

## 군 USN 환경에서 효율적인 데이터 저장 및 질의 처리 방법 연구

### Efficient Data Storage & Query Processing Methods in Military Ubiquitous Sensor Networks

권 영 모\*                  최 현 식\*                  정 연 돈\*  
Young Mo Kwon          Hyunsik Choi          Yon Dohn Chung

#### Abstract

Recently, the role of Ubiquitous Sensor Network(USN) has been considered to be essential for supporting the near future Network Centric Warfare(NCW) and Tactical Information Communication Network(TICN). In this paper, we explore a set of data storage methods(external storage, local storage and data storage) and query processing methods in WSN. In particular, we focus on analyzing a novel data structure for supporting the local storage method, named the partial ordered tree(POT). The main idea behind POT is that sensor readings are usually correlated with the physical spatial domain. With the help of POT, only a small portion of sensor nodes participate in query processing tasks, and thus network lifetime is greatly increased. Through a series of simulation experiments, we demonstrate that the POT based local storage method clearly outperforms the existing data storage methods in terms of the energy-efficiency, which directly affects the network lifetime, for processing exact match queries, range queries and top-k queries.

Keywords : Wireless Sensor Network(무선 센서 네트워크), Sensor Data Storage & Query Processing(센서 데이터 저장 기법 및 질의 처리), Partial Ordered Tree(부분 순서 트리)

#### 1. 서론

최근 우리 군은 정보 우위의 작전개념을 바탕으로 군 전투 시스템의 자동화, 단순화, 첨단 정보화를 ‘국

방개혁 2020’의 중심축으로 삼고, 정보화 마스터플랜인 “육군 정보화 비전(U-army Vision 2025)”을 발표하였다. 여기에는 언제, 어디서나, 임의의 무선 센서를 활용하여 원하는 전장정보를 시·공간적 제한 없이 누구라도 서비스 받을 수 있는 유비쿼터스 센서 네트워크(Ubiquitous Sensor Networks)를 무선 인식 전자태그(RFID : Radio-Frequency Identification)와 함께 U-국방의 핵심 인프라로 규정하고 구축 중에 있다. 이와 같이 센서는 자동화된 무인 원격 정보 수집이 가능하

† 2010년 6월 7일 접수~2010년 8월 6일 게재승인

\* 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터학과(Department of Computer Science and Engineering, Korea University)  
책임저자 : 정연돈(ydchung@korea.ac.kr)

기 때문에 모든 군사 활동 및 군 제반시스템 설계의 시발점이며 없어서는 안 될 중요한 부분을 차지하고 있다.

최근에는 전자통신 분야의 발달로 저 전력과 저가의 다기능 스마트 센서로 원격 상태 정보를 감지할 수 있는 무선 센서 네트워크의 실현이 가능해 졌다. 무선 센서 네트워크(WSN : Wireless Sensor Network)란 Fig. 1과 같이 무선 네트워크에 연결된 수많은 센서 노드들의 그룹으로서, 센서로 센싱(Sensing)이 가능하고 수집된 정보를 가공하는 프로세서가 달려 있으며, 이를 전송하는 소형 무선 송수신 장치인 센서 노드(Sensor Node)와 이를 수집하여 외부 네트워크로 내보내는 싱크 노드(Sink Node)로 구성된 네트워크이다. 센서 노드들은 배치된 센싱 지역으로부터 다양한 데이터를 수집하고, 멀티 홉 무선 네트워크를 통해 수집된 정보를 기지국으로 전달한다. 이러한 네트워크 내에는 방대한 분산 데이터베이스가 생성된다. 이러한 특징 때문에 다양한 동적인 대용량 데이터(움직임, 온도, 습도, 농도, 화재, 수위 등)를 감지 할 수 있는 센서 네트워크는 주로 광범위한 지역, 접근이 어려운 지형, 건물 내벽, 위험 지역에 설치 운용된다.

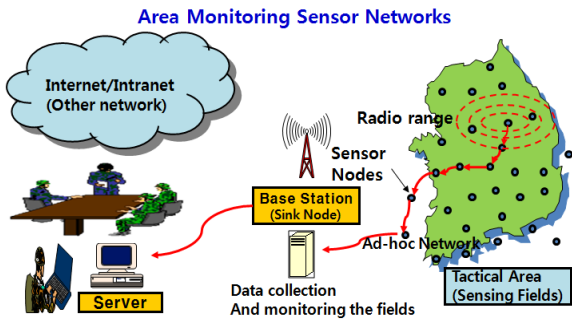


Fig. 1. Organizations of wireless sensor networks

군 환경에서 무선 센서 네트워크의 역할과 중요성은 미래 전장 환경에 효율적으로 대처하기 위한 독자적인 네트워크 중심전(NCW : Network Centric Warfare)과 다양한 전장정보 데이터의 막힘없는 전송 및 처리가 이루어지도록 하는 전술 종합정보통신체계(TICN : Tactical Information Communication Network), 군사정보 운영시스템(MIMS : Military Information Management System) 구축에 힘입어 더욱 커지고 있다<sup>[1]</sup>.

현재 우리 군은 무선 센서 네트워크를 유비쿼터스 무선 센서 네트워크 구현의 일환으로 Fig. 2와 같이

다양하고 폭넓게 응용 개발 범위를 확장하고 있다. 특히, 넓고 다양한 작전공간에서 시시각각으로 변하는 피·아 전술적 상황정보를 시·공간적 제한 없이 실시간으로 수집하고 이를 지휘통제에 활용하며, 작전결과에 대한 정보를 다시 감시, 추적할 수 있기 때문에 군 전력증강에 획기적으로 기여할 것이다. 주요 활용 예로, 작전 및 접적 지역의 적 침투 및 이동 탐지를 하는 전방 감시체계와 전장상황 판단, 훈련 및 작전지역의 실시간 모니터링을 통한 상황 인식체계, 경계근무자 위치확인 및 경보체계, 긴급 재난 관리, 화재방시스템, 보안·경비시스템, 총기 및 위험물 관리, 통제구역 및 병력 위치 관리, 시설물 상태 관리, 차량·보급품 및 유류 관리, 차량 이동 추적, 병영생활 관리, 원격 진료시스템 등 다양한 분야로 확대 되고 있다. 무인 첨단 정보화전에서 전장정보를 ‘먼저 감지하고 수집하기’는 시간전·속도전의 전장 환경에서 먼저 결심하고 적보다 먼저 타격하여 전쟁의 승리를 가져오는 필연적 요소이므로 무선 센서 네트워크의 운용은 필수적이다.



