논문번호 13-01-13 Journal of IKEEE.Vol.17,No.1,083～088,March 2013
http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2013.17.1.083

시간지연을 갖는 피드포워드 비선형시스템의 출력 피드백 제어

Output Feedback Control for Feedforward Nonlinear Systems with Time Delay

이 성 렬*

Sungryul Lee*

Abstract

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

요 약

본 논문에서는 입력과 출력에 동시에 시간 지연이 존재하는 피드포워드 비선형시스템에 대한 출력 피드백 제어 방법을 제안한다. 제안한 출력 피드백 제어기는 선형관측기와 선형제어기로 구성된다. Lyapunov-Krasovskii 정리를 이용하여 임의의 크기를 갖는 시간지연에 대하여 전역적 점근 안정도를 보장함을 증명한다. 마지막으로 제안한 결과의 유효성을 증명하기 위하여 모의실험 예제를 제공한다.

Key words : output feedback, feedforward systems, time delay, nonlinear systems, Lyapunov-Krasovskii

Ⅰ. 서론

시간 지연 시스템은 최근에 가장 많이 연구되고 있는 분야중의 하나이다. 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 시변 지연을 갖는 선형시스템에 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 선형시스템에 대하여 정적 및 동적 출력 피드백 제어기를 설계방법을 제시하였다. [7]에서는 미지의 입력지연을 갖는 체인형 적분

* Dept. of Control and Robotics Engineering, Kunsan National University
Tel: 063-469-4687, Email : 2sungryul@kunsan.ac.kr
※ This paper was supported by research funds of Kunsan National University
Manuscript received Mar. 13, 2013; revised Mar. 25,2013 ; accepted Mar. 25. 2013

기 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 입력지연을 갖는 피드백형태의 비선형시스템에 대한 안정화제어기를 제안하였다. [11]에서는 입력지연을 편미분방정식으로 변환하는 방법을 제안하여 백스테핑 기법을 이용하여 안정도를 증명하였다. [12]에서는 피드백선형화 가능한 시스템에 대하여 저이득 형태의 제어기를 제안하고 reduction method와 Razumikhin 정리를 이용하여 안정도를 증명하였다.

본 논문에서는 기존의 연구에서 다루어지지 않은 입력과 출력에 동시에 시간지연이 존재하는 피드포워드 비선형시스템의 출력 피드백 안정화 문제를 다룬다. 시간지연이 존재함에도 불구하고 피드포워드 시스템이 갖는 구조적 특징으로 인하여 선형구조를 갖는 관측기 기반의 출력피드백 제어기가 시스템을 안정화시킬 수 있음을 보인다. 또한, Lyapunov-Krasovskii 정리를 이용하여 제안한 제어기가 시간지연의 존재에도 불구하고 점근적 안정도를 보장함을 증명한다. 마지막으로 모의 실험예제를 제공한다.

II. 문제정의

본 논문에서는 다음과 같은 입력 및 출력 시간지연을 갖는 비선형 시스템을 고려한다.

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

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.

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

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

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

다음에서 본 논문의 주요결과를 증명하는 데 필요한 가정을 소개한다.

가정 : 모든 $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m$ 와 모든 $1 \le i \le n-2$에 대하여 다음 식을 만족시키는 상수 $c > 0$ 가 항상 존재한다.

$$\begin{aligned} &|\phi_i(x,u)| \le c(|x_{i+2}| + \cdots + |x_n|) \\ &\phi_{n-1}(x,u) = \phi_n(x,u) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} u(t) &= K_\theta \hat{x}(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L_\theta(y(t) - C\hat{x}(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 행렬 K_θ, L_θ은 식 (6)과 같은 구조를 갖는 제어기의 이득행렬이고 θ, l_i, k_i는 나중에 결정될 설계변수이다.

$$\begin{aligned} &K_\theta = \left(\frac{k_1}{\theta^n}\ \frac{k_2}{\theta^{n-1}} \cdots \frac{k_n}{\theta}\right), L_\theta = \left(\frac{l_1}{\theta}\ \frac{l_2}{\theta^2} \cdots \frac{l_n}{\theta^n}\right)^T \\ &K = (k_1\, k_2 \cdots k_n), L = (l_1\, l_2 \cdots l_n)^T \end{aligned} \quad (6)$$

$\Delta = 0$인 경우 충분히 큰 θ에 대하여 제어기 (5)가 시스템 (1)을 점근적으로 안정화 시킬 수 있음이 알려져 있다.[13] 본 논문의 목표는 입력과 출력에 시간지연이 존재하는 경우에도 제어기 (5)가 시스템 (1)을 점근적으로 안정화 시킬 수 있음을 증명하는 것이다.

