

논문 2013-50-12-12

에너지 수확 모바일 센서 망을 위한 유체 흐름 및 군집 분산 기반 토폴로지 변환 알고리즘

(Topology Change Algorithms based on Fluid Flow and Flock Dispersion for Energy-Harvesting Mobile Sensor Networks)

소 원 호*

(Wonho So[©])

요 약

에너지 수확 모바일 센서 망에서 센서 노드간의 듀티-사이클 동기화는 매우 중요한 의미를 갖는다. 제한된 에너지를 효율적으로 사용하여 협력해야 하기 때문에 각 노드의 듀티-사이클이 서로 유사하게 동작되어야 한다. 이때 망을 구성하는 노드 분포는 노드간의 연결뿐만 아니라 동기화에 의한 노드의 활동 시간, 그리고 망의 수명에 영향을 준다. 본 논문에서는 자기-동기화 듀티-사이클 기법을 적용한 에너지 수확 모바일 센서 망에서 망의 토폴로지를 변화시킨다. 단순 랜덤 토폴로지 망보다는 망이 담당하는 영역과 노드 밀집도에 따라서 노드의 분포를 균일하게 유지하는 알고리즘을 제시한다. 제시된 토폴로지 변환 알고리즘을 위하여 유체 흐름과 군집 분산 모델을 적용하고 에이전트 기반 모델링을 이용하여 성능분석을 시행한다. 또한 제안된 알고리즘을 자기-동기화 듀티-사이클 기반 모바일 센서 망에 적용하여 노드 간 동기화 특성이 강화되고 에너지 소비 편차의 감소를 확인한다.

Abstract

The duty-cycle synchronization among mobile sensor nodes with energy-harvesting is very important. The nodes should keep their duty-cycle same to others as much as possible because they have to cooperate each other and to consume energy efficiently. The distribution of node position in network affects not only node connectivity but also the active time of synchronized nodes, and it relates to network life-time finally. In this paper, we introduce a network topology change algorithm (TCA) for energy-harvesting mobile sensor networks based on self-synchronized duty-cycling. The algorithm tries to change a network topology into a balanced topology where the mobile sensor nodes are unified according to the density of the number of nodes. For TCA, both fluid flow algorithm and flock dispersion algorithm are proposed and they are evaluated through the simulation in agent based modeling language. TCA is applied to the energy-harvesting mobile sensor networks to improve the synchronization of duty-cycle and to reduce the variation of energy consumption among nodes.

Keywords : topology change, mobile sensor networks, energy-harvesting, self-synchronization, duty-cycle

I. 서 론

일반적으로 무선 센서 망은 넓은 영역을 모니터링하고 시간에 따른 복잡한 현상을 분석하기 위해 구성된다. 이를 위하여 조도, 습도, 온도, 산도, 그리고 물체의 방향, 속도 등을 측정할 수 있는 다양한 센서들이 사용된다. 이것은 무선 센서 망이 일상적인 우리의 삶과 주위 환경, 그리고 다양한 산업 분야에 적용됨을 의미한다.

* 정회원, 순천대학교 컴퓨터교육과
(Dept. of Computer Education, Suncheon National University)

© Corresponding Author(E-mail: whso@sunchon.ac.kr)

※ 이 논문은 2012년 순천대학교 장기해외파견 지원비로 연구되었음.

접수일자: 2013년8월8일, 수정완료일: 2013년11월27일

다^[1~3].

전원의 용량이 제한되어 센서 망의 수명을 연장하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 최근에는 센서 노드 주위에서 에너지를 확보하는 방법이 제시되었다. 기존의 전원을 교체해야 하는 센서 망은 듀티-사이클을 조정하여 망의 수명을 연장한다. 반면에 에너지 수확 무선 센서 망은 햇빛, 진동, 바람 등으로 전지를 충전하여 전지를 교체할 필요 없이 망을 유지하고 생존성을 높인다. 하지만 에너지 수확 기법만으로 망의 수명을 연장하는 것보다 듀티-사이클을 효과적으로 같이 적용하면 높은 망 생존성을 얻을 수 있다^[4~5].

최근 연구에서 에너지의 프로파일을 미리 알고 동적으로 듀티-사이클을 제어하는 방법^[6], 시간에 따른 에너지 획득 양에 따라 적응적으로 듀티-사이클을 제어하는 방법 등이 소개되었다^[7]. 또한 에너지원에 적응적이면서 노드 간 듀티-사이클을 개미의 군집 행동 특성을 기반으로 동기 시키는 기법도 소개되었다^[8~10]. 이 개미 군집의 각 개미는 항상 활동하지 않으며 (활성상태, active) 상대적으로 많은 시간 동안 휴식을 취한다 (휴지상태, idle). 이웃 개미들의 행동 패턴에 자신의 상태를 스스로 결정하여 작업을 협력하며 수행한다. 선행 연구 [11]에 의하면 개미를 모바일 센서 노드로 생각할 때 망의 토폴로지가 그리드 망인 경우에 우수한 특성을 보였다. 랜덤 토폴로지를 가정한 망은 노드가 밀집된 지역과 그렇지 않은 지역의 노드의 활성상태 빈도가 달라서 망 전체적인 동기화에 한계가 있다. 또한 밀집된 지역의 노드들이 상대적으로 활성화 빈도가 높아 많은 에너지를 소비하게 된다. 이것은 망을 구성하는 노드의 에너지 소비와 관계되며 최종적으로 망의 수명에 영향을 준다.

