

무선 센서 & 액터 네트워크에서 주문형 라우팅을 위한 파레토 개미 집단 최적화 알고리즘

정희원 강승호*, 최명수**, 정민이***, 이성로****

A Pareto Ant Colony Optimization Algorithm for Application-Specific Routing in Wireless Sensor & Actor Networks

Seung-Ho Kang*, Myeong-Soo Choi**, Min-A Jung***, Seong-Ro Lee**** *Regular Members*

요약

무선 센서 & 액터 네트워크에서 긴 네트워크의 수명을 유지하면서 다양한 지연시간을 요구하는 응용 프로그램 들을 동시에 서비스하는 라우팅 방법이 요구되고 있다. 하지만 트리 기반 라우팅에서 네트워크 수명과 패킷 전송 시의 평균 홉 수는 상충관계가 있다는 사실이 알려져 있다. 본 논문은 상충관계에 있는 두 가지 목적을 최적화하는 라우팅 트리들의 파레토 집합을 찾고자 파레토 개미 집단 최적화 알고리즘을 제시한다. 응용 프로그램이 요구하는 지연 시간에 따라 적절한 트리를 선택하여 라우팅에 사용할 수 있도록 함으로써 다양한 응용 프로그램의 요구 조건을 만족시킬 뿐 아니라 긴 네트워크의 수명을 보장한다. 그리고 모의실험을 통해 구해진 트리들이 대표적인 라우팅 트리인 최소신장트리 보다 파레토 최적에 근접한 트리들로 구성됨을 보인다.

Key Words : Pareto ACO Algorithm, Sensor Networks, Tree-based Routing, Network Lifetime, Delay, Hop Count

ABSTRACT

Routing schemes that service applications with various delay times, maintaining the long network life time are required in wireless sensor & actor networks. However, it is known that network lifetime and hop count of trees used in routing methods have the tradeoff between them. In this paper, we propose a Pareto Ant Colony Optimization algorithm to find the Pareto tree set such that it optimizes these both tradeoff objectives. As it enables applications which have different delay times to select appropriate routing trees, not only satisfies the requirements of various multiple applications but also guarantees long network lifetime. We show that the Pareto tree set found by proposed algorithm consists of trees that are closer to the Pareto optimal points in terms of hop count and network lifetime than minimum spanning tree which is a representative routing tree.

I. 서론

센서 & 액터 네트워크^[1]를 구성하는 작은 센서들은 빛, 소리, 온도, 이미지, 압력, 진동 등의 다양한

형태의 정보들을 감지하고 감지된 정보들을 특정 목적에 맞게 처리하여 처리된 정보를 베이스 노드까지 전송하는 기능을 가지고 있다. 이러한 센서들 덕분에 센서 네트워크는 국방 영역을 비롯해 환경

* 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2010-0028295)

** 본 논문은 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-C1090-1121-0007)

* 국가수리과학연구소 융복합수리과학연구부(hskang@nims.re.kr), ** 목포대학교 중점연구소(mschoi@mokpo.ac.kr)

*** 목포대학교 컴퓨터공학부(majung@mokpo.ac.kr), **** 목포대학교 정보전자공학과(srlee@mokpo.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-06-251 접수일자 : 2010년 6월 3일, 최종논문접수일자 : 2011년 3월 29일

감시, 재해 예방, 의료 보건 분야 및 조선, 해양 영역 등 다양한 곳에서 여러 가지 목적으로 사용되고 있다²⁻⁴⁾.

하지만 이러한 다양한 기능에도 불구하고 센서들의 에너지 재충전이 불가능한 경우가 대부분이어서 네트워크 수명을 최대화 하는 라우팅 방법이 중요한 연구 주제중의 하나가 되어왔다^{1-4,10,13)}. 기존 연구들 대부분은 센서 네트워크의 데이터 수거지인 베이스 노드가 고정되어있다는 가정을 전제로 하여 라우팅 프로토콜들의 연구가 이루어져 왔다. 하지만 센서 & 액터 네트워크처럼 베이스 노드가 이동하거나 여러 개의 베이스 노드가 존재하는 네트워크에서의 에너지 효율적인 라우팅 방법에 대해서는 관심에 비해 연구가 활발하지 않은 상태이다¹³⁾.

