

추정된 쿨롱 마찰을 보상한 슬라이딩 모드 제어 시스템의 위치제어

김한매*, 최정주*, 이영진#, 김종식**

Position Control of Sliding Mode Control Systems with Compensation of Estimated Coulomb Friction

Han Me Kim*, Jeong Ju Choi*, Young Jin Lee# and Jong Shik Kim**

ABSTRACT

The control systems with friction cause the steady state error and slow response, because friction is a sensitive to the change of system condition and has highly nonlinear characteristics. To overcome these problems and do precise position control for a ball-screw system, we use Coulomb friction estimator and the sliding mode control(SMC) to compensate its negative effect. The applied SMC for tracking position has a characteristics of robust stability and reducing chattering, and is derived from the Lyapunov stability theorem and reaching condition. Compensating the estimated friction torque to the bounded disturbance term of the SMC's equivalent control input, it has a tracking performance better than the PID from the experimental results.

Key Words : Coulomb friction(쿨롱마찰), Estimator(추정기), Position control(위치제어), Sliding mode control(슬라이딩 모드 제어)

1. 서론

거동하는 기계 시스템에 있어서 마찰은 필연적으로 존재하는 힘으로 제동장치에 있어서는 긍정적인 역할을 한다. 그러나 서보 시스템에 있어서 마찰은 내적, 외적 요인 등에 그 특성이 변하는 비선형성을 가지고 있어 성능을 저하시키는 결정적인 역할을 한다. 빠른 속도를 요하는 시스템이라면 마찰은 선형성을 가지게 되므로 문제점이 될 수 없다. 그러나 고정밀도를 요하는 저속 시스

템이라면 마찰은 그 성능에 악영향을 주게 된다. 이를 극복하기 위한 방법들로 저속구간의 비선형 마찰현상에 대한 해석적인 규명^{1,2,3} 실시간 비선형 마찰 매개변수의 추정기법^{3,4,6} 등이 있다. 전자의 경우는 마찰현상을 정확하게 기술할 수 있는 마찰 동역학식에 관한 부분이고, 후자의 경우는 주어진 마찰 모델의 비선형 매개변수들을 실시간으로 추정해내는 방법들이다. 과거 연구의 중심이 마찰현상에 대한 해석적인 규명이었다면 현 추세는 마찰의 실시간 추정이 큰 맥락을 이루고 있다.

접수일: 2003 년 11 월 11 일; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일

* 부산대학교 대학원 지능기계공학과
교신저자: 부산대학교 컴퓨터정보통신 연구소
yilee4@pnu.edu Tel (051) 510-2492
** 부산대학교 기계공학부

이는 마찰현상의 비선형성에 기인한다.

비선형 마찰인자 중의 하나인 쿨롱 마찰은 시스템의 움직임이 시작될 때 접촉 표면의 상대운동에 반하는 정적 마찰(static friction)로 설명되어진다. 그리고 고정밀도 서보 시스템의 성능에 영향을 미쳐 위치 오차와 느린 응답의 원인이 된다. 이러한 원인을 저감시키고, 외적 환경에 민감한 마찰토크를 공칭 마찰 토크 값으로 보상하는 것에는 한계를 가지고 있기 때문에 쿨롱 마찰토크를 실시간 추정하였다. 이는 쿨롱 마찰이 마찰로 인한 시스템의 부정적 측면에 가장 큰 영향을 미치는 요인이기 때문이다. 쿨롱 마찰 추정기는 오차 동역학식의 점근적 안정성을 보장하는 Lyapunov 안정도 조건식으로부터 유도되었다.⁴

위치 추적을 위한 제어기법으로는 강인 제어기법들 중의 하나인 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control ; SMC)와 비교 제어기로 PID 제어가 사용되었다. PID 제어는 설계하기 쉽고 적용하기가 용이하므로 산업현장 등에 광범위하게 사용된다. 그러나 외란이나 잡음 등에 취약한 단점을 가지고 있다. Lyapunov 안정도 조건과 도달법칙으로부터 유도되는 슬라이딩 모드 제어는 강인성을 가지며, 슬라이딩 모드 제어의 최대 단점인 채터링을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.^{5,7} 그리고 설계가 쉽다. 그러나 공칭항 내에 포함되어 있는 외란에 대한 상한 값을 알고 있어야만 사용이 가능하다는 단점이 있다.⁵ 따라서 정밀 위치제어를 위해 외란을 쿨롱 마찰토크로 가정하였다.