본 논문에서는 모바일 센서 노드의 분포를 균등하게 유지하는 토폴로지 변환 기법을 제시한다. 제안된 기법은 모바일 센서 노드의 이동성을 고려하여 노드의 분포가 균등하게 분포되도록 노드의 이동 방향을 결정한다. 이를 위하여 유체 흐름과 군집 분산 모델과 같은 복잡한 모델 (complex system model)을 적용한다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 선행 연구와 그 결과에 따른 본 논문의 동기를 소개한다. III장에서 유체 흐름과 군집 이동 모델을 적용한 알고리즘을 소개하여 망 토폴로지 변환 기법을 제시한다. 제시된 기법에 따른 성능 분석 IV장에서 추가로 이뤄지고 V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

에너지 수확 기반의 센서 망에서 에너지 획득에 대한 정보가 일정할 때 듀티-사이클 제어는 상대적으로 쉽다. 하지만 이에 비해서 [7]에서 제시한 적응적 듀티-사이클링 기법은 환경적인 변화가 심한 경우에 각 노드가 독립적으로 적응하며 듀티-사이클을 제어한다. 하지만 그림 1과 같이 각 노드가 적합한 듀티-사이클을 사용하더라도 공동으로 협력 작업을 할 때에는 공동으로 겹치는 듀티 시간 (cooperative period)이 많아야 한다.

[9]과 [10]에서 제안한 자기-동기화 듀티-사이클링은 기존의 적응적 듀티-사이클링의 문제점인 노드간의 동기화 시간을 군집 지능 (swarm intelligence) 기법을 적용하여 해결하고자 하였다. 자기 동기화 능력을 갖는 개미의 군집 행동을 FNN (fluid neural network)으로 모델링한다. 여기서 개미는 모델의 기본 행동 단위 (automaton)로서 모바일 센서망의 센서 노드에 해당한다.

FNN 모델은 k 개의 노드로 구성된 망을 가정한다. 각 노드는 활성상태와 휴지상태를 반복하는데 이를 표현하기 위하여 연속 상태 변수 S_i 와 2진 변수 a_i 를 이용한다. 식 (1)에 의해서 시간단계 t 에 노드 i 의 $a_i(t)$ 가 결정된다.

$$a_i(t) = \Phi(S_i(t) - \theta_{act}) \quad (1)$$

여기에서 $t \in \mathbb{N}$, $S_i(t) \in \mathbb{R}$, 그리고 θ_{act} 는 노드 활성화 문턱값이고 $\Phi(x)$ 는 $x \geq 0$ 이면 1 (active), 그렇지 않은 경우에는 0 (idle)이 되는 함수이다. 매 시간단계 t 에서 연속 상태 변수 S_i 는 식 (2)와 같이 갱신된다.

$$S_i(t) = \tanh[g \cdot h_i(t)] \quad (2)$$

이 식에서 g 는 이득 파라미터이고 $h_i(t)$ 는 시간단계 t 에서 노드 i 가 받는 자극의 합으로 다음과 같다.

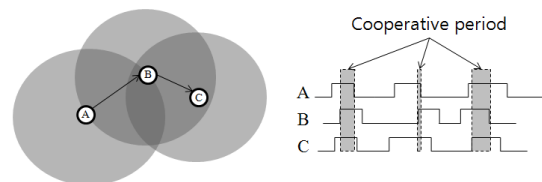


그림 1. 듀티-사이클 동기화
Fig. 1. Duty-cycle synchronization.

$$h_i(t) = S_i(t-1) + \sum_{j \in N(i,t), j \neq i} S_j(t-1) \quad (3)$$

여기서 $N(i,t)$ 는 시간단계 t 에 활성화 된 노드 중에서 노드 i 에게 이전 시간단계 $S_j(t-1)$ 를 전달할 수 있는 노드의 집합이다. 즉 이웃 노드를 의미한다. 따라서 각 노드는 매 시간단계에 수신 가능한 거리에 있는 이웃 노드로부터 상태정보를 수집하여 자신의 상태 (활성상태 또는 휴지상태)를 결정한다.

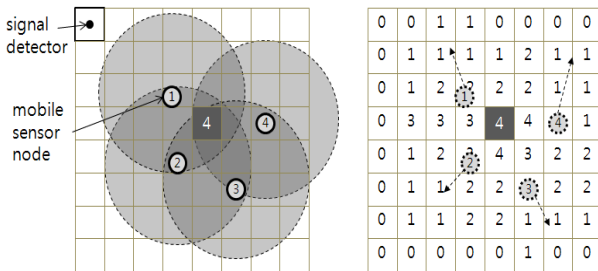
선행 연구인 [11]에서는 자기-동기화 듀티-사이클링 기법을 망의 서비스와 요구사항에 따라서 제어하기 위한 기반 연구를 수행하였다. 이득 파라미터 g 와 활성화 확률 p_a 에 의해서 망의 평균 활성화 상태값이 결정되는데 노드의 분포 방법에 따라서 다른 결과를 보인다. 랜덤 토폴로지를 갖는 망에 비해서 그리드 토폴로지 망에서 더 높은 평균 활성화 상태값을 얻었다. 또한 노드의 활성화 빈도도 그리드 토폴로지에서도 상대적으로 균일한 특성을 보인다.

[12]에서는 무선 센서 망의 수명을 연장하기 위한 토폴로지 제어를 소개한다. 에너지 소비를 줄이고 망의 수명을 연장하기 위하여 제어 방법을 토폴로지 구성 과 토폴로지 유지보수로 나누어 소개한다. WSAN (wireless sensor-actor network)을 위한 연결 복구 방법이 소개된 [13]는 노드의 재배치만이 최선의 선택임을 보인다.

III. 토폴로지 변경 알고리즘

1. 유체 흐름과 군집 분산 알고리즘

제안된 토폴로지 변경 알고리즘은 유체 흐름과 군집 분산 알고리즘을 기반으로 운용된다. 먼저 유체 흐름



(a) 노드 신호 감지 (b) 위치에 따른 신호 빈도

그림 2. 센서노드 수와 그에 따른 신호 빈도 계산
Fig. 2. The number of sensor nodes and signals.

