

무선 센서 네트워크에서의 에너지 인지 라우팅 프로토콜

남용섭, 정하경, 권태경, 최양희
서울대학교
{ysnam, hkjung, tk, yhchoi}@mmlab.snu.ac.kr

An Energy-Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

Yongsub Nam, Hakyung Jung, Taekyoung Kwon and Yanghee Choi
School of Computer Science and Engineering
Seoul National University, Seoul, Korea

요약

무선 센서 네트워크 (Wireless sensor network)는 유비쿼터스 네트워크의 핵심 기술로 다양한 응용 분야를 가지고 있다. 무선 센서 네트워크는 특성상 한정된 에너지를 효율적으로 사용하는 것이 MAC 프로토콜이나 라우팅 프로토콜 설계의 초점이 되어왔으며 많은 관련 연구들이 진행되고 있다. 그러나, 현재까지 제안된 대부분의 연구들은 개개의 센서 노드의 측면에서 에너지 효율을 다루기 때문에 전체 네트워크의 측면에서는 좋지 않은 성능을 보일 수 있다. 따라서, 전체 네트워크의 존속 시간을 최대화하기 위해서는 전체 네트워크 측면에서의 프로토콜 설계가 필요하다. 본 논문에서는 각 센서 노드들의 잔류 에너지를 고려하여 네트워크의 존속 시간을 최대화하는 라우팅 프로토콜을 제시한다. 라우팅 경로의 설정 시 경로 상의 각 노드의 평균 잔류 에너지가 가장 높은 경로를 선택함으로써 네트워크 존속 시간과 딜레이의 측면 모두에서 성능 향상을 모색한다. 시뮬레이션을 통한 성능 평가 결과는 제안된 라우팅 프로토콜의 우수성을 입증한다.

I. 서론

무선 센서 네트워크 (Wireless sensor network)는 RFID와 더불어 최근 부상하는 유비쿼터스 네트워크의 핵심 기술로, 환경 감시나 목표물 추적, 고속도로 교통 정보 관리, 건물 감시 등의 다양한 잠재적인 응용 분야를 가지고 있다. 무선 센서 네트워크는 센서 모듈과 네트워크 모듈을 갖는 센서 노드들로 이루어지며 많은 수의 센서 노드들이 목표 지역에 배치되어 유기적으로 동작하는 하나의 네트워크를 형성한다. 각 센서 노드들은 센싱을 통한 정보의 수집, 처리 그리고 전송을 수행하며, 중간에 위치한 노드들은 받은 메시지를 재전송하는 router로서의 역할을 겸한다. 일반적인 경우 센서 노드들은 접근이 어려운 지역에 설치되기 때문에 배터리의 교체나 충전이 어렵다. 따라서, 한정된 에너지로 얼마나 오랫동안 네트워크를 유지하는가가 센서 네트워크의 주된 관심사이다. 현재까지 에너지를 고려하는 많은 MAC 프로토콜과 라우팅 프로토콜이 제안되어 왔으나 대부분의 경우 노드 하나의 입장에서 에너지 효율을 고려하며 네트워크 전체의 관점은 간과하고 있다. 그러나, 센서 네트워크는 센서 노드들의 협력 시스템이기 때문에, MAC 프로토콜과 라우팅 프로토콜의 설계 시에 개개의 센서 노드보다 네트워크 전체의 입장을 고려하는 것이 중요하다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2 장에서는 기존 연구에 대해 언급하고 문제점을 분석하며, 3 장에서는 에너지를 고려하는 라우팅 프로토콜을 제시한다. 4 장과 5 장에서는 제안된 프로토콜의 정성적, 정량적 성능 평가를 제시하고, 마지막으로 6 장에서 본 논문을 마무리 짓는다.

