

◆ 특집 ◆ 자율적응 생산시스템 통합 운용기술

무인화 가공공정 최적화 및 자율대응 기술에 관한 기반연구

A basic study on Unmanned Machining Process Optimizing and Autonomous Control

김동훈^{1,✉}, 송준엽¹
Dong-Hoon Kim^{1,✉} and Jun-Yeob Song²

¹ 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 (Department of Ultra Precision Machines and Systems, KIMM)
✉ Corresponding author: kdh680@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7148

Manuscript received: 2012.1.13 / Accepted: 2012.2.17

The biggest factors that lower the machining accuracy are thermal deformation and chatter vibration. In this article, we introduce the study case of technology that can automatically compensate the errors of these factors of a machine during processing on the machine tool's CNC(Computerized Numerical Controller) in real time. This study is related to the detection and compensation of thermal deformation and chatter vibration that can compensate for faster and produce processed goods with more precision by autonomous compensation. In addition, this study is related to the active control of vibration during machining, monitoring of cutting force and auto recognition of machining axes origin. Thus, we attempt to introduce the related contents of the development we have made in this article.

Key Words: Machine Tools (공작기계), Thermal Deformation (열변형), Chatter Vibration (채터진동), Compensation (보정), CNC (수치제어기)

1. 서론

최근에는 IT 기술과 기계기술의 융합 통한 생산시스템의 원천기술 개발에 많은 관심이 높아지고 있다.¹⁻³ 본 논문에서는 지능형 가공기의 공정최적화 및 무인화에 적합한 자율예지보전과 장애유형에 따른 대응전략 등을 통한 무인화 가공공정 최적화 및 자율대응시스템에 대한 핵심기술이 요구됨에 따라^{4,5} 및 일부 개발 사례를 소개하고자 한다. 세부내용으로는 가공정밀도, 표면거칠기 등 가공품질 저하 원인이 되는 열변형, 채터진동 등 핵심 영향인자의 특성분석 및 이의 예지보전을 위한 보상값 예측알고리즘을 통한 가공 중 실시간 CNC 자율보정 기반 공정최적화, 고속정밀가공을 위한 기계진동원의 추적해석을 통한 능동적 기계진

동 감쇄제어 최적화, Vision 및 회전공구 일부하 무선 모니터링을 통한 공정무인화 및 가공 Cell 레벨에서의 무인화 및 시스템 가동율 극대화를 위한 발상에서의 자율대응 운영방안 개발로 정의할 수 있다. 이는 Fig. 1 에 배경을 제시하였듯이 재구성 가능 유연 가공 셀에서 필요로 하는 요소기술이다.

기존 연구와의 차별성으로는 장시간 가공 중 작업자의 개입없이 첫 번째 가공 사이클 후나 다음 가공공정부터가 아닌 현재 실시간 가공 중 능동적 공정감시 및 예측에 의한 실시간 자율보정을 통하여, 가공공정 최적화 및 무인화를 지향함으로써 가공성능(가공정밀도, 표면거칠기, 정밀가공, 고속가공)을 향상시키며, 아울러 외란진동 역가진 및 셋업가공 원점 자동인식 등 기존 연구와 차이가 있다. 또한 가공 셀이나 시스템에서의 가동률 극

대화 달성을 위하여 장애 유형에 따른 대응전략 개발을 목표로 하는 것 등으로 볼 수 있다.

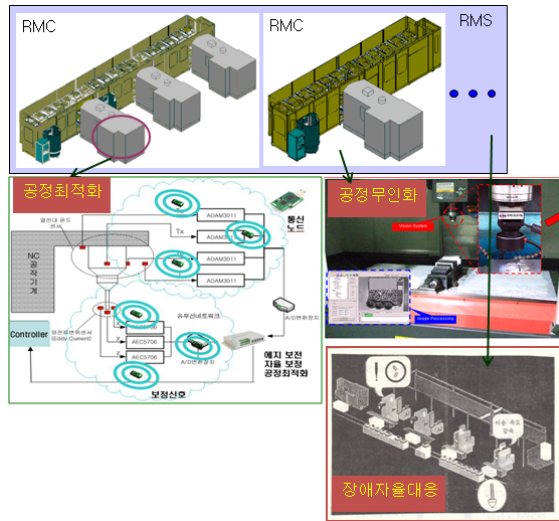


Fig. 1 Background of unmanned machining process optimizing and autonomous control

