한국지능시스템학회 논문지 2009, Vol. 19, No. 2, pp. 185-190

무선 센서 네트워크를 위한 패킷 손실을 포함한 비선형 네트워크 제어 시스템의 관측기 기반 지능 제어기 설계

Observer-based Intelligent Control of Nonlinear Networked Control Systems with Packet Loss for Wireless Sensor Network

나인호 · 김세진 · 주영훈*
In Ho Ra, Se Jin Kim, and Young Hoon Joo

군산대학교 전자정보공학부

요 약

본 논문은 무선 센서 네트워크를 위한 패킷 손실을 포함하는 비선형 네트워크 제어 시스템의 관측기 기반 지능 제어기를 제시한다. 비선형 시스템의 지능 제어를 위해 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델링 기법을 이용하고, 이를 통하여 비선형 네트워크 제어 시스템을 퍼지 모델로 표현한다. 퍼지 모델로 표현된 네트워크 제어 시스템에 대하여 퍼지 관측기를 설계하고, 관측기의 측정치와 실제 시스템의 상태변수 간의 오차를 안정화 시킬 수 있는 출력 궤환 제어기를 설계한다. 제안된 제어기를 포함한 폐루프 시스템의 안정도 조건을 선형 행렬 부등식으로 나타내고, 부등식을 이용하여 제어기의 이득값을 구한다. 모의실험을 통하여 제어기의 효용성을 평가한다.

키워드 : 관측기 기반 출력 궤환 제어, 네트워크 제어 시스템, 패킷 손실, 퍼지 제어

Abstract

In this paper, an observer-based intelligent controller for the nonlinear networked control systems with packet loss is proposed for wireless sensor network. For the intelligent control of the nonlinear system, it uses the fuzzy system with Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model. The observer is designed for the fuzzy networked control system, and the output feedback controller is proposed for the stability of estimates and errors. The stability condition of the closed-loop system with the proposed controller is represented to the linear matrix inequality (LMI) form, and the observer and control gain are obtained by LMI. An example is given to show the verification discussed throughout the paper.

Key Words : wireless sensor network, observer-based control, networked control system, packet loss, fuzzy control

1. 서 론

최근 유비쿼터스 컴퓨팅 시대를 맞이하여 사회는 점차 정보통신 기술의 급속한 발전을 맞이하고 있다. 이에 따라, 네트워크의 중요성도 매우 커지고 있으며 특히 무선 센서 네트워크라는 새로운 정보통신 기술의 필요성이 부각되고 있다. 무선 센서 네트워크는 센서노드들로 구성된 네트워크를 의미하며, 우리가 필요로 하는 환경 정보를 실시간으로 수집하는 것을 목적으로 하는 환경감시, 군사정찰, 생산자동화, 스마트스페이스 구축 등에 사용되고 있다. 이러한 무선 센서 네트워크를 제어하기 위해서는 시간 지연의 문제와 패킷 손실의 문제가 발생하게 된다. 또한 무선 센서 네트워크는 기본적으로 배터리 파워에 의존하기 때문에 에너지 이용 최적화 문제도 발생하게 된다. 이러한 무선 센서 네트워크 및 네트워크 제어 시스템에 나타나는 문제를 해결하면서 더욱 효율적인 제어 기법을 개발하는 것에 대하여 현재 많은 연구가 진행 중에 있다[1-10].

패킷 손실의 문제는 네트워크 제어 시스템에서만 나타나는 문제로 이를 해결하기 위해서는 확률적인 접근이 필요하다. 따라서 기존의 제어 기법으로는 해결하기가 매우 어렵다. 더욱이 비선형성, 불확실성 등의 일반적인 제어 시스템에서 나타나는 문제나 시간 지연, 샘플링 등의 네트워크 제어 시스템에서 나타나는 문제를 포함한 네트워크 제어 시스템의 경우, 패킷 손실 문제를 해결하기는 더욱 어렵다.

