

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 데이터 병합 트리의 생성 방법

최 현 호*

Construction of Energy-Efficient Data Aggregation Tree in Wireless Sensor Networks

Hyun-Ho Choi*

요 약

무선 센서 네트워크에서 센싱 정보의 수집 시간과 노드의 에너지 소비량 간의 트레이드오프를 고려하여 에너지 소비를 최소화하면서도 빠른 시간 내에 센싱 정보를 수집하는 에너지 효율적인 데이터 병합 트리의 생성 방법을 제안한다. 본 제안 방법은 빠른 정보 수집을 위하여 센서노드와 싱크노드간 최대 거리의 증가를 최소화하면서 에너지 소비를 줄이기 위하여 노드간 연결 링크 비용을 최소화하는 병합 트리를 생성한다. 시뮬레이션 결과, 제안 방법은 기존 방법 보다 병합 트리를 보다 더 낮은 복잡도로 생성 가능하며 기존 방식 대비 높은 에너지 효율을 보여 준다.

Key Words : Data aggregation tree, Routing, Wireless sensor networks

ABSTRACT

A construction method of energy-efficient data aggregation tree is proposed by considering a tradeoff between acquisition time and energy consumption in wireless sensor networks. This proposed method constructs the data aggregation tree to minimize the link cost between the connected nodes for reducing energy consumption, while

minimizing the maximum distance between sensor nodes and a sink node for rapid information gathering. Simulation results show that the proposed aggregation tree can be generated with low complexity and achieves high energy efficiency compared to conventional methods.

I. 서 론

무선 센서 네트워크(wireless sensor network; WSN)는 성능 향상을 위하여 데이터 병합(data aggregation) 기술을 사용해왔다^[1]. 싱크(sink)노드로 데이터가 모이는 WSN 환경에서 데이터 병합 기회를 늘리기 위해서는 트리 구조가 유리한데, 이와 같이 데이터 병합을 활성화시키는 트리 구조를 데이터 병합 트리라 부른다^[2].

WSN에서 데이터 병합 트리에 대한 연구는 WSN의 에너지 제약 문제로 인하여 대부분 노드의 에너지 소모를 줄이거나 네트워크의 생존시간을 증대시키기 위한 목적으로 연구되어 왔다^{[2],[3]}. 하지만 에너지 소모를 줄이고자 데이터 병합을 많이 하게 되면 센싱 정보의 수집 시간이 증가하는 손해가 발생한다. 데이터 병합 트리의 구조에 따라서 센싱 정보의 수집 시간과 노드의 에너지 소비량 간에는 트레이드오프(tradeoff) 관계가 있다고 알려져 있지만, 기존 데이터 병합 트리에 관한 연구에서는 서비스 품질에 해당하는 정보 수집 시간을 고려하지 않고 에너지 소비를 줄이는데 주안점을 두었다. 본 논문에서는 이러한 두 성능간의 트레이드오프를 고려하여 노드의 에너지 소비를 최소화하면서도 빠른 시간 내에 센싱 정보를 수집하는 에너지 효율적인 데이터 병합 트리의 생성 방법을 제안한다.

II. 시스템 모델 및 문제 정의

고려하는 WSN는 k 개의 노드를 가지며, $1 \sim k-1$ 번째 노드는 센서노드로 동작하며 k 번째 노드는 싱크노드가 된다. 모든 센서노드는 주기적으로 센싱 데이터를 발생시키며, 중간 노드는 모든 하위 노드의 센싱 데이터를 병합하여 다음 노드로 전송한다. 병합시 입력된 다수의 센싱 데이터는 하나의 센싱 데이터 크기로 출

* 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [(GRRC)환경2012-B02], 지능적 물류검사에 적합한 비전검사 알고리즘 및 유무선 통합 제어시스템 개발

• First Author : Hankyong National University, Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, and Institute for Information Technology Convergence, hhchoi@hknu.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2016-08-183, Received August 5, 2016; Reviewed August 18, 2016; Accepted August 22, 2016

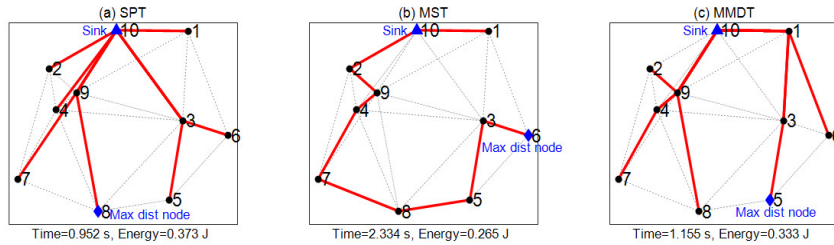


그림 1. SPT, MST, MMDT의 데이터 병합 트리의 예
 Fig. 1. Example of data aggregation tree for SPT, MST, and MMDT

력된다고 가정한다^[3].

사용되는 파라미터와 성능 지표는 다음과 같이 정의된다.

