시간지연 시스템에서의 불확실성 추정을 갖는 슬라이딩 모드제어

Sliding Mode Control with Uncertainty Adaptation for Uncertain Input-Delay Systems

노 영 훈, 오 준 호
(Young-Hoon Roh and Jun-Ho Oh)

Abstract : This paper deals with a sliding mode control with uncertainty adaptation for the robust stabilization of input-delay systems with unknown uncertainties. A sliding surface including a state predictor is employed to compensate for the effect of the input delay. The proposed method does not need *a priori* knowledge of upper bounds on the norm of uncertainties, but estimates those upper bounds by adaptation laws based on the sliding surface. Then, a robust control law with the uncertainty adaptation is derived to ensure the existence of the sliding mode. A numerical example is given to illustrate the design procedure.

Keywords : uncertain input-delay systems, sliding mode control, uncertainty adaptation, robust stabilization, predictor-based control

I. 서론

많은 시스템에서 빈번하게 나타나는 시간지연 현상은 시스템을 구성하는 요소자체에서도 존재하지만 요소들 사이의 물질 및 신호의 이동이나 원거리 통신등에서 발생한다. 이러한 시간지연은 시스템의 성능저하나 불안정의 원인이 될 뿐 만 아니라 피드백 제어 시 고 이득(high gain) 사용 및 제어대역(bandwidth)의 범위를 제한하는 등의 단점을 야기한다. 그리고 기존의 제어기법 들을 시간지연 시스템에 적용 시 제어기 설계 및 안정성 해석 등이 매우 복잡하고 어렵게 된다. 그래서 시간지연 보상기를 갖는 제어기법(predictor-based control)이 많은 연구에서 제안 되었다[2][7][9], 시간지연 보상기를 갖는 제어기의 특징은 이 제어기에 의해 폐 루프 시스템(closed-loop system)상의 시간지연 변수가 제거되어 지연이 없는 시스템(delay-free system)으로 변환 되므로 기존의 설계기법 들을 적용하기가 비교적 용이하지만 불확실성(uncertainty)에 대한 체계적인 강인성 연구 및 안정성 해석이 미흡한 실정이다.

최근에 이러한 시간지연 및 불확실성을 모두 갖는 시스템의 강인제어 및 안정성 해석에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 리아프노프 안정성 해석기법에 의한 비 메모리 상태궤환 제어(Memoryless state feedback control)를 적용한 강인 제어에 대한 연구에 관심이 모아지고 있다. 연구 내용으로는, Riccati 방정식 기법[11], 선형 행렬 부등식(Linear Matrix Inequality) 기법[8], H_∞ 제어기법[14]등의 방법들이 제안되었다. 그러나 이러한 방법들은 주로 상태변수 지연을 갖는 시스템을 다루었으며 입력변수 지연을 갖는 시스템에 적용 시 폐 루프 상에 시간지연 항이 직접 존재 하므로 안정성 해석이 어렵게 된다.

슬라이딩모드 제어기는 빠른 응답특성과 불확실성에 대한 둔감성(insensitivity)등의 장점때문에 강인 제어기로서 많은 연구가 이루어졌다 [1][5][13]. 그리고 상태변수 지연(state delay)을 갖는 시스템에 대한 비메모리 상태 궤환 제어기법을 사용한 슬라이딩 모드 제어기가 제안 되었다[6][12]. 이러한 방법들 또한 입력지연을 갖는 시스템에 적용하기에는 적합하지 않다. 그래서 입력지연(input delay) 및 불확실성을 갖는 시스템에 대한 강인제어를 위해 입력지연 보상기(predictor)를 갖는 슬라이딩 평면이 제안되고 이를 토대로 슬라이딩모드 제어기 및 안정성 조건을 도출하였다[10][15]. 일반적으로 슬라이딩모드 제어기는 불확실성을 극복하기 위한 불연속 제어기(discontinuous control) 혹은 스위칭 제어기에 필요한 불확실성의 노옴(norm)의 상계(upper bound)를 요구한다. 실제 시스템에서는 이러한 불확실성의 상계(upper bound)에 대한 정보를 얻기가 용이하지않다. 그래서 이러한 문제를 다루기 위해 불확실성 추정기법을 적용한 슬라이딩모드 제어기법이 제안되었다[13]. 그러나 이 방법은 시간지연이 없는 시스템에는 효과적이지만 시간지연이 존재하는 시스템에 적용하기에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 불확실성의 노옴(norm)의 상계(upper bound)를 알 수 없는 입력지연 시스템의 강인제어를 위한 슬라이딩모드 제어기에 대해 다루고자 한다. 이를 위해 본 논문에서는 입력지연 보상기를 갖는 슬라이딩평면(sliding surface)을 제안하고 이 평면에 기초한 적응제어 기법을 적용하여 불확실성의 상계(upper bound)를 추정하였다. 그리고 이 상계(upper bound)를 이용한 슬라이딩모드 제어법칙을 유도하고 이 제어기에 의해 입력지연 시스템이 항상 그 슬라이딩평면 위