그리고 다양한 센서의 개발로 인해 이종의 센서들로 구성된 네트워크와 여러 가지 다른 특성을 가진 응용 프로그램이 동시에 서비스되어야 하는 요구들이 등장하였다. 특히 [4]는 응용 프로그램들을 트래픽의 종류와 요구하는 성질에 따라 여러 가지 클래스로 나누고 이에 대응할 수 있는 프로토콜 개발의 필요성을 지적하였다. 이중 지연시간은 응용프로그램의 성질을 결정할 중요한 요소이며 지연시간의 허용 수준에 따라 응용프로그램의 부류를 나눌 수 있다. 예를 들어 침입 탐지나 재해발생 탐지와 같은 응용에서는 지연시간이 매우 중요한 요소가 된다. 하지만 주기적으로 온도와 같은 환경 정보를 수집하는 응용프로그램의 경우엔 지연시간이 크게 문제 되지 않는다. 이와 같은 응용프로그램의 QoS를 고려한 응용허용제어알고리즘(application admission control algorithm)들이^{5,15)} 제시되었지만 이 방법들은 센서 수준을 대상으로 하거나 베이스 노드의 이동성을 고려하고 있지 않다⁴⁾.

본 논문은 긴 네트워크의 수명을 보장하면서 응용 프로그램의 지연시간 허용 수준에 따라 라우팅 경로를 선택할 수 있도록 여러 개의 라우팅 트리를 제공하는 방법을 제시한다. 트리의 평균 홉 수와 네트워크 수명은 상충관계가 성립하므로¹⁷⁾ 긴 네트워크 수명과 낮은 지연 시간을 동시에 갖는 트리의 발견은 어느 수준에 도달하면 더 이상 불가능하다. 즉, 두 가지 목적을 동시에 개선하는 트리를 찾더라도 어느 수준에 도달하면 긴 네트워크 수명을 보장하기 위해서는 트리의 평균 홉 수를 늘려야만 하는 단계에 진입하게 된다. 그리고 무선 네트워크에서 패킷 전송 시의 홉 수와 전송지연과는 높은 상관성을 갖는다¹⁴⁾는 사실에 비추어, 이러한 상충관계는

네트워크 수명을 최대화 하면서 동시에 지연시간을 최소로 하는 트리 기반 라우팅은 한계가 있다는 사실을 말해준다. 따라서 응용프로그램의 지연 시간에 대한 허용 수준에 따라 적절한 라우팅 트리를 할당하는 방법이 필요하다. 이는 전체적으로 네트워크 수명을 늘이면서 동시에 긴급성을 요하는 응용프로그램들에도 적절히 대처하는 라우팅 방법이 될 것이기 때문이다.

본 논문은 이처럼 상충관계에 있는 두 특성을 최적 조합으로 구성하는 트리 집합을 구하여 특정 응용 프로그램의 성격에 적합한 라우팅 트리를 제공하고자 파레토 개미 집단 최적화 알고리즘을 설계한다. 다목적 최적화를 위한 개미 집단 최적화 알고리즘은 안정적이면서도 성능이 좋은 파레토 해를 제공하는 것으로 알려져 있다⁶⁻⁸⁾.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 본 논문이 대상으로 하는 네트워크 모델과 관련 용어 및 문제 등을 2장에서 정의한다. 3장에서는 문제의 최적 파레토 해를 구하기 위한 다목적 개미 집단 최적화 알고리즘을 설계하고 4장에서 실험 결과와 함께 이를 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론과 함께 향후 연구 과제를 살펴본다.

II. 네트워크 모델과 문제 정의

본 장에서는 본 논문이 대상으로 하고 있는 센서 네트워크의 모델에 대한 가정들을 기술하고 관련 용어들과 문제를 정의한다.

2.1 전파 통신 모델

전파 통신 모델은 [11]의 것을 따른다. [13]에서도 이 모델을 사용하였으며 실제 통신 환경을 적절히 반영하고 있기 때문이다. 전파 통신 모델에 사용되는 송·수신시의 파라미터는 표 1과 같다.

이 모델에 따라, k bit의 패킷을 d 미터 떨어져있

표 1. 에너지 소비 모델 파라미터.

