

# 엔드밀 가공에서 2축 절삭력 PI 제어를 통한 커터 런아웃 제거에 관한 연구

노종호\*, 황 준\*\*, S. Y. Liang\*\*\*, 정의식\*\*\*\*

## Cutter Runout Elimination in End Milling through Two-Axes PI Force Control

Jong Ho Noh\*, Joon Hwang\*\*, Steven Y. Liang\*\*\*, and Eui Sik Chung\*\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the in-process runout compensation methodology to improve the surface quality of circular contouring cut in end milling process. The runout compensation system is based on the manipulation of workpiece position relative to cutter in minimizing the cutting force oscillation at spindle frequency. The basic concept of this approach is realized on a end milling machine whose machining table accommodates a set of orthogonal translators perpendicular to the spindle axis. The system performed that measuring the runout related cutting force component, formulating PI controlling commands, and the manipulating the workpiece position to counteract the variation of chip load during the circular contouring cut. To evaluate the runout compensation system performance, experimental study based on the implementation of two-axes PI force control is presented in the context of cutting force regulation and part surface finish improvement.

**Key Words** : Cutter runout (커터 런아웃), Circular contouring cut (원호가공), PI control (비례적분제어), End milling process (엔드밀 공정), Cutting force (절삭력), Surface quality (표면품질), In-Process runout compensation (인프로세스 런아웃보상)

### 1. 서론

커터 런아웃은 밀링공정과 같은 다인공구를 이용한 기계가공에서 자주 발생하는 가공오류로서, 절삭공구가 주축의 기하학적 회전중심에서 벗어나 회전함으로써 공구의 절삭날 홈사이에 침부하가 불균일하게 되어 가공 안정성에 직접적인 영향을 미쳐 요구되는 제품의 정밀도를 충족시키지 못하는

등, 생산의 손실을 초래하는 중요한 장애요인이 되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 특히, 이와같은 커터 런아웃 현상은 주축회전시 정적인 오프셋과 함께 순간적인 절삭력 변화나 공구의 불균일한 마멸진전, 공작기계의 강성 및 진동특성 등에 기인하는 소위 사전에 예측이 불가능한 여러 요인들이 중첩되어 발생하기 때문에 정적 보상만으로는 그 한계가 있음을 지적할 수 있다.

\* 대전산업대학교 기계설계공학과 산업대학원

\*\* 충주대학교 기계설계학과

\*\*\* Georgia Institute of Technology

\*\*\*\* 대전산업대학교 기계설계공학과

최근, 밀링공정에서 커터 런아웃에 의한 동적 절삭력 변화와 공작물 표면품질 사이의 상관관계를 검토하고, 이를 제어하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 즉, Kline 과 DeVor<sup>(3)</sup> 는 런아웃 발생시 절삭력의 특성을 예측하기 위하여 절삭기구, 공구반경, 칩두께 및 공구의 입·출각도 등을 고려한 절삭모델을 개발하였다. Bifano 와 Dow<sup>(4)</sup> 는 스펀들 런아웃을 보상해 주기 위한 피드백 제어에 관한 연구를 하였으며, 런아웃 오차를 와전류로 측정하고 스펀들 지지용 하우징에 설치한 압전소자를 실시간 제어하여 런아웃 크기를 감소시키는 방안을 제시하였다. Fussel 과 Srinivasan<sup>(5)</sup> 은 런아웃에 의한 절삭력 변동으로 야기되는 진동을 보상하기 위하여 가변이득 비례적분제어기, 단독비선형 제어알고리즘, MRAC(model reference adaptive controller)의 3가지 능동제어기에 대한 성능시험을 하였다. 그러나 이들의 연구는 주로 제어기법에 관해서만 연구의 초점을 두고 있으며, 실제의 가공공정에 직접 적용하여 커터 런아웃의 절삭력 보상을 하는데는 많은 제한을 받고 있는 것으로 지적되고 있다. 한편, Tsao 와 Pong<sup>(6)</sup> 은 밀링에서 변속추적에 의한 반복학습제어방식으로 런아웃을 보상하여 제품의 표면품위를 향상시키기 위한 칩하중 서보방식을 제안하였으며, Liang<sup>(7)</sup> 등은 절삭력 피드백 시스템을 이용하여 절삭깊이를 능동제어하고, 수치적 시뮬레이션 결과를 통하여 런아웃 보상이 가능함을 제시하였다.

