

폴리토픽 모델을 위한 슬라이딩 모드 제어기 설계

Sliding Mode Control Design for Polytopic Models

최 한 호*
(Han Ho Choi)

Abstract: This paper presents an LMI-based method to design a sliding mode controller for a multivariable uncertain system with a polytopic model. In terms of LMIs an existence condition of a sliding surface is derived. And a switching feedback control law is given. Finally, a numerical design example is given to show that the proposed method can be better than the existing results.

Keywords: LMI (Linear Matrix Inequality), uncertain system, sliding mode, polytopic model

I. 서론

슬라이딩 모드 제어 이론은 불확실한 시스템을 위한 강한 궤환 제어기 설계에 성공적으로 적용되었다. [1-5]와 같은 대부분의 슬라이딩 모드 제어기는 입력행렬의 불확실성이 정합조건을 만족시키지 않는 경우에는 적용할 수 없는 단점을 갖고 있다. 최근에 Choi[6,7]에서는 입력행렬의 불확실성이 정합조건을 만족시키지 않아도 적용할 수 있는 LMI 기반의 슬라이딩 평면 설계방법이 제안되었다. 시스템 행렬과 입력 행렬에 존재하는 불확실성이 비구조적이라는 가정과 불확실성의 놈 경계치가 알려져 있다는 가정을 사용하였기 때문에 [6,7]의 LMI 조건들은 보수성 (conservativeness)이 존재하며 폴리토픽 모델처럼 불확실성을 구조적으로 모델링한 시스템에 적용할 경우 보수성이 큰 단점을 가지고 있다. 그러한 점을 고려하여 본 논문에서는 폴리토픽 모델로 주어지는 시스템을 대상으로 슬라이딩 모드 제어기 설계법을 제안한다. LMI를 사용하여 슬라이딩 평면의 존재조건을 구하고 스위칭 궤환 제어기 알고리즘을 제시한다. 그리고 설계 예를 통해 이전 방법들을 보조하고 대체할 수 있음을 보인다.

II. 대상 시스템과 예비 결과들

본 논문에서는 다음과 같은 폴리토픽 모델로 표현 가능한 시스템을 다룬다[9].

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \beta_i \left(A_i x(t) + B_i [u(t) + h(t)] \right) \quad (1)$$

여기에서 $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m$ 로 각각 상태, 입력을 가리키며 $h(t) \in R^m$ 는 외란 입력을 나타낸다. β_i 는 미지의 변수로 다음을 만족시킨다.

$$\sum_{i=1}^r \beta_i = 1, \quad 1 \geq \beta_i \geq 0 \quad (2)$$

폴리토픽모델은 비선형 시스템을 여러 동작점에서 동정하여 얻은 상태 공간 모델의 convex interpolation으로부터 얻어질 수 있음에 유의해야 한다[8]. 시스템 (1)은 다음을 만족시킨다고 가정한다.

$$A1: B = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r B_i \text{는 } \text{rank}(B) = m < n \text{를 만족시킨다.}$$

A2: $\|h(t)\| \leq \phi \|u\| + \rho(x,t)$ 을 만족시키는 상수 $\phi < 1$ 함수 $\rho_f(x,t)$ 가 알려져 있다.

선형 슬라이딩 평면을 $\Omega = \{x : \sigma = Sx = 0\}$ 로 정의하자. 여기에서 S 는 $m \times n$ 행렬이다. 이전의 결과 [1-7]를 참조하면 S 는 다음 성질을 만족시키는 것을 찾아야 함을 알 수 있다.

$$P1: \sum \beta_i S B_i \text{는 역행렬이 존재한다.}$$

P2: 슬라이딩 평면 $Sx = 0$ 에 제한된 $(n-m)$ 차의 슬라이딩 모드 동역학은 점근적으로 안정하다.

결국 가정 A1-A2를 만족시키는 시스템 (1)에 대하여 성질 P1-P2를 만족시키는 $m \times n$ 행렬 S 를 찾고 이를 이용한 스위칭 제어기를 제안하는 것으로 문제를 설정할 수 있겠다.

