비정합 불확실 시스템을 위한 견실한 슬라이딩 모드 제어

Robust Sliding Mode Control for Mismatched Uncertainties

°두 상 호*, 김 가 규**, 전 경 한***, 최 봉 열****

* 경북대학교 전자공학과(Tel : 81-053-940-8853 ; Fax : 81-053-959-7336 ; E-mail : insider@palgong.knu.ac.kr)
**한국전자통신연구원(Tel : 81-042-860-1124 ; Fax : 81-042-860-6671 ; E-mail : ggkim@etri.re.kr)
***경북대학교 전자공학과(Tel : 81-053-940-8853 ; Fax : 81-053-959-7336 ; E-mail : kacarot@csl.knu.ac.kr)
**** 경북대학교 전자공학과(Tel : 81-053-950-6553 ; Fax : 81-053-959-7336 ; E-mail : bychoi@ee.knu.ac.kr)

Abstract : This paper introduces a new design approach for robust sliding-mode control of a class of mismatched uncertainties. For this, we propose a design method of sliding-mode surface using eigenstructure assignment to be insensitive to perturbation in sliding-mode systems, and also find a formula which is shown bounds of mismatched uncertainties for stability of the system. Simulation results are given to illustrate the approach proposed in this paper.

Keywords : vsc, sliding surface, eigenstructure assignment, perturbation

1. 서 론

가변구조 제어(vsc)는 제어입력을 불연속적으로 바꾸어 미리 정해놓은 슬라이딩 평면(sliding surface) 위로 도달시키고 지속적으로 슬라이딩 평면 위에 머물도록 함으로써 시스템의 차수를 감소시켜 슬라이딩 모드(sliding mode)라는 동특성을 갖게 하는 제어방법이다[1],[2]. 슬라이딩 평면 위에서 시스템의 동특성은 슬라이딩 평면에 의해 결정되므로 슬라이딩 평면의 설계는 매우 중요한 문제이다. 최근 들어서는 시스템의 불확실성에 대해서 슬라이딩 모드 제어에 연구가 집중되어 제어입력의 공간에 있는 정합 불확실성(matched uncertainties)은 제거가능하게 되었으나[3],[4], 비정합 불확실성(mismatched uncertainties)은 슬라이딩 모드에서 제거하기가 어려워 슬라이딩 운동에 영향을 미치고 예상하지 않은 시스템의 불안정을 유발하여 최근 이에 관한 연구가 활발해 지고 있다. 불확실성이 슬라이딩 모드에서의 시스템에 항상 영향을 미치기 때문에 시스템이 안정하기 위한 영역이나 불확실성의 크기는 실계자에게 유용한 정보이다.

섭동에 견실하도록 슬라이딩 평면과 제어입력을 설계하기 위해서 고유구조 지정법(eigenstructure assignment)을 이용한다[5],[6]. 고유구조 지정법은 고유치 뿐만 아니라, 고유벡터에 의해 영향을 받는 응답형태까지도 고려할 수 있는 제어기법이며, 최근 시스템의 견실성과 민감도와의 관계를 이용하여 견실성을 고려하는 방법들이 연구되고 있다.

본 논문에서는 슬라이딩 모드에서 비정합 섭동에 대해서 견실한 슬라이딩 평면을 설계하는 방법을 제안한다. 이를 위해 고유구조 이론에서 원하는 우고유구조가 일원행렬(unitary matrix)이 되도록 설정하고, 설계된 슬라이딩 모드 시스템의 견실성 척도로서 허용되는 비구조적 불확실성 크기를 제시하는 섭동의 여유에 대하여 정의하고 계산 방법을 제시한다. 그리고, 슬라이딩 모드에 도달하도록 하는 제어입력을 설계하여 제안하는 슬라이딩 모드 제어기가 항상 슬라이딩 모드에 도달함을 증명한다.

2. 시스템 정의 및 문제설정

다음과 같은 비정합 불확실성을 가지는 선형 시불변 시스템을 고려한다.

$$\dot{x} = (A+\Delta A)x + B(u+g) \tag{1}$$

여기서 $x \in R^n$는 시스템 상태변수이고, $u \in R^m$는 제어입력이다. g는 정합 불확실성 행렬로서, $\|g\| < d_g$ 이고, ΔA는 비정합 섭동 행렬이다. 그리고, $B = [\,0\ \ B_2\,]^T$, $B_2 \in R^{m\times m}$이고, (A, B)는 제어가능하다. 또한 $\|\cdot\|$은 행렬의 최대 특이값(maximum singular value)으로 정의한다.

슬라이딩 모드에서의 동특성을 구하기 위해 시스템 (1)은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}A_{11}+\Delta A_{11} & A_{12}+\Delta A_{12}\\ A_{21}+\Delta A_{21} & A_{22}+\Delta A_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ B_2\end{bmatrix}(u+g) \tag{2}$$

ΔA는 식(2)처럼 분리하여 나타내어질 수 있고, 각각 $\|\Delta A_{11}\| < \delta a_{11}$, $\|\Delta A_{12}\| < \delta a_{12}$, $\|\Delta A_{21}\| < \delta a_{21}$, $\|\Delta A_{22}\| < \delta a_{22}$으로 유계된다.

비정합 불확실성의 경우에는 일반적인 슬라이딩 모드 입력에 의해 직접적으로 보상될 수 없으며, 설계되는 슬라이딩 평면에 따라서는 시스템의 불안정을 가져올 수 있다. 따라서, 이러한 불확실성에 대해서 둔감할 수 있도록 다음 장에서 슬라이딩 평면과 제어입력을 설계하고, 시스템이 안정하기 위한 시스템의 섭동으로 표현되는 불확실성의 크기를 구한다.

3. 고유구조를 이용한 견실한 슬라이딩 평면 설계

식(2)와 같이 나타낸 시스템의 슬라이딩 평면을 다음과 같이 정의한다.