2013년 7월 전자공학회 논문지 제 50 권 제 7 호
Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea Vol. 50, NO. 7, July 2013 http://dx.doi.org/10.5573/ieek.2013.50.7.239

논문 2013-50-7-29

시간지연을 갖는 비선형 시스템의 출력 피드백 제어

(Output Feedback Control for Nonlinear System with Time Delay)

이 성 렬*

(Sungryul Lee©)

요 약

본 논문에서는 입력에 시간 지연이 존재하는 삼각구조의 비선형시스템에 대한 출력 피드백 제어방법을 제안한다. 제안한 제어기는 고이득 관측기와 선형제어기로 구성한다. Lyapunov-Krasovskii 정리를 이용하여 점근적 안정도를 보장하는 입력지연의 크기를 유도한다. 마지막으로 제안한 결과의 유효성을 증명하기 위하여 모의실험 예제를 제공한다.

Abstract

This paper presents the output feedback control design for triangular nonlinear systems with input delay. The proposed controller is composed of a high gain observer and a linear controller. It is shown that by using Lyapunov-Krasovskii theorem, the proposed controller ensures an asymptotic stability for sufficiently small input delay. Finally, an illustrative example is given in order to show the effectiveness of our design method.

Keywords : 입력지연, 비선형시스템, 삼각구조

Ⅰ. 서 론

시간 지연 시스템은 최근에 가장 많이 연구되고 있는 분야중의 하나이다. 시간 지연은 시스템 고유의 특성으로 인하여 발생하기도 하지만 시스템과 제어기가 통신 네트웍으로 연결된 상황에서 필연적으로 발생한다. 따라서, 시간지연은 시스템 방정식이나 시스템의 입력과 출력에서 모두 나타날 수 있다. 이러한 시간지연은 시스템을 불안정하게 만드는 요인이 되므로 이를 보상하는 기술이 매우 중요하다.

시간 지연 시스템의 안정화에 관한 대부분의 연구는 Lyapunov-Krasovskii 정리와 Razumikhin 정리에 기반한다.[1] 최근에는 기존의 상태피드백 제어기 설계문제를 불확실성이 존재하는 시간지연 시스템의 강인제어기 설계 또는 출력 피드백 제어기 설계문제로 확장하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Y. He는 [2]에서 시스템에 불확실성이 존재하는 시변지연을 갖는 시스템에 대하여 강인 제어기를 제안하였다. 또한, [3]에서는 새로운 Lyapunov functional을 제안하여 개선된 설계방법을 제안하였다. H. Gao는 시변 지연을 갖는 이산 시간시스템에 대하여 기존의 연구를 확장한 결과를 제안하였다.[4] [5, 6]에서는 시변 지연을 갖는 시스템에 대하여 정적 및 동적 출력 피드백 제어기를 설계방법을 제시하였다. [7]에서는 미지의 입력지연을 갖는 체인형 적분기 시스템에 대하여 적응제어기를 제안하였다. [8]에서는 시변 입력지연을 갖는 시스템으로 [7]의 결과를 확장하였다. [9]에서는 입력지연을 갖는 피드포워드 비선형시스템의 안정화 문제를 다루었다. [10]에서는 [9]보다 비선형성이 강한 비선형 시스템에 대한 안정화제어기를 제안하였다. [11]에서는 입력지연을 편미분방정식으로 변환하는 방법을 제안하여 백스테핑 기법을 이용하여 안정도를 증명하였다. [12]에서는 매우 특수한 형태의 비선형항을 갖는 시스템에 대하여 백스테핑기법을 이용한 설계방법을 제안하였다. [13]에

* 정회원, 군산대학교 제어로봇공학과
(Dept. of Control & Robotics Eng., Kunsan National University)
© Corresponding Author (E-mail: 2sungryul@kunsan.ac.kr)
접수일자: 2013년3월6일, 수정완료일: 2013년6월25일

서는 피드백선형화 가능한 시스템에 대하여 저이득 형태의 제어기를 제안하고 reduction method와 Razumikhin 정리를 이용하여 안정도를 증명하였다.

본 논문에서는 기존의 연구에서 다루어지지 않은 입력지연이 존재하는 삼각구조를 갖는 비선형시스템의 출력 피드백 안정화 문제를 다룬다. 본 논문에서 제안한 제어기는 고이득 관측기 기반의 선형 제어기이다. Lyapunov-Krasovskii 정리를 이용하여 점근적 안정도를 만족시키는 입력지연의 범위가 존재함을 증명한다. 마지막으로 모의 실험예제를 제공한다.

