센서 데이터의 압축을 위한 시간 슬롯 할당 기법

(A Time Slot Assignment Scheme for Sensor Data Compression)

여 명 호 † (Myung Ho Yeo)
김 학 신 † (Hak Sin Kim)
박 형 순 † (Hyoung Soon Park)
유 재 수 †† (Jae Soo Yoo)

요 약 최근 환경 모니터링, 스마트 빌딩, 의료 분야, 농업 분야 등에서 센서 네트워크가 널리 활용되고 있다. 센서 노드는 배터리로 동작한다. 넓은 지역에 배포된 센서 노드의 배터리를 주기적으로 교체하는 것은 불가능하기 때문에 에너지는 센서 네트워크에서 가장 중요한 자원이다. 따라서, 센서 데이터를 수집하는 동안 네트워크 수명을 연장시키기 위한 에너지 효율적인 메커니즘에 대한 연구는 필수적이다. 대표적인 연구로는 송수신하는 데이터의 크기를 줄이기 위한 데이터 압축 기법과 통신간 충돌을 방지하여 에너지 사용의 효율을 높이기 위한 MAC 프로토콜 기법이 있다. 기존 데이터 압축 기법은 센서 데이터의 공간 또는 시간적인 연관성을 이용하며, 기존 MAC 프로토콜은 TDMA, FDMA, CDMA 등의 방법을 통해 데이터의 충돌을 방지한다. 본 논문에서는 MAC 프로토콜 중 하나로 널리 사용되고 있는 TDMA 스케줄을 조정하여 송수신되는 센서 데이터의 크기를 줄이는 새로운 압축 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 데이터 전송 시점을 이용하여 센서의 측정값을 인코딩하여 데이터의 크기를 줄이고, 동적으로 시간 슬롯을 할당함으로써 발생되는 전송 지연을 줄인다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 성능 평가를 수행하였으며, 실험 결과, 기존 데이터 수집 기법에 비해 통신 비용이 약 52% 감소하였다.

키워드 : 센서 네트워크, 압축, TDMA, MAC 프로토콜

Abstract Recently, wireless sensor networks have found their way into a wide variety of applications and systems with vastly varying requirements and characteristics such as environmental monitoring, smart spaces, medical applications, and precision agriculture. The sensor nodes are battery powered. Therefore, the energy is the most precious resource of a wireless sensor network since periodically replacing the battery of the nodes in large scale deployments is infeasible. Energy efficient mechanisms for gathering sensor readings are indispensable to prolong the lifetime of a sensor network as long as possible. There are two energy-efficient approaches to prolong the network lifetime in sensor networks. One is the compression scheme to reduce the size of sensor readings. When the communication conflict is occurred between two sensor nodes, the sender must try to retransmit its reading. The other is the MAC protocol to prevent the communication conflict. In this paper, we propose a novel approaches to reduce the size of the sensor readings in the MAC layer. The proposed scheme compresses sensor readings by allocating the time slots of the TDMA schedule to them dynamically. We also present a mathematical model to predict latency from collecting the sensor readings as the compression ratio is changed. In the simulation result, our proposed scheme reduces the communication cost by about 52% over the existing scheme.

Key words : Sensor network, Compression, TDMA, MAC Protocol

1. 서 론

최근 무선 통신과 MEMS 기술의 눈부신 발전으로 초소형, 고성능의 저렴한 스마트 센서의 개발이 가능하게 되었다. 이러한 스마트 센서는 센서 소자의 기능에 따라 다양한 정보를 수집하고, RF 통신을 통해 다른 센서 노드와 센서 네트워크(sensor network)를 구성한다 [1]. 무선 센서 네트워크(wireless sensor network)는 설치가 쉽고, 광범위한 영역의 온도, 습도, 가속도, 압력, 소리 등을 감지할 수 있는 장점을 가지고 있어 재해나 전쟁터, 사막과 같이 인간이 접근하기 힘든 지역에서 데이터를 수집하거나 감시하기 위한 용도로 사용된다. 예를 들면, 군사 응용 분야에서 전장의 상황을 감시하고,

