

무선 센서 네트워크 기반 국경 감시를 위한 계층적 멀티 홉 클러스터링 기법

김재영*, 김현철*, 윤재근*, 안순신*
*고려대학교 전기전자전파공학과
e-mail : jykim@dsys.korea.ac.kr

Hierarchical Multi-Hop Clustering Scheme for WSN-Based Border Surveillance

Jae-Yeong Kim*, Hyun-Chul Kim**, Jae-Geun Yoon***, Sun-Shin An*
*School of Electrical Engineering, Korea University

요 약

국경 지역을 실시간 모니터링하고, 효율적인 데이터 전달을 위해서는 센서 노드의 에너지 소모를 줄임으로써 전체 네트워크의 수명을 연장시킬 필요가 있다. 그에 따라, 본 논문에서는 네트워크를 클러스터링 기반으로 한 다수의 영역으로 분할하고 각각의 영역 내 특정 노드에 헤드의 역할을 부여하여 라우팅을 수행하는 계층적 클러스터 센서 네트워크를 제안한다. 제안하는 기법에서는 클러스터 헤드에서의 데이터 모음을 통한 통신 메시지 수를 줄임으로써 센서 노드들의 에너지 소모를 최소화시키고, 긴 국경 라인을 커버할 수 있는 충분한 클러스터 확장이 가능하다. 또한 링크의 상태 및 노드의 밀집도를 고려하여 적응적으로 링크의 품질을 측정하는 알고리즘을 제시하여 링크 변화에 대한 빠른 탐색을 통해 네트워크를 관리하는 방안을 제시한다.

1. 서론

무선 센서 네트워크에서 각 센서 노드들은 특정 지역 및 광범위한 지역에 설치되어 물리적인 환경의 정보를 수집하는 기능을 수행한다. 이러한 무선 센서 네트워크는 대상 감시, 침입 탐지 및 위치 추적 등과 같은 군사적인 목적뿐만 아니라 생태계나 환경 등의 모니터링을 통한 다양한 응용 서비스를 제공한다. 그러나 무선 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드들은 제한된 무선 통신 대역폭, 낮은 데이터 처리율, 작은 배터리 용량 등에 따른 제약을 가지고 있으며, 특히 배터리가 고갈되면 충전하거나 교체하기 어렵기 때문에 에너지 효율성과 네트워크 수명의 관점에서 에너지 소비를 줄이기 위한 방안은 매우 중요하다.

본 논문에서는 센서 노드들을 이용한 국경 지역을 감시함에 있어서 긴 국경 라인을 커버하고 네트워크 관리를 효율적으로 지원할 수 있는 계층적 클러스터링 기법을 제시한다. 2 장에서는 관련 연구에 대한 분석, 3 장에서는 클러스터 형성과 라우팅 수행 과정, 4 장에서는 네트워크 관리 방안, 5 장에서는 제안하는 기법의 성능을 보이고, 마지막으로 6 장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

무선 센서 네트워크에서의 라우팅 기법은 크게 평면 라우팅 프로토콜(flat routing protocol)과 계층적 라

우팅 프로토콜(hierarchical routing protocol)로 나눌 수 있다. 평면 라우팅 프로토콜 중 요구 기반(on-demand) 방식을 적용할 경우, 많은 노드들이 경로를 찾기 위한 경로 요청 메시지들로 인해 에너지가 소비되고 지연이 발생한다. 또한 테이블 기반(table-driven) 방식에서는 센서 노드의 메모리 용량상 수 많은 라우팅 테이블을 관리, 유지하는 것이 어렵다.

반면 클러스터 기반의 계층적 라우팅(Cluster-based Hierarchical routing)은 로컬 클러스터 내 헤드가 데이터 모음을 수행하여 싱크 노드로 전달함으로써 보다 에너지 효율적인 라우팅을 가능하게 하고, 요청된 질의에 대하여 클러스터 헤드에 의한 전달로 비효율적인 질의의 플러딩을 막을 수 있다.

