

태양 에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터의 안정성을 향상시키기 위한 적응형 저장 시스템

(An Adaptive Storage System for Enhancing Data Reliability in Solar-powered Sensor Networks)

노 동 건[†]

(Dong Kun Noh)

요약 태양 에너지 기반 센서 네트워크는 배터리 기반과는 다른 에너지 최적화 기법이 필요하다. 태양 에너지는 주기적으로 계속해서 공급되므로, 기본적으로는 센서 시스템을 영원히 동작하게 할 수 있지만, 공급되는 에너지량의 불확실성과 이를 저장하는 배터리의 용량 제한 등 고려해야 할 사항이 많다. 이 논문에서 우리는 태양 에너지 기반 센서 네트워크를 위한 안정적인 스토리지 시스템인 SolarSS를 제안한다. SolarSS는 계층적인 구조로 되어 있는데, 각 계층마다 센싱 데이터의 수집, 노드 고장으로 인한 데이터 손실을 줄이기 위한 데이터 복제, 그리고 리소스 고갈로 인한 데이터 손실을 줄이기 위한 데이터 균등화 기능이 포함되어 있다. 특히, 우리 시스템은 사용 가능한 에너지의 양에 따라 활성화/비활성화 되는 계층을 동적으로 결정하고, 데이터의 손실을 최소화하기 위한 효율적인 리소스(에너지 및 저장 공간) 할당 기법과 데이터 분배 기법을 제공한다.

키워드 : 태양 에너지, 센서 네트워크, 저장 시스템, 데이터 안정성

Abstract Using solar power in wireless sensor networks requires a different approach to energy optimization from networks with battery-based nodes. Solar energy is an inexhaustible supply which can potentially allow a system to run forever, but there are several issues to be considered such as the uncertainty of energy supply and the constraint of rechargeable battery capacity. In this paper, we present SolarSS: a reliable storage system for solar-powered sensor networks, which provides a set of functions, in separate layers, such as sensory data collection, replication to prevent failure-induced data loss, and storage balancing to prevent depletion-induced data loss. SolarSS adapts the level of layers activated dynamically depending on solar energy availability, and provides an efficient resource allocation and data distribution scheme to minimize data loss.

Key words : solar power, sensor network, storage system, data reliability

1. 서론

무선 네트워크와 내장형 시스템 기술이 발전함에 따라 생태계 및 환경 모니터링 응용에 센서 네트워크를 이용하는 사례가 계속 증가하고 있다[1-5]. 이들 중 대

부분의 경우, 센서 노드들은 외부 세상과의 지속적인 연결이 불가능한 외진 장소에 뿌려지는데, 따라서 센싱 데이터들은 다음 업로드 시간 (예, 관리자에 의해 싱크 노드가 센서 네트워크에 붙는 시간, 불규칙 할 수 있음) 까지 네트워크 내에 저장되어 있어야 한다. 또한, 이들 응용은 대부분 관리자의 감독 (예, 배터리 교체) 없이 오랜 시간동안 동작하여야 하는데, 이러한 요구 사항들은 태양 에너지 기반의 센서 네트워크를 더욱 매력적으로 만들고 있다.

본 논문에서는 SolarSS라고 불리는 태양 에너지 기반 센서 네트워크를 위한 데이터 저장 서비스를 제안한다. 이 서비스의 가장 주요한 목적은 에너지의 소모와 데이터의 안정성(reliability) 확보 사이의 이율배반 관계(trade-off)에서 적응적으로 데이터의 손실을 최소화 하

[†] 정 회 원 : 일리노이대학교 컴퓨터과학과

dnoh@illinois.edu

논문접수 : 2009년 3월 25일

심사완료 : 2009년 6월 2일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 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: 시스템 및 이론 제36권 제5호(2009.10)

는 것이다. SolarSS는 두 가지 측면에서 다른 연구들과 차별화 된다.

첫째, SolarSS는 태양 에너지 기반 센서 시스템을 고려한 에너지 적응적인 파일 시스템 아키텍처이다. 이 시스템은 계층적인 구조로서 이루어져 있는데, 각 계층마다 (센서 노드의 기본 기능인) 데이터 수집, (노드 고장으로 인한 데이터 손실을 줄이기 위한) 데이터 복제, 그리고 (리소스 고갈로 인한 데이터 손실을 줄이기 위한) 데이터 균등화 등의 기능이 포함되어 있다. 이러한 계층들은 에너지의 상황에 따라 적응적으로 활성화/비활성화 되는데, 즉 가장 높은 단계의 데이터 안정성은 에너지가 충분할 때 이루어지고, 에너지가 상대적으로 부족할 때는 안정성과 관련된 기능들은 순차적으로 비활성화(hibernation) 된다. 이러한 적응(adaptation)은 태양 에너지의 공급량에 대한 정확한 예측이 불가능하기 때문에 필요하다. 예를 들면, 수집되는 태양 에너지의 양은 날씨와 계절 등 환경에 따라 달라질 수 있고, 심지어 솔라 패널의 상태에 따라서도 달라질 수 있다. 더욱이, 수집 에너지의 양은 재충전 배터리의 충전 정도에 따라서 결정되는데, 예를 들어 현재 배터리가 완전 충전되었다면 태양 에너지가 풍부하다 할지라도 이를 저장 할 수 없게 된다. 따라서 에너지 사용을 최소화하는 것이 목적인 배터리 기반 센서 네트워크와는 달리, 태양 에너지 기반 시스템에서는 배터리가 완전 충전 상태로 유지되지 않도록 효율적으로 에너지를 사용하는 것이 중요하며, 이것이 우리가 에너지 적응 기법을 제안하는 동기가 되었다.

SolarSS의 두 번째 특징은, 그것이 에너지의 제약, 저장 공간의 제약, 고장 노드의 가능성을 모두 고려하여, 추후 네트워크로부터 회수되는 데이터의 양을 최대화 하는 기법을 제공한다는 것이다. 우선 SolarSS는 고장 노드에 의한 데이터 손실을 최소화하기 위해, 중복(redundancy)을 기반으로 하는 효율적인 저장 기법인 LT 코드 기법[6]을 사용하였다. 그러나 센서 네트워크에서 노드들 간의 중복적인 데이터 저장은 추가적인 에너지와 저장 공간의 소모를 야기한다. 따라서 데이터 안정성의 정도는 자신과 주변 노드들의 사용 가능한 에너지의 양과 저장 공간의 크기에 따라 달라져야 한다. SolarSS는 이러한 리소스 제약 사항을 모두 고려하여 회수되는 데이터의 양을 최대화하기 위한 적응적인 리소스(에너지 및 저장 공간) 할당 기법을 제공한다. 아울러 저장 공간 제약으로 인한 데이터 손실을 제공하기 위해 SolarSS는 부하 균등화(load balancing) 기능을 제공한다. 즉, 보다 많은 사용 가능 저장 공간이 있는 노드에게 데이터를 전달함으로써, 저장 공간 부족으로 인한 데이터의 손실을 최소화 하는 기능인데, 이 기능

또한 데이터 전달을 위한 부가적인 에너지 손실이 발생한다. 따라서 SolarSS는 에너지 손실과 데이터 손실 사이에 최적 점을 찾아 데이터를 분배함으로써 회수되는 데이터의 양을 최대화한다.

SolarSS의 성능 실험을 위해 우리는 옥외(outdoor) 테스트베드를 구축하였다. 이 테스트베드는 총 9개의 태양 에너지 기반 노드로 구성되어 있고, 새의 생태 관찰을 위한 음향 모니터링 응용을 위해 구축되었다. 그러나 이러한 옥외 실험은 같은 실험 환경이 반복되지 못하므로, 여러 가지 기법들의 공정한 비교에는 적합하지 못하다. 예를 들어, 태양 에너지는 날씨와 계절, 대기의 조건 등에 따라 달라지는데, 옥외 실험에서는 같은 환경 조건이 다시 나타날 확률이 매우 낮다. 이를 보완하기 위해 우리는 에너지 수집 시스템을 제외하고 옥외 테스트베드와 똑같은 하드웨어와 소프트웨어를 가지고 실내(indoor) 테스트베드를 구축하였다. 태양 에너지 수집 에뮬레이터를 구현하여 옥외 테스트베드의 에너지 수집 시스템을 대치하도록 하였다. 실험 결과는 SolarSS가 에너지 양 및 저장 용량의 제약 조건에 효율적으로 적용하여 저장 데이터의 손실을 최소화하고 있음을 보여 주었다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 지금까지 제시된 태양 에너지 기반 센서 시스템 및 네트워크에 대하여 살펴보고, 3장에서는 SolarSS의 계층적 아키텍처에 대하여 알아본다. 4장과 5장에서는 각각 데이터 손실을 최소화하기 위한 SolarSS의 리소스 할당 기법과 부하 균등화 기법을 설명한다. SolarSS의 성능 실험을 위한 테스트 베드에 대한 설명과 성능 분석이 각각 6장과 7장에서 이어지고, 마지막으로 8장에서 결론으로 마무리한다.

