무선 센서 네트워크에서 자연계 모방 기술

박재성
수원대학교

요 약

자연계 모방 기법은 무선 센서 네트워크 설계를 위한 핵심 알고리즘 개발에 광범위하게 이용되어 왔다. 본 고에서는 자연계 모방 기술을 적용 형태에 따라 최적의 무선 센서 네트워크 설계를 위한 최적화 문제 해결 도구로 이용되는 경우와 자연계 현상을 센서 노드가 모방하여 적응성 있는 분산 제어 알고리즘 개발에 적용되는 경우로 구분하고 각각의 연구 동향을 살펴본다. 또한 본 고에서는 무선 센서 네트워크의 설계 제약 사항을 고려하여 성능 평가 방법 관점에서 무선 센서 네트워크에 적용된 자연계 모방 기술들을 분석하고 향후 연구 방향을 제시한다.

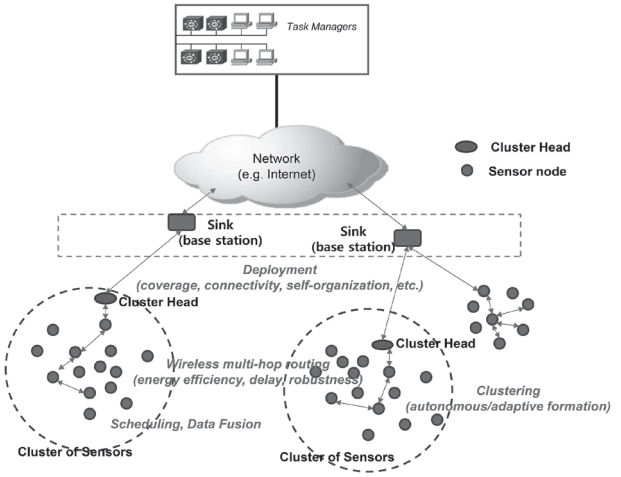

그림 1. 무선 센서 네트워크의 구조 및 설계 이슈

Ⅰ. 서 론

무선 센서 네트워크 (WSN: Wireless Sensor Network)는 지역적으로 광범위하게 포설된 자율적 센서 노드들의 분산적 협업을 통해 센서 노드가 포설된 지역의 물리적 혹은 환경적 조건을 감시하기 위해 사용되며 주기적인 보고, 중요한 사건의 발생 감지 등과 같은 다양한 응용 서비스를 제공할 수 있다[1]. WSN은 지원하는 응용 서비스에 따라 다양한 형태로 구성될 수 있으나[2], 이들 모두 센서 노드가 정보를 취득한 후 무선 다중 홉 전달 방식에 의해 싱크(sink) 노드로 취득한 정보를 전달한다는 공통점을 가진다 〈그림 1〉. WSN 응용 서비스는 시기 적절한 메시지 전달과 신뢰성 있는 정보 전송을 요구한다. 그러나 WSN을 구성하는 센서 노드는 가용 자원이 제한적이며 이들 사이의 통신 환경도 가변적이다. WSN의 제약 사항과 이로 인한 설계 요구사항은 다음과 같다 〈그림 2〉.

- 에너지 제약: 센서 노드는 베터리에 의존하여 동작하므로 가용 에너지가 제한적이며 일단 포설되면 재충전이 매우 어렵다. 따라서 센서 노드는 불필요한 통신 및 센싱을 최소화해야 한다.
- 센서 노드의 물리적 분포: 센서 노드들은 광범위한 지역에 상대적으로 조밀하게 포설되므로 전역 (global) 정보가 요구되는 알고리즘은 매우 높은 통신 비용 및 관리 비용을 요구한다. 이들 알고리즘이 효과적으로 동작하기 위해서는 센서 노드들에 저장된 전역 정보가 동시성과 일관성을 가져야 한다. 그러나 가변적인 통신 환경과 전역 정보가 네트워크를 통해 전파되는 시간 차이로 인해 모든 센서 노드들이 동일한 시간에 동일한 전역 정보를 가지고 있기 어렵다. 따라서 WSN을 효율적으로 구성하고 제어하기 위해서는 이웃한 센서 노드들 사이의 메시지 교환을 통해 획득한 지역 (local) 정보만을 이용하여 센서 노드가 자율적으로 행동 방식을 결정하는 분산 알고리즘이 필요하다.
- 토폴로지 변화: 센서 노드들은 오동작을 일으킬 수 있으며 에너지 방전 등으로 인해 네트워크에서 이탈 할 수 있다. 또한 일부 센서 노드들은 시간에 따라 위치가 이동할 수 있으며 고정된 통신 인프라가 없으므로 센서 노드 사이의 통신은 이들 사이에 공유되는 무선 자원의 경합을 통해 이루어진다. 이로 인해 센서 노드 사이의 링크 품질은 가변적이며 신뢰성이 낮고 비대칭적인 특성을 보인다. 따라서 WSN 설계에 적용될 알고리즘들은 이와 같은 동적인 토폴로지 변화에도 정상 동작할 수 있도록 적응성이 있고 강건(robust)해야 한다.

