

무선 센서 네트워크에서 혼잡 패턴을 고려한 전송률 조절 기법 (A Rate Control Scheme Considering Congestion Patterns in Wireless Sensor Networks)

강 경 현^{*} 정 광 수^{**}
(Kyung Hyun Kang) (Kwangsoo Chung)

요약 이벤트 기반 무선 센서 네트워크에서 주기적인 센싱 데이터에 비해 높은 전송률과 우선순위를 갖는 이벤트 데이터가 병목 구간에 집중되면 네트워크 혼잡이 발생한다. 혼잡이 지속되면 대부분의 데이터가 손실되는 네트워크 붕괴 현상이 나타난다. 전송률 조절 기법은 이러한 네트워크 붕괴 현상을 막기 위한 해결책 중 하나이다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서의 혼잡 제어를 위해 각 노드에서 혼잡 패턴에 따라 자식 노드의 전송률을 조절하는 기법을 제안한다. 실험을 통해 제안하는 기법이 효과적으로 혼잡을 제어하고, 기존의 전송률 조절 기법들보다 더 많은 이벤트 데이터를 전송함을 확인하였다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 전송률 조절 기법, 혼잡 패턴, 혼잡 제어

Abstract In event-driven wireless sensor networks, network congestion occurs when event data, which have higher transmission rates than periodic sensing data, are forwarded to bottleneck links. As the congestion continues, congestion collapse is triggered, so most of pac-

kets from source nodes are failed to transmit to a sink node. Rate control schemes can be a solution for preventing the congestion collapse problem. In this paper, a rate control scheme that each node controls child node's data rate based on congestion patterns is proposed. Experiments show that the proposed scheme effectively controls network congestion and successfully transmits more event data packets to a sink node than existing rate control schemes.

Key words : Wireless Sensor Network, Rate Control Scheme, Congestion Pattern, Congestion Control

1. 서론

무선 센서 네트워크는 마이크로 컨트롤러, 무선 송수신기, 센싱 모듈을 포함한 소형의 센서 노드들로 구성되며, 노드의 정보는 주로 멀티 홉 통신을 통해 데이터 수집 노드인 싱크 노드로 전달된다. 무선 센서 네트워크는 감시 경찰의 군사 응용을 목적으로 시작되었지만, 점차적으로 환경 모니터링, 건물 위험 진단 응용, 의료 서비스 응용 등 여러 분야에 사용되고 있다[1].

무선 센서 네트워크에서 가장 많이 사용되는 응용 중 하나는 타겟 모니터링이다. 타겟 모니터링은 응용에서 미리 정의한 타겟이 감지되었을 때 감지된 정보를 높은 전송률로 싱크 노드에게 전달하여 사용자에게 이를 알리는 것을 목적으로 한다. 타겟 모니터링 응용에서의 데이터 타입은 이벤트 데이터와 주기적 데이터로 나누어질 수 있다. 이벤트 데이터가 주기적 데이터보다 중요도가 높기 때문에 일반적으로 이벤트 데이터는 주기적 데이터보다 높은 전송률을 갖는다. 이벤트 데이터와 주기적 데이터가 혼재되어 있는 이벤트 기반 무선 센서 네트워크에서 네트워크 혼잡은 주로 이벤트가 발생할 때 일어난다. 이벤트가 발생하면 이벤트 주변 노드들이 높은 전송률로 데이터를 전송하기 때문에, 네트워크의 병목 구간에 데이터가 집중되어 혼잡이 발생하게 된다. 혼잡이 계속될 경우 병목 구간에서 대부분의 데이터가 손실되는 네트워크 붕괴 현상이 나타나므로, 혼잡 제어 메커니즘은 이벤트 기반 무선 센서 네트워크 응용에서 고려해야 할 중요한 요소 중 하나이다.

무선 센서 네트워크에서 혼잡을 제어하기 위한 가장 대표적인 방법은 각 노드의 전송률을 적응적으로 조절하여 혼잡을 완화하는 것이다. 전송률 조절 기법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 싱크 노드에서 혼잡 상황을 인지하고 각 노드의 전송률을 조절하는 End-to-end 기반 전송률 조절 기법이고, 다른 하나는 각 노드에서 혼잡을 판단해 전송률을 조절하는 Hop-by-hop 기반 전송률 조절 기법이다. End-to-end 기반 전송률

* 본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비 지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

