

음향센서를 활용한 CNC 공구떨림 감지 및 안정화 기법

김정준*, 조기환**

A Detection and Stabilization Method for CNC Tool Vibration
using Acoustic Sensor

Jung-Jun Kim*, Gi-Hwan Cho**

요약 최근 정밀기계, 전기전자, 반도체 등의 급속한 산업의 발달로 전장장치의 고정밀도 가공의 필요성이 증대하고 있다. 작업자의 감각과 경험에 의존하던 절삭 공작기계 제어는 CNC(Computerized Numeric Controller: 컴퓨터 수치 제어) 도입으로 가공 정밀도가 획기적으로 개선되고 있다. 또한 공작 기계의 운전 상태를 실시간 반영하는 가공 동특성 (cutting dynamics) 기법이 관심을 받고 있다. 본 논문은 CNC 공작기계에 음향센서를 부착하여 공구떨림 감지 및 안정화하는 방안을 제시한다. 공구 이송 위치와 음향센서 데이터를 동기화 하고 수집된 음향 주파수에서 이상 진동음에 대한 주파수를 분석하여 떨림을 감지한다. 또한 가공 동특성 기법을 적용하여 공구떨림 감지와 안정화의 신뢰성을 높인다. 제안한 기법은 금형 가공의 공구떨림 안정화 전후 가공 표면조도의 향상 관점에서 분석 평가한다.

Abstract Recently, there is an increasing need for highly precise processing with the rapid development of precision machinery, electrical and electronics, and semiconductor industries. Cutting machine control relies on the operator's sense and experience in tradition, but it has been greatly enhanced by the adoption of CNC(Computerized Numeric Controller). In addition, cutting dynamics technology has been paid attention to reflect the operating state of machine in real time. This paper presents a method to detect and stabilize tool vibration by attaching an acoustic sensor to a CNC machine. The sensed acoustic data is synchronized with the tool position and the abnormal vibration frequency is separated from the collected acoustic frequency, then analyzed to detect the tool vibration. Also the reliability the tool vibration detection and stabilization is improved by applying the cutting dynamic method. The proposed method is analyzed and evaluated in terms of the surface roughness.

Key Words : Acoustic Sensor, CNC(Computerized Numeric Controller), Embedded Device, Stabilization, Tool Vibration

1. 서론

작업자의 감각과 경험에 의존하던 범용 절삭가공 기계의 제어는 컴퓨터 수치제어가 도입된 후 개방형 CNC(Computerized Numeric Controller) 단계를 거쳐 현재 지능형 CNC가 도입되고 있다. 그림 1은 CNC 공작기계의 발전과정을 보인다. 공작기계에 있어 두뇌에 해당하는 제어를 지능형 CNC로 대체

하는 주요 요인으로 고품질의 가공품, 제품 수명주기의 단축 등의 현장 요구사항을 반영하기 위함이다. 지능형 CNC 고속가공은 가공시간 단축, 고품질 제품을 가공오차 범위 내에서 정밀 생산할 수 있도록 많은 센서 정보를 활용한다.

*Department of Information Security, Chonbuk University (jjkim@tredio.net)

**Corresponding Author : Division of Computer Science and Engineering, Chonbuk University (ghcho@chonbuk.ac.kr)

Received February 20, 2019

Revised March 04, 2019

Accepted March 05, 2019

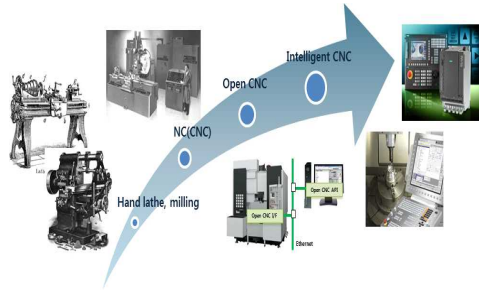


그림 1. CNC 공작기계의 발전과정
Fig. 1. A Development Process of CNC Machine

가공 상태 진단 및 공구 상태를 수집하기 위한 방법으로 그림 2와 같이 주축변위 센서, 온도감지 센서, 힘 감지센서, 진동감지 센서 등이 내장된 절삭 도구를 이용한 직접 상태감시 방법이 있다[1]. 그러나 내장형 부착 센서들의 가격이 고가임에도 불구하고 절삭 공정에서 측정인자의 미세화로 온라인상으로 측정하기가 어려운 문제점이 있다[2][3].

