

센서의 상대적 위치정보를 이용한 무선 센서 네트워크에서의 클러스터링 알고리즘

(A Relative Location based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks)

정우현* 장형수**
(WooHyun Jung) (HyeongSoo Chang)

요약 본 논문에서는 GPS가 없는 일반적인 Wireless Sensor Networks(WSNs)상에서 상대적 위치 정보를 이용하여 지리적으로 고른 cluster를 구성하고, sensor와 BS사이의 거리를 고려하여 cluster head의 선출빈도를 조절하는 새로운 centralized clustering algorithm "RLCA : Relative Location based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks"를 제안하고, RLCA의 에너지 소비 효율성이 LEACH에 비해 높다는 것을 실험적으로 보인다.

키워드 : WSNs, centralized clustering algorithm, LEACH

Abstract This paper proposes a novel centralized clustering algorithm, "RLCA : Relative Location based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks," for constructing geographically well-distributed clusters in general WSNs. RLCA does not use GPS and controls selection-rate of cluster-head based on distances between sensors and BS. We empirically show that RLCA's energy efficiency is higher than LEACH's.

Key words : WSNs, centralized clustering algorithm, LEACH

1. 서론

Wireless Sensor Networks(WSNs)는 sensor들로부터 sensing된 정보를 무선의 통식 방식을 통해 Base Station(BS)에 전달하는 network 환경을 의미한다. WSNs는 environmental monitoring, combat field surveil-

lance 등의 다양한 용도로 사용되는데, 이때 sensor의 분포 지역은 일반적으로 BS와 먼 거리에 위치하게 된다. 이러한 WSNs를 구축하는데 있어서 가장 중요하게 고려되어야할 사항 중 하나가 sensor의 energy가 모두 소모될 때까지 소요되는 시간을 의미하는 sensor의 lifetime이다. 그 이유는 battery에 의해 보유되어지는 sensor의 energy는 한번 소모되면 다시 충전될 수 없기 때문이다.

WSNs 상에서 sensor는 sensing, data processing, radio transmission 등의 작업에 energy를 소비하게 된다. 이 중 sensing과 data processing에 소비되는 energy양은 모든 sensor에서 거의 일치하고, radio transmission에 소비되는 energy양에 비해 상대적으로 매우 적기 때문에 sensor의 lifetime을 연장하기 위해서는 energy 효율적인 radio transmission에 초점을 맞춰야 한다.

radio transmission에 소비되는 energy 양을 줄이기 위한 대표적인 방법 중 하나가 clustering이다. WSNs 상에서 clustering이란 sensor들을 cluster로 나누어 각 cluster에서 cluster head로 지정된 sensor만이 BS와 통신하도록 하는 방식을 의미한다. 이때 cluster 내에

* 이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-10511-0).

** 이 논문은 2008 한국컴퓨터종합학술대회에서 '센서의 상대적 위치정보를 이용한 무선 센서 네트워크에서의 클러스터링 알고리즘'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

* 정 회 원 : 서강대학교 컴퓨터공학과
jwh81@sogang.ac.kr

** 정 회 원 : 서강대학교 컴퓨터공학과 교수
hschang@sogang.ac.kr

논문접수 : 2008년 8월 27일

심사완료 : 2009년 2월 10일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이때, 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 제3호(2009.6)

속한 sensor들은 BS가 아닌 cluster head에게 sensing 된 정보를 보내게 되고, cluster head는 data gathering 을 통해 cluster 내의 정보를 통합하여 BS에게 전송하게 된다. radio transmission에 소비되는 energy 양은 거리의 제곱에 비례하기 때문에 sensor와 BS 사이의 거리가 먼 일반적인 WSNs에서 모든 sensor가 BS와 직접 통신하는 방식보다는 clustering을 통해 선출된 일부의 sensor(cluster head)가 BS와 통신하는 방식이 energy 소비 측면에서 매우 효율적일 수 있는 것이다.

일반적으로 WSNs에 적용되는 clustering algorithm 으로는 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[1]가 있다. 다른 sensor에 비해 energy 소모가 많은 cluster head의 역할을 모든 sensor가 똑같은 횟수로 수행하도록 하는 것이 LEACH의 기본 원리인데, 매 round 마다 cluster head가 random하게 선출되기 때문에 cluster head들이 sensor 분포지역의 가장 자리에 몰려서 위치할 가능성이 존재하게 된다. 이 때 cluster 내의 sensor와 cluster head간의 거리가 멀어지는 경우가 생기게 되기 때문에 energy 비효율적인 cluster가 구성되게 된다.

LEACH-C(LEACH-Centralized)[2]는 BS에서 clustering을 진행하는 centralized clustering algorithm으로써 지리적으로 고르게 cluster를 형성하기 위하여 sensor의 절대적 위치정보를 이용한다. 즉, 각 sensor의 Global Positioning System(GPS)를 통해 전달되어지는 절대적 위치정보와 sensor의 energy 보유량 정보를 수집한 BS는 annealing algorithm을 통해 energy 효율적인 cluster 개수를 결정하고, cluster head와 cluster 내의 sensor 간의 거리의 합이 최소가 되게 하는 cluster를 구축하는 것이 LEACH-C의 기본 원리이다. 하지만 sensor가 GPS를 갖출 WSNs에만 적용될 수 있다는 제약이 있다.

BCSP(Base station Centralized Simple clustering Protocol)[3] 역시 BS에서 clustering을 진행하는 centralized clustering algorithm으로써 cluster의 개수를 일정하게 유지하고, energy 보유량이 많은 sensor에게 energy 소비 부담이 많은 cluster head의 역할을 수행하게 하여 energy 효율적인 clustering이 진행되게 하는데 목표를 두고 있다. 하지만 BCSP의 cluster head 선출과정은 오직 sensor의 남은 energy 보유량에만 의존하기 때문에 지리적으로 고른 cluster의 구성은 보장하지 못한다.

본 논문에서는 GPS가 없는 일반적인 WSNs에 적용될 수 있는 centralized clustering algorithm인 RLCA (Relative Location based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks)를 제안하고자 한다. RLCA

는 signal strength를 통해 계산된 거리정보를 이용하여 sensor의 상대적 위치를 추정된 후 상대적 위치 정보를 바탕으로 cluster head가 지리적으로 고르게 분포하도록 하여 energy 효율적인 cluster가 구성되게 하는 clustering algorithm이다. 뿐만 아니라 RLCA는 BS와 sensor간의 거리를 고려하여 cluster head 선출 빈도를 조절함으로써 해서 특정 sensor의 energy가 급격히 소모되지 않게 한다. Energy를 모두 소모한 sensor가 처음 발생하는 데까지 걸리는 시간을 WSNs의 lifetime이라 정의하였을 때 실제 실험에서 RLCA는 LEACH보다 WSNs의 lifetime을 상당히 연장시키는 결과를 보였다.

