

폴리토픽 모델을 갖는 대규모 시스템을 위한 비집중화 슬라이딩 모드 제어기 설계

Decentralized Sliding Mode Feedback Control Design Method for a Large Scale System with a Polytopic Models

최 한 호*
(Han Ho Choi)

Abstract: Based on the sliding mode control theory, a decentralized controller design method is developed for a large scale system with a polytopic model. In terms of LMIs, we derive sufficient conditions for the existence of the decentralized controller guaranteeing a stable sliding motion. We also give an LMI-based control design algorithm. Finally, the proposed method is applied to decentralized stabilization of double-inverted pendulums. Simulation results show that our method gives not only the robust stability but perfect rejection of norm-bounded uncertainties.

Keywords: LMI (Linear Matrix Inequality), sliding mode control, switching surface, large scale system, decentralized control, polytopic model

I. 서론

일부 연구자들은 전력시스템, 산업용 로봇, 컴퓨터 네트워크 등등 매우 다양한 실제의 공학 시스템들이 대규모 상호연관 시스템들이며 이들의 비집중화 제어기 설계는 신뢰성이나 실제 구현 측면에서 매우 중요한 문제임에 주목하여 대규모 시스템을 위한 비집중화 슬라이딩 모드 제어기 설계방법을 제안하였다[1,2]. 그러나 이들은 주어진 비집중화 슬라이딩 모드 제어기들은 상호연관 행렬(interconnection matrix)이나 불확실성이 정합조건(matching condition)을 만족시킨다라는 매우 제한적인 구속조건 아래에서 제안되었다. 최근에는 정합조건을 만족시키지 않는 시스템에 대한 연구가 제안되었다[3,4]. 하지만 이들 방법은 불확실성이 비구조적이라는 가정과 이들 불확실성의 높 경계치가 알려져 있다는 가정을 사용하였기 때문에 [3,4]에 주어진 제어기 존재 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 대규모 시스템을 대상으로 슬라이딩 모드 제어기 설계법을 제안한다. 슬라이딩 모드의 안정성을 보장하는 선형 슬라이딩 평면의 존재를 위한 충분조건을 LMI 형태로 유도하고 선형 슬라이딩 평면을 위한 공식을 제시한다. 그리고 슬라이딩 평면으로 궤적을 움직이게 할 비선형 이득을 설계한다. 마지막으로 설계 예를 제시한다.

II. 시스템 모델

우리는 다음과 같은 동역학 방정식으로 표현 가능한 N 개의 부시스템 $\Sigma_i, i=1, \dots, N$ 을 갖는 폴리토픽 모델로 표

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 9. 11., 수정: 2009. 11. 10., 채택확정: 2009. 11. 21.
최한호: 동국대학교 서울 전기공학부(hhchoi@dongguk.edu)

현 가능한 상호연관 대규모 시스템을 고려한다.

$$\dot{x}_i = \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik} [A_{ik}x_i + \sum_{j=1}^N \Delta A_{ijk}(t)x_j] + \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik} [B_{ik}u_i + \Delta B_{ik}(t)u_i + h_{ik}(t)], \quad i=1, \dots, N \quad (1)$$

여기에서 $x_i \in R^{n_i}$ 은 상태이고 $u_i \in R^{m_i}$ 은 제어 입력이고, A_{ik}, B_{ik} 는 적절한 차원을 갖는 공칭 시스템 행렬들이고, $\Delta A_{ijk}(t)$ 는 불확실한 상호연관 행렬이고 $\Delta B_{ik}(t)$ 는 입력 행렬의 불확실성이고 $h_{ik}(t)$ 는 외란을 의미한다. β_{ik} 는 미지의 변수로 모든 i 에 대하여 $\sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik} = 1, 1 \geq \beta_{ik} \geq 0$ 를 만족시킨다. 폴리토픽모델은 비선형 시스템을 여러 동작점에서 동정하여 얻은 상태 공간 모델의 convex interpolation으로부터 얻어질 수 있음에 유의해야 한다[5]. 위의 시스템 방정식은 다음을 만족시킨다고 가정한다.

A1: $\Delta A_{ijk}(t) = D_i F_{ijk}(t)$ 를 만족시키는 행렬 D_i 가 존재하고 $\|F_{ijk}\| \leq \delta_{ij}$ 를 만족시킨다.

