

비선형 마찰을 고려한 유압비례제어 시스템의 적응 이산시간 슬라이딩모드 추적 제어기 설계

Design of Adaptive Discrete Time Sliding-Mode Tracking Controller for a Hydraulic Proportional Control System Considering Nonlinear Friction

박형배
H. B. Park

Key Words : Adaptive Discrete Time Sliding Mode Tracking Controller(적응 이산시간 슬라이딩모드 추적제어기), Nonlinear Friction Characteristic(비선형 마찰특성), Sliding Function(슬라이딩 함수), Modeling Error(모델링오차), System Uncertainty(시스템 불확실성), Diophantine Equation(디오판틴 방정식).

Abstract : Incorections between model and plant are parameter, system order uncertainties and modeling error due to disturbance like friction. Therefore to achieve a good tracking performance, adaptive discrete time sliding mode tracking controller is used under time-varying desired position. Based on the diophantine equation, a new discrete time sliding function is defined and utilized for the control law. Robustness is increased by using both a recursive least-square method and a sliding function-based nonlinear feedback. The effectiveness of the proposed control algorithm is proved by the results of simulation and experiment.

1. 서 론

서보 시스템에서 모델링 오차는 추적제어의 성능을 상당히 저하시키며, 전체시스템을 불안정하게 만들 수도 있다. 이러한 모델과 플랜트간의 불일치는 시스템의 비선형적인 요소들의 영향에 의하여 나타난다. 특히 비선형 마찰력인 정지마찰과 쿨롱마찰은 정상상태 오차를 유발하고 동적인 추종성을 저하시키므로 제어시스템의 성능을 좌우하는 주요한 요소이다. 이에 관한 연구로서 Ohkawa¹⁾는 정지마찰력과 쿨롱마찰력을 보상신호로써 제거하는 적응제어 방식을 도입하였다. Canudas²⁾는 DC모터에서의 적응마찰보상에 대해 연구하였다. Kung³⁾은 비선형성을 포함한 선형시스템의 이산시간 적응제어에 대해 연구하였다. 최근 국내의 연구동향으로서 Cho⁴⁾는 슬라이딩 평면을 이용하여 모델링 오차를 고려한 강인한 이산시간 추적제어에 대해 연구하였다. 본 논문에서는 제어대상 플랜트로써 비례방향제어 밸브와 편로드 유압실린더로 구성된 유압 비례위치 제어시스템을 구성하고, 미지의 비선형 마찰과 모델

링오차를 동시에 고려한 적응 슬라이딩모드 추적제어 시스템을 설계하였다.

2. 시스템 구성

유압비례제어 시스템의 모델은 선형동적시스템과 비선형 마찰인 정지마찰과 쿨롱마찰, 그리고 모델링 오차가 포함된 이산시간 모델로 Fig. 1과 같이 구성한다. 이때 이산시간 모델링 식은 다음과 같다.

$$A(z^{-1})y(k) - z^{-d}B(z^{-1})m(k) + A(z^{-1})\eta(k) \quad (1)$$

여기에서 $y(k)$ 는 측정된 출력 값이고, $m(k)$ 는 비선형 마찰특성이 포함된 제어입력으로서 다음과 같이 정의된다.

$$m(k) = u(k) + f_s h(k)j(k) + f_c i(k) \quad (2)$$

여기에서 f_s 는 정지마찰 보상값이고, f_c 는 쿨롱마찰 보상값이다.

- $\eta(k)$ 는 모델링 오차를 표현한다.
- $A(z^{-1})$ 와 $B(z^{-1})$ 는 다음과 같이 백워드 시프트 작동기의 다항식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n} \\
 B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}
 \end{aligned} \quad (3)$$

접수일 : 2005년 9월 30일
박형배(책임저자) : 경기공업대학 자동차과 교수
E-mail : hbpark@kinst.ac.kr Tel. 031-496-4733

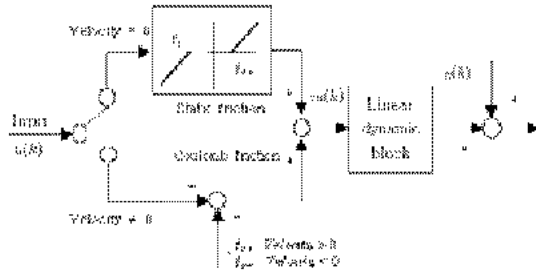


Fig. 1 The model of plant

그리고 모델링 오차의 수렴성을 유도하기 위하여 다음과 같이 가정한다. 단, 지연스텝(d) 뿐 만 아니라 n과 m은 알고 있는 값으로 가정한다.

