

베이스 노드의 이동성이 큰 센서 네트워크에서 트리 기반 라우팅을 위한 다목적 유전자 알고리즘

강승호*, 김기영**, 표세준**, 강일우**, 이성로**, 정민아***

*목포대학교 정보산업연구소

목포대학교 전자공학과, *목포대학교 컴퓨터공학과

e-mail:kinston@gmail.com

A Multi-objective Genetic Algorithm for Tree-based Routing in WSN Having High Mobile Base Node

Seung-Ho Kang*, Ki-Young Kim**, Il-Woo Kang**, Re-Jun Pyo**

Seong-Ro Lee**, Min-A Jung***

*Institute for Information Science and Engineering Research

**Dept of Electronics Engineering, Mokpo National University

***Dept of Computer Engineering, Mokpo National University

요 약

무선 센서 & 액터 네트워크(WSAN)와 같이 다수의 베이스 노드가 존재하거나 베이스 노드의 이동성이 큰 센서 네트워크에서 최소 Wiener 수 신장 트리(MWST) 기반 라우팅 방법은 최소 신장 트리(MST) 기반 라우팅 방법에 비해 패킷 전송 거리가 짧고 전력 소모가 적다. 하지만 주어진 그래프로부터 최소 Wiener 수 신장 트리를 찾는 문제는 NP-hard 문제이고 최소 신장 트리에 비해 네트워크 수명이 짧은 단점이 있다. 본 논문은 이러한 문제를 해결하고자 Wiener 수 적응도, 네트워크 수명 적응도, 차수 적응도 등을 동시에 고려한 다목적 유전자 알고리즘을 설계하고 네트워크 전체 전력 소모를 크게 증가시키지 않으면서도 네트워크의 수명을 Wiener 수 적응도만을 사용했을 때 보다 연장시킴을 실험을 통해 보인다.

1. 서론

저전력 디지털 통합(low-power digital integration) 기술과 MEMS (Micro-Electro-Mechanica System) 기술의 비약적인 발전은 마이크로 센서 네트워크를 가능하게 하였다[1][3][10]. 네트워크를 구성하는 작은 센서들은 빛, 소리, 온도, 이미지, 압력, 진동 등의 다양한 형태의 정보들을 감지하는 기능뿐만 아니라 감지된 정보들을 특정 목적에 맞게 처리하는 컴퓨팅 기능과 처리된 정보를 베이스 노드까지 전송하는 기능도 가지고 있다. 이러한 센서들 덕분에 센서 네트워크는 국방 영역을 비롯해 환경 감시, 재해 예방, 의료 보건 분야 및 조선, 해양 영역 등 다양한 곳에서 여러 가지 목적으로 사용되고 있다[1][3][5].

기존의 센서네트워크에 대한 연구들은 대부분 베이스 노드가 고정되어있다는 가정을 전제로 프로토콜이나 알고리즘이 개발되어왔다. 하지만 이러한 가정이 모든 사례에 타당한 것은 아니다. 특히 센서 & 액터 네트워크(WSANs)[2]처럼 베이스 노드의 이동성이 큰 센서 네트워크 환경에서 에너지 효율성과 네트워크의 수명을 보장하는 프로토콜이나 알고리즘의 개발에 대한 요구가 커지고 있다.

고정된 베이스 노드를 가정한 센서 네트워크를 위해 에너지의 효율성을 높이며 네트워크의 수명을 연장하기 위한 다양한 연구들이 있어왔다. 특히 클러스터나 신장 트리를 기반으로 한 여러 프로토콜[9][10][11]이 다수 제시 되었다. 트리를 네트워크 토폴로지로 사용하는 이유는 센서 간 전송 경로가 유일하므로 라우팅이 단순하고 다중 경로로 인한 패킷 재순서화가 필요

하지 않으며 전송 시마다 경로를 설정해야할 필요도 없고 비슷한 정보를 통합하여 정보량에 효율성을 기하는 데이터 집적(aggregation)의 사용이 가능하기 때문이다.

