시간 지연 시스템을 위한 적분 슬라이딩 모드 제어기의 LMI 기반 설계

논 문
58-12-29

LMI-based Design of Integral Sliding Mode Controllers for Time-Delay Systems

최 한 호*
(Han Ho Choi)

Abstract - This paper presents an LMI-based method to design a integral sliding mode controller for a class of uncertain time-delay systems. Using LMIs we derive an existence condition of a sliding surface guaranteeing the asymptotic stability of the sliding mode dynamics. And we give a switching feedback control law. Our method is a generalization of the previous integral sliding mode control design methods. Since our method is based on LMIs, it gives design flexibility for combining various useful design criteria that can be captured in the LMI-based formulation. We also give LMI existence conditions of sliding surfaces guaranteeing α-stability or LQ performance constraint. Finally, we give a numerical design example to show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : LMI, Integral sliding mode control, Time-delay system

1. 서 론

시간 지연은 여러 가지 공학 시스템에서 종종 발생하며 시스템의 안정에 심각한 장애를 초래한다. 최근 여러 연구자들이 가변구조 이론을 활용하여 시간 지연 시스템을 위한 제어기 설계 방법들을 제안하였다[1-4]. 대부분의 슬라이딩 모드 제어기는 리칭 모드가 슬라이딩 모드 이전에 존재하는데 만약 슬라이딩 모드가 초기시간 $t=0$부터 존재한다면 리칭 모드가 존재하는 일반적인 슬라이딩 모드 제어기보다 더 강인한 특성을 보이며 응답을 더욱 정확히 예측할 수 있을 것이다. 최근에 [5]에서는 리칭모드가 존재하지 않고 초기시간 $t=0$부터 슬라이딩 모드가 존재하는 적분 슬라이딩 모드 제어기를 설계하는 방법이 제시되었다. 본 논문에서는 [5]의 방법을 일반화시켜 [1-4]에서 다루었던 시간 지연 시스템을 대상으로 LMI에 기반한 적분 슬라이딩 모드 제어기 설계방법을 제안한다. 본 논문에서 제안된 방법은 LMI를 사용하였기 때문에 α안정도, LQ/H_2, H_∞ 등 LMI로 표현가능한 성능지수를 고려해 넣을 수 있는 유연성를 제공한다. 본 논문에서는 예로 α안정성과 LQ 성능을 고려한 설계방법을 제시한다. 마지막으로 설계 예를 통해 제안된 방법의 효용성을 보인다.

2. 문제 설정

본 논문에서는 다음과 같은 동역학 방정식으로 표현 가능한 시스템을 다룬다.

$$
\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= Ax(t)+A_d x_d+B[u(t)+h(t)], \\
x_d &= x(t-d), \quad x(t)=0, \ t<0, \ x(0)=x_0
\end{aligned} \tag{1}
$$

여기에서 $x(t)\in R^n$, $u(t)\in R^m$ 로 각각 상태, 입력을 가리키며 다음을 만족시킨다고 가정한다.

A1: (A, B) 는 안정가능하다.

A2: $\mathrm{rank}(B)=m<n$

A3: $\|h(t)\| \le \phi\|u\|+\beta(t)$, $0\le\phi<1$을 만족시키는 상수ϕ와 양함수 $\beta(t)$가 알려져 있다.

(2)와 같은 $q\ge m$차의 보상기를 도입하고 (4)와 같은 슬라이딩 평면을 정의하고 (5)와 같은 슬라이딩 모드 제어기를 고려하자.

$$\dot{v}=A_K v+B_K x \tag{2}$$

$$\sigma=F_1x+F_2v, \quad v(0)=-F_2^T(F_2F_2^T)^{-1}F_1x(0) \tag{3}$$

$$u=u_n+u_l, \tag{4}$$

$$u_l=C_Kv+D_Kx, \quad u_n=-\rho(t)\frac{\sigma}{\|\sigma\|} \tag{5}$$

여기에서 $A_K\in R^{q\times n}$, $B_K\in R^{q\times q}$, $C_K\in R^{m\times q}$, $D_K\in R^{m\times n}$, $F_1\in R^{m\times n}$, $F_2\in R^{m\times q}$는 설계 변수 행렬이고 v는 보상기 상태이고 $\rho(t)$는 불확실성 $h(t)$의 영향을 억제하기 위해 가해야 할 양함수이다. (3)에서처럼 $v(0)$를 결정함으로 인해 $\sigma(0)=0$이 됨에 유의해야 한다. 결국 본 논문에서 다룰 문제는 $A_K, B_K, C_K, D_K, F_1, F_2$이 존재할 조건과 LMI 설계알고리즘 그리고 설계변수 $\rho(t)$를 결정하기 위한 공식을 제공하는 것으로 환원될 수 있다.