많은 연구가들은 패킷 손실을 가지는 네트워크 제어 시스템의 안정화 문제를 해결하기 위해 노력하고 있다[6-10]. Wang[8]은 패킷 손실을 가지는 네트워크 제어 시스템의 강인 제어 기법을 연구하였다. Hu[9]는 패킷 손실을 가지는 네트워크 제어 시스템의 안정화를 연구하였고, 더욱이 PDM(packet dropping margin)의 최적화 문제를 연구하였다. 하지만 이들은 네트워크 제어 시스템에서 나타날 수 있는 비선형성에 대해서는 고려하지 못하였다. Zhang[10]은 패킷 손실을 가지는 비선형 네트워크 제어 시스템에 대한

접수일자 : 2009년 2월 1일
완료일자 : 2009년 4월 5일
* 책임저자
본 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-314-D00347)

퍼지 제어기법을 연구하였다. 하지만 이 논문은 상태변수 궤환 제어 기법을 취하였는데, 이는 시스템의 모든 상태변수를 알아야 하는 제약 조건을 가진다. 특히나 네트워크·제어 시스템에서는 모든 상태변수를 다 아는 것이 거의 불가능하다.

이에 본 논문에서는 패킷 손실을 가지는 비선형 네트워크 제어 시스템에 대한 관측기 기반 지능 제어기 설계를 제안한다. 지능 제어를 위해, Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델링을 통하여 비선형 네트워크 제어 시스템을 퍼지 시스템으로 표현한다. 그리고 퍼지 시스템에 대한 관측기를 설계하고, 측정치와 상태변수 간의 오차를 안정화 시킬 수 있는 출력 궤환 제어기를 설계한다. 폐루프 시스템의 안정화를 위한 선형 행렬 부등식 (LMI) 을 유도하고 이를 통해 관측기와 제어기의 이득값을 구한다. 모의실험을 통하여 설계된 제어기의 성능을 판단하고 관측기 기반 퍼지 출력 궤환 제어기의 성능을 입증한다.

2. 비선형 네트워크 제어 시스템의 퍼지 모델링

그림 1에서 나타난 것과 같은 비선형 네트워크 제어 시스템을 고려해보자. 이를 T-S 퍼지 시스템으로 모델링하기 위한 i번째 퍼지 규칙은 다음과 같이 나타내어진다.

Plant Rule i:

$$IF\ z_1\ is\ \Gamma_1^i, \ldots, \text{and } z_p\ is\ \Gamma_p^i,$$
$$THEN \begin{cases} x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k), \\ y(k) = \alpha(k) C x(k), \end{cases} \quad (1 \le i \le r) \tag{1}$$

여기서 $x(k) \in R^n$는 상태변수, $u(k) \in R^m$는 입력변수, $y(k) \in R^l$는 출력변수를 나타내며, Γ_q^i는 퍼지 집합으로 $q \in I_p = \{1, 2, \ldots, p\}$를 만족하고, r은 퍼지 규칙수를 나타낸다. 또한, A_i, B_i, C는 적절한 크기를 가지는 선형 행렬이고, $\alpha(k)$는 출력 부분의 패킷 손실을 결정하는 확률 변수로서 베르누이 분포를 가지는 다음과 같은 확률을 따르게 된다.

$$\text{Prob}\{\alpha(k) = 1\} = E\{\alpha(k)\} = \hat{\alpha} \tag{2}$$

$$\text{Prob}\{\alpha(k) = 0\} = 1 - E\{\alpha(k)\} = 1 - \hat{\alpha} \tag{3}$$

위의 퍼지 규칙을 통하여 네트워크 제어 시스템을 T-S 퍼지 시스템으로 모델링하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^{r} \theta_i(z(k))(A_i x(k) + B_i u(k))$$
$$y(k) = \alpha(k) C x(k) \tag{4}$$

여기서, $\theta_i(z(k)) = (\prod_{q=1}^{p} \Gamma_q^i(z_q(k))) / \sum_{i=1}^{r}(\prod_{q=1}^{p} \Gamma_q^i(z_q(k)))$이고, $\Gamma_q^i(z_q(k))$는 소속함수의 소속정도를 나타낸다.

제시된 퍼지 네트워크 제어 시스템 (2)의 제어를 위한 관측 기반 제어기는 다음과 같은 규칙을 따르게 된다.

