한국지능시스템학회 논문지 2009, Vol. 19, No. 3, pp. 323-328

무선 센서 네트워크를 위한 비선형 네트워크 제어 시스템의 출력 궤환 분산 퍼지 제어기 설계

Decentralized Fuzzy Output Feedback Control of Nonlinear Networked Control Systems for Wireless Sensor Network

주영훈* · 나인호* · 구근범** · 박진배**

Young Hoon Joo*, In Ho Ra*, Geun Bum Koo**, and Jin Bae Park**

* 군산대학교 전자정보공학부

** 연세대학교 전기전자공학과

요 약

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위한 비선형 네트워크 제어 시스템의 출력 궤환 분산 퍼지 제어기를 설계한다. 특히나, 분산 제어를 위한 네트워크 제어 시스템은 출력의 패킷 손실과 입력 전송 실패를 가진다고 가정한다. 제어기 설계를 위해 먼저 비선형 하위 시스템의 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델을 제시하고, 각 하위 시스템에 대한 출력 궤환 분산 퍼지 제어기를 설계한다. 제안된 제어기를 포함한 폐루프 시스템의 안정도 조건을 Lyapunov 방정식을 통하여 구하고, 구해진 안정도 조건을 선형 행렬 부등식으로 나타내어, 이를 통해 제어기의 이득값을 구한다. 모의실험을 통하여 제어기의 효용성을 평가한다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 출력 궤환 분산 제어, 네트워크 제어 시스템, 패킷 손실, 퍼지 제어

Abstract

In this paper, a decentralized fuzzy output feedback controller for the nonlinear networked control system is proposed for wireless sensor network. Especially, it is assumed that the networked control system has the output packet loss and the input transmission failure. For the fuzzy control of the nonlinear subsystem, it presents Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model of each subsystem and it designs the decentralized fuzzy output feedback controller. The stability condition of the closed-loop system with the proposed controller is obtained by Lyapunov functional. The obtained stability condition is represented to the linear matrix inequality (LMI) form, and the control gain is obtained by LMI. An example is given to show the verification discussed throughout the paper.

Key Words : wireless sensor network, decentralized output feedback control, networked control system, packet loss

1. 서 론

최근 정보 통신 기술과 여러 컴퓨터 장치들의 급속한 발전을 통해 사회는 유비쿼터스 컴퓨팅 시대를 맞이하고 있다. 유비쿼터스 컴퓨팅 시대에 발맞추어, 네트워크의 중요성도 매우 커지고 있으며 특히 실생활 환경을 인간 친화적 형태로 바꾸고자하는 새로운 욕구가 무선 센서 네트워크라는 새로운 정보통신 기술의 필요성으로 나타나고 있다. 무선 센서 네트워크는 센서를 통해 수집한 데이터를 여러 과정을 거쳐 전송하는 독립형태의 장치로 이는 환경에 대한 정보 수집을 목적으로 한다. 이러한 무선 센서 네트워크는 환경감시, 군사정찰, 생산자동화, 스마트스페이스 구축 등에 사용되고 있으며 점차 이용 분야가 늘어나고 있는 추세이다[1-2].

이러한 무선 센서 네트워크를 제어하기 위해서는 시간지연의 문제와 패킷 손실의 문제가 발생할 뿐만 아니라, 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[3-13]. 이중에서 특히나 네트워크 시스템의 패킷 손실 문제는 그 해결 방법이 기존의 결정론적인 제어 이론들로는 해결하기가 매우 어렵다. 따라서 기존의 제어 기법이 아닌 확률론적인 제어 기법의 접근이 필요하다. 더욱이 비선형성, 불확실성 등의 문제를 포함한 네트워크 제어 시스템의 경우, 패킷 손실 문제를 해결하기는 더욱 어렵다.

