

회전 가능한 방향센서네트워크에서 타겟 커버리지 스케줄링 향상 기법

준회원 김 찬 명*, 종신회원 한 연 희*°, 정회원 길 준 민**

An Enhanced Scheme of Target Coverage Scheduling in Rotatable Directional Sensor Networks

Chan-Myung Kim* *Associate Member*, Youn-Hee Han*° *Lifelong Member*,
Joon-Min Gil** *Regular Member*

요 약

방향센서네트워크에서 주어진 모든 타겟을 관측하고 관측한 데이터를 싱크노드까지 전달한다는 요구사항을 유지하면서 에너지를 효율적으로 절약하여 전체 네트워크 수명을 최대화하는 것은 중요한 문제이다. 본 논문에서는 이와 관련하여 Maximum Directional Cover Tree(MDCT) 문제를 제시하고 방향센서들을 그룹화하여 네트워크 수명을 최대화하는 문제를 다룬다. 모든 타겟을 관측하고 관측한 데이터를 싱크노드까지 전달하는데 참여하는 센서들을 활성상태로 설정하고 그렇지 않은 센서들은 수면상태로 설정함으로써 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 휴리스틱 알고리즘인 Directional Coverage and Connectivity (DCC)-greedy 알고리즘을 제시하여 MDCT문제를 해결한다. 제안 알고리즘에서는 타겟을 관측하고 관측한 데이터 전달에 드는 에너지 외에 방향 회전에너지까지 고려함으로써 방향센서가 소비하는 에너지를 좀 더 정확하게 고려한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘이 네트워크 수명을 증가시킬 수 있음을 보인다.

Key Words : Target Coverage, Connectivity, Rotatable Directional Sensors, Energy Efficiency, Heuristic Algorithms

ABSTRACT

In rotatable directional sensor networks, maximizing network lifetime while covering all the targets and forwarding the sensed data to the sink is a challenge problem. In this paper, we address the Maximum Directional Cover Tree (MDCT) problem of organizing the directional sensors into a group of non-disjoint subsets to extend the network lifetime. Each subset in which the directional sensors cover all the targets and forward the sensed data to the sink is activated at one time. For the MDCT problem, we first present an energy consumption model which mainly takes into account the energy consumption for rotation work. We also develop the Directional Coverage and Connectivity (DCC)-greedy algorithm to solve the MDCT problem. To evaluate the algorithm, we conduct simulations and show that it can extend the network lifetime.

※ 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행되었으며, 또한 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 지원 프로그램의 지원에 의하여 수행되었음.

* 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 첨단기술연구소 ({cmdr, yhhan}@kut.ac.kr) (° : 교신저자)

** 대구가톨릭대학교 컴퓨터정보통신공학부 (jmgil@cu.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-06-269, 접수일자 : 2011년 6월 22일, 최종논문접수일자 : 2011년 8월 9일

I. 서 론

최근 무선 센서 네트워크는 자연 현상, 군사, 기후, 관측 등의 다양한 응용분야에 걸쳐 많은 관심을 받고 있다. 무선센서네트워크는 주어진 관심영역(Region of Interest, ROI) 전체 혹은 관심영역중 특정 지역에서 발생한 이벤트를 관측, 분류, 추적하고 수집된 데이터를 싱크노드까지 전달하여 데이터를 분석가능하게 하는데 그 목적이 있다^[1].

사람이 접근하기 어려운 곳에서는 항공기 등을 이용하여 공중에서 넓은 범위에 다수의 고정 센서들을 흩뿌려 배치하기 때문에 그러한 센서들 각각의 에너지원을 사용자가 직접 관리하는 것은 쉽지 않다. 센서 네트워크에서의 이러한 제한된 에너지 관리는 네트워크의 수명에 직접적인 영향을 미치기 때문에 현재까지 중요한 연구 이슈로 알려져 있다^[1].

센서네트워크에서 고려되는 에너지 관리기법 중 스케줄링 기법은 각각의 센서가 임의의 시간에 활성상태로 있을지 비활성상태로 있을지를 결정하는 것을 말한다. 활성상태란 센서가 Tx, Rx, Idle 상태에 있는 때를 말하며 수면상태에 있을 때보다 에너지 소모량이 더 많다^[2]. 따라서 모든 센서가 활성상태에 있게 될 경우 에너지 소모가 증가되게 되며 그에 따른 네트워크 수명은 감소한다. 미리 계획된 일정에 따라 사용되지 않아도 될 센서는 수면상태로 전환함으로써 네트워크 수명을 향상시킬 필요가 있다.

한편 기존의 원형의 센싱영역을 지닌 전방향센서로 이루어진 센서네트워크와 달리 방향센서(레이더, 이미지/비디오 센서)들로 이루어진 방향센서 네트워크는 센서의 커버리지면에서 다른 특징을 가지고 있다^[3,4]. 방향센서의 가장 큰 특징은 제한된 센싱영역이다^[5,6]. 각 방향센서는 방향성을 지닌 센싱영역을 지닌 센서로서 센서의 좌표를 꼭짓점으로 하는 방향각을 지닌 부채꼴 모양의 구역을 센싱영역으로 지닌다. 방향센서네트워크를 이루는 대다수의 방향센서는 센싱영역을 회전시켜 목표하는 영역을 관측한다^[7].

센서네트워크 연구주제 중에서 커버리지는 지역(area)이나 타겟(target)을 얼마나 잘 관측하거나 추적하는지를 평가하며^[8] 무엇을 관측할지에 따라 영역(area) 커버리지, 타겟(target) 커버리지, 경계(barrier) 커버리지로 나눌 수 있다. 본 논문의 연구 범위는 모든 타겟을 관측할 수 있을 정도로 충분히 많은 방향센서들로 이루어진 센서네트워크에서의 타겟 커버리지^[9,10]에 속한다. 전방향센서네트워크와 달리 방향센서네트워크에서의 커버리지는 타겟의 위치와 함께 그

에 맞는 센서의 방향 또한 고려되어야 한다. 본 연구에서는 커버리지 뿐만 아니라 센싱한 데이터를 싱크노드까지 전달하는 연결성(connectivity)까지 고려하여 Maximum Directional Cover Tree (MDCT) 문제를 제시하고 네트워크 수명을 최대화하는 방법을 찾는다.