** 이 논문은 2010 한국컴퓨터종합학술대회에서 '무선 센서 네트워크에서 혼잡 패턴을 고려한 전송률 조절 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

^{*} 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과
khkang@cclab.kw.ac.kr

^{**} 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@kw.ac.kr

논문접수 : 2010년 7월 30일

심사완료 : 2010년 10월 5일

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 받고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨터의 실제 및 래터 제16권 제12호(2010.12)

조절 기법은 전체 네트워크를 고려하여 각 노드의 적절한 전송률을 파악할 수 있지만 혼잡에 대한 대응시간이 느려 이벤트 기반 응용에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이 점을 고려해 각 노드에서 Hop-by-hop 기반으로 전송률을 조절하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 기존에 제안되었던 기법들과는 달리 혼잡 패턴에 따라 자식 노드의 전송률을 조절함으로써 이벤트 데이터의 처리율을 향상시킨다.

본 논문의 2장에서는 무선 센서 네트워크에서의 혼잡 제어 연구에 대해 기술하였고, 3장에서는 제안하는 전송률 조절 기법에 대해 기술하였다. 4장에서는 실험을 기반으로 제안하는 기법을 평가하였고, 5장에서 결론을 맺었다.

2. 관련 연구

무선 센서 네트워크에서, 전송률 조절을 통해 혼잡을 제어하기 위한 연구 중 RCRT(Rate-Controlled Reliable Transport for Wireless Sensor Networks)[2], CRRT(Congestion-aware and Rate-controlled Reliable Transport)[3]가 있다. RCRT는 싱크 노드에서 End-to-end 기반으로 각 노드의 전송률을 조절한다. 또 싱크 노드에서 수신한 데이터의 신뢰성 향상을 위해 NACK 패킷을 사용하고, 패킷 손실률(loss rate)에 기반하여 싱크 노드에서 전송률을 조절한다. CRRT에서는 각 노드가 자신의 버퍼 상태를 체크하고, 그 정보를 싱크 노드에게 전달한다. 노드의 버퍼 상태를 전달받은 싱크 노드는 AIAD(Additive Increase Additive Decrease) 기법을 이용하여 각 노드의 전송률을 조절한다. 이러한 End-to-end 기반 전송률 조절 기법들은 Hop-by-hop 기반 기법보다 전송률을 안정적으로 조절하는 데 시간이 많이 걸리기 때문에 이벤트 기반 응용에는 적합하지 않다.

Hop-by-hop 기반으로 전송률을 조절하는 기법 중 가장 대표적인 기법은 Backpressure 메시지를 이용해 자식 노드의 전송률을 조절하는 것이다. CODA(Congestion Detection and Avoidance)[4]를 그 예로 들 수 있다. CODA에서 각 노드는 혼잡이 발생하면 Open-loop Backpressure 메시지를 통해 자식 노드의 전송률을 줄인다. 이 외에도, AFA(Aggregate Fairness model and a localized Algorithm)[5]와 같이 노드 간 공정성을 고려한 전송률 조절 기법이 제안되었다. AFA는 각 노드의 트래픽에 비례하도록 Aggregate Flow Number를 정의하고, 부모 노드는 이 Aggregate Flow Number값에 따라 자식 노드의 전송률을 조절한다. 이러한 기존의 Hop-by-hop 기반 전송률 조절 기법들은 이벤트 기반 무선 센서 네트워크 응용에서 여러 노드에 걸쳐 혼잡이

발생할 때 이벤트 데이터의 처리율을 떨어뜨린다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 혼잡을 효과적으로 제어하고, 이벤트 데이터의 처리율을 높일 수 있는 전송률 조절 기법을 제안한다.

3. 제안하는 전송률 조절 기법

제안하는 전송률 조절 기법에서, 각 노드는 자신의 버퍼 상태에 따라 혼잡 여부를 결정한다. 각 노드는 자식 노드로부터 패킷이 수신될 때마다 자신의 버퍼를 체크하고, 현재 버퍼에 저장된 패킷의 수가 버퍼 임계 값을 넘어가게 되면 혼잡으로 판단한다. 버퍼 임계 값의 기준은 [6]을 참고하였다.