II. 문제 분석

무선 센서 네트워크의 감시 용도의 응용에서는 directed diffusion [3]과 같은 라우팅 프로토콜들이 제안되고 있다. Directed diffusion은 sink 노드가 핵심이 되어 메시지 전송을 관리하며, 또한 특정 용도의 네트워크에 맞게 설계되었기 때문에 다양한 응용 분야에 적용되기 힘들다. 즉, 센서 노드 자체가 actuator의 기능을 가지고 동작하는 경우, 센서 노드들 간의 통신을 통한 자료 수집의 경우, 센서 망을 통한 인터넷 사용의 경우 등의 응용에서는 노드들 간의 unicast 형태의 통신 역시 필요하다.

이러한 응용을 위한 라우팅 프로토콜은 아직 제안된 바가 없으며, AODV [2], DSR [4], DSDV [5] 등의 무선 애드 혹 망을 위한 라우팅 프로토콜을 차용한다. 이들 routing protocol 들은 라우팅 경로를 결정하는데, 기본적으로 홵 (hop) 수가 가장 작은 경로를 택한다. 무선 애드 혹 망에서는 무선 노드들이 이동성을 가지고 있으며, 애드 혹 망 자체가 하나의 시스템이 아닌 개별 노드들 자신만을 위한 망이기 때문에 이러한 경로 탐색은 적합한 선택이다.

그러나, 무선 센서 망은 하나 혹은 몇 개의 노드만을 위한 망이 아니라, 노드들이 유기적으로 결합되어 하나의 공동 목표를 가지고 동작하는 협력 시스템 (collaborative system)이다. 또한, 대부분의 센서 네트워크 응용에서 센서 노드들의 이동성은 무시되거나 거의 없다고 가정한다. 따라서, 무선 센서 망을 위한 별도의 라우팅 프로토콜이 필요하다. 센서 네트워크를 위한 라우팅 프로토콜의 설계 시 고려해야 할 점은 다음과 같다.

* 에너지 제약

- * 유기적인 네트워크 시스템
- * 네트워크 존속 시간

이들 조건을 모두 만족시키기 위하여 가장 이상적인 프로토콜은 트래픽이 모든 노드들에게 골고루 분배되어 모든 노드들이 동시에 에너지를 소모하는 시스템이다. 따라서, 홉 수뿐만 아니라 각 센서 노드들의 에너지 잔량을 고려하는 라우팅 프로토콜이 필요하다. 만약, 센서 노드들의 에너지 잔량을 고려하지 않는다면 네트워크 분할 (Network partitioning)이나 센싱 홀 (Sensing hole)과 같은 문제가 발생하기 쉽다. 네트워크 분리된 네트워크 내에 많은 센서 노드들이 배치되어 있다 하더라도 중간 일부 노드들이 에너지를 모두 소모하거나 소실되어 메시지 전송이 발생하지 않게 되는 현상을 말하며, 센싱 홀은 특정 지역의 노드들이 에너지를 모두 소모하여 해당 지역을 센싱할 수 있는 노드들이 없게 되는 현상을 말한다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 모든 노드들이 고르게 에너지를 소모하는 것이 중요하다.

III. 제안 프로토콜

제안하는 라우팅 프로토콜은 AODV 에 기초를 둔다. 따라서, 초기에 라우팅 경로를 탐색하는 경우, 소스 노드에서 RREQ 메시지를 브로드캐스트 (broadcast) 하고 이 메시지는 여러 노드를 경유하여 목적 노드에 도달하며, 이를 받은 목적 노드는 RREP 메시지를 전송한다. 이때, 목적 노드는 일정 시간의 타이머를 두고 가장 먼저 받은 RREQ 메시지보다 더 짧은 hop 수를 갖는 경로를 소유한 RREQ 메시지가 오는 경우 RREP 에 이를 답아 소스에 보낸다. 이 과정에서 중간 노드들은 RREQ 메시지를 릴레이 하는 경우, 해당 RREQ 를 받은 링크의 정보를 기록한다. 이 링크는 이후에 받은 RREP 메시지를 소스 노드에게 전송하기 위한 리버스 패스 (reverse path)를 기록하기 위한 용도로 사용된다.

