

슬라이딩 모드 제어기법(SMC)을 이용한
마이크로 액추에이터 (Micro Actuator)의 능동 제어기 설계

지태영*, 오용설*, 조병선*, 허 훈*
*고려대학교 제어계측공학과 대학원

The Design of Active Controller using SMC:
An application to a Micro Actuator in MEMS

Tae Young Jee*, Yong Sul Oh*, Byung Sun Cho*, Hoon Heo*
*Department of Control & Instrumentation Engineering, Korea Univ.

Abstract - Variable Structure Controller with effective tracking performance is propose to control micro actuator system. Proposed VSC(Variable Structure Control) technique is implemented to tracking control of comb driving system having high non-linearity. The tracking performance due to VSC technique is compared to conventional PD(Proportional Derivative) control technique, reveals improved results .

성을 발생하는 비선형 제어 시스템 구조로서, 상태궤적이 스위칭 평면 근방을 추종 할 수 있도록 제어기의 구조를 변화시키는 제어방식이다.[5]-[7]

다음과 같이 불확실성을 갖는 선형 시변 시스템을 고려해보자.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + Bu(t) \quad \text{식(1)}$$

1. 서 론

식(1)의 형태로 표현되는 시스템 중 다음과 같은 canonical form 으로 나타내어지는 2 차 시스템을 고려해 본다.

MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) 기술과 미소전자공학 기술의 진보는 초소형 PDA와 컴퓨터 같은 소형 전자기기와 마이크로 로봇 같은 이동형 기계의 개발을 가능하게 했으며, 이 중 마이크로 액추에이터는 마이크로시스템에 있어서 매우 중요하고 다양한 기화들을 제공하고 있다.[1] 특히 마이크로 액추에이터를 이용한 고밀도 디스크 드라이브의 read/write head 구조는 대표적인 응용 분야이다.[2] 이러한 마이크로 액추에이터에 있어서 전기적 탄성 계수(Electrostatic Spring Effect)의 영향은 효율적인 동적 시스템 설계 및 운용하고 해석하는데 있어서 중요한 문제로 대두된다.[3]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2(t) & -a_1(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

식(2)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\ddot{x}(t) + a_1(t)\dot{x}(t) + a_2(t)x(t) = u(t) \quad \text{식(3)}$$

효과적으로 마이크로 액추에이터 시스템을 제어하기 위하여 다양한 방법들이 연구되고 제안되어져 왔다. 그 중에서 PD제어방법을 이용한 연구결과는 주목 할만하다.[4] 하지만 이러한 제어방법은 마이크로 액추에이터 시스템에서 특징적인, 전기적 힘(Electro force)에 의해 나타나는 비선형적 탄성효과(effective stiffness)를 충분히 고려하지 못하는 단점이 있다.

일반적으로 슬라이딩 평면을 다음과 같이 정의한다.

$$s(t) = C^T x(t) \quad \text{식(4)}$$

따라서, 본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하여 이러한 특징적 탄성효과를 고려한 능동 제어기 설계방법을 제안하고자 한다.

여기서, $C^T = (c \ 1)^T \in R^2$ 는 $C^T B$ 가 nonsingular 하고, 슬라이딩 모드, 즉 $s(t) \equiv 0$ 에서 나타나게 되는 슬라이딩 동특성이 전역적(global) 하고 점근적(asymptotical)으로 안정하도록 설계한다. 식(4)의 경우에는 $c > 0$ 으로 놓으면, $s(t) = \dot{x}(t) + cx(t)$ 이 되므로, 슬라이딩 모드, $s(t) \equiv 0$, 에서의 동특성은 안정하게 된다.