Fig. 2. Applications of WSN

특히 험난한 산악지역 및 제한된 작전지역내 설치된 여러 무선 센서 네트워크는 신속·정확하게 수집한 다양하고 방대한 전장정보를 말단 전투원에서 최상급 지휘관까지 적시 적소에 실시간으로 전달할 수 있다. 이것은 결과적으로 정확한 상황판단 및 지휘통제가 이루어지게 하여 아군의 피해 감소는 물론 전투능력을 극대화 시킬 수 있는 장점이 있다.

하지만 무선 센서 네트워크는 다양한 쓰임새에도 불구하고 무선 센서 노드의 에너지 소모가 불가피하다는 단점 때문에 다음과 같이 설계 및 개발 시 고려

해야 할 고유의 특성을 가지고 있다. 첫째, 작은 크기의 무선 센서 노드는 계산 능력, 저장 공간, 전력 등의 제한된 자원(Resource)을 가지고 넓은 지역에 대량으로 배포되기 때문에 고갈된 전력을 재충전하거나 배터리를 교환하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 센서 동작 중 가장 많은 전력을 필요로 하는 데이터의 전송을 줄이는 것이 매우 중요하다. 둘째, 무작위로 배포된 각 센서 노드는 전체 네트워크 상황을 알 수 없기 때문에 지역적인 정보만으로 네트워크를 구성해야 한다. 셋째, 한번 배포된 센서는 대부분 재사용이 힘들다. 따라서 센서 네트워크의 동작 시간을 최대한 연장할 수 있는 데이터 처리 방법이 필요하다. 센서 네트워크의 에너지 효율성은 가장 에너지 소모가 많은 몇몇 센서의 동작 시간에 의해 결정되기 때문에, 네트워크 내의 모든 센서가 균일하게 전력을 소모하도록 하는 것이 에너지 효율성을 향상시키는 방법이 될 수 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 이유로 전체 네트워크 내에서 생성된 각 노드의 모든 데이터에 접근하여 질의를 처리하는 것은 비효율적이며 상당한 어려움이 있다. 따라서 한정된 배터리 용량을 이용하여 최대의 네트워크망 동작 시간과 신뢰성이 보장된 무선 센서 노드 구성뿐만 아니라 에너지 소모량과 네트워크 성능 문제를 함께 고려해야 한다<sup>[3]</sup>.

군사 시설 및 작전, 훈련 등 군 환경에 효과적으로 지원하는 무선 센서 네트워크를 구성하기 위해서는 에너지 효율적인 센서 데이터의 저장 및 질의 처리 기법들이 요구된다. 지금까지 제안된 대표적인 센서 데이터 저장 기법으로는 외부 저장 기법, 직접 저장 기법, 그리고 데이터 중심 저장 기법이 있다. 직접 저장 기법은 전체 네트워크에 질의를 배포해야만 정확한 질의 처리가 가능하다는 면에서 비효율적이며, 외부 저장 기법과 데이터 중심 저장 기법은 데이터가 발생한 위치와 저장하는 위치가 달라 저장을 위한 추가적인 비용이 더 소요되는 단점이 있다. 또한 센서 네트워크상에서 질의를 처리 하는 기법은 크게 두 가지로, 외부 기지국에서 처리하는 기법과 센서 네트워크 내에서 처리하는 인-네트워크(In-Network) 처리 기법으로 구분 할 수 있다.

본 논문에서는 직접 저장 기법을 기반으로 에너지 소모를 최소화 하기 위한 논리적 질의 처리 구조인 부분 순서 트리를 소개하고, 여러 질의 처리를 수행하여 성능을 비교 평가한다. 일반적으로 대부분의 질의 처리는 정렬된 데이터 집합에서 효율적인 성능을 보

이므로, 본 논문에서는 부분 순서 트리 기법으로 센서 노드 간의 부분적으로 정렬된 색인 구조를 정의하고, 기지국에서 이를 효과적으로 활용하여 에너지 손실을 최소화 하는 방법을 기술한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존에 제안된 센서 데이터의 저장 기법과 질의 처리에 대한 배경 지식 및 관련 연구를 살펴보고, 3장에서는 부분 순서 트리(POT)의 생성과 갱신 및 질의 처리 방법에 대해 기술한다. 4장에서는 실험을 통해 기존에 제안된 기법들과 성능 평가를 수행하고, 부분 순서 트리를 활용한 군사 분야의 적용 방안을 고안하고 소개한다. 마지막 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대해 기술한다.

## 2. 배경 지식 및 관련 연구

이 장에서는 서론에서 간략하게 설명한 위의 대표적인 센서 데이터의 저장 기법과 질의 처리 기법에 대한 설명과 문제점을 분석한 내용에 대하여 기술한다.

### 가. 저장 기법과 질의 처리

군 무선 센서 네트워크는 응용에 따라 사용되는 환경이 전혀 다르기 때문에 각 환경에 적합한 데이터 저장 기법과 질의 처리 방법을 적절하게 선택해야 한다. 현재까지 무선 센서 네트워크에서 데이터를 저장하는 기법에 대한 많은 연구가 진행되었으며, 저장 위치에 따라 크게 외부저장(ES : External Storage) 기법, 직접 저장(LS : Local Storage) 기법, 데이터 중심 저장(DCS : Data Centric Storage) 기법으로 구분할 수 있다. 또한 질의 처리 방법 중 외부 기지국에서 처리하는 기법은 외부 저장 기법을 기반으로 한다. 따라서 센서 네트워크상에서 수집되는 모든 데이터는 특정 외부 기지국으로 전송하여 로컬 데이터베이스에 저장되고, 이를 대상으로 사용자가 질의를 처리한다. 반면 인-네트워크(In-Network)에서 처리하는 기법은 앞서 기술한 특정 외부 기지국에서 질의를 처리함에 따라 발생하는 과도한 데이터 전송 문제와 과부하를 해결하고자 고안되었으며, 크게 직접 저장 기법 기반과 데이터 중심 저장 기법 기반으로 나뉜다. 인-네트워크 질의 처리 기법은 데이터를 기지국으로 전송하는 과정에서 데이터를 취합(Aggregation)하여 전송량을 줄임으로써 전송 에너지를 절약한다.