본 논문은 베이스 노드의 이동성이 높은 네트워크 환경에 적합한 트리 기반 라우팅 알고리즘을 제시한다. 최소 Wiener 수를 가진 신장트리(MWST)는 베이스 노드의 이동성이 높다 하더라도 베이스 노드의 이동시 마다 트리를 다시 형성하지 않아도 데이터의 이동 거리가 다른 트리에 비해서 상대적으로 짧아 전송에 따르는 에너지 소모가 적다. 하지만 MWST 기반 라우팅 방법은 센서의 활용에 크게 의존하는 경향이 있어 전체적인 에너지 효율성을 높이고 짧은 패킷 이동 거리를 보장함에도 불구하고 네트워크의 수명을 단축시키는 단점을 가지고 있다[13]. 제안하는 라우팅 알고리즘은 MWST의 장점을 살리면서 동시에 네트워크의 수명을 늘이기 위해 트리의 차수를 제한하고 특정 센서의 활용도를 제한하는 요소를 고려하였다. 그리고 이러한 상충되는 목적들을 최적화하는 신장 트리 기반의 네트워크를 형성하기 위해 다목적 유전자 알고리즘[8]을 설계하였다.

2. 네트워크 모델과 문제 정의

네트워크의 에너지 소비 모델은 [7]의 것을 따른다. 표 1은 에너지 소비 모델의 파라미터 값들을 나타낸다. 센서들의 초기 에너지는 10J을 가정하였고 전송되는 모든 패킷의 크기는 1000bit를 가정하였다. k bit의 패킷을 d 미터 떨어져있는 다른 센서에 송신하는데 드는 전력 소모량 $E_{Tx}(k,d)$ 은 식 (1)에 의해

계산한다.

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

그리고 k bit의 패킷을 수신하는데 드는 전력 소모량 $E_{Rx}(k)$ 은 식 (2)에 의해 계산한다.

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

<표 1> 에너지 소비 모델 파라미터.

Transmitter electronics (E_{Tx})	50nJ/bit
Receiver electronics (E_{Rx})	50nJ/bit
Transmitter amplifier (ϵ_{amp})	100pJ/bit/m ²
Initial sensor energy	10J
Packet size	1000bit

따라서 d 미터 떨어진 연속한 두 정점 간 k bit 크기의 패킷 전송에 소모되는 전력량은 식 (1) + 식 (2)임을 알 수 있다.

Wiener 수(Wiener index 혹은 Wiener number)란 주어진 그래프 $G=(V(G), E(G))$ 의 모든 정점 간 거리의 합을 가리킨다. 그래프 내의 임의의 두 정점 $u, v \in V(G)$ 간 거리 $d_G(u,v)$ 는 두 정점 사이의 최단 거리로 정의하며 그래프의 Wiener 수 $\sigma(G)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma(G) = \frac{1}{2} \sum_{u \in V(G)} \sum_{v \in V(G)} d_G(u, v) \quad (3)$$

그리고 주어진 그래프로부터 MWST를 구하는 문제는 NP-hard 임이 알려져 있다[6].

베이스 노드의 이동성이 높거나 다 수의 베이스 노드가 연합하여 특정 작업을 처리하는 경우에는 모든 센서들이 베이스 노드와 한 홉 거리에서 직접 데이터를 전송하는 역할을 맡을 수 있다. 따라서 모든 정점을 데이터가 최종적으로 모이는 베이스 노드로 생각해도 무리가 없다. 따라서 1 라운드 패킷 전송을 다음과 같이 정의한다.

정의 1. 라운드 패킷 전송

1라운드 패킷 전송이란 모든 센서에 대해 다른 모든 센서가 동일한 크기의 패킷을 전송하는 것을 말한다 즉, 1 라운드 패킷 전송에서 각 센서는 다른 모든 센서로부터 하나씩의 패킷을 전송 받고 자신도 다른 모든 센서들에 하나씩의 패킷을 전송하게 된다.

네트워크 내에 패킷 충돌에 따른 재전송이나 overhearding 등은 없다고 가정한다. 그리고 일반적으로 네트워크의 에너지 효율성을 네트워크의 수명의 의미로 사용하나 본 논문에서는 에너지 효율성과 네트워크 수명을 다음과 같이 다르게 정의한다. 동일한 데이터양을 전송하는데 소모되는 네트워크 전체의 에너지양도 중요한 요소라고 보기 때문이다

정의 2. 라운드 에너지 소모량

라운드 에너지 소모량이란 1라운드 패킷 전송을 실행하는데 소비되는 전체 네트워크 에너지양을 말한다.

