크기가 제한된 제어기를 갖는 비정합 불확실성의 가변구조 시스템을 위한 점근 안정 영역 추정

論 文
56-3-24

Estimation of the Asymptotic Stability Region for a Mismatched Uncertain Variable Structure System with a Bounded Controller

崔 漢 浩†
(Han Ho Choi)

Abstract – We propose a method to estimate the asymptotic stability region(ASR) of a mismatched uncertain variable structure system with a bounded controller. The uncertain system under consideration may have mismatched parameter uncertainties in the state matrix. Using linear matrix inequalities(LMIs) we estimate the ASR and we show the quadratic stability of the closed-loop control system in the estimated ASR. We also give a simple LMI-based algorithm for estimating the ASR. Finally, we give a numerical example in order to show the effectiveness of our method.

Key Words : 슬라이딩 평면, 가변구조제어, 정합 조건, LMI, 불확실성

1. 서 론

가변구조제어 시스템의 가장 중요한 특성은 소위 정합조건(matching condition)을 만족시키는 변수변동이나 외란에 대하여 시스템이 영향을 받지 않는 스위칭평면에서의 슬라이딩 모드(sliding mode)가 존재한다는 것이다[1]. 실제 제어 시스템 구현에서 제어 입력 크기는 물리적인 구속조건들 때문에 제한이 된다. 최근 크기가 제한된 입력을 갖는 가변구조제어 시스템의 점근안정영역(ASR, Asymptotic Stability Region)을 측정하기 위한 방법들이 소개되었다[2-4]. 논문 [2]에서는 상태변수 변환을 사용하여 여러 개의 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 결합하는 개념이 소개되었다. 여러 개의 리아푸노프 함수들을 사용하여 3개의 어트랙션 영역(domain of attraction)을 찾아내고 ASR을 보다 크게 얻기 위해 이들 3개의 어트랙션 영역을 조합하였다. 결국 추정된 ASR은 볼록(convex)하지 않으며 부시스템(subsystem) 행렬 놈(norm)을 사용하였기 때문에 어림짐작에 의한 오차가 심하다. [3]에서는 상태 변환 행렬과 decoupling 행렬을 사용하여 좀 더 향상된 결과를 도출하여 같은 조건 밑에서 [2]의 결과를 사용할 때 보다 더 큰 ASR을 구할 수 있음을 수치적인 예를 들어 보였다. 그러나 [2]와 [3]의 결과 모두 상태 변환 행렬을 사용하였기 때문에 두 방법 모두 간접적이며 복잡하다. 논문 [4]에서는 [10]에서 제안된 LMI 기반 가변구조제어기 설계방법을 참고하여 크기가 제한된 입력을 갖는 가변구조제어 시스템의 ASR을 추정하는 방법을 제시하였다. [4]의 방법은 [2]와 [3]의 방법과 달리 상태 변환을 요구하지 않으며 LMI를 사용했기 때문에 상대적으로 덜 복잡하고 효율적으로 ASR을 추정할 수 있다. 그러나 [2-4]의 방법 모두 불확실성이 정합조건(matching condition)을 만족시킨다는 가정 하에 제안되었다. 정합조건은 유연한 로봇과 같은 다양한 동적 시스템에서 불확실성을 모델링하는데 부적절하며 제한적이다. 한편 리아푸노프 함수에 기반한 크기가 제한된 입력을 갖는 선형 제어 시스템을 위한 다양한 안정도 해석 방법이 [12-13]과 거기에 주어진 참고문헌들에 주어졌다. 그러나 이들 방법은 비정합 불확실성을 갖는 가변구조 제어 시스템의 ASR을 구하는데 직접적으로 사용될 수 없어 보인다. 이러한 사실을 고려하여 본 논문에서는 비정합 불확실성을 갖는 시스템을 대상으로 크기가 제한된 가변구조 제어 입력을 가했을 때 폐회로 시스템의 ASR을 추정하는 방법을 제시한다.

2. 문제 설정

우리는 다음과 같은 동역학 방정식으로 표현 가능한 시스템을 고려한다.