클러스터 기반 계층적 라우팅 프로토콜의 대표적인 것으로 LEACH[1], APTEEN[2]과 같은 프로토콜이 존재한다. 이러한 기존 프로토콜에서 센서 필드 내의 원거리 통신은 센서 노드의 최대 전송 범위로 한정되고, 클러스터 헤드로의 전송 에너지 소비 증가, 낮은 클러스터의 확장성 등은 고려해야 할 부분이다.

3. 클러스터 센서 네트워크

국경 지역의 센서 노드는 그 특성상 고장 또는 기후 변화에 민감하며, 국경 지역의 침입이 발생하였을 때나 토폴로지 변화에 대하여 즉각적인 모니터링 및 제어가 가능해야 한다. 또한 배터리로 동작되는 센서 노드의 특성상 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 최적

의 토폴로지 구성이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 점을 고려하여, 네트워크를 클러스터링 기반으로 한 다수의 영역으로 분할하고 각각의 영역 내 특정 노드에 헤드의 역할을 부여하여 라우팅을 수행하는 계층적 클러스터 센서 네트워크를 제안한다.

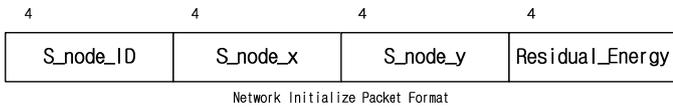
3.1. 클러스터 형성 과정

초기 클러스터를 형성하기 위해 각 센서 노드들은 그림 1과 같이 자신의 센서 노드 ID, 센서 노드 위치 정보, 잔존 에너지량을 담은 초기화 메시지를 자신의 1-홉 통신 반경 내 모든 이웃 노드들에게 브로드캐스팅 한다. 메시지를 수신한 모든 노드들은 자신의 1-홉 반경 내 이웃 노드들의 위치 정보를 확인할 수 있다. 이러한 정보는 초기 클러스터를 형성하기 위한 기반 정보로 활용된다. 센서 노드는 이웃 노드들로부터 초기화 메시지를 수신하면, Neighbor_Node_List에 수신한 모든 이웃 노드의 ID를 저장한다.

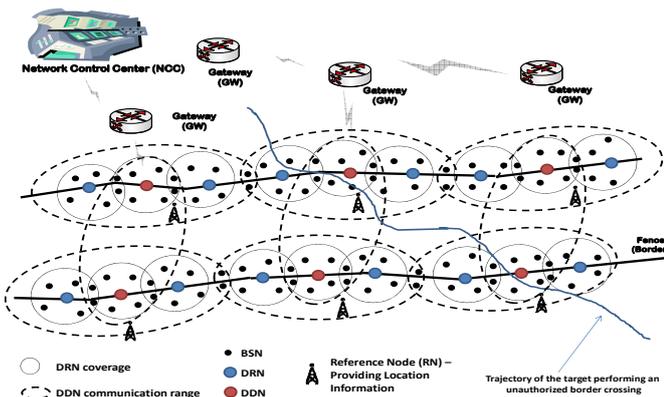
임의로 배치된 노드들은 초기 클러스터 생성 시, 국경 라인에 임의의 좌표를 고정된 간격으로 선정하고 해당 좌표를 기준으로 가장 가까운 노드를 초기 클러스터 헤드로 선정한다.

그림 2 와 같이 제시한 아키텍처에서 DRN(Data Relay Node), DDN(Data Dissemination Node)인 클러스터 헤드는 자신이 저장하고 있는 Neighbor_Node_List를 검색하여 반경 내 자신의 1-홉 BSN(Basic Sensor Node)에게 클러스터 참여 요청 메시지>Hello)를 보낸다.

