시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 견실 안정성

Robust Stability of Uncertain Discrete-Time Linear Systems with Time-Varying Delays

송 성 호, 박 섭 형, 이 봉 영
(Seong-Ho Song, Seop Hyeong Park, and Bong Young Lee)

Abstract : This paper deals with the robust stability of discrete-time linear systems with time-varying delays and norm-bounded uncertainties. In this paper, the magnitude of time-varying delays is assumed to be upper-bounded. The sufficient condition is presented in terms of linear matrix inequality (LMI). It is also shown that the robust stability of uncertain discrete-time linear systems with time-varying delays is related with the quadratic stability of uncertain discrete-time linear systems with constant time delay.

Keywords : time-varying delay, discrete-time linear system, Lyapunov function, robust stability, norm-bounded uncertainties, linear matrix inequality

I. 서론

본 논문에서는 시변 시간 지연이 존재하는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 견실 안정성 문제를 다룬다. 시간 지연이 존재하는 연속 시스템의 제어 문제는 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 시간 지연 시스템에 대한 연구는 상수 시간 지연을 갖는 연속 시간 선형 시스템에 대한 연구와 시변 시간 지연을 갖는 연속 시간 선형 시스템에 대한 연구로 나눌 수 있다. 대부분의 연구들은 상수 시간 지연을 갖는 연속 시간 선형 시스템의 안정성[1]-[5]과 안정화 문제, 견실 제어 문제, 대형 시스템 문제[6]-[10]를 다루고 있으며, 시변 시간 지연이 존재하는 연속 시간 선형 시스템의 연구들은 최근에 와서 활발히 진행되고 있다[11]-[14]

견실 안정성에 대한 결과들은 주로 시간 지연값을 고려하지 않은 형태의 조건들로 제시되어 왔다[15]-[20]. 그러나, 이들 조건은 시간 지연값이 임의로 커도 만족되는 조건들이기 때문에 일반적으로 실제 적용하는데 있어서는 매우 제한적이다[15][20][21][26]. 따라서, 최근에는 이러한 시간 지연값의 크기를 고려한 견실 안정성 해석 기법들에 대한 관심이 증대되고 있다. 즉, 견실 안정성 조건이 시간 지연값의 크기에 의존하는 형태로서 제시되고 있다[22]-[24].

[23]에서는 리아프노프 방정식의 해의 형태로 견실 안정성 조건을 제시하고 있으며, [22]에서는 변형된 대수 리카티 방정식의 형태로 주어진다. 한편 [24]에서는 최근 활발히 연구되고 있는 선형 행렬 부등식(LMI)의 형태로 견실 안정성 해석을 수행하였다.

그러나, 시간 지연이 있는 이산 시간 선형 시스템의 제어 문제는 시간 지연이 상수인 경우에는 기존의 시간 지연이 존재하는 연속 시스템에 대한 제어 이론을 이산 시간의 경우로 확장하거나 시간 지연 상태 변수를 새로운 상태 변수로 확장함으로써 상태 변수의 수가 늘어난 부가 이산 시간 선형 시스템(augmented discrete time linear system)의 제어 문제로 변환되어 기존의 이산 시간 선형 시스템의 제어 이론을 이용하면, 쉽게 풀 수 있다[18][25]. 그러나, 시간 지연이 시변(time-varying)인 경우에는 이러한 상태 변수 확장 개념을 사용할 수 없어서 기존의 제어 이론을 단순히 이용할 수 없다.

본 논문에서는 시변 시간 지연과 노옴 유계인 불확실성이 존재하는 이산 시간 선형 시스템의 점근 안정성 문제를 푼다. 리아프노프 함수를 이용하여 최근 활발히 연구되고 있는 선형 부등식 형태의 충분 조건을 제시한다. 또한, 시변 시간 지연이 존재하는 이산 시간 선형 시스템의 점근 안정성 문제를 상수 시간 지연이 존재하는 이산 시간 선형 시스템의 2차안정성 문제[7]를 풂으로써 해결할 수 있음을 보인다.

다음은 본 논문에서 사용될 용어들의 정의이다. R, N은 각각 실수 집합과 양의 정수 집합을 나타낸다. 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_n은 $n\times n$ 단위 행렬(identity matrix)을 의미한다. x^T는 벡터 $x \in R^n$의 전치(transpose)를 나타내며, $\lambda_M(Q)$은 대칭 행렬 Q의 최대 특성값(maximum eigenvalue)를 나타낸다.