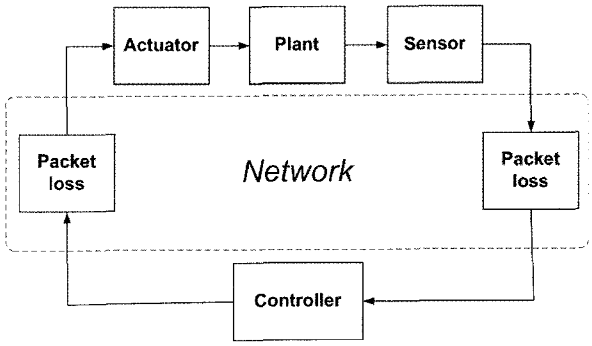


그림 1. 패킷 손실을 포함한 네트워크 제어 시스템

Fig 1. Networked controls ystem with packet loss

Controller Rule i:

$$IF\ z_1\ is\ \Gamma_1^i, \cdots, \text{and } z_p\ is\ \Gamma_p^i,$$
$$THEN \begin{cases} \hat{x}(k+1) = A_i \hat{x}(k) + B_i u(k) + L_i(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{y}(k) = \hat{\alpha} C_i \hat{x}(k) \\ u(k) = \beta(k) K_i \hat{x}(k), \end{cases} \quad (1 \le i \le r) \tag{5}$$

여기서, $\hat{x}(k) \in R^n$는 상태변수의 추정치, $\hat{y}(k) \in R^l$는 출력변수의 추정치를 나타내고,L_i 와 K_i는 각각 관측 이득값과 제어 이득값을 나타내며, $\beta(k)$는 입력의 전송 실패를 결정하는 확률 변수로서 베르누이 분포를 가지는 다음과 같은 확률을 따르게 된다.

$$\text{Prob}\{\beta(k) = 1\} = E\{\beta(k)\} = \hat{\beta} \tag{6}$$

$$\text{Prob}\{\beta(k) = 0\} = 1 - E\{\beta(k)\} = 1 - \hat{\beta} \tag{7}$$

제어기의 퍼지 규칙을 통하여 네트워크 제어 시스템을 안정화시키는 제어기를 다음과 같이 제시한다.

$$\hat{x}(k+1) = \sum_{i=1}^{r} \theta_i(z(k))(A_i \hat{x}(k) + B_i u(k) + L_i(y(k) - \hat{y}(k)))$$
$$u(k) = \sum_{i=1}^{r} \theta_i(z(k)) \beta(k) K_{ij} \hat{x}(k) \tag{8}$$

가정 1 출력 부분의 패킷 손실을 결정하는 확률 변수 $\alpha(k)$와 입력 전송 실패를 결정하는 확률 변수 $\beta(k)$는 서로 독립적(independent)이다. 즉, 다음이 성립하는 것을 가정한다.

$$E\{\alpha(k)\beta(k)\} = E\{\alpha(k)\}E\{\beta(k)\} = \hat{\alpha}\hat{\beta} \tag{9}$$

상태변수와 상태변수 추정치 간의 오차를 고려한다.

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \tag{10}$$

설계된 제어기 (8)을 (4)와 (9)에 대입하면 다음과 같은 폐루프 시스템을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ e(k+1) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} \theta_i(z(k))\theta_j(z(k))(\Phi_{ij} + \epsilon(k)\Lambda_{ij}) \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서,

$$\Phi_{ij}=\begin{bmatrix} A_i+\hat{\beta}B_iK_j & -\hat{\beta}B_iK_j \\ 0 & A_i+\hat{\alpha}L_iC \end{bmatrix},$$
$$\epsilon(k)=\begin{bmatrix} (\beta(k)-\hat{\beta})I & 0 \\ 0 & (\alpha(k)-\hat{\alpha})I \end{bmatrix},$$
$$\Lambda_{ij}=\begin{bmatrix} B_iK_j & -B_iK_j \\ -L_iC & 0 \end{bmatrix}$$

본 논문의 목적은 폐루프 시스템 (10)이 안정화되는 충분조건을 구하고 이를 통해, 이득 행렬 L_i와 K_i를 구하는 것이다. 하지만 이전의 시스템들과는 달리 위의 시스템은 확률 변수를 포함하고 있다. 따라서 일반적인 안정도 조건을 구할 수는 없다.

3. 패킷 손실을 갖는 네트워크 제어 시스템을 위한 관측기 기반 출력 궤환 제어기

이 장에서는 패킷 손실이 있는 비선형 네트워크 제어 시스템의 관측기 기반 퍼지 제어기의 이득값을 구하기 위한 선형 행렬 부등식(LMI)을 유도한다. 그러기 위해서 다음과 같은 안정화 조건을 정의한다.