본 연구에서는, 기존의 범용 및 수치제어 밀링기를 보다 고능률화·고정도화하여 생산성을 극대화할 목적으로, 엔드밀 원호가공시 커터 런아웃에 기인하는 동적 절삭력을 측정하여, 이를 제어변수로 하는 2축 PI 절삭력 제어방식에 의한 인프로세스 런아웃 보상시스템을 구성하고, 이를 이용하여 제품의 원주표면에 생성된 런아웃 마크를 제거하기 위한 실험적 연구를 수행하였다.

## 2. 시스템 설계 및 제어 알고리즘

### 2.1 시스템 설계

Fig.1은 본 연구에 사용한 실험장치를 나타낸 것으로서, 런아웃 보상시스템은 CNC 밀링머신, 런아웃 신호검출 및 변환장치, 마이크로 프로세서, 미세위치 서보제어기구 등으로 구성하였다. 즉, CNC 밀링머신의 테이블에 공구동력계를 고정 설치하고,



Fig. 1 Experimental setup.

그 위에 런아웃에 기인하는 수평방향의 동적 절삭력  $\Delta F_x$  와  $\Delta F_y$  를 제거하기 위하여 공작물을 각각  $x$ ,  $y$  평면상에서 미세변위시키기 위한 압전소자 변환기가 내장된 한쌍의 슬라이딩 테이블을 설치하였으며, 슬라이딩 테이블은  $x$ 축과  $y$ 축 방향으로 낮은 마찰계수( $\mu = 0.0005 \sim 0.005$ )로 원활한 미끄럼운동을 할 수 있도록 설계하였다.

절삭력은 밀링머신의 주축단에 고정설치한 엔코더에서 발생하는 동기화 펄스신호에 의해 공구 1회전당 100개의 데이터를 회전각 영역에서 샘플링하여 측정하였다. Fig.2는, 4날의 엔드밀 커터를 사용하여 주축회전속도 300 rpm, 이송량 300 mm/min의 절삭조건에서 직선가공을 하였을 때, 정상가공시(Fig.2(a))와 정적 런아웃 상태(Fig.2(b))에서 각각 측정된  $x$ ,  $y$  방향의 절삭력과 이들을 주파수 분석한 결과의 일례를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와같이, 런아웃 발생시 절삭력은 반복 주기적인 변동을 하고 있으며, 이러한 주기적 변동은 절삭날 1개당의 통과주파수(tooth passing frequency,  $f=20\text{Hz}$ )에 비하여 주축의 회전주파수(spindle rotation frequency,  $f_s=5\text{Hz}$ )성분에서 더욱 크게 나타나고 있다. 이와같은 결과는 주축 회전주파수 성분의 동적 절삭력은 커터 런아웃 상태를 민감하게 반영하는 동시에 런아웃과 밀접한 상관성이 있음을 보여준다.

따라서, 본 연구에서의 제어목적은 런아웃으로부터 발생하는 동적 절삭력의 변동성분을 제거하는데 있으므로, 주축 회전주파수 부근에 아날로그 대역통과필터(band-pass filter)를 설정하여 절삭력 신

호를 검출하고, 이를 제어인자로 하는 런아웃 보상 시스템을 구성하였다. 또한, 런아웃 보상을 위하여 공작물을 미세변위시키는 액츄에이터는 입력전압 100Volt에서 최대 스트로크 90μ m이고, 축방향으로의 수축·팽창력이 각각 300N· 800N 이며, 공진주파수가 6kHz 인 압전소자변환기(low-voltage piezo-electric translator, LPZT)를 사용하였다.