3. 주요 결과

확장된 상태 $z=[x^T, v^T]^T$를 도입함으로 (1)-(5)의 폐회로

* 정 회 원 : 동국대학교 전기공학과 교수
E-mail : hhchoi@dongguk.edu
접수일자 : 2009년 9월 17일
최종완료 : 2009년 10월 13일

시스템과 σ는 다음처럼 고쳐 쓰일 수 있다.

$$\dot{z}=(\overline{A}+\overline{B}K)z+\overline{A_d}\,\overline{D}z_d+B_0[u_n+h(t)] \tag{6}$$

$$\sigma=Fz \tag{7}$$

여기에서 $z_d=z(t-d)$이고 $\overline{A},\ \overline{B}, K, \overline{A_d}, \overline{D}, B_0, F$는 다음처럼 주어진다.

$$\overline{A}=\begin{bmatrix}A & 0\\0 & 0\end{bmatrix},\ \overline{B}=\begin{bmatrix}B & 0\\0 & I\end{bmatrix},\ K=\begin{bmatrix}D_K & C_K\\B_K & A_K\end{bmatrix}, \tag{8}$$

$$B_0=\begin{bmatrix}B\\0\end{bmatrix},\quad \overline{A_d}=\begin{bmatrix}A_d\\0\end{bmatrix},\quad \overline{D}=\begin{bmatrix}I\\0\end{bmatrix}^T,\ F=\begin{bmatrix}F_1^T\\F_2^T\end{bmatrix}^T$$

정리 1 : 설계변수 A_K, B_K, C_K, D_K에 대하여 다음 (9)를 만족시키는 해 P가 양수 ϵ에 대하여 존재한다고 가정하고 설계변수 F가 (10)처럼 주어지고 $\rho(t)$가 (11)처럼 주어진다고 하자.

$$P>0,\quad P(\overline{A}+\overline{B}K)+(\overline{A}+\overline{B}K)^TP+\epsilon P\overline{A_d}\,\overline{A_d}^TP+\frac{1}{\epsilon}\overline{D}^T\overline{D}<0 \tag{9}$$

$$F=B_0^TP \tag{10}$$

$$\rho(t)=\frac{1}{1-\phi}[\gamma+\|G_1z\|+\|G_2z_d\|+\phi\|C_Kv+D_Kx\|+\beta(t)] \tag{11}$$

여기에서 $\gamma>0$이며 G_1, G_2는 다음처럼 주어진다.

$$G_1=(F_1B)^{-1}F(\overline{A}+\overline{B}K),\ \ G_2=(F_1B)^{-1}F\overline{A_d}\,\overline{D}$$

그리고 $F_2F_2^T>0$라고 하자. 그러면 슬라이딩 모드 동역학은 안정하며 슬라이딩 모드는 처음부터 즉 $t=0$에서부터 시작된다.

증명 : 리아푸노프 함수를 $L(t)=z^TPz+\frac{1}{\epsilon}\int_{t-d}^{t}z^T\overline{D}^T\overline{D}zd\tau$로 하면 이의 도함수는 가정 A3, 그리고 (9), (10), (11)식을 이용하여 다음을 만족시킴을 쉽게 보일 수 있다.

$$\dot{L}\leq-\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2-2\gamma\|\sigma\|\leq-\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2\leq0 \tag{12}$$

여기에서 Q는 다음처럼 주어진다.

$$-Q=P(\overline{A}+\overline{B}K)+(\overline{A}+\overline{B}K)^TP+\epsilon P\overline{A_d}^T\overline{A_d}P+\frac{1}{\epsilon}\overline{D}^T\overline{D}<0$$

