

종속형 퍼지 뉴럴 네트워크를 이용한 네트워크 제어 시스템의 시간 지연 예측

Time Delay Prediction of Networked Control Systems using Cascade Structures of Fuzzy Neural Networks

이 철 균*, 한 창 옥*

Cheol-Gyun Lee*, Chang-Wook Han*

Abstract

In networked control systems, time-varying delay of the transmitting signal is inevitable. If the transmission delay is longer than the fixed sampling time, the system will be unstable. To solve this problem, this paper proposes the method to predict the delay using logic-based fuzzy neural networks, and the predicted time delay will be used as a sampling time in the networked control systems. To verify the effectiveness of the proposed method, the delay data collected from the real system are used to train and test the logic-based fuzzy neural networks.

요 약

네트워크 제어 시스템에서는 송신 신호의 시간 변동 지연이 불가피하다. 전송 지연이 고정된 샘플링 시간보다 길면 시스템이 불안정해진다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문은 논리 기반의 퍼지 신경망을 이용하여 지연을 예측하는 방법을 제안하며, 예측된 시간 지연은 네트워크 제어 시스템의 샘플링 시간으로 사용된다. 제안된 방법의 효과를 검증하기 위해, 실제 시스템에서 수집된 지연 데이터를 사용하여 논리 기반 퍼지 신경 네트워크를 훈련하고 테스트한다.

Key words : networked control systems, fuzzy logic, neural networks, genetic algorithm, time delay prediction

1. 서론

최근에 많은 센서와 액추에이터로 인해 제어 시스템이 복잡해지고 있다. 포인트-투-포인트 시스템에서 필요한 와이어 수는 센서 및 액추에이터 수에 비례하여 증가한다. 이 문제로 인해 네트워크 제어 시스템(Networked Control Systems: NCS)이

제어 영역에서 널리 사용되고 있다[1-2].

NCS는 피드백 제어 시스템으로 설계되어 있다. 즉, 제어 루프는 실시간 네트워크를 통해 닫힌다. NCS에서 네트워크로 인한 지연은 필연적으로 발생하며 시스템의 동적 성능을 저하시킨다. 따라서 NCS의 주요 설계 문제 중 하나는 전송 지연이다[2]. [3]에서는 profibus-DP를 사용하여 NCS를 위한

* Dept. of Electrical Engineering, Dong-Eui University

★ Corresponding author

E-mail : cwihan@deu.ac.kr, Tel : +82-51-890-1665

※ Acknowledgment

This work was supported by Dong-Eui University Grant.(201902280001)

Manuscript received Sep. 8, 2019; revised Sep. 16, 2019; accepted Sep. 24, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

원격 퍼지 로직 컨트롤러를 기반으로 단일 입력 단일 출력 시스템을 설계하였다. [4]에서는 다양한 유형의 네트워크 유도 지연 및 데이터 패킷 손실을 갖는 NCS를 모델링하기 위해 T-S 퍼지 모델을 사용하였다. 센서/액추에이터 결합을 검출하기 위해 패리티 함수 및 퍼지 읍저버 기반 접근법이 사용되었다.

NCS에서 샘플링 시간은 일정하게 고정된다. 이는 시변 네트워크 유도 지연에 대해서는 바람직하지 않다. 지연을 예측할 수 있으면 샘플링 시간으로 사용할 수 있다. 많은 연구자들이 컴퓨터 지능 기반의 NCS를 고려하고 있지만 시변 샘플링 시간 예측은 거의 고려되고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 로직 기반의 퍼지 뉴럴 네트워크를 이용하여 NCS의 샘플링 시간을 예측하기 위한 방법을 제안한다. 실제 시스템에서 수집 한 네트워크 유도 지연 데이터를 사용하여 모델을 학습하고 테스트 하였다.

II. 본론

1. 네트워크 제어 시스템

NCS는 네트워크가 있는 분산 제어 시스템이다. NCS는 네트워크를 제어하는 것이 아니라 네트워크를 통한 제어이다. 짧고 빈번한 패킷의 실시간 전송은 통신 데이터 네트워크와 NCS의 차이점이다. 그림 1은 NCS의 개요를 보여준다. 그림 1에 나타난 바와 같이 유무선 통신 매체는 제어기와 센서(액추에이터) 사이에 존재한다.