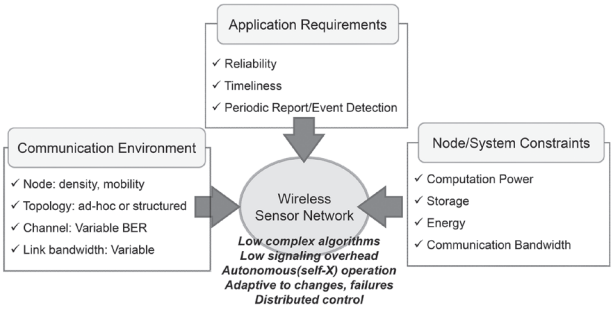

그림 2. 무선 센서 네트워크의 설계 제약 사항

이처럼 WSN은 네트워크를 구성하는 노드들의 자율적인 동작에 의해 분산적으로 제어되어야 하며 네트워크 환경 변화에도 강건성과 적응성을 가져야 한다. 이에 따라 자연계 생명체의 특성을 모방한 자연계 모방 기술이 WSN의 다양한 설계 문제를 해결할 것으로 기대되고 있다. 자연계 모방 기술은 다양한 생명체의 행동 양식이나 생체 조직의 제어 방식을 관찰하고 모델링하여 공학적 문제 해결에 적용한 것이다[3][4][5]. 자연계의 생명체는 적자생존의 원칙에 따라 종(species) 의 유지를 위해 끊임없이 환경에 적응해 왔다. 생명체를 구성하는 세포 혹은 생물 집단을 구성하는 개체들이 간단한 동작 원칙에 따라 정보가 제한적으로 제공되며 동적으로 변화하는 환경에 자율적이고 독립적으로 반응하더라도 세포들의 집합으로 발현된 생명체 혹은 개체들의 집단 측면에서는 바람직한 특성을 나타낸다. 이와 같은 특징은 WSN의 운용 환경과 설계 요구 사항과 유사성이 크며 이로 인해 자연계 모방 기술은 다음과 같은 WSN의 다양한 설계 문제에 적용되어 왔다 〈그림 1〉.

- **노드 포설 문제:** WSN은 특정 지역의 정보 획득을 위해 포설되므로 센서 노드는 감시할 지역을 모두 포함할 수 있도록 포설되야 한다. 또한 데이터는 센서 노드들을 통해 전달되므로 임의의 센서 노드에서 싱크 노드까지 연결이 보장되어야 한다.
- **노드의 위치 파악 문제:** 위치 파악은 WSN의 주요 서비스 중에 하나이며, 위치 정보는 센서 노드와 싱크 노드 사이의 효율적인 라우팅 프로토콜 설계 등과 같은 다른 주요 기법들의 기반이 된다. 따라서 센서 노드의 정확한 위치를 효율적으로 파악할 수 있어야 한다.
- **클러스터 구성 문제:** 센서 노드들이 클러스터를 구성하여 클러스터 헤드 (CH: Cluster Head)라는 특정 노드를 선정한 후 CH에게 정보를 송신하면 CH가 싱크 노드로 정보를 전달함으로써 불필요한 정보 전송을 방지하고 다중 홉 전송에 의한 에너지 소모와 처리율 감소 문제를 해결할 수 있다. 따라서 센서 노드가 분산적으로 클러스터를 구성할 수 있어야 하며 에너지 효율적으로 CH를 선정할 수 있어야 한다.
- **데이터 합성 문제:** 다수의 센서 노드에 의해 측정된 정보는 보다 정확한 상황 파악 또는 통신 부하 감소를 위해 CH 혹은 싱크 노드에서 결합된다. 센서 노드들이 대규모로 포설된 경우 매우 많은 양의 데이터가 발생되므로 중복된 데이터 혹은 신뢰성이 낮은 데이터의 제거 등을 통한 효과적인 데이터 수집 방법이 요구된다.
- **노드의 스케쥴링 문제:** 센서 노드는 에너지 소모를 줄이기 위해 활성상태와 휴면 상태를 반복한다. 그러나 휴면 상태의 센서 노드로 인해 데이터 전송 등에 장애가 발생 될 수 있다. 따라서 센서 노드가 정확한 시간에 올바른 동작을 취할 수 있도록 예정할 수 있어야 한다.

자연계 모방 기술은 WSN의 다양한 설계 문제에 광범위하게 적용되어 이들 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 그러나 WSN에 이용된 자연계 모방 기술에 대한 적용 방식에 따른 분류와 비교 및 성능 분석 방법에 있어서의 문제점들에 대한 논의는 거의 이루어지고 있지 않다. 따라서 본 고에서는 WSN에 적용된 자연계 모방 기술들을 적용 형태에 따라 최적화 문제의 해결도구로 이용되는 경우와 자연계 개체의 동작을 센서 노드가 모방하여 동작함으로써 WSN을 분산적으로 제어하기 위한 경우로 구분하여 살펴본다. 또한 본 고에서는 WSN의 설계 제약 사항을 고려하여 성능 평가 방법 측면에서 현재까지 자연계 모방 기술을 WSN에 이용한 연구들을 분석하고 향후 연구 방향을 제시한다.

