

논문 2012-49-10-9

# 무선 센서 네트워크에서 통신량 감소를 위한 적응적 데이터 제한 기법

(An Adaptive Temporal Suppression for Reducing Network Traffic in  
Wireless Sensor Networks)

민준기\*, 권영미\*\*

(Joonki Min and Youngmi Kwon)

## 요약

무선 센서 네트워크의 응용분야가 확장됨에 따라 대용량 측정 데이터의 전송에 대하여 에너지 효율성과 실시간성이 요구되고 있다. 본 논문에서는 센서 노드의 수집 데이터가 갖는 시간적 상관관계를 이용하여 센서 노드의 데이터 전송량을 감소시킴으로써, 에너지 효율성을 높이고 통신 지연을 단축시킬 수 있는 적응적 데이터 제한기법을 제안한다. 센서 노드에서는 적응적 데이터 제한기법을 이용하여 전송하는 측정값의 개수를 줄이고, 싱크 노드에서는 선형 보간법을 통하여 누락된 데이터를 복원한다. 제안하는 기법은 전송량 감소효과가 높아지더라도 데이터 품질의 큰 저하 없이 측정된 신호의 특성을 복원할 수 있다. 이 기법은 센서 데이터를 일정 구간으로 나누고, 그 구간 안에서 신호의 복잡도에 따라 싱크 노드로 전송하는 측정값의 개수를 다르게 한다. 측정 윈도우 내에서 신호의 복잡도는 기울기 변화량의 절대값이 임계치를 벗어나는 측정점의 개수를 기준으로 하였다. 제안하는 기법의 유효성을 확인하기 위해 4개의 샘플 데이터에 대하여 시뮬레이션을 통한 성능평가를 수행하였으며, 그 결과 3종의 샘플에서 6.8% 왜곡율에서 전송되는 측정값의 개수가 90%감소하는 효과를 얻었다.

## Abstract

Current wireless sensor networks are considered to support more complex operations ranging from military to health care which require energy-efficient and timely transmission of large amounts of data. In this paper, we propose an adaptive temporal suppression algorithm which exploits a temporal correlation among sensor readings. The proposed scheme can significantly reduce the number of transmitted sensor readings by sensor node, and consequently decrease the energy consumption and delay. Instead of transmitting all sensor readings from sensor node to sink node, the proposed scheme is to selectively transmit some elements of sensor readings using the adaptive temporal suppression, and the sink node is able to reconstruct the original data without deteriorating data quality by linear interpolation. In our proposed scheme, sensing data stream at sensor node is divided into many small sensing windows and the transmission ratio in each window is decided by the window complexity. It is defined as the number of a fluctuation point which has greater absolute gradient than threshold value. We have been able to achieve up about 90% communication reduction while maintaining a minimal distortion ratio 6.5% in 3 samples among 4 ones.

**Keywords**: Wireless sensor networks, Data reduction, Temporal suppression, Energy efficiency

## I. 서론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Networks, WSNs<sup>[1]</sup>)는 넓은 지역에 분포된 다수의 소형 센서 노드(Sensor node)를 이용하여 센서 노드 주변의 물리량

\* 정회원, 국방과학연구소

(Agency for Defense Development)

\*\* 평생회원-교신기자, 충남대학교 정보통신공학과

(Department of Information Communications Engineering, Chungnam National University)

접수일자: 2012년8월4일, 수정완료일: 2012년10월10일

또는 이벤트 정보를 연속적으로 모니터링 할 수 있으며, 그 응용 분야도 확장되고 있다<sup>[2~3]</sup>. 또한, 센서 네트워크에서 대용량 데이터 전송에 대한 에너지 효율성과 실시간성도 요구되고 있다.<sup>[7]</sup>

센서 네트워크에서 효율적인 에너지 사용은 네트워크 설계, 센서 노드의 배치, 네트워크 수명 등과 밀접한 관련이 있는 중요한 문제이다. 일반적으로 센서 네트워크에서 센서 노드는 배터리로 동작하며 많은 운용 환경에서 배터리 교체는 실질적으로 불가능하다. 센서 노드의 에너지가 모두 소모하게 되면 더 이상 데이터 수집 또는 라우팅과 같은 작업을 할 수 없어 센서 네트워크의 주어진 임무 수행에 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 이러한 센서 노드의 에너지 제한성을 해결하기 위한 연구가 지속적으로 이뤄지고 있으며, 특히 센서 네트워크에서 통신 관련 부분이 에너지 소비의 주요인<sup>[4]</sup>이므로 통신에 소모되는 에너지를 줄이기 위해 다양한 기법이 제안되었다.

본 논문에서는 센서 노드에서 전송하는 데이터 통신량을 감소시켜 에너지 효율성을 증대시키며, 전송 지연 시간 단축 효과를 얻을 수 있는 데이터 절감 기법을 제안한다.

센서 네트워크에서 통신 관련 부분의 에너지를 보존시키는 방안은 크게 2가지로 구분 된다<sup>[5]</sup>. 첫 번째는 센서 노드의 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 토폴로지 제어 또는 전력 관리를 수행하는 duty-cycling 기법이며, 두 번째는 센서 노드에서 샘플링 비율을 조절하거나 data reduction 기법을 통하여 싱크 노드로 전송되는 데이터 전송량을 감소시키는 data-driven 방식이다. Data reduction 기법은 센서 노드에서 수집된 측정값이 갖는 시간적, 공간적 상관관계를 이용하여 중복되는 정보를 제거함으로써, 센서 노드에서 싱크 노드로 전송되는 데이터 량을 감소시키는 방식이다. 센서 노드에서 주변 환경을 연속적으로 모니터링 하는 경우 현재 측정값은 이전에 관측된 값과 동일하거나 큰 변화가 없는 시간적 상관관계(temporal correlation)를 갖게 된다. 정밀계측의 경우 샘플링 이론에서 요구하는 Nyquist 주파수의 2배 보다 큰 5~10배의 샘플링 주파수로 측정<sup>[6]</sup>하게 되므로, 측정 데이터의 시간적 상관성이 매우 높다. 또한, 근접한 센서 노드 사이에서 동일한 시간에 측정된 데이터는 측정된 값의 변화 패턴이 동일하거나 유사한 공간적 상관관계(spatial correlation)를 갖게 된다.

