

사이버물리시스템을 위한 링크 적응기법

김도환, 박경준
DGIST

{dhkim, kjp}@dgist.ac.kr

Link Adaptation for Cyber-Physical Systems

Dohwan Kim and Kyung-Joon Park
DGIST

요 약

최근 많은 주목을 받고 있는 사이버물리시스템은 사이버시스템, 물리시스템, 그리고 통신망의 상호작용이 전체 시스템 성능에 핵심적인 영향을 미친다. 특히 통신망이 물리시스템의 제어성능에 미치는 영향을 고려하여 물리시스템의 안정성을 보장하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 사이버물리시스템을 위해 제어성능을 고려한 링크 적응기법을 제안한다.

I. 서론

최근 통신, 의료, 교통, 산업시설 등 다양한 분야에의 적용을 위해 제안된 사이버물리시스템(Cyber-Physical Systems, CPS) 패러다임이 많은 연구자들의 주목을 받고 있다. 개별적으로 동작하는 기존의 임베디드 시스템과 달리 사이버물리시스템은 각 시스템 간의 밀접한 상호작용이 존재한다. 사이버물리시스템은 물리시스템, 연산, 통신의 세 요소가 통합된 형태로, 물리시스템의 동작이 통신망을 통해 관찰되고, 조율되고, 제어되는 통합 시스템이다 [1].

특히, 물리시스템의 안정성 보장은 사이버물리시스템의 가장 중요한 목표 중 하나이다. 지속적인 상호작용을 통해 예기치 못한 환경 변화에도 물리시스템의 실시간 안정성이 유지되어야 하며 이는 통신망을 통한 제어시스템의 신뢰성 문제로 귀결된다 [2].

이러한 안정성의 확보를 위해서는, 일반적인 제어시스템과 달리 사이버물리시스템에서는 통신망과 제어의 두 가지 관점을 모두 고려해야 한다. 그림 1은 제어 주기에 따른 일반적인 디지털 제어시스템과 통신망 제어시스템의 성능 비교를 나타낸다. 일반적인 디지털 제어시스템은 제어 주기가 짧아질수록 제어 성능이 향상된다. 통신망 제어시스템의 경우 디지털 제어 시스템과 비슷한 경향을 보이지만 일정 이상 제어 주기가 짧아질 경우 제어 성능이 급격히 나빠짐을 알 수 있다. 이는 제어주기가 짧아짐에 따라 통신망의 트래픽이 증가하게 되어 통신망 지연시간을 증대를 통해 제어 패킷이 제대로 전송되지 못하는 것에 따른 결과이다. 이 현상은 물리시스템과 통신망 간 상호작용으로 인해 발생하는 중요한 문제이다. 따라서 사이버물리시스템을 위한 물리시스템과 통신망을 동시에 고려하는 링크 적응기법이 필요하다.

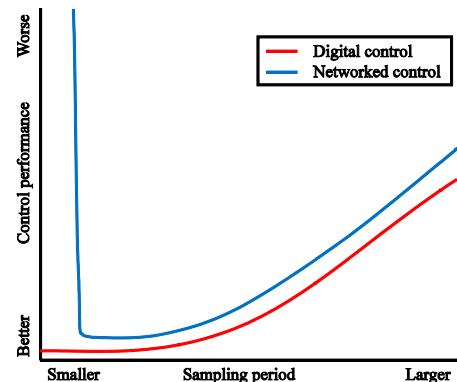


그림 1. 제어 주기에 따른 기존 디지털 제어시스템과 통신망 제어시스템의 성능 비교

본 논문에서는 사이버물리시스템의 안정성을 보장하는 링크 적응기법을 최적화 문제로 접근하여 설계한다.

II. 본론

사이버물리시스템은 그림 2와 같은 통신망 제어시스템의 형태로 표현할 수 있다. 시스템은 N 개의 물리시스템과 N 개의 제어기, 그리고 통신망으로 구성된다. 물리시스템은 제어기로부터 받은 제어 입력 값에 따라 동작하며 통신망을 통해 물리시스템의 상태 값을 포함하는 패킷을 제어기에게 전송한다. 제어기는 제어 시스템 상태 값을 바탕으로 제어 입력 값을 연산하여 물리시스템으로 전송한다. 각 제어기 C_i ($i = 1, \dots, N$)는 제어주기 s_i 마다 물리시스템 P_i 로부터 제어 상태 값을 포함하는 패킷을 전송 받는다. 물리시스템 P_i 의 성능은 제어비용 J_i 로 표현한다. 제어비용 J_i 는 시스템의 특성식과 제어주기 s_i , 통신망 시간지연 d_i 에 의해 결정된다. J_i 의 증가는 제어 성능의 저하를 의미한다. 통신망 시간지연 d_i 는 제어주기 및 통신망 파라미터 V 의 함수로 표현 가능하다. 통신망의 성능은 에너지 소모량 F 로 표현한다. 통신망의 에너지 소모량은 전송되는

패킷의 양에 비례한다. 에너지 소모량 F 는 제어주기 $\mathbf{s} = \{s_1, \dots, s_N\}$ 와 통신망 파라미터 V 에 의해 결정된다.