A2: $h_{ik}(t) = B_{ik} f_{ik}(t), \Delta B_{ik}(t) = B_{ik} H_{ik}(t)$ 를 만족시킨다.

A3: $B_{i1} = \dots = B_{ir_i} = B_i$ 이며 $rank(B_i) = m_i$ 이다.

A4: $\|H_{ik}(t)\| \leq \phi_i < 1, \|f_{ik}(t)\| \leq \rho_{ik}(t) \leq \bar{\rho}_i(t)$ 를 만족시킨다.

위의 가정을 사용하여 (1)은 다음처럼 쓰일 수 있다.

$$\dot{x}_i = \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik}(\theta_i) [A_{ik}x_i + D_i \sum_{j=1}^N F_{ijk}(t)x_j] + B_i [u_i + \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik}(\theta_i) [H_{ik}(t)u_i + f_{ik}(t)]] \quad (2)$$

다음의 보조정리는 제안된 방법을 유도하기 위해 사용될 것이다.

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

$$2X^T Y \leq \delta X^T X + \frac{1}{\delta} Y^T Y \quad (3)$$

III. 슬라이딩 평면의 존재 조건

[1-4]의 결과로부터 (2)를 위한 슬라이딩 모드 제어기 설계는 두 개의 단순한 과정으로 분리될 수 있음을 알 수 있다. 첫번째는 $\bar{N}-\bar{M}$ 차의 슬라이딩 동특성을 안정화할 $\bar{M} \times \bar{N}$ 슬라이딩 행렬을 구하는 것이다. 여기에서 $\bar{N} = \sum_i^N n_i$, $\bar{M} = \sum_i^N m_i$ 이다. 두번째 과정은 도달조건을 만족시키도록 스위칭 제어기를 설계하는 것이다. 본 3장에서는 슬라이딩 행렬을 구하겠다.

부시스템 Σ_i 의 슬라이딩 평면을 $\sigma_i = S_i x_i = 0$ 라고 하자. 여기에서 S_i 는 $m_i \times n_i$ 의 full rank 행렬로 이전의 결과들로부터 우리는 스위칭 평면이 다음과 같은 성질들을 만족시켜야 함을 알 수 있다.

P1: 간편성을 위하여 $S_i B_i = I$ 이다.

P2: 전체 스위칭 평면 $[x_1^T S_1^T, \dots, x_N^T S_N^T] = 0$ 에 구속된 $\bar{N}-\bar{M}$ 차의 슬라이딩 모드 시스템은 상태공간 모든 영역에서 안정하다.

정리 1: 다음 LMI를 만족시키는 해 X_i, λ_{ij} 가 존재한다고 가정하자.

$$X_i > 0, \begin{bmatrix} \Phi_i^T A_{ik} X_i \Phi_i + * & * & * \\ \Pi_i^T & -A_i & 0 \\ \lambda_i D_i^T \Phi_i & 0 & -\lambda_i I \end{bmatrix} < 0 \quad (4)$$

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}, \quad A_i = \text{Diag}(\lambda_{i1} I, \dots, \lambda_{iN} I)$$

$$\Pi_i = [\delta_{i1} \Phi_i^T X_i, \dots, \delta_{iN} \Phi_i^T X_i]$$

여기에서 $\Phi_i \in R^{n_i \times (n_i - m_i)}$ 는 $B_i^T \Phi_i = 0, \Phi_i^T \Phi_i = 0$ 을 만족시키는 행렬이고 *는 대칭성에 의해 유추할 수 있는 행렬블록이다. 그러면 성질 P1-2를 만족시키는 S_i 가 존재하고 (4)의 해 X_i 를 사용하여 다음처럼 표현할 수 있다.

$$S_i = (B_i^T X_i^{-1} B_i)^{-1} B_i^T X_i^{-1} \quad (5)$$

증명: (5)의 S_i 는 P1을 만족시킴을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 P2를 만족시키는 것을 보이기만 하면 된다. 다음과 같은 변환행렬과 그와 연계된 벡터 z 를 정의하자.

$$M = \begin{bmatrix} \Psi_i \\ S_i \end{bmatrix}, \quad v_i = M_i x_i = \begin{bmatrix} \Psi_i x_i \\ S_i x_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i \\ v_{2i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기에서 $\Psi_i = (\Phi_i^T X_i \Phi_i)^{-1} \Phi_i^T$ 이다. (6)식과 [5]의 결과를 이용하여 $M_i^{-1} = [X_i \Phi_i, B_i], v_{2i} = \sigma_i$ 임을 알 수 있다. (6)을 이