제안하는 프로토콜은 이를 변형하여, RREQ 메시지에 해당 메시지가 전송되는 경로에 있는 모든 노드들의 에너지 잔량과 hop 수를 저장하며 전송한다. 즉, 하나의 노드를 거쳐 전송될 때마다 해당 노드의 잔류 에너지량과 hop 수를 RREQ 메시지의 각 필드에 각각 더해준다. 각 중간 노드에서는 RREQ 메시지를 받을 때마다 자신이 이전에 전송한 RREQ 메시지와 해당 메시지에서 아래의 계산을 수행한다. 즉, 해당 노드까지 도달한 RREQ 메시지의 평균 잔류 에너지량을 계산한다. 그리고, 라우팅 경로 결정 시에 이 값이 가장 작은 경로로부터 RREQ 메시지를 다음 노드들에게 전송하게 된다. 즉, 라우팅 경로 선택 시 사용하는 식은 아래와 같다. 이 식을 통해 구해진 ae 값이 가장 작은 경로가 최종적으로 선택되는 경로가 된다.

$$ae = \frac{\text{경로 상의 모든 노드의 에너지 잔량}}{\text{경로 상의 노드의 수}}$$

이러한 방법을 통해 에너지 잔량과 홉수를 모두 고려하여 라우팅 경로를 결정한다. 라우팅 경로가 결정되면 목적 노드에서 RREP 메시지를 소스 노드에게 전송하여 경로의 생성을 알린다. 이때, RREP 메시지는

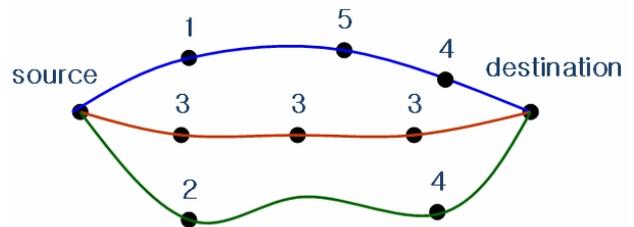
미리 설정된 Reverse path 를 따라 소스 노드에 전달된다. 센서 네트워크의 특성 상 유선 네트워크와 달리 한번 생성된 라우팅 경로가 오래 지속되지 않으므로 주기적으로 라우팅 경로를 업데이트하여 채널 및 네트워크 토폴로지의 상황 변화를 반영한다.

IV. 성능 분석

제안한 라우팅 프로토콜의 성능을 분석하기 위해 아래 그림과 같은 토폴로지를 가정한다. 이 그림에서 소스 노드와 목적 노드 사이에 총 3 가지의 라우팅 경로가 형성될 수 있는데, 이는 각각 다른 라우팅 경로 선택 방식을 채택한 경우를 나타낸다. 3 가지 라우팅 경로 설정 방식은 각각 다음과 같다: i) 가장 작은 홉 (hop) 수를 갖는 경로 선택, ii) 잔류 에너지의 최소값이 가장 큰 경로 선택, iii) 평균 잔류 에너지의 값이 가장 작은 경로 선택.

i)의 방식은 가장 짧은 경로를 택하는 방식으로 대부분의 유선 네트워크나 AODV 등의 무선 애드 hoc 네트워크에서 채택하고 있는 방식이며 에너지를 고려하지 않는 방식이다. ii)의 방식은 에너지의 최소값이 가장 작은 경로를 택함으로써 네트워크의 존속 시간을 연장하기 위해 고려한 방식이나 홉 수가 고려되지 않음으로써 메시지가 우회하거나 혹은 loop 이 형성되는 문제점이 있다. iii)의 방식은 이들의 절충안으로 에너지 잔량과 홉수를 모두 고려하는 방식이다. 이 방식을 통해 중간 노드들의 에너지를 균등하게 활용하여 라우팅 패스를 결정할 수 있는 장점이 있으며, 홉수의 측면에서도 비교적 짧은 경로를 택하는 장점이 있다.

