

무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 그라디언트 기반 라우팅 기법

윤성로^o 김중권
서울대학교 컴퓨터공학부
{sryoon^o, ckim}@popeye.snu.ac.kr

Energy-Efficient Gradient Based Routing in Wireless Sensor Network

Sungro Yoon^o, Chongkwon Kim
School of Computer Science and Engineering, Seoul National University

요 약

무선 센서 네트워크의 센서 노드들은 한번 배치되면 다시 회수되지 않으며, 외부 전원의 공급 없이 배터리만을 사용하여 작동하게 된다. 따라서 각 센서 노드는 매우 제한된 자원을 사용하여 환경을 감지하거나 주변 노드들과 통신을 해야 한다. 결국 무선 센서 네트워크에서 가장 중요한 요소는 센서 노드가 소모하는 에너지를 최대한 절약하여 네트워크의 수명을 늘리는 것이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 에너지 효율적인 그라디언트 기반의 라우팅 기법을 제안한다. 이 기법은 패킷 발생 및 전달 횟수를 새로운 메트릭으로 사용하여 주변 노드의 에너지 사용량을 추정한다. 이를 통하여 에너지 소모가 특정 노드에게 집중되지 않도록 기존의 그라디언트 라우팅을 개선하였으며, 패킷 듣기(Packet Overhearing) 방식을 통하여 별도로 메시지를 주고받는 일 없이 메트릭을 측정할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

최근 몇 년간 무선 센서 네트워크에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 무선 센서 네트워크는 환경을 감지하고 무선으로 데이터를 전달할 수 있는 많은 노드들로 이루어져 있으며 과학 연구, 군사 보안 및 스마트 홈 등 많은 분야에 응용이 가능하여 부가가치가 높은 핵심 기술로 주목받고 있다.

무선 센서 네트워크는 주로 광범위한 지역에 수많은 센서노드들을 배치함으로써 이루어지는데, 이렇게 한번 배치된 센서 노드들은 회수되거나 외부의 전원을 공급 받는 일 없이 배터리 수명이 다할 때까지 작동하게 된다. 그렇기 때문에 센서 노드는 작고, 가볍고, 비싸지 않아야 한다는 제약을 가진다. 이에 센서 노드는 매우 제한된 자원을 사용하여 작동하게 되며 센서 노드가 소모하는 에너지를 최대한 절약하여 네트워크의 수명을 늘리는 것이 무선 센서 네트워크 연구의 가장 중요한 과제 중 하나라고 할 수 있다.

한편, 무선 센서 네트워크가 광범위한 지역에 걸쳐 구성되는데 반해 센서 노드는 에너지의 제약으로 인하여 전송 범위가 비교적 짧은 편이다. 때문에 센서 노드 사이의 통신에는 멀티 홉(multi-hop) 라우팅 프로토콜이

사용된다. 각 센서 노드가 라우터의 역할을 수행하여 데이터를 주고 받으며 목적지까지 전달하는 것이다. 특히 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜은 각 노드가 소비하는 에너지가 크지 않도록 할 뿐 아니라 특정 노드에 에너지 사용이 집중되지 않도록 하는 것을 목적으로 한다. 특정 노드에 에너지 사용이 집중될 경우 네트워크의 연결성(Connectivity)가 깨어지는 경우가 발생할 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 에너지 효율적인 그라디언트 기반의 라우팅 기법을 소개한다. 이 라우팅 기법은 최적에 가까운 라우팅 경로를 보장하는 동시에, 에너지 사용량을 효율적으로 분배하여 특정 노드가 다른 노드보다 빨리 에너지가 고갈되지 않도록 한다. 이 라우팅 기법은 기본적으로 그라디언트(Gradient, [2])를 사용하며, 추가적으로 본 논문에서 제시하는 새로운 메트릭과 이웃 노드의 에너지 상태 정보를 수집하는 기법을 사용하게 된다. 패킷 전송 횟수에 기반한 메트릭을 사용함으로써 에너지 사용량에 대한 정확한 파악이 가능하게 되고, 이와 더불어 주변 노드의 에너지 상태 정보를 별도의 메시지 교환 없이 파악할 수 있다는 것이 이 라우팅 기법이 갖는 장점이라고 할 수 있다.

2장에서는 본 논문과 관련된 연구들을 살펴보고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 라우팅 기법을 소개하며, 4장에서 결론을 제시하도록 한다.