II. 상수 시간 지연을 갖는 이산 시간 선형 시스템의 안정성

다음과 같은 상수 시간 지연을 갖는 이산 시간 선형 시스템(discrete-time linear system with constant time-delay)에 대하여 고려해 보자.

접수일자 : 1998. 6 15., 수정완료 : 1999. 6. 23.
송성호, 박섭형 : 한림대학교 전자공학부
이봉영 : 한국통신 통신망 연구소
※ 본 연구는 한국통신의 '99년도 HAN/B-ISDN NTB 위탁연구 과제 지원을 받았습니다.

$$\Sigma: \ x(k+1) = A_1 x(k) + A_2 x(k-d) \tag{1}$$

여기서, $x(k) \in R^n$은 상태 변수 $u(k) \in R^m$은 제어 입력, $d \in R$은 상수 시간 지연(constant time delay)이다. 편의상 k번째 이산 시간에서의 x값 x(k)를 다음과 같이 간략하게 표시한다.

$$x_k = x(k)$$

다음의 정의 2.1은 상수 시간 지연을 갖는 이산 시간 선형 시스템의 2차안정성(quadratic stability)에 대한 정의로서, 시간 지연 연속 시스템인 경우의 [7]의 정의 2 (Definition 2)를 이산 시간 선형 시스템으로 확장한 것이다.

정의 2.1: 만약,

$$\Delta V_k = V_{k+1} - V_k < 0, \ \forall \ x_k \neq 0 \tag{2}$$

을 만족하는 리아프노프 함수

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

가 존재한다면, 시간 지연 이산 시간 선형 시스템은 2차안정하다.

다음의 정리는 (1)로 주어지는 시간 지연 이산 시간 선형 시스템의 2차안정성에 대한 필요 충분 조건을 제시한다.

정리 2.1 [7] : (1)로 주어지는 시간 지연 이산 시간 선형 시스템이 2차안정(quadratically stable)할 필요 충분 조건은 다음의 행렬 부등식을 만족시키는 양한정 행렬(positive-definite matrix) P와 Q가 존재하는 것이다.

$$-P + A_1^T P A_1 + A_1^T P A_2 (Q - A_2^T P A_2)^{-1} A_2^T P A_1 + Q < 0 \tag{3}$$

여기서

$$Q - A_2^T P A_2 > 0 \tag{4}$$

이다.

(2)와 (3)은 [18]에서 제시하는 시간 지연이 존재하는 이산 시간 선형 시스템의 점근안정성을 위한 충분 조건과 같음을 알 수 있다.

III. 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 안정성

본 절에서는 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 안정성을 위한 충분 조건을 제시한다. 다음과 같은 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \Sigma_v : \ x_{k+1} &= (A_1 + \Delta A_1) x_k + (A_2 + \Delta A_2) \ x_{k-d(k)} \\ &= \overline{A_1} x_k + \overline{A_2} x_{k-d(k)} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, $x_k \in R^n$은 상태 변수, $d(k) \in N$은 시변 시간 지연 (time-varying delay)이며, ΔA_1, ΔA_2는 불확실 행렬이다. 또한, 시변 시간 지연값 $d(k)$는 다음을 만족한다고 가정한다.

가정 3.1 : 다음을 만족하는 양수 m이 존재한다.

$$0 < d(k) \leq m, \ \forall \ k \geq 0$$

가정 3.2 : 불확실 행렬 ΔA_1, ΔA_2는 다음을 만족한다.

$$[\Delta A_1 \ \Delta A_2] = MF[E_1 \ E_2]$$

여기서 행렬 $M \in R^{n \times f}$, $E_1 \in R^{g \times n}$, $E_2 \in R^{g \times n}$는 확정 행렬 (known matrix)이고, $F \in R^{f \times g}$는 불확실 행렬로서 다음을 만족한다.

다음의 보조 정리 3.1은 (4)의 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 점근 안정성에 대한 충분 조건을 제시한다.