다음의 보조정리들은 주요 결과를 유도하는 데 사용될 것이다.

보조정리 1: 임의의 적절한 차원을 갖는 행렬 X, Y 와 양수 δ 에 대하여 다음이 항상 성립한다.

$$XY + Y^T X^T \leq \delta X X^T + \frac{1}{\delta} Y^T Y$$

보조정리 2: [8] 임의의 행렬 A, B 에 대해 $I + AB$ 의 역행렬이 존재한다고 하자. 그러면 다음이 성립한다.

$$(I + AB)^{-1} = I - A(I + BA)^{-1} B$$

보조정리 3: 임의의 적절한 차원을 갖는 벡터 a, b 에 대하여 다음이 항상 성립한다.

$$2\sqrt{\|a\| \cdot \|b\|} \leq \|a\| + \|b\|$$

III. 주요 결과

다음과 같은 행렬 $H, F(\beta)$ 를 정의하자.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2008. 11. 14., 채택확정: 2009. 4. 20.

최한호: 동국대학교 전기공학부(hhchoi@dongguk.edu)

※ 이 논문은 2008년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음.

$$H = \frac{1}{2}[(B - B_1), \dots, (B - B_r)],$$

$$F(\beta) = [(1 - 2\beta_1)I, \dots, (1 - 2\beta_r)I]^T$$

위의 정의를 이용하여 (1)식을 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \beta_i A_i x + [B + HF(\beta)][u + h] \quad (3)$$

또한 (2)식을 이용하여 다음 부등식을 보일 수 있다.

$$F^T(\beta)F(\beta) = \sum_{i=1}^r (1 - 2\beta_i)^2 I \leq rI \quad (4)$$

정리 1: 시스템 (1)을 고려하자. 다음 LMI (5)-(8)를 모든 $i = 1, \dots, r$ 에 대하여 만족시키는 해 X, γ, d_1, d_2 가 존재한다고 가정하자.

$$\begin{bmatrix} \Phi^T(A_i X + X A_i^T)\Phi & * & * \\ \gamma I & -(1 - \gamma)I & 0 \\ A_i X \Phi & 0 & -(1 - \gamma)I \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} X & I & 0 \\ I & d_1 I & 0 \\ 0 & 0 & d_2 I - X \end{bmatrix} > 0 \quad (6)$$

$$2\gamma > \frac{\eta}{\kappa}(d_1 + d_2) \quad (7)$$

$$1 - \phi - (1 + \phi)\gamma > 0 \quad (8)$$

여기에서 $X \in R^{n \times n}$, $\gamma \in R$, $d_1 \in R$, $d_2 \in R$ 은 결정 변수들이고 $\eta = \sqrt{r} \|H\|$, $\kappa = \sqrt{\lambda_{\min}(B^T B)}$ 이며 Φ 는 $B^T \Phi = 0$, $\Phi^T \Phi = I$ 를 만족시키는 임의의 $n \times (n - m)$ 행렬이다. 다음의 스위칭 제어기를 고려하자.

$$u = -\delta(t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \quad (9)$$

여기에서 슬라이딩 평면은 다음처럼 정의된다.

$$\sigma = Sx = (B^T X^{-1} B)^{-1} B^T X^{-1} x \quad (10)$$

$\rho(t)$ 는 다음처럼 정의된다.

$$\delta(t) = \frac{1}{1 - \psi - \phi} [\theta \|x\| + (1 + \psi)\rho(t, x) + \epsilon] \quad (11)$$

그리고 $\epsilon > 0$, $\theta = \sum \|SA_i\|$, $\psi = \sqrt{r} \|SH\|$ 을 만족시킨다. 그러면 S 는 P1-2를 만족시키며 제어기 (9)는 슬라이딩 모드가 유한한 시간 안에 시작하도록 한다.