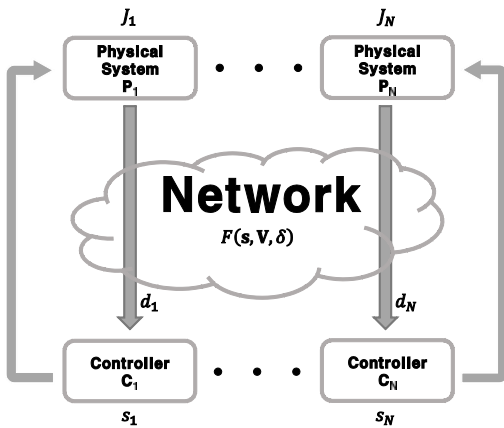


그림 2. 사이버물리시스템의 통신망 제어 구조

이러한 사이버물리시스템에서 통신망과 제어를 동시에 고려하는 링크 적응기법은 다음과 같은 최적화 문제로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{s}, V} & F(\mathbf{s}, V, \delta) \\ \text{s.t.} & J_i(s_i, d_i(\mathbf{s}, V, \delta)) \leq J_i^{th}, i = 1, \dots, N. \end{aligned}$$

J_i^{th} 는 물리시스템 P_i 의 제어비용 경계 값을 의미한다. 제어비용 J_i 가 J_i^{th} 을 초과할 경우 물리시스템은 불안정한 상태가 된다. δ 는 통신망 토폴로지 등 통신망 시스템 환경을 나타내는 파라미터이다.

결국 위의 최적화문제를 통해 모든 물리시스템들의 제어 성능을 만족시키는 범위에서 통신망의 에너지 효율을 극대화할 수 있게 된다. 이를 풀게 되면 각 물리시스템들의 최적의 제어주기 \mathbf{s} 와 통신망 파라미터 V 를 찾는다.

하지만 위의 최적화 문제에서는 링크 적응기법에 따른 물리시스템의 안정성 변화를 고려하지 않았다. 무선통신망은 주변 환경 변화에 따른 통신 채널 품질 저하를 위해 링크 적응기법을 사용한다. 예를 들어, 가장 많이 쓰이는 무선 통신 기술 표준 중 하나인 IEEE 802.11 WLAN에서는 통신 채널 상태에 따라 채널 PHY 전송 속도를 변경하는 전송속도 적응 알고리즘을 사용한다 [3]. 전송속도 적응 알고리즘은 정해진 n 개의 채널 물리계층 전송속도들의 집합 r 중에서 현재 채널 상태 ξ 에 따른 물리계층 전송속도 $r(\xi)$ 를 선택한다. 채널의 물리계층 전송속도는 통신망 시간지연 d 와 에너지 소모량 F 에 영향을 준다. 이에 따라 링크 적응기법을 고려한 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{s}, V} & F(\mathbf{s}, V, r(\xi), \delta) \\ \text{s.t.} & J_i(s_i, d_i(\mathbf{s}, V, r(\xi), \delta)) \leq J_i^{th}, i = 1, \dots, N. \end{aligned}$$

시뮬레이션을 통해 제안한 링크 적응기법의 성능 측정 결과를 하였다. 시뮬레이터는 ns-2를 사용하여 구현하였으며 통신망은 802.11g를 사용하였다. 전체 물리시스템의 개수 N 은 20이다. 물리시스템은 S1과 S2의 2가지 타입이 있으며 S1과 S2 각각 10개씩 위치한다. S1과 S2는 서로 다른 특성식과 J^{th} 를 갖는다. 시뮬레이션 시나리오에서는 링크 적응 기법의 신뢰성을 알아보기 위해 시작 후 900초 지점에서 전송속도 적응 알고리즘에 의해 물리계층 전송속도가 11Mb/s에서 2Mb/s로 떨어진다.

그림 3은 링크 적응기법을 사용한 경우와 그렇지 않은 경우의 물리시스템 S1의 성능을 보여준다. 물리시스템의 성능을 표현하기 위해 그래프의 y축은 제어비용 J 를 사용하였다. 위에 위치한 그래프는 링크 적응기법을

적용하지 않은 경우이며, 아래에 위치한 그래프는 링크 적응기법을 사용한 경우이다. 제안한 링크 적응기법을 사용하면 채널 환경변화에 적응하여 사이버물리시스템의 신뢰성을 보장할 수 있음을 확인할 수 있다.

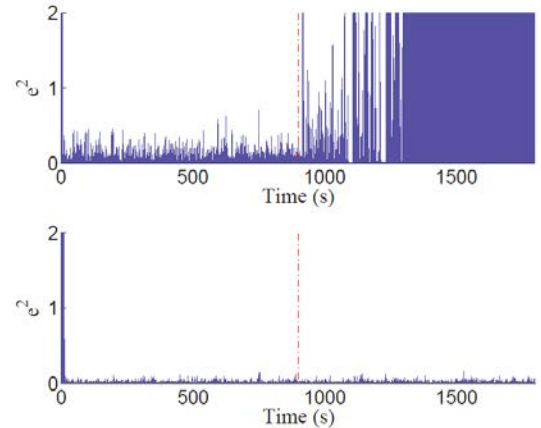


그림 3. 물리시스템의 제어비용 (위: 링크 적응기법 미적용, 아래: 링크 적응기법 적용)

III. 결론

본 논문에서는 사이버물리시스템을 위한 링크 적응기법을 제안하였다. 사이버물리시스템은 일반적인 물리시스템과 달리 통신망과 제어를 동시에 고려해야 한다. 이를 위해 통신 채널 환경 변화가 물리시스템의 안정성에 미치는 영향을 고려하여 링크 적응기법을 설계하였다. 제안한 링크 적응기법이 사이버물리시스템의 신뢰성을 보장할 수 있음을 보여주었다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was partly supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2016R1C1B2007899) and Institute for Information & communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIP) (B0101-15-0557, Resilient Cyber-Physical Systems Research)

참고 문헌

- [1] K.-J. Park, R. Zheng, and X. Liu, "Cyber-physical systems: Milestones and research challenges," *Computer Communications*, vol. 36, issue 1, pp.1-7, December 2012.
- [2] 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, November 2014.
- [3] W. L. Shen, K. C. J. Lin, S. Gollakota and M. S. Chen, "Rate adaptation for 802.11 multiuser MIMO networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 1, pp. 35-47, January 2014.