

무선 센서-액추에이터 네트워크에서 제어기-물리시스템 간 패킷 손실률 측정 기법

박형석, 문시훈, 조병문, 박경준*

대구경북과학기술원

hyungseok@dgist.ac.kr, msh0576@dgist.ac.kr, bmcho@dgist.ac.kr, *kjp@dgist.ac.kr

Packet Loss Rate Measurement between the Controller and the Physical System in Wireless Sensor-Actuator Networks

Hyung-Seok Park, Sihoon Moon, Byeong-Moon Cho, Kyung-Joon Park*

DGIST

요약

무선 센서-액추에이터 네트워크 내 물리 시스템의 성능 저하를 유발하는 패킷 손실을 줄이기 위해 다중 경로 라우팅을 사용할 수 있다. 일반적으로 주 경로의 백업 역할을 하는 보조 경로의 상태를 실시간으로 확인하는 데에는 추가적인 네트워크 리소스 할당이 필요하다. 특히 TDMA를 사용하는 무선 센서-액추에이터 네트워크에서는 추가적인 시간 슬롯 할당이 불가피하며, 이는 물리 시스템의 제어주기를 증가시키는 원인이 된다. 본 논문에서는 TDMA를 사용하는 이벤트-트리거 형식의 실시간 다중 경로 패킷 손실률 측정 기법을 제안한다. 제안된 기법은 추가적인 시간 슬롯 할당 없이 여러 경로의 패킷 손실률을 실시간으로 측정 가능하며, 가장 낮은 패킷 손실률을 갖는 경로를 주 라우팅 경로로 선택하여 패킷 손실을 감소시키며 제어 성능을 향상시킨다.

I. 서론

무선 센서-액추에이터 네트워크(WSANs)의 쟁점은 제한된 네트워크 리소스를 효율적으로 분배하여 최적의 제어 성능을 이끌어 내는데 있다. 패킷 손실, 전송 지연 및 네트워크 공격 노출에 취약한 WSANs의 신뢰성을 향상시키는 연구에도 리소스 제약이 따른다[1]. WSANs에서 많이 사용되는 WirelessHART 표준은 다중 경로를 갖는 그래프 라우팅 기법을 운용할 수 있다. 주 라우팅 경로와 보조 라우팅 경로를 통해 패킷 손실을 줄일 수 있는 네트워크 구성이 가능하다[2,3]. 그러나 네트워크 리소스가 제한된 WSANs에서 주변 환경에 의해 실시간으로 변하는 보조 경로의 패킷 손실률(PLR)을 파악하기 어려운 문제점이 있다.

본 논문에서는 다수의 제어기 및 물리 시스템이 존재하는 WSANs에서 다중 경로의 PLR를 실시간으로 측정하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 TDMA 스케줄링을 사용하는 WSANs 관점에서 중요한 리소스인 시간 슬롯을 추가하거나 낭비하지 않고, 제어 성능을 향상 시키는데 중점을 두었다. 제한된 네트워크 리소스 내에서 여러 경로의 PLR를 실시간으로 측정함으로써 가장 좋은 환경의 라우팅 경로를 선택한다. 이를 통해 제어 성능 저하를 야기하는 패킷 손실을 줄여 제어 성능을 향상시킨다.

II. 본론

WSANs는 [그림 1]과 같이 제어기와 물리 시스템이 무선 메시 네트워크를 통해 제어 값과 센싱 값을 교환하는 구조이다. 본 논문에서는 물리 시스템과 제어기가 여러 쌍인 상황을 가정한다. 센서는 물리 시스템의 상태를 측정하여 측정값을 제어기로 feedback 하며 제어기는 제어 값을 액추에이터로 forward 한다. 패킷 간 충돌을 방지하기 위해 TDMA를 사용하며 스케줄링은 [그림 2]의 (a)와 같다. 각 시스템마다 제어주기를 가지며 임의의 외란이 발생한다.

본 논문에서 제안하는 제어기-물리시스템 간 실시간 다중 경로 패킷 손

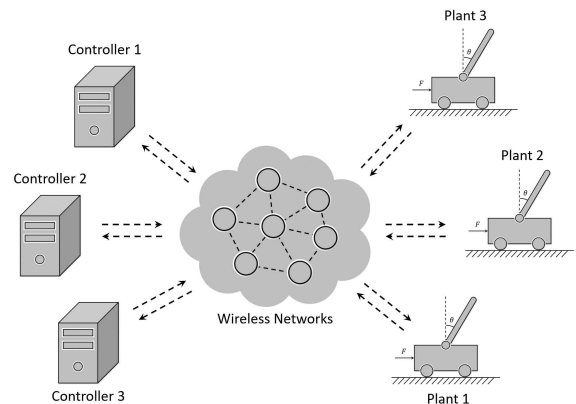


그림 1. 무선 센서-액추에이터 네트워크 구조도.

