

무선센서네트워크의 수명 최대화를 위한 모바일싱크 배치전략

김영훈, 이건택, 한승재
연세대학교 컴퓨터과학과
e-mail : felix@cs.yonsei.ac.kr

Sink Mobility Strategy for Maximizing Network Lifetime in Wireless Sensor Networks

Younghun Kim, Keontaek Lee, Seungjae Han
Dept. of Computer Science, Yonsei University

요 약

유비쿼터스 시대가 도래하면서 인프라 중 하나인 센서네트워크에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 배터리를 사용하는 센서들의 특성상 네트워크 수명을 최대화하는 것이 주요 이슈 중 하나인데, 모바일 싱크를 이용하여 패킷 전송에 소비되는 에너지 로드 밸런싱을 통해 효율적인 결과를 얻을 수 있었다. 전체 센서들의 잔여 에너지와 그 평균과의 편차를 싱크를 움직이는 기준으로 하는 휴리스틱 알고리즘을 제안하였고 최적에 가까운 결과를 얻었다.

1. 서론

무선 센서네트워크는 환경 모니터링, 군사 정찰 등의 용도로 사용되고 있고 이를 운용함에 있어서 여러 가지 이슈가 발생하여 그에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일반적인 네트워크와 달리 배터리를 사용하는 센서네트워크의 특성상 그 수명을 오래 유지하는 것이 중요한 문제인데, 이는 수많은 센서들의 배터리를 교체해준다는 것은 비현실적이기 때문이다.

이러한 센서네트워크 수명 최대화에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔는데 센서 배치 측면에서 구분하면 모바일 싱크를 이용하는 방법[1],[2],[3],[4],[5], 모바일 센서를 재배치하는 방법[6],[7],[8], 일부의 모바일 센서를 이용하여 패킷을 포워딩하는 방법으로 네트워크 수명을 최대화하는 방법[9]이 있다. 그러나 모바일 센서를 이용하는 것은 위치이동의 부정확성 및 높은 통신 오버헤드 등의 문제점이 있어 실용적이지 못하다. 따라서 우리는 모바일 싱크를 움직이는 방식을 채택하여 네트워크의 수명을 최대화 하는 연구를 하였다.

2. 센서네트워크 수명에 관한 분석

수백~수천개의 센서들로 구성된 센서네트워크는 센서가 데이터를 수집하면 Base Station 역할을 하는 싱크노드로 전송하게 된다. 그런데 고정형 센서들로 구성된 네트워크에서는 싱크에 가깝게 배치된 센서노드

들의 에너지 소비가 멀리 배치된 노드에 배치된 센서보다 빨리 소비되기 때문에, 많은 센서들이 충분한

잔여에너지를 가지고 있음에도 불구하고 싱크와의 통신이 단절되기 때문에 네트워크가 제 기능을 상실하게 된다. 싱크의 이웃 노드들은 자신의 생성 데이터뿐만 아니라 외곽에서 싱크를 향해 전송되는 패킷까지도 포함하여 전송해야 하기 때문에 생기는 문제로서, 이에 착안하여 싱크가 주변 노드들에 주는 부담을 분산시킬 수 있도록 움직이는 싱크를 생각하고 이를 활용하는 방법을 연구한 많은 결과들이 나오게 되었다.

네트워크 토폴로지는 격자형, 원형 등을 주로 가정하고 문제를 풀어나가는데 여기서는 원형 네트워크를 고려하였다. 맨해튼 워킹 모델을 이용한 최단경로 라우팅을 적용하였고 1개의 모바일 싱크가 있다고 가정하였다. 그리고 네트워크의 수명은 처음으로 센서노드가 에너지를 모두 소비해서 더 이상 작동할 수 없을 때까지의 시간으로 정의한다.

이러한 정의 하에 네트워크 수명을 최대화하기 위한 모바일 싱크가 움직이는 패턴이나 방식에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. J. Luo 등은 원형 네트워크에서 일정 시간동안 전체 네트워크에 걸리는 로드를 최소화하는 계도를 수학적 모델을 이용하여 구하였다 [4]. 또, S. Basagni 등은 모바일 싱크와 각 센서 노드의 위치에 따른 라우팅 로드 매트릭스를 파라미터로 얻을 수 있도록 식을 제안, 선형프로그래밍을 통하여 격자형 네트워크의 수명을 최대화하였을 때의 모바일 싱크가 각 센서 노드에 머무르는 시간(sojourn time)

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2010-(C1090-1011-0004))

을 얻어냈다 [1].

