

Lu-Gre 마찰모형을 갖는 XY 구동계의 위치제어

한성익*(순천제일대 기계전기제어과), 방두열(순천제일대 기계전기제어과)

Position Control for the XY Drive System with Lu-Gre Friction Model

S. I. Han(Suncheon First Coll. Dept. M. & E. Contr.), D. Y. Pang(Suncheon First Coll. Dept. M. & E. Contr.)

ABSTRACT

In a precise control system, the Lu-Gre friction model has often been used to describe the nonlinear friction. For the XY table system with this friction model, we identified the friction parameters and designed nonlinear observer. The nonlinear friction effects could be removed within appropriate position tracking errors and control inputs through experiments. Also, we designed the nonmodel-based SMC system to compensate the nonlinear friction. Through experiments, it is shown that this method has the similar performance compared with the nonlinear observer system and is useful when friction parameters are hard to identify except the problem of input chattering.

Key Words : Lu-Gre Friction(Lu-Gre 마찰), Nonlinear Observer (비선형 관측기), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드제어), XY Drive System(XY 구동계)

1. 서론

마찰은 서보 제어시스템이나 유공압 제어시스템에 나타나는 중요한 특성이다. 마찰은 추종오차, limit cycle, stick-slip 운동을 일으킨다. 마찰은 영속도에서 불연속이고 저속에서는 stick-slip 과 Stribeck 현상등이 복합적인 영향뿐만 아니라 온도, 시간, 부하무게, 작동거리 등에 의해 영향을 받으므로 모델 특성을 정확히 파악하기가 어렵다. 그래서 정밀위치 제어 시 마찰을 고려하지 않을 경우 제어성능이 만족스럽지 못하는 경우가 자주 발생한다⁽¹⁾ 일반적으로 마찰을 제어하는 방법은 모델기준(model-based) 제어방법과 비모델기준(nonmodel-based) 제어방법이 있으며 전자의 방법들은 정확한 마찰모델에 근거하여 비선형 관측기 방법^(2,3), 파라미터가 작동조건에 따라 변하는 경우에 적용하는 적응제어방법⁽⁴⁾이 있으며 적응제어는 후자는 정확한 마찰모델을 얻을 수 없는 경우에도 적용할 수 있는 방법으로서 퍼지 제어⁽⁵⁾, 신경망 제어방법⁽⁶⁾, 슬라이딩 모드제어(sliding mode control: SMC)방법⁽⁸⁾들이 있다.

마찰에 대한 전통적인 모델은 정지마찰과 쿨롱 마찰이다. 그러나 이러한 모델은 정밀제어에 중요한 영향을 주는 저속에서의 Stribeck 효과, stick-slip 운동, presliding 변위같은 특성을 반영할 수 없다

최근에 제안된 마찰모델로서 Canudas de Wit⁽¹⁾등이 정적마찰(static friction)과 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.

본 연구에서는 ball-crew 로 구동하는 XY 구동계에 대해 Lu-Gre 마찰모델을 구성하는 과정을 제시하고 비선형 관측기를 이용하여 정밀한 위치제어가 이루어짐을 실험을 통해 보이코자 한다. 또한 비모델기준 마찰제어방법인 SMC를 이용하여 정밀제어에서 모델기준 제어방법과 비교하기로 한다.

2. XY 구동시스템 모델링

2.1 비선형 마찰 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⁾.

$$\dot{z}(t) = \dot{q}(t) - \frac{|\dot{q}(t)|}{g(\dot{q})} z(t) \quad (1)$$

여기서 q 는 접촉면 사이의 상대속도이고 함수 $g(\dot{q})$ 는 윤활상태, 온도같은 많은 인자에 의해 정해 지는데 속도가 증가하면 감소하는 특성이 있으며 이것은 Stribeck 효과에 대응한다. 점성마찰계수 σ_2 을 포함한다면 탄성점도의 변형에 의한 마찰력은 다음과 같다

$$F_f(t) = \sigma_0 z(t) + \sigma_1 z(t) + \sigma_2 v(t) \quad (2)$$

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

$$\sigma_0 g(q) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(q/\dot{q}_s)^2} \quad (3)$$