정의 3. 네트워크 수명

네트워크의 수명이란 패킷 전송 과정에서 최초로 전력이 모두 소모되는 센서가 발생 할 때까지의 라운드 수를 말한다.

3. 다목적 유전자 알고리즘

네트워크 전체적인 에너지 효율성을 높이고 긴 네트워크의 수명을 보장하는 상충관계에 있는 두 가지 목적을 모두 만족시키는 트리 토폴로지의 생성을 위해 파레토 최적점을 찾는 다목적 (multi-objective) 유전자 알고리즘을 설계한다. 파레토 최적점이란 어느 한 가지 목적의 달성도를 낮추지 않고는 다른 목적의 달성도를 높이지 못하는 지점을 말한다. 이처럼 상충되는 다목적 최적화 문제에 파레토 최적점을 찾는 방법으로 유전자 알고리즘이 여러 분야에서 사용되고 있다.

유전자 알고리즘에서 염색체란 문제의 해를 가리킨다. 우리가 찾아내려는 해는 신장트리이므로 루트를 제외한 모든 정점은 반드시 하나의 부모 정점을 갖는다는 트리의 특성에 착안해 다음과 같은 염색체를 사용한다.

id	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
값	6	6	1	2	0	0	null	6	5	1

염색체를 구성하는 색인과 해당 값을 유전자라고 하는데 색인은 센서의 아이디를 나타내고 값은 트리에서 부모 정점에 해당 하는 센서의 아이디를 가리킨다. 각 유전자는 자신을 제외한 나머지 센서를 부모 노드로 가질 수 있다. 하지만 루트에 해당하는 센서는 부모를 갖지 않으며(null을 갖는다) 이 경우 센서의 개수가 n 이라 할 때 해공간의 크기는 $O(n*(n-1)^{n-1})$ 임을 알 수 있다. 이 중 염색체에 사이클이 있으면 타당한 해가 아니므로 해공간에서 제외한다. 이 방법은 간선을 염색체로 사용하는 경우의 수 $O(2^{n*(n-1/2)})$ 보다 작으므로 해공간의 측면에서 훨씬 효율적이다.

다수의 베이스 노드 혹은 베이스 노드의 이동성이 높은 센서 네트워크에서 패킷 전송 거리를 최소화하고 전체적인 에너지의 효율성을 높이기 위한 Wiener 수 적응도 이외에 네트워크의 수명 연장을 보완할 적응도가 필요하다. 이를 위해 네트워크 수명 적응도와 차수 적응도를 적응도 함수에 포함하였다.

MWST기반 라우팅 방법은 베이스 노드의 이동성이 높은 환경에서 1라운드 패킷 전송거리가 작다는 결과를 보였다[13]. 따라서 Wiener 수가 작은 트리는 지연시간을 줄일 가능성이 크고 전체적인 에너지 효율성을 높인다. Wiener 수 적응도로 다음 수식을 사용한다.

$$WIF = \frac{\sum_e d(e) \times (n-1) - \sigma(T)}{\sum_e d(e) \times (n-1)} \quad (4)$$

여기서, $d(e)$ 는 간선의 거리를 나타낸다.

Wiener 수 적응도는 패킷 전송거리를 줄임으로써 전체적인 에너지 효율성을 높이지만 특정 센서에 크게 의존하기 때문에 네트워크 수명을 단축시킨다. 이러한 단점을 생성하려는 트리로부터 제거하고 네트워크의 수명을 늘이기 위해서 적응도 함수에 네트워크 수명 적응도를 포함한다.

$$LTF = 1 - \frac{RE_{avg} - RE_{min}(T)}{RE_{avg}} \quad (5)$$

RE_{avg} 는 1라운드 패킷 전송 후 센서들의 평균 잔여 에너지량을 나타내고 $RE_{min}(T)$ 는 1라운드 패킷 전송 후 노드의 잔여 에너지 중 최소 잔여 에너지를 의미한다. 따라서 $RE_{min}(T)$ 가 높은 트리일수록 높은 적응도 값을 부여 받는다.