2. 관련연구

태양 에너지는 높은 파워 밀도(density)와 주기적인 충전 사이클 등으로 인해 센서 시스템에 가장 매력적인 에너지 공급원 중 하나가 되었다. 따라서 초창기에는 많은 태양 에너지 기반의 센서 시스템들이 [3,7-11] 프로토타입으로써 설계되고 연구되었다. 그러나 이들 초기 연구 중 대부분은 하드웨어 구조나 전원 제어와 같은 노드 수준의 설계에 초점을 두고 있고, 데이터 처리율(throughput)이나 데이터 안정성과 같은 네트워크 수준의 성능 최적화 문제는 다루고 있지 않다.

최근 들어, 태양 에너지 기반 센서 네트워크에서 네트워크 수준의 성능을 다루는 연구들이 시작되고 있다 [12-14]. 예를 들어, Noh 등은 [14] 태양 에너지 기반 센서 네트워크의 서비스 품질(QoS)으로써 데이터의 지연 시간을 다루고 있다. 이 연구에서 그들은 이웃 노드의

듀티 사이클(duty cycle)과 수집된 태양 에너지의 양, 지리적 위치 등을 고려한 최저 지연시간 데이터 전달 기법을 제안하고 있다. 그러나 이 기법은 싱크 노드가 항상 연결되어 있는 센서 네트워크, 즉 전달 중심(delivery-centric)의 센서 네트워크로 한정되어 있다. 반대로, SolarSS는 오랜 기간 동안 센서 네트워크가 데이터의 업로드 기회 없이 독립적으로 동작하는 저장 중심(storage-centric) 센서 네트워크에서 데이터의 안정성을 최대화하기 위해 설계되었다.

한편, 많은 연구들이 저장 중심(storage-centric 또는 disconnection-tolerant)의 센서 네트워크에서 분산 저장 시스템을 구현하기 위해 수행되었다. DALi[15]는 이동 또는 자주 단절되는 센서 네트워크를 위한 데이터 추상화 계층을 제공한다. 그것은 분산된 센서 노드들 사이에 가상 파일 시스템을 제공하는 것을 목적으로 하고 있으며, 따라서 데이터의 구조화 및 탐색, 명명(naming) 기법에 대한 연구가 주를 이루었다. EnviroStore[16]는 저장 중심의 센서 네트워크에서 데이터의 전체 저장 용량을 최대화하기 위해 설계된 분산 저장 시스템이다. 그러나 이것들은 SolarSS가 다루는 데이터의 안정성 문제나 에너지 제약 문제를 간과하고 있다. 아울러, 언급한 모든 연구들은 전통적인 배터리 기반의 센서 시스템을 위한 기법들이다.

태양 에너지 기반 센서 시스템을 겨냥하여, 최근의 연구[17,18]에서는 수집 에너지의 적절한 사용을 통하여, 수집되는 데이터의 양을 최대화하는 방법이 연구되었다. SolarStore[17]는 배터리의 상태(용량과 남은 에너지)와 저장장치의 상태(용량과 남은 공간)를 고려하여 데이터의 안정성을 동적으로 변화시킨다. 이렇게 에너지의 소비와 데이터 안정성 확보 사이의 이율배반적(trade-off) 관계에서 균형을 맞추으로써 데이터의 손실을 최소화할 수 있다. AdaptSens[18]는 배터리 상태(여분의 에너지)에 따라 안정성을 조절하는 계층적 파일 서비스를 제공한다. 여기서는 여분의 에너지에 따라 활성화되는 계층 집합을 제시하는데, 데이터의 안정성과 관련된 계층이 활성화 될수록 에너지를 많이 소모하는 반면, 더욱 높은 신뢰성을 얻을 수 있다. 본 논문은 우리의 이 두 가지 기존 연구[17,18]를 연동하여, 에너지와 저장 공간의 상태에 따라서 데이터의 안정성과 노드의 성능을 조절함으로써 손실되는 데이터의 양을 최소화하는 방법을 제시한다.

3. SolarSS 구조

SolarSS의 목표는 에너지 공급량이 예측 불가하게 자주 변화하는 태양 에너지 기반 센서 시스템에서 데이터를 안정적(reliable)으로 저장 할 수 있는 네트워크를 구

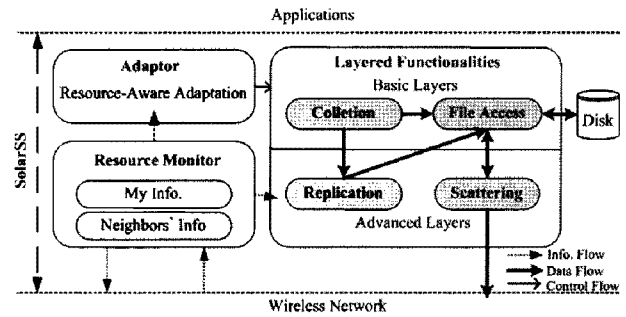


그림 1 SolarSS의 소프트웨어 구조

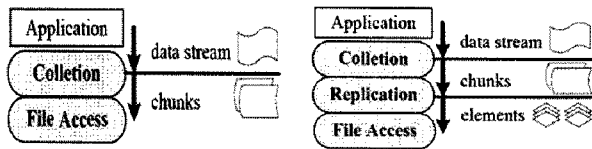
축하는 것이다. 각 노드에서 동작하는 SolarSS의 기본 구조는 AdaptSens[18]의 구조를 따른다. 그림 1에서 보듯이 SolarSS는 두 개의 제어 모듈, 즉 적응 모듈(adaptor)과 자원 모니터 모듈(resource monitor), 그리고 이 제어 모듈에 따라서 활성화되는 계층적 서비스 모음(layered functionalities)으로 구성되어 있는데, 이 기능들을 계층화 구조로 되어 있어서 서로 독립적으로 동작할 수 있다. 이 장에서는 각각의 모듈들의 기능과 필요성에 대해서 설명하려 한다.

3.1 계층화된 서비스 모음

SolarSS의 각각의 서비스들은 논리적으로 독립적인 계층으로서 설계되었다. 요컨대, 이들 각 서비스들은 데이터를 모으고, 모인 데이터를 취급하기 좋은 형태의 디렉터리와 파일로 구조화하고, 에너지 또는 디스크 제약에 의한 데이터의 손실이 최소가 되도록 데이터를 복제하고, 또한 네트워크 전체에 분배하는 역할을 한다.

3.1.1 데이터 수집 계층

그림 2[18]에서 보듯이 데이터 수집 계층은 센서로부터 수집된 입력 데이터 스트림(stream)을 받아, 그것을 청크(chunk)라 불리는 작은 데이터 조각으로 나눈다. 각 청크의 헤더에는 이 데이터들이 언제부터 언제까지 수집된 것인지를 알려주는 타임스탬프(time stamp)가 추가된다. 이 외에도 청크와 관련된 많은 정보들, 예를 들어 스트림 ID, 청크 ID, 복제 번호(기본 값은 0), 수집된 노드 ID 등이 청크 헤더에 포함된다. 이러한 정보는 각 노드에서 (또는, 싱크 노드가 연결된 경우 싱크 노드에서) 데이터의 디렉터리를 구성할 때나, 싱크 노드에서 청크 데이터들로부터 다시 원본 데이터 스트림을 재구성할 때, 또는 데이터가 손상 시 이를 회복(recovery)할 때 유용하게 사용된다. 청크 데이터는 에너지의 상태에 따라 파일 접근(file access) 계층으로 전달되거나(그림 2(a)), 복제(replication) 계층으로 전달된다. (그림 2(b)). 주지할 사항은, SolarSS의 데이터 수집 계층이 스트림들을 작은 청크 데이터로 나누고, 이를 다시 원본 스트림으로 재구성할 수 있도록 필요한 정보를 추가함으로써, 데이터의 유지 관리를 용이하게 하였다는 점이다.