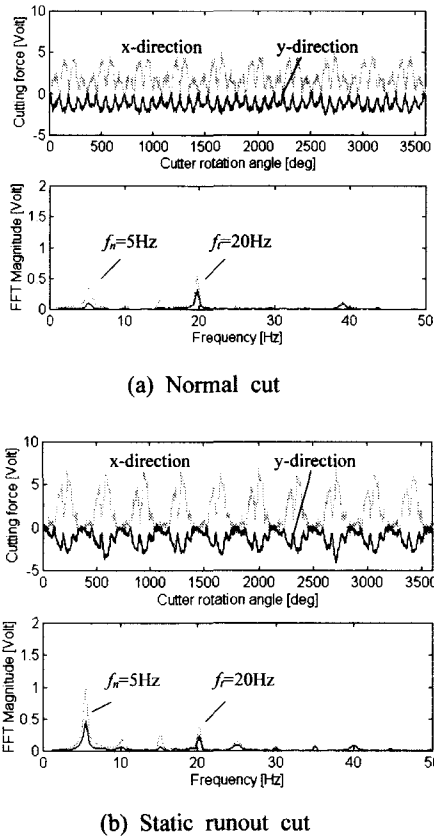


Fig. 2 Cutting force signals and power spectrum along linear tool path : (a) normal cut and (b) static runout cut.

## 2.2 제어 알고리즘

본 연구에서 사용한 디지털 제어기는 비례적분 제어(proportional integral control, PI control)알고리즘에 기초하는 PC 마이크로 프로세서상의 소프트웨어로 작동된다. 또한 본 연구에서의 제어목적은 커터 런아웃에 기인하는 절삭력 변동을 보상하는데 있으며, 이는 런아웃 량에 대응하는 절삭력의 오차

신호  $e(\theta)$ 를 영(zero) 또는 최소화시키는 것을 의미한다<sup>(8)</sup>. 즉,

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

또한, 디지털 비례적분제어기는

$$\frac{u(\theta)}{e(\theta)} = K_p \left( 1 + \frac{T \cdot a}{T_i(q-1)} \right) \quad (2)$$

여기서,  $K_p$ 는 비례이득,  $T$ 는 샘플링간격,  $T_i$ 는 적분시간이다. 식(2)에서  $a = T/T_i$ 로 놓으면

$$\frac{u(\theta)}{e(\theta)} = K_p \left( 1 + \frac{a \cdot q}{q-1} \right) \quad (3)$$

가 되며, 여기서  $u(\theta)$ 는 PI 제어기의 출력전압이고,  $e(\theta)$ 는 영점기준(zero reference)으로부터의 절삭력 변화이며,  $q$ 는 회전각 영역에서 1차 연산자(one-degree operator)이다. 또한,  $K_p$ 와  $a$ 는 각각 상수로서, 본 연구에서는 이들의 값을 각각  $K_p=15$ ,  $a=0.00012$ 로 설정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

먼저, 이상에서 기술한 런아웃 보상시스템 및 제어 알고리즘에 대한 유용성 여부를 살펴보기 위하여 Fig.3과 Table 1에 나타난 실험방법 및 실험조건으로 직선가공과 원호가공을 실시하였다. 이때 절삭실험은, 그림에 나타난 바와같이, (A)영역에서는 20μ m의 정적 런아웃이 존재하는 상태에서, 그리고 (B)영역에서는 정적 런아웃을 제거하기 위한 PI 제어상태에서 각각 수행하였으며, 아날로그 대역필터의 통과주파수(cut-off frequency)를 4~6Hz로 설정하였다.

Fig.4는 Fig.3(a)에 나타난 실험방법으로 직선가공을 실시하였을 때 검출된 PI 제어 전·후의 x, y 방향의 절삭력 신호와 제어명령 신호를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와같이, PI 제어후 (B)영역에서 절삭력 신호는 거의 영(zero) 상태로 수렴하고 있음을 알 수 있으며, 이는 앞의 식(1)에서 정의한 커터 런아웃에 대응하는 오차신호,  $e(\theta)$ 가 PI 제어 후 최소화되고 있음을 보여주고 있다. 그리고

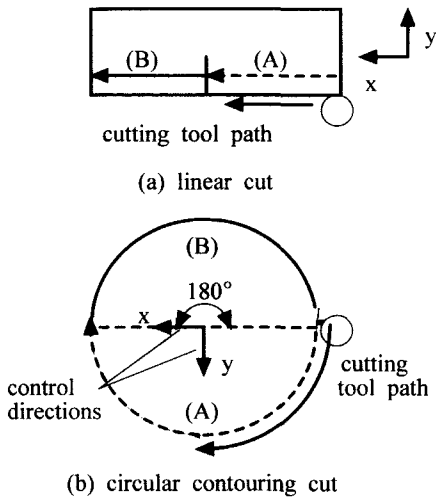


Fig. 3 Testing configuration along two sections : (A) static runout cut and (B) static runout cut with PI control.