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

여기에서 $x(t) \in R^n$은 상태이고 $u(t) \in R^m$은 제어 입력이고 $\eta(\cdot): R^+ \to R^m$는 불확실성을 일괄적으로 표현한 것이고 $A \in R^{n \times n}$은 시스템 행렬이고 $B \in R^{n \times m}$은 입력 행렬이다. 위의 시스템 방정식은 다음을 만족시킨다고 가정한다.

A1 : $\|\eta(t)\| \le \rho$를 만족하는 상수 ρ가 존재한다.

A2 : 입력행렬 B는 rank가 m이고 $m < n$이다.

A3 : 입력은 $\|u\| \le \bar{u}$ 그 크기가 제한되어 있다.

A4 : $\bar{u} - \rho = \mu > 0$ 를 만족시킨다.

A5 : 쌍 (A, B)는 안정가능하다.

A6 : $\Delta A(t)$는 $DF(t)E$의 형태로 D, E는 적절한 차원의 행렬이고 $F(t)$는 $\|F(t)\| \le 1$를 만족시키는 불확실성이다.

선형 스위칭 평면을 $\Omega = \{x: \sigma(x) = Sx = 0\}$로 정의하자. 여기에서 $S \in R^{m \times n}$는 rank가 m인 행렬이다. 이전의 가변구조제어기 관련 논문들 [1-4]를 참조하여 우리는 S가 다음의

† 교신저자, 正會員 : 동국大 工大 전기공學科 助敎授 · 工博
E-mail : hhchoi@dongguk.edu
接受日字 : 2006年 11月 9日
最終完了 : 2006年 12月 18日

성질들을 만족시킨다고 가정하는 것이 타당함을 알 수 있다.

P1 : SB는 nonsingular 행렬이다. 이론전개의 복잡함을 피하기 위해 $SB>0$이라고 가정한다.

P2 : $(n-m)$차의 슬라이딩 모드 동역학이 quadratically 안정하다.

결국 P1-2를 만족시키는 주어진 S에 대하여 ASR을 추정하는 방법을 제안하는 것으로 문제를 설정할 수 있다.

3. 주요 결과

정리 1 : 시스템 (1)을 고려하자. P1-2를 만족시키는 임의의 $m\times n$ 행렬 S 에 대하여 다음을 만족시키는 (X,ξ)가 존재한다.

$$\begin{bmatrix} \Phi^T(AX+XA^T)\Phi & \Phi^TXE^T & \xi\Phi^TD \\ * & -\xi I & 0 \\ * & 0 & -\xi I \end{bmatrix} < 0 \tag{2}$$

$$X>0, \quad SX=\epsilon B^T, \quad \epsilon>0 \tag{3}$$

여기에서 $*$ 는 대칭성을 이용하여 유추될 수 있는 행렬블록을 의미하고, $\Phi\in R^{n\times(n-m)}$ 는 $B^T\Phi=0, \Phi^T\Phi=I$ 를 만족시키는 행렬이다.

증명 : 아래의 변환행렬과 벡터 $M, v=Mx$ 를 고려해보자.

$$M=\begin{bmatrix} \Phi^T \\ (B^TB)^{-1}B^T \end{bmatrix}, \; M^{-1}=[\Phi, B], \; v=\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \Phi^Tx \\ (B^TB)^{-1}B^Tx \end{bmatrix}$$

(1)은 아래와 같은 regular 형태로 변환가능하다.

$$\dot{v}=\begin{bmatrix} A_{11}(t) & A_{12}(t) \\ A_{21}(t) & A_{22}(t) \end{bmatrix}v+\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}[u+\eta(t)]$$

여기에서

$$A_{11}(t)=\Phi^T[A+DF(t)E]\Phi, \; A_{22}(t)=(B^TB)^{-1}B^T[A+DF(t)E]B$$
$$A_{12}(t)=\Phi^T[A+DF(t)E]B, \; A_{21}(t)=(B^TB)^{-1}B^T[A+DF(t)E]\Phi$$

스위칭평면 $Sx=SM^{-1}v=S\Phi v_1+SBv_2=0$ 가 성질 P1-2를 보장하므로 $(SB)^{-1}$ 이 존재하고 스위칭평면에 구속된 슬라이딩 모드 동역학은 다음처럼 주어짐을 위의 regular 형태로부터 쉽게 유추할 수 있다.