(a) 기본 계층 활성화 (b) 복제 계층 활성화
그림 2 계층 간의 데이터 이동 및 형식 변화[18]

3.1.2 데이터 복제 계층

복제 계층은 (이 계층이 활성화 되었을 경우) 중복에 의해서 데이터의 안정성을 확보하는 역할을 한다. 그림 2(b)에서 보듯이 이 계층은 각 청크 데이터를 인코딩하여 원소(element)라 불리는 여러 개의 작은 데이터 조각으로 만든다. 이 원소 데이터를 만드는 기법은 여러 가지가 있다. 예를 들어 가장 간단한 방법은 각 청크 데이터를 같은 크기로 나눔으로서 여러 개의 원소 데이터를 만드는 것이다. 그러나 주지하다시피 이 방법은 모든 원소 데이터들이 모여져야 원본 청크 데이터를 재구성할 수 있으므로, 그리 효율적이지 못하다. 따라서 SolarSS는 LT 코드[6] 기법을 사용하여 보다 효율적이고 안정적인 복제 코드를 생성한다. 이 LT 코드 기법은 선형 시간 복잡도로 계산 될 수 있으며, 따라서 사용되는 에너지의 양도 매우 작다. LT 코딩의 보다 자세한 사항은 5장에서 설명한다. 원소 데이터의 헤더에는 앞서 살펴본 청크 데이터의 정보가 포함 되는데, 특히 같은 청크 데이터로부터 생성된 원소 데이터들은 같은 복제 번호를 유지하게 된다. 복제 계층에서 이렇게 생성된 원소 데이터들은 파일 접근 계층으로 전달되어 파일 이름이 만들어지고 해당 디렉터리로 옮겨진 후, 분배 계층을 통해 주변 노드로 분배된다.

3.1.3 데이터 분배 계층

분배(scattering) 계층은 (활성화 되었을 경우) 디스크의 고갈로 인한 데이터의 손실을 줄이기 위해 데이터를 균형 배분하는 역할을 한다. SolarSS는 SolarStore[17]의 연구를 기반으로, 간단하지만 매우 효율적인 휴리스틱 기법을 통해 얼마만큼의 데이터가 어떤 노드로 언제 전송되어야 하는지를 결정할 수 있는데, 분배 계층은 이렇게 전송되어야 하는 데이터들을 파일 접근 계층을 통해 읽은 후, 네트워크 모듈을 통해 해당 노드로 전달하는 역할을 수행한다. 데이터 분배 방식의 보다 자세한 사항은 5장에서 설명한다.

3.1.4 파일 접근 계층

파일 접근 계층은 OS의 파일 시스템 위에서 동작하며, 데이터 수집 계층 및 복제 계층(활성화 되었을 경우)에서 생성된 데이터를 다룬다. 가장 중요한 기능은 받은 청크 또는 원소 데이터에 적절한 이름을 붙이고 (naminig) 그들을 조직적으로 구성(organizing)하는 것

이다. 또한 분배 계층은 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 복제된 원소 데이터의 송수신이 필요한 경우에 파일 접근 계층에 접근하게 된다.

데이터를 구성할 때에는 그 데이터의 헤더 노드에 저장된 정보들을 이용한다. 기본적으로 디렉터리 구조는 스트림 이름과 생성된 노드 아이디 그리고 생성된 시간에 의해서 조직된다. 파일 이름은 “센싱 시작시간-센싱 종료시간-복제 번호”로 이루어지는데, 복제 번호는 복제 계층에서 주어진다. 즉, 한 청크가 LT 코드 기법을 통해 여러 개의 원소 파일을 생성하는데, 그 원소 파일의 번호가 복제 번호이다. 만약 복제 계층이 활성화 되어 있지 않은 경우, 데이터 수집 계층에서 만들어진 청크 파일이 그대로 파일 접근 계층으로 내려올 경우, 복제가 이루어지지 않았으므로 복제 번호 값은 빈칸으로 남는다. 이러한 간단한 명명 기법을 통해 싱크 노드는 전송된 원소 데이터의 내용을 알 필요 없이 파일 이름을 사용하여 원본 청크 파일을 쉽게 재구성할 수 있다.

3.2 리소스 모니터 모듈 및 적응 모듈

리소스 모니터 모듈은 SolarSS의 동작을 제어하기 위한 노드 자신 및 이웃 노드들의 리소스 정보를 수집하는 역할을 한다. 예를 들면, 자신 및 주변 노드의 에너지 및 저장 공간에 대한 정보, 이웃 노드들의 상태(깨어 있는지 여부), 토폴로지 정보 등을 포함한다. 자신의 리소스 정보는 로컬 시스템 정보를 통해 얻을 수 있지만, 이웃 노드의 정보는 주기적인 메시지의 교환을 통해서 유지해야 한다. 실제로, 태양 에너지 기반 센서 네트워크에서 에너지와 저장 공간의 수준은 짧은 시간에 큰 폭으로 변화 할 수 있으므로, SolarSS는 비교적 짧은 주기인 매 10분마다 자신의 리소스 정보를 이웃 노드로 보내도록 하였다. 이 메시지가 정상적으로 받아진 이웃 노드는 깨어서 동작하는(awake) 상태로 인지되고, 오랜 기간 동안 메시지를 받지 못하면 수면(asleep) 또는 고장(fault) 상태로 인지된다.

적응 모듈(adaptor)은 로컬 노드의 에너지 상태에 따라 활성화 되는 계층을 결정한다. 즉, 에너지가 비교적 충분하면 에너지의 안정성을 높이기 위한 선택 계층(advanced layer)을 활성화 하고, 그렇지 못한 경우에는 에너지의 효율적 사용을 위해 기본 계층(basic layer)만 활성화 한다.

데이터 수집 계층과 파일 접근 계층은 반드시 깨어 있어야 하는 기본 계층에 속한다. 이 계층들은 센싱 데이터를 수집하고 이 데이터를 로컬 디스크에 저장하는 동작, 즉 시스템에서 가장 기본적인 동작을 수행하기 때문이다. 이들 기본 노드만 활성화되어 있을 경우, 노드들 간의 협력은 필요 없어지고, 시스템의 에너지 소모는 최소화된다. 하지만 주지하다시피 데이터의 안정성은 결

여된다. 반면, 데이터 복제 계층과 분배 계층은 안정성을 높이기 위한 선택 계층이다. 이 선택 계층은 현재의 에너지 상태가 기본 계층을 활성화시키고도 여분이 남을 경우에 활성화 된다. 물론 리소스 모니터링 모듈에서 주기적으로 에너지 상태를 체크 했을 때, 에너지 여분이 더 이상 존재하지 않는다면, 이 계층은 다시 비활성화 된다.

그림 3은 에너지 레벨에 따라 활성화되는 계층을 보여준다. 현재 시간 t에서의 에너지 레벨이 E(t)일 때, E(t)가 특정 문턱 값(threshold) 보다 크면 데이터의 안정성을 높이기 위한 선택 계층을 활성화 시키고, 그렇지 못하면 기본 계층만을 활성화 시킨다. 이 때, 풀어야 할 중요한 문제가 이상적인 문턱 값을 결정하는 것이다. 4 장에서는 에너지 소모와 데이터 안정성 확보 사이의 이율배반 관계 속에서 데이터의 손실을 최소화하기 위한 최적의 문턱 값을 찾는 기법을 설명할 것이다.

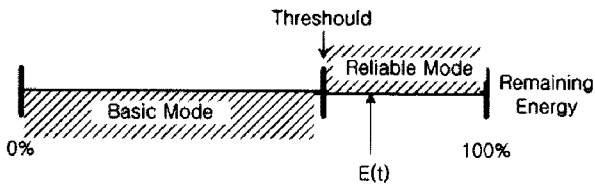


그림 3 에너지에 따른 선택적 계층 활성화

4. 데이터 손실 최소화

데이터의 손실은 각 노드의 에너지 및 저장 공간의 고갈 또는 노드의 물리적 고장 등으로 인하여 나타난다. 이 장에서 우리는 태양 에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터의 안정성을 높여, 추후 싱크 노드에서 회수되는 데이터의 양을 최대화하는 문제를 최적화 문제(optimization problem)로 유도하여(formulate) 다루려 한다. 이상적으로, 이에 해당하는 최적화 문제를 풀려면 노드의 고장 확률과 날씨 패턴에 대한 사전 정보가 있어야 한다. 그러나 이들 모두 미리 그 값을 정확하게 알기란 매우 어렵다. 따라서 우리는 그 대신 이 두 가지 물리적 모델에 독립적인 간단하지만 효율적인 해결책을 제시하려 한다. 이에 대한 연구는 우리의 최근 연구[17]에 보다 자세히 설명되어 있으므로 간단히 설명하도록 한다.