해당 문제를 해결하기 위한 기본 전략은 타겟을 관측가능하거나 관측한 데이터를 싱크노드까지 전송할 수 있는 모든 센서들을 그룹화 하여 활성 상태로 두고 나머지 센서들을 수면상태에 두므로써 센서의 제한된 에너지를 효율적으로 활용하는 것이다. 타겟을 관측하는 방향센서와 그들을 잇는 통신링크들을 합쳐 방향커버트리라 칭하며 방향커버트리의 개수를 최대화하는 MDCT 문제를 풀기 위해 휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

또한 본 논문에서는 방향센서의 회전에너지를 고려한 새로운 에너지 모델을 제시한다. 지금까지 많은 방향센서의 커버리지 연구들^[4,5]에서는 회전에너지까지 스케줄링 기법에 고려하지 않았다. 센싱 에너지와 전송 에너지 외에 회전에너지 또한 방향센서네트워크에서 에너지 소모를 줄이기 위해 고려되어야 할 대상이며 본 논문에서는 시뮬레이션에 의한 성능 평가를 통하여 회전에너지의 고려가 방향센서네트워크의 수명을 연장시킬 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 2개의 회전 가능한 방향센서모델과 네트워크 모델을 제시하고, 3장에서는 MDCT문제의 정의와 센서의 에너지 소비모델을 제시한다. 4장에서는 두 방향센서모델의 회전방법과 제안하는 MDCT문제를 풀기 위한 greedy 알고리즘을 기술한다. 5장에서는 성능 분석 및 결과를 보이고 6장에서 본 논문의 결론을 짓는다.

II. 회전방향센서 모델 및 네트워크 모델

2.1 회전가능한 방향센서 모델

본 절에서는 전통적으로 센서의 중심으로부터 원형의 센싱영역을 가지는 전방향센서모델과는 다른 회전 가능한 방향센서모델을 제시한다. 본 논문의 방향센서는 다음과 같은 두 가지 특성을 가지고 있다.

- (1) 센서의 센싱영역은 부채꼴 형태이며 센서의 방향과 방향의 각도에 따라 좌우된다.
- (2) 하나의 센서는 자신의 센싱방향을 시계방향 혹은 시계반대방향으로 360° 회전가능하다.

그림 1에 보이듯이 하나의 방향센서 s_i 는 6개의 원소를 지닌 tuple $\langle P_i, R_s, R_c, E_0(s_i), \theta, o_{i,j} \rangle$ 로 표현된

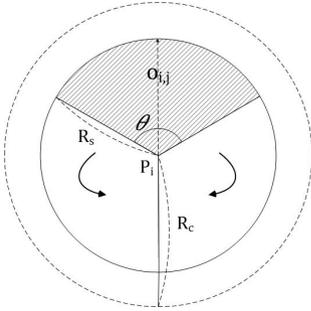


그림 1. 방향센서모델

다 (그림 1 참조). 이 때 P_i 는 그 방향센서의 위치좌표이고, R_s 는 센싱 반경, R_c 는 통신 반경이다. $E_0(s_i)$ 는 초기에너지, θ 는 방향각을 의미한다. 전통적인 전 방향센서모델은 방향각 $\theta = 2\pi$ 일 때의 특수한 경우이다. 각 센서는 최대 W 개의 방향을 고려하며 $o_{i,j}$ 는 s_i 의 j 번째 방향을 뜻한다.

본 논문에서는 타겟의 좌표가 센싱 영역 안에 존재하면 항상 관측된다고 가정하는 이진모델(Binary Model)을 적용한다. 각각의 센서는 임의의 위치좌각 기법을 통해 자신의 위치를 알고 있다고 가정한다. 본 장에서는 다음과 같은 두 가지의 방향센서 모델을 제시한다.

2.1.1 고정개수 방향센서모델

고정개수 방향센서는 그림 2와 같이 방향의 개수 및 각 방향간의 사이각이 고정된 센서를 뜻한다[7]. 이 때 각 방향간의 사이각은 $2\pi/W$ 이다. 센싱 반경 안의 주어진 타겟을 관측하기 위해 각 스케줄링에 시간마다 하나의 방향을 선택하여 초기에 임의로 선택된 방향으로부터 모터를 가동시켜 회전을 한다.

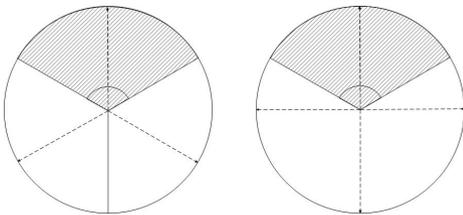


그림 2. 고정개수 방향센서모델 ($W=3, W=4$)

2.1.2 자유회전 방향센서모델

자유회전 방향센서는 그림 3과 같이 회전이 자유로워서 각 센서마다 고려할 방향의 개수가 다른 센서를 뜻한다. 센싱범위 안의 타겟의 위치에 따라 자유롭게 회전하여 타겟을 관측하기 때문에 각 방향간의 사이

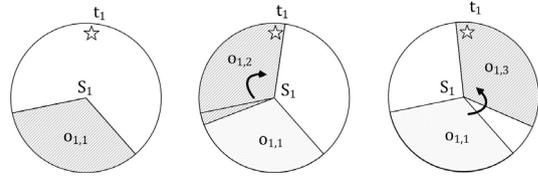


그림 3. 자유회전 방향센서모델

각이 다르다.

2.2 네트워크 모델

2차원 공간에 고정된 M 개의 타겟을 관측하기 위해 임의로 배치된 N 개의 센서로 이루어진 방향센서 네트워크를 고려할 때 각 센서는 송수신 세기를 변화시켜 통신반경을 조절할 수 있고 자신의 통신 반경 내에 있는 센서와 통신이 가능하다고 본다. 모든 센서는 싱크노드와 단일 홉(hop) 혹은 다중 홉으로 통신이 가능하다. 네트워크에는 하나의 싱크노드 κ 가 존재한다고 가정한다.

