무선 센서 네트워크에서 에너지 잔여량을 고려한 효율적인 Top-k 모니터링 기법의 설계*

김용기*, 장재우*
*전북대학교 컴퓨터공학과
e-mail: ykkim, jwchang@dblab.chonbuk.ac.kr

Design of Efficient Top-k Monitoring Considering Energy Amount in Wireless Sensor Networks

Yong-Ki Kim*, Jae-Woo Chang*
*Dept of Computer Engineering, Chonbuk National University

요 약

최근 무선 센서 네트워크 기술은 환경 모니터링과 같은 분야에서 유용하게 사용된다. 일반적으로 Top-k 질의는 수집한 데이터 중에서 가장 높거나 낮은 k개의 값을 찾는 질의로써, 많은 센서 네트워크 응용 분야에서 널리 쓰이고 있다. 센서 네트워크에서 일정 시간동안 지속적인 모니터링을 위해 Top-k 질의를 주기적으로 수행해야 하는 경우, 인-네트워크 집계(In-Network Aggregation) 기법 또는 필터(Filter) 기법을 사용한 알고리즘이 제안되었다. 본 논문에서는 에너지 효율성을 지원하기 위해, 고정된 라우팅 트리에서 네트워크의 부하를 분산시키는 라우팅 트리 변경 기법을 제안한다. 아울러, 가장 효율이 좋은 필터 기반의 FILA를 기반으로, 질의 결과의 정확성 및 에너지 효율성을 효과적으로 제공하는 알고리즘을 제안한다.

1. 서론

최근 유무선 통신 기술의 발전 및 모바일 정보기기의 보편화에 힘입어, 시간과 장소에 제약 없이 서비스를 제공할 수 있는 유비쿼터스 컴퓨팅(Ubiquitous Computing)기술이 각광받고 있다. 특히 유비쿼터스 컴퓨팅 환경 구현을 위한 기반구조로써 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network) 기술 개발에 대한 관심이 크게 고조되고 있다. 무선 센서 네트워크는 환경 모니터링, 군사 전략 등 여러 응용 분야에서 쓰이고 있다[1, 2]. 일반적으로 센서 노드는 제한된 배터리를 사용하고 있기 때문에, 에너지 사용에 많은 제약을 받는다. 아울러, 센서 노드는 광범위한 범위에 설치되거나 사람이 관리하기 어려운 곳에 쓰이기 때문에, 배터리가 모두 소모되었을 경우 재충전하거나 교체하기 어려운 특징을 지니고 있다. 따라서 제한된 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 연구가 필수적이다.

반면에 센서 데이터를 수집하여 관리하는 모니터링은 센서 네트워크의 다수의 응용 분야 중 매우 중요한 분야이다. 이러한 모니터링 응용에서 에너지를 효율적으로 관리하기 위해서는, 수집 데이터를 집계하여 상위 노드로 보내는 알고리즘이 필요하며, Top-k 질의는 이러한 분야에서 널리 쓰이는 유용한 질의이다[3, 4, 5]. Top-k 질의는 “산불로 인한 산불 진원지를 찾기 위해 지리산 지역에서의 가장 높은 온도를 지닌 5개의 지역을 찾아라”와 같은 형태의 질의이다. 즉, 수집한 데이터 중에서 가장 높거나 낮은 k개의 값을 찾는 질의이다.

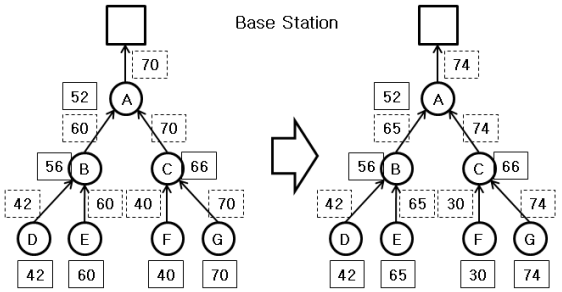
본 논문에서는 에너지 효율성을 극대화하기 위해서, Top-k 모니터링에서 네트워크의 부하를 분산시키는 라우팅 트리 변경 기법을 제안한다. 아울러, Top-k 모니터링 연구에서 가장 효율이 좋은 필터 기반의 FILA를 기반으로, 에너지 잔여량을 고려한 질의 결과의 정확성 및 에너지 효율성을 효과적으로 제공하는 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 Top-k 질의 처리를 위한 기존 알고리즘들의 특징 및 수행 과정을 제시하고, 제3장에서는 제안하는 Top-k 모니터링 기법에 대해 기술한다. 마지막으로, 제4장에서는 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 관련 연구