비록 위 두 논문의 네트워크 토폴로지는 다르지만 결과를 보면, 모바일싱크가 네트워크의 수명을 최대화할 수 있는 솔루션은 유사하다. 즉, 싱크가 네트워크의 가장 외곽지역을 회전할 때(rotation), 또는 외곽에 균등하게 오래 머무는 것이 네트워크의 수명을 최대화 할 수 있다는 결론을 얻은 것이다.

그러나 위 두 논문은 수학적 모델링을 통하여 결과만을 도출했을 뿐 그 원인에 대한 분석이 미흡하였다. 따라서 우리는 선형프로그래밍을 이용하여 원형네트워크에서의 수명 최대화에 대한 분석을 하였다. S. Basagni[1]가 사용한 식을 참조하여 선형프로그래밍을 하였는데 식은 아래와 같다.

$$\text{Objective : Max } \sum_{k \in S} t_k \quad (1)$$

$$\text{Subject to : } \sum_{k \in S} c_{ik} t_k \leq e_0 \quad (i \in N) \quad (2)$$

t_k 는 싱크가 site k(노드)에 머무르는 시간이고, S 는 site 의 집합이다. c_{ik} 는 싱크가 site k 에 머무를 때 임의의 노드 i 가 데이터를 받고 포워딩하는데 소비하는 에너지 파라미터이다. 이것은 맨해튼 워킹모델을 가정한 라우팅 프로토콜의 식[1]을 이용하여 미리 주어진다. 그리고 N 은 전체센서의 집합이다. (1)번 식은 모바일 싱크가 각 사이트에 머무르는 시간들의 합을 최대화 하는 것을 목표로 설정한 것이고, 이 때 센서의 수명에 대한 정의에 따라 처음으로 임의의 센서노드가 에너지 고갈로 작동하지 않게 되기까지의 시간에 대한 제약을 (2)번 식으로 주었다.

그러나 이 논문에서는 각 센서노드들의 데이터 생성률이 모두 같다는 가정하에서 문제에 접근하였기 때문에 그들이 내린 결론처럼 왜 네트워크의 가장자리에 대부분의 시간을 소비하는지에 대한 설명이 미흡하였다. 따라서 우리는 (2)번 식에서 데이터 생성률을 고려하여 같은 objective 아래 다음과 같은 제약식을 이용하여 모바일 싱크의 sojourning time 에 대하여 분석해 보았다.

$$\sum_{k \in S} c'_{ik} t_k \leq e_0 \quad (i \in N) \quad (3)$$

이 식에서 c'_{ik} 는 전체 노드의 각각 다른 데이터 생성률 r_i 을 고려하여 다시 계산한 파라미터 값이다. 데이터 생성률을 정중앙에 있는 노드가 0 부터 시작하여 가장자리로 갈수록 증가하여 끝에는 1 또는 10 의 값을 갖고 그 사이의 노드들은 선형적으로 감소하는 상황과, 이와 반대로 값을 가지도록 파라미터 값을 준 다음 objective 를 풀어보았다.

그림 1 은 센서의 데이터 생성률이 네트워크의 중심부가 0, 외곽으로 갈수록 1 또는 10 에 가까워지는 조

건에서 네트워크의 수명이 최대화 되었을 때의 sojourning time 분포를 나타낸 것으로, 가장 위 두 그래프는 왼쪽은 30x30 네트워크에서 각각 0~1, 오른쪽은 0~10 의 데이터 생성률 갭(gap)을 설정했을 때 얻은 결과이다. 또한 밑의 두 그래프는 50x50 네트워크에서 위의 그래프와 같은 설정시 얻은 결과이다. 그림 1 을 보면 에너지 갭의 차이가 sojourning time 분포에 미치는 영향은 크지 않지만 사각형처럼 모서리를 형성하며 좀 더 쏠리는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다 이는 라우팅 프로토콜의 특성에 기인한 것이라 할 수 있다.