· 이 논문은 2009년 교육과학기술부로부터 지원(지역거점연구단육성사업/충북BIT연구중심대학육성사업단)과 교육과학기술부 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임
· 이 논문은 2009 한국컴퓨터종합학술대회에서 '센서 데이터의 압축을 위한 시간 슬롯 할당 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

† 학생회원 : 충북대학교 정보통신공학과
mhyeo@netdb.cbnu.ac.kr
hskim@netdb.cbnu.ac.kr
soon@netdb.cbnu.ac.kr
†† 종신회원 : 충북대학교 정보통신공학과 교수
yjs@chungbuk.ac.kr
(Corresponding author임)

논문접수 : 2009년 8월 13일
심사완료 : 2009년 9월 29일

Copyright©2009 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 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제15권 제11호(2009.11)

핵 또는 화학 공격을 탐지하기 위한 목적으로 활용되고, 화재 및 홍수 감지, 토양 및 대기 상황 인지 등의 환경 모니터링 및 동물의 생태를 감시하기 위한 목적으로 사용된다[2]. 그러나 센서 노드는 연산, 저장 공간, 네트워크 대역폭과 배터리 사용의 제약을 가지고 있으며[3], 배포 환경의 특성상 센서 노드의 재사용이나 배터리의 교환/충전이 어렵기 때문에 센서 네트워크의 목적 달성과 동시에 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 기술에 대한 연구가 매우 중요하다.

여러 개의 통신 계층 중 MAC(Medium Access Control) 계층은 네트워크가 성공적으로 동작할 수 있도록 해주는 역할을 수행한다. 그리고 MAC 프로토콜은 가까이 있는 두 노드가 동시에 데이터를 전송하여 충돌이 일어나는 것을 방지해 준다. 기존 네트워크와 달리 센서 네트워크는 배터리의 용량이 작기 때문에 프로토콜의 설계에 있어서 에너지 소비를 최소화하여 네트워크의 수명을 늘리는 것이 우선시 된다. MAC 프로토콜에서 에너지의 낭비는 idle listening, 충돌, 프로토콜 오버헤드, 도청 때문에 발생한다. 이러한 특성을 고려하여, 무선 센서 네트워크를 위해 연구된 MAC 프로토콜은 S-MAC(Sensor-MAC)[4]과 같은 동기 방식의 프로토콜과 B-MAC[5]과 Wise-MAC[6] 같은 비동기 방식의 프로토콜 등이 있다.

센서 노드의 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 또 다른 접근은 전송하는 데이터 자체를 줄이는 것이다. 센서 노드는 데이터를 송수신하는 과정에서 대부분의 에너지를 소모하기 때문에 송수신에 사용되는 데이터의 크기를 줄이는 것이 필수적이다. 기존에 제안된 대부분의 데이터 압축 기법은 센서 데이터의 공간 또는 시간적인 연관성에 주목하고 있으며, 이러한 특성을 이용하여 송수신되는 데이터의 크기를 줄인다[7-9].

본 논문에서는 MAC 프로토콜 중 하나로 널리 사용되고 있는 TDMA 스케줄을 조정하여 송수신되는 센서 데이터의 크기를 줄이는 새로운 접근의 데이터 압축 기법을 제안한다. 데이터 전송 시점을 이용하여 센서의 측정값을 인코딩함으로써 데이터의 크기를 줄이고, 동적으로 시간 슬롯을 할당함으로써 발생되는 전송 지연을 줄인다. 본 논문에서 데이터의 압축과 전송 지연은 상충관계를 가지고 있음을 발견하고, 다양한 응용 분야에 적용 가능성을 미리 판단하기 위한 수학적인 분석을 수행한다. 시뮬레이션을 통해 성능평가를 수행하였으며, 제안하는 기법의 경우, 일정 범위의 전송의 지연이 발생하였지만, 일반적인 데이터 수집 과정에 비해 통신 비용이 약 52% 감소하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 센서 네트워크를 위한 데이터 압축 기법과 MAC 프로토콜에 대해 기술한다. 제3장에서는 제안하는 TDMA 스케줄링 기법의 특징과 데이터 전송 지연 문제를 해결하기 위한 방법을 기술한다. 제4장에서는 성능평가와 분석을 통해 제안하는 기법의 우수성을 보이고, 제5장에서는 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 관련연구