본 논문은 정밀 위치 제어를 위하여 해석적으로 규명된 공칭 쿨롱 마찰토크와 추정된 쿨롱 마찰토크가 슬라이딩 모드 제어기의 공칭항 내 외란 값으로 각각 보상될 경우 슬라이딩 모드 제어기법이 우수한 위치 추적 성능을 가지는 것을 실험을 통하여 입증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 1 자유도 시스템의 모델에 대해 기술하였다. 3 장에서는 슬라이딩 모드 제어기 설계, PID 제어기, 쿨롱 마찰 매개변수 추정기 설계에 대해 기술하였다. 4 장에서는 3 장에서 기술된 제어기와 추정기를 이용하여, 해석적으로 구한 공칭 쿨롱 마찰 매개변수와 추정된 쿨롱 마찰 매개변수로 인한 마찰토크를 보상하였을 경우와 보상하지 않았을 경우의 실험결과와 고찰에 대해 기술하였다. 그리고 5 장에서는 결론에 대하여 서술하였다.

2. 시스템 모델링

질량을 가지는 물체와 접촉 바닥 사이에 마찰이 존재하는 1-자유도 운동을 하는 볼스크류 시스템의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 마찰을 고려한 볼스크류 시스템의 간소화된 동역학식은 다음과 같다.

$$J\ddot{\theta} = u - T_f \tag{1}$$

여기서, J (kgm^2)는 볼스크류 시스템의 등가회전 관성모멘트, θ (rad)는 각변위, u (Nm)는 제어입력 토크, T_f (Nm)는 마찰토크를 나타낸다. 그리고 Table 1 은 시스템의 사양을 나타낸다.

식 (1)에서 T_f 를 쿨롱 마찰토크로 고려할 때, 식 (1)은 다음의 상태공간표현 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 = \frac{1}{J}[u - k_C \text{sgn}(\theta_2)] \end{cases} \tag{2}$$

여기서, θ_1 은 각변위, θ_2 는 각속도, k_C 는 쿨롱 마찰토크의 크기를 나타낸다. 그리고 식 (2)에서 제어입력 u 는 다음과 같다.

$$u = \hat{k}_C \text{sgn}(\theta_2) + v \tag{3}$$

여기서 \hat{k}_C 는 추정된 쿨롱 마찰토크이며, v 는 PID 와 슬라이딩 모드 제어입력 항이다.

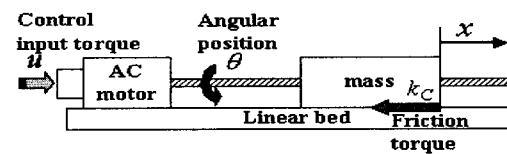


Fig. 1 Schematic diagram of the position control system

Table 1 Ball-screw system specifications

Item	Specification
Total mass	8kg
Outer radius of the screw	12mm
Lead	2mm
Inertia of the ball-screw	$6 \times 10^{-6} \text{kgm}^2$
Inertia of the AC motor	$3 \times 10^{-6} \text{kgm}^2$

3. 보상기 설계

3.1 제어기 설계

본 논문에서 사용된 슬라이딩 모드 제어기법은

시스템의 불확실성에 대해 강인한 제어 기법으로 Lyapunov 안정조건과 도달법칙으로부터 유도된다. 이 기법은 공칭외란에 대한 상한값을 알고 있다면 적용이 가능한 제어 기법이고, 채터링 현상을 현저히 줄일 수 있다.^{5,7}

시스템 식 (1)을 슬라이딩 모드 정규형태(regular form)로 고려하게 되면 식 (2)로 나타난다. 식 (2)의 마찰로 고려된 항을 정합조건(matching condition)을 만족하는 외란 d 라 하면 다음 식과 같다.