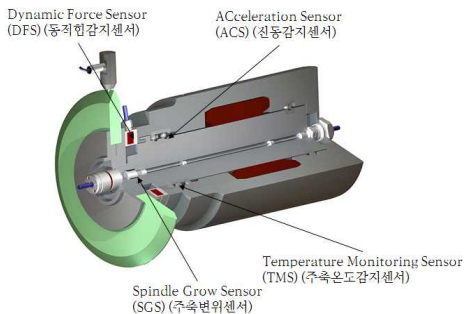


그림 2. 센서가 장착된 절삭 도구
Fig. 2. A Spindle Tool with built-in Sensors

본 논문은 CNC 공작기계에 음향센서를 부착하여 공구떨림 감지 및 안정화하는 방안을 제시한다. 공구 이송 위치와 음향센서 데이터를 동기화 하고 수집된 음향 주파수에서 이상 진동음에 대한 주파수를 분석하여 떨림을 감지한다. 또한 가공 동특성 기법을 적용하여 공구떨림 감지와 안정화의 신뢰성을 높인다. 제안한 기법은 금형 가공의 공구떨림 안정화 전후 가공 표면조도의 향상 관점에서 분석 평가한다.

2. 관련연구

전장장치의 범용화 추세를 반영하여 정밀 공작기계에 다양한 센서를 적용하여 가공의 정밀성과 효율성을 제고하려는 노력이 지속되고 있다.

참고문헌 [4]는 WPT(Wavelet Package Transform)와 HHT(Hilbert-Huang Transform)의 두 가지 첨단 신호처리 기술을 바탕으로 최종 밀링 공정을 위한 효과적인 공구떨림 식별 방법이 제시하고 있다. 참고문헌 [5]는 밀링공정에서 절삭력이 절삭 안정성에 미치는 영향을 확인하기 위해 시간 영역 해석, 주파수 영역 해석 및 Wavelet 분석을 기반으로 절삭력 변동을 해석하고 있다.

참고문헌 [6]은 최종 밀링공정을 위한 새로운 공구떨림 식별 방법을 제시하고 있다. 먼저 다양한 공구떨림 조건에서 생성된 진동신호와 안정적인 절삭신호를 비교, 분석한다. 밀링공정에서 공구떨림 진동의 비선형 특성과 비정적 특성을 대변하는 2개의 지표를 정의한다. EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition) 기법을 적용하여 진동신호를 해석하고 두 개의 비선형 지표를 공구떨림 감지 식별에 사용한다. 즉 공구떨림의 심각도가 증가함에 따라 주기적인 공구떨림 성분이 점차적으로 우세하면 확률적 소음의 비율이 감소하는 현상을 활용하고 있다.

고속가공 공정에서는 절삭력과 순간 각속도(Instantaneous Angular Speeds) 분석을 기반으로 공구떨림 식별하는 접근이 널리 사용되고 있다. 참고문헌 [7]은 순간 각속도를 기반으로 하는 표시기는 추가 센서가 필요 없으며 제조 시스템에서 공구떨림 검출을 위한 저가의 범용적인 공구떨림 감지 시스템을 개발에 유리함을 보이고 있다.

한편 참고문헌 [8]은 공구떨림 검출을 위한 신호 분석에 많이 활용되는 SLD(Stability Lobe Diagram)를 실험적인 방법으로 적용할 수 있는 방안을 제시하고 있다. SSR(Spindle Speed Ramp-Up) 기법은 절삭 깊이를 변경하는 몇 가지 테스트를 수행함으로써 간단하고 빠르게 SLD를 실험적으로 평가, 분석한다. SLD는 주파수 분석을 공작기계에 효율적인 사용을 가능하게 하고 있으며, 공

정에 대한 지식이 없어도 가속도계, 동력계 또는 마이크와 같은 다양한 센서를 사용할 수 있는 기반을 제공하고 있다.

그동안 공구진동과 관련하여 많은 연구들이 수행되었지만 실제 범용적으로 가공기계 현장에 적용하기 어려운 제약들이 많은 것으로 알려져 있다. 본 논문은 무인가공 공작기계의 내부에 장착한 음향센서를 기반으로 음향센서 데이터에서 이상 진동음에 대한 음향 주파수를 분석하여 공구떨림을 감지 및 안정화 방안을 논의한다.