본 논문에서는 제안하는 적응적 데이터 제한기법(Adaptive Temporal Suppression(ATS))은 data reduction 기법 중의 하나인 시간적 데이터 제한(temporal suppression) 방식<sup>[11~13]</sup>을 기반으로 하며, 기존 연구와 달리 측정환경에 대한 사전정보와 측정 신호의 통계적 모델링 또는 복잡한 알고리즘 등이 요구되지 않는다.

적응적 데이터 제한기법은 센서 노드에서 측정된 값들이 갖는 높은 시간적 상관관계를 이용하여 일부 측정값이 전송되지 않아도 싱크 노드에서 충분히 복원할 수 있다는 점을 이용하였다. 센서 노드의 측정값을 작은 구간(측정 윈도우)로 나누고, 각 구간에서 측정값의 복잡도에 따라 싱크 노드로 전송하는 측정값의 개수를 다르게 한다. 측정 윈도우 내에서 측정값의 변화가 크면 싱크 노드로 전송되는 측정값의 개수를 많게 하고, 변화가 적으면 전송되는 측정값의 개수를 적게 한다. 측정 윈도우의 내에서 신호의 변화 정도는 기울기 변화량의 절대값이 임계치를 벗어나는 측정점의 개수를 기준으로 하였다. 윈도우 내에서 측정점들의 기울기 변화량이 작다는 것은 신호의 기울기가 일정하다는 것을 의미하므로, 수신단에서는 측정값의 일부분만 수신하여도 보간법을 통하여 전송되지 않은 신호를 충분히 복원할 수 있다. 측정된 신호의 변동폭이 큰 경우 싱크 노드로 전송되는 측정값의 개수를 증가시킴으로써 데이터 복원 오차를 적게 하였다. 즉, 적응적 데이터 제한기법은 센서 측정 신호의 특성에 기반하여 싱크 노드로 전송되는 데이터의 개수를 조정하여 동적인 데이터는 누락 비율을 줄이고, 정적인 데이터는 더 많이 감소시켜 전송함으로써, 센서 노드의 소모 전력 감소를 통한 수명 연장 및 네트워크 점유 시간 감소 등 제한된 네트워크를 효율적으로 사용할 수 있다. 또한 적응적 데이터 제한 기법의 성능 평가를 위하여 실제 4종의 센서에서 측정된 값에 대하여 모의실험을 수행하였으며, 3종의 측정값에서 6.8% 왜곡률에서 전송되는 측정값의 개수가 90%감소하는 효과를 얻었다.

본 논문에서는 제안한 적응적 데이터 제한 기법은 센서 노드의 샘플링 비율은 일정하게 유지하면서, 모든 데이터를 측정 후 필요한 측정값을 전송하는 기법으로 정의한다.

본 논문의 II장에서는 무선 센서 네트워크에서 데이터 전송 감소기법에 대한 관련 연구를 살펴보고, III장

에서는 제안하는 적응적 데이터 제한 기법과 보간법을 이용한 데이터 복원에 대하여 설명한다. IV장에서는 모의실험을 통해 제안하는 알고리즘의 성능을 평가한다. 마지막 V장에서는 결론을 맺고 향후 연구 주제에 관해 기술한다.

## II. 관련 연구

무선 센서 네트워크 환경에서 효율적인 데이터 전송을 위하여 다양한 기법들이 제안되었으며, 데이터 전송량을 감소시켜 에너지 효율성을 높이는 data-driven 기법은 data reduction 기법과 energy-efficient data acquisition 기법으로 나뉜다<sup>[5]</sup>. Data reduction 기법은 센서의 측정값이 갖는 시간적 공간적 상관관계를 이용하여 오차 범위 내에서 불필요한 측정값을 제거하는 방식이며, energy-efficient data acquisition 기법은 적응적 샘플링과 같이 센서에서 물리량을 측정하는데 소모되는 에너지의 감소를 목표로 한다. data reduction 기법은 인-네트워크 처리 기법(in-network processing), 데이터 압축 기법(data compression), 데이터 예측기법(data prediction)<sup>[9~13]</sup>으로 분류된다. 데이터 제한(data suppression) 기법<sup>[11~13]</sup>은 시계열(time series) 예측과 같은 데이터 예측 방식으로 분류할 수 있다.

### 1. 인-네트워크 처리(In-network processing)

인네트워크 처리는 데이터를 싱크 노드로 전송하는 과정에서 병합(data aggregation)하는 기법이다<sup>[15~16, 18]</sup>. 데이터 병합 기법은 개별 센서 노드보다는 전체 네트워크 관점에서 전송되는 데이터 량을 감소시킨다는 점이 데이터 제한 또는 예측 기법과는 다른 측면이 있으나, 전송량 감소에 압축 또는 예측 기법을 병행하여 사용하기도 한다.