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 = 1/J[u - d] \end{cases} \quad (4)$$

그리고 슬라이딩 평면 집합 S 를 다음과 같이 정의한다.

$$S = \{\theta : s(\theta_1, \theta_2, t) = G_1 e_1 + G_2 e_2 = 0\} \quad (5)$$

여기서, G_1 과 G_2 는 설계 매개변수를 나타내며, e_1 과 e_2 는 다음과 같이 각각 각변위와 각속도에 대한 오차를 나타낸다.

$$e_i = \theta_{id} - \theta_i, \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

슬라이딩 모드 제어기 설계의 기본 개념은 시스템의 상태를 집합 S 로 가도록 유도하고, 그곳에 머무르도록 하는 것이다. 슬라이딩 모드를 설계하기 위해 Lyapunov 후보 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V(s) = \frac{1}{2} s^T s \quad (7)$$

Lyapunov 후보 함수의 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{V} = s^T \dot{s} \quad (8)$$

이제 Lyapunov 함수의 바람직한 도함수 형태를 아래와 같이 선정한다.

$$\dot{V} = -s^T Ds - s^T k \operatorname{sgn}(s) \quad (9)$$

여기서, Lyapunov 도함수가 음의 한정(negative definite)이 되도록 k 와 D 를 양의 한정(positive definite)으로 선정한다.

식 (8)과 식 (9)로부터 다음의 도달법칙을 얻을 수 있다.

$$\dot{s} + Ds + k \operatorname{sgn}(s) = 0 \quad (10)$$

s 의 도함수는 다음 식과 같다.

$$\dot{s} = G_1 \dot{e}_1 + G_2 \left\{ \dot{\theta}_{2d} - \frac{1}{J}(u - d) \right\} \quad (11)$$

식 (11)로부터, 조건식 (10)를 만족시키기 위한 제어입력은 다음과 같다.

$$v = v_{eq} + \left(G_2 \frac{1}{J}\right)^{-1} Ds + K \operatorname{sgn}(s) \quad (12)$$

여기서 $K = \left(G_2 \frac{1}{J}\right)^{-1} k \operatorname{sgn}(s)$ 이다. 그리고 식 (12)에서 등가제어입력 v_{eq} 는 다음과 같다.

$$v_{eq} = \left(G_2 \frac{1}{J}\right)^{-1} (G_1 \dot{e}_1 + G_2 \dot{\theta}_{2d}) - G_2 B_2^{-1} d \quad (13)$$

여기서 외란 d 를 명확하게 정의하지 않고는 v_{eq} 를 구하는 것은 불가능하다.⁸

그러나 외란 d 에 대한 상한 값을 알고 있다면, v_{eq} 를 v_{eq}^n 인 공칭 등가제어입력으로 대체할 수 있다. 이때 제어입력 v 는 다음과 같다.

$$v = v_{eq}^n + \left(G_2 \frac{1}{J}\right)^{-1} Ds + K \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

그리고 다음의 Lyapunov 함수의 도함수가 음이 되는 부등식을 만족하면 식 (14)를 사용할 수 있다.

$$\dot{V} = s^T \dot{s} = s^T [G_2 d - Ds - K \operatorname{sgn}(s)] < -\varepsilon \quad (15)$$

여기서, ε 은 양의 작은 실수이다. 식 (15)가 만족 되면 시스템의 상태는 유한시간 이내에 슬라이딩 평면에 도달하여 슬라이딩 모드가 일어나고 그 면에 계속해서 머무르게 된다. 식 (15)로부터 다음 최종 조건식을 얻게 되고, D 와 K 는 다음의 조건식을 만족하면 Lyapunov 도함수는 음이 된다.

$$\lambda_{\min}(D) + \lambda_{\min}(k) > \lambda_{\max}(G_2) \delta \|s\|^{-1} + \varepsilon \|s\|^{-2} \quad (16)$$

$$\delta \geq \|d\|_{\max}$$

따라서 도달조건 식 (16)을 만족하는 연속 슬라이딩 모드 제어법칙인 식 (14)는 외란의 상한값만 알면 적용할 수 있다. 이 제어기의 설계변수는 외란의 크기를 고려하는 δ 와 안정한 슬라이딩 모드 동특성을 보장하는 G_1 과 G_2 만 선정하면 된다. 따라서 스위칭 항의 제어게인 k 와 비례항의 제어게인 D 값을 일정 범위 내에서 작은 값으로 선정한다면 강인하고 채터링이 없는 슬라이딩 모드 제어기의 설계가 가능하다.