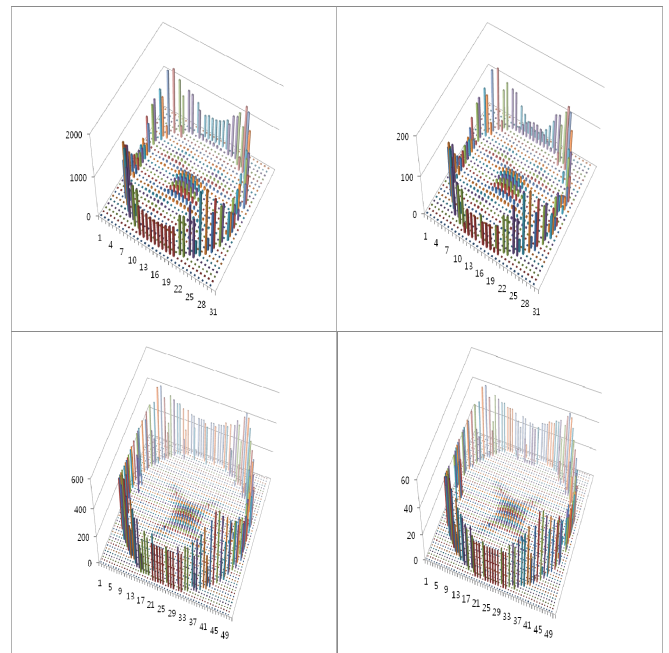


그림 1. 센서의 데이터 생성률 변화에 따른 최적화된 모바일 싱크의 sojourning time 분포를 나타낸 차트. 중심에서 외곽으로 갈수록 데이터 생성률이 증가함. Z 축 단위는 초(s).

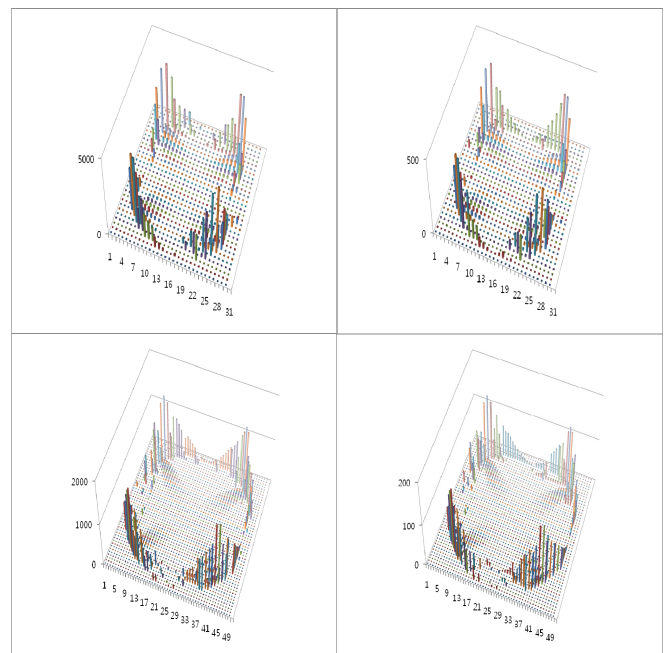


그림 2. 중심에서 외곽으로 갈수록 데이터 생성률이 0 에 가까워지는 분포를 갖는 네트워크에서의 최적화된 결과..

반대로 그림 2 는 역으로 중심부를 1 또는 10, 외곽을 0 으로 설정하였을 때 얻어낸 결과이다. 네트워크 중심부를 기준으로 외곽으로 갈수록 데이터 생성률이 감소하는 형태의 설정 또한 그림 2 에서 알 수 있듯이 싱크를 외곽에 주로 머물게 한다. 그림 1 보다 그림 2 가 좀 더 극단적인 형태의 모양을 보이는데 이는 네트워크 중심부의 상대적인 에너지 소비율이 그림 1 보다 그림 2 가 더 높기 때문에 모서리를 형성하는 경향이 더 강해짐을 알 수 있다. 결국 그림 1 과 2 를 통하여 데이터 생성률의 지역간 갭(gap)보다 네트워크 중심부의 에너지 소비경향이 네트워크 수명에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 네트워크 중심부가 통계적으로 라우팅에 참여하는 비중이 높기 때문에 에너지 고갈 속도가 빠르게 일어나고, 따라서 수명을 최대화 하기 위해서는 최대한 중심지역에서 떨어진 곳에 위치해야 고르게 에너지를 소비한다는 사실을 알 수 있다.

3. 휴리스틱 알고리즘

앞서 살펴보았던 분석은 선형프로그래밍을 통해 얻어낸 가장 이상적인 결과이다. 우리는 그에 준하는 결과를 얻을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 고안하였다.

모바일 싱크를 움직이는 기준(metric)에는 에너지 밀도(density), 데이터 트래픽 등이 사용되고 있다. 물론 이러한 기준도 랜덤워크(random walk)모델보다는 좋은 결과를 얻지만 최적화된 결과에는 여전히 부족한 사실이다. 따라서 좀 더 에너지를 고르게 소비하는 방법을 연구하였고, 에너지 편차(deviation)를 기준으로 적용해보았다. 즉, 단위시간 T 가 지날 때마다 싱크노드는 전체 네트워크의 에너지 편차를 계산하여 기준 값을 초과하여 잔여에너지의 불균형이 발생하였다고 판단되면 에너지 편차를 최소화하는 위치로 이동하는 방식을 이용하여 알고리즘을 개발하였다.

