시변시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템의 점근안정도

論 文
48A - 5 - 13

Asymptotic Stability of Discrete Time Linear Systems with Time Varying Delays

宋 誠 鎬* · 金 点 根** · 姜 彰 益***
(Seong-Ho Song · Jeom-Keun Kim · Chang-Ik Kang)

Abstract - This paper deals with the stability of discrete time linear systems with time varying delays in state. In this paper, the magnitude of time - varying delays is assumed to be upper-bounded. The stability of discrete time linear systems with time - varying delays in state is related with the stability of discrete time linear systems with constant time delay in state. To show this, a new Lyapunov function is proposed. Using this Lyapunov function, a sufficient condition for the asymptotic stability is derived.

Key Words : Time varying delay, discrete time linear system, Lyapunov function, asymptotic stability

1. 서 론

본 논문에서는 시변시간지연이 존재하는 이산시간 선형시스템의 점근안정도 문제를 다룬다.

시간지연이 존재하는 연속시스템의 제어 문제는 현재까지 많은 연구가 진행되어왔다. 시간지연 시스템에 대한 연구는 상수시간지연을 갖는 연속시간 선형시스템에 대한 연구와 시변시간지연을 갖는 연속시간 선형시스템에 대한 연구로 나눌 수 있다. 대부분의 연구들은 상수시간지연을 갖는 연속시간 선형시스템의 안정도[1-5]와 안정화 문제, 견실제어문제, 대형시스템문제[6-10] 을 다루고 있으며, 시변시간지연이 존재하는 연속시간 선형시스템의 연구들은 최근에 와서 활발히 진행되고 있다[11-14]

이들 결과들은 크게 시간지연값에 의존한 조건과 시간지연값과 관계없는 조건의 두가지 형태로 시간지연시스템의 제어 문제의 해를 제시하고 있다. 일반적으로 시간지연값과 관계없는 조건은 시간지연값에 관계된 조건 보다 훨씬 그 적용에 있어서 제약적임이 알려져있다[15-17].

그러나, 시간지연이 있는 이산시간 선형시스템의 제어 문제는 시간지연이 상수인 경우에는 기존의 시간지연이 존재하는 연속시스템에 대한 제어이론을 이산시간의 경우로 확장하거나 지연 상태변수를 새로운 상태변수로 확장함으로써 상태변수의 수가 늘어난 부가 이산시간선형시스템(augmented discrete time linear system)의 제어문제로 변환되어 기존의 이산시간선형시스템의 제어이론을 이용하면, 쉽게 풀 수 있다. 그러나, 시간지연이 시변(time-varying)인 경우에는 이러한 상태변수 확장개념을 사용할 수 없어서 기존의 제어이론을 단순히 이용할 수 없다.

본 논문에서는 시변시간지연이 존재하는 이산시간 선형시스템의 점근안정도문제를 풀기위하여 새로운 형태의 리아프노프함수를 제시한다. 제시된 리아프노프함수를 이용하여 시변시간지연이 존재하는 이산시간 선형시스템의 점근안정도 문제를 상수시간지연이 존재하는 이산시간 선형시스템의 2차 안정도 문제[7]를 풂으로써 해결할 수 있음을 보인다. 또한, 상수시간지연이 존재하는 이산시간 선형시스템의 2차안정도 문제와 변형된 보조이산시간선형시스템의 H_∞ 제어문제의 동일성을 보임으로써 시변시간지연이 존재하는 이산시간 선형시스템의 점근안정도 문제는 단순히 기존의 이산시간선형시스템의 H_∞ 제어이론을 이용하면 쉽게 풀 수 있다.

다음은 본 논문에서 사용될 용어들의 정의이다. 임의의 대칭인 행렬 $X, Y \in R^{n \times n}$ 에 대해서 $X > Y$ $(X \geq Y)$ 은 $X - Y$ 가 양한정 행렬 (positive definite matrix) (준양한정 행렬(semi-positive definite matrix))임을 의미하고 I_n 은 $n \times n$ 단위 행렬(identity matrix)을 의미한다. x^T 는 벡터 $x \in R^n$ 의 전치(transpose)를 나타낸다.