정의 1 어떠한 상태변수의 초기값 $x(0)\in R^n$에 대해서도 다음의 조건을 반족하면 제어기를 포함한 비선형 네트워크 제어 시스템 (10)은 평균 제곱 관점에서의 안정도 조건이 만족한다고 한다.

$$\lim_{k\to\infty}E\left\{\left\|\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}\right\|^2\right\}=0$$

가정 2 출력행렬에 해당하는 C는 항상 선행계수를 가진다.

위의 정의와 가정을 바탕으로 다음과 같은 Lyapunov 함수를 정의한다.

$$V=\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}\hat{P}\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix} \tag{12}$$

여기서 $\hat{P}$는 양한정 행렬로 다음과 같은 형태로 이뤄진다고 가정한다.

$$\hat{P}=\begin{bmatrix}P & 0\\0 & P\end{bmatrix},\qquad P>0$$

위의 Lyapunov 함수에서 $\hat{P}$가 양한정 행렬이므로 V는 언제나 양수의 값을 가지게 된다. 따라서 만약 V의 변화율이 언제나 음수의 값을 가지게 되면, 네트워크 제어 시스템을 안정화 시키는 안정도 조건을 구할 수 있게 된다. 이를 계산하기 위해서는 다음의 보조 정리가 필요하다.

보조 정리 1 확률 변수 $\alpha(k)$와 $\beta(k)$는 모두 베르누이 분포를 따른다. 따라서 다음이 성립한다.

$$E[\alpha(k)-\hat{\alpha}]=E[\beta(k)-\hat{\beta}]=0$$
$$E[(\alpha(k)-\hat{\alpha})^2]=(1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}$$
$$E[(\beta(k)-\hat{\beta})^2]=(1-\hat{\beta})\hat{\beta}$$

보조 정리 2 [11] 적합한 차원의 어떤 상수 대칭 행렬 N, O, L이 주어졌을 때 다음의 두 개의 부등식은 서로 필요충분조건이 된다.:

$$O>0;\qquad N+L^TOL<0 \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix}N & L^T\\ L & -O^{-1}\end{bmatrix}<0 \text{ or } \begin{bmatrix}-O^{-1} & L\\ L^T & N\end{bmatrix}<0. \tag{14}$$

보조 정리 3 [12] 적합한 차원의 어떤 상수 행렬 X_i, Y가 주어지고, 양한정 행렬 S가 주어졌을 때 다음의 부등식이 성립하게 된다:

$$2\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}h_ih_jh_kh_lX_{ij}^TSY_{kl}$$
$$\le\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}h_ih_j\left(X_{ij}^TSX_{ij}+Y_{ij}^TSY_{ij}\right)$$

여기서, h_i는 $h_i\ge 0$와 $\sum_{i=1}^{r}h_i=1$을 만족한다.

정리 1 만약 다음의 선형 행렬 부등식들과 특정한 조건을

$$\begin{aligned}
\Delta V&=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\theta_i(z(k))\theta_j(z(k))\theta_k(z(k))\theta_l(z(k))\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}^T\\
&\quad\times(E[(\Phi_{ij}+\epsilon(k)\Lambda_{ij})^T\hat{P}(\Phi_{kl}+\epsilon(k)\Lambda_{kl})]-\hat{P})\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}\\
&=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\theta_i(z(k))\theta_j(z(k))\theta_k(z(k))\theta_l(z(k))\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}^T\\
&\quad\times(E[(\Phi_{ij}+\epsilon(k)\Lambda_{ij}+\Phi_{ji}+\epsilon(k)\Lambda_{ji})^T\hat{P}(\Phi_{kl}+\epsilon(k)\Lambda_{kl}+\Phi_{lk}+\epsilon(k)\Lambda_{lk})]-4\hat{P})\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}\\
&\le\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\theta_i(z(k))\theta_j(z(k))\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}^T\\
&\quad\times(E[(\Phi_{ij}+\epsilon(k)\Lambda_{ij}+\Phi_{ji}+\epsilon(k)\Lambda_{ji})^T\hat{P}(\Phi_{ij}+\epsilon(k)\Lambda_{ij}+\Phi_{ji}+\epsilon(k)\Lambda_{ji})]-4\hat{P})\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}\\
&=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\theta_i(z(k))\theta_j(z(k))\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}^T\\
&\quad\times((\Phi_{ij}+\Phi_{ji})^T\hat{P}(\Phi_{ij}+\Phi_{ji})+(\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji})^TE[\epsilon(k)]\hat{P}(\Phi_{ij}+\Phi_{ji})+(\Phi_{ij}+\Phi_{ji})^T\hat{P}E[\epsilon(k)](\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji})\\
&\quad+(\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji})^TE[\epsilon(k)\hat{P}\epsilon(k)](\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji})-4\hat{P})\begin{bmatrix}x(k)\\e(k)\end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{19}$$