접수일자 : 1999. 9. 13., 수정완료 : 2000. 6. 27.
노영훈 : LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소
오준호 : 한국과학기술원 기계공학과

에 존재함을 증명하였다. 그리고 하나의 예제 및 수치적 모의실험을 통해 제안한 방법을 검증하고자 하였다.

II. 불확실성을 갖는 시간 지연 시스템

다음과 같은 불확실성을 갖는 시간지연 시스템을 정의한다

$$\begin{aligned}&\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-\tau) + f_0(x(t),t) + f_1(x(t-\tau),t)\\&x(0) = x^0, x_0(\theta) = \phi(\theta), u_0(\theta) = v(\theta)\\&x_t(\theta) = x(t+\theta), u_t(\theta) = u(t+\theta), -\tau \le \theta \le 0\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $x \in \Re^n, u(t) \in \Re^m$ 과 $\tau \in ([0,\infty),\Re)$ 들은 각각 상태변수 벡터, 입력변수 벡터 와 유계의(bounded) 상수 지연시간을 나타내고 행렬 A, B 는 적절한 차원을 갖는 상수 행렬이다. 불확실성을 나타내는 함수 $f_0(x(t),t)$ 와 $f_1(x(t-\tau),t)$ 는 외란 및 현재시간 상태변수, $x(t)$ 와 시간지연 상태변수, $x(t-\tau)$ 을 각각 포함하는 시스템의 비선형 섭동을 나타낸다. 그리고 정의된 시스템은 다음의 가정을 갖는다.

1) 행렬 (A,B) 는 가제어성, 즉, $\mathrm{rank}[A, \exp(-s\tau)B] = n$ 을 갖는다.

2) 모든 상태변수는 되 먹임(feedback) 제어를 위해 측정 가능하다.

3) 불확실성 함수 $f_0, f_1: \Re^n \times \Re_+ \to \Re^n$ 는 아래의 정합조건(matching condition),

$$\begin{aligned}f_0(x(t),t) &= Be_0(x(t),t)\\f_1(x(t-\tau),t) &= Be_1(x(t-\tau),t)\end{aligned} \tag{2}$$

및 다음 관계식을 만족한다.

$$\begin{aligned}\|e_0(x(t),t)\| &\le \rho_0\|x(t)\| + k\\\|e_1(x(t-\tau),t)\| &\le \rho_1\|x(t-\tau)\|\end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $\rho_0, \rho_1, k > 0$ 은 값을 모르는 양의 실수이고 $\|\|$은 2-노옴(norm)을 표시한다. 입력지연 시스템은 제어루프에 시간지연을 갖기 때문에 항상 제어 입력이 지연시간 이후에 시스템으로 입력된다. 그래서 초기지연시간동안 $(t \in [-\tau, 0])$ 에는 제어입력이 없기 때문에 가제어성을 만족할 수가 없다. 이때 시스템에 불확실성이 존재한다면 위와 같은 특징 때문에 초기지연시간동안 시스템의 안정성을 보장.하기가 쉽지 않다. 그러므로 이러한 형태의 시스템에서는 초기입력지연시간동안의 시스템의 상태 변수가 유계(bounded)임, 즉 $\phi(\theta) \in L^2((-\tau,0),\Re^n)$ 을 만족해야 하는 특징을 갖는다.