보조 정리 3.1 : 다음의 행렬 부등식을 만족시키는 양한정 행렬 P와 Q가 존재한다고 하자.

$$-P + \overline{A_1^T P A_1} + \overline{A_1^T P A_2} (Q - \overline{A_2^T P A_2})^{-1} \overline{A_2^T P A_1} + mQ < 0 \tag{6}$$

여기서

$$Q - \overline{A_2^T P A_2} > 0 \tag{7}$$

이다. 그러면, (5)와 가정 3.1, 가정 3.2를 만족시키는 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템 Σ_v는 점근적으로 안정하다.

증명 : 가정 3.1로부터 (5)로 주어지는 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 안정성을 증명하기 위하여 리아프노프 함수 V(k)를 양한정 행렬 P와 Q에 대하여 다음과 같이 정의한다.

$$V_k = x_k^T P x_k + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=k-i}^{k-1} x_j^T Q x_j \tag{8}$$

그러면, (8)로부터 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= V_{k+1} - V_k \\ &= x_{k+1}^T P x_{k+1} - x_k^T P x_k + \sum_{i=1}^{m} \{ x_k^T Q x_k - x_{k-i}^T Q x_{k-i} \} \\ &= x_k^T \{ \overline{A_1^T P A_1} - P + mQ \} x_k + 2 x_k^T \overline{A_1}^T P \overline{A_2} x_{k-d(k)} \\ &\quad + x_{k-d(k)}^T \overline{A_2^T P A_2} x_{k-d(k)} \} - \sum_{i=1}^{m} \{ x_{k-i}^T Q x_{k-i} \} \end{aligned} \tag{9}$$

그런데, 가정 3.1로부터

$$\sum_{i=1}^{m} x_{k-i}^T Q x_{k-i} \geq x_{k-d(k)}^T Q x_{k-d(k)} \tag{10}$$

이 만족되며, (9)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V_k &\leq x_k^T \{ \overline{A_1^T P A_1} - P + mQ \} x_k \\ &\quad + 2 x_k^T \overline{A_1^T P A_2} x_{k-d(k)} \\ &\quad + x_{k-d(k)}^T \overline{A_2^T P A_2} x_{k-d(k)} - x_{k-d(k)}^T Q x_{k-d(k)} \end{aligned}$$

$$= x_k^T\{\overline{A_1^T P A_1} - P + mQ\}x_k$$
$$+ x_k^T \overline{A_1^T P A_2}(Q - \overline{A_2^T P A_2})^{-1}\overline{A_2^T P A_1}x_k$$
$$- \left\{\overline{A_2^T P A_1}x_k - (Q - \overline{A_2^T P A_2})x_{k-d(k)}\right\}^T$$
$$\times (Q - \overline{A_2^T P A_2})^{-1}\left\{\overline{A_2^T P A_1}x_k - (Q - \overline{A_2^T P A_2})x_{k-d(k)}\right\} \tag{11}$$

따라서, (6)과 (11)로부터 다음이 성립한다.

$$\Delta V_k \le x_k^T\{\overline{A_1^T P A_1} - P + mQ + \overline{A_1^T P A_2}(Q - \overline{A_2^T P A_2})^{-1}\overline{A_2^T P A_1}\}x_k < 0, \ \forall k \ge 0 \tag{12}$$

(14)로부터 (5)로 주어지는 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템은 점근적으로 안정함을 알 수 있다. ■

참고 3.1 : 보조 정리 3.1에서 시변 시간 지연을 갖는 이산 시간 선형 시스템의 점근 안정성 조건 (6)는 시변 시간 지연의 상한값 m을 포함한 시간 지연 의존(delay dependent)형태로 주어짐을 알 수 있다.

다음의 정리 3.1은 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 견실 안정성을 위한 충분 조건을 제시한다.

정리 3.1: (13)의 선형 부등식을 만족시키는 양한정 행렬 P, Q와 양수 ε이 존재한다면, (5)로 주어지는 시변 시간 지연이 존재하는 불확실한 이산 시간 선형 시스템 Σ_v는 가정 3.2를 만족하는 모든 불확실 행렬에 대하여 점근적으로 안정하다.

$$\begin{bmatrix} -P & PA_1 & PA_2 & \varepsilon PM & 0 & 0 \\ A_1^T P & -P & 0 & 0 & \frac{1}{\varepsilon}E_1^T & \sqrt{m}Q \\ A_2^T P & 0 & -Q & 0 & \frac{1}{\varepsilon}E_2^T & 0 \\ \varepsilon M^T P & 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\varepsilon}E_1 & \frac{1}{\varepsilon}E_2 & 0 & -I & 0 \\ 0 & \sqrt{m}Q & 0 & 0 & 0 & -Q \end{bmatrix} < 0 \tag{13}$$

