에너지 효율성을 높인 무선 센서 네트워크의 부하 균형 군집모델

이재희*, 김병기*, 강승호**
*전남대학교 전산학과
**동신대학교 정보보안학과
e-mail:jaehee099@gmail.com

Energy Effective Load Balanced Clustering Model for Wireless Sensor Networks

Jae-Hee Lee*, Byung-Ki Kim*, Seong-Ho Kang**
*Dept of Computer Science, Chonnam National University
**Dept of Information Security, Dongshin University

요 약

무선 센서 네트워크는 제한된 에너지 자원으로 동작하므로 에너지 소비를 최소화하여 통신하는 기법이 무선 센서 네트워크 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 센서 노드들의 에너지 효율을 개선하기 위한 다양한 방법 중 클러스터링 알고리즘에 기반 한 계층적 라우팅 방법이 무선 센서 네트워크의 성능과 수명을 증가시키기 위해 효과적인 기술임이 알려지면서 다양한 접근법이 제시되고 있다. 클러스터 기반 아키텍처에서 클러스터의 부하 균형을 위한 효율적인 군집 모델은 게이트웨이와 센서 노드의 수명을 증가시켜 전체 네트워크의 성능을 향상 시킨다. 본 논문에서는 네트워크의 수명과 에너지 효율성을 높이기 위해 새로운 부하 균형 군집 모델을 제시한다. 또한 최적해를 보장하는 분기 한정 알고리즘을 설계하고 이를 이용해 다양한 조건에서 기존에 제시된 부하 균형 군집 모델과 실험하고 성능을 비교한다.

1. 서론

무선 센서 네트워크는 재난 정보 시스템, 환경 감시, 의료 보건, 침입 탐지 등을 포함한 다양한 분야에서 유용성으로 인하여 많은 연구가 이루어지고 있다[1][2]. 대부분 무선 센서 네트워크는 감지, 데이터 전송, 전력 공급 유닛을 가진 수많은 작은 센서 노드를 분산 배치하여 물리적 공간 내의 정보를 수집하는 시스템으로 구성 되어 있다. 제한된 에너지 자원으로 동작하는 무선 센서 네트워크에서는 에너지 소비를 최소화 하여 통신하는 기법이 무선 센서 네트워크의 설계에 있어 중요한 요소다. 차세대 배터리 기술의 개발 등 적은 에너지 소비를 위한 다양한 방법 등 센서 노드들의 에너지 효율을 개선하기 위하여 많은 방법들이 고려되고 있다. 클러스터링 또한 무선 센서 네트워크의 성능과 수명을 증가 시켜주는데 있어 매우 효과적인 기술이다. 클러스터 기반 아키텍처에서 센서 노드는 클러스터 헤드(CH)라고 알려진 리더를 가지고 클러스터 안에 그룹으로 만들어 진다. CH는 그룹의 멤버인 센서 노드로부터의 데이터를 처리하여 싱크(sink)로 보낸다. 이러한 클러스터 기반 계층형 아키텍처는 에너지 효율성, 통신 대역 활용, 네트워크 확장성 등에 다양한 장점[3]이 있지만, 일반적인 센서 노드들 사이에서 선출되는 CH는 부가적인 작업으로 인하여 에너지 소비가 증가되고 전체적으로 네트워크 수명에 영향을 미친다. 이에 게이트웨이라 불리는 일반 센서 노드와 달리 추가 적인 에너지 자원을 가진 노드를 추가 시키는 방법이 제안되었다[4][5]. 그러나 게이트웨이 또한 제한된 에너지 자원을 가지고 동작을 하기 때문에 부적절한 클러스터의 구성은 게이트웨이에 오버로드를 가중 시켜 전체 시스템의 성능을 떨어뜨린다.

따라서 본 논문에서는 네트워크의 수명과 에너지 효율성을 높이기 위한 새로운 부하 균형 군집 모델을 제시한다. 분기 한정 알고리즘을 설계하여 기존에 제시된 부하 균형 군집 모델과 비교하여 성능을 평가한다.