< 파라미터 >

P[i]: 싱크의 위치
 RE[j]: 노드의 잔여 에너지
 D[i]: 싱크가 i 에 위치할 때 네트워크의 에너지 편차
 T: 단위 시간
 Load[i, j]: 싱크가 i 에 위치했을 때 노드 j 의 에너지 로드
 σ : 전체 노드의 잔여 에너지에 대한 표준편차
 m: 전체 노드의 잔여 에너지에 대한 평균값

잔여에너지: $RE[j] = E[j] - load[i, j] * T$

< 알고리즘 >

For (RE[j] > 0)
 If $|1 - \sigma / m| \leq \alpha$
 Find P[i] = arg min σ
 Else P[i]

If RE[j] ≤ 0, then Stop

여기에 α 와 T 는 파라미터로서 주어지는데 α 는 0.0 초과 1.0 미만의 값을 설정함으로써 싱크의 모빌리티에 대한 제어 기준으로 작용한다. T 값 역시 싱크의 모빌리티에 영향을 주는 파라미터이다.

4. 성능평가

실험은 C 언어로 프로그래밍하여 진행하였고 주요 목적은 optimal 과의 성능 비교 및 모바일 싱크의 움직이는 양상 분석이다. 단위시간 (T)은 10, α 값은 0.99 로 하였고 초기 에너지 E 의 값은 $1.35 \mu J$ 이다. 싱크의 시작점(origin)은 네트워크의 외곽 중 임의의 점으로 설정하였다. 라우팅은 앞서 optimal 을 계산할 때와 같은 맨해튼 워킹모델을 적용한 최단경로 라우팅을 전제하였다.

휴리스틱 알고리즘을 적용하여 얻은 결과는 선형프로그래밍을 이용하여 얻은 최적화된 결과와 비슷하다. 즉, 모바일 싱크가 매 단위 시간마다 전체 네트워크의 에너지 편차를 고려하면서 이동하는 양상 또한 외곽부에 대부분의 시간을 할당하는 것으로 나타났다는 것이다.

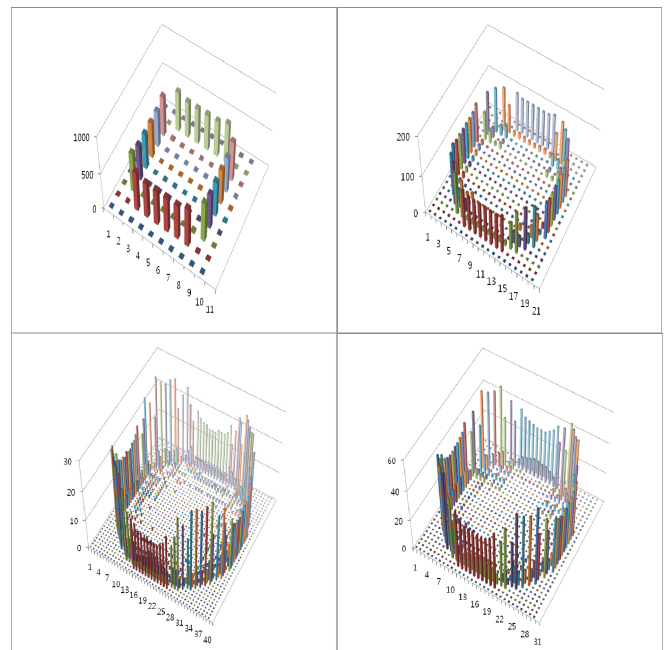


그림 3. 네트워크 크기에 따른 싱크 시간 분포 그래프. 왼쪽 위부터 시계방향으로 10x10, 20x20, 30x30, 40x40 크기의 원형 네트워크이다.

그림 3 에 보이는 것처럼 우리가 제안한 heuristic 알고리즘은 optimal 과 거의 유사한 패턴의 시간분포를 가진다. 오히려 optimal 은 네트워크 외곽 주변에 머무르는 패턴이 균등하지 못한데 반해 우리의 heuristic 은 상대적으로 고른 sojourning time 분포를 보이고 있다. 라우팅의 특성상(맨해튼 워킹 모델) 원형 네트워크에서도 사각형같이 네 꼭지점에 좀 더 많은 시간이 할당됨을 알 수 있다. 이는 다른 라우팅 프로토콜을 사용하면 좀 더 고른 시간 분포를 보일 것이다.