A1 : $A(z^{-1})$ 와 $B(z^{-1})$ 는 coprime이다.

A2 : $|\eta(k)| \leq \mu m(k)$, 여기에서 μ 는 양의 스칼라 값이고, $m(k)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$m(k) = \sigma m(k-1) + |u(k-1)| + |y(k-1)|, \quad 0 < \sigma < 1. \quad (4)$$

A3 : $\|\theta_1\| \leq \rho_1$, 여기에서 $\theta_1 = [a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m, b_{0f_s}, \dots, b_{mf_s}, b_{0f_c}, \dots, b_{mf_c}]$ 이고, ρ_1 은 양의 스칼라 값이다.

$$y(k) = \theta_1^T \phi_1(k) + \eta_1(k) \quad (5)$$

$$\eta_1(k) = A(z^{-1})\eta(k) \quad (6)$$

그때 A2 - A3 와 식 (4)에 의하여 모델링 오차의 수렴성을 다음과 같이 유도하였다.

$$|\eta_1(k)| = |A(z^{-1})\eta(k)| \leq \nu_1 \mu m(k) \quad (7)$$

여기에서 $\nu_1 = 1 + \sigma^{-n} \rho_1$ 이다.

3. 강인 이산시간 추적제어기 설계

안정한 폴/제로 상쇄(Pole/zero cancellation)로써 완벽한 추적제어기를 얻기 위하여 본 논문에서는 폴/제로 상쇄와 이산시간 슬라이딩 제어를 조합한 강인 이산시간 추적제어를 적용하였다. 비선형 마찰인 데드존과 외란을 적응보상하고 모델링 오차를 고려하여 추적제어 입력을 유도하기 위한 원하는 극점을 설정하기 위하여 다음과 같이 Diophantine 방정식을 도입하였다.

$$D_1(z^{-1}) - A(z^{-1})S_1(z^{-1}) + z^{-d}R_1(z^{-1}) \quad (8)$$

식(8)과 식(1)로부터 다음과 같이 방정식을 유도할

수 있다.

$$D_1(z^{-1})y(k) - \theta_2^T \phi_2(k-d) + \eta_2(k) \quad (9)$$

그리고 $\eta_2(k)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_2(k) = \theta_2^T \phi_2(k-d) \quad (10)$$

그리고 $|\theta_2^T \phi_2(k-d)|$ 와 $|\eta_2(k)|$ 의 경계를 유도하기 위하여 다음과 같은 가정이 필요하다.

A4 : $\|\theta_d\| \leq \rho_2$, 여기에서 $\theta_d^T = [s_1, \dots, s_{d-1}, r_0, \dots, r_{n-1}]$ 이고, ρ_2 은 알고 있는 양의 스칼라 값이다.

$$[\text{제안}] \quad |\theta_2^T \phi_2(k-d)| \leq K_{ml} \sigma^{1-d} m(k) \quad (11)$$

여기에서 $r = \max \deg(n, m+d)$,

$K_{ml} = 3\rho_1(m+1) + n\rho_2 + 3\rho_1\rho_2(m+1)(d-1)$ 이다. 가정 A4에 의하여 모델링 오차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|\eta_2| = |A(z^{-1})S_1(z^{-1})\eta(k)| \leq \nu_2 \mu m(k) \quad (12)$$

강인 이산시간 추적제어기 설계에서 슬라이딩평면은 다음과 같이 정의하였다.

$$s(k) = D_1(z^{-1})[y(k) - y_m(k)] \quad (13)$$

모델링 오차 $\eta_2(k)$ 를 보상하기 위해 $s(k)$ 를 제어루프를 추가하였다. 경계층 내부에서 뿐 만 아니라 경계층 외부의 경우에도 제어법칙은 다음과 같이 수정된다.

$$u(k) = \frac{1}{b_0} [s(k) + D_1(z^{-1})y_m(k+d) - \bar{\theta}_2^T \bar{\phi}_2^T(k) - K \text{sat}\left\{\frac{s(k)}{\Phi}\right\}] \quad (14)$$