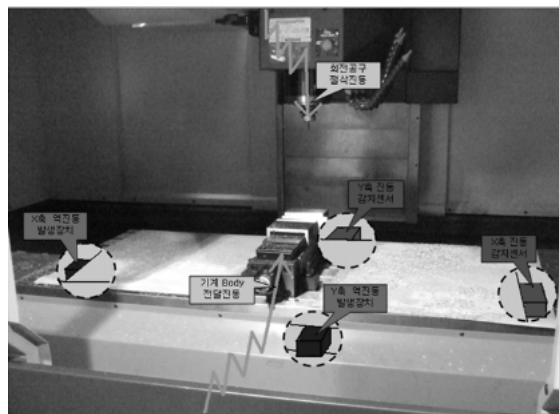


Fig. 2 Thermal deformation compensation and chatter vibration control

2. 정밀도 향상을 위한 가공공정 최적화 연구

본 연구에서의 가공공정 최적화는 Fig. 2 처럼 공정레벨에 중점을 두었으며, 구체적인 내용은 다음과 같다. 궁극적인 정량적 목표로는 가공 시 발생 열변형 실시간 보상을 통한 최대 가공오차 12um 이내, 가공 시 발생하는 chatter진동의 실시간 보상을 통한 평균거칠기(Ra) 15% 향상 및 공구 수명 5-10%이상 향상을 통하여 최적화된 정밀가공

및 고속가공을 실현할 수 있는 요소기술을 개발하여 가공성능 극대화를 시키고자 한다. 가공정밀도만 보더라도 일반 CNC(Computerized Numerical Controller)에서 정밀연삭기 수준성능을 피하는 것으로 최적화된 메커니즘이 내장된 실시간 예측 자율보상기능 구현 적용 없이는 불가능하다. 본 연구에서 개발 중인 구체적인 요소기술로는 다음과 같이 정의할 수 있다.

2.1 실시간 가공 중 열변형 예지보정

밀링 등 장시간 가공에 있어서 대기, 기계 XYZ 축 등 열에 의한 처짐 등 변형에 기인한 가공품의 정밀도 저하를 가공 중 실시간 지능적으로 예측하여 가공기의 제어기로 전달하기 위한 임베디드타입의 센싱 및 듀얼구조의 유연성있는 예측 알고리즘이 Firmware 된 디바이스를 구현 적용하고 이를 기반으로 CNC 에 인터페이스 프로그래밍함으로써 기계원점 Offset Parameter 등을 실시간 가공중 자율보상하게 하는 것이 특징이다.

기존의 열보상을 위해 적용된 공작기계의 설계 개선을 통한 방법에 비해 시간과 비용측면에서 유리할 뿐만 아니라 서보루프의 구동신호를 변경하는 기존의 아날로그 및 디지털 보상방법에 비해 적용이 매우 간편하고 실시간성이 우수하여 생산성 향상 및 경제적인 이득을 얻을 수 있는 구조로 되어 있다.

2.2 실시간 가공 중 chatter진동 감시제어

가공물과의 마찰 및 스핀들 회전에 따른 chatter진동에 기인한 가공품 표면거칠기 저하를 가공중 자율 제어하기 위하여 실시간으로 가공상태의 신호를 획득한 후 chatter진동의 유무를 결정하는 디지털 필터 및 에너지레벨 측정을 위한 RMS(Root Mean Square)기반 최적의 알고리즘을 개발 및 Firmware 하여 I/F 디바이스를 구현 적용하고 이를 기반으로 CNC 에 인터페이스 프로그래밍함으로써 스핀들 속도, 공구이송 속도, 절입깊이 등을 자율적 조절하는 것이 특징이다.

기존의 chatter진동 대응방법은 첫째 공작기계에 가공물을 물려놓은 후 여러 가공 조건으로 테스트 실험을 수행할 때 작업자의 시각적인 정보에 기준하여 가공 시 공구가 심하게 떨리는지를 판단하고 이를 DB 화해서 다음의 가공수행 시 chatter진동이 일어나지 않도록(가공조건 검사)하는 방법과 둘째는 첫 번째 방법에서 작업자의 시각적인 정보 대

신에 가속도 센서로 데이터를 획득하고 이를 분석하여 각 가공조건에 대한 채터진동의 유무를 분류하여 다음 작업 시 채터진동이 일어나지 않도록 가공조건을 선정하는 방법이다. 이러한 방법들은 실시간 보상의 개념이 아니며 미리 가공 전에 충분한 데이터를 확보해야 하는 단점을 가지고 있기 때문에 이에 비하여 효과적이라 볼 수 있다.