많은 연구가들은 패킷 손실을 가지는 네트워크 제어 시스템의 안정화 문제의 해결을 위한 연구를 진행하고 있다[4-8]. Wang[6]은 패킷 손실을 가지는 네트워크 제어 시스템의 강인 제어 기법을 연구하였다. Hu[7]는 패킷 손실을

접수일자 : 2009년 4월 6일
완료일자 : 2009년 6월 5일
본 논문은 본 학회 2009년도 춘계학술대회에서 우수논문으로 선정된 논문임.
이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-314-D00347)

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 퍼지 제어기법을 연구하였다. 하지만 무선 센서 네트워크의 경우, 여러 네크워크 제어 시스템이 그물망 같은 상호 결합성을 지니고 있다. 이에 따라, 에너지 측면의 효과적인 제어를 위해서는 분산 제어가 필수적이다. 또한 각 센서들은 독립적인 형태를 취하고 있기 때문에, 각 시스템에 대한 정보는 출력값을 통해서만 얻을 수 있다. 하지만 이러한 분산 제어와 출력 궤환 제어를 고려한 연구는 진행된 것이 없다.

이에 본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위한 비선형 네트워크 제어 시스템의 출력 궤환 분산 퍼지 제어기 설계를 제안한다. 이를 위해 먼저, 각 하위 시스템의 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델을 제시하고, 이에 대한 출력 궤환 분산 제어기를 설계한다. 설계된 제어기를 포함한 폐루프 시스템의 안정도 조건을 Lyapunov 함수를 통해 구하고, 구해진 안정도 조건을 선형 행렬 부등식으로 나타내어, 이를 통해 제어기의 이득값을 구한다. 모의실험을 통하여 설계된 제어기의 성능을 판단하고 출력 궤환 분산 퍼지 제어기의 성능을 입증한다.

2. 비선형 네트워크 제어 시스템의 퍼지 모델링

비선형 상호 결합 네트워크 제어 시스템의 i번째 하위 시스템을 고려해보자. 이를 T-S 퍼지 시스템으로 모델링하기 위한 k번째 퍼지 규칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&\mathit{Plant\ Rule}\ k:\\&\mathit{IF}\ z_{i1}\ \mathit{is}\ \Gamma_{i1}^{k}, \cdots, \text{and}\ z_{ip}\ \mathit{is}\ \Gamma_{ip}^{k},\\&\mathit{THEN}\ \begin{cases}x_i(t+1)=A_{ik}x_i(t)+B_{ik}u_i(t)+\displaystyle\sum_{j=1,j\neq i}^{n}A_{ijk}x_j(t),\\ y_i(t)=\alpha_i(t)C_ix_i(t)\end{cases}\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 Γ_{iq}^{k}는 $q\in I_p=\{1,2,...,p\}$, $i\in I_n=\{1,2,\cdots,n\}$와 $k\in I_r=\{1,2,\cdots,r\}$를 만족하는 퍼지 집합이고, $x_i(t)$, $u_i(t)$, $y_i(t)$는 각각 상태변수, 입력변수, 출력변수를 나타낸다. 또한, A_{ik}, B_{ik}, C_i는 적절한 크기를 가지는 선형 행렬이고, 특히, A_{ijk}는 j번째 하위 시스템과의 상호 결합을 나타내는 선형 행렬이다. $\alpha_i(t)$는 출력 부분의 패킷 손실을 결정하는 확률 변수로서 베르누이 분포를 가지는 다음과 같은 확률을 따르게 된다.

$$\mathrm{Prob}\{\alpha_i(t)=1\}=E\{\alpha_i(t)\}=\widehat{\alpha}_i$$
$$\mathrm{Prob}\{\alpha_i(t)=0\}=1-E\{\alpha_i(t)\}=1-\widehat{\alpha}_i$$

위의 퍼지 규칙을 디퍼지화를 통하여 다음과 같은 T-S 퍼지 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}x_i(t+1)&=\sum_{k=1}^{r}\theta_{ik}(A_{ik}x_i(t)+B_{ik}u_i(t)+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}A_{ijk}x_j(t))\\y_i(t)&=\alpha_i(t)C_ix_i(t)\end{aligned} \tag{2}$$

여기서,

$$\theta_{ik}=\omega_{ik}/\sum_{k=1}^{r}\omega_{ik}, \qquad \omega_{ik}=\prod_{q=1}^{p}\Gamma_{iq}^{k}(z_{iq}(t))$$

이고, $\Gamma_{iq}^{k}(z_{iq}(t))$는 소속함수의 소속정도를 나타낸다.