전송률 조절은 각 노드에서 분산적으로 수행된다. 그림 1에서처럼, 각각의 노드가 부모 노드로 패킷을 전송할 때 CN(Congestion Notification) 비트와 자신의 현재 전송률을 패킷의 헤더에 포함하여 전송한다. 각 노드는 혼잡이 발생할 때마다 CN 비트 값을 1씩 증가시키고, 혼잡하지 않은 경우에는 비트 값을 1씩 감소시킨다. 예를 들어, 그림 2에서 노드 i가 혼잡할 경우, 노드 i는 CN을 '01'로 설정하여 노드 j로 전송한다. 노드 i로부터 '01'을 수신한 노드 j에서 연속적으로 혼잡이 발생하게 되면 노드 j는 CN을 '10'으로 표시하고 노드 k로 전송한다. 따라서 CN 값이 커진다는 것은 연속적으로 혼잡이 발생하여 혼잡이 심화된다는 것을 의미하고, 이는 네트워크 붕괴 현상이 일어날 확률이 높아진다는 것을 의미한다. 부모 노드는 자식 노드로부터 전달되는 CN 값에 따라 혼잡의 패턴을 구분하고 차등적으로 자식 노드의 전송률을 조절한다. 부모 노드로부터 조정된 전송률은 ACK 메시지에 포함되어 자식 노드로 전달된다.

그림 2의 토폴로지에서, 노드 i로부터 노드 j가 패킷을 수신했을 경우, 노드 j는 노드 i의 CN 값에 따라 노드 i의 전송률을 차등적으로 재조정한다. 노드 j가 혼잡 상태에 있고 노드 i의 CN값이 '00'일 경우, 노드 j는 일시적 혼잡이 일어났음을 감지하여 식 (1)에서처럼 노드 i의 전송률을 α 만큼 감소시킨다. $R_s(i)$ 는 t 시간에서의 노드 i의 전송률을 의미하고, $R_{r,j}(i)$ 는 노드 j에 의해 조정

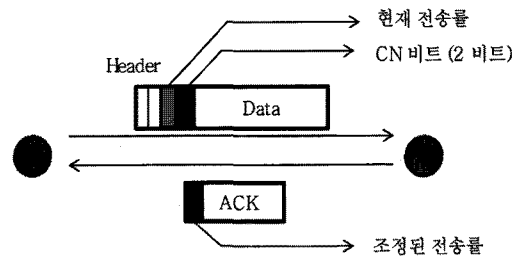


그림 1 제안하는 기법에서의 데이터 전송

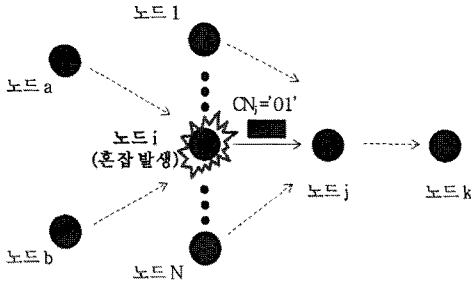


그림 2 혼잡 발생 노드에서의 CN 값 설정

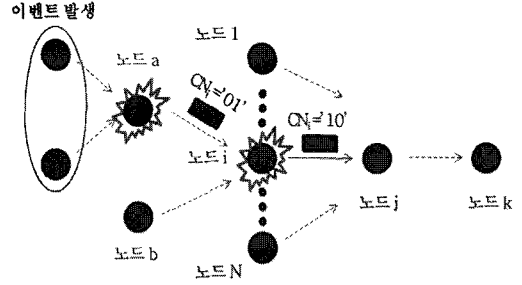


그림 3 연속적인 혼잡 발생과 CN 값 설정

된 $(t+1)$ 시간에서의 전송률을 의미한다. 재조정된 $R_{t+1}(i)$ 값은 노드 j 의 ACK 메시지에 포함되어 노드 i 로 전송된다. 식 (2)는 노드 j 에서의 CN 값을 의미한다. 노드 j 는 부모 노드인 노드 k 로 데이터를 전송할 때 CN 값을 '01'로 설정함으로써 노드 j 에서 혼잡이 발생했음을 부모 노드에게 알린다.

$$R_{t+1}(i) = R_t(i) - \alpha \quad (1)$$

$$CN_j = '01' \quad (2)$$

노드 j 가 혼잡 상태에 있고, 노드 j 에서 수신한 노드 i 의 CN 비트 값이 '01'일 때, 노드 j 는 자신 뿐 아니라 노드 i 에서도 혼잡이 발생했다는 것을 인지한다. 지속적인 혼잡을 막기 위해 노드 j 는 노드 i 의 전송률을 α 만큼 증가시키고, 노드 i 의 이웃 노드, 즉 i 를 제외한 노드 1부터 노드 N 까지의 전송률을 α 만큼 감소시킨다. 이와 같은 전송률 조절을 식 (3), (4)를 통해 나타내었다. C_j 는 j 의 자식 노드를 의미한다. 노드 i 와 j 에서 혼잡이 연속적으로 발생했으므로 노드 j 는 식 (5)와 같이 CN을 '10'으로 설정하여 데이터를 노드 k 로 전송한다.

