

## 무선 센서네트워크의 에너지 효율적 배치에 관한 연구

문준수<sup>o</sup> 이상학 이승관 정태충

경희대학교 컴퓨터공학과

jsmoon187@iislab.khu.ac.kr<sup>o</sup>, shilee@keti.re.kr, lee@iislab.khu.ac.kr, tcchung@khu.ac.kr

### A Study on Energy-Efficient Deployment for Wireless Sensor Networks

JunSu Moon<sup>o</sup>, SangHak Lee, SeungGwan Lee, TaeChoong Chung

Dept. of Computer Engineering, KyungHee University

#### 요 약

무선 센서네트워크는 센싱 지역에 분산되어 있는 초소형 센서 노드들이 감지/처리한 데이터를 수집노드로 전송하여 원격의 사용자가 센싱 지역의 상황인지를 가능하게 하는 유비쿼터스 컴퓨팅의 기반 네트워크이다. 전력 사용이 극히 제한된 센서 노드를 이용하여 무선 센서 망을 구성, 유지하며 데이터를 수집하기 위해서는 효율적인 망의 형태와 이에 따른 네트워크 배치 전략을 필요로 한다. 클러스터 기반 네트워크의 형태는 밀집도가 높은 센서네트워크에서 데이터병합을 수행하고 노드간 에너지 소비 균형을 이루기 위한 효과적인 구조이다. 본 논문에서는 클러스터 기반의 단일 홉 전송 구조에서 데이터 수집률을 높이고 노드간 에너지 사용의 균형을 이루게 하여 네트워크의 생존시간을 최대화할 수 있는 네트워크 배치 방법을 제안하였다. 클러스터링 기법에 따른 에너지 소비 모델을 분석하고 이를 통해 노드의 적절한 밀집도를 산출하였다. 싱크로부터 멀어질수록, 센서필드의 중앙보다는 외곽에 노드의 배치를 조밀하게 배치하여 네트워크의 생존시간을 늘렸다. 시뮬레이션을 통해 효율적인 네트워크의 배치가 노드간 에너지 소비의 균형을 이루도록 하여 네트워크의 생존시간을 늘릴 수 있음을 확인하였다.

#### 1. 서 론

인간과 컴퓨터와 사물이 유기적으로 연계되어 다양하고 편리한 새로운 서비스를 제공하는 유비쿼터스 컴퓨팅 환경에서, 인간 외부 환경의 감지와 제어 기능을 수행하는 센서 네트워크 기술이 최근 활발히 연구가 되고 있다[1]. 센서 기술, MEMS 기술, 저전력 전자 공학 기술, 저전력 RF 설계 기술 등의 발달로 무선 네트워크를 통하여 연결될 수 있는 소형, 저가, 저전력의 센서 노드들이 개발되어 왔다. 이러한 센서 노드들은 센싱, 데이터 처리, 통신 컴포넌트들로 구성된다. 매우 많은 수의 센서 노드들이 현상의 내부나 매우 밀접한 지역에 조밀하게 배치된 무선 센서 네트워크를 형성하여 헬스, 군사, 홈 네트워크, 환경 감시, 공장 관리, 재난 감시 등의 다양한 응용에 적용될 수가 있다.

무선 센서 네트워크에서는 응용의 관심 현상 영역에 수많은 센서 노드들이 미리 결정된 형태 없이 배치될 수 있고 근접한 센서 노드들이 유사한 정보를 감지하는 특성에 의해 임의의 센서 노드의 동작이 실패하거나 기능이 소멸되는 경우에도 네트워크의 전체적인 동작에는 영향을 미치지 않는 장점을 가진다. 그러나, 무선 매체의 저속, 오류가 심한 전송 특성 및 제한된 전원 공급, 센서 노드의 임의 배치로 인한 교체 불가능 등의 문제점을 가진다. 그러므로, 이러한 무선 센서 네트워크를 위한 프로토콜은 에너지 소비를 네트워크 전체에 분산시켜 전체적 시스템의 수명을 증가시키는 방향으로 설계되어야 하며, 센서 네트워크의 동작의 변화에 빠르게 대응할 수 있어야 한다[2].