III. 불확실성 추정 및 지연보상을 갖는 슬라이딩모드 제어기

먼저 다음과 같은 시간지연 보상기(state predictor), $\bar{x} \in \Re^n$

$$\bar{x}(t) = x(t) + \int_{-\tau}^{0} e^{-A(\tau+\theta)} Bu(t) d\theta \tag{4}$$

와 슬라이딩 평면(sliding surface),

$$\sigma = S\bar{x} = 0 \tag{5}$$

을 정의한다. 이때 $\sigma = [\sigma_1, \ldots, \sigma_m]^T \in \Re^m$ 와 $S = [S_1^T, \ldots, S_m^T]^T \in \Re^{m \times n}$ 의 구조를 갖는다. 여기서 제안된 슬라이딩 평면은 시간지연 보상기를 포함하며, 또한 $|Se^{-A\tau}B| \ne 0$ 의 조건을 갖는다. 이때 행렬 S 와 B 는 완전 행렬계수(full rank) 이다.

다음단계는 슬라이딩모드 존재조건($\sigma^T\dot{\sigma} < 0$)을 만족 하는 강인제어 법칙을 유도하는 것이다. 이러한 조건은 시스템의 상태 변수들이 슬라이딩 평면으로 들어가도록 유도할 뿐만 아니라 그 상태를 계속해서 유지하도록 보장한다. 이를 위해 다음과 같은 제어기 구조를 고려하였다.

$$u(t) = u_{eq} + u_s + u_N \tag{6}$$

이때, u_{eq} 는 불확실성을 고려하지않은 공칭 시스템에 대한 등가제어기(equivalent control)을, u_s 는 슬라이딩 평면에 도달되는 동안 천이응답특성의 결정을 위한 제어기이며 u_N 은 시.스템의 불확실성을 극복하기 위한 스위칭 제어기 이다. 등가제어법칙 u_{eq} 은 시스템 (1)의 공칭시스템에 대한 $\dot{\sigma} = 0$ 을 적용함으로써 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}u_{eq} &= -[Se^{-A\tau}B]^{-1} SA[x(t) + \int_{-\tau}^{o} e^{-A(\theta+\tau)} Bu(t+\theta) d\theta]\\&= -[Se^{-A\tau}B]^{-1} SA\bar{x}\end{aligned} \tag{7}$$

위의 제어기 (7) 은 불확실성이 없는 입력지연 시스템의 입력지연을 보상하는 기존의 시간지연 보상기를 갖는 제어방식과 유사한 제어기 구조를 갖는다 0, 0. 그리고 제어법칙 u_s 은 다음과 같이 정의한다.

$$u_s = -(Se^{-A\tau}B)^{-1} F\sigma \tag{8}$$

이때 $F \in \Re^{m \times m}$ 은 양 정치행렬(positive definite matrix)이고 원하는 천이응답 특성에 의해 결정되는 설계 변수이다. 제어기 u_N 은 시스템 불확실성의 노옴의 상계(upper bound)를 알아야 하므로 이를 위하여 추정기법에 의해 그 값을 추정하고자 한다. 먼저 Razumikhin 정리의 관계식[4]을 사용하여 (3)의 시간지연 상태변수 항을 시간지연을 제거한 항으로 다음과 같이 변환시킬 수 있다. 즉, $q \ge 1$ 와 $-\tau \le \theta \le 0$ 조건을 갖는 $\|x(t+\theta)\| \le q\|x(t)\|$ 의 관계식을 이용하여, 다음의

$$\|e_1(x(t-\tau),t)\| \le \rho_1\|x(t-\tau)\| \le \rho_1 q\|x(t)\| \tag{9}$$

식을 얻는다. 그리고 (3)의 불확실성 항들은 다음의 집중 불확실성(lumped uncertainty)으로 변환한 후 그것의 노옴(norm)의 상계(upper bound)를 다음과 같이 구한다.

$$\|e_0(x(t),t)+e_1(x(t-\tau),t)\| \le \|e_0(x(t),t)\|+\|e_1(x(t-\tau),t)\| \le \rho\|x(t)\|+k \tag{10}$$