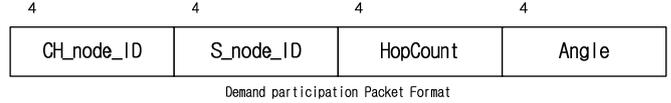
그림 3 은 클러스터 참여 요청 메시지의 구조를 나타낸다. 이 메시지에는 클러스터 헤드 ID, 센서 노드 ID, 홉 수, 각도 범위와 같은 정보를 포함하고 있다. 메시지를 받은 BSN 은 클러스터 헤드로 연결 요구(CON_REQ) 메시지를 전송하고, 메시지를 받은 클러스터 헤드는 Node ID(NID) 번호가 포함된 연결 응답(CON_RES) 메시지로 응답한다. 이 NID 는 클러스터



(그림 1) 네트워크 초기화 메시지 구조



(그림 2) 경계 감시망 아키텍처



(그림 3) 클러스터 멤버 참여 요청 데이터 구조

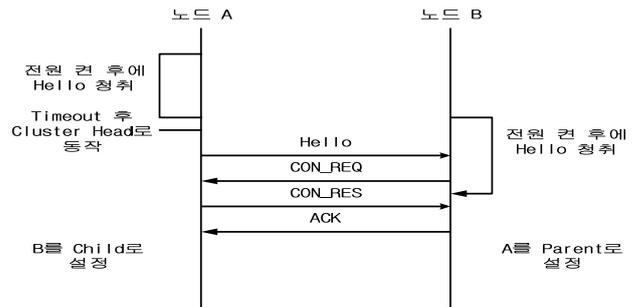
내에서 유일하며, 클러스터 헤드가 NID를 할당하는 역할을 담당한다. BSN은 ACK 메시지로 응답하여 링크 연결을 완료한다. 응답 메시지를 받은 클러스터 헤드는 Member_Node_List에 응답 메시지를 보낸 노드의 ID를 저장한다. 이후에 각자의 Neighbor_Node_List에 서로를 Parent와 Child로 설정하고, 새롭게 추가된 노드는 클러스터 헤드를 Parent로 설정한다. 이러한 클러스터 형성 과정을 통해 클러스터 헤드는 멤버 노드들로부터 메시지를 수신한다.

그림 4는 클러스터 헤더 선택 및 노드를 추가하는 과정을 나타낸다.

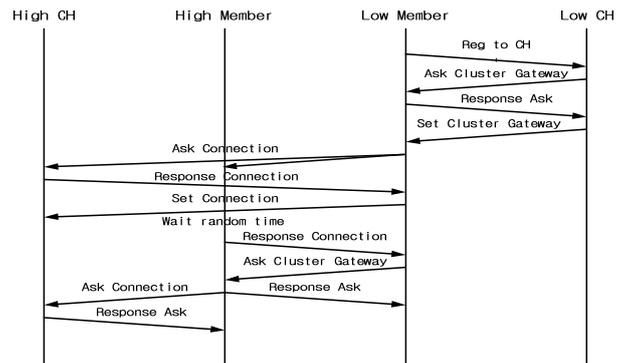
클러스터는 각 노드들이 다중 연결을 지원하면 멀티 홉 구조로 확장할 수 있다. 본 아키텍처에서 자가 구성된 클러스터는 Designated Device(DD)인 DDN, 즉 Super Node에 의해서 서로 연결된다. DDN은 다른 노드들보다 우수한 전송 범위, 전원 능력 등을 보유한 특별한 노드로서, 클러스터 헤드 DRN과 링크 설정을 시도한다. 그림 5는 클러스터 간 링크 설정 과정을 보여준다.

3.2. 계층적 멀티 홉 라우팅

클러스터 기반의 계층적 구조는 확장성이 용이하고, 라우팅 프로토콜이 단순하다는 점에서 장점을 지닌다. 즉, 로컬 클러스터를 형성함으로써 인접한 지역에서



(그림 4) 클러스터 헤더 선택 및 노드 추가



(그림 5) 클러스터 간 링크 설정 과정

발생한 사건에 대한 유사한 정보를 클러스터 헤드로 전송하고 클러스터 헤드가 데이터 모음을 수행하여 보다 에너지 효율적인 라우팅을 가능하게 한다.