2. 관련 연구

Directed Diffusion[1]은 무선 센서 네트워크에서 가장 많이 사용되는 프로토콜 중 하나이다. 이 프로토콜은 쿼리 기반의 프로토콜로서 BS가 특정 노드 또는 지역을 향하여 Interest 패킷을 브로드캐스팅하면 패킷이 Flooding 되면서 목적지로 중계된다. 이때 Interest 패킷을 받은 노드는 패킷을 보낸 노드를 향하여 그라디언트를 설정하며, 대상 노드는 그라디언트를 향하여 데이터를 유니캐스트하게 된다. Directed Diffusion 프로토콜은 구현이 간단하면서도 데이터가 Optimal한 최적의 경로를 따라 이동한다는 장점이 있으며 여러 가지의 경로 강화(Reinforcement) 방법을 제시하여 경로가 단절되거나 새로운 노드가 추가되었을 경우에도 처리할 수 있게 해준다. 그러나 이 방법의 단점은 노드가 소비하는 에너지를 고려하지 않음으로 인하여 주요 길목에 있는 특정 경로의 노드들의 에너지가 다른 노드보다 빨리 고갈되는 경우가 발생할 수 있다는 점이다. 주요 길목(Hot Spot)에 위치한 노드들의 에너지가 빨리 고갈되면 멀티 홉으로 데이터를 전송하는 무선 센서 네트워크의 특성상 네트워크의 연결성(Connectivity)이 깨어지게 되고 나머지 노드들도 제 기능을 다 하지 못하게 된다.

Gradient-Based Routing[2]은 Directed Diffusion 프로토콜의 변형으로 BS가 Interest 패킷을 브로드캐스팅할 때, 패킷이 홉 수(Hop Count)를 기억하도록 하는 것이 주요 아이디어이다. 각 노드는 BS까지의 최소 홉 수를 자신의 높이(Height)로 설정하며, BS까지의 최소 높이를 가진 이웃 노드를 파악하여 최적의 경로로 라우팅을 할 수 있게 된다. 그런데 [2]에서는 노드와 이웃 노드 사이의 홉 수의 차이를 그라디언트로 설정하여, 그라디언트가 최대인 이웃 노드에게 패킷을 보내도록 한다고 기술하고 있으나 본 논문의 3.3장에서 설명하듯 홉 수의 차이가 1이 아닌 경우는 발생하지 않기 때문에 그라디언트 값 자체는 큰 의미를 갖지 않는다고 볼 수 있다.

[2]에서는 그라디언트가 같은 이웃 노드가 여러 개 있을 때 경로를 결정하는 기법들을 제시하고 있으며 통계적(Stochastic) 기법, 에너지 기반(Energy-Based) 기법, 스트림 기반(Stream-Based) 기법이 그것들이다. 이 중, 에너지 기반 기법이 노드들의 에너지 소모를 고려하고 있으며, 노드의 에너지 레벨이 일정 한계값(Threshold)

이하로 떨어지면 자신의 높이를 증가시켜 자신에게 패킷이 라우팅되지 않도록 하는 방법이다. 그러나 이 경우에 노드의 에너지가 완전히 고갈되지 않을 뿐, 네트워크의 연결성은 깨어지기 때문에 효과적인 기법이라고 할 수 없다.

Energy Aware Routing[3]은 이 문제의 근본적인 해결을 시도한다. 즉, 노드의 남은 에너지를 라우팅 경로 결정의 주요 메트릭으로 이용함으로써 특정 노드에 에너지 사용이 집중되지 않도록 하는 것이다. 이 라우팅 기법은 하나의 노드가 이웃 노드를 통하여 패킷을 전송할 때, 이웃 노드의 에너지 레벨에 비례하는 확률로 경로를 결정하도록 한다. 이렇게 하면 특정 노드의 에너지 레벨이 떨어질 수록, 이 노드로 패킷이 라우팅될 확률도 적어지므로 노드들 사이의 에너지 레벨이 균등하게 분포될 수 있다.

그러나 이 프로토콜의 단점은 우선 메트릭을 정확하게 구할 수 없다는 점에 있다. 이 논문에서는 각 노드의 라우팅 메트릭을 $C_{ij} = e_{ij}^{\alpha} R_i^{\beta}$ (e_{ij}^{α} :노드 i 가 j 로 패킷을 전송하는데 사용하는 에너지, R_i^{β} :노드 i 의 남은 에너지)의 식으로 표현하고 있는데, 패킷 전송 에너지가 모두 동일하다고 해도 남은 에너지는 구하기가 쉽지 않다. 노드의 내부 전압을 에너지 레벨 측정의 근거로 사용할 수 있겠으나 이 역시 온도나 습도등 외부 환경의 영향을 받으면 바뀔 수 있다.

또한 [3]에서는 측정된 에너지 레벨을 주변 노드에게 알리기 위하여 Localized Flooding을 이용하는데 이 때문에 별도의 메시지 오버헤드 및 에너지 소모를 야기할 수 있다.