공간적으로 인접한 센서 노드들은 공간적 상관관계가 높으므로 각각의 센서들이 싱크 노드로 데이터를 전송하는 것보다 네트워크 내부에서 데이터를 병합한 후 전송하는 것이 더 효율적이다. 센서 노드들이 클러스터를 형성하고, 각 클러스터의 멤버 노드들은 자신의 클러스터 헤드 노드에게 자신의 데이터를 전송하며, 클러스터 헤드 노드는 수집된 멤버 노드들의 데이터에 나타나는 중복성을 제거함으로써 싱크 노드로 전송되는 데이터를 감소시킨다.<sup>[16]</sup>

### 2. 데이터 압축(Data compression)

데이터 압축 기법은 기존의 압축 기법을 무선 센서 네트워크에 적용한 것으로, 센서 노드에서 전송되는 측정값의 개수가 아니라 정보를 감소시켜 센서 노드의 데이터 전송량을 줄이는 것이다. 데이터 압축 기법을 적용하기 위해서는 각 센서노드에서 수집한 데이터를 부호화(encoding)하고 싱크 노드에서는 복호화(decoding)하는 과정이 필요하다.<sup>[8]</sup>

### 3. 데이터 예측(Data prediction)

데이터 예측 기법은 싱크 노드에서 센서 노드로부터 전송되는 데이터를 예측하여 센서 노드의 전송 데이터를 제한함으로써 에너지 효율성은 높이는 기법이다.<sup>[9~13]</sup>

시간적 데이터 제한기법(temporal suppression)<sup>[11~13]</sup>은 가장 간단한 방식으로 특정한 모델을 사용하지 않으며, 현재 측정값이 마지막으로 전송한 측정값과 다른 경우에만 싱크 노드로 데이터를 전송한다. 사용자가 설정한 오차범위를 벗어나는 경우에만 센서 측정값을 지국으로 전송하는 방법<sup>[18]</sup>도 제안되었다. 시간적 데이터 제한기법에서 사용하는 허용범위는 고정 상수이므로, 측정값이 연속적으로 크게 변동하거나, 허용범위를 설정해야하는 상수를 알 수 없는 경우, 데이터를 모두 전송하게 되거나, 전송을 완전히 할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 또한, 전송 구간에서 충돌이 발생하여도 싱크 노드는 이 상황을 인지하지 못하고 마지막으로 수신 값을 현재 값으로 계속 업데이트하는 단점이 있다.

확률 모델을 사용한 방식<sup>[12]</sup>은 센서 노드와 싱크 노드가 동기화된 2가지 확률모델을 이용하며, 학습 단계(learning phase)에서 모델 파라미터를 추정하게 된다. 이러한 모델을 기반으로 노드와 싱크 노드는 수집되는 데이터에 대하여 동일한 예측을 수행한다. 센서 노드는 실제 데이터를 수집하고 예측값과 비교하며, 실측값과 예측값이 사용자가 정의한 오차보다 큰 경우에만 노드는 실측값을 싱크 노드로 전송하고, 그렇지 않은 경우에는 수집된 데이터를 제한하게 된다. 이 기법은 측정값의 변화가 빈번히 크게 발생하는 경우 데이터를 계속하여 전송하게 되므로 전송량 감소효과가 낮아지는 단점이 있다.

통계에서 사용되는 이동평균(Moving Average(MA)), 자기회귀(Auto-Regressive(AR)), 자기회귀 이동평균

(Auto-regressive Moving Average(ARMA)) 모델을 이용한 시계열 예측(time series forecasting)기반의 데이터 예측 기법<sup>[10, 13, 17]</sup>도 제안되었다. Probabilistic Adaptive Query(PAQ)<sup>[13]</sup>는 시계열 예측 기반으로 싱크 노드로 전송되는 데이터를 제한하기 위하여 센서 별로 자기회귀(AR) 모델을 사용한다. 이 방식도 센서 노드별로 학습 단계를 통하여 AR 모델 계수와 같은 파라미터를 결정하고 싱크 노드로 전송한다. 센서 노드에서는 모니터링 윈도우를 설정하고 이 구간 동안에 오차범위를 벗어나는 값의 개수가 임계치보다 크면 모델 파라미터를 재설정하여 싱크 노드로 전송함으로써 싱크 노드가 설정된 오차 범위 안에서 측정값을 예측할 수 있도록 한다. PAQ는 AR 기반의 예측모델을 생성하는 학습 단계가 길다는 단점이 있다.

여러 가지 모델을 적응적으로 선택하여 시계열 예측을 할 수 있도록 한 방식<sup>[17]</sup>도 제안되었으며, 시스템이 자체적으로 상황에 따라 적절한 모델을 선택한다. 노드는 주어진 상황에 따라 하나의 모델을 선택하여 데이터 예측에 사용한다. 오차가 임계치보다 커지면 요구되는 정확도를 만족하면서 업데이트 비용이 적게 드는 새로운 모델로 변경된다. 데이터 예측 방식에서 보다 더 정확한 예측 모델은 알고리즘의 복잡도와 요구되는 파라미터가 증가하는 경향이 있으며, 센서 노드에서는 신호 처리에 더 많은 에너지를 소모하게 된다.

### III. 적응적 데이터 제한 기법

본 논문에서 제안하는 적응적 데이터 제한 기법은 센서 노드의 측정값 사이의 시간적 상관관계를 이용한다. 적응적 데이터 제한 기법은 그림 1에 나타난 것과 같이 센서 노드와 싱크 노드에서 크게 8단계로 적용된다. 센서 노드의 측정값들을 시간의 흐름에 따라 작은 구간으로 나뉘지며, 각 구간에서는 측정값들의 변화 정도에 따라 적응적 데이터 제한기법이 적용되어 싱크 노드로 전송되고, 싱크 노드에서는 선형 보간법을 이용하여 원래 센서 노드의 측정값을 복원하게 된다.

Step 1(초기화 단계)에서는 적응적 데이터 제한 기법이 적용되는 구간의 크기(window size =  $k$ )와 임계치의 크기에 영향을 끼치는  $CF$  값을 설정한다. 식(7)과 같이  $CF$  값이 커질수록 임계치가 커지므로 전송되는 측정값의 수는 줄어들게 된다.