용해 (3)을 다음의 정규형태를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik} \Psi_i A_{ik} [X_i \Phi_i z_i + B_i \sigma_i] \\ &\quad + \Psi_i D_i \sum_{k=1}^{r_i} \sum_{j=1}^N \beta_{ik} F_{ijk}(t) [X_j \Phi_j z_j + B_j \sigma_j] \\ \dot{\sigma}_i &= \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik} S_i A_{ik} [X_i \Phi_i z_i + B_i \sigma_i] \\ &\quad + S_i D_i \sum_{k=1}^{r_i} \sum_{j=1}^N \beta_{ik} F_{ijk}(t) [X_j \Phi_j z_j + B_j \sigma_j] \\ &\quad + u_i + \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik} [H_{ik}(t) u_i + f_{ik}(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

[6]처럼 등가입력 방법을 이용하여 슬라이딩 동특성이 다음처럼 주어짐을 알 수 있다.

$$\dot{z}_i = \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik} [\Psi_i A_{ik} X_i \Phi_i z_i + \Psi_i D_i \sum_{j=1}^N F_{ijk}(t) X_j \Phi_j z_j] \quad (8)$$

(8)식은 리아푸노프 함수 $V_s(t) = \sum_i z_i^T P_i z_i$ 가 양수 k_s 에 대하여 다음을 만족시키도록 하는 양한정 리아푸노프 행렬 $P_i \in R^{(n_i - m_i) \times (n_i - m_i)}$ 가 존재하면 안정하다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &\leq 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{r_i} \beta_{ik} z_i^T P_i \Psi_i [A_{ik} X_i \Phi_i z_i + D_i \sum_{j=1}^N F_{ijk}(t) X_j \Phi_j z_j] \\ &\leq -k_s \sum_i z_i^T z_i \end{aligned}$$

$P_i = \Phi_i^T X_i \Phi_i$ 라고 하자. 여기에서 X_i 는 LMI (4)의 해이다. 그러면 $P_i > 0$ 이다. 가정 1과 보조정리 1, $\sum_j \lambda_{ij} = \lambda_i$ 를 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\dot{V}_s \leq \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{r_i} z_i^T \Phi_i^T [A_{ik} X_i + X_i A_{ik}^T + \lambda_i D_i D_i^T + \sum_j \frac{\delta_{ij}^2}{\lambda_{ij}} X_i^2 \Phi_i] z_i$$

한편 [5]의 Schur complement 공식을 이용하여 (4)식이 성립하면 다음 식이 $i=1, \dots, N, k=1, \dots, r_i$ 에 대하여 성립함을 알 수 있다.

$$\Phi_i^T [A_{ik} X_i + X_i A_{ik}^T + \lambda_i D_i D_i^T + \sum_j \frac{\delta_{ij}^2}{\lambda_{ij}} X_i^2 \Phi_i] \Phi_i < 0$$

결국 (5)의 S_i 는 P1-2를 보장한다. $\nabla \nabla \nabla$

주 1: [4]의 방법과 같이 본 논문에서 제안된 방법도 H_∞, H_2 나 최소 감쇠율 구속조건 등의 성능지수들을 슬라이딩 평면 설계에 포함시킬 수 있는 장점이 있다. 예로 다음을 사용하면 슬라이딩모드의 최소감쇠율 α 를 보장하는 슬라이딩 평면을 설계할 수 있다.

$$X_i > 0, \begin{bmatrix} \Phi_i^T (A_{ik} + \alpha I) X_i \Phi_i + * & * & * \\ \Pi_i^T & -A_i & 0 \\ \lambda_i D_i^T \Phi_i & 0 & -\lambda_i I \end{bmatrix} < 0$$

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}, \quad A_i = \text{Diag}(\lambda_{i1} I, \dots, \lambda_{iN} I)$$

$$H_i = [\delta_{1i}\Phi_i^T X_i, \dots, \delta_{3i}\Phi_i^T X_i]$$

주 2: 다음과 같은 변수 치환을 고려해보자.