본 논문의 목적은 에너지 효율적인 노드의 배치를 통해서 감시 지역에서 발생하는 이벤트에 대한 손실을 최소화하면서 전송에 요구되는 에너지 사용을 균등하게 하여 네트워크의 생존시간을 늘리는 것이다.

#### 2. 관련연구

##### 2.1 무선센서네트워크의 소개

무선 센서 네트워크는 센서 노드들이 배치된 센서 필드(sensor field)와 센서 필드와 외부망을 연결하는 싱크(sink)로 구성된다. 각 노드는 데이터를 수집하고 이를 싱크(sink)로 라우팅 하는 능력을 갖는다. 수집정보는 멀티홉(multihop) 유동기반구조(infra-structureless)의 센서, 네

트워크 통신전달 및 구조를 통해 싱크로 연계 전송(라우팅)된다. 싱크는 인터넷이나 위성을 통해 태스크 관리자(task manager)와 통신한다. 센서 네트워크의 디자인은 장애허용성(fault tolerance), 확장성(scalability), 생산 가격(production cost), 동작 환경(operating environment), 토폴로지(topology), 하드웨어의 제약(constraints), 전송 매체, 전력 소모 등의 요소에 영향을 받는다[3].

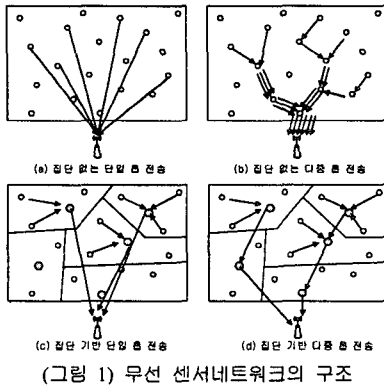
무선 센서네트워크는 기존의 센서에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 단일한 센서에 의한 감시는 하드웨어의 수준에 따라 감시 영역이나 정확도에서 매우 제약을 받는다. 그러나 개별 노드에서 수집되는 정보를 병합한다면 실제계의 현상을 보다 정확하고 신뢰성 있게 관찰할 수 있다. 전통적인 센서 시스템은 대형의 고가 매크로 센서를 사용하여 유선으로 사용자에게 직접 연결되고 데이터를 수집하는 장소에 정확히 위치해야 한다. 이러한 시스템에 비해 저가의 소형 시스템은 가격을 절감할 수 있고 단일 임무를 여러 노드에서 나누어서 수행하기 때문에 다각도에서 세밀하게 관찰된 데이터를 수집할 수 있다.

무선 센서네트워크가 적용될 수 있는 분야는 기본적으로 홈 시큐리티, 기계 고장진단, 화학적/생물학적 이상 감시, 의료 분야, 감시 등의 실제계의 다양한 환경을 관찰하는 것이다. 그러나 이외에도 원격 감지가 필요한 많은 응용 분야에 적용될 수 있다[4].

##### 2.2 무선 센서네트워크의 구조

무선 센서네트워크의 데이터 수집을 위한 네트워크 구조는 (그림 1)과 같이 여러 유형으로 분류할 수 있다[6].

(그림 1)의 (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 다중홉 전송을 수행한다[5].



3. 무선 센서네트워크의 에너지 소비 모델 분석

네트워크의 에너지 소비 요소를 분석하기 위해 클러스터 기반 단일 전송에서 노드의 에너지 소모량을 측정해 본다.

