

센서 네트워크에서 계층적 필터링을 이용한 에너지 효율적인 데이터 집계연산

김진수*, 박찬흠**, 김종근***, 강병욱***

An Energy-Efficient Data Aggregation using Hierarchical Filtering in Sensor Network

Jin Su Kim *, Chan Heum Park **, Chong Gun Kim ***, Byung Wook Kang ***

요약

본 논문에서는 연속질의에 대한 집계연산을 수행할 때, 센서 네트워크의 수명을 길게 하기 위해 각 센서 및 클러스터 헤드에서의 데이터 전송량을 줄이기 위한 방법을 제안한다. 센서의 에너지 소모를 줄이는 가장 중요한 요소는 전송되는 메시지 수를 줄이는 것이다. 본 논문에서 제안하는 방법은 기본적으로 클러스터링, 네트워크 내 집계 및 계층적 필터링을 결합한 것이다. 계층적 필터링이란 센서 네트워크를 두 계층으로 나누어 필터링하는 것이다. 1계층 필터링은 클러스터 멤버에서 클러스터 헤드로 데이터를 전송시 필터링을 수행하고, 2계층 필터링은 클러스터 헤드에서 기지국으로 데이터를 전송시 필터링을 수행한다. 이 방법은 기존의 데이터 필터링 방법보다 더 효율적이고 효과적인 방법이다. 다양한 실험을 통해서, 제안한 방법이 다른 방법들보다 더 많은 메시지를 줄이고, 네트워크의 생존기간이 더 증가하였음을 보여준다.

Abstract

This paper proposes how to reduce the amount of data transmitted in each sensor and cluster head in order to lengthen the lifetime of sensor network by data aggregation of the continuous queries. The most important factor of reducing the sensor's energy dissipation is to reduce the amount of messages transmitted. The method proposed is basically to combine clustering, in-network data aggregation and hierarchical filtering. Hierarchical filtering is to divide sensor network by two tiers when filtering it. First tier performs filtering when transmitting the data from cluster member to cluster head, and second tier performs filtering when transmitting the data from cluster head to base station. This method is much more efficient and effective than the previous work. We show through various experiments that our scheme reduces the network traffic significantly and increases the network's lifetime than existing methods.

▶ Keyword : 센서 네트워크(Sensor Networks), 클러스터링(Clustering), 집계연산(Aggregation), 계층적 필터링(Hierarchical Filtering)

• 제1저자 : 김진수

• 접수일 : 2007.2.23, 심사일 : 2007.2.24, 심사완료일 : 2007. 3.19.

* 동명대학교 항만물류학부 교수, ** 영남대학교 박사과정

*** 영남대학교 컴퓨터공학과 교수

1. 서론

센서 네트워크는 최근에 중요한 컴퓨팅 플랫폼으로 출현되었다. 센서 네트워크는 기본적으로 센서 노드(sensor node)와 싱크 노드(sink node)로 구성된다. 센서 노드(예를 들어, Berkeley Motes 등)는 일반적으로 배터리를 이용하는 저가의 초소형 저전력 장치로 센싱을 위한 센서, 센싱 정보를 디지털 신호로 변환하기 위한 ADC (Analog to Digital Converter), 데이터 가공 처리를 위한 프로세서와 메모리, 전원 공급을 위한 배터리, 그리고 데이터 송수신을 위한 무선 트랜시버(transceiver) 등으로 구성된다. 센서 네트워크 내의 각각의 센서 노드에서 센싱된 데이터는 싱크 노드에 의하여 수집되어 인터넷 등의 외부 네트워크를 통하여 사용자에게 제공된다. 이 데이터에는 온도나 습도 같은 기상 데이터도 있을 수 있고, 소음이나 진동의 정도, 그리고 사물의 움직임 같은 데이터도 있을 수 있다.

센서 네트워크에서는 센서 필드에 많은 수의 노드가 밀집되어 분포하고 있으므로, 각 센서 노드는 전력 및 계산능력, 저장용량 등의 제약이 크다[1]. 또한, 한번 배터리를 충전된 센서 노드는 배터리 교체가 거의 불가능하므로 센서 네트워크에서는 에너지 효율이 가장 중요한 요소 중 하나가 된다. 센서 노드의 제한된 전력(power)으로 인해, 센서 네트워크에서의 통신은 에너지 소비를 최소화하여 네트워크의 수명을 길게 하는 것이 가장 큰 목표 중 하나이다.

에너지 소비를 줄여 네트워크의 수명을 길게 하는 연구들은 크게 세 가지 형태로 구분될 수 있다[2]. 첫째, 에너지 인지 및 전력 조절 프로토콜(energy-aware and power control protocol)을 사용하는 방법이고, 에너지에 기초한 적절한 통로(routes)를 선택하는 에너지 인지 라우팅 프로토콜[3]이 있다. 또한 네트워크 접속이 유지되는 동안 네트워크 용량을 증가시키기 위해 각 노드에서 송신 전력(transmission power level)을 조절[4]하거나, 클러스터링 및 각 센서의 잔존 에너지를 이용하여 에너지가 적은 센서의 작동을 줄임으로써 노드의 에너지를 효율적으로 관리하는 방법[5]이 있다. 둘째로, 데이터 집계 계산을 위해 센서 노드로부터 데이터를 받아 기지국(base station)에서 최종 계산하는 방법을 탈피하여 네트워크 내 집계연산(in-network aggrega-

tion)을 사용해서 센서들이 전송하는 양을 줄여주는 방법이 있다[7]. 셋째로, 필터링을 사용해서 데이터 전송 횟수를 줄이는 방법이다[9]. 센서 데이터는 그 값에 정확도가 부족해도 큰 문제가 되지 않는 경우가 많다. 즉, 질의 결과에 어느 정도의 오차를 인정할 수 있는 애플리케이션에 적용하는 경우이다[10].