Ⅱ. 문제 정의

본 논문에서는 다음과 같은 입력지연을 갖는 비선형 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t-\Delta(t)) + \Phi(x(t), u(t-\Delta(t))) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m, y(t) \in R^p$는 각각 시스템의 상태벡터, 시스템의 입력, 시스템의 출력을 나타낸다. A, B, C 는 다음과 같은 상수 행렬이다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, C = (1\, 0 \cdots 0) \tag{2}$$

$\Phi : R^n \times R^m \rightarrow R^n$은 식 (3)과 같은 비선형벡터함수이고 $\Delta(t) > 0$는 알려진 시간 지연값이다.

$$\Phi(x(t), u(t-\Delta(t))) = \begin{pmatrix} \phi_1(x(t), u(t-\Delta(t))) \\ \phi_2(x(t), u(t-\Delta(t))) \\ \vdots \\ \phi_n(x(t), u(t-\Delta(t))) \end{pmatrix} \tag{3}$$

다음에서 본 논문의 주요결과를 증명하는 데 필요한 가정을 소개한다.

가정1: 모든 $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m$와 모든 $1 \le i \le n$에 대하여 다음 식을 만족시키는 상수 $c > 0$ 가 항상 존재한다.

$$|\phi_i(x, u)| \le c(|x_1| + |x_2| + \cdots + |x_i|) \tag{4}$$

가정2: 모든 t에 대하여 다음 식 (5)를 만족시키는 상수 $\overline{\Delta} > 0$ 가 항상 존재한다.

$$0 \le \Delta(t) \le \overline{\Delta} \tag{5}$$

식 (4)를 만족시는 시스템을 삼각구조 비선형시스템이라고 부른다. 시스템 (1)에 대하여 다음과 같은 출력 피드백 제어기를 고려한다.

$$\begin{aligned} u(t) &= K_\theta \hat{x}(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L_\theta(y(t) - C\hat{x}(t)) \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, 행렬 K_θ, L_θ은 식 (7)과 같은 제어기의 이득행렬이고 $\theta \ge 1, l_i, k_i$는 나중에 결정될 설계변수이다.

$$\begin{aligned} K_\theta &= \left(\theta^n k_1\, \theta^{n-1} k_2 \cdots \theta k_n\right) \\ L_\theta &= \left(\theta l_1\, \theta^2 l_2 \cdots \theta^n l_n\right)^T \end{aligned} \tag{7}$$

$\Delta(t) = 0$인 경우 충분히 큰 θ에 대하여 제어기 (6)이 시스템 (1)을 점근적으로 안정화 시킬 수 있음이 알려져 있다. 본 논문의 목표는 시간지연이 존재하는 경우 가정1,2를 이용하여 제어기 (6)이 시스템 (1)을 점근적으로 안정화 시킬 수 있음을 증명하는 것이다.

Ⅲ. 주요 결과

본 장에서는 제어기 (6)이 시스템 (1)을 안정화 시킬 충분조건을 유도하겠다.

정리: 시스템 (1)이 가정1,2를 만족시킨다고 하자. 모든 $\Delta(t) \in [0, \Delta^*]$에 대하여 제어기 (6)이 시스템 (1)을 점근적으로 안정화시키는 상수 $\Delta^* > 0$가 항상 존재한다.

증명: 식 (6)를 고려하면 식 (1)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + BK_\theta \hat{x}(t-\Delta(t)) \\ &\quad + \Phi(x(t), u(t-\Delta(t))) \end{aligned} \tag{8}$$

다음 식 (9)를 이용하면 식 (8)은 식 (10)처럼 된다.

$$\hat{x}(t) = \hat{x}(t-\Delta(t)) + \int_{t-\Delta(t)}^{t} \dot{\hat{x}}(s)\,ds \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = &\ Ax(t) + BK_\theta \hat{x}(t) - BK_\theta \int_{t-\Delta(t)}^{t} \dot{\hat{x}}(s)\,ds \\ &+ \Phi(x(t), u(t-\Delta(t))) \end{aligned} \tag{10}$$

