

무선 센서네트워크의 에너지 효율적 집단화에 관한 연구

이 상 학* · 정 태 충**

요 약

무선 센서네트워크는 광범위하게 설치되어 있는 유무선 네트워크 인프라에 다양한 센서 디바이스를 결합하여 감지된 환경데이터를 응용 서비스와 연결하여 상황인지를 가능케 하는 유비쿼터스 컴퓨팅의 핵심기술이다. 하지만 자원이 제한된 노드를 이용해서 역동적인 애드 hoc 네트워크를 유지하며 네트워크의 생존시간을 최대화하기 위해서는 네트워크 계층에서 효율적인 에너지 사용 방법을 필요로 한다. 집단화(Clustering)를 통한 데이터의 병합과 전송은 센서 네트워크의 구조와 데이터 특성에 비추어 에너지 효율적인 방법이다. 본 논문에서는 싱크로부터의 거리 정보를 이용해 분산된 방법으로 집단을 구성하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 집단 구성에 따르는 추가적인 비용을 최소화하면서 전체 네트워크 노드간의 에너지 소모를 균등하게 유지할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 기존의 센서네트워크를 위해 제안된 확률적 집단 구성과 비교해 에너지 사용에 보다 효율적이었으며 이를 통해 네트워크의 생존시간을 늘릴 수 있었다.

A Study of Energy Efficient Clustering in Wireless Sensor Networks

Sang Hak Lee* · Tae Choong Chung**

ABSTRACT

Wireless sensor networks is a core technology of ubiquitous computing which enables the network to aware the different kind of context by integrating existing wired/wireless infranet with various sensor devices and connecting collected environmental data with applications. However it needs an energy-efficient approach in network layer to maintain the dynamic ad hoc network and to maximize the network lifetime by using energy constrained node. Cluster-based data aggregation and routing are energy-efficient solution judging from architecture of sensor networks and characteristics of data. In this paper, we propose a new distributed clustering algorithm in using distance from the sink. This algorithm shows that it can balance energy dissipation among nodes while minimizing the overhead. We verify that our clustering is more energy-efficient and thus prolongs the network lifetime in comparing our proposed clustering to existing probabilistic clustering for sensor network via simulation.

키워드: 유비쿼터스 센서네트워크(Ubiquitous sensor networks), 자율 감지(Autonomic Sensing), 에너지 효율적 집단화(Energy Efficient Clustering), 분산 처리(Distributed Processing)

1. 서 론

무선통신, 반도체, 센서 기술의 발전에 힘입어 실현 가능하게 된 무선 센서네트워크는 실세계의 상황인지(context-aware)를 위한 유비쿼터스 컴퓨팅의 핵심기술로 떠올랐다. 저전력, 저가격, 다량의 노드로 구성되는 센서네트워크는 기존의 단일 센서에서 수행하던 임무를 보다 많은 노드에서 분배해서 수행하고 데이터를 집단적으로 처리하여 정보의 정확도를 높이고 이를 통해 실세계의 현상을 보다 정확하고 신뢰성 있게 관찰할 수 있다. 에너지와 처리 능력이 극히 제한적인 센서네트워크 플랫폼에서 데이터를 지능적

으로 처리하고 네트워크의 생존시간(lifetime)을 늘이기 위해서는 네트워크 분야의 광범위한 연구를 필요로 한다[1].

현재 네트워크 계층 프로토콜에 기반을 두어 에너지를 절약하기 위한 연구가 다각도로 진행 중이며 데이터의 경로 설정(routing), 데이터 병합(data aggregation) 등에 대해 많은 연구가 수행되어 왔다. 경로 설정(routing)을 위해 계층적(hierarchical) 구조, 단층(flat) 구조, 위치(geographic) 기반 경로 설정 등의 여러 유형의 네트워크 구조가 제안되고 데이터 중심(data-centric)의 경로 설정과 데이터 병합을 위해 그룹 형성을 통한 데이터 병합 알고리즘과 네트워크 경로 상에서 최적 병합 트리(tree)의 구성 등에 대한 연구가 이루어졌다[10].

센서네트워크의 모든 노드는 싱크(sink)에게 데이터를

* 본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 추진되고 있는 유비쿼터스 컴퓨터 및 네트워크 원천기반 기술개발사업의 지원으로 의한 것임.

† 정 회 원 : 전자부품연구원 선임연구원, 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과

** 정 회 원 : 경희대학교 컴퓨터공학과 교수
논문접수 : 2004년 6월 11일, 심사완료 : 2004년 7월 13일

1) 센서 지역으로부터 발생하는 데이터를 수집하여 사용자에게 전송하고 센서네트워크와 인터넷, 위성 등의 외부망을 연결하여 관리자가 원격에서 센서네트워크를 제어할 수 있도록 하는 노드이다.

