

DSP를 이용한 초정밀가공기용 진직도 보상시스템 개발

이대희*, 이종호*, 김호상*, 민흥기*(고등기술연구원), 김민기**, 김태형**(쑤대우종합기계**)

Development of the Straightness Compensation System for Ultra-Precision Machine Using DSP

Dae-Hee Lee*, Jong-Ho Lee*, Ho-Sang Kim*, Heung-Gi Min*, Min Gi Kim**, Tae Hyoung Kim**

ABSTRACT

This paper presents the straightness compensation system which is a device for improving the machining accuracy of ultra-precision machines by synchronizing the position of diamond tool tip with machine error motion. Since it is actuated by piezoelectric actuator with highly nonlinear hysteresis characteristics, the feedback control schemes such as Proportional Integral(PI), are required and realized by measuring the displacements of diamond tool tip. For the better tracking performance, the controller was implemented using TMS320C32 32bit floating-point DSP which is fast so that the real-time control is possible. In addition, stand alone type DSP board was chosen for the easy assembly into the ultra-precision machines. The experimental results show good command tracking performance and the motion error of the machine is satisfactorily compensated during the machining process

Key Words : TMS320C32 DSP, Straightness(진직도), Ultra-precision machine(초정밀 가공기), Fast tool servo (미세구동 공구대), Piezoelectric actuator (압전액츄에이터)

1. 서론

최근 첨단산업이 보편화 되면서 다양한 분야에서 초정밀가공 제품에 대한 수요가 급증하고 있다. 이로 인해 고정밀도 제품을 만들기 위한 여러 가지 방법들이 제시되고 있으며, 제안된 방법 중에 천연 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 선삭가공이 기존의 전통적인 연삭, 래핑, 폴리싱을 대신한 새로운 가공법으로 주목을 받고 있다. 그러나 이러한 초정밀 가공기는 기계자체의 한계성으로 인해서 가공 중에 발생하는 스핀들의 회전오차와 열팽창, 이송계의 운동오차, 공작물의 열변형 등을 실시간으로 보상하기가 어렵다. 따라서 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 스핀들이나 이송계의 운동정밀도를 정밀하게 측정하고 고분해능, 고응답성 및 고강성을 갖는 압전액츄에이터를 이용한 미세구동 공구대(Fast Tool Servo:이하

FTS)로 운동오차를 실시간 보상하는 방법이 제시되었다. 하지만 제안된 FTS로 가공 중에 발생하는 운동오차를 실시간으로 보상하는 시스템을 구현하기에는 다음과 같은 이유로 인해서 어려움이 있다.

먼저 압전액츄에이터는 상당한 비선형성을 가지고 있으므로 정밀위치제어를 하기 위해서는 반드시 피드백 제어 알고리즘을 요구한다. 하지만 이러한 시스템에 적용된 제어 알고리즘을 통해서 제어입력을 구하는 데는 과중한 계산량을 요구하며 결과적으로 지연시간으로 인한 실시간 오차보상에 어려움이 따른다. 또한 기존의 제어시스템은 PC를 기반으로 FTS의 위치를 제어하도록 구성되어 있어서 실제 산업현장에 놓인 초정밀 가공기에 적용하는데 공간상의 문제와 아울러 비효율적이다.

따라서, 본 논문에서는 부동소수점 연산이

가능한 DSP와 내장된 고속의 AD/DA변환기를 가진 스탠드 얼론 타입의 DSP Board를 사용함으로써 PC상에서 구현되는 것보다 상당히 빠른 사이클 타임을 갖으며 기존 시스템과 비교해 매우 콤팩트화된 제어시스템을 구현하였다. 실제 가공실험에서 개발된 오차보상시스템은 만족할 만한 오차수준으로 스핀들 이송계의 진직도 오차를 보상하고 있음을 확인할 수 있었다.

2. FTS제어시스템

2.1 제어기 하드웨어

본 시스템의 하드웨어는 크게 제어연산을 담당하는 중앙처리부(CPU)와 제어연산에 필요한 정보를 받아들이고 연산결과를 플랜트에 인가하는 입출력부로 나뉘며, 이를 Fig. 1에 나타내었다.

CPU부분

메인프로세서

- 32 bit 부동소수점연산 DSP (TMS320C32)
- 클럭주파수 : 60MHz

메모리

- 2개의 256 32bit 내부RAM블록
- 16M 32bit의 외부확장 메모리영역(24bit add.)