- C_{ij} : 노드 i 와 j 사이의 링크 비용
- D_{ik} : 센서노드 i 와 싱크노드 k 사이의 최단 거리 비용으로 최단 경로 상의 모든 링크 비용의 합
- 정보 수집 시간 (second): 모든 센서노드로부터 발생한 센싱 정보가 싱크노드에 도착하는데 걸리는 시간 ($\max\{D_{ik}\}$ 에 비해, $\forall i \neq k$)
- 에너지 소비량 (Joule): 정보 수집 시간 동안 모든 노드가 데이터를 송수신하는데 소비되는 에너지의 총량 ($\sum\{C_{ij}\}$ 에 비해, 링크 ij 는 트리의 구성 링크)
- 네트워크 에너지 효율 (b/s/Hz/J): 단위 에너지, 대역폭, 시간을 가지고 수집 가능한 센싱 데이터량 ($\max\{D_{ik}\}$ 와 $\sum\{C_{ij}\}$ 에 반비례)

제안하는 데이터 병합 트리의 목표는 WSN에서 정보 수집 시간과 노드의 에너지 소비량을 최소화하여 네트워크 에너지 효율을 최대화하는 것으로, 제안 방안의 목적 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\max \left\{ 1 / \left(\max\{D_{ik}\} \times \sum\{C_{ij}\} \right) \right\}. \quad (1)$$

III. 제안하는 데이터 병합 트리의 생성 방법

식 (1)과 같이 두 성능이 조합된 경우 최적의 데이터 병합 트리를 찾는 것은 NP-hard 문제로 높은 복잡도를 갖는다^[2]. 따라서 본 논문에서는 각각의 성능을 최적화하는 병합 트리를 기반으로 이들의 특징을 결합 적용하여 복잡도를 낮추는 휴리스틱(heuristic) 방법을 제안한다.

정보 수집 시간 측면에서 최적의 트리는 최단 경로 트리(shortest path tree; SPT) 이다^[1]. SPT는 모든 센서노드와 싱크노드가 최단 경로로 연결되므로 전체 센싱 정보를 수집하는데 드는 시간이 가장 짧다. 하지만 중간 노드에서 데이터 병합 기회가 줄어들고 트리

의 구성 링크 비용의 합이 증가하여 노드의 에너지 소비량이 크다. 반면, 노드의 에너지 소비 측면에서 최적의 트리는 최소 신장 트리(minimum spanning tree; MST)로 노드간 연결 링크 비용의 총 합이 가장 적어 노드의 에너지 소비 총량이 가장 적지만, 센서노드와 싱크노드와의 연결 거리가 멀어져 센싱 정보의 수집 시간이 증가한다. 그림 1의 (a)와 (b)는 노드 수가 10개 일 때 각각 SPT와 MST의 예를 보여준다. 표시된 것처럼 최대 거리(maximum distance)를 갖는 노드와 싱크노드와의 거리에 의해서 정보 수집 시간이 결정되며, 트리를 구성하는 링크 비용의 합에 의해서 에너지 소비량이 결정된다.

제안 방안은 각 성능의 최적 트리에 해당되는 SPT와 MST 방식을 결합 적용한다. 먼저 정보 수집 시간을 최소화하기 위하여 SPT에서 결정된 최대 거리를 갖는 연결 경로를 초기 트리라고 사용하고, 이 트리에 아직 연결되지 않은 노드들을 MST와 같이 최단 링크 비용을 갖도록 연결시키면서 트리를 확장시킨다. 그림 1(c)의 예를 들어 설명하면, SPT에서 결정된 최대 거리를 갖는 노드 10, 9, 8로 구성된 초기 트리에 싱크노드와 가까운 순서대로 노드 1, 2, 4가 최소 링크 비용을 갖도록 연결된다. 이와 같이 점점 트리가 확장되면서 노드 3과 7도 확장된 트리에 최소 링크 비용을 갖도록 연결된다. 하지만 노드 6의 경우에는 최소 링크 비용을 갖는 노드 3과의 연결이 최대 거리를 증가시키기 때문에 최대 거리를 증가시키지 않는 노드 1에 연결된다. 마지막으로 노드 5의 연결은 모든 경우에 최대 거리를 증가시키지 않기 때문에 최대 거리의 증가를 최소화하는 연결을 선택하여 노드 3과 연결된다. 이와 같이 제안 방안은 센서노드와 싱크노드의 최대 거리를 최소화하는 전략을 따르기 때문에 최소 최대 거리 트리(min-max distance tree; MMDT)라고 명명된다.

제안하는 MMDT의 생성 알고리즘은 표 1에 자세히 기술되어 있다. 일련의 동작이 노드 수(k) 만큼 수행되므로 $O(k)$ 의 낮은 계산 복잡도를 갖는다.

