선형 슬라이딩 평면의 개선된 존재 조건

An Improved Existence Condition of Linear Sliding Surfaces

최 한 호
(Han Ho Choi)

Abstract : This paper deals with the problem of designing a linear sliding surface design for a class of uncertain systems with mismatched unstructured uncertainties. The uncertain system under consideration may have mismatched parameter uncertainties in the state matrix as well as in the input matrix. In terms of linear matrix inequalities (LMIs), we give a sufficient condition for the existence of linear sliding surfaces guaranteeing the asymptotic stability of the sliding mode dynamics. We show that our LMI condition can be less conservative than the existing conditions and our result supplement the existing results. Finally, we give a numerical example showing that our method can be better than the previous results.

Keywords : Linear Matrix Inequality(LMI), uncertain system, sliding mode, matching condition

I. 서론

현재까지 여러 저자들에 의하여 정합조건(matching condition)이 성립한다는 가정 하에 다양한 슬라이딩 평면 설계 방법들이 제안되었다[7]. 정합조건은 매우 제한적이며 실제 응용에서 불확실성을 모델링하는데 적절하지 않은 경우가 많다. 최근 이러한 사실을 고려하여 정합조건을 만족시키지 않는 불확실성이 시스템 행렬에 존재하는 경우를 위한 슬라이딩 평면 설계방법이 LMI에 기반하여 제안되었다[3-5,10,11]. LMI에 기반한 방법들은 여러 가지 면에서 장점을 갖고 있다. LMI 기반 방법들은 극배치조건, LQ/H_2나 L_∞ 성능조건 등과 같이 LMI로 표현 가능한 성능지수들을 설계할 때 고려해 넣을 수 있는 융통성을 제공한다[2]. 그러나 [3-5,10,11]의 방법은 입력행렬의 불확실성이 정합조건을 만족시키지 않는 경우에는 적용할 수 없는 단점을 갖고 있다. 이러한 점을 고려하여 [6]에서는 입력행렬의 불확실성이 정합조건을 만족시키지 않아도 적용할 수 있는 LMI 기반의 슬라이딩 평면 설계방법이 제안되었다. 그리고 [1]에서는 [6]을 개선하여 이전 방법에서는 해가 존재하지 않는 경우에도 특히 [6]의 방법이 적용되지 않는 경우에도 적용할 수 있음을 수치적인 예를 통하여 보이고 [3-6,10,11]의 방법을 보완할 수 있음을 보였다.

본 논문에서도 [1,6]과 같이 시스템행렬 뿐만 아니라 입력행렬에도 정합조건을 만족시키지 않는 불확실성이 존재하는 시스템에도 적용 가능한 LMI 기반의 슬라이딩 평면 설계방법을 제안한다. LMI를 사용하여 슬라이딩 평면이 존재할 충분조건을 유도한다. 또한 LMI 충분조건의 해를 이용하여 슬라이딩 평면을 배개변수화한다. 그리고 [1]의 방법보다 항상 덜 보수적임을 보인다. 마지막으로 수치적인 예를 통하여 보여 제안된 방법이 이전 방법들에 비해 덜 보수적일 수 있으며 이전 방법을 보완할 수 있음을 입증한다.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2007. 2. 6., 채택확정 : 2007. 6. 6.
최한호 : 동국대학교 전기공학과(hhchoi@dongguk.edu)

II. 대상 시스템과 예비 결과들

다음과 같은 정합조건을 만족시키지 않는 불확실성이 존재하는 시스템을 고려하자[6].

$$\dot{x}(t) = [A+\Delta A(t)]x(t) + [B+\Delta B(t)][u(t)+f(t)] \quad (1)$$

여기에서 $x\in R^n, u\in R^m, f\in R^m$으로 각각 상태, 입력, 외란입력을 나타낸다. $\Delta A(t), \Delta B(t)$는 적절한 차원을 갖는 행렬로 [6]에서 주어진 것과 마찬가지로 각각 시스템행렬과 입력행렬의 불확실성을 나타낸다. 시스템 (1)에 대하여 다음이 성립한다고 가정하자.