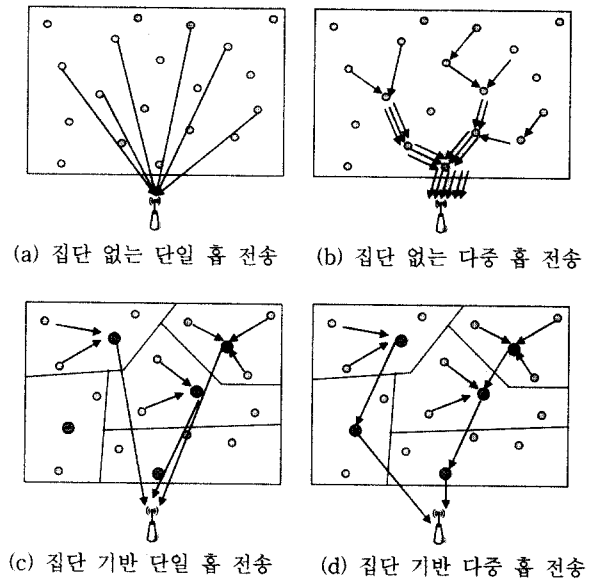
송신하는 다 대 일(many-to-one) 통신을 수행하고 노드들은 조밀하게 배치되기 때문에 지리적으로 근접한 노드들은 중복된 데이터를 전송할 수 있다. 따라서 모든 노드들이 감지된 데이터를 싱크로 바로 전송한다면 이는 네트워크 전체의 트래픽 부하로 이어져 에너지를 급격히 감소시킨다. 이를 극복하기 위해 국부지역(local area)에서 노드간의 협업을 통해 데이터 병합을 수행하고 이를 통해 나온 결과만을 전송하는 집단화(Clustering) 방법이 제안되었다. 네트워크의 집단화는 에너지 소모를 줄이는데 유용하며 특히 네트워크의 노드 수가 증가되어 확장성이 요구되는 응용에 매우 효과적이다[25]. 최적의 집단을 구성하기 위해서는 중앙의 서버에서 네트워크 전체에 대한 상태 정보에 기반을 둔 집중(centralized) 처리 방법이 가장 효율적이지만 지속적으로 변하는 상태를 유지하기 어렵고 집단 구성을 위한 추가 비용을 증가시킨다. 따라서 개별 노드에서 집단을 구성하는 분산(distributed) 처리 방법에 대한 필요성이 절실하다. 본 연구에서는 싱크로부터의 거리를 기반으로 에너지 사용이 균등한 집단을 구성하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 센서네트워크의 데이터 수집 시 에너지를 균등하게 사용하도록 하여 네트워크 생존시간을 연장시킬 수 있었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 무선 네트워크에서 데이터 수집을 위한 집단 구성방법과 관련된 기존 연구에 대해, 3장에서는 집단 구성 방법이 적용될 네트워크의 모델에 대해 알아본다. 4장과 5장에서는 제안한 집단 구성 알고리즘의 상세한 내용과 분석적 모델을 통한 검증과 시뮬레이션을 통한 성능에 대한 평가 결과를 기술하고, 마지막으로 6장에서는 결론 및 향후 연구 방향으로 끝을 맺는다.

2. 관련 연구

네트워크 노드의 집단화에 기반을 둔 통신 모델은 일정 지역을 관장하는 기지국을 통해 일반 노드들이 송수신을 하는 이동통신이 대표적이다. 이 구조를 무선 센서네트워크에 적용하려는 시도는 대역폭의 효율적인 관리와 집단 헤드(head) 노드에서 데이터 병합(aggregation)을 수행할 수 있기 때문이다[7]. 기존의 무선 애드 혹(ad hoc) 네트워크에서 목적에 맞는 효율적인 집단 구성 방법에 대한 연구가 수행되어 왔다. 본 장에서는 무선 센서네트워크의 구조, 데이터 병합을 위한 집단 구성 방법, 데이터 병합 알고리즘, 그리고 애드 혹 네트워크의 확률적(probabilistic) 집단 구성 방법, 비용(cost) 기반 집단 구성 방법 등 기존 연구에 대해 알아보고 본 연구의 목표를 도출한다.

무선 센서네트워크의 데이터 수집을 위한 네트워크 구조는 (그림 1)과 같이 여러 유형으로 분류할 수 있다[4].



(그림 1) 무선 센서네트워크의 구조

(그림 1)(a)는 집단 없이 싱크로 바로 전송하는 방식으로 가장 단순한 구조이나 에너지 소모가 많고 (b)는 일반적인 애드 혹(ad hoc) 네트워크의 다중 홉(hop) 라우팅과 동일하다. 이 두 가지 방식은 중앙의 싱크에서 모든 데이터를 수집 후 분석을 수행하기 때문에 네트워크 내의 데이터 전송을 위한 에너지 소모가 많은 단점을 지닌다. (c)와 (d)는 네트워크 내부에서 집단을 구성하고 집단 내에서는 헤드 노드로 경로 설정 없이 바로 전송하고 헤드 노드는 이들을 병합한 결과 데이터만을 싱크로 직접 전송하거나 다른 집단의 헤드 노드를 네트워크의 백본(backbone)으로 활용하여 다중 홉 전송을 수행한다[3]. 네트워크 내부에서 데이터 병합에 따른 전송량의 절감 효과는 L. Krishnamachari[2]이 식 (1)과 같이 분석해 보였다.

