

무선 센서 네트워크에서 다중 타겟 커버리지와 연결성을 고려한 스케줄링 기법

준회원 김 용 환*, 종신회원 한 연 희*, 정회원 박 찬 열**

A Scheduling Scheme Considering Multiple-Target Coverage and Connectivity in Wireless Sensor Networks

Yong-hwan Kim* *Associate Member*, Youn-Hee Han*° *Lifelong Member*
 Chan-Yeol Park** *Regular member*

요 약

무선 센서 네트워크의 센서 노드들은 한정된 자원을 가지고 있으며 배터리의 교체가 어렵다는 특성을 가지고 있기 때문에 제한된 에너지를 효율적으로 사용하는 기법은 매우 중요하다. 지금까지 이러한 센서 노드의 에너지 소모를 최소화하기 위하여 다양한 스케줄링 문제 및 해결 방안에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 특히 CTC(Connected Target Coverage) 문제는 타겟 커버리지와 연결성을 동시에 고려하여 센서 노드들의 효율적인 상태 전이 시점을 결정하는 대표적인 스케줄링 문제로 간주된다. 본 논문에서는 중복되어 센싱되는 타겟을 고려한 보다 올바른 센서 에너지 소비 모델을 제안하고 센서 네트워크의 수명을 더욱 연장 할 수 있는 CMTC(Connected Multiple-Target Coverage) 문제를 제시한다. 또한, 이 문제를 해결하기 위한 SPT(Shortest Path based on Targets)-Greedy 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 제안기법이 기존기법보다 센서 네트워크의 수명을 더욱 연장하는 기법임을 보인다.

Key Words : Wireless Sensor Network, Scheduling, Target Coverage, Connectivity, Energy efficiency

ABSTRACT

A critical issue in wireless sensor networks is an energy-efficiency since the sensor batteries have limited energy power and, in most cases, are not rechargeable. The most practical manner relate to this issue is to use a node wake-up scheduling protocol that some sensor nodes stay active to provide sensing service, while the others are inactive for conserving their energy. Especially, CTC (Connected Target Coverage) problem has been considered as a representative energy-efficiency problem considering connectivity as well as target coverage. In this paper, we propose a new energy consumption model considering multiple-targets and create a new problem, CMTC (Connected Multiple-Target Coverage) problem, of which objective is to maximize the network lifetime based on the energy consumption model. Also, we present SPT (Shortest Path based on Targets)-Greedy algorithm to solve the problem. Our simulation results show that SPT-Greedy algorithm performs much better than previous algorithm in terms of the network lifetime.

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부) 재원의 한국연구재단(2009-0076098) 및 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다.

* 한국기술교육대학교 첨단기술연구소(cherish@kut.ac.kr, yhhan@kut.ac.kr)(°:교신저자)

** 한국과학기술정보연구원(chan@kisti.re.kr)

논문번호 : KICS2009-10-515, 접수일자 : 2009년 10월 31일, 최종논문접수일자 : 2010년 2월 12일

I. 서 론

최근 무선 센서 네트워크는 국가적 보안이나 감시체계, 건강관리 및 다양한 환경상의 관측 등 다양한 응용 도메인에서 활용되고 있다. 이러한 센서 네트워크를 구성하는 센서는 제한된 에너지를 가지고 있으며 배터리의 교체가 어렵다는 특성 때문에 응용 도메인에는 보통 많은 수의 센서들을 촘촘하게 배치할 가능성이 크다. 따라서 많은 수의 센서 상태를 적절하게 활성(active)/수면(sleep) 모드로 전환하여 센서의 에너지를 효율적으로 사용하는 스케줄링은 무선 센서 네트워크의 수명을 최대화하기 위한 주요 이슈이다.

일반적으로 센서 네트워크의 목적은 센서 노드들을 특정 지역에 배치하여 관심지역에서 발생하는 각종 이벤트를 센싱하고 사용자에게 수집한 정보를 전달하는데 있다. 그래서 관심지역이 각 센서에 의하여 얼마나 잘 센싱되는지의 정도에 대한 커버리지(Coverage)와 센서에 의하여 센싱된 데이터가 싱크 노드까지 무선 통신을 통하여 얼마나 잘 전달될 수 있는지의 정도에 관한 연결성(Connectivity)은 센서 네트워크 분야의 또 다른 주요 척도라고 할 수 있다. 센서 네트워크에서 커버리지는 크게 센싱하는 대상에 따라 지역(area) 커버리지, 타겟(target) 커버리지, 경계(barrier) 커버리지 등 세 가지 유형으로 분류되어 진다^[1]. 본 논문은 이 중 타겟 커버리지와 관련된 스케줄링을 연구한다. 기존의 [2]-[4] 연구에서는 타겟 커버리지를 고려한 스케줄링 알고리즘을 제시하고 있다. 하지만 데이터 통신과 관련한 네트워크의 연결성을 고려하지 않고 있다. 또한 [5]-[7] 연구에서는 커버리지를 고려함과 더불어 트리를 기반으로 하여 센서들이 싱크 노드까지 데이터를 전달할 수 있는 경로를 찾음으로써 연결성을 고려한 스케줄링 알고리즘을 제시하고 있다. 그러나 이러한 연구 또한 적용하고 있는 센서의 에너지 소비 모델에 문제점과 한계가 존재한다.