3. 공구떨림 감지 및 안정화

3.1 공구떨림 감지

일반적으로 절삭기계에서 연속된 절삭 날에 의한 칩 두께 변화는 그림 3과 같이 도식할 수 있다. 그림에서 시간에 따른 변화는 이전 날에 의한 가공표면의 위상과 현재 날에 의한 위상을 변화하는 것을 보인다. 이때 위상이 일치하는 경우는 매우 안정적인 가공을 할 수 있음을 의미하는 반면에 위상이 변경된 경우 매우 불안정한 떨림 진동을 야기한다. 즉 공작기계에서 공구에 의한 진동 주파수와 주축회전수를 일치시켜 일정한 절삭두께를 유지하게 된다면 일정한 절삭력을 보존할 수 있으며, 결과적으로 균일한 가공 품질을 얻을 수 있다[9][10].

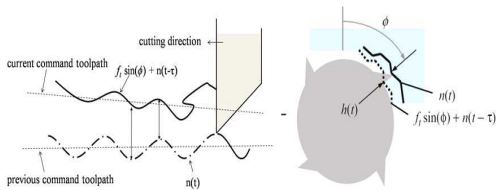


그림 3. 절삭날에 의한 가공물 두께의 변화
Fig. 3. Variance of Artifact's Thickness with Varying the Cutting Edge

절삭가공의 이전 가공 날에 의한 표면과 현재 가공 날의 위상 차이는 절삭력 변화를 가져온다. 공구 절삭력은 공구와 소재의 상대적 접촉면적에 따라서 달라진다. 만약 일정한 접촉면을 갖는다면 주기적인 절삭력 분포를 갖게 되고, 결과적으로 일정한 가진

주파수(Tool Path Frequency)를 만들어 낸다.

$$\text{가진주파수} = \frac{RPM \times N_t}{60} \quad \text{식(1)}$$

여기서 N_t 는 공구의 날수이다.

이때 생성되는 주파수는 식(1)와 같이 주축 회전수에 공구의 날수를 곱해서 초당 주파수로 얻을 수 있다. 그림 4는 가공 중 절삭기계에서 생성되는 음향 데이터를 수집하여 FFT 분석을 통하면 가진 주파수는 물론 다른 주파수가 생성됨을 보인다. FFT 분석을 통해 가진 주파수의 하모닉 주파수 진폭보다 큰 값을 갖는 주파수는 공구떨림으로 판단한다.

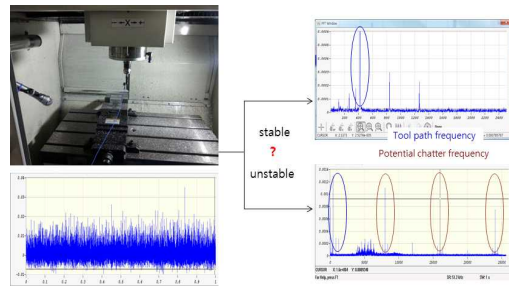


그림 4. 음향정보를 이용한 공구떨림 감지
Fig. 4. Tool Vibration Detection with Cutting Sound

3.2 공구떨림 안정화

공구떨림이 안정적인 경우는 가진 주파수만을 확인할 수 있으며, 공구떨림이 감지되면 가진 주파수의 하모닉 주파수 진폭보다 큰 값을 갖는 주파수들이 생성된다. 생성된 주파수들 중 가장 큰 값을 공구떨림 주파수 ω_c 로 결정하고 순차 증가 값 K에 의해 식(2)을 이용하여 가공 주축회전수를 다시 계산한다.

$$RPM_{new} = \frac{\omega_c \times 60}{N_t \times K} \quad \text{식(2)}$$

여기서, ω_c 는 공구떨림 주파수, N_t 는 날수, $K=1,2,3,4,\dots$ 순차 증가 값이다

이때 순차적으로 증가되는 K값에 의해 계산된 다수의 가공 주축회전수에서 현재 가공 주축회전수에 근접한 값을 공작 기계의 새로운 가공 주축회전수로

반영하여 공작 기계의 가공 공정을 수행한다.

본 논문에서 제안한 방법은 그림 5과 같이 공구떨림 감지 및 진단 단계와 공구떨림 안정화 단계로 구분된다. 안정화 단계를 통과한 경우에는 공구떨림에 대한 안정적인 가공 상태를 유지하면서 고품질 가공을 수행하며, 궁극적으로 가공 표면조도를 향상시킨다.