Top-k 질의는 센서 네트워크 환경에서 가장 높거나 낮은 데이터를 가진 k 개의 센서 노드를 찾는 질의이다[3, 4, 5, 6]. 따라서 이 질의는 환경 모니터링 등 여러 모니터링 응용 환경에서 사용된다. 예를 들면, 산불이 일어났을 경우, 효과적으로 산불 진원지를 찾기 위하여 가장 온도가 높은 몇 개의 지역을 찾고자 한다면, 환경의 온도를 측정하는 센서 네트워크에 Top-k 질의를 요청함으로써 산불 진원지를 유추할 수 있음으로써 쉽게 산불 진화가 가능하

* 본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

게 된다. 이러한 Top-k 질의를 연속적으로 수행함으로써 센서 네트워크 환경의 모니터링이 가능하다. 연속적인 Top-k 모니터링 방법의 가장 단순한 방법은 모든 센서 노드로부터 수집한 데이터를 기지국(base station)에 주기적으로 전송하고, 기지국에서 원하는 k 개의 데이터를 찾는 방법이다. 하지만, 센서 노드가 주기적으로 데이터를 전송해야 하기 때문에, 많은 에너지 소모가 발생하며 이에 따라 센서 네트워크의 수명이 줄어든다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 TAG[5]는 인-네트워크 집계 알고리즘을 이용하여 네트워크 내에서 전송하는 메시지 양을 줄이는 방법을 제안하였다. TAG는 센서 노드가 자신이 수집한 데이터와 하위 센서 노드에서 받은 데이터를 모두 상위 노드로 전송하지 않고, Top-k 질의에 맞는 결과 데이터만을 전송하는 기법이다. (그림 1)은 TAG 기법의 예를 보이고 있다.

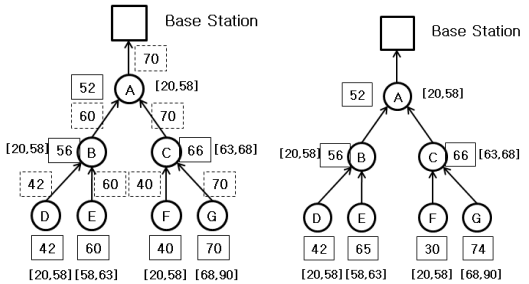


(a) 처음 데이터 수집인 경우 (b) 질의 주기가 경과한 후

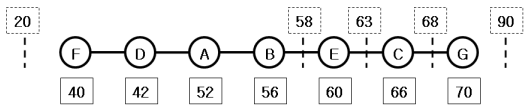
(그림 1) TAG 기법의 예

예를 들면, 센서 노드들이 (그림 1-a)와 같은 구조를 가졌을 때, 센서 노드 B인 경우 자신이 수집한 56 값과 하위 센서 노드 D, E로부터 받은 데이터 42와 60중에서 Top-1 질의의 결과에 해당하는 데이터 60만을 상위 센서 노드 A로 전송한다. 마찬가지로, 센서 노드 A는 자신의 데이터 52와 하위 센서노드에서 받은 60과 70중에서 가장 높은 70만을 기지국으로 보내게 된다. 질의 주기가 경과한 후 (그림 1-b)의 경우도 마찬가지로 자신의 데이터 값과 하위 센서 노드로부터 받은 값 중에서 질의 결과에 해당하는 값만을 상위 센서 노드로 전송하게 된다. 이 기법은 모든 센서 데이터가 아닌 집계한 데이터 결과 값만을 전송하기 때문에 전체적인 네트워크 수명이 늘어난다. 그러나, 주어진 질의 주기마다 수집한 데이터를 상위 노드로 보내야 할 뿐만 아니라, 결과에 해당하지 않은 대부분의 데이터 값이 전송되는 단점을 지니고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 필터 기반의 FILA 기법[6]이 제안되었다. FILA 기법은 모든 센서 노드에서 데이터를 보내는 단점을 개선하기 위하여, 각 센서 노드가 필터를 지니고 있어 필터의 범위를 벗어난 경우에만 데이터를 전송하는 방법이다. 여기에서 각 센서 노드가 지니고 있는 필터는 처음 데이터 수집이 이루어진 다음에 필터를 계산하여 각 센서 노드에 할당된다. 이 때, 각 필터의 범위는 겹치지 않는 범위로 설정한다.



