

Adaptive feedforward cancellation 기법을 이용한 Long stroke fast tool servo의 정밀제어

Feedback control of long stroke fast tool servo using adaptive feedforward cancellation method

***김호상, 이광일, 김상인, 이경돈

**H. S. Kim(hoskim@iae.re.kr), K. I. Lee, S. I. Kim, K. D. Lee
고등기술연구원 로봇/생산기술센터

Key words : Long stroke fast tool servo, Adaptive feedforward cancellation, diamond turning machine

1. 서론

FTS(Fast Tool Servo)는 초정밀가공기의 부가축으로 장착되어 공구의 절입을 빠른 속도로 제어하는 장치로서 많은 연구자들에 의해 최대 수십 μm 급의 FTS가 소개된 바 있다¹. 그러나 기존의 FTS의 스트로크의 제약을 개선하고 실제 렌즈나 미러의 형상에 대응하기 위해 LFTS(Long Stroke Fast Tool Servo)에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다². 초정밀가공기를 위한 LFTS는 가공시 공구의 최종 위치를 결정하는 요소로써 LFTS의 추종오차가 최종적으로 가공된 workpiece에 그대로 전사되는 특징을 나타낸다. 따라서 초정밀 가공기에 장착되는 LFTS의 추종오차의 크기는 전체 가공품질에 지대한 영향을 미치게 된다.

일반적으로 LFTS의 구동을 위해 압전액츄에이터와 힌 지구조가 채용되고 있으며 피드백 제어를 위해 PID-제어기가 널리 사용되고 있으나 압전액츄에이터가 갖는 비선형 히스테리시스 특성에 의하여 명령값과는 왜곡된 출력 변화가 발생하는 문제가 나타난다. 이러한 비선형성에 의한 왜곡정도는 사용된 액츄에이터의 종류에 따라 달라지지만 일반적으로 입력 정현파 진폭의 약 5~10%를 차지하며 이는 초정밀 가공의 최종적인 형상정밀도를 저해하는 문제점이다. 따라서 이와 관련하여 LFTS의 비선형성을 극복할 수 있는 알고리즘의 개발 및 적용이 필수적이다. 이를 위하여 LFTS의 피드백 제어 알고리즘으로서 AFC(Adaptive Feedforward Controller) 방법을 선정하였다³. 그리고 실제 초정밀가공기에서의 구현을 위해 Turbo-PMAC2의 User-written servo 알고리즘을 사용하여 관련 알고리즘의 구현과 이를 실제 가공시험에 적용하여 가공정밀도를 확인하였다.

2. AFC를 이용한 LFTS의 피드백 제어

2.1 LFTS의 개요

Fig. 1에 최대 100 μm 의 이송영역을 갖는 압전액츄에이터와 변위확대기구를 사용하여 약 432 μm 의 이송영역을 구현한 LFTS의 개략도를 나타냈다².

2.2 AFC 방법 소개

AFC를 사용한 비선형 제어 알고리즘의 block-diagram은 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 여기서 AFC의 전달함수는 Eqn. 1에 나타낸 바와 같이 2차 전달함수 구조를 가진다.

$$C_{AFC}(s) = g_i \left[\frac{s \cos \phi_i + \omega_i \sin \phi_i}{s^2 + \omega_i^2} \right] \quad (1)$$

여기서 g_i 는 i 번째 AFC의 이득치를 나타내며 ϕ_i 는 위상 처짐, 그리고 ω_i 는 추종 주파수를 나타낸다. 이러한

전달함수의 특성을 파악하기 위하여 10개의 AFC에 대한 보드선도를 Fig. 3에 나타내었다. LFTS의 비선형성에 의하여 발생하는 오차 성분은 여러 주파수의 조합으로 나타낼 수 있으며, 이러한 오차 성분에서 가장 많은 영향을 차지하는 주파수들을 제거하는 경우 전체 추종오차는 최소화할 수 있다는 것이 다수의 AFC를 사용한 비선형 제어의 기본 방안이다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 AFC는 특정 주파수에 대하여 무한한 게인(gain)을 나타내며 비선형성에 의하여 발생하는 위상 지연을 보상하는 특성을 나타낸다.