2.3 강제진동 능동제어

밀링계 회전공구와 선반계 공구 및 가공물 사이에서 가공 중 발생하여 바디진동으로 전달되기에 고속가공을 위해서는 반드시 해결되어야 하는 다양한 기계 진동 발생원을 추적, 해석하여 능동적 기계진동감쇄를 위한 역 진동 발생모듈 장치를 구현 적용하여 가공속도를 줄이지 않고도 진동을 감쇄 최적화하는 것이 특징이다.

기존의 경우는 대부분 수동적 진동 감쇄로써 기계에서 발생될 수 있는 진동을 미연에 방지하는 방법이다. 설계 시 고유 진동 주파수를 해석 이 주파수와 체배되는 길이를 피해 설계한다든지 진동 발생 요소에 방진 장치를 설치, 고속회전부의 Balancing 을 본다든지, 가공에서도 스핀들 회전수 변경, 가공 Feed 조절, 절삭량 조절 등이 이에 포함된다. 하지만 고속가공이 필요한 경우, 고속 가공 중에는 필히 진동이 발생하는데, 이를 적응제어를 한다 할지라도 속도 저하 등 단점이 따르므로 고속가공이 필요 시는 능동적 대처가 안된다. 따라서 이를 극복하는 방법이 절실히 필요하다. 아직 기계에서 발생하는 진동을 역진동 발생이란 방법으로 국내에서 능동적 대처한 실제 기계는 없기에 효과적이라 할 수 있다.

3. 가동률 극대화 위한 가공공정 무인화 연구

본 연구에서의 가공공정 무인화는 Fig. 3 처럼 회전공구 실부하 및 셋업공정에 중점을 두었으며, 구체적인 내용은 다음과 같다.

3.1 회전공구 실부하 유무선 감시

일반적으로 가공공정에서 무인화의 가장 큰 저해요인 중 대표적 하나인 공구 파손을 감시하기 위해서는 공구의 실부하를 감시하여야 하며, 이를 위해서는 기존방식인 회전부의 마찰손(bearing 마찰손등), motor 의 전기손이 포함 된 Spindle motor 의 전류치가 아닌, Tool tip 에서 받는 stress 신호를

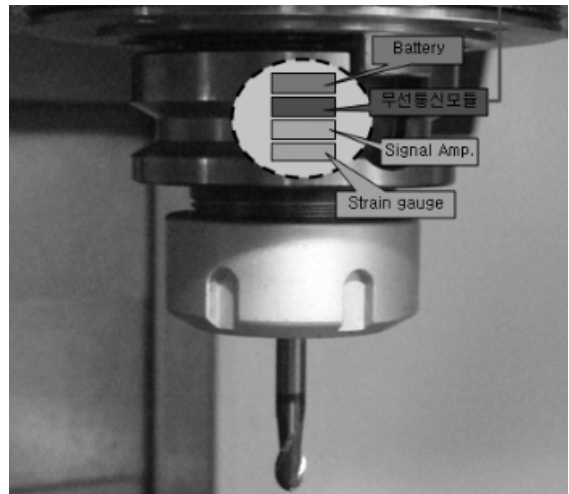


Fig. 3 machining tool monitoring and setup process automation

획득해야 하고 가공의 종류나 공구의 형상에 따라 Strain gage 를 장착하는 Know how 가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 방법론 및 유선시 회전에 따른 노이즈 등 문제가 많아 샘플링타임 5~10ms 이하 무선모니터링 솔루션을 개발하고 있는 것이 특징이다.

공구 실부하라고 한다면 필히 회전하는 공구이어야 하며 이는 Milling 계를 의미한다. Turning 계에서는 부하가 가공물을 회전시키는 Chuck Spindle 에서 추정이 가능할 것이다. Turning 계에서는 고정되어 있는 Tool Bite 에 Strain gage 를 장착하여 Bite tip 에서 받는 stress 를 측정하게 된다. 이를 응용하는 연구를 더러 하고 있다. 그러나 회전공구의 holder 에 strain gage 를 삽입하고 이 신호를 무선으로 전송받는 방법은 아직 실시된 적이 없기에 본 연구의 개발내용이 차별화된 효과적인 것이라 할 수 있다.

3.2 가공원점 셋업공정 무인화

Vision 장치를 Tool Holder 에 장착하여 On-Machine 에서 투입가공물의 Setup 또는 장착 양부 판정, 가공 후 가공부위 미가공 불량검사 및 치수 측정 등을 함으로써 판단 및 측정기능을 실제 기계에 적용하여 무인화에 기여한 것이 특징이다.