제안된 슬라이딩 모드 제어기 식 (14)의 특징은 강인항 내의 두 설계 매개변수 k , D 가 서로 상충관계로써 k 의 영향력을 줄이고, D 의 영향력을 높임으로써 채터링을 줄일 수 있다.

슬라이딩 모드 제어 성능과 비교하기 위한 제어기로 다음은 일반적인 PID 제어 법칙 식이다.

$$v(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

여기서 K_P , K_I , K_D 는 설계 매개변수이다.

3.2 쿨롱 마찰 추정기 설계

쿨롱 마찰토크의 추정을 위해 다음의 비선형 추정 식이 선정되었다.^{3,6}

$$\dot{\hat{k}}_C = z - g(|\theta_2|) \quad (17)$$

여기서 z 는 매개변수이다. 식 (2)로부터 비선형 함수인 $g(\theta_2)$ 함수의 선정을 위해 다음의 Lyapunov 후보 함수식이 선정되었다.

$$V = \frac{1}{2} e^2 \quad (18)$$

여기서 $e = k_C - \hat{k}_C$ 이며, 식 (18)의 Lyapunov 도함수 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\dot{\hat{k}}_C (k_C - \hat{k}_C) \\ &= -[\dot{z} - \dot{g}(|\theta_2|) \dot{\theta}_2 \operatorname{sgn}(\theta_2)] (k_C - \hat{k}_C) \end{aligned} \quad (19)$$

Lyapunov 함수의 도함수가 음의 한정 함수로 선정되기 위한 \dot{z} 은 다음과 같다.

$$\dot{z} = \frac{1}{J} \dot{g}(|\theta_2|) [v - \hat{k}_C \operatorname{sgn}(\theta_2)] \operatorname{sgn}(\theta_2) \quad (20)$$

식 (20)의 함수 $\dot{g}(|\theta_2|)$ 이 $0 < \dot{g}(|\theta_2|) < k_{C_{\max}}$ 의 조건을 만족하고, 단조적으로 증가하게 되면 \dot{V} 는 음의 한정이 되고, 고차 동역학에 대해 점근적 안정성을 보장 받게 된다. 따라서 위 조건들을 전제로 하여 비선형 함수 $g(|\theta_2|)$ 에 관한 다음 식이 선정된다.

$$g(|\theta_2|) = \ln \frac{1}{1 + \exp(-|\theta_2|)} \quad (21)$$

식 (19)로부터 다음의 업-데이터 모드가 결정된다.⁴ 식 (22)와 식 (23)에서 α 와 μ 는 설계 매개변수이다. 그리고 식 (21)의 도함수의 값은 0.5 로 구속되어진다.

추정기 식 (22)와 식 (23)은 실제 측정된 각속도, 슬라이딩 모드 제어입력/PID 제어입력을 각각 쿨롱 마찰 추정을 위해 사용한다. Fig. 2 는 쿨롱 마찰 보상을 갖는 슬라이딩 모드 제어 시스템의 블록선도를 나타낸다.

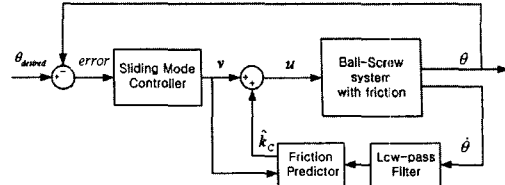


Fig. 2 Block diagram of the control system with adaptive Coulomb friction compensator

$$\hat{k}_C = z - \alpha \ln \frac{1}{1 + \exp(-\mu |\theta_2|)} \quad (22)$$

$$\dot{z} = \alpha \mu \frac{\exp(-|\theta_2|)}{1 + \exp(-|\theta_2|)} [v - \hat{k}_C \operatorname{sgn}(\theta_2)] \operatorname{sgn}(\theta_2) \quad (23)$$

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3 은 실제 실험장치의 사진이다. 위치 검출을 위해 8192 펄스의 분해능을 가지는 엔코더를 사용하였으며, 모터는 100W 급 AC 서보모터가 사용되었다. 그리고 12 bit 분해능의 D/A 변환기가 1 msec 로써 사용되었고 제어 알고리즘은 LabVIEW 기반의 G 언어로 작성되었다. 이 언어는 기존의 텍스트 기반의 C 언어를 라이브러리 단위로 아이콘화 한 그래픽 언어로 배우기 쉽고 이해하기 용이한 장점을 가지고 있다.