본 논문에서는 연속질의에 대한 집계연산(SUM)을 수행할 때, 센서 네트워크의 수명을 길게 하기 위해 각 센서 및 클러스터 헤드에서의 전송량을 줄이기 위한 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 기본적으로 클러스터링, 네트워크 내 집계 및 계층적 필터링을 결합한 것이다. 즉, 기존에 제시된 LEACH[5] 등의 클러스터링 알고리즘을 기본으로 하여, 클러스터 내에서는 네트워크 내 집계와 필터링을 수행하여 클러스터 헤드에서 데이터를 집계하고, 그 데이터를 다시 필터링하는 과정을 거침으로써 센서 네트워크로부터 데이터를 수집할 때 각 센서의 데이터 전송 역제를 극대화하는 방안을 제시한다.

센서에서 데이터 필터링을 하기 위해서는 각 센서에 필터링 허용 범위가 할당되어야 하는데 각 센서에 대한 가중치 및 클러스터링을 이용하면 데이터 전송을 보다 효율적으로 감소시킬 수 있다. 질의 결과에 대해 허용 가능한 기본적인 필터링 허용 범위 및 가중치(weights)는 사용자가 질의를 요청할 때 지정할 수 있다. 필터링 허용 범위를 사용자가 정하기 어려운 경우에 대비하여 가중치를 이용하여 그 값을 조정한다. 이와 같이 각 노드에 대한 필터링 허용 범위를 관리하여 전체적인 기본 필터링 허용 범위와 차별을 기하여 노드별 특성을 고려한다. 필터링 허용 범위를 지정하는 방법은 노드의 값의 변화가 심한 경우, 필터링 되는 메시지 송신 비율을 기초로 그에 대한 필터링 허용 범위를 관리하여 송신 효율도 높이고 데이터의 정확도를 동시에 높이도록 한다.

본 논문에서는 연속질의에 대한 집계연산(SUM)을 수행할 때, 데이터 전송량을 줄이기 위해 기존 연구보다 효과적인 계층적 필터링 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 LEACH와 같은 정상 상태(steady-state) 프로토콜을 사용한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 계층적 필터링을 설명하기 전에 알아야 할 개념 및 관련 연구를 설명하고, 3장에서는 본 논문에서 제시하는 계층적 필터링

에 대해 설명하고, 4장에서는 계층적 필터링의 우수성을 실험으로 증명해 보인다. 마지막 5장에서는 본 논문의 결론을 내리고 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 연구 배경 및 관련 연구

2.1 클러스터링

클러스터링(clustering) 기법은 클러스터를 형성하여 데이터를 통합한 후 한 번에 전송해서 에너지를 효율적으로 사용하는 기법이다. 센서 필드를 클러스터라는 작은 영역으로 나누고, 각 클러스터에는 클러스터 헤드(cluster head, CH)가 존재하여 클러스터 멤버(cluster member, CM)로부터 데이터를 수집하고 이를 모아 그것을 다른 클러스터 또는 기지국으로 전달하는 역할을 한다. 무선 센서 네트워크에서는 인접한 노드 간의 유사한 정보의 중복 전달이 많기 때문에 에너지 낭비를 줄이기 위한 데이터 집계(data aggregation)가 필요하다. 멀티 홉(multi-hop) 기반의 모델에서는 모든 중계 노드가 데이터 집계를 수행하는 반면에, 클러스터 기반의 모델에서는 클러스터 헤드만이 데이터 집계를 수행한다. 따라서 클러스터 기반의 모델이 멀티 홉 기반의 네트워크보다 무선 센서 네트워크에 더 적합한 모델이 될 수 있다.

클러스터링에 대해서는 다양한 연구가 이루어지고 있다. 참고 문헌 [11]에서는 클러스터링으로 더 좋은 자원 할당이 가능한 점을 이용하여 전력 조절을 증진하였다. 전통적인 클러스터 기반(cluster-based) 네트워크는 고정된 기반 구조(infrastructure)에 의존하고 있으나, 참고 문헌 [12]에서는 애드 혹 네트워크에서 클러스터링 구조를 배치하는데 중점을 두고 있다. 클러스터링을 위상 관리 프로토콜(topology management protocols) 등의 다른 프로토콜 운영의 부수 효과로 활용하는 경우도 있다.

LEACH(5)는 네트워크 수명을 연장하기 위하여 클러스터링을 사용하는 애플리케이션 특유의 데이터 전달 프로토콜이다. HEED(6)는 LEACH를 개선한 방법으로 에너지와 통신 비용의 복잡한 면을 고려한 분산된 클러스터링 접근 방법이다. LEACH는 클러스터 헤드에 대한

균일한 에너지 소비를 가정하고 있으나, HEED는 에너지 소비에 대한 가정이 없고 잘 분산된 클러스터 헤드를 선택한다. 이 연구들 중에서 본 논문과 관련이 많은 연구가 LEACH와 HEED이다.

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)(5)는 클러스터링 기반 라우팅 기법으로, 클러스터 헤드가 클러스터의 멤버 노드들로부터 데이터를 수집하여 데이터 집계를 통해 데이터를 모아서 직접 기지국(BS)으로 전달한다. 이 기법의 특징은 네트워크에 있는 모든 센서 노드들에 에너지 소비를 공정하게 분산시키기 위해, 에너지 집약적인 기능을 하는 클러스터 헤드를 무작위로 순환시키고, 전체적으로 통신 비용을 줄이기 위해 클러스터 헤드에서 클러스터 내의 데이터를 모아 지역적으로 집계하는 것이다. 또한 적응적인 클러스터(adaptive cluster), 라우팅 클러스터 헤드(rotating cluster-heads)를 사용하고, 에너지 요구사항을 모든 센서에 분배함으로써 고전적인 클러스터링 알고리즘의 성능을 능가한다.