기존의 연구에서는 같은 스케줄 시간에 활성화되는 센서들이 얼마나 많은 타겟을 센싱하는지와 관계없이 발생된 데이터의 양은 동일하며 이에 따라 센서들은 동일한 에너지를 소모한다고 가정하고 있다. 또한 데이터를 중계(relay)하는 센서들도 실제 전달하는 데이터의 양이 아닌 통신하고 있는 센서의 수만을 고려하여 차등의 에너지를 소모한다고 가정하고 있다^{[5]-[7]}. 하지만 실제 환경에서는 센서의

에너지 소모는 얼마나 많은 데이터를 모으고, 전송하고, 수신하는지에 따라 달라진다^[8]. 따라서 타겟 커버리지를 고려한 스케줄링 문제의 경우, 데이터의 발생과 관련된 타겟을 얼마나 많이 센싱하는지에 따라 생성되는 데이터의 양이 달라지며 이에 따라 각 센서는 차등의 에너지를 소모함이 합당하다. 즉, 센서가 많은 수의 타겟을 센싱하면 할수록 좀 더 많은 데이터가 생성되며 이에 따라 센서가 소모하는 에너지가 많아지게 된다. 마찬가지로 데이터를 중계하는 센서들 또한 얼마나 많은 타겟에 의해 생성된 데이터를 송수신하는지에 따라 에너지의 소모를 달리해야 한다. 본 논문에서는 센서의 에너지 소비 모델을 발생되는 데이터의 양에 근거하여 제시함으로써 실제 환경에 적합하게 설계하고 이를 스케줄링에 적용하고 있다.

또한 임의의 센서 네트워크에서는 데이터를 발생시키는 타겟이 하나 이상의 센서에 의하여 중복 센싱되는 경우가 자주 발생하게 된다. 이를 다중 타겟(Multiple-Target)이라 하는데 기존 연구들에서는 이 다중 타겟의 데이터가 싱크 노드까지 중복되어 송수신되는 상황을 고려하고 있지 않다. 게다가 이의 경우에 초래되는 센서의 불필요한 에너지 소모 또한 스케줄링 기법에 반영하지 않고 있다. [9]의 연구에서는 다중 타겟을 고려하고 있지만 그 보다 더 중요한 싱크 노드까지의 연결성은 전혀 고려하고 있지 않다.

본 논문에서는 싱크 노드까지 각 타겟에 의해 발생된 데이터에 대한 전달 경로를 유일하게 하나만 선정함으로써 각 타겟의 데이터가 중복되어 송수신되는 다중 타겟을 제거하고 이에 부합하는 센서의 센서 에너지 소모 모델을 제시한다. 다중 타겟으로 유발되는 중복 데이터 제거는 센서 사이의 중복된 데이터의 송수신을 방지함으로써 센서 에너지의 소모를 줄여 결과적으로 센서 네트워크의 수명을 연장하는 효과를 가지고 온다.

본 논문에서는 위에서 언급한 사항들을 고려하여 모든 타겟을 센싱하고 싱크 노드까지 타겟의 데이터가 중복됨이 없이 전달하는 센서 그룹 수를 최대로 구하여 네트워크의 수명을 연장시키는 스케줄링 기법인 SPT(Shortest Path based on Targets)-Greedy 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통한 성능 분석에서 SPT-Greedy 알고리즘이 기존의 방법보다 네트워크의 수명을 더 연장할 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스

템 모델을 제시하고 본 논문에서 해결하려고 하는 문제를 구체적으로 제시한다. III장에서는 이 문제를 해결하기 위해 제안하는 SPT-Greedy 알고리즘을 설명한다. IV장에서 성능 분석 및 결과를 보이고 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 내린다.

II. 시스템 모델 및 문제 정의

본 장에서는 제안하는 스케줄링 기법을 위한 시스템 모델을 제시하고, 타겟 커버리지와 연결성을 동시에 고려한 스케줄링 문제인 CMTC(Connected Multiple-Target Coverage) 문제에 대하여 새롭게 제시한다.

2.1 시스템 모델

본 논문에서 무선 센서 네트워크는 임의로 배치된 센서들과 센싱하고자 하는 타겟 그리고 센싱된 데이터를 모으는 싱크(sink)노드로 구성되어 있다고 가정한다. 또한 각 타겟의 위치는 네트워크 관리 시스템에서 미리 알고 있으며 각각의 센서들은 임의의 기법을 통하여 스스로 자신의 위치를 알 수 있다고 가정한다.

모든 센서의 센싱 범위는 동일하며 타겟이 센서의 센싱 반경 내부에 있으면 항상 센싱된다고 가정하는 이진 모델(Binary Model)을 사용한다. 또한 센서의 통신 범위(Communication Range)는 각 센서의 무선 송수신기의 전송파워에 따라 달라질 수 있으며 서로 다른 두 센서가 서로의 최대 통신 범위 안에 존재할 때 두 센서는 연결되어 있다고 가정한다. 그리고 이를 통해 모든 센서는 단일 홉(hop) 또는 다중 홉으로 싱크 노드와 통신 가능한 네트워크 상황을 고려한다.

본 논문에서 센서 네트워크의 수명은 다음과 같이 정의한다.

[Definition 1] 네트워크 수명 (Network Lifetime): 네트워크 수명은 센서들이 임의로 배치되어 센싱 작업을 시작한 시점부터 임의의 타겟이 하나 이상의 센서에 의하여 센싱되지 않는 상황이나 센서가 센싱한 데이터를 싱크 노드까지 전달 할 수 있는 센서들이 없을 때까지이다. □

본 논문에서 스케줄링의 기본적인 수행 방법은 다음의 중앙 집중형 기법 (Centralized Scheme)에 따라 수행된다.