$$\dot{v}_1=[A_{11}(t)-A_{12}(t)(SB)^{-1}S\Phi]v_1, \; v_1=\Phi^Tx$$

P2와 [5]의 결과는 어떤 양수 ξ에 대하여 다음을 만족시키는 리아푸노프행렬 H 가 존재하는 것을 보장한다.

$$\overline{A}H+H\overline{A}^T+\xi\Phi^TDD^T\Phi+\frac{1}{\xi}H\overline{E}^T\overline{E}H<0$$

여기에서 $\overline{A}, \overline{E}$ 는 다음처럼 주어진다.

$$\overline{A}=\Phi^TA[I-B(SB)^{-1}S]\Phi, \quad \overline{E}=E[I-B(SB)^{-1}S]\Phi$$

결국 보조정리4를 이용하여 위의 부등식은 다음처럼 고쳐 쓸 수 있다.

$$H>0, \quad \begin{bmatrix} \overline{A}H+H\overline{A}^T & * & \xi\Phi^TD \\ \overline{E}H & -\xi I & 0 \\ * & 0 & -\xi I \end{bmatrix} < 0 \tag{4}$$

$X\in R^{n\times n}$ 를 다음처럼 정의하자.

$$X=\begin{bmatrix} \Phi^T \\ B^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H & -H\Phi^TS^T(SB)^{-T} \\ * & \epsilon(SB)^{-1}+(SB)^{-1}S\Phi H\Phi^TS^T(SB)^{-T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi^T \\ B^T \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기에서 ϵ은 임의의 양수이다. 그러면 [6]의 Schur complement formula를 이용하여 $X>0$ 임을 알 수 있다. (4)는 (5)의 값 X 가 (2)식을 만족시킴 의미한다. 그리고 (5)의 값 X 는 $SX=\epsilon B^T$를 만족시킨다. ▽▽▽

[6]의 projection lemma를 이용하면 (2)가 다음과 동치임을 보일 수 있다.

$$\begin{bmatrix} AX-KB^T+* & XE^T & \xi D \\ * & -\xi I & 0 \\ * & 0 & -\xi I \end{bmatrix} < 0 \tag{6}$$

결국 다음 정리를 얻을 수 있다.

정리 2 : 시스템 (1)을 고려하자. P1-2를 만족시키는 임의의 행렬 S 에 대하여 다음을 만족시키는 (Y,ϵ,k,K,ξ)가 존재한다.

$$\begin{bmatrix} A(\Psi Y\Psi^T+\epsilon B(SB)^{-1}B^T)-KB^T+* & * & * \\ E(\Psi Y\Psi^T+\epsilon B(SB)^{-1}B^T) & -\xi I & 0 \\ \xi D^T & 0 & -\xi I \end{bmatrix} < 0 \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} \Psi Y\Psi^T+\epsilon B(SB)^{-1}B^T & K \\ * & I \end{bmatrix}>0, \tag{8}$$
$$\begin{bmatrix} \Psi Y\Psi^T+\epsilon B(SB)^{-1}B^T & I \\ * & kI \end{bmatrix}>0,$$

$$Y=Y^T, \quad \epsilon>0 \tag{9}$$

여기에서 $\Psi\in R^{n\times(n-m)}$ 는 $S\Psi=0, \Psi^T\Psi=I$ 를 만족시키는 행렬이다.

증명 : 먼저 P1-2를 만족시키는 행렬 S 에 대하여 (3), (6)과 다음의 LMI를 만족시키는 해 (X,K,ϵ,ξ)가 존재함을 보이겠다.

$$\begin{bmatrix} X & K \\ * & I \end{bmatrix}>0, \quad \begin{bmatrix} X & I \\ * & kI \end{bmatrix}>0 \tag{10}$$

정리 1과 [6]의 Finsler's lemma는 어떤 양수 γ, k_0에 대하여 다음을 만족시키는 (X_0,ξ_0,ϵ_0)가 존재함을 보장한다.