소스 방향 센서는 한 개 이상의 타겟을 관측하여 일정한 데이터 메시지를 생성하는 센서를 말한다. 관측된 데이터 메시지는 통신을 통해 릴레이 센서나 싱크노드로 전송된다. 타겟 관측에는 관여하지 않고 다른 노드로부터 데이터 전달 기능만 하는 센서를 릴레이 센서라 한다. 릴레이 센서는 데이터를 다른 릴레이 센서나 싱크노드로 전달한다. 본 논문에서는 N 개의 센서 노드 집합을 S 로 정의하고 M 개의 타겟 집합을 T 로 정의한다. O 를 모든 센서의 방향 $o_{i,j}$ 의 집합이라고 할 때 $i=1,2,\dots,N$ 이고 $j=1,2,\dots,W$ 이며 $O(t_m)$ 을 $t_m(m=1,2,\dots,M)$ 을 관측하는 방향들의 집합이라 한다.

소스나 릴레이 혹은 두 기능을 함께 수행하는 센서를 활성 센서라 한다. 활성상태에 있지 않은 센서들은 수면상태로 전환한다. 본 논문에서의 방향센서 스케줄링은 배치된 센서들의 활성상태와 수면상태를 적절하게 변이시키는 것이다.

III. Maximum Directional Cover Tree(MDCT) 문제

본 장에서는 회전 가능한 방향센서로 이루어진 센서와 네트워크 모델에서의 Maximum Directional Cover Tree (MDCT)문제를 제시한다. 이어서 방향 커버트리와 센서의 에너지 소비모델을 기술하고 MDCT문제를 수식화한다.

3.1 방향성 커버리지

본 논문은 OTI(Operation Time Interval)동안에는 각 센서들의 활성, 수면 상태가 변하지 않는다고 가정한다. 하나의 OTI τ 시간 동안의 관측 방향과 통신 링크로 이루어진 방향 커버트리 $T(\tau) = (O_s(\tau) \cup S_r(\tau) \cup \{\kappa\}, E(\tau))$ 를 구성한다. 이 때 $O_s(\tau)$ 는 모든 타겟을 관측하는 활성상태의 방향 집합이고 $S_r(\tau)$ 는 활성상태의 릴레이 센서 집합이며, $E(\tau)$ 는 선택된 활성상태의 센서들과 싱크를 연결하는 통신 링크의 집합이다.

하나의 방향 $o_{i,j} \in O_s(\tau)$ 는 센서 s_i 의 j 번째 방향을 뜻하며 다른 소스 센서에 의해 생성되는 데이터를 릴레이하기 위해 $S_r(\tau)$ 에 포함되기도 한다. 방향 커버트리 $T(\tau)$ 는 다음과 같은 특성을 지닌다.

- 트리의 루트는 싱크노드이다.
- 트리의 각 리프노드는 방향 소스 센서이다.
- 방향 커버리지: 모든 타겟은 최소한 한 개 이상의 활성상태의 방향 소스 센서에 의해 관측된다.
- 연결성: 각 소스가 센싱한 데이터를 활성상태에 있는 센서들을 통해 싱크노드까지 전달하는 경로가 존재하여야 한다.
- 비중복성: 센서 s_i 는 오직 한 개의 방향만 사용한다.

3.2 에너지 소비 모델

본 절에서는 센서가 관측, 릴레이, 방향 회전에 소모하는 에너지의 소비모델을 제시한다. 이 모델은 제안하는 스케줄링 알고리즘에서 각 센서의 에너지 잔량을 계산하는데 쓰인다.

센서의 에너지 소모는 얼마나 관측으로 인한 데이터를 생성하는가, 얼마나 데이터를 전송하고 수신하는가에 좌우된다. 타겟 커버리지 시나리오의 경우 각 타겟은 최소 한 개 이상의 소스센서의 방향에 의해서 관측되어야 하며 소스센서는 관측한 데이터를 싱크노드까지 전송해야 한다.

본 논문은 각 OTI τ 동안 동작하는 모든 센서가 같은 $B(\tau)$ 만큼의 일정량의 데이터 비트를 생성한다고 가정한다. 그것은 모든 센서가 같은 표본화, 양자화, 부호화 작업을 수행함을 뜻한다.

e_s 와 e_r 은 1비트를 관측과 수신하는데 소모되는 에너지를 뜻한다. 센서 s_i 가 s_j 에 1비트를 전송하는데 드는 에너지는 $e_{i,j}^t$ 로 표현하며 식(1)과 같다.

$$e_{i,j}^t = e_t + b \cdot (d_{i,j})^\alpha \tag{1}$$

e_t 는 1비트를 송신하기 위한 기본에너지이고 b 는 가중치상수이다. $d_{i,j}$ 는 센서 s_i 와 s_j 간의 유클리디안 거리이고 α 는 경로손실요소(path loss factor)이다. 하나의 방향소스센서는 OTI τ 시간 동안 관측하는데 $e_s \times B(\tau)$ 에너지를 소모하고 관측한 데이터를 전송하는데 $e_r^t \times B(\tau)$ 만큼의 에너지를 소모한다. $D(s, T(\tau))$ 를 방향커버트리 $T(\tau)$ 에서의 센서 s 의 자식소스노드 개수라고 할 때 릴레이노드 s 는 s 의 자식노드들로부터 데이터를 전달하는데 $(e_r + e_{i,j}^t) \times B(\tau) \times D(s, T(\tau))$ 만큼의 에너지를 소모한다.

방향커버트리 $T(\tau_x)$ 와 $T(\tau_y)$ 에서 선택된 센서의 방향이 $o_{i,j}^x$ 와 $o_{i,k}^y$ 일 때 $j \neq k$ 라면 센서는 $T(\tau_y)$ 가 활성화될 때 방향회전에너지를 소모하게 된다. 이 때의 센서 s_i 의 회전에너지는 회전각도와 관련 있으며 다음 식과 같다.

$$e_{rot}(s_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } \theta(\tau_x) = \theta(\tau_y); \\ \frac{1}{2} \left[\frac{r(\theta(\tau_x), \theta(\tau_y))}{t_\lambda} \right]^2, & \text{if } \theta(\tau_x) \neq \theta(\tau_y). \end{cases} \tag{2}$$

t_λ 가 회전축을 상회하는 관성계수라고 할 때 t_λ 는 하나의 센서가 회전하는데 드는 시간을 의미하며 이 시간동안 각 센서들의 방향이 재정비된다. 본 논문에서 t_λ 는 고정상수이기 때문에 방향센서의 회전속도는 방향각에 좌우되며 모든 센서는 같은 시간동안 방향을 재정비한다고 가정한다. $\theta(\tau_x)$ 는 τ_x 시간의 방향각이며 $r(\theta(\tau_x), \theta(\tau_y))$ 는 τ_x 와 τ_y 간의 방향각의 편차를 의미한다. $r(\theta(\tau_x), \theta(\tau_y))$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$r(\theta(\tau_x), \theta(\tau_y)) = \begin{cases} |\theta(\tau_x) - \theta(\tau_y)|, & \text{if } |\theta(\tau_x) - \theta(\tau_y)| \leq \pi \\ 2\pi - |\theta(\tau_x) - \theta(\tau_y)|, & \text{if } |\theta(\tau_x) - \theta(\tau_y)| > \pi \end{cases} \tag{3}$$