- 1) 모든 센서는 자신의 위치 정보를 싱크 노드에

게 보낸다.

- 2) 싱크 노드는 스케줄링 알고리즘을 수행한 뒤, 이를 센서들에게 방송한다.
- 3) 모든 센서는 수신한 스케줄에 입각하여 스케줄링을 수행한다.

2.2 Connected Multiple-Target Coverage 문제

본 논문에서 해결하려고 하는 문제는 기본적으로 [7]번 논문에서 제안하는 CTC(Connected Target Coverage) 문제를 기반으로 한다. CTC 문제는 센서 네트워크상에서 타겟 커버리지와 연결성을 고려하고자 고안되었다. 본 논문에서는 이와 같은 CTC 문제에 추가적으로 다중 타겟 및 중복성 제거를 고려하여 CMTC (Connected Multiple-Target Coverage) 문제를 새롭게 정의한다. CMTC 문제는 구체적으로 다음과 같이 정의되어 진다.

[Definition 2] CMTC 문제 (Connected Multiple-Target Coverage Problem): 무선 센서 네트워크에 위치가 알려진 M 개의 타겟과 제한된 에너지를 지닌 N 개의 센서가 배치되었을 때, 다음의 조건을 만족하는 다수의 센서 스케줄링 집합을 구한다.

- 1) 타겟 커버리지 - 임의의 시간에 각 타겟은 하나 이상의 센서에 의하여 센싱되어야 한다.
- 2) 연결성 - 타겟을 센싱하는 센서들이 싱크 노드까지 데이터를 전달할 수 있도록 데이터를 주고받을 수 있는 센서들이 존재하여야 한다.
- 3) 중복 제거성 - 임의의 타겟에 대하여 데이터를 센싱하는 센서들 중 하나의 센서만이 싱크 노드로 타겟의 데이터를 전달하여야 한다.
- 4) 네트워크의 수명이 최대화되어야 한다. □

위에서 정의된 CMTC 문제는 기존 CTC 문제에서 3)번 조건, 즉 중복 제거성이 추가된 것이다. 즉, 기존 CTC 문제를 확장하여 에너지 효율성의 관점에서 다중 타겟 및 중복성 제거를 고려한 좀 더 복잡한 문제로 정의한 것이다.

그림 1은 CMTC 문제의 해 일부를 도시하고 있다. 이 그림에서는 임의의 센서 네트워크에 8개의 센서와 3개의 타겟 그리고 1개의 싱크 노드가 존재함을 그래프로서 표현하고 있다. 그래프에서 임의의 센서가 특정 타겟을 센싱할 수 있다면 그 센서와 타겟은 센싱 링크(Sensing Link)로 연결되고 센싱된 데이터를 주변 센서 노드로 전달을 할 수 있다면 그 두 센서들은 통신 링크(Communication Link)로

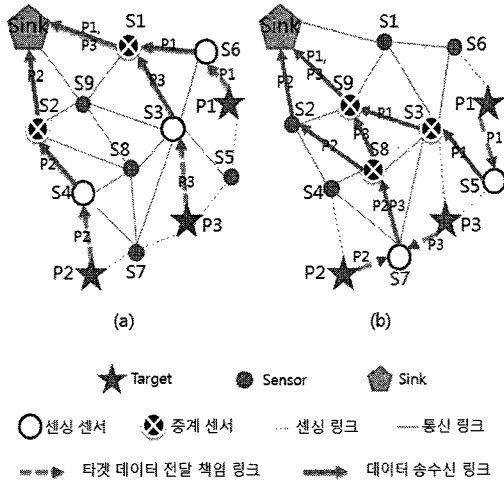


그림 1. CMTC 문제의 예제

연결된다. 이 중 임의의 순간에 존재하는 활성 센서가 임의의 타겟을 센싱하여 그 타겟의 데이터를 다른 중계 노드나 싱크로 전송을 한다면 방향성이 있는 점선(Directed Dotted Edge)으로 표기한다. 마지막으로 그러한 데이터를 송수신하는 경우 방향이 있는 간선(Directed Edge)으로 표기한다. 그림 1(a)와 그림 1(b)에서 활성화되어진 센서들 및 방향이 있는 점선 및 간선으로만 이루어진 그래프 각각은 CMTC 문제의 해에 속하는 서로 다른 두 개의 센서 집합들을 나타낸다. 그 두 개의 센서 집합들은 각각 모든 타겟을 센싱하고 있으며, (타겟 커버리지) 싱크까지 하나의 경로를 통해서 각 타겟 데이터를 전달하고 있고(연결성), 각 타겟의 데이터는 하나의 센서에 의해서만 전달되고 있음(중복 제거성)을 볼 수 있다. 즉, CMTC 문제는 이와 같은 조건을 지닌 센서 집합을 가능한 최대의 수로 만들어 내고 그 센서 집합마다 적절한 활성화 시간을 할당하여 네트워크 수명을 최대화 하는 문제이다.

III. 제안하는 스케줄링 알고리즘

본 장에서는 CMTC 문제를 센서 에너지 소비 모델을 활용하여 좀 더 정형화하여 표현한 MNDG (Maximum Non-Duplication Cover Graph) 문제를 정의하고 이 문제는 NP Complete임을 설명한다. 또한, 이 문제를 해결하기 위한 SPT(Shortest Path based on Target)-Greedy 스케줄링 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서 제시한 MNDG 문제는 [7]에서 제안한 MCT (Maximum Cover Tree)문제에 다중

타겟 및 중복성 제거를 고려하여 정의한 문제이다.