Table 1 Experimental cutting conditions.

Cutting variables	Cutting conditions
cutting tool	$\phi$ 10mm, 4-flute, 30° helical angle
cutting material	UHMW polyethylene
axial depth of cut	15 mm
radial depth of cut	1.0 mm
feed rate	150, 300 mm/min
spindle speed	300 rpm, $f_r=5\text{Hz}$
feed direction	linear and circular contouring down cut
static cutter runout	20 $\mu$ m

이러한 직선가공에서의 표면품질 향상을 위한 PI 제어효과에 관해서는 참고문헌 (8)에서 이미 검토된 바 있다.

또한, Fig.5는 Fig.3(b)에 나타난 방법으로 원호가공을 실시하였을 때 검출된 절삭력 신호와 제어 명령 신호의 전형적인 일례를 나타낸 것으로서, x, y방향의 두 절삭력 신호는 공작물 1회전의 360° 전 영역에 걸쳐서 서로 역방향의 크기로 주기적인 변동을 하고 있으며, PI 제어 후(Fig.3(b)의 (B)영역) 절삭력 크기는 제어 전(Fig.3(b)의 (A)영역)에 비해

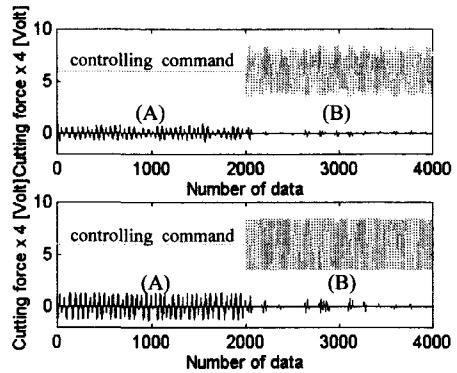


Fig. 4 Measured example of PI controlling commands and cutting force responses along linear cut.

여 그 진폭이 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig.6은 이들 제어 전과 후의 절삭력 신호를 주파수 분석한 결과로서, PI 제어 후 주축의 회전주파수  $f_r=5\text{Hz}$  부근의 스펙트럼 진폭이 크게 감소하고 있다.

이상과 같은 결과는, 이미 언급한 바와같이, 커터 런아웃에 의한 칩부하의 변동을 민감하게 반영하는 주축 회전주파수 성분의 동적 절삭력을 제어 입력으로 하고 있는 본 연구에서 구성한 런아웃 보상시스템이 공작물을 x, y방향으로 미세구동하여 런아웃 보상을 위한 미세 절삭깊이의 제어가 성공적으로 이루어지고 있으며, 주축 회전주파수 5Hz 성분의 동적 절삭력  $\Delta F_x$  와  $\Delta F_y$ 를 제거해 줌으로서 런아웃 보상을 위한 정확한 절삭력 피드백 제어가 수행되고 있음을 입증해 주고 있다.

한편, 커터 런아웃과 동적 절삭력과의 상관성을 좀더 상세히 조사하기 위하여, 정상가공시와 정적 런아웃이 존재하는 상태에서 공작물 1회전 360°의 원주가공을 실시하고, 이때 임의의 원주각 구간에서 측정된 절삭력의 주파수 분석 결과와 중심선 평균 표면거칠기,  $Ra(\text{cutoff} : 0.8\text{mm})$ 의 측정결과를 비교하였다. Fig.7(a),(b)은 원주각 60~90° 와 270~300° 구간에서 각각 검출된 x, y축 방향의 절삭력을 주파수 분석한 결과를 나타내며, Fig.8은 공작물 표면거칠기의 측정결과를 나타낸다. 이 경우, Fig.7(a),(b)에 나타난 스펙트럼 진폭의 거동특징을 Fig.8의 표면거칠기 측정결과와 비교해 보면, 커터 런아웃 현상을 대표하는 5Hz 성분의 동적 절삭력은 공

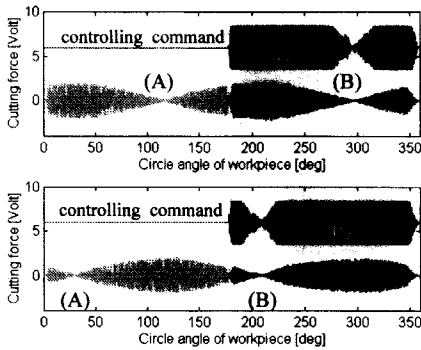


Fig. 5 Measured example of PI controlling commands and cutting force responses along circular contouring cut : (a) x- and (b) y-direction.