Ⅱ. 본 론

1. 최적화 문제의 해결 도구로서의 자연계 모방 기술

센서 노드 포설, 노드 위치 측위, 클러스터링, 데이터 합성, 스케쥴링 등과 같은 WSN 설계에 필요한 문제들은 종종 최적화 문제로 정의된다. 그러나 센서 노드 수의 증가로 인해 문제의 크기가 커질수록 기존 최적화 기법들이 해를 얻기 위한 계산 복잡도는 기하급수적으로 증가한다. 따라서 자원 제약이 많은 센서 노드에서 최적화 알고리즘 구현을 위해서는 메모리의 양이나 프로세서의 처리 능력과 같은 연산에 필요한 자원양은 작고 응용 서비스의 요구 사항을 만족할 수준의 결과를 얻을 수 있는 최적화 기법이 필요하게 되었고 이에 따라 자연계 모방을 통한 메타휴리스틱 (metaheuristic) 최적화 기법들이 각광을 받고 있다 [6]. 〈그림 3〉과 같이 이들 기법들은 대부분 인구 (population) 기반 진화(evolutionary) 알고리즘 들이며, 이들 중 생

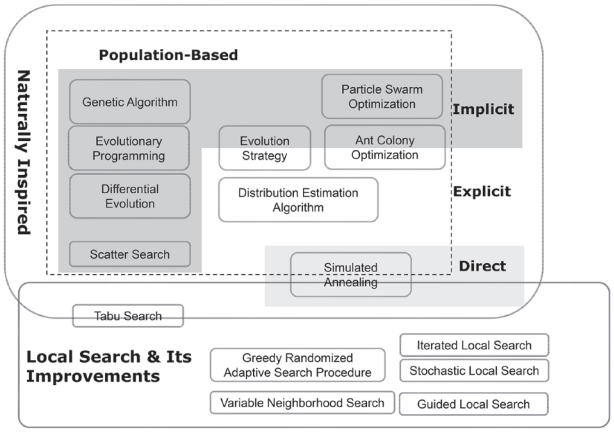

그림 3. 메타휴리스틱(Metaheuristic) 최적화 알고리즘의 분류

물의 진화를 모델링 한 유전자 알고리즘 (GA)과 새나 물고기 등이 무리를 짓는 특성을 이용한 PSO (Particle Swarm Optimization), 개미집단의 포식행태를 적용한 ACO(Ant-Colony Optimization)가 다양한 분야에 적용되어 왔으며 최근 제안된 뻐꾸기의 번식 전략을 모방한 cuckoo 알고리즘과[7] 크릴새우 떼의 집단적 행동을 모방한 krill herd 알고리즘을[8] 적용하기 위한 노력이 진행 중이다.

〈표 1〉은 WSN에 적용된 자연계 모방 최적화 기술들을 WSN 설계에 적용된 주제에 따라 분류하고 각 기법들의 적용 형태와 성능 평가 방법을 보여준다. 표 1에서 보는 바와 같이 유전자 알고리즘과 PSO 알고리즘은 WSN의 최적 설계를 위한 문제에 광범위하게 이용되어 왔다. 그러나 제안된 대부분의 기법들은 중앙집중적 제어 방식을 취하고 있다. 즉, 이들 연구에서는 싱크 노드나 기지국과 같이 에너지, 메모리, 프로세싱 능력 등과 같은 제약 조건이 거의 없는 특정 노드가 센서 노드들로부터 필요한 정보를 취합한 후 제안한 알고리즘에 의해 최적의 해를 찾고 그 결과에 따라 WSN을 제어하는 형태로 자연계 모방 최적화 알고리즘을 적용하여 왔다. 그러나 WSN은 통신 대역폭이 제한적이며 센서 노드의 에너지는 재충전이 매우 어렵다. 따라서 센서 노드들이 데이터가 아닌 제어 정보를 싱크 노드로 전달하고 그 결과를 다시 센서 노드에 전달하는 것은 센서노드의 통신 자원과 에너지 자원의 낭비를 초래할 수 있다. 또한 적용되는 최적화 알고리즘이 휴리스틱(heuristic) 하기 때문에 알고리즘 자체의 특성에 의해 연산 결과가 지역 최적해 (local optima)가 될 수 있으며 해를 찾기 위해 필요한 시간이 WSN에서 요구되는 시간보다 늦을 수도 있다. 따라서 이들 기법을 이용한 연구 결과는 WSN의 환경적 제약 사항과 응용 서비스의 서비스 품질 요구사항 관점에서 검증 되어야만 한다. 또한 이들 최적화 기

