

전송지연이 큰 NCS 를 위한 자율복원 네트워크 설계

정서빈, 김상준, 박경준
대구경북과학기술원

{jsb9607, sjkim, kjp}@dgist.ac.kr

Design of Resilient Networking for Networked Control Systems with Large Transmission Delays

Seo Bin Jeong, Sangjun Kim, Kyung-Joon Park
Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology (DGIST)

요약

Networked control system (NCS)은 플랜트, 센서, 제어가 네트워크를 통해 폐루프를 이루는 제어시스템이며, 폐루프의 네트워크 전송지연이 커질 경우 플랜트가 불안정해진다. 본 논문에서는 NCS의 네트워크에서 큰 전송지연이 발생한 경우, 플랜트의 안정성을 보장하기 위해 software-defined network (SDN) 기반의 네트워크 복구 기법을 제안하며, 실험을 통해 전송지연이 큰 NCS의 안정성을 보장할 수 있음을 증명한다.

I. 서론

Networked control system (NCS)은 플랜트, 센서, 제어로 구성되며, 네트워크를 통해 폐루프를 이루어 플랜트가 안정적인 동작을 할 수 있도록 제어하는 시스템이다. NCS는 일반적인 제어 시스템과 달리, 네트워크를 통해 피드백 제어를 수행하므로, 제어시스템 구축을 위한 비용이 적고, 유연한 시스템 구성이 가능하다. 이러한 장점으로 자동차 제어, 열차 제어 등 다양한 분야에서 활용되고 있다 [1]. 하지만, 네트워크의 결함 또는 외부의 공격으로 인해 NCS의 네트워크는 제어 정보의 전송지연을 유발하며, 이는 플랜트에 대한 제어성능 저하와 불안정을 초래한다.

본 논문에서는 NCS의 폐루프를 구성하는 네트워크에 플랜트의 불안정을 초래하는 전송지연이 발생하는 경우, 플랜트의 안정성을 보장하는 네트워크 복구 기법을 제시한다. 먼저, 선형 제어 시스템과 full-state feedback 제어를 대상으로 플랜트의 안정성을 보장하는 최대 네트워크 delay bound τ_{max} 를 분석한다. NCS 폐루프 네트워크에 외부요인으로 인한 전송지연 τ_k 가 τ_{max} 를 초과하면 플랜트가 불안정하게 되는데, 이러한 경우 플랜트의 안정성을 보장하기 위해 software-defined network (SDN) 기반의 네트워크 경로 복구를 제안한다.

제안하는 기법의 성능을 확인하기 위해, SDN과 선형 제어시스템 에뮬레이터로 테스트베드 환경을 구성하여 실험을 수행하였다. 실험을 통해 폐루프 네트워크에서 특정 시점에 큰 전송지연이 발생하는 경우, 제안하는 네트워크 복구 기법이 플랜트를 안정성을 보장함을 보인다.

II. NCS 모델 및 안정성 분석

본 논문에서는 그림 1과 같은 NCS model을 고려한다. 그림 1의 구조에서 플랜트는 전송주기 h 마다 모든 상태변수 $x_k \in \mathbb{R}^n$ 를 제어로 전송하고, 제어기는 액추에이터로 제어입력 $u_k \in \mathbb{R}$ 를 전송하는 피드백제어를 수행한다. 네트워크 상의 여러 요인으로 인해 전송지연 τ_k 가 발생하며, τ_k 가 τ_{max} 보다 크면 플랜트가 불안정해진다.

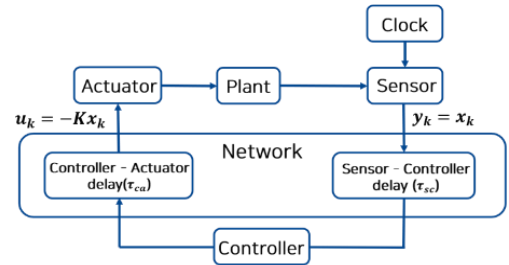


그림 1. Networked control system (NCS) 구조

연속시간 NCS 모델은 (1)과 같고, 전송지연 τ_k 를 고려한 이산시간 NCS 모델과 제어입력 u_k 은 식 (2)를 통해 얻을 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu^*(t) \quad (1)$$

$$u^*(t) = u_k, t \in [kh + \tau_k, (k+1)h + \tau_{k+1}]$$

$$x_{k+1} = e^{Ah}x_k + \int_0^{h-\tau_{k-d+1}} e^{As}dsB u_{k-d+1} + \int_{h-\tau_{k-d+1}}^h e^{As}dsB u_{k-d} \quad (2)$$

$$u_k = -Kx_k$$

과거 제어입력을 고려한 상태변수 ξ_k 와 상태공간 방정식은 식 (3)-(5)과 같이 정의된다.