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \frac{N_d}{N_A} = \frac{1}{k} \tag{1}$$

위 식에서 ND는 데이터 병합을 수행하는 데이터 중심(data-centric)의 라우팅의 전송량, NA는 데이터 병합을 수행하지 않는 일반적인 주소 중심(address-centric)의 라우팅의 전송량, d는 데이터 발생 노드에서 싱크까지의 거리(홉수), 그리고 k는 데이터 발생 노드의 수를 나타낸다. 데이터 발생 노드로부터 싱크까지의 거리가 멀어지고 데이터 발생 노드의 수가 증가할수록 데이터 병합을 수행하는 라우팅에서의 전송량은 보다 적어진다[5, 6]. 따라서 집단 기반의 데이터 병합을 통한 전송은 센서네트워크의 데이터 전송에 따른 에너지 소모를 줄일 수 있는 매우 효과적인 방법이다. 그러나 통신비용을 최소화하는 전역 최적 집단을 구하는 문제는 NP-hard의 조합최적화 문제이다[4]. 현재까지 여러 발견적 해결(heuristic approach)을 적용하여 근사 해

를 찾는 연구를 수행 해 왔다[17, 18].

기존의 애드 혹(ad hoc) 네트워크에 제안되었던 집단 구성을 위한 발견적 해결들은 가장 많은 이웃노드와 연결된 노드가 헤드로 선출하는 최상 연결 휴리스틱(Highest-Degree heuristic)[20], 노드 중 가장 낮은 식별자(identifier)가 헤드가 되는 최저 식별자 휴리스틱(Lowest-ID heuristic)[21, 22], 그리고 노드의 헤드로서 적합성을 가중치(weight)로 나타내 가장 높은 가중치를 가진 노드가 헤드인 노드 가중치 휴리스틱(Node-Weight heuristic)[19, 23, 24] 등이 있다.

센서네트워크를 위한 프로토콜로는 MIT의 LEACH[12, 25]에서 (그림 1)(c)와 같은 구조를 제안하고 에너지의 균등한 사용을 위한 확률적 집단 구성 방법을 제안하였다. 프로토콜은 일정시간의 라운드(round)마다 집단 헤드 노드를 다음 식에 의해 선출한다.

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k * (r \bmod \frac{N}{k})} : C_i(t) = 1 \\ 0 : C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서 i 는 노드의 식별자, t 는 시간, N 은 전체 노드의 수, k 는 시스템에서 요구하는 집단의 수, r 은 라운드를 나타낸다. $C_i(t)$ 는 최근 $r \bmod (N/k)$ 라운드 동안 집단 헤드였다면 1이고, 아니라면 0이다. 식 (2)의 확률 함수에 의해 나온 값이 임의의 값보다 크다면 헤드 노드가 되는 것이다. 헤드 노드는 이를 이웃노드에게 브로드캐스트하고 일반노드는 하나의 집단에 속하게 된다. 이는 에너지 소모가 많은 집단 헤드를 노드 간에 균등하게 하여 네트워크 생존시간을 늘이고자 했다.

HEED[13]에서는 노드의 잔여 에너지와 집단 내부의 통신비용을 고려하여 헤드를 결정하는 알고리즘을 제안하였다. 노드의 잔여 에너지가 첫 번째 선택 기준이며, 집단 내부의 통신비용은 첫 번째 기준값이 같은 후보가 여럿 있는 경우 헤드를 선택하기 위함이다. 노드의 초기 에너지가 같

다고 가정하면 잔여 에너지는 $\frac{E_{residual}}{E_{max}}$ 로 나타낼 수 있고, 집단 내부의 통신비용은 집단 구성의 목표에 따라 다르다. 부하의 분산이 목표라면 비용 값은 노드 연결도(node degree)에 비례하고, 목표가 고밀도 집단의 구성이면 (1/node degree)에 비례한다. 노드의 가변적 에너지 조절이 가능하다면 집단 내부에서 일반노드에서 헤드노드로 전송하는 비용의 평균값을 비용 값에 이용할 수 있다. 평균 최소 도달 전력(average minimum reachability power : AMRP)은

$\frac{\sum_{i=1}^M MinPwr}{M}$ 로 구할 수 있다. M 은 집단 내의 일반노드의 수이고 $MinPwr$ 은 일반노드에서 헤드로 전송 시 소모되는 전력양이다. 알고리즘은 개별 노드에서 에너지 잔량에

확률값²⁾ (5%)을 곱해서 초기 집단 헤드 확률을 구하고 이 값을 계속 라운드를 돌며 2배씩 증가시키며 1이 되면 헤드가 되고 아니면 주위의 헤드 노드에 속하게 된다. 이 때 초기 값의 최소 제한이 되는 임계치($P_{min} = 10^{-4}$)를 두어 $O(1)$ 내의 시간에 헤드 설정이 끝나도록 한다. 본 알고리즘에서 집단 간의 비용은 집단 헤드 결정에 고려하지 않고 있다.