2. 상수시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템의 안정도

다음과 같은 상수시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템(discrete time linear system with constant time delay)에 대하여 고려해 보자.

$$\Sigma : x(k+1) = A_1 x(k) + A_2 x(k-d) \quad (2.1)$$

* 正 會 員 : 翰林大學校 電子工學科 助敎授 · 工博
** 正 會 員 : 翰林大學校 電子工學科 副敎授 · 工博
***正 會 員 : 濟州大學校 海洋計測工學科 專任講師 · 工博
接受日字 : 1998년 6월 15일
最終完了 : 1999년 3월 15일

여기서, $x(k) \in R^n$ 은 상태변수, $d \in R$ 은 상수시간지연(constant time delay)이다. 편의상 k 번째 이산시간에서의 x 값 x(k) 를 다음과 같이 간략하게 표시한다.

$$x_k = x(k)$$

다음의 정리는 식(2.1)로 주어지는 시간지연 이산시간 선형시스템의 점근안정도에 대한 충분조건을 제시한다.

정리 2.1 [18]

만약, 다음의 행렬 부등식을 만족시키는 양한정행렬(positive-definite matrix) P 와 Q 가 존재한다고 가정하자.

$$-P+A_1^TPA_1+A_1^TPA_2(Q-A_2^TPA_2)^{-1}A_2^TPA_1+Q < 0 \tag{2.2}$$

여기서

$$Q - A_2^TPA_2 > 0 \tag{2.3}$$

이다. 그러면, 식(2.1)로 주어지는 시간지연 이산시간 선형시스템은 점근적으로 안정(asymptotically stable)하다. ■

다음의 정의 2.1 은 상수시간지연을 갖는 이산시간선형시스템의 2차안정도(quadratic stability)에 대한 정의로서, 시간지연 연속시스템인 경우의 [7]의 정의 2 (Definition 2)를 이산시간선형시스템으로 확장한 것이며, 정의 2.2 는 이산시간선형시스템의 H_∞ 노옴 유계와 2차안정도에 대한 정의이다[19].

정의 2.1

만약,

$$\Delta V_k = V_{k+1} - V_k < 0, \ \forall\ x_k \neq 0 \tag{2.4}$$

을 만족하는 리아프노프함수

$$V_k = x_k^TPx_k + \sum_{i=k-d}^{k-1} x_i^TQx_i,\ P > 0,\ Q > 0$$

가 존재한다면, 시간지연 이산시간 선형시스템은 2차안정하다. ■

정의 2.2 [19]

다음과 같은 이산시간선형시스템을 가정한다.

$$\begin{aligned} \overline{\Sigma}:\ x_{k+1} &= A_1x_k + B\,w_k \\ z_k &= Cx_k \end{aligned} \tag{2.5}$$

만약, 식(26)의 행렬 부등식을 만족시키는 양한정행렬(positive-definite matrix) P 가 존재하면, 식(2.5)로 주어지는 이산시간선형시스템은 H_∞ 노옴이 γ 이며 2차안정(quadratically stable with an H_∞ -norm bound γ) 하다.

$$-P+A_1^TPA_1+A_1^TPB(I_n-\gamma^{-2}B^TPB)^{-1}B^TPA_1+C^TC < 0 \tag{2.6}$$

여기서

$$I_n - \gamma^{-2}B^TPB > 0 \tag{2.7}$$

이다. ■

다음의 정리 2..2 는 상수시간지연 이산시간선형시스템의 2차안정도는 보조이산시간 선형시스템(auxiliary discrete time linear systems)의 H_∞ 노옴이 1 이며 2차안정(quadratically stable with an unitary H_∞ -norm bound)할 조건과 동일함을 나타낸다.

정리 2.2

다음의 보조이산시간 선형시스템(auxiliary discrete-time linear systems)을 고려해보자.

$$\begin{aligned} \Sigma_1:\ x(k+1) &= A_1x(k) + H\,w(k) \\ z(k) &= Cx(k) \end{aligned} \tag{2.8}$$

여기서

$$H = A_2Q^{-1/2},\ C = Q^{1/2},\ Q > 0 \tag{2.9}$$

이다. 그러면, 다음의 두 언급은 동일하다.

(1) 시간지연 이산시간선형시스템 Σ 가 2차안정하다.

(2) 이산시간 선형시스템 Σ_1 이 H_∞ 노옴이 1 이며 2차안정하다.