여기서 F_c 는 Coulomb 마찰력, F_s 는 stiction 크기, \dot{q}_s 는 Stribeck 속도이다. 정적마찰력(static friction force)는 정상상태 마찰력으로서 다음과 같다.

$$F_{fs}(q) = [F_c + (F_s - F_c) e^{-(q/\dot{q}_s)^2}] \text{sgn}(\dot{q}) + \sigma_2 \dot{q} \quad (4)$$

결과적으로 마찰모델을 구성하기 위해서는 6개의 파라미터 $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, F_c, F_s, \dot{q}_s$ 값들을 결정해야한다. 그림 1은 XY Table 구동계의 사진이다.

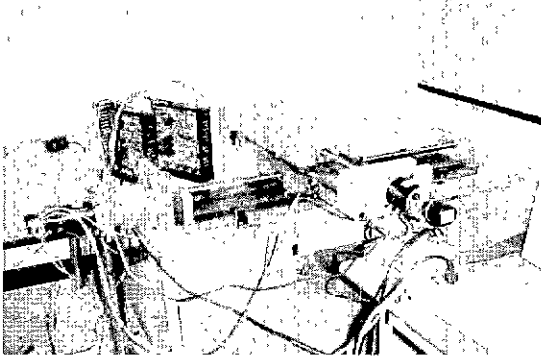


Fig.1 Photograph of the XY Table Drive System

X 축에는 5mm/rev의 분해능을 갖는 ball-screw와 LM 가이드가 있고 1000 pulse/rev의 분해능을 갖는 회전증분형 엔코더가 부착된 DC servo 모터와 20.1의 기어비를 갖는 감속기가 부착되어 있다. Y 축에는 8mm/rev의 분해능을 갖는 ball-screw와 LM 가이드, X 축과 같은 사양의 DC 모터가 연결되어 있다. 그리고 PC에서 Mathwork사의 Simulink에 의해 제어기를 구현하고 dSPACE사의 TMS320C 칩이 내장된 DSP1102 보드와 인터페이스 요소를 통해 전달되는 제어신호는 모터드라이브로 전달되어 모터를 구동하게 된다. 마찰 파라미터를 구하기 위해 모터에 전류를 인가하고 DSP1102 보드를 통해 토크와

속도를 측정하여 정적마찰 파라미터들과 \dot{q}_s 를 추정하였다. 그림 2에 X축에 대한 추정된 결과가 일부 제시되어 있다. 그리고 표 1에는 추정된 마찰 파라미터들의 평균값이 제시되어 있다.

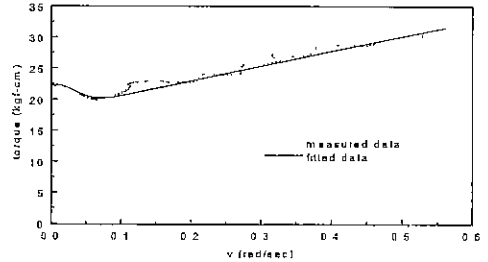


Fig. 2 The measured friction model and fitted result

Table 1 The values of identified parameters (kgf-cm, rad/s)

	F_c	F_s	σ_2	\dot{q}_s	σ_0	σ_1
X축	18.02	22.65	21.94	0.056	14400	255
Y축	0.94	1.20	0.0047	3.44	75	24

그리고 시스템 동적방정식은 다음과 같다.

$$J_i \ddot{\theta}(t) + \sigma_{2i} \dot{\theta}(t) = u_i(t) - F_{fi}(t) \quad (i=x,y) \quad (5)$$

3. 비선형 제어기 설계 및 검토

3.1 비선형 관측기를 이용한 마찰제어

마찰에 대한 위치제어는 X축에 대해서만 시도하기로 한다. 먼저 모델기준 제어방법인 비선형 관측기를 이용하여 제어기를 설계하기로 한다. 먼저 동적마찰의 상태변수 $z(t)$ 는 직접 측정이 불가능하므로 다음과 같은 비선형 관측기를 이용하여 간접적으로 추정할 수 있다(1).