$$\xi_k = (x_k^T, u_{k-1}^T, u_{k-2}^T, \dots, u_{k-d}^T)^T \quad (3)$$

$$\xi_{k+1} = M(\tau_k)\xi_k + N(\tau_k)u_k \quad (4)$$

$$M(\tau_k) = \begin{pmatrix} e^{A_h} \bar{B}_1 & \dots & \bar{B}_d \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I & 0 \end{pmatrix}, N(\tau_k) = (\bar{B}_0^T, I, 0 \dots 0)$$

$$\bar{B}_\rho(\tau_k) = \int_{h-\tau_k-\rho+1}^{h-\tau_k-\rho} e^{As} ds B \quad (5),$$

$$t_j^k = \min \{ \max\{0, \tau_j - (k-j)h\}, \max\{0, \tau_{j+1} - (k-j-1)h\}, \dots, \max\{0, \tau_{k-d} - dh\} \},$$

$$\rho \in \{0, 1, \dots, \bar{d}\}, j \in \{0, 1, 2, \dots, \bar{d} - \underline{d}\}, \bar{d} = \lceil \frac{\tau_{max}}{h} \rceil, \underline{d} = \lfloor \frac{\tau_{max}}{h} \rfloor$$

또한, 전송지연 $\tau_k \in [0, \tau_{max}]$ 의 범위 내의 유한개의 τ_k 에 대한 안정성 분석을 위해 (6)과 같은 행렬의 집합을 정의한다.

$$H_{FG} = \{ (F_0 + \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^{\bar{d}-\underline{d}} a_i F_{i,j}, G_0 + \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^{\bar{d}-\underline{d}} a_i G_{i,j}) : a_i \in \{ \underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i \} \} \quad (6)$$

$$t_{j,min}^k = \begin{cases} \tau_{min} - \underline{d}h & , j = k - \underline{d} \\ 0 & , j < k - \underline{d} \end{cases}, t_{j,max}^k = \begin{cases} 0 & , j < k - \underline{d} \\ \tau_{max} - (\bar{d} - 1)h & , j = k - \underline{d} \end{cases}$$

$$\bar{\alpha}_i = \max_{t_j^k \in [t_{j,min}^k, t_{j,max}^k]} a_i(t_j^k), \underline{\alpha}_i = \min_{t_j^k \in [t_{j,min}^k, t_{j,max}^k]} a_i(t_j^k), v = \sum_{i=1}^p q_i$$

$a_i, F_0, F_{i,j}, G_0, G_{i,j}$ 는 각각 Jordan form의 eigen value 정보를 통해 구할 수 있다. 여기서 p 는 각 다른 eigen value의 개수, q_i 는 모든 eigen value 중 가장 큰 차원의 크기를 나타낸다. 식 (6)과 같은 유한개의 행렬 집합에서 Lyapunov 선형 행렬 부등식 (7)을 만족하는 정부호행렬 P 가 존재하면, 제어이득 $\bar{K} = [K \ 0_{\bar{d}}]$ 와 τ_k 에 대해 NCS가 안정성을 만족한다 [2].

$$\begin{pmatrix} P & (H_F - H_G \bar{K})^T \\ P(H_F - H_G \bar{K}) & P \end{pmatrix} > 0 \quad (7)$$