2. 관련 연구

무선 센서 네트워크에서 클러스터 기반의 계층적 라우팅을 위한 다양한 알고리즘이 제시되었다. LEACH[6]는 가장 많이 알려진 분산 클러스터를 구성하는 방법이다. 그러나 이 방법은 작은 에너지를 가진 노드가 CH로 선출되어 네트워크 수명이 짧아지는 문제점을 가진다. 따라서 이를 개선한 PEGASIS[7], HEED[8], TEEN[9], TL-LEACH[10] 등의 알고리즘이 개발 되었다. 그러나 이러한 방법들은 공통적으로 헤더 노드를 일반 노드 중에 선발함으로써 네트워크의 수명연장에 한계를 가지고 있다. Gupta[4]는 일반노드보다 초기 에너지량이 큰 헤더노드

(게이트웨이) 노드를 네트워크에 도입하여 수명연장을 시도하였다. 이후 Low[5]는 주어진 게이트웨이 노드들의 부하가 균형이 되도록 나머지 일반 노드를 분배하는 부하균형 클러스터링 문제가 NP-hard임을 증명하고 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. Kuila[11]는 부하균형 클러스터링 문제를 해결하기 위해 유전자 알고리즘을 제시하고 Gupta와 Low 방법보다 에너지 효율적임을 보였다. Kuila가 제안한 방법에서는 노드 간의 거리를 네트워크의 부하로 사용하고 다음과 같이 부하균형 문제를 정의하였다.

$$\min imize\, L = \{\max L_i | \forall\, g_i \in G\}$$

여기서 L_i는 클러스터 헤더 g_i의 부하를 나타내며 다음과 같이 정의 된다.

$$L_i = \sum_{j \in s_i} d_j$$

s_i는 클러스터 헤더 g_i에 속한 일반 센서노드의 집합을 가리키며 d_j는 센서노드와 헤더 사이의 거리를 의미한다. 결국 Kuila가 정의한 부하균형 클러스터링 문제는 각 클러스터의 거리의 합으로 계산되는 부하 편차를 최소화하는 문제이다.

3. 부하 균형 클러스터링 모델

3.1 에너지 모델

네트워크의 에너지 소비 모델은 LEACH의 제안 모델을 사용한다[6]. Kuila 제안 방법에서도 동일한 에너지 모델을 사용하였기에 비교에 문제가 없다.

k bit의 패킷을 d미터 떨어져 있는 다른 센서에 송신하는데 드는 전력 소모량 는 아래의 식에 의하여 계산한다.

$$E(k,d) = \begin{cases} kE_{Tx} + ke_{fs}d^2 & \text{for } d < d_0 \\ kE_{Tx} + ke_{mp}d^4 & \text{for } d \geq d_0 \end{cases}$$

만약 거리가 임계값 d_0보다 적다면 e_{fs}모델을, 크면 e_{mp} 모델을 사용한다. e_{fs}와 e_{mp}은 에너지 서킷에 의해서 요구되어지는 에너지량이고, 그리고 k bit 패킷을 수신할 때 소모되는 에너지량은 다음 식으로 계산한다. E_{Rx}는 비트당 소모되는 에너지량을 말한다.

$$E(k) = E_{Rx}k$$

3.2 제안 모델

Kuila가 정의한 부하균형 클러스터링 문제에서 사용하는 부하는 노드간의 거리였다. 하지만 사용한 에너지 모델을 살펴보면 실제 에너지 소모량은 거리의 제곱에 비례한다는 사실을 알 수 있다. 그리고 부하를 거리로 사용한 경우와 거리의 제곱을 사용한 경우의 부하균형 클러스터링 문제는 같지 않으며 따라서 그 해가 항상 일치하는 것은 아니다. 본 논문은 노드간 거리가 아니라 거리의 제곱을 부하로 사용하여 부하균형 클러스터링 문제를 다시 정의한다.