$$\dot{\hat{z}} = \dot{\theta} - \frac{|\dot{\theta}|}{g(\dot{\theta})} \hat{z} + k e \quad (6)$$

$$\hat{F}_f = \sigma_0 \hat{z} + \sigma_2 \dot{\hat{z}} \quad (7)$$

여기서 $e = \theta_r - \theta$ 은 위치추종오차, θ_r 은 기준위치 입력, $k > 0$ 는 관측기 게인, \hat{z} 는 관측기 상태변수를 나타낸다. 제어법칙은 다음과 같다

$$u = K(s)e + \hat{F}_f + J_s \ddot{\theta} + \sigma_2 \dot{\theta} \quad (8)$$

여기서 $K(s)$ 는 표준 선형제어기로서 PID 제어기로 설계하였다. 선형 PID 제어기만을 이용하여 진폭 0.1rad, 주파수가 1 rad/sec인 sine 파를 기준입력으로 주었을 때 위치추종결과가 그림 3에 제시되어 있다. 그림에서 선형 PID 제어기로서는 마찰을 제대로 보상하지 못하고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 진폭 0.0025rad, 주파수가 1 rad/sec인 sine 파를 기준입력으로 인가하였을 때 위치추종결과를 나타낸다. 그리고 입력진폭이 0.1rad일 때의 위치추종결과가

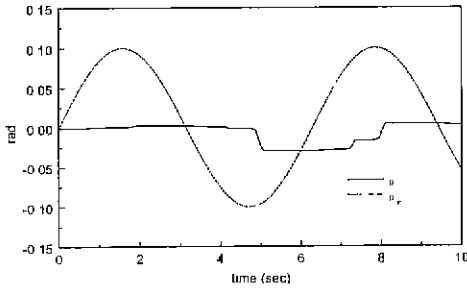


Fig. 3 Output of the linear PID control system

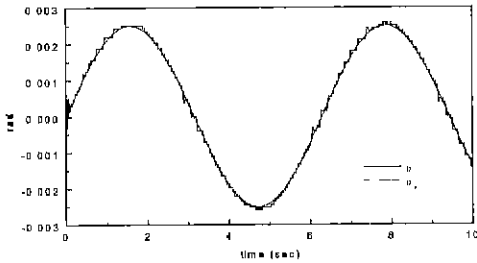


Fig. 4 Output of the nonlinear observer system for $\theta_r = 0.0025 * \sin t$

그림 5 에 제시되어 있다. 이러한 결과를 살펴보면

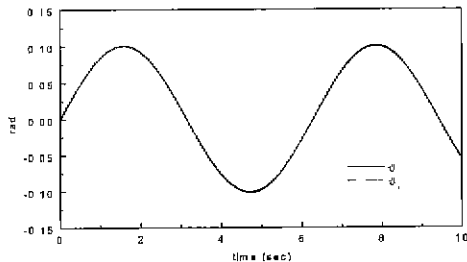


Fig. 5 Output of the nonlinear observer system for $\theta_r = 0.1 * \sin t$

작은 기준입력이나 큰 입력에서도 선형제어기에 비해 매우 만족스러운 위치추종을 하고 있음을 알 수 있다

3.2 SMC 를 이용한 마찰제어

모델기준 제어기는 마찰에 대한 특성을 정확히 알고 있어야 제어가 가능하므로 마찰에 대한 식별 과정이 반드시 있어야 한다. 그러나 마찰에 대한 모델식별을 하기가 어려운 경우에는 비모델기준 제어기를 이용하여 마찰 보상을 할 수 있다. 신경망 제어나 퍼지제어를 이용한 마찰 제어방법은 많이 연구되어 있으나 SMC 를 이용한 마찰 제어방법은 비교적 덜 연구된 편이다. 그래서 비모델 기준제어