LEACH의 분산된 클러스터 형성 알고리즘은 그림1과 같다.

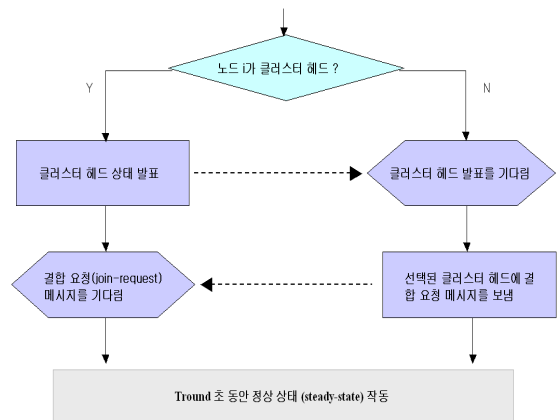


그림 1. LEACH의 분산된 클러스터 형성 알고리즘 순서도
Fig 1. Flowchart of the Distributed Cluster Formation Algorithm for LEACH

HEED(Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering)(6)는 에너지와 통신 비용의 복잡한 면을 고려한 독립형(stand-alone)의 분산된 클러스터링 접근 방법이다. 주된 목표는 분산된 에너지 소비에 의한 네트워크의 수명을 연장시키는 것이다. HEED는 노드의 분

산, 밀도, 노드 용량, 위치 인식 등에 대한 가정은 없다. 고전적인 분산 시스템에서 노드는 서버 또는 자원이거나, 둘 다 아니었다. 그러나 HEED에서 모든 노드는 자원과 서버(클러스터 헤드)로 행동한다. 이는 효율적인 알고리즘을 구현하기 위한 필요성에 의한 것으로, 노드의 에너지 자원이 고갈되면 노드 부담에 대한 균형을 맞추기 위해 모든 노드들이 서버 역할을 번갈아 할 필요가 있기 때문이다.

2.2 네트워크 내 집계연산

무선 센서 네트워크에서의 질의 처리 기술의 목적은 통신 비용을 절감하고 신뢰성을 향상시키는 것이다. 또한 SUM, AVG 등 전통적인 데이터 집계 계산뿐만 아니라 복잡한 유형의 집계 계산을 지원해야 한다. 데이터 집계 연산을 위해 센서 노드로부터 데이터를 받아 기지국(base station)에서 최종 계산하는 중앙 처리 방식을 탈피하여 센서 네트워크 내부에서 연산하는 네트워크 내 집계 방식에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 중앙 처리 방식은 매우 많은 메시지 전송이 필요하고 처리 시간도 오래 걸리나, 네트워크 내 집계 방식은 중앙 처리 방식보다 메시지 전송이나 지연, 그리고 센서의 배터리 소모를 크게 줄인다.

참고 문헌 [7]에서는 저전력이고 분산된 무선 환경에서 데이터 집계를 위한 TAG(Tiny AGgregation) 서비스를 제시하고 있다. 이는 센서 네트워크에 있는 데이터 집계 질의를 시간 내에 또한 전력 효율적인 방법에 의해 지능적으로 분배하고 실행한다. 참고 문헌 [8]에서는 네트워크 내 질의 처리로써 데이터 네트워크 내 데이터 집계를 수행함으로써 통신 데이터 양을 줄이는 것에 초점을 두고 있다. 이 연구의 주된 개념은 집계 트리(aggregation tree)를 구축하는 것이다. 참고 문헌 [13]에서는 두 개의 주된 계획 즉, 지능적인 오류 범위의 자기 조정과 잔존 오류 범위 집계에 기초한 경량의 네트워크 내 데이터 집계 프로토콜을 제안하고 있다. 이 연구의 목표는 메시지 송신의 수를 줄임으로써 센서 네트워크의 수명을 증진시키는 것이다.

품질을 보증하는 일반적인 네트워크 내 데이터 집계 방법은 다음 그림과 같이 3단계로 구성된다[13].

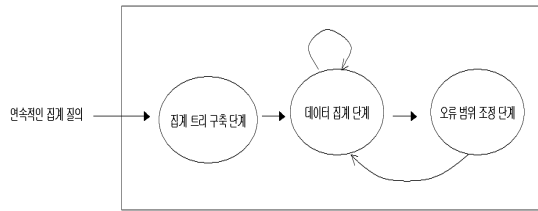


그림 2. 네트워크 내 데이터 집계 3단계
Fig 2. Three Step of In-network Aggregation

2.3 필터링

많은 애플리케이션이 정확한 정밀도를 요구하지 않는다는 점을 이용하여 통신 비용을 줄이는 효율적인 방법을 제공할 수 있다[10]. 예를 들어, 빛, 온도, 소리, 진동, 구조적인 변형 등과 같은 환경 조건에서 연속적인 모니터링이 가능한 무선 센서네트워크를 고려해보자. 작은 센서의 배터리 수명은 매우 제한되어 있고 무선의 사용은 배터리 수명을 결정하는 유력한 요소이기 때문에, 비록 센서에 의한 지역적인 처리에 있어서 비록 소량의 증가가 요구된다 하더라도 데이터 전송량을 줄이는 것은 결정적이다. 센서 데이터에 의존하는 많은 애플리케이션은 데이터 전송을 줄이기 위한 필터링을 통해 비록 부정확하지만 통제된 등급(degree)을 가지는 근사 해답을 참을 수 있다. 분산된 데이터에 걸쳐있는 연속 질의의 다른 예들은 산업적인 처리 모니터링, 온라인 경매, 광범위한 지역의 자원 산출(accounting) 및 중복된 서버에 대한 부하 조정 등을 포함한 부정확한 한정된 양을 허용할 수 있다[14].