그러나 여기서 $\rho=\rho_0+\rho_1 q>0$ 와 $k>0$ 는 미지수들이므로 집중 불확실성(lumped uncertainty)의 노옴의 상계(upper bound)는 하기의 적응법칙(adaptation law) 들을 적용하여 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\rho}}(x,t) &\cong \xi_\rho^{-1}\|B^TS^T\sigma\|\|x\| \\ \dot{\tilde{k}}(x,t) &\cong \xi_k^{-1}\|B^TS^T\sigma\|\end{aligned} \tag{11}$$

이때 $\tilde\rho(x,t)=\hat\rho(x,t)-\rho$ 와 $\tilde k(x,t)=\hat k(x,t)-k$ 이고, ξ_ρ 와 ξ_k 은 양의 적응이득 (adaptation gain)들이다. 위의 (11) 은 다음과 같은 해를 갖는다.

$$\hat\rho(x,t)=\hat\rho_{t_0}+\xi_\rho^{-1}\int_{t0}^{t}\|B^TS^T\sigma\|\|x(t)\|dt \tag{12}$$

$$\hat k(x,t)=\hat k_{t_0}+\xi_k^{-}\int_{t0}^{t}\|B^TS^T\sigma\|dt \tag{13}$$

$\hat\rho_{t_0}$ 와 $\hat k_{t_0}$ 은 각각 $\hat\rho(x,t)$ 와 $\hat k(x,t)$ 의 초기값들을 나타낸다. 따라서 집중 불확실성(lumped uncertainty)의 상계(upper bound)의 추정치는 하기와 같이 구할 수 있다.

$$\hat\delta(x,t)=\hat\rho(x,t)\|x\|+\hat k(x,t) \tag{14}$$

그리고 (14) 의 추정치를 이용하여 스위칭 제어기 u_N 은 다음과 같이 나타낸다.

$$u_N=\begin{cases}-\dfrac{(Se^{-A\tau}B)^{-1}SBB^TS^T\sigma}{\|B^TS^T\sigma\|}\hat\delta(x,t) & \text{if } \|B^TS^T\sigma\|\neq 0 \\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \tag{15}$$

상기의 제어 법칙들은 슬라이딩평면(sliding surface, σ)이 시간지연 보상기, $(\bar{x})$를 포함하므로 입력지연을 보상하도록 설계 되었다. 즉 제안된 제어기(15)는 임의의 시간, t 에 들어온 불확실성 항을 제어입력이 들어가는 시간, $t+\tau$ 에서 보상제어 하도록 설계되어 있다. 결국 매 순간에 시스템에 들어오는 외란 및 불확실성 항들은 실제로 제어신호가 입력되는 지연시간 이후에 입력지연을 보상하는 스위칭 제어기에 의해 제거된다.

한편, 상기의 제어기 하에 있는 시스템 (1)의 슬라이딩 평면에서의 동특성 거동을 살펴보고자 한다. 슬라이딩모드 동특성 방정식을 유도하기 위해 슬라이딩 평면식, σ 을 아래와 같이 미분하고

$$\begin{aligned}\dot\sigma &= S\dot{\bar{x}} \\ &= S[\dot x+A\int_{-\tau}^{0}e^{-A(\tau+\theta)}Bu(t+\theta)d\theta \\ &\quad +e^{-A\tau}Bu(t)-Bu(t-\tau)]\end{aligned} \tag{16}$$

위 식에 시스템 (1)을 대입하면 다음과 같다

$$\begin{aligned}\dot\sigma &= S[Ax+Bu(t-\tau)+A\int_{-\tau}^{0}e^{-A(\tau+\theta)}Bu(t+\theta)d\theta \\ &\quad +e^{-A\tau}Bu(t)-Bu(t-\tau)+f_0(x(t),t) \\ &\quad +f_1(x(t-\tau),t)] \\ &= S[Ax+A\int_{-\tau}^{0}e^{-A(\tau+\theta)}Bu(t+\theta)d\theta+e^{-A\tau}Bu(t) \\ &\quad +f_0(x(t),t)+f_1(x(t-\tau),t)]\end{aligned} \tag{17}$$

그리고 위 식에 식 정합조건 (2) 와 제어기 (6)을 대입하면 결국 다음과 같은 슬라이딩모드 동특성 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\dot\sigma &= -F\sigma+Se^{-A\tau}Bu_N \\ &\quad +SB\{e_0(x(t),t)+e_1(x(t-\tau),t)\}\end{aligned} \tag{18}$$

그리고 슬라이딩모드 동특성 방정식의 안정성 해석을 통하여 슬라이딩모드의 존재조건을 증명하고자 한다.