위의 결과로 x 번째 OTI동안 활성화된 방향커버트리 $T(\tau_x)$ 에서 센서 s_i 의 에너지 소비모델은 다음과 같다.

$$E(s_i, T(\tau_x)) = \begin{cases} (e_s + e_{i,j}^t)B(\tau_x) + e_{rot}(s_i), & \text{if } s_i \in S_s(\tau_x) \text{ and } s_i \notin S_r(\tau_x); \\ (e_r + e_{i,j}^t)B(\tau_x)D(s, T(\tau_x)), & \text{if } s_i \notin S_s(\tau_x) \text{ and } s_i \in S_r(\tau_x); \\ (e_s + e_{i,j}^t)B(\tau_x) + (e_r + e_{i,j}^t)B(\tau_x)D(s, T(\tau_x)) + e_{rot}(s_i), & \text{if } s_i \in S_s(\tau_x) \text{ and } s_i \in S_r(\tau_x); \\ 0, & \text{if } s_i \notin S_s(\tau_x) \text{ and } s_i \notin S_r(\tau_x); \end{cases} \tag{4}$$

3.3 MDCT 문제정의

본 절에서는 Maximum Directional Cover Tree (MDCT)문제를 제시한다. 하나의 방향 $o_{i,j}$ 는 센서 s_i 의 에너지가 모두 소진될 때까지 여러 개의 커버트리에 속할 수 있다. 이 때 변수 $b_{i,j,k}$ 는 다음과 같다.

$$b_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & \text{if } o_{i,j} \in T(\tau_x); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

MDCT문제는 다음과 같이 정형화될 수 있다.

$$\text{Maximize } L(S, \kappa, E, T) \equiv \sum_{k=1}^X \tau_k \quad (6)$$

$$\text{subject to } \sum_{k=1}^K E(s_i, T(\tau_k)) \leq E_0(s), \forall s_i \in S \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^W b_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall s_i \in S, k=1,2,\dots,X \quad (8)$$

$$\sum_{o_{i,j} \in O(t_m)} b_{i,j,k} \geq 1, \forall t_m \in T, k=1,2,\dots,X \quad (9)$$

where $b_{i,j,k} = 0,1$ and $\tau_k \geq 0$

수식(7)은 모든 방향커버트리의 각 센서 s_i 가 초기 에너지 이상의 에너지를 소모할 수 없음을 보장한다. 수식(8)은 한 센서당 오직 하나의 방향만 동작할 수 있음을 보장한다. 마지막으로 식 (9)는 각 타겟이 최소한 한 개 이상의 방향센서에 의해서 관측됨을 보장한다. 하나의 센서는 각기 다른 방향커버트리에 속할 수 있다.

IV. 제안 알고리즘

4.1 방향 회전 방법

고정개수 방향센서모델과 자유회전 방향센서모델은 방향인덱스 $j=1,2,\dots,W$ 중 하나를 선택하여 회전한다. 그러나 타겟을 관측하기 위한 방향의 회전 방식이 다르다.

4.1.1 고정개수 방향센서모델

모든 센서는 고려해야할 방향개수 W 가 같고 각 방향간의 사이각 또한 $2\pi/W$ 로 고정된다. 방향의 회전 시에 임의의 방향구역(방향의 중심축)을 선택해서 시계방향 혹은 시계 반대방향으로 회전한다.

4.1.2 자유회전 방향센서모델

자유회전 방향센서는 각 센서마다 고려해야할 방향개수 W 가 다르고 각 방향간의 사이각 또한 다르다. 그림 4에서 주어진 타겟을 관측하기 위해 방향을 회전할 때 $W=3$ 인 고정방향개수를 지닌 센서는 최소 $2\pi/W$ 의 각도를 회전하게 된다. 반면 자유회전 방향센서는 주어진 타겟을 관측하기 위해 최소한의 회전각만큼을 회전하여 타겟을 관측한다. 단, 센서가 방향을 회전할 때 타겟의 관측수준을 보장하기 위해 여분 각도 θ_{margin} 을 더하여 회전한다.

센서 s_i 와 타겟 t_c 의 유클리디안 거리 $dist(P(s_i), P(t_c)) \leq R_s$ 일 때 t_c 를 s_i 의 관측가능 타겟이라 하며 s_i 의 관측가능 타겟들의 집합을 $T_{cov}(s_i)$ 라 한다. 이 때 센서 s_i 가 고려해야할 방향의 개수 W_i 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{cases} W_i = 1, & \text{if } o_{i,init} \text{ covers } T_{cov}(s_i) \\ W_i = 2|T_{cov}(s_i)| + 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

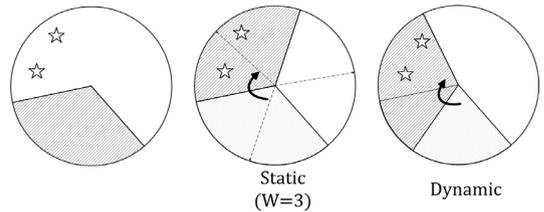


그림 4. 고정개수 방향센서와 자유회전 방향센서의 회전방법

4.2 DCC-greedy 알고리즘

본 절에서는 MDCT문제를 해결하기 위해 DCC (directional coverage and connectivity)-greedy 알고리즘을 제시한다. DCC-greedy 알고리즘은 greedy 방식의 알고리즘으로 3.2절의 에너지 소비모델과 링크간의 가중치 함수를 통해 가중치그래프 $G=(S \cup \{\kappa\}, E)$ 에서 각 소스센서로부터 싱크까지의 최적경로를 찾음으로서 방향커버트리와 각각의 OTI를 반환한다.