나. 외부 저장 기법과 질의 처리

외부 저장(ES) 기법은 Fig. 3과 같이 가장 기본적인 저장 기법으로 센서에서 새로운 데이터를 감지하거나 주기적으로 생성된 데이터를 수집하여 지정된 기지국(Base Station)의 로컬 데이터베이스에 저장하는 방식이다. 이 방식은 데이터가 센서에 저장되지 않기 때문에 센서 자체의 저장 공간은 필요하지 않는 반면, 모든 센싱 데이터를 기지국으로 전송해야 하므로 높은 라우팅 비용이 발생한다.

외부 저장 기법의 장점은 모든 데이터가 동일한 기지국의 데이터베이스에 존재하고 직접 이루어지기 때문에 모든 센서에 질의를 배포하거나 데이터 저장 위치를 색인하는 과정이 필요 없다. 따라서 질의 처리가 간단하고 네트워크 비용이 소요되지 않는다. 그러나 센서 네트워크 토폴로지에서 멀티 홉으로 연결된 상위 센서 노드일수록, 외부 저장 장치로 가깝게 위치한 상위 센서 노드일수록 멀티 홉 라우팅 특성 때문에 많은 데이터를 전송해야 하는 문제가 발생한다. 또한 많은 데이터가 동시 다발적으로 발생하여 중앙 시스템으로 집중되기 때문에 데이터 전송 주기가 짧을 경우 네트워크 병목현상이 발생하는 치명적인 문제점을 가진다. 또한 네트워크 내에서 어떠한 질의 처리도 하지 않아 최종 질의 결과에 영향을 주지 않는 불필요한 데이터가 기지국으로 전송되기 때문에 과부하가 발생하며, 외부 저장 방식이 가지는 높은 데이터 저장 비용 발생 문제를 그대로 내포하고 있다<sup>[2]</sup>.

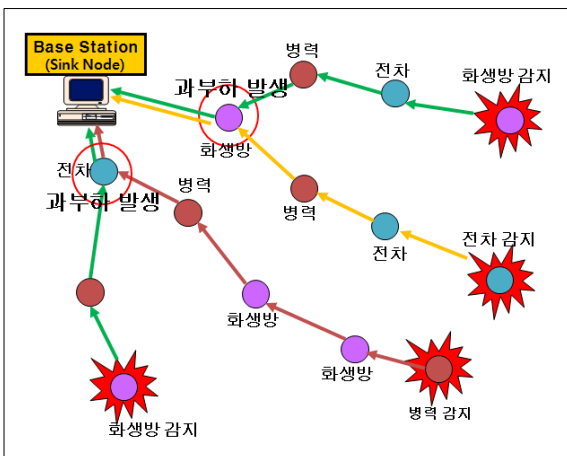


Fig. 3. Query processing of ES

다. 직접 저장 기법과 질의 처리

직접 저장(LS) 기법은 Fig. 4와 같이 센싱한 데이터를 각 센서노드가 센서 내에 직접 저장하는 방식이다. 이 방식은 사용자가 직접 원하는 질의 데이터만 기지국으로 전송되므로 외부 저장 기법에 비해 에너지 소모 측면에서 효율적이고, 데이터 저장을 위한 전송 비용이 없기 때문에 많은 데이터가 발생하는 환경에 적합하다. 그러나 질의 처리에 필요한 데이터 저장 위치를 특정화 할 수 없으므로 질의 처리를 위해서 모든 센서에 질의를 보내야 한다. 따라서 질의 처리 비용이 네트워크의 크기에 비례하여 증가하고, 질의 처리 시간이 많이 소요되는 문제점이 있다.

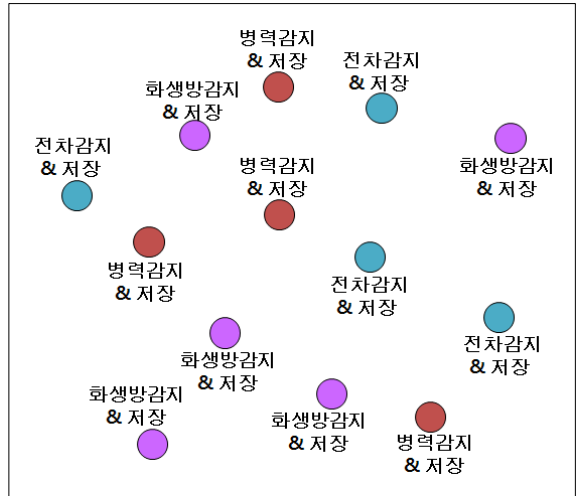


Fig. 4. Query processing of LS

기존에 제안된 대표적인 직접 저장 기법 기반의 질의 처리 기법은 HEED<sup>[5]</sup>와 TAG<sup>[6]</sup>라우팅 기법이 있다. HEED(Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering)는 기존의 트리 기반의 라우팅 구조에 대비하여 데이터 전송 비용을 절감하기 위해 제안된 라우팅 기법이다. HEED는 클러스터 헤더를 선정하고 헤더를 기준으로 주변의 센서 노드들을 클러스터링 함으로써 각각의 클러스터 내에서 부분적인 결과를 도출 할 수 있는 구조를 가지고 있다. TAG(Tiny Aggregation Service for Ad Hoc Sensor Networks)는 기지국을 기준으로 네트워크를 구성하는 모든 센서를 계층적인 트리 형태로 구조화시킨 라우팅 기법이다. 센서에서 수집된 모든 데이터는 라우팅 트리의 최상위 노드로 전달되는 과정에서 다른 경로를 거쳐 온 데이터와 서로 병합한다. HEED

와 TAG는 기본적으로 수집한 데이터를 센서 노드에 저장하는 직접 저장 기법을 기반으로 한다. 따라서 질의 처리를 위해서는 전체 네트워크에 질의를 배포해야 함으로 높은 질의 배포 비용이 발생하는 단점이 있다.

