

초정밀 자유곡면 가공을 위한 long stroke fast tool servo 의 이력현상 모델링

Hysteresis modeling of long stroke fast tool servo for ultra precision free-form surface generation

**이광일, 김상인, 김호상, 이경돈

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

Key words : Ultra precision free-form surface, Long stroke fast tool servo, Hysteresis modeling

1. 서론

T 자 형태의 다이아몬드 터닝 머신은 공구를 이송하는 스테이지의 느린 응답 특성에 의해 비 회전대칭 형상의 초정밀 자유곡면 가공에 문제점을 나타내며, 이를 극복하기 위한 하나의 방안으로서 공구의 고속 이송을 진행하는 공구대 (fast tool servo; FTS)가 사용된다.¹ 일반적으로 FTS 에는 높은 강성과 빠른 응답특성을 위해 압전 구동기 (piezoelectric actuator)가 적용되지만, 압전 구동기의 제한된 이송영역과 이력현상 (hysteresis)에 의하여 초정밀 위치결정에 문제점을 나타낸다.² 이러한 압전 구동기의 문제점은 탄성 힌지를 사용한 변위 확대 기구와 이력현상 모델링에 의하여 각각 해결 가능하다. 변위 확대 기구를 적용한 장행정 공구대 (long stroke FTS; LFTS)는 고등기술연구원에서 개발하였으며, 압전 구동기의 이력현상 모델링은 Preisach model, 수정된 PI (modified Prandtl-Ishlinskii; MPI) 연산자를 사용하여 연구되고 있다.^{3,4}

본 논문에서는 고등기술연구원에서 개발한 장행정 공구대 (long-stroke FTS; LFTS)를 대상으로 MPI 연산자를 적용하여 이력현상을 모델링하고 역이력 모델을 결정한다.

2. MPI 연산자

2.1 LFTS 의 개요

상용화된 압전 구동기는 최대 100 μm 의 이송영역을 나타내며, 이를 사용하여 고등기술연구원에서 개발한 변위 확대 기구 기반의 LFTS 는 약 432 μm 의 이송영역을 가지고 Fig. 1 에 나타낸 바와 같다.

2.2 MPI 연산자

MPI 연산자는 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 가중치 (weight)와 문턱치 (threshold)가 주어진 백래시 연산자 (backlash operator)의 중첩을 통하여 압전 구동기의 이력현상을 모델링하며 Eq. 1 과 같이 주어진다.

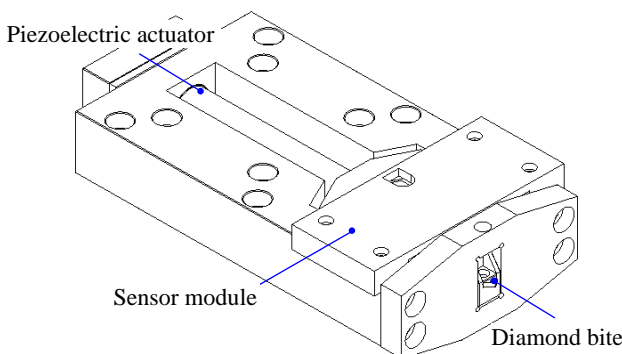


Fig. 1 LFTS with 432 μm for free-form surface generation

$$y(t) = \sum_{i=0}^n w^i \max \left[x(t) - r^i, \min \left\{ x(t) + \eta^i r^i, y(t-T) \right\} \right] \quad (1)$$

여기서 w^i, η^i 는 백래시 연산자의 가중치,
 r^i 는 문턱치 값,
 $x(t)$ 는 백래시 입력,
 $y(t)$ 는 백래시 출력을 나타낸다.

MPI 연산자의 장점은 역이력 모델의 형태도 이력모델과 동일한 구조를 가지는 것이며, Eq. 2 에 주어진 바와 같이 분석적으로 정의된다.

$$z(t) = \sum_{i=0}^n w^i \max \left[y(t) - r^i, \min \left\{ y(t) + \eta^i r^i, z(t-T) \right\} \right]$$

$$w^0 = \frac{1}{w^0}, \quad w^i = \frac{-w^i}{\left(\sum_{j=0}^i w^j \right) \left(\sum_{j=0}^{i-1} w^j \right)}, \quad i = 1, \dots, n$$

$$r^i = \sum_{j=0}^i w^j (r^i - r^j),$$

$$z_0^i = \sum_{j=0}^i w^j y_0^i + \sum_{j=i+1}^n w_j y_0^j, \quad i = 0, \dots, n$$

(2)

여기서 w^i, η^i 는 백래시 연산자의 가중치,
 r^i 는 문턱치 값,
 $z(t)$ 는 역이력 모델의 출력을 나타낸다.

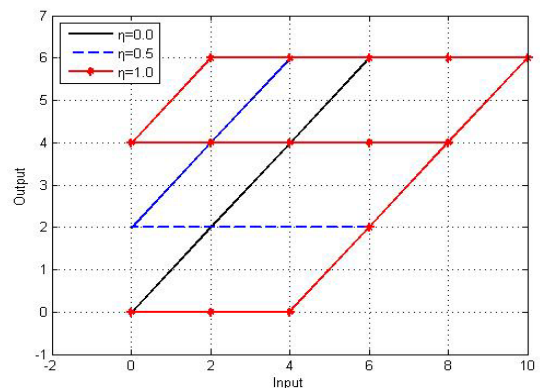


Fig. 2 Backlash operators to model hysteresis ($w = 1, r = 4$)