여기에서

$$\text{sat}\left\{\frac{s(k)}{\Phi}\right\} = \begin{cases} +1 & \text{for } \Phi \leq s(k) \\ \frac{s(k)}{\Phi} & \text{for } -\Phi < s(k) < \Phi \\ -1 & \text{for } s(k) \leq -\Phi \end{cases} \quad (15)$$

$$\theta_2^T = \{b_0, \bar{\theta}_2^T\}, \quad \phi_2^T = \{u(k), \bar{\phi}_2^T(k)\}$$

$s(k) = 0$ 주위에서 경계층의 크기는 Φ 로 결정한다. $s(k)$ 는 Fig. 2에 제시된 것과 같은 궤적으로 나타난다. 강인 이산시간 추적제어시스템의 전 블록 다이어그램은 Fig. 3 안에 보여준다. 식 (11), (12)을 통해 다음을 알 수 있다.

$$s(k+d) - s(k) + \eta_2(k+d) - K \text{sat}\left\{\frac{s(k)}{\phi}\right\} \quad (16)$$

[이론 1] 강인 이산시간 추종제어 시스템의 강인 안정성 플랜트 (1), 제어기 (14)로 구성된 강인 적응 이산시간 추종제어 시스템은 $|s(k)| > \phi$ 일 때 $|s(k)|$ 가 감소하며, s 의 정상상태 값은 ϕ 에 의해 제한된다는 사실을 통해 안정하게 된다.

식 (1)인 플랜트와 식 (14)의 제어기로 구성된 적응 이산시간 슬라이딩 모드 추종제어 시스템은 $|s(k)| > \phi$ 일 때는 $|s(k)|$ 가 감소하고, s 의 정상상태 값이 ϕ 안에 존재하면 안정하다.

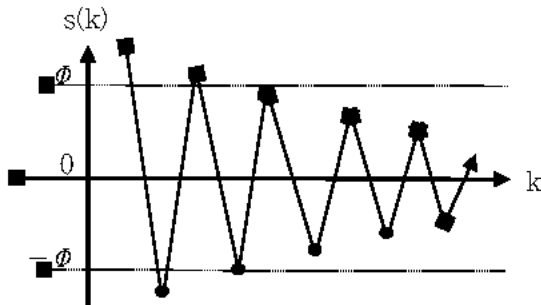


Fig. 2 Sliding surface with boundary layer

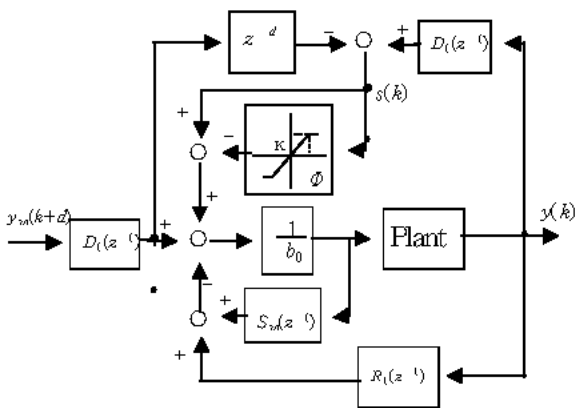


Fig. 3 Robust discrete time tracking control system

[증명] 다음과 같은 이산 리아프노프 함수를 선정한다.

$$V(k) = |s(k)| \quad (17)$$

여기에서 $|s(k)|$ 은 $s(k) = 0$ 인 슬라이딩 평면까지의 거리이다. 그 때 아래와 같은 차분방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V_i(k+d) &= V_i(k+d) - V_i(k) \quad i=1, 2, \dots, d \\ &= |s_i(k+d)| - |s_i(k)| \\ &= |s_i(k) + \eta_2(k+d) - K \text{sat}\{s_i(k)\}| \\ &\quad - |s_i(k)| \end{aligned} \quad (18)$$

식 (12)에서 모델링 오차의 상한 치를 상수라고 가정한다.

$$|\eta_2(k)| \leq \nu_2 \mu m(k) \leq F_2 \quad (19)$$

여기에서 F_2 는 제한된 스칼라이다. 따라서 K 에 대한 두 가지 조건에 의해 식(18)을 음의 값을 갖는다.