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} W_1 &= \{s_1, s_2, \dots, s_k\} = \{s_1(1), \dots, s_1(k)\} \\ W_2 &= \{s_{k+1}, s_{k+2}, \dots, s_{2k}\} = \{s_2(1), \dots, s_2(k)\} \\ &\vdots \\ W_m &= \{s_{(m-1)k+1}, s_{(m-1)k+2}, \dots, s_{mk}\} \\ &= \{s_m(1), s_m(2), \dots, s_m(i), \dots, s_m(k)\} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2)$$

Step 2는 초기화 단계에서 설정한 윈도우 크기에 따라 센서 노드의 측정값을 분리하는 단계로서, 윈도우 크기  $k$  만큼 분리된 측정값들의 집합은 식(2)같이 나타낼 수 있다. 식(1)의  $S$ 와 식(2)의  $W_m$ 은 전체 측정데이터와  $m$ 번째 측정 윈도우의 측정값의 집합이며,  $s_m(i)$ 는  $m$ 번째 윈도우에서  $i$ 번째 지점의 측정값을 나타낸다. 첫 번째 측정 윈도우에서는 모든 값( $W_1$ )을 싱크 노드로 전송하며, 두 번째 측정 윈도우부터 적응적 데이터 제한 알고리즘이 적용된다.

Step 3은 임계치 계산(threshold calculation) 단계로서 다음 윈도우( $m+1$  번째 윈도우)에서 사용하는 임계

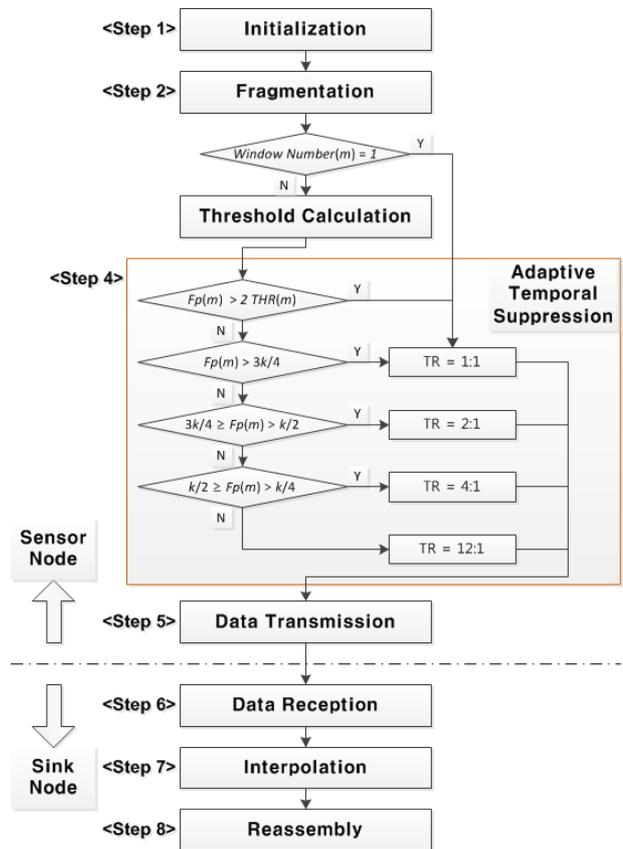


그림 1. 적응적 데이터 제한 알고리즘  
Fig. 1. Algorithm of adaptive temporal suppression.

치가 계산되며, 각 측정점에 대한 기울기 변화량의 절대값과 이 값들에 대한 평균을 계산하여야 한다.  $m$  번째 윈도우에서  $i$  번째 지점의 기울기  $g_m(i)$ 와 기울기 변화량의 절대값  $v_m(i)$ 는 식(3)과 식(4)와 같다. 임계치는 식(7)과 같이 각 윈도우 내의 측정 점에서의 기울기의 변화량에 대한 절대 값들에 대한 평균과  $CF$  값을 곱하여 계산한다. 각 윈도우의 앞 두 지점에서의 기울기 변화량은  $s_m(0) = s_{m-1}(k)$ 와  $s_m(-1) = s_{m-1}(k-1)$ 와 같이 이전 윈도우의 마지막 두 측정값을 이용하여 식(5)와 식(6)과 같이 계산한다. 첫 번째 윈도우의 앞 두 지점은 기울기 변화량을 구할 수 없으므로 계속하여 같은 값을 측정된 것으로 가정한다. 즉, 기울기와 기울기 변화량을  $g_1(1) = 0, v_1(1) = 0$ 로 계산한다.

$$g_m(i) = s_m(i) - s_m(i-1) \quad (3)$$

$$v_m(i) = |g_m(i) - g_m(i-1)| \\ = |s_m(i) - 2s_m(i-1) + s_m(i-2)| \quad (4)$$

$$v_m(1) = |s_m(1) - 2s_m(0) + s_m(-1)| \\ = |s_m(1) - 2s_{m-1}(k) + s_{m-1}(k-1)| \quad (5)$$

$$v_m(2) = |s_m(2) - 2s_m(1) + s_m(0)| \\ = |s_m(2) - 2s_m(1) + s_{m-1}(k)| \quad (6)$$

$$THR(m+1) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j v_m(i) \times CF \quad (7)$$

Step 4는 적응적 데이터 제한 알고리즘이 적용되는 단계로서, 측정 윈도우의 복잡도와 전송되는 측정값의 비율을 식(9)와 같이 4가지로 구분하였다. 식(8)과 같이 각 측정점에서의 기울기 변화량의 절대값이 임계치 보다 크면 그 점을 기울기 변동점(gradient fluctuation point)으로 지정한다. 측정 윈도우 내에서 변동점이 없으면 측정값이 선형적으로 변화한다는 것을 의미하며, 변동점이 많으면 신호의 변화가 크다는 의미가 된다. 각각의 측정 윈도우의 복잡도는 기울기 변동점의 개수에 따라 결정되며, 이에 따른 싱크 노드로의 데이터 전송 비율은 식(9)와 같다. 복잡도가 낮은 구간은 전송 비율을 낮게 하고, 높으면 전송 비율을 높여서 더 많은 측정값을 전송한다. 각 윈도우의 첫 번째와 두 번째 측정점의 기울기 변화량의 절대값은 임계치 계산 단계에서와 마찬가지로 식(5)와 식(6)을 이용한다.