증명: 먼저 (10)에 주어진 S 가 P1을 만족시킴을 보이겠다. [8]의 Schur complement 보조정리를 사용하면 (5), (6)의 LMI는 다음을 의미함을 알 수 있다.

$$0 < \gamma < 1, \quad 0 < \frac{1}{d_1} I < X < d_2 I \quad (12)$$

우리는 $\|SHF(\beta)\| < 1$ 가 만족되면 성질 P1이 만족되는 것을 쉽게 알 수 있다. (4)식은 $\|HF(\beta)\| \leq \sqrt{r} \|H\| = \eta$ 를 (12)는 $\gamma < 1$ 을 의미하므로 다음이 만족되면 $\|SHF(\beta)\| < 1$ 이 성립한다.

$$\eta^2 SS^T < \gamma^2 I \quad (13)$$

보조정리 3과 (7), (10), (12)를 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\eta^2 SS^T \leq \eta^2 d_1 (B^T X^{-1} B)^{-1} \leq \eta^2 d_1 d_2 (B^T B)^{-1} \leq \frac{\eta^2}{4\kappa^2} (d_1 + d_2)^2 < \gamma^2 I \quad (14)$$

결국 P1이 성립한다. S 가 P2를 만족시킴을 보이겠다. [1,2]에서의 방법을 사용하여 등가입력을 구하고 이를 이용하여 슬라이딩 모드 동역학을 구하고 리아푸노프 정리를 이용하여 안정함을 보이겠다. (3), (10)를 이용하여 다음 동역학을 구할 수 있다.

$$\dot{\sigma} = \sum_{i=1}^r \beta_i S A_i x + [I + SHF(\beta)][u + h] \quad (15)$$

결국 [1,2]를 참조하여 $\dot{\sigma} = \sigma = 0$ 으로 하여 (15)식으로부터 다음의 등가입력을 구할 수 있다.

$$u_{eq}(t) = -h(t) - [I + SHF(\beta)]^{-1} \sum_{i=1}^r \beta_i S A_i x \quad (16)$$

여기에서 $\|SHF(\beta)\| < 1$ 즉 $I + SHF(\beta)$ 의 역행렬이 존재하는 것이 이용되었다. 다음처럼 변환 행렬 M 과 이와 관련된 벡터 v 를 정의하자.

$$M = \begin{bmatrix} (\Phi^T X \Phi)^{-1} \Phi^T \\ (B^T X^{-1} B)^{-1} B^T X^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ S \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Vx \\ Sx \end{bmatrix} = Mx$$

(17)은 $v_2 = \sigma$, $M^{-1} = [X\Phi, B]$ 가 성립함을 의미한다. (17)의 변환행렬을 사용하여 (3)식을 다음처럼 바꾸어 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{\sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{A}_{11} & \overline{A}_{12} \\ \overline{A}_{21} & \overline{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \sigma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} VHF(\beta) \\ I + SHF(\beta) \end{bmatrix} [u + h] \quad (18)$$

여기에서 \overline{A}_{ij} 는 다음처럼 정의된다.

$$\overline{A}_{11} = \sum_{i=1}^r \beta_i V A_i X \Phi, \quad \overline{A}_{12} = \sum_{i=1}^r \beta_i V A_i B$$

$$\overline{A}_{21} = \sum_{i=1}^r \beta_i S A_i X \Phi, \quad \overline{A}_{22} = \sum_{i=1}^r \beta_i S A_i B$$

등가 제어 방법에 따라 (18)식에서 $\dot{\sigma} = \sigma = 0$ 로 놓고 (16)의 $u_{eq}(t)$ 를 $u(t)$ 에 대입하면 슬라이딩 평면 $Sx = 0$ 에 구속된 슬라이딩 모드 동역학이 다음처럼 주어짐을 알 수 있다.

$$\dot{v}_1 = \overline{A}_{11} v_1 - VHF(\beta)[I + SHF(\beta)]^{-1} \overline{A}_{21} v_1 \quad (19)$$

보조정리 2를 이용하여 (19)를 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\dot{v}_1 = \sum_{i=1}^r \beta_i V [I + HF(\beta)S]^{-1} A_i X \Phi v_1 = \overline{A}_{11} v_1 - V [I + HF(\beta)S]^{-1} HF(\beta) \overline{A}_{21} v_1 \quad (20)$$