증명) 시간지연 이산시간선형시스템 Σ 가 2차안정할 필요충분조건은 정의 2.2 로부터 다음을 만족시키는 양한정행렬 P, Q 가 존재하는 것이다.

$$\begin{bmatrix} A_1^TPA_1-P+Q & A_1^TPA_2 \\ (A_1^TPA_2)^T & A_2^TPA_2-Q \end{bmatrix} < 0 \tag{2.10}$$

따라서, 식(2.10)은 Shur 보수(Complement)로부터

$$\begin{aligned} &Q - A_2^TPA_2 > 0 \\ &A_1^TPA_1-P+Q+A_1^TPA_2(Q-A_2^TPA_2)^{-1}A_2^TPA_1 < 0 \end{aligned} \tag{2.11}$$

이 된다.

한편, 정의 2.2 로부터 이산시간 선형시스템 Σ_1 가 H_∞ 노옴이 1 이며 2차안정할 필요충분조건은 다음을 만족하는 양한정 행렬 P 가 존재하는 것이다.

$$\begin{aligned} &-P+A_1^TPA_1+A_1^TPH(I_n-H^TPH)^{-1}H^TPA_1+C^TC < 0 \\ &I_n-H^TPH > 0 \end{aligned} \tag{2.12}$$

따라서, 식(2.9)을 식(2.12)에 대입하면, 식(2.12)는 식(2.11)과 같아진다. ■

3. 시변시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템의 점근안정도

본 절에서는 시변시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템의 점근안정도를 위한 충분조건을 제시한다. 다음과 같은 시변시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템을 고려한다.

$$\Sigma_v : x(k+1) = A_1x(k) + A_2x(k-d(k)) \tag{3.1}$$

여기서, $x(k) \in R^n$ 은 상태변수, $d(k) \in R$ 은 시변시간지연 (time varying delay)이다. 또한, 시변시간지연값 $d(k)$ 는 다음을 만족한다고 가정한다.

가정 3.1 : 다음을 만족하는 양수 m 이 존재한다.

$0 < d(k) \le m, \ \forall\ k \ge 0.$ ■

다음의 정리 3.1 은 식(3.1)의 시변시간지연을 갖는 이산시간선형시스템의 점근안정도에 대한 충분조건을 제시한다.

정리 3.1

다음의 행렬부등식을 만족시키는 양한정행렬 P 와 Q 가 존재한다고 하자.

$$-P+A_1^TPA_1+A_1^TPA_2(Q-A_2^TPA_2)^{-1}A_2^TPA_1+mQ < 0 \tag{3.2}$$

여기서

$$Q - A_2^TPA_2 > 0 \tag{3.3}$$

이다. 그러면, 식(3.1)과 가정 3.1을 만족시키는 시변시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템은 점근적으로 안정하다.

증명) 가정 3.1 로부터 식(3.1)로 주어지는 시변시간지연 이산시간선형시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Sigma_v : x(k+1) &= A_1x(k) + A_2x(k-d(k)) \\ &= A_1x(k) + A_2\sum_{i=1}^{m}\delta(d(k)-i)x(k-i) \end{aligned} \tag{3.1'}$$

여기서

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & \text{if } n = 0 \\ 0, & \text{if } n \neq 0 \end{cases} \tag{3.4}$$

이다. 리아프노프 함수 V(k) 를 양한정행렬 P 와 Q 에 대하여 다음과 같이 정의한다.

$$V_k = x_k^TPx_k + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=k-i}^{k-1} x_j^TQx_j \tag{3.5}$$

그러면, 식(3.1)'과 식(3.5)로부터 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= V_{k+1} - V_k \\ &= x_{k+1}^TPx_{k+1} - x_k^TPx_k + \sum_{i=1}^{m}\{x_k^TQx_k - x_{k-i}^TQx_{k-i}\} \\ &= x_k^T\{A_1^TPA_1-P+mQ\}x_k + 2x_k^TA_1^TP\sum_{i=1}^{m}\{\delta(d(k)-i)A_2x_{k-i}\} \\ &\quad + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\{\delta(d(k)-i)\delta(d(k)-j)x_{k-i}^TA_2^TPA_2x_{k-j}\} \\ &\quad - \sum_{i=1}^{m}\{x_{k-i}^TQx_{k-i}\} \end{aligned} \tag{3.6}$$