Transmitter electronics (ET_x)	50nJ/bit
Receiver electronics (ER_x)	50nJ/bit
Transmitter amplifier (amp)	100pJ/bit/m ²
Initial sensor energy	1J
Packet size	1000bit

는 다른 센서에 송신하는데 드는 전력 소모량 $E_{Tx}(k,d)$ 은 식 (1)에 의해 계산한다.

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

k bit의 패킷을 수신하는데 드는 전력 소모량은 식 (2)에 의해 계산한다.

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

따라서 d 미터 떨어진 연속한 두 센서 사이에 k bit 크기의 패킷 전송에 소모되는 전력량은 다른 조건이 없는 한 식 (1) + 식 (2)임을 알 수 있다.

센서들의 초기 에너지는 $20J$ 을 가정하였고 패킷의 크기는 $1000bit$ 를 가정하였다.

2.2 문제 정의

해결하고자 하는 문제의 정의에 앞서 필요한 관련 용어들을 먼저 정의한다.

정의 1. 모든 센서간 패킷 전송

모든 센서간 패킷 전송이란 모든 센서가 순서에 상관없이 한 번씩 베이스 노드의 역할을 수행하며 동일한 크기의 패킷을 나머지 센서로부터 수신하는 것을 말한다.

모든 센서간 패킷 전송은 센서 네트워크 모델에 하나 이상의 베이스 노드가 이동하는 상황을 포함하기 위한 장치이다. 본 모델은 베이스 노드와 가장 가까운 거리에 있는 센서가 다른 센서로부터 전송된 데이터를 수집하여 최종적으로 베이스 노드에 전송한다고 가정하므로 베이스 노드가 무작위로 움직인다면 모든 센서가 균등하게 최종 전송 센서가 될 수 있기 때문이다.

정의 2. Wiener 수

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

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

주어진 그래프로부터 최소 Wiener 수 신장트리를 구하는 문제는 연결선의 가중치가 모두 같은 경

우에도 NP-hard임이 알려져 있고^[6], 가중치를 1로 하면 모든 센서간의 총 홉 수를 나타낸다.

정의 3. 네트워크 수명

네트워크의 수명이란 모든 센서간 패킷 전송을 계속하는 과정에서 최초로 전력이 모두 소모되는 센서가 발생할 때까지의 모든 센서간 패킷 전송의 홉수를 말한다.

본 논문은 긴 네트워크 수명을 보장하면서 동시에 다양한 지연 시간을 요구하는 응용프로그램들에 적합한 전송경로를 제공하는 라우팅 트리를 찾기 위해 다음과 같은 문제를 제시한다.

정의 4. 파레토 최적 신장트리 집합 찾기 문제

모든 센서간 패킷 전송시 평균 홉 수를 최소화하고 네트워크의 수명을 최대화하는 파레토 신장트리 집합을 찾아라.

III. 파레토 개미 집단 최적화 알고리즘

평균 홉 수와 네트워크 생명 최대화라는 상충관계에 있는 두 가지 목적을 모두 만족시키는 트리 토폴로지의 생성을 위해 파레토 최적점을 찾는 다목적 개미 군집 최적화 알고리즘(MO-ACO)을 설계한다.

3.1 파레토 최적 집합

MO-ACO에서 목적으로 하는 파레토 최적 집합(P)이란 주어진 해 집합에 대해 다음과 같은 조건을 만족하는 해의 부분 집합을 말한다. 우선 m 개의 목적을 가진 해를 m 차원 벡터로 표현할 때 특정해 $s_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}\}$ 가 $s_j = \{s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jm}\}$ 을 지배한다(dominate)는 말은 s_i 의 모든 벡터 값이 적어도 s_j 의 벡터 값만큼은 좋으면서 즉, $\forall k, s_{ik} \geq s_{jk}$ 이고 그 중 적어도 하나 이상의 벡터 값이 엄격히 더 좋은 경우 즉, $\exists k, s_{ik} > s_{jk}$ 인 경우를 말한다. 여기서 기호 '>'는 크다는 의미가 아니고 특정 목적에 맞게 좋다는 의미이다. 그리고 파레토 최적 집합이란 해집합의 원소 중 다른 해들에 의해 지배당하지 않는 해들의 집합을 말한다.

