

에너지 균형비와 중계노드 위치를 함께 고려한 센서 네트워크의 에너지 소비 최소화

손석원¹, 한광록^{2*}

¹호서대학교 뉴미디어학과, ²호서대학교 컴퓨터공학부

Minimizing Energy Consumption of Sensor Networks with Energy Balance Ratio and Relay Node Placement

Surgwon Sohn¹ and Kwang-Rok Han^{2*}

¹Department of New Media, Hoseo University

²Division of Computer Engineering, Hoseo University

요약 무선센서 네트워크에서 노드들의 데이터를 수집하고 기지국에 전달하는 중계노드의 위치(Relay Node Placement)를 구하는 문제는 전체 네트워크의 생존시간에 관련되어 있기 때문에 매우 중요하다. 중계노드 위치문제는 전체 네트워크의 센서노드에서 소비되는 에너지를 최소화시키는데 그 초점이 맞추어져 있다. 그러나 중계노드 위치와 센서노드와의 거리가 모두 다르므로 센서노드에서 소비되는 에너지의 불균형이 초래된다. 본 논문에서는 클러스터링 모델에서 에너지 균형비(Energy Balance Ratio)라는 개념을 제안하고 이 에너지 균형을 최대화시키는 목적함수를 사용하여 중계노드의 위치를 구한다. 에너지 균형을 최대화시키는 것은 클러스터에 할당된 센서노드들의 에너지 소비를 클러스터 간에 균형 잡히게 한다. 이것은 궁극적으로 대규모 센서 네트워크의 에너지 소비를 최소화시켜서 네트워크 생존시간을 최대화시키는 효과가 있다. 그러나 이 문제의 해를 구하는 것은 NP-hard 문제이므로 완전해(Exact Solution)를 구하는 것은 현실적으로 힘들다. 따라서 제약프로그래밍 방법을 사용하여 에너지 균형비와 중계노드 위치를 함께 고려하는 EBR-RNP 문제로 모델링하여 근사해를 구한다.

Abstract The Relay node placement problem is one of the most important requirements for many wireless sensor networks because the lifetime of sensor networks is closely related with the placement of relay nodes which receive sensed data from sensor nodes and forward them to the base station. Relay node placement problem has focused at minimization of dissipated total energy of the sensor nodes in whole networks. However, minimum total energy causes the unbalance of consumed energy in sensor nodes due to different distances between relay nodes and sensor nodes. This paper proposes the concept of energy balance ratio and finds the locations of relay nodes using objective functions which maximize the energy balance ratio. Maximizing this ratio results in maximizing the network lifetime by minimizing the energy consumption of large-scale sensor networks. However, finding a solution to relay node placement problem is NP-hard and it is very difficult to get exact solutions. Therefore, we get approximate solutions to EBR-RNP problem which considers both energy balance ratio and relay node placement using constraint programming.

Key Words : Relay Node Placement, Energy Balance Ratio, NP-hard, Approximate Solution

1. 서론

최근의 무선센서 네트워크에서 센서노드의 생존시간(Lifetime)이 중요한 관심사로 인식되고 있다[1]. 센서노

드가 수집한 데이터를 직접 기지국(Base Station)에 전달하는 것은 에너지 소비가 크다. 이 문제를 해결하기 위해서 네트워크에서 중계노드(Relay Node)를 설치하고 클러스터링(Clustering)을 형성하는 방법들이 사용되고 있다

*교신저자 : 한광록 krhan@hoseo.edu

접수일 08년 11월 11일 수정일 (1차 09년 05월 14일, 2차 09년 07월 06일, 3차 09년 07월 08일) 게재확정일 09년 07월 22일

[2-5]. 중계노드의 주요 임무는 센서노드로부터 데이터를 수신하고 그 데이터를 기지국으로 재전송하는 일이다. 그러므로 중계노드의 위치선정을 잘하는 것은 네트워크의 생존시간을 최대화시킬 수 있기 때문에 매우 중요하다. 이러한 연구들을 중계노드 위치문제(Relay Node Placement Problem)[6-9]라고 부른다.