제시한 아키텍처에서 BSN은 DRN의 요청된 질의를 받아 응답하며 침입, 생태, 환경 등의 다양한 센싱 정보를 수집하여 데이터를 DRN에게 1-홉으로 전송한다. DRN은 수신된 데이터를 모아 가장 가까운 DDN에게 전송한다. 이때, 릴레이 노드로 링크 품질이 좋은 BSN을 선택한다. DDN은 무선 통신을 통해 상위 레벨 DDN에게 전송, DDN은 GW(Gateway)로 데이터를 전달한다. GW는 데이터 처리 및 연동을 통해 최종 NCC(Network Control Center)로 전송한다.

4. 네트워크 관리 방안

국경 감시의 특성상 고장으로 인하여 커버하지 못하는 영역이 생겨서는 안되며 이를 위하여 고장난 노드에 대한 빠른 탐색이 필요하다. 또한 노드 고장으로부터 무선 링크를 회복하는 일이 중요하다. 이러한 장애를 확인하기 위하여 비컨 패킷을 기반으로 하는 기존의 주기적인 링크 품질 측정은 신뢰성과 에너지 측면에서 비효율적이다.

이에 본 논문에서는 클러스터 센서 네트워크에서 링크의 상태 및 노드의 밀집도를 고려하여 적응적으로 링크의 품질을 측정하는 알고리즘을 제시하고 클러스터에 문제가 발생했을 시, 클러스터 재구축 방법에 대해 논의한다.

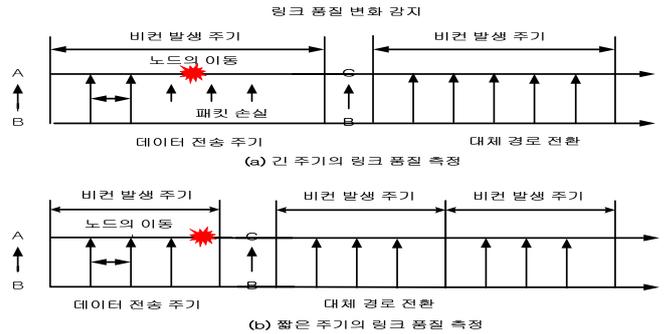
4.1. 적응적인 무선 링크 품질 측정

무선 링크의 품질은 환경적인 요인에 따라 불규칙하게 변화하는 특성을 갖고, 이러한 변화는 상위 계층 프로토콜의 성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 링크 품질의 변화를 민감하게 측정할 수 있어야 하며, 이는 경로 설정 시 고려해야 할 부분이다. 재전송을 포함한 양방향의 전체 패킷의 전송 횟수를 나타내는 ETX(Expected Transmission Number)[3]는 브로드캐스트 방식의 주기적인 비컨 메시지를 이용해 링크 품질을 측정한다. 이러한 동적인 네트워크의 특성상 비컨 메시지의 주기를 조절하여 링크 품질을 측정하고, 품질이 높은 경로를 설정한다면 네트워크의 신뢰성 및 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다.

제안하는 기법은 무선 링크의 품질이 불안정할 때, 민감하게 대응하기 위하여 비컨의 주기를 짧게 하고 링크 품질이 안정적일 때, 비컨의 주기를 길게 하여 패킷 손실과 에너지 소모를 줄인다[4]. 그림 6은 주기적인 비컨 메시지로 링크의 품질을 측정할 때의 패킷 손실을 보여준다.

토폴로지 변화에 따른 밀집도가 높은 네트워크에서 링크의 품질을 측정할 때 비컨의 수는 증가하기 때문에 에너지 소모, 트래픽 등이 많아지게 된다. 따라서 밀집도를 고려한 알고리즘을 추가적으로 제안한다.