3. 프로토콜

본 논문에서 제시하는 라우팅 프로토콜은 하나의 BS(Base Station)가 데이터 싱크(Data Sink)의 역할을 담당하는 토폴로지 상황을 가정한다. 또한 무선 센서 네트워크는 비교적 노드의 밀도가 높은(Dense) 네트워크이므로 노드 사이의 무선 링크가 대칭적이라고(Symmetric) 가정한다.

프로토콜은 크게 그라디언트 설정과 데이터 통신의 두 단계로 나뉘는데, 그라디언트 설정 단계에서는 각 노드가 BS로 향하는 다음 노드에 대한 정보를 수집한다. 데이터 통신 단계에서는 각 노드가 통신을 수행하면서 이웃 노드의 에너지 상태에 대한 정보를 수집하여 동적으로 라우팅 경로를 결정한다.

기본적으로, 본 논문에서 제시하는 프로토콜은 센서 네트워크가 구성된 이후 노드의 이동성이 없는 경우를 가정하지만 [1]에서 제시하는 Reinforcement 기법이나 AODV[4], DSR[5] 등의 프로토콜에서 제시하는 Route Maintenance 기법을 적용하면 통하여 이웃 노드가 없어 지거나 새로 생긴 경우에 대해 처리할 수 있다.

3.1 그라디언트 설정

그라디언트 설정 단계는 [2]와 유사하다. 이 단계는 무선 센서 네트워크가 구성된 후 초기에 단 한번만 수행되며 BS가 네트워크에 Hello 메시지를 브로드캐스팅 하는 것으로 시작한다. 이 Hello 메시지를 받은 노드들은 자신에게 메시지를 보낸 노드에 대하여 그라디언트를 설정한 다음, 메시지를 연속적으로 중계하여 다른 노드에게 브로드캐스팅하게 된다.

Hello 메시지는 홉 수(Hop Count)를 나타내는 필드가 있어서 이 메시지를 받은 노드는 몇 홉을 거쳐 BS까지 도달할 수 있는지 알 수 있다. 메시지를 받은 노드는 홉 수에 1을 더하여 필드에 다시 기록하고 브로드캐스팅하게 된다. 한편, 한 노드가 BS까지 패킷을 보내기 위해 거쳐야 하는 최소 홉 수를 높이(Height)라고 하며 자신의 높이와 이웃 노드의 높이의 차이가 이웃 노드에 대한 그라디언트가 된다.

하나의 노드는 각기 다른 이웃 노드들로부터 Hello 메시지를 받을 수 있기 때문에 여러 개의 그라디언트를 설정할 수 있으며, 이 그라디언트들을 테이블의 형태로 저장하여 관리하게 된다(그림 2). [2]와 다른 점은 그라디언트 테이블에 추가된 메트릭으로, 기존의 그라디언트 테이블에 '패킷 생성/중계 비용'(Packet Generation and Relay Cost)이 추가되었다. 이 값은 이웃 노드가 패킷을 발생시키거나 중계하는데 얼마나 많은 에너지를 사용했는지를 나타내는 정보로서, 데이터 통신 단계에서 라우팅 경로 결정을 하는데 사용한다.

3.2 데이터 통신

데이터 통신 단계는 다시 이웃 노드의 에너지 상태 정보를 수집하는 단계와 노드가 그라디언트 테이블에서 이웃 노드를 찾아 데이터를 전송하는 단계로 나뉜다.

에너지 상태 정보 수집 단계 : 모든 노드는 패킷 생성/중계 비용을 4바이트 자료구조로 가진다. 이 자료구조는 노드가 이웃에게 패킷을 전송하는데 사용한 에너지를 의

미하며, 자신이 발생시킨 패킷과 자신이 중계한 이웃 노드의 패킷을 모두 포함한다. 노드는 패킷을 전송할 때 패킷 헤더의 필드에 이 4바이트 데이터 값을 항상 기록한다.

각 노드는 Promiscuous 모드로 동작을 하며, 이웃 노드가 전송한 패킷을 캡처하여 패킷 헤더를 확인한다. 만약 그라디언트 테이블에 포함된 이웃 노드가 보낸 패킷이라면 패킷 헤더에 포함된 생성/중계 비용 값을 그라디언트 테이블에 업데이트하게 된다. 이를 통하여 별도의 메시지 오버헤드나 에너지의 소모 없이 이웃 노드들의 에너지 상태를 점검할 수 있다.

그림 1에서 점선은 그라디언트를, 실선은 패킷 전송을 의미한다. 노드 A는 노드 B에 대한 그라디언트를 설정하였기 때문에, 노드 B가 C에게 패킷을 전송할 때 그 패킷을 엿듣고 노드 B의 패킷 생성/중계 비용을 그라디언트 테이블에 업데이트 한다.