$$v_m(i) = |g_m(i) - g_m(i-1)| > THR(m) \quad (8)$$

$$TR = \begin{cases} 1:1 & \text{if } F_p(m) \geq 3k/4 \text{ or} \\ & \max(v_m(i)) > 2THR(m) \\ 2:1 & \text{if } 3k/4 > F_p(m) \geq k/2 \\ 4:1 & \text{if } k/2 > F_p(m) \geq k/4 \\ 12:1 & \text{if } k/4 > F_p(m) \end{cases} \quad (9)$$

식(9)에서  $TR$ 은 싱크 노드로 전송되는 비율이고, 측정 윈도우 안의  $F_p$ 는 기울기 변동점의 총 개수이다. 윈도우 안에서 기울기 변화량의 절대값이 임계치의 2배보다 큰 것이 하나라도 있거나, 기울기 변동점의 개수가  $3k/4$ 이상이면, 윈도우 내의 측정값들이 급격히 변화하는 것으로 판단하여 윈도우 내의 모든 값을 싱크 노드로 전송한다. 해당 윈도우의 기울기 변동점 개수에 따라 싱크 노드로 전송되는 측정값의 개수를 각각 1:1, 2:1, 4:1, 12:1로 제한함으로써 효과적인 전송량 감소효과를 얻을 수 있다.

Step 5와 Step 6은 센서 노드와 싱크 노드에서 데이터를 송수신하는 단계이다.

Step 7은 싱크 노드에서 데이터를 복원하는 단계로서 각 측정 윈도우 별로 측정값이 복원된다. 싱크 노드에서 수신한 데이터는 적응적 데이터 제한 알고리즘이 적용된 것이므로 각 측정 윈도우의 누락된 측정값 복원을 위하여 보간법을 사용하였다. 선형 보간법과 3차 spline 보간법을 적용하여 비교하였으나 결과에 큰 차이가 없었으며, 성능 분석에서는 계산량이 간단한 선형 보간법을 이용하였다.

Step 8은 측정 윈도우 별로 구분되어 있는 데이터를 재조립하는 단계이다.

그림 2는 제안하는 적응적 데이터 제한기법의 동작 원리를 나타낸 것으로, 그림 2(a)는 센서노드의 측정값과 싱크 노드에서 복원되는 값을 같이 표현한 것이다. 그림 2(b)는 그림2(a)의 일부 구간을 확대한 것으로, 실제 측정값, 싱크 노드에서의 복원값, 싱크 노드로 전송되는 측정값을 같이 나타낸 것이다. 그림2(b)에서는 구간 별로 측정 윈도우의 기울기의 변화 정도에 따라서 전송되는 측정값의 개수 즉, 전송 비율이 달라짐을 볼 수 있다. 복잡도가 작은 윈도우는 측정값의 전송 비율이 낮고, 복잡도가 높으면 전송 비율이 높아진다. 그림 2(c)는 실제 측정값과 싱크 노드에서 복원된 값의 차이를 나타낸 것으로 센서의 측정 범위(-50mV~+50mV)를 기준으로 하였을 때 매우 작은 값을 알 수 있다.

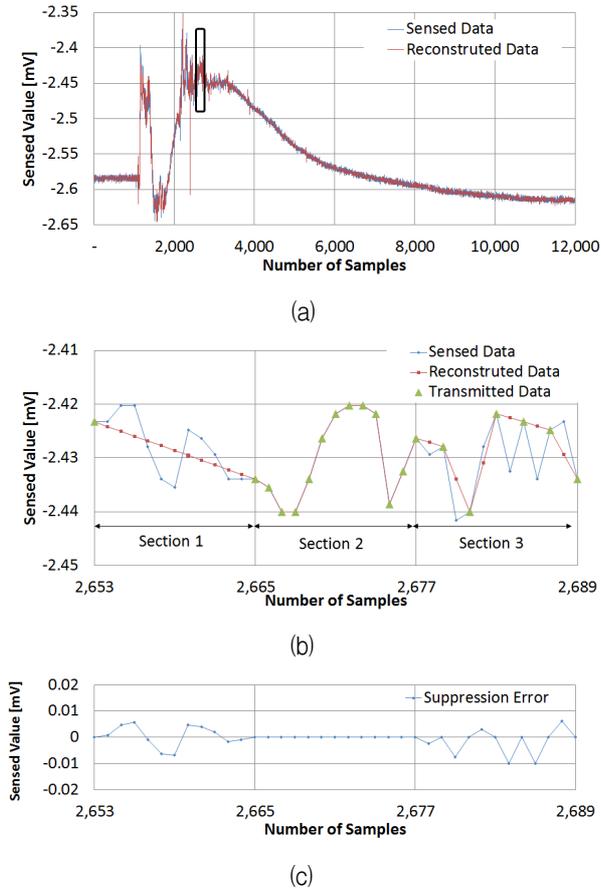


그림 2. 적응적 데이터 제한 알고리즘을 이용한 데이터 전송 : (a) 실제 측정값과 복원 값, (b) 실제 측정값, 복원 값, 전송되는 측정값, (c) 오차

Fig. 2. Adaptive temporal suppression : (a) real and reconstructed sensor readings, (b) real, reconstructed, and transmitted sensor readings, (c) suppression error.

### III. 모의실험 결과

본 논문에서 제안하는 적응적 데이터 제한 기법의 성능 평가를 위하여 표 1과 같이 실측을 통하여 획득된 4 종류의 데이터를 모의실험에 사용하였다.

표 1. 실측 데이터의 종류

Table 1. Type of real sensor readings.