그런데, 식(3.4)로부터

$$\delta(d(k)-i)\delta(d(k)-j) = \begin{cases} \delta(d(k)-i), & \text{if } i = j \\ 0, & \text{if } i \neq j \end{cases} \tag{3.7}$$

이고

$$\sum_{i=1}^{m}x_{k-i}^TQx_{k-i} \ge \sum_{i=1}^{m}\delta(d(k)-i)\ x_{k-i}^TQx_{k-i} \tag{3.8}$$

이 만족된다. 따라서, 식(3.6)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V_k &\le x_k^T\{A_1^TPA_1-P+mQ\}x_k + 2x_k^TA_1^TP\sum_{i=1}^{m}\{\delta(d(k)-i)A_2x_{k-i}\} \\ &\quad + \sum_{i=1}^{m}\{\delta(d(k)-i)x_{k-i}^TA_2^TPA_2x_{k-i}\} - \sum_{i=1}^{m}\{\delta(d(k)-i)x_{k-i}^TQx_{k-i}\} \\ &= x_k^T\{A_1^TPA_1-P+mQ\}x_k \\ &\quad + \sum_{i=1}^{m}\{\delta(d(k)-i)x_k^TA_1^TPA_2(Q-A_2^TPA_2)^{-1}A_2^TPA_1x_k\} \\ &\quad - \sum_{i=1}^{m}[\delta(d(k)-i)\{A_2^TPA_1x_k - (Q-A_2^TPA_2)x_{k-i}\}^T \\ &\qquad \times(Q-A_2^TPA_2)^{-1}\{A_2^TPA_1x_k - (Q-A_2^TPA_2)x_{k-i}\}] \end{aligned} \tag{3.9}$$

시변시간지연 $d(k)$ 는 1 이상 m 이하의 정수값을 갖기 때문에

$$\sum_{i=1}^{m}\delta(d(k)-i) = 1, \ \ \forall\ k \ge 0 \tag{3.10}$$

이 만족된다. 따라서, 식(3.2)와 식(3.9)로부터 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned}\Delta V_k &\le x_k^T\{A_1^TPA_1-P+mQ \\ &\quad +A_1^TPA_2(Q-A_2^TPA_2)^{-1}A_2^TPA_1\}x_k \\ &< 0, \quad \forall\, k\ge 0\end{aligned} \tag{3.11}$$

식(3.11)로부터 식(3.1)로 주어지는 시변시간지연을 갖는 이산시간선형시스템은 점근적으로 안정함을 알 수 있다. ■

참고 3.1 : 정리 3.1에서 식(3.2)로 주어지는 시변시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템의 점근안정도조건은 시변시간지연의 상한값을 포함한 시간지연의존(delay dependent) 형태로 주어짐을 알 수 있다. ■

참고 3.2 : 정리 3.1에서 식(3.2)와 식(3.3)으로 주어지는 리카티부등식은 시변시간지연 상한 m 이 커지면, 해의 존재가능성이 작아질 소지가 있다. 그러나, 이 리카티부등식은 다음과 같은 선형행렬부등식(LMI)으로 변환되어, 간단한 알고리즘을 적용함으로써 그 해의 존재여부가 쉽게 판명된다.

$$\begin{bmatrix} A_1^TPA_1-P+mQ & A_1^TPA_2 \\ A_2^TPA_1 & A_2^TPA_2-Q \end{bmatrix} < 0$$

따라서, 위의 부등식을 만족시키는 양한정행렬 P 와 Q 의 존재여부는 볼록최적화(convex optimization) 문제에서 다루는 해의 존재문제(feasibility problem)을 풀면되는데, 이에 대한 알고리즘들은 최근에 많이 연구되었으며[20], matlab LMI toolbox를 이용하면, 쉽게 구할 수 있다[21]. ■

다음의 정리 3.2 는 정의 2.1 로 주어지는 상수시간지연을 갖는 이산시간선형시스템의 2차안정도와 시변시간지연을 갖는 이산시간선형시스템의 점근안정도와의 관계를 제시한다.