Directed Diffusion[9]은 노드들이 주위의 현상 감지를 분산 처리할 수 있도록 조절할 수 있다는데 기반하고 있다. 중복되는 데이터의 효율적 데이터 병합을 위한 경로 탐색을 위해 그리디 증분 트리(Greedy Incremental Tree)를 이용하였다. 첫 번째 노드가 싱크까지의 최소 경로를 설정한 후, 나머지 노드들은 설정된 트리에 가장 가까운 곳으로 연결하여 데이터를 전송하며, 이 때 중복되는 데이터를 전송하지 않는다. 이 연구에서는 네트워크의 트리를 찾는 것을 목표로 하였으며, 병합 방법은 단순히 중복되는 같은 데이터를 삭제하였다. PEGASIS[4]에서는 노드들이 이웃의 노드들과 데이터를 송수신하도록 연쇄를 형성하는 방법을 제안하였다. 노드와 노드 간에 데이터가 전송되고, 병합되어, 마침내 싱크로 전송된다. 이 연구 역시 데이터가 전송되는 네트워크의 흐름을 구성하는 방법에 대해 연구되었고, 데이터 병합을 위한 구체적인 방법은 언급되지 않고 있다.

그 밖에 TAG[8]에서는 데이터베이스의 데이터 병합을 센서 네트워크에 적용하기 위해 구현하였다. TinyOS 플랫폼에 기반을 둔 COUNT, MIN, MAX, SUM, AVERAGE 병합 연산을 구현하였다. TiNA[16]는 데이터 병합을 위해 연속되는 센서 데이터에서 시간 변화에 따른 상관관계를 이용한다. 노드는 이전 데이터와 새로운 데이터의 변화 차이 값이 사용자가 입력하는 센서 값의 변화의 허용오차, 즉 시간 상관성 허용오차(Temporal Coherency Tolerance) 임계치 이상을 넘는 경우만 실제 데이터를 전송한다.

무선 센서네트워크에서 에너지 소모가 발생하는 요소는 중복되는 데이터가 싱크로 전송되는 경우이며 특히 싱크로부터 거리가 멀수록 에너지 소모가 가중된다. 따라서 본 논문에서는 싱크로부터 거리가 멀수록 가중치를 두어 확률적으로 보다 많은 집단을 선정하는 방법을 제안하고자 한다.

3. 무선 센서네트워크의 모델

이번 장에서는 본 연구에서 목표로 하는 센서 네트워크의 모델에 대해 설명하고 제안한 집단 구성 방법을 통해 이루고자 하는 목표를 기술한다. 본 연구의 가장 중요한 목표는 노드의 에너지 사용을 전체 네트워크에서 균등하게 사용 해 네트워크의 생존시간을 연장하는 것이다. 이를 위

2) LEACH[25]에서 수학적 모델을 통해 최적 값으로 결정된 5%를 이용하고 있다.

해 분산된 방법으로 근사 최적의 집단을 구하는 방법을 제안한다. 집단 구성의 효율성을 위한 최소 조건은 집단 구성에 필요한 시간 TCP(clustering process interval) 이 집단 구성 후 데이터 전송 시간 TDP(data transmission interval)보다 작아야 한다. 다음은 본 논문의 무선 센서네트워크 모델이다.

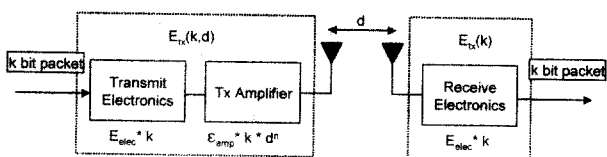
- 무선 센서네트워크의 노드는 배포 후 위치 이동이 거의 없다.
- 무선 센서네트워크의 노드는 GPS 등의 도구를 이용하여 자신의 위치를 알고 있다.³⁾
- 모든 노드는 동일한 초기 에너지를 가진다.
- 네트워크는 배치 후 무인(unattended) 관리 상태이다.
- 균등한 밀집도로 노드가 배치된다.

집단화의 목표는 N개의 노드가 배치되었을 때, 네트워크 지역 전체의 집단 헤드 집합을 구하는 것이다. 각 노드 v_i ($1 \leq i \leq N$) 는 하나의 집단 c_j ($1 \leq j \leq N_c$)에 속하고 N_c 는 집단의 개수이다. 집단 내의 노드는 헤드노드와 직접 통신할 수 있다. 이 때 다음과 같은 요구사항을 만족해야 한다.

- ① 집단화 후에는 모든 노드는 헤드이거나 하나의 헤드에 속해야 한다.
- ② 집단화 과정은 분산되게 처리되어야 한다.
- ③ 집단화를 위해 주고받는 데이터 전송량이 많지 않아야 한다.
- ④ 집단 헤드를 전체 노드 간에 균등하게 수행해야 한다.

4. 집단화(Clustering) 알고리즘

이번 장에서는 제안한 집단 구성 알고리즘에 대해 기술하고 분석적 모델을 통해 요구사항을 만족시킴을 보인다. 무선 통신에서 1 bit 메시지를 거리 d 만큼 전송하는 에너지 모델은 (그림 2)와 같고, 이 때 에너지 소모량은 식 (3)이다.



(그림 2) 라디오 에너지 모델

라디오 신호 감쇄는 거리에 비례하며 상대적으로 필요로 하는 에너지 소모량도 다르다. 식 (4)에서 보는 것처럼 크로스오버(cross-over) 점(point) 이내는 Friss free space model

에 따라 d^2 에 비례하고, 크로스오버(cross-over) 점(point) 이상은 two-ray ground propagation model에 따라 d^4 에 비례한다.

