\text{Hz}$ )의 진폭이 크게 나타나고 있는데 대하여, 런아웃 발생시는  $f_t$ 에 비하여  $f_n$ 의 진폭이 크게 증대하는 동시에 전대역에 걸친 스펙트럼의 파워가 크게 증가하고 있다.

이와같은 결과는 매우 흥미있는 것으로서, 공구의 회전주파수  $f_n$ 은 커터 런아웃 발생의 영향을 매우 민감하게 반영하며, 특히 공구 회전주파수 내역의 동적 절삭력이나, 주파수성분의 진폭은 런아웃 현상의 규명이나 런아웃량을 검출하는데 있어 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

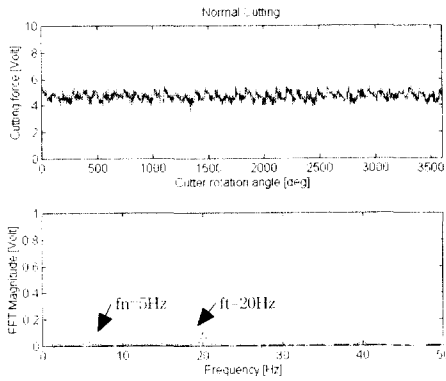


Fig. 7 Variation of cutting force and frequency response under normal cutting state ( $f_r=150$  mm/min,  $n=300$  rpm)

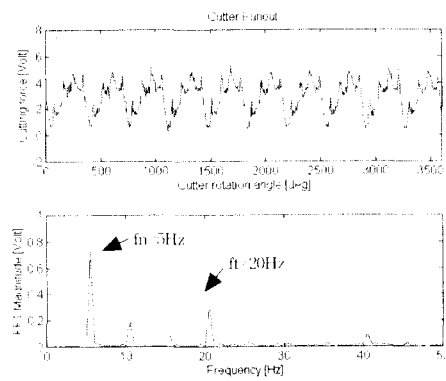
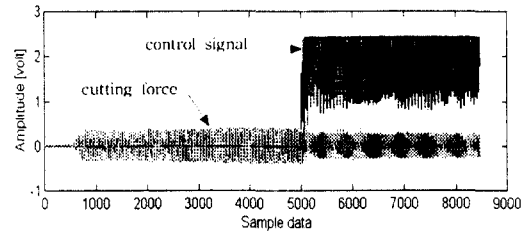
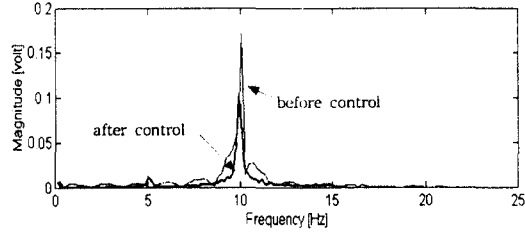


Fig. 8 Variation of cutting force and frequency response under cutter runout state ( $f_r=150$  mm/min,  $n=300$  rpm)

Figure 9 와 Fig.10 에는 반복학습제어를 통해 실시간 커터 런아웃 보상을 실행하였을 때, 검출된 제어 및 절삭력 신호를 정상가공상태와 런아웃 발생시에 대하여 각각 나타내었다. 그림에서 런아웃 발생시(Fig.10) 절삭력 신호의 진폭은 정상시(Fig.9)

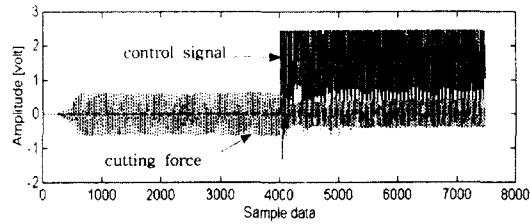


(a) cutting force & control signal

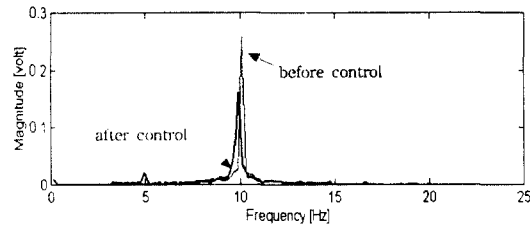


(b) frequency response of cutting force

Fig. 9 Variation of cutting force and frequency response under normal cutting state ( $f_r=300$  mm/min,  $n=600$  rpm)



(a) cutting force & control signal



(b) frequency response of cutting force

Fig. 10 Variation of cutting force and frequency response under cutter runout cut state ( $f_r=300$  mm/min,  $n=600$  rpm)

에 비하여 런아웃량에 대응하여 증가하고 있으며, 이들 모두 반복학습 제어를 실시한 후에는 절삭력이 다시 감소하였음을 알 수 있으며, 칩부하 변동에 기인한 절삭력 증감 변화를 실시간 절삭깊이 정밀제어를 통해 효과적으로 극소화할 수 있다.