가변 구조 시스템(VSS)이란 비선형 제어의 특수한 형태로 시스템 상태가 스위칭 평면에 도달할 때 까지 구조를 변화시키는 불연속 제어 작용을 의미한다. 따라서 불규칙적이고 외란 특성을 갖는 동역학적 비선형 시스템은 스위칭 평면을 구성하는 수식과 파라미터에 따라 크게 좌우되는 강인성을 갖는다.[5]-[7] 본 논문에서는 비선형성을 고려한 동역학적 해석을 통해 시스템 방정식을 구한 후, 최적의 슬라이딩 평면을 최적이론에 근거하여 설계하고 가변구조 제어 이론을 바탕으로 마이크로 액추에이터에 사용되는 능동 제어기를 설계하고자 한다. 이으로 기존의 PD 제어기와 추적 오차 성능을 비교함으로써 제안된 제어기의 타당성을 검증하고자 한다.[8]

식(4)에서 제안한 슬라이딩 함수는 다음과 같이 다시 쓸수 있다.

$$s(t) = cx_1(t) + x_2(t) \quad \text{식(6)}$$

따라서 이를 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

2. 본 론

2.1 VSCS

가변 구조 제어 시스템(Variable structure control system)은 설정된 스위칭 평면을 중심으로 스위칭 특

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= c\dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) \\ &= c\dot{x}_1(t) - a_1x_2(t) - a_2x_1(t) + u(t) \end{aligned}$$

식(7)

식(3)에 주어진 제어 대상 시스템에 대하여, 식(6) 과 같은 슬라이딩 평면을 도입하여 다음과 같은 제어를 적용하면, 생성되는 제어 신호는 다음과 같다.

$$u(t) = -(c - a_1(t))x_2(t) + a_2(t)x_1(t) - \eta \operatorname{sgn}(s) \quad \text{식(5)}$$

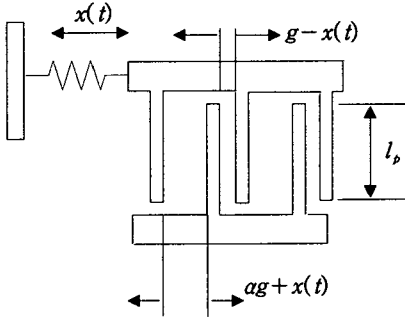
이에 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용한, 제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = u_{eq}(t) - \eta \operatorname{sgn}(s) \quad \text{식(8)}$$

여기서 $\eta > 0$

2.2 시스템 모델링

본 논문에서는 다음 그림과 같은 평행한 판 구조의 단일 자유도 (Single degree of freedom)를 갖는 마이크로 액추에이터를 가정한다. Shuttle 과 Stator 로 이루어진 액추에이터는 간단한 $m-b-k$ 시스템으로 표현된다.



$$M \ddot{x}(t) + b \dot{x}(t) + k_m x(t) = f(x, V) \quad \text{식(9)}$$

여기서, M : Actuator mass
 b : Damping coefficient
 k_m : Spring constant

마이크로 액추에이터의 stator 와 shuttle 사이에 걸리는 전압 V 에 의하여 생성되는 전기적 힘(Electro force)은 다음과 같다.

$$f(x, V) = \frac{1}{2} \frac{\partial C(x)}{\partial x} V^2 \quad \text{식(10)}$$

여기서, $C(x)$ 는 액추에이터의 변위 x 에 대한 stator 와 shuttle 사이의 캐패시턴스(Capacitance)를 의미한다.

따라서, 마이크로 액추에이터의 stator 와 shuttle 의 크기를 고려한 electrode 의 캐패시턴스는 다음과 같다.

$$C(x) = \epsilon_a h l_p \left(\frac{1}{g-x(t)} - \frac{1}{ag+x(t)} \right) \quad \text{식(11)}$$

여기서, $\epsilon_a = 8.86 \text{ pF/m}$: Permittivity of air
 g : Nominal interelectrode gap
 h : Height of electrode
 l_p : Length of electrode

식 (11)을 식 (10) 에 대입하면,

$$f(x, V) = \frac{1}{2} \epsilon_a h l_p V^2 \left[\frac{1}{(g-x(t))^2} - \frac{1}{(ag+x(t))^2} \right] \quad \text{식(12)}$$

와 같은 비선형 전기적 힘 방정식(nonlinear electrostatic force equation)을 얻는다.