문제정의)

거리제곱을 부하로 사용한 부하균형 클러스터링 문제

$$\min imize\, L = \{\max L_i | \forall\, g_i \in G\}$$

여기서 $L_i = \sum_{j \in adj(g_i)} d^{2_{ji}}$

Kuila등이 사용한 방법과 본 논문이 제시한 방법의 에너지 효율성을 LEACH의 에너지 모델을 사용하여 비교하기 위해 최적해를 보장하는 분기한정 알고리즘을 설계하였다. 분기한정 알고리즘은 다양한 최적화 문제를 풀기위한 대표적인 알고리즘으로 항상 최적해를 보장해준다[12]. 분기 한정 알고리즘은 모든 후보해를 나열해서 최적화할 수치의 상한이나 하한을 추정하여 해공간의 탐색 영역을 줄이는 방법으로 불필요한 영역을 제거하여 시간 소모를 줄인다. 아래에 부하균형 클러스터링 문제를 해결하기 위한 분기한정 알고리즘의 의사코드를 제시한다. 두 문제에 대한 재귀함수를 사용한 분기한정 알고리즘은 동일하고 다만 부하 계산이 다를 뿐이다.

Algorithm : Branch_and_Bound
Input : Set of sensor nodes and gate ways
Output : Clustering set of Sensor nodes

```
mload <- MAX_NUM;
nsensors <- 센서노드 수
ngates <- 게이트웨이 수
Branch_and_Bound(sol, curbest, n)
Begin
   if (n >= nsensors)
      cld <- Load_Computation(sol, n);
      if (cld < mload)   //부하 개선
         mload <- cld;  //min load 변경
         bestsol <- sol; //최적해 변경
      Branch_and_Bound(sol, curbest, n-1);
   else
      if (sol[n] >= ngates-1)
         sol[n] = -1;
         if (n - 1 < 0) // 종료 조건
            return;      // 종료
         Branch_and_Bound(sol, curbest, n-1);
      else
         sol[n] <- sol[n] + 1;
         cld = Load_Computation(sol, n);
         if (cld >= gload)
            Branch_and_Bound(sol, curbest, n);
         else
            Branch_and_Bound(sol, curbest, n+1);
End
```

Function: Load_Computation (Kuila) **Input**: solution, n **Output**: maximum load
Load_Computation(sol, n) **Begin** n번 센서까지만 센서와 게이트웨이까지의 ***거리 d***를 사용해 각 게이트웨의 부하 계산; maxld <- 게이트웨이의 부하 중 가장 큰 부하; return maxld; **End**

Function Load Computation (Proposed) **Input**: solution, n **Output**: maximum load
Load_Computation(sol, n) **Begin** n번 센서까지만 센서와 게이트웨이까지의 ***거리의 제곱 d^2***을 사용해 각 게이트웨의 부하 계산; maxld <- 게이트웨이의 부하 중 가장 큰 부하; return maxld; **End**

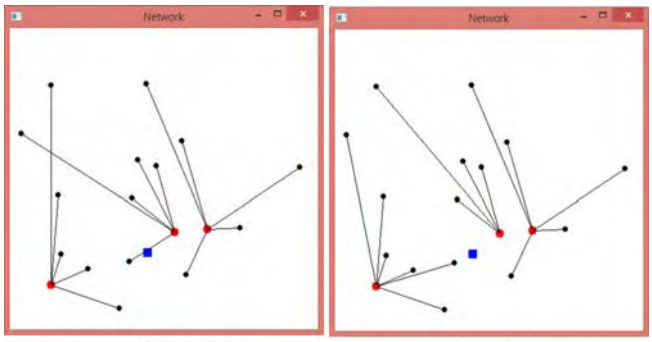
4. 실험 및 성능 분석

노드간 거리를 부하로 사용한 경우와 거리의 제곱을 부하로 사용한 경우의 부하균형 클러스터링의 성능을 측정하기 위해 표 1과 같이 네트워크를 구성하였다.