$$\begin{bmatrix} AX_0+X_0A-2\gamma BB^T & X_0E^T & \xi_0D \\ * & -\xi_0I & 0 \\ * & 0 & -\xi_0I \end{bmatrix} < 0, \tag{11}$$

$$X_0>\frac{1}{k_0}I>0, \quad SX_0=\epsilon_0B^T, \quad \epsilon_0>0$$

$\lambda_{\min}(X_0), \lambda_{\max}(BB^T), \gamma$이 유한해 $\lambda_{\min}(X_0)/\lambda_{\max}(BB^T)>\gamma^2\beta$를 만족시키는 양수 β가 항상 존재한다. 이러한 양수 β에 대하여 X_0는 다음 식을 만족시킨다.

$$\begin{bmatrix} \beta X_0 & \beta\gamma B \\ * & I \end{bmatrix}>0, \quad \begin{bmatrix} \beta X_0 & I \\ * & \frac{k_0}{\beta}I \end{bmatrix}>0$$

그리고 (11)식은 다음을 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \beta AX_0+\beta X_0A-2\beta\gamma BB^T & \beta X_0E^T & \beta\xi_0D \\ * & -\beta\xi_0I & 0 \\ * & 0 & -\beta\xi_0I \end{bmatrix} < 0, \tag{12}$$

$$\beta X_0>\frac{\beta}{k_0}I>0, \quad \beta SX_0=\beta\epsilon_0B^T, \quad \beta\epsilon_0>0$$

결국 $X=\beta X_0, K=\beta\gamma B, \epsilon=\beta\epsilon_0, k=k_0/\beta, \xi=\beta\xi_0$가 행렬식 (3), (6), (10)을 만족시킨다. 한편 [14]의 보조정리1, (3), (5) 그리고 $SB>0$을 이용하여 Y를 $(n-m)\times(n-m)$ 대칭행렬이라 할 때 X가 $X=\Psi Y\Psi^T+\epsilon B(SB)^{-1}B^T$로 표현될 수 있음을 보일 수 있다. 결국 (3), (6), (10)은 LMI (7), (8), (9)로 고쳐 쓰일 수 있다. ▽▽▽

주 1 : LMI (7)은 [6]의 Schur complement formula를 이용하여 다음처럼 고쳐 쓰일 수 있다.

$$AX-KB^T+XA^T-BK^T+\xi DD^T+\frac{1}{\xi}XE^TEX<0, \quad (13)$$
$$X=\Psi Y\Psi^T+\epsilon B(SB)^{-1}B^T>0$$

성질 P1-2를 만족시키는 슬라이딩 평면 $Sx=0$가 주어졌고 스위칭 궤한 제어입력이 크기가 $\|u\| \le \bar{u}$의 형태로 제한되어 [2-4]처럼 다음과 같이 주어졌다고 가정하자.

$$u(t)=-\bar{u}\frac{Sx}{\|Sx\|} \quad (14)$$

여기에서 (14)와 같은 형태의 제어기는 실제에서 매우 많이 쓰이며 무한차원시스템의 경우에도 적용됨에 유의해야 한다 [7]. 정리 2와 주 1에 의하여 (8), (9), (13)을 만족시키는 양한정 행렬 $X=\Psi Y\Psi^T+\epsilon B(SB)^{-1}B^T$의 존재가 보장된다. 리아푸노프 함수를 $V(x)=x^TX^{-1}x=x^TPx$로 정의하자. (1)과 (14)의 폐회로 응답 궤적을 따른 리아푸노프 함수의 도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{V}=2x^TP[A+DF(t)E]x-2x^TPB[\bar{u}\frac{Sx}{\|Sx\|}-\eta(t)]$$

[5]의 Fact A.1과 주 1, 가정 A1과 A4를 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\dot{V}\le-\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2+\frac{2}{\epsilon}\|Sx\|(\|K^TX^{-1}x\|-\mu)$$

여기에서 행렬Q는 다음과 같이 주어진다.

$$-Q=X^{-1}(AX-BK^T+XA^T-KB^T+\xi DD^T+\frac{1}{\xi}XE^TEX)X^{-1}$$

그러므로$\Xi_0=\{x : x^TX^{-1}KK^TX^{-1}x \le \mu^2\}$영역에서 다음의 부등식이 성립함을 알 수 있다.

$$\dot{V}\le-\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 \le 0 \quad (15)$$