노드에서 주기적으로 센서 신호를 감지한 후 이를 싱크로 전송하는 일련의 과정에서 소모하는 에너지는 센싱, 데이터 송수신, 데이터 처리로 나누어 진다. 이 중 가장 많은 에너지 소모가 발생하는 부분은 송신 부분이다. [7]의 에너지 소비 모델과 유사하다고 가정한다면 1 bit를 거리  $d$  만큼 송신하기 위한 에너지는  $l + \mu d^k$  이다. 이때,  $l$  은 송신부 전자 회로에서 소모되는 에너지량이고,  $d^k$  는 전파 손실을 막기 위해 RF 증폭기에서 소모하는 에너지량이다. 클러스터링과 관련한 에너지 소모는 센서노드와 클러스터 헤드 노드간의 거리와 클러스터 내의 센서노드의 수에 따라 라운드 동안 데이터 송신에 소모되는 에너지와 클러스터 헤드 노드에서 데이터 병합을 위한 에너지 소모가 달라지게 된다. 네트워크가  $N$  개의 노드로 구성되고 이중 일정 부분인  $(k)$  개의 클러스터가 라운드마다 형성되는 구조를 지니고 클러스터 헤드는 모든 노드가 균일한 횟수로 수행한다면 노드는 매  $N/k$  라운드에 한 번씩 클러스터 헤드를 수행하고 나머지  $(N/k - 1)$  라운드 동안 감지한 데이터를 클러스터 헤드에게 송신하게 된다. 만일 노드가 전체 네트워크 영역에 균등하게 잘 분포되어 있다면 하나의 클러스터 헤드는  $(N/k - 1)$  개의 센서 노드를 포함한다. 클러스터 헤드에서 소모되는 에너지를 분석하면, 센서노드로부터 데이터를 수신하기 위해 소모하는 에너지:  $(N/k - 1)l$ , 데이터 병합을 위해 소모하는 에너지:  $(N/k - 1)DA$ , 데이터를 싱크로 전송하기 위해 소모하는 에너지:  $l + \mu d^k$  이다. 이때 데이터 병합에 소모하는 에너지는 데이터 병합 알고리즘과 밀접한 관련이 있고, 센서 노드의 수에 영향을 받는다.

노드간의 에너지 차이를 분석해 보면 클러스터 헤드를 수행할 때 발생하는 에너지 차이와 센서 노드를 수행할 때 발생하는 에너지 차이로 나누어 볼 수 있다. 우선 클러스터 헤드일 때 발생하는 에너지 차이는 센서 필드의 크기가  $A^2 = [A, A]$  이고, 싱크가 센서 필드로부터 원거리에 위치한다면 싱크로부터 가장 먼 노드의 싱크까지 거리를  $d_{max}$ , 싱크로부터 가장 가까운 노드의 싱크까지 거리를  $d_{min}$  라 한다. 이들 노드 간의 거리 차에 의한 싱크에게 전송할 때 발생하는 에너지 소모의 차이는 식 (3.1)과 같다.

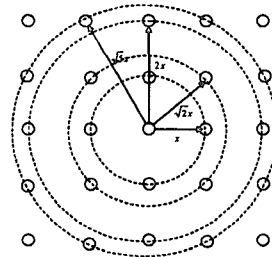
$$\mu (d_{max}^k - d_{min}^k) \quad (3.1)$$

센서 필드 내에서 가능한 노드 간 최대 거리는  $\sqrt{2}A$ 이기 때문에 클러스터 헤드 동안 발생할 수 있는 에너지 소모의 차이는  $\mu(\sqrt{2}A)^k$  이다.

센서 노드일 때 발생하는 에너지 소모의 차이를 분석해 보기 위해 우선 센서 노드로 클러스터 헤드에게 송신하기 위해 소모하는 에너지는  $(N/k - 1)$  라운드 동안  $(N/k - 1)(l + \mu d^k)$  이다. 만일 모든 노드가 균등한 횟수로 클러스터 헤드를 수행한다면 센서 노드는 자신에게 가장 가까운  $(N/k - 1)$  개의 노드에게 데이터를 송신하게 될 것이다.

이는 노드의 가장 근접한  $(N/k - 1)$  개의 노드와의 거리에 따라 센서 노드 동안 소모하는 에너지량이 영향을 받는다는 것이다. 따라서와 같이 센서 필드의 범위가  $A^2 = [A, A]$  이고, 노드가 고르게 분포되어 위치하고 있다면, 각 노드가 차지하는 면적은 약  $A^2/N$  이고 각 노드의 반경은  $r = A/\sqrt{\pi N}$  이다. 이 때 두 노드간의 거리는  $2A/\sqrt{\pi N}$  이다. 클러스터 헤드가  $(N/k - 1)$  개의 센서노드를 포함하는 통신 영역은 (그림 2)와 같다.