A1 : (A,B)쌍은 안정가능하다.

A2 : 모든 상태 정보는 이용가능하다.

A3 : $\mathrm{rank}(B)=m<n$

A4 : $\Delta A(t), \Delta B(t), f(t)$는 시간에 대하여 연속적이다.

A5 : 다음을 만족시키는 상수 ρ_A, ρ_B와 함수 $\rho_f(t)$가 알려져 있다.

$$\|\Delta A(t)\| \le \rho_A, \quad \|\Delta B(t)\| \le \rho_B, \quad \|f(t)\| \le \rho_f(t)$$

선형 슬라이딩 평면을 $\Omega=\{x : \sigma = Sx = 0\}$로 정의하자. 여기에서 S는 $m\times n$행렬이다. 이전의 결과 [3-7]를 참조하면 S는 다음 성질을 만족시키는 것을 찾아야 함을 알 수 있다.

P1 : $[SB+S\Delta B(t)]$는 역행렬이 존재한다.

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

다음에 주어지는 보조정리들은 주요 결과를 유도할 때 사용될 것이다.

보조정리 1 [8]: 행렬 E, Y에 대하여 $(I+EY)$의 역행렬이 존재하면 다음처럼 주어진다.

$$(I+EY)^{-1} = I-E(I+YE)^{-1}Y$$

보조정리 2 [1]: 적절한 차원을 갖는 행렬 E, Y에 대하여 임의의 $W>0$, $0<\delta<1$에 대하여 다음 부등식이 항상 성립한다.

$$E^TY+Y^TE \leq E^TW^{-1}E+Y^TWY$$
$$[E+Y]^T[E+Y] \leq \frac{1}{1-\delta}E^TE+\frac{1}{\delta}Y^TY$$

보조정리 3 [2]: 적절한 차원을 갖는 행렬 $\overline{B},\overline{D},\overline{C}$이 주어졌고 $I>\gamma^2\overline{D^T}\overline{D}$가 어떤 수 $\gamma \geq 0$에 대하여 성립한다고 하자 그러면 다음의 부등식이 항상 성립한다.

$$\overline{B}[I-\overline{X}(t)\overline{D}]^{-1}\overline{X}(t)\overline{C}+ * < \overline{C^T}\overline{C} \\ +\gamma^2(\overline{B}+\overline{C^T}\overline{D})(I-\gamma^2\overline{D^T}\overline{D})^{-1}(\overline{B}+\overline{C^T}\overline{D})^T$$

여기에서 $\overline{X}(t)$는 $\|\overline{X}(t)\| \leq \gamma$를 만족시키는 임의의 행렬이며 $*$는 대칭성에 의해 유추될 수 있는 행렬블록이다.

III. 주요 결과

다음 LMI를 고려해보자.

$$\begin{bmatrix} \Phi^T(AX+XA^T+d_0I)\Phi & * & * & * & * \\ \gamma\Phi & -I & 0 & 0 & 0 \\ AX\Phi & 0 & -(1-\delta)I & 0 & 0 \\ \rho_AX\Phi & 0 & 0 & -d_0I & 0 \\ \rho_AX\Phi & 0 & 0 & 0 & -\delta I \end{bmatrix} < 0 \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & d_1I \end{bmatrix} > 0, \quad X<d_2I, \quad 0<\gamma<1 \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} 2\gamma I & * & * \\ \rho_Bd_1I & \gamma B^TB & 0 \\ \rho_Bd_2I & 0 & \gamma B^TB \end{bmatrix} > 0 \tag{4}$$

여기에서 $\Phi \in R^{n\times(n-m)}$는 $\Phi^T\Phi=I, \Phi^TB=0$를 만족시키는 행렬이다. 그러면 다음 정리를 얻을 수 있다.