제시된 퍼지 네트워크 제어 시스템 (2)의 제어를 위해 다음과 같은 출력 궤환 제어기를 고려한다.

$$\begin{aligned}&\mathit{Controller\ Rule}\ k:\\&\mathit{IF}\ z_{i1}\ \mathit{is}\ \Gamma_{i1}^{k}, \cdots, \text{and}\ z_{ip}\ \mathit{is}\ \Gamma_{ip}^{k},\\&\mathit{THEN}\ u_i(t)=\beta_i(t)K_{ik}y_i(t)\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, K_{ik}는 제어 이득값을 나타내며, $\beta_i(t)$는 입력의 전송 실패를 결정하는 확률 변수로서 베르누이 분포를 가지는 다음과 같은 확률을 따르게 된다.

$$\mathrm{Prob}\{\beta_i(t)=1\}=E\{\beta_i(t)\}=\widehat{\beta}_i$$
$$\mathrm{Prob}\{\beta_i(t)=0\}=1-E\{\beta_i(t)\}=1-\widehat{\beta}_i$$

제어기의 퍼지 규칙을 디퍼지화하면 식 (4)와 같다.

$$u_i(t)=\sum_{k=1}^{r}\theta_{ik}\beta_i(t)K_{ik}y_i(t) \tag{4}$$

이 된다. 이를 상호 결합 네트워크 제어 시스템 (2)에 대입하면, 다음의 폐루프 시스템을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}x_i(t+1)=\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\theta_{ik}\theta_{il}((A_{ik}+\alpha_i(t)\beta_i(t)B_{ik}K_{il}C_i)x_i(t)\\+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}A_{ijk}x_j(t))\end{aligned} \tag{5}$$

본 논문의 목적은 폐루프 시스템 (5)의 안정화 충분조건을 구하고 이를 통해, 이득 행렬 K_{ik}를 구하는 것이다. 이를 위해서 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1 i번째 하위 시스템의 출력 부분의 패킷 손실을 결정하는 확률 변수 $\alpha_i(t)$와 입력 전송 실패를 결정하는 확률 변수 $\beta_i(t)$는 서로 독립적(independent)이다. 즉, 다음이 성립하는 것을 가정한다.

$$E\{\alpha_i(t)\beta_i(t)\}=E\{\alpha_i(t)\}E\{\beta_i(t)\}$$

문제 1 폐루프 시스템 (5)를 안정화시키는 제어 이득값 K_{ik}는 다음 조건들을 고려하면서 구해야 한다.

1) 각 하위 폐루프 시스템으로 구성된 전체 시스템이 확률론적으로 안정하다.
2) 구해진 안정도 조건은 선형 행렬 부등식으로 나타낼 수 있다.

3. 패킷 손실을 갖는 네트워크 제어 시스템의 출력 궤환 분산 퍼지 제어기

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

정의 1 만약 다음의 식을 만족하는 어떠한 $\epsilon_i>0$에 대해서

도 $\delta_i = \delta_i(\epsilon_i) > 0$가 존재한다면 i번째 하위 시스템의 평형점 $x_i(t) = 0$는 확률론적으로 안정하다고 한다.

$$\| x_i(0) \| < \delta \quad \Rightarrow \quad E\{ \| x_i(t) \| \} < \epsilon, \qquad \forall t \geq 0$$

가정 2 출력행렬에 해당하는 C_i는 항상 선행계수를 가진다.

비선형 상호 결합 네트워크 제어 시스템의 안정도 조건을 구하기 위해서는 다음의 몇 개의 보조 정리가 필요하다.