2.1 데이터 압축

데이터 압축은 네트워크의 트래픽을 줄이기 위한 전통적이고 효과적인 방법 중 하나이다. 센서 네트워크의 데이터는 네트워크 특성상 시간적 혹은 공간적 연관성을 지닌다[10]. 이러한 데이터 연관성을 이용하여 센서 데이터를 압축하기 위한 많은 연구들이 진행되었다. [7]에서 제안하는 시간적인 제한 기법은 센서 데이터의 오차 허용치를 미리 정하고, 수집한 데이터의 변화가 오차 범위보다 작은 경우 데이터를 기지국으로 전송하지 않는다. 이때, 데이터를 수신하지 않은 기지국은 시간적인 유사도 관점에서 해당 센서 노드의 현재 데이터가 마지막으로 보고된 데이터의 오차 허용치 범위에 있다고 판단한다. [8]은 이웃 노드의 공간적인 연관성을 이용하여 데이터를 압축한다. 모든 센서 노드들은 서로 다른 시간 슬롯(slot)을 할당 받고, 시간 슬롯에 따라 자신의 데이터를 기지국으로 전송한다. 센서 노드들은 자신의 시간 슬롯을 기다리는 동안 이웃 노드들이 기지국으로 전송하는 데이터를 도청한다. 이때, 도청한 모든 값에 대한 평균값을 계산하고, 자신의 값과 이 평균값을 비교하여 동일한 경우 데이터를 전송하지 않는다. [9]은 센서 노드들이 클러스터를 형성하고, 각 클러스터의 멤버 노드들은 자신의 클러스터 헤드 노드에게 자신의 데이터를 전송한다. 이때 클러스터 헤드 노드는 수집된 멤버 노드들의 데이터에서 중복된 데이터를 제거함으로써 데이터 압축을 수행한다. [10]는 수집된 데이터 유사성을 기반으로 클러스터를 생성하고, 클러스터 헤드에서 중복제거와 양자화를 통해 데이터 압축을 수행한다.

2.2 MAC 프로토콜

일반적으로 MAC 프로토콜은 크게 slotted protocol과 sampling protocol 두 가지로 나누어진다. slotted protocol 방식은 시간을 여러 슬롯들로 나누고, 각 슬롯을 기본 단위로 휴면 상태에 있을지 활동 상태로 동작할지를 결정하게 된다. 대표적으로 S-MAC과 T-MAC방식이 있다[4]. S-MAC과 T-MAC은 센서 노드들을 일정시간 휴면시킴으로써 불필요한 에너지 소비를 방지하여 낮은 duty cycle을 유지하는 동기 방식의 프로토콜이다. sampling protocol 방식으로 B-MAC[5]과 Wise-MAC[6] 등이 있다. B-MAC과 Wise-MAC은 일정 주기로 채널을 샘플링하여 데이터 전송 유무에 따라 통신 상태를 변화함으로써 저전력으로 동작한다.

B-MAC과 Wise-MAC은 Preamble Sampling을 통해 수신 노드를 깨우는 대표적인 비동기 방식의 프로토콜이다. 동기 방식은 센서 노드 간 duty cycle에 대한 동기화를 구현하는 방식이 복잡하여 비교적 구현이 단순한 비동기 방식의 MAC 프로토콜이 널리 이용되고 있다.