특히 RMC(Reconfigurable Manufacturing System)에서는 기계 및 주변기기의 재구성에 따른 가공공정 및 가공소재가 자주 변경이 될 수 있기에 이에 따른 비전계측을 통한 가공원점 자동인식이 필요하다. 현재는 대부분 작업자에 의하여 가공소재가

변경 시 두께 및 넓이가 달라짐에 따라 가공원점을 조그모드에서 수작업 제어로 세팅을 하게 된다. 이를 극복하는 방법이 본 연구에서 개발중인 비전계측을 통한 가공원점 자동인식 기능이다.

4. 장애유형에 따른 대응전략 연구

본 연구에서의 장애유형 따른 대응전략의 예는 Fig. 4 와 같이 제시할 수 있으며, 가공기 제어기 및 셀 컨트롤러에서의 고장이력을 기반으로 기존 시스템들을 분석하여 개발 요구사항의 파악 및 이의 기반과 에이전트 기술의 응용 하에 셀 또는 시스템내의 각종 장애들에 자율 대응하는 에이전트 기반 제조 제어전략 메커니즘을 개발하고 있다.

기존에 비하여 특징은 Agent 의 구성으로 표준화된 Module, 고장 등 시스템 내의 장애에 대한 자체 대응력으로 기계 및 시스템의 효율 및 무인화 가동률 증가, 제조시스템의 생산성 향상을 목표로 장애유형별 유연한 대처가 가능한 장애 대응 전략 및 장애에 대해서 항상 생동감 있는 운용방안 구현을 지향하는 것이다.

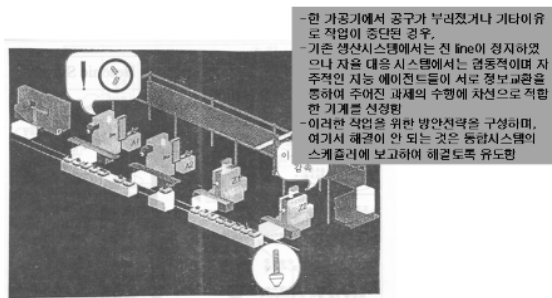


Fig. 4 Trouble countermeasure based on agent

5. 요소기술 개발 사례

5.1 가공 중 실시간 열변형 보정제어 실험

Fig. 5 는 스핀들 회전을 6000rpm, 이송속도를 0.1m/min, 절입깊이를 0.1mm 로 하여 가공하는 것을 보여주고 있다. Fig. 6 은 보정치 전후의 가공표면의 상태를 레이저 변위센서를 이용하여 가공 전체의 표면거칠기를 100Hz 로 샘플링한 결과를 나타내고 있다. 보정 전의 표면오차는 최대 40um 로 나타났지만 보정 후 최대 20um 로 감소하는 것을 보였다. 이러한 결과는 보정 후 가공표면이 50%정도 개선되었지만, 초기에 일정한 보정을 유지하

가 200 초 근방에서 보정기능이 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이는 입력되는 신호에 노이즈가 상대적으로 많이 포함되었을 가능성이 농후하다. 지금까지의 실험결과로는 13 시간 전후 장시간 가공중 열변형에 따른 평균 가공오차는 약 16.5 μm 정도로 예측하며, 이를 보상 시 12.5 μm 이내로 25%이상 향상 가능할 것으로 보고 있으며, 계속 정밀도 향상을 위하여 메커니즘을 개선 중이다.