필터링을 적응적으로 하는 연구는 이전에 스트림 데이터를 처리하기 위해 연구된 여러 알고리즘에 기반을 두고 있다. 이들 중 대표적인 것이 참고 문헌 [9, 10]이다. 이들 연구는 다섯 개의 표준 집계 함수인 SUM, AVG, COUNT, MAX 및 MIN을 대상으로 하고 있다. 이들 중 대표적으로 AVG에 초점을 두어 알고리즘을 제안하고 있다.

III. 계층적 필터링 기법

본 논문에서 제안한 계층적 필터링은 적응적인 필터링 범위 조정 방법이고 메시지 전송 효율성 및 데이터 정확성을 목적으로 삼고 있다. 이는 기존의 연구들과 달리,

필터링 범위 조정을 위한 특별한 메시지를 주고받지 않고, 정해진 약속에 따라 필터링 범위를 스스로 조정한다. 참고 문헌 [9]와 같은 연구는 필터링 범위 조정을 특별한 메시지를 주고받으므로 그에 대한 오버헤드가 생긴다. 참고 문헌 [10]과 같은 센서 노드 전체에 대해 집계 트리(aggregation tree)를 이용하는 기존 필터링 연구들은 집계 트리의 단계가 많아질수록 그 오버헤드는 커질 수밖에 없다. 본 연구에서 제안하는 방법은 적응적인 필터링 범위 조정 방법인 동시에 클러스터링을 이용하여 데이터를 필터링 및 전송하므로 기존 연구들에서 발생하는 단점을 극복할 수 있다.

3.1 제안 네트워크 모델

센서 네트워크는 응용 분야에 따라 다양한 모델이 있을 수 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 특징을 가지는 센서 네트워크 모델을 정의한다.

1) 센서 노드의 가정

- 일정한 거리의 통신 능력과 데이터 탐지, 수집 능력을 가지고 있다.
- 센서 노드는 지역 클러스터로 구성되고, 그 중 한 노드가 클러스터 헤드로 행동한다.
- 모든 클러스터 헤드 노드는 그들의 데이터를 클러스터 헤드에게 전송할 수 있다.
- 클러스터 헤드 노드는 모든 멤버로부터 데이터를 수신하여 데이터에 대한 신호 처리 기능 (예: 데이터 집계 연산)을 수행하고, 기지국(BS)으로 데이터를 전송한다.

2) 센서 네트워크에 대한 가정

- 초기에 노드 수 N 과 클러스터 수 K_s 를 임의의 수로 지정한다.
- N 개의 노드가 $M * M$ 지역을 통해 분배된다.
- 센서 노드는 메시지를 전송할 때, 1계층 즉, 클러스터 멤버 계층에서는 1 hop으로 데이터를 전송하고, 2계층 즉, 클러스터 헤드 계층에서는 1 hop 이상의 트리구조로 데이터를 전송한다.
- 센서 네트워크는 클러스터로 구성되고, 클러스터 내부의 서브클러스터는 없다.
- 클러스터 헤드는 자신의 클러스터에 속한 노드들의 ID와 위치를 알고 있다.
- 동일한 클러스터 내의 각각의 노드는 클러스터 헤드와 직접 통신이 가능하다.

- 센서 노드는 최종 사용자에게 항상 송신될 데이터를 가지고 있다.

3.2 계층적 필터링

사용자가 입력한 질의를 받은 센서 노드는 질의에 명시되어 있는 일정 주기마다 데이터를 센싱한다. 그 센싱된 데이터를 클러스터 헤드로 보낸다. 또한 클러스터 헤드에서 모아진 데이터는 집계 연산 처리되어 기지국으로 보내진다. 이러한 데이터를 보내는 과정은 각 센서에서 센싱한 데이터를 필터링하는 경우와 클러스터 헤드에서 집계한 데이터를 필터링하는 경우로 구분된다. 이러한 필터링 및 집계 연산을 효율적으로 처리하기 위해서 계층적으로 필터링을 처리한다. 에너지 효율적인 측면에 덧붙여서 데이터의 정확성을 기하기 위해서 필터링 허용 범위에 대한 가중치(weights)를 관리한다.

본 논문에서는 일정한 주기에 새로운 클러스터를 구성하는 것은 [5]에서 제안하는 방법 등을 이용해서 빠른 시간 안에 새로운 클러스터가 재구성된다고 가정한다. 또한 모든 센서 노드는 클러스터 헤드 정보를 가지고 있어서, 자신이 어떤 클러스터에 소속되어 있고 어떤 노드가 자신의 클러스터 헤드인지, 또한 클러스터 헤드는 어떤 노드들로부터 데이터를 기다리고 있어야 하는지 알고 있다고 가정한다.

표 1에서는 본 논문에서 사용할 기호에 대해 정리해 놓았다. 계층적 필터링에서는 초기에 모든 센서 노드에 대해 똑같은 필터링 허용 범위인 δ 를 할당한다. 이 δ 는 질의를 요청하는 사용자가 그 질의 결과에 대해 필터링이 허용 가능한 범위에 대한 수치인데, 각 센서 노드의 필터링 허용 범위를 할당하고 조정하는 근간이 되는 값이다. 이 값은 사용자가 질의를 입력할 때에 임의로 조정할 수 있다.