$$X_i = \begin{bmatrix} \Phi_i^T \\ B_i^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Y_i & * \\ L_i & I + L_i Y_i^{-1} L_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_i^T \\ B_i^T \end{bmatrix}$$

여기에서 $Y_i \in R^{(n_i-m_i) \times (n_i-m_i)}$, $L_i \in R^{m_i \times (n_i-m_i)}$ 이다. 그러면 [5]의 Schur complement 공식을 사용해서 $Y_i > 0$ 이면 $X_i > 0$ 임을 알 수 있다. 위의 변수치환을 사용하면 (4)의 LMI를 다음과 같은 LMI로 변환 할 수 있다.

$$Y_i > 0, \begin{bmatrix} \Phi_i^T A_{ik} \Phi_i Y_i + \Phi_i^T A_{ik} B_i L_i + * & * & * \\ \Xi_i^T & -A_i & 0 \\ \lambda_i D_i^T \Phi_i & 0 & -\lambda_i I \end{bmatrix} < 0$$

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}, \quad A_i = \text{Diag}(\lambda_{1i} I, \dots, \lambda_{3i} I)$$

$$\Xi_i = [\delta_{1i}(Y_i \Phi_i^T + L_i^T B_i^T), \dots, \delta_{3i}(Y_i \Phi_i^T + L_i^T B_i^T)]$$

여기에서 $Y_i \in R^{(n_i-m_i) \times (n_i-m_i)}$, $L_i \in R^{m_i \times (n_i-m_i)}$, $\lambda_{ij} \in R$ 이 결정변수들이다. 그리고 (5)의 슬라이딩 평면의 공식은 다음처럼 고쳐 쓰일 수 있다.

$$S_i = -L_i Y_i^{-1} \Phi_i^T + (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T \quad (10)$$

LMI식 (4)의 경우에는 결정해야할 최적화 변수의 수가 $\sum_{i=1}^N (n_i(n_i+1)/2 + N)$ 이나 위 LMI식 (9)의 경우에는 최적화 변수 수가 $\sum_{i=1}^N [(n_i-m_i)(n_i-m_i+1)/2 + m_i(n-m_i) + N]$ 으로 줄었음에 유의해야 한다.

IV. 제어기 설계

다음의 비집중 제어 규칙을 고려하자.

$$u_i = -\frac{1}{1-\phi_i} \vartheta_i(t, x_i) \frac{\sigma_i}{\|\sigma_i\|} \quad (11)$$

여기에서

$$\vartheta_i(t, x_i) = \epsilon_i + \bar{\rho}_i(t) + \sum_{k=1}^{r_i} \tau_{ik}(x_i)$$

$$\tau_{ik}(x_i) = \|x_i\| (\|S_i A_{ik}\| + \sum_{j=1}^N \delta_{ji} \|S_j D_j\|)$$

그러면 다음의 정리를 구할 수 있다.

정리 2: (4)를 만족시키는 해가 존재하며 슬라이딩 평면이 (5)처럼 주어진다고 가정하자. 그리고 (11)과 같은 비집중화 제어를 사용되었다고 가정하자. 그러면 제어 시스템은 안정하다.

증명: (5) 와 (7)을 사용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i^T}{\|\sigma_i\|} \dot{\sigma}_i < \sum_{i=1}^N \sum_k^{r_i} \beta_{ik} \frac{\sigma_i^T}{\|\sigma_i\|} S_i A_{ik} x_i$$

$$+ \sum_{i=1}^N \sum_k^{r_i} \beta_{ik} \frac{\sigma_i^T}{\|\sigma_i\|} [S_i D_i \sum_j^N F_{ijk}(t) x_j + f_{ik}(t)]$$

$$+ \sum_{i=1}^N \sum_k^{r_i} \beta_{ik} \frac{\sigma_i^T}{\|\sigma_i\|} H_{ik}(t) u_i - \sum_i^N \frac{\vartheta_i}{1-\phi_i}$$

한편 가정들과 위식을 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i^T}{\|\sigma_i\|} \dot{\sigma}_i < \sum_{i=1}^N \sum_k^{r_i} \tau_{ik} + \sum_i^N \bar{\rho}_i + \sum_i^N \frac{\phi_i}{1-\phi_i} \vartheta_i - \sum_i^N \vartheta_i < -\sum_i^N \epsilon_i$$

그러므로 [4]를 참조하여 슬라이딩 동작이 유도되고 궤적이 0으로 수렴함을 알 수 있다. $\nabla \nabla \nabla$

주 3: [5]의 결과를 이용하면 (4)식은 (A_{ik}, B_i) 가 안정화 가능하지 않으면 해가 존재하지 않음을 알 수 있다. 그리고 본 논문에서 제안된 결과는 다음과 같은 제어기 설계 알고리즘으로 요약될 수 있다.