라. 데이터 중심 저장 기법과 질의 처리

데이터 중심 저장(DCS) 기법은 앞서 기술한 외부 저장 기법과 직접 저장 기법의 단점을 보완하고자 제안되었다. Fig. 5와 같이 데이터 영역을 분할하여 각 센서 노드들에게 할당하고, 수집된 데이터를 해당 데이터 영역을 담당하는 특정 센서 노드에 전송 및 저장하여 전체 데이터를 색인한다<sup>7)</sup>. 이 기법은 질의 처리에 필요한 데이터가 저장된 위치를 알 수 있어 미국은 질의를 네트워크 전체에 배포할 필요 없이 특정 센서 노드만 제어하여 효율적이고 정확한 위치로 라우팅 할 수 있다. 또한 데이터가 많이 발생할 경우 외부 저장 공간에 가까운 센서들에게 부하가 집중되거나 질의를 수행할 때 필요치 않은 센서가 질의 처리에 관여되는 것을 방지할 수 있다. 따라서 데이터 중심 저장 기법은 센서 네트워크의 크기가 크고 측정 데이터의 저장량이 많이 발생하는 환경에 적합하다. 그러나 이 기법 또한 사용자의 질의와는 상관없이, 데이터를 정해진 센서 노드에 저장하기 위해 여러 센서 노드를 거쳐 전송하기 때문에 데이터 저장 측면에서는 직접 저장 방식에 비해 더 많은 에너지가 소모된다. 기존에 제안된 대표적인 데이터 중심 저장 기법으로는 GHT<sup>8)</sup> 기법과 DIM<sup>9)</sup>, KDDCS<sup>10)</sup>가 있다. GHT (Geographic Hash Table for DCS) 기법은 공간 해싱 기법을 이용하여 데이터가 저장될 지리적인 위치를 선정하고, 데이터의 저장, 탐색, 질의 처리의 작업을 수행한다. DIM(Distributed Index for Multi-dimensional data)은 K-D 트리를 기반으로 센서와 데이터를 균등 분할하는 방식으로 색인한다. 그리고 DIM에서 사용되는 색인은 데이터의 지역성(Locality)을 보존하는 위치 기반의 해싱 기법을 사용하기 때문에 작은 수의 라우팅으로 영역 질의를 처리할 수 있다. 하지만 특정 데이터 영역에 대한 데이터가 집중적으로 발생하는 저장소 핫스팟(Storage Hot-spot) 문제를 고려하지 않았기 때문에, 특정 센서에 대한 저장 공간 부하 문제로 빠른 에너지 소모를 초래한다. KDDCS(K-D tree based Data-Centric Storage)는 DIM을 개선하기 위해 저장소 핫스팟이 발생하는 센서의 데이터 영역을 동적으로 조정할 수 있는 K-D 트리 기반의 색인 기법을 제안하

였다. 하지만 KDDCS를 포함한 모든 기존 DCS 기반의 기법들은 사용 빈도가 높은 데이터 영역에 대한 질의 핫스팟(Query Hot-spot) 문제를 고려하지 않았기 때문에, 결과적으로 전체 센서 네트워크의 에너지 효율을 크게 감소시키는 문제점을 가진다<sup>13)</sup>.

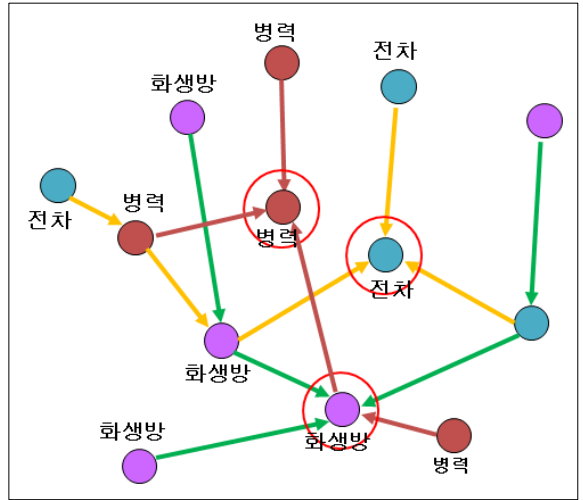


Fig. 5. Query processing of DCS

기존의 연구 결과, 외부 저장 기법에 의한 질의 처리는 세 가지 기법 중 가장 많은 에너지를 소모하며 비효율적인 기초 성능을 보이며, 직접 저장과 데이터 중심 저장 기법의 질의 처리는 데이터의 변화 분포 및 특성, 그리고 사용자 질의 종류에 따라 서로 상충 관계(Trade-offs)의 성능을 보인다<sup>5,7,11)</sup>. 본 논문에서는 부분 순서 트리(Partial Ordered Tree)를 이용하여 직접 저장 기법에서 질의 처리 성능을 더욱 향상시킬 수 있음을 보여준다.

3. 부분 순서 트리

본 장에서는 부분 순서 트리(POT Partial Ordered Tree)를 생성하고 갱신하는 방법을 기술한다. 부분 순서 트리의 정의는 다음과 같다.

[정의] 부분 순서 트리 (POT)

부모 노드는 자식 노드보다 큰 데이터 값을 갖는 트리로서 부분 순서 트리의 루트(Root)는 자신의 트리 내에서 지역적으로 가장 큰 데이터 값을 가진 센서 노드를 루

트로 가지며, 데이터의 크기가 연속되는 센서 노드들로 이루어진 트리 구조의 클러스터(Cluster)이다<sup>[4]</sup>.

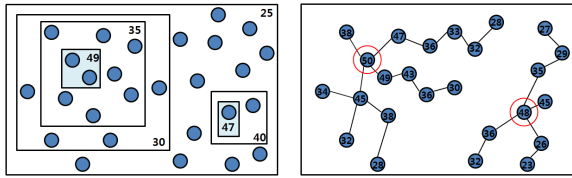


Fig. 6. Constructions of POT

Fig. 6 (b)는 두 개의 부분 순서 트리를 형성하는 구조를 나타낸 것이며, 분산 되어 있는 모든 센서는 어떤 특정한 규칙과 순서로 서로 연결되어 있음을 알 수 있다. 다음 절부터 부분 순서 트리의 생성 및 갱신 절차와 질의 처리를 기술한다.

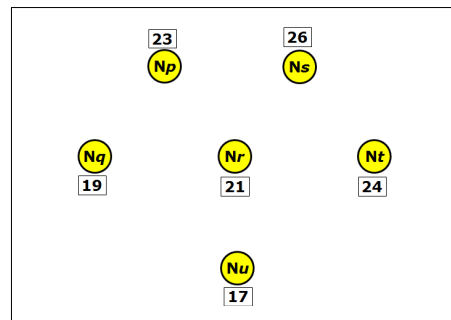
가. 부분 순서 트리의 생성

부분 순서 트리는 각 센서 노드가 자신의 통신 범위 안에 있는 이웃 노드 중에서 가장 높은 센서 데이터 값을 가진 노드를 자신의 부모 노드(Parents Node)로 선택함으로써 트리를 구성한다. 다음의 알고리즘 1은 부분 순서 트리의 세부적인 생성 절차를 보이고 있다.