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ($|S| = N$)와 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$ ($|P| = M$)는 각각 센서네트워크에 배치되는 센서와 타겟의 집합을 나타내고 R 은 싱크 노드라고 가정하자. 본 논문에서는 센서 네트워크를 가중치 그래프 $G = (V, E)$ 로 모델링한다. 여기서 $V = S \cup P \cup \{R\}$ 이며 E 는 센싱 링크와 통신 링크의 집합으로 이뤄진다.

3.1 관측 그래프(Cover Graph)

각 센서들은 임의의 시간에 활성 상태와 수면 상태중 하나의 상태를 유지한다. 이 때 [7]번에서 제안한 것처럼 OTI (Operational Time Interval) τ 는 각 센서들의 상태가 바뀌지 않는 단위 시간을 의미한다.

임의의 OTI인 τ 시간 동안 활성화되어 있는 센서들은 타겟을 직접 센싱하는 센서 집합($S_s(\tau)$)과 센싱 데이터를 중계하는 센서 집합($S_r(\tau)$)으로 구분할 수 있다. 이 때, 관측 그래프(Cover Graph) $G(\tau)$ 는 다음과 같이 정의한다.

[Definition 3] 관측 그래프(Cover Graph) $G(\gamma)$: $E'(\tau)$ 를 τ 시간 동안 활성화된 센서들 및 싱크 노드 R 사이에 연결된 센싱 링크 및 통신 링크들의 집합이라고 할 때,

$$G(\tau) = (S_s(\tau) \cup S_r(\tau) \cup P \cup \{R\}, E'(\tau))$$

이며, 이 $G(\tau)$ 는 CMTC 문제의 1), 2), 3) 속성을 만족해야 한다. □

앞선 CMTC 문제의 해 일부를 도시한 그림 1(a)와 그림 1(b)에서 활성화되어진 센서들 및 방향이 있는 점선 및 간선으로만 이루어진 그래프 각각은 관측 그래프 두 개를 예시한 것이다.

[7]번 연구에서는 관측 그래프 대신에 관측 트리(Cover Tree)를 정의하고 있다. 이 관측 트리의 단말 노드는 센싱 노드이며 임의의 타겟에 대하여 여러 개의 센서들이 동시에 센싱할 수 있음을 가정하지만 본 논문에서 제안하는 관측 그래프는 에너지 효율 측면에서 그러한 중복 센싱은 하지만 센싱된 데이터들이 중복되어 전송되지 못하도록 막고 있다.

또한 위에서 정의한 관측 그래프는 [10]에서 소개된 내용기반 라우팅 (Content-based routing)을 지

원한다. 내용기반 라우팅이란 목적지에 기반을 두는 기존 라우팅 방식에 데이터의 내용 즉, 그 데이터를 발생시킨 타겟(소스)에 근거한 라우팅 방식을 추가하는 것을 일컫는다. 임의의 센서는 자신이 취득한 타겟별 데이터를 서로 취론 두 개의 중계 노드로 각각 전달할 수 있다. 그래서, 관측 그래프를 구성하는 센서와 타겟들을 트리형태로 구성할 수는 없다. 이는 배치된 센서들의 부하분산(load balancing) 효과를 유발하며 센서들이 에너지를 균등하게 소모하도록 이끌어 결과적으로 네트워크의 수명을 더욱 연장시키게 된다.

3.2 센서의 에너지 소비 모델

제안하는 스케줄링 알고리즘은 센서들이 배치되어 자신의 센싱 임무를 수행하기 전에 싱크 노드가 수행한다고 가정한다. 또한, 제안 알고리즘에서 각 센서들의 에너지 소모가 예측 가능해야 하기 때문에 올바른 센서 에너지 소비 모델이 요구된다.

각 타겟에 대하여 센서가 생성하는 데이터 비트 발생률(Bit Rate, R_b)이 동일하다고 가정한다. 즉, 모든 센서는 센싱가능한 각 타겟에 대하여 같은 표본화, 양자화, 부호화 작업을 수행한다. 따라서 같은 센서들의 집합에 속하더라도 얼마나 많은 타겟을 센싱하는지에 따라 센서가 생성하는 데이터의 양이 달라진다.

e_s 와 e_r 은 각각 임의의 센서가 임의의 타겟에서 발생하는 한 비트의 데이터를 센싱하고 수신하는데 소모되는 에너지를 나타낸다. 또한, 센서 s_i 가 센서 s_j 에게 한 비트의 데이터를 전송하기 위하여 소모하는 에너지는 다음 식 (1)과 같다.

$$e_{ij}^t = e_i + b \cdot d_{ij}^\alpha \quad (1)$$

위 식에서 e_i 는 한 비트를 송신하기 위한 기본 에너지이며 b 는 가중치 상수이다. 또한, d_{ij} 는 두 센서간의 거리이고 α 는 경로 손실 요소(path loss factor)이다. 본 논문에서는 에너지 모델을 좀 더 간단하게 표현하기 위하여 e_{ij}^t 를 e_{trans} 로 단순화 하겠다.