3. 제안하는 시간 슬롯 할당 기법

3.1 특징

제안하는 시간 슬롯 할당 기법은 데이터 수집을 위한 TDMA 스케줄링 기법에서 착안하여, 시간(또는 순서)의 개념을 활용하여 전송 데이터의 크기를 효과적으로 줄인다. 예를 들면, 한 라운드(센서 데이터를 수집하는 주기)의 TDMA 스케줄을 그림 1과 같이 2개의 프레임으로 구성한다고 하자. 프레임의 수와 담당 구간은 센서 배포시 사전 정의되며, 그림 1에서 프레임1과 프레임2는 각각 *0x0???, 0x1???* 로 시작하는 측정값을 수신하는 구간이다. 따라서, 센서 노드 S_1, S_2, S_3, S_4가 측정한 값이 각각 *{0x0000}, {0x1000}, {0x0100}, {0x1100}*와 같다고 할 때, 각 센서 노드는 측정값을 이용하여 프레임을 선택하고, 압축된 측정값을 전송한다. 즉, S_1과 S_3는 *프레임1*의 TDMA 스케줄을 이용하여 압축된 측정값 *{0x000}, {0x100}*을 전송하며, S_2와 S_4는 *프레임2*의 TDMA 스케줄을 이용하여 압축된 측정값 *{0x000}, {0x100}*을 전송한다. 측정값을 수신한 센서 노드는 수신 시점을 기준으로 원본 측정값을 복원하게 된다.

프레임의 수를 *n*개로 확장하게 되면 결국 센서 노드는 *1bit*의 메시지를 전송함으로써 자신의 측정값을 표현하게 된다. 전송하는 메시지의 크기는 *log(n) bit* 만큼 줄어들게 된다. 하지만, 하나의 TDMA 스케줄은 모든 센서 노드의 시간 슬롯을 유지하고 있기 때문에 측정값의 수집 시간은 식 (1)만큼 지연된다. 즉, 일반적인 TDMA스케줄링 기법을 사용할 때, 소요되는 측정값 수집 시간($T_{timeslot} * N$)의 *n*배만큼의 수집 시간을 필요로 한다. 이때, $T_{timeslot}$은 하나의 시간 슬롯에 할당된 시간을 의미하며, *N*은 센서 노드의 수, *n*은 TDMA 프레임의 수를 의미한다.

