

센서 네트워크를 위한 효율적인 토폴로지 제어

손태환, 장경배, 심일주, 박귀태  
고려대학교 전자전기공학과

An Energy-efficient Topology Control for Sensor Networks

Tae-Hwan Son, Kyung-Bae Chang, Il-Joo Shim, Gwi-Tae Park  
Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - 본 논문에서는 멀티 홉 패킷 무선통신 네트워크를 위한 An Energy-efficient Topology Control 을 제안한다. 센서 네트워크의 기본적인 형태에 따라 네트워크 망의 구성 방식은 큰 차이를 가져온다. 현재 센서 네트워크의 topology control 의 많은 부분에서는 clustering을 이용하여 센서 네트워크의 lifetime 을 연장시키는 연구가 진행 되고 있다. 그러나 cluster 로의 노드의 연합과 분리는 네트워크 topology 의 안정성을 혼란시킬 뿐만 아니라, BS(Base Station)가 시스템의 외부에 존재하는 경우 더 적합한 방식이라고 볼 수 있다. 본 논문에서는 BS 가 시스템의 내부에 존재하는 경우에 대한 sensor network의 lifetime 을 연장시키는 방안에 대해 제안 하고 있다. 이러한 시스템의 경우 BS에 가까운 지역일수록 Black-hole effect 가 발생할 가능성이 증가하게 되고 이는 네트워크의 수명을 단축시키게 된다. 따라서 노드의 energy를 균등하게 사용 함으로서 lifetime을 연장 하는 on-demand 방식의 topology control을 제시하고 이를 시뮬레이션으로 확인 하였다.

1. Introduction

센서네트워크의 형태는 크게 BS가 네트워크의 내부 또는 외부에 있느냐에 따라 분류 될 수 있다. 그리고 현재 센서 네트워크 분야에서는 각 네트워크 형태에 따른 에너지 소모를 최소화하기 위한 연구가 여러 가지 방면에서 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 방법 중 클러스터링 기법은 각각의 센서 노드들이 직접 멀리 떨어진 BS로 자신의 취득 정보를 전송하는 것이 아니라 일정한 비율로 클러스터 헤드를 결정하여 결정된 클러스터 헤드가 주위의 정보를 한번에 BS로 전송함으로써 에너지 소비를 줄이는 가장 대표적인 기법이다 [1]. 그러나 이런 클러스터링 기법은 BS이 네트워크 외부에 멀리 떨어져 있고 고정되어 있다는 제한적인 시나리오에서 적합하며 BS가 네트워크 내부에 있고 데이터 수집이 on-demand 방식으로 이루어질 경우에는 비효율적이라는 단점을 가진다.

본 논문에서는 제한된 필드에 무작위로 뿌려진 복수개의 센서 노드로 이루어진 센서 네트워크 모델에서의 노드의 연결성을 유지하기 위한 topology control을 제안한다. 본 논문은 BS가 네트워크 안에 고정되어 있는 경우에 대하여 수행되었다. 각각의 센서 노드들은 BS로 직접 데이터를 전송할 수 있는 능력을 가지며 모든 노드는 똑같은 에너지 제약조건을 가진다. 네트워크의 lifetime은 센서 노드들로부터 취득된 데이터의 중요성을 크게 여기어 첫 번째 노드가 꺼지는 FND(First Node Die)가 발생한 시점으로 결정하였다. 시뮬레이션을 위하여 전체 노드가 임의의 순서로 한번씩 BS로 데이터를 전송한다고 가정하고 이를 1 round로 정의하였다. 그리고 이러한 조건에서 각 노드들 모두 직접 BS로 데이터를 전송할 때와 효과적인 에너지 사용을 위한 topology 구성했을 때의 네트워크 lifetime을 비교해 보았다.

2. Energy model

본 논문에서 제안된 알고리즘을 평가하기는 기준이 될 에너지 모델에 대해 소개하겠다. 결과의 신뢰성을 보장하기 위하여 센서 네트워크 분야의 논문에서 많이 인용되는 에너지 모델로서 first radio model 을 사용하였다.