단조 증가 입력을 명령입력으로 하고 비례-미분(PD) 제어를 이용하여 실제 볼스크류 시스템이 가지고 있는 쿨롱 마찰토크를 정방향, 역방향으로 각 5 회 실험하였다. 이 때의 토크 값과 속도 값에 관한 그래프를 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4 의 가로축은 시스템이 가지는 쿨롱 마찰토크를 실험한 횟수를 나타내고, 그 부호는 방향을 나타낸다. 규명된 공칭 쿨롱 마찰토크는 $0.02 \operatorname{sgn}(\theta_2)$ 로써 각각의 제어시스템에 피드포워드로 보상하였다. 이때 슬라이딩 모드 제어기의 설계 매개변수 G_1 , G_2 , D , k 는 각각 60, 0.1, 2050, 0.001 이고, PID 제어기의 설계 매개변수 K_P , K_I , K_D 는 각각 0.5, 0.01, 0.001 이었다. 이때 선정된 슬라이딩 모드 제어 계인과 PID 제어 계인은 마찰의 강한 비선형성으로 동일 제어 계인에 대해 동일 반복 응답을 얻기가 힘들었으므로 시행착오 방법으로 그 값이 선정되었다. 이는 강인 제어기법을 사용하게 된 동기가 된다. 그리고 쿨롱 마찰 추정기의 설계

매개변수 α , μ 는 0.1 과 1 로 이 또한 시행착오 방법을 통하여 선정하였다.

Fig. 5 는 마찰을 보상했을 경우 시스템의 응답 속도의 개선 여부를 확인하기 위해 5mm 의 계단 명령입력에 대하여 추정된 마찰토크를 보상하였을 경우와 보상하지 않았을 경우의 시스템 응답이다. 마찰이 보상되었을 경우 시스템의 응답 성능이 개선되었다. 그리고 제안된 슬라이딩 모드 제어 시스템의 추적 성능을 평가하기 위하여 진폭 1mm, 주파수 0.1Hz 의 느린 정현파 명령 입력을 사용하였다. Fig. 7, Fig. 11, Fig. 15 는 각각 마찰을 보상하지 않은, 규명된 쿨롱 마찰토크를 보정한, 그리고 쿨롱 마찰 추정 값을 보정한 슬라이딩 모드 제어 시스템의 위치 오차 값을 나타낸다. 추정된 쿨롱 마찰토크를 보정한 경우의 추적오차 제곱평균값 (Root Mean Square : RMS)이 0.0061mm 로써 Fig. 7 의 0.0197mm 그리고 Fig. 11 의 0.0103mm 에 비해 감소되었다.

Fig. 6, Fig. 10 과 Fig. 14 는 마찰 보상 여부에 따른 PID 제어 시스템의 위치 오차값을 나타낸다. PID 제어 시스템의 오차값의 평균 또한 슬라이딩 모드 제어 시스템과 동일한 조건에서 평가되었다.

Fig. 8, Fig. 12 와 Fig. 16 은 PID 제어 시스템의 제어입력을 나타내고 Fig. 9, Fig. 13, Fig. 17 은 슬라이딩 모드 제어 시스템의 제어입력을 나타낸다. PID 와 SMC 시스템의 제어입력을 비교하면 SMC 가 PID 보다 제어입력에 미소한 진동이 발생하고 있다. 이것은 제안된 SMC 의 강인성을 보장하는 k 와 추정기에 포함된 스위칭 항으로 인함이다. 제어입력의 RMS 값은 Table 3 에 나타내었으며, 고정된 마찰토크를 보상하였을 경우의 RMS 값이 크게 나타난 이유는 마찰의 비선형성과 외적 실험조건 변화 때문이다. 추정된 마찰토크를 보상하였을 경우는 마찰토크를 보상하지 않았을 때, 고정된 마찰토크를 보상하였을 경우보다 작은 제어입력 값이 들어가고 오차 성능면에서도 우수하다.