3.2 에너지 모델을 반영하는 초기 그래프 생성

베이스 노드는 각 센서로부터 전송되어온 위치 정보를 이용하여 센서사이의 거리를 계산하고 모든 센서 사이의 가중치 w 를 식(2) + 식(3)에 의해서

계산한다. 이때 전송 bit $k = 1$ 로 한다. 에지에 대한 가중치에 에너지 모델을 반영하는 이유는 식(2)와 식(3)의 합이 해당 센서 사이에 특정 크기의 데이터를 송수신하는데 소모되는 에너지의 양을 나타내므로 네트워크의 수명을 극대화하기 위해서이다.

3.3 해 생성 방법

MO-ACO를 사용하려면 문제의 해를 생성하는 알고리즘이 필요하다. 본 논문은 최소신장트리(MST)를 구하는 Prim 알고리즘을 변형하여 사용한다. Prim 알고리즘은 임의의 정점을 출발점으로 하여 매번 정점 하나씩을 생성중인 트리에 추가 시켜 결국 모든 정점을 포함하는 신장트리를 생성해내는 탐욕적 문제 해결 방법이다. 이때 추가하는 정점의 선택은 이미 트리를 형성하고 있는 정점과 그렇지 않은 정점들 사이의 간선 중 가장 작은 가중치를 갖는 간선을 끝점으로 하는 정점을 대상으로 이루어진다. 본 논문이 제안하는 방법은 트리 생성을 위한 정점 선택시 탐욕적인 방법을 사용하는 것이 아니라 개미 군집 최적화 알고리즘이 제공하는 확률적인 상태 전이 규칙을 사용한다. 그리고 개미의 수는 노드 수와 같게 하였다.

3.4 상태 전이 규칙

k 번째 개미가 트리를 형성할 때 실행하는 상태 전이는 식 (4)와 (5)를 사용한다. 임계치로 설정된 $q_0(0 \leq q_0 \leq 1)$ 와 $[0, 1]$ 사이의 균등 분포로 부터 임의로 얻어낸 q 를 비교하여 임계치 보다 작으면 식 (4)를 사용하여 트리에 포함할 간선을 선택한다. 이때 각 개미는 자신이 트리에 포함시킨 정점들을 저장하는 장소 $M(k)$ 를 가지고 있다. 식에서 i 는 현재 트리에 포함된 정점들 중 하나를 나타내고($i \in M(k)$) j 는 아직 트리에 포함되지 않은 정점($j \notin M(k)$)을 나타낸다. 그리고 e_{ij} 는 이들 사이의 간선을 의미한다.

$$s(k) = \begin{cases} \arg \max \{ [\tau(e_{ij})]^\alpha \cdot [\eta(e_{ij})]^\beta \} & \text{if } q \leq q_0 \\ S & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $\tau(e_{ij})$ 는 간선에 놓인 페레몬 자국의 양을 나타내고 $\eta(e_{ij})$ 는 휴리스틱 함수로써 본 논문에서는 간선 가중치의 역수를 사용한다. 즉, $\eta(e_{ij}) = 1/w_{ij}$ 이다. α 와 β 는 파라미터로써 간선의 현재 페레몬의 양과 에너지 소모량의 상대적 중요성을 반영한다. S 는 식 (5)를 따르는 확률 변수이다. 만약 q 가 q_0 보다 크면 S 에 의해서 간선이 선택된다. 식 (4)와 식 (5)를 통한 상태 전이 규칙을 의사무작위비례규칙

(pseudo-random-proportional rule)이라고 한다.

$$p(e_{ij}) = \begin{cases} \frac{[\tau(e_{ij})]^\alpha \cdot [\eta(e_{ij})]^\beta}{\sum [\tau(e_{ij})]^\alpha \cdot [\eta(e_{ij})]^\beta} & \text{if } j \notin M(k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

3.5 지역 갱신 규칙

각 개미들은 자신의 해인 신장트리를 생성해갈 때 자신이 선택한 간선에 대해 식 (6)을 사용하여 페레몬 자국의 양을 갱신한다.

$$\tau(e) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau(e) + \rho \Delta \tau_l(e) \quad (6)$$

여기서 $\rho(0 < \rho < 1)$ 는 페레몬 증발율을 나타내는 파라미터이다. $\Delta \tau(e)$ 는 지역 갱신에 사용할 페레몬 양인데 초기 페레몬 양을 사용하였다.