중계노드 위치문제는 라우팅에 따라서 1-tier와 2-tier로 구분되는데 1-tier 네트워크에서 센서노드는 서로 데이터를 전송 또는 재전송한다. 그러나 2-tier 네트워크에서는 센서노드끼리의 전송은 없고 오직 센서노드로부터 중계노드로 데이터 전송이 있을 뿐이다. 중계노드는 센서노드로부터 수집된 데이터를 다시 기지국으로 데이터를 전송한다.

클러스터링을 사용하는 대규모의 센서 네트워크에서는 개개의 클러스터 단위의 생존시간이 중요하다. 가장 이상적인 네트워크는 모든 클러스터의 동작이 일시에 중지되는 즉, 클러스터의 에너지 소비가 고르게 균형을 이루는 것이다. 각각의 클러스터에 할당된 센서노드에서 소비되는 에너지를 최소로 만드는 문제의 해를 찾는 것은 클러스터링 문제의 해를 찾는 것과 같다. 그러나 가장 간단한 클러스터링 문제를 해결하는 것도 NP-hard 문제[10]로서 그 해를 찾는 것이 쉽지 않다. 더구나 이 방법이 센서노드의 생존시간을 최대화된다는 것도 분명하지 않다 [11].

Kang 및 Poovendran은 MINMAX[12]라는 개념을 이용하여 네트워크 생존시간을 최대화하는 것이 더 효과적이라는 사실을 밝혔다. 따라서 본 논문에서는 클러스터 간에 센서노드의 에너지 소비가 균형을 이루고 있는지 판단하기 위해서는 에너지 균형비(Energy Balance Ratio)라는 개념을 제안한다. 이것은 클러스터 간에 소비된 최소에너지와 최대에너지간의 비율을 말하며 이 에너지 균형비를 크게 하는 최적의 중계노드 위치를 찾아서 중계노드를 설치하면 네트워크의 에너지 소비를 최소화할 수 있다. 이 문제 또한 클러스터링 문제로서 NP-hard 문제 [13]이고 정수계획법으로 완전해를 구하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이 EBR-RNP 문제를 백트래킹 탐색을 기본으로 하는 제약최적화 방법을 사용하여 모델링하고 근사해를 구한다.

2. 관련연구

Ghiasi는 센서네트워크에서 클러스터링 문제에 관한 이론적 연구를 광범위하게 연구하였으며 "Balanced k-Clustering"이라는 알고리즘을 제안하였다[14]. 이 알고

리즘은 클러스터에 있는 마스터 노드(Master node)와 센서노드 사이의 거리의 합이 모든 클러스터 간에 균형을 이루게 하는 알고리즘이다. 그러나 실제 에너지 소비를 생각하지 않았으며 클러스터 안에 할당되는 센서노드의 수를 모두 같게 처리하였다.

이와는 다르게 ad-hoc 네트워크의 부분집합으로서 클러스터에 기반을 둔 동종의(Homogeneous) 센서 네트워크를 생각할 수 있다. 이런 종류의 네트워크에서는 클러스터 헤드(Cluster Head)에서 대부분의 에너지가 소비되므로 이 클러스터 헤드의 에너지를 최소화시켜 네트워크의 생존시간을 최대화하려는 노력도 시도되었다[15]. 그러나 클러스터 헤드에서 소비되는 에너지가 센서노드에서 소비되는 것보다 훨씬 크다는 에너지 불균형문제가 발생된다. 이 문제를 해결하기 위해 클러스터에 기반을 둔 이기종(Heterogeneous) 센서네트워크의 사용이 제안되었는데[16] 이것은 클러스터 헤드의 에너지를 다른 센서노드보다 크게 한 클러스터 헤드를 사용하는 것이다.

Younis는 클러스터 헤드의 에너지 효율뿐만 아니라 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)[17] 최적화 모델링을 사용하였다. Lloyd 및 Xue는 최소 중계노드를 사용하는 무선센서 네트워크에서 다항식 시간(Polynomial Time)안에 근사해를 구하는 알고리즘을 제안하였다[13]. 또한 Misra 는 기지국과 센서노드의 연결도(Connectivity)와 생존도(Survivability)를 모두 고려하여 최소의 중계노드 위치를 찾는 다항식 시간 알고리즘을 개선하였다[18].