제안 알고리즘은 [10,11]에서 제안되었던 알고리즘과 비슷하나 방향센서 네트워크의 특성에 맞게 변화되었다. 제안 알고리즘은 S, κ, E, T , 각 센서 s_i 의 초기에너지 $E_0(s_i)$, 방향각 θ , 최대 OTI τ 를 입력받는다. 각 방향커버트리는 τ 시간동안 동작하며 그 시간동안에는 커버트리에 존재하는 센서가 에너지의 소모에 의해 활동이 종료되지 않음을 보장한다. 본 알고리즘은 방향커버트리의 순서 $T(\tau_1), T(\tau_2), \dots, T(\tau_X)$

와 각각의 OTI $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_X$ 를 반환한다. 반환된 결과를 통해 네트워크 수명은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^X \tau_k + X \times \tau_x. \quad (11)$$

알고리즘의 의사코드는 그림 5와 같다. 알고리즘에서는 다음과 같은 기호가 사용된다.

표 1. 알고리즘 기호 설명

기호	설명
S_l	에너지가 남아 있는 센서들의 집합
O_l	에너지가 남아있는 센서들의 방향 집합
$T(o_{i,j})$	방향 $o_{i,j}$ 에 의해 관측되는 타겟들의 집합(s_i 가 소스센서일 때);
x	방향 커버트리의 순서
$E_r(s)$	센서 s 의 에너지 잔량
w_s	주어진 그래프 $G=(S \cup \{\kappa\}, E)$ 에서 센서 s 의 경로가중치
$w_{i,j}$	s_i 와 s_j 를 잇는 통신링크의 가중치
$R(s, T)$	커버트리 T 에서 소스 센서 s 와 싱크 κ 까지의 경로에 속해있는 센서들의 집합 ($R(s, T) \equiv \langle s, s_1, s_2, \dots, s_n, \kappa \rangle$)
$\bar{R}(s, T)$	경로 $R(s, T)$ 에서 소스 센서 s 와 싱크 κ 를 제외한 센서들의 집합

DCC-greedy ($S, \kappa, E, T, E_0(s_i), \theta, \tau$)

- 1: $S_l = S, O_l = \emptyset, x = 0$
- 2: for each $s_i \in S_l$ do
- 3: $E_r(s_i) = E_0(s_i), w_{s_i} = 0$
- 4: determine each orientation by using static or dynamic strategy
- 5: for each orientation $o_{i,j}$ operated by s_i do
- 6: $O_l = O_l \cup \{o_{i,j}\}$
- 7: end for
- 8: end for
- 9: while $O_l \neq \emptyset$ and $\cup_{o_{i,j} \in O_l} T(o_{i,j}) = T$ do
- 10: for each pair $\{s_i, s_j\}$ of live sensors in S_l do
- 11: $w_{i,j} = e_{i,j}^t \times E_0(s_i) / E_r(s_i)$
- 12: end for
- 13: Build a minimum weight tree T_m connecting each sensor $s \in S_l$ to κ
- 14: For each sensor s in T_m , the sum of link weights in the route $R(s_i, T_m)$ is set to w_s

- 15: $x = x + 1, SOURCES = \emptyset, TARGETS = T, O_c = \emptyset, \tau_x = \tau, T(\tau_x) = \{\kappa\}$
- 16: while $TARGETS \neq \emptyset$ do
- 17: Find a critical target $t_c \in TARGETS$
- 18: Find all orientations $\in O_l$ that cover t_c and insert them into O_c
- 19: Select $o_{s,t}^* \in O_c$ with the maximum directional profit $W(o_{s,t}^*)$
- 20: $SOURCES = SOURCES \cup \{o_{s,t}^*\}, TARGETS = TARGETS - T(o_{s,t}^*)$
- 21: for each orientation $o_{i,j} \in O_l$ do
- 22: if $i = s$ then $O_l = O_l - \{o_{i,j}\}$ endif
- 23: end for
- 24: for each $s_i \in \bar{R}(s, T_m)$ do
- 25: $w_s = w_s + (e_{i,j}^t + e_r) B(\tau) \times w_s / E_r(s_i)$ where s_j is directly connected to s_i in T_m
- 26: end for
- 27: end while
- 28: for each $o_{i,j} \in SOURCES$ do
- 29: $T(\tau_x) = T(\tau_x) \cup R(s_i, T_m)$ where s_i is the source sensor that faces to $o_{i,j}$
- 30: end for
- 31: for each $s \in T(\tau_x)$ do
- 32: $\tau_x = \min(\tau_x, \frac{E_r(s)}{E(s, T(\tau_x))} \tau_x)$
- 33: end for
- 34: for each $s \in T(\tau_x)$ do
- 35: $E_r(s) = E_r(s) - E(s, T(\tau_x))$
- 36: if $E_r(s) \leq 0$ or a sensor s is isolated then $S_l = S_l - \{s\}$ endif
- 37: end for
- 38: $O_l = \cup_{j=1}^W \{o_{i,j}\}$ for each sensor $s_i \in S_l$
- 39: end while
- 40: return $T(\tau_1), T(\tau_2), \dots, T(\tau_X)$ and their OTIs $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_X$

그림 5. DCC-greedy 알고리즘 의사코드

알고리즘은 반복적으로 방향커버트리를 구축하고 각 타겟이 최소 한 개의 센서에 의해서 관측되지 않거나 센싱한 데이터를 싱크노드까지 전달하지 못할시 종료된다. 여기서 최대 이익값 $W(o_{i,j})$ 을 산정하기 위한 다양한 함수가 정의될 수 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 함수를 사용한다. $\tilde{A}(o_{i,j})$ 와 $\tilde{B}(o_{i,j})$ 는 A 와 B 를 0에서 1사이로 정규화한 값이다.

$$W(o_{i,j}) \equiv (1 - \sigma)\tilde{A}(o_{i,j}) + \sigma\tilde{B}(o_{i,j}), 0 < \sigma < 1. \quad (12)$$

$$A = \frac{|TARGETS \cap T(o_{i,j})|}{w_{s_i}} \quad (13)$$

$$B = \frac{1}{e_{rot}(s_i)}. \quad (14)$$

V. 실험 및 성능 분석

본 절에서는 제안한 DCC-greedy 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석 및 평가한다. 센서네트워크에서의 대부분의 연구에서는 타겟 커버리지 문제와 연결성 문제를 동시에 다루지 않았지만 [11]에서 제안한 Communication Weighted Greedy Cover (CWGC) 알고리즘은 커버 트리를 생성하면서 타겟 커버리지와 싱크노드까지의 연결성을 동시에 만족하고 있다. 제안하는 알고리즘의 우수성을 입증하기 위해 DCC-greedy 알고리즘과 CWGC 알고리즘을 실험을 통해 비교한다. 성능 비교를 위해 CWGC 알고리즘은 DCC-greedy 알고리즘과 같은 방식으로 방향 센서네트워크에 맞게 수정되며 소스 센서를 선택할 때 회전 에너지는 고려하지 않는다. 본 절에서 DCC-greedy 알고리즘은 DCCG로 표기하며 CWGC는 CWGC-d로 표기한다.