Wiener 수만을 고려하면 트리의 차수가 높아지는 경향을 보

인다. 예를 들어 정점간의 거리가 모두 동일한 네트워크인 경우엔 스타 트리가 가장 낮은 Wiener 수를 갖는다. 이런 경우 차수가 높은 정점의 이용도가 높아져 네트워크 수명을 줄이게 된다. 따라서 트리의 차수를 제한하면 특정 노드에 대한 패킷 전송의 의존도를 낮출 수 있다. 이는 네트워크의 수명을 연장하는데 도움이 된다. 차수 적응도 함수는 다음과 같다.

$$DGF = 1 - \min(1, D_{max}(T)) \quad (6)$$

여기서 $D_{max}(T)$ 는 주어진 트리의 차수를 가리킨다. 차수가 작은 트리일수록 높은 적응도를 부여 받는다

위에 제시된 세 가지 적응도들을 포함하는 최종 적응도는 다음과 같이 정의된다.

$$TF = \alpha WIF + \gamma LTF + \delta DGF \quad (7)$$

여기서, α, γ, δ 값은 가중치로서 각 적응도에 대한 상대적 중요성에 의존한다. 가중치 조합은 네트워크의 활용 특성, 예를 들어 응용 프로그램의 성격 등에 따라 다르게 선택 될 수 있다.

한 세대를 구성하는 해들 중 최고의 적응도를 가진 일부를 다음세대에 그대로 편입하는 엘리티즘을 사용하였다. 나머지 세대 구성원은 적응도에 비례해 교배 대상을 선정하는 룰렛휠 선택연산자를 사용하여 채웠다. 교배 연산은 단순 교배 연산자를 사용하였다. 단 교배를 통해 생성한 자식 해들은 타당하지 않은 해일 수 있으므로 수선을 실행하였다. 수선이란 루트가 되는 유전자가 오직 하나이고 사이클이 없도록 염색체를 고치는 것을 말한다. 돌연변이는 한 점 돌연변이를 사용하였다. 임의의 유전자를 선택하여 부모 노드를 무작위로 변경한다. 이때도 경우에 따라 타당한 해가 되도록 수선이 필요하다.

4. 모의실험과 결과분석

특정 센서 네트워크 표준 기술의 하위 계층 프로토콜들의 효과를 차단하고 순수한 토폴로지 효과만을 검증하기 위하여 모의 실험기(simulator)를 자체 제작하였다. 네트워크 내의 모든 센서는 동일한 종류를 가정하였다. 또한 패킷 충돌에 따른 재전송이나 overhearding이 없다고 가정하여 이에 따르는 전력 소모는 무시하였다. 50m×50m 공간에 50, 60, 70, 80, 90, 100개의 센서가 임의로 배치된 상황에서 모든 실험이 진행 되었다. 실험의 정확성을 기하기 위하여 10개의 사례를 생성하고 실험을 실시한 후 이를 평균하였다. 사용한 유전자 알고리즘 자체의 파라미터들은 다음과 같다.