$$\{\text{측정값 수집 지연}\} = T_{timeslot} \cdot N \cdot (n-1) \quad (1)$$

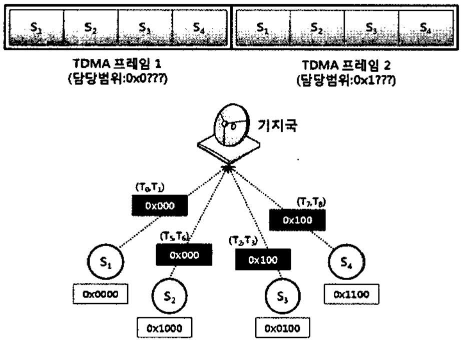

그림 1 2개의 프레임으로 구성된 TDMA 스케줄을 이용한 데이터 수집의 예

3.2 데이터 전송 지연 문제

데이터 전송 지연은 센서 네트워크의 응용에 따라 중요한 성능 요소가 된다. 따라서, 지연 문제를 해결하기 위해 측정값을 전송하기 이전에 그림 2와 같이 시간 슬롯의 사용 여부를 미리 판단하기 위한 전송 예약 슬롯(TRS: transmission reservation slot)을 구성한다. 각 프레임의 전송 예약 슬롯은 전체 센서 노드의 수와 동일하게 구성되며, 측정값보다 훨씬 작은 크기의 신호를 송·수신하게 된다. 센서 노드가 시간 슬롯을 할당 받고, 측정값을 전송하기 위해서는 전송 예약 슬롯을 통해 시간 슬롯 사용을 통보해야 한다. 예를 들면, 센서 노드 S_1과 S_3가 *TDMA 프레임1* 동안 측정값을 송신하기 위해서 각각 전송 예약 슬롯 R_1과 전송 예약 슬롯 R_3 동안 신호를 전송한다. *TDMA 프레임1*에 참여하지 않는 센서 노드 S_2와 S_4는 전송 예약 기간 동안 아무런 신호를 발생시키지 않는다. 전송 예약 신호를 수신한 센서 노드들은 수신 시점을 이용하여, 모든 센서 노드의 데이터 전송 여부를 파악하게 된다. *TDMA 프레임1*의 전송 예약 구간에서 센서 노드 S_1과 S_3는 전송 예약 신호를 송신하게 된다. 전송 예약 구간에서 모든 센서 노드는 신호를 수신할 수 있기 때문에, *TDMA 프레임1*에서 S_1과 S_3의 데이터 송신이 이루어지는 것을 인지하게 된다. 결국, *TDMA 프레임1* 에는 S_1과 S_3의 시간 슬롯이 할당된다. 이후, *TDMA 프레임2* 의 예약 구간에서 S_1과 S_3의 전송 예약 슬롯은 제거되며, S_2와 S_4가 전송에 참여하게 된다. 측정값을 수신하기 위한 TDMA 스케줄의 시간 슬롯은 전송 예약 구간에서 수신된 신호에 의해 동적으로 결정하게 된다.

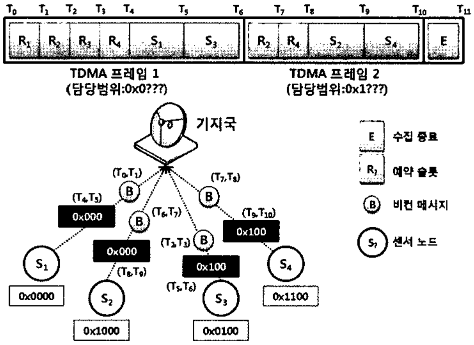

그림 2 제안하는 시간 슬롯 할당 기법의 예

3.3 비컨 전송을 이용한 확장 기법

TDMA 프레임의 수 확장하여 센서 노드가 시간 슬롯에서 *1bit*의 신호를 전송하게 되면, 전송 예약 슬롯과 시간 슬롯을 함께 사용하는 것 자체가 무의미해진다. 따라서, 응용에 따라 그림 3과 같이 전송 예약 슬롯만을 이용하여 측정값을 표현할 수도 있다. TDMA 프레임의 수를 *n*개로 확장할 때, 각 센서 노드가 전송하는 데이터의 크기는 *log(n)* bit만큼 줄어들게 되고, 모든 측정값을 수집하는데 식 (2)만큼 지연된다. 이때, $T_{reservation}$은 하나의 전송 예약 슬롯에 할당된 시간을 의미한다. 전송 예약 슬롯은 시간 슬롯과 달리 전송 여부를 파악하기 위한 짧은 신호를 송·수신하기 위한 시간을 할당한다. 따라서 확장 시간 슬롯 할당 기법은 기본 데이터 기반 시간 슬롯 할당 기법에 비해 지연 시간이 짧다.

$$T_{reservation} \cdot N \leq \{지연시간\} \leq T_{reservation} \cdot N \cdot n \quad (2)$$