링크 품질의 변화가 생겼을 때, 민감하게 품질을 측정하기 위해 비컨 주기의 최소값과 최대값을 설정



(그림 6) 비컨 기반의 주기적인 품질 측정

한다. 새로운 노드가 추가되거나 주변 환경의 영향으로 링크 품질의 변화가 일어났을 때, 링크 품질을 측정하는 비컨 주기를 초기화하고 설정한 최소 비컨 주기를 통해 패킷 손실이나 지연을 방지한다. 그 후 초기 설정된 이웃 노드의 수를 기준으로 밀집도를 판별한다. 밀집도가 높은 네트워크에서 빈번한 링크 품질 측정은 많은 오버헤드를 초래하기 때문에 주기를 최소값에서 최대값까지 지속적으로 증가시킨다. 반대로 밀집도가 낮은 네트워크에서는 주기를 가산적으로 증가시켜 링크 품질 변화에 빠른 적응을 하도록 한다 [5]. 그림 7은 링크 상태와 밀집도를 고려한 적응적인 링크 품질 측정 알고리즘을 나타낸다.

4.2. 클러스터 재구축

클러스터 헤드는 데이터 수집과 수집된 데이터를 모으고, 싱크 노드로 전송하는 역할을 동시에 수행하기 때문에 다른 센서 노드들에 비하여 에너지가 상대적으로 빠르게 소모된다. 만약 클러스터 헤드가 에너지를 모두 소모하거나 고장이 발생하여 통신이 불가능한 경우에는 멤버들이 이를 빠르게 감지하여 이웃하는 클러스터의 멤버가 되거나 새로운 클러스터 헤드를 선출하게 된다. 클러스터 헤드 선출 과정은 앞선 클러스터 생성 과정을 반복하여 수행한다.

```

Program
  Global Bcurrent, Ncurrent
  Set the number of neighbor_nodes Nnum
  Set the beacon interval Bmax, Bmin

  while
    if (new node || data packet loss)
      beacon timer reset
      beacon interval = Bmin
    else
      beacon interval = Bcurrent
      if (Ncurrent > Nnum)
        increase multiplicatively the Bcurrent
        if (Bmin ≤ Bcurrent)
          Bcurrent = Bmax
      else
        increase additively the Bcurrent
        if (Bmin ≤ Bcurrent)
          Bcurrent = Bmax
      endif
    endif
  endwhile
End Program
    
```

(그림 7) 링크 상태와 밀집도를 고려한 적응적인 링크 품질 측정 알고리즘

5. 성능 평가

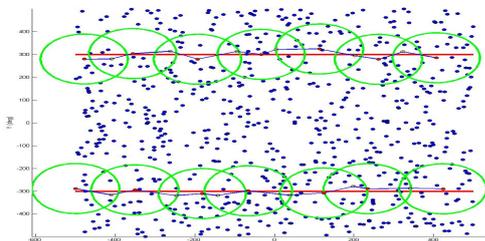
성능 평가를 위해 그림 8과 같이 시뮬레이션을 실시하였으며, 동작 모습은 다음과 같다.

100m의 최대 전송 거리를 가지고 있는 700개의 센서 노드들은 1000m x 1000m 내 임의로 배치되었다고 가정한다. 클러스터 헤드 선출 방식은 앞선 설명과 동일하다.

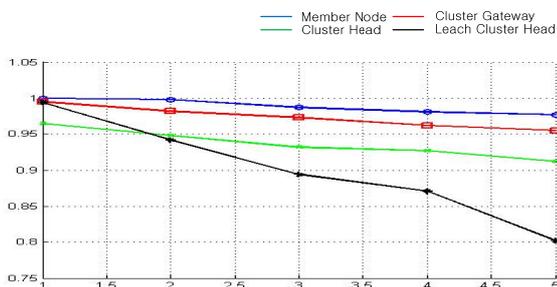
그림 9의 결과를 살펴보면, 클러스터 헤드는 최초 클러스터 형성을 위해 에너지를 많이 소모하였고, 비교를 위한 LEACH 프로토콜의 클러스터 헤드는 균등하게 분포되지 않고 모은 데이터를 BS(Base Station)에 직접 전송하기 때문에 에너지 소모가 더 크다.