위의 식은 초기치가 $x(0) \in \Xi \subset \Xi_0$의 조건을 만족시킨다면 아래의 영역 Ξ에서 $x=0$가 지수함수적으로 안정함을 의미하고 Ξ를 (1)과 (14)의 폐회로 시스템에 대한 ASR의 추정치로 삼을 수 있음을 의미한다.

$$\Xi=\{x : V(x)=x^TX^{-1}x\le\mu^2\} \quad (16)$$

조건$\Xi\subset\Xi_0$는 $X^{-1}>X^{-1}KK^TX^{-1}$이 성립하면 만족된다. [6]의 결과를 이용해 $X^{-1}>X^{-1}KK^TX^{-1}$는 (8)의 첫 번째 식으로 고쳐 쓰일 수 있고 (8)의 두 번째 식은 $X^{-1}<kI$로 고쳐 쓰일 수 있음을 보일 수 있다. 그러므로 $\Xi_s\subset\Xi\subset\Xi_0$이 성립하고 다음과 같은 ASR의 추정치 Ξ_s를 얻을 수 있다.

$$\Xi_s=\left\{x : \|x\|\le\frac{\mu}{\sqrt{k}}\right\} \quad (17)$$

정리 3 : P1-2를 만족시키는 슬라이딩 평면 $Sx=0$가 주어졌고 스위칭 궤한 제어입력이 (14)와 같이 주어졌다고 가정하자. 불확실성을 갖는 시스템 (1)과 제어기 (14)의 폐회로 응답은 영역 (17)에서 지수함수적으로 안정하다.

주 2 : 성질 P1-2를 만족시키는 S에 대하여 (7), (8), (9)를 만족시키는 해 (Y,ϵ,k,K,ξ)가 존재한다. 그리고 해의 선택에 따라 ASR의 추정치 (17)의 conservativeness가 변한다. 다음의 LMI 문제를 풀고

$$\text{minimize } k \text{ subject to } (7),(8),(9) \quad (18)$$

이의 최적값 k^*를 사용하여 ASR의 추정치 (17)을 최대로 만들 수 있다. 결국 다음과 같은 LMI 기반 알고리즘의 형태로 주요 결과를 요약할 수 있다.

Step 1) 주어진 S에 대하여 $\Psi\in R^{n\times(n-m)}$를 구하라.

Step 2) LMI최적화 알고리즘을 사용하여 최적화 문제 (18)의 최적값 k^*를 구하라.

Step 3) 최적값 k^*를 (17)식의 k에 대입하여 ASR의 추정치를 구하라.

4. 수치적 예

[9]에 주어진 L-1011 항공기의 lateral 축 동역학 모델을 고려해보자. 다음의 데이터로 표현될 수 있다.

$$A=\begin{bmatrix}-2.98 & 0.93 & 0 & -0.034\\ -0.99 & -0.21 & 0.035 & -0.0011\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0.39 & -5.555 & 0 & -1.89\end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix}-0.032\\ 0\\ 0\\ -1.6\end{bmatrix}, \quad (19)$$
$$D=[1.5,\ 0,\ 0,\ 0]^T,\quad E=[0,\ 1,\ 0, 0],\quad F(t)=\zeta/1.5,\quad \eta(t)=0$$

여기에서 ζ는 불확실한 변수로 $|\zeta|\le 1.5$를 만족시킨다. 상태변수는 각각 yaw rate, side-slip angle, bank angle, roll rate를 의미하고 입력 변수는 aileron deflection이다[9]. (19)의 데이터는 불확실한 변수 ζ가 정합조건을 만족시키지 않음을 의미한다. 그러므로 [2-4]의 방법을 사용해서 (19)의 ASR을 추정할 수 없다.(19)가 다음의 크기가 제한된 가변구조 제어기에 의하여 제어된다고 가정하자.

$$u(t)=-\mathbf{sign}(-x_3-x_4) \quad (20)$$

이는 S가 $S=[0,\ 0,\ -1,\ -1]$로 주어짐을 의미한다. 정합조건을 만족시키지 않는 (19)와 같은 시스템을 위한 슬라이딩 평면이나 가변구조 제어기 설계는 [10-11] 등에 주어진 방법을 사용하면 쉽게 할 수 있음에 유의하라. $\bar{u}=1$이고 $\|\eta(t)\|=0$이므로 $\rho=0, \mu=1$이다.(18)의 최적화 문제를 [8]의 LMI Control Toolbox를 사용하여$\Xi_s=\{x : \|x\|\le 16.14\}$로 ASR의 추정값을 얻을 수 있다. $x_1(0)=5, x_3(0)=x_4(0)=0$, $\zeta=-1.5^*\cos 0.01u$로 하고 다양한 $x_2(0)$에 대한 (19)와 (20)의 폐회로 응답에서 $x_1(t)$를 그림 1에 보였다.