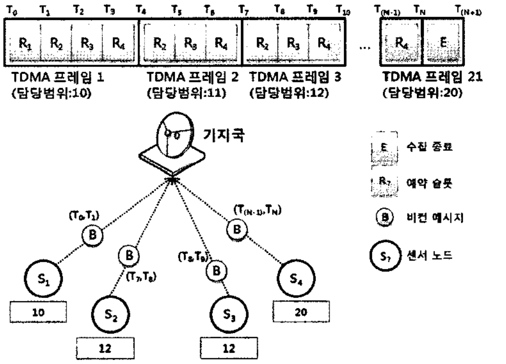

그림 3 전송 예약 슬롯만으로 구성된 스케줄링 기법

4. 성능 평가 및 분석

4.1 실험 환경

제안하는 기법의 우수성을 보이기 위해서 대표적인 데이터 수집 기법인 TAG를 기반으로 네트워크 트래픽과 네트워크 수명을 비교하였다. 실험에 사용한 데이터는 인텔 연구실[11]에서 1개월 동안 54개의 센서로부터 수집한 실제 환경 데이터이다. 중앙에 기지국이 위치한 *100m×100m*의 영역 공간을 가정하였으며, 임의로 54개의 센서 노드를 위치시키고 센서 노드는 다중-홉으로 통신한다고 가정하였다. 임의의 네트워크 토폴로지(network topology)에서 연결성을 보장하기 위해서 통신 반경은 18m로 설정하였다. 표 1은 임의로 구성된 1,000개의 센서 네트워크로부터 측정된 평균 중간 노드의 수, 평균 전송 거리이다. 센서 노드의 메시지 전송에 소모되는 에너지 모델은 *{메시지 크기}×({전송 비용}+{증폭 비용}×{거리})*이며, 전송 비용은 *50nJ/b*, 증폭 비용은 $100pJ/b/m^2$으로 설정하였다. 메시지 수신에 소모되는 에너지 모델은 *{메시지 크기}* × *{수신 비용}* 이며, 수신 비용은 *50nJ/b*으로 설정하였다.

표 1 네트워크 설정

센서 노드의 수(N)	54
평균 중간 노드의 수(N_{nl})	25.7
통신 반경	18m
평균 통신 홉수	4.26
센서 식별자, 측정값	4byte
시간 슬롯	2ms
전송 예약 슬롯	70us

4.2 통신 비용

그림 4는 센서 노드의 수에 따른 통신비용을 나타낸다. TAG와 제안하는 기법은 센서 노드의 수가 증가함에 따라 통신비용이 증가하지만 제안하는 기법의 통신비용은 약 52% 감소하였다.

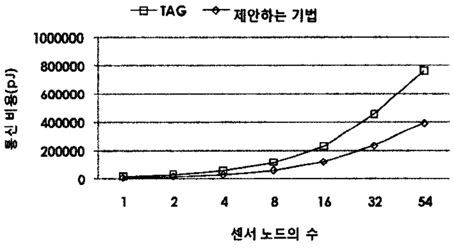

그림 4 통신 비용

4.3 네트워크 트래픽

그림 5는 데이터 수집 횟수에 따른 누적된 네트워크 트래픽의 크기를 나타낸다. 제안하는 기법의 경우, 압축된 정보를 전송하기 때문에 전체적으로 네트워크 트래픽이 줄어든다.

4.4 TDMA 프레임의 수

그림 6과 그림 7은 TDMA 프레임의 수에 따른 각각 데이터의 크기와 지연시간을 나타낸다. TDMA 프레임 수가 증가함에 따라 데이터의 크기는 log(N) bit만큼 작아지고, 지연시간은 증가한다. TDMA 프레임의 수를 4096으로 설정한 경우, 데이터의 크기는 12 bit만큼 감소하였고, TAG에 비해 최소 0.01초~최대 33분, 평균 약 16분의 지연시간을 보여준다. 즉, 데이터 압축과 전송 지연은 상충(tradeoff) 관계이며, TDMA 프레임을 구성함에 있어 그 지연시간의 범위를 예측할 수 있기 때문에 지연시간에 대한 응용 분야의 민감도에 따라 데이터의 압축을 고려할 수 있다.

