

주축 변위 신호를 이용한 밀링가공의 chatter 감시

장훈근*, 김일해⁺, 장동영⁺⁺

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 8. 16)

Chatter Monitoring of Milling Process using Spindle Displacement Signal

Hun-Keun Chang*, Il Hae Kim⁺, Dong Young Jang⁺⁺

Abstract

To improve productivity of a metal cutting process, it is required to monitor machining stability in real time. Since cutting environment is harsh against sensing conditions due to vibration, chip, and cutting fluid, etc., it is necessary to develop a robust and reliable sensing system for the practical application. In this work, a chatter monitoring system was developed and its effectiveness was proved. Spindle displacement caused by cutting was selected as a main monitoring parameter. A cylindrical capacitive displacement sensor was adopted. Chatter frequencies were identified through modal analysis. To quantify chatter vibrations, chatter correlation coefficient was introduced. The identification of the monitoring system showed a good agreement with the result of experiment.

Key Words : Chatter(채터), Chatter correlation coefficient(채터 상관 계수), Cylindrical capacitive displacement sensor(원통형 정전용량형 변위 센서), Spindle displacement(주축 변위)

1. 서론

채터는 절삭가공의 생산성을 제한하는 여러 요소들 중 하나이다. 채터가 발생하면 절삭공구에 과도한 진동이 발생하게 되며, 절삭 표면의 품질이 나빠지게 된다. 채터 발생의 메커니즘에는 모드 커플, 진동 파형의 재생산, 마찰 진동 및 열기구 채터 등이 있다⁽¹⁾. 많은 연구들이 채터를 회피하기 위하

여 수행되었다. Tobias⁽²⁾와 Tlusty⁽³⁾는 안정성선도(stability lobe)의 개념을 만들었고, 채터 하에서 절삭력이 칩 두께와 이송속도, 회전속도의 함수라는 것을 밝혔다. Altintas와 Budak^(4,5)은 절삭안정성을 결정하는 분석적인 방법을 개발하였다. Weck 등⁽⁶⁾은 페이스 밀링에서 채터를 회피하는 온라인 시스템을 개발하였고, Smith 등⁽⁷⁾은 주축 속도를 변화시키는 방법을 구현하였다.

* 서울산업대학교 나노생산기술연구소
+ (주) 캄시스 (chyarlie@gmail.com)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172 다산관 007
++ 서울산업대학교 산업정보시스템공학부

본 논문에서는, 가공 중 주축 변위 신호를 이용한 채터모니터링 시스템을 개발하였다. 주축 변위 신호를 측정하기 위하여 원통형 정전용량 변위센서⁽⁸⁾가 사용되었으며, 주축 변위 신호로부터 계산되는 채터상관계수를 새로이 도입하였다. 이를 이용하여 채터를 정량화 하였다. 채터 주파수를 측정하기 위하여 머시닝센터 축공구단의 모달 분석을 수행하였다. 실험을 통하여 개발된 시스템의 채터 감시 능력을 평가하였다.

2. 모니터링 시스템 구성

2.1 주축변위의 측정

가공 중 주축 변위 신호를 측정하기 위해서는 공작기계 주축부에 센서를 설치하는 것이 필요하다. 실제 가공 현장에서는 절삭으로 인한 칩, 절삭유 등의 오염요소 등에 의하여 범용 상용 변위센서를 주축부에 부착하는 것이 쉽지 않다. 또한 절삭물의 형상에 따라 혹은 절삭물이 자주 교체되는 경우에도 센서의 부착에 많은 어려움을 가지게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 주축부의 하단에 하우징 커버를 대체하는 형태의 원통형 주축변위 센서를 제작, 부착하였다⁽⁹⁾.