5.1 실험 환경

성능 분석을 위해 $100m \times 100m$ 크기의 지역에 센서와 타겟들이 임의로 배치되는 상황을 고려한다. 싱크 노드는 관심영역의 중앙($50m, 50m$)에 위치한다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 다음 표 2와 같다. 모든 센서는 오직 하나의 방향으로만 관측할 수 있다고 가정한다. 각 소스 노드로부터 생성되는 데이터 생성률은 $10Kbps$ 이다. 기본적으로 100개의 센서 ($N=100$)와 20이나 30개의 타겟($M=20$ or 30)이 배치된 상황을 고려한다. 모든 센서는 같은 센싱반경($20m$)과 같은 최대 통신반경($40m$)을 가진다고 가정하고 센싱반경이나 통신반경의 변화가 네트워크 수명에 어떠한 영향을 미치는지 시뮬레이션을 통해 알아보기로 한다.

DCCG는 임의로 배치된 네트워크와 주어진 파라미터 집합에서 σ 의 최적 값은 네트워크 토폴로지에 따라 다양하기 때문에 $\sigma=0.1, 0.2, \dots, 0.9$ 까지 변화시켜 9번의 시뮬레이션 중 가장 높은 네트워크 수명을 취한다. 시뮬레이션은 25번을 수행하여 신뢰구간 95%

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Item	Value
E_0	20J
θ	$2\pi / 3$
τ	60 sec.
e_t	$50nJ/bit/m^4$
e_s	150nJ/bit
e_r	150nJ/bit
t_λ	1 sec.
α	4
I	$20 \times 10^6 kg \cdot m^2$

를 적용하였다.

5.2 성능 평가

5.2.1 주요 타겟 선택에 따른 영향

그림 5의 17번째 줄의 주요 타겟 t_c 를 선택하는 방법에 따라 DCCG 알고리즘의 에너지 효율에 영향이 있다. 주요 타겟은 네트워크 수명 면에서 병목구간과 같은 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 다음과 같은 3가지 방식으로 주요 타겟을 선택하여 알고리즘에 대한 영향을 알아보기로 한다.

- *MIN_NUM_OF_SENSORS*: 자신을 관측하는 센서의 수가 가장 적은 타겟
- *MIN_ENERGY_OF_SENSORS*: 자신을 관측하는 센서의 에너지 잔량 합이 가장 적은 타겟
- *ANY*: 임의로 선택한 타겟

그림 6에서 6개의 센서, 타겟 쌍이 주요 타겟의 선택에 따른 네트워크 수명에 대한 영향을 알아보기 위해 사용되었다. 그림 6을 통해 *MIN_NUM_OF_SENSORS* 를 주요 타겟을 선택하는 방식으로 활용할 때 다른 두 가지 방식보다 네트워크 수명이 높은 것을 알 수 있다.

결론적으로 MDCT문제를 해결하기 위해 네트워크 수명 면에서 *MIN_NUM_OF_SENSORS* 방식이 가장 적합한 방식이며 다음 시뮬레이션에도 사용하기로 한다.

5.2.2 회전에너지에 따른 영향

회전방향센서네트워크에서 대부분의 방향 센서들은 방향을 회전하는데 많은 에너지를 소모하기 때문에 방향 축을 기준으로한 관성모멘트 (I)는 중요한 요

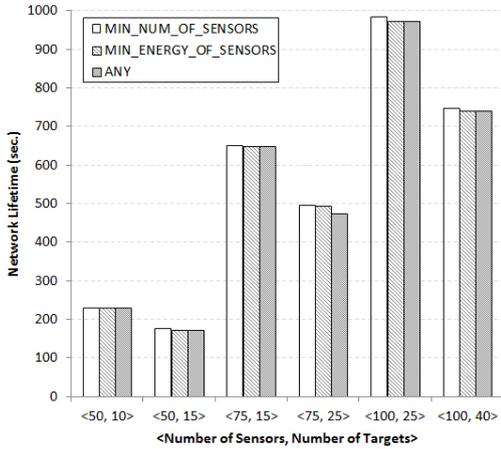


그림 6. 주요 타겟 선택방법에 따른 네트워크 수명

소이다. 다양한 관성모멘트 값의 변화에 따른 두 알고리즘의 성능을 비교 분석한다. 시뮬레이션을 위해 100개의 센서와 30개의 타겟이 사용되었고 센싱반경과 최대통신반경은 20m와 40m로 고정하였다.

그림 7은 관성모멘트의 영향에 따른 네트워크 수명을 나타낸다. Dynamic은 자유회전 센서모델을 뜻하고 3과 4는 $W=3$, $W=4$ 인 고정방향센서모델을 뜻한다. 그림을 통해 관성모멘트 값이 증가할수록 회전 에너지가 많은 에너지 소모를 야기하기 때문에 두 알고리즘의 네트워크 수명은 감소함을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 DCCG 알고리즘이 CWGC-d 알고리즘보다 높은 네트워크 수명을 나타냄을 알 수 있고 회전 에너지가 증가할수록 두 알고리즘간 네트워크 수명의 격차 또한 증가함을 알 수 있다. 이것은 센서가 방향을 회전할 때 드는 회전에너지가 높아질수록 DCCG 알고리즘이 CWGC-d 알고리즘보다 센서의

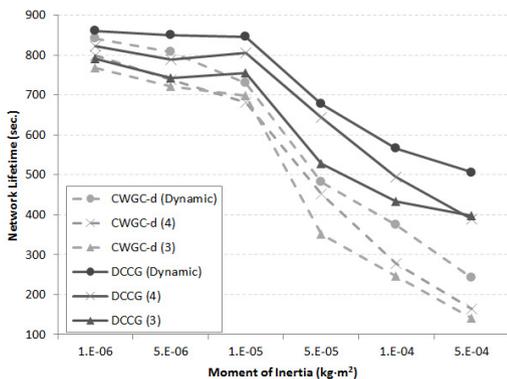


그림 7. 관성모멘트의 증가에 따른 네트워크 수명변화

에너지를 더욱 절약하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향으로 인해 DCCG 알고리즘의 방향 회전에너지 고려가 결과적으로 CWGC-d 알고리즘보다 에너지 효율적으로 네트워크 수명을 증가시킴을 알 수 있다.