- Step 1: (A_{ik}, B_i) 의 안정가능 여부를 확인한다. 어떤 i 혹은 k 에 대하여 안정 불가능하면 제안된 방법으로 제어기를 설계할 수 없으므로 중지한다. 아니면 Step 2로.
- Step 2: LMI (4) 혹은 (9)의 해를 구한다.
- Step 3: (5) 혹은 (10)의 공식을 이용해 S_i 를 구한다.
- Step 4: (11)에 따라 제어기를 구한다.

V. 수치적 예

[2,7]에서 고려된 두 개의 역진자가 스프링으로 연결된 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= g r \frac{m_1}{J_1} \sin x_{11} + \frac{1}{J_1} u_1 - \frac{\kappa}{J_1} x_{11} + \frac{\kappa}{J_1} x_{21} + \frac{1}{J_1} h_1(t) \\ \dot{x}_{21} &= x_{22} \\ \dot{x}_{22} &= g r \frac{m_2}{J_2} \sin x_{21} + \frac{1}{J_2} u_2 - \frac{\kappa}{J_2} x_{21} + \frac{\kappa}{J_2} x_{11} + \frac{1}{J_2} h_2(t) \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서 x_{11}, x_{21} 은 진자의 각변위이며 u_1, u_2 는 서보모터토크 입력이며 $h_i(t)$ 는 외란이며, κ 는 연결 스프링의 계수이며, 진자의 무게는 $m_1 = 2[\text{kg}], m_2 = 2.5[\text{kg}]$ 이며 관성질량은 $J_1 = 2[\text{kg}], J_2 = 2.5[\text{kg}]$ 이며 진자의 크기 $r = 1[\text{m}]$ 이며 중력가속도 $g = 9.8[\text{m/s}^2]$ 이다. 외란은 $|h_i(t)| \leq 5$ 이며 스프링 계수는 $1.5 \leq \kappa \leq 2.5$ 를 만족한다고 가정하자. (11)의 제어기를 구하기 위해서는 폴리토픽 모델이 필요하다. [7]을 참조하여 다음의 폴리토픽 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A_{11} &= A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 9.8 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \end{bmatrix} \\ A_{12} &= A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4 \end{bmatrix} \\ f_{11}(t) &= f_{12}(t) = h_1(t), f_{21}(t) = f_{22}(t) = h_2(t), \\ H_{11}(t) &= H_{12}(t) = H_{21}(t) = H_{22}(t) = 0, \\ F_{111}(t) &= F_{112}(t) = F_{221}(t) = F_{222}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\kappa & 0 \end{bmatrix} \\ F_{121}(t) &= F_{122}(t) = F_{211}(t) = F_{212}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \kappa & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

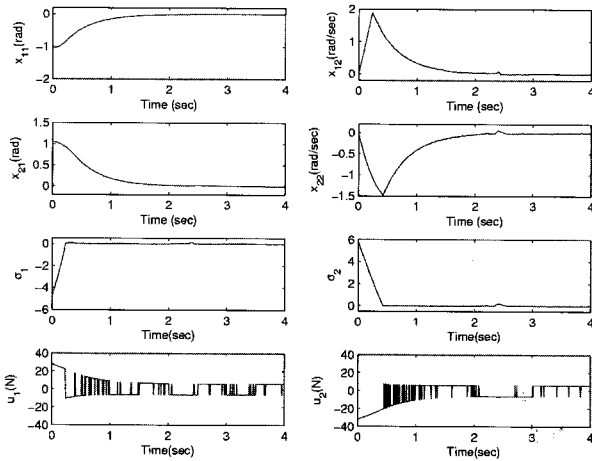


그림 1. 초기조건이 $x_{21}(0) = 60^\circ$, $x_{11}(0) = -x_{21}(0)$, $x_{12}(0) = x_{22}(0) = 0$ 일 때 응답.