정리 1: 주어진 A,B,ρ_A,ρ_B에 대하여 LMI (2)-(4)를 만족시키는 해 $(X,d_0,d_1,d_2,\delta,\gamma)$가 존재한다고 가정하자. 그러면 성질 P1-P2를 만족시키는 선형 슬라이딩 평면을 위한 행렬 S가 존재하고 (2)-(4)의 해 X를 사용하여 다음과 같이 매개변수화하여 표현할 수 있다.

$$\sigma(x)=Sx=NB^TX^{-1}x \tag{5}$$

여기에서 N은 임의의 $m\times m$차원을 갖는 비특이 행렬이다.

증명: LMI (2)-(4)를 만족시키는 해가 존재하고 S가 (5)처럼 주어진다고 가정하자. 먼저 (5)에 주어진 S가 P1을 만족시킴을 보이겠다. 보조정리 1은 LMI (2)-(4)가 다음 부등식을 함축하고 있음을 의미한다.

$$d_0>0, \quad d_1>0, \quad d_2>0, \quad 1>\delta>0, \quad 1>\gamma>0 \tag{6}$$

(5)에 주어진 S는 다음의 부등식을 모든 t에 대하여 만족시키면 성질 P1을 만족시킨다.

$$[I+S_0\Delta B(t)][I+S_0\Delta B(t)]^T>0 \tag{7}$$

여기에서 $S_0=(SB)^{-1}S$. 만약 $\|S_0\Delta B(t)\| \leq \gamma < 1$이면 다음 부등식이 만족된다.

$$[I+S_0\Delta B(t)][I+S_0\Delta B(t)]^T \geq I-\gamma^2I>0 \tag{8}$$

그러므로 $\|S_0\Delta B(t)\|^2 \leq \rho_B^2\|S_0\|^2<\gamma^2$가 만족되면 (7)은 성립한다, 즉 다음이 만족되면 (7)은 성립한다.

$$\rho_B^2S_0S_0^T<\gamma^2I<I \tag{9}$$

보조정리 1은 (3), (4) 그리고 (6)이 다음 부등식들이 성립함을 보장한다.

$$0<\frac{1}{d_1}I<X<d_2I \tag{10}$$

$$\frac{\rho_B^2}{2}(d_1^2+d_2^2)(B^TB)^{-1}<\gamma^2I<I \tag{11}$$

결국 (10), (11) 그리고 보조정리 2를 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\rho_B^2S_0S_0^T &\leq \rho_B^2(B^TX^{-1}B)^{-1}B^TX^{-2}B(B^TX^{-1}B)^{-1} \\ &< d_1\rho_B^2(B^TX^{-1}B)^{-1}<\rho_B^2d_1d_2(B^TB)^{-1} \\ &\leq \frac{\rho_B^2}{2}(d_1^2+d_2^2)(B^TB)^{-1}<\gamma^2I<I\end{aligned} \tag{12}$$

위 부등식은 (7)과 (9)가 성립함을 의미한다. 즉 P1이 성립함을 의미한다.

(5)에 주어진 S가 P2를 만족시킴을 보이겠다. [7]의 방법을 사용하여 슬라이딩 평면 $Sx=0$에 구속된 슬라이딩 모드 동역학이 다음처럼 주어짐을 우선 보이겠다.

$$\dot{v}_1=V[I-[I+\Delta B(t)S_0]^{-1}\Delta B(t)S_0][A+\Delta A(t)]X\Phi v_1 \tag{13}$$

여기에서 $S_0=(SB)^{-1}S=(B^TX^{-1}B)^{-1}B^TX^{-1}$, $v_1=Vx$, $V=(\Phi^TX\Phi)^{-1}\Phi^T$이다. 그리고 적절한 리아푸노프 함수를 이용하여 (13)이 점근적으로 안정함을 보이겠다. 다음처럼 변환 행렬 M과 이와 연관된 벡터v를 정의하자.