만족하는 양한정 행렬 Q 와 어떤 행렬 W_i, N_i가 존재하기 된다면, 관측기 기반 제어기를 가지는 비선형 네트워크 제어 시스템 (10)은 안정하게 된다.

$$\begin{bmatrix} -Q & * & * & * & * & * \\ 0 & -Q & * & * & * & * \\ A_iQ+\hat{\beta}B_iW_i & -\hat{\beta}B_iW_i & -Q & * & * & * \\ 0 & A_iQ+\hat{\alpha}N_iC & 0 & -Q & * & * \\ \sqrt{(1-\hat{\beta})\hat{\beta}}\,B_iW_i & -\sqrt{(1-\hat{\beta})\hat{\beta}}\,B_iW_i & 0 & 0 & -Q & * \\ -\sqrt{(1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}}\,N_iC & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q \end{bmatrix} < 0$$
$$(1 \le i \le r) \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} -4Q & * & * & * & * & * \\ 0 & -4Q & * & * & * & * \\ \Psi_{ij} & -\hat{\beta}\widehat{W}_{ij} & -Q & * & * & * \\ 0 & \Xi_{ij} & 0 & -Q & * & * \\ \sqrt{(1-\hat{\beta})\hat{\beta}}\,\widehat{W}_{ij} & -\sqrt{(1-\hat{\beta})\hat{\beta}}\,\widehat{W}_{ij} & 0 & 0 & -Q & * \\ -\sqrt{(1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}}\,\widehat{N}_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q \end{bmatrix} < 0$$
$$(1 \le i,j \le r \quad \text{그리고} \quad i \ne j) \tag{16}$$

그리고

$$CQ = MC \tag{17}$$

여기서

$$W_i = K_iQ$$
$$N_i = L_iM$$
$$\Psi_{ij} = A_iQ + A_jQ + \hat{\beta}B_iW_j + \hat{\beta}B_jW_i$$
$$\Xi_{ij} = A_iQ + A_jQ + \hat{\alpha}N_iC + \hat{\alpha}N_jC$$
$$\widehat{W}_{ij} = B_iW_j + B_jW_i$$
$$\widehat{N}_{ij} = N_iC + N_jC$$

이고, $*$는 행렬에서의 전칭요소를 의미한다. 관측기 이득값은 다음을 통해 구한다.

$$L_i = N_i\{CQC^T(CC^T)^{-1}\}^{-1} \tag{18}$$

증명) 앞에서 말한 바와 같이 V의 변화율이 언제나 음수의 값을 가지는 조건을 구한다. 확률 변수가 포함된 Lyapunov 함수의 변화율은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta V(k) = E[V(k+1) - V(k) | \chi(k), \epsilon(k)]$$

여기서,

$$\chi(k) = x(k),\ x(k-1),\ \cdots\ x(0)$$
$$\epsilon(k) = e(k),\ e(k-1),\ \cdots\ e(0)$$

위의 Lyapunov 함수의 변화율을 보조 정리를 이용하여 풀면 앞장의 아래에 정리된 부등식 (19)를 얻을 수 있다. 여기서, 보조정리 1을 이용하면 확률 변수의 평균이 다음과 같이 정리된다:

$$E[\epsilon(k)] = 0 \tag{20}$$

$$\begin{aligned} & E[\epsilon(k)\hat{P}\epsilon(k)] \\ &= E\left[\begin{bmatrix} (\beta(k)-\hat{\beta})I & 0 \\ 0 & (\alpha(k)-\hat{\alpha})I \end{bmatrix}\hat{P}\begin{bmatrix} (\beta(k)-\hat{\beta})I & 0 \\ 0 & (\alpha(k)-\hat{\alpha})I \end{bmatrix}\right] \\ &= \begin{bmatrix} E[(\beta(k)-\hat{\beta})^2]P & E[(\beta(k)-\hat{\beta})(\alpha(k)-\hat{\alpha})]P \\ E[(\beta(k)-\hat{\beta})(\alpha(k)-\hat{\alpha})]P & E[(\alpha(k)-\hat{\alpha})^2]P \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} E[(\beta(k)-\hat{\beta})^2]P & E[(\beta(k)-\hat{\beta})]E[(\alpha(k)-\hat{\alpha})]P \\ E[(\beta(k)-\hat{\beta})]E[(\alpha(k)-\hat{\alpha})]P & E[(\alpha(k)-\hat{\alpha})^2]P \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (1-\hat{\beta})\hat{\beta}I & 0 \\ 0 & (1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}I \end{bmatrix}\hat{P} \end{aligned} \tag{21}$$