Fig. 1. Closed-loop system responses with $x_{21}(0) = 60^\circ$, $x_{11}(0) = -x_{21}(0)$, $x_{12}(0) = x_{22}(0) = 0$.

결국 (12)를 (13)의 데이터를 갖는 모델 (2)로 표시할 수 있음을 알 수 있다. $|h_i(t)| \leq 5$ 이며 스프링 계수는 $1.5 \leq \kappa \leq 2.5$ 를 만족시키므로 다음을 얻을 수 있다.

$$\delta_{ij} = 2.5, \rho_{ik}(t) = 5, \phi_i = 0 \quad (14)$$

결국 주 3에 주어진 설계 알고리즘에 따라 다음의 슬라이딩 평면을 얻을 수 있다.

$$S_1 = [4.504, 2], \quad S_2 = [5.63, 2.50] \quad (15)$$

그리고 다음의 제어규칙을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} u_1 &= -(30\sqrt{x_{11}^2 + x_{12}^2} + 6) \text{Sgn}(\sigma_1) \\ u_2 &= -(30\sqrt{x_{21}^2 + x_{22}^2} + 6) \text{Sgn}(\sigma_2) \end{aligned} \quad (16)$$

여기에서 $\sigma_1 = S_1 x_1, \sigma_2 = S_2 x_2$ 이며 $\text{Sgn}(\cdot)$ 는 signum 함수이다. 시뮬레이션시 $\kappa = 2 + 0.5\sin\pi t$, $h_1(t) = 5\sin 2\pi t$, $h_2(t) = 5\sin\pi t$ 라 가정하였다. 그림 1은 $x_{21}(0) = 60^\circ$, $x_{11}(0) = -x_{21}(0)$, $x_{12}(0) = x_{22}(0) = 0$ 일 때 응답을 보여준다. [7]의 경우에는 $\kappa = 2$ 로 고정하여 시뮬레이션을 했음에도 정상상태 오차가 있었으나 본 논문에서 제시한 비집중제어 방식을 적용한 경우에는 스프링 계수에 불확실성을 가하였음에도 불구하고 강인제어 성능 뿐만 아니라 정상상태 오차가 없는 결과를 얻을 수 있음에 유의해야 한다. 또한 [7]을 비롯한 T-S 퍼지제어기의 경우에는 β_{ik} 값을 이용

하여 퍼지 추론을 통해 제어입력을 계산해야 하므로 부정확한 β_{ik} 를 사용하면 성능과 안정성을 보장할 수 없으며 본 논문에서 제안된 (16)의 형태보다 매우 복잡한 구조를 갖는 제어가 구성되어야 함에 유의해야 한다.

VI. 결론

본 논문에서는 정합조건을 만족시키지 않는 불확실성을 갖는 대규모 시스템의 비집중 안정화 문제를 다루었다. 제어로 비집중화 슬라이딩모드 제어기를 사용하였고 제어기의 설계를 위한 LMI-기반 알고리즘을 제시하였다. 마지막으로 두 개의 역진자가 스프링으로 연결된 시스템을 대상으로 설계 예를 제시하였다.

참고문헌

- [1] H. Khurana, S. I. Ahson, and S. S. Lamba, "On stabilization of large-scale control systems using variable structure system theory," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 31, pp. 176-178, 1986.
- [2] X. Xu, Y. Wu, and W. Huang, "Variable structure control approach of decentralized model reference adaptive systems," *IEE Proc. Pt. D*, vol. 137, pp. 302-306, 1990.
- [3] X.-G. Yan, C. Edwards, and S. K. Spurgeon, "Decentralised robust sliding mode control for a class of nonlinear interconnected systems by static output feedback," *Automatica*, vol. 40, pp. 613-620, 2004.
- [4] 최한호, "대규모 시스템을 위한 LMI 기반 비집중화 슬라이딩 모드 제어기 설계," 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제11권 제8호, pp. 651-655, 2005.
- [5] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, "Linear matrix inequalities in system and control theory," Philadelphia, SIAM, 1994.
- [6] V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, pp. 212-222, 1977.
- [7] H. Zhang, C. Li, and X. Liao, "Stability analysis and H_∞ controller design of fuzzy large-scale systems based on piecewise Lyapunov functions," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.-Part B: Cybern.*, vol. 36, pp. 685-698, 2006.

최한호

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제13권 제9호 참조.