아래 그림에서 가장 위의 라우팅 경로는 총 3 개의 중간 노드를 거쳐 목적 노드에 도달하며, 이때 평균 잔류 에너지량은 $(1+5+4)/3 = 3.3$ 이 되고 최소 잔류 에너지는 1 이 되어 위에서 소개한 iii)의 방식에서 선택되는 경로이다. 가운데의 라우팅 경로 역시 3 홉을 거치나 평균 잔류 에너지량과 최소 잔류 에너지가 모두 3 이 된다. 따라서, 위에서 소개한 ii)의 방식에서 선택되는 경로이다. 맨 아래의 라우팅 경로는 2 홉을 거치며 평균 잔류 에너지량은 $(2+4)/2 = 3$ 이 되고 최소 잔류 에너지는 2 가 되어, 위에서 소개한 i)의 방식에서 선택되는 경로이다.



[그림 1] 라우팅 경로 형성 예

위의 방식들 중, i)의 방식은 가장 짧은 경로를 택함으로써, 종단간 딜레이의 측면에서는 다른 두 방식에 비해 이득을 얻을 수 있으나, 센서 네트워크의 특성 상 딜레이는 성능 평가에 있어 크게 중요한 요소가 아니다. 즉, delay 와 throughput 이라는 기존 네트워크의 metric 대신에 네트워크의 존속 시간 (network

lifetime)이 더욱 중요한 metric 으로 작용한다. 따라서, i)의 방식을 사용하는 경우, 가장 짧은 경로 상에 위치한 센서 노드들의 에너지가 경로에 참여하지 않는 다른 노드들에 비해 더욱 빨리 소모된다. 이는 네트워크 분할이나 센싱 홀이 발생하는 시간을 앞당기게 되어 결과적으로 네트워크 내에 많은 노드들이 충분히 많은 잔류 에너지를 가지고 있다 하더라도 더 이상 지역 센싱을 못하거나 센싱 메시지의 전송을 못하는 현상을 야기하게 된다. 반면, ii)의 방식은 i)의 방식에 비해 네트워크 전체의 에너지량을 고려하나, 홉수를 고려하지 않아 메시지가 크게 우회하여 전송되는 단점이 있다. 즉, 경로 내에서 가장 잔류 에너지가 작게 남은 노드의 에너지가 가장 큰 경로만을 택하므로 같은 노드를 갖는 여러 경로가 생성되며 이들 중 멀리 우회하여 전송되는 경로가 선택될 가능성이 크다. 네트워크 존속 시간의 측면에서 이점이 있으나 전체 네트워크 캐패시티 측면이나 딜레이의 측면에 있어서 큰 손해를 입게 된다. iii)의 방식은 이 두 방식의 장점을 조합한 방식으로 네트워크 존속 시간의 측면에서도 큰 이점이 있으며 메시지가 우회하기는 하나 홉수를 고려하므로 sub-optimal 한 경로를 유지하게 된다. 따라서, 존속 시간과 딜레이에 있어서 고르게 좋은 성능을 보인다. 즉, 최단 hop 수를 갖는 optimal 경로 근방의 노드들이 고르게 전송에 참여한다. 뿐만 아니라 메시지가 멀리 우회하지 않으므로 네트워크 캐패시티의 측면에 있어서도 장점을 갖는다.