이 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 본 논문에서 다루려는 문제를 정의하고, 3장에서는 RLCA의 자세한 algorithm에 대해 서술할 것이다. 4장에서는 LEACH와의 비교 실험을 통해 RLCA의 효율성에 대해 분석하고, 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대해 언급할 것이다.

2. Problem Outline

2.1 Network Model

본 논문에서는 아래와 같은 가정을 만족하는 일반적인 WSNs를 다룬다.

- 하나의 Base Station(BS)과 다수의 sensor로 이루어져 있다.
- 모든 sensor와 BS는 고정되어 있고, BS는 sensor의 분포 지역으로부터 먼 거리에 위치해 있다.
- 모든 sensor는 BS 혹은 다른 sensor와 one-hop으로 통신할 수 있는 거리에 놓여있다.
- 모든 sensor의 위치는 알려져 있지 않다. (sensor에는 GPS와 같은 위치 탐지 장치가 장착되어 있지 않다.)
- sensor의 battery는 충전이 불가능 하다.
- sensor는 signal을 받을 경우 signal strength를 바탕으로 거리를 측정할 수 있다.
- 모든 sensor는 같은 빈도로 주위 환경을 감지한다.
- 모든 sensor는 time synchronization 되어있다.

2.2 Problem Setup

2.1절에서 가정한 WSNs에 대해 전체 network를 하나의 그래프 $G=(V, E)$ 로 나타내도록 하자. 이때 그래프의 vertex는 BS와 sensor들을 나타내게 된다. BS를 포함한 node들의 개수가 총 $n+1$ 개일 때 Base Station은 BS로 각각의 sensor는 vertex v 로 표시될 수 있고, $V=\{BS, v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 가 된다. 여기서 $v, u \in V$ 인 vertex v, u 에 대해서 $(v, u) \in E$ 일 경우 v, u 가 나타내는 sensor는 서로 통신 가능함을 의미한다.

위와 같이 그래프로 표시되는 network상에서 energy

에 제약이 있는 sensor의 energy 소비 효율을 높이기 위해서 clustering을 하고자 한다. sensor의 개수를 n 이라 하고, 이를 $k(k \leq n)$ 개의 부분으로 나눌 때 각 부분을 $V_i(1 \leq i \leq k)$ 라 나타내면, (1), (2), (3) 성립한다.

$$V_1, V_2, \dots, V_k \subset V, V_i \neq \emptyset \quad (1)$$

$$V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_k \cup \{BS\} = V \quad (2)$$

$$V_i \cap V_j = \emptyset, 1 \leq i, j \leq k, i \neq j \quad (3)$$

여기서 각각의 $V_i(1 \leq i \leq k)$ 를 cluster라 했을 때 각각의 cluster에 속한 sensor 중 단 하나의 sensor만이 BS와 직접 통신하는 cluster head의 역할을 수행하게 된다. 본 논문에서 clustering에 관련하여 사용되는 parameter를 표 1에 정리하였다.

가정에 따르면 모든 sensor는 같은 빈도로 BS에 전송할 data를 갖게 된다. 그러므로 각각의 sensor가 sensing하는 횟수로 해당 network의 시간 단위가 정의될 수 있다. 이를 $t(= 0, 1, 2, \dots)$ 로 나타내기로 하자. 이때 clustering algorithm은 시간 단위인 t 의 간격으로 cluster의 개수($=k(t)$), cluster($=CLUSTER(t)$), 그리고 cluster head($=CH(t)$)를 결정하는 algorithm을 의미한다. 본 논문에서 다루는 network model에서 clustering algorithm이 입력으로서 사용할 수 있는 parameter는 sensor의 잔여 energy($=E(t-1)$)와 signal strength를 바탕으로 계산된 거리정보($=D(V)$) 등이므로 식 (4)가 성립하게 된다.

$$A(t, E(t-1), D(V)) = (k(t), CH(t), CLUSTER(t)), \text{ where } t \geq 1, A \in \text{Clustering_A} \quad (4)$$

clustering algorithm에 의해 cluster와 cluster head가 결정되면, radio model에 따라 sensor들의 data 전송 경로가 결정되고, 그에 따라 data 전송 후 각각의 sensor가 갖는 잔여 energy가 구해지게 된다. 본 논문

에서는 cluster head가 아닌 sensor는 cluster head에게 data를 전송하고, cluster head는 cluster 내의 data를 취합하여 BS에게 전송하는 일반적인 radio model을 사용하도록 한다. cluster의 개수($=k(t)$), cluster($=CLUSTER(t)$), cluster head($=CH(t)$), data 전송 전 남아있는 energy($=E'(t)$) 등의 parameter를 통해 radio model에 따른 data 전송 후 sensor의 잔여 energy($=E(t)$)를 구하는 함수를 R 이라 하면, 식 (5)가 성립하게 된다.

$$R(k(t), CH(t), CLUSTER(t), E'(t)) = E(t) \quad (5)$$

본 논문에서는 energy를 모두 소모한 sensor가 처음 발생하는데 까지 걸리는 시간을 최대화하는 clustering algorithm을 근사하는 algorithm을 구현하려고 한다. 즉, 임의의 multiset X 에 대하여 $S(X)$ 를 (6)과 같이 정의하였을 때, 식 (7)을 만족하는 A' 와 근접한 WSNs lifetime을 얻을 수 있는 clustering algorithm을 고안하고자 하는 것이다.

$$S(X) = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \notin X \\ 1 & \text{if } 0 \in X \end{cases} \quad (6)$$

$$A' \in \arg \max_{A \in \text{Clustering_A}} \left\{ t \mid \begin{array}{l} S(R(A(t-1), E(t-2), D(V)), E'(t-1))) = 0, \\ S(R(A(t), E(t-1), D(V)), E'(t))) = 1, t \geq 1 \end{array} \right\} \quad (7)$$

3. RLCA

RLCA는 WSNs의 lifetime을 연장하기 위해서 다음의 두 가지 목적을 추구한다.

- 지리적으로 cluster head의 위치가 고르게 분산되도록 한다.
- sensor의 위치가 BS로부터 멀수록 cluster head로 선출되는 빈도를 낮춘다.