슬라이딩 모드 제어 시스템과 PID 제어 시스템의 최대 오차값 비교로부터 PID 제어 시스템이 센서 잡음에 민감하다. 따라서 센서 잡음에 영향을 덜 받는 슬라이딩 모드 제어 시스템이 공칭항 내의 마찰로 간주된 구속된 외란 값을 보상한다면 PID 제어 시스템보다 더 좋은 성능을 나타 낼 수 있다. 슬라이딩 모드 제어 시스템과 PID 제어 시스템의 제곱 평균 오차값과 최대 오차값은 Table 2

에 나타내었다.

Table 2 RMS values of SMC v.s. PID control system (unit : mm)

	Error of SMC system		Error of PID control system	
	RMS	e_{max}	RMS	e_{max}
Without friction Comp.	0.0197	0.051	0.0104	0.041
With fixed friction Comp.	0.0103	0.032	0.0093	0.037
With estimated friction Comp.	0.0061	0.018	0.0084	0.033

Table 3 RMS values of SMC input vs. PID control input (unit : Nm)

	Without friction compensator	Fixed friction compensator	Estimated friction compensator
PID	0.263	0.548	0.243
SMC	0.209	0.283	0.054

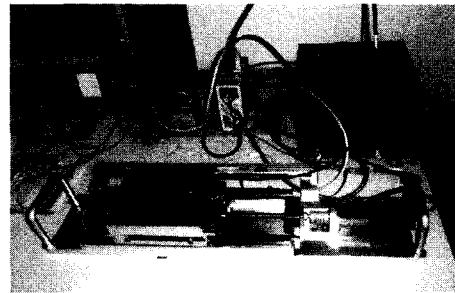


Fig. 3 Ball-screw system with AC servo motor

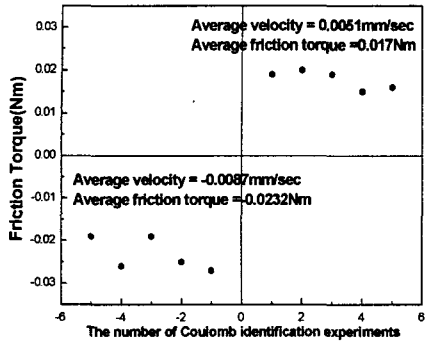


Fig. 4 Distribution of Coulomb friction

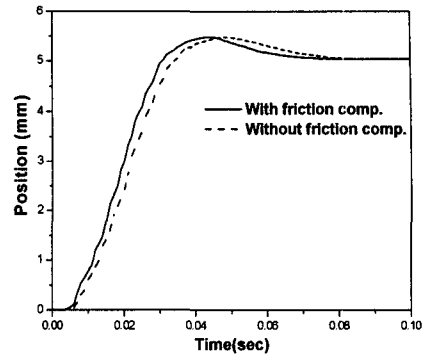


Fig. 5 Step responses of the SMC with/without friction compensator

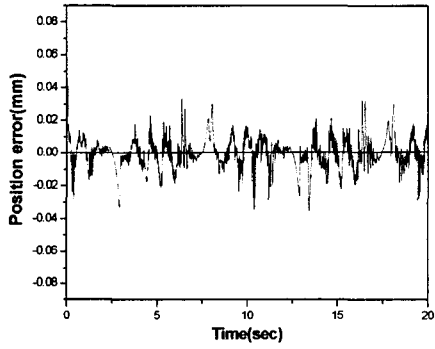


Fig. 6 Position error of the PID control without friction compensator

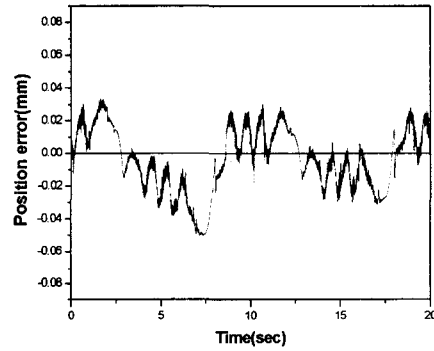


Fig. 7 Position error of the SMC without friction compensator

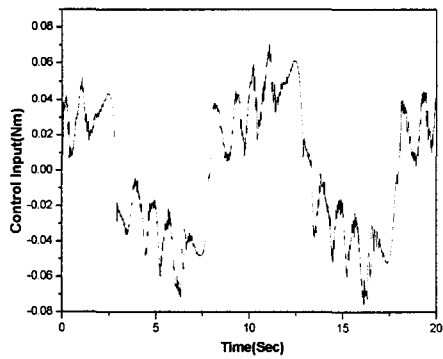