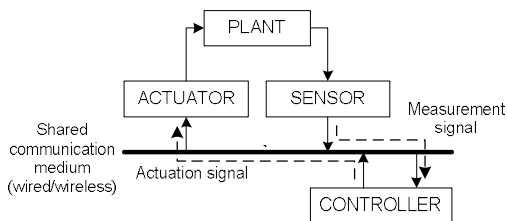


Fig. 1. Basic structure of the NCS.

그림 1. NCS의 기본 구조

NCS의 장점은 유선, 저비용, 저중량, 저전력, 손쉬운 유지 보수 등이다. 그러나 네트워크 매체의 공유로 인해 NCS에는 시변 지연이 존재한다. 이 지연을 네트워크 유발 지연이라고 한다. 이 네트워크 유발 지연은 메시지 전송 시간과 오버 헤드 시

간에 따라 크게 다르다. 매체를 통한 전송 시간은 네트워크 프로토콜에 크게 의존한다. 따라서 네트워크 스케줄링 방법이라 불리는 방법을 사용하여 NCS 성능의 저하 없이 네트워크 지연을 감소시킬 필요가 있다.

NCS에서는 시스템 안정성을 보장하면서 샘플링 시간 내에 샘플링 된 데이터를 전송하는 것이 중요하다. 대부분의 제어 시스템에서는 짧은 샘플링 주기가 바람직하지만 NCS의 샘플링 주기는 시스템 성능 저하에도 불구하고 시스템 안정성을 보장하는 범위까지 확장 될 수 있다. 이 샘플링 주기를 최대 허용 지연 한계라고 한다. 따라서 NCS의 안정성을 보장하는 최대 허용 지연 한계 및 최대 허용 지연 한계 내에서 네트워크 유발 지연을 제한하는 스케줄링 방법을 찾아야 한다.

2. 시변 샘플링 주기를 가지는 NCS[5]

NCS에서 고정 샘플링 주기 모델에는 다음과 같은 문제점이 있다.

- 실제 시스템의 시간 지연은 시간에 따라 다르며 규칙이 없다. NCS 모델링에서 적절한 샘플링 주기를 선택하는 것은 매우 어렵다.
- NCS의 시간 지연 부분은 제어 성능을 크게 저하시킨다.
- 시간 지연을 보상하기 위해 보상 제어 기술이 필요하며, 또한 네트워크 유발 지연을 고려한 특수 제어기를 설계해야 한다.

이러한 문제를 극복하기 위해 본 논문에서는 시변 샘플링주기(각 샘플링 단계마다 다른 샘플링 주기를 고려한다. 시간 지연을 샘플링 주기로 설정하는 것이 합리적이다.

새로운 시변 샘플링 주기 모델을 개발하기 위해서는 다음과 같은 가정을 고려해야 한다(그림 2 참조).

- NCS는 기본적으로 플랜트, 액추에이터, 제어기, 센서 및 통신 네트워크로 구성된다.
- 액추에이터는 플랜트와 제어기 모두에 직접 연결된다.
- 제어기-액추에이터, 액추에이터-플랜트 사이에는 네트워크가 없으며 시간 지연이 없다.
- 센서가 플랜트에 직접 연결되어 있다. 센서는 플랜트의 일부로 간주 될 수 있다.
- 네트워크는 센서와 제어기 사이에만 존재한다.

- 센서, 제어기 및 액추에이터는 모두 이벤트 중심(event-driven)으로 동작한다.

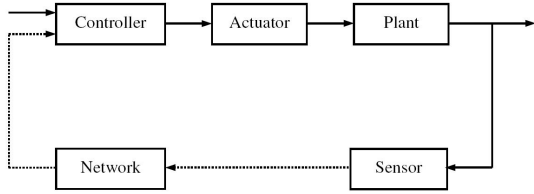


Fig. 2. Structure of the considered NCS.
그림 2. 사용된 NCS의 구조

네트워크 유발 지연을 고려한 NCS의 연속 플랜트 모델은 다음과 같은 형식으로 표현된다.