두 가지 목적 모두 radio transmission에 소비되는 energy를 최소화하는 것과 관련이 있다. 즉, cluster head가 sensor 분포지역의 가장자리에 뭉쳐서 선출되지

표 1 parameter의 의미

t	sensor의 sensing 횟수
$e_i(t)$	sensor v_i 가 t 번째 data를 전송한 후 갖게 되는 잔여 energy ($1 \leq i \leq n, t \geq 0$)
$e'_i(t)$	sensor v_i 가 t 번째 data 전송을 위한 clustering을 끝낸 후 갖게 되는 energy ($1 \leq i \leq n, t \geq 1$)
$E(t)$	$= \{e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)\}$
$E'(t)$	$= \{e'_1(t), e'_2(t), \dots, e'_n(t)\}$
$d(v, u)$	sensor v 와 sensor u 사이의 거리 ($v, u \in V$)
$D(V)$	$= \{d(v_i, v_j) \mid i > j, 1 \leq i, j \leq n\}$
$k(t)$	t 번째 data 전송을 위한 clustering 후 구성되는 cluster의 개수 ($t \geq 1$)
$V_j(t)$	t 번째 data 전송을 위한 clustering 후 구성되는 cluster ($1 \leq j \leq k, t \geq 1$)
$CLUSTER(t)$	$= \{V_1(t), V_2(t), \dots, V_k(t)\}$
$CH(j, t)$	$V_j(t)$ 의 cluster head ($1 \leq j \leq k$)
$CH(t)$	$= \{CH(1, t), CH(2, t), \dots, CH(k, t)\}$
Clustering_A	WSNs에 적용되는 모든 clustering algorithm의 집합

않도록 하여 cluster head와 sensor간의 거리가 멀어지는 경우를 방지하고, BS와 거리가 먼 sensor가 BS와 통신할 경우 radio transmission에 소비되는 energy가 크다는 점을 고려하여 cluster head로 선출되는 횟수를 상대적으로 줄이는 idea를 사용한다.

RLCA는 sensor의 상대적 위치를 지정하는 단계, cluster head가 선출되는 집합을 지정하는 단계, cluster를 setup하는 단계, 그리고 data transmission의 단계로 구성된다. 본 논문에서는 sensor의 상대적 위치를 지정하는 단계와 cluster 선출 집합을 지정하는 단계에 대한 설명 부분에 예제를 포함하여 이해를 돕도록 하겠다.

3.1 Sensor의 상대적 위치 지정

Sensor의 상대적 위치를 지정하는 과정은 sensor가 sensing을 시작하기 이전 단계인 network deployment phase에서 이루어진다. 이 과정은 BS가 모든 sensor에게 같은 power level로 "hello" message를 broadcasting하는 것으로부터 시작된다. "hello" message를 받은 sensor들은 signal strength를 통해 BS로부터의 거리를 계산한 후 자신을 제외한 다른 sensor들을 상대로 CSMA MAC protocol을 사용하여 "hello" message를 broadcasting한다. 이때 power level은 BS가 보냈던 "hello" message의 power level과 동일하게 하여 broadcasting의 범위가 sensor 분포지역의 많은 부분 혹은 전체를 포함하게 한다. 각각의 sensor는 다른 sensor들로부터 "hello" message를 받으면 message를 보낸 sensor와의 거리를 계산하게 된다. 다른 sensor로부터 "hello" message를 전달받는 과정이 끝나면, 각각의 sensor는 BS와의 거리, 다른 sensor와의 거리, 현재 자신의 energy 보유량 등의 정보를 취합하여 BS에게 전달한다.

Sensor들로부터 거리정보를 받은 BS는 sensor들의 위치를 $(d(BS, v_i), \theta_{v_i})$ 의 형식으로 지정한다. 이때 $1 \leq i \leq n$ 이고, $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 를 만족한다. sensor들의 위치를 지정하는 과정은 다음과 같다.

Step 1. BS를 제외한 임의의 $v (v \in V)$ 를 선택하여 $(d(BS, v), 0^\circ)$ 로 위치를 지정한다.

Step 2. v 와의 거리정보가 있는 sensor 중 임의의 하나($=u (u \in V)$)를 선택하여, 선택한 sensor의 위치를 $(d(BS, u), \theta_u)$ 로 지정한다. 이때 θ_u 는 주어진 거리정보를 cosine 제 2법칙에 대입함으로 해서 식 (8)과 같이 구해진다. 만약 $\theta_u = 0$ 일 경우 step 2를 반복한다.

$$\theta_u = \cos^{-1} \left(\frac{d(v, u)^2 - d(BS, v)^2 - d(BS, u)^2}{-2 \times d(BS, v) \times d(BS, u)} \right), \theta_u \geq 0 \quad (8)$$

Step 3. v, u 모두와 거리정보가 있는 sensor 중 임의

의 하나($=w (w \in V)$)를 선택하여, 선택한 sensor의 위치를 $(d(BS, w), \theta_w)$ 로 지정한다. 이때 θ_w 를 구하기 위해서 식 (9), 식 (10)을 통해 θ_1 과 θ_2 를 구한다. 그림 1은 w 의 위치가 ②내에 있을 때 θ_1 과 θ_2 의 의미를 나타낸다.

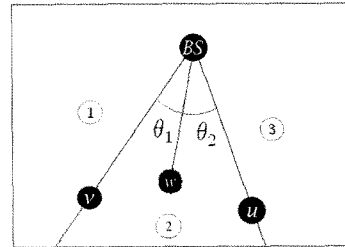


그림 1 w의 위치

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{d(v, w)^2 - d(BS, v)^2 - d(BS, w)^2}{-2 \times d(BS, v) \times d(BS, w)} \right), \theta_1 \geq 0 \quad (9)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{d(u, w)^2 - d(BS, u)^2 - d(BS, w)^2}{-2 \times d(BS, u) \times d(BS, w)} \right), \theta_2 \geq 0 \quad (10)$$

Step 4. 아직 위치가 지정되지 않은 sensor에 대해서 이미 위치가 지정된 두 sensor를 기준으로 step 3을 반복한다.

그림 2, 그림 3, 그림 4는 3개의 sensor의 상대적 위치를 지정하는 과정을 보여주는 예이다. 그림 2에서와

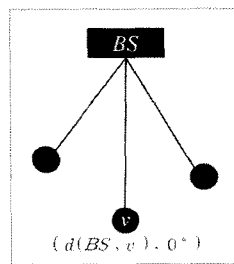


그림 2 v의 위치 지정

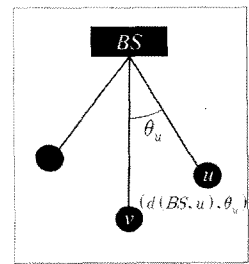


그림 3 u의 위치 지정

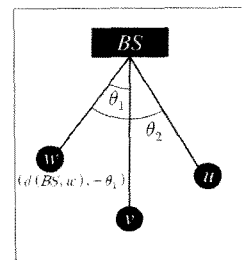


그림 4 w의 위치 지정

같이 우선 BS는 임의의 sensor(=v)를 선택하여 $(d(BS, v), 0^\circ)$ 로 위치를 지정한다. 그 후 v와의 거리 정보가 있는 임의의 sensor(=u)를 선택하여 식 (8)의 cosine 법칙을 통해 θ_u 를 구하고, u의 위치를 $(d(BS, u), \theta_u)$ 로 지정한다. 마지막으로 v, u 모두와 거리정보가 있는 sensor(=w)에 대하여 식 (9), 식 (10)에 의해 그림 4에 표시된 θ_1, θ_2 를 각각 구하고, $\theta_1 < \theta_2$ 와 $\theta_2 > |\theta_u - \theta_v|$ 가 만족되므로 w의 위치를 $(d(BS, w), -\theta_1)$ 로 지정한다.