III. 주요 결과

본 장에서는 제어기 (5)가 시스템 (1)을 안정화 시킬 충분조건을 유도하겠다.

정리: 시스템 (1)이 가정을 만족한다고 하자. 행렬 $A+BK, A-LC$가 각각 Hurwitz 하도록 행렬 K,L를 선택하면 모든 시간지연 $\Delta > 0$에 대하여 제어기 (5)가 시스템 (1)을 점근적으로 안정화시키는 상수 $\theta \ge 1$가 항상 존재
한다.

증명: 먼저 다음 식이 항상 성립한다.

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t-\Delta) + \int_{t-\Delta}^{t} \dot{x}(s)ds \\ \hat{x}(t) &= \hat{x}(t-\Delta) + \int_{t-\Delta}^{t} \dot{\hat{x}}(s)ds \end{aligned} \quad (7)$$

식 (5)를 고려하면 식 (1)은 다음과 같다.

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

식 (7)을 이용하면 식 (8)은 다음처럼 된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BK_\theta \hat{x}(t) - BK_\theta \int_{t-\Delta}^{t} \dot{\hat{x}}(s)ds + \Phi(x(t),u(t)) \quad (9)$$

비슷하게 식 (5)와 (7)을 고려하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + BK_\theta \hat{x}(t) + L_\theta C(x(t-\Delta) - \hat{x}(t)) \\ &= (A - L_\theta C + BK_\theta)\hat{x}(t) + L_\theta Cx(t) \\ &\quad - L_\theta C \int_{t-\Delta}^{t} \dot{x}(s)ds\end{aligned} \quad (10)$$

한편, 다음과 같은 좌표변환을 고려해보자.

$$\begin{aligned} z(t) &= \Theta x(t) \\ \hat{z}(t) &= \Theta \hat{x}(t) \\ \Theta &= diag(\theta, \cdots, \theta^n)\end{aligned} \quad (11)$$

좌표변환 (11)를 이용하면 식 (9)은 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= \Theta(Ax(t) + BK_\theta \hat{x}(t) \\ &\quad - BK_\theta \int_{t-\Delta}^{t} \dot{\hat{x}}(s)ds + \Phi(x(t),u(t))) \\ &= \Theta A \Theta^{-1} z(t) + \Theta BK_\theta \Theta^{-1} \hat{z}(t) \\ &\quad - \Theta BK_\theta \Theta^{-1} \int_{t-\Delta}^{t} \dot{\hat{z}}(s)ds + \Theta\Phi(x(t),u(t)) \\ &= \frac{1}{\theta}Az(t) + \frac{1}{\theta}BK\hat{z}(t) - \frac{1}{\theta}BK \int_{t-\Delta}^{t} \dot{\hat{z}}(s)ds \\ &\quad + \Theta\Phi(x(t),u(t))\end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)를 얻기 위해 다음과 같은 관계식을 이용하였다.[13]

$$\Theta A \Theta^{-1} = \frac{1}{\theta}A \quad (13)$$
$$\Theta BK_\theta \Theta^{-1} = \frac{1}{\theta}BK$$

같은 식으로 식 (10)는 다음처럼 변환된다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{z}}(t) &= \Theta((A - L_\theta C + BK_\theta)\hat{x}(t) + L_\theta Cx(t)) \\ &\quad - \Theta L_\theta C \int_{t-\Delta}^{t} \dot{x}(s)ds \\ &= \Theta(A - L_\theta C + BK_\theta)\Theta^{-1}\hat{z}(t) + \Theta L_\theta C \Theta^{-1} z(t) \\ &\quad - \Theta L_\theta C \Theta^{-1} \int_{t-\Delta}^{t} \dot{z}(s)ds \\ &= \frac{1}{\theta}(A - LC + BK)\hat{z}(t) + \frac{1}{\theta}LCz(t) \\ &\quad - \frac{1}{\theta}LC \int_{t-\Delta}^{t} \dot{z}(s)ds\end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)를 얻기 위해 다음과 같은 관계식을 이용하였다.

$$\Theta L_\theta C \Theta^{-1} = \frac{1}{\theta}LC \quad (15)$$

식 (12),(14)를 간단하게 표현하기 위하여 다음과 같은 벡터를 정의하자.