이 때 임의의 τ 시간 동안 형성할 수 있는 관측 그래프 $G(\tau)$ 에 속한 임의의 센서 s 의 에너지 소비 모델은 다음 식 (2)와 같다.

$$E(s, G(\tau)) = \begin{cases} \tau R_b e_s \theta_s + \tau R_b e_{trans} \phi_s(\tau), & \text{if } s \in S_s \text{ and } s \notin S_r; \\ \tau R_b (e_r + e_{trans}) \Phi_s(\tau), & \text{if } s \in S_s \text{ and } s \in S_r; \\ \tau R_b e_s \theta_s + \tau R_b e_{trans} \phi_s(\tau) + \tau R_b (e_r + e_{trans}) \Phi_s(\tau), & \text{if } s \in S_s \text{ and } s \in S_r; \\ 0, & \text{if } s \notin S_s \text{ and } s \notin S_r. \end{cases} \quad (2)$$

위의 에너지 소비 모델에서 θ_s 는 주어진 센서 s 의 센싱 범위에 있는 타겟의 수를 의미하며 $\phi_s(\tau)$ 는 관측 그래프 $G(\tau)$ 에서 센서 s 와 연결된 타겟(스케줄링 시간인 τ 시간 동안 싱크로 전송해야 할 데이터와 관계된 타겟)의 수를 의미한다 ($\phi_s(\tau) \leq \theta_s$). 마지막으로 $\Phi_s(\tau)$ 는 $G(\tau)$ 에서 센서 s 을 통해 전달되는 데이터와 관계된 타겟의 수를 의미한다.

3.3 MNDG 문제와 NP-Complete

[Definition 3] MNDG 문제 (Maximum Non-Duplication Cover Graph): 센서 네트워크상에 S, P, R 그리고 센서의 초기 에너지양 E_0 가 주어졌을 때, 주어진 에너지 조건을 만족하는 관측 그래프 $G(\tau_1), G(\tau_2), \dots, G(\tau_x)$ 와 이에 대응되는 스케줄링 시간 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_x$ 을 네트워크의 수명을 최대화하도록 구한다. □

L 을 주어진 네트워크의 수명이라고 가정할 때, MNDG 문제는 다음과 같이 정형화될 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{Maximize } L(S, P, R, C) \equiv \sum_{i=1}^x \tau_i, \\ &\text{subject to } \sum_{i=1}^x E(s, G(\tau_i)) \leq E_0(s), \forall s \in S. \quad (3) \end{aligned}$$

본 논문에서 해결하고자하는 MNDG와 같은 종류의 문제는 [5]에서 NP-Complete 범주에 속함이 증명되어 있다.

3.4 제안하는 스케줄링 알고리즘

MNDG 문제는 NP-Complete 문제이기 때문에 본 논문에서는 이를 Greedy 방식의 휴리스틱 알고리즘을 활용하여 해결한다. 제안하는 알고리즘은 먼저 각 센싱링크와 통신링크에 에너지 관련 가중치를 부여하여 가중치 그래프를 형성한다. 그 뒤, Greedy 알고리즘을 활용하여 각 타겟에서 발생하는 데이터에 대하여 하나의 경로를 통해 그것을 전달

할 수 있도록 하는 임의의 센서들을 찾아낸다. 이로써 임의의 OTI 시간 τ_i 과 관측 그래프 $G(\tau_i)$ 을 구하게 된다. 이 과정을 에너지가 남아있는 센서들이 타겟들을 관측하고 싱크까지 데이터를 전달할 수 있을 때까지 반복수행하여 가능한 한 많은 $G(\tau_i)$ 및 τ_i 을 구한다. 본 논문에서는 이러한 알고리즘을 SPT (Shortest Path based on Target)-Greedy 알고리즘이라고 부르겠다.

SPT-Greedy 알고리즘은 입력으로 S, P, R 과 센서의 에너지양 E_0 및 OTI τ 을 받아서 관측 그래프 $G(\tau_1), G(\tau_2), \dots, G(\tau_x)$ 과 이에 대응되는 스케줄링 시간 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_x$ 을 반환한다.

SPT-Greedy 알고리즘에서 사용하는 기호들은 다음과 같이 정의된다.

- S_i : 에너지가 남아있고 고립되지 않은(다른 센서와 통신이 가능한) 센서들의 집합
- P_s : 센서 s 가 센싱하는 타겟들의 집합
- $E_r(s)$: 센서 s 의 잔존 에너지양
- w_s : 센서 s 의 가중치
- $w_{k,s}$: 타겟 k 와 센서 s 의 센싱링크 가중치
- $w_{i,j}$: 센서 i 와 센서 j 의 통신링크 가중치
- $R(k, sink)$: 가중치 그래프 $G = (V, E)$ 에서 타겟 k 부터 싱크까지의 경로
 $R(k, sink) \equiv \langle k, s_1, s_2, \dots, sink \rangle$
- $\bar{R}(k, sink)$: $R(k, sink)$ 에서 타겟 k 와 싱크가 배제된 집합
- x : 관측 그래프의 수

그림 2는 SPT-Greedy 알고리즘을 보여준다. 이 알고리즘은 먼저 초기화 작업을 수행한다(line 1-8). $w_{k,s}$ 의 경우, 임의의 센서 s 가 임의의 타겟 k 을 센싱하면 센서 s 가 센싱하는 타겟들의 수만큼 가중치를 부여한다(line 4-7).