Fluid flow algorithm

```

1  for all signal detectors  $x, x=1, \dots, D$  do
2      Calculate  $d_x(t)$  as the number of sensors
3      within monitoring radius  $r_m$  at time  $t$ 
4  end for
5
6  for all sensors  $i=1, \dots, k$  do
7      Find one of  $d_z(t)$  for sensor  $i$  (see Eq. 4)
8      if else  $d_z(t) < d_{x_i}(t)$  then
9          Set heading toward  $z$ 
10         Set  $f_{move} := true$ 
11     else
12         Set  $f_{move} := false$ 
13     end if
14 end for
    
```

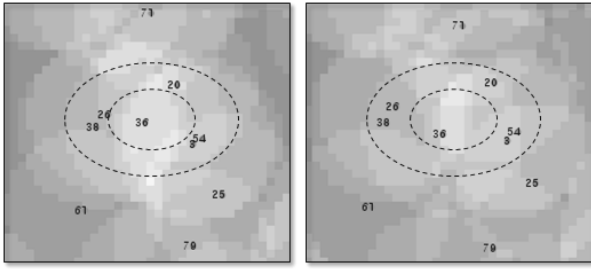
그림 3. 유체 흐름 알고리즘
Fig. 3. Fluid flow algorithm

알고리즘은 유체를 구성하는 기본 구성단위 (물방울)가 중력에 의해서 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 성질을 이용한다. 그림 2(a)는 4개의 센서 노드가 송수신 신호를 발생하는 경우에 그 범위와 그에 따른 신호 빈도를 표시한다. 사각형 블록은 신호 탐지기 (signal detector)로 가정한다. 그림 2(b)는 각 신호 탐지기가 그림 2(a)의 센서 노드 신호를 감지하여 기록한 신호 빈도를 나타낸다. 따라서 높은 신호 빈도를 갖는 감지기 위치의 노드는 빈도가 낮은 지역으로 이동한다.

그림 3은 제안된 유체 흐름 알고리즘을 보인다. 모바일 센서 노드 i 는 주기 또는 비주기적으로 통신 반경 r_m 이내로 송신을 한다고 가정한다. 신호 탐지기 x 는 시간 $t-1$ 과 t 사이에 감지된 신호를 수신하여 인접한 노드의 수 $d_x(t)$ 를 계산한다 (1~4줄). 이제 센서 노드 i 는 자신의 다음 위치를 결정하는 처리과정을 수행한다. 먼저 신호 탐지기 중에서 신호 빈도가 최소값인 탐지기를 결정한다. 탐지기 x 는 주기적으로 또는 요청이 있을 때 자신의 신호 빈도를 방송한다. 노드 i 가 시간 t 에 통신 반경 r_s 안에서 수신할 수 있는 탐지기 집합을 $X_i(t)$ 라하면 노드 i 는 식(4)와 같이 시간 t 에 빈도가 최소인 탐지기를 결정한다.

$$d_z(t) = \min [d_y(t), y \in X_i(t)] \quad (4)$$

노드 i 는 자신이 위치한 곳의 탐지기 x_i 의 $d_{x_i}(t)$ 와 비교하여 이동 여부를 결정한다. 이때 반경 r_s 는 r_m 에 대하여 $r_s = \alpha r_m$ 같은 관계로 결정된다. 4장의 실험 결과에 의하면 α 는 망을 구성하는 초기 모바일 노드의 군집형태에 따라서 다양한 값이 결정될 수



(a) 초기 상태 (b) 수행 후 상태

그림 4. 유체 흐름 알고리즘에 의한 ABM 시뮬레이션
Fig. 4. ABM simulation using fluid flow algorithm.

있다.

실험이 진행되는 동안 시뮬레이션 뷰에서 노드의 이동을 관찰하는데 그림 4는 뷰의 그 일부분만 표시한다. 그림에서 번호 (3, 20, 25, 26, 36, 38, 54, 61, 71, 79)는 그 부분의 노드를 나타내며 회색조가 진한 곳은 신호 빈도가 낮은 곳이고 흰색은 신호 빈도가 높은 감지기를 나타낸다. 그림 4(a)는 신호 감지기와 모바일 센서 노드의 초기 상태를 나타낸다. 노드 36을 중심으로 빈도가 높음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 10개의 노드가 초기상태 이후 어떻게 이동했는지를 나타낸다. 노드 3, 20, 26, 38, 54가 중심으로부터 떨어진 것을 확인 할 수 있다.

유체 흐름 알고리즘에 의해서 모바일 센서 노드를 낮은 신호 빈도가 있는 곳으로 이동이 가능하다. 그러나 각 노드가 독립적으로 방향을 결정하여 진행하는 경우에 그림 5와 같이 너무 가까이 인접한 노드 i 는 진행 방향을 새롭게 결정하여 다음 방향으로 진행해야 한다. 그림 5(a)는 노드 i 와 j 가 각각 θ_i 와 θ_j 인 방향으로 진행할 때 서로 가장 가까이 인접한 경우이다. 거리 r_d 는 다양한 상황에서 결정되어야 하지만 본 논문에서는 $r_d = r_m/5$ 로 설정하였다. 그림 5(b)는 그림 6에 소개된 군집 분할 알고리즘에 의해서 결정되는 예를 보인다. 그림 5(c)는 새롭게 결정된 방향으로 노드 i 가 진행하는 것을 보인다. 이것으로 밀집된 노드들이 분산된다.

그림 6은 군집 분할 알고리즘을 보인다. 센서 노드 i 는 이웃 노드 중에서 가장 가까운 노드 j 를 결정한다 (1~2줄). 만일 시간 t 에 노드 i 와 노드 j 의 거리 $\delta_{ij}(t)$ 가 $\delta_{ij}(t) < r_d$ 이면 Δ 를 구한다. 이때 θ_i 와 θ_j 는 그림 5(b)에서 알 수 있듯이 0° 가 정북방향을 나타낸다. 만일 $|\Delta| > 180$ 이면 $\Delta = -(360 - |\Delta|)$ 로 계산하여 노드 i 에 대한 노드 j 의 진행 방향을 일반화시킨

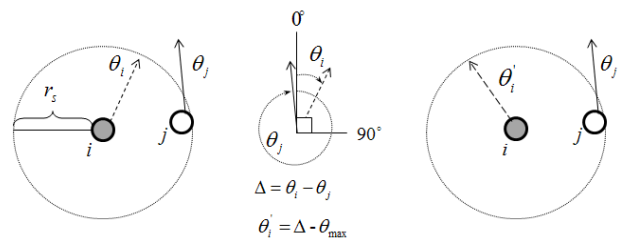
것이다. 제안된 알고리즘은 $\Delta > \theta_{max}$ 보다 크면 유체 흐름 알고리즘에 의해 결정된 방향으로 진행한다. 그렇지 않고 작다면 새로운 방향의 결정된다(6~11줄). 예를 들면, $\theta_i = 15^\circ$, $\theta_j = 350^\circ$ 그리고 $\theta_{max} = 45^\circ$ 로 가정하자. $\Delta = 15 - 350 = -335$ 가 되고 각도 일반화 과정에 의해서 $\Delta = -25$ 가 된다. 따라서 새롭게 결정된 노드 i 의 진행 방향은 -70 이고 결국 $\theta'_i = 290^\circ$ 가 된다.

