

무선 센서 네트워크에서 유전자 알고리즘 기반의 혼잡 제어

(Congestion Control based on Genetic Algorithm
in Wireless Sensor Network)

박 총 명 [†] 이 좌 형 [†] 정 인 범 ^{††}
(Chongmyung Park) (Joahyoung Lee) (Inbum Jung)

요 약 무선 센서 네트워크는 많은 센서 노드들이 환경 정보를 수집하는 이벤트 기반의 네트워크 시스템이다. 에너지를 효율적으로 사용하기 위해, 센싱 주기를 길게 하며 특정한 이벤트가 발생한 경우에는 짧은 주기로 센싱하여 전송한다. 이러한 무선 센서 네트워크 환경에서 지역적인 이벤트 발생은 네트워크의 혼잡을 야기하여 중요한 정보의 손실이 일어날 수 있으며, 과도한 전송 모듈의 사용으로 네트워크의 수명이 단축될 수 있다. 본 논문에서는 지역적인 이벤트가 발생하여 네트워크 트래픽이 증가할 때, 트래픽이 집중된 노드의 트래픽을 분산하기 위한 유전자 알고리즘 기반의 혼잡 제어 기법(CCGA)을 제안한다. CCGA는 트래픽이 집중된 노드의 자식 노드들로부터 주변 노드들의 정보를 수집하고 유전자 알고리즘을 수행하여 포워딩 노드를 선택하고 트래픽을 분산시킨다. CCGA의 유전자 알고리즘은 주변 노드들의 데이터 전송률을 염색체로 표현하였다. 이벤트 발생 지역 주변노드들의 데이터 전송률이 고르게 분포될 수 있도록 이벤트 발생 지역 노드들의 전송률 평균과 표준편차를 이용한 적합도 함수를 설계하였다. 실험을 통하여 CCGA 알고리즘이 무선 센서 노드들의 데이터 전송률을 균등하게 유지시키며 이러한 결과가 특정 노드의 전력 소모 집중을 방지함을 보인다. 이러한 결과는 무선 센서 네트워크의 신뢰성 있는 데이터 전송을 보장하며 무선 센서 네트워크의 수명 연장에 기여한다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 혼잡 제어, 유전자 알고리즘, 적합도 함수

Abstract Wireless sensor network is based on an event driven system. Sensor nodes collect the events in surrounding environment and the sensing data are relayed into a sink node. In particular, when events are detected, the data sensing periods are likely to be shorter to get the more correct information. However, this operation causes the traffic congestion on the sensor nodes located in a routing path. Since the traffic congestion generates the data queue overflows in sensor nodes, the important information about events could be missed. In addition, since the battery energy of sensor nodes exhausts quickly for treating the traffic congestion, the entire lifetime of wireless sensor networks would be abbreviated. In this paper, a new congestion control method is proposed on the basis of genetic algorithm. To apply genetic algorithm, the data traffic rate of each sensor node is utilized as a chromosome structure. The fitness function of genetic algorithm is designed from both the average and the standard deviation of the traffic rates of sensor nodes. Based on dominant gene sets, the proposed method selects the optimal data forwarding sensor nodes for relieving the traffic congestion. In experiments, when compared with other methods to handle the traffic congestion, the proposed method shows the efficient data transmissions due to much less queue overflows and supports the fair data transmission between all sensor nodes as possible. This result not only enhances

[†] 학생회원 : 강원대학교 컴퓨터정보통신공학
empark@snslab.kangwon.ac.kr
jhlee@snslab.kangwon.ac.kr

^{††} 종신회원 : 강원대학교 컴퓨터정보통신공학 교수
ibjung@snslab.kangwon.ac.kr
(Corresponding author)

논문접수 : 2008년 7월 15일

심사완료 : 2009년 8월 3일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 정보통신 제36권 제5호(2009.10)

the reliability of data transmission but also distributes the energy consumptions across the network. It contributes directly to the extension of total lifetime of wireless sensor networks.

Key words : sensor network, traffic congestion, genetic algorithm, fitness function

1. 서론

무선 센서 네트워크는 많은 센서 노드들이 필드에 배치되어 환경 정보를 수집하는 이벤트 기반의 네트워크 시스템이다. 센서 노드들은 무선 멀티 홉 네트워크를 통해 싱크 노드로 데이터를 전송한다. 이러한 센서 네트워크에 대한 관심이 증가하면서 다양한 목적을 가진 응용 프로그램들이 개발되고 있다. 예를 들면, 산불 감시, 동·식물의 생태 감시와 같은 환경 모니터링 어플리케이션과, 사람이나 기계 또는 건축물의 움직임을 감지하는 움직임 모니터링 어플리케이션 등이 있다. 다양한 센서 네트워크는 그 목적에 따라 요구사항도 다양하지만, 데이터 전송기법에 관하여 다음과 같은 특징을 만족해야 한다. 센서 노드들은 배치된 후 관리자가 노드의 유지관리를 하지 않는 형태이므로 한번 배치된 후 긴 수명을 갖고 데이터를 수집하기 위해서는 노드 자체의 전력을 효율적으로 사용하여야 한다[1]. 또한 센서 노드들로부터 싱크 노드로 수집된 데이터들이 환경 정보를 분석하기에 충분하도록 데이터 전송의 신뢰성이 보장되어야 한다.

네트워크의 수명 연장을 위해 각 노드는 수집한 데이터의 전송 횟수를 줄여야할 필요가 있다[2]. 이를 위해 긴 주기로 데이터를 수집하여 전송하게 하고, 특정한 이벤트를 감지할 경우 짧은 주기로 데이터를 수집하여 이벤트에 대한 분석을 할 수 있는 충분한 양의 데이터를 전송하는 방법을 사용할 수 있다. 예를 들면, 교량 안전 관리를 위한 센서 네트워크에서 정상 상태의 경우 초당 1개의 패킷을 전송하게 하고 이상상태를 감지하였을 경우에는 초당 100개의 패킷을 전송하게 하여 정밀한 분석을 가능하게 할 수 있다. 그림 1은 앞서 설명한 바와 같이 긴 샘플링 주기를 갖는 센서 네트워크에서 이벤트 발생 시 일부 지역에 데이터 전송량이 증가함을 나타낸다. 그림 1에서 화재 발생시 A~D 노드가 이를 감지하고 라우팅 경로가 점선과 같다고 하면, A~D 노드는 화재라는 이상 상태를 감지했으므로 샘플링 주기를 증가시킨다. 그런데 증가된 데이터는 A 노드에 집중되게 되고, 이는 네트워크의 혼잡 상태를 야기시킬 수 있다[3]. 네트워크 혼잡을 피하기 위해 A 노드에서 자식 노드인 B~D 노드의 데이터 전송을 가용한 이웃 노드들로 분산시킬 필요가 있다.

네트워크의 혼잡은 과다한 전송 모듈의 사용으로 네트워크의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 멀티 홉을 이용

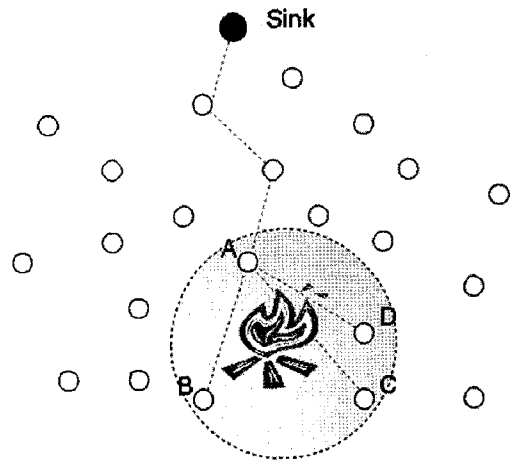


그림 1 지역적인 이벤트 감지

하여 싱크 노드로 데이터를 전송 중 중요한 정보의 손실을 발생시킬 수 있다[4]. 센서 노드들은 이벤트를 감지하여 데이터를 생성할 뿐 아니라 하위 노드들로부터 싱크 노드로 전송되는 데이터를 중계하는 라우터의 역할을 수행한다. 센서 노드는 생성한 데이터를 전송하고 중계하기 위한 데이터 전송 큐를 사용한다. 하지만 위와 같이 데이터의 집중이 발생하였을 때, 큐의 처리 속도가 전송량을 감당하지 못할 경우 전송 실패가 발생하고 데이터를 잃어버리게 된다. 이러한 현상은 최종적으로 싱크노드에서 중요한 데이터를 수신하지 못하는 결과를 야기할 수 있다.

