

■ 2007년도 학생논문 경진대회 수상작

무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 이중 레이어 분산 클러스터링 기법

(A Dual-layer Energy Efficient Distributed Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks)

여 명 호 [†] 김 유 미 ^{**} 유 재 수 ^{***}
 (Myung Ho Yeo) (Yu Mi Kim) (Jae Soo Yoo)

요약 최근 무선 센서 네트워크는 다양한 응용분야의 플랫폼으로써 사용되고 있다. 무선 센서를 배치하고, 센서 네트워크를 구성함으로써 원격으로 어떤 영역에 포함된 객체들의 동작, 상태, 위치 등에 관한 정보를 얻을 수 있다. 일반적으로 센서 노드들은 제한된 배터리로 동작하기 때문에 센서 네트워크의 생명주기를 연장시키기 위한 에너지 효율적인 데이터 수집 메커니즘은 필수 조건이다. 본 논문에서는 클러스터 헤드의 에너지 소모를 분산할 수 있는 새로운 클러스터링 기법을 제안한다. 먼저 클러스터 헤드의 역할에 따른 에너지 소모를 분석하고, 클러스터를 수집과 전송을 위한 두 계층으로 분리한다. 그 다음 각 계층을 담당하는 센서 노드를 선출하여 단일 클러스터 헤드의 에너지 소모를 2개의 센서 노드로 분산한다. 제안하는 클러스터링 기법의 우수성을 보이기 위해 시뮬레이션을 통해 기존의 클러스터링 기법과 성능을 비교했다. 그 결과, 기존의 알고리즘에 비해 생명 주기(lifetime)가 10%~40% 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

키워드 : 센서 네트워크, 클러스터링, 네트워크 생명주기, 에너지 효율

Abstract Wireless sensor networks have recently emerged as a platform for several applications. By deploying wireless sensor nodes and constructing a sensor network, we can remotely obtain information about the behavior, conditions, and positions of objects in a region. Since sensor nodes operate on batteries, energy-efficient mechanisms for gathering sensor data are indispensable to prolong the lifetime of a sensor network as long as possible. In this paper, we propose a novel clustering algorithm that distributes the energy consumption of a cluster head. First, we analyze the energy consumption of cluster heads and divide each cluster into a collection layer and a transmission layer according to their roles. Then, we elect a cluster head for each layer to distribute the energy consumption of single cluster head. In order to show the superiority of our clustering algorithm, we compare it with the existing clustering algorithm in terms of the lifetime of the sensor network. As a result, our experimental results show that the proposed clustering algorithm achieves about 10%~40% performance improvements over the existing clustering algorithms.

Key words : sensor networks, clustering, network lifetime, energy efficiency

* 이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단 지원
 (지방연구중심대학육성사업/충북BIT연구중심대학육성사업단)과 과학기술부
 한국과학재단의 지원(No.R01-2006-000-10809-0)을 받아 수행된 연구임

[†] 학생회원 : 충북대학교 정보통신공학과
 mhyeo@netdb.chungbuk.ac.kr

^{**} 학생회원 : 충북대학교 바이오정보기술학과
 ymkim@netdb.chungbuk.ac.kr

^{***} 종신회원 : 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수
 yjs@chungbuk.ac.kr
 (Corresponding author임)

논문접수 : 2007년 5월 29일

심사완료 : 2007년 8월 17일

Copyright©2008 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 : 데이터베이스 제35권 제1호(2008.2)

1. 서론

최근 무선 센서 네트워크에 대한 관심이 증가하고 있으며 환경 감시, 의료 시스템, 군사 응용 등 다양한 분야에 널리 응용이 되어 연구되고 있다[1,2]. 환경 감시 분야에서는 센서에 카메라나 마이크를 부착하여 특정 동·식물의 서식지를 관찰하거나 온도, 습도 등의 간단한 데이터를 수집하여 현재 날씨나 앞으로의 날씨를 예측 하는데 응용된다[3,4]. 또한 의료시스템의 경우 의료 시설에 센서를 일정 간격으로 배치하여 의사와 환자의 현재 위치를 모니터링하거나 시각장애인을 위한 수십~수백 개의 마이크로 센서가 삽입된 인공 안구를 개발하는데 활용되기도 한다. 마이크로 센서들은 독립적으로 동작하는 것이 아니라 인체 안구의 신경들이 작용하는 것처럼 센서간의 통신을 통하여 이미지를 윤곽을 인식한다[5]. 군사 응용 분야에서는 센서를 배포하여 센서에 감지된 움직임을 통해 적군의 위치를 파악하거나 생화학 무기로 인하여 오염된 지역을 검출하는데 이용된다. 이와 같이 특정 목적을 위해 배치된 센서들은 응용이 되는 특정 분야에서 요구하는 데이터를 지속적으로 수집하고 싱크 노드(sink node)로 전송한다. 그러나 일반적으로 센서 노드는 제한된 배터리를 가지고 동작하기 때문에 노드들은 에너지 사용에 많은 제약을 받는다. 배터리가 모두 소모되어 노드의 동작이 멈추면 재충전이 되거나 교체 될 때까지 동작하지 않는다. 최근 무선 통신의 발전과 다기능, 저가의 스마트 센서(smart sensor)들의 개발로 보통 한 번에 배포되는 센서 노드들의 수가 수백~수만 개에 이르고 센서 노드들이 배포되는 환경이 매우 가변적이므로 센서 노드를 일일이 재충전하거나 교체를 하는 것은 쉽지 않다. 이에 제한된 에너지를 효율적으로 사용하여 센서 네트워크의 생존시간을 최대화 할 수 있는 기법과 함께 확장성(scalability), 부하 균등(load balancing) 이 센서 네트워크의 응용에 중요한 요구사항이 되었다[6-8].

클러스터링 기법은 이러한 요구사항을 효과적으로 처리할 수 있는 기법중 하나이다. 클러스터링 기법은 여러 가지 장점을 지닌다. 실제 네트워크는 센서 노드가 추가로 배포되거나 배터리를 모두 소모하여 센서 노드가 동작을 하지 않는 경우와 같이 동적인 위상 변화가 발생했을 때 상위 계층은 모든 변화를 인식해야한다. 센서 네트워크처럼 많은 수의 노드로 이루어진 네트워크의 경우, 이러한 변화는 상위계층에게 상당한 부담으로 작용하게 된다. 하지만 이러한 부담을 클러스터링을 통해 줄일 수 있다. 즉, 클러스터 내부의 노드와는 상관없이 응용 계층에서 내려다보는 시각에서는 클러스터를 하나의 단위로 보고 통신하기 때문에 라우팅 테이블 등의

갱신에 대한 비용을 보다 줄일 수 있다. 이와 함께 응용 계층에서는 클러스터 헤드에서 클러스터 멤버 노드의 데이터를 병합할 수 있도록 하여 좀 더 큰 범위의 네트워크, 즉 확장성을 가질 수 있다[7]. 따라서 센서 네트워크의 위상(network topology)를 관리하거나 데이터의 병합을 위해 클러스터 기반의 구조를 사용하는 것은 타당한 접근 방법이라 할 수 있다. 하지만, 데이터 수집과 데이터 전송을 모두 담당하는 클러스터 헤드는 클러스터 멤버 노드에 비해 더 많은 에너지를 소모한다. 클러스터 헤드의 에너지 소모는 클러스터의 크기와 클러스터 멤버 노드의 수에 따라 크게 달라진다. 따라서 기존에 제안된 클러스터링 알고리즘은 클러스터 헤드의 에너지 소모를 균등하게 하고, 네트워크의 생명주기를 연장하기 위해서 클러스터 헤드를 주기적으로 선출하거나 클러스터의 크기와 멤버 노드의 수를 균등하게 조정한다. 하지만, 이러한 방법은 클러스터 헤드 노드의 송/수신 에너지 소모를 직접적으로 분산할 수 없다.