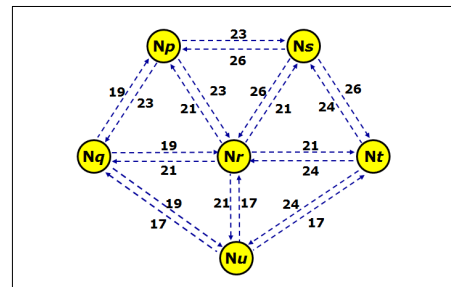
```

알고리즘 1 부분 순서 트리 생성
procedure TreeInitialize(a node ni, time t)
    rt ← sensor reading at time t
    parent ← i
    rmax ← rt
    make a hello packet p
    p.id ← i
    p.val ← rt
    send p
    receive others' hello packets
    for each received hello packets p' do
        if (pk.val > rmax) then
            parent ← pk.id
            rmax ← pk.val
        end if
    end for
    if parent equals i then
        root ← i
    end if
end procedure
    
```

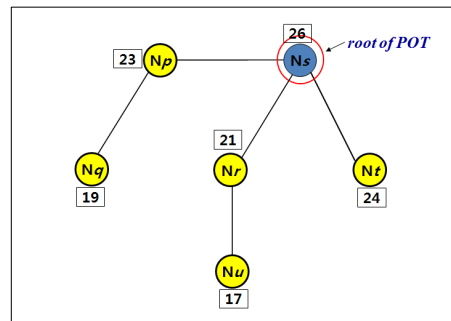
가. 각 센서 노드는 이웃 노드들에게 자신의 데이터 값과 식별자를 넣은 광고 메시지를 내보낸다.  
 나. 임의의 센서 노드  $N_i$ 가 자신의 데이터 값보다 더 큰 데이터 값을 포함한 광고 메시지를 수신하지 못한 경우  $N_i$ 는 스스로 트리의 루트(Root)가 된다.  
 다. 나의 조건을 충족시키지 못한 경우에는(즉, 이웃 노드 중에서 자신의 데이터 값보다 큰 데이터 값을 가진 노드가 존재 하는 경우), 수신한 광고 메시지 중에서 가장 큰 데이터 값을 보낸 센서 노드를 자신의 부모 노드로 선정한다.



(a) Initial deployed sensor



(b) Exchange of advertises message



(c) Construction of POT

Fig. 7. An example of POT construction

Fig. 7 (a)는 여섯 개의 센서 노드와 각 노드의 데이터 크기가 표기되어 있다. Fig. 7 (b)와 같이, 각 센서 노드는 자신의 데이터 값을 주변으로 브로드캐스트(Broadcast)한다. 각 센서 노드는 가장 큰 데이터 값을 가진 노드를 자신의 부모로 선택하며, Fig. 7 (c)에서는 노드  $N_5$ 가 트리의 루트가 된다. 루트가 된 센서 노드는 자신이 루트가 되었음을 기지국으로 보고한다.

부분 순서 트리의 루트는 자신의 트리 내에서 가장 큰 값을 가지는 센서 노드이다. 이 트리는 엄격한 정렬 구조를 이루지는 않지만, 부모 노드는 자식 노드보다 큰 데이터 값을 갖고 있으며 루트에 가까워질수록 데이터 값이 커짐을 보장한다. 이를 이용하여 기지국은 다양한 질의(정합 질의, 영역 질의, k-최상위 질의 등)들을 처리 할 때, 필요한 데이터가 존재하는 트리를 선택하여 질의를 보낼 수 있다.

전체 센서 네트워크에는 데이터 값의 분포에 따라 여러 개의 트리가 생길 수 있다. 각 클러스터의 루트는 기지국으로 자신의 데이터 값과 식별자를 전송한다. 기지국에서는 전송된 클러스터 루트들의 정보를 바탕으로 전체 네트워크의 트리 리스트를 생성한다. 이를 통해 다양한 질의 처리를 효율적으로 수행할 수 있다.

나. 부분 순서 트리의 갱신

부분 순서 트리의 갱신은 새로운 주기가 시작되거나 사용자의 즉시적인 요청이 있거나 노드의 추가 및 삭제(소멸)가 이루어 질 때 일어나며, 아래 알고리즘 2와 같이 이웃한 노드와 자신의 데이터 값과 식별자를 넣은 광고 메시지의 교환을 통해 이루어진다.

가. 이전 주기의 데이터 값보다 작은 데이터 값을 수집한 임의의 센서 노드  $N_i$ 는 자신의 데이터 값과 식별자를 넣은 광고 메시지를 내보낸다.

나. 루트를 제외한 센서 노드 중에서 부모 노드보다 더 큰 데이터 값을 가진 센서  $N_j$ 는 자신의 데이터 값과 식별자를 넣은 광고 메시지를 내보낸다.

다. 가와 나의 광고메시지 교환을 통해 이웃 노드들과 데이터 값을 비교한 후, 현재 자신의 이웃 노드 중에서 가장 큰 데이터 값을 보낸 센서 노드를 자신의 부모 노드로 선정한다.

라. 현재 주변 센서 노드들의 데이터 값보다 자신의 데이터 값이 가장 큰 센서 노드는 스스로 루트 노드가 된다.

```

    알고리즘 2 부분 순서 트리의 갱신

    procedure TreeUpdate(a node ni, time t)
        rt ← sensor reading at time t
        if rt-1 > rt or (ni is not root and rt > rmax) then
            parent ← i
            rmax ← rt
            make a hello packet p
            p.id ← i
            p.val ← rt
            send p
        end if
        receive others' hello packets
        for each received hello packets p' do
            if p'.val > rmax then
                parent ← p'.id
                rmax ← p'.val
            end if
        end for
    end procedure
    
```

다. 부분 순서 트리를 이용한 군사 분야 질의 처리

이 절에서는 앞서 기술한 부분 순서 트리의 색인 구조를 이용한 대표적인 질의 방법인 정합 질의, 영역 질의, k-최상의 질의가 군사 부분에서 어떻게 적용되고 처리되는지 기술한다.

1) 정합 질의(Exact Match Query)

“방사능 농도가 30몰인 센서 노드들을 찾아라.”와 같이 정확한 조건을 주고 결과 값을 찾는 질의를 정합 질의라 한다. 기지국은 트리 리스트에서 30몰이 넘는 부분 순서 트리의 루트만을 선택하여 질의를 전송한다. 질의를 수신한 트리의 루트는 30몰보다 낮은 데이터를 가진 센서 노드를 만날 때까지 해당 질의를 자식 노드에게로 전달한다. 질의가 전송되는 중에 질의 결과가 될 수 있는 데이터를 가진 센서 노드는 트리의 루트 노드에 해당 데이터를 전송하여 트리 내의 질의 결과를 수집한다. 30몰보다 낮은 데이터를 가진 센서 노드 아래로는 질의 결과 값이 없으므로 질의를 종료하고 질의가 종료되었음을 루트 노드에게 알린다. 루트 노드가 질의가 종료되었음을 알리는 메시지를 수신하면 질의 결과를 기지국으로 전송한다. 기지국은 루트 노드들로부터 전송된 질의 결과를 취합하여 최종 질의 결과를 지휘관 및 참모에게 전달한다.