정리 3.2

다음의 두 시간지연이산시간시스템을 고려해보자.

$$\begin{aligned}\Sigma_v : x(k+1) &= A_1\,x(k) + A_2\,x(k-d(k)) \\ &= A_1\,x(k) + A_2\sum_{i=1}^{m}\delta(d(k)-i)x(k-i)\end{aligned} \tag{3.1'}$$

$$\Sigma_c : x(k+1) = A_1\,x(k) + \sqrt{m}A_2\,x(k-d),\ d>0 \tag{3.12}$$

만약, 상수시간지연을 갖는 이산시간선형시스템 Σ_c 가 2차안정하다면, 시변시간지연을 갖는 이산시간선형시스템 Σ_v 는 점근적으로 안정하다.

증명) 상수시간지연을 갖는 이산시간선형시스템 Σ_c 가 2차안정하다면, 정의 2.1을 만족시키는 양한정행렬 P 와 Q 가 존재한다. 따라서, 식(2.4)로부터

$$\begin{aligned}\Delta V_k &= V_{k+1} - V_k \\ &= x_{k+1}^TPx_{k+1} - x_k^TPx_k + \{x_k^TQx_k - x_{k-d}^TQx_{k-d}\} \\ &= x_k^T(A_1^TPA_1-P+Q)x_k + 2\sqrt{m}x_k^TA_1^TPA_2x_{k-d} \\ &\quad + mx_{k-d}^TA_2^TPA_2x_{k-d} - x_{k-d}^TQx_{k-d} \\ &= [\,x_k^T\ \ x_{k-d}^T\,]\begin{bmatrix} A_1^TPA_1-P+Q & \sqrt{m}A_1^TPA_2 \\ \sqrt{m}(A_1^TPA_2)^T & mA_2^TPA_2-Q\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-d}\end{bmatrix} \\ &< 0, \quad \forall\, k\ge 0\end{aligned} \tag{3.13}$$

이 만족된다. 식(3.13)으로부터

$$\begin{bmatrix} A_1^TPA_1-P+Q & \sqrt{m}A_1^TPA_2 \\ \sqrt{m}(A_1^TPA_2)^T & mA_2^TPA_2-Q\end{bmatrix} < 0$$

이므로, Shur 보수(Complement) 로부터

$$\begin{aligned}& Q - mA_2^TPA_2 > 0 \\ & A_1^TPA_1-P+Q+mA_1^TPA_2(Q-mA_2^TPA_2)^{-1}A_2^TPA_1<0\end{aligned} \tag{3.14}$$

임을 알 수 있다. 행렬 $\overline{Q}=Q/m$ 으로 정의하면, 식(3.14)로부터

$$\begin{aligned}& \overline{Q}-A_2^TPA_2 > 0 \\ & -P+A_1^TPA_1+A_1^TPA_2(\overline{Q}-A_2^TPA_2)^{-1}A_2^TPA_1+m\overline{Q}<0\end{aligned} \tag{3.15}$$

이 성립하고, 정리 3.1의 식(3.2)로부터 식(3.12)의 시변시간지연 이산시간 선형시스템은 점근적으로 안정함을 알 수 있다. ■

정리 3.2 에서보면, 시변시간지연 이산시간 선형시스템의 점근안정도를 위한 충분조건은 식(3.12)로 주어지는 상수시간지연 이산시간선형시스템이 2차안정할 조건으로 주어진다. 따라서, 시변시간지연 이산시간 선형시스템의 점근안정도는 변형된 상수시간지연 이산시간선형시스템의 2차안정도 조건을 조사함으로써 판단할 수 있다. 또한, 변형된 상수시간지연 이산시간선형시스템은 시변시간지연의 상한값을 매개변수로 갖는 시스템이다.

다음의 정리 3.3 은 시변시간지연을 갖는 이산시간선형시스템의 점근안정도를 위한 또 다른 충분조건으로서 특별한 형태의 보조이산시간 선형시스템의 H_∞ 노옴이 1 이며 2차안정(quadratically stable with an unitary H_∞ -norm bound)할 조건을 제시한다. 이의 증명은 정리 2.2 와 정리 3.2 로부

터 쉽게 얻어진다.