본 논문에서는 센서 네트워크에서 특정 노드에 트래픽이 집중되는 경우, 집중된 트래픽을 주변 노드들로 분산시키는 알고리즘인 유전자 알고리즘 기반의 혼잡 제어 기법(Congestion Control based on Genetic Algorithm : CCGA)을 제안한다. CCGA는 트래픽이 집중된 노드의 자식 노드들로부터 주변 노드들의 데이터 전송률을 수집하여 자식 노드들의 데이터 전송을 특정 비율로 다른 노드로 포워딩 시킨다. 센서 노드들이 밀집되어 주변 노드들이 많고 각 노드들의 데이터 전송률이 다양할 경우 자식 노드들에 적당한 포워딩 노드와 전송률을 선택하기 어렵다. CCGA는 적절한 포워딩 노드와 전송률을 선택하여 주변 노드들에 트래픽을 균등하게 분배할 수 있도록 유전 알고리즘을 사용한다.

유전자 알고리즘은 두 부모 유전자로부터 자손 유전자를 생성하고 변이시켜 더 나은 형질을 가진 유전자를 보존 및 진화 시키는 알고리즘이다[5]. 유전자 알고리즘은 문제의 해를 표현하는 염색체를 정의하고, 염색체 표

현 방법을 이용하여 랜덤하게 염색체들의 초기 모집단을 생성한다. 그리고 유전 연산과 적합도(fitness) 함수를 이용하여 적합도가 우수한 염색체들을 선택하여 점진적으로 개선된 집단을 형성한다. 유전 연산은 염색체를 교차, 변이 시켜 새로운 염색체를 생성하고, 모집단의 염색체들과 새로운 염색체 중 우수한 염색체들로 다시 모집단을 구성한다. 본 연구에서는 자식노드와 그 주변노드들의 데이터 전송률을 이용하여 유전자를 정의하고 주변노드들의 데이터 전송률이 고르게 분포될 수 있도록 이벤트 발생지역 노드들의 전송률 평균과 표준편차를 이용한 적합도 함수를 설계하여 이를 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 센서 네트워크에서의 혼잡 제어 및 유전자 알고리즘에 대해 살펴보고, 3장에서는 제안하는 알고리즘인 CCGA의 동작 원리와 설계 방법에 관하여 설명한다. 4장에서는 실험을 통해 CCGA의 성능을 측정하고, 5장에서는 실험의 결과를 분석하고 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2.1 센서 네트워크 토폴로지

센서 네트워크의 확장성, 처리능력 및 효율적인 에너지 소모를 위한 토폴로지 제어 기법에 관한 연구가 진행되고 있다[6,7]. 센서 노드들은 통신 범위와 노드간 연결성, 위치정보 등을 고려한 커뮤니케이션 토폴로지 제어 기법을 이용하여 네트워크의 처리 능력을 늘리거나 에너지 소모를 절약할 수 있다. LINT(Local Information No Topology) / LILT(Local Information Link-State Topology)는 이웃 노드들의 상태에 의존적인 지역적 알고리즘으로 네트워크 토폴로지를 형성하기 위해 라디오의 전송 파워를 조절하는 방법을 사용하지만 네트워크의 연결성을 보장하지는 못한다[8]. 원뿔 기반 토폴로지 제어 알고리즘(cone-based algorithm)은 연결성을 보장하는 동시에 에너지 소모를 최소화하는 것을 목적으로 연구되었다[9]. 각 노드는 노드에 도달하기 위한 최소한의 파워로 데이터를 전송하며 전송 파워를 결정하기 위한 방법을 제시하고 있다. ASCENT(Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies)는 노드가 어플리케이션의 요구사항에 기반하여 라우팅에 협력할지를 결정하는 패킷 손실율의 임계값을 이용하여 연결성을 측정하고 토폴로지 제어에 사용한다[10].

본 논문에서 제안하는 CCGA 알고리즘은 데이터 전송의 신뢰성을 보장하고 네트워크의 전력 소모를 분산시키기 위한 기법이다. CCGA는 지역적인 데이터 전송률 정보를 이용하여 데이터의 분산을 위해 라우팅 경로 외에 보조적인 경로를 설정한다. 따라서 노드간 연결성을 보장하며 네트워크의 전체 에너지 소모량의 변화는

없고 에너지 소모의 분산 효과를 가져온다.

2.2 센서 네트워크에서의 혼잡 제어

센서 네트워크에서의 혼잡 제어는 싱크 노드로 전송하는 데이터가 네트워크 대역폭을 초과하지 않기 위해 필요하며, 센서 노드들의 데이터 전송을 줄임으로써 네트워크 수명을 최적화시킬 수 있다[11-13].

CODA(Congestion Detection and Avoidance in Sensor Network)[13]는 혼잡을 감지하기 위한 두 가지 방법을 사용한다. 중간 노드에서 부하량을 측정하고 임계값과 비교하여 상위 노드로 알리는 방법과, 싱크 노드에서 혼잡 발생시 ACK 메시지를 이용해 소스 노드들에 알려 데이터 전송률을 감소시킨다. ESRT(Event-to-Sink Reliable Transport protocol)[3]는 이벤트에 대한 신뢰성을 보장하는 기법으로, ESRT에서 센서 노드들은 내부적으로 관리하는 버퍼를 모니터링하다가 혼잡 발생시 이를 싱크 노드에 알린다. 싱크노드는 혼잡을 감지하면 혼잡 발생을 네트워크의 모든 센서 노드에게 알리고, 각 센서 노드들은 싱크 노드로의 데이터 전송률을 줄임으로써 혼잡을 제어한다. 하지만 혼잡 발생시 각각의 이벤트를 구분하지 않아 네트워크 전체적으로 흐름이 제한되고 다양한 이벤트 발생에 대한 신뢰성을 제공하기 어렵다. 이러한 방법들은 소스 노드의 데이터 전송률을 줄이므로 싱크 노드에서 관심있는 이벤트들에 대한 정보가 부족하게 할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 CCGA는 소스 노드의 데이터 전송률을 줄이는 것이 아니라, 주변 노드들의 전송률을 고려하여 분배함으로써 이러한 문제를 발생시키지 않고 신뢰성을 제공한다.

2.3 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)

유전자 알고리즘은 복잡한 문제 영역을 확률적인 방법으로 탐색하여 해를 도출해내는 방법으로 기계 학습, 로봇 공학, 순회 판매원 문제를 비롯한 최적화 문제 등 다양한 분야에서 사용되고 있다[5].

그림 2는 기본적인 단순 유전 알고리즘의 흐름을 나타낸다. 우선 복잡한 문제의 해를 표현하는 염색체들의 모집단을 만들고 세대를 거듭하여 교차와 변이의 유전자 연산을 수행한 후 각 개체의 적합도를 평가하여 우수한 개체들로 다음 세대를 구성한다.

