

SMC와 비선형관측기를 이용한 동적마찰에 대한 정밀추종제어

한성익*

Precise Control of Dynamic Friction Using SMC and Nonlinear Observer

Seong IK Han

Key Words : Dynamic Friction(동적마찰), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드제어), Nonlinear Observer(비선형 관측기), Ball-screw System(볼-스크류 시스템)

Abstract

A precise tracking control scheme on the system in presence of nonlinear dynamic friction is proposed. In this control scheme, the standard SMC is combined with the nonlinear observer to estimate the dynamic friction state that is impossible to measure. Then this control scheme has the good tracking performance and the robustness to parameter variation compared with the standard SMC and the PID based nonlinear observer control system. This fact is proved by the experiment on the ball-screw driven servo system with the dynamic friction model.

1. 서론

마찰은 거의 모든 기계운동에 영향을 주는 현상이다. 그래서 서보 제어시스템이나 윤활설계나 마모현상에 대한 마찰의 영향에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 고전적인 마찰모델은 0속도에서 계단형태의 비선형이고 속도에 따라 일정한 값을 갖는 쿨롱마찰과 속도에 비례하는 점성마찰로 표현된다. 그러나 저속에서 정밀제어가 요구되는 경우 고전적인 마찰모델은 한계가 있다. 저속에서 마찰에 의해 limit cycle, stick-slip, stick-slip과 Stribeck 현상등이 나타나며 온도, 시간, 부하무게, 작동거리에 의해 영향을 받으므로 모델 특성을 정확히 파악하기가 어렵다. 최근에 제안된 마찰모델로서 Canudas de Wit⁽¹⁾등이 저속에서의 동적마찰(dynamic friction)특성을 반영할 수 있는 Lu-Gre(Lund-Grenoble)모델을 제안하였다. 이 모델에서는 두개의 접촉면에서 탄성을 갖는 섬모(bristle)의 변형을 상태변수로 하여 마찰을 설명하고 있다. 그러나 이 상태변수는 직접 측정을 할 수 없으므로 간접적으로 관측기를 이용하여 상태를 추정하여 마찰을 제어한다.

일반적으로 마찰을 제어하는 방법은 모델기준(model-based) 제어방법과 비모델기준(non-model-based) 제어방법이 있으며 전자의 방법들은 정확한 마찰모델에 근거하여 비선형 관측기(nonlinear observer: N.O.) 방법^(1,2), 파라미터가 작동조건에 따라 변하는 경우에 적용하는 적응제어방법이 있다. 후자는 정확한 마찰모델을 얻을 수 없는 경우에도 적용할 수 있는 방법으로서, 신경망 제어방법⁽³⁾, 슬라이딩 모드제어(sliding mode control: SMC)방법⁽⁴⁾ 등이 있다. 모델기준 제어방법은 동적마찰 파라미터를 정확하게 추정된다면 상당히 정밀한 추종제어가 가능하지만 파라미터를 정확하게 추정하는 것이 매우 어렵다. 비모델기준 제어방법은 마찰파라미터 추정이 필요없으나 μm 단위의 정밀한 제어가 요구되는 경우 추종오차가 커지고 제어입력도 크게 나타나는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 비선형 관측기를 이용하는 모델기준 제어방법⁽⁴⁾과 비모델기준 제어방법인 SMC(sliding mode control)방법을 결합하여 SMC의 단점인 제어입력을 줄이고 또한 정밀추종제어를 할 수 있는 동적마찰 제어방법을 제안한다. 또한 마찰 파라미터의 부정확한 추정에 강인함을 보이고자 한다. 볼-스크류(ball-screw) 구동 서보시스템에 대해 Lu-Gre 마찰모델을 구하고 제안한 방법과 SMC 방법 및 PID+N.O. 제어방법들과 비교하여 강인한 정밀추종제어가 수행됨을 보이기로 한다.