비슷하게 식 (6)을 고려하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t)+BK_\theta \hat{x}(t)+L_\theta C(x(t)-\hat{x}(t)) \\ &= (A-L_\theta C+BK_\theta)\hat{x}(t)+L_\theta Cx(t)\end{aligned} \quad (11)$$

한편, 다음과 같은 좌표변환을 고려해보자.

$$\begin{aligned}&z(t)=\Theta x(t) \\ &\hat{z}(t)=\Theta \hat{x}(t) \\ &\Theta = diag\left(\frac{1}{\theta},\cdots,\frac{1}{\theta^n}\right)\end{aligned} \quad (12)$$

좌표변환 (12)를 이용하면 식 (10)은 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= \Theta(Ax(t)+BK_\theta\hat{x}(t) \\ &\quad -BK_\theta\int_{t-\Delta(t)}^{t}\dot{\hat{x}}(s)ds+\Phi(x(t),u(t-\Delta(t)))) \\ &= \Theta A\Theta^{-1}z(t)+\Theta BK_\theta\Theta^{-1}\hat{z}(t) \\ &\quad -\Theta BK_\theta\Theta^{-1}\int_{t-\Delta(t)}^{t}\dot{\hat{z}}(s)ds \\ &\quad +\Theta\Phi(x(t),u(t-\Delta(t))) \\ &= \theta Az(t)+\theta BK\hat{z}(t)-\theta BK\int_{t-\Delta(t)}^{t}\dot{\hat{z}}(s)ds \\ &\quad +\Theta\Phi(x(t),u(t-\Delta(t)))\end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)을 얻기 위해 다음과 같은 관계식을 이용하였다.

$$\begin{aligned}&\Theta A\Theta^{-1}=\theta A \\ &\Theta BK_\theta\Theta^{-1}=\theta BK \\ &K=\left(k_1\, k_2 \cdots k_n\right)\end{aligned} \quad (14)$$

같은 식으로 식 (11)은 다음처럼 변환된다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{z}}(t) &= \Theta((A-L_\theta C+BK_\theta)\hat{x}(t)+L_\theta Cx(t)) \\ &= \Theta(A-L_\theta C+BK_\theta)\Theta^{-1}\hat{z}(t)+\Theta L_\theta C\Theta^{-1}z(t) \\ &= \theta(A-LC+BK)\hat{z}(t)+\theta LCz(t)\end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)를 얻기 위해 다음과 같은 관계식을 이용하였다.

$$\begin{aligned}&\Theta L_\theta C\Theta^{-1}=\theta LC \\ &L=\left(l_1\, l_2 \cdots l_n\right)^T\end{aligned} \quad (16)$$

식 (13),(15)를 간단하게 표현하기 위하여 다음과 같은 벡터를 정의하자.

$$Z(t)=\begin{pmatrix} z(t) \\ \hat{z}(t)\end{pmatrix} \quad (17)$$

식 (17)을 이용하면 식 (13),(15)는 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{Z}(t)=\theta\overline{A}Z(t)+\theta\overline{\Phi_1}+\overline{\Phi_2} \quad (18)$$

위 식에서 각 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&\overline{A}=\begin{pmatrix} A & BK \\ LC & A-LC+BK\end{pmatrix} \\ &\overline{\Phi_1}=\begin{pmatrix} -BK\int_{t-\Delta(t)}^{t}\dot{\hat{z}}(s)ds \\ 0\end{pmatrix} \\ &\overline{\Phi_2}=\begin{pmatrix}\Theta\Phi(x(t),u(t-\Delta(t))) \\ 0\end{pmatrix}\end{aligned} \quad (19)$$

여기서 K,L은 행렬 $A+BK, A-LC$가 각각 Hurwitz 하도록 선정한다. 선정된 행렬 K,L과 모든 $\mu>0$에 대하여 다음 식 (20)을 만족시키는 행렬 $P=P^T>0$이 항상 존재함을 증명할 수 있다.[14]

$$\overline{A}^TP+P\overline{A}=-\mu I \quad (20)$$

식 (18)의 안정도 해석을 위하여 다음과 같은 Lyapunov-Krasovskii functional을 고려하자.

$$V(t)=Z^T(t)PZ(t)+\int_{-\overline{\Delta}}^{0}\int_{t+\beta}^{t}\|\dot{\hat{z}}(\alpha)\|^2 d\alpha d\beta \quad (21)$$