Fig. 8 Control input of PID control without friction

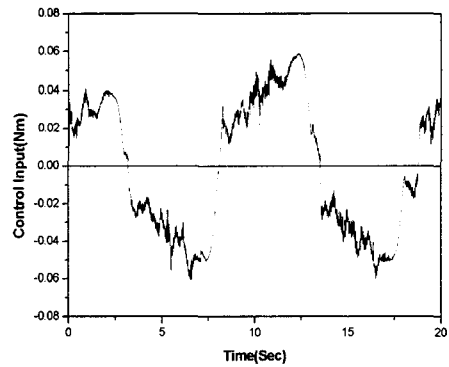


Fig. 9 Control input of SMC without friction

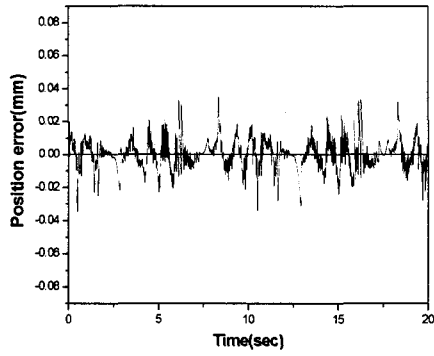


Fig. 10 Position error of the PID control with fixed friction compensator

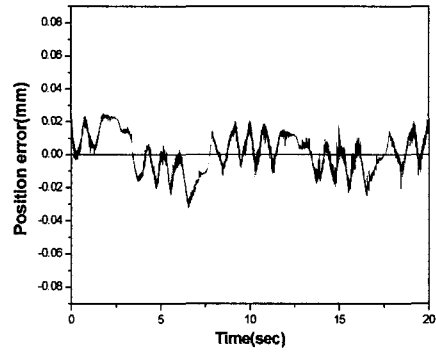


Fig. 11 Position error of the SMC with fixed friction Compensator

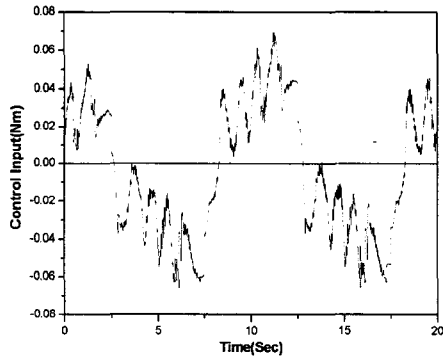


Fig. 12 Control input of PID control with fixed friction

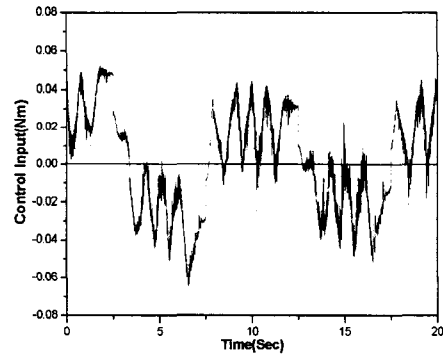


Fig. 13 Control input of SMC with fixed friction

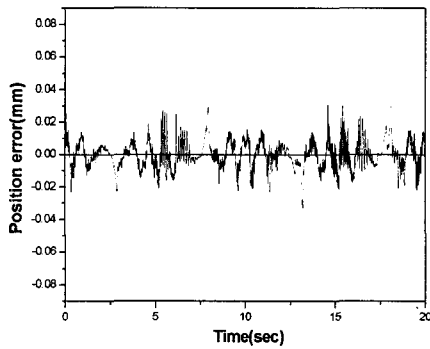


Fig. 14 Position error of the PID control with adaptive friction compensator

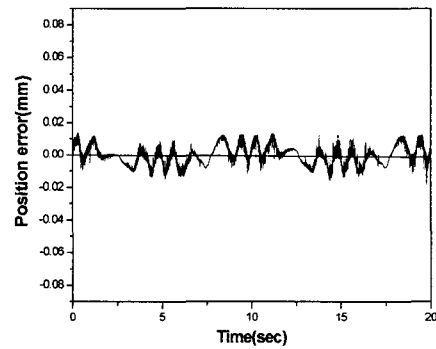


Fig. 15 Position error of the SMC with adaptive friction compensator

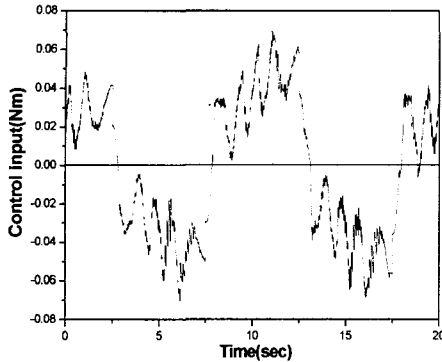


Fig. 16 Control input of PID control with estimated friction

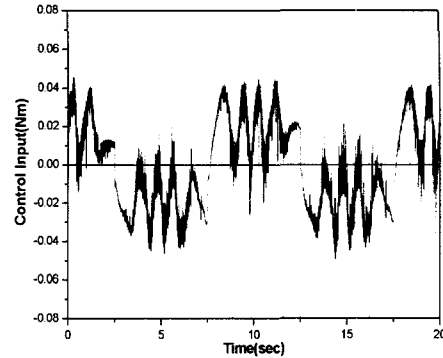


Fig. 17 Control input of SMC with estimated friction

5. 결 론

볼스크류 시스템에 존재하는 쿨롱 마찰을 실시간으로 추정하는 추정기와 간략화된 시스템 모델식의 불확실성을 극복하기 위해 슬라이딩 모드 제어기가 사용되었다. 그리고 그들은 Lyapunov 안정도 이론으로부터 유도되었다. 제안된 시스템의 성능을 확인하기 위해 위치오차에 대해 PID 제어와 비교 실험을 하였다.

마찰로 인한 시스템의 응답속도 개선을 위해 슬라이딩 모드 제어기 내의 외란을 추정된 쿨롱 마찰로 보상하여 응답속도의 향상이 있었다. 그리고 외적 요인에 의해 그 성질이 변하는 마찰 특성상 공칭 쿨롱 마찰을 보상했을 경우 보다 실시간 추정된 쿨롱 마찰을 보상했을 때가 보다 작은 정상상태 오차를 가졌다. 추정된 쿨롱 마찰 보상이 있을 때와 없을 때 슬라이딩 모드 제어 시스템의 추적 성능은 1.7~3.3 배 향상되었다. 그리고 제어입력에 있어서도 향상이 있었다.