표기	데이터 종류	측정범위	샘플율
Sample 1	스트레인	-50mv ~ +50mV	1kHz
Sample 2	압력1	-50mv ~ +50mV	1kHz
Sample 3	압력2	-10V ~ +10V	1MHz
Sample 4	음압	-1000Pa ~ +1000Pa	200kHz

센서 노드의 에너지 절감을 위한 전송량 감소 기법 중에서 데이터 예측 기법, 손실 압축 기법 등은 센서 노드에서 측정된 모든 데이터가 싱크 노드로 전송되지 않기 때문에 데이터가 손실되는 과정에서 데이터 품질의 저하가 발생할 수 있으므로 데이터 품질에 관한 영향을 평가해야한다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 평가를 위하여 센서 노드의 측정값과 싱크 노드에서 보간법을 통하여 복원된 값에 대하여 Root Mean Square Error(RMSE), Mean Absolute Error(MAE), 왜곡률(distortion ratio), Index Of Agreement(IOA), 전송비율을 비교분석 하였다. RMSE는 복원된 값과 실제 측정값이 평균적으로 얼마 정도의 차이(error)가 나는지 나타내며, MAE는 측정값과 복원값 사이의 오차의 절대값에 대한 평균으로 측정값과 같은 단위를 갖는다. 왜곡률은 복원된 데이터와 원래 데이터 사이의 왜곡 정도를 나타낸다. IOA는 측정값과 복원값의 변화 정도에 대한 일치도를 나타내지만, 오차를 설명하지는 못한다. RMSE와 MAE 및 왜곡률은 0에 가까울수록 측정값과 복원값이 서로 유사하다는 것을 의미하며, IOA는 값이 1에 가까울수록 일치도가 높음을 의미한다. 또한, 센서 노드에서 싱크 노드로 전송되는 측정값의 비율을 나타내는 전송비율(TR)을 계산하였다. 전송비율은 0에 가까울수록 데이터 전송량 감소 효과가 높음을 나타낸다. 사용하는 데이터의 단위 및 측정 범위가 다르므로 RMSE는 데이터 별로 분석하였으며, 전송비율에 대하여 왜곡률과 IOA를 종합적으로 분석하였다. 각각의 데이터 품질 지수의 계산식은 아래와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - s_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i - s_i| \quad (11)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|r_i - \bar{S}| + |s_i - \bar{S}|)} \quad (12)$$

$$DR = \frac{\|S - R\|}{\|S\|} \times 100[\%] \quad (13)$$

$$TR = \frac{\text{전송되는 측정값의 개수}}{\text{센서 노드의 측정값의 개수}} \times 100[\%] \quad (14)$$

$S$ 와  $R$ 은 센서 노드의 측정값과 싱크 노드의 복원값들의 집합을 나타내며,  $s_i$ 와  $r_i$ 는  $i$ 번째 측정점의 측정값과 복원값을 각각 나타낸다.  $\bar{S}$ 는 측정값들의 평균을 의미하며,  $n$ 은 측정 점의 개수를 의미한다.

우선 본 논문에서 제안하는 적응적 데이터 제한기법은  $CF$  값이 커짐에 따라 전송량 감소효과가 커지므로  $CF$  값을 1에서 20까지 증가시키면서 센서 노드에서 싱크 노드로 전송되는 측정값의 전송 비율(TR)을 파악하였다. 그림 3은 Sample 1에서 Sample 4까지  $CF$  값에 따른 전송비율(TR)을 나타낸 것으로,  $CF$  값이 커짐에 따라, 즉, 임계치가 증가함에 따라 센서 노드에서 전송되는 측정값의 수가 감소함을 알 수 있다. 각 측정 윈도우에서 최소한 한 개의 측정값을 전송해야 하기 때문에  $CF$  값이 증가하여도 센서 노드의 측정값 전송비율은 비율은 일정 수준 이하로는 낮아지지 않으며, 최소 전송비율은  $100/k[\%]$ 로써 측정 윈도우의 크기( $k$ )에 따라 결정된다. 모의실험에서는 측정 윈도우의 크기를 12( $k=12$ )로 하였으며, 전송 비율은 8.3% 이상이 된다. 센서 노드에서는 싱크 노드로 데이터를 더 적게 전송하면서 데이터 품질을 유지해야 하므로 전송 비율에 따라

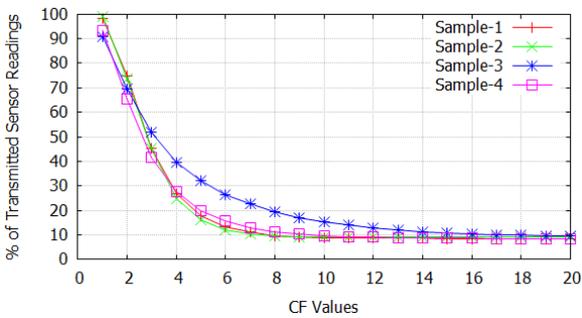


그림 3. CF 값에 따른 측정값의 전송 비율  
Fig. 3. Percentage of transmitted sensor readings according to CF values.

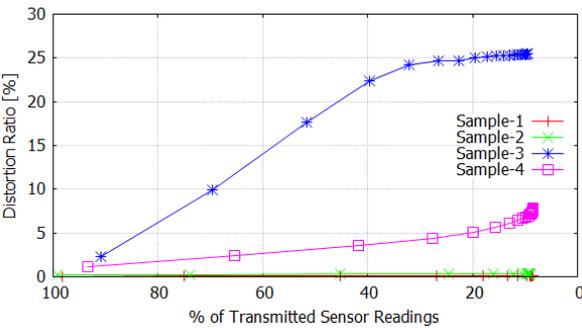


그림 4. 전송 비율에 따른 왜곡률  
Fig. 4. Distortion ratio according to transmission ratio.