(a) 처음 데이터 수집인 경우 (b) 질의 주기가 경과한 후



(c) 필터 설정 방법

(그림 2) FILA 기법의 예

(그림 2-a)는 (그림 2-c)의 필터 설정 방법을 이용하여, Top-3 질의를 수행하기 위한 필터를 설정한 후의 FILA의 모습이다. 아울러 (그림 2-b)는 일정 주기가 지난 후의 각 센서에서의 데이터 값을 보여준다. 필터 설정 방법은 각 센서 노드의 데이터 값을 오름차순으로 정렬한 후에, 각 센서 노드 사이의 중간 값을 이용하여 질의 결과인 k 개의 필터와 이 외의 1개의 필터를 설정한다. 질의 주기가 경과한 후의 (그림 2-b)에서, 센서 노드 E가 필터의 범위를 벗어나기 때문에, 센서 노드 E는 데이터 전송을 이루어진다. 즉, eager 알고리즘에서는 E, B, A 센서 노드는 기지국으로 데이터를 전송하기 위하여 상위 노드로 E 센서 노드의 데이터 값을 전송하게 된다. 기지국은 수신한 데이터가 질의의 결과인지 아닌지 재검증 과정이 필요하다. 이 과정에서 데이터 전체를 다시 순회해야 하는 단점을 초래하게 된다. 반면, 필터의 범위가 벗어난다 하더라도 Top-k 질의의 결과가 바뀌지 않는 경우의 데이터 전송을 방지하기 위하여, eager 알고리즘 기법의 또 다른 lazy 알고리즘을 제시하였다. (그림 2-b)의 경우, 센서 노드 E의 데이터가 필터의 범위를 벗어난다 하더라도, 센서 노드 A와 순서가 바뀌지 않을 뿐더러 결과에도 영향을 미치지 않는다. 이는 센서 노드 E가 필터의 범위를 벗어난다 하더라도, 데이터 전송을 하지 않음으로써 불필요한 데이터 전송을 줄이게 된다. 그러나, (그림 2-c)에서 보다시피 센서 노드 G의 데이터 값이 변경된다 하더라도, 필터 이내의 값이 변경된 경우에는 질의 결과에 반영되어야 한다.

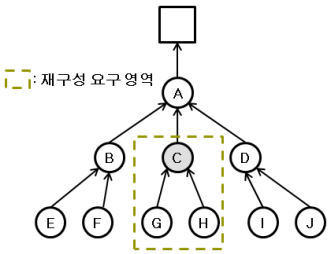
3. 제안하는 Top-k 모니터링 기법

본 장에서는 기존 연구에서 에너지 효율성을 극대화하기 위하여, Top-k 모니터링에서 네트워크의 부하를 분산시키는 라우팅 트리 변경 기법을 제안한다. 아울러, 기존 Top-k 질의처리 알고리즘에서 가장 효율이 좋은 필터 기반의 FILA를 기반으로, 에너지 잔여량을 고려한 질의 결과의 정확성과 에너지 효율성을 유연하게 제공하는 알고리즘을 제안한다.