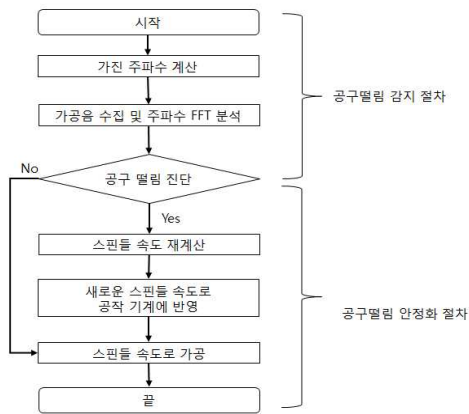


그림 5. 공구떨림 감지 및 안정화 절차
Fig. 5. Flow Chart of Tool Vibration Detection and Stabilization Procedure

4. 구현 및 평가

본 논문에서 제안한 공구떨림 감지 및 안정화 방법은 그림 6과 같이 CNC 공작기계, 음향센서, 임베디드 디바이스로 구성한다. CNC 공작기계는 가공에 필요한 데이터를 기반으로 실제 가공 소재를 가공하는 공작기계이다. 음향센서는 CNC 공작기계의 내부 회전부에 부착하며, 가공음을 수집하여 임베디드 디바이스에 전달한다. 임베디드 디바이스는 음향센서로부터 전달받은 가공음을 분석하여 공구떨림을 진단하고, 식(2)에 의해 계산된 주축회전수 값을 CNC 공작기계에 전달하여 공구떨림 안정화를 위한 가공 공정을 진행한다.

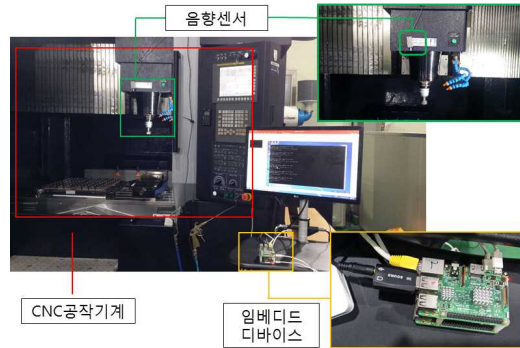


그림 6. 시스템 구성도
Fig. 6. The System Configuration

4.1 CNC 메모리 구조 및 내부 데이터

공작기계의 제어기인 CNC는 시리얼 및 이터넷 인터페이스를 이용하여 외부에서 CNC 내부 메모리를 접근한다. 그림 7은 CNC 내부 메모리 구조와 CNC 내부 메모리에서의 모니터링 데이터 등을 나타낸다. 가공 중인 공작 기계의 주축회전수(RPM)는 식(1)의 공구떨림 진단의 주요 변수로 사용되며, 식(2)에 계산된 새로운 가공 주축회전수(RPM)를 공작 기계에 반영한다.

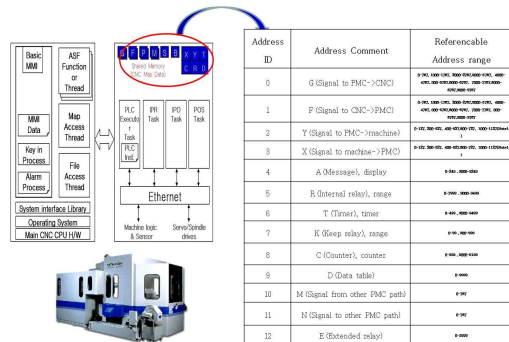


그림 7. CNC 메모리 구조 및 내부 데이터
Fig. 7. CNC Memory Configuration and Internal Data

4.2 음향센서와 임베디드 디바이스

본 논문에서 구현된 스템에 사용되는 음향센서 및 임베디드 디바이스 사양은 표1, 표2에서 보이고 있다. 임베디드 디바이스의 운영체제는 임베디드 리눅스 커널 4.14.30을 사용한다. 가공음 수집 및 분석, CNC 메모리 접근 등의 어플리케이션구현은 GCC 4.x, QT 5.x 라이브러리를 사용하였다.

표 1. 음향센서 사양

Table 1. Acoustic Sensor Specification

| 구분 | 하드웨어 상세 |
|--------|------------------------|
| 타입 | Electret Condenser MIC |
| 방향성 | Omni-Direction(360°) |
| 감지성능 | -23dB(1kHz at 1Pa) |
| 주파수 | 50 ~ 18,000Hz |
| 신호대잡음비 | 58dB+ |
| 플러그 형태 | 3.5mm 3-pole stereo |

표 2. 임베디드 디바이스 사양

Table 1. Embedded Device Specification

| 구분 | 하드웨어 상세 |
|------|---|
| 프로세스 | Broadcom BCM2387, 1.2GHz Quad-Core ARM Cortex-A53 |
| 메모리 | 1GB LPDDR2 |
| 연결포트 | 4 x USB, 1 x 10/100 Ethernet 40pin extended GPIO |
| 전원 | DC 5V/2.5A |