결국 이는 $z=0$이 점근적으로 안정함을 의미한다. 즉 슬라이딩 모드 동역학은 안정하다. $t=0$에서부터 슬라이딩모드가 존재함을 보이기 위해 $\sigma(0)=0$이며 $\sigma^T(B_0^TPB_0)^{-1}\dot{\sigma}<0$이 0이 아닌 σ에 대하여 성립함을 보이기만 하면 된다[1-5]. (3)은 $\sigma(0)=0$을 의미하므로 $\sigma^T\dot{\sigma}<0$만 보이면 된다. 가정 **A3**을 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\sigma^T(B_0^TPB_0)^{-1}\dot{\sigma}\leq-\gamma\|\sigma\| \tag{13}$$

결국 슬라이딩 모드 동역학은 안정하며 슬라이딩 모드는 $t=0$에서부터 시작됨을 알 수 있다. ▽▽▽

위의 정리1은 해석에는 유용하나 설계에는 직접적으로 유용하지 않다. 다음의 정리가 설계에 사용될 수 있다.

정리 2 : 다음의 LMI를 만족시키는 해 (W, U, ϵ)가 존재하면 (9)를 만족시키는 (P, K, ϵ)가 존재한다.

$$W>0,\quad \begin{bmatrix}\overline{A}W+\overline{B}U+* & * & *\\ \epsilon\overline{A_d}^T & -\epsilon I & 0\\ \overline{D}W & 0 & -\epsilon I\end{bmatrix}<0 \tag{14}$$

여기에서 $*$는 행렬의 대칭성에 의해 유추될 수 있는 블록 행렬을 의미하고, $\Phi\in R^{n\times(n-m)}$는 $\Phi^T\Phi=I,\ \Phi^TB=0$를 만족시키는 행렬이다.

증명 : (9)는 다음과 동치이다.

$$P^{-1}>0,$$

$$(\overline{A}+\overline{B}K)P^{-1}+P^{-1}(\overline{A}+\overline{B}K)^T+\epsilon\overline{A_d}\,\overline{A_d}^T+\frac{1}{\epsilon}P^{-1}\overline{D}^T\overline{D}P^{-1}<0$$

결국 변수치환 $W=P^{-1}, U=KW$을 도입하고 [6]의 Schur complement 공식을 사용하면 쉽게 (9)와 (14)는 동치임을 알 수 있다. ▽▽▽

[6]의 Prejection lemma를 사용하면 또 다른 LMI 조건을 다음처럼 구할 수 있다.

정리 3 : 다음의 LMI를 만족시키는 해 X가 존재하면 (9)를 만족시키는 (P, K, ϵ)가 존재한다.

$$X>0,\quad \begin{bmatrix}\Phi^TAX\Phi+* & * & *\\ \epsilon A_d^T\Phi & -\epsilon I & 0\\ X\Phi & 0 & -\epsilon I\end{bmatrix}<0 \tag{15}$$

증명 : [6]의 Prejection lemma를 이용하여 다음 LMI의 해가 존재하면 (14)식의 해가 존재함을 보일 수 있다.

$$W>0,\quad \begin{bmatrix}\Phi_0^T\overline{A}W\Phi_0+* & * & *\\ \epsilon\overline{A_d}^T\Phi_0 & -\epsilon I & 0\\ \overline{D}W\Phi_0 & 0 & -\epsilon I\end{bmatrix}<0 \tag{16}$$

여기에서 $\Phi_0^T=[\Phi^T,\ 0]$이다. W를 다음처럼 정의하자.

$$W=\begin{bmatrix}X & -XR\Pi\\ -\Pi R^TX & \Pi+\Pi R^TXR\Pi\end{bmatrix} \tag{17}$$

여기에서 X는 (15)의 해이고 Π는 임의의 $q\times q$ 양한정 행렬이고 R은 임의의 $n\times q$행렬이다. [6]의 Schur complement 공식을 이용하여 (17)의 W가 양한정임을 알 수 있다. 그리고 (17)의 W가 (16)을 만족시킴을 알 수 있다. ▽▽▽

주 1 : [6]의 결과를 이용하면 $\Phi^TAX\Phi+*<0$의 해가 존재할 필요충분조건은 (A,B)쌍이 안정 가능한 것임을 알 수 있다. 이는 LMI (14)해가 존재할 필요조건은 (A,B)쌍이 안정 가능한 것임을 의미한다.