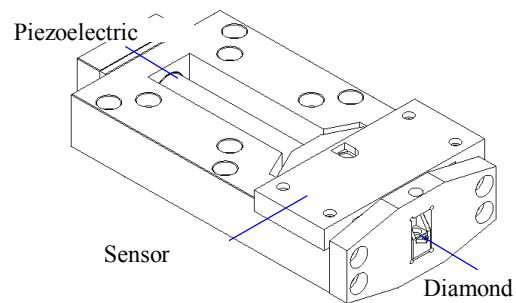


Fig. 1 LFTS for free-form surface generation

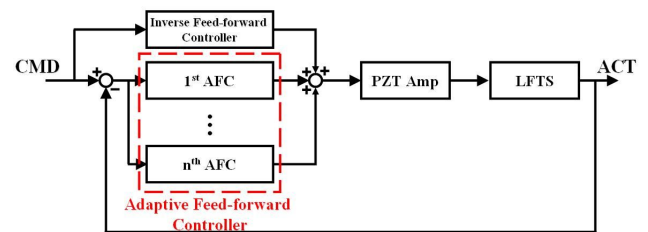


Fig. 2 AFC block diagram for LFTS

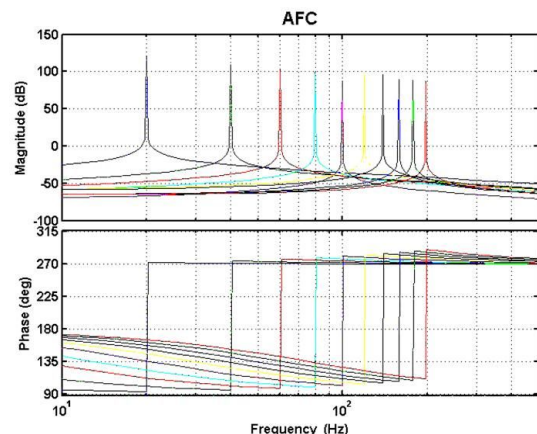


Fig. 3 Bode-plot of ten AFCs

AFC-block의 개수 및 구성 변수는 실제 LFTS 제어시

발생하는 오차의 주파수 특성에 의하여 실험적으로 정의하여야 한다. 또한 inverse feed-forward controller의 경우 LFTS의 2차 모델링 및 역함수 정의에서의 극점(pole)의 개수를 구성하기 위하여 2차 전달함수를 추가함으로써 Eqn. 2와 같이 최종 4차의 전달함수를 결정하였다.

여기서 ω_n 은 LFTS의 공진주파수, ζ_n 은 LFTS의 damping 계수, τ 는 시정수(time constant)를 나타내며 ω_c 는 노치필터의 공진주파수, ζ_c 는 노치필터의 damping 계수를 의미한다.

$$C_{IFC}(s) = \frac{\omega_c^2(\tau s + 1)}{s^2 + 2\zeta_c\omega_c s + \omega_c^2} \times \frac{\omega_c^2(s^2 + 2\zeta_n\omega_n s + \omega_n^2)}{\omega_n^2(s^2 + 2\zeta_c\omega_c s + \omega_c^2)} \quad (2)$$

3. AFC를 이용한 LFTS 기반의 평면가공 실험

제안된 AFC의 타당성과 초정밀 가공기로의 적용성을 확인하기 위하여 AFC의 튜닝 및 가공 실험을 진행하였다. 먼저, AFC의 튜닝을 위해 Turbo-PMAC2 기반의 User servo 알고리즘을 작성하였으며 Inverse feed-forward controller, 5개의 AFC 그리고 1차 베셀(Bessel) 필터와 저대역 통과 필터를 구성하였다. 또한 샘플링 시간은 약 3.3 msec로 결정하였으며 진폭 50 μm , 주파수 20 Hz의 정현파에 대한 추종 성능을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)와 (b)와 같이 정상 상태에서의 추종오차는 정전용량형 센서의 전기적 노이즈 수준과 유사한 약 40 nm를 나타내며 이는 진폭대비 0.08%의 추종오차를 나타낸다.