참고문헌

1. Popovic, M. R., Friction Modeling and Control, Digital Xerographic Process, 1996.
2. Armstrong, B., Control of Machines with Friction, Kluwer Academic Publishers, 1991.

3. Canudas, C. and Lischinsky, P., "Adaptive Friction Compensation with Partially Known Dynamic Friction Mode," Int. Journal of adaptive control and signal processing, Vol. 11, pp. 65-80, 1997.
4. Yazdizadeh, A. and Khorasani, K., "Adaptive Friction Compensation Based on the Lyapunov Scheme," IEEE International Conference on Control Applications, pp. 1060-1065, 1996.
5. Lee, K. J., "Design of the Chattering Free PD-SM Hybrid Control," Doctoral Dissertation, Pusan National University, 2002.
6. Utkin, V. I. and Shi, J., "Integral sliding mode in systems operating under uncertainty conditions," Proc. IEEE Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, pp. 4591-4596, 1996.
7. 이규준, 김상환, 김종식, "반-연속 슬라이딩 모드 제어기의 설계 및 적용(자기부상 시스템의 제어)," 한국정밀공학회지, Vol. 19, No. 8, pp. 38-46, 2002.
8. Erbatur, K., Kaynak, M. O. and Sabanovic, A., "A Study of Robustness Property of Sliding-Mode Controllers : A Novel Design and Experimental Investigation," IEEE Trans. on Indus. Elect., Vol. 46, No. 5, pp. 1012-1018, 1999.