(20)의 동역학식은 다음 부등식을 만족시키는 리아푸노프 행렬 $P > 0$ 가 존재하면 안정하다.

$$P\overline{A_{11}} - PV[I + HF(\beta)S]^{-1}HF(\beta)\overline{A_{21}} + * < 0 \quad (21)$$

(13)과 $\|HF(\beta)\| \leq \sqrt{r}\|H\| = \eta$ 을 이용하여 $\|HF(\beta)S\| \leq \gamma < 1$ 를 얻고 다음 식이 성립함을 보일 수 있다.

$$\|I + HF(\beta)S\| \geq 1 - \gamma, \quad \|I + HF(\beta)S\|^{-1} < \frac{1}{1 - \gamma} \quad (22)$$

보조정리 1과 (22)를 이용하여 다음 부등식이 성립함을 쉽게 보일 수 있다.

$$PV(I + HF(\beta)S)^{-1}HF(\beta)\overline{A_{21}} + * \leq \frac{\gamma^2}{1 - \gamma}PVV^TP + \frac{1}{1 - \gamma}[\sum \beta_i A_i X \Phi]^T [\sum \beta_i A_i X \Phi] \quad (23)$$

(23)식은 다음 식이 성립하면 (21)식이 만족됨을 의미한다.

$$P\overline{A_{11}} + \overline{A_{11}}^T P + \frac{\gamma^2}{1 - \gamma}PVV^TP + \frac{1}{1 - \gamma}[\sum \beta_i A_i X \Phi]^T [\sum \beta_i A_i X \Phi] < 0 \quad (24)$$

[8]의 Schur complement 보조정리를 사용하여 다음 식이 모든 $i = 1, \dots, r$ 에 대하여 성립하면 (24)식이 만족됨을 보일 수 있다.

$$\begin{bmatrix} PVA_i X \Phi + * & * & * \\ \gamma V^T P & -(1 - \gamma)I & 0 \\ A_i X \Phi & 0 & -(1 - \gamma)I \end{bmatrix} < 0 \quad (25)$$

위 식은 (5)가 성립하면 $P = X$ 에 의해 만족된다. 즉 슬라이딩 모드 동역학 (19)가 안정함을 의미한다.

슬라이딩모드가 유한한 시간 후에 시작됨을 보이기 위 $\sigma^T \sigma < 0$ 이 0이 아닌 σ 에 대하여 성립함을 보이기만 하면 된다. (15)식에 스위칭 입력 (9)를 대입하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma^T \sigma &\leq \sigma^T [\sum \beta_i S A_i x + [I + SHF(\beta)](u + h)] \\ &\leq \sigma^T \sum \beta_i S A_i x + (\rho + \phi \|u\| + \psi [\rho + \phi \|u\| + \|u\|]) \|\sigma\| + \sigma^T u \\ &\leq [(1 + \psi)\rho + (\psi + \phi\psi + \phi)\|u\| + \sum \|S A_i\| \cdot \|x\|] \|\sigma\| - \delta \|\sigma\| \\ &\leq [(1 + \psi)\rho + (\psi + \phi\psi + \phi)\delta + \sum \|S A_i\| \cdot \|x\|] \|\sigma\| - \delta \|\sigma\| \\ &\leq -(1 - \psi - \phi\psi - \phi)\delta \|\sigma\| + [(1 + \psi)\rho + \theta \|x\|] \|\sigma\| \leq -\epsilon \|\sigma\| < 0 \end{aligned}$$

여기에서 (8)과 (13)식에 의해 $\psi = \sqrt{r}\|SH\| \leq \eta\|S\| < \gamma$ 가 성립하며 $1 > \psi + \phi\psi + \phi$ 이 항상 보장됨을 이용하였다. 결국 슬라이딩 모드 동역학은 안정하며 슬라이딩 모드는 유한한 시간 후에 시작됨을 알 수 있다.