유전자 알고리즘을 구현하기 위해서는 우선 문제에 맞는 염색체 표현 방법과 교차, 변이와 같은 유전자 연산자의 정의가 필요하며 문제에 맞는 적합도 함수를 설계하는 것이 중요하다. 염색체를 표현하는 방법에는 이진 수 표현, 순열 표현, 실수 표현 등이 있으며, 유전자 연산에는 선택, 교차, 변이, 대치 연산자 등이 있다. 본 논문에서는 센서 노드의 특성을 고려하여 센서 노드들의 노드 번호와 데이터 전송률, 포워딩 전송률을 이용하여 유전자를 표현하였으며, 각 개체의 포워딩 전송률을 새

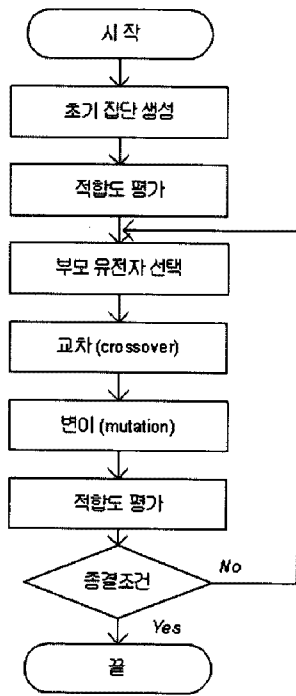


그림 2 단순 유전자 알고리즘

로 할당하거나 이웃 노드와 정보를 교환함으로써 유전 연산을 수행한다.

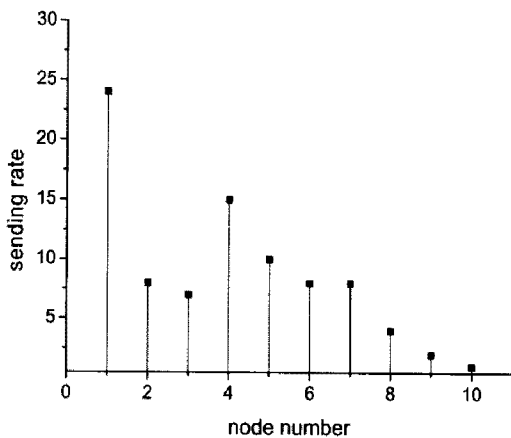
3. 유전자 알고리즘을 이용한 혼잡 제어

이벤트가 발생하여 전송되는 데이터의 양이 증가하는 경우, 싱크 노드와 이벤트 발생지역까지의 라우팅 경로 상에 위치한 노드들간에 혼잡이 발생할 가능성이 높아진다. 센서 네트워크의 혼잡은 패킷 충돌과 릴레이 노드들의 버퍼 오버플로우로 인한 데이터 손실을 발생시킨다. 따라서 네트워크의 신뢰성과 자원의 효율적 사용을 위해 네트워크의 혼잡을 회피하거나 혼잡으로 인해 발

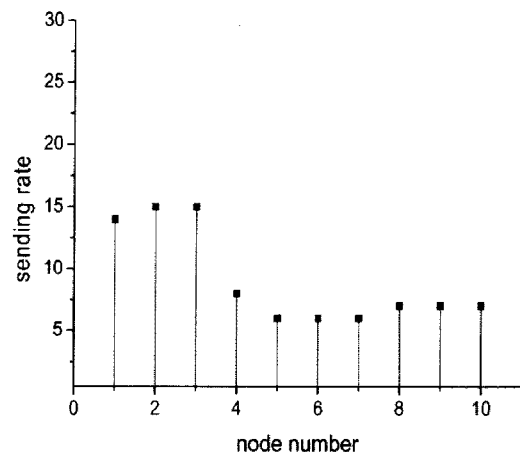
생하는 문제를 복구하는 방법이 필요하다. CCGA는 네트워크의 혼잡으로 인한 문제를 방지하기 위해 트래픽을 분산시키는 방법을 사용한다.

센서 네트워크에서 그림 3의 (a)와 같이 특정 노드에 트래픽이 집중되는 경우, 그림 3의 (b)와 같이 집중된 트래픽을 주변 노드들로 분산시킴으로써 혼잡한 네트워크로 인해 발생할 수 있는 데이터 손실 문제를 해결할 수 있다. 또한 데이터의 전송량이 한 노드에 집중되지 않고 여러 노드에서 분담하여 전송함으로써 네트워크의 수명을 증가시킬 수 있다. CCGA는 네트워크 혼잡 발생 시 상대적으로 데이터 전송이 적은 노드를 선택하여 포워딩함으로써 각 노드들의 전력 소모를 균일하게 하여 센서 네트워크의 수명을 연장시킬 수 있다. 또한 멀티홉 무선 통신의 큐에서 발생할 수 있는 데이터 손실을 줄여 신뢰성 있는 데이터 전송을 보장한다.

CCGA는 주변 노드들의 데이터 전송률을 수집하여 자식 노드들의 데이터 전송을 특정 비율로 다른 이웃 노드로 포워딩 시킨다. 센서 노드들이 밀집도가 높을 경우 자식 노드들의 적당한 포워딩 노드와 전송률을 선택하기 어렵다. 데이터의 집중을 균등하게 분산시키기 위한 포워딩 노드와 전송률을 선택하기 위해 유전 알고리즘을 사용한다. 유전자 알고리즘은 문제의 해를 표현하는 염색체를 정의하고, 염색체 표현 방법을 이용하여 랜덤하게 염색체들의 초기 모집단을 생성한다. 그리고 유전 연산과 적합도 함수를 이용하여 적합도가 우수한 염색체들을 선택하여 점진적으로 개선된 집단을 형성한다. 유전 연산은 염색체를 교차, 변이 시켜 새로운 염색체를 생성하고, 모집단의 염색체들과 새로운 염색체 중 우수한 염색체들로 다시 모집단을 구성한다. CCGA에서는 자식노드와 그 주변노드들의 데이터 전송률을 이용하여 염색체를 정의하고 염색체에 할당된 포워딩 전송률과



(a) 불균형적인 전송률 분포



(b) 균형적인 전송률 분포

그림 3 이벤트 감지에 따른 노드의 전송률 변화 예

이웃 노드들의 정보를 교차, 변이시키는 유전자 연산을 구현하였다. 또한 주변노드들의 데이터 전송률이 고르게 분포될 수 있도록 이벤트 발생지역 노드들의 전송률 평균과 표준편차를 이용한 적합도 함수를 설계하였다.

3.1 CCGA의 동작 방법

CCGA 알고리즘이 동작하기 위해서는 주변 노드들의 전송률에 관한 정보를 저장하고 있어야 한다. 이를 위해 각 노드들은 주기적으로 자신의 정보를 브로드캐스트하고 이웃 노드들은 수신한 정보를 저장한다. 주변 노드들의 전송률 정보를 다시 브로드캐스트 하는 것은 브로드캐스트 스톰을 형성할 수 있으므로 자식 노드들만 브로드캐스트 한다. 즉 CCGA는 두 단계로 브로드캐스트 한다. 따라서 각 노드들은 자신으로부터 2홉 까지의 전송률 정보를 저장한다. 저장된 노드들의 정보는 CCGA 알고리즘 수행시 유전자 연산의 염색체 형성과 각 노드의 적합도를 평가하는데 사용된다.

그림 4는 CCGA 알고리즘의 순차다이어그램을 나타낸다. 센서 노드들은 주기적으로 자신의 데이터 전송률을 확인한다. 트래픽이 집중된 노드(Busy Node, BN)의 데이터 전송률이 증가한 경우 BN의 자식 노드인 CBN(Child node of BN)에게 자신의 전송률 정보를 포함한 상태 메시지를 브로드캐스트 한다. CBN은 저장하고 있던 이웃노드들의 전송률 정보를 BN에게 전송한다. BN은 CBN으로부터 수신한 정보를 이용하여 염색체를 생성하고 유전자 알고리즘을 수행한 후 적합도가 높은 개체, 즉 CBN의 전송률을 주변노드에게 균등하게 분산시킬 수 있는 개체를 선택하여 포함하고 있는 포워딩 정보를 CBN에게 전송한다. CBN은 BN으로부터 수신한 포워딩 정보를 확인하고 할당된 비율로 부모노드 대신 포워딩 노드에 데이터를 전송한다. CBN은 라우팅 경로를 변경하는 것이 아니라, 라우팅의 부모노드는 그대로 유지하며 일정량의 데이터를 할당받은 포워딩 노드로 전송한다.