본 논문에서는 그리드 구조를 기반으로 하는 새로운 클러스터링 기법을 제안한다. 클러스터 헤드의 위치에 따른 셀 내부 센서 노드의 데이터 수집 비용을 분석하고, 클러스터 헤드 선출 영역을 제한하는 방법과 새로운 이중 레이어 분산 클러스터링 기법을 제안한다. 제안하는 클러스터링 기법의 우수성을 보이기 위해 시뮬레이션을 통해 기존의 클러스터링 기법과 성능을 비교했다. 그 결과, 기존의 알고리즘에 비해 생명 주기(lifetime)가 10%~40% 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 사용하고 있는 에너지 소모 모델과 기존에 제안된 클러스터링 기법에 대해서 논의한다. 3장에서는 클러스터 헤드의 역할에 따른 에너지 소모를 분석하고, 4장에서는 제안하는 알고리즘의 특성과 상세한 클러스터링 과정을 기술한다. 5장에서는 성능평가와 분석을 통해 제안하는 클러스터링 기법의 우수성을 보이고, 6장에서 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 관련연구

2.1 에너지 소모 모델

본 논문에서 사용하는 에너지 소모 모델은 [10-13]에서 제안한 것과 동일한 에너지 소모 모델을 가정하고 있다. 센싱된 데이터들은 일정한 시간 간격이나 요구에 따라 싱크 노드로 수집된다. 센서 노드들은 제한된 에너지를 가지고 있으며, 센서 노드들마다 배터리의 용량은 다를 수 있다. 센서 노드들은 라디오 신호의 범위를 조정 가능한 무선 송신기(wireless transmitter)와 수신기(receiver)를 가지고 있다. 또한 여러 데이터들은 단일 크기의 데이터로 모으거나 합병될 수 있다. $E_{elec}(nJ/bit)$

는 송신기와 수신기 회로에서 소모되는 에너지를 나타내고, ϵ_{fs} ($pJ/bit/m^2$)와 ϵ_{mp} ($pJ/bit/m^4$)는 송신 증폭기에서 소모되는 에너지를 나타낸다. 각 센서 노드들은 거리 d 만큼 k -비트의 메시지를 송신하거나 수신하기 위해서는 각각 $E_{T_x}(k, d)$, $E_{R_x}(k)$ 의 에너지가 소모된다. 일반적으로 수신시 소모되는 에너지보다 송신 시 거리에 따른 증폭기의 에너지 소모비용이 크다는 것을 알 수 있다. 식 (1)과 식 (2)에서 송신하는데 소모되는 에너지 비용 $E_{T_x}(k, d)$ 와 수신시 소모되는 에너지 비용 $E_{R_x}(k)$ 을 보여 준다.

$$E_{T_x}(k, d) = \begin{cases} E_{elec} \times k + \epsilon_{fs} \times k \times d^2 & (d \leq d_0) \\ E_{elec} \times k + \epsilon_{mp} \times k \times d^4 & (d > d_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{R_x}(k) = E_{elec} \times k \quad (2)$$

2.2 대표적인 클러스터링 기법

일반적으로 클러스터를 구성하게 되면, 클러스터 헤드는 데이터를 수집하고 전송하기 위해서 다른 센서 노드들에 비해 더 많은 에너지를 소모하게 된다. 결국 센서 노드 간 균형적인 에너지 소모가 이루어지지 않는다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 Heinzelman과 Chandrakasan은 LEACH[10]와 LEACH-C[11]를 제안했다.

LEACH는 클러스터를 이용하여 센싱된 데이터를 싱크 노드까지 전달하는 가장 널리 알려진 클러스터링 기법중 하나이다. 이 기법이 가정하고 있는 대상은 다음과 같다. 먼저 사용자는 센서 필드와 노드의 수를 알고 있어야 하고 가장 적절한 클러스터 헤드의 수를 지정할 수 있어야 한다. 모든 노드는 자신의 신호 세기를 조절할 수 있으며, 클러스터 헤드는 클러스터 내의 노드로부터 센싱된 데이터를 정확히 수집하며 수집된 정보를 싱크 노드로 한 번에 전송한다. 즉, 필드 내의 모든 노드는 최대 세기로 신호를 보낼 경우 싱크 노드까지 정보를 전달할 수 있다. 클러스터 헤드의 에너지 소모를 분산하기 위한 방법으로 LEACH 알고리즘은 매 주기(round)마다 클러스터 내부에서 클러스터 헤드를 랜덤하게 선출한다. LEACH에서 클러스터 헤드를 결정하는 방법은 다음과 같다. 사용자는 미리 알고 있는 노드의 수와 필드에 따라 확률 P 를 결정하는데, 이것은 매주기마다 각각의 노드가 클러스터 헤드가 될 수 있는 확률을 뜻한다. LEACH는 시간을 사이클로 나누고, 그것을 각 라운드로 다시 나누는데, 모든 노드는 하나의 사이클 내에 단 한 번씩 클러스터 헤드가 될 수 있다. 하지만 이는 주변 노드의 상태를 고려하지 않기 때문에 불균형적인 클러스터가 형성이 될 수 있으며, 클러스터에 포함된 센서 노드의 수에 따라 불균형적인 에너지 소모를 초래한다. 또한, 클러스터 구성 시 에너지에 대한 고려

가 전혀 없다는 것도 문제가 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 LEACH-C 알고리즘에서는 잔여 에너지 정보를 이용하여 더 많은 에너지를 가지고 있는 센서 노드를 클러스터 헤드로 선출하는 방법을 제안했다. 하지만 여전히 확률적인 방법을 이용하여 클러스터를 생성하기 때문에 상황에 따라 불균형적인 네트워크 위상을 만들 수 있다는 문제점을 가지고 있다.

Ossama Younis와 Sonia Fahmy에 의해 제안된 HEED [12]는 LEACH의 문제점을 해결하기 위해서 주기적으로 노드의 에너지 혹은 그 이외의 여러 요소를 고려하여 클러스터 헤드를 선출한다. 이 기법은 잔여 에너지뿐 아니라 이웃 노드에 대한 근접도와 같은 다양한 파라미터를 고려하여 적절한 노드의 밀도, 클러스터 내/외의 전송 거리를 결정함으로써 균등한 분산 클러스터를 구성한다.

Junpei Kamimura에 의해 제안된 ANTCLUST[13]는 클러스터 노드간의 지역 통신(local communication)을 통해서 클러스터의 정보를 교환하고, 클러스터 헤드까지의 거리, 잔여 에너지와 같은 추가적인 정보를 통해 동적으로 클러스터를 재구성하는 방법을 제안했다. 그 결과 두 가지 방법 모두 에너지 소모를 전체 네트워크로 분산할 수 있는 클러스터를 생성했고, 네트워크의 생명 주기를 LEACH와 HEED보다 30% 연장시킬 수 있었다.