2) 영역 질의(Range Query)

“충격파가 100 펄스에서 150 펄스사이의 값을 갖는 센서 노드들을 찾아라.”와 같이 특정한 범위가 주어지는 질의를 영역 질의라고 한다. 정합 질의와 마찬가지로 기지국은 트리 리스트에서 영역 질의의 작은 범위에 해당하는 조건 값보다 큰 데이터를 갖는 부분 순서 트리의 루트만을 선택하여 질의를 전송한다. 질의를 수신한 트리의 루트는 영역 질의의 작은 범위를 이용하여 정합 질의와 마찬가지로 100 펄스보다 작은 데이터를 가진 센서 노드를 만날 때까지 해당 질의를 자식 노드에게로 전달한다. 질의가 전송되는 중에 질의의 결과 값이 될 수 있는 데이터를 가진 센서 노드는 트리의 루트 노드에게 해당 데이터 값을 전송한다. 100 펄스보다 작은 데이터 값을 가진 센서 노드를 만나면 질의를 종료하고 루트 노드에게 알린다. 마지막으로 루트 노드는 질의 종료 메시지를 수신하면 기지국으로 수집된 질의 결과 값을 전송하고, 기지국은 전송된 질의 결과를 취합하여 최종 질의 결과를 생성하여 지휘관 및 참모에게 전달한다.

3) k-최상위 질의(Top-k Query)

“탄약 소모량이 가장 높은 3개의 센서 노드를 찾아라(3-최상위 질의 또는 Top-3 Query).”와 같이 최상위 k개의 데이터를 찾는 질의를 k-최상위 질의라 한다. 이 질의는 순위 기반 질의(Rank-aware Query)라고도 하며, 전체 데이터 셋(Set)에서 데이터 값의 순위 비교가 필요하다. 기지국은 트리 리스트에서 가장 높은 데이터 값을 가진 부분 순서 트리의 루트에게 질의를 전송하여 k개만큼 상위 데이터를 전송 받는다. 높은 데이터 값을 갖는 클러스터를 향해 k개의 데이터 값을 수집할 때까지 순차적으로 질의를 전송함으로써 원하는 결과 값을 얻을 수 있다. 결과 값에 만족하면 질의를 종료하고 루트 노드에 알리며, 루트 노드는 질의 결과를 기지국으로 전송한다. 마지막으로 기지국은 전송된 질의 결과를 취합하여 최종 질의를 지휘관 및 참모에게 전달한다.

이 방법은 특정 임계값(Threshold)에 기반 하여 결과 값에 영향을 미치지 않는 불필요한 데이터를 제거하는 방식을 적용했으며, 가장 최근 k-최상위 질의의 결과 값을 임계값으로 정한다. 최종 k-최상위 질의의 결과 값은 최소한 이전 결과 값(임계값)보다 같거나 크기 때문이다. 질의 수행중 각 센서 노드는 임계값  $\theta(N_i)$ 을 유지하며 결과 값을 업데이트 한다.

4. 실험

실험에서는 부분 순서 트리를 직접 저장 기법 기반으로 구현하여 ns-2에서 성능 평가 하였다. 또한 각 저장 기법의 질의 처리 성능을 비교·평가하기 위하여 외부 저장 기법, 직접 저장 기법, 데이터 중심 저장 기법으로 나누어 실험하였다. 시뮬레이션 환경은 Table 1과 같으며, ‘3.다’절에서 다루었던 3가지 질의에 대한 에너지 소모량을 평가하였다. 에너지 소모량은 한 개의 질의를 처리할 때, 전체 네트워크가 사용한 에너지 총량을 전체 노드의 수로 나눈 값으로 정의하였으며, 자유 공간 모델(Free Space Model)기법을 적용했다<sup>14)</sup>. 이 모델은 센서 네트워크에서 메시지를 전송하는 전송 노드와 수신 노드 사이의 거리  $d(\text{meter})$ 와 메시지의 크기  $l(\text{byte})$ 에 따라 에너지 소모량을 측정하였으며, 무선기기의 기본 전력량과 거리에 따른 전파 증폭량으로 계산한다.

Table 1. Simulation parameter

| Parameter    | Value                |
|--------------|----------------------|
| 트래픽 타입       | CBR traffic          |
| 헤더 크기        | 20Byte               |
| 데이터 크기       | 8Byte/(Sensing Data) |
| Mac Protocol | IEEE 802.15.4        |
| 데이터 전송 속도    | < 0.20Mb/s           |
| 토폴로지         | Random Deployed      |
| 센서 노드 수      | 100                  |
| 안테나 타입       | Omni-Directional     |
| 센서 통신 반경     | 10m                  |

Fig. 8은 정합 질의와 영역 질의, k-최상위 질의에 대한 외부 저장 기법, 직접 저장 기법, 데이터 중심 기법, 그리고 부분 순서 트리 기반의 직접 저장 기법에 따른 평균 에너지 소모량을 나타낸 비교 그래프이다. 위 평균 에너지 소모량의 정량적인 수치는 각기 다른 질의를 10회에 걸쳐 수행한 시뮬레이션의 평균값을 나타낸 것이다.

외부 저장 기법은 모든 질의에서 가장 많은 에너지를 소모한다. 이는 모든 센서 노드가 기지국을 향해



여러 센서 노드를 거치는 멀티 홉 방식으로 데이터를 전송하므로 플러딩(Flooding)과 같은 전송 비용이 많이 소요 때문이다. 뿐만 아니라 하나의 기지국에서 질의 처리가 이루어지므로 질의 종류에 관계없이 많은 에너지 소모량을 보였다.