또한, 일반적으로 커터 런아웃이 존재하지 않는다고 판단할 수 있는 정상가공상태에서도 공구홀더의 제작 및 조립정밀도에 의해  $2\ \mu m$  정도의 런아웃이 존재하며, 이러한 상태에서도 본 보상시스템에 의한 제어를 통해 칩부하를 제거 또는 최소화하여 가공정밀도를 더욱 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터, 본 연구에서 적용한 반복학습 제어알고리즘과 보상시스템이 가공공정 중에 실시간 커터 런아웃 보상기능을 충분히 수행하고 있음을 알 수 있다. 또한, 커터 런아웃 보상후 절삭력이 감소하고 있는 것은 커터 런아웃에 의한 절삭깊이 변화량, 즉 칩부하 변화를 효과적으로 제거하고 있음을 의미하며, 이는 반복 학습제어 전·후의 주파수 분석 결과에서도 잘 입증해 주고 있다. 즉, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 공구 회전주파수 성분  $f_r=10\text{Hz}$  부근의 진폭이 제어후 다시 감소함을 보여주고 있다.

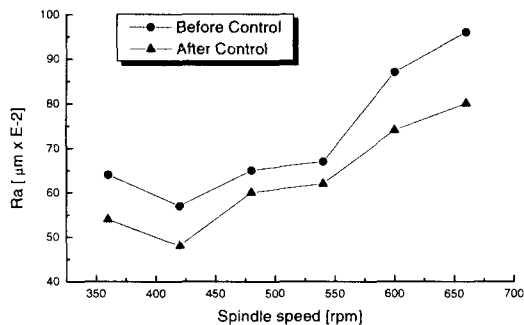


Fig. 11 Comparison of the center line average surface height under normal and runout cut state

한편, Fig. 11에는 정상가공상태와 커터 런아웃 상태에서 각각 반복학습제어를 이용한 보상을 실시한 전·후에 측정된 가공면의 중심선 평균거칠기 (center line average surface height)  $R_a$  값을 나타낸

것으로서, 제어후 가공물의 표면품질은 전체적으로 크게 개선되고 있으며, 또한, 통상적인 정상가공시 ( $\rho = 2\ \mu m$ ) 에도 반복학습제어를 통하여 표면거칠기가 크게 향상될 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 밀링공작기계를 이용한 기계가공공정에 있어서 제품의 가공정밀도를 저하시킬 수 있는 외란 성분인 커터 런아웃 현상의 영향을 제거 또는 극소화하기 위하여, 절삭력 신호에 반영된 칩부하 변동을 제어할 수 있는 인프로세스 커터 런아웃 보상시스템을 개발하고, 실험적 검증을 통한 시스템의 유용성과 실용화 가능성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 검출된 절삭력에서 공구회전 주파수 대역의 신호와 같이 커터 런아웃 현상을 민감하게 반영하는 성분을 이용하여 런아웃 보상의 유용한 정보로 사용할 수 있다.

2) 칩부하 변동에 기인한 절삭력 신호 변화성분을 제어변수로 하여 반복학습제어 알고리즘과 절삭력 피이드백 제어에 기초한 인프로세스 커터 런아웃 보상시스템을 개발하였으며, 이를 이용하여 제품가공시 발생하는 커터 런아웃 마크를 효과적으로 제거하고, 가공정밀도를 약 20%이상 개선할 수 있었다.

3) 본 연구의 결과를 향후, 범용 및 수치제어 공작기계의 가공정밀도 향상과 금형 가공공정 등에 적용함으로써, 품질개선 및 생산향상, 생산원가의 절감효과가 기대된다.

#### 참고문헌

1. Bifano, T. G., and Dow, T. A., "Real Time Control of Spindle Runout," *Optical Engineering*, Vol. 24, No. 5, October, pp. 888-892, 1985.
2. Liang, S. Y., Horng, M. C., and Liu, M., "Runout Compensation in peripheral Milling Using Repetitive Control," *Proc. of Symposium on Advances in Manufacturing System Engineering*, ASME Winter Annual Meeting, San Francisco,

- CA, December, pp. 77-87, 1989.
3. Tomizuka, M., Tsao, T. C., and Chew, K., "Analysis and Synthesis of Discrete Time Repetitive Controllers," ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 111, pp. 353-358., 1989.
  4. Tsao, T. C., Burke, J. B., and Ferreira, P. M., "Control of Radial Runout in Face Milling." Proc. of Symposium on Control Issues in Manufacturing Processes: Controlling Manufacturing Processes, ASME Winter Annual Meeting, San Francisco, CA, December, pp. 99-105, 1989.
  5. Hwang, J., Chung, E. S., "In-Process Compensation of Cutter Runout for Two-Axes Contour Machining in End Mill," Proc. of the 1999 International Conf. on Mechatronic Technology, pp. 523-528, 1999.