결국, (20)과 (21)을 이용하여 부등식 (19)를 정리하면, 아래의 (22)와 같이 나타내어진다. 이를 통해, 다음의 두 부등식이 성립하면, 네트워크 제어 시스템이 안정화됨을 알 수 있다.

$$\Phi_{ii}^T\hat{P}\Phi_{ii} + \Lambda_{ii}^T\begin{bmatrix} (1-\hat{\beta})\hat{\beta}I & 0 \\ 0 & (1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}I \end{bmatrix}\hat{P}\Lambda_{ii} - \hat{P} < 0 \tag{23}$$

$$\begin{aligned} & (\Phi_{ij}+\Phi_{ji})^T\hat{P}(\Phi_{ij}+\Phi_{ji}) \\ & + (\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji})^T\begin{bmatrix} (1-\hat{\beta})\hat{\beta}I & 0 \\ 0 & (1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}I \end{bmatrix}\hat{P}(\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji}) - 4\hat{P} < 0 \end{aligned} \tag{24}$$

위의 두 부등식 (23)과 (24)에 보조 정리 2와 합동 치환을 이용하면 정리 1의 선형 행렬 부등식 (15)와 (16)을 얻을 수 있다.

참조 1 비선형 네트워크 제어 시스템에서 출력행렬 C의 경우 역행렬을 가지고 있을 필요는 없다. 하지만, 선행계수는 항상 만족해야 한다. 즉, CC^T의 역행렬은 항상 존재해야 한다.

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

논문에 대한 내용을 검증하기 위해서 다음과 같은 이산

$$\begin{aligned} \Delta V \le\ & \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\theta_i(z(k))\theta_j(z(k))\begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^T \\ & \times((\Phi_{ij}+\Phi_{ji})^T\hat{P}(\Phi_{ij}+\Phi_{ji}) + (\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji})^T\begin{bmatrix} (1-\hat{\beta})\hat{\beta}I & 0 \\ 0 & (1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}I \end{bmatrix}\hat{P}(\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji}) - 4\hat{P})\begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix} \\ =\ & \sum_{i=1}^{r}\theta_i^2(z(k))\begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix}(\Phi_{ii}^T\hat{P}\Phi_{ii} + \Lambda_{ii}^T\begin{bmatrix} (1-\hat{\beta})\hat{\beta}I & 0 \\ 0 & (1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}I \end{bmatrix}\hat{P}\Lambda_{ii} - \hat{P})\begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix} \\ & + \frac{1}{2}\sum_{i<j}^{r}\theta_i(z(k))\theta_j(z(k))\begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^T \\ & \times((\Phi_{ij}+\Phi_{ji})^T\hat{P}(\Phi_{ij}+\Phi_{ji}) + (\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji})^T\begin{bmatrix} (1-\hat{\beta})\hat{\beta}I & 0 \\ 0 & (1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}I \end{bmatrix}\hat{P}(\Lambda_{ij}+\Lambda_{ji}) - 4\hat{P})\begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{22}$$

시간 비선형 네트워크 제어 시스템을 고려한다.

$$x(k+1)=\sum_{i=1}^{2}\theta_i(z(k))(A_i x(k)+B_i u(k))$$
$$y(k)=\alpha(k)Cx(k)$$

여기서, $x=[x_1,\ x_2,\ x_3]^T$이고, 시스템 행렬은 각각 다음과 같이 이루어져 있다.

$$A_1=\begin{bmatrix}0.7 & 0.6 & -0.1\\ 0 & 0.4 & 0.5\\ 0.1 & 0.1 & 0.8\end{bmatrix},\quad A_2=\begin{bmatrix}0.6 & 0.8 & 0\\ -0.1 & 0.5 & 0.4\\ 0 & 0.2 & 0.9\end{bmatrix}$$
$$B_1=\begin{bmatrix}1\\0\\1\end{bmatrix},\quad B_2=\begin{bmatrix}0\\1\\1\end{bmatrix},\quad C=[1\ \ 0\ \ 0]$$