원통형 주축변위 센서는 넓은 면적의 측정면을 갖기 때문에 측정물의 표면 상태에는 둔감하나 주축의 회전 성분에는 민감한 특성을 가진다. 센서는 원통형 형상을 가지며 주축과

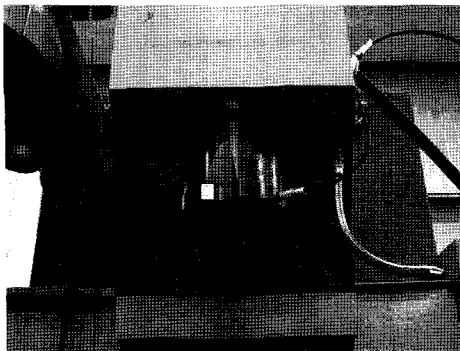


Fig. 1 Installed cylindrical capacitive displacement sensor

Table 1 Specification of cylindrical displacement sensor

Name	SPT-V40TS	Inner Dia.	77 mm
Sensor gap	100 μm	Resolution	< 0.1 μm
Sensor gain	1 V/μm	Bandwidth	10 kHz

약 100μm의 틈새를 갖도록 제작, 설치되었다. 센서는 ATC 및 주축의 모든 기능과의 간섭이 없도록 Fig. 1과 같이 설치되었다. 설치된 센서의 사양은 Table 1에 나와 있다.

2.2 모니터링 시스템의 구성

모니터링 시스템은 원통형 주축변위 센서와 센서 앰프, PC를 기반으로 구성되어 있다. 센서 신호는 전용 앰프를 통하여 증폭된 후 PC의 A/D 보드로 입력된다. 이후 전용 모니터링 프로그램에서 분석된다. 모니터링 시스템의 개념도가 Fig. 2에 나와 있다. PC기반의 모니터링 프로그램의 GUI가 Fig. 3에 나와 있다.

3. 채터 모니터링 알고리즘

채터의 원인에는 여러 가지가 있으나, 재생채터 및 모드커플링 채터가 두 가지 주된 채터로 알려져 있다. 재생채터는 과도한 절삭 중 절삭물 표면과 공구 운동사이의 파동 중첩으로 발생하며, 자력 진동에 의해서도 채터가 발생하게 된다. 채터 발생 주파수를 예측하기 위하여 공작기계 주축부의 전

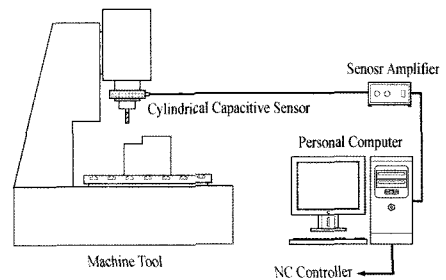


Fig. 2 Hardware configuration of monitoring system

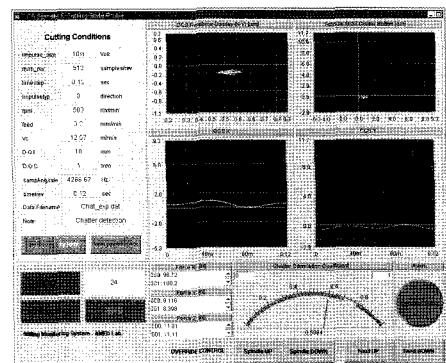


Fig. 3 GUI of PC based monitoring program

달함수를 구하고, 이를 바탕으로 채터 발생 시 주파수를 확인하였다. 이를 이용하여 절삭 시 주축 변위 신호간의 상관관계를 분석하여 채터 모니터링 알고리즘을 개발하였다. 채터상관계수의 계산 등 신호 획득 및 처리는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 Agilent VEE pro 프로그램과 Matlab 스크립트를 작성하여 채터 모니터링 작업을 수행하였다.

3.1 주축-공구단의 모달 시험

주축-공구단의 전달함수를 구하기 위하여 모달 시험을 수행하였다⁽¹⁰⁾. 실험은 엔드밀 공구 하단에 가속도계를 부착하고 임펄스 해머로 가진을 하여 그 신호를 분석하여 이루어졌다. 사용된 공구는 각각 TiCN이 코팅된 HSS 재질과 TiAlN이 코팅된 초경 재질의 10mm 2날 스퀘어 엔드밀이다. Fig. 4에 주축-공구단의 전달함수가 나와 있다. 두 공구 모두 주축-공구단의 1차 고유진동수가 760Hz, 2차 고유진동수가 960Hz 근방에 위치함을 알 수 있다.