증명 : (13)은 Schur 보수(complement)와 약간의 조작을 통해 다음 부등식과 동일함을 알 수 있다.

$$\begin{pmatrix} -P^{-1} + \varepsilon^2 MM^T & A_1 & A_2 \\ A_1^T & -P + mQ + \frac{1}{\varepsilon^2}E_1^T E_1 & \frac{1}{\varepsilon^2}E_1^T E_2 \\ A_2^T & \frac{1}{\varepsilon^2}E_2^T E_1 & -Q + \frac{1}{\varepsilon^2}E_2^T E_2 \end{pmatrix} < 0 \tag{14}$$

한편, 가정 3.2로부터

$$\begin{pmatrix} 0 & \Delta A_1 & \Delta A_2 \\ \Delta A_1^T & 0 & 0 \\ \Delta A_2^T & 0 & 0 \end{pmatrix} \le \begin{pmatrix} \varepsilon^2 MM^T & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\varepsilon^2}E_1^T E_1 & \frac{1}{\varepsilon^2}E_1^T E_2 \\ 0 & \frac{1}{\varepsilon^2}E_2^T E_1 & \frac{1}{\varepsilon^2}E_2^T E_2 \end{pmatrix} \tag{15}$$

이 만족되므로, (14)로부터 다음이 성립한다.

$$\begin{pmatrix} -P^{-1} & \overline{A_1} & \overline{A_2} \\ \overline{A_1^T} & -P + mQ & 0 \\ \overline{A_2^T} & 0 & -Q \end{pmatrix} < 0 \tag{16}$$

(16)으로부터 Schur보수로부터 다음 부등식이 성립함을 알 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \overline{A_1^T P A_1} - P + mQ & \overline{A_1^T P A_2} \\ (\overline{A_1^T P A_2})^T & \overline{A_2^T P A_2} - Q \end{pmatrix} < 0 \tag{17}$$

Schur보수로부터 (17)은 보조 정리 3.1의 (6)과 (7)은 동일하며, 따라서 (13)가 만족되면 보조 정리 3.1로부터 (5)로 주어지는 시변 시간 지연이 존재하는 불확실한 이산 시간 선형 시스템 Σ_v는 가정 3.2를 만족하는 모든 불확실 행렬에 대하여 점근적으로 안정함을 알 수 있다. ■

정리 3.1에서 주어지는 선형 부등식 (13)는 양한정 행렬 P, Q에 대하여 선형인 부등식으로서 이러한 형태의 부등식에 대해서는 최근 많이 연구되었으며, 볼록최적화(convex optimization) 알고리즘을 이용하면, 비선형 리카티 부등식보다 쉽게 그 수치해를 구할 수 있는 장점이 있다[24]. 다음의 따름 정리 3.1은 정의 2.1로 주어지는 상수 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 2차안정성과 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 견실 안정성과의 관계를 제시한다.

따름 정리 3.1 : 다음의 시간 지연 이산 시간 시스템을 고려해보자.

$$\Sigma_c: x_{k+1} = \overline{A_1}x_k + \sqrt{m}\,\overline{A_2}x_{k-d}, \ d > 0 \tag{18}$$

만약, 시간 지연 이산 시간 선형 시스템 Σ_c가 2차안정하다면, 시변 시간 지연이 존재하는 불확실한 이산 시간선형 시스템 Σ_v는 가정 3.2를 만족하는 모든 불확실 행렬에 대하여 점근적으로 안정하다.

증명 : 정의 2.1과 Schur 보수를 이용하면, (6)과 (7)이 성립함을 쉽게 증명할 수 있다. ■

따름 정리 3.1에서보면, 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 견실 안정성을 위한 충분조건은 (18)로 주어지는 상수 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간선형 시스템이 2차안정할 조건으로 주어진다. (18)에서 보면 알 수 있듯이, 변형된 상수 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템은 시변 시간 지연의 상한값을 매개 변수로 갖는 시스템이다. 따라서, 시변 시간 지연을 갖는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 점근 안정성은 시간 지연 상한값을 시스템 행렬의 매개 변수로 갖는 변형된 상수 시간 지연 불확실 이산 시간 선형 시스템의 2차안정성 조건을 조사함으로써 판단할 수 있다. 따라서, 기존의 상수 시간 지연 시스템에 대한 이론을 이용하여 시변 시간 지연 시스템의 안정성을 판별할 수 있다.