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

그리고 이산 제어기는 다음과 같이 주어진다.

$$u(kh) = -Kx(kh), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

고정된 샘플링 주기 h 로 시스템을 샘플링하고, 시간 지연 τ_k 를 고려할 때, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma_1(\tau_k)u(k) + \Gamma_2(\tau_k)u(k-1), \\ y(k) &= Cx(k), \\ u(k) &= -Kx(kh - \tau_k), \\ \text{where} \\ \tau_k &< h, \\ \Phi &= e^{Ah}, \\ \Gamma_1(\tau_k) &= \int_0^{h-\tau_k} e^{As} ds B, \\ \Gamma_2(\tau_k) &= \int_{h-\tau_k}^h e^{As} ds B. \end{aligned} \quad (3)$$

고정 샘플링 주기 시스템에서 하나의 시간 지연 상한을 설정해야 한다. 일반적인 방법은 최대 시간 지연을 선택한 다음 이것을 고정 샘플링 주기로 정하는 것이다. 이는 시간 지연이 하나의 샘플링 기간 h 또는 d 샘플링 기간 dh 내에 있어야 함을 의미한다. 이 방법은 보수적이며 실제 조건과 일치하지 않다.

시변 샘플링주기 h_k 를 갖는 시스템은 다음과 같이 설명 될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{(k+1)} &= A_k(h_k)x_k + B_k(h_k)u_k, \\ y_k &= Cx_k, \\ u_k &= -Kx_k, \\ \text{where} \\ A_k &= e^{Ah_k}, \\ B_k &= \int_0^{h_k} e^{As} B ds. \end{aligned} \quad (4)$$

위에서 볼 수 있듯이 샘플링 주기는 A_k, B_k 의 파라미터로, 시간 지연은 제어기에서 사라진다. 이렇게 해서 NCS는 시간 지연이 없는 이산 시변 시스템이 된다. 고정된 샘플링 주기 모델을 시변 샘플링 주기 모델로 대체하는 이점은 시간 지연 부분이 사라짐에 따라 시변 샘플링 주기 모델의 안정도 분석이 훨씬 쉬워진다는 것이다. 안정도를 분석하기 위해서는 각 샘플링 단계 k 에서 $A_k - B_k K$ 의 모든 고유값이 단위 원 안에 있는지 여부만 찾으려 된다.

확장된 상태 벡터를 다음과 같이 정의하면,

$$z_k = \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

확장된 페루프 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{k+1} &= \Phi_k z_k = \begin{bmatrix} A_k - B_k K & 0 \\ -K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} \\ \text{where} \\ \Phi_k &= \begin{bmatrix} A_k - B_k K & 0 \\ -K & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

그러나 이 모델링 기법을 적용하려면 각 샘플링 단계에서 가변 샘플링 주기 또는 시간 지연을 알아야 한다. NCS의 특성상 시간 지연은 발생하기 전에 알 수 없다. 따라서 본 논문에서는 로직 기반의 퍼지 뉴럴 네트워크를 이용하여 각 샘플링 단계에서 시간 지연을 예측하고자 한다.

3. 종속형 퍼지 뉴럴 네트워크[6]

그림 3에 설명된 logic processor(LP)는 h 개의 AND 뉴런의 계산 결과가 출력층에 위치한 단일 OR 뉴런에 의해 처리되는 기본적인 2단계 구조이다.