주 1: [8]의 결과를 이용하면 (A_i, B) 쌍이 안정가능하지 않으면 LMI (5)-(8)의 해가 존재하지 않음을 알 수 있다. 그리고 위의 증명과정을 통해 $\rho_B \|B_j\| < 1$ 가 성립하지 않아도 LMI (2)의 해가 존재하지 않음을 알 수 있다.

주 2: 다음과 같이 크기가 제한된 제어기들은 폐회로 응답을 국부적으로 안정화시킬 것이다.

$$u(t) = -\delta_0 \frac{\sigma}{\|\sigma\|}$$

$$u(t) = - \begin{bmatrix} \delta_1 \text{sign}(\sigma_1) \\ \vdots \\ \delta_m \text{sign}(\sigma_m) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \delta_1 \text{sign}(S_1 x) \\ \vdots \\ \delta_m \text{sign}(S_m x) \end{bmatrix}$$

여기에서 $\delta_0 > 0, \delta_i > 0$ 로 그 크기에 따라 안정영역의 크기가 변하는 설계변수이며 $\text{sign}(\cdot)$ 는 시그넘 함수이다. 그리고 S_i 는 슬라이딩 평면 행렬 S 의 i 번째 열을 의미한다.

IV. 수치적 예

[9]에 주어진 수레에 실린 역진자 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{2 - 0.3 \cos^2 x_1} \{29.4 \sin x_1 - \cos x_1 [u - f_c + x_2^2 \sin x_1]\} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= -\frac{5.88 \sin 2x_1}{8 - 1.2 \cos^2 x_1} + \frac{0.4}{4 - 0.6 \cos^2 x_1} \{u - f_c + x_2^2 \sin x_1\} \end{aligned} \quad (26)$$

여기에서 마찰력 $f_c = 0.005 \text{sign}(x_4)$ 이다. [9]에 주어진 방법을 사용하여 (26)을 다음의 데이터를 갖는 (1)의 모델로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 17.294 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.729 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1765 \\ 0 \\ 0.1176 \end{bmatrix} \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 17.149 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.694 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1735 \\ 0 \\ 0.1171 \end{bmatrix} \\ h(t) &= x_2^2 \sin x_1 - 0.005 \text{sign}(x_4) \end{aligned} \quad (27)$$

위의 데이터는 $\phi = 0, \rho(t, x) = \|x\|^2 + 0.005$ 로 정할 수 있음을 의미한다. 결국 LMI (5)-(8)을 풀어 다음의 제어기를 얻을 수 있다.

$$u = -(1 + 356\|x\| + 1.1\|x\|^2) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \quad (28)$$

여기에서 σ 는 다음처럼 주어진다.

$$\sigma = [-59.081, -10.288, -0.237, -6.819]x$$

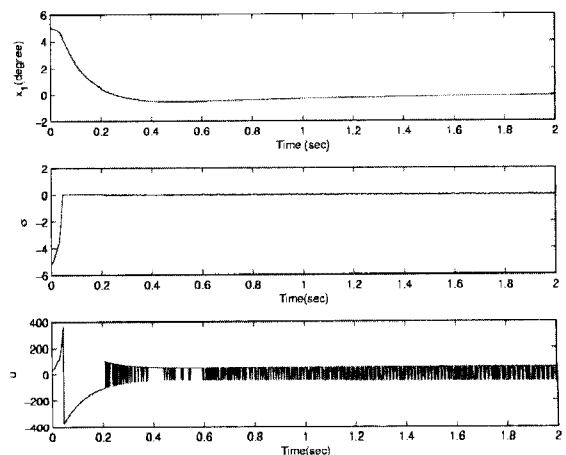


그림 1. 식 (26)과 (28)의 폐회로 응답.

Fig. 1. Closed-loop system responses of (26) and (28).