대부분의 클러스터링 방법들은 클러스터의 크기와 노드의 수에 따라 헤드의 에너지 소모비용이 달라진다는 것을 고려하고 있으며, 균형적인 클러스터를 생성하기 위해서 다양한 파라미터를 이용한다. 그러나 이러한 기법들은 클러스터 헤드의 변경을 통한 센서 노드의 수명 연장을 기대할 수는 있지만 데이터의 수집과 전송을 모두 클러스터 헤드가 담당하고 있다는 점에서 클러스터를 이용한 데이터 수집의 근본적인 문제점은 해결하지 못하고 있다. 이를 해결하기 위해서 본 논문은 클러스터 헤드의 역할에 따른 에너지 소모를 분석하고 전체 센서 네트워크의 생명주기를 연장하기 위해 클러스터 헤드의 에너지 소모비용을 분산 시키는 방법을 제안한다.

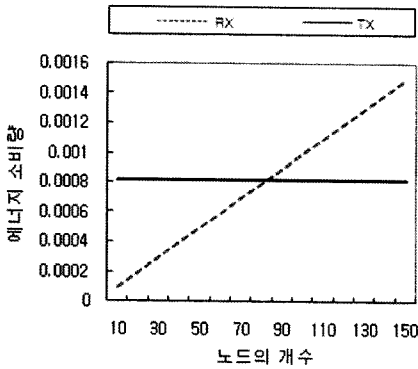
3. 클러스터 헤드의 에너지 소모 분석

클러스터 헤드는 다수의 센서에서 송신하는 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 싱크노드로 전송하는 역할을 동시에 수행한다. 표 1은 클러스터 헤드의 역할과 역할에 따른 에너지 소모비용을 나타낸다. 클러스터 헤드가 제어 신호를 전송할 때 소비되는 에너지 비용은 클러스터에 포함된 노드 개수와 상관없이 모든 노드와 통신이 가능한 최소 거리의 제곱에 비례하며, 데이터 수집에 필요한 수신 비용은 해당 클러스터에 포함된 노드의 수에 따라 크게 달라진다. 응용분야에 따라 무선 센서 네트워

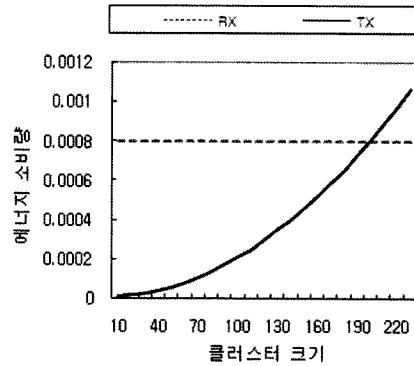
표 1 클러스터 헤드의 역할과 에너지 소비비용

(n : 클러스터에 포함된 노드의 수, k : 전송 bit 수)

역할	에너지 소비비용
클러스터 구성에 필요한 제어 신호 전송	$\begin{cases} E_{elec} \times k + \epsilon_{fs} \times k \times d^2 & (d \leq d_0) \\ E_{elec} \times k + \epsilon_{mp} \times k \times d^4 & (d > d_0) \end{cases}$
싱크노드로 수집된 데이터 전송	
데이터 연산	50mJ/signal
데이터 수집	$E_{elec} \times k \times n$



(a) 노드의 개수에 따른 송수신 에너지



(b) 클러스터 크기에 따른 송수신 에너지

그림 1 클러스터 헤드의 송수신 에너지 비교

(RX: 수신시 소모하는 에너지 E_{Rx} , TX: 전송시 소모하는 에너지 E_{Tx})

크가 수 백~수 만개의 노드로 구성된다는 점을 감안할 때, 수신비용 역시 송신비용 못지않게 크다는 것을 알 수 있다. 또한 싱크 노드로 데이터를 전송하기 위해서 드는 비용은 싱크 노드의 위치에 따라 최소 거리의 제곱 혹은 네제곱에 비례하며 라우팅 과정에 참여하기 때문에 센서 네트워크의 규모에 따라 클러스터 헤드는 일반 센서 노드에 비해 더욱더 많은 에너지를 소모하게 된다.

그림 1은 각각 노드의 개수와 클러스터의 크기에 따른 클러스터 헤드가 소모하는 송수신 에너지를 비교한 그래프이다. 비교를 위하여 그림 1(a)의 경우 크기가 25m × 25m의 영역에 10~150개의 노드들을 임의로 배포한다고 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 1(b)의 경우는 영역의 크기를 10m부터 220m까지 변화 시키면서 80개의 노드를 배포하여 소모되는 에너지를 시뮬레이션한 결과이다. 각각의 조건에서 주고받는 데이터의 패킷사이즈는 25byte라고 가정하였다. 그 결과 노드와 클러스터의 수에 따라 송수신시 소모되는 에너지가 크게 달라지는 것을 알 수 있고, 대부분의 센서 네트워크 연구에서 간과하고 있는 수신시 소모되는 에너지의 크기가 전송시 소모되는 에너지 못지않게 크다는 것을 알 수 있다.

4. 제안하는 이중 레이어 분산 클러스터링 기법

4.1 특징

본 논문에서는 클러스터 헤드의 에너지 소모를 근본적으로 분산하기 위한 “이중 레이어 분산 클러스터링 알고리즘(Dual-layer Energy-Efficient Distributed Clustering Algorithm)”을 제안한다. 앞장에서 언급했듯이 클러스터 헤드는 데이터의 수집과 수집된 데이터를 싱크노드로 전송하는 역할을 동시에 수행한다. 따라서 클러스터 헤드는 다른 센서 노드들에 비해 에너지가 상대적으로 빠르게 소모된다. 클러스터 헤드의 에너지 소모는 클러스터의 크기, 클러스터를 구성하는 노드의 수에 큰 영향을 받으며, 균등한 에너지 분산을 위해서 대부분의 클러스터링 알고리즘들은 클러스터 헤드를 주기적으로 변경하거나 클러스터 헤드의 수, 클러스터의 크기, 클러스터 내 센서 노드들의 수를 조정하는 방법을 제안했다. 하지만 클러스터 헤드의 입장에서 보면, 이것은 클러스터 헤드의 에너지 소모에 대한 근본적인 해결책이 될 수 없다. 따라서 역할에 따라 각각 수집과 전송을 담당하는 클러스터 헤드를 선출하여 단일 클러스터 헤드의 에너지 소모를 분산할 수 있는 새로운 접근의 분산 클러스터링 방법을 제안한다.