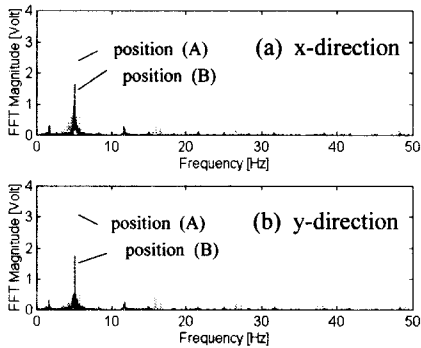


Fig. 6 Power spectrum of cutting force responses

작물 표면상태를 민감하게 반영하며, 이들은 서로 밀접한 상관성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 즉, 정상가공시와 정적 런아웃 상태에서 측정된 표면 거칠기 Ra 값은(Fig.8), 스펙트럼 진폭의 차이가 작은 60~90°의 원호구간(Fig.7(a))에서 거의 동일한 값을 갖는데 대하여, 진폭의 차이가 큰 270~300°의 원호구간(Fig.7(b))에서는 커다란 차이를 나타내고 있다.

이번에는, 위에서 구성한 런아웃 보상시스템을 이용하여, 엔드밀 원호가공시 실시간 런아웃 보상을 실시하고, 표면거칠기의 측정결과를 통하여 시스템의 성능과 유용성을 살펴보았다.

Fig.9(a),(b)는 정상가공과 정적 런아웃이 존재하

는 상태에서 PI 제어 전·후의 중심선 평균 표면거칠기 Ra의 측정값을 비교하여 나타낸 것으로서, PI 제어 후 공작물 표면품질은 전 원주표면에 걸쳐서 크게 개선되었음을 볼 수 있으며, Fig.9(c)의 결과를 통하여 실시간 런아웃 보상을 실시한 후, 공작물 표면품질은 PI 제어 전의 정상가공 수준으로 크게 향상되었음을 알 수 있다. 또한, Fig.9(a)에 나타낸 정상가공시의 PI 제어 효과를 통하여, 본 연구에서 개발한 런아웃 보상시스템은 절삭가공시 외부로부터 유입되는 외란까지도 효과적으로 제어하여 표면 품질을 개선할 수 있는 성능을 가진 것으로 판단된다.

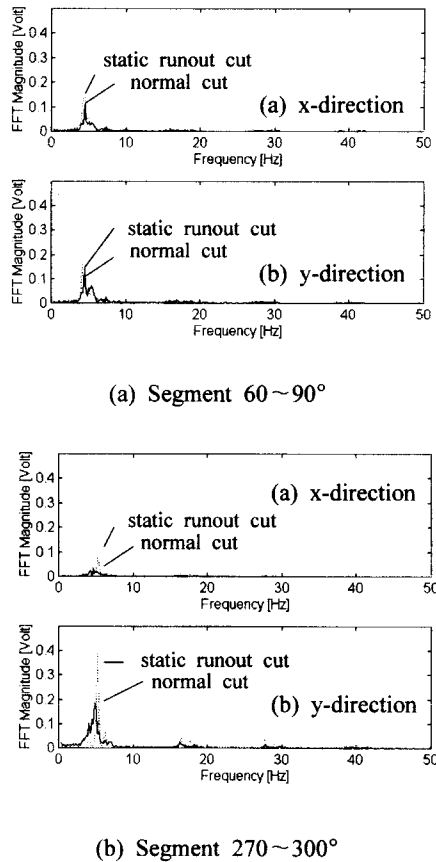


Fig. 7 Comparison of frequency responses for each segments under normal and static runout cut.