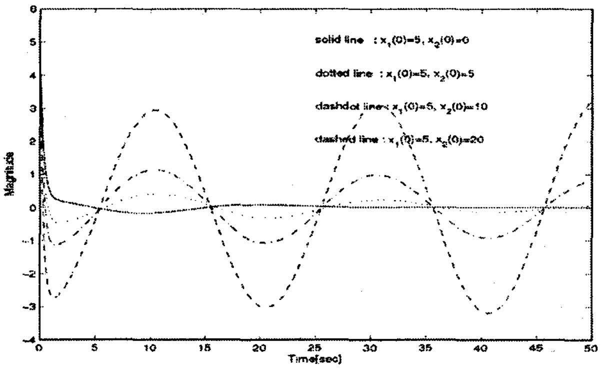

그림 1 시뮬레이션 결과
Fig. 1 Simulation results.

5. 결 론

본 논문에서는 시스템 특성 행렬에 비정합 불확실성이 존재하는 시스템을 대상으로 크기가 제한된 가변구조 제어 입력을 가했을 때 폐회로 시스템의 ASR을 추정하는 문제를 고려하였다. LMI에 기반한 간단한 추정알고리즘을 제안하였

다. 그리고 수치적인 예제를 통하여 효용성을 보였다. 제안된 방법은 [2-3]과 같이 상태 변환을 요구하지 않으며 [4]의 방법처럼 LMI에 기반을 두었기에 매우 효율적으로 ASR을 추정할 수 있다. 그리고 비정합 불확실성을 시스템 행렬에 갖는 경우에도 적용 가능하므로 [2-4]를 포괄하는 일반적인 방법이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

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

[2] S.M. Madani-Esfahani, M. Hached and S.H. Zak, "Estimation of sliding mode domains of uncertain variable structure systems with bounded controllers," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 35, pp. 446-449, 1990

[3] H.H. Choi and M.J. Chung, "Estimation of asymptotic stability region of uncertain systems with bounded sliding mode controllers," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 39, pp. 2275-2278, 1994

[4] 최한호, "크기가 제한된 입력을 갖는 가변구조제어 시스템을 위한 개선된 안정영역 추정값," 제어자동화시스템 공학 논문지, 11권, pp. 492-495, 2005

[5] P.P. Khargonekar, I.R. Petersen, and K. Zhou, "Robust stabilization of uncertain linear systems: Quadratic stabilizability and H_∞ control theory," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 35, pp. 356-361, 1990

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

[7] Y. Orlov, "Discontinuous unit feedback control of uncertain infinite dimensional systems", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 45, pp. 834-843, 2000

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

[9] A.R. Galimidi, and B.R. Barmish, "The constrained Lyapunov problem and its application to robust output feedback stabilization," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 31, pp. 410-419, 1986

[10] 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.

[11] K.S. Kim and Y. Park, "Parametric approaches to sliding mode design for linear multivariable systems," Int. J. Control, automation, and Systems, vol.1 pp. 11-18, 2003

[12] T. Hu, and Z. Lin, "An analysis and design method for linear systems subject to actuator saturation and disturbance," Automatica, vol.38, pp. 351-359, 2002

[13] H. Fang, Z. Lin, and Y. Shamash, "Disturbance tolerance and rejection of linear systems with imprecise knowledge of actuator input output characteristics," Automatica, vol.42, pp. 1523-1530, 2006

[14] 이재관, 최한호, "$C(sI-A)^{-1}B$가 최소위상이 될 LMI 조건을 이용한 해석과 설계," 제어자동화시스템 공학 논문지, 11권, 11호, pp. 895-900, 2005

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