* 회원, 순천제일대학 기계전기제어학부

E-mail: hansng@suncheon.ac.kr

TEL: (061)-740-1352 FAX: (061)-740-1355

2. 동적마찰 모델링 및 볼-스크류 시스템

2.1 비선형 동적마찰 모델

마찰현상은 불규칙한 미소 접촉면의 많은 돌기에서의 접촉으로 인해 나타난다. Lu-Gre 마찰모델은 강체가 접촉할 때 접촉면에서 미소한 탄성섬모들이 접촉한다고 간주한다. 이 때 수직력이 작용하면 탄성섬모들은 스프링처럼 변형을 일으킨다. 이러한 탄성변형의 평균값을 $z(t)$ 로 표시하면 다음과 같은 동특성을 갖는다⁽¹⁾.

$$\dot{z}(t) = \dot{q}(t) - f(\dot{q})z(t) \quad (1)$$

$$f(\dot{q}) = \frac{|\dot{q}|}{g(\dot{q})} \quad (2)$$

여기서 \dot{q} 는 접촉면 사이의 상대속도이고 함수 $g(\dot{q})$ 는 윤활상태, 온도같은 많은 인자에 의해 정해지는데 속도가 증가하면 감소하는 특성이 있으며 이것은 Stribeck 효과에 대응한다. 점성마찰력을 제외하면 탄성섬모의 변형에 의한 마찰력은 다음과 같다.

$$F_f(t) = \sigma_0 z(t) + \sigma_1 \dot{z}(t) \quad (3)$$

(3)식은 동적마찰력(dynamic friction force)이라고 하며 σ_0 는 탄성섬모의 강성계수, σ_1 은 감쇠계수를 의미한다. Stribeck 효과를 나타내는 함수 $g(\dot{q})$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma_0 g(\dot{q}) = F_c + (F_s - F_c)e^{-(\dot{q}/\dot{q}_s)^2} \quad (4)$$

정적마찰력(static friction force)은 정상상태 마찰력으로서 다음과 같다.

$$F_{fs}(\dot{q}) = [F_c + (F_s - F_c)e^{-(\dot{q}/\dot{q}_s)^2}] \text{sgn}(\dot{q}) + C\dot{q} \quad (5)$$

여기서 F_c 는 Coulomb 마찰력, F_s 는 stiction 크기, C 는 점성마찰계수, \dot{q}_s 는 Stribeck 속도이다. 결과적으로 마찰모델을 구성하기 위해서는 6개의 파라미터 $\sigma_0, \sigma_1, F_c, F_s, \dot{q}_s, C$ 값을 추정해야한다. 그림 1에 추정한 결과가 일부 제시되어 있다. 그리고 표 1에는 추정된 마찰 파라미터들의 평균값이 제시되어 있다.

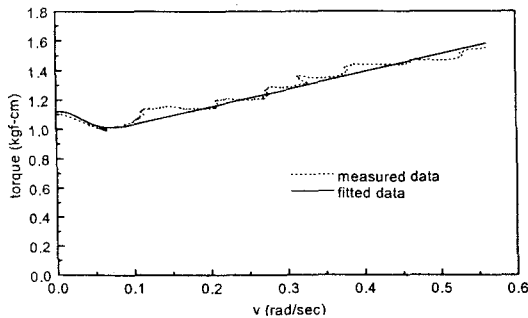


Fig. 1 The graph of measured data and estimated data
Table 1 Values of estimated parameters (kgf-cm, rad/s)

F_c	F_s	C	\dot{q}_s	σ_0	σ_1
0.901	1.133	1.097	0.056	720	13

2.2 볼-스크류 시스템

그림 2는 볼-스크류 구동계의 사진이다. 축에는

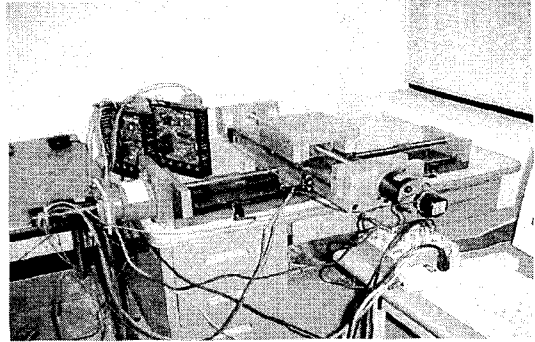


Fig 2 The photograph of ball-screw system
5mm/rev의 분해능을 갖는 볼-스크류와 LM 가이드가 있고 1000 pulse/rev의 분해능을 갖는 회전중분형 엔코더가 부착된 DC servo 모터와 20:1의 기어비를 갖는 감속기가 부착되어 있다. 그리고 PC에서 Mathwork사의 Simulink에 의해 제어기를 구현하고 dSPACE사의 TMS320C 칩이 내장된 DSP 11-02 보드와 인터페이스 요소를 통해 전달되는 제어 신호는 모터드라이브로 전달되어 모터를 구동하게 된다. 모터를 포함한 볼-스크류 축의 등가관성 J 는 $0.25085 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ 이다.