초기값은 $x_1(0) = 5^\circ, x_2(0) = x_3(0) = x_4(0) = 0$ 이라고 가정하였다. 그림 1은 제어기 (28)을 실제 시스템 모델 (26)에 가하였을 때 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 제안된 슬라이딩 모드 제어기 설계 방법이 성공적으로 적용됨을 알 수 있다. [6,7]의 방법을 적용하기 위해서는 (27)을 다음의 형태로 모델링해야 한다.

$$\dot{x} = [A + \Delta A(t)]x + [B + \Delta B(t)][u + h(t)] \quad (29)$$

(29) 형태의 모델링 방법은 (1)의 폴리토픽 모델보다 간단하나 불확실성이 구조적일 때에 비해 보수성이 크다. [8]을 참조하여 (27)의 값으로부터 $A, B, \|\Delta A(t)\|, \|\Delta B(t)\|$ 를 다음의 식을 이용하여 정하면 합리적일 것이다.

$$\begin{aligned} A &= (A_1 + A_2)/2, B = (B_1 + B_2)/2 \\ \|\Delta A(t)\| &\leq \rho_A = \max(\|A - A_1\|, \|A - A_2\|) \\ \|\Delta B(t)\| &\leq \rho_B = \max(\|B - B_1\|, \|B - B_2\|) \end{aligned}$$

결국 (27)을 다음의 값을 갖는 (29)의 모델로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 17.222 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.7116 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.175 \\ 0 \\ 0.1176 \end{bmatrix} \\ \rho_A &= 0.0747, \quad \rho_B = 0.0015, \\ h(t) &= x_2^2 \sin x_1 - 0.005 \text{sign}(x_4) \end{aligned} \quad (30)$$

[6,7]의 LMI조건들은 (30)의 값에 대하여 해가 존재하지 않아 적용할 수가 없었다. LMI 최적화방법을 사용하여 조금 더 수치연산을 수행하여 보았더니 [7]의 방법은 (30)의 데이터에서 쓰인 ρ_A, ρ_B 의 95%이하 값에서 즉 $\rho_A \leq 0.0740, \rho_B \leq 0.0014$ 에서 해가 존재하였다. [6]의 방법은 2.3% 이하일 때 해가 존재하였다. 이는 (29)식의 형태가 입력과 시스템 행렬의 불확실성을 비구조적으로 표현하여 초래된 것이며 폴리토픽 모델을 대상으로 하여 제안된 본 논문의 방법이 [6,7]의 방법보다 보수성이 덜한 이유이다.

V. 결론

본 논문에서는 비정합 불확실성이 존재하는 폴리토픽 시스템 모델을 대상으로 슬라이딩 평면이 존재할 조건을 LMI 형태로 제시하고 스위칭 궤환 제어기를 제시하였다.

마지막으로 수치적인 예를 제시하여 효용성을 보였고 이전 방법보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] R. A. DeCarlo, S. H. Zak, and G. P. Mathews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial," *IEEE Proceedings*, vol. 76, pp. 212-232, 1988.
- [2] V.I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, pp. 212-222, 1977.
- [3] C. Edwards, "A practical method for the design of sliding mode controllers using linear matrix inequalities," *Automatica*, vol. 40, pp. 1761-1769, 2004.
- [4] 최한호, "선형 슬라이딩 평면의 개선된 존재 조건" 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제13권 제9호, pp. 851-855, 2007.
- [5] 최한호, "전차수 슬라이딩 모드 관측기를 대체하는 축소차수 관측기의 LMI 기반 설계," 제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제14권 제3호, pp. 232-235, 2008.
- [6] H. H. Choi, "Variable structure control of dynamical systems with mismatched norm-bounded uncertainties: An LMI approach," *Int. J. Control*, vol. 74, pp. 1324-1334, 2001.
- [7] H. H. Choi, "LMI-based sliding surface design for integral sliding mode control of mismatched uncertain systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 52, no. 4, pp. 736-742, 2007.
- [8] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in system and Control Theory*, Philadelphia, SIAM, 1994.
- [9] M. C. M. Teixeira, and S. H. Zak, "Stabilizing controller design for uncertain nonlinear systems using fuzzy models," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 7, pp. 133-142, 1999.

최한호

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제13권 제9호 참조