Table 1 Hysteresis model parameters of LFTS

i	w^i	η^i	r^i	i	w^i	η^i	r^i
0	0.0069	0.2000	0.00	10	0.0004	0.1740	4.51
1	0.0032	0.0395	0.45	11	0.0006	0.2204	4.96
2	0.0010	0.3140	0.90	12	0.0002	0.1639	5.41
3	0.0009	0.2108	1.35	13	0.0005	0.2265	5.86
4	0.0009	0.2430	1.80	14	0.0002	0.1362	6.31
5	0.0005	0.1986	2.25	15	0.0014	0.2216	6.76
6	0.0007	0.1875	2.70	16	-0.0016	0.1875	7.21
7	0.0005	0.2106	3.15	17	0.0010	0.2000	7.66
8	0.0006	0.1887	3.60	18	-0.0013	0.2000	8.11
9	0.0004	0.2312	4.06	19	0.0042	0.2000	8.56

Table 2 Inverse hysteresis model parameters of LFTS

i	w''^i	r''^i	i	w''^i	r''^i
0	144.3506	0.00	10	-1.7283	185.23
1	-45.2108	10.23	11	-2.1571	208.81
2	-8.5935	25.12	12	-0.8485	233.23
3	-7.1465	41.43	13	-1.5750	258.00
4	-5.5226	59.14	14	-0.6980	283.44
5	-2.7645	78.10	15	-4.1213	309.19
6	-3.8183	97.76	16	4.9739	336.94
7	-2.4540	118.47	17	-3.0789	362.31
8	-2.7942	139.92	18	4.1857	389.10
9	-1.6939	162.28	19	-11.9017	414.00

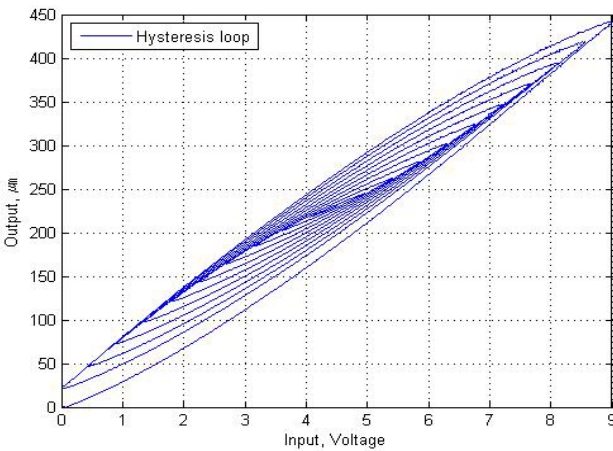


Fig. 3 Hysteresis of LFTS

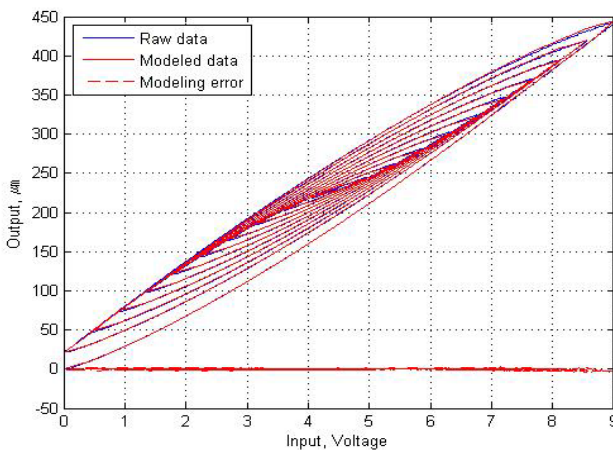


Fig. 4 Identification of LFTS hysteresis

3. LFTS 의 이력현상 모델링

3.1 LFTS 의 이력현상

LFTS 에 0V~9V 의 전압영역에서 삼각형 입력을 인가하였으며 Fig. 3 과 같이 이력현상을 실험적으로 나타내었다. 이러한 경우 이력현상에 의하여 발생하는 오차는 최대 37 μm 을 나타내고 있다.

3.2 이력현상 모델링

최소 자승법을 사용하여 LFTS 이력현상의 관련 변수를 결정하였으며, 정의된 모델은 Fig. 4 와 Table 1 에 나타내었다. 모델링 오차는 최대 3.97 μm 이다. 또한 역이력 모델은 Table 2 와 같이 결정된다.

4. 결론

본 논문에서는 압전 구동기 기반의 장행정 공구대의 이력현상과 역이력 모델을 정의하였다. 수정된 Prandtl-Ishlinskii 연산자를 사용하여 이력현상을 모델링 하였으며 최소 자승의 최적화 기법을 사용하여 모델 변수를 결정하였다. 압전 구동기의 이력에 의하여 최대 37 μm 의 오차가 고찰되었으나, 이력현상 모델링의 결과 최대 3.97 μm 의 오차가 발생하여 약 89% 의 오차가 감소함을 나타내었다.

후기

본 연구는 지식경제부의 지역중점기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참고문헌

1. H. S. Kim, E. J. Kim, B. S. Song, "Diamond Turning of Large Off-axis Aspheric Mirrors using a Fast Tool Servo with on-Machine Measurement," J. Materials Proc. Tech., 146, 349-355, 2004.
2. 김형석, 이수희, 이병룡, 안경과, "히스테리시스 앞먹임과 신경회로망을 이용한 압전 구동기의 정밀 위치제어," 한국정밀공학회지, 22 권, 7 호, 94-101, 2005.
3. G. Ping, J. Musa, "Generalized Preisach Model for Hysteresis Nonlinearity of Piezoceramic Actuators," Precision Engineering, vol. 20, pp 99-111, 1997.
4. S. Bashash, N. Jalili, "Robust Multiple Frequency Trajectory Tracking Control of Piezoelectrically Driven Micro/Nano positioning systems," IEEE Trans. Cont. Sys. Tech., vol. 15, no. 5, 867-878, 2007.