위에서 제안된 유체 흐름 알고리즘과 군집 분산 알고리즘을 이용하여 토폴로지 변환 알고리즘 (TCA; topology change algorithm) 구성한다. 그림 7은 기존의 FNN에 TCA를 적용한 모델을 소개한다. 실험이 진행되는 동안 두 개의 알고리즘이 반복적으로 수행되어 새로운 위치를 결정한다. 유체 흐름 알고리즘 수행 시 결정된 f_{move} 값에 의해서 노드는 이동된다. 알고리즘은 더 이상 이동하는 노드가 없거나 이웃 노드 수가 주어 진 N_{max} 보다 작은 경우 또는 제한된 시간동안만 수행된다. 본 논문의 성능 평가에서는 실험을 단순화시키기 위하여 $N_{max} = 0$, 제한 조건은 없는 것으로 실시한다.

2. 환경 및 파라미터 결정

제시된 토폴로지 변환 알고리즘의 중요 내용은 중력이 작용하는 자연계에서 유체의 흐름 개념이 적용된 것이다. 이러한 환경을 최대한 활용하기 위하여 본 논문에서는 가장 이상적인 경우를 가정한다. 첫째, 모바일 센서 노드가 활동하는 공간에 모든 신호 탐지기가 위치된 것으로 가정하고 알고리즘을 제시한다. 즉, 통신망역의 넓이를 $w \times h$ 로 표현할 때 신호 감지기의 개수는 식(5)와 같다.

$$D = wh \tag{5}$$



(a) 인접한 노드 (b) 방향 비교 (c) 방향 재설정

그림 5. 인접한 노드의 분산
Fig. 5. Dispersion of adjacent nodes.

Flock dispersion algorithm

```

1  for all sensors  $i=1, \dots, k$  do
2    Find nearest neighbor  $j$ 
3
4    if  $d_{ij}(t) < r_d$  then
5       $\Delta := \theta_i - \theta_j$ 
6      if  $|\Delta| < \theta_{\max}$  then
7        if  $\Delta > 0$  then
8           $\theta_i' = \Delta + \theta_{\max}$ 
9        else
10          $\theta_i' = \Delta - \theta_{\max}$ 
11        end if
12      end if
13    end if
14  end for

```

그림 6. 군집 분산 알고리즘

Fig. 6. Flock dispersion algorithm.

Fluid Neural Network with TCA

```

1  Initialize states:  $S_i(0) := S_a, i=1, \dots, k$ 
2  for  $t=1, \dots, T_{sim}$  do
3    for all automata  $i=1, \dots, k$  do
4      Calculate  $a_i(t)$  (see Eq. 1) and activate sensors with  $p_a$ 
5
6      Topology Change Algorithm
7      Find  $N(i, t)$ 
8      call fluid flow algorithm
9      call flock dispersion algorithm
10
11     if  $f_{move} == \text{true}$  then
12       Move to  $z$  at the speed of  $v$ 
13     end if
14
15     Decide to stay at the current location or to move to one of the
16     four neighbor sites
17     Exchange  $S_i(t-1)$  to  $N(i, t)$  and Calculate  $S_i(t)$  (see Eqs.
18     2 and 3)
19   end for
20 end for

```

그림 7. 토폴로지 변환 알고리즘이 적용된 FNN

Fig. 7. FNN with topology change algorithm.

여기서 w 는 통신 영역의 폭이고 h 는 높이에 해당한다. 이때 감지기의 위치 및 수는 구현 방법 및 경제적인 비용을 고려하여 결정될 수 있다. 예를 들면 감지기의 수를 임의로 제한하여 랜덤하게 위치시키거나 확률적인 방법을 사용할 수 있다.

둘째, 토폴로지 변환 알고리즘이 매 시간마다 수행되는 것은 비효율적인 측면과 계산 복잡도 관점에서 매우 비효율적이다. 따라서 적합한 알고리즘의 수행 조건과 수행 시간 결정은 새로운 연구 이슈이다. 본 연구에서는 자기-동기화 듀티-사이클링이 효과적으로 수행되기 위한 균등한 토폴로지 구성에 목표를 둔다. 이를 위하여 모바일 센서 노드의 수가 n 일 때, r_m 을 식(6)과 같이 결정한다.

$$r_m = \left\lceil \left(\frac{wh}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \right\rceil \quad (6)$$

위 식은 먼저 전체 망 영역에서 하나의 모바일 노드가 담당하는 영역 wh/n 을 구한다. 이때 각 노드가 이웃 노드와 연결성이 제공되기 위해서는 최소 통신 거리 r_m 을 폭과 높이로 하는 조건 $(r_m)^2 = wh/n$ 을 만족해야 한다.