4.1 문제 정의 및 수식화

저장 중심의 센서 네트워크에서는 데이터 손실을 야기하는 두 가지의 요인이 있다. 그 중 한 가지는 노드의 고장(여러 가지 자연 재해나 동물의 습격 등으로 인한)이다. 고장 노드의 데이터는 추후에도 싱크노드로 전달될 수 없다. 중복은 저장 데이터의 안정성을 확보할 수 있는 가장 좋은 방법이므로, 고장 노드로 인한 데이터 손실의 충격을 완화시킬 수 있다. 그러나 앞서 설명한

것처럼, 중복을 위해 데이터를 인코딩(encode)하여 복제하고, 그 복제된 데이터들을 네트워크에 분배하는 것은 또 다른 에너지와 저장 공간의 소비를 야기한다.

$E_{residual}$ 을 현재 배터리에 남아있는 에너지의 양이라고 하고, ΔE ($0 \leq \Delta E \leq E_{residual}$)를 데이터의 안정성을 높이기 위해 할당되는 에너지양이라고 하자. 그러면 우리는 주어진 복제 기법, 현재 저장 공간의 상태, 노드 고장 모델 하에서, ΔE 를 소모하여 얼마나 많은 데이터들을 살릴(survive) 수 있는지 계산 할 수 있고, 앞으로 이렇게 계산된 값을 $Gain(\Delta E)$ 라고 부를 것이다.

한편, ΔE 를 데이터의 안정성을 위해 사용하면, 그 만큼의 에너지 손실로 인해 센싱 작업을 수행하지 못할 수 있고, 따라서 이 경우도 또 다른 종류의 데이터 손실이라 할 수 있다. 이렇게 발생하는 데이터 손실을 $Loss(\Delta E)$ 라 정의한다. 즉, $Loss(\Delta E)$ 는 ΔE 의 에너지를 데이터의 안정성을 위해 사용함으로써 잃을 수 있는 데이터 손실의 양이다. 따라서, 에너지의 측면에서 우리의 목표는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{최대화} && \{ Gain(\Delta E) - Loss(\Delta E) \} \\ & \text{조건} && 0 \leq \Delta E \leq E_{residual} \end{aligned}$$

직관적으로 우리는 ΔE 가 커질 수록 $Gain(\Delta E)$ 가 커지지만, 또한 $Loss(\Delta E)$ 도 함께 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 우리는 이 두 가지 값을 신중하게 결정하여야 한다.

$Loss(E)$ 를 좀 더 자세히 알아보기 위해, 우리는 $B(E_{residual})$ 을 정의하였는데, 이는 현재 남아있는 에너지의 양이 $E_{residual}$ 일 때, 지금 시간부터 배터리가 완전히 충전되는 시간 사이에 기대되는 정전(blackout) 시간(배터리의 에너지가 고갈되어 데이터의 센싱 작업이 중단된 기간)을 의미한다. 이 기간 동안에는 센싱되는 데이터가 없기 때문에, R 을 데이터 센싱 속도(rate)이라고 할 때, 손실되는 데이터의 양은 $R \cdot B(E_{residual})$ 가 된다. 따라서, 만약 현재 에너지의 양 $E_{residual}$ 로부터 에너지의 안정성을 위해 ΔE 를 사용한다면, 다음과 같은 추가적인 데이터 손실이 발생할 것이다.

$$Loss(E) = R \cdot [B(E_{residual} - \Delta E) - B(E_{residual})]$$

정확한 $B(E_{residual})$ 와 $Gain(\Delta E)$ 의 수식은 노드 고장 모델과 날씨 패턴에 따라 달라진다. 앞서 언급한 것처럼, 이들은 정확히 예측 할 수 없으므로, 우리는 이들의 물리 모델과 상관없는 이들의 특성을 유도함으로써 문제를 풀 것이다.

4.2 간단하고 효율적인 해결책

우리는 아래와 같은 $B(E_{residual})$ 와 $Gain(\Delta E)$ 의 특성에 기반을 두어 간단하지만 효율적인 해결책을 제안한다.

특성 1: 어떠한 노드 고장 모델에 대해서도, $Gain(\Delta E)$ 는 ΔE 에 대해 비 감소함수이다. 데이터의 안정성을

증대시키기 위한 제시된 어떤 기법에서도, 에너지를 더 사용하면서 안정성이 줄어드는 경우는 없다.

특성 2: 어떠한 날씨 패턴에서도 $B(E_{residual})$ 은 $E_{residual}$ 에 대해 비 증가함수이다. 어떤 날씨에서도 현재 배터리의 에너지가 많으면, 정전 시간은 짧아지게 된다.

P_{solar} 를 솔라 패널의 평균 충전 속도(rate)라 하고 P_{sys} 를 시스템의 평균 전력 소모 속도라 하면, 주어진 현재 에너지의 양 $E_{residual}$ 과 배터리 용량 C 에서, 현재로부터 배터리가 완전 충전되어질 때까지의 기대 시간은 아래와 같다.

$$T_{full}(E_{residual}) = (C - E_{residual}) / (P_{solar} - P_{sys})$$

주지할 사항은 배터리가 충전되기 위해서는 $P_{solar} \geq P_{sys}$ 를 만족해야 한다는 점이다. 즉, 시스템의 평균 에너지 소모 속도가 태양 에너지 충전 속도보다 작거나 같아야 배터리가 충전되며, 그렇지 않은 경우 시스템의 전원은 꺼지게 될 것이다.

충전되는 태양 에너지의 양이 시간에 따라, 계절에 따라 다르지만, 현재 적어도 $P_{sys} \cdot T_{full}(E_{residual})$ 이상의 에너지가 배터리에 존재한다면, 현재부터, 다음 배터리가 완전 충전될 때까지 정전 시간은 0일 것이다. 즉, $E_{residual} \geq P_{sys} \cdot T_{full}(E_{residual})$ 일 경우 정전 시간은 0이 되는데, 이 식을 풀면 $E_{residual} \geq (P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$ 일 경우가 된다. 이 식과 특성 2로부터 우리는 아주 중요한 특성 3을 얻을 수 있다.

특성 3: 만약 $E_{residual} \geq (P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$ 일 경우 항상 $B(E_{residual})=0$ 이다. 이것은 시스템이 배터리의 에너지를 전체 배터리 용량 C 의 P_{sys}/P_{solar} 비율 이상으로 유지하게 되면, 정전 시간은 0이라는 것을 의미한다.

특성 3에 의해서, 만약 우리가 데이터의 안정성을 위해 할당된 에너지 양을 ΔE 라 하고, 그 값이 $E - \Delta E \geq (P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$ 를 만족한다면, ΔE 로 인한 데이터 손실, $Loss(E)$ 의 값은 0일 것이다.

또한 특성 1에 따르면 $Gain(\Delta E)$ 는 ΔE 에 대해 비 감소함수이므로, $Gain(\Delta E)$ 를 최대화함과 동시에 추가적인 데이터 손실을 없게 ($Loss(E) = 0$)하는 ΔE 의 값은 아래와 같다.

$$\Delta E = E_{residual} - (P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$$

따라서 3.2절에서 언급했던 에너지 문턱값(threshold)은 $(P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$ 가 된다. 즉, $E_{residual}$ 의 값이 $(P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$ 보다 작으면, 시스템은 기본 계층(데이터 수집 계층과 파일 접근 계층)만을 활성화시키고, $(P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$ 보다 클 경우, 남은 에너지($\Delta E = E_{residual} - (P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$)만큼을 데이터 안정성을 위한 선택 계층(데이터 복제 계층과 분배 계층)을 위하여 사용한다.

P_{solar} 와 P_{sys} 값은 시스템에서 이들을 주기적으로 관측하고, 그 관측 값들을 이동 평균 기법(moving aver-

age)으로 업데이트함으로써 보다 정확한 값을 얻을 수 있다.

지금까지 살펴본 것처럼, 우리의 기법은 노드 고장 비율과 날씨 패턴 등의 물리 모델들에 독립적인, 매우 간단하지만 효율적으로 데이터의 안정성에 사용될 수 있는 에너지의 양을 도출하였다. 우리가 강조하는 것은 우리가 도출한 이 문턱값이 이상적인 값은 아닐 수 있으나, 적어도 시스템 성능의 저하는 절대 가져 오지 않는다는 것이다.

4.3 저장 공간의 할당

4.1장과 4.2장에서는 데이터의 안정성을 도모하기 위하여, 에너지의 측면에서 데이터의 손실을 최소화 하는 효율적인 에너지 할당 값에 대하여 살펴보았다. 여기서는 저장 공간의 관점에서 데이터의 손실을 줄이는 최적의 저장 공간 할당에 대해서 살펴볼 것이다.