여기서, 캐패시티브 갭 (Capacitive gap) g 에 의존하는 최적값 α 는 일반적으로 2 에서 3 값을 갖는다.[8]

2.3 제어기 설계

액추에이터의 stator 와 shuttle 양단에 다음과 같은 차동 전압을 인가하면,

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_0(t) + u(t) \\ V_2(t) &= V_0(t) - u(t) \end{aligned} \quad \text{식(13)}$$

여기서 $V_1(t)$, $V_2(t)$ 는 마이크로 액추에이터의 Push-Pull 구동을 위하여 인가하는 차동 전압으로 $V_0(t)$ 는 DC bias 전압을, $u(t)$ 는 제어 입력 전압을 의미한다.[4]

따라서, 입력전압에 의해서 생성되는 전체적인 전기적 인 힘 (Total Electro force)은 다음과 같다.

$$F_T(x, V_1, V_2) = F_1 + F_2 \approx k_v(V_0)u(t) + k_e(V_0)x \quad \text{식(14)}$$

여기서, $k_v(V_0)$ 와 $k_e(V_0)$ 는 비선형 전기적 힘 방정식인 식(12) 로부터 비선형 해석을 통하여 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} k_v(V_0) &= 2 \left| \frac{\partial F(x, V)}{\partial V} \right|_{(0, V_0)} = 2 \frac{\epsilon_0 A}{g^2} (1 - \alpha^{-2}) V_0 \\ k_e(V_0) &= 2 \left| \frac{\partial F(x, V)}{\partial x} \right|_{(0, V_0)} = 2 \frac{\epsilon_0 A}{g^3} (1 + \alpha^{-3}) V_0^2 \end{aligned}$$

제어 목적은 시스템의 상태 x 가 원하는 궤적 x_d 를 추적하도록 하는 제어 입력을 결정하는 것이므로, 추적 오차는 다음과 같이 정의되고,

$$e = x - x_d \quad \text{식(16)}$$

슬라이딩 평면 $s(t) \rightarrow 0$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad \text{식(17)}$$

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= \ddot{e} + \lambda \dot{e} = \ddot{x} - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e} \\ &= f(x, \dot{x}) + k_v u - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e} \end{aligned} \quad \text{식(18)}$$

따라서,

$$\begin{aligned} u_{eq} &= \frac{1}{k_v} (-f(x, \dot{x}) + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e}) \\ &= \frac{1}{k_v} \left(-\frac{b}{m} \dot{x}(t) + \frac{k_m - k_e}{m} x(t) + \ddot{x}_d - \lambda \dot{x} + \lambda \dot{x}_d \right) \end{aligned} \quad \text{식(19)}$$

이 되고 제어입력은 다음과 같이 결정한다.

$$u(t) = u_{eq}(t) - \frac{1}{k_v} \eta \text{sgn}(s) \quad \text{식(20)}$$

이때, $\dot{s} = -\eta \text{sgn}(s) \rightarrow s\dot{s} = -\eta |s| < 0$ 이므로 다음을 보장한다.

$$s \rightarrow 0 \Rightarrow e \rightarrow 0 \Rightarrow x \rightarrow x_d \quad \text{식(21)}$$

2.4 시뮬레이션 및 결과

앞에서 제안된 SMC 제어기를 이용하여 모의 실험을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 제원은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M &= 3.29 \times 10^{-8} \text{ (kg} \cdot \text{m)} \\ b &= 3.1216 \times 10^{-4} \text{ (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ k_m &= 101 \text{ (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \\ V_0 &= 40 \text{ (V)} \\ \alpha &= 2 \\ \epsilon_a &= 8.86 \text{ (pF/m)} \\ g &= 10 \times 10^{-8} \text{ (m)} \\ h &= l_p = 0.3 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\ k_v \text{ (V)} &= 2 \frac{\epsilon_0 A}{g^2} (1 - \alpha^{-2}) V \text{ (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \\ k_e \text{ (V)} &= 2 \frac{\epsilon_0 A}{g^3} (1 + \alpha^{-3}) V^2 \text{ (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \\ \lambda &= 0.3 \\ \eta &= 1 \\ x_d &= (0 - 4.8 \times 10^{-8}) \text{m } 10000 \text{ Hz square-wave} \end{aligned}$$