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) \quad (3)$$

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l_{\infty friss-amp} d^2: d < d_{crossover} \\ lE_{elec} + l_{\infty two-ray-amp} d^4: d > d_{crossover} \end{cases} \quad (4)$$

이를 구분하는 지점인 크로스오버(cross-over) 점(point)은 식 (5)로 구할 수 있다.

$$d_{crossover} = \frac{4\pi\sqrt{L} h_r h_t}{\lambda} \quad (5)$$

$L \geq 1$ 인 전파(propagation)와 관련 없는 시스템 손실을

h_r : 수신 안테나의 지상으로부터 높이

h_t : 송신 안테나의 지상으로부터 높이

λ : 반송 신호의 파장

$h_r = h_t = 1.5m, L = 1$, 무선 주파수가 914MHz, $\lambda = \frac{3 \times 10^8}{914 \times 10^6} = 0.328m$ 일 때, $d_{crossover} = 86.2m$ 정도이다. 이와 같은 에너지 소모에 의해 에너지 소모량은 데이터의 전송거리에 지수적으로 증가한다. 만일 LEACH[12]와 같이 (그림 1)(c) 형태로 데이터를 전송하고 집단 구성을 식 (2)에서와 같이 확률적 방법에 따라 균등하게 한다면 집단 내부에서 데이터 전송에 소모되는 에너지는 균일하지만 싱크로의 전송에 소모되는 에너지의 차이가 발생하기 때문에 네트워크의 에너지 소모가 불균형을 이뤄 싱크로부터 먼 노드가 먼저 에너지 사용을 다하게 된다.

따라서 본 연구에서는 싱크로부터의 거리에 따라 상대적 가중치를 둔 집단 헤드 선정으로 거리가 멀수록 보다 많은 집단이 구성되어 네트워크 전체 에너지 소모가 균등하게 되도록 한다. 각 노드는 자신의 그룹에 따라 다음과 같은 다른 확률 함수를 적용한다.

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k_j}{N_j - k_j * (r \bmod \frac{N_j}{k_j})} : C_i(t) = 1 \\ 0 : C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)에서 j 는 각 노드가 속해있는 그룹을 나타내며, 그룹별 k (집단의 수)와 N (노드의 수)은 다르다. 네트워크가 배치되고 모든 노드는 자신의 위치를 싱크에게 전송하면 이를 수신한 싱크는 네트워크를 분할하여 그룹별 노드의 수와 집단의 수를 브로드캐스트 한다. 이후 각 노드는 식 (6)의 확률 함수에 따라 집단 헤드 선정 작업을 수행한다. 단 싱크로부터 먼 거리에 위치할수록 보다 자주 집단 헤드가 된다. 싱크에서 수행한 분할은 다음과 같다.

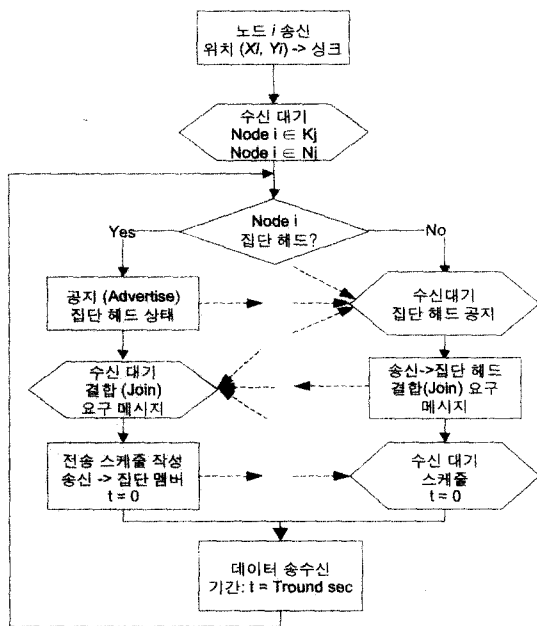
3) 위치인지는 센서네트워크에서 활발히 연구되는 또 다른 목표이지만 본 논문에서는 이 기능이 지원되는 것으로 가정한다.

$$N = \sum_{i=1}^n N_i \text{ (} n \text{은 거리에 기반을 둔 그룹의 수, } N_i = N/n \text{)} \quad (7)$$

$$k = \sum_{i=1}^n k_i \text{ (} n \text{은 거리에 기반을 둔 그룹의 수,}$$

$$k_i = k * \frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (8)$$

D_i 는 그룹 i 의 싱크로부터 거리를 나타낸다. (그림 3)은 개별 노드에서 집단화 알고리즘과 데이터 전송을 나타내는 흐름도이다.