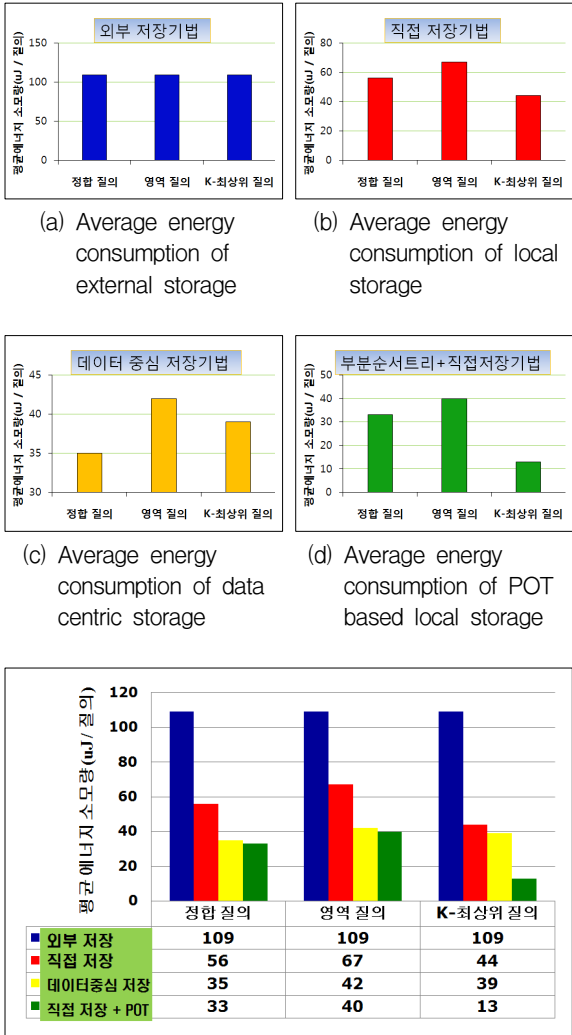


Fig. 8. Comparisons of average energy consumption

반면 직접 저장 기법은 질의를 전체 센서 노드에 내보내야 처리가 가능하다. 직접 저장 기법 역시 전체 네트워크에 보내기 위해 플러딩을 수행함으로 많은 에너지를 소모한다. 그러나 질의의 크기는 데이터 크기에 비해 상대적으로 작기 때문에 외부 저장 기법에 비해 평균 49%의 에너지를 절감 할 수 있다.

데이터 중심 저장 기법은 사용자가 지정한 특정 센서 노드에 데이터가 크기, 특징, 범위별로 취합되어 있으므로 사용자는 특정 센서 노드만 제어하여 효율적이고 정확한 라우팅을 할 수 있다. 하지만 사용자의 질의와는 상관없이 데이터가 정해진 센서 노드에 저장하기 위해 멀티 홉 방식으로 전송하기 때문에 데이터 저장 측면에서는 직접 저장 기법에 비해 더 많은 에너지를 소모한다. 반면 질의 처리는 최종 질의 결과에 영향을 미칠 수 있는 센서 노드들만 데이터를 전송하므로 적은 에너지가 소모된다. 결과적으로 각 질의에서 외부 저장 기법에 비해 평균 65%, 직접 저장 기법 비해 평균 30%의 에너지 효율이 개선되었다.

마지막으로 부분 순서 트리 기반의 직접 저장 기법은 부분적으로 정렬된 색인 구조로 인해 효율적인 데이터 순위 비교가 이루어졌기 때문에 가장 우수한 성능을 보였다. 뿐만 아니라 외부 저장 기법과 데이터 중심 저장 기법과 달리 부분 순서 트리는 데이터 전송 통신비용 없이 정렬된 트리를 생성하고, 이를 기지국에서 이용하여 사용자가 질의를 처리하므로 외부 저장 기법의 질의 처리에 비해 평균 74%, 단순 직접 저장 기법의 질의 처리에 비해 평균 49%, 데이터 중심 저장 기법의 질의 처리에 비해 평균 26%의 에너지 효율이 크게 향상됨을 알 수 있었다. 특히 k-최상위 질의 처리는 부분 순서 트리 기반의 직접저장 기법에서 상대적으로 월등한 에너지 효율이 보였는데, 이는 부분 순서 트리의 데이터 크기별로 정렬된 색인 구조로 인해 손쉽게 최상위 결과 값을 속출할 수 있기 때문이다.

가. 무선 센서 네트워크에서 부분 순서 트리 기반의 군 적용 방안

실험을 통해 밝힌 바와 같이, 군 무선 센서 네트워크에서 부분 순서 트리를 이용한 질의 처리의 장점은 다음과 같다. 첫째, 추가적인 데이터 전송 통신비용 없이 에너지 효율적인 질의 처리로 전체 센서 네트워크의 수명을 크게 연장시킨다. 둘째, 질의 처리에 필요한 탐색 범위를 한정시킴으로써 빠른 질의 처리가 가능하다. 이런 효율적인 부분 순서 트리 기반의 질의 처리는 U-국방의 핵심 인프라인 유비쿼터스 센서 네트워크에서 보다 빠르고 정확한 지휘통제 및 전투력 상승효과를 가져 올 것이다.

구체적인 적용 방안으로 병력, 장비, 군수 물자에 센서를 부착하고 통신망과 연계하여 실시간으로 지휘통

제실이나 관련 부대에 전장정보를 제공하는 체계를 구축하는 것이다. 즉, Fig. 9와 같이 Ad-hoc 네트워크로 연결하여 병력·장비의 위치 확인, 적 침투 및 무기체계의 식별, 아군피해 여부, 기상 상태, 생화학적 오염 등의 정보를 군 위성통신, TICN을 통하여 지휘통제본부와 관련 부대에 신속·정확하게 제공하는 체계를 구축할 수 있다. 뿐만 아니라 전선 및 적 이동 상황, 핵 및 방사능전을 감시하는 전장 감시체계와 전장 상황 판단 및 효율적인 정비·보급체계를 위한 상황 인식체계, 그리고 적시 폭파와 명중률을 제고할 수 있는 타격체계 등 복합적이고 다양한 분야로 적용이 가능하다.