$$K > F_2, K > 2|s_i(k)| - F_2 \quad (20)$$

만약 K 를 다음과 같이 선정하면

$$K = F_2 + \eta_0 \quad (21)$$

따라서 식(17)은 다음과 같은 영역 내부에서의 리아프노프 함수가 된다.

$$|s_i(k)| > F_2 + \frac{\eta_0}{2} \quad (22)$$

경계층 내부에서 s 의 거동은 다음과 같다.

$$s(k+d) - \left(1 - \frac{K}{\phi}\right)s(k) + \eta_2(k+d) \quad (23)$$

경계층 두께 ϕ 는 식 (23)이 입력 $\eta_2(k+d)$ 와 고유치를 포함한 1차 필터의 특성을 보이도록 선택한다.

$$1 - \frac{K}{\phi} = \lambda \quad (24)$$

식 (21)과 식 (24)에 의해 경계층 두께 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{F_2 + \eta_0}{1 - \lambda} \quad (25)$$

안정성의 측면에서 다음과 같은 관계를 만족해야 한다.

$$\left|1 - \frac{K}{\phi}\right| < 1 \quad (26)$$

안정한 고유치 λ 에 대한 정상상태 해는 다음과 같이 된다.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} s_i(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{j=0}^{\infty} \lambda^j \eta_2(k-j \cdot d) \quad (27)$$

식 (27)에서 다음과 같은 조건을 유도할 수 있다.

$$\left| \lim_{k \rightarrow \infty} s(k) \right| \leq \{1 + |\lambda| + |\lambda|^2 + \dots\} F_2 \quad (28)$$

$$\left| \lim_{k \rightarrow \infty} s(k) \right| \leq \frac{1}{1 - |\lambda|} F_2 < \frac{K}{1 - |\lambda|} \quad (29)$$

$$\left| \lim_{k \rightarrow \infty} s(k) \right| < \phi \quad (30)$$

4. 적응 이산시간 슬라이딩모드 추적제어기

실시간에서 모델링 오차와 미지의 비선형 마찰을 포함한 플랜트를 제어하기 위하여 파라미터 적응알고리즘을 적용해야 한다. 이때 적응알고리즘과 제어법칙을 결합하여 추정된 파라미터와 실제 파라미터 간의 오차의 노름(norm)이 각 스텝마다 감소하여야 안정된 제어가 구성된다. 추정 알고리즘은 다음과 같은 projection algorithm을 사용하였다.⁶⁾

$$\bar{\theta}_2(k) = \bar{\theta}_2(k-d) + \frac{\phi(k-d)\phi^T(k-d)\bar{\theta}_2(k-d)}{c + \phi^T(k-d)\phi(k-d)} \quad (31)$$

그리고 모델과 플랜트 간의 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(k) &= \theta_2^T(k)\phi_2(k-d) + \eta_2(k) - \bar{\theta}_2^T(k-d)\phi_2(k-d) \\ &\quad - \bar{\theta}_2^T(k-d)\phi_2(k-d) + \eta_2(k) \\ &\quad - s(k) - \lambda \Phi \text{sgn}\{s(k-d)\} \end{aligned} \quad (32)$$

식 (31) ~ (32)로 정의된 추정 알고리즘을 플랜트에 적용하면 다음과 같은 특성을 가지게 된다.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\bar{\theta}_2(k) - \bar{\theta}_2(k-1)\| = 0 \quad (33)$$

이 장에서의 제어입력 (14)은 추정치 파라미터가 포함된 형태로써 경계층 내부에서는 식 (34)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u(k) &= \frac{1}{\bar{b}_0(k)} [s(k) + D_1(z^{-1})y_m(k+d) \\ &\quad - \bar{\theta}_2^T(k)\bar{\phi}_2^T(k) - K \text{sat}\left\{\frac{s(k)}{\Phi}\right\}] \end{aligned} \quad (34)$$

그리고 경계층 외부에서는 식 (35)와 같은 형태로 정의된다.

$$\begin{aligned} u(k) &= \frac{1}{\bar{b}_0(k)} [s(k) + D_1(z^{-1})y_m(k+d) \\ &\quad - \bar{\theta}_2^T(k)\bar{\phi}_2^T(k) + \lambda \Phi \text{sgn}\{s(k)\}] \end{aligned} \quad (35)$$