III. 실험

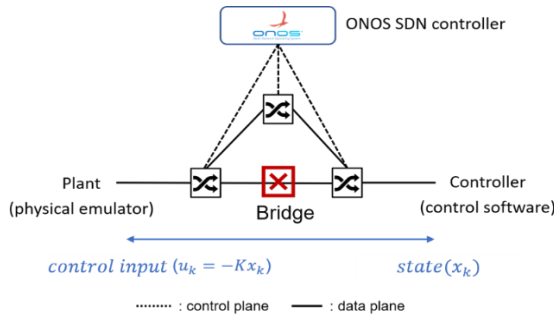


그림 2. 테스트베드 구조

성능을 확인하기 위하여 그림 2와 같은 테스트베드를 구축하였다. 플랜트와 제어를 선형제어 에뮬레이터 [3]로 구현하였으며, 플랜트 (1)는 식(8)과 같은 DC servo motor 시스템을 고려하였다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -41.5769 \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} 0 \\ 384.6154 \end{pmatrix} \quad (8)$$

제어 페루프는 ONOS SDN 컨트롤러와 OpenVswitch 기반의 SDN 스위치로 구성된다. 한 경로에는 전송지연을 발생시키기 위해 NetfilterQueue 기반의 브릿지를 활용하였으며, ICMP 패킷 100개에 대한 round trip time (RTT)은 표 1과 같다.

	Minimum	Maximum
RTT without delay	2.596 ms	4.760 ms
RTT with delay	509.680 ms	511.969 ms

표 1. ICMP 패킷의 round trip time (RTT)

II를 통해 (6)에 대한 안정성 분석으로 $\tau_k < \tau_{max}$ 을 만족하는 $K = [2.5 \ 0.1]$ 를 선택하여 실험을 진행하였다. 이때의 τ_{max} 는 20 ms, 플랜트의 상태변수 전송 주기 h 는 20ms다.

식 (7)에 의해 브릿지에 의한 전송지연이 없는 경우, $\tau_k < \tau_{max}$ 를 만족하여 K 가 플랜트에 실시간으로 반영된다. 따라서, DC servo motor의 angle이 1로 수렴하여 플랜트가 안정하다는 것을 알 수 있다.

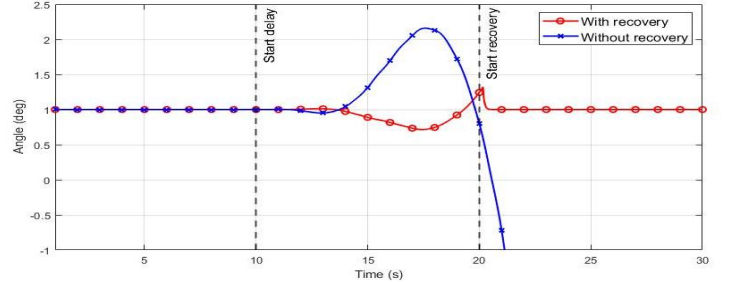


그림 3. 실험 결과

하지만, 그림 3.의 파란색 그래프와 같이 10 초 시점에 전송지연을 발생시키면, $\tau_k > \tau_{max}$ 가 되어 angle이 시간에 따라 발산하게 되고, 플랜트가 불안정하게 된다. 이에 대해 그림 3.의 파란색 그래프와 같이 20 초 지점에서 경로복구를 하면, 전송지연이 없는 경로로 상태변수와 제어입력이 전송되어 $\tau_k < \tau_{max}$ 조건을 만족하게 된다. 따라서, angle이 1로 수렴하고, 플랜트의 안정성이 만족되는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 NCS의 페루프를 구성하는 네트워크에 큰 전송지연이 발생하는 경우, SDN 기반의 네트워크 복구기법을 제안한다. 제안된 기법은 SDN과 선형제어 에뮬레이터를 활용한 실험을 통해, 전송지연에 대한 플랜트의 안정성 보장을 확인한다. 향후, 네트워크 전송 지연 검출 알고리즘을 포함하는 네트워크 자율복원 기법 연구를 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was partly supported by Institute for Information & communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIP) (2014-0-00065, Resilient Cyber-Physical Systems Research).

참고 문헌

- [1] K.-J. Park, J. Kim, H. Lim, and Y. Eun, "Robust path diversity for network quality of service in cyber-physical systems," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, no. 4, pp. 2204-2215, 2014.
- [2] M. B. G. Cloosterman, N. van de Wouw, W. P. M. H. Heemels and H. Nijmeijer, "Stability of networked control systems with large delays," Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, 2007, pp. 5017-5022.
- [3] S. Kim, Y. Eun, and K.-J. Park, "Stealthy sensor attack detection and real-time performance recovery for resilient CPS," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021 (Early Access).