식 (20)을 이용하면 식 (21)의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= \theta Z^T(t)(\overline{A}^TP+P\overline{A})Z(t)+2Z^T(t)P\theta\overline{\Phi_1} \\ &\quad +2Z^T(t)P\overline{\Phi_2}+\overline{\Delta}\|\dot{\hat{z}}(t)\|^2-\int_{t-\overline{\Delta}}^{t}\|\dot{\hat{z}}(\alpha)\|^2 d\alpha \\ &= -\mu\theta Z^T(t)Z(t)+2\theta Z^T(t)P\overline{\Phi_1}+2Z^T(t)P\overline{\Phi_2} \\ &\quad +\overline{\Delta}\|\dot{\hat{z}}(t)\|^2-\int_{t-\overline{\Delta}}^{t}\|\dot{\hat{z}}(\alpha)\|^2 d\alpha\end{aligned} \quad (22)$$

Young과 Jensen의 부등식을 이용하여 식 (22)의 우변의 두 번째 항을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&2\theta Z^T(t)P\overline{\Phi_1} \\ &\le \frac{\mu\theta}{2}\|Z(t)\|^2+\frac{2\theta}{\mu}\|P\overline{\Phi_1}\|^2 \\ &\le \frac{\mu\theta}{2}\|Z(t)\|^2+\frac{2\theta}{\mu}\|P\|^2\|\overline{\Phi_1}\|^2 \\ &\le \frac{\mu\theta}{2}\|Z(t)\|^2+\frac{2\theta}{\mu}\|P\|^2\|BK\|^2\left\|\int_{t-\Delta(t)}^{t}\dot{\hat{z}}(s)ds\right\|^2 \\ &\le \frac{\mu\theta}{2}\|Z(t)\|^2+\overline{\Delta}\frac{2\theta}{\mu}\lambda_M^2(P)\|K\|^2\int_{t-\overline{\Delta}}^{t}\|\dot{\hat{z}}(s)\|^2 ds\end{aligned} \quad (23)$$

위 식에서 $\lambda_M(P)$는 행렬 P의 최대고유값을 나타낸다. 한편, 식 (4)를 이용하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned}\left|\frac{1}{\theta^i}\phi_i(x,u)\right| &\le \frac{c}{\theta^i}(|x_1|+\cdots+|x_i|) \\ &\le c\left(\left|\frac{x_1}{\theta^i}\right|+\cdots+\left|\frac{x_i}{\theta^i}\right|\right) \\ &\le c\left(\left|\frac{x_1}{\theta}\right|+\cdots+\left|\frac{x_i}{\theta^i}\right|\right) \\ &\le c(|z_1|+\cdots+|z_i|) \\ &\le c\sqrt{n}\,\|z\|\end{aligned} \quad (24)$$

또한, 식 (3), (24)을 이용하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\| \Theta\Phi(x(t),u(t-\Delta(t))) \| &\le \sqrt{c^2 n \| z(t) \|^2 n} \\ &\le cn \| Z(t) \|\end{aligned} \tag{25}$$

식 (25)를 이용하면 식 (22)의 세 번째 항은 다음과 같이 정리된다.

$$\| 2Z^T(t)P\overline{\Phi_2} \| \le 2cn\lambda_M(P) \| Z(t) \|^2 \tag{26}$$

마지막으로 식 (15)를 이용하면 식 (22)의 네 번째 항은 다음처럼 정리된다.

$$\begin{aligned}\overline{\Delta} \| \dot{\hat{z}}(t) \|^2 &\le 3\theta^2\overline{\Delta} \| A-LC+BK \|^2 \| \hat{z}(t) \|^2 \\ &\quad +3\theta^2\overline{\Delta} \| LC \|^2 \| z(t) \|^2 \\ &\le (3\theta^2\overline{\Delta} \| A-LC+BK \|^2 \\ &\quad +3\theta^2\overline{\Delta} \| L \|^2) \| Z(t) \|^2\end{aligned} \tag{27}$$

식 (23),(26),(27)을 이용하면 식 (22)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) \le & \left(-\frac{\mu\theta}{2}+2cn\lambda_M(P)+3\theta^2\overline{\Delta} \| A-LC+BK \|^2\right. \\ & \left. +3\theta^2\overline{\Delta} \| L \|^2\right) \| Z(t) \|^2 \\ & +\left(\overline{\Delta}\frac{2\theta}{\mu}\lambda_M^2(P) \| K \|^2-1\right)\int_{t-\overline{\Delta}}^{t} \| \dot{\hat{z}}(\alpha) \|^2 d\alpha\end{aligned} \tag{28}$$

