

Best Paper of this month

가공공정 최적화 및 무인화를 위한 요소기술 분석 연구

김동훈*, 송준엽⁺

(Manuscript received: Mar, 6, 2013 / Revised: Mar, 18, 2013 / Accepted: Mar, 25, 2013)

Key Technology Analysis for Machining Process Optimization and Automation

Dong-Hoon Kim*, Jun-Yeob Song⁺

Abstract

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. The biggest factors that lower the machining accuracy are thermal deformation and chatter vibration. 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), Deformation(변형), Chatter(진동), Factors(영향인자), Detection(검출)

1. 서론

최근에는 IT기술과 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^(4,7) 관련 핵심 요소기술을 분석하고 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 공정최적화가 있다.

아울러 고속가공을 위한 기계진동원의 추적해석을 통한 능동

적 기계진동 감쇄제어 최적화, Vision 및 회전공구 일부하 무선 모니터링을 통한 공정무인화 및 가공셀 레벨에서의 무인화 및 시스템 가동을 극대화를 위한 발생장애의 자율대응 방안 개발 연구로 정의할 수 있다. 이는 Fig. 1에 배경을 제시하였듯이 첨단생산시스템이나 재구성 가능 유연 가공 셀에서 필요로 하는 요소기술이다. 기존 연구와의 차별성으로는 장시간 가공 중에도 작업자의 개입없이 첫 번째 가공 사이클 후나 다음 가공공정 부터가 아닌 현재 실시간 가공 중에서 능동적 공정감시 및 예측에 의한 실시간 자율보정이 지원된다는 것이다. 이를 통하여, 가공공정 최적화 및 무인화를 지향하고자 한다.

그렇게 되면 가공정밀도, 및 표면거칠기 등 가공품의 품질향상과 정밀가공, 고속가공 등의 가공성능을 향상시킬 수 있을 것이다. 아울러 앞으로 각광받을 자율 재구성 생산시스템에서

* 한국기계연구원 초정밀시스템연구실
주소: 305-343 대전 유성구 장동 171

+ 한국기계연구원 초정밀시스템연구실

✉ Corresponding Author E-mail: kdh680@kimm.re.kr

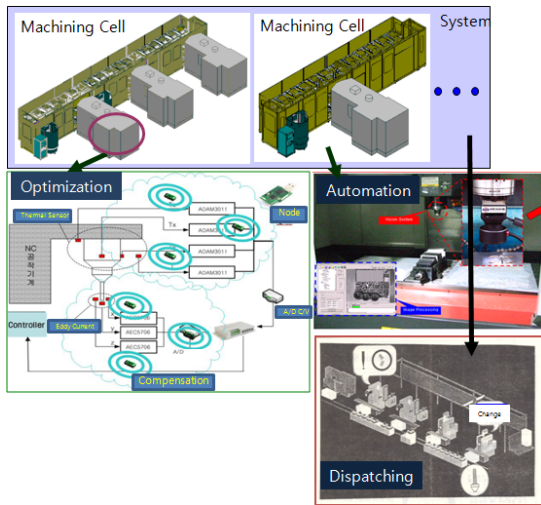


Fig. 1 Background of unmanned machining process optimizing and autonomous control

가공품이나 공정 다변화에 따른 빈번히 발생하는 외란진동 등 다양한 진동에 대하여 역가진을 통한 능동제어 기능 등도 차별점이자 특징이라 할 수 있다. 또한, 소재변경에 따른 셋업가공원점이 달라질 때 초기 가공원점 자동인식 등의 기능도 기존 연구와 차이가 있다. 이와 함께 가공 셀이나 시스템에서의 가동률 극대화 달성을 위하여 에이전트 기반의 장애 유형에 따른 대응전략 개발을 목표로 하는 것도 특징이라 볼 수 있다.

2. 가공공정 영향인자 및 핵심요소 기술 분석

앞으로의 유연가공시스템에서는 가공공정의 최적화 및 셋업 공정 무인화 필요성이 강조되고 있다. 이에 대처하기 위하여 먼저 가공공정의 주요 영향인자를 분석하였다. Fig. 2처럼 일례로 장시간 가공중 발생하는 열변형이나 고속가공에 따른 발생 채터진동, 재구성에 의한 기계주변 강제진동이 최적화 영향인자가 속한다. 아울러 셋업공정 무인화에 대처하기 위한 영향인자로는 공정/소재/라인 변경에 따른 가공원점 오차의 자동인식 계측문제 및 무선절삭력 미세감지 문제가 여기에 해당된다.