$$R_{t+1}(n) = \sum_{n=1, n \neq i}^N R_t(n) - \alpha, n \in C_j \quad (3)$$

$$R_{t+1}(i) = R_t(i) + \alpha \quad (4)$$

$$CN_j = '10' \quad (5)$$

그림 3에서처럼 노드 a , 노드 i 에서 연속적으로 혼잡이 발생하여, 노드 j 에서 수신한 노드 i 의 CN 비트 값이 '10'일 경우, 노드 j 는 노드 i 부근에서 연속적으로 혼잡이 발생했음을 인지하게 된다. 노드 j 가 혼잡하지 않을 경우, 노드 j 는 식 (3), (4)와 같이 자식 노드의 전송률을 조절하고, 노드 k 로 데이터를 전송할 때 CN을 '01'로 설정하여 전송한다. 노드 j 가 혼잡할 경우, 노드 j 는 혼잡 구간의 데이터를 신속히 처리해주기 위해, 식 (6)에서처럼 노드 i 의 이웃 노드의 전송률을 배수적으로 줄이고, 식 (7)과 같이 노드 i 의 전송률을 높여준다. 줄어드는 전송률은 β 값에 의해 결정되고, β 의 범위는 $0 \leq$

$\beta < 1$ 이다. β 값이 작을수록 혼잡한 노드의 전송률은 더 높아지게 되며, 혼잡이 발생한 노드의 이웃 노드들에게 보다 낮은 전송률이 할당된다. 이벤트 기반 무선 센서 네트워크에서의 혼잡은 대부분 이벤트 데이터에 의해 발생하기 때문에 혼잡 노드의 전송률을 높여주게 되면 이벤트 데이터의 처리율을 높일 수 있다. 노드 j 는 데이터를 부모 노드로 전송할 때 CN 값을 '11'로 설정한다.

$$R_{t+1}(n) = \sum_{n=1, n \neq i}^N R_t(n) * \beta, n \in C_j \quad (6)$$

$$R_{t+1}(n) = R_t(i) + \sum_{n=1, n \neq i}^N R_t(n) * (1 - \beta) \quad (7)$$

노드 j 에서 수신한 노드 i 의 CN 비트 값이 '11'일 때, 노드 j 는 현재의 이벤트 데이터 전송률이 네트워크 대역폭에 비해 너무 높다고 판단하고, 식 (6), (7)과 같이 전송률을 조절하고, 이벤트가 발생한 노드가 전송률을 감소시키도록 브로드캐스트 메시지를 전송한다. 브로드캐스트 메시지를 받은 이벤트 노드는 자신의 이벤트 데이터 전송률을 α 만큼 낮추어 전송한다.

4. 실험 및 성능 평가

본 논문에서 제안한 전송률 조절 기법을 평가하기 위해 Matlab을 이용하여 그림 4와 같은 토폴로지에서의 실험하였다. 이벤트가 발생하지 않은 노드는 초 당 세 개의 패킷을 싱크 노드로 전송하고, 이벤트가 발생한 노드 0, 노드 1은 초 당 여섯 패킷을 싱크 노드로 전달한다. α 값은 1로 설정하였으며, β 는 0.5로 설정하였다. 그림 4의 토폴로지에서의 이벤트 데이터를 지속적으로 발생시켜 노드 4와 노드 5에서 연속적으로 혼잡이 발생하도록 설정하였다.

그림 5는 제안한 기법에서 노드 4와 노드 5의 버퍼의 변화를 나타낸 것이다. 각 노드의 버퍼 길이는 30 패킷, 버퍼 임계 값은 21 패킷으로 설정하였다. 노드 0과 노드 1에서 전송되는 이벤트 데이터에 의해 노드 4에서 먼저 혼잡이 발생하고, 후에 노드 5에서 혼잡이 발생한다.