$$M=\begin{bmatrix}(\Phi^TX\Phi)^{-1}\Phi^T \\ (B^TX^{-1}B)^{-1}B^TX^{-1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}V \\ S_0\end{bmatrix}, \\ v=\begin{bmatrix}v_1 \\ v_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Vx \\ S_0x\end{bmatrix}=Mx \tag{14}$$

(14)는 $v_2=(SB)^{-1}\sigma$, $M^{-1}=[X\Phi,\ B]$가 성립함을 의미한다. (14)의 변환행렬을 사용하면 (1)은 다음처럼 고쳐 써질 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\dot{v}_1 \\ (SB)^{-1}\dot{\sigma}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\overline{A_{11}} & \overline{A_{12}} \\ \overline{A_{21}} & \overline{A_{22}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_1 \\ (SB)^{-1}\sigma\end{bmatrix} \\ +\begin{bmatrix}V\Delta B(t) \\ I+S_0\Delta B(t)\end{bmatrix}[u+f] \tag{15}$$

여기에서 $\overline{A_{ij}}$는 다음처럼 정의된다.

$$\overline{A_{11}}=V[A+\Delta A(t)]X\Phi, \quad \overline{A_{12}}=V[A+\Delta A(t)]B$$
$$\overline{A_{21}}=S_0[A+\Delta A(t)]X\Phi, \quad \overline{A_{22}}=S_0[A+\Delta A(t)]B$$

[7]에 주어진 방법에 의해 슬라이딩 평면 $Sx=0$에 구속된 슬라이딩 모드 동역학이 다음처럼 주어짐을 알 수 있다.

$$\dot{v}_1=(\Phi^TX\Phi)^{-1}\Phi^T[I-\Delta B(t)[I+S_0\Delta B(t)]^{-1}S_0][A+\Delta A(t)]X\Phi v_1$$

보조정리 1은 위의 슬라이딩 모드 동역학이 (13)처럼 고쳐쓰일 수 있음을 의미한다. (13)은 다음 리아푸노프 부등식을 만족시키는 양한정 행렬 $P_0\in R^{(n-m)\times(n-m)}$이 존재하면 안정하다.

$$P_0\widetilde{A_{11}}+\widetilde{A_{11}}^TP_0<0 \tag{16}$$

여기에서 $\widetilde{A_{11}}$는 다음처럼 정의된다.

$$\widetilde{A_{11}}=(\Phi^TX\Phi)^{-1}\Phi^T[I-[I+\Delta B(t)S_0]^{-1}\Delta B(t)S_0][A+\Delta A(t)]X\Phi$$

$P_0=\Phi^TX\Phi$라고 하자. 그러면 $P_0>0$이고 (16)은 다음처럼 고쳐 쓰일 수 있다.

$$\Phi^T[A+\Delta A(t)]X\Phi-\Phi^T\Gamma(t)[A+\Delta A(t)]X\Phi+*<0 \tag{17}$$

여기에서 $\Gamma(t)=[I+\Delta B(t)S_0]^{-1}\Delta B(t)S_0$이다. 보조정리 3에서 $\overline{B}=\Phi^T$, $\overline{X}(t)=-\Delta B(t)S_0$, $\overline{D}=I$, $\overline{C}=[A+\Delta A(t)]X\Phi$에 대응시킴으로써 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}&-\Phi^T\Gamma(t)[A+\Delta A(t)]X\Phi-\Phi^TX[A+\Delta A(t)]^T\Gamma^T(t)\Phi\\ &\le\Phi^TX[A+\Delta A(t)]^T[A+\Delta A(t)]X\Phi\\ &\quad+\frac{\gamma^2}{1-\gamma^2}\Phi^T([A+\Delta A(t)]X+I)^T([A+\Delta A(t)]X+I)\Phi\\ &=\frac{1}{1-\gamma^2}\Phi^TX[A+\Delta A(t)]^T[A+\Delta A(t)]X\Phi\\ &\quad+\frac{\gamma^2}{1-\gamma^2}\Phi^T(I+X[A+\Delta A(t)]^T+[A+\Delta A(t)]X)\Phi\end{aligned} \tag{18}$$