다음 수치예를 통하여 정리 3.1의 타당성을 알아본다.

예제 : (5)로 주어지는 시변 시간 지연 이산 시간 선형 시스템에서 시스템 행렬 A_1, A_2 ΔA_1, ΔA_2가 각각 다음과 같은 경우에 대하여 고려하여 보자.

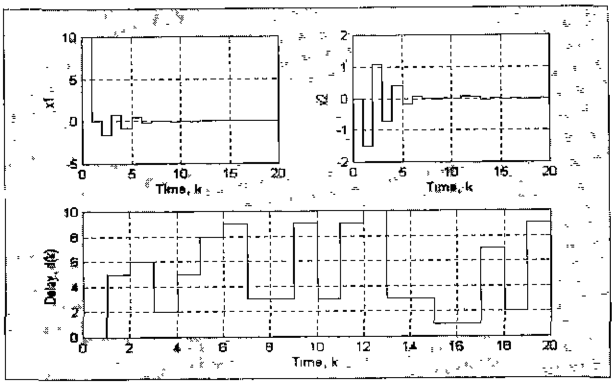

그림 1. 모의 실험 결과(Case 2).
Fig. 1. Simulation result (Case 2).

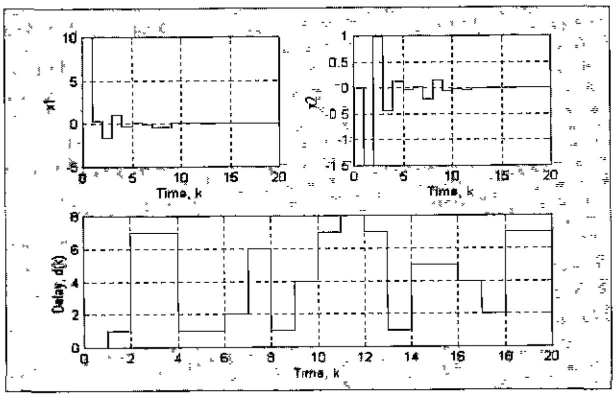

그림 2. 모의 실험 결과(Case 1).
Fig. 2. Simulation result (Case 1).

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

$$\Delta A_1 = \begin{bmatrix} 0.04\delta_1 & 0.15\delta_2 \\ 0 & 0.15\delta_2 \end{bmatrix},$$

$$\Delta A_2 = \begin{bmatrix} 0.07\delta_1 + 0.06\delta_2 & 0.09\delta_2 \\ 0.06\delta_2 & 0.09\delta_2 \end{bmatrix}$$

여기서 $\delta_1 < 1$, $\delta_2 < 1$을 만족하는 불확실 상수이다. 그러면, 가정 3.2를 만족시키는 M, F, E_1, E_2는 각각 다음과 같다.

$$M = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0 & 0.3 \end{pmatrix},\ F = \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_1 \end{pmatrix},$$

$$E_1 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix},\ E_2 = \begin{pmatrix} 0.7 & 0 \\ 0.2 & 0.3 \end{pmatrix}$$

가정 3.1에서 시변 시간 지연 $d(k)$의 상한 $m = 10$인 경우, 정리 3.1의 (13)으로 주어지는 선형 부등식은 다음과 같이 주어지는 양한정 행렬 P, Q와 양수 ε에 대하여 성립함을 알 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} 1.5012 & 1.0611 \\ 1.0611 & 3.4595 \end{bmatrix},\ Q = \begin{bmatrix} 0.2281 & 0.0960 \\ 0.0960 & 0.2131 \end{bmatrix},\ \varepsilon = 1$$

그림 1과 그림 2는 각각 시변 시간 지연 $d(k)$가 1에서 10 사이의 랜덤값(random number)을 매 이산 시간 k마다 임의로 갖으며, 각 상태 변수의 초기값 $x(0) = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \end{pmatrix}$일 때, 불확실 상수값 $\delta_1 = 0.9$, $\delta_2 = 0.7$인 경우(Case 1)와 $\delta_1 = 0.2$, $\delta_2 = 0.5$인 경우(Case 2)에 대한 시뮬레이션 결과이다.