방법으로서 SMC 를 이용하여 마찰을 보상하는 비선형 제어기를 설계하여 성능을 검토하기로 한다. 시스템 (5)에 대해 다음과 같은 슬라이딩 함수를 정의한다.

$$S = e + \lambda e \quad (9)$$

여기서 λ 는 페루프 시스템의 원하는 상승시간에 관계되는 양의 실수이다. 원하는 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

$$\dot{V} = S(\ddot{\theta}_r - \ddot{\theta} + \lambda \dot{e}) = S(\ddot{\theta}_r + \lambda \dot{e} - \frac{u - F_f}{J_x}) \quad (10)$$

그리고 다음과 같은 제어법칙을 선정한다.

$$u = u_{eq} + \Phi \operatorname{sgn}(S) \quad (11)$$

여기서 $u_{eq} = J_x \ddot{\theta}_r + J_x \lambda \dot{e} + \sigma_2 \theta$, $\Phi > 0$ 는 마찰력에 대한 한계를 나타낸다

$$|F_f| < \Phi \quad (12)$$

(11)을 (10)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\dot{V} = -\frac{S}{J_x} (\Phi \operatorname{sgn}(S) - F_f) < 0 \quad (13)$$

(13)에서 마찰이 존재하더라도 위치오차는 점근적으로 0으로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 그러나 sign 함수에 의한 채터링을 방지하기 위해 다음과 같은 연속함수를 이용하는 방법을 도입한다.

$$u = u_{eq} + \beta S / \Phi \quad (14)$$

여기서 $|F_f| < \beta S / \Phi$ 를 만족해야 한다.

(14)를 (10)에 다시 대입하면

$$\dot{V} = -\frac{S}{J_x} (\beta S / \Phi - F_f) < 0 \quad (15)$$

(15)에서 앞의 경우처럼 위치오차가 0으로 수렴함을 알 수 있다. 진폭이 0.0025rad 이고 주파수가 1 rad/sec 인 sine 파를 기준입력으로 주었을 때 위치추종결과가 그림 6에 제시되어 있다. 그리고 입력진폭

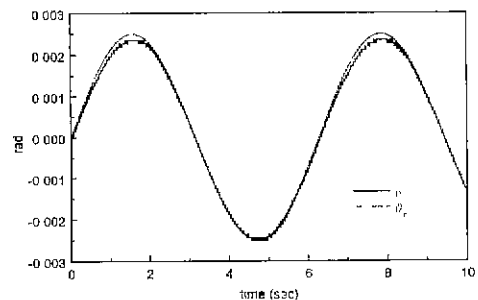


Fig. 6 Output of the SMC system for $\theta_r = 0.0025 * \sin t$ 이 0.1rad 일 때의 위치추종결과가 그림 7에 제시되어 있다. 모델기준 제어기와 비교하면 오차가 작은

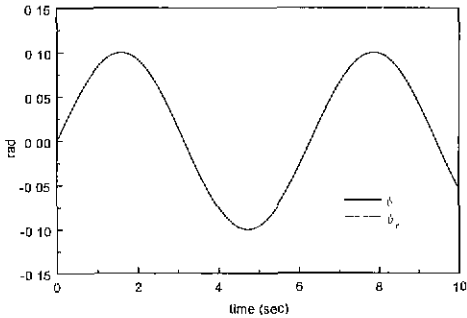


Fig. 7 Output of the SMC system for $\theta_r = 0.1 * \sin t$

입력의 경우 비선형 관측기 제어시스템이 약간 작고 입력이 큰 경우 SMC 시스템이 약간 나은 편이나 거의 유사한 성능을 나타내고 있으므로 마찰모델식별이 어려운 경우 적용할 수 있는 뛰어난 방법임을 알 수 있다. 기준입력 $\theta_r = 0.1 * \sin t$ 에 대한 제어입력을 비교한 결과가 그림 8, 9 에 제시되어 있다.