여기서 $\overline{\Delta}=\frac{\mu}{\theta^2}$으로 정의하고 $\dot{V}(t)<0$을 만족시킬 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&-\frac{\mu\theta}{2}+2cn\lambda_M(P)+3\mu \| A-LC+BK \|^2+3\mu \| L \|^2<0 \\ &\frac{2}{\theta}\lambda_M^2(P) \| K \|^2-1<0\end{aligned} \tag{29}$$

θ가 충분히 크다면 식 (29)을 항상 만족시킨다. 식 (29)을 만족시키는 θ의 최소값을 θ^*으로 정의하고 $\Delta^*=\mu/\theta^{*2}$으로 설정하면 모든 $\Delta(t)\in[0,\Delta^*]$에 대하여 식 (6)은 식 (1)을 점근적으로 안정화시킨다.

■

θ^*가 증가하면 Δ^*의 값은 감소한다. 따라서 제어기 (6)은 충분히 작은 시간 지연값에 대하여 시스템 (1)을 안정화 시킬 수 있다.

Ⅳ. 모의 실험

이번 장에서는 본 논문에서 제안한 설계 방법의 유효성을 증명하기 위하여 모의 실험 결과를 제시한다. 모의 실험을 위하여 다음과 같은 시스템을 고려해보자

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t)+Bu(t-\Delta(t))+\begin{pmatrix} x_1(t)\sin x_2^2(t) \\ x_1^{2/3}(t)x_2^{1/3}(t)\end{pmatrix} \\ y(t) &= Cx(t) \\ x(t) &= (x_1(t)\ x_2(t))^T\end{aligned} \tag{30}$$

시스템 (30)의 비선형항이 가정1을 만족시킴은 [15]에서 보여졌다. 이때, $c=1$이다.

$$\begin{aligned}&|x_1(t)\sin x_2^2(t)| \le |x_1(t)| \\ &|x_1^{2/3}(t)x_2^{1/3}(t)| \le |x_1(t)|+|x_2(t)|\end{aligned} \tag{31}$$

K, L, θ, Δ은 다음처럼 설정한다.

$$K=(-1\ -2), L=(2\ 1)^T, \theta=3, \Delta(t)=0.2\sin t \tag{32}$$

또한, 초기값은 각각 다음처럼 사용하였다.

$$x(0)=(0.5\ 0.2)^T, \hat{x}(0)=(-0.5\ -0.2)^T \tag{33}$$

그림 1, 2는 시스템과 제어기의 상태변수 그래프를 각

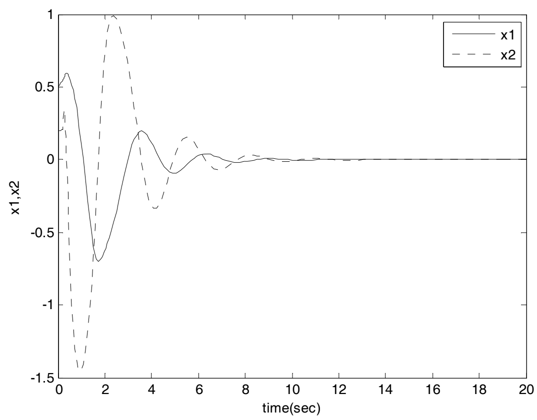

그림 1. 시스템의 상태변수 x(t)의 그래프
Fig. 1. The graph of system state x(t)

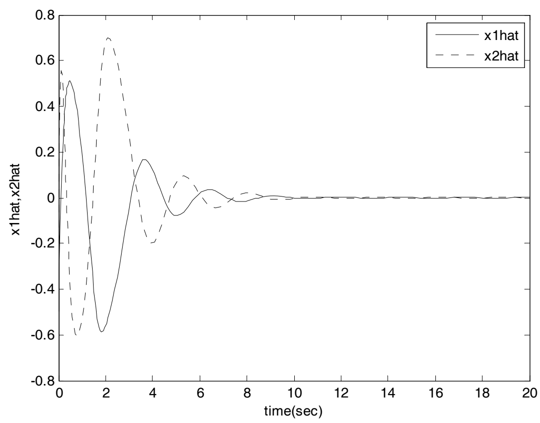

그림 2. 제어기의 상태변수 $\hat{x}$(t)의 그래프
Fig. 2. The graph of controller state $\hat{x}$(t)

각 나타낸다. 모두 점근적으로 안정함을 볼 수 있다. 사실, 식 (29)을 통하여 Δ^*를 계산하면 매우 작은 값이 나온다. 이것은 식 (29)의 한계값이 과도하게 크게 추정되었음을 의미한다. 실험적으로 Δ^*를 구하면 $\Delta^* = 0.2$이다.