3.2 Cluster Head 선출 집합 지정

이 과정은 cluster head가 지리적으로 고르게 선출되도록 하기 위하여 cluster head가 선출되는 집합을 상대적 위치 정보를 바탕으로 지정하는 과정이다. 이때 cluster head가 선출되는 집합에는 energy가 완전히 소모되지 않은 sensor만이 포함되게 된다. 즉, energy가 완전히 소모된 sensor가 추가되는 시간 $t (t \geq 1)$ 마다 cluster head 선출 집합은 새롭게 지정된다. Cluster head의 개수가 총 k개일 때 시간 t에 대한 cluster head 선출 집합 $C_i(t) (1 \leq i \leq k)$ 는 다음의 (11), (12), (13), (14)를 만족한다.

$$C_1(t), C_2(t), \dots, C_k(t) \subset V, C_i(t) \neq \emptyset \quad (11)$$

$$C_1(t) \cup \dots \cup C_k(t) \cup \{BS\} \quad (12)$$

$$\cup \{\text{set of dead sensors at time } t\} = V$$

$$C_i(t) \cap C_j(t) = \emptyset, 1 \leq i, j \leq k, i \neq j \quad (13)$$

$$CH(t) = \{c_1(t), c_2(t), \dots, c_k(t)\}, \quad (14)$$

$$c_j(t) \in C_j(t), 1 \leq j \leq k$$

우선 BS는 식 (15), 식 (16), 식 (17), 식 (18)에 의해 주어 진 시간 t에 대하여 $min_distance(t), max_distance(t), min_angle(t), max_angle(t)$ 의 값을 구한다.

$$min_distance(t) = \min \{d(BS, v_i) \mid v_i \in V, e_i(t) > 0, 1 \leq i \leq n\} \quad (15)$$

$$max_distance(t) = \max \{d(BS, v_i) \mid v_i \in V, e_i(t) > 0, 1 \leq i \leq n\} \quad (16)$$

$$min_angle(t) = \min \{\theta_{v_i} \mid v_i \in V, e_i(t) > 0, 1 \leq i \leq n\} \quad (17)$$

$$max_angle(t) = \max \{\theta_{v_i} \mid v_i \in V, e_i(t) > 0, 1 \leq i \leq n\} \quad (18)$$

이 값들에 의해 그림 5의 색칠한 부분과 같은 구역이 정해지는데, BS는 이를 sensor 분포지역으로 인식한다. 이때 색칠된 부분을 벗어나는 sensor는 존재할 수 없기 때문에 점선으로 표기된 sensor의 실제 분포지역은 sensor가 인식한 분포지역에 포함되게 된다. 이후 BS는 결정된 sensor의 분포지역을 $k(t)$ 개의 구역으로 나눈다. Cluster head의 선출비율을 P_{opt} 라 하였을 때 $k(t)$ 는

식 (19)와 같이 구해진다.

$$k(t) = (\text{number of alive sensors at time } t) \times P_{opt} \quad (19)$$

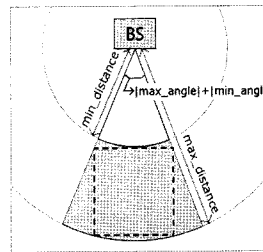


그림 5 BS가 인식한 sensor 분포

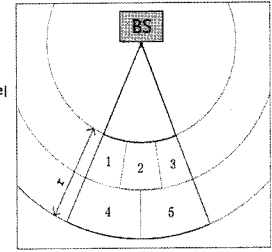


그림 6 k=5일 때, 분할된 sensor 지역 분포지역

Sensor의 분포지역을 $k(t)$ 개의 구역으로 나누는 방법은 다음과 같다. 우선 그림 6에 표기된 $r (= max_distance(t) - min_distance(t))$ 의 부분을 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor$ 로 균등하게 나누어 sensor분포지역을 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor$ 개만큼 세로로 나눈다. 이렇게 세로로 나눈 구역을 BS로부터 가까운 순서로 큰구역1, 큰구역2, ..., 큰구역 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor$ 라고 하자. 그림 6과 같은 경우 1, 2, 3으로 표기된 구역을 합친 구역이 큰구역1이 되고, 4, 5를 합친 구역이 큰구역2가 된다. 이후 $k(t) / \lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor$ 의 나머지 값을 $residue(t)$ 라 하였을 때 큰구역 $j (1 \leq j \leq residue(t))$ 는 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor + 1$ 개로, 그 외의 큰구역 $j' (residue(t) + 1 \leq j' \leq \lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor)$ 는 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor$ 개로 균등하게 가로로 나눈다. 만약 sensor가 가로(세로)로만 넓게 분포한 경우 세로로 나누는 비율을 줄여서(늘려서) sensor 분포지역을 나누도록 한다. 이렇게 나눈 각 구역에 그림 6과 같은 순서로 숫자를 매겨서 구역1, 구역2, ..., 구역 $k(t)$ 와 같이 표기하도록 하자. 이때 구역 $i (1 \leq i \leq k(t))$ 에 속한 sensor들을 각각 cluster head 선출 집합 $C_i(t)$ 에 포함시킨다. 이를 식 (20)과 같이 나타내자.

$$C_i(t) = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{i(h(t))}\}, c_{h(t)} \in V, 1 \leq h(t) \leq n \quad (20)$$

이때 $C_i(t) \cap C_j(t) = \emptyset (1 \leq i, j \leq k, i \neq j)$ 이 되도록 구역의 경계에 놓인 sensor는 한 구역으로만 포함되게 한다.