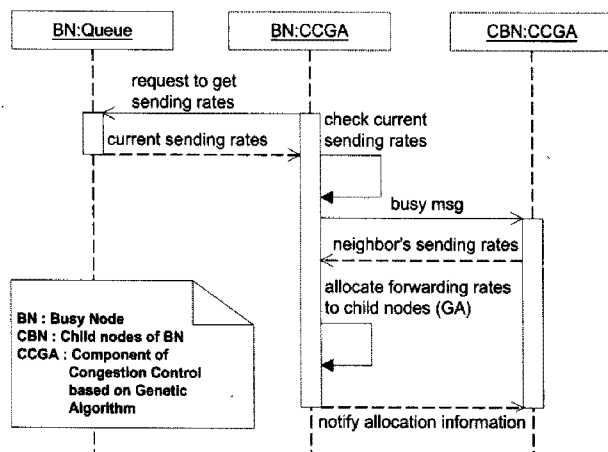


그림 4 CCGA 순차다이어그램

그림 5는 CCGA의 동작 예를 나타낸다. 이벤트가 발생하면 발생지역 주변 노드들은 많은 데이터를 샘플링하여 싱크노드로 전송한다. 증가된 데이터들은 라우팅 경로에 포함되는 노드들을 통해 전송되기 때문에 1번 노드가 병목지점이 된다. 1번 노드는 데이터를 분산시키기 위해 CCGA 알고리즘을 시작하며 자신의 상태를 알리는 메시지를 브로드캐스트를 통해 2~4번 노드들에 전송한다. 그림 5의 (b) 단계에서 2~4번 노드들은 주변 노드들의 전송률 정보를 부모노드인 1번 노드에게 알려준다. 1번 노드가 자신의 이웃 노드들 정보를 이용해 할당할 경우 자식 노드들의 통신 범위 밖일 수가 있으므로 자식 노드들로부터 이웃 노드들의 정보를 수집하여 알고리즘에 사용한다. 그림 5의 (c) 단계에서 1번 노드는 이들 정보를 바탕으로 유전자 알고리즘의 염색체들을 생성하고 유전 연산과 적합도 함수를 통해 염색체들에 포워딩 정보를 할당하고 평가하여 적합도가 높은 염색체를 선택한 다음, 포워딩 정보를 2~4번 노드에 알려준다. 그림 5의 (d) 단계에서 2~4번 노드는 포워딩 정보에 포함된 5~7번 노드에 일부 데이터를 포워딩하여 1번 노드로 집중되는 데이터를 다른 경로로 분산시켜 전송한다.

그림 6은 BN에서 상태를 체크하는 과정과 busy 상태가 되었을 때, 유전자 알고리즘을 이용하여 자식 노드들에 포워딩 노드와 전송률을 할당하는 알고리즘이다. 컴포넌트 초기화 후 상태 검사를 위한 타이머를 시작한다. 주기적으로 타이머에서 fired 이벤트가 발생할 때마다 상태를 검사하고 busy 상태라면 상태 메시지를 broadcast 한다. 그리고 자식 노드들로부터 노드 정보를 받아 유전자 알고리즘을 시작한다. 초기에 자식노드들로부터 수신한 이웃노드 정보를 이용하여 유전자 알고리즘을 이용한 해집합을 생성한다. 그리고 종결조건을 만족할 때까지, 해집합에서 두 개체를 선택하여 교차, 변이, 적합도 평가, 대치 함수 수행을 반복한다. 교차 연산은 염색체간에 이웃 노드들의 정보를 교환하여 새로운 염색체를 생성하고, 변이 연산은 선택된 염색체의 포워딩 전송률을 제한당하여 염색체의 특성을 변화시킨다. 이러한 교차, 변이 연산을 수행한 후 적합도 함수를 통해 새로운 염색체의 적합도를 평가한다. 마지막으로 해집합에서 적합도가 높은 개체를 선택하여 자식 노드로 전송한다. 이와 같은 유전자 함수들을 수행함으로써 세대가 지날수록 해집합에는 적합도가 낮은 개체들은 대치되고 적합도가 높은 개체들만 남게 된다.

3.2 염색체 표현 방법

유전자 알고리즘을 구현하기 위해서는 주어진 문제를 해결하기 위해 개체로 사용되는 염색체를 표현하는 방법이 필요하다. 염색체 표현 방법에는 이진수 표현, 순

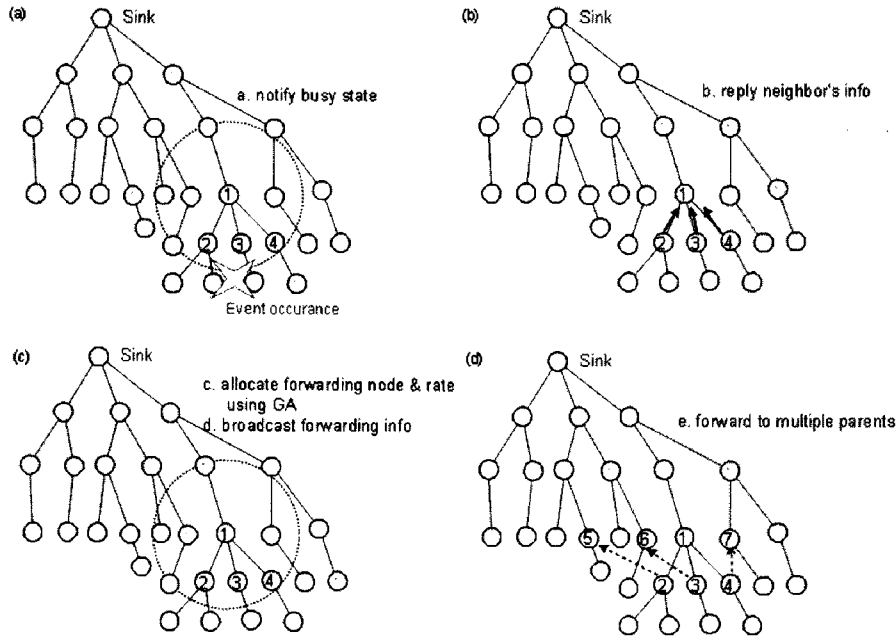


그림 5 CCGA 동작 예

<pre> INIT component CALL Timer.start WHEN timer is fired check state IF state is busy THEN broadcast state message ENDIF WHEN state is busy IF receives all replies from child nodes THEN CALL allocFWRateGA ENDIF </pre>	<pre> TASK allocFWRateGA INIT population DO select 2 chromosomes CALL crossover // generate new chromosome with 2 chromosomes CALL mutation // allocate new forwarding rate CALL evaluate // evaluate new chromosome CALL substitution // replace chromosomes UNTIL meets end condition send the best-fitted chromosome to child nodes </pre>
--	--

그림 6 유전자 알고리즘을 이용한 포워딩 정보 할당 알고리즘

열 표현, 실수 표현 등이 있다. 본 연구에서는 특정 노드에 집중되는 트래픽을 분산하기 위해 다음과 같은 실수 표현 방법으로 염색체를 표현하였다.