식 (35)을 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} D_1(z^{-1})y_m(k+d) \\ &= -\lambda \Phi \text{sgn}\{s(k)\} + \bar{b}_0(k)u(k) + \bar{\theta}_2^T(k)\bar{\phi}_2^T(k) \\ &= -\lambda \Phi \text{sgn}\{s(k)\} + \bar{\theta}_2^T(k)\phi_2(k) \end{aligned} \quad (36)$$

여기에서 식 (9)와 식 (36)을 통하여 s 의 거동을 구하면 다음과 같다.

$$s(k+d) - \lambda \Phi \text{sgn}\{s(k)\} + \bar{\theta}_2^T(k)\phi_2(k) + \eta_2(k+d) \quad (37)$$

식 (37)과 추정 알고리즘을 조합하여 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{[\bar{\theta}_2^T(k-d)\phi_2(k-d) + \eta_2(k)]^2}{\phi_2^T(k-d)\phi_2(k-d) + c} = 0$$

따라서

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{[s(k) - \lambda \Phi \text{sgn}\{s(k-d)\}]^2}{\phi_2^T(k-d)\phi_2(k-d) + c} = 0 \quad (38)$$

Key technical lemma⁶⁾에서 조건 (1)을 만족하기 위해 $p(k) - s(k) - \lambda \Phi \text{sgn}\{s(k-d)\}$, $b_1(k) - c - 0.95$, $b_2(k) - 1$, 그리고 $\sigma(k) - \phi_2(k-d)$ 이 되어야 한다. 조건(2) 또한 위와 같은 $b_1(k)$, $b_2(k)$ 의 선택을 통해 만족할 수 있다. 조건 (3)을 만족하기 위해 $p(k)$ 가 $\phi(k-d)$ 을 선형적으로 제한해야 한다.

이를 증명하기 위해 먼저 $y(k)$ 가 $\phi(k-d)$ 를 선형적으로 제한함을 보인다. 여기서 $\phi(k-d)$ 는 $k-n+1 \leq i \leq k$ 에 대한 출력 $y(i)$ 와 $k-m-d+1 \leq i \leq k$ 에 대한 제어입력 $u(i)$ 의 함수로 구성되어 있다. 파라미터 추정치는 파라미터 추정자의 제한특성에 기인하여 제한되어 있으므로, $y(i)$ 와 $u(i)$ 또한 (제안)에서 나타낸 바와 같이 제한되어 있다. $p(k)$ 가 선형적으로 $y(k)$ 를 제한함을 증명하기 위해 3장에서 보인 슬라이딩평면에서의 함수 $s(k)$ 는 제한되어 있고, $y_m(k)$ 도 제한되어 있다고 가정할 수 있으므로 $s(k)$ 는 선형적으로 $y(k)$ 를 제한할 수 있다. 따라서 $p(k)$ 는 선형적으로 $y(k)$ 를 제한한다. key technical lemma의 모든 조건이 만족하므로 $\phi(k-d)$ 가 모든 k 에 대해 제한되어 있다는 조건과 다음의 조건을 만족하게 된다.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} [s(k) - \lambda \Phi \text{sgn}\{s(k-d)\}] = 0 \quad (39)$$

이 결과를 요약하면 다음 이론과 같다.

[이론2] 강인 적응 이산시간 추종제어 시스템의 안정성: 플랜트 (1)과 제어기 (14), 그리고 적응제어 법칙 (31) ~ (32)로 구성된 강인 적응 이산시간 추종제어 시스템은 $|s(k)| > \Phi$ 일 때 $|s(k)|$ 가 감소하며, s 의 정상상태 값은 Φ 에 의해 제한된다는 사실을 통해 안정하게 된다.

5. 실험장치 및 결과

5.1 실험방법

본 연구에서 실험에 사용된 유압비례 위치제어 시스템

템은 펌로드 유압 실린더, 비례방향 위치제어밸브, DSP 보드, 그리고 개인용 컴퓨터로서 구성되어 있다. 유압시스템의 적응제어를 실시간으로 구현하고 응답특성을 해석하기 위해서는 빠르고 효율적인 연산시스템이 필요하다. 연산 장치의 성능뿐만 아니라, I/O 장치, 데이터 전송라인 등의 성능도 좋아야 한다. 최근 빠른 DSP 칩의 개발은 이러한 시스템을 원활하게 구성하는 원동력이 되고 있다.