나아가서는 RMC(Reconfigurable Machining Cell) 내 장애 유형별 대응 메커니즘 등이 시스템레벨에서 요구되는 영향인자이기도 하다. 지금부터는 이러한 영향인자들을 해결하기 위한 핵심 요소기술들에 대하여 언급하고자 한다.

2.1 장시간 가공중 열변형 예지보정

밀링, 보링 등 장시간 가공(예: 12시간 이상 장시간 가공으로 일교차 및 가공축 열변위 발생)에 있어서 대기온도, 기계 X, Y, Z축 등 열에 의한 처짐 및 변형에 기인한 오차로 가공품의 정밀도 저하 문제가 일어난다. 이를 가공 중 실시간 효율적으로 예측하여 가공기의 제어기로 전달하여 미리 예측 보정을 할 필

Key Factors	
Thermal Deformation	Real-time Optimization Optimization of Machining Process
Chatter Vibration by Cutting Force	
External Vibration by System	
Precision Tool Force of Tool Tip	Flexible Automation Automation of Machining Process
Operator Need of Setup Process	
Un Expected Trouble on Machine, System	Re-Scheduling of Machining Process System Efficiency

Fig. 2 Key factors for unmanned machining process optimizing

Real-Time Compensation of Thermal Deformation	
◆	Real-time intelligent prediction of thermal deformation during machining process
◆	Embedded type sensing for interfacing with CNC controller of machine tools
◆	Implementation of firmware device with dual structured prediction mechanism
◆	Interface programming based on OEM package method of CNC
◆	Autonomous compensation of machining zero offset parameter during machining process

Distinction and Feature	
◆	Benefit of cost and time compared to design change method of machine tools
◆	Good simplicity and flexibility compared to conventional method by changing analog signal
◆	Enhanced productivity by superiority of real-time processing can be possible

Fig. 3 Characteristic of proposed thermal deformation compensation

요가 있다. 그러기 위해서는 Fig. 3과 같이 실시간성을 위하여 임베디드타입 센싱 및 듀얼구조의 유연성있는 예측 알고리즘이 Firmware된 디바이스 구현 적용이 필요하고 이를 기반으로 CNC에 인터페이스 프로그래밍함으로써 기계원점 Offset Parameter를 실시간 가공중 자율보상하게 하는 것이 필수적이며, 본 연구에서 추구하는 바이며 특징이라 할 수 있다.

기존의 열보상을 위해 적용된 공작기계의 설계 개선을 통한 방법에 비해 시간과 비용측면에서 유리할 뿐만 아니라 서보모프의 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 채터진동 감시제어

가공물과의 마찰 및 스펴을 회전에 따른 채터진동에 기인한 가공품 표면거칠기 저하를 가공 중 자율 제어하기 위하여 실시간으로 가공상태의 신호를 획득한 후 채터진동의 유무를 결정하는 디지털 필터 및 에너지레벨 측정

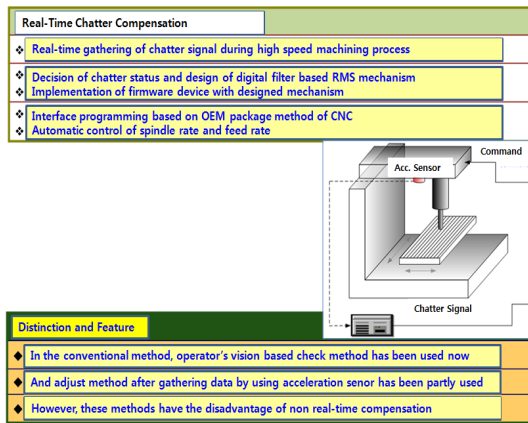


Fig. 4 Characteristic of proposed real-time chatter compensation

을 위한 RMS(Root Mean Square)기반 최적의 알고리즘을 개발 및 Firmware하여 I/F 디바이스를 구현 적용하고 이를 기반으로 CNC에 인터페이스 프로그래밍함으로써 스피indle 속도, 공구이송 속도, 절입깊이 등을 자율적 조절하는 것이 특징이다.

기존의 채터진동 대응방법은 첫째 공작기계에 가공물을 물려놓은 후 여러 가공 조건으로 테스트 실험을 수행할 때 작업자의 시각적인 정보에 기준하여 가공 시 공구가 심하게 떨리는지를 판단하고 이를 DB화해서 다음의 가공수행 시 채터진동이 일어나지 않도록(가공조건 검사)하는 방법과 둘째는 첫 번째 방법에서 작업자의 시각적인 정보 대신에 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 있기에 이에 비하여 Fig. 4와 같은 제안방식이 효과적이라 볼 수 있다.