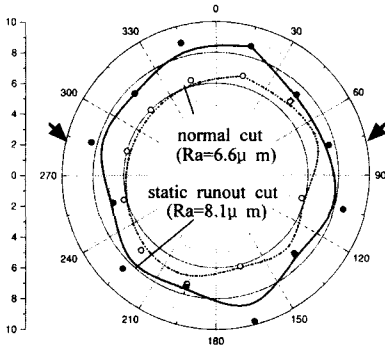


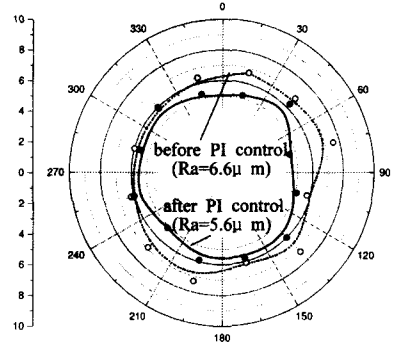
Fig. 8 Comparison of the surface roughness between normal and static runout cuts.

#### 4. 결론

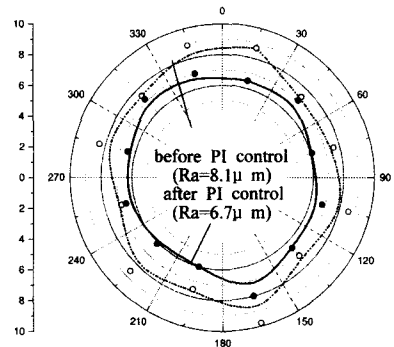
본 연구에서는 엔드밀 원호가공시 커터 런아웃 현상에 의해 공작물 원주표면에 생성되는 런아웃 마크를 제거하여 제품의 표면품위를 개선할 목적으로, 주축 회전주파수 성분의 동적 절삭력을 제어인자로 하고, 비례적분 제어 알고리즘을 적용한 2축 절삭력 제어방식의 런아웃 보상시스템을 구성하였으며, 실험적인 방법으로 시스템의 성능과 유용성을 검토하였다. 그 결과, 주축 회전주파수 성분의 동적 절삭력은 커터 런아웃 현상을 매우 민감하게 반영하는 동시에 런아웃 보상을 위한 제어목적에 유용하게 사용할 수 있으며, 제안한 런아웃 보상시스템을 이용하여 제품의 표면품위를 런아웃 발생전의 정상가공 수준으로 크게 개선할 수 있었다.

#### 참고문헌

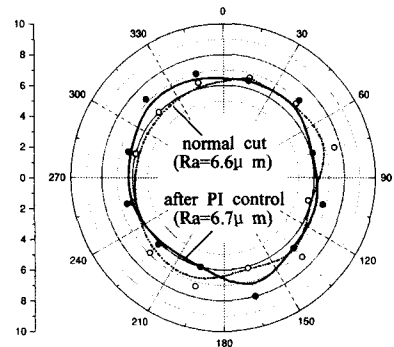
1. Sutherland, J. W., and Babin, T. S., "The Geometry of Surfaces Generated by the Bottom of End Mill," Proc. of 16th NAMRC, pp. 202-208, 1988.
2. Gu, F., Kapoor, S. G., DeVor, R. E., and Bandyopadhyay, P., "An Approach to On-Line Cutter Runout Estimation in Face Milling," Trans. of the NAMRI of SME, pp. 240-247, 1991.
3. Kline, W. A., and DeVor, R. E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End



(a) Normal cut



(b) Static runout cut



(c) Normal cut vs. after static runout cut with PI control

Fig. 9 Comparison of the surface roughness between before and after PI control.

- Milling," *Int. Journal of MTDR*, Vol.23, No.2/3, pp. 123-140, 1983.
4. Bifano, T. G., and Dow, T. A., "Real Time Control of Spindle Runout," *Optical Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 888-892, 1985.
  5. Fussel, B. K., and Srinivasan, K., "Adaptive Control of Force in End Milling Operation-An Evaluation of Available Algorithms," *ASME Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 8-20, 1988.
  6. Tsao, T. C., and Pong, K. C., "Spindle Speed Regulation and Tracking in Interrupted Cutting," *Trans. of NAMRI of SME*, pp. 235-241, 1992.
  7. Liang, S. Y, and Perry, S. A., "In-Process Compensation for Milling Cutter Runout via Chip Load Manipulation," *Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 153-160, 1994.
  8. Hwang, J., Chung, E. S., and Liang, S. Y., "Surface Quality Improvement through Cutter Runout Elimination in End Milling Process," '98 Japan-US Symposium on Flexible Automation, Otsu, Japan, Vol.3, pp. 1173-1178, 1998.