저장 공간은 센서 네트워크 내에 싱크 노드가 접속되어, 네트워크로부터 싱크노드로 데이터가 업로드 될 때에 갱신된다. 이를 이용하여, 저장 공간의 할당도 에너지의 할당과 비슷한 방법으로 수행할 수 있다. M 을 현재 시간부터 다음 업로드 시간까지 기대 값이라 하고, R 을 센싱 속도라 하면 모든 데이터를 저장하기 위해서는 $R \cdot M$ 만큼의 저장 공간이 필요하다. $S_{residual}$ 을 현재 남아 있는 저장 공간이라 할 때, $S_{residual}$ 이 $R \cdot M$ 이상일 경우, 아래의 저장공간 만큼이 데이터의 복제본을 저장하기 위하여 사용된다.

$$\Delta S = S_{residual} - R \cdot M$$

5. 안정성을 위한 데이터의 인코딩 및 분배

3.1.2절에서 설명한 것처럼, SolarSS는 같은 데이터 블록을 하나 더 생성하는 단순한 복사가 아니라, LT 코드를 사용해서 보다 안정적이고 효율적인 복제를 구현한다. LT 코드 기법은 원본 데이터 블록을 k 개의 청크(chunk) 데이터로 나누고, 이를 인코딩하여 K ($K > k$)개의 원소(element) 데이터를 생성하는데, 원본 데이터 블록은 $(1+\epsilon)k$ (ϵ 은 0보다 큰 아주 작은 수)개의 원소가 모이면 복구될 수 있다. 이렇게 한 데이터 블록을 여러 개의 청크 데이터 블록으로 나누고, LT 코드를 적용함으로써, 우리는 단순히 데이터 블록을 복사하는 것보다 같은 에너지와 저장 공간 조건에서 훨씬 큰 에너지 안정성을 제공할 수 있게 된다. 예를 들어, 한 개의 데이터 블록이 8개의 ($k=8$)의 청크로 나누고, LT 코드에 의해 12개의 ($K=12$) 원소 데이터로 인코딩 되었다고 할 경우, 12개의 원소 데이터 중 약 9개만 존재하여도($\epsilon=0.1$ 일 경우) 원본 데이터 블록이 재구성 될 수 있는 것이다. 이것은, 만약 12개의 원소 데이터가 각각 다른 노드에 분산되어 저장되었다면, 3개의 노드에 고장이

발생하여도 견딜 수 있다는 것을 의미한다. 단순한 데이터 블록의 복사 기법을 사용하여 위의 예와 같은 데이터 안정성(3개 노드 고장을 안내함)을 확보하려면 그 데이터 블록의 복사본 3개를 만들어야 하고 이것은 원본 데이터 크기 3배의 추가적인 저장 공간을 요구할 것이다. 반면, LT 기법은 원래 8개의 청크 데이터가 필요한데 비해 12개의 원소 데이터가 생성되므로 0.5배의 추가적인 저장 공간만이 요구된다. 또한 데이터 블록을 LT 코드 기법을 사용하여 작은 원소 데이터로 분할함으로써 전체 네트워크의 저장 데이터양 균형화(load balancing)에도 아주 큰 도움이 된다.

이렇게 효율적으로 인코딩된 원소 데이터들은, 각 노드의 저장 데이터양의 균형을 맞추고 안정성을 최대화하기 위해, 다른 노드들로 분배되어야 한다. 데이터 분배의 문제는 크게 두가지 고려할 점이 있다.

첫 번째는 “얼마나 많은 데이터가 각 이웃 노드로 옮겨져야 하는가?”이다. 어떤 노드가 g 개의 이웃을 가지고 있고 $g+1 \leq K$ 라고 하면, K 개의 원소 노드는 균등하게 분배되어, 각 이웃노드와 자신 노드는 $K/(g+1)$ 개의 원소 데이터를 저장할 것이다. 만약 $g+1 > K$ 인 경우, g 개의 이웃 노드 중 $K-1$ 개의 노드들이 무작위로 선택되어 각각 한 개의 원소 데이터를 전송 받게 될 것이다. 그러나 이웃 노드들의 상태가 계속해서 변하기 때문에 (수면 상태에 들어갈 수도 있고, 심지어 노드가 완전히 고장 날 경우도 있음), SolarSS는 원소 데이터를 재분배(redistribution)하는 기법을 사용하였다.

따라서 두 번째 고려사항은 “자신 노드로부터 인코딩된 원소 데이터나 다른 노드로부터 받은 원소 데이터들을 언제 어떻게 재분배 할 것인가?”이다. 이를 위하여 우리는 데이터 블록에 대한 안정성 레벨(reliability level)이라는 개념을 정의하였다. 한 데이터 블록으로부터 인코딩된 원소 데이터 총 K 개 중에서, 어떤 노드에서 h 개를 가지고 있다고 하면, 그 노드의 이 데이터 블록에 대한 안정성 레벨 $a = K/h$ 이다. 즉, 어떤 노드에서 그 데이터 블록에 대해 저장하고 있는 원소 데이터가 적을수록 안정성 레벨은 커지는데, 이는 이 노드가 고장일 경우에도 이 데이터 블록과 관련한 원소 데이터들은 주로 다른 노드에 저장되어 있으므로 이 데이터 블록은 비교적 안전하다는 것을 뜻한다. 각 데이터 블록의 안정성 레벨 a 를 기반으로, 각 노드는 자신에게 저장된 모든 데이터에 대한 평균 안정성 레벨 β 를 구한다.

한 노드에서 각 데이터 블록은 자신의 안정성 레벨에 따라서 정렬되고, SolarSS는 안정도가 가장 낮은 데이터 블록부터 차례로 처리한다. 아직 데이터 블록이 LT 코드에 의해 인코딩이 되기 전이라면, 인코딩을 우선 수행하고, 두 번째 고려사항에서 살펴본 것처럼 이웃 노드

에 균등하게 보내진다. 데이터 블록이 이미 인코딩 되었다면, 그 노드에는 이 데이터 블록과 관련하여 h 개의 원소 노드가 있다는 것이고, 그중 $K \cdot (1/a - 1/\beta)$ 개의 원소 노드를 이웃 노드에게 균등하게 분배한다. 이렇게 함으로써, 이 데이터 블록과 관련된 안정성 레벨 a 는 이 노드 전체의 안정성 레벨 β 와 같은 수준으로 향상된다.

각 노드는 데이터 복제 계층과 분배 계층이 활성화되어 있다면, 즉 4장에서 살펴본 것처럼, 데이터의 안정성을 위해 사용할 수 있는 여유 에너지 ΔE 와 여유 공간 ΔS 가 있다면, 원소 데이터를 생성하고 이를 저장 또는 이웃 노드로 분배함과 동시에, 이웃 노드로부터 전송되는 원소 데이터를 받아서 이를 저장하거나 재전송하는 동작을 수행한다.

6. 테스트베드의 구현

우리는 SolarSS의 성능 실험을 위해 실내/실외 테스트베드를 구현하였다. 이와 관련한 보다 자세한 사항은 우리의 기존 연구[17-19]를 참조하고, 여기서는 간단히 언급하도록 한다. 옥외 테스트베드는 현실적인 실제 환경을 제공하여 주지만, 실제 환경(예, 날씨, 계절, 대기 조건 등)은 추후 또 다시 반복되지 못하므로, 여러 가지 기법들의 공정한 비교에는 적합하지 않다. 이를 보완하기 위해 실내 테스트베드가 구축 되었다.

6.1 옥외 테스트베드

우리는 총 9개의 노드를 우리가 속한 대학의 남쪽에 있는 산에 배치하였다. 그림 4는 옥외 테스트베드 노드의 장치들 간 구조도를 보여준다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 야외 테스트베드 노드들은 크게 에너지 수집 시스템과 센서 시스템의 두 가지 시스템으로 구성되어 있다.