주 2 : (9)의 조건식은 만약 P가 주어진다면 K에 대하여 LMI식이다. 그리고 (15)는 LMI이다. 그러므로 다음 과정처럼 제어이득 $A_K, B_K, C_K, D_K, F_1, F_2$을 구할 수 있다.

[단계1.1] (15)를 LMI 최적화 알고리즘을 사용해 풀어 W를 구하고 (17)식과 $P=W^{-1}$의 관계식을 이용하여 P를 결정한다. 이 때 R을 $rank(B^TR)=m$이 되도록 선정하여 $F_2F_2^T>0$이 보장되도록 한다.

[단계1.2] $F=B_0^TP$를 이용해 이득 F를 계산해 낸다.

[단계1.3] (9)를 LMI 최적화 알고리즘을 사용해 풀어 K를 구한다.

위의 경우 $n(n+1)/2+(m+q)(n+q)$개의 LMI 최적화 변수가 필요하다. 또한 항상 $F_2F_2^T>0$를 보장할 수 있다. 한편 (9)의 조건식은 LMI (14)와 동치이므로 이를 이용해 다음 과정처럼 제어이득을 구할 수도 있다.

[단계2.1] LMI 최적화에 의해 (14)식을 풀어 먼저 W와 U를 구한다.

[단계2.2] 공식 $K=UW^{-1}, F=B_0^TW^{-1}$을 이용해 이득을 구한다.

그러나 위 과정의 경우 $(q+n)(q+n+1)/2+(m+q)(n+q)$개의 LMI 최적화변수가 필요하여 계산량에 있어서 불리하며 $F_2F_2^T>0$를 항상 보장하지는 못한다.

본 논문에서 제안된 방법은 LMI를 사용하였기 때문에

[6]에서처럼 α안정성, LQ/H_2, H_∞등 LMI로 표현가능한 성능지수를 고려해 넣을 수 있는 유연성를 제공한다. 본 논문에서는 예로 α안정성과 LQ 성능을 고려한 설계방법만을 제시한다. 다른 성능지수는 [2], [6]을 참조하여 유도할 수 있을 것이다.

따름 정리 4 : 다음 LMI를 만족시키는 행렬 (W, U, ϵ)가 존재한다고 가정하자.

$$W>0,\quad \begin{bmatrix} (\overline{A}+\alpha I)W+\overline{B}U+* & * & * \\ \epsilon e^{\alpha d}\overline{A}_d^T & -\epsilon I & 0 \\ \overline{D}W & 0 & -\epsilon I \end{bmatrix} < 0 \tag{18}$$

위식의 해를 이용하여 $P=W^{-1}, K=UW^{-1}$라 하고 (10)을 이용하여 A_K, B_K, C_K, D_K, F_1, F_2를 결정하여 $F_2F_2^T>0$라고 하자. 그리고 $\rho(t)$가 아래처럼 주어진다고 하자.

$$\rho(t)=\frac{1}{1-\phi}[\gamma+\|G_{11}z\|+\|G_{21}z_d\|+\phi\|C_Kv+D_Kx\|+\beta(t)] \tag{19}$$

여기에서 $\gamma>0$이며 G_{11}, G_{21}은 다음 처럼 주어진다.

$$G_{11}=(F_1B)^{-1}F(\overline{A}+\alpha I+\overline{B}K),\quad G_{21}=e^{\alpha d}(F_1B)^{-1}F\overline{A_d}\overline{D} \tag{20}$$

그러면 전체 제어 시스템은 α안정성이 보장된다.

증명 : $\zeta=e^{\alpha t}z$라고 하자. 만약 ζ가 안정하면 z의 α안정도는 보장된다. $\zeta=e^{\alpha t}z$의 관계식을 이용하면 (6)은 다음처럼 고쳐 쓰일 수 있다.

$$\dot{\zeta}=(\overline{A}+\alpha I+\overline{B}K)\zeta+e^{\alpha d}\overline{A_d}\overline{D}\zeta_d+B_0[u_n+h(t)] \tag{21}$$

여기에서 $\zeta_d=\zeta(t-d)$이다. 리아푸노프함수를 다음처럼 하자.

$$L_\alpha(t)=\zeta^TP\zeta+\frac{1}{\epsilon}\int_{t-d}^{t}\zeta^T\overline{D}^T\overline{D}\zeta d\tau \tag{22}$$