또한, 퍼지 시스템의 소속함수는 다음과 같다.

$$\theta_1(x_1(k))=\exp[-2x_1^2(k)]\ ,\quad \theta_2(x_1(k))=1-\theta_1(x_1(k))$$

이 소속 함수들은 $\theta_i(x_i(k))\ge 0$와 $\theta_1(x_1(k))+\theta_2(x_1(k))=1$의 조건을 만족한다. 이에 대한 관측기 기반 퍼지 출력 궤환 제어기는 다음과 같이 설계된다.

$$\hat{x}(k+1)=\sum_{i=1}^{2}\theta_i(z(k))(A_i\hat{x}(k)+B_i u(k)+L_i(y(k)-\hat{\alpha}C\hat{x}(k))$$
$$u(k)=\sum_{i=1}^{2}\theta_i(z(k))\beta(k)K_{ij}\hat{x}(k)$$

이때, 출력 패킷 잃어버릴 확률과 입력이 실패할 확률 이 모두 0.1이라고 가정한다.

선형 행렬 부등식을 이용하여, 관측기와 제어기의 이득값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_1=[-0.3783\ \ 0.0815\ \ -0.0328]$$
$$K_2=[0.0348\ \ -0.0225\ \ -0.0427]$$
$$L_1=\begin{bmatrix}-0.5627\\-0.2572\\-0.3768\end{bmatrix},\quad L_2=\begin{bmatrix}-0.6144\\-0.0029\\0.0532\end{bmatrix}$$

그림 1, 2, 3은 모의실험의 결과로 시스템의 상태변수를 나타내는 것으로 시스템이 안정화되었다는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 우리는 패킷 손실을 가지는 비선형 네트워크 제어 시스템에 대한 관측기 기반 출력 궤환 제어기의 성능을 알 수 있다.