V. 성능 평가

A. 실험 환경

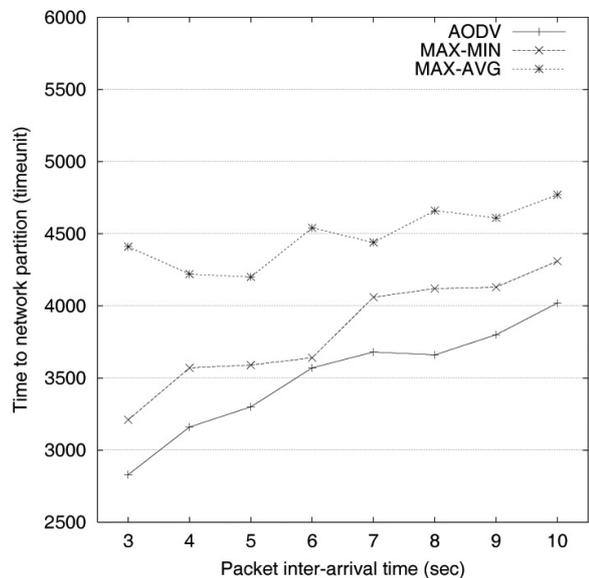
성능 평가를 위해 네트워크 시뮬레이터인 NS-2 를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 네트워크 배치는 5 x 5 의 grid 형태의 네트워크이며, 격자 사이의 간격은 100 m 로 하였다. 노드의 전송 거리는 150 m 로 하여 각 노드는 자신 주위에 최대 8 개의 이웃 노드를 갖게 하였다. MAC 프로토콜로는 S-MAC [1]을 사용하였으며, 이는 센서 네트워크에서 널리 사용되는 MAC 프로토콜이다. S-MAC 의 duty cycle 은 30%로 설정하였다. 사용한 트래픽은 UDP 와 CBR 을 사용하였으며, 패킷의 inter-arrival time 에 따른 네트워크 존속 시간과 종단간 딜레이를 측정하였다. 사용한 라우팅 프로토콜은 앞서 소개한 3 가지 프로토콜이며, 각각 AODV, MAX-MN, MAX-AVG 라 이름 붙였다.

B. 실험 결과

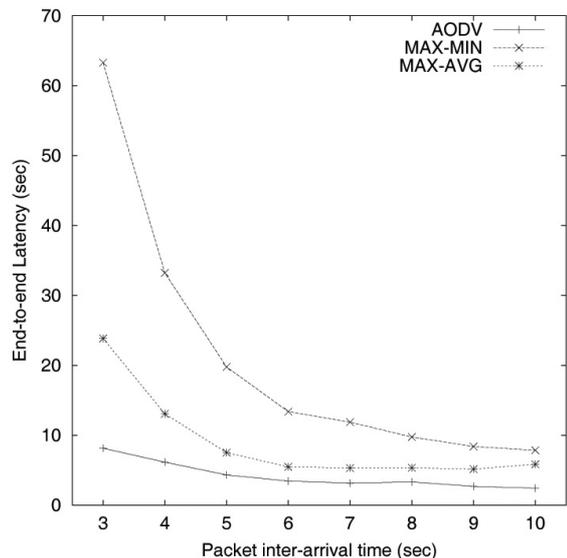
그림 2 는 패킷의 inter-arrival time 에 따른 네트워크 분할까지의 시간을 도시한다. 네트워크 분할까지의 시간은 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 우선, 전체 네트워크를 그래프로 인식하였다. 즉, 각 노드가 그래프의 vertex 가 되고, 두 노드가 전송 가능한 거리에 있으면 edge 가 있는 것으로 판단하였다. 이때, 해당 link 는 symmetric link 로 인식하였다. 그리고, 두 노드가 전송 가능한 거리를 벗어나 배치되어 있으면 두 노드 사이에 edge 가 없는 것으로 판단하였다. Edge 에 걸리는 weight 은 모두 1 로 두었다. 전체 네트워크를 이러한 방식으로 인식한 후, 매 초마다 잔류 에너지를

가진 모든 노드에서 다른 노드로 가는 패스가 있는지 확인하였다. 이때, all-pair shortest path 알고리즘인 Floyd-Warshall [6] 방식을 사용하여 네트워크 분할이 발생하였는지를 확인하였다. 즉, 깨어 있는 두 노드 사이에 갈 수 있는 경로가 없는 경우 네트워크 파티션이 발생했음을 판단하였다.

그림 2 에서 보면, MAX-AVG 프로토콜에서 가장 성능이 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 네트워크 파티션이 발생하는 시간이 가장 긴 것을 확인할 수 있다. 다시 말하면, MAX-AVG 의 경우가 가장 긴 네트워크 존속 시간을 보인다. 그 다음으로 MAX-MN 프로토콜과 AODV 의 순으로 네트워크 분할 시간이 분포하며, AODV 가 가장 짧은 홉을 metric 으로 삼기 때문에 가장 먼저 네트워크 분할이 발생함을 알 수 있다. MAX-MN 의 경우 중간 정도의 성능을 보이며, 이는 다소 비효율적이기는 하지만 잔류 에너지를 고려하기 때문으로 분석된다.