또한 자유회전 방향모델을 적용하였을 때 고정개수 방향모델보다 네트워크 수명 면에서 앞서는 것을 볼 수 있다. 자유회전 센서모델은 타겟을 관측할 수 있을 정도의 최소한의 각도로 회전하기 때문에 고정개수 방향모델보다 에너지 효율적이다.

5.2.3 센서 수와 타겟 수에 따른 영향

본 절에서는 센서와 타겟의 수가 네트워크 수명에 미치는 영향을 알아보기로 한다. 센싱 반경과 최대 통신반경은 20m와 40m로 고정하고 CWGC-d와 DCCG를 비교한다. 그림 8은 DCCG와 CWGC-d의 네트워크 수명을 나타낸다. 이 시뮬레이션에서 센서의 수(N)는 60에서 130개까지 증가시키고 타겟의 수(M)는 20개로 고정하였다. 센서수가 늘어날 때 임의의 방식을 통해 센서 간 충돌이나 간섭의 영향을 해소한다고 가정한다. 그림 8을 통해 센서의 수가 증가함에 따라 네트워크 수명 또한 증가함을 알 수 있다. 센서의 수가 많아질수록 보다 많은 방향커버트리를 찾을 수 있게 되고, 주어진 타겟을 관측하고 데이터를 전달하는데 도움을 준다. 그림 8에서 Ratio는 두 알고리즘의 네트워크 수명을 DCCG/CWGC-d로 나타낸 것으로 DCCG 알고리즘이 CWGC-d보다 15% 가량 항상 앞서는 것을 알 수 있다. 이것은 센서의 센싱과 통신 에너지만을 고려한 CWGC-d 알고리즘에 비해 방향센서의 회전에너지도 고려한 DCCG 알고리즘이 방향커버트리를 생성할 때 더욱 에너지 효율적임을

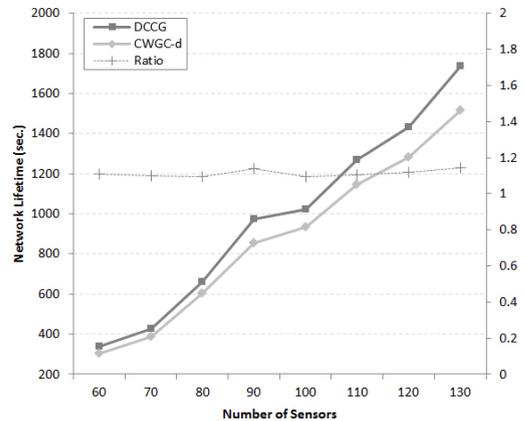


그림 8. 센서 수의 증가에 따른 네트워크 수명변화

나타낸다.

그림 9는 타겟의 수에 따른 네트워크 수명을 나타낸다. 이 시뮬레이션은 타겟의 수(M)를 15개에서

50개까지 변화시켰으며 센서의 수(N)는 100개로 고정하였다.

타겟의 수가 증가함에 따라 센서의 데이터 생성률이 증가하며 보다 많은 센서가 소스 및 릴레이 기능에 쓰이게 된다. 그림 9를 통해 타겟의 수가 증가함에 따라 네트워크 수명은 감소함을 알 수 있다. 또한 DCCG 알고리즘의 네트워크 수명은 CWGC-d에 비해 항상 앞서는 것을 알 수 있다. 이 결과 역시 방향센서의 회전에너지를 고려한 DCCG 알고리즘이 센싱과 통신 에너지만을 고려한 CWGC-d 알고리즘에 비해 에너지효율적임을 알 수 있다.

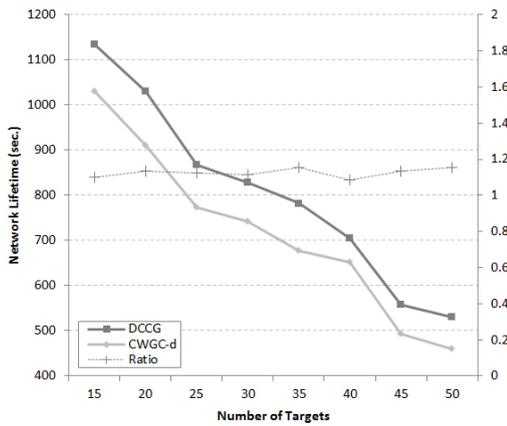


그림 9. 타겟 수의 증가에 따른 네트워크 수명 변화

5.2.4 센싱 반경과 최대 통신 반경에 따른 영향

센싱반경과 최대통신반경에 따른 두 알고리즘의 네트워크 수명의 변화를 알아보기 위해 센서와 타겟의 수를 100개와 30개로 고정한 상태에서 센싱반경은 15m에서 40m까지 변화시켰고 최대통신반경을 20m에서 70m까지 변화시켜서 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 10은 최대통신반경이 40m일 때 센싱반경의 증가에 따른 네트워크 수명을 보인다. 센싱반경이 증가함에 따라 하나의 센서가 관측할 수 있는 타겟의 양 또한 증가하기 때문에 적은 센서로도 효율적인 타겟 관측이 가능하다. 그로 인해 보다 많은 방향커버트리를 생성할 수 있고 네트워크 수명 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 10을 통해 센싱반경이 증가할수록 DCCG 알고리즘과 CWGC-d 알고리즘의 네트워크 수명의 차이가 증가함을 볼 수 있다. DCCG 알

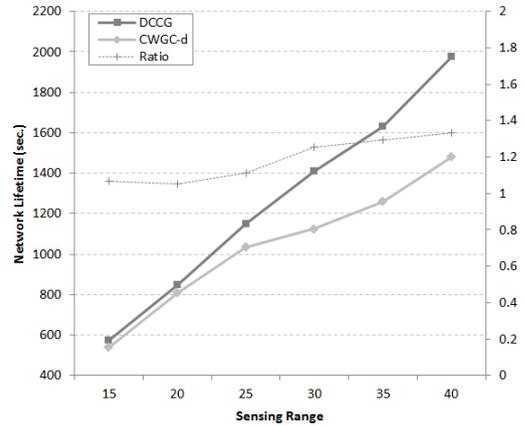


그림 10. 센싱반경의 증가에 따른 네트워크 수명 변화

고리즘은 방향센서의 회전에너지를 고려함에 따라 CWGC-d 알고리즘보다 에너지 효율적인 방향커버트리를 찾을 수 있기 때문이다.