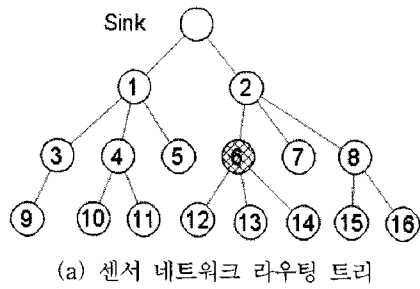
FIT	CID[n]	CR[n]	FR[n]	NID[2][n]	NR[2][n]
-----	--------	-------	-------	-----------	----------

- FIT : 적합도 (FITness)
- CID : 자식노드 번호 (Child node ID)
- CR : 자식노드의 데이터 전송률 (Child node Rate)
- FR : 포워딩 전송률 (Forwarding Rate)
- NID : 이웃노드 번호 (Neighbor node ID)
- NR : 이웃노드의 데이터 전송률 (Neighbor node Rate)

유전자 알고리즘 초기화시에 저장된 이웃 노드들의 정보를 바탕으로 위와 같은 형태로 염색체를 생성하고 해집합을 구성한다. FIT은 적합도 함수를 통해 계산되며 이 적합도를 통해 최적의 염색체를 선택하고 선택된 염색체의 정보를 자식 노드들에게 전파함으로써 자식 노드

의 트래픽을 주변 노드들로 균등하게 분배할 수 있다. CID와 CR은 자식 노드의 노드 번호와 데이터 전송률을 나타내며 하나의 염색체는 모든 자식 노드들에 대한 정보를 포함한다. NID, NR은 자식 노드의 이웃 노드들로 2홉의 이웃 노드들에 대한 경로를 포함하여, 각 염색체는 같은 자식 노드에 대해 다른 이웃 노드들의 정보를 포함할 수 있어 많은 해집합을 형성할 수 있다. FR은 현재 데이터 전송률과 설정된 임계값의 차이를 이용하여 할당하며, 다양한 FR 할당으로 NID, NR과 함께 많은 해집합을 형성하는데 사용된다. 또한 FR은 세대를 거듭하는 유전자 알고리즘의 변이 연산을 통해 재할당되고 적합도를 재평가받아 적합도가 높게 진화한다.

그림 7(a)와 같이 센서 네트워크 라우팅 트리가 구성되어 있고, 노드 6에서 CCGA의 유전자 알고리즘이 수행될 경우, 그림 7(b)와 같이 염색체를 표현할 수 있다.



(a) 센서 네트워크 라우팅 트리

FIT	CID	CR	FR	NID1	NR1	NID2	NR2
-	12	5	2	5	6	4	10
	13	10	4	4	8	3	6
	14	7	3	7	4	8	7

(b) 탐색체 구조

그림 7 유전자 알고리즘의 탐색체 예제

노드 12, 13, 14는 노드 6의 자식노드이므로 (b)와 같이 하나의 탐색체는 자식 노드에게 할당하는 포워딩 전송률과 자식노드의 전송률, 이웃 노드들의 전송률에 대한 정보를 포함한다. 자식노드 12에 대해서는 노드 12의 이웃노드인 노드 5, 노드 5의 이웃노드인 노드 4에 대한 정보를 가지고 있어 자식 노드의 2홉 거리의 전송률 분포를 고려하여 알고리즘이 수행될 수 있도록 표현하고 있다. 노드 13, 14에 대해서도 마찬가지로 2홉 거리의 이웃노드에 대한 정보를 포함하고 있다. 각 자식 노드에 대해서 포워딩 전송률(FR) 필드를 가지고 있으며 FR은 해집합 형성시에 할당되며 변이 연산을 통해 재할당 된다. FIT은 적합도를 나타내며 적합도 함수 실행 후 할당되며 이 적합도를 이용하여 우성의 탐색체를 선택한다.

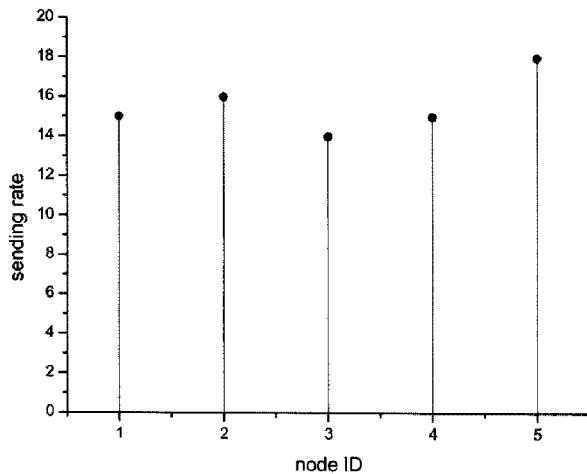
3.3 적합도 함수

본 연구에서 제안하는 CCGA 알고리즘은 네트워크 토폴로지를 변경하여 특정 노드에 집중된 트래픽을 분산하고 네트워크 혼잡으로 인한 데이터 손실을 방지하는데 있다. 따라서 유전자 알고리즘의 적합도 함수는 이러한 목적을 달성할 수 있도록 구현되어야 하며 다음의 식 (2)와 같이 설계되었다

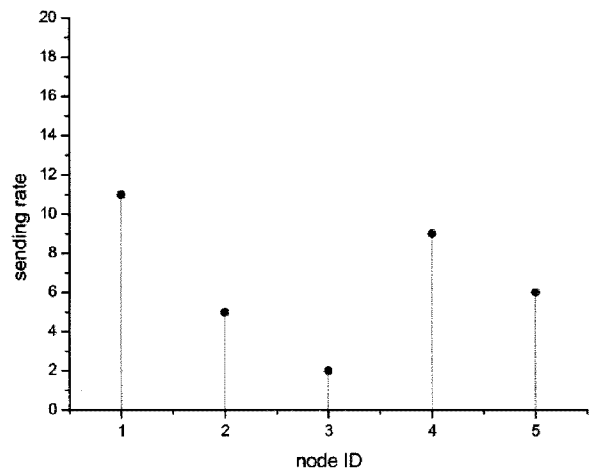
$$ANR = \sum_{i=0}^{n-1} (NR_i + FR) / n \quad (1)$$

$$Fitness^{-1} = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \{ANR - (NR_i + FR)\}^2 / n} + ANR \quad (2)$$

식 (1)의 ANR (Average of Neighbor node's Rate) 은 해집합의 한 개체에 포함된 이웃노드들의 데이터 전송률과 새로 할당된 포워딩 전송률의 합의 평균을 나타내며, 식(2)에서 적합도는 ANR 을 이용하여 계산한 표준편차와 ANR 의 합의 역수이다. 적합도는 각 노드들의 전송률의 평균과 표준편차에 반비례한다. 표준편차가 크다는 것은 데이터 전송률이 고르게 분산되지 않았음을 의미하며, ANR 이 큰 것은 전체적으로 전송해야할 평균 데이터양이 많음을 나타낸다. 균등한 데이터 분배를 위해 표준편차만을 적합도 함수로 사용할 경우, 노드들에 할당된 전송률은 작고 표준편차가 큰 개체와 할당된 전송률은 많고 표준편차가 작은 개체가 있을 경우 후자가 선택될 확률이 높다. 이는 데이터 전송이 많은 노드들에 데이터를 포워딩하는 부정적인 현상을 나타낼 수 있다. 그림 8은 유전 연산을 실행한 후 탐색체가 표현하는 주변 노드의 전송률 분포의 예를 나타낸다. (a)



(a) 고른 전송률 분포를 갖는 경우



(b) 낮은 전송률 분포를 갖는 경우

그림 8 노드들의 전송률 분포의 예

의 평균은 15.6, 표준 편차는 1.5이고 (b)의 평균은 6.6, 표준 편차는 3.5이다. 이러한 경우 균등한 분배를 위해 표준 편차만을 이용해 적합도를 평가할 경우 표준편차가 작은 (a)가 적합도가 높은 개체가 된다. 전체적으로 전송률이 높고 편차가 작은 정보를 갖는 검색체가 높은 적합도를 나타내어, 결과적으로 주변 노드의 트래픽이 불균등해질 수 있다. 반대로 평균만을 고려하여 적합도를 평가할 경우, 평균적인 전송률은 낮지만 편차가 큰 정보를 갖는 검색체가 높은 적합도를 갖을 수 있다. 따라서 전송률의 평균과 표준편차를 함께 이용함으로써 이와 같은 문제를 피하고 데이터의 공정한 분배를 이룰 수 있다.