Table 1 The Specification of the Hydraulic system

Components	Specification
Hydraulic Pump	$Q_{max} - 14 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{min}$, $P_{max} - 16,000 \text{ KPa}$
Hydraulic Cylinder	Piston area - $8.0384 \times 10^6 \text{ m}^2$ Stroke - 0.020m
Proportional control valve	$P_{max} - 16,000 \text{ KPa}$, $Q - 14 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{min}$
Relief valve	$P_{max} - 16,000 \text{ KPa}$, $P_{set} - 6,000 \text{ KPa}$
filter	Mesh size (5 μm)
LVDT	Stroke - 0~0.20 m, Voltage - 0~10V

5.2 실험결과

본 연구에 이용한 유압 비례제어 시스템에 존재하는 마찰력을 측정된 결과는 Fig. 4와 같다. 이 실험결과를 통하여 속도가 대략 8 mm/sec 이하에서는 정지마찰력이 우세하고, 그 이상의 속도에서는 쿨롱 마찰과 속도에 비례하는 점성마찰의 영향이 우세함을 알 수 있다. 적응 이산시간 슬라이딩 모드 추적제어 실험결과는 비선형마찰을 고려하지 않는 경우와 고려한 경우로 나누어서 실험한 결과를 다음과 같이 도시하였다. 비선형 마찰력을 고려하지 않는 경우의 실험결과는 Fig. 5와

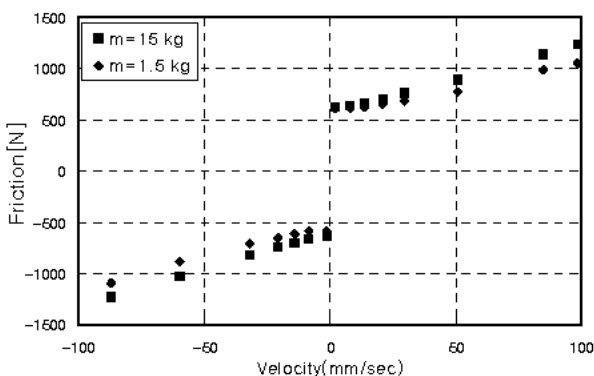


Fig. 4 Friction force behavior : Static, coulomb and viscous friction force

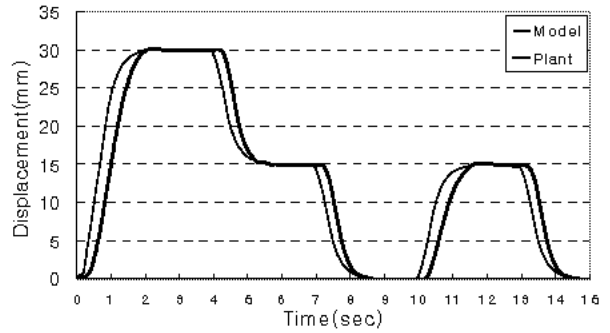
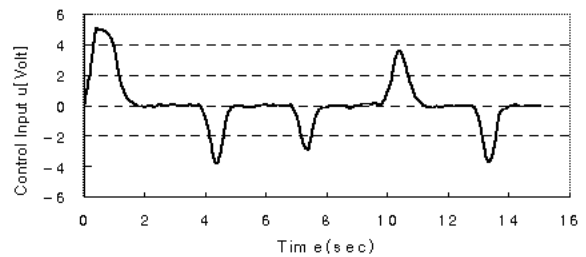
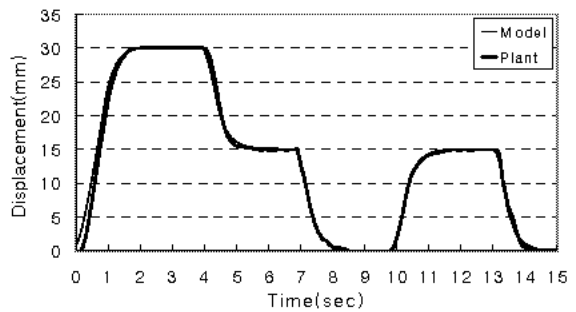
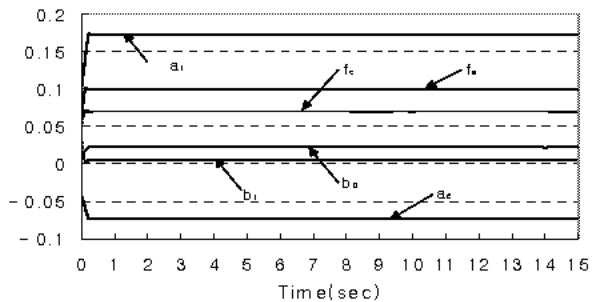


Fig. 5 Adaptive Discrete-Time Sliding-Mode Tracking Control results without friction compensation



(a) Displacement and control input



(b) On-line parameter estimation.