표 1. 제안하는 MMDT의 생성 알고리즘
Table 1. Algorithm of the proposed MMDT construction

```

/* Initialization */
01: Find SPT and decide  $D_{ik}$  when  $i \in \{1, 2, \dots, k-1\}$ 
02: Set  $D_{max} = \max\{D_{ik}\}$ 
03: Set  $L = \{i \mid \text{nodes on the path with } D_{max}\}$ 
/* Operation */
04: Sort nodes  $i \notin L$  according to  $D_{ik}$  with ascent order
05: FOR sorted nodes  $i \notin L$ 
06:   Find  $\min\{C_{ij}\}$  subject to  $C_{ij} + D_{jk} < D_{max}$  for  $\forall j \in L$ 
07:   IF  $j$  is not found
08:     Find  $\min\{C_{ij} + D_{jk}\}$  for  $\forall j \in L$ 
09:      $D_{max} = \min\{C_{ij} + D_{jk}\}$ 
10:   END
11:   node  $i$ 's next hop =  $j$ 
12:    $L = L \cup \{i\}$ 
13: END
    
```

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션을 위하여 한 변의 길이(W)가 1000 m 인 정사각형 영역에 k 개의 노드가 랜덤하게 분포하며, 각 노드의 통신 반경은 $2W / \sqrt{k}$ 로 결정된다⁴⁾.

모든 노드가 서로 멀티홉 연결이 가능한 토폴로지만을 고려하고, 데이터 병합을 위한 송수신 스케줄링이 완벽하여 충돌 및 전송 에러는 없다고 가정한다. 모든 노드는 주기적으로 100 kbits의 센싱 데이터를 발생시키며, 채널 대역폭은 100 kHz이고, 송수신에 드는 전력은 100 mW로 가정한다¹⁾.

그림 2는 노드 수의 증가에 따라 기존 SPT 및 MST와 제안하는 MMDT의 성능을 보여준다. 정보 수집 시간은 SPT가 최적 성능을 보이며 제안 MMDT가 SPT에 근접한 낮은 정보 수집 시간을 보여준다. 반면 에너지 소비량은 MST가 최적 성능을 가지며 제안 MMDT가 MST에 근접한 낮은 에너지 소비량을 보여준다. 이와 같이 제안한 MMDT는 기존 SPT와 MST의 정보 수집 시간과 에너지 소비량 사이의 트레이드오프 관계를 깨고 둘 다 향상된 성능을 보여준다.

두 성능을 통합한 에너지 효율 측면에서 보면 제안한 MMDT가 SPT와 MST 대비 노드가 100개 일 때 40% 이상의 이득을 보여준다.

V. 결론

제안한 MMDT 방식은 낮은 복잡도로 동작하면서, 최소 수집 시간을 갖는 SPT와 최소 에너지 소비를 갖는 MST의 장점을 결합하여 낮은 에너지 소비를 가지면서도 빠른 정보 수집이 가능하다. 이를 통해 제안 MMDT는 센서 네트워크의 에너지 효율을 극대화한다. 향후 노드 개별적으로 동작하는 분산 MMDT 알고리즘으로의 확장을 통하여 WSN 환경에서 효과적으로 활용 가능하리라 예상된다.

References

[1] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker, "The impact of data aggregation in wireless sensor networks," in *Proc. ICDCS 2002*, Vienna, Austria, Jul. 2002.

[2] T.-W. Kuo and M.-J. Tsai, "On the construction of data aggregation tree with minimum energy cost in wireless sensor networks: NP-completeness and approximation algorithms," in *Proc. IEEE Infocom*, pp. 2591-2595, Orlando, FL, Mar. 2012.

[3] S. Wan, Y. Zhang, and C. Jia, "On the construction of data aggregation tree with maximizing lifetime in large scale wireless sensor networks," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 20, pp. 7433-7440, Oct. 2016.

[4] H.-H. Choi, B. Roh, H. Choi, and J.-R. Lee, "Bio-inspired routing protocol for mobile ad hoc networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 11, pp. 2205-2217, Nov. 2015.

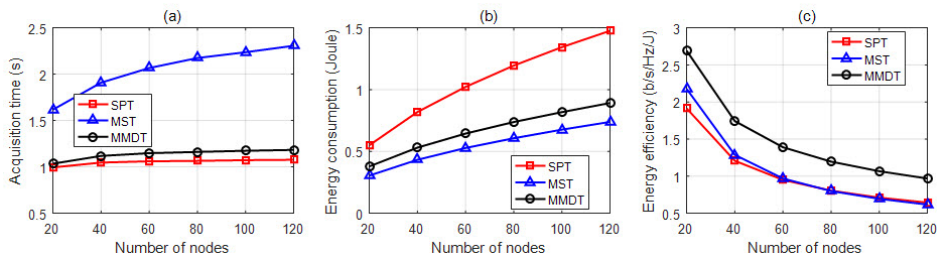


그림 2. 성능 비교: (a) 정보 수집 시간, (b) 에너지 소비량, (c) 에너지 효율
Fig. 2. Performance comparison: (a) acquisition time, (b) energy consumption, and (c) energy efficiency