보조 정리 1 [14] 만약 다음의 세 가지 조건을 만족하는 Lyapunov 함수 $V(x(t))$와 $a(0) = 0$와 0보다 큰 η에 대해 $a(\eta) > 0$를 만족하는 비감소 볼록(convex) 함수 $a(\eta)$가 존재하면, 평형점 $x(t) = 0$는 확률론적으로 안정화된다.
1) $V(0) = 0$
2) $a(\| x(t) \|) \leq V(x(t))$
3) $E\{V(x(t+1))\} - E\{V(x(t))\} < 0$

보조 정리 2 확률 변수 $\alpha_i(t)$와 $\beta_i(t)$는 모두 베르누이 분포를 따른다. 따라서 다음이 성립한다.

$$E\left[\alpha_i(t) - \hat{\alpha}\right] = E\left[\beta_i(t) - \hat{\beta}\right] = 0$$
$$E\left[\left(\alpha_i(t) - \hat{\alpha}\right)^2\right] = (1-\hat{\alpha})\hat{\alpha}$$
$$E\left[\left(\beta_i(t) - \hat{\beta}\right)^2\right] = (1-\hat{\beta})\hat{\beta}$$

보조 정리 3 [15] 적합한 차원의 어떤 상수 대칭 행렬 N, O, L이 주어졌을 때 다음의 두 개의 부등식은 서로 필요충분조건이 된다.:

$$O > 0, \qquad N + L^T O L < 0$$
$$\begin{bmatrix} N & L^T \\ L & -O^{-1} \end{bmatrix} < 0 \text{ or } \begin{bmatrix} -O^{-1} & L \\ L^T & N \end{bmatrix} < 0.$$

보조 정리 4 [16] 적합한 차원의 어떤 상수 행렬 X_i, Y가주어지고, 양한정 행렬 S가 주어졌을 때 다음의 부등식이 성립하게 된다:

$$2\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r} h_i h_j h_k h_l X_{ij}^T S Y_{kl}$$
$$\leq \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i h_j \left(X_{ij}^T S X_{ij} + Y_{ij}^T S Y_{ij}\right)$$

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

위의 가정들과 보조 정리들을 통하여 다음과 같은 비선형 상호 결합 네트워크 제어 시스템에 대한 안정화 조건을 구할 수 있다.

정리 1 만약 다음의 선형 행렬 부등식들과 특정한 조건을 만족하는 양한정 행렬 Q_i 와 어떤 행렬 F_i가 존재하기 된다면, 출력 궤환 분산 퍼지 제어기가 포함된 비선형 네트워크 제어 시스템 (5)는 확률론적으로 안정하게 된다.

$$\begin{bmatrix}
-\zeta Q_i & * & \cdots & * & * & \cdots & * & * & * \\
0 & -\lambda Q_1 & \cdots & * & * & \cdots & * & * & * \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & \cdots & -\lambda Q_{i-1} & * & * & * & * & * \\
0 & 0 & \cdots & 0 & -\lambda Q_{i+1} & * & * & * & * \\
\vdots & \vdots & \cdots & 0 & 0 & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & -\lambda Q_n & * & * \\
\Lambda_{ikl} & \widetilde{A}_{i1kl} & \cdots & \widetilde{A}_{i(i-1)kl} & \widetilde{A}_{i(i+1)kl} & \cdots & \widetilde{A}_{inkl} & -Q_i & \vdots \\
E_{ikl} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & -Q_i
\end{bmatrix} < 0$$
$$(1 \leq k \leq r,\ 1 \leq i \leq n) \tag{6}$$

그리고

$$C_i Q_i = M_i C_i \tag{7}$$

여기서‘

$$\zeta = 4 - (n-1)\lambda$$
$$F_{ik} = K_{ik} M_i$$
$$\Lambda_{ikl} = A_{ik} Q_i + A_{il} Q_i + \hat{\alpha}_i \hat{\beta}_i B_{ik} F_{il} C_i + \hat{\alpha}_i \hat{\beta}_i B_{il} F_{ik} C_i$$
$$\widetilde{A}_{ijkl} = A_{ijk} Q_j + A_{ijl} Q_j \qquad (1 \leq j \leq n \text{ and } j \neq i)$$
$$E_{ikl} = \sqrt{(1-\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i)\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i}\,(B_{ik} F_{il} C_i + B_{il} F_{ik} C_i)$$