V. 결 론

본 논문에서는 입력에 시간 지연이 존재하는 삼각구조의 비선형시스템에 대한 출력 피드백 제어방법을 제안하였다. 제안한 제어기는 고이득 관측기와 선형제어기로 구성된다. Lyapunov-Krasovskii 정리를 이용하여 점근적 안정도를 보장하는 입력지연의 크기를 유도하였다. 마지막으로 모의실험 예제를 통하여 제안한 제어기의 유효성을 입증하였다.

REFERENCES

[1] K. Gu, V. Kharitonov, and J. Chen, "Stability of Time-Delay Systems", Birkhauser, Boston, 2003.
[2] Y. He, M. Wu, J. She and G. Liu, "Parameter - Dependent Lyapunov Functional for Stability of Time-Delay Systems With Polytopic-type Uncertainties," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 49, no. 5, pp. 828-832, May, 2004.
[3] Y. He, Q.Wang, L.Xie, and C.Lin, "Futher Improvement of Free-Weighting Matrices Technique for Systems With Time-Varying Delay," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 52, no. 2, pp. 293-299, Feb., 2007.
[4] H.Gao and T.Chen, "New Results on Stability of Discrete-Time Systems With Time-Varying State Delay," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 52, no. 2, pp. 328-334, Feb., 2007.
[5] H.Gao, J.Lam, C.Wang, and Y. Wang, "Delay-dependent output-feedback stabilization of discrete-time systems with time-varying state delay," IEE Proc. Control Theory Appl., vol. 151, no. 6, pp. 691-698, Nov., 2004.
[6] Y.He, M.Wu, G.Liu, and J. She, "Output Feedback Stabilization for a Discrete-Time Systems With Time-Varying Delay," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 53, no. 10, pp. 2372-2377, Nov., 2008.
[7] H.-L. Choi and J.-T. Lim, "Stabilization of a chain of integrators with an unknown delay in the input by adaptive output feedback." IEEE Transactions on Automatic Control, 51(8):1359 - 1363, 2006.
[8] H.-L. Choi and J.-T. Lim. "Output feedback regulation of a chain of integrators with an unknown time-varying delay in the input.", IEEE Transactions on Automatic Control, 55(1):263 - 268, 2010.
[9] F. Mazenc, S. Mondie, and R. Francisco, "Global asymptotic stabilization of feedforward systems with delay in the input.", IEEE Transactions on Automatic Control, 49(5): 844~850, 2004.
[10] F. Mazenc, P.-A. Bliman, "Backstepping design for time-delay nonlinear systems," IEEE Trans. Automat. Control 51 (2006) 149~154.
[11] M. Mrstic, "On Compensating Long Actuator Delays in Nonlinear Control", IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 53, no. 7, pp.1684-1688, Aug., 2008.
[12] F. Mazenc, P.-A. Bliman, "Backstepping design for time-delay nonlinear systems," IEEE Trans. Automat. Control 51 (2006) 149~154.
[13] H.L. Choi, and J.T. Lim, "Asymptotic Stabilization of an input-delayed chain of integrators with nonlinearity", Systems & Control Letters, vol. 59, pp.374-379, 2010.
[14] Haibo Du, Chunjiang Qian, Shihua Li and Michael T. Frye, "Global Output Feedback Stabilization of a Class of Upper-triangular Systems with Input Delay", Proceeding of American Control Conference, June 27-29, 2012
[15] C. Qian and W. Lin, "Output feedback control of a class of nonlinear systems: a nonseparation principle paradigm", IEEE Trans. Automat. Control, 47(10):1710 - 1715, 2002.

저 자 소 개

이 성 렬(정회원)-교신저자
2003년 연세대학교 전기전자공학과 박사졸업.
2003년~2006년 삼성전자 책임연구원
2007년~현재 군산대학교 제어로봇공학과 부교수
<주관심분야 : 비선형제어이론 및 응용>