이는 다음이 만족되면 (17)이 만족됨을 의미한다.

$$\begin{aligned}&\frac{1}{1-\gamma^2}\Phi^T([A+\Delta A(t)]X+*)\Phi+\frac{\gamma^2}{1-\gamma^2}\Phi^T\Phi\\ &+\frac{1}{1-\gamma^2}\Phi^TX[A+\Delta A(t)]^T[A+\Delta A(t)]X\Phi<0\end{aligned} \tag{19}$$

즉 다음 식이 만족되면 (17)은 만족된다.

$$\begin{aligned}&\Phi^T([A+\Delta A(t)]X+*)\Phi+\gamma^2\Phi^T\Phi\\ &+\Phi^TX[A+\Delta A(t)]^T[A+\Delta A(t)]X\Phi<0\end{aligned} \tag{20}$$

한편 보조정리 2는 $\|\Delta A(t)\|\le\rho_A$를 만족시키는 임의의 불확실성에 대해 다음 부등식들이 항상 성립함을 의미한다.

$$\begin{aligned}&\Phi^T[\Delta A(t)X+X\Delta A^T(t)]\Phi\le d_0\Phi^T\Phi+\rho_A^2\frac{1}{d_0}\Phi^TX^2\Phi\\ &\Phi^TX[A+\Delta A(t)]^T[A+\Delta A(t)]X\Phi\\ &\le\Phi^TX[\frac{1}{1-\delta}A^TA+\frac{1}{\delta}\rho_A^2I]X\Phi\end{aligned} \tag{21}$$

(20)과 (21)은 LMI (3), (4), (6)과 아래의 부등식을 만족시키는 해 $(X,d_0,d_1,d_2,\delta,\gamma)$가 존재하면 (17)이 만족됨을 의미한다.

$$\begin{aligned}&\Phi^T(AX+XA^T+d_0I+\frac{1}{d_0}\rho_A^2X^2+\gamma^2I)\Phi\\ &+\Phi^T(\frac{1}{1-\delta}XA^TAX+\frac{1}{\delta}\rho_A^2X^2)\Phi<0\end{aligned} \tag{22}$$

[2]에 주어진 Schur complement 공식을 사용하면 (22)는 LMI (2)로 고쳐 쓰일 수 있음을 알 수 있다. 결국 X를 LMI (2)-(4)를 만족시키는 해라고 할 때 $P_0=\Phi^TX\Phi>0$가 리아푸노프 부등식 (16)을 만족시킴을 알 수 있다. 이는 슬라이딩 모드 동역학 (13)이 점근적으로 안정함을 의미한다. ▽▽▽

주 1: LMI (2)-(4)는 [8]의 LMI control toolbox와 같은 다양한 최적화 알고리즘을 통해 매우 효율적으로 해의 존재 유무를 쉽게 판단할 수 있고 해가 존재하는 경우 손쉽게 해를 구할 수 있다.

주 2: 다음의 스위칭 궤환 제어기 (23)를 사용한다고 하자.

$$u(t)=-\frac{p(t)}{(1-\gamma)}\cdot\frac{(SB)^{-1}\sigma}{\|(SB)^{-1}\sigma\|} \tag{23}$$

여기에서 ϵ은 양수이고 $p(t)$는 다음처럼 정의된다.

$$p(t)=\epsilon+\|(SB)^{-1}SAx\|+\rho_A\|(SB)^{-1}S\|\cdot\|x\|+(1+\gamma)\rho_f(t)$$

그러면 [1]에 의하여 $Sx=0$은 광역적으로 reachable하고 (1)과 (23)의 폐회로 응답은 광역적으로 안정함을 알 수 있다. 다음과 같이 크기가 제한된 제어기는 폐회로 응답을 국부적으로 안정화시킬 것이다.