2.3 외란진동 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 하는 것이 목적이다. 본 연구에서는 이를 위한 역진동 발생모듈 장치를 구현 적용하여 스피indle 회전속도나 공구 이송속도 등 가공속도를 줄이지 않고도 진동을 감쇄 최적화하는 것이 특징이다.

기존의 경우는 대부분 수동적 진동 감쇄로써 기계에서 발생할 수 있는 진동을 미연에 방지하는 방법이다. 설계 시 고유 진동 주파수를 해석 이 주파수와 체배되는 길이

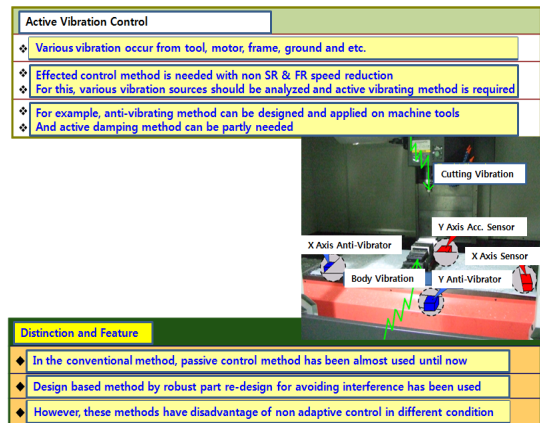


Fig. 5 Characteristic of proposed active vibration control

를 피해 설계한다든지 진동 발생 요소에 방진 장치를 설치, 고속회전부의 Balancing을 본다든지, 가공에서도 스피indle 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 안 된다. 따라서 Fig. 5와 같이 이를 극복하는 방법이 절실히 필요하다. 아직 기계에서 발생하는 진동을 역진동 발생이란 방법으로 국내에서 능동적 대처한 실제 기계는 없기에 효과적이라 할 수 있다.

2.4 회전공구 실부하 유무선 감시

일반적으로 가공공정에서 무인화의 가장 큰 저해요인 중 대표적인 요소 중 하나인 공구 파손을 감시하기 위해서는 공구의 실부하를 감시하여야 하며, 이를 위해서는 기존방식인 회전부의 마찰손(bearing 마찰손등), motor의 전기손이 포함 된 Spindle motor의 전류치가 아닌, Tool tip에서 받는 stress 신호를 획득해야 하고 가공의 종류나 공구의 형상에 따라 Strain gage를 장착하는 Know how가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 구조적 방법론 및 유선시 회전에 따른 노이즈 등 문제점 등을 샘플링타임 5~10ms이하 무선모니터링하여 개발하고 있는 것이 특징이다.

공구 실부하라고 한다면 필히 회전하는 공구이어야 하며 이는 Milling계를 의미한다. Turning계에서는 부하가 가공물을 회전시키는 Chuck Spindle에서 추정이 가능할 것이다. Turning계에서는 고정되어 있는 Tool Bite에 Strain gage를 장착하여 Bite tip에서 받는 stress를 측정하게 된다. 이를 응용하는 연구를 더 하고 있다. 그러나 회전공구의 holder에 strain gage를 삽입하고 이 신호를 무선으로 전송받는 방법은 아직 실시된 적이 없기에 Fig. 6처럼 본 연구의 개발내용이 차별화된 효과적 인 것이라 할 수 있다.

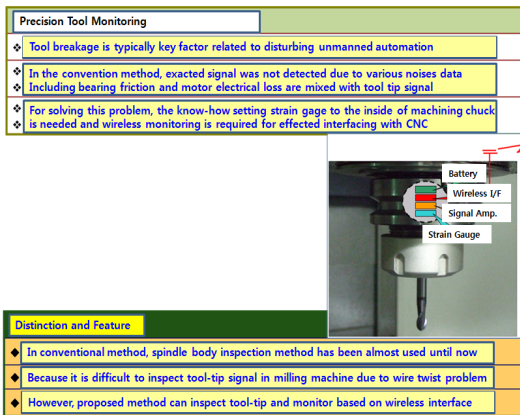


Fig. 6 Characteristic of wireless precision tool monitoring

2.5 셋업 가공원점 자동인식

Vision 장치를 Tool Holder에 장착하여 On-Machine에서 투입가공물의 Setup 또는 장착 양부판정, 가공 후 가공부위 미가공 불량검사 및 치수측정 등을 함으로써 판단 및 측정기능을 실제 기계에 적용하여 무인화에 기여 한 것이 특징이다.

특히 RMC에서는 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 Fig. 7처럼 본 연구에서 개발중인 비전계측을 통한 가공원점 자동인식 기능이다. 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 DB화 가능하게 할 수 있는 장점이 있다.