3. 비선형 관측기를 이용한 SMC 시스템

3.1 표준 SMC 시스템

볼-스크류 시스템 운동방정식은 다음과 같다.

$$J\ddot{q} + C\dot{q} + F_f = u \quad (6)$$

(1), (2)식을 (3)식에 대입하고 정리하면

$$F_f(t) = \chi(\dot{q})z + \sigma_1 \dot{q} \quad (7)$$

여기서 $\chi(\dot{q}) = (\sigma_0 - \sigma_1 f(\dot{q}))$. (7)식을 (6)식에 대입하면

$$J\ddot{q} + C_{eq}\dot{q} + F_z = u \quad (8)$$

여기서 $C_{eq} = C + \sigma_1$, $F_z = \chi(\dot{q})z$. 슬라이딩 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$s = \lambda e + \dot{e}, \quad e = q_d - q \quad (9)$$

여기서 λ 는 원하는 상승시간에 관련된 상수이며 q_d 는 목표위치를 나타낸다. 제어목표는 마찰에 관계없이 시스템의 상태를 슬라이딩 평면 $s=0$ 로 구동시키는 제어입력 $u(t)$ 를 선정하는 것이다. Lyapunov 함수를 $V = 0.5s^2$ 으로 선정하고 미분하면

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(\lambda\dot{e} + \ddot{e}) = s(\lambda\dot{e} + \ddot{q}_d + \frac{C_{eq}\dot{q} + F_z - u}{J}) \quad (10)$$

제어입력을 등가제어 입력항과 채터링(chattering)을 줄이는 제어입력으로 다음과 같이 선정하면

$$u = u_{eq} + u_f \quad (11)$$

여기서 $u_{eq} = J(\lambda\dot{e} + \ddot{q}_d) + C_{eq}\dot{q}$, $u_f = \frac{\beta s}{\phi} + \hat{F}_z$, 그리고 β 는 강인성에 대한 양의 상수, ϕ 는 경계층 폭을 나타내는 양의 상수이며 \hat{F}_z 는 추정된 마찰력이다. (11)식을 (10)식에 대입하면

$$\dot{V} = -\frac{s}{J} \left(\frac{\beta s}{\phi} + \hat{F}_z - F_z \right) \quad (12)$$

만일 마찰력을 모델링오차로 간주하는 기존의 SMC 방법의 경우 \hat{F}_z 가 없으므로 (12)식은

$$\dot{V} = -\frac{s}{J} \left(\frac{\beta s}{\phi} - F_z \right) \quad (13)$$

이 되고 $|F_z| < \frac{\beta}{\phi}$ 가 되도록 β 와 ϕ 를 선정해야

$\dot{V} < 0$ 가 되어 추종오차가 0으로 수렴한다. 그런데 이러한 경우 β/ϕ 값을 마찰력보다 크게 선정해야 하는데 정밀제어의 경우 비록 채터링을 감소시키는 제어입력 구조로 선정하더라도 마찰력을 보상하기 위한 무리한 제어입력과 채터링이 유발된다. 그래서 (12)식에서 마찰력 F_z 를 추정하여 $F_z \rightarrow \hat{F}_z$ 가 되도록 하면 모델링 오차가 거의 없어지고 채터링과 제어입력이 작고 더 정밀한 제어가 될 것이다. 또한 SMC 시스템의 강인성이 뛰어난 특성을 고려할 수 있기 때문에 마찰 파라미터들을 다소 부정확한 모델링하더라도 강인한 성능을 유지할 수 있다.