3.6 전역 갱신 규칙

모든 개미들이 해를 완성하면 이들을 대상으로 평균 홉 수와 E_{min} 를 목적으로 하여 파레토 최적 집합 P 를 구한다. 이때 네트워크 수명 대신 E_{min} 을 사용하는 이유는 트리만을 대상으로 네트워크의 수명을 직접 구할 수 없기 때문이다. 전역 갱신은 파레토 최적 집합 P 에 속하는 해들을 대상으로 식 (7)에 따라 각 해를 구성하는 간선에 대해 페레몬 자국의 양을 갱신한다.

$$\tau(e) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau(e) + \rho \Delta \tau_g(e) \quad (7)$$

여기서, ρ 는 지역 갱신에 사용한 것과 동일한 증발율을 나타낸다. 하지만 $\Delta \tau(e)$ 는 식 (8)을 따른다.

$$\Delta \tau_g(e) = \gamma_1 \frac{1}{\sigma(s_k)} + \gamma_2 \left(1 - \frac{1}{E_{min}(s_k)} \right) \quad (8)$$

여기서 $s_k \in P$ 이고, $\sigma(s_k)$ 는 해 s_k 에 대한 Wiener 수를, $E_{min}(s_k)$ 는 모든 센서간 1라운드 패킷 전송이 후 최소의 에너지를 가진 센서의 에너지 값을 나타낸다. Wiener 수는 평균 홉 수가 작은 트리의 선택 확률을 높이기 위한 것이고, E_{min} 은 E_{min} 가 큰 센서를 보유한 해의 간선들의 선택 확률을 높임으로써 수명이 긴 네트워크의 선택 가능성을 상대적으로 크게 하려는 것이다. γ_1 , γ_2 는 각 목적들의 상대적 중요성을 반영하는 파라미터이다.

3.7 파라미터 값 설정

표 2는 MO-ACO에 사용된 각 파라메타들의 설정 값을 나타낸다. 각 파라메타는 다양한 값을 상대로 실험한 후 선택한 값들이다. 이 중 주목할 점은 다른 파라메터 값을 표의 값으로 고정하고 β 값을 β 값보다 크게 하더라도 네트워크의 수명에 큰 개선이 없다는 사실이다. 이는 전체적인 파라메터의 설정 값의 영향이 여러 간선에 조그마한 차이로 분산되기 보다는 한정된 간선들에 집중적으로 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

표 2. ACO에 사용된 파라메터 설정 값

파라메터	값	파라메터	값
q_0	0.9	ρ	0.1
α	1	β_1	1.0
β	2	β_2	1.0

3.8 최종 파레토 해집합

사전에 정의된 반복 횟수에 도달했을 때 마지막 해집합을 대상으로 전역 갱신 규칙과 동일한 목적들로 지배관계를 이용해 최종 파레토 최적인 해집합을 구한다. 해집합을 구성하는 라우팅 트리들의 홉 수와 네트워크 수명은 실험결과로부터 상충관계에 있다는 사실을 확인할 수 있는데, 응용의 지연 시간 요구에 따라 특정 라우팅 트리를 사용하도록 연결한다. 예를 들어 침입 탐지와 같은 실시간을 요하는 응용인 경우에 에너지 요소보다 낮은 지연 시간이 중요한 고려사항이므로 트리 중에서 평균 홉 수가 가장 작은 라우팅 트리를 이용해 데이터를 전송하도록 한다. 한편 온도에 대한 주기적 변화 측정과 같이 데이터 전송의 긴급성을 요하지 않은 응용에 대해서는 네트워크의 수명 연장을 최대화 하는 라우팅 트리를 이용해 데이터를 전송한다.

라우팅의 전체적인 단계를 아래에 제시한다.