$2A/\sqrt{\pi N}$ 를  $x$  로 치환하여 계산하면,  $x, \sqrt{2}x, 2x, \sqrt{5}x$ 에 대해 각기 이웃노드는 4, 8, 12, 20이다. 이웃노드의 수는 센서 필드에서 노드의 위치에 영향을 받는다.



(그림 2) 노드가 균등 분포로 배치된 경우 전송거리에 따른 이웃노드의 수

위치에 따른 노드의 범주를 분류해 보면 그룹 A는 센서 필드의 가운데 위치하고, 그룹 B는 전송 영역의 절반이 센서 필드 밖으로 나간 노드들이고, 그룹 C는 전송 영역의 3/4가 센서 필드 밖으로 나간 노드들이다.

노드의 기하학적 위치를  $n_i = (x_i, y_i)$  이라 하고, 네트워크의 노드 수  $N$  는 100, 클러스터의 수  $k$  는 5(5%), 센서 필드의 크기  $A$  는 100 이면, 노드의 통신 반경은  $2\sqrt{5}A/\sqrt{\pi N}$  이고 각 그룹의 속하는 영역은 다음과 같다.  $2\sqrt{5}A/\sqrt{\pi N}$ 를  $\alpha$  로 치환한다.

그룹 A:  $(\alpha \leq x_i \leq (A - \alpha))$  AND  $(\alpha \leq y_i \leq (A - \alpha))$

그룹 B:  $((0 < x_i < \alpha) \text{ OR } ((A - \alpha) < x_i < \alpha))$  AND  $(\alpha < y_i < (A - \alpha))$   
 $((0 < y_i < \alpha) \text{ OR } ((A - \alpha) < y_i < \alpha))$  AND  $(\alpha < x_i < (A - \alpha))$

그룹 C:  $((0 < x_i < \alpha) \text{ OR } ((A - \alpha) < x_i < \alpha))$  AND  $((0 < y_i < \alpha) \text{ OR } ((A - \alpha) < y_i < \alpha))$

그룹 A의 경우 자신을 포함해  $N/k$  개의 노드를 커버하기 위한 최대 전송 반경은  $\sqrt{20}A/\sqrt{\pi N}$  이고 클러스터 헤드와 센서노드간 평균 거리는  $\sqrt{10}A/\sqrt{\pi N}$  이다. 이에 비해 그룹 C의 노드의 최대 전송 반경과 평균 거리는  $\sqrt{80}A/\sqrt{\pi N}$ 와  $\sqrt{40}A/\sqrt{\pi N}$  이다. 그룹 A와 그룹 C 간의 에너지 소모차이는 식 (3.2)와 같다.

$$\mu \left[ \left( \frac{\sqrt{40}A}{\sqrt{\pi N}} \right)^k - \left( \frac{\sqrt{10}A}{\sqrt{\pi N}} \right)^k \right] \quad (3.2)$$

4. 에너지 효율성 고려한 네트워크 배치 전략

센서 필드에 노드가 균일하게 배치되어 있을 때 그룹 A, 그룹 B, 그룹 C에서 에너지 소모의 차이가 발생함을 3장에서 알아보았다. 이는 노드에서 주기적으로 센서 신호를 감지후 이를 싱크로 전송할 때 그룹 C의 노드들이 그룹 A의 노드들보다 빨리 사라진다는 것을 의미한다. 전체 영역에서 노드의 에너지 소모를 균등하게 하기 위해서는 노드의 배치 전략이 필요하다. 식(3.1)에서 싱크로부터 거리가 멀어질수록 에너지 소모량이 커지는 것을 알 수 있고, 식(3.2)에서 그룹 A와 그룹 C의 에너지 소모 차이로부터 싱크로부터 거리가 멀수록 노드의 배치를 조밀하게 하고 센서필드의 중앙보다는 바깥쪽 영역에 노드를 많이 배치해야 균등한 에너지 소모를 예상할 수 있다.