무선센서 네트워크에서 에너지 효율적인 클러스터링 문제 또는 중계노드 위치문제는 창고위치 문제(Warehouse Location Problem)[19]나 이동통신망에서 기지국 위치문제(Base Station Location Problem)[20]와 유사하며 모두 NP-hard 문제이다. 따라서 이 문제는 제약만족 문제(Constraint Satisfaction Problem)[21]로 모델링하여 근사해를 구할 수 있다.

3. 에너지 균형비를 고려한 중계노드 위치모델

3.1 클러스터링 모델

본 논문에서 기술하는 시스템 모델은 초기 에너지가 동일한 동종의 노드들이 클러스터를 형성하고 클러스터 내부에는 중계노드가 존재하는 2-tier 네트워크를 고려한다. 기본적으로 무선 통신에서 소비되는 에너지 모델은 LEACH[22-23] 모델을 따른다. 즉, 센서에서 소비되는 에

너지를 송신에너지와 전자기기 에너지로 분류한다. 대부분의 에너지는 송신할 때 소모되며 송신주파수가 1-2GHz 일 때, 약 90m[24] 이내에서는 센서노드와 중계노드 사이의 거리의 제곱, 즉 r^2 에 반비례한다. 이 때 사용하는 모델을 자유공간 모델(Free-space Model)이라고 부른다. 만약 거리가 90m 이상이 되면 송신 에너지는 급격하게 증가되는데 r^4 에 반비례하게 되며 이때의 모델을 다중경로 모델(Multi-path Model)이라고 한다. 따라서 자유공간 모델에서 k bit의 메시지를 거리 r 인 중계노드에 전송하는데 소비되는 센서노드의 전송에너지는 다음 식 (1)로 표시된다.

$$E_{tx}(k, r) = E_{elec}(k) + E_{amp}(k, r) \quad (1)$$

$$= kE_{elec} + kP_{fs}r^2$$

여기서 E_{elec} 은 전자기기 회로에서 소비되는 에너지로서 거리에 관계없이 일정하게 소비된다. E_{amp} 는 송신출력 에너지로서 $P_{fs}r^2$ 로 표시되며 거리에 관계가 있는 항이다. 식(1)은 다중경로 모델에서는 식(2)로 표현된다.

$$E_{tx}(k, d) = E_{elec}(k) + E_{amp}(k, d) \quad (2)$$

$$= kE_{elec} + kP_{mp}d^4$$

여기서 d 는 센서노드와 중계노드 사이의 거리인데 식 (1)과 구별하기 위해 d 로 나타내었다. 센서노드에서 데이터를 수신할 때에는 거리에 관계없이 일정한 에너지만 소비되며 식 (3)으로 표현된다.

$$E_{rx}(k) = E_{elec}(k) = kE_{elec} \quad (3)$$

중계노드는 물리적으로 아무 곳이나 설치될 수 없기 때문에 우선 중계노드 위치후보들을 정한다. 중계노드 후보들의 집합을 $RN=\{1, \dots, m\}$ 이라 하며 이 RN 의 원소들은 이미 초기에 그 위치가 정해져 있다. 또한 이 후보 집합에서 j 라는 중계노드가 선택되어 설치된다. 센서노드의 집합은 $SN=\{1, \dots, n\}$ 으로 표시되며 임의의 센서노드 $i \in SN$ 이고 중계노드 j 에 할당될 수 있다.

중계노드에서 기지국으로 전송하는데 소비되는 에너지 벡터를 \mathbf{X} 라고 한다면 X_j 는 중계노드 j 에서 소비되는 에너지양을 의미한다. 중계노드 j 는 클러스터에 할당된 n_j 개의 센서노드로부터 각각 q bit의 메시지를 받아서 기지국으로 재전송하는데 이때 필요한 에너지는 다중경로 모델로 표현되며 식 (4)와 같다.

$$X_j = qn_j(2E_{elec} + E_{da} + P_{mp}d_j^4) \quad (4)$$

여기서 E_{da} 는 중계노드가 데이터를 병합하는데 소비되는 에너지이다. \mathbf{Y} 는 센서노드의 에너지 행렬로 표현할 수 있으며 이 행렬의 크기는 $|RN| \times |SN|$ 으로 표시된다. 따라서 Y_{ij} 는 행렬 Y 의 (i, j) 원소이다. 이것은 센서노드 i 가 중계노드 j 에 q 비트의 데이터를 전송하는데 소비되는 에너지를 말한다.