센서 s_i 와 센서 s_j 의 통신링크 경로가중치 w_{ij} 는 다음과 같이 주어진다(line 10-11).

$$w_{ij} = w_i \times (E_0(s_i) / E_r(s_i)) \times d_{ij}; \quad (4)$$

통신링크는 w_i 와 센서 s_i 의 초기 에너지양과 남아있는 에너지양의 비율, 그리고 두 센서간의 거리를 반영하여 계산된다.

SPT-Greedy(S, P, R, E_0, τ)

```

(01)  $S_i = S; S = \emptyset; x = 1;$ 
(02) for each  $s \in S_i,$ 
(03)    $E_r(s) = E_0(s); w_s = 1;$ 
(04)   for each target  $k \in P,$ 
(05)     if target  $k$  is covered by  $s,$ 
(06)        $w_{k,s} = |P_s|;$  endif
(07)   endifor
(08) endifor
(09) while  $\cup_{s \in S_i} P_s = P,$ 
(10)   for each link  $(s_i, s_j),$ 
(11)      $w_{ij} = w_i \times (E_0(s_i) / E_r(s_i)) \times d_{ij};$  endifor
(12)    $x = x + 1; P' = \emptyset, \tau_x = \tau, G(\tau_x) = \{R\};$ 
(13)   while  $P' \neq P,$ 
(14)     Find a critical target  $k \in P; P' = P' \cup \{k\};$ 
(15)     Find a route  $R(k, sink)$  with the
       minimum weight;  $G(\tau_x) = G(\tau_x) \cup \{k\};$ 
(16)     for each  $s \in \bar{R}(k, sink),$ 
(17)        $G(\tau_x) = G(\tau_x) \cup \{s\}; w_s = w_s + e_t \times R_k;$ 
(18)     endifor
(19)   endwhile
(20)   for each  $s \in G(\tau_x),$ 
(21)      $\tau_x = \min(\tau_x, \frac{E_r(s)}{E(s, G(\tau_x))} \tau_x); w_s = 1;$  endifor
(22)   for each  $s \in G(\tau_x),$ 
(23)      $E_r(s) -= E(s, G(\tau_x));$  endifor
(24)   Remove dead and isolated nodes from  $S_i;$ 
(25) endwhile
(26) return  $G(\tau_1), G(\tau_2), \dots, G(\tau_x)$  and  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_x$ 

```

그림 2. SPT-Greedy 알고리즘

그 다음 가장 적은 수의 센서에 의하여 센싱되는 타겟 k 를 critical target 으로서 선정하고 k 에서 싱크까지의 경로 중 총 가중치가 가장 적은 단일 경로를 찾는다. 이를 찾기 위해 기존의 최단 경로 찾기 알고리즘(e.g. Dijkstra's Algorithm)을 사용하였다. 그리고 경로 상에 존재하는 센서들을 관측 그래프 $G(\tau_x)$ 에 포함시키고 센서의 가중치를 높인다. 이와 같은 과정을 모든 타겟을 커버할 때까지 수행한다(line 13-19).

그 다음 x 번째 관측 그래프 $G(\tau_x)$ 의 τ_x 을 정하고(line 20-21), 현재 구성된 $G(\tau_x)$ 에 근거하여 각 센서들의 에너지를 식 (2)의 에너지 모델을 사용하여 감소시킨다(line 22-23). 마지막으로 에너지가 없는 센서나 에너지는 있으나 다른 센서 노드와 통신할 수 없는 센서들을 S_i 에서 제거한다(line 24).

SPT-Greedy 알고리즘을 통하여 구해진 $G(\tau)$ 에

서 각 타겟은 싱크까지 유일한 경로를 가지기 때문에 임의의 타겟으로부터 발생된 데이터는 하나의 센서에 의해서만 그 데이터가 중계 노드로 전송됨을 보장할 수 있다. 한편, 관측 그래프가 각 타겟마다 싱크까지 하나의 경로를 찾음으로써 구성이 되기 때문에 내용기반 라우팅 (Content-based routing)^[9]이 가능해진다. 즉, 임의의 관측 그래프 $G(\tau_x)$ 에서 임의의 센서가 타겟 p_1 및 타겟 p_2 로부터 데이터를 받으면 그 데이터들을 각 타겟별로 서로 다른 중계 노드로 전송하여 별도의 경로를 형성할 수 있다.

IV. 성능 분석

제안하는 SPT-Greedy 알고리즘의 우수성을 입증하기 위하여 기존에 타겟 커버리지와 연결성을 동시에 고려하여 [7]에서 제안된 CWGC (Communication Weighted Greedy Cover) 알고리즘의 성능과 비교분석하였다. 위의 두 알고리즘의 시뮬레이션은 jdk1.6.0_06/jre1.6.0_07버전의 자바 환경아래에서 수행하였으며 같은 조건하에서 측정 실험을 총 20번을 수행하여 평균값을 결과 데이터로 정하였다. 시뮬레이션을 통해 비교하고자 하는 주요 성능은 네트워크의 수명이며 이에 대응하는 파라미터로는 센서의 수, 타겟의 수, 관측 범위와 통신 범위 그리고 초기 센서들의 위치 상황을 활용하였다..