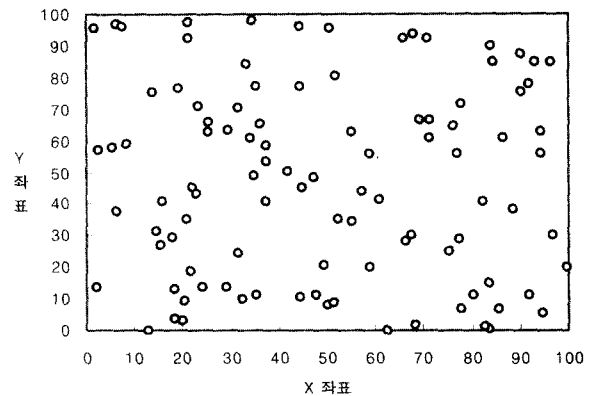
(그림 3) 집단화 알고리즘의 순서도

이와 같은 집단 구성 방법은 노드의 위치 정보를 확인하기 위해 전송하는 초기 전송 외에는 집단 구성을 위해 필요한 추가적인 데이터 전송이 이루어지지 않고 이후 분산 처리 됨으로 요구사항 ②, ③을 만족한다. 각 노드에서 집단 함수를 수행한 후 헤드 여부가 결정되면 이를 이웃노드에게 알려(Advertisement) 일반 노드들이 가장 근접한 헤드 노드의 집단에 결합(Join) 하도록 하여 요구사항 ①을 충족하고, 집단 함수는 임의의 라운드 동안 단 한 번씩만 헤드를 수행하기 때문에 요구사항 ④를 따른다. 따라서 본 연구의 목표하는 요구사항을 모두 만족시키는 집단화 방법이 제안되었음을 알 수 있다.

5. 시험평가

본 장에서는 제안된 집단 구성 방법의 시뮬레이션을 통한 성능 측정 결과를 보인다. 이를 위해 네트워크 시뮬레이터

NS-2 [11]상에서 ① 제안한 알고리즘, ② LEACH, ③ LEACH-C 프로토콜을 비교 해 보았다. LEACH 프로토콜은 각 노드에서 확률함수를 수행하여 헤드의 여부를 결정하는 분산된 방법이며 LEACH-C(Centralized) 프로토콜은 싱크에서 발견적 해결(Heuristic approach) 기법 중 Simulated Annealing 을 통해 근사 최적 집단 헤드를 구하는 집중형 방식이다. LEACH-C는 매 라운드마다 노드가 싱크에게 정보를 전송해야 하는 부담이 있지만 싱크는 지속적으로 에너지가 공급된다는 가정 하에 에너지 소모가 많은 작업은 싱크에서 수행하고 최적의 집단을 구성할 수 있다.



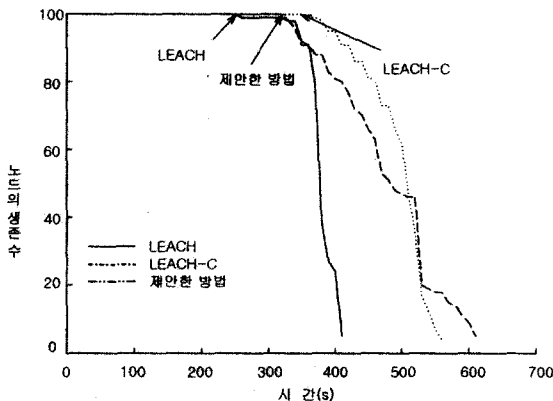
(그림 4) 센서 필드의 노드 위치

시뮬레이션을 위한 네트워크의 구성은 100 개의 노드를 ($x=0, y=0$)에서 ($x=100, y=100$)까지의 영역 내에 임의로 위치시키고 싱크는 ($x=50, y=175$)의 센서 필드 밖에 있다. 채널의 대역폭은 1Mbps, 데이터의 크기는 500byte, 패킷의 헤더는 25byte이다. 노드의 초기 에너지 값은 모두 동일하며 목표 집단의 수는 5개이다. 네트워크의 노드 위치는 (그림 4)에 나타나고 시험용 네트워크의 특성은 <표 1>과 같다. 제안한 방법은 싱크로부터의 거리에 따라 두 개의 영역으로 나누어 보다 가까운 지역에서는 2개의 집단을, 먼 지역에서는 3개의 집단을 구성하는 것으로 하였다.

<표 1> 시뮬레이션용 네트워크의 특성

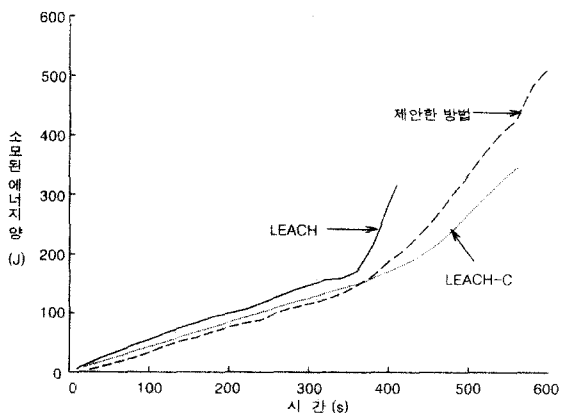
구 분	값
노드 수	100
네트워크의 크기	100m × 100m
싱크의 위치	(50, 175)
무선 전파 속도	3×10^8 m/s
처리 지연	50μs
무선 속도	1Mbps
데이터 크기	500bytes
무선부 에너지	50nJ/bit
무선 증폭 에너지	$\epsilon_{\text{triss-amp}} : 10\text{pJ/bit/m}^2$ $\epsilon_{\text{two-ray amp}} : 0.0013\text{pJ/bit/m}^4$
데이터 병합 에너지	5nJ/bit