$$Y_{ij} = q(E_{elec} + P_{fs}r_{ij}^2) \quad (6)$$

Y_j 는 클러스터 j 에 할당된 모든 센서노드에서 소비되는 에너지의 합을 말한다. 클러스터 내에서 센서노드로부터 중계노드까지의 거리는 비교적 가까우므로 자유공간 모델을 사용한다. Y_j 는 식 (5)로 나타내어진다.

$$Y_j = \sum_{i \in I_j} Y_{ij} = qn_j \sum_{i \in I_j} (E_{elec} + P_{fs}r_{ij}^2) \quad (5)$$

여기서 I_j 는 클러스터 j 에 할당된 센서노드의 집합을 말하며 식(5)에서는 n_j 개가 할당된다는 것을 의미한다.

3.2 클러스터의 에너지 균형비

클러스터를 기반으로 하는 무선센서 네트워크에서 중요한 생존시간은 각각의 클러스터가 생존하는 시간으로 볼 수 있다. 중계노드는 센서노드에 비해서 소비전력이 크기 때문에 초기 에너지가 훨씬 큰 상태로 제공된다. 또한 중계노드는 처음에 네트워크를 설계할 때에 그 위치가 정해진다고 가정한다. 즉, 중계노드의 위치는 정적으로 정해지지만 센서노드의 위치는 동적으로 클러스터를 형성할 때마다 할당되는 중계노드가 달라질 수 있다. 따라서 실제 대규모 네트워크에서 클러스터의 생존시간은 센서노드들의 에너지 소비가 얼마나 균형 있게 소비되는가 하는 문제에 크게 의존한다.

Kang 및 Poovendran[12]은 네트워크의 생존시간을 최대화하기 위해서 클러스터 간의 에너지가 균형을 이루는 것이 중요하다는 것을 이론적으로 밝혀냈다. 따라서 이 결과를 바탕으로 본 논문에서는 클러스터의 에너지 균형비라는 개념을 제안하며 이 비율이 커지는 방향으로 클러스터를 형성하게 되면 센서노드의 에너지 소비가 전체 네트워크에 걸쳐서 각각의 클러스터 안에서 고르게 됨으로써 각각의 클러스터 안에서 시스템의 생존시간을 최대화시킬 수 있다. 에너지 균형비 EBR은 클러스터에서 소비되는 에너지의 비율을 말하며 식 (6)으로 정의한다.

$$EBR = \frac{\min_{j \in RN} Y_j}{\max_{j \in RN} Y_j} \times 100\% \quad (6)$$

식(6)에서 EBR 값이 커질수록 클러스터 간의 센서노드에서 소비되는 에너지양은 고르게 된다. 즉, 에너지 소비가 최소인 클러스터와 에너지 소비가 최대인 클러스터 간의 비율이 100%에 가까워질수록 네트워크 전체에서 소비되는 에너지가 균일하다는 것을 말하며 이것은 전체 네트워크의 생존기간이 길다는 것을 의미한다.

3.3 중계노드 위치모델

중계노드 위치문제의 해를 구하기 위해 네트워크 전체에서 소비되는 에너지를 최소화시키는 것보다 각각의 클러스터에서 소비되는 에너지를 균형 있게 만드는 것이 중요하다. 따라서 중계노드의 위치문제를 해결하기 위한 목적함수로 클러스터의 에너지 균형비 EBR을 크게 만드는 식을 사용한다. 즉 목적함수로 아래 식을 생각할 수 있다.

$$\min \{ \max_{j \in RN} Y_j \} \quad (7)$$

식(7)은 임의의 클러스터에서 소비되는 센서노드의 에너지합의 최대값을 최소화시킨다는 의미이다. 또한 중계노드에서 소비되는 에너지 X_j 와 클러스터에 할당된 센서노드에서 소비되는 에너지 Y_j 를 각각 고려하는 목적식도 생각할 수 있다.

$$\min \{ \max_{j \in RN} X_j + \max_{j \in RN} Y_j \} \quad (8)$$

또 다른 목적함수로 중계노드와 그에 할당된 센서노드를 동시에 함께 고려한 식도 시도할 만하다.

$$\min \{ \max_{j \in RN} (X_j + Y_j) \} \quad (9)$$

이 때 제약조건들은 다음 식들로 표현된다.