3.2 비선형 관측기와 SMC 시스템의 결합

동적마찰에 관련된 변수 $z(t)$ 는 직접 측정 할 수 없으므로 비선형 관측기를 이용하여 $z(t)$ 를 간접 추정하여 마찰력을 추정한다. (11)식을 (8)식에 대입하여 오차항으로 정리하면 다음과 같다.

$$J[(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + \lambda\dot{e}] = F_z - \hat{F}_z - \frac{\beta s}{\phi} \quad (14)$$

$\tilde{z} = z - \hat{z}$ 로 두면 $F_z - \hat{F}_z = \chi(\dot{q})\tilde{z}$ 이므로

$$\dot{s} = \frac{1}{J} \left(\chi(\dot{q})\tilde{z} - \frac{\beta s}{\phi} \right) \quad (15)$$

Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V_s = 0.5Js^2 \quad (16)$$

미분하고 (15)를 대입하면

$$\dot{V}_s = s[\chi(\dot{q})\tilde{z} - \beta s/\phi] \quad (16)$$

$z(t)$ 를 지수적으로 추정하는 비선형 관측기는 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$\dot{\hat{z}} = w - \frac{J}{\sigma_1} \dot{q} \quad (17)$$

여기서 w 는 보조변수이고 다음을 만족한다.

$$\dot{w} = \frac{1}{\sigma_1} [-\sigma_0 w + (-C_{eq} + \sigma_1 + J \frac{\sigma_0}{\sigma_1}) \dot{q} + u + \chi(\dot{q})s] \quad (18)$$

지수적인 안정성을 보장하기 위해 다시 다음과 같이 Lyapunov 함수를 정의한다.

$$V_{s2} = V_s + 0.5\sigma_1 \tilde{z}^2 \quad (19)$$

(19)를 미분하고 (17)을 미분한 결과에 (18)을 대입한 후 (16)을 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_{s2} &= s \left(\chi(\dot{q})\tilde{z} - \frac{\beta s}{\phi} \right) + \sigma_1 \tilde{z} \left(\frac{\chi(\dot{q})s}{\sigma_1} - \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \tilde{z} \right) \\ &= -\frac{\beta s^2}{\phi} - \sigma_0 \tilde{z} < 0 \end{aligned} \quad (20)$$

(19)에서 V_{s2} 가 양의한정(positive-definite)이고 (20)에서 \dot{V}_{s2} 가 음의한정(negative-definite)이므로 관측기오차 $\tilde{z}(t)$ 는 빠르게 0으로 수렴하고 따라서 $F_z \rightarrow \hat{F}_z$ 가 된다. 그래서 마찰력에 의한 모델링오차가 소거되어 관측기와 결합된 SMC 시스템은 적은 제어입력을 유지하면서 좋은 성능을 발휘하게 된다.

4. 볼-스크류 정밀추종제어 실험

4.1 위치추종제어 성능검토

볼-스크류 시스템에 대해 비모델기준 제어방법인 표준 SMC 시스템과 모델기준 제어방법인 Vedagarbha⁽⁹⁾가 제안한 PID 제어와 비선형 관측기를 결합한 PID+N.O. 제어시스템을 설계하였고 또한 본 연구에서 제안한 SMC와 비선형 관측기를 결합한 SMC+N.O. 제어시스템을 설계하여 DSP를 통해 실시간으로 실험을 수행하였다. 각각의 제어시스템에 대해 목표 입력신호로 주파수가 1 rad/sec 인 정현파를 진폭이 각각 0.0025 rad (2 μm), 0.0126 rad (10 μm)를 인가하여 실험을 수행하였고 출력을 μm 단위로 환산하여 나타내었다. y_r 목표입력을 나타낸다. 설계된 각 제어시스템의 위치추종오차와 제어입력을 비교하여 제안한 제어시스템의 성능을 평가하기로 한다.

그림 3~5에서는 목표 입력값이 2 μm를 인가한 경우에 대한 위치추종오차를 나타낸다.

PID+N.O. 제어시스템과 제안한 SMC+N.O. 제어시스템은 만족스러운 추종성능을 보이고 있으나 비모델 기준 제어방법인 표준 SMC 제어시스템은 위치추종오차가 크게 나타나고 있다.