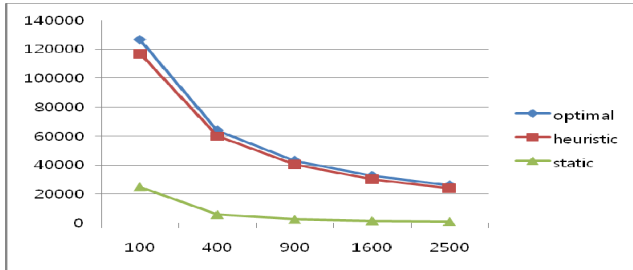


그림 4. optimal, heuristic, static 네트워크 수명 비교

위 그래프는 각각 네트워크 사이즈를 10, 20, 30, 40, 50으로 확장했을 때 수명을 비교한 것이다. static은 싱크가 중심부에 고정되어 네트워크의 로드 밸런싱을 하지 못하므로 에너지 고갈 속도가 빠름을 알 수 있다. 반면 우리가 제안한 알고리즘은 optimal에 근접한 결과를 보여주고 있다. 네트워크 사이즈가 클수록 싱크의 이동성은 수명 최대화에 효율적인데, 50x50 네트워크에서는 static보다 27배 긴 수명을 유지하였다.

5. 결론

앞서 보았듯이 선형프로그래밍을 통한 최적화 결과와 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 얻은 결과 모두 모바일 싱크가 네트워크의 가장자리에 오래 머무는 것이 네트워크 수명을 최대화할 수 있음을 말해주고 있다. 이는 모든 센서가 동일한 양의 데이터를 생성하고 싱크로 리포팅하는 네트워크에서는 중심부의 에너지 소비율(속도)이 외곽부에 비해 높기 때문에 네트워크 수명을 최대화하기 위해서 싱크는 가장 바깥쪽에 오래 머물러야 하기 때문이다. 기존의 연구에서도 수학적 접근을 통해 네트워크 중심부의 노드가 상대적으로 외곽부의 노드에 비해 많은 양의 데이터 패킷을 전송하게 된다고 언급한 바 있다.

에너지의 편차를 이용한 휴리스틱 알고리즘은 최적화된 결과에 가까운 좋은 성능을 보여주었다. 그러나 매 단위시간마다 전체 네트워크의 에너지 편차를 계산하여 이동하는 방식은 라우팅 경로 재설정 횟수가 많아져 오버헤드가 발생하므로 비효율적일 수 있다. 향후 연구에서는 deterministic한 방법으로 이러한 오버헤드를 최소화할 수 있는 알고리즘 개발에 주력할 것이다.

참고문헌

- [1] Z. Maria Wang, S. Basagni and Chiara Petrioli, "Exploiting Sink Mobility for Maximizing Sensor Networks Lifetime," Proc. Of Hawaii International Conference on System Sciences, 2005.
- [2] Gaotao Shi and Yantai Shu, "Exploiting Sink Movement for Energy-efficient Load-balancing in Wireless Sensor Networks," Proc. Of ACM FOWANC, 2008.
- [3] S. Basagni and Z. Maria Wang, "A New MILP Formulation and Distributed Protocols for Wireless Sensor Networks Lifetime Maximization," Proc. Of IEEE ICC, 2006.

- [4] Jun Luo and Jean-Pierre Hubaux, "Joint Mobility and Routing for Lifetime Elongation in Wireless Sensor Networks," Proc. Of IEEE Infocom, 2005.
- [5] V. Donepudi and Mohamed Younis, "Employing Sink Mobility to Extend the Lifetime of Wireless Sensor Networks," CollaborateCom/LNICST 10, pp.355-369, 2009.
- [6] Cheng-Hung Liu and Kuo-Feng Ssu, "A Moving Algorithm for Non-Uniform Deployment in Mobile Sensor Networks," Proc. Of ACM International Conference on Mobile Technology, Applications & Systems, 2008.
- [7] Guiling Wang and Tom La Porta, "Sensor Relocation with Mobile Sensors: Design, Implementation, and Evaluation," Proc. Of IEEE Infocom, 2005.
- [8] Yi Zou and Krishnendu Chakrabarty, "Sensor Deployment and Target Localization in Distributed Sensor Networks," ACM Transactions on Embedded Computing Systems, Vol. 3, No. 1, February 2004, Pages 61-91.
- [9] Wei Wang and Kee-Chaing Chua, "Using Mobile Relays to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks," Proc. Of ACM Mobicom, 2005.