IV. 성능 분석

제안된 토폴로지 변환 알고리즘을 평가하기 위하여 복잡계를 모델링하는 ABM (agent based model) 언어인 Netlogo^[14]를 사용한다. 모바일 센서 노드는 위치 및 방향 정보를 확보하고 요청 시 방송하거나 인접 노드에 전송한다. 본 논문에서는 노드의 송수신과 직접적으로 관계되는 매체접근제어와 라우팅 프로토콜은 고려하지 않는다. 통신망이 구성될 영역 $w \times h$ 는 100×100 으로 설정한다. 거리의 기본 단위는 $1m$, $10m$, 또는 그 이상으로 설정할 수 있다. 노드가 활성화된 상태에서 통신이 수행되기 때문에 이 부분은 논외로 한다. 노드 수 n 은 25, 50, 100, 200, 300 등 다양하게 적용하며 노드 수에 따른 r_m 은 식(6)에 의해서 각각 20, 14.1, 10, 7.1, 5.8로 결정되며 통신망 구성 영역의 기본 단위를 같이 사용한다. 실험이 수행되는 기본 시간 단위는 1분이다. 따라서 1시간 동안 60번 알고리즘이 수행되는 것으로 가정한다. 마지막으로 실험을 위한 센서 노드의 초기 분포 조건은 크게 3가지로 가정한다. 먼저 랜덤 (random)하게 망에 분포된 경우에 제안된 알고리즘을 적용하는 경우다. 두 번째는 정방형 통신 영역에서 모서리 부분 (corner)에 모두 모여 있는 경우다. 마지막은 모든 노드가 한쪽 측면 (side)에 모여 있는 초기 상태이다.

성능 파라미터는 이를 분석할 수 있어야 한다. 이를 위하여 이웃 노드 개수의 분포 특성, 토폴로지 변환 과정에서 평균 이웃 노드 수의 변화, 폭과 높이 영역에서 노드 수의 분산과 분산에 대한 평균, 그리고 안정화 상태까지 변화되는 동안 이동한 노드의 거리가 사용된다.

1. 알고리즘 분석

먼저 초기 센서 노드의 분포가 랜덤 토폴로지인 경우

에 대한 분석이다. 식(6)에서 결정된 r_m 에 대한 평가를 위하여 $\alpha = 1.0$ 일 때, r_m 을 0.5~1.5 까지 변화하여 성능 파라미터를 비교한다. 따라서 실험 가정은 $n = 100$, $r_s = r_m (\alpha = 1.0)$, $N_{max} = 0$, 그리고 $\theta_{max} = 45^\circ$ 로 가정한다. 실험 시간은 60회 실시하여 망의 안정 상태를 확인한다.

그림 8부터 그림 10까지는 r_m 에 따른 성능 평가 결과이다. 먼저 그림 8은 폭과 높이 영역에서 노드 수의 분산에 대한 평균으로서 $r_m = 7.5$ 와 10일 때 안정적인 분산 결과를 보인다. 그림 9의 이동 거리*를 고려하여

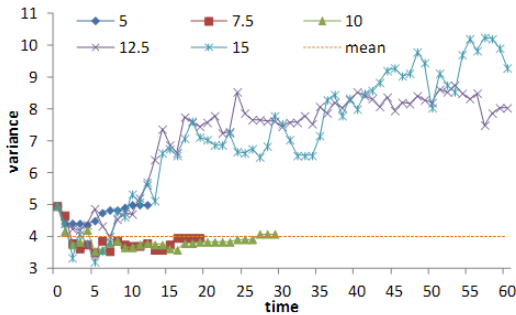


그림 8. 영역별 노드 수의 분산 ($n=100, \alpha=1.0$)
Fig. 8. Variance of the number of nodes ($n=100, \alpha=1.0$).

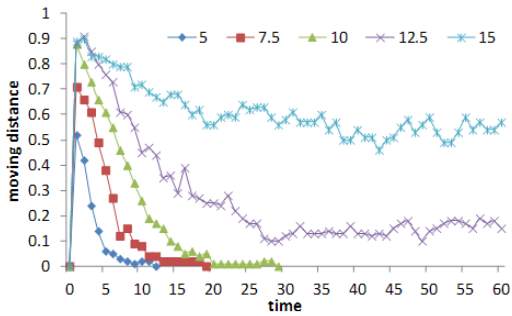
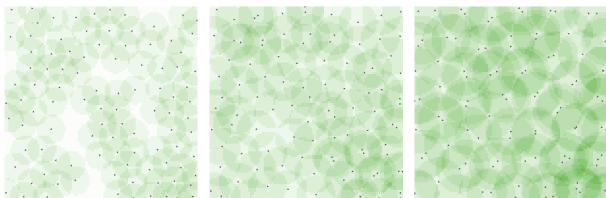


그림 9. 이동 거리 ($n=100, \alpha=1.0$)
Fig. 9. Moving distance ($n=100, \alpha=1.0$).



(a) $r_m = 7.5$ (b) $r_m = 10$ (c) $r_m = 12.5$
그림 10. r_m 에 따른 노드의 분포 ($n=100, \alpha=1.0$)
Fig. 10. Node dispersion for various r_m ($n=100, \alpha=1.0$).

* 이동 거리의 의미는 실험 시간 t 에 이동하면 1, 그렇지 않으면 0이다.

이 결과를 분석하면, 제안된 알고리즘이 수행되어 각각 20분, 30분 후에 망이 안정된 것을 확인할 수 있다. $r_m = 5$ 인 경우는 알고리즘이 정상적으로 수행되었지만 분산이 상대적으로 크며 1.25와 1.5인 경우에도 분산 값이 크고 증가됨을 알 수 있다. 따라서 이 실험에서는 r_m 가 7.5와 10일 때 기대했던 결과를 보임을 알 수 있다. 하지만 그림 10을 보면 수치상으로 큰 차이를 구분하기 어려웠던 결과가 다소 차이를 보인다. 즉, r_m 이 10일 때가 7.5인 경우에 비해서 균등하게 노드가 이동되어 망을 구성된 것으로 확인된다. 또한 12.5는 균등하게 배치되지만 2개 이상의 노드들이 모이는 현상이 발

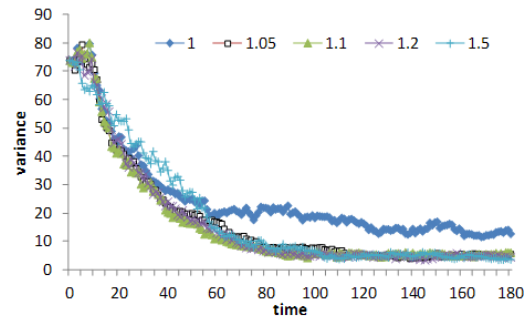


그림 11. 영역별 노드 수의 분산 ($n=100, r_m=10$)
Fig. 11. Variance of the number of nodes ($n=100, r_m=10$).