각 LP는 다수의 파라미터로 고유하게 특징지어진다. 즉, 입력의 수(n), 은닉층 노드의 수(h), AND 뉴런과 OR 뉴런의 연결강도들이다. LP의 구조를 살

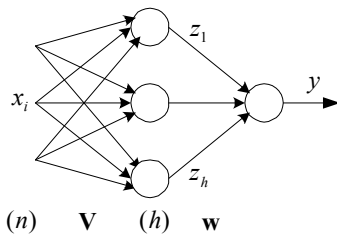


Fig. 3. Structure of LP.
그림 3. LP의 구조

펴보면, AND 뉴런의 연결은 행렬 \mathbf{V} 로 나타낼 수 있으며, OR 뉴런의 연결은 단일 벡터 형태(\mathbf{w})로 수집된다. 이것은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$z_j = \text{AND}(\mathbf{x}, \mathbf{V}_j), j=1,2,\dots, h \quad y = \text{OR}(\mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (7)$$

여기서 \mathbf{z} 는 AND 뉴런의 출력 벡터($\mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_h]^T$)이고 \mathbf{V}_j 는 연결강도 행렬 \mathbf{V} 의 j 번째 열을 나타낸다.

LP는 종속형 구조로 결합되는 네트워크의 기본 모듈이다. 이 구조의 본질은 LP를 서로 종속형으로 연결하는 것이다. 이로 인해 입력 변수의 특징 순서가 생성된다. 결과 네트워크의 동질성을 보장하기 위해 본 논문에서는 그림 4와 같이 두 개의 입력만을 가지는 LP를 사용한다. 이러한 의미에서 n 개의 입력 변수를 사용하면, 네트워크에서 $(n-1)$ 개의 LP가 사용된다. 각 LP는 연결 강도 행렬들(\mathbf{V}, \mathbf{w})로 명확히 설명될 수 있다.

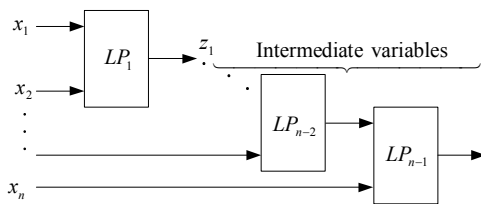


Fig. 4. Structure of cascade type fuzzy neural networks.
그림 4. 종속형 구조의 퍼지 뉴럴 네트워크

종속형 구조의 퍼지 뉴럴 네트워크를 최적화하기 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 사용하였다. 종속형 구조의 퍼지 뉴럴 네트워크 및 최적화 방법에 대한 자세한 사항을 [6]을 참조하기 바란다.

4. 실험 및 결과분석

일반적으로 현재의 시간 지연은 과거의 시간 지

연의 영향을 받는다. 따라서 시간 지연은 마르코프 체인으로 간주할 수 있으며, 현재의 시간 지연과 과거의 시간 지연 사이에 상관관계가 있다고 가정할 수 있다. 이러한 이론적 토대를 바탕으로 본 논문에서는 종속형 퍼지 뉴럴 네트워크를 NCS의 현재 시간 지연을 예측하는데 사용하였다.

시간 지연 데이터를 수집하기 위해 Bluetooth 기반 NCS를 사용하였다. 유선 전송 시간을 무선 (Bluetooth) 전송 시간과 비교하여 동일한 신호 전송에 대한 시간 지연 데이터를 수집하였다.

시간 지연 예측을 위해 800개의 데이터가 시계열로 수집되었다. 고정 슬라이딩 데이터 윈도우를 20으로 설정한 다음 780개의 특징 벡터를 획득했다. 그 중 50%(390개)는 네트워크의 학습을 위해 사용되었고 나머지는 테스트를 위해 사용되었다.

각 특징들은 균일하게 분포된 3개의 가우시안 소속함수를 이용하여 이산화 된다. 유전 알고리즘은 네트워크의 입력 순서와 연결 강도들을 최적화 한다. 모든 LP는 은닉층에 2개의 AND 뉴런을 가진다. 본 실험에서는 입력 변수의 수를 제한하여 7개로 고정하였다.

최적화를 위해 사용된 파라미터들은 실험을 통해 구해졌으며, 그 값들은 아래와 같다.

- 개체군 수 : 200
- 세대 수 : 200
- 교차 확률 : 0.9
- 돌연변이 확률 : 0.01

최적화 결과는 Root Mean Square Error (RMSE)로 표현되었으며, 트레이닝 및 테스트 데이터를 각각 이용한 유전 알고리즘 최적화 결과가 표 1에 나타나 있다.