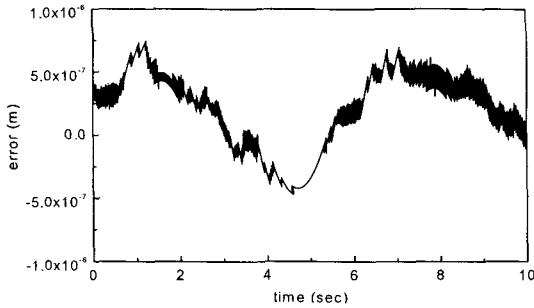


Fig. 3 The position tracking error of the standard SMC control system ($y_r = 2\mu m$)

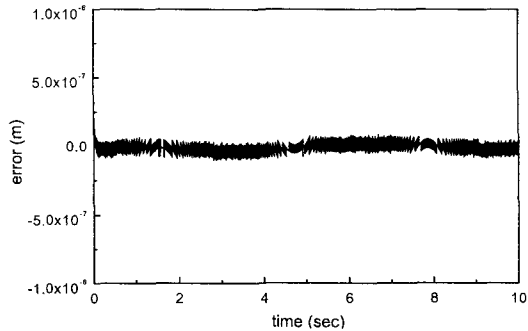


Fig. 4 The position tracking error of PID+N.O. control system ($y_r = 2\mu m$)

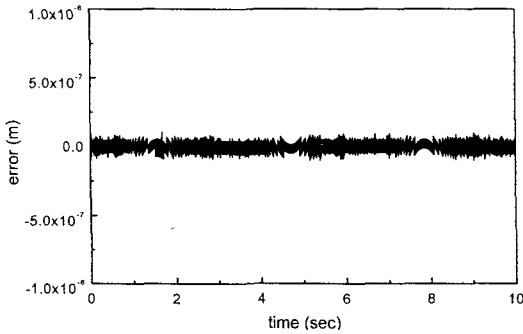


Fig. 5 The position tracking error of SMC+N.O. control system ($y_r = 2\mu m$)

그리고 제어입력 특성을 다음의 그림 6~8에서 살펴보기로 한다. 제어입력 특성을 살펴보면 표준 SMC 제어시스템은 마찰력을 무리하게 보상 하기 때문에 sign 함수를 사용한 경우보다는 작지만 제어입력이 크고 채터링 현상이 크게 나타나고 있다. 반면에 제안한 방법은 PID+N.O. 제어시스템보다 제어입력이 약간 크지만 표준 SMC 제어시스템 보다는 크게 작아짐을 알 수 있다.

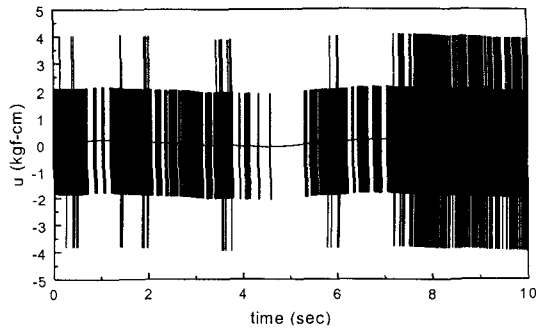


Fig. 6 Control input of the standard SMC ($y_r = 2\mu m$)

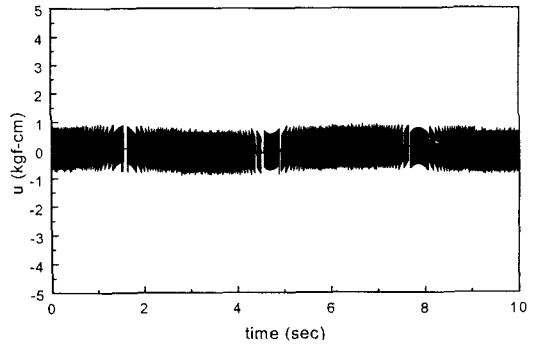


Fig. 7 Control input of PID+N.O. control system ($y_r = 2\mu m$)