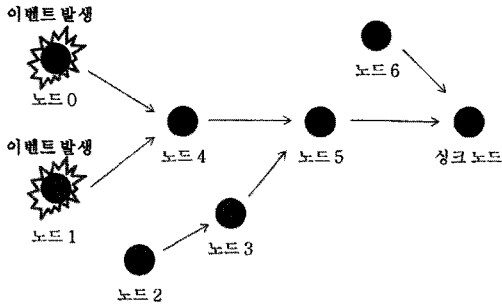


그림 4 성능 평가를 위한 토폴로지

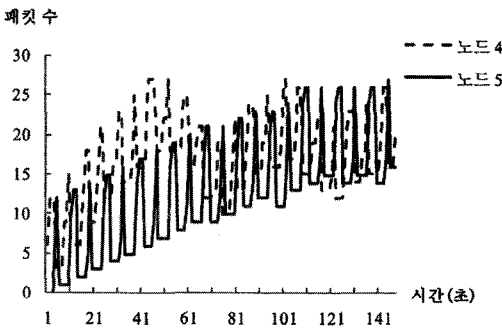


그림 5 혼잡 노드에서의 버퍼 상태

그림 5를 통해 제안하는 기법이 패킷 손실을 효과적으로 방지하고, 더 나아가 네트워크 붕괴 현상을 막는다는 것을 알 수 있다.

기존 연구와의 성능 비교를 위해 AFA[5], CODA[4]의 전송률 조절 기법과 제안하는 기법을 비교하였다. 최근의 연구인 RCRT[2], CRRT[3]의 경우 싱크 노드에서 전체 노드의 전송률을 조절하는 End-to-end 기반 기법을 사용한다. 이러한 기법은 주기적인 모니터링에서는 효과적으로 동작하지만 본 논문에서 가정한 이벤트 기반 무선 센서 네트워크에는 적합하지 않다. 이벤트 데이터 발생으로 인해 소스 노드의 전송률이 갑작스럽게 증가하게 되면 싱크 노드와 소스 노드 사이의 중간 노드에서 많은 데이터가 손실되기 때문이다. 또 End-to-end 기반 전송률 조절 기법은 데이터의 신뢰성을 목표로 하기 때문에 이벤트 데이터의 처리율을 높이기 위한 제안하는 기법의 목표와는 차이가 있다. 따라서 본 논문에서는 Hop-by-hop 기반의 최근 연구인 AFA, 그리고 대표적인 기법인 CODA와 성능을 비교하였다.

그림 6, 7에서는 AFA, CODA의 전송률 조절 기법과 제안하는 기법의 버퍼 상태를 비교하였다. 먼저 그림 6에서, 혼잡이 발생하는 노드 4에서의 버퍼 변화를 살펴보면, AFA는 자식 노드의 트래픽에 따라 전송률을 공정하게 할당하기 때문에 제안하는 기법보다 혼잡 구간

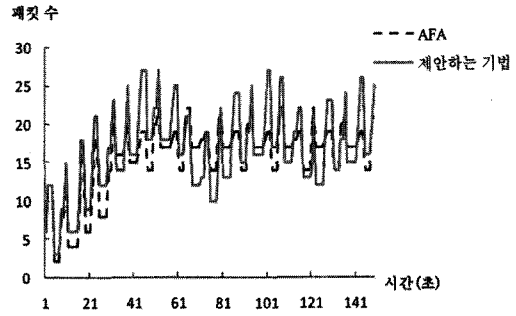


그림 6 노드 4에서 AFA와의 버퍼 상태 비교

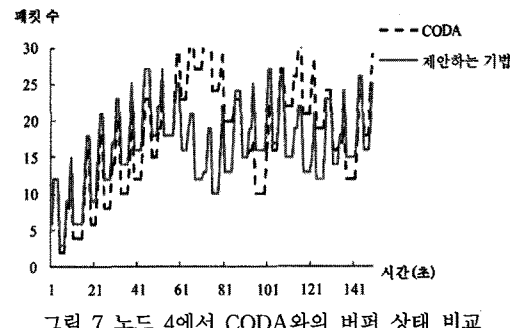


그림 7 노드 4에서 CODA와의 버퍼 상태 비교

에서 좀 더 안정적으로 동작함을 알 수 있다. 하지만 혼잡 구간에서 멀리 떨어진 노드일수록, 또한 혼잡이 연속적으로 발생할수록 데이터 전송률이 현저히 낮아지는 단점이 있다. 결과적으로 AFA는 제안하는 기법보다 이벤트 데이터 처리율이 현저히 낮아지게 된다.