에너지 효율적인 데이터 수집이라면 작은 양의 에너지를 사용하면서 보다 많은 데이터를 수집하는 것이라 할 수 있다. 또한 네트워크 전체의 에너지 사용량이 같다면 전체 노드의 에너지 사용량이 균등하게 되어 노드의 생존시간이 비슷하게 유지되어야만 네트워크의 생존시간을 연장할 수 있다. 센서네트워크의 네트워크 생존시간은 노드 중 처음으로 에너지 소모를 다하여 네트워크에서 사라지는 시간(FND : First Node Diest)과 마지막 노드의 사라지는 시간(LND : Last Node Diest)으로 정의할 수 있는데 이는 센서네트워크의 애플리케이션에 따라 기준을 선택할 수 있다. 이와 같은 네트워크의 에너지 효율성을 측정하기 위해 시뮬레이션을 통해 살펴본 평가항목들은 노드의 생존 수, 네트워크의 에너지 소모량, 싱크에서 수신한 데이터양이다.



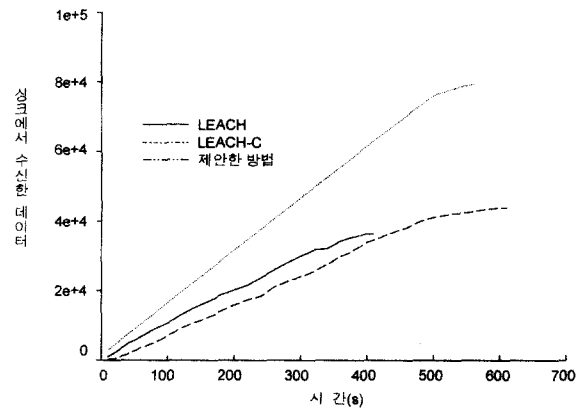
(그림 5) 생존 노드의 수 비교 차트

(그림 5)의 차트는 시간 흐름에 따른 노드의 생존 수를 비교한 그림이다. LEACH-C는 최적의 집단을 구성하기 때문에 노드간의 에너지 소모를 균등하게 하여 FND를 최대한 늦출 수 있었다. 하지만 마지막 노드가 사라지는 시간은 본 논문에서 제안한 방법이 더 이후이기 때문에 LND를 기준으로 하면 전체 네트워크의 생존시간은 제안한 방법이 더 길다는 것을 알 수 있다.



(그림 6) 노드에서 소모한 에너지 비교 차트

(그림 6)와 (그림 7)를 통해 노드에서 소모한 에너지와 싱크에서 수신한 데이터양을 비교해 보았다. 소모된 에너지 양은 네트워크 전체 노드의 에너지 소모량을 누적하여 합한 값이다. 네트워크의 효율성은(수신한 데이터/소모된 에너지)이라 할 수 있다. 근사 최적 집단을 구성하는 LEACH-C가 에너지 소모나 수집한 데이터양에서 모두 우수함을 나타내었고, 본 논문에서 제안한 알고리즘은 수집한 데이터양은 작았으나 에너지 소모를 균형 있게 하여 전체 네트워크의 에너지 소모량을 증대시켰다.



(그림 7) 싱크에서 수신한 데이터 비교 차트

실험을 통해 본 논문에서 제안한 방법은 간단하면서도 기존의 방법보다 네트워크의 생존시간을 보다 길게 할 수 있음을 확인하였다.

6. 결론 및 향후 연구 방향

에너지 사용이 제약적인 무선 센서네트워크에서 네트워크의 생존시간을 늘일 수 있는 에너지 효율적인 프로토콜의 개발은 중요하다. 집단 기반의 데이터 수집 구조는 네트워크의 대역폭 활용, 에너지 소모, 데이터 병합 측면에서 단순하면서 매우 효과적이다. 그러나 최적의 집단 구성 문제는 일반적으로 NP-hard 부류에 속하기 때문에 많은 연산 능력을 필요로 한다. 본 논문에서는 무선 센서네트워크의 에너지 소모 특성을 반영한 싱크로부터 거리에 기반을 둔 확률적 집단 구성 방법을 제안하였다. 에너지 소모가 많은 집단 헤드의 역할을 동일한 확률로 노드 간에 나누어 수행하지만 싱크로부터 거리가 멀수록 보다 많은 집단의 수가 구성되도록 하였다. 이는 집단 내에서 헤드로 전송하는 에너지 소모를 줄여 집단 헤드 노드가 싱크로 전송하는 에너지 소모량을 상쇄시키는 효과가 있다. 이는 전체 네트워크의 에너지 사용이 균형을 이루게 하여 네트워크의 생존시간을 늘일 수 있었다. 실험을 통해 기존의 균일한 확률로 집단을 구성하는 방법과 비교해 에너지 소모량을 줄일

수 있었으며 이를 통해 네트워크의 생존시간이 늘어남을 확인하였다.