표 1. 계층적 필터링에 사용되는 표기
Table 1. Notation for Hierarchical Filtering

기호	의미
N	기지국을 포함한 노드의 수
d	클러스터 헤드 노드로부터 기지국(BS)까지의 거리
N_i	센서 노드 ($i=1, \dots, n$)
W	전체 노드에 할당되는 고정적인 가중치(울)
δ	센서 노드 값에 대한 기본적인 필터링 허용 범위(울)

기호	의미
δ_i	센서 노드 i 값에 대한 필터링 허용 범위(울)
V_i	센서 i 의 현재 센싱한 값
V_{Pi}	센서 i 의 이전에 센싱된 값
M_i	특정 노드 i 에서 필터링 된 후 송신되는 메시지 수
MR_i	특정 노드 i 에서의 메시지 송신 비율

계층적 필터링은 네트워크를 두 계층으로 나눈 뒤 각 계층별로 서로 다른 데이터 필터링 허용 범위를 사용한다. 1계층 즉, 클러스터 멤버(CM) 계층에서는 네트워크 내에 여러 개의 클러스터를 형성한 뒤 클러스터 멤버들의 정보를 클러스터 헤드에서 수집하여 하나의 데이터로 집계한다. 이 계층에서의 데이터 필터링 허용 범위는 각 센서 노드마다 적응적으로 조정된 δ_i 를 이용한다. 2계층 즉, 클러스터 헤드(CH) 계층에서는 각 클러스터 헤드에서 집계된 정보를 기지국(BS)까지 전송한다. 이 계층에서의 데이터 필터링 범위는 집계된 데이터를 처리하기 때문에 δ 의 10%인 $\frac{\delta}{10}$ 를 이용한다.

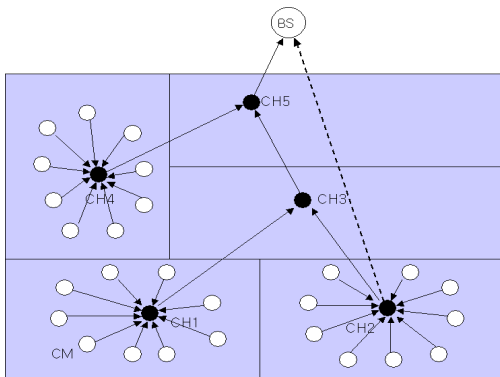


그림 3. 클러스터 계층에 따른 데이터 전송 및 필터링
Fig 3. Data Transmission and Filtering for Cluster Hierarchy

그림 3에서 CM(흰색 원)에서 CH(검은색 원)로 데이터를 전송하는 것이 1 계층 데이터 전송으로 분류했고, CH에서 BS으로 데이터를 전송하는 것이 2 계층 데이터 전송으로 분류했다. 2 계층 데이터 전송할 때는 트리 구조 즉, $CH1 + CH2 \rightarrow CH3$, $CH3 + CH4 \rightarrow CH5$, $CH5 \rightarrow BS$ 로 데이터를 집계하면서 기지국(BS)으로 전송한다.

1) 1계층 (클러스터 멤버 계층) 필터링

1계층 필터링은 클러스터 멤버에서 클러스터 헤드로 데이터를 전송할 때의 데이터 필터링이고, 1 hop으로 전송한다. 일반적으로 특정 노드 i 에서의 필터링 되는 데이터 필터링 허용 범위는 다음 식과 같다.

$$-V_i * \delta \leq V_i - V_{Pi} \leq V_i * \delta \dots\dots\dots (3.1)$$

특정 노드 i 에서의 메시지 송신 비율(MR_i)은 $MR_i = \frac{M_i}{MT_i}$ 이다. 이러한 MR_i 가 너무 작은 경우는 센서 노드에서 센싱되는 데이터의 변동폭이 거의 없거나 δ_i 의 범위가 큰 경우라고 할 수 있다. 이때에는 필터링을 너무 많이 할 것이므로 데이터 정확성에 문제가 생길 수 있다. 또한 MR_i 가 너무 큰 경우는 센서 노드에서 센싱되는 데이터의 변동폭이 크거나 δ_i 의 범위가 작은 경우라고 할 수 있다. 이때에는 필터링을 거의 하지 않을 것이므로 데이터 전송 효율에 문제가 생길 수 있다. 본 논문에서는 데이터 전송 효율성과 더불어 데이터 정확성을 기할 수 있는 센서 데이터 필터링 허용 범위를 조정하는 방안을 제안한다.

센서 데이터 범위 조정은 MR_i 가 너무 작거나 또는 너무 큰 경우에 한다. 즉, $MR_i \leq 0.5$ 또는 $MR_i \geq 0.8$ 인 경우이다. MR_i 의 하한선을 0.5로 잡은 이유는 필터링을 너무 많이 하는 경우 데이터 정확도가 떨어지는 점을 방지하기 위함이다. 또한 MR_i 의 상한선을 0.8로 잡은 이유는 필터링을 너무 적게 하는 경우 에너지 효율성이 떨어지므로 그런 경우 가중치를 두어 필터링을 더 많이 하도록 조정하기 위함이다.

■ $MR_i \leq 0.5$ 인 경우

$$\delta_i = \delta_i - (MR_i * W) \dots\dots\dots (3.2)$$

이때 W 는 전체 노드에 할당되는 고정적인 가중치(울)이고 보통 0.01을 사용한다.