3.2 채터상관계수

모드 커플 채터 발생 시 고유진동수 부근의 특정 성분 주파수가 검출된다는 특징을 고려하여 채터 감시 알고리즘을 개발하였다. 채터 여부를 판별하기 위하여 타임도메인에서 채터 발생 시의 주축 변위 신호와 가공 중 주축 변위 신호를

비교하여 그 상관관계를 비교하였다. 이를 Eq. (1)에 표시하였다.

$$R_{chatter} = correlation(\delta_d(t), \delta_{ch}(t)) \quad (1)$$

여기서, $R_{chatter}$ 는 채터상관계수, $\delta_d(t)$ 는 주축 변위 신호, $\delta_{ch}(t)$ 는 채터 발생 시 채터 주파수 부근에서의 주축변위 신호이다. 각각의 주축 변위 신호는 1회전 당 512개의 데이터를 가지며, 채터상관계수는 1회전 당 계산된다. 채터 상관계수를 이용하여 채터를 정량적으로 평가할 수 있으며, 문턱값을 결정하여 채터를 판별 할 수 있다.

4. 절삭 실험

절삭 실험은 현대중공업 제작의 SPT-V40TS 수직형 머시닝 센터에서 수행되었다. 공구는 앞서 모달 시험에 사용된 것과 동일한 형식의 엔드밀을 사용하였으며, 공작물로는 플라스틱 금형용 강으로 경도 40HRC를 갖는 NAK80이 사용되었다. 절삭 실험 1은 TiCN이 코팅된 HSS 엔드밀로 측면 단 절삭을, 실험 2는 TiAlN이 코팅된 초경 엔드밀로 홈 절삭을 수행하였다. 각각의 절삭 조건은 Table 2와 같다.

4.1 절삭 중 주축 변위 신호

절삭 중 주축변위 신호의 주파수 분석을 FFT를 사용하여 수행하였다. 주축변위 신호를 이송방향(x 방향)과 법선방향(y 방향)으로 분리하였다. Fig. 5에 실험 1에서 채터의 유무에 따른 주축 변위 신호의 변화를 나타내었다. (a),(b)는 채터가 발생하지 않았을 때의 주축변위 신호를 나타내며, (c),(d)는 채터가 발생하였을 때의 주축변위 신호를 각각 나타낸다. Fig. 5를 통하여 채터 발생 시 주축-공구단의 1차 고유진동수인 760Hz 부근의 성분이 주축 변위 신호에 포함됨을 알 수 있다. Fig. 6에는 채터 발생 시 공구의 1회전동안의 실제 주축 변위 신호(x 방향)를 표시하였다.

Fig. 7에 실험2의 주축변위 신호를 나타내었다. 실험 1과는 달리 주축-공구단의 1차, 2차 고유진동수 사이에서 많은

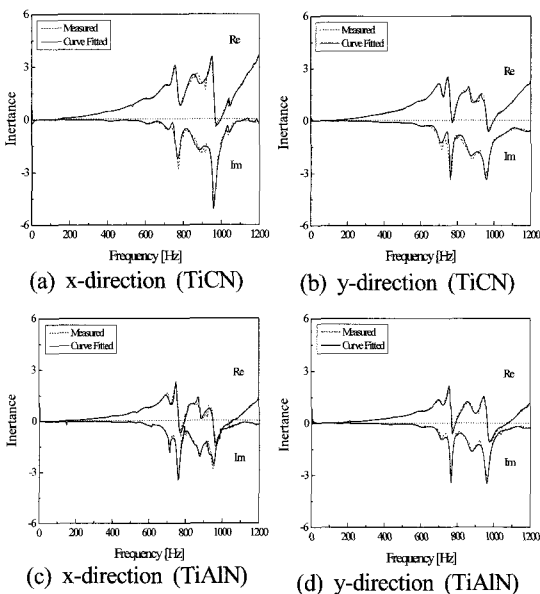
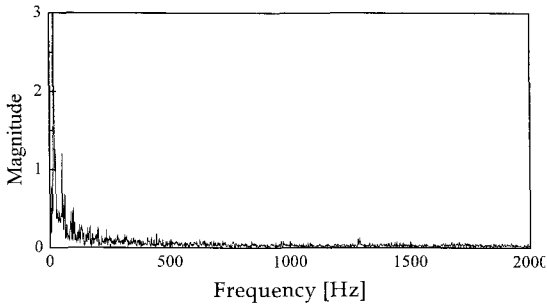