Fig. 6 Adaptive Discrete-Time Sliding-Mode Tracking Control results with friction compensation

같이 마찰에 의한 위치 추적 오차가 크게 발생함을 알 수 있었고, 비선형 마찰력을 고려한 경우의 실험결과는 Fig. 6과 같이 정지마찰보상을 통하여 정상상태에서 부하가 일정한 위치에 있을 때의 위치오차가 줄고, 쿨롱

마찰 보상에 의하여 질량부하가 운동 중에 있을 때의 위치오차가 개선됨으로서 전체적으로 시스템 응답특성이 매우 향상됨을 알 수 있다. 이 때 파라미터 값들도 일정하게 수렴하는 것을 Fig. 6 (b)로부터 알 수 있다. 그리고 불확실한 파라미터 안에서 경계층 값의 변화에 따르는 모델과 플랜트간의 출력오차는 Fig. 7에 도시되어 있다. 경계층 값이 클수록 시스템이 안정화됨을 알 수 있다.

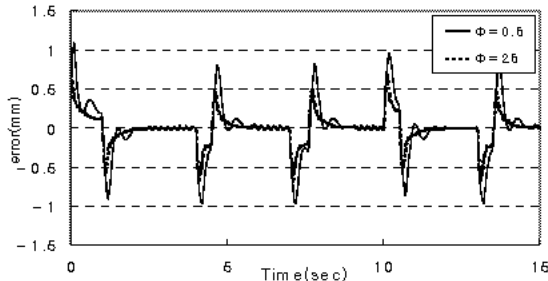


Fig. 7 Output error according to the boundary layer under parameter uncertainty

6. 결 론

본 논문에서는 유압 비례 위치제어시스템의 실린더·질량부하계에 존재하는 미지의 비선형 마찰력과 모델링 오차를 개선하기 위하여 적응 이산시간 슬라이딩모드 추적제어기를 구성하고, 유압실린더·부하계에 존재하는 정지와 쿨롱마찰력을 측정하여 파라미터 추정 알고리즘의 초기값 설정에 이용하였다.

적응 이산시간 슬라이딩 모드 추적제어를 실험한 결과는 다음과 같다. 비선형 마찰을 보상하지 않고 모델링 오차만을 고려한 경우는 위치 추적 오차가 크게 발생함을 알 수 있었고, 마찰력과 모델링 오차를 모두 보상한 경우는 정지마찰보상을 통하여 정상상태에서 부하가 일정한 위치에 있을 때의 위치오차가 줄고, 쿨롱마찰 보상에 의하여 질량부하가 운동 중에 있을 때의 위치오차가 개선됨으로서 전체적으로 시스템 응답특성이 매우 향상됨을 알 수 있다. 이 때 파라미터 값들도 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있었다. 그리고 불확실한 파라미터 안에서 경계층 값의 변화에 따르는 모델과 플랜트간의 출력오차는 경계층 값이 클수록 시스템이 안정화됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 相良·大川, 1993, “適應制御法を用いた空壓モータの速度制御” 日本機械學會論文集, 59卷 565号, pp. 2707~2711.
2. Canudas de Wit.C., K. J. Åström and K. Braun, 1987, “Adaptive Friction Compensation in DC-Motor Drives”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 6, pp. 681~685.
3. M. C. Kung and B. F. Womack, 1984, “Discrete Time Adaptive Control of Linear Systems with Preload Nonlinearity”, Automatica, Vol. 23, No. 15, pp. 477~479.
4. S. H. Cho, 1995, “Robust Discrete Time Tracking Control Using Sliding Surface”, KSME Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 80~90.
5. I. D. Landau and R. Lozano, 1981, “Unification and Evaluation of Discrete Time Explicit Model Reference Adaptive Design”, Automatica, Vol. 17, No. 4, pp. 593~611.
6. G. C. Goodwin and K. S. Sin, 1984, “Adaptive Filtering Prediction and Control”, Prentice-Hall.