I/O 부분

- A/D : 4채널, 16bit, 100kHz(max)
- D/A : 4채널, 16bit, 200kHz(max)

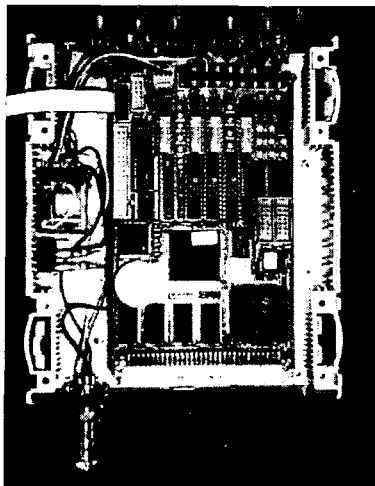


Fig. 1 DSP Controller Board

2.2 제어기 소프트웨어

제어기의 전체 동작흐름은 다음과 같다. 먼저 다양한 파라미터를 초기화한 후 메인 루틴에서는 인터럽트처리를 위한 초기화 및 타이머를 설정하고 무한 루프안에서 정해진 샘플링 시간에 따라서 인터럽트 처리 루틴을 호출한다. 인터럽트처리 루틴에서는 A/D채널을 통해서 이송계의 진직도 및 FTS의 공구위치를 측정하고 적용된 제어로직을 거친 후 최종적으로 D/A를 통해서 압전액추에이터에 전압을 인가한다.

2.3 진직도 오차보상용 레이저 센서

스핀들의 이송계 진직도 오차보상을 위해 사용된 레이저 센서는 아날로그 출력 $\pm 10V$ 가 나으며 디지털 값은 RS232C인터페이스를 통해 얻을 수 있다. 이 센서의 최대측정범위는 $\pm 0.2mm$ 이며 resolution과 응답주파수는 각각 $0.01\mu m$, 20kHz이다.

2.4 제어기 설계 및 실험

비선형특성이 강한 FTS시스템의 추종성을 개선하기 위해서 Fig. 2와 같은 폐루프 제어시스템을 구성하였다.

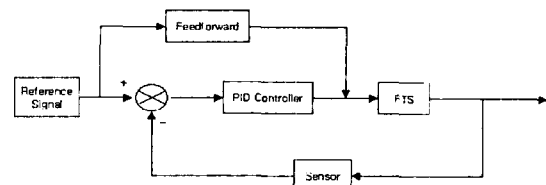


Fig. 2 Block Diagram of FTS Control Algorithm

FTS 제어 알고리즘은 일차적으로 PI제어 알고리즘으로 구성하였다. 이때 적용된 게인은 $K_p=0.01$, $K_i=17,500$ 이고, 이후 동일한 PI제어기에 레퍼런스 추종성을 개선하고자 Feed forward 게인을 추가하였다.

제어성능 실험은 FTS의 추종성을 알아보기 위해 압전액추에이터에 주기 100Hz($6\mu m$ 이상)의 정현파 입력을 주고 FTS가 이 신호를 추종하도록 하였다. 본 실험에는 FTS의 변위를 측정하기 위해서 정전용량형(Capacitive) 센서를 사용하였다. 여기서 제어기의 작동주기는 20kHz로 설정하였다. Fig. 3은 개루프 실험 결과를 나타낸다

기준입력(100Hz, 6 μm 이상)에 대하여 개루프 실험에서 약 3.0 μm 의 peak-to-peak(이하p-p)오차가 발생하였다.

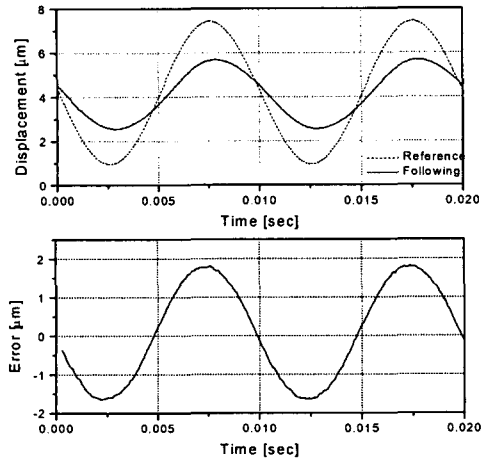


Fig. 3 Results of Open Loop Experiment

Fig. 4는 동일한 기준신호에 대해서 PI제어 기법을 적용한 폐루프 제어실험의 결과를 나타낸다. 개루프 실험보다 오차가 1.0 μm 로 감소되었음을 알 수 있다. 하지만 위상지연으로 인해서 아직도 오차수준을 넘어섬을 알 수 있다.

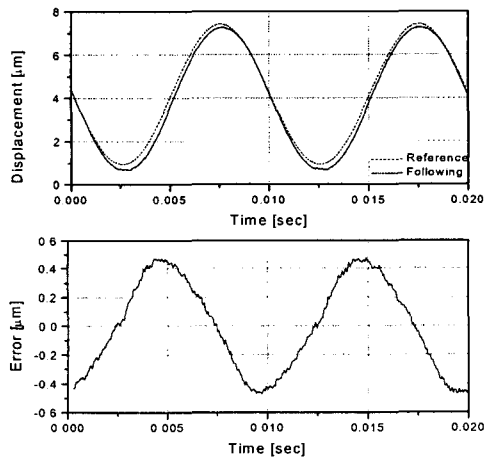


Fig. 4 Results of PI-Closed Loop Experiment

마지막으로 추종오차를 개선하고자 Feed forward 계인을 추가한 결과, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 p-p오차가 0.24 μm 로 감소하였다.

이는 추가된 제어 항이 비례-적분 제어기의 추종량을 적게 하고 결과적으로 위상지연이 감소되는 효과를 주어서 오차수준이 감소되는 것으로 생각된다.