집단 헤드에서 싱크로 직접 전송하는 방식이 구현이 용이하나 네트워크가 확장될 경우 실제 무선 전송거리의 제약이 있고 에너지 소모가 크기 때문에, 집단 헤드들이 네트워크 백본이 되어 다중 홉 라우팅을 수행하는 구조와 이때의 에너지 효율적인 집단 구성방법에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] I. F. Akyildiz et al., "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, Issue 8, pp.102-114, Aug., 2002.
- [2] L. Krishnamachari, D. Estrin and S. Wicker, "The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks," *Distributed Computing Systems Workshops*, 200. Proc. of 22nd International Conference, pp.575-578, July, 2002.
- [3] W.R. Heinzelman, J. Kulik and H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," Proc. of 5th ACM/IEEE Mobicom Conference, Seattle, Washington, United States, pp.174-185, 1999.
- [4] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS : Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems," Proc. of IEEE Aerospace Conference, pp.1125 - 1130, Mar., 2002.
- [5] S. Lindsey, C. S. Raghavendra and K. Sivalingham, "Data Gathering in Sensor Networks using the Energy*Delay Metric," Proc. of IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, pp.2001-2008, April, 2001.
- [6] M. Bhardwaj, T. Garnett and A. P. Chandrakasan, "Upper Bounds on the Lifetime of Sensor Networks," Proc. of International Conference on Communications, pp.785-790, June, 2001.
- [7] K. Dasgupta, K. Kalpakis and P. Namjoshi, "An Efficient Clustering-based Heuristic for Data Gathering and Aggregation in Sensor Networks," *Wireless Communications and Networking*, pp.1948-1953, Mar., 2003.
- [8] S. Madden et al., "Supporting Aggregate Queries over Ad-Hoc Wireless Sensor Networks," Proc. of 4th IEEE Workshop on Mobile Computing and Systems Applications, pp.49-58, June, 2002.
- [9] C. Intanagonwiwat et al., "Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.11, No.1, pp.2-16, Feb., 2003.
- [10] H.O.Tan and I. Korpeoglu, "Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks," *ACM SIGMOD*, Vol.32, Issue4, pp.66-71, 2003.
- [11] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [12] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks," Proc. of the Hawaii International Conference on Systems Sciences, pp.3005-3014, Jan., 2000.
- [13] O. Younis and S. Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach," *IEEE INFOCOM 2004*, Mar., 2004.
- [14] A. Manjeshwar and D. Agrawal, "APTEEN : A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive information Retrieval in Wireless Sensor Networks," *International Parallel and Distributed Processing Symposium : IPDPS 2002 Workshops*, April, 2002.
- [15] E. Catterall, K. Laerhoven and M. Strohbach, "Self-organization in ad hoc sensor networks: an empirical study," Proc. of the eighth international conference on Artificial life, pp.260-263, Dec., 2002.
- [16] M. Sharaf et al., "TiNA : A Scheme for Temporal Coherency-Aware in-Network Aggregation," Proc. of the 3rd ACM international workshop on Data engineering for wireless and mobile access, pp.69-76, Sep., 2003.
- [17] A. Hac, "Wireless Sensor Network Designs," Wiley, 2003.
- [18] S. Basagni, I. Chlamtac and A. Farago, "A generalized clustering algorithm for peer-to-peer networks," Proc. of Workshop on Algorithmic Aspects of Communication, July, 1997.
- [19] M. Cahtterjee, S. K. Das and D. Turgut, "WCA : A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks," *Cluster Computing*, pp.193-204, 2002.
- [20] A. K. Parekh, "Selecting routers in ad-hoc wireless networks," Proc. of the SBT/IEEE International Telecommunications Symposium, August, 1994.
- [21] D. J. Baker and A. Ephremides, "A distributed algorithm for organizing mobile radio telecommunication networks," Proc. of the 2nd International Conference on Distributed Computer Systems, pp.476-483, April, 1981.
- [22] D. J. Baker and A. Ephremides, "The architectural organization of a mobile radio network via a distributed algorithm," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.29, No.11, pp.1694-1701, 1981.
- [23] S. Basagni, "Distributed clustering for ad hoc networks," Proc. of International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks, pp.310-315, June, 1999.
- [24] S. Basagni, "Distributed and mobility-adaptive clustering for multimedia support in multi-hop wireless networks," Proc. of Vehicular Technology Conference, VTC, Vol.2, pp.889-893, 1999.
- [25] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.1, No.4, pp.660-670, Oct., 2002.



이 상 학

e-mail : shlee@keti.re.kr

1993년 전주대학교 수학과 이학사

1997년 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과
공학석사

2000년 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과
박사수료

2000년~현재 전자부품연구원 유비쿼터스컴퓨팅연구센터 선임
연구원

관심분야 : Sensor Network, Combinatorial Optimization, Meta-
Heuristic Algorithm



정 태 충

e-mail : tcchung@khu.ac.kr

1980년 서울대학교 전자공학과 공학사

1982년 한국과학기술원 대학원 전자계산
공학과 공학석사

1987년 한국과학기술원 대학원 전자계산
공학과 공학박사

1987년~1988년 KIST 시스템 공학센터 선임연구원

2001년 미국 Iowa 대학 교환교수

1998년~현재 경희대학교 컴퓨터공학과 정교수

관심분야 : 인공지능, 지능에이전트, 메타알고리즘