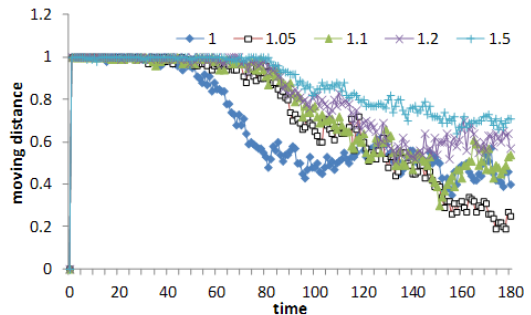
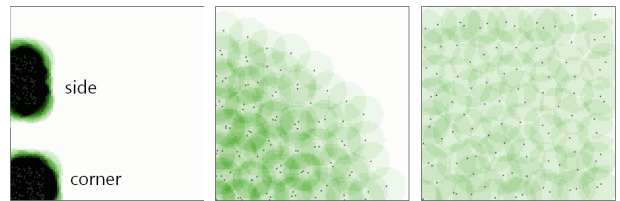


그림 12. 이동 거리 ($n=100, r_m=10$)
Fig. 12. Moving distance ($n=100, r_m=10$).



(a) 초기 조건 (b) $\alpha = 1.0$ (c) $\alpha = 1.1$
그림 13. r_m 에 따른 노드의 분포 결과 ($n=100, r_m=10$)
Fig. 13. Node dispersion for various r_m ($n=100, r_m=10$).

생된다. 랜덤 토폴로지에서 r_m 이 클수록 에너지 소비는 증가하고 노드가 정지하지 않으면 이동이 계속된다. 따라서 식(6)에서 제시한 방법으로 결정된 $r_m = 10$ 이 초기 랜덤 토폴로지에는 적절하다 할 수 있다.

그림 11에서 그림 13은 초기 모바일 센서 노드의 위치가 모서리에 위치한 경우에 대한 분석 결과이다. 그림 13(a)의 corner에 모여 있는 노드들이 망 전체에 분포되어야 한다. 이때는 α 가 1.0이상의 값으로 설정되어야 노드의 확산 이동이 가능하다. 먼저 그림 12는 영역별 노드 수의 분산에 대한 평균인데 α 가 1.05이상 일 때, 분산이 감소한다. 반면에 1.0인 경우에는 랜덤 토폴로지와는 다르게 감소되지 않는다. 그림 13은 $\alpha = 1.05$ 일 때 실험 60분 동안 이동 거리가 최소로 감소됨을 알 수 있다. 그림 14(b)와 14(c)는 α 에 따른 토폴로지 결과를 보인다. $\alpha = 1.0$ 일 때는 일정 시간 확산되다가 노드들이 더 이상 확산되지 못하는 결과를 얻는다. 반면에 $\alpha = 1.1$ 인 경우에는 노드들이 망에 균등한 상태로 확산된다. 하지만 $\alpha > 1.0$ 경우에는 $r_m < r_s$ 이 되기 때문에 매 시간 새로운 위치로 노드가 이동한다. 본 논문에서 제

안된 알고리즘이 위와 같은 경우에 적용되는 경우에는 토폴로지 변환 정지에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

그림 14와 그림 15는 $n = 100, r_m = 10$, 그리고 $\alpha = 1.1$ 일 때, 망의 초기 상태가 그림 13(a)와 같이 corner와 side인 경우를 비교한 것이다. 결과를 보면 망의 초기 상태의 영향으로 변환 과정에서 다소 차이는 있으나 결과적으로 영역별 노드 수의 평균 분산도 안정화되고 이동 거리도 감소한다. 이것은 제안된 알고리즘이 다양한 초기 조건에서도 운용됨을 나타낸다.

그림 16터 18까지는 랜덤 토폴로지에서 n 이 25, 50,

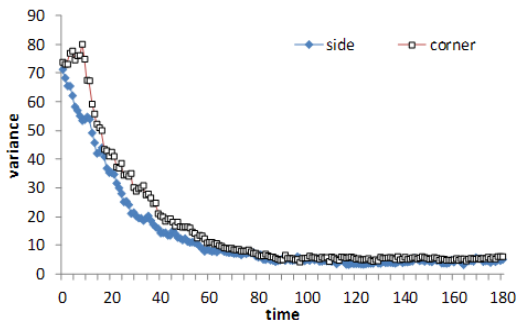


그림 14. 영역별 노드 수의 분산 ($n = 100, r_m = 10, \alpha = 1.1$)
Fig. 14. Variance of the number of nodes ($n = 100, r_m = 10, \alpha = 1.1$).

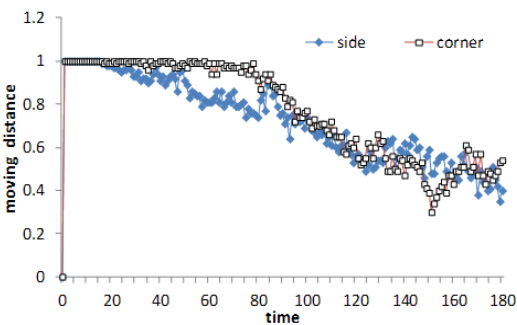


그림 15. 이동 거리 ($n = 100, r_m = 10, \alpha = 1.1$)
Fig. 15. Moving distance ($n = 100, r_m = 10, \alpha = 1.1$).