정리 : 만약 시스템 (1) 이 제어법칙 (6) 과 적응법칙 (11) 을 갖는다면 그 시스템의 슬라이딩모드는 항상 존재한다. 즉 슬라이딩모드 동특성 (18) 은 점진적으로 안정하다(asymptotically stable).

증명 : 리아프노프 함수(Lyapunov function)를 다음과 같이 고려하고

$$V(\sigma,t)=\frac{1}{2}(\sigma^T\sigma+\xi_e\tilde{e}^2+\xi_k\tilde{k}^2) \tag{19}$$

상기의 리아프노프 함수를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot V(\sigma,t)=\sigma^T\dot\sigma+\xi_\rho\tilde\rho\dot{\tilde\rho}+\xi_k\tilde k\dot{\tilde k} \tag{20}$$

그리고 (18)을 위 식에 대입하면

$$\begin{aligned}\dot V &= \sigma^T[-F\sigma+Se^{-A\tau}Bu_N+SB\{e_0(x(t),t) \\ &\quad +e_1(x(t-\tau),t)]+\xi_\rho\tilde\rho\dot{\tilde\rho}+\xi_k\tilde k\dot{\tilde k}\end{aligned} \tag{21}$$

로 되고 (10) 과 (15) 을 위 식에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot V &\le -\sigma^TF\sigma-\|B^TS^T\sigma\|\{(\hat\rho-\rho)\|x\|+(\hat k-k)\} \\ &\quad +\tilde\rho\xi_\rho\dot{\hat\rho}+\tilde k\xi_k\dot{\hat k}\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}&= -\sigma^TF\sigma+\tilde\rho(\xi_\rho\dot{\hat\rho}-\|B^TS^T\sigma\|\|x\|) \\ &\quad +\tilde k(\xi_k\dot{\hat k}-\|B^TS^T\sigma\|)\end{aligned} \tag{23}$$

그리고 적응법칙(adaptation law), (11) 을 대입하면 결국에는 $\sigma\neq 0$ 을 만족하는 한 다음과 같은 부등식을 얻을 수 있다.

$$\dot V\le-\sigma^TF\sigma<0 \tag{24}$$

이때 F 은 양 정치행렬(positive definite matrix)이므로 시간이 $t\to\infty$ 따라 $\sigma\to 0$ 이 된다. 따라서 시스템 (1) 의 슬라이딩모드는 항상 존재한다. ■

참고 : 제안된 방법에서 비록 불확실성의 상계(upper bound)의 추정치가 실제 값에 수렴하지 않는다 해도 실제 값보다 작지않는 한 결국에는 스위칭 제어기에 의해 슬라이딩 모드에 도달하게 된다.

불확실성의 상계추정을 갖는 슬라이딩모드 제어기법은 참고문헌 [3]에서 제안한 바 있지만 입력지연을 갖는 시스템에는 적용하기가 적합하지 않다. 본 논문에서 제안된 방법은 입력지연을 보상하도록 확장된 기법으로 입력지연 시스템의 강인 안정화를 위한 유용한 제어기이다. 그리고 제안된 제어기는 지연시간 $\tau=0$을 대입하면 참고문헌 [13]에서 제안한 제어기로 바뀌게 된다.