CODA의 경우, 그림 7에서처럼, 노드 4와 노드 5에서 연속적으로 혼잡이 발생할 때 버퍼 오버플로우가 발생하는 문제점이 있다. 노드 5에서 혼잡이 발생하게 되면 노드 5는 Backpressure 메시지를 통해 노드 4의 전송률을 감소시킨다. 이 때 노드 4가 혼잡 상태에 있으면 버퍼에 있는 패킷들을 빠르게 처리해주지 못하게 되어 버퍼 오버플로우가 발생한다. 이에 비해, 제안하는 기법은 연속적으로 혼잡이 발생했을 때 혼잡 지역의 데이터를 신속히 싱크 노드로 전송함으로써 버퍼 오버플로우를 방지한다.

그림 8은 CODA, AFA의 전송률 조절 기법과 제안하는 기법의 이벤트 데이터 처리율을 비교한 그래프이다. 시뮬레이션을 200초 동안 수행한 후 싱크 노드로 전달된 이벤트 데이터를 살펴보면, 제안하는 기법이 CODA나 AFA보다 더 많은 이벤트 패킷을 전송함을 알 수 있다. 실험 결과 제안하는 기법이 CODA의 전송률 조절 기법보다 초 당 1.5개의 이벤트 패킷을 더 전송하며, AFA의 기법보다 초 당 2개의 이벤트 패킷을 더 전송하는 것으로 나타났다. 제안하는 기법이 기존의 전송률

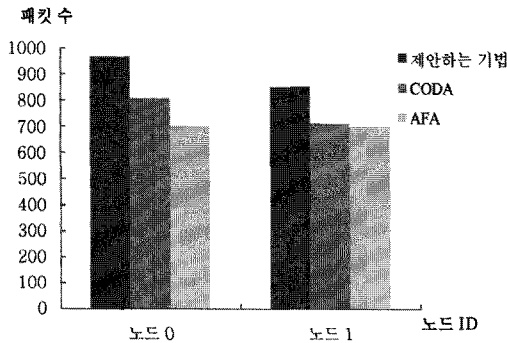


그림 8 이벤트 데이터 처리율 비교

조절 기법보다 더 높은 처리율을 보이는 이유는 제안하는 기법이 CN 값에 따라 혼잡의 패턴을 구분하고, 혼잡 정도에 따라 노드의 전송률을 조절하기 때문이다.

6. 결론 및 향후 연구

이벤트 데이터와 주기적 데이터가 혼재하는 이벤트 기반 센서 네트워크에서 혼잡은 주로 이벤트 데이터에 의해 발생한다. 혼잡이 지속되면 대부분의 데이터가 손실되는 네트워크 붕괴 현상이 나타난다. 전송률 조절 기법은 이러한 네트워크 붕괴 현상을 막기 위한 해결책 중 하나이다.

본 논문에서는 이벤트 기반 센서 네트워크에서 기존의 Hop-by-hop 기반 전송률 조절 기법을 사용했을 때 이벤트 데이터의 처리율이 낮아질 수 있음을 지적하였다. 본 논문에서 제안한 전송률 조절 기법은 각 노드에서 혼잡 패턴에 따라 자식 노드의 전송률을 조절한다. 실험을 통해 제안한 전송률 조절 기법이 효과적으로 혼잡을 제어하고, Backpressure 기반 전송률 조절 기법이나 공정성을 고려한 전송률 조절 기법보다 더 많은 이벤트 데이터를 전송하게 됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J. Kang, Y. Zhang, and B. Nath, "TARA: Topology Aware Resource Adaptation to Alleviate Congestion in Sensor Networks," *IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems*, vol.18, no.7, pp.919-931, Jul. 2007.
- [2] J. Paek and R. Govindan, "RCRT: Rate-Controlled Reliable Transport for Wireless Sensor Networks," *In Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.305-319, Nov. 2007.
- [3] M. Alam and C. Hong, "CRRT: Congestion-Aware and Rate-Controlled Reliable Transport in Wireless Sensor Networks," *IEICE Transactions on Com-*
- [4] C. Wan, S. Eisenman, and A. Campbell, "CODA: Congestion Detection and Avoidance in Sensor Networks," *In Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.266-279, Nov. 2003.
- [5] S. Chen and Z. Zhang, "Localized Algorithm for Aggregate Fairness in Wireless Sensor Networks," *In Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.274-285, Sep. 2006.
- [6] S. Rangwala, R. Gummadi, R. Govindan, and K. Psounis, "Interference-Aware Fair Rate Control in Wireless Sensor Networks," *In Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication*, pp.63-74, Aug. 2006.