Transmitting :

$$E_{Tx} = E_{elec} * k + \epsilon_{amp} * k * d^2 \quad (1)$$

Receiving :

$$E_{Rx} = E_{elec} * k \quad (2)$$

송수신 거리에 따라 각 센서 노드의 데이터 송신 에너지 소비량( $E_{Tx}$ ), 수신 에너지 소비량( $E_{Rx}$ )을 다음 식과 같이 정의한다. 각 노드들의 초기 에너지는 0.5J/node, 전송 데이터 비트 수  $k=2000$ bit, 송수신 노드간의 거리  $d$ , 비트당 회로의 에너지 소비량  $E_{elec} = 50$ nJ/bit, 비트당 송신 앰프의 에너지 소비량  $\epsilon_{amp} = 100$ pJ/bit/m<sup>2</sup>를 뜻하며, 센서 노드가 데이터를 송수신 할 때마다 에너지 소비량을 계산한다.

본 논문에서 노드의 최소 전송거리를 50m이상으로 잡은 이유는 위의 두 식에 의하여 50m를 1 hop으로 연결했을 때와 2 hop으로 연결했을 때 각 노드에서 송수신 에너지가 비슷하게 소비되는 것을 계산을 통하여 알 수

있었다. 이는 에너지를 고려하여 효과적인 데이터 전송을 할 때 multi-hop 이 이루어질 조건은 데이터를 전송하려는 노드를 중심으로 반지름이 50m 인 원호 밖에 다음 노드가 위치해 있어야 한다는 것을 보여 준다 [2].

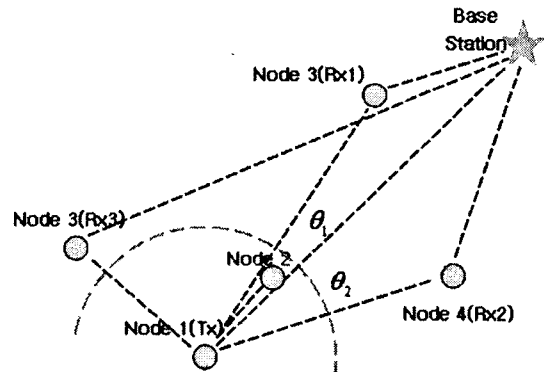
3. Topology Control Method

3.1 Direct method

가장 기본적인 형태의 네트워크 방식으로서 모든 노드가 다른 노드를 거치지 않고 직접적으로 BS로 패킷을 전달하는 형태를 가지며 어떠한 제어 방식이나 특정한 설비 없이도 무선 센서 노드만 있다면 가능한 구성 방식이다. 그러나 모든 노드에서 1 hop 전달하기 때문에 에너지 효율의 측면에서 평가 할 경우 비효율적이다. 노드간의 패킷 전송거리가 노드의 배터리 소비와 높은 관계를 가지는 무선 네트워크에서는 전송거리에 따라 신호의 세기를 조절할 수 있다 하더라도 효율 측면에서 매우 낮은 성능을 보이게 된다. 그러나 이 방식은 어떠한 알고리즘도 포함되지 않은 방식으로써 기준으로 잡고 본 논문에서는 이 방식에 기초하여 제안한 알고리즘의 성능의 효율을 측정하였다.

3.2 Energy-efficient Topology Control

본 논문에서는 노드 사이의 거리, 각도 그리고 잔류 에너지를 기반으로 다음 노드를 선택하는 방식을 제안한다. 불규칙한 형태를 갖는 네트워크에서 노드 사이에 이루는 각에 기초하여 다음 노드를 선택하는 방식이다. 현재 데이터를 보내고자 하는 노드(Tx)는, 우선 자신의 전송 반경 안에 있는 노드(Rx1, 2, 3)들을 위치 정보를 통해 인지한다. 그 다음 각 Tx-BS간 거리보다 Rx-BS 간 거리가 짧은 것을 만족하는 노드(Rx1,2)를 선별한다. 마지막으로 식 (3) 을 통해 Tx 노드가 Rx와 이루는 각 중 작은  $\theta$ 값을 가지면서 잔류에너지가 많은 노드를 선택 하게 된다. 만일 선택된 Rx가 없는 경우에는 BS로 직접 전달하는 방법을 택한다.