4.1 실험 환경

본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 제안하는 SPT-Greedy 스케줄링 알고리즘에 대한 성능 분석을 수행한다. 성능 분석을 위한 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. $100m \times 100m$ 센서 네트워크 지역에 센서들과 타겟들이 랜덤하게 배치되고 싱크는 관측 지역의 중앙에(50m, 50m) 위치한다. 이러한 초기 센서 위치에서 모든 타겟이 센서들에 의하여 관측되는 상황만을 고려한다. 또한 모든 센서의 관측범위와 통신범위는 각각 20m와 40m로 가정한다. 다음은 SPT-Greedy 알고리즘을 수행하기 위하여 필요한 파라미터 값들이다. 각 값들의 선정은 [7]에서 사용된 값들을 참고하였다. 모든 센서의 초기 에너지는 20J이며 $e_s = 150nJ/bit$, $e_t = 50uJ/bit$, $e_r = 150nJ/bit$, $R_b = 10kbps$, $b = 100pJ/bit/m^3$, $\alpha = 3$ 이다.

4.2 성능 평가

그림 3은 센서의 수(50~120개)에 따른 센서 네트워크의 수명 변화를 보여준다. 본 실험에서는 랜

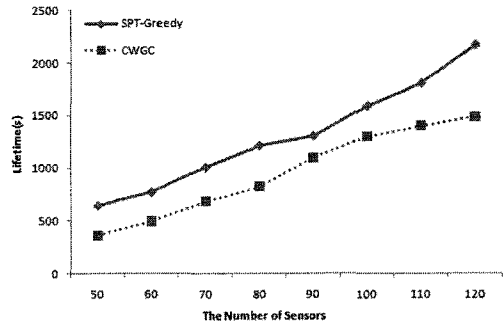


그림 3. 센서의 수에 따른 네트워크의 수명

덤하게 20개의 타겟을 배치하였다. 그림에서 알 수 있듯이 두 알고리즘 모두 센서의 수가 증가함에 따라 네트워크의 수명이 더욱 길어진다. 그 이유는 배치되는 센서의 수가 증가함에 따라 임의의 타겟을 관측하는 센서의 수가 많아지므로 더 많은 관측 그래프를 구성할 수 있기 때문이다. 또한, SPT-Greedy 알고리즘이 CWGC 알고리즘에 비하여 네트워크 수명을 더욱 연장할 수 있음을 알 수 있다. SPT-Greedy 알고리즘은 타겟에 따른 에너지 모델을 고려하고 있으며 타겟의 데이터를 중복하여 전달하는 상황을 방지하지 때문에 CWGC 알고리즘보다 더 좋은 성능을 보인다.

그림 4는 네트워크에 80개의 센서들이 랜덤하게 배치될 때 그와 더불어 배치되는 타겟의 수(10~45개)에 따른 네트워크 수명의 변화를 보여준다. 그림에서 보이듯이 타겟의 수가 많아지면 그만큼 센서 에너지 소모도 많아지므로 두 알고리즘 모두 타겟의 수가 늘어남에 따라 네트워크의 수명이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 제안하는 SPT-Greedy 알고리즘이 CWGC 알고리즘보다 더 나은

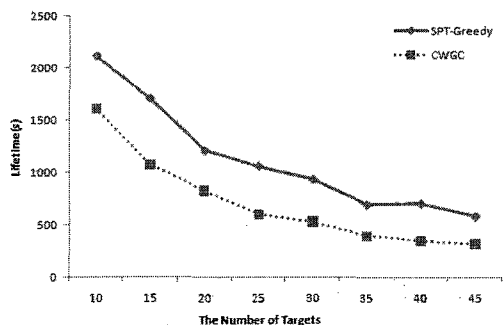


그림 4. 타겟의 수에 따른 네트워크의 수명

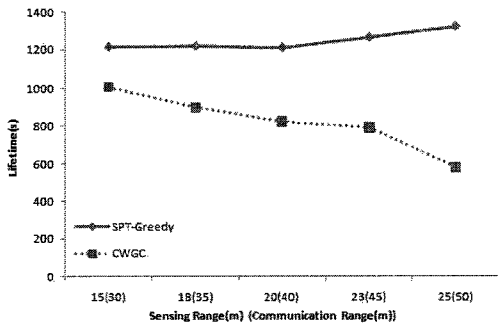


그림 5. 센서의 통신 범위와 관측 범위에 따른 네트워크의 수명 비교

성능을 보임을 알 수 있다.

센서의 관측 범위와 통신 범위에 따른 네트워크의 수명을 비교한 결과를 보여주는 그림 5는 SPT-Greedy 알고리즘의 우수성을 더욱 확실하게 보여준다. 본 실험에서는 네트워크에 80개의 센서와 20개의 타겟을 랜덤으로 배치하였다. 일반적으로 센서의 관측 범위와 통신 범위가 넓어지면 센서가 관측할 수 있는 타겟의 수가 많아지고 임의의 센서의 통신 가능한 이웃 노드의 개수가 많아진다. 이 실험에서 SPT-Greedy 알고리즘은 많아진 관측 링크와 통신 링크를 활용하여 각 타겟과 싱크 노드 사이에 에너지 측면에서 더욱 효율적인 경로를 찾기 때문에 전반적으로 네트워크의 수명이 변화가 없거나 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 CWGC 알고리즘에서는 타겟에서 발생하는 데이터들이 중복되어 관측될수록 그러한 모든 중복 데이터가 임의의 중계 노드로 전송되는 것을 무조건 허용한다. 그러므로, 싱크 노드에 가까운 센서일수록 에너지 소모가 더욱 많아지게 된다. 그래서, CWGC 알고리즘을 활용하면 센서의 관측 범위와 통신 범위가 넓어질수록 점진적으로 네트워크의 수명이 줄어들게 된다. 결과적으로, 본 논문에서 제안하는 SPT-Greedy 알고리즘은 CWGC 알고리즘과 달리 센싱 범위와 통신 범위의 크기가 증가됨에 따라 안정적인 성능을 보이거나 오히려 그 성능이 향상되는 우수성을 지닌다.