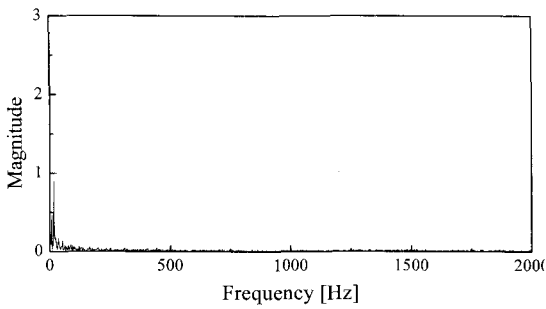
Fig. 4 Measured and curve fitted transfer functions of the spindle-tool system

Table 2 Cutting Test Condition

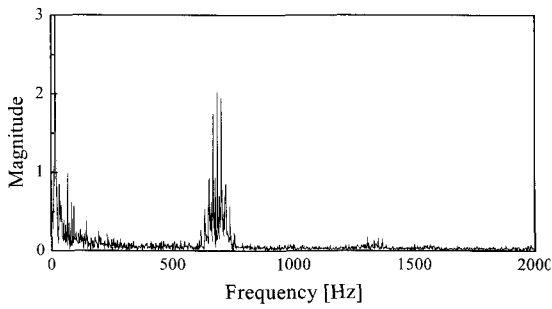
No.	Spindle speed	Feed speed	Axial depth of cut	Radial depth of cut
1	500 rpm	40 mm/min	12.5 mm	1.0 mm
2	1200 rpm	55 mm/min	5.0 mm	-



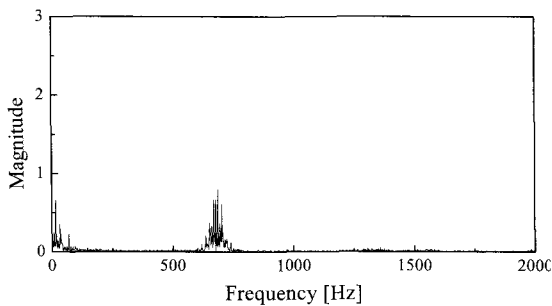
(a) x-direction (no chatter)



(b) y-direction (no chatter)



(c) x-direction (chatter)



(d) y-direction (chatter)

Fig. 5 FFT of spindle displacement signals of test 1

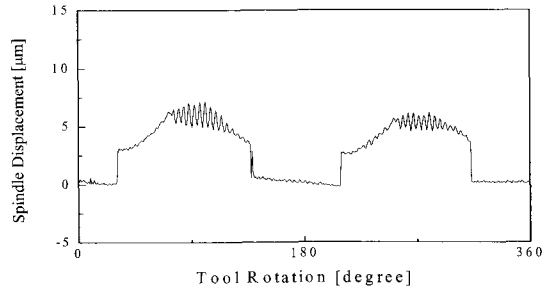
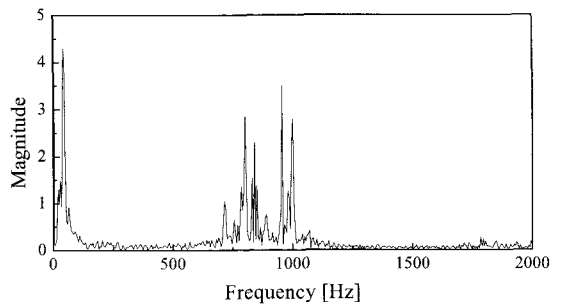
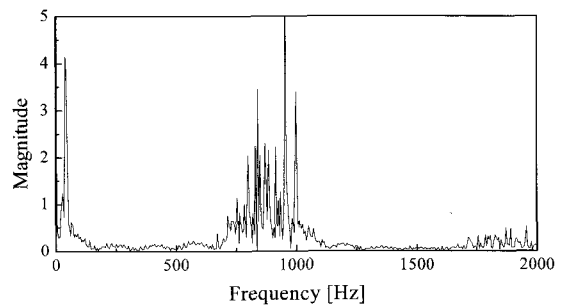


Fig. 6 Spindle displacement in chatter condition of test 1



(a) x-direction (chatter)



(b) y-direction (chatter)

Fig. 7 FFT of spindle displacement signals of test 2

진동 성분들이 검출되었다. Fig. 8에는 채터 발생 시 공구 2회전에 대한 주축 변위 신호를 표시하였다.