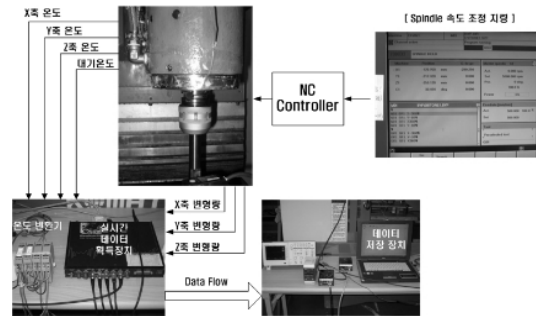


Fig. 5 Thermal deformation compensation in real-time during machining

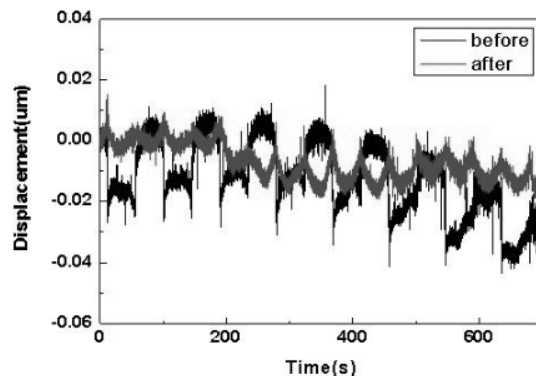


Fig. 6 Machining precision measurement through thermal deformation compensation

5.2 가공 중 실시간 채터진동 제어 실험

내부적인 채터 보정 방법은 실험적으로 선행된 채터 시 발생하는 RMS 한계값과 현재 계측된 RMS 값의 비를 공작기계의 Feedrate 변화율 지령으로 하여 NC 커널에 지령하는 방식을 채택하였다. 실험조건은 다음과 같다.

- 가공회수 : 5 회
- 스핀들 회전속도 : 1000rpm
- 공구 이송속도 : 200mm/min

Fig. 7 처럼 구성된 환경하에 5 회 반복 실험결과와 채터 보상 전후의 성능 개선율은 Table 1 처럼 약 14%정도로 나타났다. 현재 일부 실험 중이지만 개선율을 15% 까지 향상 중에 있다. 이는 노이즈 제거 및 메커니즘적으로 보완결과이다.

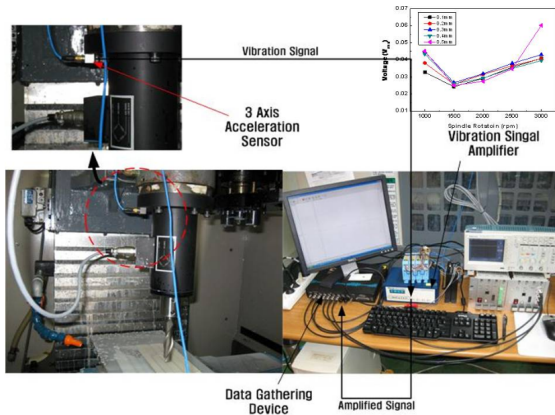


Fig. 7 Monitoring and control of chatter vibration in real-time during machining

Table 1 Surface precision measurement through chatter vibration control

	Pre-compensation values(5 times avg.)	Post-compensation values(5 times avg.)
Feed rate	200mm/min	200mm/min
Surface	4.2um	3.6um

5.3 강제진동 능동제어 기반 실험

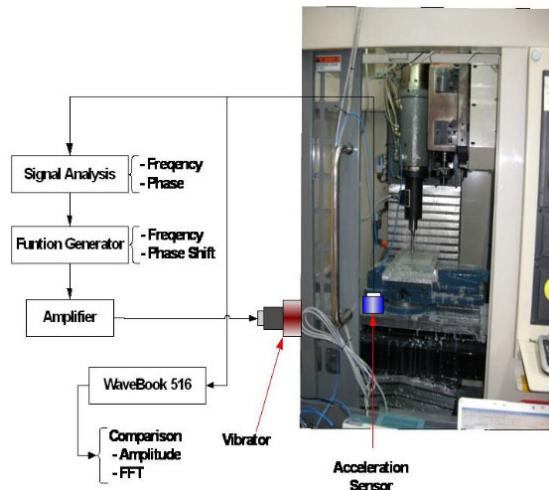


Fig. 8 Active control of vibration in machining process

외란 등 기계에서 발생하는 다양한 진동을 역진동 발생이란 방법으로 실제 능동적 대처를 위한 실험으로서 Fig. 8 에 이에 대한 내용을 나타내었다. 현재 가진기의 기계장착 등 기반실험 단계이다.

5.4 회전공구 실부하 유무선 감시 실험

회전공구의 실부하 감시는 톨 팁으로부터 나오는 신호를 직접 받아야 모터 전기손 등 노이즈 대역이 아닌 실제 정확한 신호처리가 가능하다. 이를 위하여 Fig. 9 처럼 절삭력과 스트레인게이지 출력과의 관계를 알기 위하여 Kistler 압전소자형 공구동력계(3-Comp. Dynamometer)-9272, Amplifier Kistler 5007 를 사용하였다. 공구동력계에 공구를 설치하여 부하에 대한 스트레인게이지 출력과의 관계를 측정하는 모습이다. 회전기계에서 신호를 무선으로 처리 및 노이즈 처리, 신호처리의 고속화를 가능하게 하리라 본다. 현재 기계적용을 위한 전 단계 진행 중이다.