$$Z(t) = \begin{pmatrix} z(t) \\ \hat{z}(t) \end{pmatrix} \quad (16)$$

식 (16)을 이용하면 식 (12),(14)는 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{Z}(t) = \frac{1}{\theta}\overline{A}Z(t) - \frac{1}{\theta}\overline{B}\int_{t-\Delta}^{t} \dot{Z}(s)ds + \overline{\Phi} \quad (17)$$

위식에서 각 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\overline{A} &= \begin{pmatrix} A & BK \\ LC & A - LC + BK \end{pmatrix} \\ \overline{B} &= \begin{pmatrix} 0 & BK \\ LC & 0 \end{pmatrix} \\ \overline{\Phi} &= \begin{pmatrix} \Theta\Phi(x(t),u(t)) \\ 0 \end{pmatrix}\end{aligned} \quad (18)$$

여기서 행렬 $A+BK, A-LC$가 각각 Hurwitz하도록 선정된 행렬 K, L과 모든 $\mu > 0$에 대하여 다음 식 (19)를 만족시키는 행렬 $P = P^T > 0$이 항상 존재함을 증명하는 것은 어렵지 않다.

$$\overline{A}^T P + P\overline{A} = -\mu I \quad (19)$$

식 (17)의 안정도 해석을 위하여 다음과 같은 Lyapunov-Krasovskii functional을 고려하자.

$$V(t) = Z^T(t)PZ(t) + \int_{-\Delta}^{0}\int_{t+\beta}^{t} \| \dot{Z}(\alpha) \|^2 d\alpha d\beta \quad (20)$$

식 (19)를 이용하면 식 (20)의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) =& \frac{1}{\theta}Z^T(t)(\overline{A}^TP+P\overline{A})Z(t)\\ &-\frac{2}{\theta}Z^T(t)P\overline{B}\int_{t-\Delta}^{t}\dot{Z}(s)ds\\ &+2Z^T(t)P\overline{\Phi}+\Delta\|\dot{Z}(t)\|^2-\int_{t-\Delta}^{t}\|\dot{Z}(\alpha)\|^2d\alpha\\ =& -\frac{\mu}{\theta}Z^T(t)Z(t)-\frac{2}{\theta}Z^T(t)P\overline{B}\int_{t-\Delta}^{t}\dot{Z}(s)ds\\ &+2Z^T(t)P\overline{\Phi}+\Delta\|\dot{Z}(t)\|^2-\int_{t-\Delta}^{t}\|\dot{Z}(\alpha)\|^2d\alpha\end{aligned} \tag{21}$$

Young과 Jensen의 부등식을 이용하여 식 (21)의 우변의 두 번째 항을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&-\frac{2}{\theta}Z^T(t)P\overline{B}\int_{t-\Delta}^{t}\dot{Z}(s)ds\\ &\le \frac{\mu}{2\theta}\|Z(t)\|^2+\frac{2}{\mu\theta}\|P\|^2\|\overline{B}\|^2\left\|\int_{t-\Delta}^{t}\dot{Z}(s)ds\right\|^2\\ &\le \frac{\mu}{2\theta}\|Z(t)\|^2+\frac{2}{\mu\theta}\lambda_M^2(P)\|\overline{B}\|^2\left\|\int_{t-\Delta}^{t}\dot{Z}(s)ds\right\|^2\\ &\le \frac{\mu}{2\theta}\|Z(t)\|^2+\frac{2\Delta}{\mu\theta}\lambda_M^2(P)\|\overline{B}\|^2\int_{t-\Delta}^{t}\|\dot{Z}(s)\|^2ds\end{aligned} \tag{22}$$

위 식에서 $\lambda_M(P)$는 행렬 P의 최대고유값을 나타낸다. 한편, 식 (4)를 이용하고 $\theta \ge 1$으로 선택하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned}|\theta^i\phi_i(x,u)| &\le \theta^i c(|x_{i+2}|+\cdots+|x_n|)\\ &= c(|\theta^i x_{i+2}|+\cdots+|\theta^i x_n|)\\ &= \frac{c}{\theta^2}(|\theta^{i+2}x_{i+2}|+\cdots+|\theta^{i+2}x_n|)\\ &\le \frac{c}{\theta^2}(|\theta^{i+2}x_{i+2}|+\cdots+|\theta^{n}x_n|)\\ &= \frac{c}{\theta^2}(|z_{i+2}|+\cdots+|z_n|)\\ &\le \frac{c}{\theta^2}\sqrt{n}\,\|Z(t)\|\end{aligned} \tag{23}$$