표 1. 최적화 문제의 해결 도구로서의 자연계 모방 기술 적용 사례

WSN 설계문제	적용기술	최적화 문제	성능평가 방법
노드 포설	Coarse Grain Decomposition GA [9]	초기 구성 결정	Centralized (real deployment)
	Sequential PSO [10]	소나 센서의 검출 확률 최대화	Centralized (simulation)
	Traffic PSO [11]	최소 비용으로 최대 커버리지 획득을 위한 최적의 카메라 센서 노드 할당 방법	Centralized (real deployment)
	Virtual force coevolutionary PSO (VFCPSO) [12]	모바일 노드를 이용한 커버리지 최대화	Combination of both (simulation)
	PSO Multi-Base [13]	최대 에너지 효율을 위한 기지국(싱크노드) 위치 결정	Centralized (simulation)
위치 측위	GA-Loc [14]	거리 예측 오류의 합 최소화	Centralized (simulation)
	PSO-Loc [15]	거리 예측 오류 제곱의 평균값 최소화	Centralized (simulation)
	PSO-beaconless [16]	비콘 메시지가 없는 환경에서 위치 측정 오류 최소화	Distributed (real deployment)
클러스터링	Energy efficient GA clustering [17]	기지국(싱크 노드)에 의한 에너지 효율적인 클러스터링	Centralized (simulation)
	PSO-Clustering [18]	클러러스터 내부 노드 사이의 거리 최소화를 위한 CH 선정	Centralized (simulation)
	MSTree-PSO [19]	네트워크 수명 최대화를 위한 CH 선정	Centralized (simulation)
데이터 합성	GAgent [20]	측정 데이터의 획득과 합성을 위한 모바일 에이전트의 최적 경로 결정	Centralized (simulation)
	stochastic gradient GA, parallel GA [21]	통신 제약이 있는 환경에서 상황 검출 성능 최적화	Combination of both (simulation)
	PSO-Opt-Alloc [22]	에너지 소모와 오류 확률 최소화를 위한 최적 파워 할당	Centralized (simulation)
	BMPSO [23]	오류와 전송 시간 최소화를 위한 센서 구성 결정	Distributed (simulation)
스케줄링	Dynamic Alliance GA [24]	에너지 소모양 최소화를 위한 센서 노드의 활성/비활성 모드 스케쥴링	Centralized (simulation)
	Artificial immune system [25]	전력 소모 최소화와 충돌 없는 전송을 위한 경로 최적화	Centralized (simulation)

표 2. 자연계 현상과 이를 모방한 WSN 알고리즘들

자연계 현상	무선 센서 네트워크 적용 예
Swarm Intelligence [26]	Routing [27][28]
Self-Synchronization [29]	Globally optimal distributed decision [30] Energy efficient periodic data gathering [31]
Activator-Inhibitor System [32]	Coordination of On-off cycles of sensor nodes [33] Distributed control of processing period [34]
Artificial Immune System[35]	Distributed node and rate selection [36] Misbehavior detection [37]
Epidemic Spreading [38]	Determination of energy-efficient Information collection infrastructure [39] Content distribution [40]
Cellular Signaling [41]	Energy Efficient Clustering [42] Programming of data-centric WSN [43]

법은 알고리즘 적용을 위한 다수의 파라미터들이 존재하며 이들의 값에 따라 알고리즘의 성능이 달라 질 수 있으므로 적용된 WSN 환경과 해결하고자 하는 문제에 따라 알고리즘 운영을 위한 체계적인 파라메터 설정 방법들이 제시되어야 한다.

2. 자연계 현상을 모방한 WSN 기술들

자연계 현상을 모방한 WSN 기술들은 자연계 생물체들 혹은 생명체를 구성하는 세포들 각각의 독립적이고 분산적인 단순한 동작만으로도 집단 전체 혹은 생명체 자체에 바람직한 결과를 야기할 수 있다는 것에 착안하고 있다. 즉, 이들 연구는 자연계 생물체들의 행동 양식을 자원에 제약이 있는 센서 노드에 모방하여 적용함으로써 WSN의 다양한 설계 문제를 해결하고자 한다. 〈표 2〉는 WSN에 적용된 자연계 모방 기술의 예를 보여준다. 본 절에서는 이들 중 대표적인 자연계 모방 기술인 개미집단의 집단 지성 (swarm intelligence) 을 이용한 라우팅 알고리즘 개발 방법을 예로 들어 WSN 설계 문제를 해결하기 위해 자연계 현상을 모방하는 방법에 대해 기술한다.

집단지성은 곤충, 새때, 물고기 집단과 같이 주변 환경 혹은 동종 개체와 독립적이며 분산적으로 상호작용하는 개체들의 집단적인 행태를 나타내는 용어로 1989년 Gerardo Beni와 Jing Wang에 의해 사용되었다[44]. 집단지성의 개념은 초기에 인공지능 분야에 많이 적용 되었으며, 통신네트워크 분야에는 적응성이 있고 강건하며 확장성있는 라우팅 프로토콜 개발에 주로 적용되어 왔다[45][46][47]. 이들 기법들은 곤충 집단을 구성하는 개체들 사이의 단순한 상호 작용을 통해 곤충 집단이 먹이까지 최적 경로를 찾아내는 행태를 공학적으로 역설계 (reverse engineering)하여 개체의 동작을 센서 노드에 직관적으로 적용하고 있다.