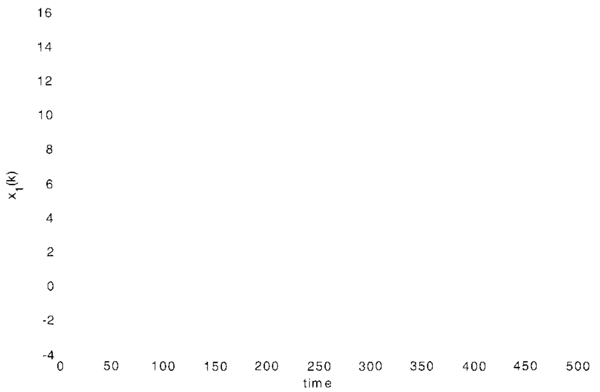


그림 1. 상태변수 x_1

Fig 1. state x_1

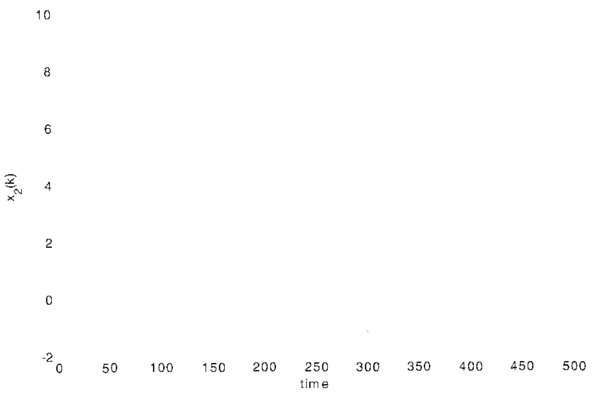


그림 2. 상태변수 x_2

Fig 2. state x_2

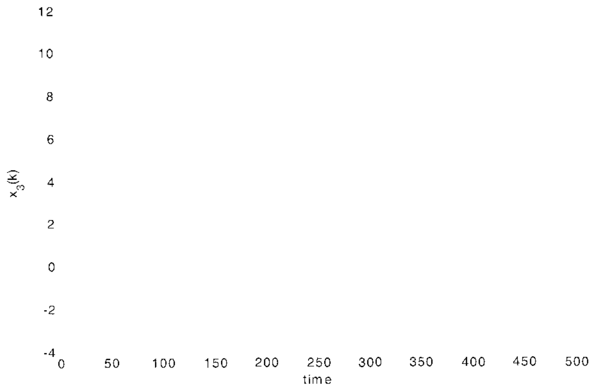


그림 3. 상태변수 x_3

Fig 3. state x_3

5. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위한 패킷 손실을 가지는 비선형 네트워크 제어 시스템의 관측기 기반 퍼지 출력 궤환 제어기를 설계하였다. 네트워크 시스템에서 출력 궤환 제어 기법을 통하여 제어가 가능함을 보였고, 제어기의 설계 문제는 제약 조건이 있는 선형 행렬 부등식을 통하여 해결하였다. 또한, 선형 행렬 부등식의 해가 존재할 경우, 비선형 네트워크 제어 시스템이 안정화됨을 증명하였다. 결국, 관측기 기반 퍼지 출력 궤환 제어기를 이용하여 패킷 손실을 가지는 네트워크 제어 시스템이 제어가 가능함을 보였고, 모의실험을 통하여 그 우수성을 증명하였다.

참 고 문 헌

[1] W. Zhang, M. S. Branicky and S. M. Phillips, "*Stability of networked control systems,*" IEEE Control Systems Magazine, Vol, 21, No. 1, pp. 84-99, 2001.

[2] X. Jia, D. Zhang, L. Zheng and N. Zheng, "*Modeling and stabilization for a class of non-linear networked control systems: a T-S fuzzy*

approach," Progress in Natural Science, Vol. 18, pp. 1031-1037, 2008.

[3] G. C. Walsh, H. Ye and L. G. Bushnell, "*Stability analysis of networked control systems*," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 3, pp. 438-446, 2002.

[4] D. Huang and S. K. Nguang, "*State feedback ontrol of uncertain networked control systems with random time delays*," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 53, No. 3, pp. 829-834, 2008.

[5] L. A. Mongestruque and P. Antsaklis, "*Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times*," IEEE Trans. on Automatic Control., Vol. 49, No. 9, pp. 1562-1572, 2004.

[6] J. Xiong and J. Lam, "*Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss*," Automatica, Vol, 43, pp. 80-87, 2007.

[7] J. Wu and T. Chen, "*Design of networked control systems with packet dropouts*," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 52, No. 7, pp. 1314-1319, 2007.

[8] Z. Wang, F. Yang, D. W. C. Ho and X. Liu, "*Robust H_∞ control for networked systems with random packet losses*," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. 37, No. 4, pp. 916-924, 2007.

[9] S. Hu and W. Y. Yan, "*Stability robustness of networked control systems with respect to packet loss*," Automatica, Vol. 43, pp. 1243-1248, 2007.

[10] X. Zhang, Y. Zheng, H. Tang and G. Lu, "*A stochastic fuzzy system approach to networked control systems with data dropout*," Proceeding of the 25th Chinese Control Conference, pp. 2189-2193, 2006.

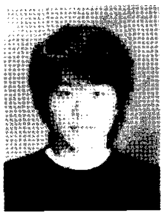
[11] L. Xie, "*Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainties*," Int. J. Contr., Vol. 63, No. 4, pp. 741- 750, 1996.

[12] X. P. Guan and C. L. Chen, "*Delay-dependent guaranteed cost control for T-S fuzzy systems with time delay*," IEEE Tran. on Fuzzy Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 236- 249, 2004.

저 자 소 개

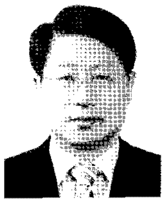
나인호(In Ho Ra)
1988년 : 울산대학교 전자계산학과 졸업.
1991년 : 중앙대 대학원 공학석사.
1995년 : 동 대학교 공학박사.
1995년 ~ 현재 : 군산대학교 전자정보공학부 교수

관심분야 : 멀티미디어 통신, 무선센서네트워크, 유비쿼터스 컴퓨팅, 텔레메틱스 시스템
Phone : 063-469-4697
Fax : 063-466-2086
E-main : ihra@kunsan.ac.kr



김세진(Se Jin Kim)
2008년 : 군산대 전자정보공학부 졸업
2008년 ~ 현재 : 동 대학원 전자정보공학부 석사과정

관심분야 : 지능형 로봇, Vision system, 지능시스템, 신경회로망
Phone : 063-469-4706
E-mail : blessedu@kunsan.ac.kr



주영훈(Young Hoon Joo)

제18권 6호(2008년 12월호) 참조