[그림 2] 라우팅 프로토콜에 따른 네트워크 분할 시간 비교



[그림 3] 라우팅 프로토콜에 따른 딜레이 비교

그림 3 은 라우팅 프로토콜에 따른 중단간 딜레이를 도시한 그래프이다. 패킷의 *inter-arrival* 시간을 3 초에서 10 초까지로 변화시키며 측정하였으며, AODV 에서 가장 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉, AODV 가 최저 홉수에 따라 라우팅 경로를 결정하기 때문에 중단 간 딜레이가 가장 적은 것으로 분석할 수 있다. MAX-AVG 가 그 다음 성능을 보이는데, 패킷의 *inter-arrival* 시간이 5 초를 넘어서면 AODV 와 거의 유사한 딜레이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 MAX-AVG 가 잔류 에너지 외에 홉수 또한 고려하기 때문으로 판단된다. MAX-MN 의 경우, 가장 좋지 않은 성능을 보이는데, 이는 잔류 에너지 만을 고려하기 때문에 우회 경로를 택하기 때문으로 판단할 수 있다. 또한, 앞의 그림 2 에서 AODV 와 MAX-MN 의 네트워크 분할 시간이 다소 유사했던 것을 비교해 보면, MAX-MN 이 네트워크 캐패시티 측면에서 낭비를 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 2 와 그림 3 을 종합하여 보면, MAX-AVG 가 딜레이에 있어서도 최적점에 근사한 성능을 보이면서 네트워크 존속 시간에 있어서는 다른 두 프로토콜 보다 훨씬 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 반면, AODV 는 딜레이에 있어서는 우수한 성능을 보이거나 네트워크 존속 시간에 있어서는 상당히 좋지 않은 성능을 보였다. 또한, MAX-MN 의 경우는 두 경우 모두에 있어 가장 좋지 않은 성능을 보였다.

VI. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문은 무선 센서 네트워크에 있어서 에너지와 홉수를 고려한 라우팅 프로토콜을 소개하였다. 무선 센서 네트워크는 네트워크의 전체 목적을 위해 센서 노드들이 유기적으로 작용하는 협력 시스템이므로 에너지 효율을 고려함에 있어서도 개개의 노드의 측면이 아닌 전체 네트워크의 측면에서의 접근이 중요하다. 본 연구는 이러한 센서 네트워크의 특성을 충분히 활용하여 설계하였으며, 시뮬레이션을 통한 성능 평가 결과는 본 연구에서 제시한 라우팅 프로토콜의 우수성을 증명하였다. 이후의 연구는 MAC 프로토콜과 상위 애플리케이션과의 크로스-레이어 (cross-layer)의 접근 방법을 포함할 것이다.

VII. 참고문헌

- [1] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transaction on Networking*, Vol. 12, N. 3, JUNE 2004.
- [2] Charles E. Perkins and Elizabeth M Royer. "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing." In Proc of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, New Orleans, LA, February 1999, pp. 90-100.
- [3] Chalermek Intanagonwivat, Ramesh Govindan and Deborah Estrin, "Directed diffusion: A scalable

and robust communication paradigm for sensor networks," In Proc. of Mobicom '00, August 2000, Boston, Massachusetts.

[4] David B. Johnson, David A. Maltz, and Josh Broch, "DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks," in *Ad Hoc Networking*, edited by Charles E. Perkins, Chapter 5, pp. 139-172, Addison-Wesley, 2001.

[5] Charles Perkins and Pravin Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," *ACM Sigcomm* 94.

[6] R. W Floyd, "Algorithm 97: Shortest Path," *Communications of the ACM* Vol. 5, No. 6, June 1962, p. 345.