3.4 유전 연산

유전 알고리즘에서 교차, 변이 연산의 유전 연산을 반복적으로 수행하고 해집합의 검색체들과 적합도를 비교하여 적합도가 높은 검색체를 보존함으로써 해집합 내의 검색체들은 점진적으로 적합도가 높아진다. 그림 9, 10은 CCGA에 사용된 교차, 변이 연산을 나타낸다.

교차 연산자는 두 부모의 검색체를 부분적으로 바꾸어 새로운 검색체를 생성하는 연산이다. CCGA에서는 그림 9와 같이 해집합에서 두 부모 검색체를 선택하고 검색체의 각 원소 중 임의의 자식 노드에 관한 정보를 교환하여 새로운 검색체를 생성한다. 검색체는 자식노드(CID, CR)와 자식노드의 이웃노드(NID, NR)들에 관한 정보를 쌍으로 가지고 있는데, 이 정보를 다른 검색체와 교차한다.

변이 연산자는 검색체를 확률적으로 변화시키는 연산이다. 변이 연산이 없을 경우 해집합 이외의 공간에서 해를 찾을 수 없어 초기 해집합에 최적의 해가 없을 경

우 적당한 해를 구하기 어렵다. CCGA에서는 그림 10과 같이 검색체1의 포워딩 전송률(FR)을 재할당하여 FR' 전송률을 갖는 검색체 1' 개체로 변이시킴으로써 변이 연산을 수행한다. 검색체는 자식노드와 그 이웃노드들의 정보를 가지고 있고 유전자 알고리즘에서 할당된 FR을 포함하고 있다. FR은 집중된 트래픽을 분산하기 위해서 자식 노드들의 전송률을 주변 노드들로 분산하기 위해 자식 노드들에 할당하는 값이다. FR이 할당되면 자식 노드들은 부모 노드에게 전송하던 트래픽 중 FR 만큼을 선택된 다른 노드로 전송하게 된다. 포워딩 노드로 선택된 이웃 노드들은 FR 만큼의 트래픽을 추가로 부담해야 한다. 이 FR을 어떻게 할당하는가에 따라서 검색체에 포함되어있는 주변 노드들의 전송률이 결정되며 변이 연산을 통해 적합도가 변하게 된다.

4. 실험 및 성능 평가

4.1 실험 환경 및 시나리오

CCGA의 성능 평가를 위해 TinyOS와 TOSSIM 시뮬레이터를 사용한 모의실험을 수행하였다. TinyOS는 버클리 대학에서 개발된 센서 네트워크를 위한 컴포넌트 기반의 운영체제이다. TOSSIM은 Java와 Tython을 이용하여 동적인 시뮬레이션이 가능한 TinyOS를 기반으로 한 시뮬레이터이다.

시뮬레이션은 100개의 노드를 그리드 형태로 배치하였고 트리 구조의 경로를 설정하는 라우팅 컴포넌트를 사용하여 실험하였다. CCGA의 혼잡 제어를 통한 신뢰성 확인을 위해 CSMA 기반의 B-MAC 프로토콜을 사용하였으며 무선 통신에서 채널 에러는 없다고 가정한다. 패킷 손실의 발생은 라우팅을 위한 큐 오버플로우로

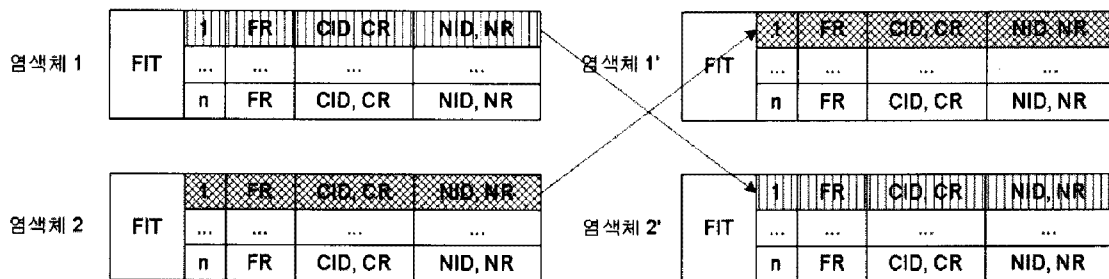


그림 9 교차 연산

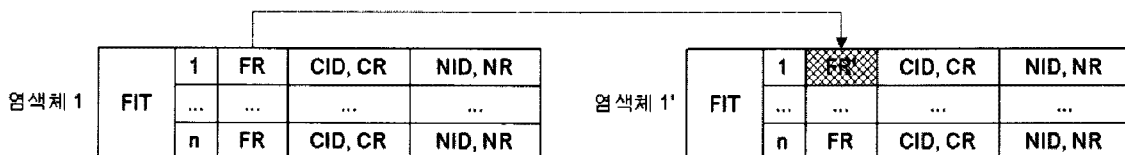


그림 10 변이 연산

인해 발생한다. 센서 노드의 어플리케이션은 샘플링한 데이터를 멀티 홉 통신을 통해 싱크노드(0번 노드)로 전송한다. 멀티 홉 통신을 위한 라우팅은 TinyOS에서 제공하는 멀티 홉 라우팅 프로토콜인 MINT[15]를 사용하였다. 그리고 제안 알고리즘을 구현한 CCGA 컴포넌트를 어플리케이션에 연결하여 실험하였다[14].

CCGA 알고리즘의 트래픽 분산 효과를 알아보기 위하여 라우팅 트리의 최하위 레벨 지역에서의 이벤트 발생을 가정하였다. 이벤트가 발생하게 되면 이벤트로부터 정밀한 정보를 얻기 위해 많은 양의 데이터가 싱크 노드로 전송되고 혼잡이 발생하게 된다. 실험을 통해 100개의 노드를 그리드로 배치했을 경우 상위 노드들에서 혼잡이 발생할 수 있는 데이터 전송률을 산출하여 실험에 이용하였다. 시뮬레이션은 앞서 설명한 에너지 효율적인 모니터링 어플리케이션의 시나리오를 따라서 데이터 전송률은 최초 초당 0.25개의 패킷을 전송하도록 하고, 이벤트 감지에 따른 데이터 전송률의 증가를 나타내기 위해 시뮬레이션 시작 후 약 50초에 하위 노드들의 데이터 전송률이 증가하도록 하였다. 본 논문에서 제안하는 CCGA의 성능을 평가하기 위해서 MINT, CODA와의 성능을 비교 분석하였다.