■ $MR_i \geq 0.8$ 인 경우

$$\delta_i = \delta_i + (MR_i * W) \dots\dots\dots (3.3)$$

클러스터링 주기가 끝나고 다음 주기에서는 이전에 집계된 자료(δ_i)를 이용하여 δ 값을 적응적으로 조정한다. 이를 이용하여 센서 데이터의 필터링 허용 범위 조정 횟수를 줄인다. 새롭게 조정되는 δ 값은

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i \dots\dots\dots (3.4)$$

2) 2계층 (클러스터 헤더 계층) 필터링

2계층 필터링은 클러스터 헤더에서 기지국으로 데이터를 전송할 때의 데이터 필터링이고, 1 hop 이상으로 전송한다. 그림 3과 같이 트리 구조로 데이터를 집계 및 전송한다. 이렇게 하는 이유는 클러스터 헤더에서 기지국까지 거리가 먼 경우가 있기 때문에 1 hop으로 전송할 경우 에너지 소모량이 과다하기 때문이다. 이때의 δ 값은 집계된 데이터를 다시 필터링해야 하기 때문에 $\frac{\delta}{10}$ 으로 줄여서 필터링한다.

클러스터 헤더(CH)에서 기지국(BS)으로 데이터를 1 hop으로 송신할 때와 트리 구조 즉, 1 hop 이상으로 데이터를 집계하고 송신할 때의 에너지 사용량을 비교할 수 있다. 이는 송신기와 수신기 사이의 거리에 의존하는 자유 공간(free space: d^2 power loss) 모델과 다중 경로 페이딩(multipath fading: d^4 power loss) 채널 모델을 사용[15]한다.

LEACH에서는 CH에서 BS로 1 hop으로 메시지를 송신한다. 이때의 에너지 소모량은 트리 구조(1 hop 이상)로 메시지를 송신할 때보다 많은 에너지를 소모한다. 이는 거리 임계값에 따라 자유 공간 모델 또는 다중 경로 페이딩 채널 모델을 선택하기 때문이다.

본 논문에서 제안한 트리 구조를 이용한 데이터 전송 및 필터링을 이용하면, CH에서 BS로 메시지를 송신시 트리 구조 즉, 1 hop 이상으로 송신하면 에너지 소모량은 1 hop 으로 메시지를 송신할 때보다 적은 에너지를 소모한다. 이는 4장의 실험 결과에서 그 내역을 확인할 수 있다.

IV. 실험 및 분석

4.1 실험 환경

본 논문에서 제안한 기법의 성능을 분석하기 위하여 시뮬레이터를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험도구로는 CMU(Carnegie Mellon University)의 무선 확장을 구현한 NS-2 네트워크 시뮬레이터를 이용하였다. 실험을 위한 파라미터들은 표2와 같이 설정되었다.

표 2. 실험 파라미터들
Table 2. Simulation Parameters

파라미터	값
노드의 수 : N	100
실험 영역 : M * M	가로 100m * 세로 100m
채널의 대역폭(bandwidth)	100 Mb/s
각 노드의 초기 에너지	2J
각 데이터의 메시지 크기	500 bytes
패킷 헤더	25 bytes
처리 지연(processing delay)	50 μ s
전송률 (bit rate)	100 kbps
기본적인 클러스터 수 (Ks)	5
무선 전자 에너지(Eelec, radio electronics energy)	50 nJ/bit
자유 공간(free space) 모델 무선 증폭 에너지 (efs)	10 pJ/bit/m2
다중 경로 페이딩 채널 모델 무선 증폭 에너지(camp)	0.0013 pJ/bit/m4
기지국(BS) 위치	x=50, y=175

4.2 실험 결과 및 분석

1) 에너지 소모량 실험

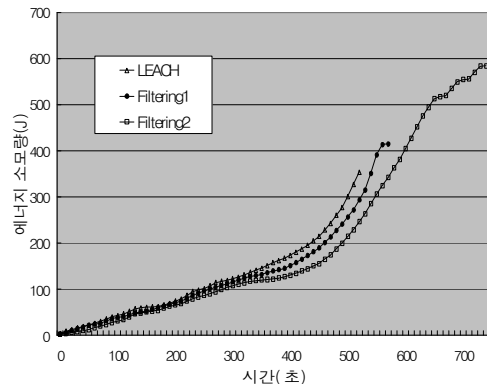


그림 4. 시간에 따른 에너지 소모량
Fig 4. Amount of Energy Dissipation over Time

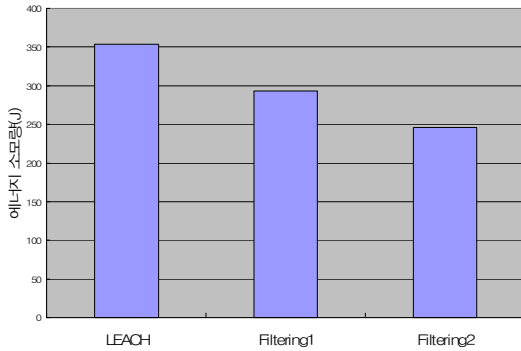


그림 5. 전체 에너지 소모량
Fig 5. Total Amount of Energy Dissipation

본 실험에서 센서 네트워크는 100개의 노드와 1개의 기지국(BS)으로 구성하였다. 실험은 LEACH 알고리즘과 그 성능을 비교하였다. Filtering1은 메시지 송신 비율(MRi) 즉, 필터링 비율이 약 20%인 경우로써 1계층만 필터링한 경우이고, Filtering2는 메시지 송신 비율(MRi) 즉, 필터링 비율이 약 30%인 경우로서 1계층 및 2계층을 같이 필터링한 경우이다. 실험 수치는 10번의 실험을 반복하여 그 평균치를 그래프로 옮겼다. 그림 4를 보면, LEACH보다 Filtering1이 에너지 소모량이 적은 것을 알 수 있다. Filtering1보다 Filtering2가 더욱더 에너지 소모량이 적은 것은 계층적 필터링의 효과가 큰 것임을 알 수 있다. 그래프 마지막에 Filtering 1 및 Filtering2가 LEACH보다 에너지 소모량이 많은 것은 생존된 노드수가 많기 때문이다. 그림 5의 전체 에너지 소모량을 보면 그 내용을 확실히 알 수 있다. 이 그래프를 보면 필터링한 결과가 LEACH보다 훨씬 더 에너지 소모량이 적고, 전체 네트워크 수명이 길어진 것을 알 수 있다.