2.6 장애유형에 따른 대응전략 연구

본 연구에서의 장애유형 따른 대응전략의 예는 Fig. 8와 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 에이전트기반 제조 제어전략 메커니즘을 개발하고 있다.

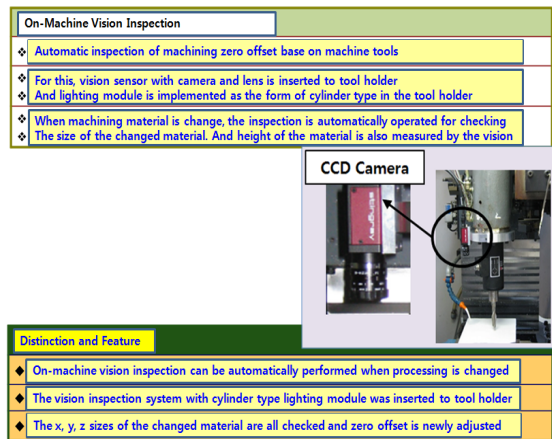


Fig. 7 Characteristic of proposed on-machine vision

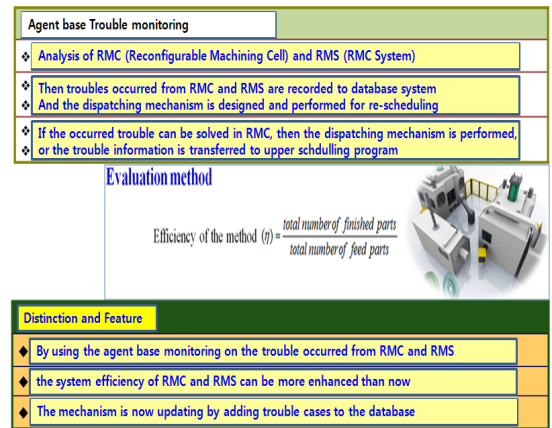


Fig. 8 Characteristic of proposed agent monitoring

기존에 비하여 특징은 Agent의 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 대응전략 및 장애에 대해서 항상 생동감 있는 운용방안 구현을 지향하는 것이다.

3. 기계적용 실험 일부사례

여기에서는 기계적용 일부 실험 및 계측 결과에 대하여 소개하고자 한다. 주요사례 일부로서 가공중 실시간 열변형 보정제어 실험과 가공 중 실시간 채터진동 제어 실험 내용에 대하여 언급한다.

3.1 가공 중 실시간 열변형 보정제어 실험

Fig. 9는 스핀들 회전을 6000rpm, 이송속도를 0.1m/min, 절입깊이를 0.1mm로 하여 가공하는 것을 보여주고 있다. Fig. 10은 보정치 전후의 가공표면의 상태를 레이저 변위

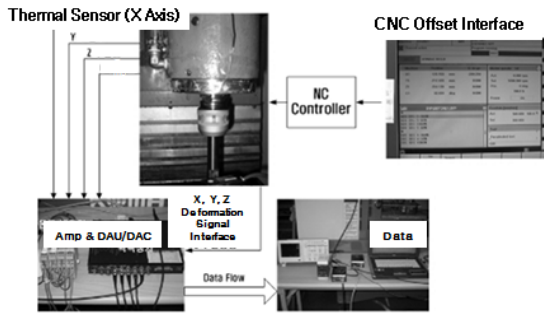


Fig. 9 Thermal deformation compensation in real-time during machining

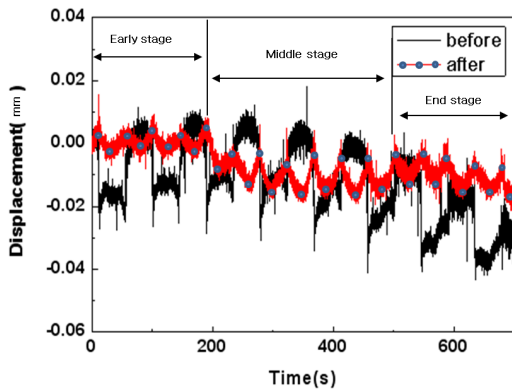


Fig. 10 Machining precision measurement through thermal deformation compensation

센서를 이용하여 가공 전체의 표면거칠기를 100Hz로 샘플링한 결과를 나타내고 있다. 보정 전의 표면오차는 최대 40um로 나타났지만 보정 후 최대 20um로 감소하는 것을 보였다. 이러한 결과는 보정 후 가공표면이 50%정도 개선되었지만, 초기에 일정한 보정을 유지하다가 200초 근방에서 보정기능이 떨어지는 것을 볼수 있는데 이는 입력되는 신호에 노이즈가 상대적으로 많이 포함되었을 가능성이 농후하다. 지금까지의 실험결과로는 13시간 전후 장시간 가공중 열변형에 따른 평균 가공오차는 약 16.5um 정도를 예측하며, 이를 보정 시 12.5um 이내로 25%이상 향상 가능할 것으로 보고 있으며, 계속 정밀도 향상을 위하여 메커니즘을 개선 중이다.