그러면 정리1의 증명 과정을 따라 쉽게 슬라이딩 모드 동역학은 안정하며 슬라이딩 모드는 $t=0$에서부터 시작됨을 보일 수 있다. ▽▽▽

주 3 : 정리 3의 증명과정을 참조하여 다음 LMI를 만족시키는 해 X가 존재하면 (18)를 만족시키는 (W, U, ϵ)가 존재하는 것을 보일 수 있다. 결국 LMI (18) 대신에 다음의 LMI를 풀어 최소 α의 감쇠율을 보장하는 슬라이딩 모드 제어기를 설계할 수 있다.

$$X>0,\quad \begin{bmatrix} \Phi^T(A+\alpha I)X\Phi+* & * & * \\ \epsilon e^{\alpha d}A_d^T\Phi & -\epsilon I & 0 \\ X\Phi & 0 & -\epsilon I \end{bmatrix} < 0 \tag{23}$$

따름 정리 5 : 다음 LMI를 만족시키는 행렬 (W, U, ϵ)가 존재한다고 가정하자.

$$\begin{bmatrix} \mu I & I \\ I & W \end{bmatrix}>0,\quad \begin{bmatrix} \overline{A}W+\overline{B}U+* & * & * & * \\ \epsilon\overline{A}_d^T & -\epsilon I & 0 & 0 \\ \overline{D}W & 0 & -\epsilon I & 0 \\ \overline{C}W & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \tag{24}$$

위식의 해를 이용하여 $P=W^{-1}, K=UW^{-1}$라 하고 (10)을 이용하여 A_K, B_K, C_K, D_K, F_1, F_2를 결정하여 $F_2F_2^T>0$라고 하자. 여기에서 $\overline{C}=[C^T, 0]^T$. $\rho(t)$를 (11)처럼 하자. 그러면 슬라이딩 모드 제어기 (2)-(4)는 모든 $\|z(0)\|\le 1$에 대하여 LQ 성능 $\int_0^\infty x^TC^TCxdt<\mu$를 보장한다.

증명 : 리아푸노프 함수를 $L(t)=z^TPz+\frac{1}{\epsilon}\int_{t-d}^{t}z^T\overline{D}^T\overline{D}zd\tau$로 하고 정리1의 증명과정을 참조하여 $\|z(0)\|\le 1$에 대하여 다음 식이 성립함을 유도할 수 있다..

$$z(0)^TPz(0)\le\mu$$

결국 이는 $\int_0^\infty x^TC^TCxdt<\mu$를 의미한다. ▽▽▽

주 4 : 정리 3의 증명과정을 참조하여 다음 LMI를 만족시키는 해 X가 존재하면 (24)를 만족시키는 (W, U, ϵ)가 존재하는 것을 보일 수 있다. 결국 LMI (24) 대신에 다음의 LMI를 풀어 LQ 성능 $\int_0^\infty x^TC^TCxdt<\mu$를 보장하는 슬라이딩 모드 제어기를 설계할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mu I & I \\ I & X \end{bmatrix}>0,\quad \begin{bmatrix} \Phi^TAX\Phi+* & * & * & * \\ \epsilon A_d^T\Phi & -\epsilon I & 0 & 0 \\ X\Phi & 0 & -\epsilon I & 0 \\ CX\Phi & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \tag{25}$$

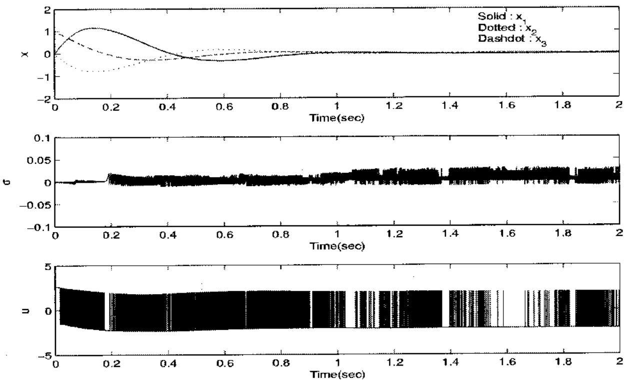

그림 1 시뮬레이션 결과
Fig. 1 Simulation results

4. 수치적 예

[7]에 주어진 F4E 팬텀 전투기의 5000피트에서의 동역학 모델을 고려해보자. 다음의 데이터를 갖는 시스템 (1)로 표현될 수 있다.