개미 집단이 먹이까지 최단 경로를 찾아내는 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다. 개미는 다른 개미들이 경로상에 남겨 둔 페르몬이라는 휘발성 화학물질의 양에 따라 먹이까지의 경로를 선택하며, 자신도 자신이 지나온 경로에 일정 양의 페르몬을 남겨둠으로써 다른 개미들의 경로 선택에 영향을 준다. 따라서 개미집(소스)에서 먹이(최종 목적지)까지의 경로가 짧을수록 경로의 페르몬 양이 증가하게 되고 이로 인해 보다 많은 개미가 해당 경로를 지나가게 된다. 이와 같은 현상이 반복되면 대다수의 개미들은 개미집에서 먹이까지 최단 경로를 선택하게 된다[1].

개미군집 기법을 이용한 라우팅 알고리즘들은 개미들의 행동을 모방하여 개미의 역할을 수행하는 에이전트라 불리는 제어 패킷을 이용하여 집단적으로 라우팅 정보를 획득한다. 즉, 개미들의 포식 형태는 라우팅 알고리즘 설계를 위해 〈표 3〉과 같이 모델링 된다.

에이전트들은 각 노드에서 독립적으로 발생되며 주어진 목적지까지의 경로의 품질을 시험하는데 사용된다. 즉, 소스 s에서 목적지 d까지 이동하는 에이전트 (순방향 에이전트)는 경로의 품질 (예. 종단간 지연, 홉 수, 등)을 측정한 후 s에서 d까지 이동한 경로를 역으로 따라서 다시 s에 도착한다 (역방향 에이전트). 이 과정에서 에이전트는 자신이 측정한 순방향 경로 품질에 따라 자신이 d에 도착하기까지 거처간 중간 노드의 라우팅 테이블을 갱신한다. 페르몬 테이블이라 불리는 라우팅 테이블의 각 열은 목적지, 이웃 노드 식별자, 페르몬 양으로 구성되며 페르몬 양은 주어진 목적지 d로 패킷을 전송하기 위해 이웃 노드 n을 선택하는 것이 얼마나 적합한지를 계산하는데 사용된다.

에이전트는 목적지까지 순방향 경로를 중간 노드들의 페르몬 테이블에 따라 확률적으로 결정한다. 즉, 중간 노드 k에서 다음 홉은 k와 이웃 노드 사이의 페르몬 양과 k의 지역적 선호도 값의 조합에 의해 확률적으로 결정된다. 링크의 페르몬 양은 에이전트에 의한 장시간 학습된 경로 품질을 나타내기 위해 이용

1 이처럼 개미들 사이에 페르몬을 통해 경로 품질을 간접적으로 통신하여 개미 집단의 행동 양식을 결정하는 방법을 스티그멀지 (stigmergy)라고 한다.

표 3. 개미집단의 포식 형태 v.s. 라우팅 프로토콜

Metric	개미 군집 이론	분산 라우팅 프로토콜
품질 측정 개체	개미	에이전트 (노드가 생성하는 제어 패킷)
경로 적합도 평가 도구	페르몬	에이전트가 수집한 링크의 품질
분기점에서 경로 선택 기준	분기점에서 링크별 페르몬 양	에이전트들이 수집한 이웃 노드와의 경로 품질과 지역적 선호도의 조합

되며 지역적 선호도 값은 노드 k와 이웃 노드 사이의 큐 길이와 같이 노드 k의 지역적 상황을 반영하기 위해 사용된다. 목적지가 d이고, 노드 k의 이웃 노드의 집합이 $N(k)$, k와 이웃 노드 n 사이의 페르몬 값이 τ_{kn}^{d}, k의 휴리스틱 값이 φ_{kn}, k와 n 사이 링크의 큐 길이가 q_{kn}인 경우 k가 n을 다음 노드로 선택할 확률은 일반적으로 다음과 같이 결정된다.

$$p_{kn}^{d} = \frac{(\tau_{kn}^{d})^{\alpha}(\varphi_{kn})^{\beta}}{\sum_{i\in N(k)}(\tau_{ki}^{d})^{\alpha}(\varphi_{ki})^{\beta}} \quad (1)$$

$$\varphi_{kn} = 1 - q_{kn}/\sum_{i\in N(k)} q_{ki}, \quad \alpha, \beta \in R^{+}. \quad (2)$$

에이전트가 노드 k의 다음 홉으로 노드 n을 선택한 후 목적지 d에 도착한 후 n을 통해 다시 k에 도착하면 k와 n 사이의 페르몬 양은 갱신된다. 갱신방법은 개미군집 이론을 이용한 제안 기법들마다 다양하지만[48] 일반적인 갱신방법은 다음과 같다.

$$\tau_{ki}^{d} = \begin{cases} (1-\rho)\tau_{ki}^{d} + \rho r & if\ i = n \\ (1-\rho)\tau_{ki}^{d} & \forall_{i\in N(k)}, i \neq n \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $r \in R^{+}$ 이며 증발계수라 불리는 ρ는 [0,1] 사이의 값을 갖는다. 일반적으로 ρ는 상수로서 시스템의 모든 페르몬 값을 주기적으로 감소시켜 새로운 경로를 검색할 수 있게 해주며 r은 경로 품질에 따라 가변적인 값으로 품질이 좋은 경로를 지속적으로 이용할 수 있게 해준다.