V. 결 론

본 논문은 네트워크에 배치된 각 센서들의 상태를 적절하게 활성/수면 상태로 전환하여 센서의 에너지를 효율적으로 사용하도록 하는 스케줄링 알고리즘을 제안하였다.

스케줄링 알고리즘을 연구함에 있어서 모든 타겟을 관측해야 하는 커버리지와 관측한 데이터를 싱크 노드까지 전송해야 하는 연결성은 중요한 고려사항이다. 하지만 기존의 많은 연구들은 그 두 가지를 동시에 고려하지 못하고 있으며 커버리지와 연결성을 동시에 고려하는 [7]연구에서도 센서 에너지 소비 모델 및 알고리즘의 효율성에 미흡함이 존재하였다.

본 논문에서는 [7]에서 제시된 알고리즘을 확장하여 다중 타겟 및 중복성 제거를 고려함으로써 스케줄링 알고리즘의 성능을 향상시키는 방안을 제시하고 있다. 이와 관련된 CMTC 문제를 정의하였으며 이를 해결하는 SPT-Greedy 알고리즘을 제안하였다. 마지막으로 시뮬레이션을 통하여 다양한 파라미터를 사용하여 SPT-Greedy 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

앞으로는 본 연구를 더욱 확장하여 측정 타겟들만을 관측하는 것이 아닌 지역 전체 또는 경계 지역을 관측해야 하는 지역(Area) 커버리지나 경계(barrier) 커버리지를 보장하면서도 연결성까지 동시에 보장하는 스케줄링 기법을 연구할 예정이다. 또한 이동 능력을 지닌 센서로 구성된 네트워크에서의 스케줄링 기법도 연구할 예정이다.

참 고 문 헌

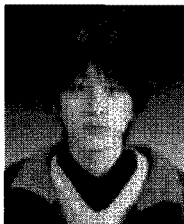
- [1] M. Cardei and J. Wu, "Coverage problems in wireless ad hoc sensor networks," in Handbook of Sensor Networks, M. Ilyas and I. Mahgoub, Eds. Boca Raton, FL: CRC Press, ch. 19, 2004.
- [2] M. Cardei and D.-Z. Du, "Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization," Wireless Networks, Vol.11, No. 3, pp.333-340, 2005.
- [3] M. Cardei, M. T. Thai, Y. Li, and W. Wu, "Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks," in Proc. IEEE INFOCOM, pp.1976-1984, 2005.
- [4] C. Wang, M. T. Thai, Y. Li, F. Wang and W. Wu, "Minimum Coverage Breach and Maximum Network Lifetime in Wireless Sensor Networks," In Proc. of IEEE Globecom '07, pp.1118-1123, 2007.
- [5] Q. Zhao and M. Gurusamy, "Maximizing network lifetime for connected target coverage

problem in wsn,” Tech. Rep., Electrical and Computer Engineering Dept., National University of Singapore, 2005.

- [6] M. Lu, J. Wu, M. Cardei, and M. Li, “Energy-efficient connected coverage of discrete targets in wireless sensor networks,” in Int. Conf. of Computer Networks and Mobile Computing (ICCNMC), 2005.
- [7] Q. Zhao, and M. Gurusamy, “Lifetime Maximization for Connected Target Coverage in Wireless Sensor Networks,” IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.16, No.6, 2008.
- [8] D. Li, K. Wong, Y. Hu, and A. Sayeed. “Detection, classification, tracking of targets,” IEEE Signal Processing Mag., Vol.19, No.2, pp. 17-29, 2002.
- [9] S.-Y. Pyun and D.-H. Cho, “Power-Saving Scheduling for Multiple-Target Coverage in Wireless Sensor Networks,” IEEE Communication Letter, pp.130-132, Vol.13, No.2, 2009.
- [10] P. Bizarro, S. Babu, D. J. DeWitt, J. Widom, “Content-Based Routing: Different Plans for Different Data,” In Proceedings of the 31st International Conference on VLDB, pp.757-768, 2005.

김 용 환 (Yong-hwan Kim)

준회원



2005년 8월 한국기술교육대학교 인터넷미디어공학부 학사
 2008년 9월~현재 한국기술교육대학교 정보미디어공학과 석사과정
 <관심분야> WSN, Network Topology Control, 센서 네트워크 스케줄링

한 연 희 (Youn-Hee Han)

중신회원



1996년 2월 고려대학교 수학과 (이학사)
 1998년 5월 고려대학교 컴퓨터학과(이학석사)
 2002년 2월 고려대학교 컴퓨터학과(이학박사)
 2002년 2월~2006년 2월 삼성

종합기술원 전문연구원
 2006년 3월~현재 한국기술교육대학교 조교수
 <관심분야> 지능형 센서 네트워크, IPv6 Mobility, Cross-Layer Optimization

박 찬 열 (Chan-Yeol Park)

정회원



1993년 2월 고려대학교 수학과 (이학사)
 1995년 8월 고려대학교 컴퓨터학과 (이학석사)
 2000년 2월 고려대학교 컴퓨터학과 (이학박사)
 2002년 4월~현재 한국과학기술정보연구원

선임연구원
 <관심분야> 지능형 센서 네트워크, 분산시스템