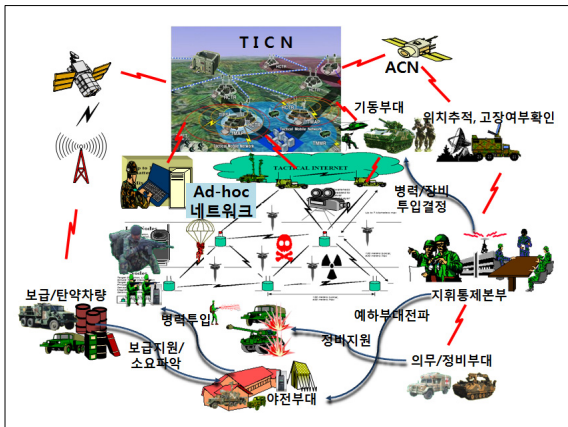


Fig. 9. System of ubiquitous sensor networks using POT

지휘관 및 참모가 수행할 수 있는 실질적인 질의의 예로, 작전 지역에 배포된 센서로부터 적 전차를 식별했다고 하자. 이때 “식별한 적 전차의 이동 경로를 추적하라”라는 질의를 부분 순서 트리의 k-최상위 질의를 이용하면 빠르고 정확하게 적 전차 정보를 얻을 수 있다. 먼저 식별한 적 전차에 가장 가까운 k개의 센서 노드를 모니터링 하면, 이동 전차의 동선을 추적할 수 있다. 각 질의의 시간마다 적 전차에 가장 가까운 노드가 부분 순서 트리의 루트 노드로 선정된다. 부분 순서 트리는 적 전차를 추적하며 갱신되고, 부분 순서 트리의 루트는 기지국에 k-최상위 질의의 결과 값을 보고하며, 지휘관·참모는 이를 통해 적 전차의 이동 경로를 모니터링 할 수 있다. 뿐만 아니라 “전투력이 70%인 부대를 찾아라.”와 같이 부분 순서 트리 기반의 정합 질의, 카메라가 부착된 장면 분석(Scene Analysis) 센서로 “현재 밀집 병력이 50~100명인 부대를 찾아라.”와 같이 부분 순서 트리 기반의 영역 질의, “현재 배치된 센싱 지역에서 화학적(또는 방사능) 오염도가 가장 높은 지역 3곳을 찾아라.”와 같이 부분 순서 트리 기반의 k-최상위 질의 등 다양한 질의를 부분 순서 트리로 구현하면 신속·정확한 결과 값을 보장할 수 있어 군 전력 증강에 크게 기여할 것이다.

## 5. 결론 및 향후 과제

군의 시간전·속도전의 전장 환경에서 전체 센서 네트워크의 수명을 연장 시키고 에너지 효율적인 빠른 질의 처리는 미래 전장 환경에 효율적으로 대처하기 위해서 무엇보다도 중요하다. 이와 같은 환경에서 질의 처리는 저장 기법과 밀접한 연관이 있다. 본 논문은 기존에 제안된 센서 데이터의 저장 기법과 질의 처리 기법의 문제점을 분석하고, 에너지 효율적인 데이터 저장 및 질의 처리 기법으로서 직접 저장 기법에서 질의 처리를 효과적으로 지원하는 부분 순서 트리의 성능을 평가하였다. 부분 순서 트리는 부분적으로 정렬된 색인 구조로 인해 효율적인 데이터 순위 비교가 가능하며, 추가적인 데이터 전송 통신비용 없이 에너지 효율적인 빠른 질의 처리가 가능하다. 다양한 저장 기법과 질의 처리의 실험을 통해 제안하는 부분 순서 트리 기반의 직접 저장 기법의 우수성을 입증하였다.

향후 과제는 본 저장 기법 기반의 군 센서 네트워크 환경에서 적합한 클러스터링 기법, 취합(Aggregation) 기법뿐만 아니라 K-NN 질의, Skyline 질의와 같은 다양한 질의 처리에 대한 상층적인 특성을 보다 세밀하게 연구하며, 에너지 효율을 극대화하는 부분 순위 트리의 유지 및 보수 방법을 연구 하고자 한다.

## 후 기

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21 사업의 지원을 받았음.

## Reference

[1] JCS, Military Tactical Information Communication Network System Operations Condept Document, 2006.

- [2] Yong Hun Park, Jong Hyun Yoon, Dong Min Seo, Jae Soo Yoo, "A Time-Parameterized Data-Centric Storage Method for Storage Utilization and Energy Efficiency in Sensor Networks", The Korea Institute of Information Scientists and Engineers, Ver. 36, No. 2, pp. 99~111, 2009.
- [3] Kyu-tae Oh, Jae-Sung Roh, "Performance Analysis of Coded FSK System for Multi-hop Wireless Sensor Networks", The Korea Institute of Information Scientists and Engineers, Ver. 11, No. 4, 2007.
- [4] YongHyun Cho, Jihoon Son, Yon Dohn Chung, "POT : an Efficient Top-k Monitoring Method for Spatially Correlated Sensor Readings", DMSN, pp. 8~13, 2008.
- [5] O. Younis and S. Fahmy, "HEED : A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for ad Hoc Sensor Networks", IEEE Trans. Mobile Computing, Vol. 3, No. 4, pp. 366~79, 2004.
- [6] S. Madden, M. Franklin, J. Hellerstein, and W. Hong, "TAG : A Tiny Aggregation Service for Ad Hoc Sensor Networks", Proc. Usenix Fifth Symp. Operating Systems Design and Implementation(OSDI '02), pp. 131~146, Dec. 2002.
- [7] Xin Li, YoungJin Kim, Ramesh Govindan and Wei Hong, "Multi-dimensional Range Queries in Sensor Networks", SenSys, pp. 63~75, 2003.
- [8] Sylvia Ratnasamy and Brad Karp, "GHT : A Geographic Hash Table for Data-Centric Storage", ACM, Applications and OS, New York, US, pp. 78~87, 2002.
- [9] Xin Li, Young-Jin Kim, Ramesh Govindan, and Wei Hong, "Multi-dimensional Range Queries in Sensor Networks", In Proc. of Sensys, pp. 63~75, 2005.
- [10] Mohamed Aly, Kirk Pruhs, Panos K, and Chrysanthis, "KDDCS : a Load-balanced In-networks Data-centric Storage Scheme for Sensor Networks", In proc.of CIKM, pp. 317~326, 2006.
- [11] Scott Shenker, Sylvia Ratnasamy, Brad Karp, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, "Data-centric Storage in Sensornets", Computer Communication Review, 33(1) : 137~142, 2003.
- [12] Sylvia Ratnasamy, Brad Karp, Scott Shenker, Deborah Estrin, Ramesh Govindan, Li Yin, Fang Yu, "Data-Centric Storage in Sensornets with GHT, a Geographic Hash Table", Mobile Networks and Applications 8, pp. 427~442, 2003.
- [13] Seong Dong Ook, Yeo Myung Ho, Yoo Jae Soo, "An Efficient Distributed Indexing Scheme for Data Storage and Query Processing in Wireless Sensor Networks", KCC, Ver. 3, No. 1, pp. 129~133, 2009.
- [14] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Network", IEEE Tran. Wireless Communications, 1(4), pp. 660~670, 2002.