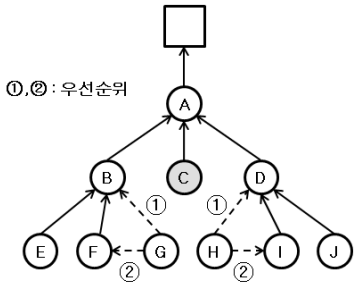
3.1. Top-k 모니터링을 위한 라우팅 트리 변경 기법

고정된 라우팅 트리의 기법은 단말 센서 노드가 아닌 중간 센서 노드가 에너지를 모두 소모하게 되면, 그 자신이 갖고 있는 하위 센서 노드들은 데이터를 기지국으로 보낼 수 없게 된다. 아울러, Top-k 질의의 특성상 갱신이 빈번한 지역이 자주 바뀌는 특성을 지니고 있기 때문에, 변경이 일어나는 경로의 센서 노드가 에너지를 많이 소모하는 경향을 지니고 있다. 이는 심각한 네트워크 절단을 야기하게 된다. 따라서 센서 노드의 전체 배터리 중에서 라우팅 트리를 변경해야 하는 한계치(ε)를 정하여 자신이 지니고 있는 에너지가 ε 값 비율 이하로 내려가는 경우 라우팅 트리의 변경을 요구한다. 이 때, 에너지 소모가 심한 센서 노드는 통신량을 줄이기 위해 단말 센서 노드가 되고, 하위 센서 노드는 다른 센서 노드와 연결하여 라우팅 트리를 재구성한다. (그림 3)은 라우팅 트리를 변경하는 과정을 나타낸다.

(그림 3-a)에서 센서 노드 C가 극심한 에너지 소모로 인해 라우팅 트리의 재구축이 필요하면, 자식 노드들은 각각 다른 센서 노드와 연결하여 재구축을 수행한다. 만약 재조정 과정에서 재조정이 필요한 영역의 센서 노드가 하나의 트리를 구성하여 다른 센서 노드와 연결한다면, 연결된 다른 영역의 센서 노드의 에너지 소모가 크게 된다. 따라서, 센서 노드 C의 자식 센서 노드 G, H는 각각 분리하여 (그림 3-b)와 같이 다른 영역과 통신을 시도하여 변경한다. 이 때, ①, ②는 다른 영역의 센서 노드와 연결하여 라우팅 트리를 구성하는 우선순위를 나타낸다. ②로 연결하는 경우에는 ①의 경우보다 라우팅 트리의 깊이가 깊어지게 되므로 통신횟수가 증가하게 된다. 따라서, 연결할 수 있는 가장 상위 레벨의 센서 노드와 연결하여 라우팅 트리를 재구성한다.



(a) 재구성 전의 라우팅 트리



(b) 통신을 통한 라우팅 트리 변경

(그림 3) 제안하는 라우팅 트리 변경 기법

3.2. 제안하는 Top-k 질의처리 알고리즘

제안하는 Top-k 질의처리 알고리즘은 에너지 잔여량에 따라 eager 알고리즘, lazy 알고리즘과 라우팅 트리 변경 기법을 병행하여 수행한다. FILA 기법의 eager 알고리즘은 lazy 알고리즘에 비해 에너지 사용이 효율적이지 않지만, 필터의 범위를 벗어나는 경우에 즉시 필터의 재조정이 일어나기 때문에 lazy 알고리즘에 비해 높은 Top-k 질의의 정확한 결과를 제공한다. 반면에 lazy 알고리즘은 센서 노드 데이터가 필터의 범위를 벗어나더라도 Top-k 질의 결과의 포함 유무에 따라 필터의 재조정이 이루어진다. 따라서, lazy 알고리즘은 질의 결과의 정확성이 낮은 근사(approximation) 기반의 알고리즘이기 때문에, eager 알고리즘에 비해 약 50%의 에너지 효율성을 지니고 있다. 한편, FILA 기법은 고정된 라우팅 트리를 지니고 있기 때문에, 단말 노드가 아닌 경우 통신 횟수가 매우 많아진다. 뿐만 아니라, 데이터의 갱신이 빈번한 지역의 센서 노드는 에너지 소모가 다른 지역의 센서 노드에 비해 매우 높다. 이러한 지역의 센서 노드는 에너지 효율성을 고려하여 네트워크 수명을 연장시켜야 한다. 그러므로 센서 네트워크 초기에는 정확성이 높은 Top-k 질의 결과를 제공하다가, 일정 시간이 지나면 에너지 효율성을 고려하여 네트워크 전체 수명을 연장시키는 효과적인 방법을 제공하여야 한다. 아울러, 에너지 잔여량이 앞서 언급한 ε 값보다 작아지면 라우팅 트리 변경 기법을 병행한다.