에너지 시스템에는 총 98Ah의 용량을 지닌 12V의 심주기(deep-cycle) 배터리가 포함되어 있다. 두 개의 솔라 패널이 배터리를 충전하기 위해 사용되고 있는데, 각 패널의 출력은 약 105W이다. 그러나 이 출력 값은 아주 이상적인 상태를 가정하고 있기 때문에, 실제 값은

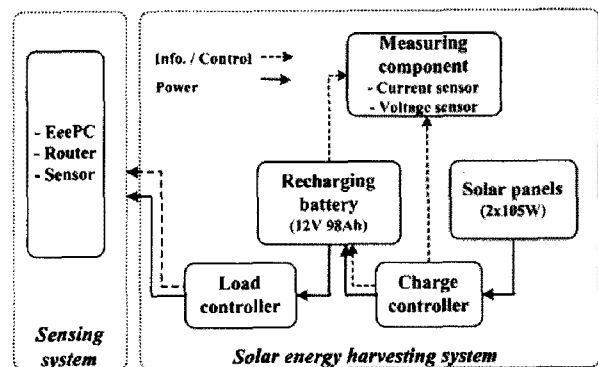


그림 4 옥외 테스트베드 노드의 구조도[19]

이보다 매우 작다. 또한 배터리의 과충전과 디바이스들에 전기적인 충격을 줄 수 있는 가능한 요인들을 피하기 위해 충전 제어가 사용되었고, 부하 제어기는 배터리가 거의 방전된 상태가 되면 배터리와 부하를 분리함으로써 배터리의 과방전을 막는 역할을 수행한다. 또한 시스템이 에너지 관련 정보를 얻게 하기 위하여 전압 센서[20]와 전류 센서[21]가 추가적으로 사용되었다.

다음으로, 센서 시스템에서는 계산 장치(component)로써 저전력 랩톱(Asus EEE Pc[22])이 사용되었는데, 이것은 일반적인 경우 평균 10W에서 최고 15W의 적은 에너지만을 소모한다. 또한, 고성능(high fidelity)의 마이크가 새들의 소리를 모니터링하기 위해 사용되었다.

6.2 실내 테스트베드

실내 테스트베드에도 실외와 마찬가지로 9개의 노드를 구축하였다. 각 노드의 센서 시스템은 실외 테스트베드와 똑같고, 에너지 수집 시스템을 모사(emulate)하기 위하여 그림 5와 같은 배터리 에뮬레이터를 설계하였다.

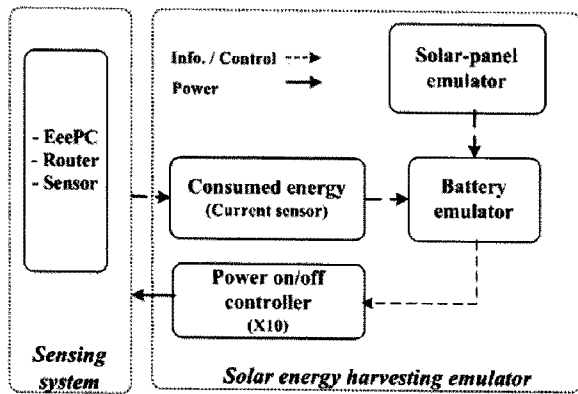


그림 5 실내 테스트베드 노드의 구조도 [19]

우선, 배터리 에뮬레이터는 솔라 패널 에뮬레이터로부터 충전 전류 값을 받는데, 이때 충전 전류 값은 옥외 테스트베드 노드로부터 수집된 실제 에너지 추이(trace)를 기반으로 한다. 그리고 각 노드의 전류 센서로부터 현재 시스템의 에너지 사용 속도(discharge rate)를 전달 받는다. 이러한 충전/방전 속도를 기반으로 배터리 에뮬레이터는 현재 배터리에 남아있는 에너지의 양을 갱신한다. 현재 노드들은 실내에서 AC 전원으로 연결되어 있지만, 배터리 에뮬레이터는 모사되는 배터리의 잔존 에너지양에 따라 이 AC 전원을 연결하거나 끊는데, 이것은 옥외 테스트베드의 부하 제어를 모사한 것이다. 이렇게 AC 전원의 연결을 제어하는 것은 X10[23] 모듈에 의하여 수행되는데, 이것은 주로 '스마트 홈'을 위한 전자 기기 제어를 위해 사용되는 것이다.

7. 성능 평가

앞서 설명한 것처럼 SolarSS의 성능을 평가하기 위해 우리는 우선 우리의 기법이 옥외 테스트베드에서 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 이후, 옥외 실험에서 측정된 태양 에너지 입력 값의 추이(trace)를 기반으로, 실내 테스트베드에서 여러 기법들의 성능을 실험하고 비교하였다. 앞으로의 실험 환경 및 결과들은 이러한 실내 실험을 기반으로 기술 한 것이다.

7.1 실험 환경

우리는 10월 21일부터 11월 4일까지의 15일 동안의 태양 에너지 수집 값을 실험을 위해 사용하였다. 이 기간 동안의 하루 평균 태양 에너지는 30.69Ah, 표준 편차는 7.90이었다. 각 실험동안, 각 노드는 에너지의 부족으로 인하여 시스템이 꺼지지 않는 이상, 계속해서 음향 데이터를 기록한다. 그러나 음향 데이터가 모니터링되는 속도는 각 노드마다 달랐다. 이는 옥외 테스트베드에서 관찰된 바, 노드가 위치한 장소에 따라 센싱되는 데이터의 양이 달랐기 때문이다. 이렇게 각 노드는 서로 다른 데이터 수집 속도를 갖는데, 네트워크 내의 총 데이터 수집 속도는 응용의 요구사항에 따라 450KB/s를 넘지 않도록 하였다. 또한 각 노드는 16GB의 데이터 저장 공간을 갖고, 싱크 노드는 전체 네트워크 저장 공간의 80%정도가 채워지는 매 3일 마다 네트워크에 연결되어 데이터를 모은다. 배터리 에뮬레이터의 경우, 옥외 노드와 같은 98AH의 용량을 갖도록 하였고, 옥외 테스트베드의 경우 초기 배터리양이 제각각 다르기 때문에, 이를 반영하기 위해 실내 실험에서도 이를 20%~100% 사이에서 균등하게 분포하게 하였다. 마지막으로 LT 코드는 k=8과 K=12를 사용하였다.

7.2 실험 결과

SolarSS의 성능을 비교할 대상으로 고정된 계층들만이 활성화된 기법들을 택하였다. 즉, C, R, S는 각각 데이터 수집 계층과 데이터 복제 계층, 데이터 분배 계층을 의미하고, 여러 개의 계층이 함께 사용된 경우 '+'를 사용하여 표현하였다. 예를 들어, C+R의 경우는 C 계층과 R 계층이 동시에 활성화된 기법을 의미한다. SolarSS가 에너지의 양에 따라 적응하여 그에 따른 계층들을 활성화(문턱 값 이하의 경우 기본 계층만 활성화, 그 이상의 경우 선택 계층 활성화)하는 반면, 이들 기법은 이에 관계없이 항상 해당하는 계층들이 활성화 되어 있다. 모든 기법은 기본적으로 파일 접근 계층을 사용하므로, 이를 따로 명시하지 않았다.

7.2.1 효율적인 에너지의 사용

그림 6은 배터리의 에너지 잔존량 $E_{residual}$ 과 문턱 값 $(P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$ 가 SolarSS하에서 어떻게 변하는지 특정 노드(노드 9)에서 관측한 값을 보여준다. 또한 솔라 패널로부터의 충전 전류도 그림에 함께 보여주고 있다.

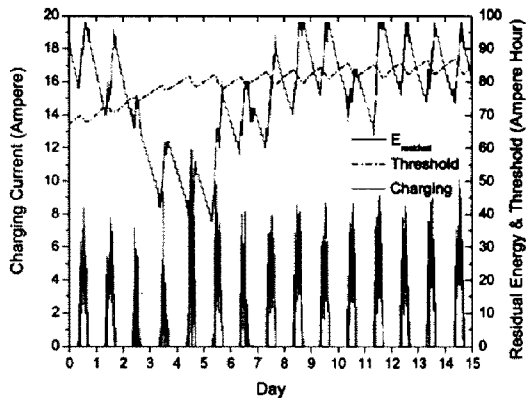


그림 6 노드 9의 에너지 잔존량과 문턱값의 변화

그래프가 복잡해지는 것을 막기 위해 안정성 확보를 위해 사용가능한 에너지 량 ΔE 의 값은 나타내지 않고 있는데, 식 $\Delta E = E_{residual} - \text{문턱값}$ 으로부터 쉽게 추측할 수 있다. 관찰 노드의 초기 에너지 잔존량 $E_{residual}$ 은 88.2AH이다. 처음 2일 동안은 $E_{residual}$ 가 문턱 값 $(P_{sys}/P_{solar}) \cdot C$ 보다 커서(뒤에서 살펴보겠지만, 이 기간동안 저장 공간도 문턱 값보다 높았다.), 기본 계층 뿐만 아니라, 선택 계층 즉 복제 계층과 분배 계층도 활성화되었다. 이에 따라 시스템의 에너지 소비 속도가 증가하여 3일째부터 약 5일간 $E_{residual}$ 가 문턱 값보다 작아지게 되고, 이 기간 동안 선택계층은 비활성화 된다. 이렇게 기본 계층만을 동작시킴으로서 에너지를 축적하여 8 일째 되는 날 다시 $E_{residual}$ 가 문턱 값보다 높아지게 되고, 다음 며칠간은 계속해서 몇 시간동안 에너지의 안정성을 위한 선택 계층이 활성화되고 다시 비활성화되는 패턴이 반복되고 있다.