<그림 1> Energy-efficient Topology Control method

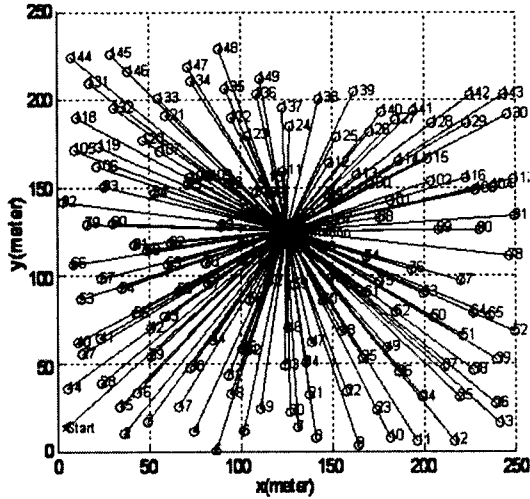
$\alpha$  와  $\beta$  는 사용자가 정하는 임의의 상수이고  $E_{rem}$ 은 잔류 에너지 수치이다. 식 (3)을 통해 계산된  $\delta$  값 중 가장 작은  $\delta$  값을 갖는 노드가 다음 노드로 선택되며 이 방법은 거리와 방향성 그리고 잔류 에너지 고려하여 효율적인 다음 노드를 찾는 방법이라고 할 수 있다. 노드의 위치 정보를 이용하여 적은 처리만으로 빠르게 multi-hop 노드를 선택 할 수 있는 장점이 있다.

$$\delta = \frac{\alpha}{\theta} + \beta * E_{rem} \quad (\alpha + \beta = 1) \quad (3)$$

4. Simulation

본 시뮬레이션은 몇 가지 네트워크의 시스템 상태를 가정하고 제안된 알고리즘을 Matlab으로 수행하였다 [3]. 각각의 노드는 서로의 위치정보는 알

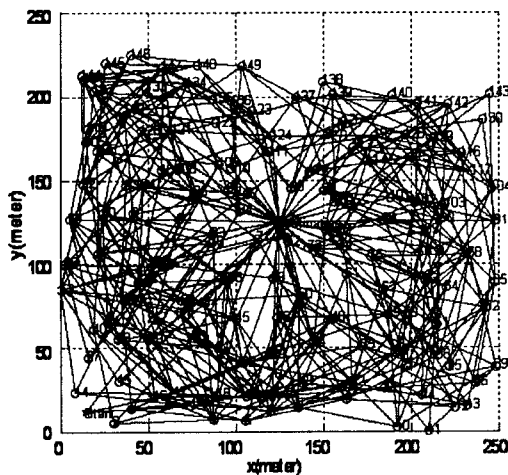
고 있고, 초기화 된 후에 이동성을 가지지 않는다. 최소 전송반경은 50m이며, 따라서 BS반경 50m 안의 노드는 BS로 직접 전달한다. 시뮬레이션에서 0.5J의 에너지를 가지는 150개의 노드는 250m X 250m 안에 불규칙적으로 뿌려지며 각 알고리즘에 수행 되었을 경우 FND(first node die)가 발생하는 시점을 알고리즘의 성능 평가 기준으로 정하였다. 그림 2는 Direct method 방식의 topology 구성 형태를 나타낸다. 보이는 바와 같이 출발 노드와 BS를 직접(1 hop) 연결하는 가장 간단한 알고리즘이지만, 전송 에너지가 전송거리의 제곱에 비례하는 에너지 모델을 고려할 때 멀리 떨어져 있는 노드가 상대적으로 많은 에너지를 사용하게 되고 확인한 결과 BS에서 가장 멀리 떨어져 있는 노드에서 가장 먼저 FND가 발생했다. 이 실험을 10회 수행하여 평균을 구한 결과 FND는 85 round에서 발생함을 확인 할 수 있었다.



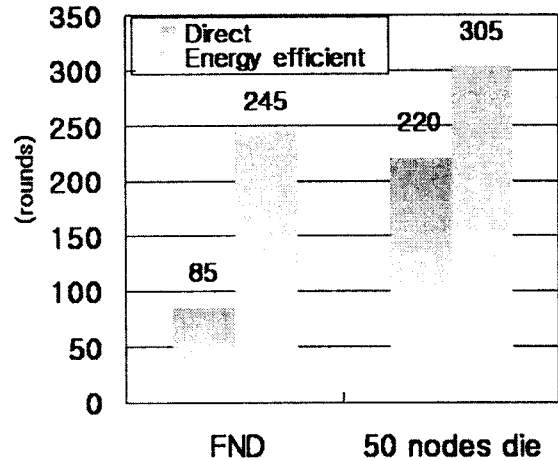
〈그림 2〉 Topology of Direct method

그림 3는 제안된 알고리즘으로 구성된 topology의 자취를 보여주고 있다. FND가 발생할 때까지의 모든 패킷의 전송 경로를 표시 하고 있어 매우 복잡해 보이지만 이를 통해 Tx노드가 선택하는 노드의 경우의 수가 다양해졌음을 확인할 수 있다. 이 알고리즘은 다음 노드의 위치와 다음노드의 방향성, 에너지의 잔량을 고려하여 더욱 능동적인 topology를 구성하게 되고 따라서 x와 y 좌표 50m ~ 200m의 사용 빈도가 높은 노드에 대해서는 매우 효율적인 토폴로지 구성방식이라고 할 수 있다. 만일 이에 부적합할 경우 직접 BS로 전달 함으로서 Black-hole effect를 개선하는 효과를 가져왔다. 수치적인 측면에서도 lifetime이 평균 245round로서 Direct method의 3배 효율로서 매우 향상된 결과를 보여주고 있다.