Table 1. RMSE after GA optimization using training and testing data, respectively.

표 1. 트레이닝과 테스트 데이터를 이용한 유전 알고리즘 최적화 후의 각각의 RMSE

	Training	Testing
GA optimization	0.478	0.491

그림 5는 실제 지연과 예상 지연을 비교한 테스트 데이터에 대한 예측 결과를 보여준다. 대각선에 가까울수록 작은 예측 오차를 가진다.

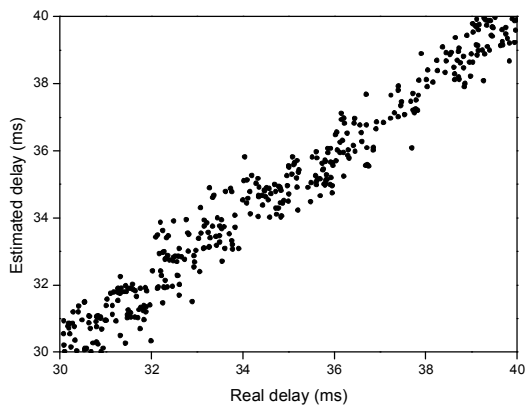


Fig. 4. Estimation error for the testing data.
그림 4. 테스트 데이터에 대한 예측 오차

III. 결론

본 논문은 NCS의 시간 지연을 예측하기 위해 유전 알고리즘에 의해 최적화되는 종속형 퍼지 뉴럴 네트워크를 사용하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 시변 샘플링 주기는 시스템 방정식에서 시간 지연 항이 사라진다는 관점에서 고정 샘플링 주기보다 유리하다. 실험 결과에서 보듯이 제안된 방법은 NCS의 시간 지연을 효과적으로 예측할 수 있음을 보여주었다.

References

- [1] X. Jie, M. Fei and D. Du, "Anomaly detection and resilient control of networked control system with multi-hop routing," *International Journal of Systems Science*, vol.50, no.6, pp.1202-1215, 2019.
DOI: 10.1080/00207721.2019.1597944
- [2] M. Wang, X. Sun, H. Xing and H. Zheng, "Online fault detection for networked control system with unknown network-induced delays," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, vol.30, no.4, 2018.
DOI: 10.1504/IJMIC.2018.095832
- [3] K. C. Lee, S. Lee and M. H. Lee, "Remote fuzzy logic control of networked control system via Profibus-DP," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.50, no.4, pp.784-792, 2003.
DOI: 10.1109/TIE.2003.814761

- [4] Y. Zheng, H. Fang and H. O. Wang, "Takagi-sugeno fuzzy-model-based fault detection for networked control systems with Markov delays," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, vol.36, no.4, pp.924-929, 2006.
DOI: 10.1109/TSMCB.2005.861879
- [5] J. Yi, Q. Wang, D. Zhao and J. Wen, "BP neural network prediction-based variable-period sampling approach for networked control systems," *Applie Mathematics and Computation*, vol. 185, no.2, pp. 976-988, 2007.
DOI: 10.1016/j.amc.2006.07.020
- [6] W. Pedrycz, M. Reformat and C. W. Han, "Cascade architectures of fuzzy neural networks," *Fuzzy Optimization and Decision Making*, vol.3, no.1, pp.5-37, 2004.
DOI: 10.1023/B:FODM.0000013070.26870.e6

BIOGRAPHY

Cheol-Gyun Lee (Member)

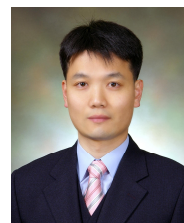


1989 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
1991 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

1998 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

1999~ : Professor in Electrical Engineering, Dong-Eui University.

Chang-Wook Han (Member)



1994 : BS degree in Electronic Engineering, Yeungnam University.
1996 : MS degree in Electronic Engineering, Yeungnam University.
2002 : PhD degree in Electronic Engineering, Yeungnam University.
2008~ : Professor in Electrical Engineering, Dong-Eui University.