이처럼 에너지에 적응적으로 동작하는 SolarSS의 성능을 에너지의 측면에서 각각 다른 기법들과 비교하여 보았다. 그림 7은 노드 2(초기 에너지량 $E_{residual} = 19.6AH$)에서 일주일 동안 각 기법을 사용하였을 때 에너지 잔존량의 변화를 보여준다. 에너지 수집 계층(C)만 활성화되었을 경우, 에너지는 점차 증가하는 모습을 보이는데, 이는 수집되는 에너지의 양이 사용되는 에너지의 양보다 크기 때문이다. 반대로 에너지 수집 계층과 함께 선택 계층(복제 계층과 분배 계층)이 모두 활성화된 기법(C+R+S)의 경우, 사용되는 에너지양이 수집되는 에너지양보다 커서, 잔존 에너지양이 점차 감소하는 추세를 보이게 된다. 심지어 잔존 에너지가 부족하여 5일 동안 야간에 몇 시간 정도 시스템이 꺼지는 모습을 보이는데, 이는 큰 데이터 손실을 가져올 수 있다. 이에 반해 SolarSS는 시스템의 꺼짐 없이, 또는 불필요하게 에너지 잔존량을 늘이지 않고 항상 적정 수준의 에너지를 유지하면서 효율적으로 동작하고 있다. 여기서 효율적이란 말은 에너지 관점에서 효율적이란 뜻이다. 즉 에

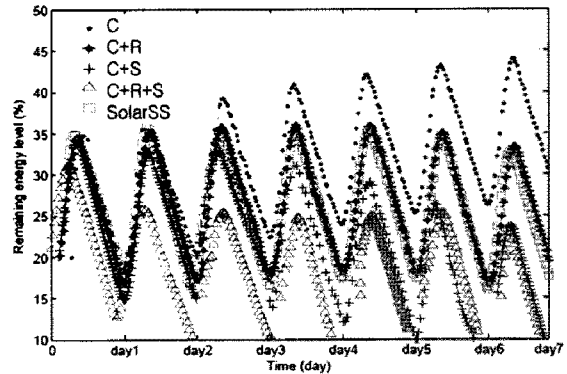


그림 7 노드 2의 에너지 잔존량 변화 추이

너지의 고갈로 인해 야기되는 데이터의 손실을 최소화 하고, 또한 적정량의 에너지를 데이터의 안정성 확보를 위해 사용하고 있다는 의미이다.

7.2.2 효율적인 저장 공간의 사용

그림 8은 노드 9의 15일 동안 저장 공간 $S_{residual}$ 의 변화와 안정성을 위해 사용할 수 있는 저장 공간 여분 ΔS 의 변화를 보여주고 있다. 싱크 노드가 매 3일 마다 연결되어 모든 데이터를 수집해 가므로, 저장 공간은 매 3일마다 갱신된다. 그림에서 알 수 있듯이, 처음 이틀 동안은 안정성을 위한 저장 공간 여분 ΔS 이 존재한다. 앞서 그림 6에서 보았듯이 이 기간 동안 역시 안정성을 위한 에너지 여분 ΔE 도 존재하였으므로, 데이터의 복제와 분배가 시작되어 저장 공간이 복제된 데이터들에 의해서 점차 사용되고 있고, 따라서 ΔS 가 감소하게 된다. 그리고 다음 5일간은 ΔS 의 값이 변하지 않고 있는데, 이는 이 기간 동안 에너지의 부족으로 기본 계층만이 동작하고 있기 때문이다. 물론 기본 계층도 센싱 데이터의 저장으로 인하여 저장 공간을 사용하므로 $S_{residual}$ 의 값은 감소한다.

그림 9는 저장 공간이 고갈되는 노드의 수를 시간에 따라(0부터 싱크 노드가 연결되기 전까지) 나타낸 그래

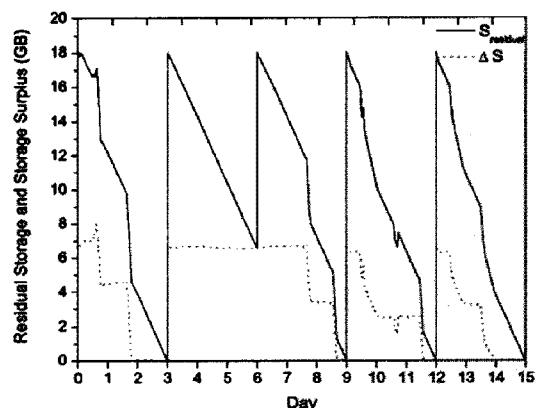


그림 8 노드 9의 사용 가능 저장 공간과 안정성을 위해 할당 가능한 여분의 저장 공간의 변화 추이

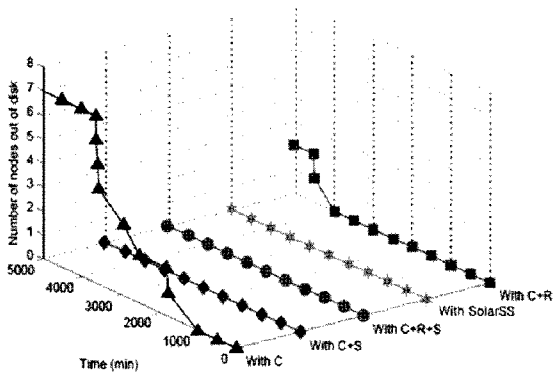


그림 9 시간에 따른 저장 공간 고갈 노드 수 변화

프이다. 그림에서 보듯이, 이 기간 동안 SolarSS는 저장 공간이 고갈된 노드가 하나도 없다. 반면, 데이터 분배 계층이 활성화 되지 않은 C 또는 C+R 기법에서는 저장 공간이 고갈된 노드가 나타나게 되는데, 특히 C+R 기법에서는 약 2000분 정도에서 벌써 7개의 노드에 저장 공간이 없어지고 있고, 이는 큰 데이터 손실을 야기한다. C+S와 C+R+S의 경우 저장 공간이 고갈된 노드는 없으나, 앞서 에너지의 측면에서 살펴보았듯이 에너지의 비효율적 사용으로 인한, 즉 에너지 고갈로 인한 데이터의 손실이 발생할 수 있다.

이처럼 SolarSS는 에너지의 사용 뿐 아니라 저장 공간의 사용에 있어서도 매우 효율적이다. 즉, 저장 공간 고갈로 인해 야기되는 데이터의 손실을 최소화하고, 또한 적정량의 저장 공간을 데이터의 안정성을 위해 사용하고 있다.

7.2.3 데이터 손실 비교

모든 노드들이 서로 다른 초기 에너지 값과 저장 공간을 가지고 있지만, 실험이 끝난 후 측정된 안정성 레벨 평균값 β 는 2.9~4.2 사이의 값으로 거의 비슷하였다. 전체 평균 안정성 레벨은 3.56 인데, 이것은 평균적으로 한 데이터 블록에 대해 $K/3.56=3.37$ 개의 인코딩된 원소 데이터가 한 노드에 저장되어 있음을 의미한다. 따라서 한 노드가 고장이 났을 경우에도, 이 데이터 블록에 대해서 $K-3.37=8.63$ 개의 인코딩된 데이터를 다른 노드들로부터 얻을 수 있음을 의미하고, 이 수치는 k (8)보다 크므로 LT 코드로 원본 데이터 블록을 재구성할 수 있음을 의미한다.