네트워크 밀집도를 고려한 적응적인 링크 품질 측정의 성능을 평가하기 위해 그림 10, 그림 11 과 같이 100m x 100m, 150m x 150m의 영역에서 싱크 노드를 포함한 30 개의 노드를 배치하였다. 그림 12 는 밀집도에 따른 비컨의 증가 방법을 달리 했을 때의 패킷 수신율을 보여주고 있다.

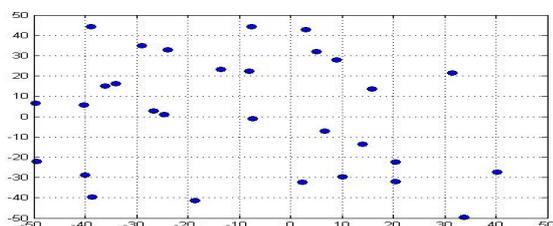
비컨의 주기를 가산적으로 증가시켰을 때, 비컨의 발생 횟수는 많아지기 때문에 밀집도에 크게 상관없이 높은 패킷 수신율을 얻는다. 반면, 비컨의 주기를 지수적으로 증가시켰을 때 밀집도가 낮은 경우에는 높은 경우에 비해 대체 경로가 비교적 적게 존재하기 때문에 적은 수의 비컨에 낮은 패킷 수신율을 보인다.



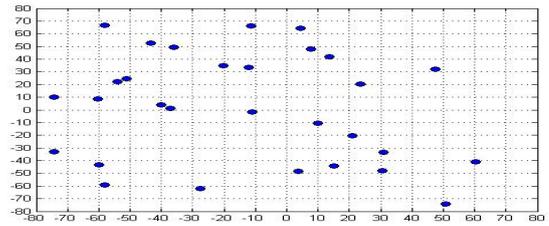
(그림 8) 시뮬레이션 동작 모습



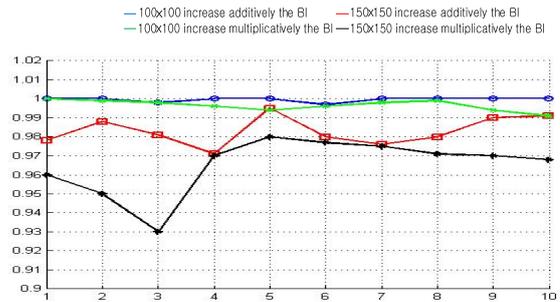
(그림 9) 각 노드별 에너지 소모



(그림 10) 100m x 100m (high density)



(그림 11) 150m x 150m (Low density)



(그림 12) 알고리즘을 고려한 패킷 수신율

6. 결론

본 논문에서는 국경 감시를 위한 환경에서 국경 지역을 실시간 모니터링하고 효율적인 데이터 모음을 위해, 계층적 멀티 홉 클러스터링 기법을 제시하고 네트워크를 관리할 수 있는 방안에 대해 살펴보았다.

클러스터 네트워크는 헤드에서의 데이터 모음을 통한 통신 메시지 수를 줄임으로써 노드의 에너지를 절약할 수 있었고, 링크의 품질을 기반으로 한 경로를 설정함에 있어서 적응적인 측정은 신뢰성과 에너지 효율을 향상시켰다.

앞으로의 연구 방향은 클러스터 네트워크를 최적화 하는 방안과 헤드에서의 급격한 에너지 소모에 대한 방안이 모색되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proc. Of the Hawaii International Conference on System Sciences, PP.3005-3014, 2000.
- [2] Arati Manje shwar e t al., "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks," IEEE Proc. Of the International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'02), April, 2002, pp.195-202.
- [3] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket and R.Morris, "A High-Throughput Path Metric for Multihop Wireless Routing," MOBICOM 2003, pp. 134-146, Oct. 2003.
- [4] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, S. Kim, P. Levis, and A. Woo. TEP 123: "The Collection Tree Protocol," Aug. 2006.
- [5] P. Levis, N. Patel, D. Culler, and S. Shenker. "Trickle: A self-regulating algorithm for code maintenance and propagation in wireless sensor networks." In Proc. of the USENIX NSDI Conf., San Francisco, CA, Mar. 2004.