4.2 평가 요소

성능을 확인하기 위해 각 센서 노드들의 전송 효율성(η)과 형평성(ϕ)을 측정하였다. 전송 효율성은 식 (3)과 같이 싱크 노드가 수신한 패킷(u)들이 도착할 때 까지 전송된 홉수를 각 노드들에서 생성해서 전송한 패킷과 중간 노드로서 전달한 패킷들의 수의 합, 즉 네트워크 내 데이터 패킷의 전달 횟수로 나눈 값이다. 전송 효율성은 자원 제약적인 센서 네트워크의 제한된 대역폭을 얼마나 효율적으로 사용했는가를 나타낸다.

$$\eta = \frac{\sum_{u \in U} \text{hops}(u)}{\sum_{n \in N} (\text{relay}(n) + \text{create}(n))} \quad (3)$$

노드들의 균등한 데이터 전송을 확인하기 위해 형평성을 측정하였다. 형평성은 식 (4)와 같이 N 개의 노드가 있을 때 각 노드들의 전송률(r_i)을 이용하여 계산한다. 실험에서는 라우팅 트리의 동일 깊이에 있는 노드들 간의 형평성을 측정하여 CCGA가 집중된 트래픽을 분산시켜 센서 노드들이 어느 정도 균등한 에너지 소모를 하는지 알아보았다.

$$\phi = \frac{(\sum_{i=1}^N r_i)^2}{N \sum_{i=1}^N r_i^2} \quad (4)$$

4.3 전송 효율성

전송 효율성은 싱크 노드에서 수신한 패킷의 전달된

홉 수와 네트워크에서 패킷이 전달된 횟수의 비로 나타낸다. 따라서 낮은 전송 효율성은 센서 노드들이 많은 전송을 하였지만 데이터가 싱크 노드로 전송되지 않았음을 나타낸다. 이는 센서 노드들이 불필요한 중계 전송을 시도하여 에너지 낭비가 빈번히 발생하였음을 의미하므로 자원 제약적인 센서 네트워크에서는 전송 효율성을 개선할 필요가 있다.

그림 11은 시간에 따른 전송 효율성의 변화를 나타낸다. 라우팅이 형성된 이후, 데이터량이 증가하는 50초 이전까지 CCGA, CODA, MINT의 전송 효율이 거의 1인 것을 볼 수 있다. 하지만 전송량이 증가한 이후, CCGA와 CODA의 경우 0.8 이상의 전송 효율을 나타내지만 MINT는 0.65의 전송 효율을 보인다. MINT는 일부 노드에 트래픽이 집중되어 지속적인 큐 오버플로우가 발생하므로 낮은 전송 효율을 나타낸 것으로 분석된다. CODA는 혼잡 발생 시 샘플링 비율을 줄이기 때문에 전송 효율이 높게 나타난다. 하지만 그림 12와 같이 싱크 노드에서의 데이터 수신량이 현저히 줄어들어 정확한 정보의 수집이 어려우며, 센서 노드들의 원래 임무에 지장을 줄 수 있다. CCGA는 집중되는 트래픽을 이웃 노드들에게 분산함으로써, MINT에 비해 낮은 오버플로우를 나타내었다. 또한 싱크 노드에서의 수신 패킷이 많은 것은 효율적이며 신뢰성 있는 데이터 전송이 이루어짐을 의미한다.

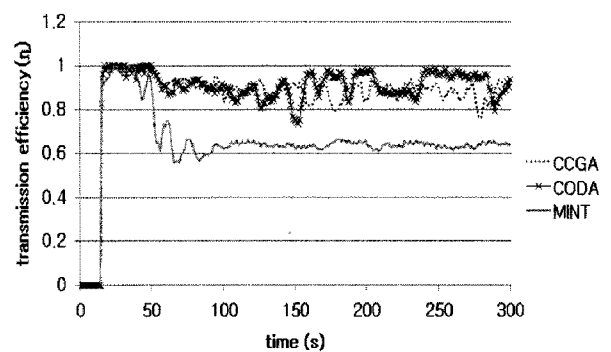


그림 11 전송 효율성

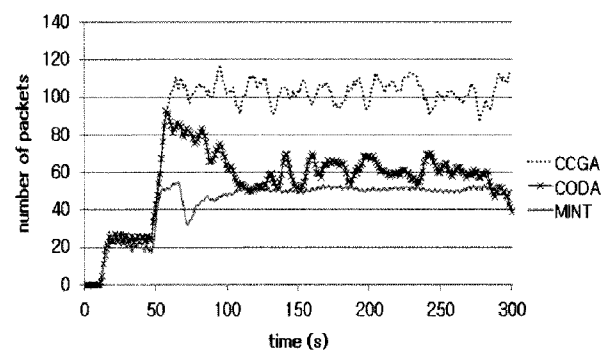


그림 12 싱크 노드에서의 패킷 수신량

4.4 전송 형평성

전송 형평성은 라우팅 트리에서 이벤트가 발생한 지역의 상위 레벨에 있는 노드들의 형평성을 측정하였다. 그림 13은 시간에 따른 전송 형평성의 변화를 나타낸다. 초기에는 라우팅 경로에 따라 형평성의 수치가 다르게 나타난다. 50초에 이벤트가 발생하여 데이터가 증가하게 되면, 증가된 데이터가 일부 노드에 집중되어 형평성이 낮아져 CODA와 MINT의 경우 각각 0.23, 0.19의 형평성을 나타낸다. CCGA는 이웃 노드들의 전송량을 고려하여 데이터를 분산시키므로 형평성이 증가하여 평균 0.43의 형평성을 나타낸다. 다른 방법에 비해 높은 수치를 나타내지만 집중된 경로의 인접 노드들 중에 포워딩 노드를 선택하므로 절대적으로 높은 형평성을 나타내지는 않는다. 만약 형평성 향상을 위해 싱크 노드까지 먼 경로를 선택하게 된다면 경로 변경에 따른 추가적인 에너지 소모가 발생하게 된다.

그림 14는 시뮬레이션 종료 후 각 센서 노드들의 패킷 전송에 대한 전력 소모량의 분포를 나타낸다. TOS-SIM에서 제공하는 파워 프로파일을 이용하여 패킷 송수신에 따른 전력 소모량을 측정하였다[16]. 각 축이 만나는 왼쪽 부분이 싱크 노드가 위치한 곳이며, 오른쪽 부분이 이벤트가 발생하는 지역으로 하위 노드들이 위치한 부분이다. 이벤트 발생에 따라 증가된 데이터가 집중된 경로에 전력 소모가 심한 것으로 나타난다. MINT의 경우 4000~6000mA의 에너지 소모량을 나타내는 노드들이 다른 방법들에 비해 많이 나타나 에너지 소모가 편중됨을 알 수 있다. CODA는 샘플링 레이트의 조절로 전체적으로 낮은 에너지를 나타낸다. 하지만 낮은 샘플링 레이트는 센서 네트워크를 통한 데이터 수집이 원활하지 못해 정확한 정보 분석을 어렵게 할 수도 있다.

CCGA는 집중된 경로 주변에 2000~4000mA으로 MINT에 비해 상대적으로 적은 에너지 소모를 갖는 노드들이 많이 분포하였다. 트래픽이 집중된 경로 외에는 노드들의 경우에도 트래픽이 분산되어 MINT 보다

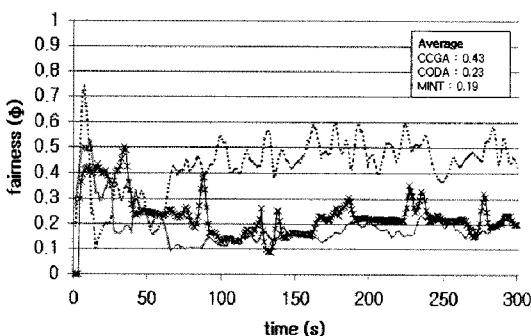
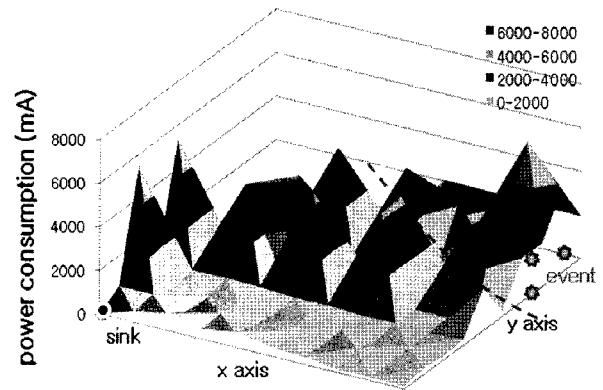
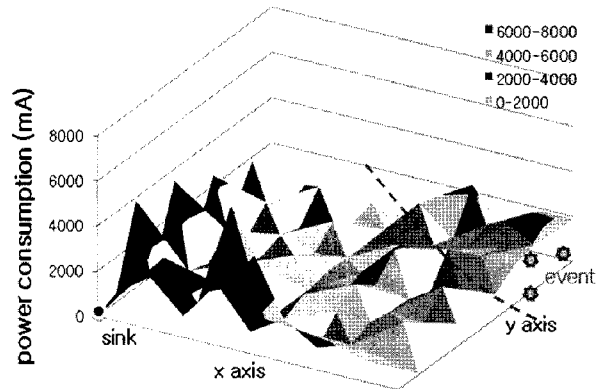