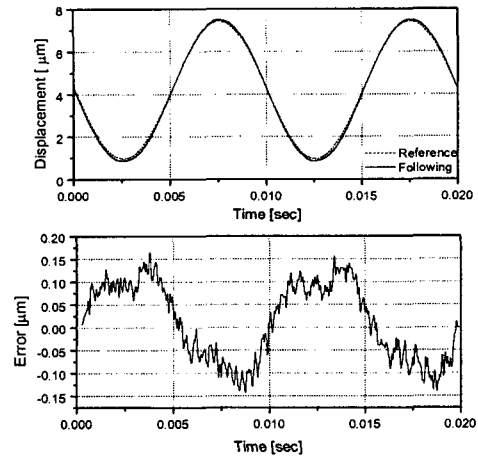


Fig. 5 Results of PI-feedforward Closed Loop Experiment

3. 스트레이트 에지를 이용한 오차보상

3.1 오차보상시스템 구성도

아래의 그림은 초정밀가공기용 스핀들 이송계 진직도 오차보상 시스템을 Fig. 6에 간략하게 표현하였다.

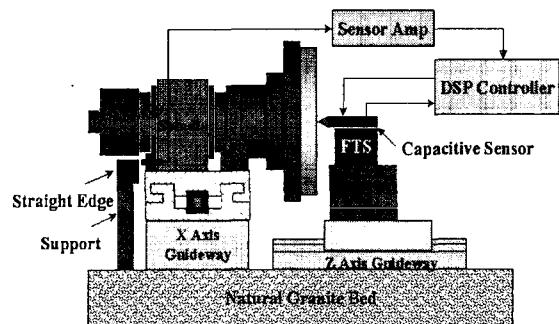


Fig. 6 FTS System Configuration with x-axis Straightness Compensation

개발 적용된 진직도 오차보상 시스템은 스핀들 x-축 가이드웨이의 진직도오차를 FTS로

In-Process 보정하기 위하여 300mm급 Straight Edge를 설치하였으며, 진직도 오차는 분해능 10nm의 레이저 변위센서를 사용하여 측정하였다. 이 때 레이저 센서로부터 나오는 신호에는 높은 주파수를 갖는 노이즈 및 외란 성분이 중첩되어 나타난다. 따라서 순수한 x-축 슬라이드의 진직도오차 성분만을 얻기 위하여 저주파통과필터 등을 사용하여 저주파 대역의 성분만을 FTS의 기준입력으로 인가하여 보상하였다. Fig. 7은 스피들 이송축의 풀 스트로크에 대한 진직도를 측정한 결과이다. 실제로 그림에서 보여준 x-축의 진직도 오차만큼 FTS로 보상하여 가공 평면도를 개선하였다.

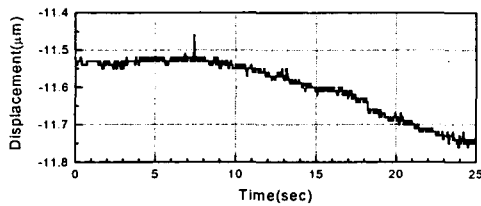


Fig. 7 Straightness Error of Spindle x-axis

3.2 가공실험

개발된 초정밀가공기용 진직도 오차보상 시스템의 가공정밀도 성능을 알아보기 위해서 ㉞대우중합기계의 Nanoturn 60을 이용하여 직경 50mm의 Cu를 가공 실험하였다. FTS를 사용하지 않은 일반 공구와 제어를 하지 않은 FTS가공, 마지막으로 진직도 오차보상 제어를 한 FTS가공에 대한 3가지 시편을 같은 조건에서 비교 분석한 결과 조도에서 오차보상을 한 가공시편이 좀 더 좋은 조도형상을 보였으나, 가공시편을 고정하는 3점 지지방법으로 인해 형상도에 대한 제어효과를 확인 할 수는 없었다. 이후 계속되는 가공방법에 진공척 등을 사용함으로써 형상도 측정에 있어 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 예상된다.

4. 결론

본 논문에서는 스탠드 얼론 타입의 DSP controller board를 사용함으로써 PC상에서 구현되는 것보다 좀더 빠른 사이클 타입을 갖고 또한 기존에 비해 매우 콤팩트화된 초정밀가공기용 진직도 오차 보상시스템을 구현하였다.

제안된 오차보상 시스템은 0.24 μ m 이하의 오차수준을 가지고 정현파를 추종함으로써 만족할 만한 위치정밀도를 얻었다. 또한 실제 가공 실험에 적용한 결과 x-축 슬라이드의 진직도 오차를 실시간으로 잘 보상해 주고 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Jung, S.B. and Kim, S.W., "Improvement of Scanning Accuracy of PZT Piezoelectric Actuators by Feed-Forward Model Reference control," Precision Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 49-55, 1994.
2. P. Ge, M. Jouaneh, "Tracking Control of Piezoceramic Actuator," IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol. 4, No. 3, pp.209-216, May, 1996.
3. 송재욱, 김승한, 송하성, 김호상, "압전 구동기를 이용한 미소절삭 공구대의 정밀위치제어" 한국 정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp. 50-57, 1997.