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad \forall i \in SN \quad (10)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i \in SN, \forall j \in CH \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^m y_j = k \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq C_j, \quad \forall j \in CH \quad (13)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\}, \quad \forall i \in SN, \forall j \in CH \quad (14)$$

제약조건 (10)은 센서노드 i 가 단일 중계노드 j 에 할당된다는 것을 말한다. 조건식 (11)은 센서노드는 후보 중계노드 중에서 선택된 중계노드에 할당된다는 말이다. 식 (12)에서 k 는 클러스터의 수를 의미한다. 기지국의 위치를 고려하지 않고 순수하게 센서노드의 에너지만을 고려하는 LEACH와 같은 클러스터 모델에서는 최적의 클러스터 개수를 사전에 알 수 있다. 식(13)에서 C_j 는 계산 속도를 높이기 위한 것으로 직관적으로 N/k 보다 커야 한다. 여기서 N 은 네트워크 전체의 센서노드 개수이다. 식 (12)와 (13)으로 인해서 탐색공간을 크게 줄일 수 있으며 따라서 탐색속도를 높게 된다.

4. 실험 및 평가

본 실험에서는 에너지 효율적인 센서 네트워크의 기지국 위치문제를 푸는데 있어서 본 논문에서 제안한 EBR 개념의 효용성을 증명한다. 클러스터 기반의 센서 네트워크에서 에너지 소비의 최소화는 네트워크 전체의 에너지 소비 최소화보다는 클러스터간의 에너지 소비가 고르게 균형을 이루는 것이 좋다. 또한 클러스터링하면서 중계기 위치와 할당되는 센서노드가 결정된다. 그런데 클러스터링 하는 방법에 따라서 식 (7), (8), (9)와 같은 목적함수를 사용한다. 이들 목적함수 중에서 어느 것이 가장 우수한가를 판별하는 것은 본 논문에서 제안한 에너지 균형비(EBR)를 이용한다. EBR이 크다는 것은 클러스터 간에 에너지가 균일하게 소비된다는 것을 의미하기 때문이다. EBR은 클러스터 기반의 네트워크에서 사용가능하며 각각의 클러스터마다 EBR 값이 존재한다.

실험에 사용된 네트워크의 크기는 한 변이 100m 인 정사각형이고 100개의 센서노드 들이 무작위로 설치된다. 중계노드는 센서노드보다 훨씬 큰 초기에너지를 갖고 있으며 30개의 후보 위치를 네트워크 설계하기 전에 미리 정한다. 실험의 일관성을 위해서 LEACH의 연구[23]에서 사용했던 것과 같은 크기의 네트워크와 같은 수의 센서노드를 사용하여 실험하였다. LEACH 논문에서 최적의 클러스터 수는 6개이며, 이 때 목적함수를 최적으로 만족하는 중계노드의 위치를 찾아내는 것이 본 실험의 목적이다. 실험에 사용된 목적함수는 3개로서 식 (7), (8), (9)이며 이 식들 중에서 에너지 균형비 EBR을 가장 크게 나타내는 목적함수식을 찾아내면 중계노드의 위치가 구해진다.

실험에서 사용된 파라미터는 다음과 같다. 전자회로에서 소비되는 에너지 $E_{elec} = 50$ nJ/bit이고, 송신 에너지에

사용된 파라미터 $P_{fs} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$ 와 $P_{mp} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$ 이다. 또한 데이터 병합에 소비되는 에너지 $E_{da} = 50 \text{ nJ/bit}$ 이다. 센서노드가 한 번에 송신하는 데이터 크기는 500 bytes이고 각각의 패킷 헤더의 크기는 25 bytes이다. 중계노드는 센서노드로부터 수신된 데이터를 기지국으로 재전송한다. 기지국은 (50,175)m에 위치해 있고, 계산을 간단히 하기 위해서 중계노드는 다중경로 모델을 사용하였고, 센서노드는 자유공간 모델을 사용하였다.