식 (14)에서와 같이 각각의 $C_i(t)$ 에 속한 sensor들 중 하나의 sensor만이 cluster head로 선출된다. 따라서 $C_i(t)$ 에 속한 sensor의 개수에 따라 각 sensor가 cluster head로 선출될 확률이 달라진다. 만약 $C_i(t)$ 에 속한 sensor들의 위치가 BS로부터 멀고, $|C_i(t)|$ 의 값이 작을 경우 해당 $C_i(t)$ 에 속한 sensor들의 cluster head 선출 빈도는 높아지게 되고, energy는 매우 빠르게 소모될

것이다. 이러한 점을 고려하여 sensor들을 $C_i(t)$ 에 다음과 같이 재배치하도록 한다. 우선 sensor의 radio transmission에 소모되는 energy가 거리의 제곱 값에 비례하다는 점을 고려하였을 때 각 sensor가 BS와 통신할 때 소모되는 energy에 반비례한 cluster head 선출빈도를 갖기 위해서는 $C_i(t)$ 에 속한 sensor의 개수가 구역*i*와 BS사이의 거리 제곱 값에 비례해야한다. 이와 같이 BS와의 거리 제곱 값에 비례한 $|C_i(t)|$ 의 적정 값을 $S_i(t)$ 라 하자. 이때 동일한 큰구역*j* ($1 \leq j \leq \lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor$)에 위치한 sensor들이 구성하는 $C_i(t)$ 들의 $S_i(t)$ 값은 BS로부터 거리가 일치하기 때문에 같은 값을 갖게 된다. 이 값을 큰구역*j*와 시간 t 에 대하여 $s(j,t)$ 라고 하자. 이때 $s(j,t)$ 는 식 (21)의 $cost(j,t)$ 값을 이용하여 식 (22), 식 (23)에 의해 구해지게 된다.

$$cost(j,t) = \frac{\left[\min_distance(t) + j \times \frac{r}{\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor} \right]^{-1}}{\sum_{w=1}^j \left[\min_distance(t) + (j-1) \times \frac{r}{\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor} \right]^{-1}} w^2 \quad (21)$$

, where $1 \leq j \leq \lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor$

$$s(1,t), \dots, s(\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor, t) = cost(1,t), \dots, cost(\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor, t) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & (\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor + 1) \times s(1,t) + \dots \\ & + (\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor + 1) \times s(residue(t), t) \\ & + \lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor \times s(residue(t)+1, t) + \dots \\ & + \lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor \times s(\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor, t) = n \end{aligned} \quad (23)$$

만약 $s(j,t)$ 가 정수가 아닐 경우 큰구역*j*에 속한 $C_i(t)$ 에 대해 $s(j,t)$ 혹은 $s(j,t)+1$ 의 값을 $S_i(t)$ 값으로 지정하되, $S_i(t)$ 값들의 총합이 energy가 완전히 소모되지 않은 sensor의 개수가 되게 한다. 이렇게 $S_i(t)$ 값이 정해지면, 다음에 의해 $C_1(t), C_2(t), \dots$ 의 순서로 $C_i(t)$ ($1 \leq i \leq k(t)-1$)를 재배치한다.

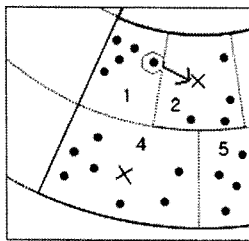


그림 7 $|C_i(t)|$ 의 값이 $S_i(t)$ 값

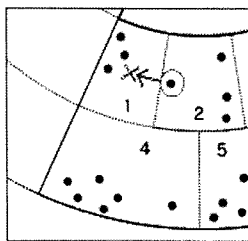


그림 8 $|C_i(t)|$ 의 값이 $S_i(t)$ 값 보다 클 경우 보다 작을 경우

Case 1. 현재 $|C_i(t)|$ 의 값이 $S_i(t)$ 값보다 클 경우 : $C_i(t)$ 의 원소들과 구역*j*에 접해있는 구역*j* ($i < j \leq k(t)$)

들의 중심점간에 거리를 계산하여 최단거리를 이루는 $C_i(t)$ 의 원소와 구역*j*의 쌍을 구하고, 해당 원소를 $C_i(t)$ 에서 제외시키고, $C_j(t)$ 에 포함시킨다. 이러한 과정을 $|C_i(t)|$ 의 값이 $S_i(t)$ 값과 같아질 때까지 반복한다.

Case 2. 현재 $|C_i(t)|$ 의 값이 $S_i(t)$ 값보다 작을 경우 : 구역*i*에 접해있는 구역*j* ($i < j \leq k(t)$)들에 속해있는 원소들 중 구역*i*의 중심점과 가장 가까운 거리에 있는 원소를 찾아서 해당 원소가 속해있던 $C_j(t)$ 로부터 해당 원소를 제거하고, $C_i(t)$ 에 포함시킨다. 이 과정을 $|C_i(t)|$ 의 값이 $S_i(t)$ 값과 같아질 때 까지 반복한다.

그림 9, 그림 10, 그림 11, 그림 12, 그림 13, 그림 14는 $n=12, k(t)=5$ 일 때 cluster head 선출 집합을 지정하는 과정을 보여주는 예이다. 우선 BS는 주어진 시간 t 에 대하여 $\min_distance(t), \max_distance(t), \min_angle(t), \max_angle(t)$ 의 값을 구하여 그림 9의 색칠된 부분과 같은 sensor 분포지역을 지정한다. 그 후 sensor 분포지역을 그림 10과 같이 $d_1 = d_2$ 가 되게 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor = 2$ 개만큼 세로로 나누어 BS에서 가까운 순서로 큰구역1, 큰구역2로 지정한다. $k(t)$ 를 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor$ 로 나눈 나머지 값이 1이므로 지정된 BS에서 가까운 1개의 큰구역, 즉 큰구역1을 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor + 1 = 3$ 개로 나누고, 그 외의 큰구역, 즉 큰구역2를 $\lfloor \sqrt{k(t)} \rfloor = 2$ 개로 나

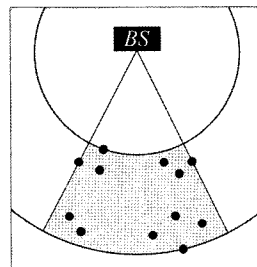


그림 9 sensor 분포지역 지정

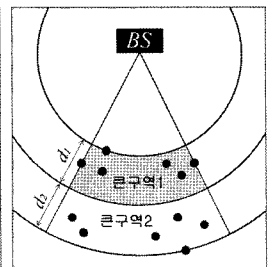


그림 10 큰구역 지정

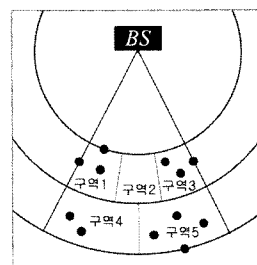


그림 11 구역 지정 ($k(t)=5$)