또한, 식 (3), (23)을 이용하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\|\Theta\Phi(x(t),u(t)\| &\le \sqrt{\left(\frac{c}{\theta^2}\right)^2 n\|Z(t)\|^2 n}\\ &= \frac{cn}{\theta^2}\|Z(t)\|\end{aligned} \tag{24}$$

식 (24)을 이용하면 식 (21)의 세 번째 항은 다음과 같이 정리된다.

$$\|2Z^T(t)P\overline{\Phi}\| \le \frac{2cn}{\theta^2}\lambda_M(P)\|Z(t)\|^2 \tag{25}$$

마지막으로 식 (14)를 이용하면 식 (21)의 네 번째 항은 다음처럼 정리된다.

$$\begin{aligned}\Delta\|\dot{\hat{z}}(t)\|^2 \le& \frac{3\Delta}{\theta^2}\|A-LC+BK\|^2\|\hat{z}(t)\|^2\\ &+\frac{3\Delta}{\theta^2}\|LC\|^2\|z(t)\|^2\\ &+\frac{3\Delta}{\theta^2}\|LC\|^2\left\|\int_{t-\Delta}^{t}\dot{z}(s)ds\right\|^2\\ \le& \frac{3\Delta}{\theta^2}(\|A-LC+BK\|^2\\ &+\|L\|^2)\|Z(t)\|^2\\ &+\frac{3\Delta^2}{\theta^2}\|L\|^2\int_{t-\Delta}^{t}\|\dot{Z}(s)\|^2ds\end{aligned} \tag{26}$$

식 (22),(25),(26)을 이용하면 식 (21)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) \le& \left(-\frac{\mu}{2\theta}+\frac{3cn}{\theta^2}\lambda_M(P)+\frac{3\Delta}{\theta^2}\|A-LC+BK\|^2\right.\\ &\left.+\frac{3\Delta}{\theta^2}\|L\|^2\right)\|Z(t)\|^2\\ &+\left(\frac{2\Delta}{\mu\theta}\lambda_M^2(P)\|\overline{B}\|^2+\frac{2\Delta^2}{\theta^2}\|L\|^2-1\right)\\ &\bullet\int_{t-\Delta}^{t}\|\dot{Z}(\alpha)\|^2d\alpha\end{aligned} \tag{27}$$

여기서 $\dot{V}(t) < 0$을 만족시킬 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&\left(-\frac{\mu}{2\theta}+\frac{3cn}{\theta^2}\lambda_M(P)+\frac{3\Delta}{\theta^2}(\|A-LC+BK\|^2+\|L\|^2)\right)\\ &<0\\ &\left(\frac{2\Delta}{\mu\theta}\lambda_M^2(P)\|\overline{B}\|^2+\frac{2\Delta^2}{\theta^2}\|L\|^2-1\right)<0\end{aligned} \tag{28}$$

$\theta \ge 1$을 만족시키면서 θ를 충분히 크게 선택하면 모든 $\Delta > 0$에 대하여 식 (28)를 항상 만족시킨다. 따라서 식 (5)는 식 (1)을 점근적으로 안정화시킨다.

Ⅳ. 모의 실험

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

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t-\Delta) + \begin{pmatrix} x_3(t)\sin x_3(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ y(t) &= Cx(t-\Delta) \\ x(t) &= \left(x_1(t)\ x_2(t)\ x_3(t)\right)^T \end{aligned} \tag{29}$$

시스템 (29)의 비선형항이 가정을 만족시킨다. 이때, $c=1$이다. 따라서, 정리에 의하여 식 (29)를 안정화시키는 제어기 (5)가 항상 존재한다. 모의 실험을 위하여 K, L, θ, Δ은 다음처럼 설정한다.

$$K = (-1\ -3\ -3),\ L = (3\ 3\ 1)^T,\ \Delta = 0.5 \tag{30}$$

또한, 초기값은 각각 다음처럼 사용하였다.

$$x(0) = (-0.2\ 0.5\ -0.5)^T,\ \hat{x}(0) = (0\ 0\ 0)^T \tag{31}$$

그림 1,2는 $\theta=5$일 때 시스템과 제어기의 상태변수 그래프를 각각 나타낸다. 모두 점근적으로 안정함을 볼 수 있다. 그림 3,4는 $\theta=1$일 때 식 (28)을 만족하지 못하여 시스템이 발산함을 보여준다. 따라서, 본 논문에서 제안한 제어기가 잘 동작함을 알 수 있다.