정리 3.3

식(2.9)에서 $H = \sqrt{m}A_2Q^{-1/2}$ 일 때, 이산시간 선형시스템 Σ_1 이 H_∞ 노옴이 1 이며 2차안정하면, 시변시간지연 이산시간 선형시스템 Σ_v 는 점근적으로 안정하다. ■

정리 3.3에서 보면 알 수 있듯이 시변시간지연을 갖는 이산시간선형시스템의 점근안정도 문제는 기존의 이산시간선형시스템의 제어이론을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 다음에 수치예를 보인다.

예제 1.

식(3.1)로 주어지는 시변시간지연 이산시간 선형시스템에서 시스템행렬 A_1, A_2 가 각각 다음과 같은 경우에 대하여 고려하여 보자.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.15 & -0.8 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0.16 & 0.24 \\ 0 & 0.08 \end{bmatrix}$$

가정 3.1에서 시변시간지연 $d(k)$ 의 상한 m = 10 인 경우, 정리 3.1 의 식(3.2)로 주어지는 리카티부등식은 다음과 같이 주어지는 양한정행렬 P, Q 에 대하여 성립함을 알 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} 14.47 & 18.44 \\ 18.44 & 52.08 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 0.9174 & 1.0850 \\ 1.0850 & 2.6967 \end{bmatrix}$$

즉, 식(3.2)로 주어지는 리카티부등식은 다음과 같다.

$$-P + A_1^TPA_1 + A_1^TPA_2(Q - A_2^TPA_2)^{-1}A_2^TPA_1 + mQ$$
$$= \begin{bmatrix} -2.1086 & -1.0661 \\ -1.0661 & -1.3757 \end{bmatrix}$$
$$< 0$$

그림 1 은 앞의 경우에서 시변시간지연 $d(k)$ 가 1에서 10 사이의 랜덤값(random number)을 매 이산시간 k 마다 임의로 갖으며, 각 상태변수의 초기값 $x(0) = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix}$ 인 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다.

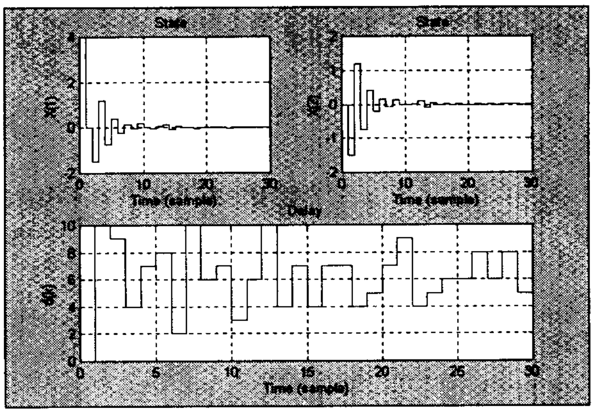

그림 1. 시뮬레이션 결과

4. 결 론

본 논문에서는 상태변수에 시변시간지연이 존재하는 이산시간 선형시스템의 점근안정도를 위한 충분조건을 제시하고 있다. 이 충분조건은 시간지연이 없는 이산시간 선형시스템의 H_∞ 제어 조건의 형태로 제시되어, 시변시간지연이 존재하는 이산시간 선형시스템의 점근안정도 문제를 기존의 이산시간 선형시스템의 H_∞ 제어이론을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

현재까지 시변시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템의 안정도에 대한 결과는 아직 미진한 상태로서, 본 논문에서는 새로운 리아프노프 함수를 제시하고, 이를 이용하여 점근안정도를 위한 충분조건을 제시할 수 있었다. 제시된 리아프노프 함수를 이용한다면, 불확실성이 존재하는 시변시간지연을 갖는 이산시간 선형시스템의 견실제어와 H_∞ 제어의 해도 쉽게 구할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 1998년도 한림대학교 지원 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] T. Mori and H. Kokame,"Stability of $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bx(t-\tau)$," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.34, pp.460-462, 1989.

[2] T. Mori,"Criteria for asymptotic stability of linear time-delay systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.30, pp.158-161, 1985.

[3] E. W. Kamen,"On the relationship between zero criteria for two-variable polynomials and asymptotic stability of delay differential equations," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.25,

pp.983-984, 1980.

[4] H. Bourles,"α-stability of systems governed by a functional differential equation-extension of results concerning linear delay systems," Int. J. Control, Vol.45, pp.2233-2234, 1987.