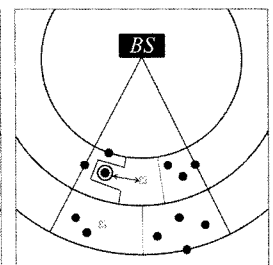


그림 12 C_i 지정

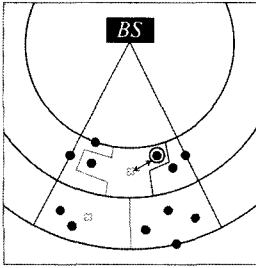


그림 13 C_2 지정

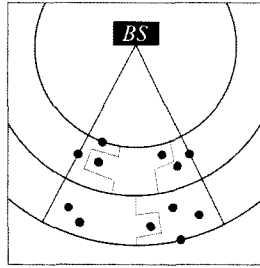


그림 14 cluster head 선출
집합 지정

누어 그림 11과 같은 순서로 구역1, 구역2, 구역3, 구역4, 구역5로 지정한다. 이렇게 정해진 구역 $i(1 \leq i \leq 5)$ 내에 위치한 sensor들을 각각 집합 C_i 에 포함시킨다. 식 (21), 식 (22), 식 (23)에 의해 $S_1(t) = S_2(t) = S_3(t) = 2$, $S_4(t) = S_5(t) = 3$ 라고 정해졌을 때 $|C_1(t)|$ 의 값이 그림 11에서와 같이 3이므로 $C_1(t)$ 에 속한 sensor 중 하나를 다른 cluster head 선출 집합으로 다음과 같이 이동시킨다. 우선 구역1을 둘러싸고 구역2, 구역4의 중심점과 $C_1(t)$ 에 속한 sensor들 사이에 거리를 계산한 후 그림 12와 같이 최소의 거리를 이루는 쌍, 즉 원으로 표시한 sensor와 구역2를 구한 후 해당 sensor를 $C_1(t)$ 으로부터 $C_2(t)$ 로 옮긴다. 이로써 $C_1(t)$ 가 지정되게 된다. 이때 $C_2(t)$ 와 같은 경우 $|C_2(t)| = 1$ 이 되어 $S_2(t) = 2$ 값보다 1이 작으므로 구역2의 중심점과 최소 거리를 이루는 $C_j(3 \leq j \leq 5)$ 에 속한 sensor를 구한 후 그림 13과 같이 해당 sensor가 기존에 $C_3(t)$ 에 포함되어 있었을 때 해당 sensor를 $C_2(t)$ 에 포함시키고, $C_3(t)$ 에서는 제거한다. 이와 같은 과정을 $C_3(t)$, $C_4(t)$, $C_5(t)$ 에서도 수행하여 그림 14와 같은 최종적인 cluster head 선출 집합을 지정한다.

3.3 Cluster Setup

이 과정은 cluster head 선출 집합 $C_i(t) (1 \leq i \leq k(t))$ 로부터 각각 하나의 cluster head를 선출하고, 해당 cluster head들을 중심으로 cluster를 구성하는 단계이다. 우선 BS는 sensor들이 현재시간 t 를 기준으로 보유하고 있는 energy와 BS로 부터의 거리를 고려하여 식 (24)와 같이 $cost_CH(v_j, t)$ 의 값을 구한다. ($1 \leq j \leq n$)

$$cost_CH(j, t) = \frac{e_j(t-1)}{d(BS, v_j)^2}, \quad 1 \leq j \leq n, t \geq 1 \quad (24)$$

이후 각각의 집합 $C_i(t)$ 로부터 식 (25)를 만족하는 하나의 cluster head $CH(i, t)$ 를 선출한다.

$$CH(i, t) \in \arg \max_{v \in C_i(t)} \{cost_CH(v, t) \mid t \geq 1\}, \quad 1 \leq i \leq k \quad (25)$$

이후 과정은 LEACH와 같다[1]. 즉, BS는 결정된 cluster head에 대한 정보를 sensor 분포지역에 broadcasting하고, cluster head로 선출된 sensor들은 같은 power level로 “cluster head advertisement” message를 broadcasting한다. 이때 CSMA MAC protocol을 이용하여 broadcasting을 한다. “cluster head advertisement” message를 받은 cluster head가 아닌 sensor들은 받은 message의 signal strength를 바탕으로 가장 짧은 거리에 위치한 cluster head를 선택하여 해당 cluster head의 cluster에 속하겠다는 message를 보낸다. 모든 message를 받은 cluster head는 해당 cluster 내에 속한 sensor들의 개수를 토대로 TDMA schedule을 구성하여 cluster내의 sensor들에게 해당 TDMA schedule을 전달함으로써 해서 data transmission의 준비를 마친다.

3.4 Data Transmission

Data transmission 과정은 LEACH와 유사하다[1]. Cluster가 정해지고 나면 sensor들은 자신이 속해있는 cluster의 cluster head가 지정한 TDMA schedule에 따라 sensing된 정보를 cluster head에게 전달한다. cluster head가 아닌 sensor는 자신에게 할당된 TDMA schedule외의 시간에는 radio를 끄므로 해서 소비되는 energy의 양을 최소화 시킨다. Cluster head는 해당 cluster에 속한 sensor들로부터 sensing된 정보가 모두 전달되면, data gathering을 수행하여 sensing 정보를 조합하고, 조합된 정보를 BS에게 전달한다. 이때 각각의 cluster head는 자신이 어느 sensor들로부터 정보를 받았는지에 대한 정보를 data packet에 포함하여 보냄으로써 해서 BS가 energy를 모두 소모한 sensor를 알 수 있게 해준다. RLCA의 진행을 pseudocode로 나타내면 아래와 같다.

```

I. Initialize
Input G(V,E)
Compute D(V) and E(0)
Obtain n : number of nodes
/* Sensor의 상대적 위치 지정 */
Compute relative location of  $v_i (1 \leq i \leq n)$  // [3.1] 참조

II. Main Processing
t=1 ;
while( the number of alive sensors !=0 ) {
    k(t) = (number of alive sensors) *  $P_{opt}$  ;
    if ( the number of alive sensors at time t !=
        the number of alive sensors at time t-1 ){
        /* Cluster Head 선출 집합 지정 */
        set  $C_i(t) (1 \leq i \leq k(t))$  ; // [3.2] 참조
    }
    /* Cluster Setup */
    for( i=1 ; i<=n ; i++ )

```

```

        calculate cost_CH(v_i, t);
    for(i=1; i<=k(t); i++)
        select cluster head CH(i, t); // 식(23) 참조
    for(i=1; i<=k(t); i++)
        V_i(t) = {v ∈ V | d(CH(i, t), v) ≤ d(CH(j, t), v)}
        : where i = j, 1 ≤ j ≤ k(t)
/* Data Transmission */
    data transmission; // [3.4] 참조
}
    
```

4. 실험 결과 및 분석

실험을 위해 사용될 radio model은 [4]에 제시된 radio model과 같다. 즉, sensor는 data를 보내거나 받을 때 energy를 소모하게 되는데, sensor $v(v \in V)$ 가 l -bit의 data를 d 만큼의 거리에 있는 목적지 까지 전송하는데 소모되는 energy $E_{T_v}(l, d)$ 와 l -bit의 data를 수신하는데 소모되는 energy $E_{R_v}(l)$ 는 식 (26), 식 (27)에 의해서 구해질 수 있다.

$$E_{T_v}(l, d) = \begin{cases} E_{elec} \times l + \epsilon_{fs} \times l \times d^2 & \text{if } d < d_{crossover} \\ E_{elec} \times l + \epsilon_{mp} \times l \times d^4 & \text{if } d \geq d_{crossover} \end{cases} \quad (26)$$

$$E_{R_v}(l) = E_{elec} \times l \quad (27)$$

여기서 E_{elec} 은 1-bit의 data를 처리하는데 소모되는 energy이고, $d_{crossover}$ 는 먼 거리의 기준이 되는 값이다. d 가 $d_{crossover}$ 보다 작을 경우 free space channel model(ϵ_{fs})이 적용되고, 클 경우 multi-path fading channel model(ϵ_{mp})이 적용된다.