$$A=\begin{bmatrix} -0.990 & 17.410 & 96.150 \\ 0.265 & -0.851 & -11.390 \\ 0 & 0 & -30.000 \end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix} -97.780 \\ 0 \\ 30.000 \end{bmatrix} \tag{26}$$

비행기의 기계적이며 유압을 이용한 서보기구의 전달 지연이나 비행사의 시간 지연으로 인하여 비행기의 모델은 실제로 작은 시간지연을 갖는다. [1]에서와 비슷하게 시스템 (1)을 시뮬레이션 하기 위해 다음처럼 가정한다.

$$A_d=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\quad x_1(0)=x_2(0)=0,\quad x_3(0)=1,$$
$$x(t)=0,\quad t\in[-d,0),\quad d=0.1,\quad h(t)=\sin 2\pi t$$

최소 감쇠율 0.35과 $\|z(0)\|\le 1$에 대하여 LQ 성능 $\int_0^\infty x^Txdt<1$ 를 보장하는 제어기를 설계하도록 하자. $C=I$, $\mu=1$, $\alpha=0.35$로 놓고 다음과 같은 이득 행렬을 구할 수 있다.

$$K=\begin{bmatrix} 0.535 & 0.903 & 0.646 & 0.245 \\ -0.009 & -0.007 & -0.021 & -1.008 \end{bmatrix}, \tag{27}$$
$$F=[-1.185,\quad -1.845,\quad 0.109,\quad 0.569]$$

결국 다음과 같은 제어기를 얻을 수 있다.

$$
\begin{aligned}
\dot{v} &= -1.008v - [0.009,\ 0.007,\ 0.021]x \\
\sigma &= 0.569v - [1.185,\ 1.845,\ -0.109]x \\
u_l &= 0.245v + [0.535,\ 0.903,\ 0.646]x \\
u_n &= -[2 + \|[0.541,\ 0.743,\ -0.162,\ 0.240]z\| \\
&\quad + \|[0,\ -0.025,\ 0,\ 0]z_d\|]\frac{\sigma}{|\sigma|}
\end{aligned}
\tag{28}
$$

여기에서 $v(0)=-0.191$이다. 그림 1은 (28)를 사용하였을 경우 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 이전 시간 지연 시스템을 위한 슬라이딩 모드 제어기의 시뮬레이션 결과들과 달리 그림 1에서는 리칭모드가 존재하지 않고 초기시간 $t=0$부터 슬라이딩 모드가 존재함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 [5]의 결과를 확장하여 [1-4]에서 다루었던 시간 지연 시스템을 위한 적분 슬라이딩 모드 제어기 설계법을 제안하였다. 슬라이딩 평면이 존재할 조건을 LMI 형태로 제시하고 스위칭 궤환 제어기를 제시하였다. 더불어 α 안정성과 LQ 성능을 고려한 설계방법을 제시하였고 설계 예를 통해 제안된 방법의 효용성을 보였다.

참 고 문 헌

[1] E.M. Jafarov, “Robust sliding mode controllers design techniques for stabilization of multivariable time-delay systems with parameter perturbations and external disturbances,'', Int. J. Systems Science, vol. 36, pp. 433-444, 2005

[2] H.H. Choi, “Sliding-mode output feedback control design,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, pp. 4047-4054, 2008

[3] R. El-Khazali, “Variable structure robust control of uncertain time-delay systems,” Automatica, vol. 34, pp. 327-332, 1998

[4] S. Oucheriah, “Exponential stabilization of linear delayed systems using sliding-mode controllers,” IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 55, pp. 826-830, 2003

[5] J. Ackermann and V.I. Utkin, "Sliding mode control design based on Ackermann's formula", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 43, no. 2, pp. 234-237, 1998

[6] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan, Linear Matrix Inequalities in system and Control Theory, Philadelphia, SIAM, 1994.

[7] U. Shaked "An LPD approach to robust H_2 and H_∞ static output-feedback design," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 48, no.5, pp.866-872, 2003

저 자 소 개

최 한 호 (崔 漢 浩)

1966년 8월 25일생. 1988년 서울대학교 제어계측 공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공박). 2003년~현재 동국대학교 교수

Tel : 02-2260-3777

Fax : 02-2275-6013

E-mail : hhchoi@dongguk.edu