그림 13 전송 형평성

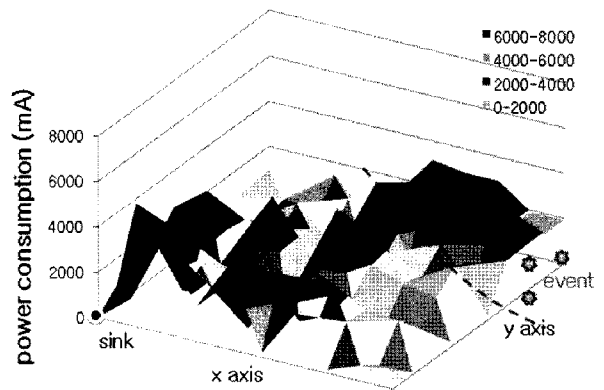
많은 에너지 소모를 나타내었다. 그림 12의 패킷 수신율 그래프에서 살펴보았듯이 CODA에 비해 2배 가까운 수신율을 나타내기 때문에 전체적인 에너지 소모량이 많았다. 이러한 에너지 소모 편차의 감소는 센서 네트워크 특정 노드들의 에너지 소모 집중을 방지하여 센서 네트워크의 수명을 연장시키는데 기여한다. 또한 CODA와 같이 전송률을 줄이는 정책을 사용하지 않기 때문에 이벤트 분석을 위해 필요한 충분한 데이터도 확보할 수 있다.



(a) MINT



(b) CODA



(c) CCGA

그림 14 전력 소모량의 분포

5. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 센서 네트워크에서 지역적인 이벤트 감지 등에 의해 특정 노드에 트래픽이 집중되는 경우, 집중된 트래픽을 주변 노드들로 분산시키는 CCGA 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 성능을 확인하였다.

CCGA는 트래픽 분산을 위한 포워딩 노드를 선택하기 위해 유전자 알고리즘을 사용하였다. 유전자 알고리즘을 위해 주변 노드들의 데이터 전송률을 이용하여 염색체를 표현하였으며, 염색체간에 자식 노드들의 정보를 교환하거나 포워딩 전송률을 재할당하는 교차, 변이 연산을 정의하였다. 주변 노드들의 데이터 전송률과 할당된 포워딩 전송률의 합에 대하여 평균과 표준편차를 구하여 이를 적합도 함수에 적용하였다.

성능 평가를 위해 전송률의 형평성, 효율성 및 전력 소모량을 측정하였다. 실험 결과에서 같은 레벨에 있는 센서 노드들의 전송률이 변화하면서 평균적으로 비슷한 수준의 전송률을 유지하는 것을 나타내었다. 또한 MINT, CODA와 같은 다른 방법에 비해 효율성은 15%, 형평성은 20~24%의 높은 성능을 나타냄을 확인하였다. ESRT, CODA와 같은 방법은 데이터 전송량을 줄임으로써 혼잡을 제어하기 때문에 싱크 노드의 수신량이 감소하는 문제가 있지만 결과에서 CCGA는 효율성과 함께 데이터 수신량을 유지하는 것을 확인하였다. 이로부터 CCGA가 센서 네트워크에 혼잡 발생 시 집중된 트래픽을 분산시켜 노드 간 전송에 따른 에너지 소모의 형평성을 향상 시키며 노드간 연결성을 확보하여 안정적인 전송을 함으로써 센서 네트워크의 신뢰성 향상에 기여함을 알 수 있다.

현재 CCGA는 센서 노드들의 전송률만을 이용하여 적합한 염색체를 선택하지만, 센서 네트워크는 제한된 자원을 가지는 특성이 있으므로 센서 노드들의 잔여 전력을 파라미터로 사용한 적합도 함수를 향후 연구할 것이다. 또한 멀티미디어 데이터의 전송이 필요한 센서 네트워크에서 멀티미디어 데이터의 특성을 고려한 혼잡 제어 기법에 관한 연구를 진행할 것이다.

참고 문헌

- [1] I.-F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol.38, pp.393-422, March 2002.
- [2] J. Polastre, R. Szewczyk, C. Sharp, D. Culler, "The Mote Revolution: Low Power Wireless Sensor Network Devices," in *Proceedings of Hot Chips 16: A Symposium on High Performance Chips*, August 2004.
- [3] Y. Sankarasubramaniam, O. B. Akan, and I. F. Akyildiz, "ESRT: Event-to-Sink Reliable Transport for Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp.177-188, June 2003.
- [4] C. Wang, B. Li, K. Sohraby, M. Daneshmand, and Y. Hu, "Upstream Congestion Control in Wireless Sensor Networks Through Cross-Layer Optimization," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.25, 2007.
- [5] D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989.
- [6] Y. Wang, "Topology control for wireless sensor networks," *Wireless Sensor Networks and Applications*, Springer, 2008.
- [7] V. Gupta and R. Pandey, "Data fusion and topology control in wireless sensor networks," 2007.
- [8] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, "Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp.404-413, March 2000.
- [9] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and Y. Wang, "Distributed topology control for wireless multihop ad hoc networks," *Proceedings of the Twenty First International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, pp.1388-1397, 2001.
- [10] A. Cerpa and D. Estrin, "ASCENT: Adaptive self-configuring sensor network topologies," In *Twenty First International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, June 2002.
- [11] F. Stann and J. Heidemann, "RMST: Reliable data transport in sensor networks," *Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, May 2003.
- [12] C. Wan, A. Campbell, and L. Krishnamurthy, "PSFQ: A reliable transport protocol for wireless sensor networks," *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, September 2002.
- [13] C. Wan, S. Eisenman, and A. Campbell, "CODA: Congestion detection and avoidance in sensor networks," *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, November 2003.
- [14] <http://tinyos.net>
- [15] A. Woo, T. Tong, and D. Culler, "Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks," *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pp.14-27, 2003.
- [16] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, D. Culler, "TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire tinyOS

applications," *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, November, 2003.



박 충 명

1998년~2005년 강원대학교 정보통신공학과 학사. 2005년~2007년 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 석사. 2007년~현재 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 박사과정. 관심분야는 멀티미디어 시스템, 센서네트워크, 병렬처리



이 좌 형

1994년~2003년 강원대학교 정보통신공학과 학사. 2003년~2005년 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 석사. 2005년~현재 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 박사과정. 관심분야는 멀티미디어 시스템, 센서네트워크



정 인 범

1985년 고려대학교 전자공학과 학사. 1985년~1995년 (주)삼성전자 컴퓨터 시스템 사업부 선임 연구원. 1992년~1994년 한국과학기술원 정보통신공학과 석사. 1995년~2000년 8월 한국과학기술원 전산학과 박사. 2001년~현재 강원대학교 컴퓨터정보통신공학 전공 교수. 관심분야는 운영체제, 소프트웨어 공학, 멀티미디어 시스템, 센서네트워크