이러한 radio model을 바탕으로 표 2와 같은 parameter를 사용하여 LEACH, LEACH-C, BCSP 그리고 RLCA를 비교 실험해보았다. 표 2의 P_{opt} 의 경우 각각의 WSNs 상에서 LEACH, LEACH-C, BCSP, RLCA가 energy를 모두 소모한 sensor가 처음 발생하는데 까

지 걸리는 시간을 최대로 연장시킨 결과를 보인 cluster head 선출 비율을 실험으로 구하여 작성한 것이다. 이는 각 clustering algorithm이 최적의 성능을 보이는 환경을 구성하여 clustering algorithm 간에 성능을 비교하기 위함이다.

Energy를 모두 소모한 sensor가 처음 발생하는데 까지 걸리는 시간은 WSNs가 정상적으로 작동되는 시간을 나타내는 것이므로 WSNs의 전체의 수명을 의미하는 시간이라고 할 수 있다. 그림 15는 표 2의 100×100 WSNs 부분에 해당되는 parameter의 값을 적용한 실험 결과이다. LEACH의 경우 첫 번째로 모든 energy를 소모하는 sensor가 발생하는 round가 711임을 확인할 수 있고, BCSP의 경우 871, RLCA의 경우 958을 나타낼 수 있다. 이는 RLCA가 LEACH에 비해 WSNs의 lifetime을 134% 연장 시킨 결과이고, BCSP에 대해서는 110% 연장 시킨 결과이다. 해당 결과를 통해 100×100 WSNs과 같은 비교적 작은 규모의 WSNs에 RLCA가 적용될 경우 WSNs의 수명은 기존의 clustering algorithm에 의한 WSNs의 수명에 비해 연장될 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 작은 규모의 WSNs에서 centralized 방식을 통해 cluster의 개수를 일정하게 유지하는 것과 cluster head와 sensor간의 거리가 가까워지도록 cluster가 구성되게 하는 것이 WSNs의 수명 연장에 도움이 될 수 있음을 입증하는 실험 결과인 것이다. 뿐만 아니라 RLCA는 그림 15에서 확인할 수 있듯이 GPS를 이용하여 절대적 위치 정보를 clustering에 적용하는 LEACH-C 보다 WSNs의 수명을 154% 연장한 결과를 보였다. 이는 위치정보의 정확성보다 위치 정보를 clustering에 적용하는 방식이 WSNs의 수명 연장에 미치는 영향이 큼을 입증하는 것이다.

그림 16을 통해 100×100 WSNs에 비해 규모가 큰 200×200 WSNs상에서도 RLCA가 LEACH, BCSP에

표 2 실험을 위한 parameter

parameter	100×100 WSNs	200×200 WSNs
area	100×100	200×200
location of BS	(50, 200)	(100, 350)
number of sensors	400	1000
initial energy	0.5 J	1.0 J
P_{opt}	0.0125(RLCA), 0.03(LEACH), 0.025(LEACH-C), 0.03(BCSP)	0.009(RLCA), 0.01(LEACH), 0.013(LEACH-C), 0.02(BCSP)
E_{elec}	50 nJ/bit	
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²	
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴	
$d_{crossover}$	87 m	
packet size	4000 bits	

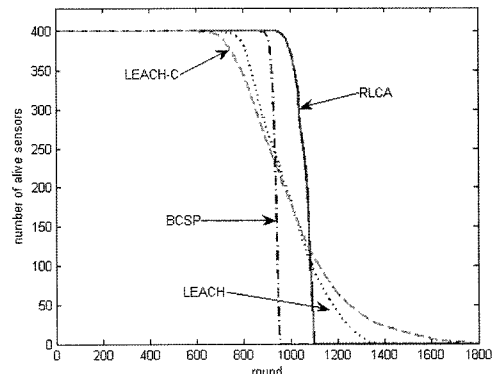


그림 15 100×100 WSNs에서 round에 따른 energy가 0이 아닌 sensor의 개수

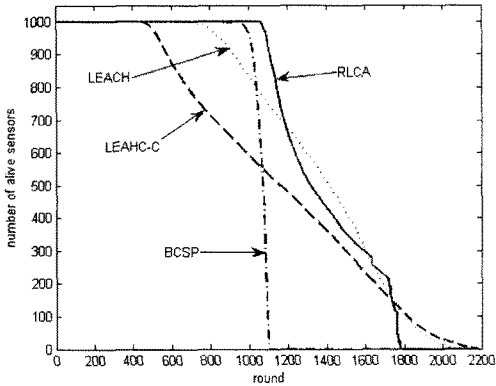


그림 16 200×200 WSNs에서 round에 따른 energy가 0이 아닌 sensor의 개수

비해 WSNs의 수명을 연장시켰음을 확인할 수 있다. 그림 16에서 보이듯이 RLCA의 경우 첫 번째로 energy를 모두 소모한 sensor가 나타나는 round가 1050인데 반해 BCSP의 경우 821번째 round에서, LEACH의 경우 686번째 round에서 각각 첫 번째로 energy를 모두 소모한 sensor가 나타나고 있다. 이는 RLCA가 LEACH에 비해 WSNs의 수명을 153% 연장시킨 결과이고, BCSP에 대해서는 128% 연장시킨 결과이다. 이러한 결과는 비교적 규모가 큰 WSNs 상에서도 지리적으로 고르게 분포된 cluster가 sensor들의 data transmission에 소모되는 energy양을 줄이는데 도움이 됐음을 의미하는 것이다. 실제 BCSP와 같은 경우 cluster head의 역할을 sensor의 위치를 고려하지 않고, 오직 energy 보유량에 의지하여 할당하게 됨으로 해서 지리적으로 고르지 못한 cluster를 구성할 가능성이 가지게 되고, 때문에 고르지 못한 cluster가 구성된 round에는 sensor의 data transmission에 대한 energy 소비 부담이 커지게 된다. 200×200 WSNs상에서도 RLCA는 절대적 위치 정보를 사용하는 LEACH-C에 비해 WSNs의 수명을 244% 연장한 결과를 보였는데, 이는 RLCA의 위치 정보 활용이 LEACH-C에 비해 energy 효율적으로 이루어졌음을 보여주는 것이다.