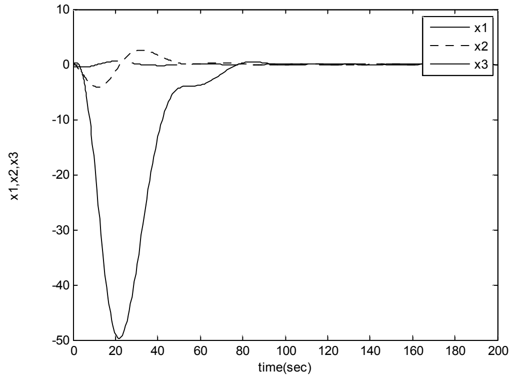

Fig. 1. The graph of system state x(t)

그림 1. 시스템의 상태변수 x(t)의 그래프

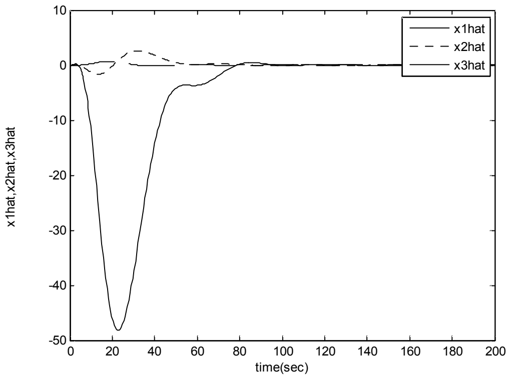

Fig. 2. The graph of controller state $\hat{x}$(t)

그림 2. 제어기의 상태변수 $\hat{x}$(t)의 그래프

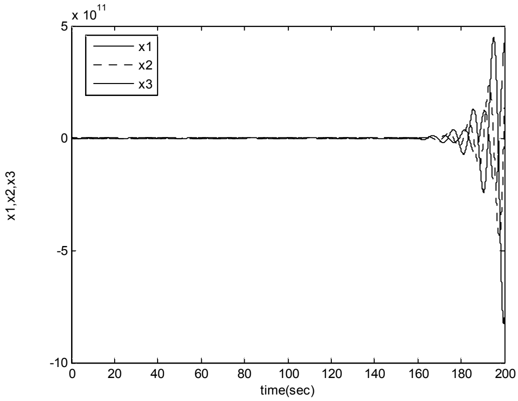

Fig. 3. The graph of system state x(t)

그림 3. 시스템의 상태변수 x(t)의 그래프

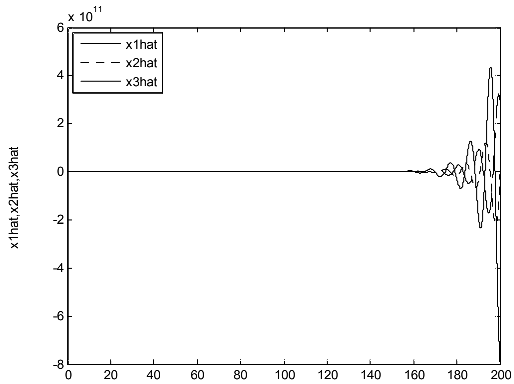

Fig. 4. The graph of system state x(t)

그림 4. 시스템의 상태변수 x(t)의 그래프

V. 결론

본 논문에서는 입력과 출력에 시간 지연이 존재하는 피드포워드 비선형시스템에 대한 출력 피드백 제어방법을 제안하였다. Lyapunov-Krasovskii 정리를 이용하여 제안한 제어기의 전역적 안정도를 증명하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 피드포워드시스템에만 적용이 가능하다. 따라서, 제안한 설계방법을 적용할 수 있는 시스템의 범위를 확장하는 연구가 필요하다.

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] 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.

[13] H.L. Choi, and J.T. Lim, "Global Exponential Stabilization of a Class of Nonlinear Systems by Output Feedback", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 50, no.2, Feb, 2005.

BIOGRAPHY

Lee Sungryul (Member)

1996 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
1998 : MS degree in Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University.
2003 : Ph.D. degree in Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University.
2003~2006 : Research Engineer, Samsung Electronics.
2007~ : Professor, Kunsan National University