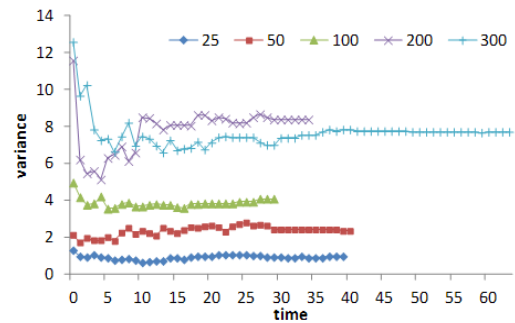


그림 16. 영역별 노드 수의 분산 ($\alpha = 1.0$)
Fig. 16. Variance of the number of nodes ($\alpha = 1.0$).

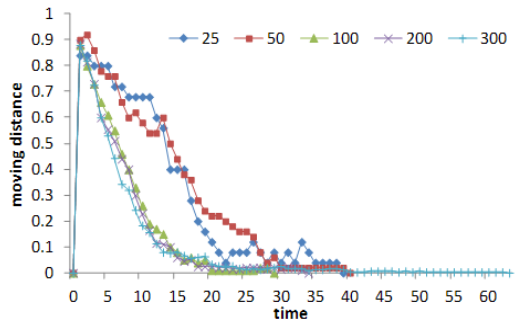


그림 17. 이동 거리 ($\alpha = 1.0$)
Fig. 17. Moving distance ($\alpha = 1.0$).

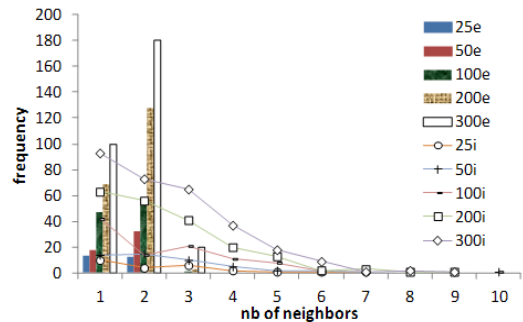


그림 18. 평균 이웃 노드 수 ($\alpha = 1.0$)
Fig. 18. Average number of neighbor nodes $\alpha = 1.0$).

100, 200, 그리고 300인 경우에 r_m 은 각각 20, 14.1, 10, 7.1, 그리고 5.8로 설정하고 $\alpha = 1.0$ 일 때, 성능 비교 결과이다. 그림 16은 노드의 이동 멈출 때까지 노드 수에 따른 평균 분산 값이 일정하게 유지됨을 보인다. 즉, 망을 구성하는 노드 수에 따라서 식(6)을 적용하여 r_m 값을 적합하게 결정하면 망은 노드의 이동으로 인해서 안정 상태를 유지한다. 그림 17은 실험이 진행되는 동안 노드의 이동 거리를 나타낸다. $n < 100$ 인 경우에는 망이 담당해야 할 영역에 비해서 노드 수가 적기 때문에 $n \geq 100$ 인 경우에 비해서 상대적으로 많다. 그렇지만 모든 경우에서 노드의 이동이 정지하고 균등한 분포로 토폴로지가 구성된다. 그림 18는 초기에 주어진 랜덤 토폴로지 $n_i, n \in \{25, 50, 100, 200, 300\}$ 상태의 평균 이웃 노드수와 실험 후 토폴로지 n_e 를 비교한 것이다. 대부분의 경우에 초기 상태에서는 이웃 노드의 분포가 넓게 유지된다. 반면에 알고리즘이 수행된 후에는 이웃 노드 수가 대부분 1 또는 2로 결정된다. 이것은 망의 노드 수가 다양해도 알고리즘이 효과적으로 적용됨을 나타낸다.

2. FNN 모델에 적용

제안된 토폴로지 변환 알고리즘 (TCA)을 FNN에 적용하여 성능을 평가한다. 본 논문에서는 TCA를 적용하여 자기-동기화 듀티-사이클링이 더 효과적으로 이뤄지는지 판단한다. 실험을 위하여 기존 연구에서 사용한 실험 가정을 그대로 사용하고 TCA 알고리즘을 적용한다. 먼저 [9]를 참조하여 활성화 확률 $p_a = 0.001$, $S_a = 0.01$, $r_c = 1.0$, 그리고 $g = 0.1$ 로 설정한다. 그리고 $n = 100$, $r_m = 10$, $\alpha = 1.2$ 이며 랜덤 토폴로지에 적용하고 6일을 실험한다. 이에 대한 성능 평가는 식(7)에 주어진 평균 활성화 $A(t)$ 를 이용한다.

$$A(t) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k a_j(t) \in [0, 1] \quad (7)$$

망을 구성하는 모바일 센서 노드 간에 동기가 잘되면 될수록 이 값은 큰 값이거나 아주 작은 값으로 나타난다. 그림 19는 처음 3일간의 실험 결과 중에서 평균 이웃하는 노드의 수를 비교한다. FNN은 랜덤하게 이동하기 때문에 이웃노드의 수에 큰 변화가 없다. 반면에 FNN-TCA는 점점 이웃노드의 수가 감소됨을 알 수 있

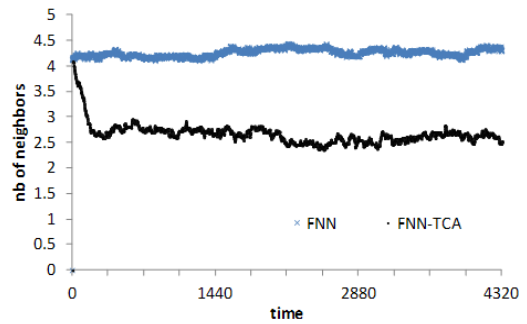


그림 19. 평균 이웃 노드 수 ($n=100, r_m=10, \alpha=1.2$)
Fig. 19. Average number of neighbor nodes ($n=100, r_m=10, \alpha=1.2$).

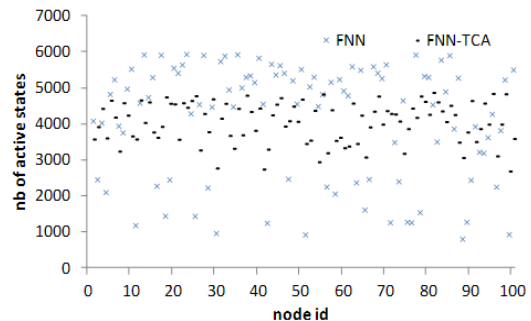


그림 20. 활성화 빈도 ($n=100, r_m=10, \alpha=1.2$)
Fig. 20. Histogram of active states. ($n=100, r_m=10, \alpha=1.2$).