실률 측정 기법은 제어기에서 물리시스템의 액추에이터로 향하는 forward 경로에 적용하였으며, 동일한 방법으로 feedback 경로에 적용 가능하다. 액추에이터는 간단한 패킷 손실 보상기(PLC)를 가지고 있으며 식은 다음과 같다.

$$\hat{u}_n = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m u_{n-i} \quad (1)$$

\hat{u}_n 은 패킷 손실 발생시 PLC가 제어 값 u_n 을 추정한 값이며 최근의 m 개 제어 값의 평균이다. 제어기는 다음 식을 이용하여 실제 전달 될 제어 값과 액추에이터가 예측할 값의 차이를 계산한다.

$$e_c = |u - \hat{u}| \quad (2)$$

제어기는 e_c 가 임계 값 δ 보다 작은 경우, 미리 설정된 보조 경로 중 하나의 경로로 제어 값을 전달한다. 일반적인 TDMA 스케줄링에서 라우팅 경로를 변경하기 위해서는 네트워크 매니저에서 새로운 스케줄링 정보를 모든 노드에 브로드캐스팅하기 때문에 추가적인 시간 슬롯 할당이 필요하

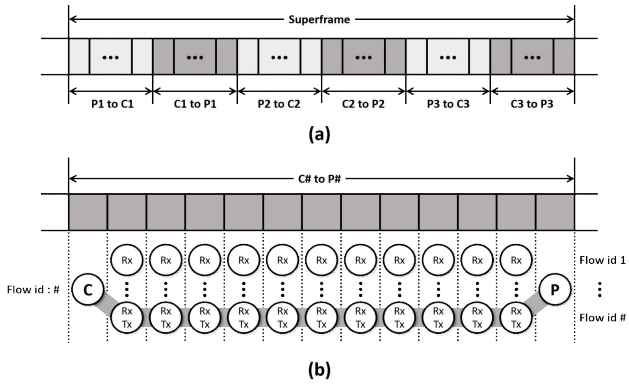


그림 2. (a) 제어기-물리 시스템 간 라우팅 스케줄링, (b) 다중 경로 라우팅을 위한 스케줄링.

다. 슬롯 할당이 추가될수록 모든 물리시스템의 제어주기가 증가하며, 라우팅 경로를 변경하지 않는다면 해당 슬롯은 주기적으로 낭비되는 슬롯이다. 본 논문에서는 추가되는 슬롯 할당 없이 라우팅 경로를 변경하기 위해 [그림 2]의 (b)와 같은 스케줄링 알고리즘을 사용한다. 하나의 시간 슬롯에 각 경로의 노드들을 동시에 수신 상태로 활성화하고, 라우팅 경로별 flow id를 이용하여 한 슬롯에 하나의 노드만 해당 패킷을 송신하여 패킷 충돌을 방지한다. 이를 통해 새로운 스케줄링 정보를 모든 노드가 갱신할 필요 없이 라우팅 경로를 스위칭 할 수 있다. 제어기는 다음 프레임에 feedback 되는 물리 시스템 상태 값과 함께 ACK 메시지를 받아 송신한 제어 패킷의 손실 유무를 파악한다. 미리 설정된 여러 보조 경로들을 polling 방식으로 선택하여 실시간으로 모든 경로의 PLR를 측정한다.

e_c 가 임계 값 δ 보다 큰 경우, 해당 제어 패킷의 손실 발생 시 물리 시스템 성능 저하에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 각 경로의 누적된 k 개의 패킷 손실 유무로 PLR를 도출하여 PLR이 가장 낮은 경로로 해당 제어 값을 전송한다. 이를 통해 비교적 중요도가 높은 제어 명령을 항상 최적의 경로로 전달 할 수 있다.

제안된 기법의 효율성을 입증하기 위해 inverted pendulum 3개와 PID 제어기 3개, 무선 네트워크를 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 각 시스템의 제어 주기는 6 ms 이며 각 inverted pendulum과 PID 제어기 사이에 4개의 라우팅 경로가 존재한다. PLC는 최근의 8개의 제어 평균값을 \hat{u} 으로 사용하며 임계값 δ 는 0.001 이다. k 값은 100 이며 가장 최근 100회의 패킷 손실 유무로 PLR을 측정한다.