4.2 단순 이중 레이어 분산 클러스터링 기법

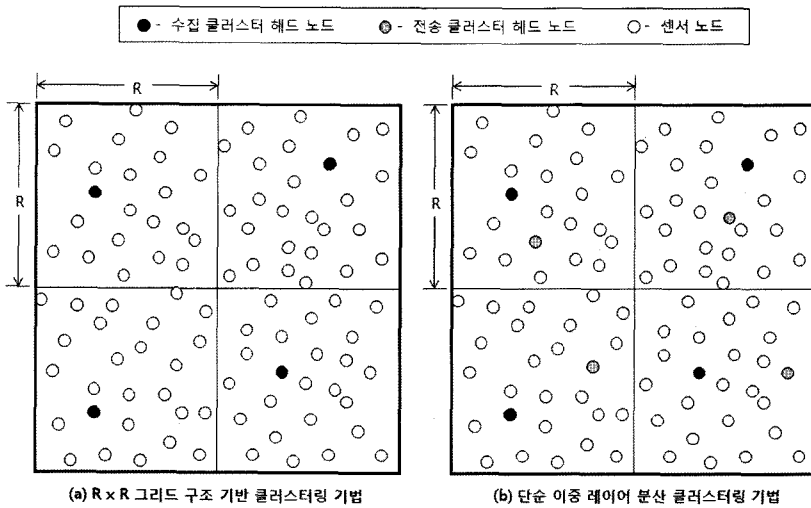


그림 2 그리드 구조 기반 클러스터링 기법

이중 레이어 분산 클러스터링 기법은 그리드 구조를 기반으로 한다. 그림 2는 셀의 크기가 $R \times R$ 인 그리드 구조 기반의 센서 네트워크를 표현한 것이다. 각 셀은 하나의 클러스터 헤드를 가지고 있으며, 헤드는 셀에 포함된 센서 노드들의 데이터를 수집하고 병합하여, 병합된 데이터를 싱크 노드로 전송하는 역할을 수행한다.

클러스터링을 통한 효율적인 데이터 수집을 위해서 먼저 두 개의 클러스터 헤드를 선출해야 한다. 두 개의 헤드를 선출하기 위한 방법으로 LEACH, HEED와 같은 대표적인 클러스터링 기법에서 제안된 방법들을 고려할 수 있다. 제안하는 기법은 HEED와 같이 클러스터링 생성 단계에서 잔여에너지 정보를 이용하여 헤드를 선출하되 선출 과정을 두 번 반복하여 잔여 에너지가 많은 두 개의 클러스터 헤드를 선출하는 방법을 사용한다. 이 방법을 “단순 이중 레이어 분산 클러스터링 기법 (Simple Dual-layer Energy-Efficient Distributed Clustering Algorithm)” 이라고 한다.

4.3 확장 이중 레이어 분산 클러스터링 기법

클러스터링을 통해서 데이터를 수집하는 과정에서 데이터를 전송하기 위해서 소모되는 에너지의 총합을 “데이터 수집 비용”이라고 정의할 때, 데이터 수집 비용은 클러스터 헤드의 위치에 따라 크게 달라진다. 센서 노드들이 균등하게 분포되어 있다고 가정할 때 각 노드를 클러스터 헤드로 선출할 경우 데이터 수집 비용은 식 (3)과 같고, 그림 3과 같은 분포를 보여준다. 중앙부에서 데이터 수집 비용이 가장 작으며 가장자리로 갈수록 데이터 수집 비용이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 헤드와 클러스터를 구성하는 각 노드들 간의 거리에 비례하며 결국 중앙에 위치한 센서 노드가 데이터를 수집할

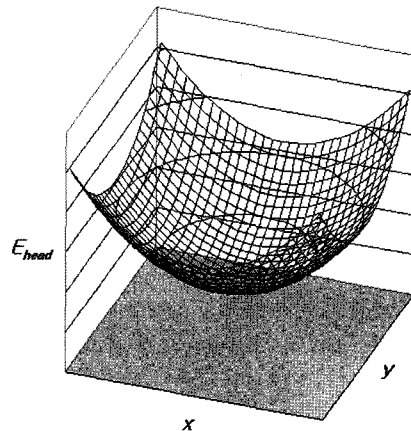


그림 3 헤드의 위치에 따른 데이터 수집 비용

때 가장 효율적이라는 것을 의미한다.

$$E_{head} = \sum_{i=1}^N (E_{elec} + \epsilon_{fs} \times |Node_{head} - Node_i|^2) \quad (3)$$

클러스터 헤드의 에너지 소모는 다른 노드에 비해 빠르기 때문에 중앙에 위치한 센서 노드를 고정적으로 클러스터 헤드로 사용할 수 없다. 따라서 센싱 영역의 중심으로부터 반지름 r 을 가진 원형의 영역을 설정하고, 이 영역 내에 포함된 센서 노드를 대상으로 수집을 위한 클러스터 헤드를 선출한다. 본 논문에서는 그림 4와 같이 “계층 분리선”을 정의하고, 이 영역을 기준으로 수집 계층과 전송 계층을 분리한다. 즉, 식 (4)와 같이 반지름 $r \times \delta$ 을 가진 원을 기준으로 내부에서 수집을 위한 클러스터 헤드 노드 $CH_{collecting}$ 를 선출하고, 외부에서 전송을 위한 클러스터 헤드 $CH_{routing}$ 을 선출한다. 이때

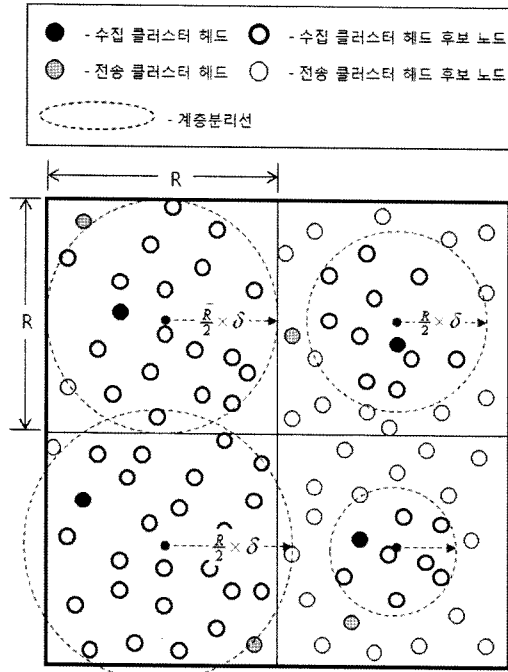


그림 4 수집 계층과 전송 계층의 분리

δ 는 클러스터 헤드 선출 영역의 크기를 결정하는 비례 상수이며 비례상수에 따라 각 선출 영역에 참여하는 센서 노드의 비율이 결정된다.

*수집 클러스터 헤드 선출 영역 :

$$x^2 + y^2 \leq \left(\frac{R}{2} \times \delta\right)^2 \tag{4}$$

*전송 클러스터 헤드 선출 영역 :

$$x^2 + y^2 > \left(\frac{R}{2} \times \delta\right)^2$$

각 센서 노드들은 처음에 배포될 때, 어떤 영역에 포함될지 결정되어야 한다. 응용분야에 따라 특정 위치에 설치되는 센서 노드의 경우 설치 이전에 설정될 수 있으며, 센서 노드가 이동성을 가지고 있거나 대량으로 무작위로 배포되어 그렇게 할 수 없는 경우 GPS(Global Positioning System) 같은 위치 탐색 시스템을 통해서 자신의 절대적인 위치나 상대적인 위치를 알 수 있고 [14-16], 별도의 제어 없이 센서 노드 스스로 클러스터

헤드 선출 영역을 결정할 수 있다.

4.4 클러스터링을 이용한 센싱 데이터 수집 과정

클러스터링 기법을 이용한 센싱 데이터 수집은 그림 5와 같이 (1) 클러스터 생성, (2) 데이터 수집, (3) 데이터 전송의 과정을 거친다. 클러스터 생성 과정에서는 클러스터를 생성하고, 효율적인 데이터 수집을 위한 TDMA(Time Division Multiple Access) 스케줄링 테이블을 작성한다. 하지만 이 과정을 수행하기 위해서 클러스터 헤드와 클러스터를 구성하는 센서 노드간의 잦은 통신을 요구한다. 이것은 적지 않은 에너지 소모를 의미하며, 이를 해결하기 위해서 주기마다 클러스터를 다시 생성하지 않고, 클러스터 헤드가 일정 에너지를 소모하거나 지정 횟수 이상의 주기마다 클러스터를 생성한다[13].