4.3 시험결과

시험 구현에 사용된 가공 소재는 AL7075소재로 가공날이 두날($N_f=2$)이고, D12R1.0인 공구로 가공하였다. 가공조건은 주축회전수가 6,000RPM, 공구이송속도 2,000mm/mn, 절삭깊이 5mm, 절삭폭 3mm이다. 이 때 가진 주파수는 식(1)에 의해 200hz임을 알 수 있다. 임베디드 디바이스의 가공음 샘플링 주기는 초당 44,100hz이고, 샘플링 개수는 초당 8,192개이다(1회 샘플링 시간 \approx 샘플링 개수/샘플링 주기 \approx 0.186 초).

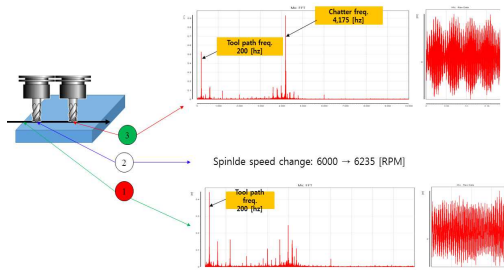


그림 8. $\omega_d = 4,175\text{hz}$, 안정화 RPM적용 예
Fig. 8. $\omega_d = 4,175\text{hz}$, An Example of Applying Stabilization RPM

실험의 시작단계에서 4,175hz의 공구떨림 주파수가 분석되었다. 그림 8㉔에서 보이는 바와 같이 음

향신호의 진폭 역시 크게 변화되었다. 분석된 공구떨림 주파수 4,175hz를 식(2)에 대입한 결과 표 3과 같은 대체 주축회전수가 계산되었다.

표 3. 안정화를 위한 대체 주축회전수

Table 3. Candidate Spindle Speed for Stabilization

| K | N_f | ω_d hz | 주축회전수(RPM) |
|-----|-------|---------------|------------|
| 1 | 2 | 4,175 | 125,250 |
| 2 | 2 | 4,175 | 62,625 |
| 3 | 2 | 4,175 | 41,750 |
| ... | ... | ... | ... |
| 20 | 2 | 4,175 | 6,263 |
| 21 | 2 | 4,175 | 5,964 |
| 22 | 2 | 4,175 | 5,693 |

K의 순차 대입 값에 의해 계산된 각 대체 주축회전수 중 현재 CNC의 주축 회전수와 근접한 값인 6,263RPM으로 CNC의 가공 주축회전수를 변경하여 CNC의 공구떨림 안정화를 진행하였다. 가공 주축회전수 6,263 RPM을 변경한 후 공작 기계의 가공음을 수집한 결과 그림 8㉔에서 보이는 바와 같이 음향 정보의 FFT그래프는 안정된 가공 상태임을 확인하였다.

공구떨림 진단과 안정화 과정을 적용한 전과 후에 가공 표면조도를 비교한 결과는 그림 9에서 보이고 있다. 가공소재의 가공 표면을 확대한 그림에서 보이듯이 시각적인 조도가 다르다.

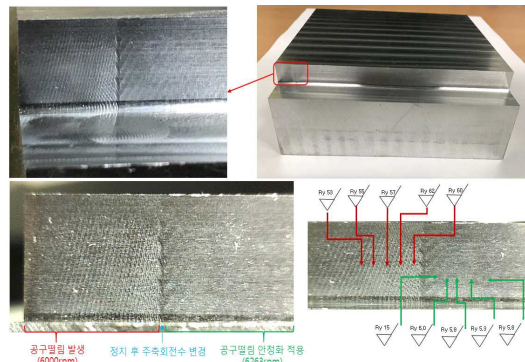


그림 9. 공구떨림 안정화 전후 가공면 비교
Fig. 9. A Comparison of Finished Surfaces before and after Tool Vibration Stabilization

또한 표 4와 같이 가공 소재 표면조도 값은 공구떨림 안정화 처리 후 공구떨림 가공 표면 조도 값 보

다 10배 이상 좋아짐을 확인하였다. 즉, 공구떨림 발생으로 가공 소재 표면에 발생한 물결무늬는 공구떨림 진단 및 안정화 과정 후 제거된 것을 확인하였다.