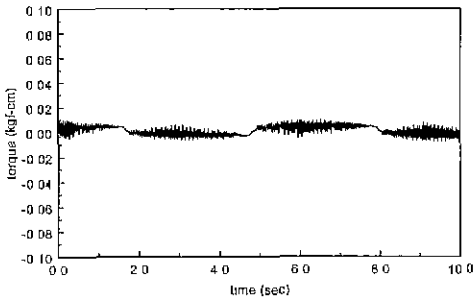


Fig 8 Control input of the nonlinear observer system for $\theta_r = 0.1 * \sin t$

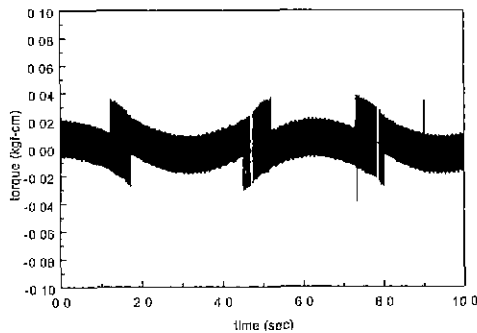


Fig. 9 Control input of the SMC system for $\theta_r = 0.1 * \sin t$
 그림 8, 9 에서 제어입력은 SMC 경우가 더 크게 나타나고 있으며 채터링을 작게 하는 SMC 방법을 사용했으나 채터링이 sign 함수보다는 작으나 나타나고 있다 그래서 제어입력 면에서는 모델기준 마찰 제

어방법인 비선형 관측기 제어방법이 우수하고 모델 식별과정이 필요가 없는 측면에서는 SMC 방법이 편리함을 알 수 있다. 그러나 더 정밀한 위치제어가 요구되는 경우에는 모델기준 마찰제어 방법이 더 나은 성능을 보인다는 것을 예상할 수 있다.

4. 결론

Lu-Gre 마찰모델을 갖는 XY Table 구동시스템에 대해 모델기준 제어방법인 비선형 관측기와 비모델기준 제어방법인 SMC 시스템을 설계하여 위치제어 성능을 비교하였다. 구동부인 ball-screw 와 LM 가이드면에서 발생하는 마찰 파라미터들을 실험을 식별하였고 비선형 관측기를 이용하여 X축의 위치제어 성능을 실험을 통해 조사한 결과 만족스러운 성능을 보이고 있다. 그리고 모델식별과정이 필요없는 SMC 시스템을 설계하여 동일 축에 대해 실험을 통해 위치제어성능을 검증한 결과 모델기준 제어기와 비슷한 성능을 나타내고 있으며 제어입력에서 약간의 채터링이 발생하고 있으나 매우 큰 정밀도가 필요없고 마찰모델링이 어려운 경우 마찰제어를 편리하게 할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Canudas de Wit, C., Olsson, H., and Lischinsky, P., "A New Model for Control of Systems with Friction," IEEE Trans. A. C., Vol. 40, No. 3, pp. 419 - 425, 1995.
2. Iwasaki, M., Shibata, T., and Matun, N., "Disturbance-Observer-Based Nonlinear Friction Compensation in Table Drive System," IEEE/ASME on Mechatr., Vol. 4, No. 1, pp. 3-8, 1999
3. Fricdland, B. and Park, Y. J, "On Adaptive Friction Compensation," IEEE, Trans. A. C., Vol. 37, No. 10, pp. 1609-1612, 1992.
4. Kim, J. H., Jcon, J Y, Lee, S W, and Koh, K., "Hing-Precision Control of Positioning Systems with Nonsmooth Nonlinearities," Pro. of CDC, pp 4375-4380, 1996.
5. 손경오, 국태용, "학습제어기법을 이용한 X-Y Table 의 마찰보상," 제어자동화시스템공학회지, 제 6 권, 제 3 호, pp. 248-255, 2000.
6. Ha, Q. P., Rye, D. C., and Durrant-Whyte, H. F., "Variable Structure Systems Approach to Friction Estimation and Compensation," Pro. of IEEE Inter Confr. on Robot. & Auto , pp. 3543-3548, 2000.