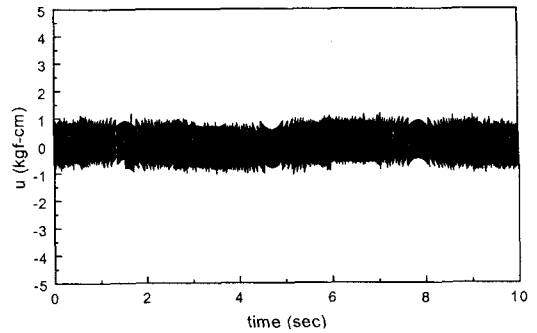


Fig. 8 Control input of SMC+N.O. control system ($y_r = 2\mu m$)

이러한 결과에서 마찰이 존재하는 경우 정밀추종 제어는 비모델기준 제어방법으로서는 한계가 있음을 알 수 있다. 제안한 방법과 PID+N.O. 제어시스템은 더 큰 목표입력에 대해서도 비슷한 성능을 보이므로 더 큰 목표값에 대해 표준 SMC 제어시스템과 제안한 방법을 비교하기로 한다. 그림 9~10은 $y_r = 10\mu m$ 인 경우의 위치추종오차를 나타낸다. 위치추종오차는 표준 SMC 제어시스템보다 제안한 방법이 매우 만족스러운 성능을 나타내고 있으며 제어입력도 작게 나타나고 있음을 그림 10~11에서 알 수 있다.

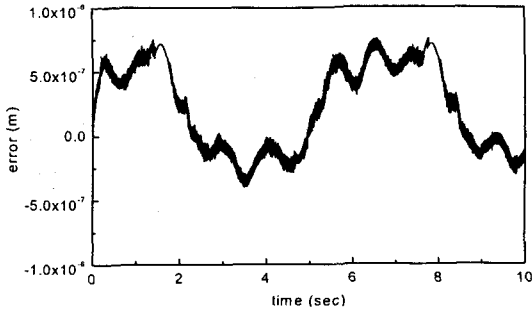


Fig. 9 The position tracking error of the standard SMC control system ($y_r = 10\mu\text{m}$)

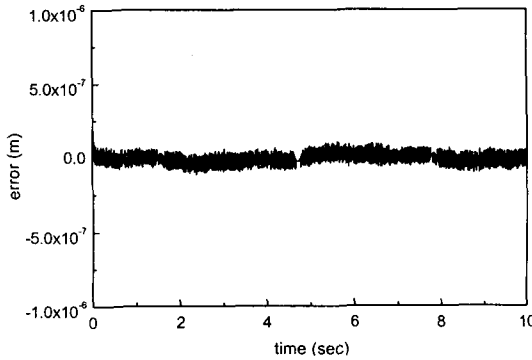


Fig. 10 The position tracking error of SMC+N.O. control system ($y_r = 10\mu\text{m}$)

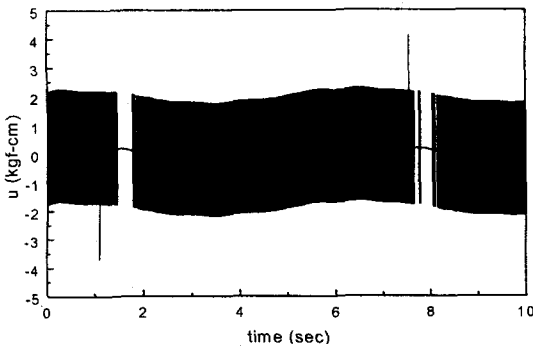


Fig. 11 Control input of the standard SMC ($y_r = 10\mu\text{m}$)
 이러한 결과를 살펴볼 때 기존의 비모델 기준 제어방법인 표준 SMC를 이용한 마찰 제어방법은 μm 단위의 위치추정 정밀도가 요구되는 경우 적합하지 않으며 신경망을 이용한 마찰 제어방법⁶⁾도 cm 단위의 위치추종제어를 보이고 있어 μm 단위의 정밀 마찰제어 성능은 갖기 어렵다고 사료된다