[그림 3]은 각 경로가 독립적으로 시간에 따라 PLR이 임의의 값으로 변할 때, 모든 제어기-물리시스템이 각각 4개의 라우팅 경로의 실제 PLR과 실시간으로 측정된 PLR의 오차의 평균값을 나타낸 그래프이다. 각 경로의 PLR 측정 오차의 평균값은 약 3~8%p이다. 이때 제어기가 전체 패킷 전달 횟수 대비 가장 PLR가 낮은 라우팅 경로 선택 횟수는 각각 73.87%, 74.16%, 79.77%이다. 본 논문이 제안하는 알고리즘을 적용하지 않은 경우에는 각각 20.76%, 38.82%, 13.50%로, 평균적으로 약 280% 증가하였다. 제안된 알고리즘을 적용한 뒤 주 라우팅 경로의 PLR는 각각 9.43%,

표1. 제안된 알고리즘의 성능 비교 표.

Type		System 1	System 2	System 3
Rate of selecting the lowest packet loss rate (%)	before	73.87	74.16	79.77
	after	20.76	38.82	13.50
Packet loss rate of primary path (%)	before	14.32	15.35	20.69
	after	9.43	10.18	9.28
Integral Absolute Error (rad)	before	0.1203	0.1221	0.1053
	after	0.1158	0.1258	0.0927

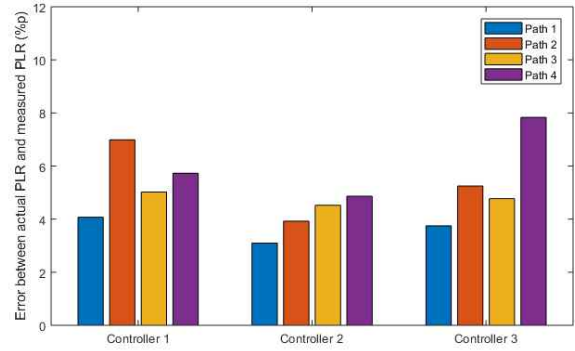


그림 3. 제어기 및 라우팅 경로 별 실제 패킷 손실률과 측정된 패킷 손실률 간 오차.

10.18%, 9.28%, 적용하지 않은 경우의 주 라우팅 경로 PLR는 각각 14.32%, 15.35%, 20.69%로 평균적으로 약 43% 감소하였다. 제안된 알고리즘을 적용한 뒤 적분절대오차(IAE)는 각각 0.1158 rad, 0.1258 rad, 0.0927 rad이며, 적용하지 않은 경우에는 각각 0.1203 rad, 0.1221 rad, 0.1053 rad으로 평균적으로 약 4.25% 감소였다. 즉, 제안된 알고리즘이 실시간으로 다중 경로의 패킷 손실률을 측정하여 가장 좋은 환경의 전달 경로로 패킷을 보냄으로써 패킷 손실을 줄여 제어 성능을 향상시킨다.

III. 결론

본 논문에서는 제한된 네트워크 리소스를 갖는 무선 센서-액추에이터 네트워크에서 실시간으로 제어기와 물리 시스템 간 다중 라우팅 경로의 패킷 손실률을 측정하여 가장 패킷 손실률이 낮은 경로를 주 라우팅 경로로 선택함으로써 패킷 손실을 줄이고 물리 시스템 성능을 향상시키는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 TDMA를 사용하는 무선 센서-액추에이터 네트워크에서 제한된 네트워크 리소스 중 하나인 시간 슬롯을 추가로 할당하거나 낭비하지 않고 실시간으로 독립적인 여러 라우팅 경로의 패킷 손실률을 측정한다. 추후 주 라우팅 경로에서의 패킷 손실 발생 시 제한된 네트워크 리소스를 극복하며 유연한 대처를 할 수 있는 방안을 연구하여 본 논문에서 제안된 알고리즘과 함께 패킷 손실에 강인한 무선 센서-액추에이터 네트워크를 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부에서 지원하는 DGIST 기관고유사업에 의해 수행되었습니다(19-EE-01).

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] Radi M, Dezfouli B, Abu Bakar K, Lee M, "Multipath routing in wireless sensor networks: survey and research challenges," Sensors, vol. 12, pp. 650-685, January 2012.