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

$$K_{ik} = F_{ik}\left\{C_i Q_i C_i^T (C_i C_i^T)^{-1}\right\}^{-1}$$

증명) 폐루프 상호 결합 시스템 ()의 안정성을 증명하기 위해 다음과 같은 Lyapunov 방정식을 고려한다.

$$V(x(t)) = \sum_{i=1}^{n} x_i^T(t) P_i x_i(t)$$

여기서, P_i는 양한정 행렬로서, 이를 통해 Lemma 1의 첫 번째와 두 번째 조건이 만족하게 된다. Lamma 1의 세 번째 조건은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E\{V(x(t+1))\} - E\{V(x(t))\}$$
$$= E\left\{\sum_{i=1}^{n} x_i^T(t+1) P_i x_i(t+1)\right\} + E\left\{\sum_{i=1}^{n} x_i^T(t) P_i x_i(t)\right\}$$
$$= E\ \left\{\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\sum_{m=1}^{r}\sum_{n=1}^{r}\theta_{ik}\theta_{il}\theta_{im}\theta_{in}\right.$$
$$\times((\varPhi_{ikl} + \varXi_{ikl}\gamma_i(t))x_i(t)$$
$$+ \sum_{j=1, j\neq i}^{n} (A_{ijk} + A_{ijl}) x_j(t))^T P_i$$
$$\times((\varPhi_{imn} + \varXi_{imn}\gamma_i(t))x_i(t)$$
$$\left. + \sum_{j=1, j\neq i}^{n} (A_{ijm} + A_{ijn}) x_j(t))\right\} - \sum_{i=1}^{n} x_i^T(t) P_i x_i(t)$$

여기서,

$$\varPhi_{ikl} = A_{ik} + A_{il} + B_{ik} K_{il} C_i \hat{\alpha}_i \hat{\beta}_i + B_{il} K_{ik} C_i \hat{\alpha}_i \hat{\beta}_i$$
$$\varXi_{ikl} = B_{ik} K_{il} C_i + B_{il} K_{ik} C_i$$
$$\gamma_i(t) = \alpha_i(t)\beta_i(t) - \hat{\alpha}_i \hat{\beta}_i$$

보조 정리 4를 이용하면, 다음과 같은 부등식을 얻을 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&E\{V(x(t+1))\}-E\{V(x(t))\}\\
&\le E\left\{\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\theta_{ik}\theta_{il}\right.\\
&\quad\times((\Phi_{ikl}+\Xi_{ikl}\gamma_i(t))x_i(t)\\
&\quad+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t))^T P_i\\
&\quad\times((\Phi_{ikl}+\Xi_{ikl}\gamma_i(t))x_i(t)\\
&\quad\left.+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t))\right\}-\sum_{i=1}^{n}x_i^T(t)P_i x_i(t)\\
&=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\theta_{ik}\theta_{il}\\
&\quad\times((\Phi_{ikl}x_i(t)+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t))^T P_i\\
&\quad\times(\Phi_{ikl}x_i(t)+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t))-4x_i^T(t)P_i x_i(t)\\
&\quad+2(\Phi_{ikl}x_i(t)+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t))^T\\
&\quad\times P_i\Xi_{ikl}x_i(t)E\{\gamma_i(t)\}\\
&\quad+x_i^T(t)\Xi_{ikl}^T P_i\Xi_{ikl}x_i(t)E\{\gamma_i^2(t)\})
\end{aligned}
\tag{7}
$$

가정 1과 보조 정리 2를 이용하면, $\gamma_i(t)$와 $\gamma_i^2(t)$의 평균값들은 각각 다음과 같이 구해진다.

$$
\begin{aligned}
&E\{\gamma_i(t)\}=0\\
&E\{\gamma_i^2(t)\}=(1-\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i)\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i
\end{aligned}
$$