Fig. 9 Function measurement between cutting force and strain-gauge

5.5 셋업공정의 가공원점 자동인식 실험

자동원점 인식시스템은 이미지를 처리하는 임베디드 장치에서 기존의 소재에 대한 정보를 저장할 수 있기 때문에 획득된 이미지에서 일정 부분만을 필터처리하여 원점도출이 가능하여 동일한 소재로 작업할 경우 매우 빠른 시간 안에 새로운 가공원점의 도출이 가능하다.

또한 임베디드 시스템에 무선통신 모듈인 블루투스를 부착할 경우 원격으로 이러한 정보를 CNC 컨트롤러와 작업자에게 송수신이 가능함으로 실시간으로 현재와 이전의 가공원점에 대한 이력을 DB 화 가능하게 할 수 있는 장점이 있다. 기존 사용되고 있는 드릴척의 개조 방안과 이와 결합될 이미지 센서와 조명부 지그의 개념설계와 조명부의 회로를 개발하였다. Fig. 10 은 척홀더에 비전장

치를 내장화하기 위하여 개조된 드릴척에 삽입될 요소들에 대한 내용을 보여준다. 현재 기계에 연계하여 프로그래밍 작업 중인 단계이다.

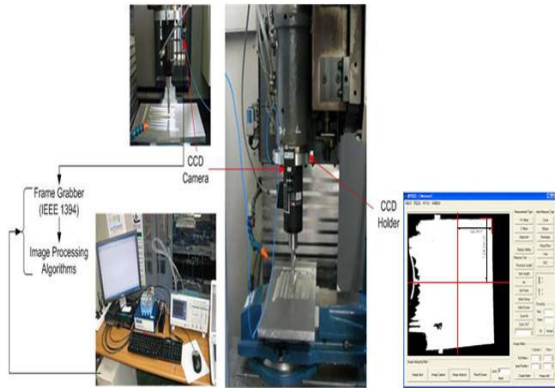


Fig. 10 Auto recognition of machining axes origin

6. 결론

본 논문에서는 IT 융합 기계지능화 사례로 생산기계의 가공공정 최적화 및 무인화 요소기술 및 일부 개발 중인 사례에 대하여 제시하였다. 특히 자율재구성 가능한 RMC/RMS 환경하에서는 가공기계 및 주변기계의 재배치와 재구성으로 가공공정 및 기계가공 환경의 변화가 많아져 가공품의 품질저하 및 생산성 저하를 초래하기에 아래와 같은 요소기술을 도출하고 이의 기반연구를 수행하였다. 향후 실용화 단계까지 많은 적용 테스트와 메커니즘 보안을 통한 보정 및 제어 성능 업그레이드가 필요할 것이다.

- 주변 환경변화에 따른 기계 가공축 (X,Y,Z 축) 및 외부(대기) 열변형 등 발생함에 따라 가공원점 Offset 값 조정을 위한 보상값 예측 및 실시간 CNC 연계 자율보정

- 재구성에 의한 기계주변 환경이 바뀌어 기계 내외부 강제진동 발생함에 따라 chatter 자려진동 경우 디지털 필터링 등을 통한 chatter진동 분석 및 CNC 연계를 통하여 실시간 자율보정과 기계내외부 강제진동 경우 별도 역진동 발생 등에 의한 능동 감쇄제어

- 기계변경에 의한 공정/소재/라인이 바뀌어 가공원점 오차 발생함에 따라 자동 가공원점 인식 등 Vision 계측을 통한 공정무인화

후 기

본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업 ‘자율적응 생산시스템 통합운용기술 개발 (10033468)’ 사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Kim, D. H. and Song, J. Y., “Ubiquitous-Based Mobile Control and Monitoring of CNC Machines for Development of u-Machine,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 4 pp. 455-466, 2006.
2. Kim, D. H. and Song, J. Y., “Knowledge-Evolutionary Intelligent Machine-Tool - Part 1: Design of Dialogue Agent based on Standard Platform,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 11, pp. 1863-1872, 2006.
3. Wright, P. K., “Principles of open-architecture manufacturing,” Journal of Manufacturing Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 187-202, 1995.
4. Yellowley, I. and Pottier, P. R., “The integration of process and geometry within an open architecture machine tool controller,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, No. 2, pp. 277-293, 1998.
5. Budak, E. and Altintas Y., “Analytical prediction of chatter stability in milling - Part 1: General formulation,” Trans. ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 120, No. 1, pp. 22-30, 2002.