그림 17은 100×100 WSNs에 LEACH, LEACH-C, BCSP 그리고 RLCA를 적용하였을 때 sensor가 매 round 마다 보유하게 되는 평균 energy양을 보여주고 있다. 실험은 표 2의 parameter를 적용하여 진행하였다. 그림을 통해서 알 수 있듯이 RLCA는 LEACH, LEACH-C, BCSP와는 달리 network deployment phase에서 sensor의 상대적 위치를 결정하기 위해 sensor의 energy 소비를 필요로 한다. 때문에 round 초반에는 LEACH, LEACH-C, BCSP에 비해 적은 energy를 보유하게

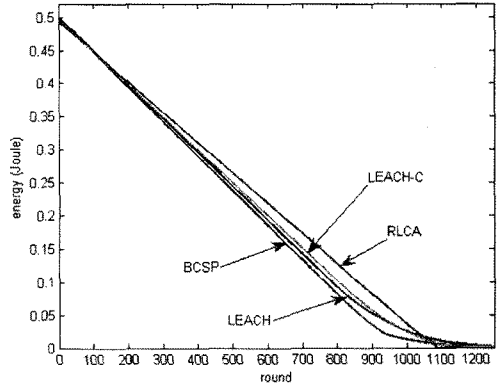


그림 17 100×100 WSNs에서 round에 따른 sensor의 평균 energy 보유량

되지만, 지리적으로 고른 cluster의 구성을 바탕으로 round 후반으로 갈수록 sensor의 data transmission에 소모되는 energy 부담을 LEACH, LEACH-C 그리고 BCSP에 비해 줄이게 됨으로 해서 더 많은 energy를 보유하게 된다.

그림 18과 그림 19는 각각 100×100 WSNs과 200×200 WSNs에서 RLCA에 의해 결정되는 WSNs의 수명을 보여주는 그래프로써 표 2의 parameter를 RLCA에 적용하여 실험을 진행하였다. 그림 18의 경우 P_{opt} 의 값이 0.0125(cluster의 개수=5)일 때 최적의 결과를 보이고, 그림 19의 경우 P_{opt} 의 값이 0.009(cluster의 개수=9)일 때 최적의 결과를 얻을 수 있다. 이는 WSNs의 규모, BS와 sensor 분포지역간의 거리에 따라 최적의 P_{opt} 값이 달라짐을 보이는 것으로 특정 WSNs에 대하여 최적의 P_{opt} 값을 RLCA에 적용했을 때 보다 energy 효율적인 cluster가 구성될 수 있음을 입증하는 것이다.

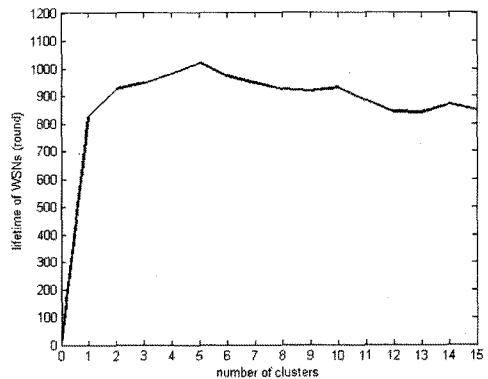


그림 18 100×100 WSNs에서 P_{opt} 에 따른 WSNs의 수명

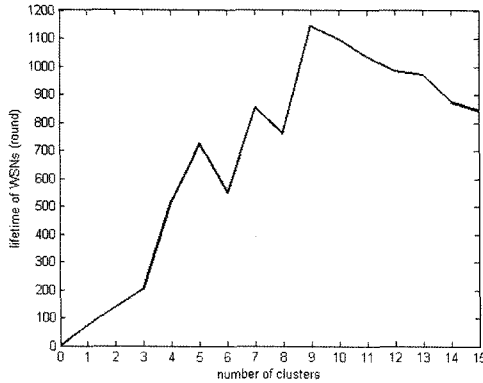


그림 19 200×200 WSNs에서 P_{opt} 에 따른 WSNs의 수명

5. 결론

본 논문에서 sensor들의 상대적 위치 정보를 이용하여 지리적으로 고르게 cluster head를 배치하고, sensor와 BS사이의 거리를 고려하여 cluster head의 선출빈도를 조절하는 centralized clustering algorithm인 RLCA를 제안하였다. 그리고 실험결과 RLCA가 WSNs가 정상적으로 작동하는 시간을 연장하는데 효과적 algorithm임을 알 수 있었다.

RLCA는 주어진 WSNs에 따라 cluster head의 선출 비율을 달리하면 더욱 효율적일 수 있다는 사실 역시 실험을 통해 알 수 있었다. 이 점을 고려하여 sensor 분포지역의 면적, sensor의 개수, 그리고 BS와 sensor 분포지역간의 거리 등을 이용하면, 적절한 cluster head 선출비율을 계산할 수 있는 algorithm이 고안될 수 있으리라 생각된다.

실제 WSNs에 RLCA를 적용하였을 때 거리정보의 부정확성으로 인해 야기될 수 있는 문제점을 보완하기 위한 연구도 진행되고 있다. 즉, WSNs에 일반적으로 적용되는 signal strength 기반의 거리 측정 방식은 특정 범위 내에 속하는 거리들을 동일한 거리로 간주하기 때문에 정확하지 않은 거리정보를 제공할 수 있고, 정확하지 않은 거리 정보는 RLCA의 상대적 위치 지정단계에서 sensor의 위치가 부정확하게 지정되는 원인을 제공할 수 있다. 이에 대해 BS에서 계산된 sensor의 energy 소비량과 실제 sensor에서 소비된 energy 양을 비교하여 부정확한 거리 정보로 인해 상대적 위치가 잘못 지정된 sensor의 위치를 새롭게 지정하는 방식에 대해 연구 중이다.

참고 문헌

[1] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks,"

Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Vol.8, pp. 3005-3014, Jan. 2000.

[2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.1, No.4, pp. 660-670, Oct. 2002.

[3] G. Lee, M. Lee, W. Seok, J. Kong, and O. Byeon, "A base station centralized simple clustering protocol for sensor networks," in *Proceedings of the International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing(EUC 2006)*, Vol.4096, pp. 682-691, 2006.

[4] M. Ye, C. Li, G. Chen, and J. Wu. "EECS : An Energy Efficient Clustering Scheme in Eireless Sensor Networks," *Performance, Computing and Communications Conference(IPCCC) 24th IEEE International*, pp. 535-540, April 2005.



정 우 현

2007년 서강대학교 컴퓨터공학과 졸업, 동대학원 석사(2009). 관심분야는 Wireless Sensor Networks, System Modeling and Optimization

장 형 수

정보과학회논문지 : 정보통신 제 36 권 제 2 호 참조