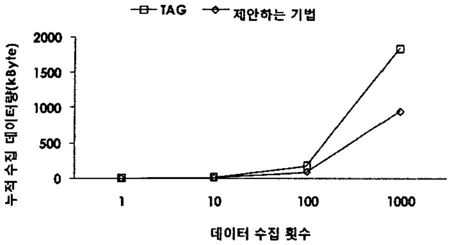

그림 5 네트워크 트래픽

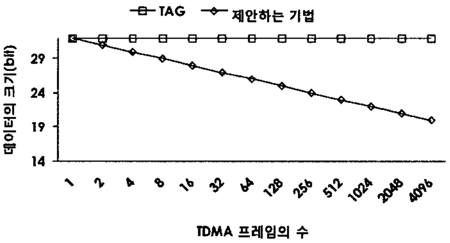

그림 6 데이터의 크기

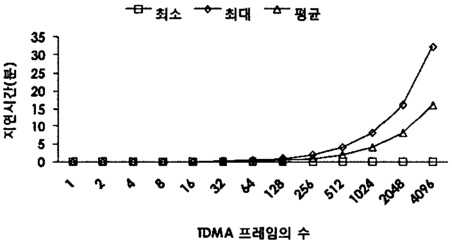

그림 7 지연시간(기준: TAG)

5. 결 론

본 논문에서는 센서 데이터를 압축하기 위해서 새로운 접근의 데이터 압축 기법을 제안하였다. 기존에 제안된 데이터 압축 기법은 센서 데이터의 공간 또는 시간적인 연관성을 이용하여 데이터 압축을 수행하지만, 제안하는 기법은 데이터 수집과정에서 사용되는 TDMA 스케줄을 변형하여 데이터 압축을 수행한다. 즉, 데이터 전송 시점을 이용하여 센서의 측정값을 인코딩하여, 동적으로 시간 슬롯을 할당함으로써 발생되는 전송 지연을 줄였다. 제안하는 기법은 특성상 데이터의 압축과 전송 지연은 상충관계를 가지고 있으며, 압축률에 따른 전송 지연의 시간을 예측할 수 있기 때문에 응용 분야에 따라 적합한 압축률을 미리 결정하여 사용할 수 있다. 향후 연구는 실제 응용 분야에 적용하여 실험을 수행하고, TDMA와 FDMA를 동시에 활용함으로써 전송 지연을 최소화하는 것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Ramaswamy, R. Rastogi, and K. Shim. "Efficient Algorithms for Mining Outliers from Large Data Sets," *Proceedings of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 427-438, 2000.

[2] A. Lazarevic and V. Kumar. "Feature Bagging for Outlier Detection," *Proceedings of the eleventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery in Data Mining*, pp.157-166, 2005.

[3] S. Subramaniam, T. Palpanas, D. Papadopoulos, V. Kalogeraki, and D. Gunopulos. "Online Outlier Detection in Sensor Data Using Non-Parametric Models," *Proceedings of the 32nd International Conference on Very Large Data Bases*, pp.187-198, 2006.

[4] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive sleeping for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol.12, no.3, pp.493-506, 2004.

[5] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.95-107, 2004.

[6] A. El-Hoiydi and J. Decotignie, "WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 9th International Symposium on Computer and Communications*, pp.244-251, 2004.

[7] M. Sharaf, J. Beaver, A. Labrinidis and P. Chrysanthis, "Tina: A Scheme for Temporal Coherency-Aware in-Network Aggregation," *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access*, pp. 69-76, 2003.

[8] X. Meng, L. Li, T. Nandagopal and S. Lu, "Event contour: An Efficient and Robust Mechanism for Tasks in Sensor Networks," Technical Report, UCLA, 2004.

[9] S. Pattem, B. Krishnamachari and R. Govindan, "The Impact of Spatial Correlation on Routing with Compression in Wireless Sensor Networks," ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), vol.4, no.4, 2004.

[10] 여명호, 이미숙, 박종국, 이석재, 유재수 "무선 센서 네트워크에서 네트워크 트래픽 감소를 위한 데이타 중심 클러스터링 알고리즘", *정보과학회논문지: 정보통신*, 제35권, 제2호, pp.139-148, 2008년 4월.

[11] Intel Lab Data, http://berkeley.intel-research.net/labdata/, 2004.