- 단계 1: 개별 센서들이 자신의 위치정보와 에너지 상태를 플러딩을 통해 베이스 노드에 전달
- 단계 2: 베이스 노드는 수집된 정보를 이용해 그래프를 작성하고 파레토 개미 집단 최적화 알고리즘으로 파레토 집합 생성
- 단계 3: 파레토 집합을 모든 센서에 전달
- 단계 4: 응용 프로그램의 설정에 따라 라우팅 트리를 선정하고 해당 경로를 이용해 베이스 노드와 센서들 간의 패킷 송수신

IV. 모의 실험과 결과 분석

4.1 실험 환경 및 시나리오

특정 센서 네트워크 표준 기술의 하위 계층 프로토콜들의 효과를 차단하고 순수한 라우팅 효과만을 검증하기 위하여 모의 실험기(simulator)를 자체 제작하였다(그림 1 참조). 네트워크 내의 모든 센서는 동일한 종류이고 패킷 충돌에 따른 재전송이나 누화가 없다고 가정하여 이에 따른 전력 소모는 무시하였다. 그리고 50m×50m 공간에 센서들이 임의로 배치된 상황에서 모든 실험이 진행 되었다.

모의 실험은 다음과 같이 실시하였다. 우선 정의의 모든 센서간 패킷 전송이 가능하도록 하나의 액터가 공간 안의 모든 센서들을 한 번 씩 방문하도록 하였고 이동시마다 방문한 센서를 제외한 다른 모든 센서들이 1000bit 크기의 패킷을 트리상의 유일한 경로를 따라 현재 액터가 방문하고 있는 센서로 전송하도록 하였다. 그리고 이러한 모든 센서간 패킷 전송을 네트워크 내에 최초의 완전 전력소실 센서가 발생할 때까지 지속하였다. 액터 트래킹은 그 자체로 무선 센서 & 액터 네트워크의 중요한 주제지만 본 논문은 모든 센서들이 액터의 현재 위치를 알고 있고 방문 센서로 패킷을 전송하도록 하였다. 이는 본 논문의 목적이 라우팅 트리 자체의 성능을 측정하고 비교하려는 것이기 때문에 필요한 가정이다.

```

drminor@alex:~/Research/wsn/wiener/aco/multi_obs/result/node_ZU/1056

Our Spanning Tree built by ACO
49 37 23 8 24 41 39 9 31 32 40 38 13 41 58 12 62 20 22 65 63 29 44 28 22 15 40 1
5 62 2 25 49 34 5 60 13 12 51 43 26 35 0 62 12 13 38 10 32 43 -1 14 59 7 24 56 3
9 22 64 51 16 27 53 44 27 39 34 47 61 58 48

MNST_ACO wiener index(energy): 219019.920
MNST_ACO round travel distance: 425684.337 m, avg: 176.267
MNST_ACO hop count total: 34988, avg: 14.455
MNST_ACO round energy consumed: 4386.398
MNST_ACO life time: 52

Our Spanning Tree built by MO-ACO
68 62 23 37 50 33 39 52 3 7 36 26 36 12 50 27 62 -1 13 65 17 29 18 28 4 17 39 63
62 2 25 8 9 14 63 39 30 1 43 40 10 13 15 48 13 38 10 32 69 31 16 58 61 2 32 33
54 39 14 51 27 23 42 20 57 34 47 61 58 30

MNST_MO-ACO wiener index(energy): 260199.420
MNST_MO-ACO round travel distance: 506212.399 m, avg: 209.612
MNST_MO-ACO hop count total: 44812, avg: 18.556
MNST_MO-ACO round energy consumed: 5202.188
MNST_MO-ACO life time: 56
    
```

그림 1. 모의 실험기(simulator)

4.2 실험 결과

그림 2과 그림 3은 각각 70개의 센서로 구성된 네트워크와 100개의 센서로 구성된 네트워크를 대상으로 파레토 개미 집단 최적화 알고리즘을 사용해 구한 트리들의 평균 홉 수와 네트워크 수명을

나타낸 것이다(마름모). 이때 알고리즘에 필요한 파레토 값들은 표 2의 것을 사용하였다.

그림에 있는 삼각형은 동일한 네트워크들을 대상으로한 MST의 것이다. 작은 홉 수를 갖고 수명이 긴 네트워크가 목적이므로 그림에서 우하향에 위치한 트리일 수록 좋은 라우팅 트리임에 비추어 파레토 해를 구성하는 트리들이 MST보다 파레토 최적에 근접함을 알 수 있다. 또한 파레토 집합으로부터 평균 홉 수와 네트워크의 수명이 상충관계에 있음을 확인 할 수 있다.