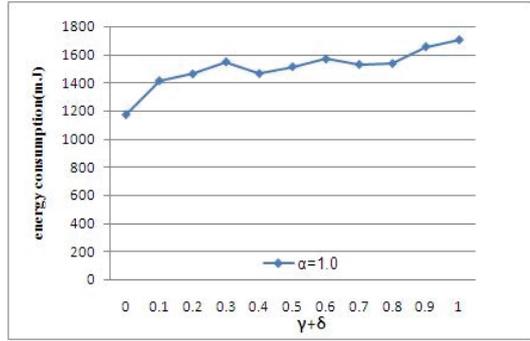
<표 2> 유전자 알고리즘의 실험 파라미터

파라미터	값
인구수(M)	100
세대수(GN)	500
교배율(CR)	0.9
돌연변이율(MR)	0.008

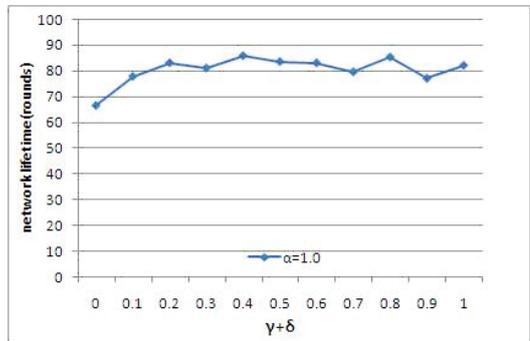
Wiener 수 적응도와 네트워크 수명 적응도, 차수 적응도의 관계를 알아보고 적절한 가중치를 얻기 위해 α 를 1.0으로 고정하고 $\gamma + \delta$ 를 0.0 ~ 1.0까지 달리하며(γ, δ 은 같은 값을 갖는다) 에너지 효율성과 네트워크 수명을 비교하였다. 그림 1과 2 모두 센서수가 50인 경우이다. 그림 1은 네트워크 수명 적응도와 차수 적응도를 증가 시킬 수록 1 라운드 패킷 전송에 소모되는 에너지의 양이 완만하게 증가함을 보여 주고 있다

네트워크 수명은 네트워크 수명 적응도와 차수 적응도의 증

가에 선형적 증가 관계를 보이지는 않았다(그림 2). 어느 정도 상승한 이후에는 80과 90 라운드를 경계로 등락을 하였다. 하지만 이들 적응도를 사용하지 않은 경우에 비해 약 30%의 수명 증가를 보이고 있다.

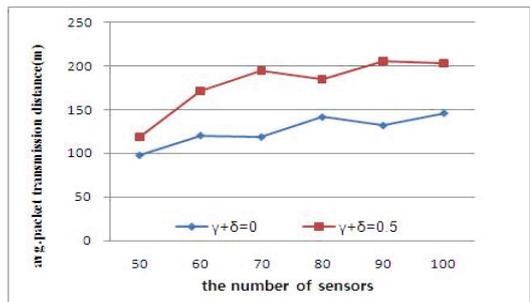


(그림 1) 네트워크 수명 적응도와 차수 적응도의 가중치 합과 에너지 효율성과의 관계

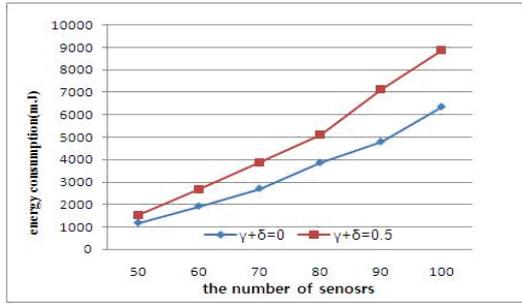


(그림 2) 네트워크 수명 적응도와 차수 적응도의 가중치 합과 네트워크 수명과의 관계

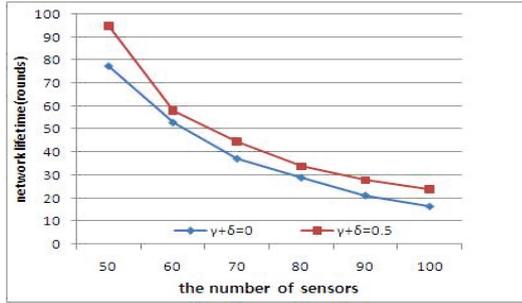
센서의 개수가 n 이라 할 때, 1라운드 패킷 전송 시 패킷의 평균 이동거리는 $((\alpha T) * 2)/(n*(n-1)/2)$ 을 이용해 구할 수 있다. 그림 3, 4, 5는 $\gamma + \delta$ 를 0.5인 경우만을 나타내었다. 그림 3은 α 를 1.0으로 고정하고 다른 두 적응도를 사용하지 않은 경우와 사용한 경우를 여러 센서 수에 대해 비교한 것이다. 그림 3으로부터 Wiener 수 적응도 외에 네트워크 수명 적응도와 차수 적응도를 함께 고려하게 되면 패킷의 평균 이동 거리는 증가한다는 사실을 알 수 있다. 그림 4는 1라운드 패킷 전송에 소모된 네트워크의 전체 에너지량을 Wiener 수 적응도만 고려한 경우와 네트워크 수명 적응도와 차수 적응도를 함께 고려한 경우를 비교하고 있다. Wiener 수 적응도만 사용했을 때의 네트워크 전체 에너지 소모량이 작음을 알 수 있다. 하지만 그림 5로부터 네트워크 적응도와 차수 적응도를 포함함으로써 네트워크의 수명이 길어짐을 알 수 있다.