4.4.1 클러스터 생성 과정

클러스터 생성 과정은 크게 (1) Advertisement, (2) Join, (3) TDMA 스케줄링 과정으로 구성된다. Advertisement 과정은 센서 노드가 클러스터 헤드로 선출되기 위해서 주위로 Advertisement 메시지를 브로드캐스팅 하는 것을 의미하며, 메시지를 수신한 센서 노드들은 메시지를 전송한 센서 노드를 클러스터 헤드로 선출하기 위해서 Join 메시지를 전송하게 된다. Join 메시지를 수신한 클러스터 헤드는 TDMA 방식을 이용한 데이터 수집을 하기 위해서 클러스터를 구성하는 노드의 수를 기반으로 TDMA 스케줄링 테이블을 작성하고 클러스터 내부로 브로드캐스팅한다. 이 과정의 상세한 의사코드는 그림 6과 같다.

(a) Advertisement 과정

각 센서 노드들은 잔여 에너지양에 따라 현재 주기의 클러스터 헤드를 결정한다. 이것은 LEACH-C의 클러스터 헤드 선출 기법과 유사하나 확률적인 개념 대신에 절대적인 시간 단위를 사용한다는 차이점이 있다. 잔여 에너지양에 따라 모든 노드들은 Delay time을 결정하고, Delay time이 지난 후 자신을 클러스터 헤드로 선정하기 위해서 주위로 Advertisement 메시지를 브로드캐스팅하게 된다. Advertisement 메시지를 전송하기 이전에 다른 센서 노드로부터 Advertisement 메시지를 수신한 센서 노드는 Advertisement 메시지를 브로드캐스팅(broadcasting)하는 것, 즉 클러스터 헤드가 되는

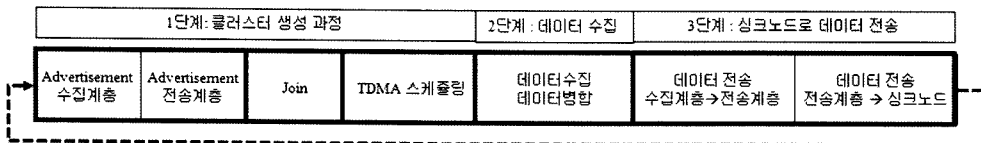


그림 5 클러스터 생성 과정

```

Initialize : //각 노드들은 GPS 수신기를 통해 위치를 알수 있음
1. isInnerDomain ← {GPS} //수집 클러스터 헤드 선출 범위 포함 여부
2. CellID ← {GPS} //그리드 셀의 ID

Main Processing : // 클러스터 헤드 선출 과정
1. delayTime ← Durationadv × (1 -  $\frac{E_{residual}}{E_{max}}$ )
   // delayTime : 잔여에너지에 의한 대기시간 계산
2. wait for delayTime or until receiving {any Advertisement Message}
   //delayTime 또는 다른 Advertisement Msg. 를 수신할 때 까지 대기
3. if( delayTime_Expired ) //delayTime이 경과한 경우
4.   if( isInnerDomain )
5.     become CHcollect
6.   else
7.     become CHrouting
8.   end if
9. else
10.  become non-CHcollect //다른 노드로부터 Advertisement Msg.를 수신한 경우
11. end if

CHcollect : //수집 클러스터 헤드의 처리 과정
1. broadcast( the Advertisement Message {CellID, isInnerDomain, nodeID, position} )
2. accept(Join Messages)
3. broadcast(TDMA_scheduling_table)
4. if( remainEnergy > minEnergyThreshold ) // 잔여에너지량 > 최저에너지 기준값
5.   receive( sensing data )
6.   aggregation( a set of sensing data )
7.   transmit_data_to_CHrouting ( aggregationData, CellID )
   //전송 클러스터 헤드로 수집된 데이터 전송
8.   end if

non-CHcollect : // 일반 노드의 처리 과정
1. join_to_cluster( nodeID, Header.nodeID, position )
   //클러스터 헤더에게 Join 메시지 전송
2. receive(TDMA_scheduling_table) // TDMA 스케줄 수신
3. foreach(TDMA_scheduling_table) // TDMA 스케줄에 따른 데이터 패킷 전송
4.   transmit_data(Packet, NodeID)

CHrouting : // 전송 클러스터 헤드의 처리 과정
1. broadcast( the Advertisement Message {CellID, isInnerDomain, nodeID, position} )
2. receive( aggregationData )
3. transmit_dataToSink( aggregatedData, CellID ) // 싱크노드로 데이터 전송

```

그림 6 클러스터 생성 과정 의사코드

것을 포기한다. 이러한 방식을 통해 더 많은 에너지를 가진 센서 노드가 클러스터 헤드가 된다. 클러스터 헤드 선출 영역에 따라 독립적으로 헤드 선출이 이루어지며, 클러스터 헤드 선출 영역 내부와 외부에서 각각 하나씩 클러스터 헤드가 선출된다.

그림 7은 수집 계층의 클러스터 헤드를 선출하는 과정을 나타낸다. 수집 계층에서 선출된 클러스터 헤드는 데이터 수집을 담당하며, 임의의 센서 노드 N1~N4가

있다고 가정할 때 앞에서 언급한 Advertisement 과정에 따라 가장 많은 에너지를 가진 N1이 가장 먼저 Advertisement 메시지를 브로드캐스팅하게 된다. Advertisement 메시지를 수신한 모든 센서 노드들은 N1을 클러스터 헤드로 선정하고, Join 과정을 수행하게 된다. 그림 8은 전송 계층의 클러스터 헤드를 선출하는 과정의 예를 나타낸다. 전송 계층에서 선출된 클러스터 헤드는 데이터 전송을 담당하며, 수집 계층에서 이루어진 방

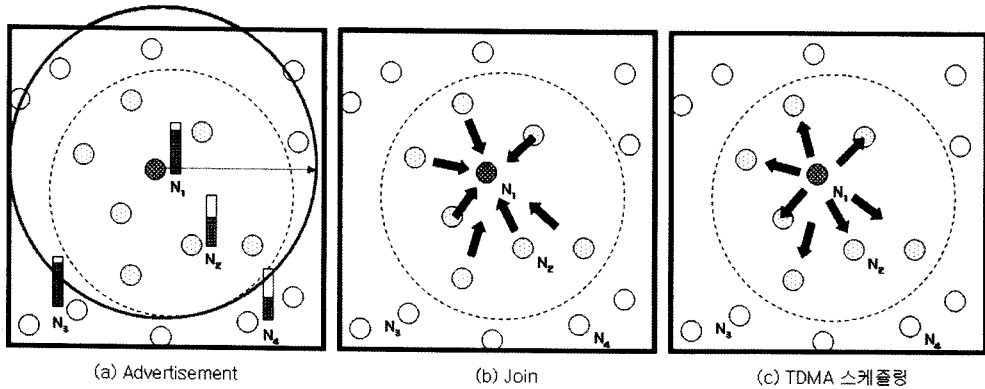


그림 7 수집 계층의 클러스터 헤드 선출 과정 (Advertisement -> Join -> TDMA 스케줄링)