그림에서 A쪽에 가까운 라우팅 트리는 상대적으로 작은 평균 홉 수와 짧은 네트워크 수명을 가지고 있다. 이와 반대로 B쪽에 가까운 라우팅 트리는 상대적으로 큰 평균 홉 수와 긴 네트워크 수명을 보여준다. 따라서 네트워크에서 서비스하려는 응용들의 지연 요구 시간에 따라 적당한 라우팅 트리를 선택하여 데이터를 전송하면 된다. 만약 침입 탐지와 같이 긴급한 사항을 알리는 응용에 대해서는 A쪽에 가까운 트리를 이용해 라우팅을 실시하고 주

기적 기온 변화를 확인하는 응용처럼 긴급성이 절박하지 않은 응용에 대해서는 B에 가까운 트리를 사용하여 데이터를 전송하도록 함으로써 네트워크의 수명을 늘일 수 있을 것이다. 또한 [13]도 하나의 라우팅 트리를 사용하는 것 보다 다수의 라우팅 트리를 사용하는 방법이 전체적인 네트워크의 수명을 증가시킬 수 있음을 보여 주었다. 따라서 긴 네트워크 수명에 있어 여러 트리의 사용에 따른 효과도 기대할 수 있다.

표 3은 50~100 개까지의 센서로 구성된 네트워크에 대해 파레토 개미 군집 최적화 알고리즘을 통해 구해진 파레토 해의 크기, 즉 트리의 개수이다. 모든 값은 10개의 사례에 대해 평균을 한 것이다. 그리고 모든 사례의 트리 수는 최소 3개 이상이었다. 이로부터 본 논문이 제시하는 알고리즘이 센서수에 상관없이 안정적인 개수의 트리를 제공하고 있음을 알 수 있다.

표 3. 각 센서 수에 대한 파레토 해의 크기

센서수	50	60	70	80	90	100
트리 수	6.7	7.4	6.4	6.6	5.3	5.3

V. 결 론

본 논문은 베이스 노드가 이동하는 센서 & 액터 네트워크 환경에서 다양한 지연시간을 요구하는 응용 프로그램들에 적절히 대응하고 네트워크의 긴 수명을 보장하는 라우팅 트리를 제공하는 방법을 제시하였다. 두 가지 상충되는 목적을 최적화하는 라우팅 트리 집합을 구하기 위한 지역 갱신 규칙과 전역 갱신 규칙을 작성하고 이를 적용한 파레토 개미 집단 최적화 알고리즘을 설계하였다. 제시한 알고리즘은 특정 파라메타에 민감하지 않으며 안정적으로 파레토 최적 집합을 제공하였다.

앞으로 IEEE 802.15.4와 같은 표준의 물리 계층과 MAC 계층을 고려한 모의 실험과 테스트 베드의 구현 실험을 통해 제시한 알고리즘의 타당성을 보다 현실성 있게 검증하는 연구가 있어야 되겠다. 이를 위해서는 우선 응용들을 사례에 따라 지연 시간의 요구 정도에 따라 체계적으로 분류하는 작업이 선행되어야 하고 응용에 상응하는 트리의 선택 방법에 대해서도 연구가 필요하다. 또한 센서 & 액터 네트워크의 중요한 연구 주제인 액터의 트래킹 방법도 기존 연구를 검토하여 제시한 라우팅 알고

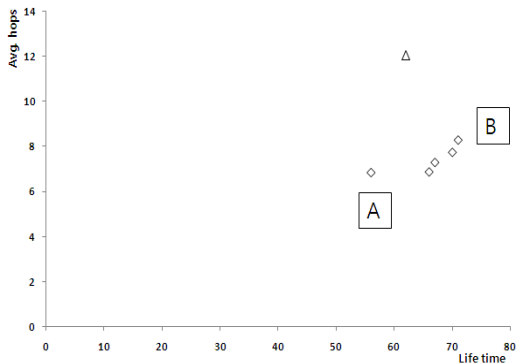


그림 2. 70개의 센서로 구성된 네트워크

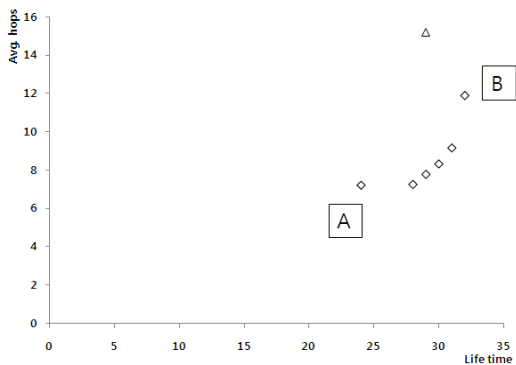


그림 3. 100개의 센서로 구성된 네트워크

리즘의 적합성을 극대화 할 수 있는 방법들을 고안해 내어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] K. Akkaya and M. Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, Vol.3, pp.325-349, May 2005.