위의 두 값들을 식 (7)에 대입하면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
(7)&=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\theta_{ik}\theta_{il}\\
&\quad\times((\Phi_{ikl}x_i(t)+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t))^T P_i\\
&\quad\times(\Phi_{ikl}x_i(t)+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t))\\
&\quad-4x_i^T(t)P_i x_i(t)\\
&\quad+(1-\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i)\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i x_i^T(t)\Xi_{ikl}^T P_i\Xi_{ikl}x_i(t))\\
&=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\theta_{ik}\theta_{il}\\
&\quad\times(x_i^T(t)(\Phi_{ikl}^T P_i\Phi_{ikl}-4P_i\\
&\quad+(1-\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i)\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i\Xi_{ikl}^T P_i\Xi_{ikl})x_i(t)\\
&\quad+2x_i^T(t)\Phi_{ikl}^T P_i\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t)\\
&\quad+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}x_j^T(t)(A_{ijk}+A_{ijl})^T P_i\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(A_{ijk}+A_{ijl})x_j(t)\\
&=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\theta_{ik}\theta_{il}X_i^T\left(\Psi_i+\Omega_{ikl}^T P_i\Omega_{ikl}+\tilde{\Xi}_{ikl}^T P_i\tilde{\Xi}_{ikl}\right)X_i
\end{aligned}
$$

여기서,

$$
\begin{aligned}
X_i^T&=\left[x_i(t)\ \ x_1(t)\ \cdots\ x_{i-1}(t)\ \ x_{i+1}(t)\ \cdots\ x_n(t)\right]\\
\Psi_i&=diag\{-4P_i+\lambda(n-1)P_i\ \ -\lambda P_1\\
&\qquad\cdots\ -\lambda P_{i-1}\ -\lambda P_{i+1}\ \cdots\ -\lambda P_n\}\\
\Omega_{ikl}&=[\Phi_{ikl}\ \ A_{i1k}+A_{i1l}\ \cdots\ A_{i(i-1)k}+A_{i(i-1)l}\\
&\qquad A_{i(i+1)k}+A_{i(i+1)l}\ \cdots\ A_{ink}+A_{inl}\}
\end{aligned}
$$

$$
\tilde{\Xi}_{ikl}=\left[\sqrt{(1-\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i)\hat{\alpha}_i\hat{\beta}_i}\,\Xi_{ikl}\ \ 0\ \cdots\ 0\right]
$$

정리된 식 (19)을 통해, 다음의 부등식이 만족하면 보조 정리 1의 세 번째 조건이 만족함을 알 수 있다.

$$
\Psi_i+\Omega_{ikl}^T P_i\Omega_{ikl}+\tilde{\Xi}_{ikl}^T P_i\tilde{\Xi}_{ikl}<0
$$

부등식 (19)에 보조 정리 3과 다음의 행렬

$$
\tilde{P}_i=diag\left\{P_i^{-1}\ \ P_1^{-1}\ \cdots\ P_{i-1}^{-1}\ \ P_{i+1}^{-1}\ \cdots\ P_n^{-1}\ \ I\ \ I\right\}
$$

을 이용한 합동 치환을 이용하면 정리 1의 선형 행렬 부등식을 얻을 수 있다.

참조 1 비선형 네트워크 제어 시스템에서 출력행렬 C_i의 경우 역행렬을 가지고 있을 필요는 없다. 하지만, 선행계수는 항상 만족해야 한다. 즉, $C_iC_i^T$의 역행렬은 항상 존재해야 한다.

참조 2 정리 1에서 구한 선형 행렬 부등식이 만족하기 위해서는 ζ와 λ 값이 항상 양수여야 한다. 즉, 다음의 두 부등식이 만족되어야한다.

$$
\lambda>0\ ,\quad 4-(n-1)\lambda>0
$$

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

논문에 대한 내용을 검증하기 위해서 다음과 같은 두 개의 하위 시스템을 가지는 이산 시간 비선형 네트워크 제어 시스템을 고려한다.

$$
\begin{aligned}
x_i(t+1)&=\sum_{k=1}^{2}\theta_{ik}(A_{ik}x_i(t)+B_{ik}u_i(t)+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}A_{ijk}x_j(t))\\
y_i(t)&=\alpha_i(t)C_ix_i(t)
\end{aligned}
$$