3. 추후 연구 방향

본 고에서 살펴본 바와 같이 자연계 모방 기술은 분산적 자가 구성 능력, 네트워크 환경 변화에 대한 적응력, 노드 및 링크 고장에 대한 강건성을 제공하기 때문에 WSN의 다양한 설계 영역에 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 이들 대부분의 성능 검증은 모의실험을 통해 이루어지고 있으며 수학적 분석 모델이나 실제 네트워크 환경에서의 성능 검증은 거의 이루어지고 있지 않다.

또한 모의실험을 통한 성능 검증에 있어서도 WSN을 위해 개발된 모의실험기가 [49] 아닌 일반 네트워크 모의실험기 혹은 연구자가 실험을 위해 개발한 모의실험기를 이용하는 것이 대부분이다. 실험환경 측면에서도 대부분의 연구는 작은 규모의 WSN에서 적용한 모델 파라미터 (예. 식 (1)~(3)에서의 α, β, r, ρ 및 에이전트 발생 시기 등)에 대한 논리적인 설명 없이 특정 성능 메트릭에 대한 단순 결과만을 제시하고 있으며 다양한 네트워크 운영 시나리오를 고려한 대규모 WSN에서의 성능 검증은 거의 이루어지고 있지 않다.

특히, 대다수의 연구에서는 제안한 자연계 모방 기술의 장단점의 원인에 대한 고찰 없이 단순 성능 평가 결과만을 제시하고 있다. 예를 들어 개미집단을 모방한 라우팅 기법의 경우 에이전트들의 경로 품질 시험 결과에 따라 경로를 결정하기 때문에 제어 패킷인 에이전트로 인한 WSN의 부하가 증가하게 되며 이는 통신 대역폭이 귀중한 자원인 WSN에 무시 못할 부담이 될 수 있으나 이에 대한 고찰이 부족하다. 더욱이 자연계 모방 기법과 관련 분야의 다른 최신 연구들과 정량적 성능 비교를 통해 이들과의 상대적 성능 차이를 평가하기 위한 통계적 검증은 부재한 상태이다. 따라서 WSN에서 자연계 모방 기술의 적용을 보다 활성화하기 위해서는 다음과 같은 노력이 요구된다.

- WSN 특성을 고려한 모의실험 환경 구축과 다양한 WSN 운영 시나리오에서 다양한 성능 인자를 고려한 제안 기법의 성능 평가
- 모델 파라미터 설정 방법에 대한 가이드라인 제시
- 동일 환경에서 관련 분야 최신 연구들과의 통계적 비교 및 장단점 분석
- 단일 계층의 단독 기술이 아닌 계층간 설계 기법 개발
- 실제 네트워크에 개발 프로토콜을 적용하여 성능 평가
- 수학적 분석 모델 개발

이 외에도 단순한 자연계 개체들의 행동을 직접적으로 모방하는 것에서 벗어나 WSN의 특성, 요구사항 및 제약사항을 고려하여 자연계 개체의 행동을 사상하려는 노력이 요구된다.

Ⅲ. 결 론

본고에서는 WSN의 설계 문제에 적용된 자연계 모방 기법들에 대해 살펴봤다. 이들 기법들은 WSN 설계를 위해 최적화 문제를 해결하기 위한 도구로 이용되거나 실제 생명체의 동작 특성을 모방한 알고리즘 개발을 통해 WSN 운영 환경 변화에 적응성 있는 분산적 제어 기술 개발에 이용되어 왔다. 이들 연구를 통해 WSN과 같이 다수의 노드들로 구성되며 운영환경이 가

변적이고 가용 자원이 제약적인 환경에 자연계 모방 기술을 적용함으로써 네트워크 환경 변화에 적응력이 뛰어난 제어 기법의 개발이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 자연계 모방 기술이 WSN과 같은 분산적 통신 네트워크 환경에 효과적으로 적용되기 위해서는 실제 구현 혹은 실제와 유사한 모의실험 환경에서 기존 기법들과의 정량적 비교를 통해 자연계 모방 기술을 적용한 기법의 장단점이 분명하게 제시되어야 하며 이를 논리적으로 설명하고 검증하기 위한 수학적 분석 모델의 개발이 병행되어야 한다.

참 고 문 헌

[1] Akyildiz I., Su W., Sankarasubramaniam Y., and Cayirci E., "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communication Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.

[2] Tilak S., Abu-Ghazaleh N. B., and Heinzelman W., "A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models," ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review, vol. 6, no. 2, pp. 28-36, Apr. 2002.

[3] Dressler F., Akan O. B., "A Survey on Bio-Inspired Networking," Elsevier Journal of Computer Networks, vol. 54, no. 6, pp. 881-900, Apr. 2010.

[4] Dressler F., Akan O. B., "Bio-Inspired Networking: From Theory to Practice," IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 11, pp. 176-183, Nov. 2010.