3.2 가공 중 실시간 채터진동 제어 실험

내부적인 채터 보정 방법은 실험적으로 선행된 채터 시 발생하는 RMS(Root Mean Square) 한계값과 현재 측득된 RMS 값의 비를 비교하여 동작기계의 이송속도인 Feedrate 변화율을 CNC커널에 지령하는 방식을 채택하였다. 실험 조건은 다음과 같다.

Table 1 Surface precision measurement through chatter vibration control

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

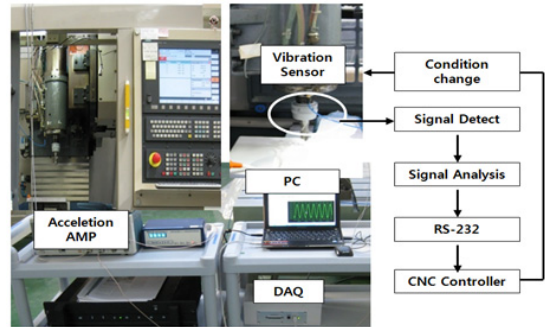


Fig. 11 Monitoring and control of chatter vibration in real-time during machining

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

Fig. 11처럼 구성된 환경하에 5회 반복 실험결과 채터 보상 전후의 성능 개선율은 Table 1처럼 약 14%정도로 나타났다. 현재 일부 실험 중이지만 개선율을 15% 까지 향상 중에 있다. 이는 노이즈 제거 및 메커니즘적으로 보 완결과이다.

4. 결론

본 논문에서는 지능형 가공기의 공정최적화 및 무인화에 적합한 자율예지보전과 능동제어 등을 통한 가공공정의 최적화 및 셋업공정 무인화를 위한 주요 영향인자와 관련 핵심기술을 분석하였다. 아울러 이에 관련된 핵심 요소기술의 일부 개발 사례를 소개하였다. 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 기능추가와 실용화 단계까지 많은 적용 테스트와 메커니즘 보안을 통한 보정 및 제어 성능 업그레이드가 필요할 것이다.

- (1) 주변 환경변화에 따른 기계 가공축 (X,Y,Z축) 및 외부(대기) 열변형 등이 발생함에 따라 이를 해결하기

- 위한 요소기술, 즉 가공원점 Offset값 조정을 위한 보상값 예측 및 실시간 CNC연계 자율보정 등
- (2) 재구성에 의한 기계주변 환경이 바뀌어 기계내외부 강제진동 발생함에 따라 이를 해결하는 요소기술, 즉 채터 자러진동 경우는 디지털 필터링 등을 통한 채터 진동 분석 및 CNC연계를 통하여 실시간 자율보정과 기계내외부 강제진동 경우는 별도 역진동 발생장치 등에 의한 능동 감쇄제어 등
 - (3) 가공 공정/소재/라인이 바뀌어 가공원점 오차가 발생함에 따라 이를 해결하기 위한 가공원점 자동인식 등 Vision 계측을 통한 셋업공정 무인화 요소기술

후 기

이 연구는 지식경제부의 산업원천기술과제 자율적응 생산시스템 통합 운용기술 개발과 연구재단 기본 모험연구의 일환으로 완성되었으며 그 지원에 감사드립니다.

References

- (1) Kim, D. H. and Song, J. Y., 2006, "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.
- (2) Kim, D. H. and Song, J. Y., 2006, "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.
- (3) Wright, P. K., 1995, "Principles of open-architecture manufacturing", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 187~202.
- (4) Yellowley, I. and Pottier, P. R., 1998, "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.
- (5) Budak, E. and Altintas, Y., 2002, "Analytical prediction of chatter stability in milling - Part 1: General formulation", *Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 120, No. 1, pp. 22~30.
- (6) Zhou, Z. D., Chen, Y. P. and Fuh, J. Y., 2000, "Integrated condition monitoring and diagnosis for modern manufacturing systems", *Annals of the CIRP*, Vol. 49, No. 1, pp. 387~390.
- (7) Rao, R. V. and Gandhi, O. P., 2002, "Failure cause analysis of machine tools using digraph and matrix methods", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 1, pp. 521~528.