5. 실험결과

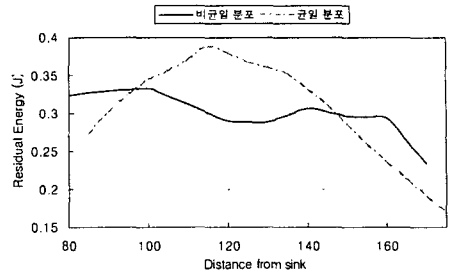
센서 네트워크의 에너지 소모에 대한 분석을 실행하기 위해 시뮬레이션 수행하였다. 시뮬레이션 환경의 네트워크는 노드 100개로 구성되고 센서 필드의 범위는 [100×100], 싱크는 (50, 175)에 위치하고, 노드의 초기 에너지는 2J로 모든 노드의 초기값이 동일하다. 프로토콜은 매 20s마다 전체 노드의 5% (5개)의 노드가 클러스터 헤드로 선정되고 클러스터 헤드가 아닌 센서노드들은 가장 근접한 클러스터 헤드에 속하게 된다. 노드들은 (N/k) 라운드 (즉, 20라운드) (400s)에 한 번씩만 균등하게 클러스터 헤드를 수행하게 된다. 본 시뮬레이션에서는 최적 클러스터 구성을 통한 에너지 소모를 알아보기 위해 발견적 문제해결 방법의 하나인 시뮬레이티드 어닐링 (Simulated Annealing)을 이용하였다. 모든 노드가 한 번씩 클러스터 헤드 노드를 수행한 후인 20라운드의 시뮬레이션 후 노드의 잔여 에너지를 구하였다. 그룹에 상관없이 전체적으로 노드가 균일하게 배치된 경우와 이 논문에서 제안한 그룹에 따라 노드의 밀도를 다르게 하였을 때를 비교하여 보았다. (그림 3)은 노드의 싱크로부터 거리에 따라 측정된 노드의 잔여에너지이다. 균일 분포로 구성된 노드 토폴로지에서는 거리에 단조 감소하지 않는 이유는 클러스터 헤드 노드로 데이터 송신 횟수보다 센서 노드로 데이터 송신 횟수가 많기 때문에 싱크 노드까지의 거리보다 주위 이웃노드들과의 거리가 에너지 소모에 보다 영향을 미쳤기 때문이다. 센서 필드의 중앙에 위치한 노드들은 이웃노드의 수가 센서 필드 가장자리에 위치한 노드들보다 많아 센서 노드의 역할을 수행할 때 보다 근거리 통신을 수행할 수 있고 이를 통해 에너지 소모를 줄일 수 있었다. 반면 비균일 분포로 구성된 노드 토폴로지에서는 대체적으로 거리와 무관하게 노드의 잔여 에너지가 일정한 것을 알 수 있다. (그림 4)는 위에서 분류한 그룹을 기준으로 측정된 노드의 잔여 에너지이다. 균일 분포로 구성된 노드 토폴로지에서는 그룹A의 노드 24개, 그룹B의 노드 45개, 그룹C의 노드 31로 구성되었다. 각 그룹은 이웃노드의 수에 밀접한 영향을 미치며 이는 데이터 송신의 거리와 관련이 있어 분류된 그룹에 따라 노드의 잔여 에너지가 정확히 차이를 보였다. 그렇지만, 비균일 분포로 구성된 노드 토폴로지에서는 그룹A의 노드 11개, 그룹B의 노드 46개, 그룹C의 노드 43개로 구성되어 있으며 그룹별 노드의 잔여 에너지가 거의 일정한 것을 알 수 있다. 이와 유사한 기준으로 측정된 방법이 노드의 이웃노드 수에 따라 측정된 잔여 에너지이다. 이 때 통신 반경은  $r = \sqrt{20A} / \sqrt{\pi N}$ 로 하여 이웃노드 수를 구하였다. 균일분포에서는 통신 반경 내에 보다 많은 이웃노드를 가진 노드가 상대적으로 에너지를 조금 소모했지만, 비균일 분포에서는 그룹별로 노드의 분포를 다르게 하여 그룹별 에너지를 균일하게 소모했다.