2) 데이터 전송량 실험

본 실험은 센서 노드에서 보낸 메시지가 기지국(BS)에 도달한 데이터 전송량에 대한 것이다. 그림 6은 시간 흐름에 따라 LEACH, Filtering1 및 Filtering2에 대한 데이터 전송량을 비교 분석한 도표이고, 그림 7은 최종 데이터 전송량을 집계한 도표이다. 그림 6, 7을 보면, LEACH보다 Filtering1 및 Filtering2가 데이터 전송량이 적은 것을 알 수 있다. 그러나 Filtering1 및 Filtering2는 데이터 전송 내역을 필터링하기 때문에 전송 데이터량은 떨어지나 LEACH보다 오랜 시간 동안 노드가 생존해 있음을 알 수 있다. 이는 메시지를 필터링해서 BS에 보내기 때문에 당연한 결과이다.

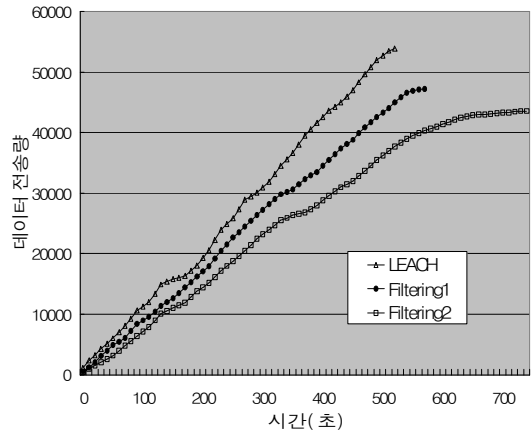


그림 6. 시간에 따른 데이터 전송량
Fig 6. Amount of Data Transmission over Time

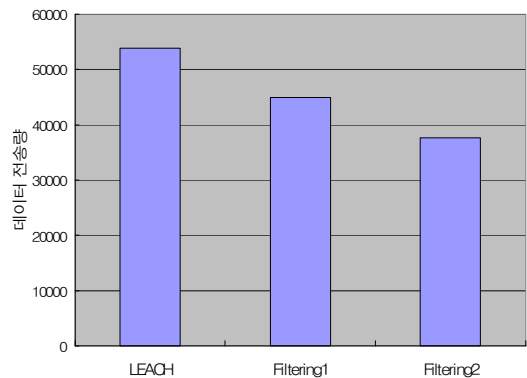


그림 7. 전체 데이터 전송량
Fig 7. Total Amount of Data Transmission

결국 이로 인해서 LEACH보다 에너지 소모량이 적어진 다. 그러나 데이터 정확도가 떨어질 가능성이 있기 때문에 에너지 소모량이 적어진다고 해서 무조건 다 좋은 것은 아니다. 본 논문에서는 이러한 점을 보완하기 위해서 메시지 송신 비율(MRi)의 하한선을 50%로 지정하고 MRi가 50% 이하인 경우는 필터링 율(δ)에 대해 가중치(W)를 주어 적용적으로 조정하였다.

3) 네트워크 수명(lifetime) 실험

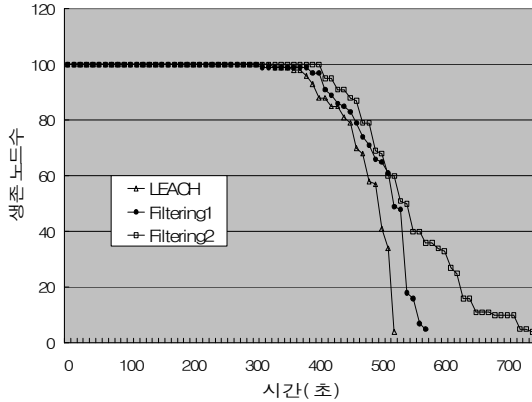


그림 8. 시간에 따른 생존 노드수
Fig 8. Number of Nodes alive over Time

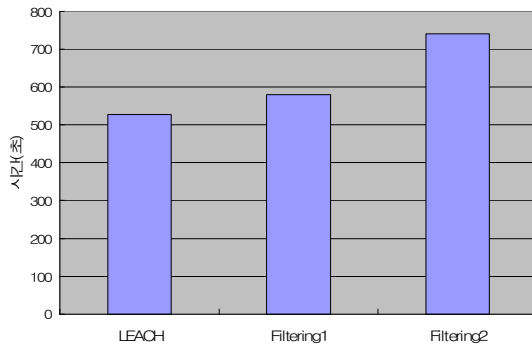


그림 9. 네트워크 수명
Fig 9. Network Lifetime

그림 8은 시간 흐름에 따라 LEACH, Filtering1 및 Filtering2에 대한 전체 네트워크 생존 노드수를 비교 분석한 도표이고, 그림 9는 네트워크 수명이 종료되는 시간을 집계한 도표이다. 생존 노드수는 에너지 소모량과 더불어 센서 네트워크의 에너지 관리 및 수명 측면에서 중요한 요소이다. 그림 8, 9에서 전체적인 에너지 소모량보다 생존 노드수가 많다는 것은 더 중요하며, 센서 네트워크를 구성하는 노드의 수가 많이 남아 있다는 것은 더욱더 센서 네트워크 수명이 연장된다는 것을 의미한다. 이러한 점은 특정 노드에 부하를 많이 주지 않고 센서 네트워크 내의 노드가 골고루 네트워크 관리에 참여했음을 알 수 있다. LEACH의 경우, 어느 특정 노드가 많은 에너지를 소모함으로써 센서 네트워크에 참여하지 못하는 노드가 어느 시점에서 급격히 많아지는 것을 볼 수 있다. LEACH의 이러한 단점을 필