둘째로, LFTS와 초정밀 가공기를 사용하여 초정밀 평면 가공 실험을 진행하였다. 사용한 가공시편은 직경 50 mm의 무산소동이며 가공조건은 이송속도 8.3 $\mu\text{m}/\text{rev}$, 황삭 절입깊이 5 μm , 정삭 절입깊이 2 μm , 스핀들 회전수 600 rpm이며 공구반경 0.5R의 다이아몬드 공구를 사용하였다. 가공된 시편은 Fig. 5에 나타내었으며 접촉식 조도 측정기인 Form Talysurf Series2와 비접촉식 형상측정기인 Fizeau Optical Interferometer(WYKO RTI 4100)를 사용하여 시편의 조도와 표면 형상을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타냈다. 가공된 평면은 37.5 mm의 측정 영역에 대하여 12 nm의 조도와 직경 50 mm에 대하여 PV 0.268 μm 의 형상오차를 나타낸다.

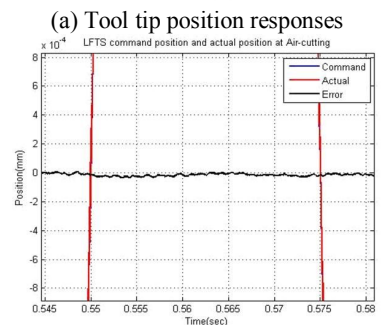
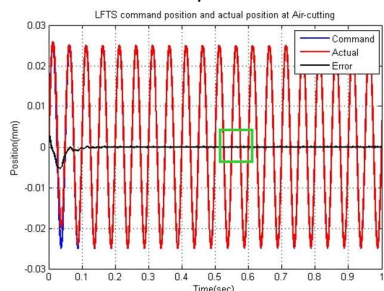


Fig. 4 Tracking result for sinusoidal wave (amplitude 50 μm , frequency 20 Hz)



Fig. 5 Photograph of diamond turned surface using proposed AFCs

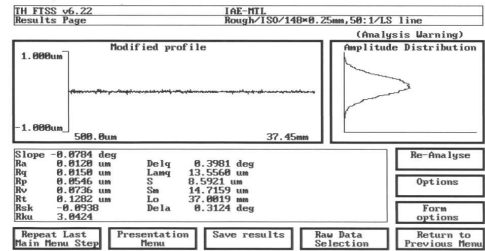


Fig. 6 Surface roughness result

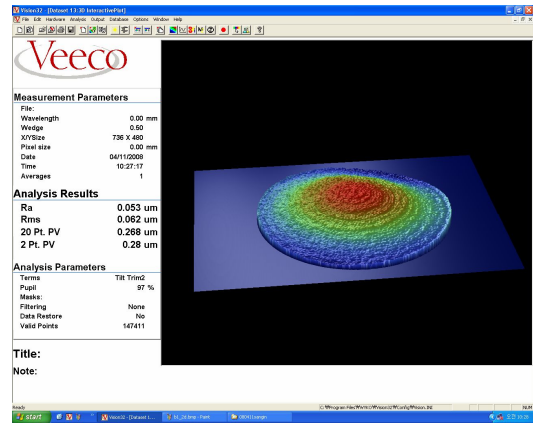


Fig. 7 Form accuracy of machined surface

4. 결론

본 연구에서는 LFTS의 정밀제어를 위해 AFC 방법을 적용하고 이를 이용하여 기초적인 초정밀 가공실험을 수행하였다. 추종실험 결과 진폭 50 μm , 주파수 20 Hz의 정현파에 대해 정상 상태에서 약 40 nm (진폭대비 0.08%)의 추종오차를 달성했다. 또한 제안된 알고리즘의 실제 가공기에서의 효율성을 확인하기 위해 가공시편을 수행한 결과 표면조도 12 nm, 형상오차 0.268 μm 의 가공결과를 얻었다.

참고문헌

1. Kim, H. S., Kim, E. J. and Song, B. S., "Diamond Turning of Large Off-axis Aspheric Mirrors using a Fast Tool Servo with on-Machine Measurement," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, No. 3, pp. 349-355, 2004.
2. Kim, H. S., Kim, S. I., Lee, K. I., Lee, K. M. and Bang, Y. B., "Development of long stroke fast tool servo for diamond turning machine with its range of 432 μm ," Proc. of KSPE Spring conference, pp. 497-498, 2008.
3. Byl, M. F., Ludwick, S. J. and Trumper, D. L., "A loop shaping perspective for tuning controllers with adaptive feedforward cancellation," Precision Engineering, Vol.29, No.1, pp. 27-40, 2005.