여기서, $x_i=[x_{i1},\ x_{i2}]^T$이고, 시스템 행렬은 각각 다음과 같이 이루어져 있다.

$$
\begin{aligned}
&A_{11}=\begin{bmatrix}0.9 & 0.3\\ -0.1 & 0.4\end{bmatrix}\ ,\quad A_{12}=\begin{bmatrix}0.6 & 0\\ 0 & 0.7\end{bmatrix}\ ,\\
&A_{21}=\begin{bmatrix}0.8 & 0.2\\ 0 & 0.3\end{bmatrix}\ ,\quad A_{22}=\begin{bmatrix}0.7 & 0.1\\ 0.1 & 0.6\end{bmatrix}\ ,\\
&B_{11}=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}\ ,\ B_{12}=\begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix}\ ,\ B_{21}=\begin{bmatrix}2\\1\end{bmatrix}\ ,\ B_{22}=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}\ ,\\
&C_1=[1\ \ 0]\ ,\quad C_2=[1\ \ 1]\ ,\\
&A_{121}=\begin{bmatrix}0.2 & 0.3\\ 0.2 & 0.1\end{bmatrix}\ ,\quad A_{12}=\begin{bmatrix}0.3 & 0.2\\ 0.2 & 0.1\end{bmatrix}\ ,\\
&A_{211}=\begin{bmatrix}0.1 & 0.2\\ 0.1 & 0\end{bmatrix}\ ,\quad A_{212}=\begin{bmatrix}0.2 & 0.1\\ 0.1 & 0\end{bmatrix}
\end{aligned}
$$

또한, 퍼지 시스템의 소속함수는 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
\theta_{11}(x_{11}(t))&=\exp[-2x_{11}^2(t)]\ ,\\
\theta_{12}(x_{11}(t))&=1-\theta_{11}(x_{11}(t))\ ,\\
\theta_{21}(x_{21}(t))&=\frac{1}{1+\exp[-x_{21}(t)]}\ ,\\
\theta_{22}(x_{21}(t))&=1-\theta_{21}(x_{21}(t))
\end{aligned}
$$

이에 대한 관측기 기반 퍼지 출력 궤환 제어기는 다음과 같이 설계된다.

$$u_i(t) = \sum_{k=1}^{r} \theta_{ik}\beta_i(t)K_{ik}y_i(t)$$

이때, 각 하위 시스템에 대한 출력 패킷 잃어버릴 확률 $\alpha_i(t)$ 과 입력이 실패할 확률 $\beta_i(t)$은 각각 다음과 같다고 가정한다.

$$\mathrm{Prob}\{\alpha_1(t)=0\}=0.2\ ,\quad \mathrm{Prob}\{\alpha_2(t)=0\}=0.3\ ,$$
$$\mathrm{Prob}\{\beta_1(t)=0\}=0.3\ ,\quad \mathrm{Prob}\{\beta_2(t)=0\}=0.4$$

정리 1의 선형 행렬 부등식을 이용하여 제어기의 이득값을 구하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$K_{11}=0.1512\ ,\ K_{12}=-1.6372,$$
$$K_{21}=0.2255\ ,\ K_{22}=-0.5359$$

그림 1, 2은 모의실험의 결과로 시스템의 상태변수를 나타내고 있다. 그래프를 통해서 시스템이 안정화되었다는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 우리는 패킷 손실을 가지는 비선형 네트워크 제어 시스템에 대한 출력 궤환 분산 퍼지 제어기의 성능을 알 수 있다.