제안하는 알고리즘은 에너지의 잔여량에 따라 3단계로 이루어진다. 첫째, 에너지 잔여량이 많다면, 정확한 질의 결과를 제공하는 eager 알고리즘을 수행한다. 둘째, 센서 노드의 에너지 소모량이 많은 센서 노드의 비율이 일정 한계치(δ)를 벗어나면, 네트워크 수명을 연장할 수 있는 lazy 알고리즘을 수행한다. 이 때, 에너지 소모량이 많은 센서 노드의 비율을 구하기 위해, 각 센서 노드의 에너지 잔여량이 Θ보다 낮게 되면 소모량이 많은 센서 노드로 간주한다. 마지막으로, 각 센서 노드의 에너지 잔여량이 ε보다 적다면, 라우팅 변경 기법을 수행한다. 이를 고려한 Top-k 질의처리 알고리즘은 (그림 4)와 같다.

```
-----------------------------------------------
Top-k Query Processing
01. count = 0, N = number of sensor;
02. run on eager_FILA;
03. while (for each node) {
04.    node = sensor node ID;
05.    E = calculate_energy(node)
06.    if (Θ > E) {
07.        count ++;
08.        if (δ < count / N) {
09.            run on lazy_FILA; } }
10.    else if (ε > E) {
11.        run on change_routingtree(node); }
12.    }
-----------------------------------------------
```

(그림 4) 제안하는 Top-k 질의처리 알고리즘

4. 결론

본 논문에서는 센서 네트워크의 전체 수명을 늘리기 위해, 에너지 소모가 많은 영역을 재배치하여 라우팅 트리의 구조를 변경하는 기법을 제안하였다. 아울러, 기존 Top-k 질의처리 알고리즘 연구에서 가장 효율이 좋은 FILA 기법을 기반으로, 에너지 잔여량을 고려하여 정확한 질의 결과와 에너지 효율성을 제공하는 Top-k 질의처리 알고리즘을 제안하였다. 향후 연구로는 제안하는 Top-k 질의처리 알고리즘과 라우팅 트리 변경 기법을 구현하여 성능 평가를 실시하는 것이다.

참고문헌

[1] R. Szewczyk, A. Mainwaring, J. Polastre, and D. Culler, “An Analysis of a Large Scale Habitat Monitoring Application,” Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04) Nov. 2004.

[2] R. Szewczyk, E. Osterweil, J. Polastre, M. Hamilton, A. Mainwaring, and D. Estrin, “Habitat Monitoring with Sensor Networks,” Comm. ACM, vol. 47, no. 6, pp. 34-40, Jun. 2004.

[3] A. Deligiannakis, Y. Kotidis, and N. Roussopoulos, “Hierarchical In-Network Data Aggregation with Quality Guarantees,” Proc. Int'l Conf. Extending Database Technology (EDBT '04), Mar. 2004.

[4] M.A. Sharaf, J. Beaver, A. Labrinidis, and P.K. Chrysanthis, “Balancing Energy Efficiency and Quality of Aggregate Data in Sensor Networks,” VLDB Journal, vol. 13, no. 4, pp. 374-403, Dec. 2004.

[5] S. Madden, M.J. Franklin, J.M. Hellerstein, and W. Hong, “TAG: A Tiny Aggregation Service for Ad Hoc Sensor Networks,” Proc. Usenix Fifth Symp. Operating Systems Design and Implementation (OSDI '02), pp. 131-146, Dec. 2002.

[6] W. Minji, X. Jianliang, T. Xueyan, and L. Wang-Chien, “Top-k Monitoring in Wireless Sensor Networks“, IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering (TKDE '07), vol. 19, no. 7, pp. 962-976, Jul. 2007.