$$u(t)=-(SB)^{-1}\begin{bmatrix}\rho_1\mathbf{sign}(\sigma_1)\\ \vdots\\ \rho_m\mathbf{sign}(\sigma_m)\end{bmatrix}=-(SB)^{-1}\begin{bmatrix}\rho_1\mathbf{sign}(S_1x)\\ \vdots\\ \rho_m\mathbf{sign}(S_mx)\end{bmatrix}$$

여기에서 $\rho_i>0$로 그 크기에 따라 안정영역의 크기가 변하는 설계변수이다. 그리고 S_i는 슬라이딩 평면 행렬 S의 i번째 열을 의미한다.

정리 2: 주어진 A,B,ρ_A,ρ_B에 대하여 [1]의 슬라이딩 평면의 존재조건이 만족되기만 하면 LMI (2)-(4)를 만족시키는 해 $(X,d_0,d_1,d_2,\delta,\gamma)$가 존재한다. 즉 [1]의 슬라이딩 평면의 존재조건보다 항상 덜 보수적이거나 같다.

증명: [1]의 슬라이딩 평면의 존재조건은 LMI (2)-(4)에서 (2)가 다음으로 대체된 것과 마찬가지이다.

$$\begin{bmatrix}\Phi^T(AX+XA^T+d_0I)\Phi & * & * & * & * & *\\ \gamma\Phi & -I & \gamma I & 0 & 0 & 0\\ 0 & \gamma I & -I & 0 & 0 & 0\\ AX\Phi & 0 & 0 & -(1-\delta)I & 0 & 0\\ \rho_AX\Phi & 0 & 0 & 0 & -d_0I & 0\\ \rho_AX\Phi & 0 & 0 & 0 & 0 & -\delta I\end{bmatrix}<0 \tag{24}$$

[2]에 주어진 Schur complement 공식을 사용하면 (24)는 다음처럼 고쳐 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}&\Phi^T(AX+XA^T+d_0I+\frac{1}{d_0}\rho_A^2X^2+\frac{\gamma^2}{1-\gamma^2}I)\Phi\\&+\Phi^T(\frac{1}{1-\delta}XA^TAX+\frac{1}{\delta}\rho_A^2X^2)\Phi<0\end{aligned} \tag{25}$$

(6)에 의하여 $0\leq\gamma<1$이 항상 보장되므로 $\gamma^2/(1-\gamma^2)\geq\gamma^2$이 성립하고 결국 (25)가 만족되면 (22)가 항상 만족됨을 의미한다. 즉 LMI (24), (3), (4)의 해는 항상 LMI (2)-(4)를 만족시킨다. ▽▽▽

주 3: (9)에서 보면 ρ_B가 증가하면 γ도 증가하게 되고 (24)를 만족시키기 점점 힘들어짐을 알 수 있다. ρ_A값의 증가도 마찬가지 효과를 미친다.

주 4: 결국 이전의 논문들에서 주어진 충분조건들이 해가 존재하지 않는 경우에도 특히 [1]에서 제시된 LMI 충분조건의 해가 존재하지 않는 경우에도 본 논문에서 제시된 LMI 충분조건은 해가 존재하여 본 논문의 방법으로 슬라이딩 평면을 설계할 수 있어 기존의 충분조건들 보다 본 논문의 충분조건이 덜 보수적일 수 있으며 본 논문의 설계방법은 기존 방법들을 보완할 수 있다.