(그림 3) 1라운드 패킷 전송시 패킷의 평균 이동 거리



(그림 4) 1 라운드 패킷 전송에 소모되는 네트워크 전체 에너지량



(그림 5) 라운드 수로 나타낸 네트워크 수명 비교

5. 결론

다수의 베이스 노드가 존재하거나 베이스 노드의 이동성이 높은 센서 네트워크 환경에서 작은 Wiener 수를 가진 신장 트리 기반의 다중 홉 라우팅 방법은 작은 패킷 전송 거리와 전체적인 에너지 효율성을 갖지만 특정 노드에 전송 의존도가 높아 네트워크 수명이 짧은 단점을 가지고 있다. 또한 최소 Wiener 수 신장트리를 구하는 문제는 NP-hard이므로 많은 수의 센서를 갖는 네트워크에는 최적해를 보장하는 분기한정 방법을 사용할 수 없다. 본 논문은 이러한 단점들을 보완하고자 Wiener 수 적응도 이외에 네트워크 수명 적응도와 차수 적응도를 도입한 다목적 유전자 알고리즘을 설계하였다. 다수의 센서를 가진 네트워크에도 사용이 가능하며 Wiener 수 적응도만 사용한 경우에 비해 라운드 에너지 소모량을 증가시킨 대신 네트워크의 수명을 개선하였다.

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음”(NIPA-2010-C1090-1021-0007)
 “이 논문은 2009년도 정보(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임 (2009-0093828)”

참 고 문 헌

[1] I. F. Akyildiz, et al., “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393-422, Mar. 2002.
 [2] I. F. Akyildiz, et al., “Wireless sensor and

actor networks: research challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 2, pp. 351-367, 2004.

[3] I. F. Akyildiz, et al., “A survey on wireless multimedia sensor networks,” *Computer Networks*, vol. 51, pp. 921-960, 2007.

[4] M. Fischermann, et al., “Wiener index versus maximum degree in trees,” *Discrete Applied Mathematics*, vol. 122, pp. 127-137, 2002.

[5] D. Ganesan, et al., “Networking Issues in Wireless Sensor Networks,” *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 64, pp. 799-814, July 2004.

[6] M. R. Garey and D. S. Johnson, *Computers and Intractability*, W. H. Freeman, 1979.

[7] W. R. Heinzelman, et al., “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks,” *In Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1-10, 2000.

[8] J. Horn, et al., “A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization: Evolutionary Computation,” *In Proc. 1st IEEE Conf. Computational Intelligence*, pp. 82-87, 1994.

[9] S. Hussain and O. Islam, “An Energy Efficient Spanning Tree Based Multi-hop Routing in Wireless Sensor Networks,” *In Proc. of Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 4383-4388, 2007.

[10] S. Hussain and O. Islam, “Genetic Algorithm for Energy Efficient Trees in Wireless Sensor Networks,” *Advanced Intelligent Environments*, Springer, pp. 1-14, 2008.

[11] R. Khanna, H. Liu, and H. H. Chen, “Self-Organization of Sensor Networks Using Genetic Algorithms,” *In Proc. of IEEE Intl. Conf. on Communications(ICC)*, pp. 3377-3382, 2006.

[12] S. Okdem and D. Karaboga, “Routing in Wireless Sensor Networks Using an Ant Colony Optimization Router Chip,” *Sensors*, vol. 9, pp. 909-921, Feb. 2009.

[13] 강승호, 김기영, 이우영, 정민아, 이성로, “베이스 노드의 이동성이 큰 센서 네트워크 환경에서 최소 Wiener 수 신장트리의 효율성 분석,” 한국통신학회논문지 심사중.