4.2 강인성 성능검토

동적마찰이 존재하고 정밀한 위치추종이 요구

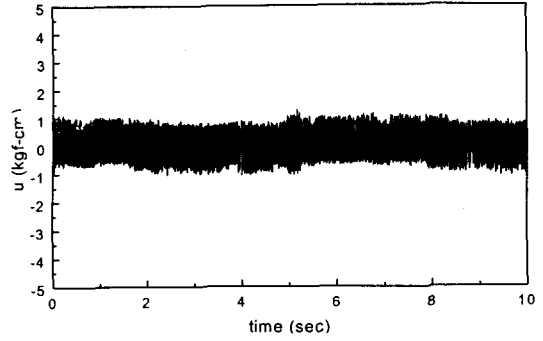


Fig. 12 Control input of SMC+N.O. control system ($y_r = 10\mu\text{m}$)

되는 경우 모델기준 제어방법인 PID+N.O. 제어시스템과 SMC+N.O. 제어시스템이 위치추종성과 제어입력측면에서 비모델 기준 제어방법인 표준 SMC 제어시스템보다는 성능이 훨씬 뛰어난을 앞절에서 알 수 있었다. 그런데 마찰모델기준 제어방법이 성능이 개선되기 위해서는 정확한 동적마찰 파라미터를 실험적으로 구해야 하는데 실제로 매우 정확한 파라미터를 구하기 위해서는 정밀한 계측기와 정확한 실험조건이 구비해야 하는데 현

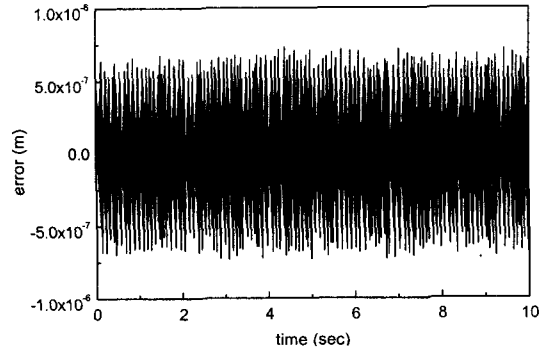


Fig. 13 The position tracking error of PID+N.O. ($y_r = 2\mu\text{m}$, 50% parameter variation)

실적으로 모두 만족시킬 수 없는 경우가 많다. 그래서 마찰 파라미터가 정확하지 않더라도 어느 범위 이내로 마찰 파라미터를 추정하고 추정오차에 대해 강인한 정밀 제어가 이루어지면 매우 바람직할 것이다. 그래서 제안한 제어방법이 마찰 파라미터의 부정확한 추정이나 온도등에 의한 변화에 강인함을 PID+N.O. 제어시스템과의 비교를 통해 보이고자 한다. 표 1에 마찰 파라미터들과 축관성값이 50%증가한 경우에 대한 성능을 평가한 결과가 그림 13~16에 제시되어 있다. 그림에서 제안한 방법이 50% 시스템 파라미터 변화에 대해 PID+N.O. 제어시스템보다 매우 강인한 특성을 보이고 있다. 위치추종오차도 공칭시스템인 그림 5

와 비교하면 크게 차이가 없으며 제어입력도 크게 증가하지 않고 있음을 알 수 있다.

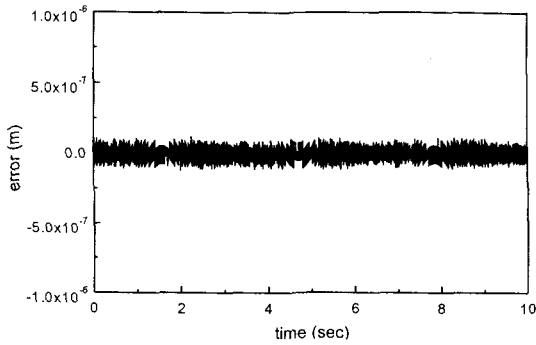


Fig. 14 The position tracking error of SMC+N.O. control system ($y_r = 2\mu\text{m}$, 50% parameter variation)

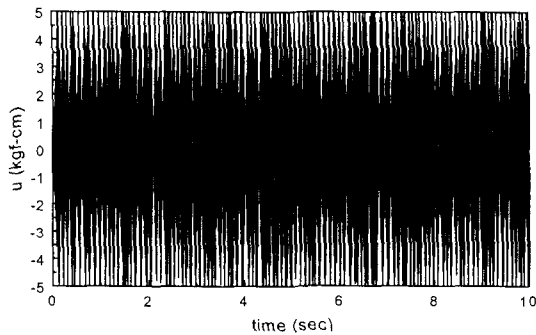


Fig. 15 Control input of PID+N.O. control system ($y_r = 2\mu\text{m}$, 50% parameter variation)