IV. 결론

본 논문에서는 시변 시간 지연이 존재하는 불확실한 이산 시간 선형 시스템의 견실 안정성을 위한 충분 조건을 제시하였다. 이 충분 조건은 최근 많이 연구되는 선형 부등식 형태로 주어지며, 이 선형 부등식의 해는 볼록최적화 알고리듬(convex optimization)을 이용하여 쉽게 수치해를 구할 수 있다.

현재까지 시변 시간 지연을 갖는 이산 시간 선형 시스템의 안정성에 대한 결과는 아직 미진한 상태로서, 본 논문에서는 견실 안정성을 위한 선형 부등식 형태의 충분 조건을 제시하였으며, 불확실성이 존재하는 시변 시간 지연을 갖는 이산 시간 선형 시스템의 견실 제어와 H_∞ 제어의 해도 쉽게 구할 수 있을 것이다.

참고문헌

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

[2] T. Mori, "Criteria for asymptotic stability of linear time-delay systems," *IEEE Trans. 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 Trans. 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 Trans. 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 Trans. 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 Trans. Automatic Control*, vol. 39, pp. 180-182, 1994.
[9] T. Su and C. Huang, "Robust stability of delay dependence for linear uncertain systems," *IEEE Trans. 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 Trans. 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 Trans. Automatic Control*, vol. 39, no. 10, pp. 2135-2139, Oct. 1994.
[16] J. S. Luo, A. Johnson, and P. P. J. van den Bosch, "Delay independent robust stability of uncertain linear systems," *Systems and Control Letters*, vol. 24, pp. 33-39, 1995.
[17] S. Phoojaruenchanachai and K. Furuta, "Memoryless stabilization of uncertain linear systems including time-varying state delays," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, pp. 1022-1026, 1992.
[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] J. C. Shen, B. S. Chen, and F. C. Kung, "Memoryless stabilization of uncertain dynamic delay systems : Riccati equation approach," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 36, pp. 638-640, 1991.
[20] E. Cheres, S. Gutman, and Z. J. Palmor, "Stabilization of uncertain dynamic systems including time-varying state-delay," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol 34, pp. 1199-1203, 1989.
[21] J. Chen, "On computing the maximal delay intervals for stability of linear delay systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 40, pp. 1087-1093, 1995.
[22] S. I. Niculescu, C. E. de Souza, J. M. Dion, and L. Dugard, "Robust stability and stabilization of uncertain linear systems with state delay : single delay case," *Proc. IFAC Symposium on Robust Control Design.*, Rio de Janeiro, Brazil, Sep. 1994.
[23] T. J Su and C G. Huang, "Robust stability of delay dependence for linear uncertain systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol 37, pp. 1656-1659, 1992.
[24] X. Li and C. E. de Souza, "Criteria for robust stability and stabilization of uncertain linear systems with state delay," *Automatica*, vol. 33, pp. 1657-1662, 1997.
[25] 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.
[26] J. W. Wu and K. S. Hong, "Delay-independent stability criterion for time-varying discrete delay systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 39, pp. 811-814, 1994.

송 성 호

1987년 서울대 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(1991), 동대학 박사(1995). 1996년-1998년 한림대학교 전자공학부 전임강사, 1998년-현재 한림대학교 전자공학부 조교수. 관심분야는 견실 제어 및 응용, 시간 지연 시스템,비선형 제어, 통신망 흐름 제어.

박 섭 형

1984년 서울대 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(1986), 동대학 박사(1990). 1990년-1992년 생산기술연구원 HDTV 개발사업단 선임연구원, 1992년-1998년 한국통신 통신망연구소 선임연구원(팀장). 1998년-현재 한림대학교 전자공학부 부교수. 관심분야는 신호처리, 네트워크 트래픽 제어, 멀티미디어 통신, 음성 및 영상 신호 처리.

이 봉 영

1982년 고려대학교 물리학과 졸업, 1989년 일본 오사카대학 전기공학분야 물리계 석사, 동대학원 박사(1992), 1984년-1985년 삼성정밀연구소 연구원, 1992년-현재 한국통신 통신망연구소 선임연구원(실장), 관심분야는 광통신 기술, 통신망 기술.