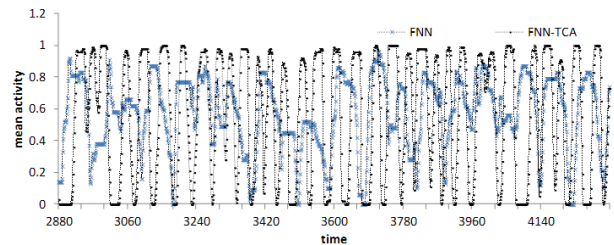


그림 21. 평균 활성화 ($n=100, r_m=10, \alpha=1.2$)
Fig. 21. Average activity ($n=100, r_m=10, \alpha=1.2$).

는데 이것은 노드가 망에 균등하게 분포됨을 나타낸다.

그림 20은 실험이 진행된 후에 각 노드별 활성화 빈도를 히스토그램으로 나타낸 것이다. FNN은 노드별로 차이가 많음을 알 수 있는데 이것은 특정 노드들이 상대적으로 많이 활성화(active)되어 에너지 소비가 발생됨을 나타낸다. 반면에 FNN-TCA는 그 폭이 줄어들어 노드간에 비슷한 에너지 소비를 예상할 수 있다.

그림 21은 3일째 되는 날의 평균 활성화를 비교한 것이다. FNN에 비해서 FNN-TCA가 평균 활성화 값이 모두 1이거나 0이 되는 빈도가 높음을 확인할 수 있다.

이상과 같은 결과로 알 수 있는 것은 제안된 알고리즘이 적용됨으로써 노드가 망에 균등하게 분포되고 비슷하게 에너지를 소비하며 듀티-사이클의 동기가 잘 되고 있음을 나타낸다.

V. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 에너지 수확 모바일 센서망에서 듀티-사이클을 효과적으로 동기 시키기 위한 토폴로지 변환 알고리즘을 소개한다. 이를 위하여 유체 흐름 알고리즘과 군집 분산 알고리즘을 제시한다. 신호 탐지기에 의한 모바일 센서 노드의 군집 정보를 이용하여 노드의 다음 위치를 결정하고 노드들이 밀집되지 않도록 일정한 범위에서 새로운 방향을 결정한다. 제시된 토폴로지 변환 알고리즘을 자기-동기화 듀티-사이클링 기반 유체 신경망에 적용하여 망을 구성하는 노드간의 동기화 능력이 향상됨을 보인다. 또한 노드와 노드간의 활성 상태를 균등하게 유지하여 편중된 에너지 소비를 줄인다.

REFERENCES

- [1] D. Wagner and R. Wattenhofer, editors. "Algorithms for Sensor and Ad Hoc Networks," volume 4621 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Verlag, Berlin, Germany, 2007.
- [2] F. Zhao and L. Guibas. "Wireless Sensor Networks—An Information Processing Approach," *The Morgan Kaufmann Series in Networking*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 2004.
- [3] Xiong Hongyu, Wonho So, "Performance Evaluation of Traffic Adaptive Sleep based MAC in Clustered Wireless Sensor Networks," *Journal of IEEK vol. 48-CI, no. 5*, pp.561-570, 2011. 9.(In Korean)
- [4] Z.G. Wan, Y.K. Tan and C. Yuen, "Review on Energy Harvesting and Energy Management for Sustainable Wireless Sensor Networks," , *2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Jinan, 25-28 Sept. 2011.
- [5] Zhi Ang Eu, Hwee-Pink Tan, Winston K.G. Seah, "Design and performance analysis of MAC schemes for Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting," *Ad Hoc Networks 9* (2011) 300-323
- [6] Aman Kansal, Jason Hsu, Sadaf Zahedi, and Mani B. Srivastave, "Power management in Energy harvesting sensor networks," *Trans. on Embedded Computing Sys.*, 6(4):32, 2007.
- [7] C. M. Vigorito, D. Ganesan, and A. G. Barto, "Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks," in *Proceedings of SECON 2007 -4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communicaitons and Networks*, pages 21-30. IEEE press, 2007.
- [8] Delgado, J. and Sole, R. V. "Self-synchronization and task fulfilment in ant colonies," *J. Theor. Biol.*, 205, 433-441, 2000.
- [9] Hernandez, H., Blum, C., "Asynchronous simulation of self-synchronized duty-cycling mechanism for mobile sensor networks," In *Proc. BADS 2009-Workshop on Bio-inspired Algorithms for distributed Systems*, Barcelona, Spain, 15-19 June, PP. 61-68. 2009.
- [10] Hernandez, H., Blum, C., "Foundations of ANTICYCLE: Self-synchronized Duty-cycling in Mobile Sensor Networks," *The Computer Journal Advance Access published*, January 20, 2011.
- [11] Wonho So, Sunsik Roh, Youngchun Kim, "The Control of Self-synchronized Duty-cycling in Energy Harvesting Mobile Sensor Networks," *2013 IEEK Summer Conference, vol. 36, no.1*, Jeju Grand Hotel, 2013. 7. 3-5 (In Korean)
- [12] Pedro M. Wishtman and Miguel A. Labrador, "Topology Maintenance: Extending the Lifetime of Wireless Sensor Networks," *LATINCOM '09. IEEE Latin-American Conference on Communications*, Medellin, 10-11 Sept. 2009.
- [13] Ameer Abbasi, Mohamed Younis, Uthman Baroudi, "Restoring Connectivity in Wireless Sensor-Actor Networks with Minimal Topology Changes," *2010 IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, 23-27 May 2010.
- [14] netlogo: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

— 저 자 소 개 —

소원호(정회원)
대한전자공학회 논문지
제43권 TC편 1-14 참고