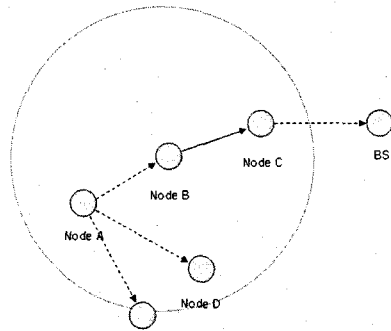


그림 1

데이터 전송 단계 : 에너지 상태 정보 수집 단계에서 수집한 이웃 노드들의 에너지 상태 정보를 바탕으로 메트릭을 계산하여 라우팅 경로를 결정한다. 여기서 결정한 라우팅 경로를 통해 데이터 패킷을 전송하게 된다.

3.3 라우팅 경로 결정 및 메트릭

본 논문에서는 기존의 그라디언트에 추가하여 패킷 생성/중계 비용을 새로운 메트릭으로 사용한다. 모든 노드의 전송 범위(Transmission Range)가 동일하다고 가정하였을 때 노드가 소비하는 패킷 생성/중계 비용은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = g + \alpha \cdot r \quad (1)$$

여기서 C 는 패킷 생성/중계 비용, g 는 노드 자신이 발생시킨 패킷 개수, r 은 노드가 중계한 패킷 개수이며 이 때 g 와 r 은 MAC 레벨의 재전송 횟수를 포함한다. 패킷을 수신할 때도 에너지를 소비하기 때문에 r 에 가중치인 $\alpha(1 < \alpha \leq 2)$ 를 곱하도록 하였다.

$$G = self.H - neighbor.H \quad (2)$$

한편, 그라디언트를 (2)와 같이 나타낸다고 했을 때 (H =노드의 높이), 노드는 자신의 높이(Height)보다 크거나 같은 홉 수를 가지는 Hello 패킷은 무시하게 되므로 그라디언트 값은 항상 1로서 동일하다. [2]에서는 별다른 가정 없이 그라디언트를 계산하여 사용하였으나, 그럴 경우 결국 자신의 높이보다 높은 높이를 갖는 이웃 노드가 포함되게 되며, 이때의 그라디언트는 0보다 작은 음수 값이 된다. 결국 최대 그라디언트 값은 1이 되어 1이 아닌 그라디언트 값은 의미가 없어진다.

node id	cost
B	231
D	409

그림 2

따라서 본 논문에서는 한 노드가 설정하는 주변 노드의 그라디언트 값은 1로서 동일하다고 보았다. 이처럼 1의 그라디언트 값을 갖는 이웃 노드가 여러 개 존재할 때 그 중에서 패킷 생성/중계 비용이 가장 작은 노드에게 패킷을 전달하도록 하면 에너지 사용량을 여러 노드에 공평하게 분배할 수 있다. 이 메트릭은 기존의 메트릭보다 좀 더 객관적이고 명확한 라우팅 근거를 제시해주며 측정하는데 어려움이 없기 때문에 유용하게 사용할 수 있다.

5. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 에너지 효율적인 그라디언트 기반의 라우팅 기법을 제안하였다. 이 라우팅 기법은 그라디언트 기반의 라우팅을 사용하여 최적에 가까운 경로를 선택하며, 또한 패킷 전송/중계 횟수에 기반한 라우팅 메트릭을 사용하여 이웃 노드의 정확한 에너지 사용량을 추정할 수 있도록 해준다. 이 메트릭을 사용하여 특정 노드에 에너지 소모가 집중되지 않도록 라우팅 경로를 결정하며 따라서 에너지 사용량이 여러 노드에 걸쳐 고르게 분배될 수 있도록 해준다.

각 노드는 자신이 발생시키거나 중계하는 모든 패킷의 헤더에 자신의 패킷 전송/중계 비용 값을 기록하여 보내

도록 한다. 이웃 노드가 Promiscuous 모드를 취하여 패킷을 Overhear함으로써 별도의 메시지 교환 없이 이웃 노드의 에너지 상태를 추정할 수 있다.

참고 문헌

- [1] C. Intanagonwivat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," Proceedings of ACM MobiCom '00, Boston, MA, 2000, pp. 56-67.
- [2] C. Schurgers and M.B. Srivastava, "Energy efficient routing in wireless sensor networks", in the MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean, VA, 2001.
- [3] R. C. Shah and J. Rabaey, "Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 17-21, 2002, Orlando, FL.
- [4] Charles E. Perkins, Elizabeth M. Belding-Royer, and Samir R. Das, "Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-12.txt, November 2002.
- [5] David B. Johnson, David A. Maltz, Yih-Chun Hu, and Jorjeta G. Jetcheva, "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)," February 2002.