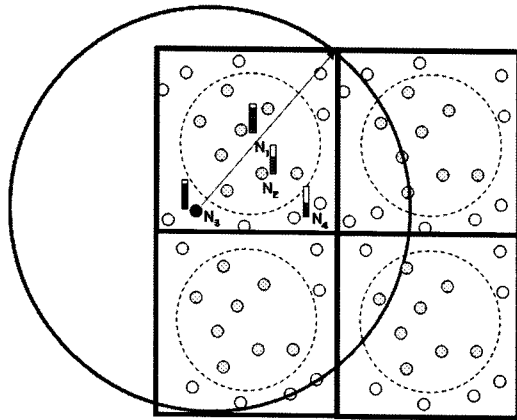


그림 8 전송 계층의 클러스터 헤드 선출 과정 (Advertisement 만 수행)

법을 통해 가장 많은 에너지를 가진 N3이 Advertisement 메시지를 브로드캐스팅 하는 것은 수집 계층에서 이루어진 과정과 동일하지만 이를 수신한 다른 노드들이 별도의 Join 과정을 수행하지 않는다는 차이점이 있다.

(b) Join 과정

Advertisement 메시지를 수신하고 해당 센서 노드를 클러스터 헤더를 선정한 센서 노드는 클러스터 헤드에게 클러스터 구성원이 된 것을 알려야 한다. 이 과정을 "Join 과정"이라고 이야기하며, 각 노드들은 CSMA MAC 프로토콜을 사용하여 클러스터 헤드에게 Join 정보를 전송한다[9]. Join 과정이 수행되는 동안 모든 클러스터 헤드들은 수신기를 켜 상태로 유지된다.

(c) TDMA 스케줄링 테이블 작성

Join 과정을 통해서 클러스터 헤드는 클러스터에 포함된 모든 센서 노드들로부터 메시지를 수신한다. 클러스터 헤드는 클러스터 내 노드의 수를 기반으로 데이터를 전송할 수 있는 시간 슬롯을 할당하고 TDMA 스케

줄링 테이블을 작성한다. 작성이 완료된 이후, 스케줄링 테이블을 브로드캐스팅 한다.

4.4.2 데이터 수집과 데이터 병합

데이터 수집을 위해서 일반적인 클러스터링 알고리즘에서 사용하는 TDMA 방법을 사용한다. 데이터 수집 과정동안 센서 노드들은 대기 에너지를 절약하기 위해서 대기 동작을 비활성화시키고, 클러스터 생성 과정에서 작성된 TDMA 스케줄링 테이블에 따라 할당된 시간 슬롯에만 동작을 활성화하여 센싱된 데이터를 클러스터 헤드로 전송한다. 이러한 TDMA 방식은 대기시간을 줄이기 때문에 유용할 뿐만 아니라, 통신 범위가 겹치는 센서 노드들 간의 오버히어링(overhearing)을 방지할 수 있다. 데이터의 수집이 종료되면, 클러스터 헤드는 효율적인 데이터 전송을 위해서 응용분야의 특성에 따라 압축, 합산, 평균과 같은 연산을 통해 데이터를 병합하게 된다. 센서 네트워크를 통해 수집된 데이터들은 시간적 또는 공간적으로 유사성을 가지거나 중복되는 값을 가지는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 이용하여 데이터를 압축하거나, 모든 데이터를 전송하는 것이 아니라 일부 데이터만을 싱크 노드로 전송하는 데이터 제한 기법(data suppression technique)들이 제안되었다[17-20]. 이렇게 병합된 데이터의 크기는 각각의 데이터의 크기를 합한 것보다 훨씬 작기 때문에 데이터 전송시 소모되는 에너지를 감소시켜준다. 본 논문은 데이터 수집과 전송에 따른 클러스터 헤드의 부하를 분산하기 위한 클러스터링 기법의 제안에 초점을 맞추고 있으며, 기존의 다양한 데이터 병합(데이터 압축 또는 데이터 제한) 기법과 함께 사용될 수 있다.

4.4.3 데이터 전송

기존에 제안된 클러스터링 기법들은 데이터 수집 단계에서 수집되거나 병합된 데이터를 클러스터 헤드가 싱크 노드로 바로 전송한다. 일반적으로 센서 네트워크

내부나 외부에 위치하고 있는 싱크 노드와 통신을 하기 위해서는 클러스터 내부에서 통신하는 것보다 더 큰 통신비용을 요구한다. 이것은 클러스터 헤드의 빠른 에너지 소모의 주된 원인이며 이를 해결하기 위해서 클러스터 생성 과정에서 전송을 수행하는 센서 노드를 별도로 선출했다. 이 센서 노드를 “전송 클러스터 헤드”라고 부르며, 전송 클러스터 헤드가 데이터를 싱크 노드로 보내기 위해서는 수집 클러스터 헤드에 의해 수집/병합된 데이터를 전송 클러스터 헤드로 전송해야한다. 그 다음 전송 클러스터 헤드는 싱크 노드로 데이터를 전송한다. 이때, 수집과 전송을 담당하는 클러스터 헤드들을 제외한 나머지 센서 노드들은 동작을 비활성 상태로 유지하게 된다. 전송 클러스터 헤드가 싱크 노드까지 데이터는 전송하는데 필요한 에너지와 수집 클러스터 헤드로부터 전송 클러스터 헤드까지 데이터를 전송하는 비용의 합은 단일 클러스터 헤드가 데이터를 수집하고 싱크노드까지 전송하는 에너지양보다 크다. 하지만, 단일 클러스터 헤드가 소모하던 에너지를 두 개의 센서 노드가 분배하기 때문에 전체 네트워크의 생명주기는 연장된다.

5. 실험 및 성능 평가

5.1 실험 환경

제안하는 이중 레이어 분산 클러스터링 기법을 평가하기 위해서 사용한 시뮬레이션 환경과 에너지 소비 모델은 다음과 같다. 넓이가 120m × 120m의 정방형인 센싱 영역에 200~800개의 노드가 균등하게 분포되어 있고, 싱크 노드는 (50, 175)에 위치해 있다고 가정하였다. 각 센서 노드들의 초기 에너지는 0.5J 이 할당되어 동작한다. Advertisement 메시지는 400bits, Join 메시지는 200bits, 센싱 데이터는 1000bits, TDMA 스케줄링 메시지는 2000bits라고 가정한다. 에너지 소비 모델은 앞장에서 언급한 모델을 사용하였으며, 송/수신 회로에서 소모되는 에너지 소비량, $E_{elec}(nJ/bit)$ 는 $50nJ/bit$, 증폭기에서 소모되는 에너지 량, $\epsilon_{fs}(pJ/bit/m^2)$, $\epsilon_{mp}(pJ/bit/m^4)$ 는 각각 $10pJ/bit/m^2$, $0.013pJ/bit/m^4$ 이라고 가정하였다. 각 클러스터의 헤더 노드들이 수신한 데이터들을 병합하는데 드는 비용은 $5nJ/signal$ 이다.

제안하는 기법의 우수성을 입증하기 위해서 기존 클러스터링 기법인 LEACH, HEED, ANTCLUST와 생명주기를 비교하였다. 그리고 제안하는 기법의 주요 알고리즘인 클러스터 헤더 선정의 영역 제한의 효율성 평가를 위해 헤더 선출시 영역을 제한하지 않는 경우와 제한하는 경우를 비교하였다. 마지막으로 제안하는 기법에 영향을 미칠 수 있는 요소인 클러스터 수, 밀집도, 클러스터 헤더 선출 영역의 크기에 따른 성능을 비교

분석하였다.