<표 1> 실험 조건

Parameter	Value
Area	200×200 m^2
Sensor nodes	10, 15, 20
Gateways	3
Initial energy of sensor nodes	$2J$
E_{Tx}	$50nJ$
E_{Rx}	$50nJ$
efs	$10pJ/bit/m^2$
emp	$0.0013pJ/bit/m^4$
E_{DA}	$5nJ$
d_0	$87.0m$
Packet size	$4000bits$

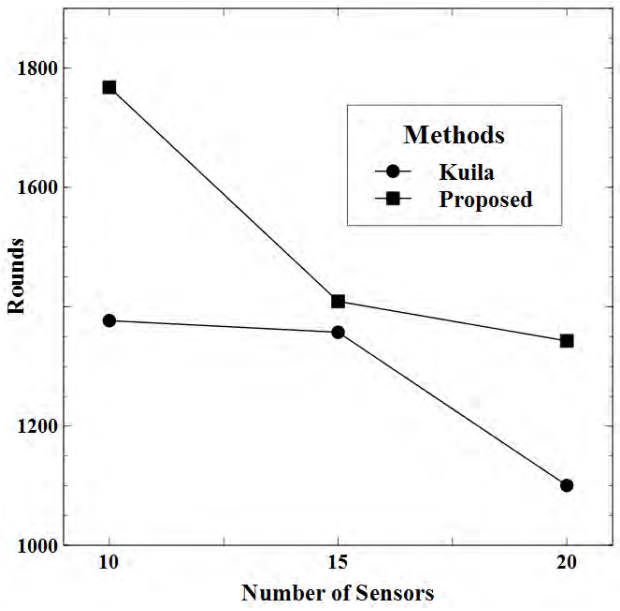
200m×200m 공간에 3개의 게이트웨이와 10, 15, 20 개의 센서들을 무작위로 배치하고 거리를 부하로 사용한 경우와 본 논문이 제시한 거리의 제곱을 부하로 사용한 경우각각에 대해 최적 클러스터링을 계산하였다. 그림 1에서 알 수 있듯이 두 문제의 최적해가 반드시 일치하는 것은 아님을 확인할 수 있다. 그림 1의 네트워크는 3개의 게이트웨이와 15개의 센서로 구성되어있고 베이스 노드는 센서들의 중앙값으로 위치를 지정하였다.



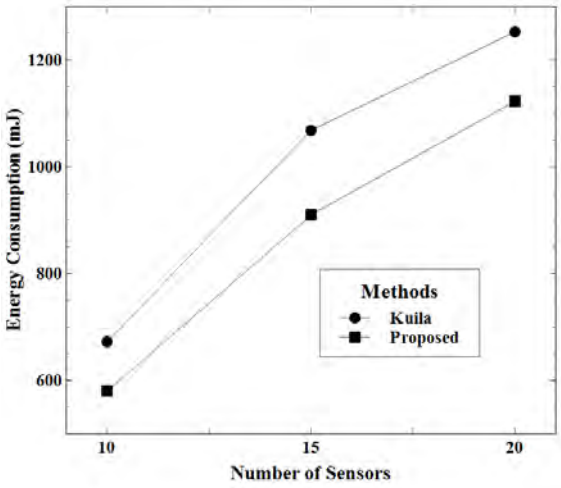
(그림 1) 클러스터링 예 (a)Kuila 방법 (b)제안 방법

매 라운드마다 모든 센서는 자신이 속한 클러스터의 헤더에 525바이트의 패킷을 전송하고 각 CH는 전송받은 패킷을 베이스 노드에 직접 전송한다.

일반적으로 네트워크 수명은 에너지가 방전된 센서가 최초로 발생할 때까지의 라운드 수로 정의된다. 그림 2는 20개의 네트워크를 생성해 시뮬레이션하고 네트워크 수명을 평균한 것이다. 모든 센서 수에서 거리의 제곱을 부하로 사용한 방법의 네트워크 수명이 길다는 사실을 알 수 있다.