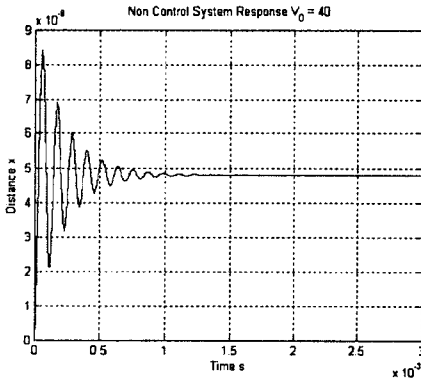


그림 1. 마이크로 액추에이터의 동특성.
입력전압 40V

그림 1.은 식(12)를 이용, 마이크로 액추에이터의 비선형적 동특성을 나타낸다. 이때의 시스템 특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Rise Time, } T_r &= 2.1 \times 10^{-5} \text{ (s)} \\ \text{Peak Time, } T_p &= 6 \times 10^{-5} \text{ (s)} \\ \text{Settling Time, } T_s &= 8 \times 10^{-4} \text{ (s)} \\ \text{Percent Overshoot, \%OS} &= 75.6 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

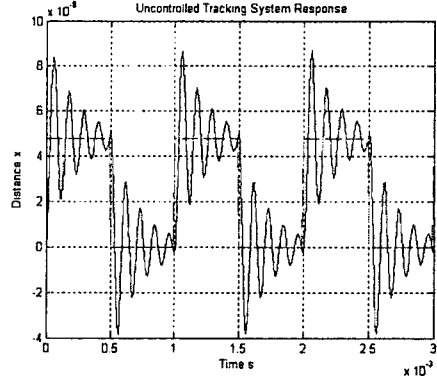


그림 2. 마이크로 액추에이터의 펄스 응답특성

그림 2.는 식(12)를 이용, 마이크로 액추에이터의 비선형적 펄스 응답특성을 나타낸다. 이때의 인가된 전압은 $V = (0 - 40) \text{V}, 1000 \text{ Hz}$ 인 사각 펄스 전압이고, 시스템 특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Rise Time, } T_r &= 2 \times 10^{-5} \text{ (s)} \\ \text{Peak Time, } T_p &= 6 \times 10^{-5} \text{ (s)} \\ \text{Percent Overshoot, \%OS} &= 73.4 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

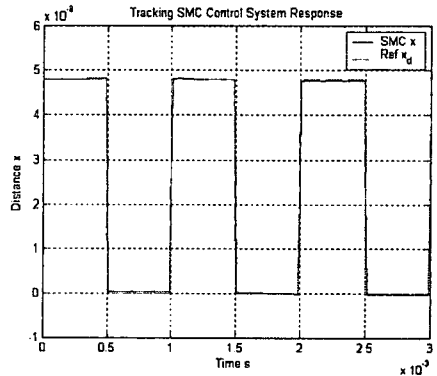


그림 3. SMC 기법으로 제어된 마이크로 액추에이터의 추종 응답

그림 3.은 SMC 기법을 사용하여 제어된 마이크로 액추에이터의 추종 응답 특성을 나타낸다. 이때의 시스템 특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Rise Time, } T_r &= 0.89 \times 10^{-5} \text{ (s)} \\ \text{Peak Time, } T_p &= 2 \times 10^{-5} \text{ (s)} \\ \text{Settling Time, } T_s &= 0.2 \times 10^{-4} \text{ (s)} \text{ 미만} \approx 0 \\ \text{Percent Overshoot, \%OS} &= 0.5 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

Settling Time, T_s 경우 거의 0 에 가까운 것을 볼수 있다. 이는 SMC 제어기법에 의하여 오버슈트 거의 발생 하지 않는 결과를 보여준다.