채터 발생 시 측면 단 절삭의 경우 이송방향의 주파수 신호 변화가 두드러지는 경향을 보이는 것에 비하여 홈 절삭의 경우 이송 방향과 법선 방향의 신호 모두 큰 변화를 나타내었다. 실제 주축 변위 신호의 거동도 같은 경향을 보였다.

4.2 채터상관계수의 적용

실험 1의 주축 변위 신호를 이용하여 채터상관계수를 적

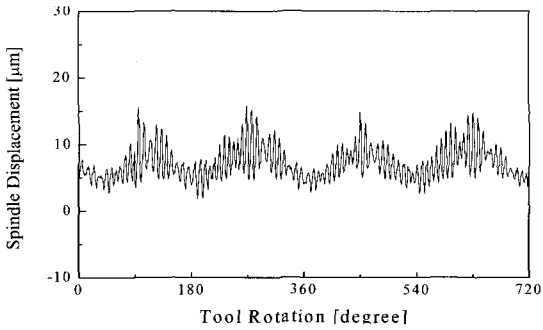
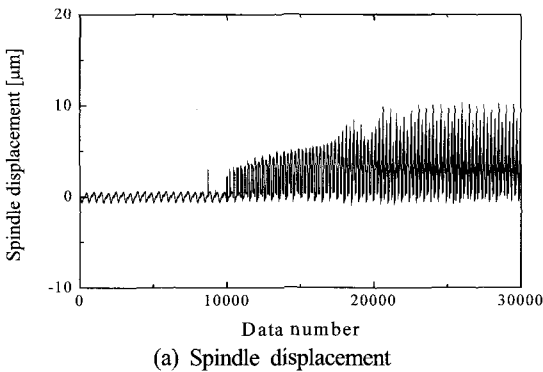
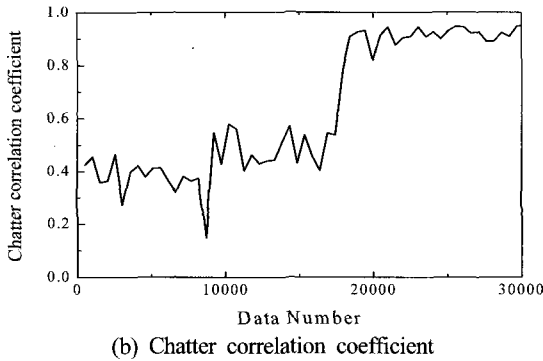


Fig. 8 Spindle displacement in chatter condition of test 5



(a) Spindle displacement

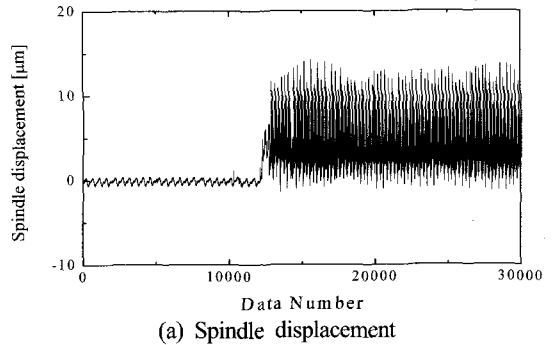


(b) Chatter correlation coefficient

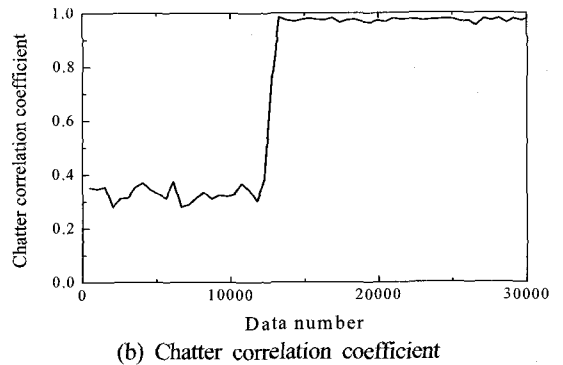
Fig. 9 Chatter correlation coefficient of test 1

용하여 보았다. 이송 방향과 법선 방향 성분 중 모든 조건에서 큰 변화를 보인 이송방향 성분(x 방향)을 이용하여 계산을 수행하였다.