지금까지 클러스터 기반 단일 홉 전송의 구조에서 노드의 에너지 소모에 영향을 미치는 요소를 분석해보았다. 본 연구의 클러스터링의 목표는 전체 네트워크의 에너지 소모를 최소화하면서 데이터 수집량을 최대화하도록 노드간 에너지 소모의 균형을 이루어 네트워크의 생존시간을 늘이는 것이다.

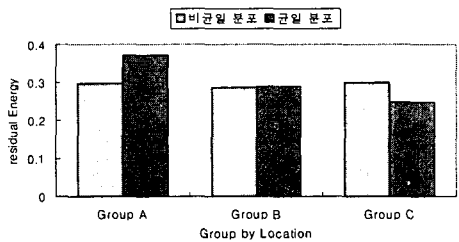
6. 결론

클러스터 기반 단일홉 전송에서 노드의 에너지 소모는 싱크와의 거리와 함께 클러스터 내 노드의 네트워크 구성이 중요한 요소임을 알 수 있었다. 노드의 에너지 소모가 거리에 따라 단조 감소하지 않는 이유는 클러스터 헤드로서 싱크로 데이터 송신 횟수보다 센서 노드로서 클러스터 헤드로 데이터 송신 횟수가 많기 때문에 싱크 노드까지의 거리보다 주위 이웃노드들과의 거리가 에너지 소모에 보다 영향을 미쳤기 때문이다. 센서 필드의 중앙에 위치한 노드들은 이웃노드의 수가 센서 필드 가장자리에 위치한 노드들보다 많아 센서 노드의 역할을 수행할 때 보다 근거리 통신을 수행할 수 있고 이를 통해 에너지 소모를 줄일 수 있었다. 균일한 노드 분포는 영역별로 에너지 소모의 차이가 발생하는데 위치에 따른 노드의 센서필드의 중앙보다는 외곽에, 싱크로부터 먼 쪽에 노드의 밀집도를 높게 함으로써 전체

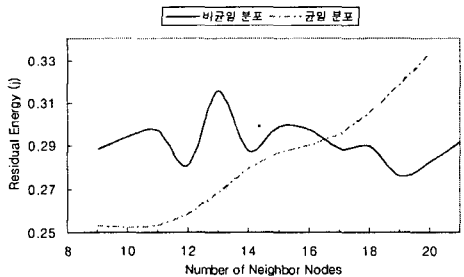
적으로 균등하게 에너지가 소모되어 네트워크의 생존시간을 늘일 수 있음을 확인하였다.



(그림 3) 노드의 싱크로부터 거리에 따라 측정된 노드의 잔여 에너지



(그림 4) 센서 필드에서 노드 위치를 기준으로 측정된 노드의 잔여 에너지



(그림 5) 이웃노드의 수를 기준으로 측정된 노드의 잔여 에너지

참고문헌

- [1] 김대영, 도움미, 박노성, 이상수, Pham Minh Long, Dui Buy Bach, rath Ozturk, "센서 네트워크 기술", 한국정보처리학회지, 제10권, 제4호, pp.85-96, 2003.7
- [2] 배정숙, 김성희, "무선 센서 네트워크에서의 라우팅 프로토콜", 정보통신연구진흥원, 주간기술동향, 1140호, 2004.4.7
- [3] I. F Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E Cayirci, " A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine, Volume 40 Issue 8, pp.102-114, August 2002
- [4] "Wireless Sensors and Integrated Wireless Sensor Networks (Technical Insights)", Frost & Sullivan, 2002.
- [5] W.R. Heitzelman et al., "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," Proc. ACM Mobicom' 99, pp.174-185, 1999
- [6] O. Younis and S. Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach", IEEE INFOCOM 2004, Mar. 2004
- [7] Wendi B. Heinzelman et al., "An Application -Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol.1, No.4, pp.660-670, Oct. 2002