IV. 수치적 모의 실험

본 논문에서 제안된 불확실성 추정을 갖는 슬라이딩 모드 제어기를 검증하기 위해 다음과 같은 시스템을 고려하고 수치적 모의 실험을 수행하였다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t)+B\{u(t-\tau)+(e_0(x(t),t)+e_1(x(t-\tau),t)\} \tag{25}$$
$$A=\begin{pmatrix}0 & 1\\ 3 & -2\end{pmatrix},\quad B=\begin{pmatrix}0\\ 1\end{pmatrix}$$

시스템의 불확실성 항은 현재시간 상태변수와 시간지연 상태변수를 포함하는 시스템의 비선형 섭동 과 외란을 다음과 같이 고려하였다.

$e_0(t),t)=0.5x_1(t)\sin(x_2(t))+0.2\sin(2\pi\omega t),\ \omega=40$

$e_1(x(t-\tau),t)=0.3x_2(t-\tau)\sin(x_2(t-\tau))$

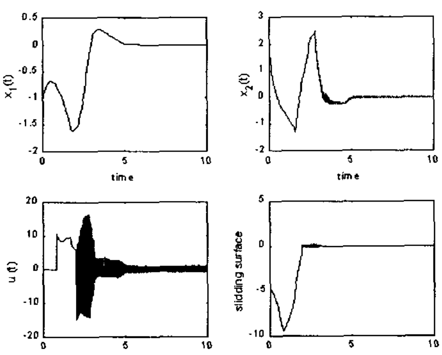


그림 1. 제안된 슬라이딩모드 제어기의 모의실험 결과.

Fig. 1. Simulation results of the proposed SMC with uncertainty adaptation.

이때 초기조건 과 지연시간은 각각 $x(0)=[-1.6\ \ 1]^T$ 와 $\tau=0.8$ 이다. 그리고 제어기의 설계 변수들을 각각, S=[1354 4.49], $\{\hat{\rho}_{t_0},\hat{k}_{t_0}\}=\{0,0\}$ 및 $\{\xi_\rho,\xi_k\}=\{18,90\}$ 으로 선정하였다. 그림 1은 제안된 제어기가 주어진 시스템의 슬라이딩 모드 존재 및 불확실성에 대해 효과적인 강인제어 성능을 보장함을 보여주고 있다. 그림 2는 집중 불확실성 (lumpeduncert ainty)의 노옴(norm)의 상계(upper bound)에 대한 추정성능을 보여준다. 비록 슬라이딩 평면에 도달되기까지 그것의 상계의 추정성능이 양호하지 않는다 해도 실제 값보다 작지않는 한 결국에는 스위칭 제어기에 의해 슬라이딩 모드에 도달하게 된다. 한번 슬라이딩 평면에 도달되고 그 상태가 유지되면 본 논문에서 제안된 추정기법에 의해 추정치는 실제 값에 더욱 가까워져서 제어성능도 향상됨을 알 수 있다. 그리고 초기의 입력지연시간 동안에는 입력이 없으므로 추정이 이루어지지 않음을 보여주고 있다.

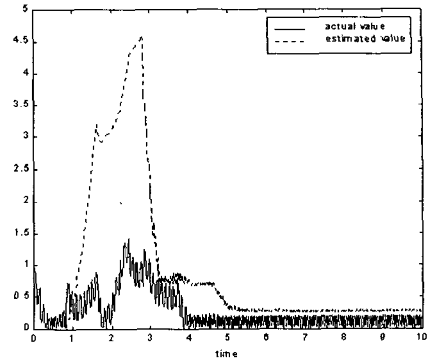


그림 2. 집중 불확실성의 노옴의 상계추정 성능에 대한 모의실험 결과.

Fig. 2. Adaptation results of upper bound on norm of the lumped uncertainty by the proposed adaptation law.

V. 결론

슬라이딩 모드 제어는 일반적으로 불확실성의 노옴(norm)의 상계에 대한 정보를 미리 알기를 요구한다. 그러나 이러한 정보는 실제 시스템에서 얻기가 쉽지 않다.