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

[3] I. F. Akyildiz, et al., "Wireless sensor and actor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 2, pp. 351-367, 2004.

[4] I. F. Akyildiz, et al., "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer Networks*, Vol.51, pp.921-960, 2007.

[5] A. Boulis, M. Srivastava, "Node-level Energy Management for Sensor Networks in the Presence of Multiple Applications," In Proc. of IEEE Intl. Conf. on Pervasive Computing and Communications, pp.41-49, 2003.

[6] K. F. Doerner, et al., "Pareto ant colony optimization with ILP preprocessing in multiobjective project portfolio selection," *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, pp.830-841, 2006.

[7] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.1, pp.53-66, 1997.

[8] M. Dorigo, et al., "The ant system: optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B*, Vol.26, pp.29-41, 1996.

[9] M. Fischermann, et al., "Wiener index versus maximum degree in trees," *Discrete Applied Mathematics*, Vol.122, pp.127-137, 2002.

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

[11] 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.

[12] J. Horn, et. al., "A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization," In Proc. of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation, pp.82-87, 1994.

[13] 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.

[14] J. C. Kuo and W. Liao, "Hop Count Distribution of Multihop Paths in Wireless Networks With Arbitrary Node Density: Modeling and Its Applications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.56, pp.2321-2331, 2007.

[15] M. Perillo, W. Heinzelman, "Sensor Management Policies to provide application QoS," *Ad Hoc Networks*, Vol.1(2-3), pp.235-246, 2003.

[16] S. Upadhyayula, S. K. S. Gupta, "Spanning tree based algorithms for low latency and energy efficient data aggregation enhanced convergecast (DAC) in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks* 5, pp.626-648, 2007.

[17] 김정현 외., "무선 센서네트워크에서 다양한 지연시간을 갖는 라우팅 트리 제공을 위한 적소 파레토 유전자 알고리즘," 2010년도 한국통신학회 하계 종합학술발표회 논문집, pp.72-73, 2010.

강 승 호(Seung-Ho Kang)

정회원



1994년 8월 전남대학교 전산학과 졸업

2003년 2월 전남대학교 전산학과 석사

2009년 8월 전남대학교 전산학과 박사

2009년 12월 목포대학교 정보

산업연구소 전임연구원

2010년 9월~현재 국가수리과학연구소 연구원

<관심분야> 센서네트워크, 생물정보학, 알고리즘, 생태계 모델링

최 명 수 (Myeong-Soo Choi)

정회원



2000년 2월 목포대학교 전자공학과 졸업
2002년 2월 목포대학교 전자공학과 석사
2009년 2월 목포대학교 전자공학과 박사
2009년 3월 목포대학교 해양텔레매틱스 기술개발센터 박사후연구원

2009년 12월~현재 목포대학교 정보산업연구소 연구교수

<관심분야> 디지털통신시스템, 무선통신분야(USN, 배열신호처리), 임베디드시스템, 생체인식시스템

이 성 로 (Seong-Ro Lee)

정회원



1987년 2월 고려대학교 전자공학과
1990년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
1996년 8월 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사
2005년 3월~현재 목포대학교 정보전자공학과교수

<관심분야> 디지털통신시스템, 이동 및 위성통신시스템, USN/텔레매틱스응용분야, 임베디드시스템, 생체인식시스템

정 민 아 (Min-A Jung)

정회원



1992년 2월 전남대학교 전산통계학과 졸업
1994년 2월 전남대학교 전산통계학과 석사
2002년 2월 전남대학교 전산통계학과 박사
2005년 3월~현재 목포대학교 컴퓨터공학과 부교수

<관심분야> 데이터베이스/데이터마이닝, 생체인식시스템, 무선통신응용분야(RFID, USN, 텔레매틱스), 임베디드시스템