목적함수 (7)을 계산하는 것은 논문[10,13]에서와 같이 NP-hard 문제이다. 따라서 완전해를 구하기 어렵고 시간이 많이 소모된다. 따라서 본 실험에서는 빨리 계산할 수 있는 근사해를 구하는데 제약만족최적화 기법을 적용하였으며 프로그래밍 언어로 제약프로그래밍 언어인 ILOG OPL 3.7을 사용하였다. 제약만족최적화는 기본적으로 백트래킹에 기반을 둔 나무탐색(Tree Search)이다. 따라서 그 성능을 비교하는데 있어서 탐색한 노드의 수가 적을 수록 우수한 알고리즘이며 그 실행시간도 적어야 좋다.

목적함수 (7), (8), (9)를 이용해서 6개의 클러스터링을 얻고 각각의 클러스터에서 소비되는 에너지는 각각 다음 표1, 표2, 표3과 같다.

[표 1] 목적함수 (7)을 이용한 클러스터에서 소비된 센서노드의 에너지 소비

클러스터 번호	할당된 센서노드의 수	클러스터의 센서노드에서 소비된 에너지의 합(mJ)
3	19	5,282
25	15	5,236
27	18	5,284
28	17	5,154
29	17	5,174
30	14	5,238

표 1에서 $\min_{j \in RN} Y_j = Y_{28} = 5,154 (mJ)$ 이고 $\max_{j \in RN} Y_j = Y_{27} = 5,284 (mJ)$ 이다. 따라서 $EBR = \frac{5,154}{5,284} \times 100\% = 97.5\%$ 이다.

[표 2] 목적함수 (8)을 이용한 클러스터에서 소비된 센서노드의 에너지 소비

클러스터 번호	할당된 센서노드의 수	클러스터의 센서노드에서 소비된 에너지의 합(mJ)
3	19	5,392
25	16	5,471
27	15	4,614
28	17	5,458
29	18	5,429
30	15	5,503

[표 3] 목적함수 (9)를 이용한 클러스터에서 소비된 센서노드의 에너지 소비

클러스터 번호	할당된 센서노드의 수	클러스터의 센서노드에서 소비된 에너지의 합(mJ)
3	17	5,666
25	13	4,424
27	13	4,403
28	20	6,882
29	19	5,665
30	18	7,376

[표 4] 목적함수별 EBR 성능비교

목적함수	네트워크의 EBR(%)	Choic Points	Time (sec.)
식 (7)	97.5	27,850	26.56
식 (8)	83.8	32,905	33.84
식 (9)	59.7	24,031	24.03

표 4에서 Choice Point는 탐색한 노드의 수이다. 따라서 값이 작을수록 빨리 해를 찾았다는 것을 의미한다. 표 4에서 알 수 있듯이 목적함수 식 (7)이 네트워크의 EBR이 가장 크지만 탐색노드 수와 실행시간은 식 (9)가 가장 적다. 즉 에너지 효율성 측면에서 목적함수 식 (7)이 클러스터 별로 에너지가 가장 효율적으로 소비됨을 알 수 있지만 그 알고리즘을 푸는 데에는 식 (9)가 더 우수하다. 그렇지만 본 논문에서는 정적 네트워크에서 에너지소비를 최소화하는데 그 목적이 있으므로 식 (7)이 더 적합함을 알 수 있다. 향후에 더 좋은 목적함수 식을 개발함에 있어서 EBR 뿐만 아니라 탐색노드 수와 실행시간도 동시에 최소화시키는 알고리즘의 개발이 필요하다.

5. 결론

본 논문은 무선 센서 네트워크의 에너지 소비 최소화에 관한 문제로서, 이 문제를 에너지 균형비와 중계노드 문제를 동시에 고려한 EBR-RNP 문제로 모델링하였고 이에 대한 근사해를 제약 프로그래밍을 이용하여 구하였다. 이를 위하여 에너지 균형비라는 개념을 제안하였으며, 이 균형비를 최대화시키는 목적함수가 곧 네트워크의 에너지를 최소화시킨다는 것을 발견하였다. 실험에서 3 종류의 목적함수를 이용하여 시뮬레이션한 결과, 목적함수 식 (7)이 가장 좋은 결과인 97.5%라는 EBR을 보였다. 앞으로의 연구에서 보다 우수한 성능을 가진 목적함수식을 개발할 때에 본 논문에서 제안한 EBR이 그 판단의 기준이 될 것이다.