[5] Xiao Y., "Bio-Inspired Computing and Networking, CRC Press, NW, 2011.

[6] Wikipedia, available at http://en.wikipedia.org/wiki/Metaheuristic

[7] Goel S., Sharma A., and Bedi P., "Cuckoo Search Clustering Algorithm: A Novel Strategy of Biomimicry," Proc. IEEE Information and Communication Technologies (WICT), pp. 916-921, Dec. 2011.

[8] Gandomi A. H., and Alavi A. H., "Krill Herd: A New Bio-Inspired Optimization Algorithm," Elsevier Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol.17, no.2, pp. 4831-4845, Dec. 2012.

[9] Carballido J. A., Ponzoni I., and Brignole N. B., "CGD-GA: A Graph-Based Genetic Algorithm for Sensor Network Design." Elsevier Information Sciences, vol. 177, no. 22, pp. 5091-5102, Nov. 2007.

[10] Ngatchou P., Fox W., and El-Sharkawi M., "Distributed Sensor Placement with Sequential Particle Swarm Optimization," Proc. IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS), pp. 385-388, Jun. 2005.

[11] Hu J., Song J., Kang X., and Zhang M., "A Study of Particle Swarm Optimization in Urban Traffic Surveillance System," Proc. IEEE IMACS Multiconference on Computational Engineering System Applications, ppl 2056-2061, Oct. 2006.

[12] Wang X., Wang S., and Ma J. J., "An Improved Co-Evolutionary Particle Swarm Optimization for Wireless Sensor Networks with Dynamic Deployment," MDPI Sensors, vol. 7, no.3, pp. 354-370, Mar. 2007.

[13] Hong T. P., and Shiu G.N., "Allocating Multiple Base Stations under General Power Consumption by the Particle Swarm Optimization," Proc. IEEE Swarm Intelligent Symposium (SIS), pp. 23-28, Apr. 2007.

[14] Nan G.-F., Li M.-Q., and Li J., "Estimation of Node Localization with a Real-Coded Genetic Algorithm in WSNs," Proc. IEEE Int. Conf. on Machine Learning Cybernetics, pp. 873-878, Aug. 2007.

[15] Gopakumar A., and Jacob A., "Localization in Wireless Sensor Networks using Particle Swarm Optimization," Proc. IET Int. Conf. on Wireless, Mobile Multimedia Networks, pp. 227-230, Jan. 2008.

[16] Guo H., Low K.-S., and Nguyen H.-A., "Optimizing the Localization of a Wireless Sensor Network in Real Time based on a Low Cost Microcontroller," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 3, pp. 741-749, Mar. 2011.

[17] Hussain S., Matin A. W., and Islam O., "Genetic Algorithm for Energy Efficient Clusters in Wireless Sensor Networks," Proc. IEEE Int. Conf. on Information Technology (ITNG), pp. 147-154, Apr. 2007.

[18] Guru S., Halgamuge S., and Fernando S., "Particle Swarm Optimisers for Cluster Formation in Wireless Sensor Networks," Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, pp. 319-324, Dec. 2005.

[19] Cao X., Zhang H., Shi J., and Cui G., "Cluster Heads Election Analysis for Multi-Hop Wireless Sensor Networks based on Weighted Graph and Particle Swarm Optimization," Proc. IEEE Int. Conf. on Natural Computation, pp. 599-603, Oct. 2008.

[20] Wu Q., Rao N., Barhen J., Iyengar S., Vaishnavi V., Qi H., and Chakrabarty K., "On Computing Mobile Agent Routes for Data Fusion in Distributed Sensor Networks," IEEE Transactions on Knowledge Data Engineering, vol. 16, no. 6, pp. 740-753, Jun. 2004.

[21] Aldosari S., and Moura J., "Fusion in Sensor Networks with Communication Constraints," Proc. IEEE 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), pp. 108-115, Apr. 2004.

[22] Wimalajeewa T., and Jayaweera S. K., "Optimal Power Scheduling for Correlated Data Fusion in Wireless Sensor Networks via Constrained PSO,"IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 9, pp. 3608-3618, Sep. 2008.

[23] Veeramachaneni K., and Osadciw L. A., "Dynamic Sensor Management using Multi Objective Particle Swarm Optimizer," Proc. SPIE Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications, pp. 1-12, Apr. 2004.

[24] Jin M. H., Liu W. Z., Hsu D., and Kao C. Y., "Compact Genetic Algorithm for Performance Improvement in Hierarchical Sensor Networks Management," Proc. IEEE 8th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms Networks (ISPAN), Dec. 2005.

[25] Xue W., and Chi Z., "An Immune Algorithm based Node Scheduling Scheme of Minimum Power Consumption and No Collision for Wireless Sensor Networks," Proc. IFIP Int. Conf. on Network and Parallel Computing Workshops pp. 630-635, Sept. 2007.

[26] Bonabeau E., Dorigo M., and Theraulaz G., "Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems," Oxford University Press, 1999.