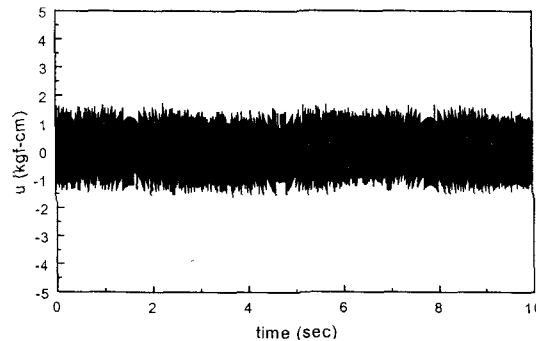


Fig. 16 Control input of SMC+N.O. control system ($y_r = 2\mu\text{m}$, 50% parameter variation)

이것은 SMC가 PID 제어기보다 더 강인성을 갖고 있다는 일반적인 사실에 기인하고 있으며 제안한 방법이 기존의 PID 제어를 이용한 비선형 관측기 제어방법⁽⁵⁾에 비해 강인성면에서 더 나은 성능을 갖고 있음을 보여주고 있다.

5. 결론

비선형 동적마찰이 존재하는 서보시스템의 정밀추종제어에 대한 연구를 수행하였다. 동적마찰을 Lu-Gre 동적마찰모델로 간주하여 마찰 파라미터를 추정하였고 뛰어난 위치추종성능과 작은 제어입력특성, 파라미터 변화에 대한 강인성을 갖도록 SMC와 비선형 관측기를 결합한 제어시스템을 설계하여 DSP 시스템으로 실시간 실험을 수행하였다. 그리고 비교를 위해 표준 SMC 시스템과 PID와 비선형 관측기를 사용하는 기존의 마찰 제어시스템을 설계하여 동일한 조건하에 실험을 수행하였다.

실험 결과에서 비모델 기준 제어방법인 표준 SMC의 경우 위치추종성능이 매우 떨어지고 제어입력도 크게 나타나고 채터링이 발생하고 있다. 그리고 PID+N.O. 제어시스템은 공칭모델에 대한 제어성능은 제안한 방법과 비슷하지만 강인성 측면에서는 취약한 성능을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 SMC+N.O. 제어방법은 동적마찰이 존재하는 정밀추종제어의 경우 뛰어난 성능을 갖고 있음을 보여주었다.

참고문헌

- (1) C. Canudas de Wit, H. Olsson, and P. Lischinsky, 1995, "A New Model for Control of Systems with Friction," *IEEE Trans. A. C.*, Vol. 40, No. 3, pp. 419 - 425.
- (2) M. Iwasaki, T. Shibata, and N. Matui, 1999, "Disturbance-Observer-Based Nonlinear Friction Compensation in Table Drive System," *IEEE/ASME on Mechatr.*, Vol. 4, No. 1, pp. 3-8.
- (3) 손경오, 국태용, 2000, "학습제어기법을 이용한 X-Y Table의 마찰보상," 제어자동화시스템공학회지, 제 6권, 제 3호, pp. 248-255.
- (4) Q. P. Ha, D. C. Rye, and H. F. Durrant-Whyte, 2000, "Variable Structure Systems Approach to Friction Estimation and Compensation," *Pro. of IEEE Inter. Confr. on Robot. & Auto.*, pp. 3543-3548.
- (5) P. Vedagarbha, D. M. Dawson, and M. Feemster, 1999, "Tracking Control of Mechanical Systems in the Presence of Nonlinear Dynamic Friction Effects," *IEEE Trans. on Contr. Sys. Tech.*, Vol. 7, No. 4, pp. 446-456.
- (6) S. Nicosia and P. Tomei, 1990, "Robot Control by Using Only Joint Position Measurements," *IEEE Trans. AC*, Vol. 35, pp. 1058-1061.