5.2 생명 주기 비교

그림 9는 기존 클러스터링 기법과 생명주기를 비교한 결과를 나타낸다. [13]에서는 전체 노드의 80% 이상이 살아 있는 시점까지를 “센서 네트워크의 생명주기”로 가정한다. 즉, 전체 센서의 80% 이상의 노드가 생존해 있는 경우, 수집된 데이터의 신뢰성이 보장된다고 간주한다. 이 가정에 따라 분석을 한 결과 본 논문에서 제안하고 있는 이중 레이어 분산 클러스터링 기법이 기존 제시된 다른 알고리즘에 비해 10~40% 정도의 성능향상이 되었음을 알 수 있었다. 이중 레이어 분산 클러스터링 기법은 약 1950 라운드까지 80% 이상의 센서 노드가 살아 있다가 이후 급격히 센서 노드의 수가 감소한다. 이것은 이중 레이어 분산 클러스터링 기법이 클러스터 헤드의 에너지 소모를 분산하였기 때문이다.

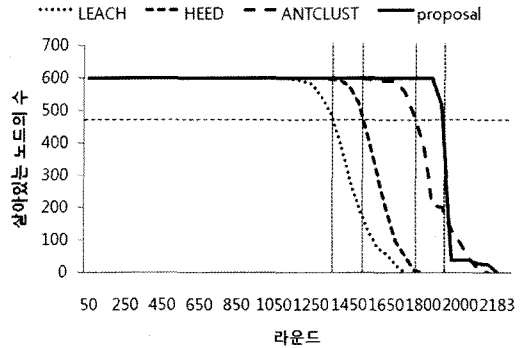


그림 9 기존 알고리즘들과 제안한 알고리즘의 생명주기의 비교 (점선이 교차하는 부분: 살아 있는 노드가 전체의 80%가 되는 시점)

5.3 단순/확장 이중 레이어 분산 클러스터링 기법 비교

이중 레이어 분산 클러스터링 기법은 클러스터 헤드의 선정시 선정되는 영역을 제한하는 기법을 제안하였다. 그림 10은 영역 제한 기법의 효율성을 비교하기 위하여 단순 이중 레이어 분산 클러스터링 기법과 확장 이중 레이어 분산 클러스터링 기법을 비교한 결과를 보여준다. 비교 결과, 단순 이중 레이어 기법은 약 1750주기, 확장 이중 레이어 기법은 약 1950주기까지 80%이상의 노드가 살아있음을 볼 수 있다. 단순 이중 레이어 분산 클러스터링 기법에 비해 클러스터 헤더 선출 영역을 적용한 확장 이중 레이어 분산 클러스터링 기법이 약 10% 가 향상되었음을 알 수 있다. 이것은 가장자리보다 중앙부에 위치한 센서 노드를 클러스터 헤드로 선정할 때, 헤더 노드와 일반 노드들 간의 거리의 합이 작아지기 때문에 이에 비례해서 데이터 수집 비용이 작아지는 것이다.

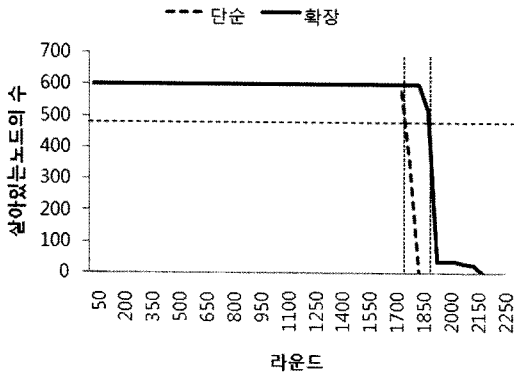


그림 10 단순/확장 이중 레이어 분산 클러스터링 기법 비교(점선이 교차하는 부분 : 살아 있는 노드가 전체의 80%가 되는 시점)

5.4 클러스터의 개수에 따른 생명주기 비교

그림 11은 클러스터 개수에 따른 이중 레이어 분산 클러스터링 기법의 성능을 비교한 결과이다. 전체 120 × 120m 인 영역을 1, 4, 9개의 클러스터로 구성할 경우, 각각 클러스터 수에 비례하여 약 1700 주기, 1950 주기, 2000 주기까지 센서 노드의 80% 이상이 살아남는다. 이것은 전체 센싱 영역을 여러 개의 클러스터로 구성함으로써 분산처리가 가능해지고, 클러스터 헤더와 클러스터를 구성하는 센서 노드와의 거리의 합이 상대적으로 짧아지기 때문이다.

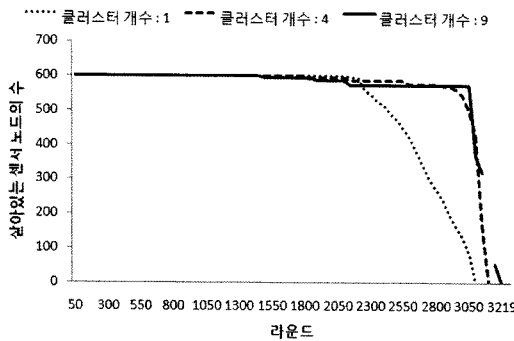


그림 11 클러스터 개수에 따른 생명주기 비교

5.5 밀집도에 따른 생명주기 비교

표 2는 노드의 수에 따른 밀집도를 나타낸다. 그림 12는 밀집도에 따른 이중 레이어 분산 클러스터링 기법의 성능을 보여준다. 밀집도가 높으면 높을수록 센서 네트워크의 생명주기가 약간씩 증가 하는 것을 볼 수 있다. 그 결과, 이중 레이어 분산 클러스터링 기법이 0.045 (노드의 개수 : 600 개) 정도의 밀집도를 가진 센서 네트워크에서 가장 효율적임을 보여준다.

표 2 노드의 수에 따른 밀집도

노드의 수 (밀집도 D)	클러스터의 수 (그리드의 크기)
200 (0.015)	4 (60 × 60)
400 (0.03)	4 (60 × 60)
600 (0.045)	4 (60 × 60)
800 (0.06)	4 (60 × 60)

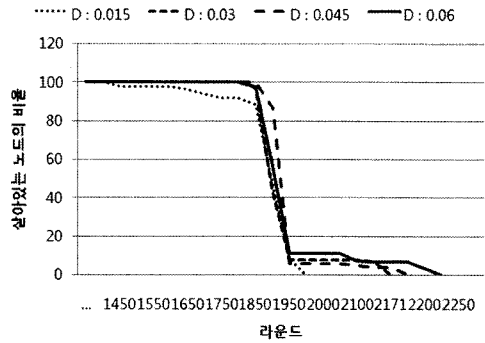


그림 12 밀집도에 따른 생명주기 비교

5.6 클러스터 헤드 선출 제한 영역의 크기에 따른 성능 비교

이중 레이어 분산 클러스터링 기법은 센싱 영역을 두 계층으로 나누고, 각 계층에서 클러스터 헤드를 선출한다. 따라서 각 계층을 구성하는 센서 노드의 수에 따라 생명주기의 차이가 발생한다. 두 계층을 구성하는 센서 노드의 비율 결정하는 것은 클러스터 헤드 선출 영역 제한 비례상수이다. 그림 13은 클러스터 헤드 선출 영역 제한 비례상수에 따른 살아있는 노드의 비율을 나타낸다. 그 결과, 제안하는 알고리즘은 비례 상수 δ 가 1.1일 때 가장 좋은 성능을 보여준다. 이 비례상수는 수집 계층의 크기에 비례한다. 즉 비례상수가 클수록 수집 계층의 헤드가 될 수 있는 노드들의 수가 증가한다. 반면에 전송계층의 헤드를 선출하는 영역은 줄어든다.