그림 4는 앞서 비교한 두 가지 알고리즘에 대한 FND와 전체 노드 중 50번째 노드가 꺼지는 시점을 비교한 결과이다. FND에서는 전체적으로 3배에 이르는 효율을 보이고 있지만, 50번째 노드가 꺼지는 시점에서는 전자만큼의 효율을 발휘하지는 못하였다. 그러나 전체 네트워크 시간을 절대적으로 오랜 시간동안 유지할 수 있다는 측면에서 매우 좋은 효율을 확인할 수 있다.



〈그림 3〉 Topology of Dynamic control method



〈그림 4〉 FND comparison with proposed algorithm

표 1은 두 가지 방법에서 각 노드들이 사용하는 에너지를 비교 분석한 표이다. Energy Reduction per Round는 처음 1 Round 만을 수행 하는데 사용된 에너지를 나타내며, 제안된 알고리즘이 더 적은 에너지를 사용 한다는 것을 확인할 수 있다. Total Energy Reduction은 FND가 발생할 때까지 사용한 에너지의 총 양을 의미하고 2배의 못 미치는 효율을 확인할 수 있다. Total Energy Reduction per Round는 FND가 발생할 때 까지 노드 당 사용한 에너지의 양으로서 2배에 못 미치는 효율을 확인할 수 있다. 이처럼 에너지의 효율은 2배에 못 미치는 효율을 보이지만 FND는 3배 이상의 효과를 보임을 앞의 표에서 확인하였다. 이는 본 알고리즘을 적용함으로써 적은 에너지를 사용 할뿐만 아니라 노드 에너지의 사용에 있어서도 각 노드의 균등한 사용이 매우 중요함을 확인시켜주는 결과이다.

〈표 1〉 Performance results

	Energy Reduction per Round	FND	Total Energy Reduction	Total Energy Reduction per round
Direct	0.0040 J	86 Round	0.1730 J	0.0020 J
Energy Efficient	0.0013 J	251 Round	0.3064 J	0.0012 J

### 5. Conclusion and future works

센서네트워크에서 시스템의 성능은 전체 네트워크를 구성하는 디바이스들이 얼마나 오랫동안 제 기능을 발휘 할 수 있는냐에 초점이 모아진다. 그리고 효율적인 에너지 관리를 통해 에너지의 제약이 있는 센서 네트워크에서는 얼마나 더 효율적으로 활용하여 네트워크 lifetime을 연장 시키느냐가 연구의 목적 이라고 할 수 있다. 이를 위해 우리는 그 해결책이 네트워크상의 모든 노드들이 균등한 에너지를 사용 하는 데에 목표를 두고 연구를 수행하였다. 그리고 우리는 앞에서 보인 바와 같이 목표에 부합되는 결과를 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

나아가 본 연구의 향상된 결과를 만들기 위한 제어방식으로 연구에서 더욱 향상된 효율을 만들어내기 위해 Fuzzy 이론을 도입해보고자 한다 [4]-[5]. 또한 센서 네트워크의 구축에 본 알고리즘을 적용하여 실제 효율에 대한 확인을 하고자 한다.

### [참고 문헌]

- [1] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks". In Proc. Of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences(HICSS), Maui, HI, Jan. 2000.
- [2] Jamal N. Al-karaki, Ahmed E. Kamal. "Routing Techniques In Wireless Sensor Networks : A Survey," In Proc. IEEE Wireless Communications, December 2004.
- [3] D. Hanselman, B. Littlefield. "Mastering MATLAB7," Prentice Hall, 2005.
- [4] Jang, J.S. and Sun,C., "Neuro-Fuzzy Modeling and Control," Proc. Of IEEE, Vol. 83, No. 3, 378-406, 1995.
- [5] Jang, J.S., Sun, C., and Mizutani, E., "Neuro Fuzzy and Soft Computing," Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997