[5] S. D. Brierley, J. N. Chiasson, E. B. Lee, and S. H. Zak,"On stability independent of delay for linear systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.27, pp.252-254, 1982.

[6] J. H. Lee, S. W. Kim, and W. H. Kwon,"Memoryless H_∞ controllers for state delayed systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.39, pp.159-162, 1994.

[7] L. Yuan, "Robust analysis and synthesis of linear time-dealy systems with norm-bounded time-varying uncertainty," Systems and Control Letters, Vol.28, pp.281-289, 1996.

[8] Z. Hu,"Decentralized stabilization of large-scale interconnected systems with delays," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.39, pp.180-182, 1994.

[9] T. Su and C. Huang,"Robust stability of delay dependence for linear uncertain systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.37, pp.1656-1659, 1992.

[10] J. Hennet and S. Tarbouriech,"Stability and stabilization of delay differential sytems," Automatica, Vol.33, pp.347-354, 1997.

[11] H. H. Choi and M. J. Chung,"Robust observer-based H_∞ controller design for linear uncertain time-delay systems," Automatica, Vol.33, pp.1749-1753, 1997.

[12] X. Li and C. E. Souza,"Criteria for robust stability and stabilization of uncertain linear systems with time-delay," Automatica, Vol.33, pp.1657-1662, 1997.

[13] S. Phoojaruenchanachai and K. Furuta,"Memoryless stabilization of uncertain linear systems including time-varying state-delays," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.37, pp.1022-1026, 1992.

[14] E. T. Jeung, D. C. Oh, J. H. Kim, and H. B. Park,"Robust controller design for uncertain systems with time delays : LMI approach," Automatica, Vol.32, pp.1229-1231, 1996.

[15] M. S. Mahmoud and N. F. Al-Muthairi,"Quadratic stabilization of continuous time systems with state-delay and norm-bounded time-varying uncertainties," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.39, No.10, pp.2135-2139, Oct. 1994.

[16] E. Cheres, S. Gutman, and Z. J. Palmor,"Stabilization of uncertain dynamic systems including time-varying state-delay," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.34, pp.1199-1203, 1989.

[17] J. Chen,"On computing the maximal delay intervals for stability of linear delay systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.40, pp.1087-1093, 1995.

[18] E. I. Verriest and A. F. Ivanov,"Robust stability of delay-difference equations," Proc. of 34th Conf. Decision & Control., New Orleans, LA, pp.386-391, Dec. 1995.

[19] L. Yuan, L. E. K. Achenie, and W. Jiang, "Robust H_∞ control for linear discrete-time systems with norm-bounded time-varying uncertainty," Systems and Control Letters, Vol.27, pp.199-208, 1996.

[20] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrichnan, Linear matrix inequalities in system and control theory, SIAM, Philadelphia, PA, 1994.

[21] P. Gahinet, A. Nemirovski, A. Laub, and M. Chilali, LMI control toolbox, Matlab, 1995

저 자 소 개

송 성 호 (宋 誠 鎬)

1964년 10월 2일생. 1987년 서울대 공대 제어계측과 졸업. 1991년 동 대학원 제어계측과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 제어계측과 졸업(공박). 1995년~1996년 서울대 자동화시스템연구소 연구원. 1996년~현재 한림대 전자공학과 전임강사

Tel : (0361) 240-1515

E-mail : ssh@hee.ee.hallym.ac.kr

김 점 근(金 点 根)

1959년 12월 20일생. 1982년 서울대 공대 제어계측과 졸업. 1986년 동 대학원 제어계측과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 제어계측과 졸업(공박). 1992년~1994년 삼성전자(주) 선임연구원. 1994년~현재 한림대 공대 전자공학과 조교수

Tel : (0361) 240-1513

E-mail : jkim@hee.ee.hallym.ac.kr

강 창 익 (姜 彰 益)

1967년 3월 25일생. 1989년 서울대 제어계측공학과 졸업(학사). 1991년 서울대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1995년 서울대 대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 1995~98년 삼성전자 선임연구원. 현재 제주대학교 해양계측공학과 전임강사

Tel : (064) 754-3481

E-mail : cikang@cheju.cheju.ac.kr