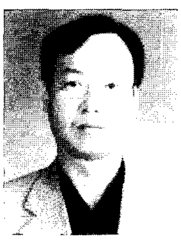
본 논문에서는 적응기법을 사용하여 이러한 불확실성의 상계를 추정하고 이 추정 값을 사용하여 슬라이딩모드 제어기를 유도하였다. 이때 슬라이딩 평면이 시간 지연 보상기를 포함하기 때문에 상계의 추정치 역시 시간지연을 보상하도록 되어있다. 그 결과 슬라이딩모드의 존재성 및 불확실성에 대해 효과적인 강인제어 성능을 보장하였다. 그리고 불확실성 추정성능도 슬라이딩평면에 도달되기까지는 추정치가 실제 값보다 크지만 한번 슬라이딩평면에 도달되고 그 상태가 유지되면 추정치는 실제 값에 더욱 가까워진다.

참고문헌

[1] R. DeCarlo, S. H. Zak, and G. P. Matthews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial," *Proceedings of IEEE*, pp. 212-232, 1988.

[2] Y. A. Fiagedz and A. E. Pearson, "Feedback stabilization of linear Autonomous time lag systems," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol.

31, pp. 847−855, 1986.
[3] T. Furukawa and E. Shimemura, "Predictive control for systems with time delay," *Internat. J. Control*, vol. 37, pp. 399−412, 1983.
[4] J. K. Hale and S. M. Verduyn Lunel, *Introduction to functional differential equations*, Springer−Verlag, New york, 1993.
[5] J. Y. Hung, W. Gao, and J. C. Hung, "Variable structure control: A survey," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 40, pp. 1−22, 1993.
[6] A. J. Koshkouei and A. S. I. Zinober, "Sliding mode time−delay systems," *Proc. of Int. Workshop on VSS*, Tokyo, pp. 97−101, 1996.
[7] W. H. Kwon and A. E. Pearson, "Feedback stabilization of linear systems with delayed control," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 25, pp. 266−269, 1980.
[8] X. Li and C. E. Souza, "Delay−dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: a linear matrix inequality approach," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 42, pp. 1144−1148, 1997.
[9] A. Z. Manitius and A. W. Olbrot, "Finite spectrum assignment problem for system with delays," *IEEE Trans, Automat. Control*, vol. 25, pp. 266−269, 1979.
[10] Y. H. Roh and J. H. Oh, "Robust stabilization of uncertain input−delay systems by sliding mode control with delay compensation," *Automatica*, vol. 35, pp. 1861−1865, 1999.
[11] J. C. Shen, B. S. Chen, and F. C. Kung, "Memoryless stabilization of uncertain dynamic delay systems: Riccati equation approach," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 36, pp. 638−640, 1991.
[12] K. K. Shyu and J. J Yan, "Robust stability of uncertain time−delay systems and its stabilization by variable structure control," *Internat. J. Control*, vol. 57, pp. 237−246, 1993.
[13] D. S. YOO and M. J. CHUNG, "A variable structure control with simple adaptation laws for upper bounds on the norm of the uncertainties," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 26, pp. 860−864, 1992.
[14] L. Yu, J. Chu, and H. Su, "Robust memoryless H_∞ controller design for linear time delay systems with norm−bounded time varying uncertainty," *Automatica*, vol. 32, pp. 1759−1762, 1996.
[15] 노영훈, 오준호, "불확실성을 갖는 시간지연 시스템에서의 강인한 안정화를 위한 슬라이딩 모드 제어기", 제어.자동화.시스템공학 회(KACC) 학술대회 논문집, pp. 811−814, 1998.



노 영 훈

1961년 4월 11일생. 1984년 인하대학교 기계공학과 (공학사). 1986년 인하대학교 기계공학과 (공학석사). 1999년 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사). 1988~현재 LG전자 Digital Appliance 연구소 책임연구원. 관심분야는 강인 제어, 비선형 제어, 시간지연시스템의 강인 안정화 연구 및 가전기기의 System Identification, Network Control 등.

오 준 호

1954년 10월 3일생. 1977년 연세대학교 기계공학과 (공학사). 1979년 연세대학교 기계공학과 (공학석사). 1985년 University of California 기계공학과 (공학박사). 1979~1981한국 원자력 연구소 연구원. 1985~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 1996 ~1997 University of Texas at Austin 방문교수. 관심분야는 최적 제어, 비선형 제어, Neural Network, Fuzzy Control, Sliding Mode Control 및 Robot Control (Quadruped Walking Robot)등.