터링을 통해 상당히 개선된 것을 그래프를 통해 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서 제안한 계층적 필터링은 1계층 즉, 클러스터 멤버 계층에서 필터링을 한 후 2계층 즉, 클러스터 헤더 계층에서 다시 필터링을 하는 방법이다. 이는 적응적인 필터링 범위 조정 방법으로 기존의 연구들과 달리, 필터링 범위 조정을 위한 특별한 메시지를 주고받지 않고, 정해진 약속에 따라 필터링 범위를 스스로 조정한다. 참고 문헌 [10]과 같은 집계 트리(aggregation tree)를 이용하는 기존 필터링 연구들은 집계 트리의 단계가 많아질수록 그 오버헤드는 커질 수밖에 없다. [9] 등의 과거의 필터링 알고리즘은 에너지 효율성을 필터링에만 국한하기 때문에 에너지 효율과 데이터 정확도에 대한 동시 만족이 어려운 경우가 발생할 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 계층적 필터링 알고리즘은 에너지 효율성을 필터링에서 일부를 찾고 일부는 클러스터링에서 찾기 때문에 에너지 효율성 및 데이터 정확도를 동시에 만족할 수 있는 장점이 있다. 또한 클러스터링 등의 토폴로지 제어를 포함한 광범위하고 포괄적인 필터링을 이용하여 데이터를 전송하므로 기존 연구들에서 발생하는 단점을 극복할 수 있다.

실험을 통해서 계층적 필터링 알고리즘이 LEACH 알고리즘보다 에너지 효율이 뛰어나고, 생존 노드수가 많아 네트워크 수명이 향상되었음을 보여주었다.

향후 연구 과제로는 필터링을 할 때 예외 상황이 발생할 경우와 그 예외 상황에서 에너지 효율을 최대화 할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

[1] Ian F, Akyidiz, Weilian Su et al., "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communication Magazine, vol 40. 2002
[2] 박노준, 현동준, 김명호, "센서 네트워크에서 집계연산을 위한 적응적 필터링," 정보과학회 논문지, 데이터베이스 제32권 제4호, pp.372-382, 2005. 8

- [3] S. Park and M. Srivastava, "Power aware routing in sensor networks using dynamic source routing," *ACM MONET Special Issue on Energy Conserving Protocols in Wireless Networks*, 1999.
- [4] V. Kawadia and P. R. Kumar, "Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, April 2003.
- [5] Wendi B. Heinzelman, Anantha P. Chandrakasan, Hari Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE transactions on Wireless communications* Vol. 1, no. 4, Oct. 2002
- [6] Ossama Younis and Sonia Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach", In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2004.
- [7] S. Madden, M. J. Franklin, J.M. Hellerstein, and W. Hong, "Tag: A Tiny Aggregation Service for ad hoc Sensor Networks," In *Proceedings of OSDI*, Boston, America, 2002
- [8] Y. Yao and J. Gehrke, "The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks," *SIGMOD Record*. 2002
- [9] Antonios Deligiannakis, Yannis Kotdis, and Nick Roussopoulos, "Hierarchical In-Network Data Aggregation with Quality Guarantees," In *Proceedings of EDBT*. pp. 658-675. 2004
- [10] Chris Olston, Jing Jiang, and Jennifer Widom, "Adaptive Filters for Continuous Queries over Distributed Data Streams," In *Proceedings of SIGMOD*, pp. 563-574, San Diego, America, 2003
- [11] T. Kwon and M. Gerla, "Clustering with power control," in *Proc. MILCOM*, vol. 2, Atlantic City, NJ, Nov. 1999.
- [12] C. Lin and M. Gerla, "Adaptive clustering for mobile wireless networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 15, pp. 1265-1275, Sept. 1997.
- [13] Dongjoon Hyun, No Joon Park, Myoung Ho Kim, Jin Hyun Son, "Quality- guaranteed Lightweight Protocol for In-network Data Aggregation in Sensor Networks," CS/TR-2005- 218, KAIST Department of Computer Science, March 7, 2005
- [14] S. Shah, A. Bernard, V. Sharma, K. Ramamritham, and P. Shenoy. Maintaining temporal coherency of cooperating dynamic data repositories. In *Proc. VLDB*, 2002.
- [15] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles & Practice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.

저 자 소 개



김진수

1990년 : 숭실대학교
정보산업학과 이학석사
2000년 : 영남대학교 컴퓨터
공학과 박사과정 수료
현재 : 동명대학교
항만물류학부 교수
관심분야 : 데이터베이스,
센서네트워크, 소프트웨어 공학



박찬흠

2004년 : 영남대학교
컴퓨터 공학과 공학석사
현재 : 영남대학교
컴퓨터 공학과 박사과정
관심분야 : 모바일 애드혹
네트워크, 센서네트워크



김종근

1987년 : 영남대학교
전자공학과 공학석사
1991년 : 일본 전기통신대학
공학박사
현재 : 영남대학교
컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 컴퓨터 네트워크,
모바일 네트워크, 분산처리



강병욱

1977년 : 영남대학교
전자공학과 공학석사
1994년 : 경북대학교
전자공학과 공학박사
현재 : 영남대학교
컴퓨터공학과 교수
관심분야 : UML, 정형명세기법,
OCL, 소프트웨어공학