(그림 2) 제안 방법과 Kuila의 에너지가 모두 소모 되는 첫 번째 센서가 나타날 때의 라운드 비교



(그림 3) 제안 방법과 Kuila의 에너지 소비율 비교

한편, 에너지 효율성을 측정하기 위해 100라운드까지 센서들이 소모한 에너지의 총량을 합산하였다. 그림 3은 마찬가지로 20개의 네트워크에 대해 에너지 총량을 평균한 것이다. 네트워크 수명에서와 동일하게 거리의 제곱을 부하로 사용하여 최적 클러스터링 한 경우의 에너지 효율성이 높다는 사실을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 일반 센서와는 다른 게이트웨이를 사용하는 센서 네트워크 아키텍처를 대상으로 노드간 거리의 제곱을 부하로 사용하는 부하균형 클러스터링 문제를 제시하였다. 노드 간의 거리를 부하로 사용하는 Kuila 등이 제시한 기존의 부하균형 클러스터링 문제와 에너지 효율성 측면에서의 성능을 비교하기 위해 최적해를 보장하는 분기한정 알고리즘을 설계하였다. 두 문제의 해가 다를 수 있음을 확인하였고 거리의 제곱을 부하로 사용한 최적 클러스터링이 네트워크 수명과 에너지 효율성 측면 모두에서 우수하다는 사실을 확인하였다.

그러나 분기 한정 알고리즘은 한정 함수를 이용하여 탐색 영역을 줄인다 하더라고 전체 해공간을 대상으로 탐색해야 하기 때문에 센서의 수가 많을 경우 적용할 수 없어 작은 규모의 네트워크에서만 확인할 수 있었다. 큰 규모의 네트워크를 대상으로 클러스터링이 가능한 휴리스틱 알고리즘의 개발이 필요하다. 또한 베이스 노드의 위치에 따라 성능 상에 차이를 보일 수 있으므로 이를 적극적으로 고려한 모델을 개발해야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2014R1A1A4A01008799)

참고문헌

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” Computer networks, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, 2002.

[2] K. Akkaya, and M. Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor networks,” Ad hoc networks, vol. 3, no. 3, pp. 325-349, 2005.

[3] A. A. Abbasi, and M. Younis, “A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks,” Computer communications, vol. 30, no. 14, pp. 2826-2841, 2007.

[4] G. Gupta, and M. Younis, "Load-balanced clustering of wireless sensor networks," Communications, ICC'03. IEEE International Conference on, IEEE, pp. 1848-1852. 2003

[5] C. P. Low, C. Fang, J. M. Ng, and Y. H. Ang, “Efficient load-balanced clustering algorithms for wireless sensor networks,” Computer Communications, vol. 31, no. 4, pp. 750-759, 2008.

[6] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 1, no. 4, pp. 660-670, 2002.

[7] S. Lindsey, and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems," Aerospace conference proceedings IEEE, vol. 3., pp. 3-1125-3-1130, 2002

[8] O. Younis, and S. Fahmy, “HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks,” Mobile Computing, IEEE Transactions on, vol. 3, no. 4, pp. 366-379, 2004.

[9] A. Manjeshwar, and D. P. Agrawal, "TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks,", IEEE, p. 30189a., 2001

[10] V. Loscri, G. Morabito, and S. Marano, "A two-levels hierarchy for low-energy adaptive clustering hierarchy (TL-LEACH)," IEEE Vehicular Technology Conference, p. 1809, 2005

[11] P. Kuila, S. K. Gupta, and P. K. Jana, “A novel evolutionary approach for load balanced clustering problem for wireless sensor networks,” Swarm and Evolutionary Computation, vol. 12, pp. 48-56, 2013.

[12] J. Hromkovic “Algorithmics for Hard Problems” 2nd Edition, Springer, 2004.