[27] Caro G. D., Ducatelle F., and Gambardella L. M., "AntHocNet: An adaptive Nature-Inspired Algorithm for Routing in Mobile Ad Hoc Networks," European Transactions on Telecommunications, Special Issue on Self-organization in Mobile Networking, vol. 16, no. 5, pp. 443-455, Spet./Oct. 2005.

[28] Wang J., Osagie E., Thulasiraman P., and Thulasiram R. K., "HOPNET: A Hybrid ant colony OPtimization routing algorithm for Mobile ad hoc NETwork," Elsevier Ad Hoc Networks, vol. 7, no. 4, pp. 690-705, Jun. 2009.

[29] Pikovsky A., Rosenblum M., and Kurths J., "Synchronization - A Universal Concept in Nonlinear Science," Cambridge Univ. Press, 2001.

[30] Sergio B., and Gesualdo S., "Bio-Inspired Sensor Network Design - Distributed Decision through Self-Synchronization," IEEE Signal Processing Magazine, vol.24, no.3, pp.26-35, May 2007.

[31] Wakamiya N., and Murata M., "Synchronization-Based Data Gathering Scheme for Sensor Networks," IEICE Transactions on Communications, Special Issue on Ubiquitous Networks vol. E88-B no. 3, pp. 873-881, Mar. 2005.

[32] Meinhardt M., "Models of Biological Pattern Formation," Academic Press London 1982.

[33] Neglia G., and Reina G., "Evaluating Activator-Inhibitor Mechanisms for Sensors Coordination," Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS 2007), pp. 129-133, Dec. 2007.

[34] Dressler F., "Self-Organized Event Detection in Sensor Networks using Bio-inspired Promoters and Inhibitors," Proc. 3rd ACM/ICST Int. Conf.on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS 2008), Article no. 10, Nov, 2008.

[35] Castro L. N., and Timmis J., "Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach," Springer, 2002.

[36] Atakan B., and Akan O. B., "Immune System Based Distributed Node and Rate Selection in Wireless Sensor Networks," Proc. IEEE/ACM Int. Conf. on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS 2006), pp. 1-8, Dec., 2006.

[37] Le Boudec J.-Y., and Sara_janovic S., "An Artificial Immune System Approach to Misbehavior Detection in Mobile Ad-Hoc Networks," Springer LNCS 3141, pp. 396-411, 2004.

[38] Kleinberg J., "Computing: The Wireless Epidemic," Nature vol. 449, no. 20, pp. 287-288, Sept. 2007.

[39] Pappas V., Verma D., Ko B.-J., and Swami A., "A Circulatory System Approach for Wireless Sensor Networks," Elsevier Ad Hoc Networks, vol. 7, no.4, pp. 706-724, Jun. 2009.

[40] Hayashi H., Hara T., Nishio S., "On Updated Data Dissemination Exploiting an Epidemic Model in Ad Hoc Networks," Springer LNCS 3853, pp. 306-321, 2006.

[41] Owen M. R., and Sherratt J. A., "Mathematical Modeling of Juxtacrine Cell Signaling," Mathematical Bioscience, vol. 153, no. 2, pp. 125-150, Nov. 1998.

[42] Charalambos C., and Shuguang C., "A Biologically Inspired Networking Model for Wireless Sensor Networks," IEEE Network, vol. 24, no. 3, pp.6-13, May/June 2010.

[43] Dressler F., Dietrich I., German R., and Krouger B., "A Rule-Based System for Programming Self-Organized Sensor and Actor Networks," Elsevier Computer Networks, vol. 53 no. 10, pp. 1737-1750, Jul. 2009.

[44] Beni, G., and Wang, J., "Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems," Springer NATO ASI Series vol. 102, pp. 703-712, 1993.

[45] Caro G. D., and Dorigo M., "AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communication Networks," Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR) vol. 9, no. 1, pp. 317-365, Aug. 1998.

[46] Farooq M., and Di Caro G.A., "Routing Protocols Inspired by Insect Societies," Springer Natural Computing Series, pp. 101-160. 2008.

[47] Saleem M., and Farooq M., "Beesensor: a Bee-Inspired Power Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," Springer, LNCS 4448, pp. 81-90, 2007.

[48] Saleem M., Di Cargo G. A., and Farooq M., "Swarm Intelligence Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks: Survey and Future Directions," Elsevier Information Science, vol.181, no.20, pp. 4597-4624, Oct. 2011.

[49] Korkalainen M., Sallinen M., Kärkkäinen N., and Tukeva P., "Survey of Wireless Sensor Networks Simulation Tools for Demanding Applications," Proc. IEEE Int. Conf. on Networking and Services (ICNS), pp. 102-106, Apr. 2009.

약 력

박 재 성

1995년 연세대학교 공학사
1997년 연세대학교 공학석사
2001년 연세대학교 공학박사
2001년~2002년 미네소타대학교 연구원
2002년~2005년 LG전자 시스템사업부 선임연구원
2005년~현재 수원대학교 정보보호학과 부교수
관심분야: 자원 관리 프로토콜, 매체접속제어, 이동성관리, 등