그림 10은 네트워크에서 각각 1개, 2개, 3개의 노드가 죽었을 경우, 발생할 수 있는 데이터 손실의 양을 보여 준다. 우리는 두 가지 종류의 데이터 손실을 측정하였는데, 하나는 에너지 고갈로 인한 데이터 손실이고, 다른 하나는 고장 노드로 인하여 충분한 원소 데이터를 받을 수가 없어서 원본 데이터 블록을 재구성할 수 없을 때 생기는 데이터 손실이다. 또한 이러한 데이터 손실과 관련한 성능 비교를 위해 SolarSS를 C, C+R+S, 그리고

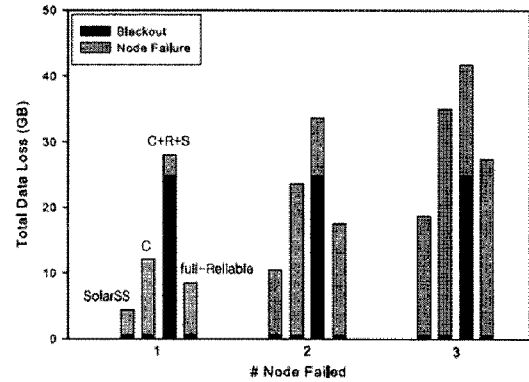


그림 10 고장 노드의 개수에 따른 데이터 손실 비교

full-Reliable 기법과 비교하였다. 앞서 설명한 것처럼, C기법은 데이터 안정성을 위한 선택 계층(복제와 분배 계층)을 전혀 수행하지 않은 것이고, C+R+S 기법은 데이터의 안정성을 높이기 위해 항상 선택 계층을 활성화 시킨 기법이다. 마지막으로 full-Reliable 기법은 (문턱 값을 기준으로 삼지 않고) 배터리가 완전 충전이 되었을 경우에만 선택 계층을 활성화 시키는 기법이다. 이는 배터리가 완전 충전되었을 경우 배터리의 에너지를 사용하지 않으면 수집되는 태양 에너지를 버려야 하기 때문이다. 그림에서 알 수 있듯이 SolarSS가 가장 낮은 데이터 손실을 보였다. 비록 C+R+S가 고장 노드로 인한 데이터 손실 면에서 가장 좋은 값을 보였지만, 에너지 고갈로 인한 데이터 손실이 너무 커서, 전체적으로 가장 큰 데이터 손실이 발생하였다. 반대로 C 기법은 고장 노드로 인한 데이터의 손실이 매우 컸고, full-Reliable 기법은 다른 앞서 살펴본 두 가지 기법에 비해 낮은 데이터 손실을 보였지만, SolarSS에 비해 데이터 안정성을 위해 사용하는 에너지의 양이 상대적으로 적기 때문에 역시 고장 노드로 인한 데이터의 양이 SolarSS보다 컸다.

8. 결론

태양 에너지는 주기적이고 끊임없이 공급될 수 있는 에너지라는 점에서 센서 노드에 아주 매력적인 에너지원이지만, 공급되는 양이 계속해서 바뀌고, 또 그 양을 예측 할 수 없으므로, 이를 센서 노드에 적용하려면 고려할 점이 많이 있다. 이 논문에서 우리는 SolarSS라고 하는 저장 중심의 태양 에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터의 안정성을 향상시키기 위한 파일 서비스에 대하여 살펴보았다. 주지하다시피, 시스템의 리소스(에너지, 저장 공간)사용은 데이터의 안정성의 확보와 이율배반 관계에 있다. 우리는 이 관계를 수식화하여, 데이터의 안정성을 위해 할당될 리소스의 양을 결정하였다. 즉, SolarSS는 에너지의 상태와 저장 공간의 상태에 따

라 수행되는 계층을 선택하는데, 이에 따라 안정성 확보를 위한 리소스가 할당되어 선택 계층(데이터 복제 및 분배 계층)이 활성화 될 경우, 데이터의 중복과 분배를 통하여 손실되는 데이터의 양을 최소화 한다. 아울러 우리는 이러한 SolarSS의 성능을 실제 구현된 실내/외 테스트베드를 통해 실험함으로써 그 효과를 검증하였다.

참고 문헌

- [1] A. Arora, R. Ramnath, E. Ertin, P. Sinha, S. Bapat, V. Naik, V. Kulathumani, H. Zhang, H. Cao, M. Sridharan, S. Kumar, N. Seddon, C. Anderson, E. Herman, N. Trivedi, C. Zhang, M. Nesterenko, R. Shah, S. Kulkarni, M. Aramugam, L. Wang, M. Gouda, Y. Choi, D. Culler, P. Dutta, C. Sharp, G. Tolle, M. Grimmer, B. Ferreira, and K. Parker, "Exscal: Elements of an extreme scale wireless sensor network," In *RTCSA '05*, Washington DC, USA, 2005.
- [2] T. He, S. Krishnamurthy, L. Luo, T. Yan, L. Gu, R. Stoleru, G. Zhou, Q. Cao, P. Vicaire, J. A. Stankovic, T. F. Abdelzaher, J. Hui, and B. Krogh, "Vigilnet: An integrated sensor network system for energy-efficient surveillance," *ACM Trans. Sen. Netw.*, 2(1):1-38, 2006.
- [3] T. Liu, C. M. Sadler, P. Zhang, and M. Martonosi, "Implementing software on resource-constrained mobile sensors: experiences with impala and zeb-ranet," In *MobiSys '04*, New York, USA, 2004.
- [4] R. Szewczyk, A. Mainwaring, J. Polastre, J. Anderson, and D. Culler, "An analysis of a large scale habitat monitoring application," In *SenSys '04*, New York, USA, 2004.
- [5] G. Tolle, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, N. Turner, K. Tu, S. Burgess, T. Dawson, P. Buonadonna, D. Gay, and W. Hong, "A macro-scope in the redwoods," In *SenSys '05*, New York, USA, 2005.
- [6] M. Luby, "LT codes," In *FOCS '02*, Vancouver, Canada, 2002.
- [7] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," In *IPSN/SPOTS '05*, California, USA, 2005.
- [8] A. Kansal, J. Hsu, M. Srivastava, and V. Raghunathan, "Harvesting aware power management for sensor networks," In *DAC '06*, San Francisco, USA, 2006.
- [9] C. M. Vigorito, D. Ganesan, and A. G. Barto, "Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks," In *SECON '07*, San Diego, USA, 2007.
- [10] C. Alippi and C. Galperti, "An adaptive system for optimal solar energy harvesting in wireless sensor network nodes," *IEEE Trans. Circuits and Systems*, 55(6):1742-1750, 2008.
- [11] J. Taneja, J. Jeong, and D. Culler, "Design, modeling, and capacity planning for micro-solar power sensor networks," In *IPSN '08*, St. Louis, USA, 2008.
- [12] T. Voigt, H. Ritter, and J. Schiller, "Utilizing solar power in wireless sensor networks," In *LCN '03*, Bonn, Germany, 2003.
- [13] D. Noh, D. Lee, and H. Shin, "Qos-aware geographic routing for solar-powered wireless sensor networks," *IEICE Trans. Comm.*, E90-B(12): 3373-3382, 2007.
- [14] D. Noh, I. Yoon, and H. Shin, "Low-latency geographic routing for asynchronous energy-harvesting WSNs," *Journal of Netw.*, 3(1):78-85, 2008.
- [15] C. M. Sadler and M. Martonosi, "Dali: A communication-centric data abstraction layer for energy-constrained devices in mobile sensor networks," In *Mobisys '07*, San Juan, Puerto Rico, 2007.
- [16] L. Luo, C. Huang, T. Abdelzaher, and J. A. Stankovic, "Envirostore: A cooperative storage system for disconnected operation in sensor networks," In *INFOCOM '07*, Achorage, USA, 2007.
- [17] Y. Yang, L. Wang, D. K. Noh, H. K. Le, and T. Abdelzaher, "SolarStore: Enhancing data reliability in solar-powered storage-centric sensor networks," In *MobiSys'09*, Kracow, Poland, 2009.
- [18] L. Wang, Y. Yang, D. K. Noh, H. K. Le, T. Abdelzaher, and M. Ward, "AdaptSens: An adaptive data collection and storage service for solar-powered sensor networks," *RTSS'09* (in submission), [Online] Available: <http://www.cs.uiuc.edu/homes/dnoh/A.pdf>.
- [19] D. K. Noh, L. Wang, Y. Yang, H. K. Le, and T. Abdelzaher, "Minimum variance energy allocation for a solar-powered sensor system," In *DCOSS'09*, California, USA, 2009.
- [20] "Phidget Precision Voltage Sensor," [Online] Available: <http://www.phidgets.com/products.php?product id=1123>
- [21] "Phidget Current Sensor," [Online]. Available: <http://www.phidgets.com/products.php?product id=1119>
- [22] "Asus EEE PC 900," [Online]. Available: <http://eeeec.asus.com/global>
- [23] "X10 Smart Home Controller," [Online]. Available: <http://www.x10.com>.



노동건

2000년, 2002년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사 및 석사. 2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사. 2007년 9월~현재 UIUC 컴퓨터공학과 박사후연구원. 관심 분야는 Ad-hoc Network, Sensor Network, Mobile Computing