IV. 수치적 예

[1]에서는 다음과 같이 시스템행렬 뿐만 아니라 입력행렬에도 정합조건을 만족시키지 않는 불확실성이 존재하는 시스템에 대하여 기존의 방법들을 사용해서는 슬라이딩 평면의 설계가 불가능하지만 [1]과 [6]의 방법으로는 가능함을 보였다.

$$A=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&-1&1\\0&0&0\end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix}1&0\\1&0\\0&1\end{bmatrix}, \tag{26}$$
$$\rho_A=\rho_B=0.1,\quad \rho_f(t)=0$$

그리고 [1]에서는 [6]의 조건은 $\rho_A=\rho_B>0.2319$가 만족되면 해가 존재하지 않지만 [1]의 방법은 $\rho_A=\rho_B>0.3197$이 되어야 해가 존재하지 않게 됨을 보였다. 본 논문에서 제안된 방법을 사용하였더니 $\rho_A=\rho_B>0.3333$이 되어야 해가 존재하지 않게 되었다. $\rho_A=0.2$일 때 [1]은 $\rho_B>0.4907$이 되면 해가 존재하지 않으나 본 논문의 방법은 $\rho_B>0.5773$이 되어야 해가 존재하지 않아 본 논문에서 구한 값의 85%까지만 [1]의 방법은 해가 존재하였다. $\rho_A=0.1$인 경우 [1]은 $\rho_B>0.6180$이 되면 해가 존재하지 않으나 본 논문의 방법은 $\rho_B>0.7915$이 되어야 해가 존재하지 않아 본 논문에서 구한 값의 80.5%까지만 [1]의 방법에서는 해가 존재하였다. 결국 본 논문에서 제안된 방법은 덜 보수적이거나 같을 수 있어 기존 방법들을 보완할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 시스템행렬 뿐만 아니라 입력행렬에도 정합조건을 만족시키지 않는 불확실성이 존재하는 시스템에 대하여 LMI를 사용하여 슬라이딩 평면이 존재할 충분조건을 유도하였고 LMI 충분조건의 해를 이용하여 슬라이딩 평면의 공식을 제시하였다. 제시된조건은 기존의 조건들에 비해 덜 보수적일 수 있으며 특히 [1]의 방법보다는 항상 좋거나 같은 결과를 줄 수 있어 제시된 방법으로 기존 방법들을 보완할 수 있음을 보였다.

참고문헌

[1] 최한호, "비정합 불확실성을 갖는 선형 시스템을 위한 LMI 기반 슬라이딩 평면 설계법," 대한전기학회 논문지, 제 55D 권, 제 9 , pp. 409-413, 2006.

[2] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan, Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, PA:SIAM, 1994.

[3] H. H. Choi, "A new method for variable structure control system design: A linear matrix inequality approach," *Automatica*, vol. 33, pp. 2089-2092, 1997.

[4] R. H. C. Takahashi and P. L. D. Peres, "H_∞ design of switching surfaces for sliding modes control with nonmatching disturbances," *In Proc. 36th IEEE Conf. Decision Contr.*, pp. 4046-4051, San Diego, USA, Dec. 1997.

[5] H. H. Choi, "On the existence of linear sliding surfaces for a class of uncertain dynamic systems with mismatched uncertainties," *Automatica*, vol. 35, pp. 1707-1715, 1999.

[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] V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, pp. 212-222, 1977.

[8] P. Gahinet, Nemirovski, A. and Laub, A. J., *LMI Control Toolbox User's Guide*, MA: The MathWorks Inc., 1995.

[9] B. D. O. Anderson, J. B. Moore, *Optimal Control:Linear Quadratic Methods*, NJ: Prentice Hall, 1989.

[10] R. H. C. Takahashi and P. L. D. Peres, "H_∞ design of switching surfaces for sliding mode control with non-matching disturbances," *IEE Proc. Contr. Theor.* Appl., vol. 145, 435-441, 1998.

[11] R. H. C. Takahashi and P. L. D. Peres, "H_2 guaranteed cost-switching surface design for sliding modes with nonmatching disturbances," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 44, pp. 2214-2218, 1999.

최 한 호

1966년 8월 25일생. 1988년 2월 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1994년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 2003년 3월~현재 동국대학교 전기공학과 교수. 관심분야는 가변구조제어이론, 마이콤 기반 제어, 가상현실 및 로보틱스.