데이터 품질을 분석하였다. 그림 4는 전송비율과 왜곡률 사이의 관계를 나타낸 것으로, 샘플 1, 2, 4는 전송비율이 20%까지 낮아져도 왜곡률이 5%안에 있음을 알 수 있다. 샘플 3은 50%의 전송비율에서 18% 정도의 왜곡률을 가진다.

표 2는 전송비율이 25%와 10%인 경우의 데이터 품질을 나타내며, MAE와 RMSE 역시 전체적으로 낮은 값을 유지한다. 1MHz의 샘플링 비율을 갖는 샘플 3과 같이 높은 주파수 성분을 포함하는 신호에 대해서는 왜곡률이 높게 나타나는 현상도 발생하였으나, 나머지 품질 지표들은 우수한 결과를 나타내었다.

그림 5는 전송 비율에 따른 측정값과 복원값 사이의 일치도를 나타내며 평균 IOA 값이 0.88 이상의 높은 값을 나타내었다. 그림 6은 샘플 1에서 4까지 센서 노드에서 측정된 데이터와 전송 비율 10%로 전송되어 싱크 노드에서 복원된 데이터를 나타낸 것으로 측정값과 복원값 사이에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

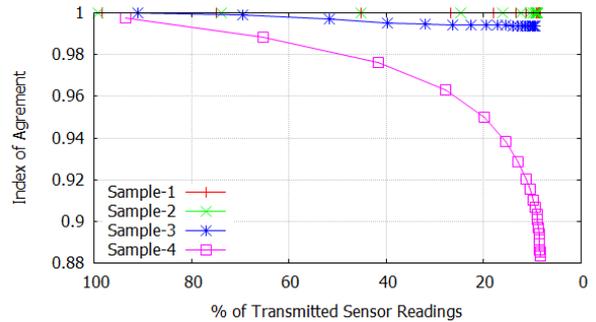


그림 5. 전송 비율에 따른 IOA 성능  
Fig. 5. Index of agreement performance according to transmission ratio.

표 2. 전송비율 10%와 25%에서의 복원 데이터의 품질  
Table 2. Data quality of reconstructed sensor readings at TR=25% and TR=10%.

전송 비율	Data	왜곡률	MAE	RMSE	IOA
25%	Sample-1	0.13	0.00198	0.00330	0.9998
	Sample-2	0.33	0.01107	0.02635	0.9999
	Sample-3	24.68	0.00447	0.01667	0.9941
	Sample-4	4.38	0.24031	0.76237	0.9633
10%	Sample-1	0.15	0.00243	0.00385	0.9998
	Sample-2	0.30	0.01128	0.02425	1.0000
	Sample-3	25.43	0.00551	0.01717	0.9938
	Sample-4	6.84	0.34428	1.18935	0.9105

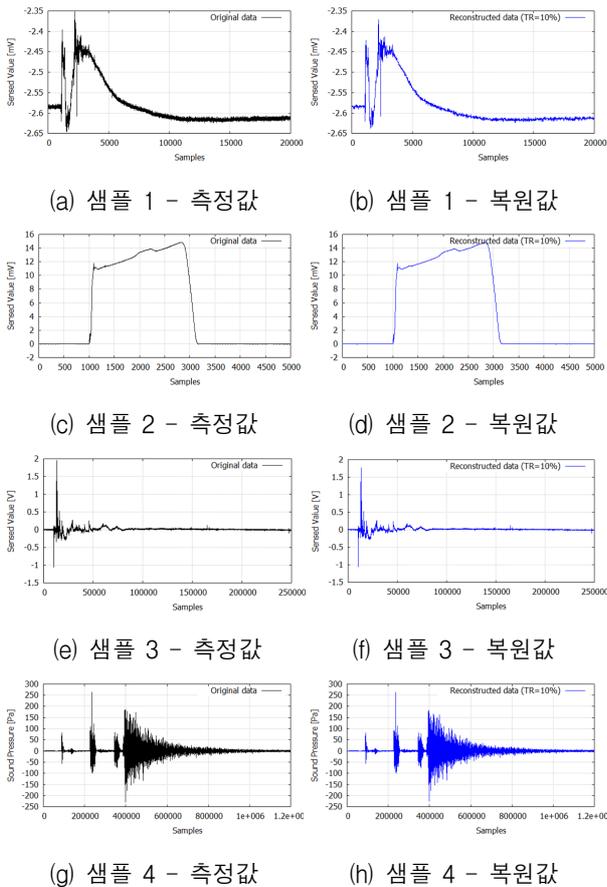


그림 6. 센서 측정값과 싱크 노드의 복원값  
Fig. 6. Real and reconstructed sensor readings (TR=10%).

모의실험 결과를 통하여 측정데이터가 시간영역에서 높은 상관관계를 가지는 경우, 제안하는 적응적 데이터 제한기법의 적용을 통하여 데이터 품질의 저하 없이 센서 노드에서 싱크 노드로 전송하는 데이터 양을 크게 감소시킬 수 있음을 확인 하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 데이터 전송량을 감소시켜 에너지 효율성을 높이고 통신 지연을 단축시킬 수 있는 적응적 데이터 제한기법을 제안하였다. 이 기법은 센서 노드의 측정값들이 갖는 높은 시간적 상관관계를 이용한 것으로 센서 노드에서는 시간적 데이터 제한기법을 기반으로 수집한 데이터의 복잡도에 따라 싱크 노드로 전송하는 측정값의 개수를 감소시키며, 싱크 노드에서는 선형 보간법을 통하여 누락된 데이터를 복원한다. 제안하는 기법은 전송량 감