Fig. 9,10에는 각각 실험 1,2의 주축 변위 신호 및 채터상관계수를 표시하였다. Fig. 9의 측면 절삭 실험 1에서는 채터가 데이터 수 10,000 근방에서 발생되어 20,000 근방에서 완전히 발달 하였다. 채터 상관 계수를 살펴보면 가공이 진



(a) Spindle displacement



(b) Chatter correlation coefficient

Fig. 10 Chatter correlation coefficient of test 2

행되는 동안 0.4 근처의 값을 보이다가 채터가 발생하자 그 값이 상승하였다. 그 후 채터가 완전히 발달하자 0.8 이상의 값으로 상승하였다. Fig. 10의 홈 가공 실험 2에서는 채터가 수 회전 만에 완전히 발달하였다. 채터 상관 계수를 살펴보면 정상 상태에서는 0.4 이하의 값을 보이다가 채터가 발생하자 0.9 이상으로 급상승하였다. 이를 통하여 채터가 발생하였을 경우 채터상관계수의 문턱값을 0.8로 설정하면 채터를 감지할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 주축 변위 신호를 이용하여 채터를 감지할 수 있는 채터 모니터링 시스템을 개발하였다. 가공 중 주축 변위를 측정하기 위하여 원통형 정전용량 변위 센서를 머시닝 센터의 주축부 하단에 하우징의 형태로 부착하였다. 이를 이용하여 가공 중 주축 변위를 측정하였다. 주축·공구단의 모달 시험을 수행하여 공작 기계 시스템의 전달 함수를 측정하였으며, 이를 채터 발생 시 주축 변위 신호의 주파수와 비교하였다. 채터상관계수를 도입하여 채터를 정량화 하였으

며, 이를 이용하여 채터 모니터링 시스템을 PC 상에서 구현하였다. 절삭 실험을 통하여 모니터링 알고리즘이 실제로 잘 적용됨을 알 수 있었으며, 주축 변위를 이용한 채터 모니터링 시스템이 성공적으로 개발되었음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Wiercigroch, M. and Budak, E., 2001, "Source of Nonlinearities, Chatter Generation and Suppression in Metal Cutting," *Trans. of Royal Society*, Vol. 359, pp. 663~693.
- (2) Tobias, S. A., 1969, *Machine Tool Vibrations*, Blackie, London.
- (3) Tlustý, J. and Poláček, M., 1963, "The Stability of the Machine Tool against Self-Excited Vibration in Machining," *ASME Int. Research in Production Engineering*, Vol. 1, pp. 465~474.
- (4) Altintas, Y. and Budak, E., 1995, "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling," *Annals of CIRP*, Vol. 44, pp. 357~362.
- (5) Budak, E. and Altintas, Y., 1998, "Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling Part I: General Formulation," *J. of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 120, pp. 22~36.
- (6) Weck, M., Verhaag, E. and Gather, M., 1975 "Adaptive Control for Face-Milling Operation with Strategies for Avoiding Chatter Vibrations and for Automatic Cut Distribution," *Annals of CIRP*, Vol. 44, pp. 405~409.
- (7) Smith, S. and Tlustý, J., 1992, "Stabilizing Chatter by Automatic Spindle Speed Regulation," *Annals of CIRP*, Vol. 41, pp. 433~436.
- (8) Jeon, S., Ahn, H. J. Han, D. C. and Chang, I. B., 2001, "New Design of Cylindrical Capacitive Sensor for On-line Precision Control of AMB Spindle," *IEEE trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, pp. 757~763.
- (9) Chang, H. K., Kim, J. H., Kim, I. H., Jang, D. Y. and Han, D. C., 2007, "In-Process Surface Roughness Prediction using Displacement Signals from Spindle Motion," *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1021~1026.
- (10) Altintas, Y., 2000, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Cambridge Univ. Press, London.