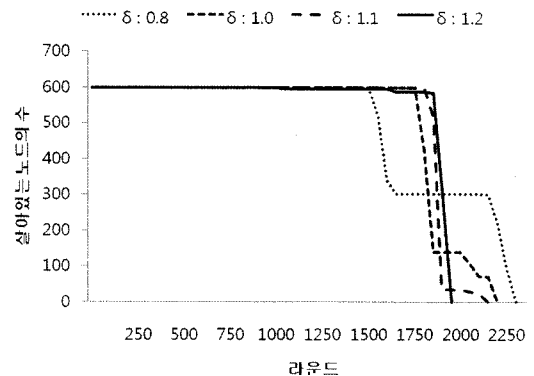


그림 13 클러스터 헤드 선출 제한 영역의 크기에 따른 성능 비교 (δ : 비례 상수)

6. 결론

본 논문에서는 센서 네트워크의 생명주기를 연장시키기 위한 새로운 에너지 효율적인 분산 클러스터링 기법을 제안했다. 제안하는 클러스터링 기법은 클러스터 헤드의 에너지 소모를 분산시키기 위해서 센서 영역을 수집 계층과 전송 계층으로 분리하고, 역할에 따라 수집과 전송을 담당하는 두 개의 클러스터 헤드를 선출하는 기법이다. 두 개의 클러스터 헤드를 선출하는 기법으로 "단순 이중 레이어 분산 클러스터링 기법"과 "확장 이중 레이어 분산 클러스터링 기법"을 제안하였다. 두 기법 모두 수집과 전송을 분리하여 처리하기 때문에 기존 기법에 비해 클러스터 헤드의 에너지 소모가 분산되어 전체적인 네트워크 생명 주기가 10~40% 연장되었다. 헤드 선출 영역 제한 기법을 이용하는 확장 이중 레이어 분산 클러스터링 기법의 경우, 데이터 수집을 담당하는 클러스터 헤드의 에너지 소모가 감소하여 단순 이중 레이어 분산 클러스터링 기법에 비해 네트워크의 생명 주기가 10% 더 향상되었다.

기존에 제안된 클러스터링 기법이 클러스터의 크거나 클러스터를 구성하는 센서 노드들의 수를 조정하는 간접적인 에너지 분산 방법을 제안했지만, 본 논문에서는 클러스터 헤드의 역할에 따른 에너지 소모를 분석하고, 이를 직접적으로 분산하기 위한 방법을 제안했다. 향후 연구방향은 클러스터로부터 수집된 데이터를 효율적으로 압축하거나 제한할 수 있는 기법을 제안하고, 이중 레이어 분산 클러스터링 기법의 특성과 함께 사용될 수 있는 다중 홉 라우팅 기법을 제안하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava, "Instrumenting the World with Wireless Sensor Networks," in Proceedings of International Conference Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 2001.
- [2] G.J. Pottie and W.J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors," *Comm. ACM*, Vol.43, No.5, pp. 51-58, May 2000.
- [3] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson. "Wireless sensor networks for habitat monitoring," in ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), Atlanta, GA, Sep. 2002.
- [4] N. Xu, "A Survey of Sensor Network Applications," University of Southern California, Jan. 2004.
- [5] L. Schwiebert, S. K. S. Gupta, and J. Weinmann. "Research challenges in wireless networks of biomedical sensors," in Proceedings of the Mobile Computing and Networking, pp. 151-165, Jul. 2001.
- [6] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, "Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks," in Proceedings of the Mobile Computing and Networking, Seattle, WA., pp. 263-270, Aug. 1999.
- [7] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, and J. Heidemann, "Scalable Coordination for Wireless Sensor Networks: Self-Configuring Localization Systems," in Proceedings of the Sixth International Symposium on Communication Theory and Applications, Ambleside, Lake District, UK, Jul. 2001.
- [8] P. Gupta and P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.IT-46, No.2, pp. 388-404, Mar. 2000.
- [9] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002), pp. 1567-1578, Jun. 2002.
- [10] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, Jan. 2000.
- [11] W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [12] O. Younis and S. Fahmy, "Distributed clustering in adhoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach," *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 366-379, Mar. 2004.
- [13] J. Kamimura, N. Wakamiya, M. Murata, "Distributed Clustering Method for Energy-Efficient Data Gathering in Sensor Networks," in Proceedings of the 1st IEEE Communications Society Conference (SECON 2004), Oct. 2004.
- [14] A. Savvides, C. Han, and M. Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors," in Proceedings of the Mobile Computing and Networking, pp. 166-179, Jul. 2001.
- [15] A. Nasipuri and K. Li, "A directionality based location discovery scheme for wireless sensor networks," in Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, pp. 105-111, Sep. 2002.
- [16] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher, "Range-free localization 30. schemes for large scale sensor networks," in Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, pp. 81-95, Sep. 2003.

- [17] D. W. Carman, P. S. Kruus, and B. J. Matt, "Constraints and approaches for distributed sensor network security," NAI Labs Technical Report 00-010, Sep. 2000.
- [18] D. Petrovic, R. Shah, K. Ramchandran, and J. Rabaey. "Data funneling: Routing with aggregation and compression for wireless sensor networks," in Proceedings of the 2003 IEEE Sensor Network Protocols and Applications, May 2003.
- [19] S. Pattem, B. Krishnamachari, and R. Govindan. "The impact of spatial correlation on routing with compression in wireless sensor networks," in Proceedings of the 2004 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Apr. 2004.
- [20] A. Silberstein, R. Braynard, and J. Yang. "Constraint Chaining: On Energy-Efficient Continuous Monitoring in Sensor Networks," in Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp. 157-168, Jun. 2006.



여 명 호

2004년 2월 충북대학교 정보통신공학과 공학사. 2006년 2월 충북대학교 정보통신공학과 공학석사. 2006년~현재 충북대학교 정보통신공학과 박사과정. 관심분야는 메인 메모리 기반 데이터베이스 시스템, 시공간 데이터베이스 시스템, 무선 센서

네트워크 등



김 유 미

2006년 2월 충북대학교 컴퓨터공학과 공학사. 2006년 3월~현재 충북대학교 바이오정보기술학과 석사과정. 관심분야는 무선 센서 네트워크, 데이터베이스 시스템, 바이오 인포매틱스 등



유 재 수

1989년 2월 전북대학교 컴퓨터공학과 공학사. 1991년 2월 한국과학기술원 전산학과 공학석사. 1995년 2월 한국과학기술원 전산학과 공학박사. 1995년 2월~1996년 8월 목포대학교 전산통계학과 전임강사. 1996년 8월~현재 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부 및 컴퓨터정보통신연구소 정교수. 관심분야는 데이터베이스 시스템, 센서네트워크 데이터 관리, 멀티미디어 데이터베이스, 바이오 인포매틱스 등