표 4. 안정화를 위한 대체 주축회전수
Table 4. Candidate Spindle Speed for Stabilization

| 구분 | 최대높이Ry(μm)* | 삼각기호 |
|---------------------|--------------------------|------|
| 공구떨림 가공면 표면조도 | 53 | ▽ |
| | 55 | |
| | 57 | |
| | 62 | |
| | 60 | |
| 안정화 가공면 표면조도 | 15 | ▽▽▽ |
| | 6.0 | |
| | 5.8 | |
| | 5.3 | |
| | 5.8 | |

*최대높이(Ry) : 거친 곡선에서 그 평균선의 방향에 기준길 이만 발췌하여 발췌한 부분의 평균선에서 최고 높은 산꼭대기까지의 높이와 최고로 낮은 골짜기의 높이와의 차이를 미크론 단위로 표시한 것

5. 결론

본 논문은 공작기계에 음향센서를 부착하여 주축 회전속도와 음향센서 데이터를 동기화 하고, 수집된 음향 데이터의 주파수를 분석하여 공구떨림에 대한 안정화하는 방안을 제안하였다. 제안한 방법의 구현 및 실험을 통해 그 결과로 공구떨림 안정화 후 가공 소재 표면조도의 품질이 10배 이상 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 음향 신호는 가속도 및 절삭력 신호에 비해 장치 비용이 저렴하고 설치가 간단하며 공구떨림 검출 능력이 우수함을 확인하였다. 공작기 계에서 발생하는 다른 소음원을 분리하는 방안과 가속도 센서, 전류센서 등 유용한 센서 데이터와 융합하여 공구떨림 감지의 정밀도를 높이는 추가적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

[1] Kim J. H., et al., "Correlation between Cutting Force and Spindle Load in Machining AL6061," KSPE 2016 Spring Conference, p. 312
[2] Ridwan F. and Xu X., "Advanced CNC System

with In-process Feed-rate Optimization," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 29, 2013, pp. 12-20
[3] Cho D. W., Lee S. J., Cho C. N., "The State of Machining Process Monitoring Research in Korea," Journal of Machine Tools & Manufacturing, 39, 1999, pp.1697-1715
[4] Cao, H., Lei, Y., and He, Z., "Chatter Identification in End Milling Process Using Wavelet Packets and Hilbert-Huang Transform," Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 69, 2013, pp. 11-19
[5] Huang, P., Li, J., Sun, J., and Zhou, J., "Vibration Analysis in Milling Titanium Alloy Based on Signal Processing of Cutting Force," Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 64, no. 5-8, 2013, pp. 613-621, 2013
[6] Cao, H., Zhou, K., and Chen, X., "Chatter Identification in End Milling Process Based on EEMD and Nonlinear Dimensionless Indicators," Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 92, 2015, pp. 52-59
[7] Lamraoui, M., Thomas, M., El Badaoui, M., and Girardin, F., "Indicators for Monitoring Chatter in Milling Based on Instantaneous Angular Speeds," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 44, no. 1-2, 2014, pp. 72-85
[8] Grossi, N., Scippa, A., SALLESE, L., Sato, R., and Campatelli, G., "Spindle Speed Ramp-Up Test: A Novel Experimental Approach for Chatter Stability Detection," Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 89, 2015, pp. 221-230
[9] Altintas Y., "Prediction of Cutting Force and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurement," ASME Journal of Engineering for Industry, vol. 114, 1992, pp. 386-392
[10] Altintas Y., et al., "Virtual Process Systems for Part Machining Operations," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 63, 2014, pp. 585-605

저자약력

김 정 준 (Jung-Jun Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 전북대학교 산업공학과 학사
- 2003년 8월 : 전북대학교 정보과학대학원 석사
- 2016년 9월 - 2018년 9월 : 전북대학교 정보보호공학과 대학원 박사 수료
- 2008년 7월 - 현재 : (주)트레디오 대표이사

〈관심분야〉 정보통신, 정보보호, 임베디드 시스템, 센서 네트워크, 모니터링 시스템

조 기 환 (Gi-Hwan Cho)



- 1985년 2월 전남대학교 학사
- 1987년 2월 서울대학교 석사
- 1996년 5월 뉴캐슬대학교 박사
- 1987년 9월 - 1997년 8월: 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 1997년 9월 - 1999년 2월: 목포대학교 컴퓨터과학과 교수
- 1999년 3월 - 현재: 전북대학교 컴퓨터공학부 교수

〈관심분야〉 컴퓨터 네트워크, 무선인터넷, 정보보호, 센서 네트워크, 정보보호