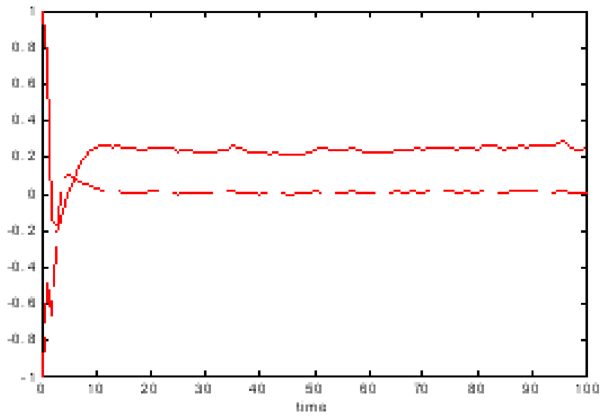

그림 1. 첫 번째 시스템의 상태변수
– x_{11} (실선), x_{12} (점선)
Fig. 1. System states

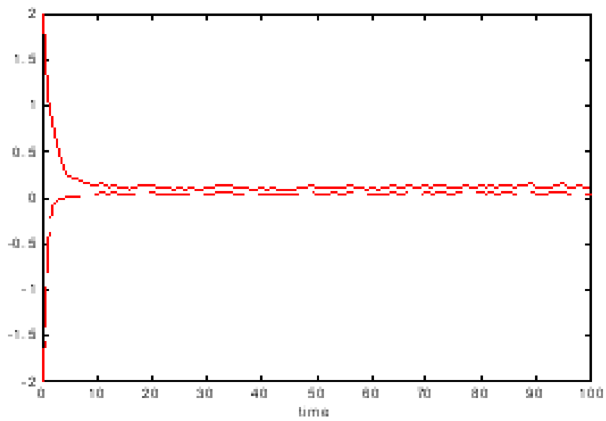

그림 2. 두 번째 하위 시스템의 상태변수
– x_{21} (실선), x_{22} (점선)
Fig. 2. System states

5. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위한 비선형 네트워크 제어 시스템에 대한 출력 궤환 분산 퍼지 제어기를 설계하였다. 네트워크 제어 시스템에서 상호 결합의 문제와 패킷 손실의 문제를 고려하였고, 이를 출력 궤환 분산 제어 기법을 통하여 제어가 가능함을 보였다. 제어기의 설계 문제는 제약 조건이 있는 선형 행렬 부등식을 통하여 해결하였고 선형 행렬 부등식의 해가 존재할 경우, 비선형 네트워크 제어 시스템이 안정화됨을 증명하였다. 결국, 출력 궤환 분산 퍼지 제어기를 이용하여 패킷 손실을 가지는 비선형 네트워크 제어 시스템이 제어가 가능함을 보였고, 모의실험을 통하여 그 우수성을 증명하였다.

참 고 문 헌

[1] L. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communication Magazine*, pp. 102-114, 2002.

[2] D. Culler, "Overview of sensor network," *IEEE Computer Magazine*, pp. 41-49, 2004.

[3] M. Tabbara, D. Nešić and A. R. Teel, "Stability of wireless and wireline networked control system," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol, 52, No. 9, pp. 1615-1630, 2007.

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

[5] 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.

[6] 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.

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

[8] 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.

[9] 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.

[10] X. Jia, D. Zhang, L. Zheng and N. Zheng, "Modeling and stabilization for a class of nonlinear networked control systems: a T-S fuzzy approach," *Progress in Natural Science*, Vol. 18, pp. 1031-1037, 2008.

[11] 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.

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

[13] 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.

[14] B. Chen, Z. Wang, H. Shu and G. Wei, "On non-linear H_∞ filtering for discrete-time stochastic systems with missing measurements," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 53, No. 9, pp. 2170- 2180, 2008.

[15] L. Xie, "Output Feedback H_∞ Control of Systems with Parameter Uncertainties," *Int. J. Contr.*, Vol. 63, No. 4, pp. 741- 750, 1996.

[16] 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

주영훈(Young Hoon Joo)

제19권 제2호(2009년 4월호) 참조

나인호(In Ho Ra)

제19권 제2호(2009년 4월호) 참조

구근범(Geun Bum Koo)

2007년 2월 : 연세대학교 전기전자 공학과 졸업

2009년 6월 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자 공학과 박사 과정

관심분야 : 퍼지 이론, 지능 제어.

Phone : 02-2123-2773

박진배(Jin Bae Park)

제 18권 6호(2008년 12월호) 참조