그림 11은 센싱반경이 20m일 때 최대통신반경의 변화에 따른 네트워크 수명을 나타낸다. 통신반경이 늘어날수록 네트워크 수명이 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 통신링크의 증가에 따라 보다 에너지 효율적인 경로를 찾을 확률이 높기 때문이다.

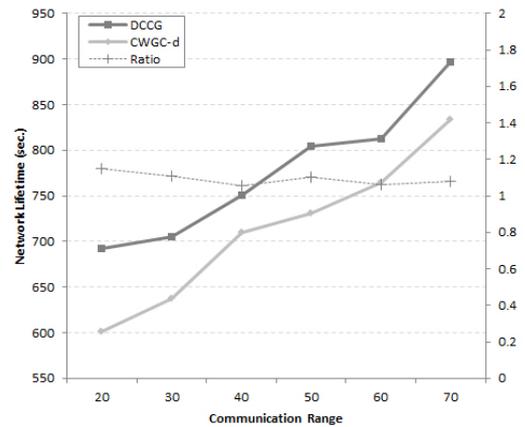


그림 11. 통신반경의 증가에 따른 네트워크 수명 변화

VI. 결 론

본 논문은 방향센서의 커버리지와 연결성을 고려한 새로운 스케줄링 문제인 MDCT 문제를 제시하였다. 방향센서들의 활성/수면상태를 적절하게 전환하여 네트워크 수명을 최대화할 수 있는 DCC-greedy 기법을

제안하였다. DCC-greedy 알고리즘에서는 방향센서의 에너지 소모를 줄이기 위해 센싱과 통신에 따른 에너지에 이어 방향센서의 회전에너지 또한 고려하였다. 타겟을 관측하는 센서들과 관측한 데이터를 싱크노드까지 전달하는 센서들을 활성상태에 두고 그렇지 않은 센서들은 수면상태로 전환하여 네트워크 수명을 최대화할 수 있는 DCC-greedy 기법을 제안하였다. 또한 고정개수 방향센서 모델과 자유회전 방향센서 모델을 제시하였다.

시뮬레이션을 통하여 자유회전 방향센서 모델이 고정개수 방향센서 모델보다 에너지효율적임을 보였다. 그리고 제안하는 DCC-greedy 알고리즘이 MDCT 문제를 해결하기 위한 적합한 알고리즘임을 보였다. 다양한 파라미터를 적용하여 기존의 방향센서네트워크에 맞게 수정된 CWGC-d 알고리즘과 비교하여 DCC-greedy 알고리즘이 네트워크 수명 면에서 우수함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] I.F. Akyildiz, T. Melodia and K. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer Networks*, 51, pp.921-960, 2007.

[2] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. B. Srivastava, "Energy-Aware Wireless Microsensor Networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, 19, pp.40-50, 2002.

[3] M. Rahimi, R. Baer, O. Iroezzi, J. Garcia, J. Warrior, D. Estrin and M. Srivastava, "Cyclops: In Situ Image Sensing and Interpretation in Wireless Sensor Networks," *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems*, 2005.

[4] H. Ma and Y. Liu, "On Coverage Problems of Directional Sensor Networks," *The First Int. Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, pp.721-731, 2005.

[5] J. Ai and A.A. Abouzeid, "Coverage by Directional Sensors in Randomly Deployed Wireless Sensor Networks," *Journal of Combinatorial Optimization*, 11, pp.21-41, 2006.

[6] J. Wang, C. Niu and R. Shen, "Priority-based Target Coverage in Directional Sensor Networks Using a Genetic Algorithm,"

Computers and Mathematics with Applications, 57, pp.1915-1922, 2009.

[7] G. Fusco and H. Gupta, "Placement and Orientation of Rotating Directional Sensors," *7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON '10)*, pp.332-340, 2010.

[8] C.F. Huang and Y.C. Tseng, "A Survey of Solutions to The Coverage Problems in Wireless Sensor Networks," *Journal of Internet Technology*, 6, pp.1-8, 2005.

[9] M. Cardei and D.Z. Du, "Improving Wireless Sensor Network Lifetime through Power Aware Organization." *Wireless Networks*, 11, pp.333-340, 2005.

[10] M. Cardei, M.T. Thai, Y. Li and W. Wu, "Energy-efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks," *IEEE Infocom*, pp. 1976 - 1984, 2005.

[11] Q. Zhao and M. Gurusamy, "Lifetime Maximization for Connected Target Coverage in Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16, 2007.

김 찬 명 (Chan-Myung Kim)

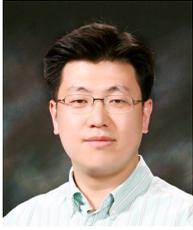
준회원



2009년 8월 한국기술교육대학교 멀티미디어공학과 졸업
 2009년 9월~현재 한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> 센서네트워크, 스케줄링, 커버리지

한 연 희 (Youn-Hee Han)

중신회원



1996년 2월 고려대학교 수학과
(이학사)

1998년 5월 고려대학교 컴퓨터
학과(이학석사)

2002년 2월 고려대학교 컴퓨터
학과(이학박사)

2002년 2월~2006년 2월 삼성
종합기술원 전문연구원

2006년 3월~현재 한국기술교육대학교 조교수
<관심분야> 이동성 관리, 지능형 센서 네트워크

길 준 민 (Joon-Min Gil)

정회원



2000년 8월 고려대학교 전산과
학과 박사

2001년 6월~2002년 5월 Univ.
of Illinois at Chicago,
Post-Doc.

2002년 10월~2006년 2월KISTI
슈퍼컴퓨팅센터 선임연구원

2006년 3월~현재 대구가톨릭대학교 컴퓨터정보통
신공학부 교수

<관심분야> 센서네트워크, 클라우드 컴퓨팅, 그리드
컴퓨팅