소효과가 높아지더라도 데이터 품질의 큰 저하 없이 측정된 신호의 특성을 복원할 수 있으며, 단순한 알고리즘으로 측정 신호의 통계적 특성에 대한 사전 정보 또는 모델링이 필요 없고, 다양한 네트워크 토폴로지에 적용이 가능하다. 또한, 싱크 노드로부터의 피드백 정보를 이용하면 데이터 전송비율을 조정할 수 있는 특징을 갖는다. 성능 평가를 위하여 4종의 센서 측정값에 대하여 모의실험을 수행하였으며, 3종의 측정값에서 왜곡률 6.8%이하에서 전송되는 측정값의 개수가 90% 이상 감소하는 결과를 얻음으로써, 제안하는 알고리즘의 유효성을 확인하였다. 추후 연구과제는 테스트 베드를 구축하여 제안하는 기법을 센서 네트워크 응용 시스템에 적용하는 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal. "Wireless sensor network survey", *Computer Networks*, Vol. 52, Issue 12, pp. 2292 - 2330, August 2008.
- [2] 손호선, 박성승, 전서인, 류근호, "전장감시 센서네트워크시스템을 위한 온톨로지 기반 상황인식 프레임워크", *전자공학회논문지-CI* 48권, 제4호, 9-20쪽, 2011년 7월
- [3] 정인교, 김영준 박인수 이인성, "원격 진료를 위한 실시간 생체 신호 취득, 전송 및 압축, 저장 시스템 설계 및 구현", *전자공학회 논문지-SC*, 제45권 제4호, 42-50쪽, 2008년 7월
- [4] M. Stemm and R. H. Katz, "Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices", *IEICE Transactions on Communications*, vol. E80-B(8), pp. 1125 - 1131, 1997.
- [5] G. Anastasia, M. Contib, M. D. Francescoa, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey", *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, No. 3, pp. 537-568, 2009.
- [6] Aliasing and Sampling at Frequencies Above the Nyquist Frequency "<http://www.ni.com/white-paper/3000/en>" (접속일 2012.10.9. 16:00).
- [7] Y. Qian, Jeng-muk Kang, Jook-young Kim, Joon-ki Min, and Young-mi Kwon, "DTR-Filter: An Efficient Transmission Scheme for Real-Time Monitoring in Wireless Bulky Sensor Networks", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol 6935, pp. 90-97, 2011.
- [8] C. Tang, C. S. Raghavendra, "Compression

- techniques for wireless sensor networks”, *Chapter 10 in book Wireless Sensor Networks*, pp. 207-231, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [9] S. Santini, and K. Römer, “An adaptive strategy for quality-based data reduction in wireless sensor networks”, in *Proc. of the 3rd Int'l Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2006)*, pp. 29-36, Chicago, USA, June 2006.
- [10] C. Liu, K. Wu, and M. Tsao, “Energy Efficient Information Collection with the ARIMA Model in Wireless Sensor Networks”, in *Proc. from IEEE Globecom*, vol. 5, pp. 2470 - 2474, St Louis, USA, June 2005.
- [11] A. Silberstein, R. Braynard, G. Filpus, G. Puggioni, A. Gelfand, K. Munagala, and J. Yang, “Data Driven Processing in Sensor Networks,” in *the 3rd Biennial Conf. on Innovative Data Systems Research*, pp. 10-21. Asilomar, USA, January 2007.
- [12] D. Chu, A. Deshpande, J.M. Hellerstein, W. Hong, “Approximate Data Collection in Sensor Networks using Probabilistic Models”, in *Proc. of the 22nd International Conference on Data Engineering (ICDE06)*, pp. 48-59, Atlanta, USA, April 2006.
- [13] D. Tulone, S. Madden, “PAQ: Time series forecasting for approximate query answering in sensor networks”, in *Proc. of the 3rd European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN06)*, pp. 21-37, Zurich, Switzerland, February 2006.
- [14] D. Petrovic, R. Shah, K. Ramchandran, and J. Rabaey. “Data funneling: Routing with aggregation and compression for wireless sensor networks”, in *Proc. of the 2003 IEEE Sensor Network Protocols and Applications*, pp. 156-162, Anchorage, USA, May 2003.
- [15] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer, and M. Zorzi, “In Network Aggregation Technique for Wireless Sensor Networks: A Survey”, *Wireless Communications*, IEEE, Vol. 14, pp. 70-87, April 2007.
- [16] S. Patten, B. Krishnamachari, and R. Govindan. “The impact of spatial correlation on routing with compression in wireless sensor networks”. in *Proc. of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks (IPSN '04)*, pp. 28-35, Berkeley, USA, April 2004.
- [17] Y.-Ä. Le Borgne, S. Santini, G. Bontempi, “Adaptive Model Selection for Time Series Prediction in Wireless Sensor Networks”, *Signal Processing (Elsevier publisher)*, Vol. 87, Issue 12, pp. 3010-3020, December 2007.
- [18] M. Sharaf, J. Beaver, A. Labrinidis, and P. Chryanthi, “Tina: A scheme for temporal coherency-aware in-network aggregation”, in *Proc. of the 3rd ACM international workshop on Data engineering for wireless and mobile access(MobiDe'03)*, pp. 69-76, San Diego, USA, September 2003.

---

 저 자 소 개
 

---



민 준 기(정회원)  
 1994년 전북대학교  
 전기공학과 학사  
 1996년 전북대학교  
 전기공학과 석사  
 1996년~현재 국방과학연구소  
 선임연구원

<주관심분야 : WSN, Embedded Systems>



권 영 미(평생회원)-교신저자  
 1986년 서울대학교  
 컴퓨터공학과 학사  
 1988년 서울대학교  
 컴퓨터공학과 석사  
 1996년 서울대학교  
 컴퓨터공학과 박사

1993년~1995년 ETRI 연구원  
 1996년~2002년 목원대학교 컴퓨터공학과 조교수  
 2006년~2007년 Indian Statistica Institute  
 객원연구원  
 2002년~현재 충남대학교 정보통신공학과 교수  
 <주관심분야 : Internet Protocols, WSN,  
 Embedded Systems, Cloud Computing>