참고문헌

- [1] K. Akkaya, M. Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," *Elsvier Ad Hoc Networks*, vol. 3, issue 3, pp.325-349, May 2005.
- [2] O. Younis, S. Fahmy, "Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach," *INFOCOM 2004*.
- [3] W.B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [4] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, "TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," *IPDPS 2001*.
- [5] S. Lindsey, C. Raghavendra, K.M. Sivalingam, "Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 13, no. 9, pp.924-935, 2002.
- [6] X. Han, X. Cao, E.L. Lloyd and C.-C. Shen, "Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks," *INFOCOMM 2007*.
- [7] A. Kashyap, S. Khuller and M. Shayman, "Relay placement for higher order connectivity in wireless sensor networks," *INFOCOMM 2006*.
- [8] W. Zhang, G. Xue, and S. Misra, "Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: problems and algorithms," *INFOCOMM 2007*.
- [9] Y.T. Hou, Y. Shi, H.D. Sherali and S.F. Midkiff, "Prolonging sensor network lifetime with energy provisioning and relay node placement," pp. 295-304, *SECON 2005*.
- [10] P. K. Agarwal and C. M. Procopiuc, "Exact and approximation algorithms for clustering," in *Symposium on Discrete Algorithms*, 1997.
- [11] J.H. Chang, L. Tassiulas, "Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 4, pp. 609-619, Aug. 2004.
- [12] Intae Kang and Radha Poovendran, "Maximizing network lifetime of broadcasting over wireless stationary ad hoc networks," *MONET*, pp. 879-896, 2005.
- [13] Errol Lloyd and Guoliang Xue, "Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on computers*, vol. 56, no. 1, pp. 134-138, Jan. 2007.
- [14] S. Ghiasi, A. Srivastava, X. Yang, and M. Sarrafzadeh, "Optimal energy aware clustering in sensor networks," *Sensors*, 2002(2), pp. 258-269, 2002.
- [15] Carla-Fabiana Chiasserini, Imrich Chlamtac, Paolo Monti, and Antonio Nucci, "An energy-efficient method for nodes assignment in clusterbased ad hoc networks," *Wireless Networks*, 10(3), pp. 223-231, 2004.
- [16] Jing Ai, Damla Turgut, and Ladislau B'ol'oni, "A cluster-based energy balancing scheme in heterogeneous wireless sensor networks," in *ICN(1)*, eds., Pascal Lorenz and Petre Dini, vol. 3420 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 467-474, Springer, 2005.
- [17] M. Younis, K. Akkaya, A. Kunjithapatham, "Optimization of Task Allocation in a Cluster-Based Sensor Network," *IEEE Int'l Symposium on Computers and Communication*, Jul. 2003.
- [18] S. Misra, S. D. Hong, G. Xue and J. Tang, "Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks to Meet Connectivity and Survivability Requirements," *IEEE INFOCOMM 2008*, Phoenix, AZ, April 13-19, 2008.
- [19] N. Christofides and J. E. Beasley, "Extensions to a lagrangean relaxation approach for the capacitated warehouse location problem," *European Journal of Operational Research*, 12(1), pp. 19-28, 1983.
- [20] E. Amaldi, A. Capone, and F. Malucelli, "Planning UMTS base station location: Optimization models with power control and algorithms," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2(5), pp. 939-952, 2003.
- [21] Vipin Kumar, "Algorithms for constraint satisfaction problems: A survey," *AI Magazine*, 13(1), pp. 32-44, 1992.
- [22] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *HICSS*, 2000.
- [23] Wendi B. Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4), pp. 660-670, 2002.
- [24] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles & Practice*, Prentice-Hall, 1996.

손 석 원(Surgwon Sohn)

[정회원]



- 1985년 2월 : 인하대학교 전자공학과 공학사
- 1987년 2월 : 인하대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 2007년 8월 : 인하대학교 컴퓨터 정보공학과 공학박사
- 1999년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 뉴미디어학과 부교수

<관심분야>

인공지능,무선통신망, e-Health

한 광 록(Kwang-Rok Han)

[정회원]



- 1984년 2월 : 인하대학교 전자공학과 공학사
- 1986년 2월 : 인하대학교 대학원 정보공학전공(공학석사)
- 1989년 8월 : 인하대학교 대학원 정보공학전공(공학박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 컴퓨터공학부 교수

<관심분야>

USN, HCI, e-Health, 시맨틱웹, 온톨로지