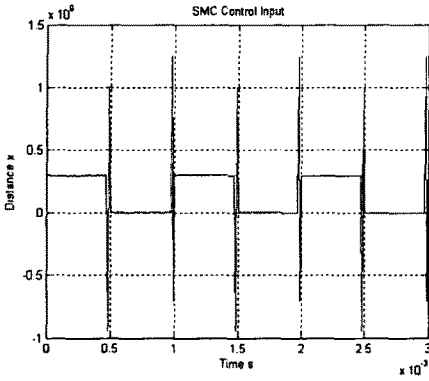


그림 4. SMC 기법에 사용된 제어입력

제어기의 성능 평가를 위하여 동일한 시스템에 대하여 PD 제어기를 적용하여 비교해 보았다.[8]

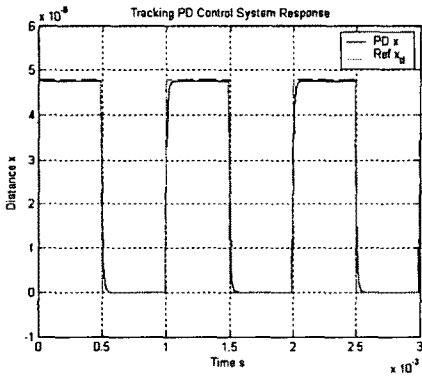


그림 5. PD 기법으로 제어된 마이크로 액추에이터의 추종 응답

$$\begin{aligned} \text{Rise Time, } T_r &= 1.26 \times 10^{-5} \text{ (s)} \\ \text{Peak Time, } T_p &= 7.8 \times 10^{-5} \text{ (s)} \\ \text{Settling Time, } T_s &= 0.42 \times 10^{-4} \text{ (s)} \end{aligned}$$

추종 응답 특성을 비교해 보면, T_r , T_p 값에서 알 수 있듯이 SMC가 PD 제어기에 비해 빠른 응답 속도를 보임을 알 수 있다. 또한 급격한 위치 변화시 안정되는 속도(T_s)도 SMC 가 더 빠름을 알 수 있다. PD 제어기의 경우 오버슈트는 발생하지 않지만, 정상상태 오차 (steady state error)가 발생함을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 마이크로 액추에이터 stator 와 shuttle 에 걸리는 전압에 의하여 비선형 응답 특성을 보이는

MEMS 시스템에 대하여 SMC를 이용한 능동 제어를 제안하였다. 모의 실험을 통하여 제안된 제어기는 기존의 PD 제어기에 비하여 괄목할만한 결과를 보임을 검증하였다.

본 실험에서는 마이크로 액추에이터를 SISO 시스템으로 가정하였는데, 왜란 또는 일정치 않은 DC 바이어스 전압에 대하여 시스템은 MISO 시스템으로 변화한다. 이러한 경우 시스템의 동특성은 보다 복잡한 비선형성을 띄게 된다. 따라서 SMC 기법을 이용할 경우 이러한 시스템 변화에 보다 능동적으로 대처 가능할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박효덕, 박준식, 박철완, "MEMS의 최근 기술 동향 (추진/구동분야)", 대한전기학회지, 12 v.49, pp.22-27, 2000
- [2] Sanjay K. Aggarwal, David A. Horsley, Roberto Horowitz, Albert P. Pisano, "Micro-actuators for High Density Disk Drives", American Control Conference, 1997. Proceedings of the 1997, Vol. 6, pp. 3979-3984
- [3] Francis Tay E.H, Kumaran R, B.L.Chua, Logeeswaran VJ, "Electrostatic Spring Effect on the Dynamic Performance of Microresonators", MSM 2000, Chap 4 :System-Level Modeling and Simulation of MEMS, pp. 154-157
- [4] David A. Horsley, Roberto Horowitz, Albert P. Pisano, "Microfabricated Electrostatic Actuators for Hard Disk Drives", Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, Volume: 3 Issue: 3, Sept. 1998
- [5] V.I.Utkin, "Variable structure systems with sliding mode", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 22, no. 2, pp. 212-222, 1977.
- [6] R.A.DeCarlo, S.H.Zak, G.P.Matthews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial", Proc. IEEE, vol. 76, no.3, pp. 212-232, 1988.
- [7] J.Y.Hung, W.Gao, J.C.Hung "Variable structure control: A survey", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 40, no. 1, pp. 2-22, 1993
- [8] T. Imamura, T. Koshikawa, and M. Katayama, "Transverse mode electrostatic microactuator for MEMS based HDD slider", in Proc. 9th Int. Workshop Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '96), San Diego, CA, Feb. 1996, pp. 216-221