태양 에너지의 효율적 활용을 위한 센서 시스템의 에너지 공유 기법

노동건*

Energy-Sharing Scheme of the Sensor System for the efficient use of Solar Power

Dong Kun Noh*

요 약

본 논문에서는 여러 개의 센서 응용 프로그래밍이 함께 동작하는 공유형 태양 에너지 기반 센서 노드에서, 수집되는 태양 에너지의 효율적 활용을 위한 가상 에너지 시스템 기법을 소개한다. 가상 에너지 시스템은 한 센서 노드에서 동시에 수행되는 여러 응용들이 각각 자신이 사용할 에너지를 전체 시스템으로부터 분리하고 예약하여, 어느 정도 예측 가능한 성능을 기대할 수 있게 해주는, 에너지 시스템 추상화 계층이다. 실험 결과는 가상 에너지 시스템이 효율적이고 안정적으로 동작하여, 한 센서 노드에서 여러 응용이 조화롭게 실행됨을 보여주고 있다

ABSTRACT

In this paper, we introduce an efficient energy management using a notion of virtual energy system for shared solar-powered sensor network. Virtual energy system is an abstraction that allows sensor network applications on a node to reserve their own fractions of the shared solar cell and the shared rechargeable battery, hence achieving logically partition of a shared renewable power source. Our results show that our design and implementation are reliable, lightweight and efficient, allowing proper isolation of energy consumption among applications.

키워드

태양 에너지, 센서 네트워크, 센서 시스템, 에너지 공유, 에너지 가상화 기법

Key word

Solar energy, sensor network, sensor system, energy sharing, energy vertualization

* 배재대학교 컴퓨터공학과 (dnoh@pcu.ac.kr)

접수일자 : 2010. 10. 29

I. 서 론

기존의 배터리 기반 센서 네트워크는 에너지양의 제약으로 인한 네트워크 수명 단축이 큰 문제가 되었고, 이를 해결하고자 에너지 소모량을 최소화하는 방향으로 각 분야의 연구가 진행되어져 왔다. 그러나 최근에는 보다 근본적으로 이 문제를 해결하고자 배터리가 아닌 여러 가지 환경 에너지를 수집하여 센서 시스템에 적용 하는 기술[1, 2, 3]들이 활발하게 연구되고 있다.

그 중에서도 솔라 셀을 이용한 태양 에너지 수집 기술은 높은 에너지 수집 밀도(약 15mW/cm2 [4])로 인하여 관심이 높아지고 있는데, 이 정도의 에너지 밀도는 센서 시스템의 에너지 요구량을 충분히 넘어서는 수치이기 때문이다. 연구[4]에 의하면 일반적인 센서 시스템의 평균 에너지 소모량은 100uW-10mW 사이인데, 2005년 UCLA에서 개발한 솔라셀 기반 센서 노드인 Heliomote [2]의 경우에 평균 에너지 수집량이 25mW로서 센서 시스템의 파워 요구량을 충분히 맞추고도 남는다. 그림 1은 대표적인 솔라셀 기반 센서 시스템인 Solar-biscuit[1]과 Heliomote[2]를 보여준다.

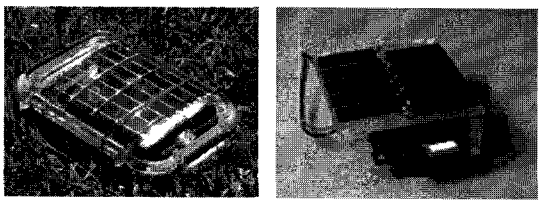

그림 1. Solar-biscuit과 Heliomote
Fig. 1 Solar-biscuit and Heliomote

이와 같은 장점에 반해, 현재 이러한 솔라 셀 기반 센서 시스템의 가장 큰 단점은 고비용이라는 점인데, 일반적인 배터리 기반 센서 노드가 수십 달러인데 비해, 솔라 셀 기반 센서 시스템은 상용화되지도 않았을 뿐더러, 그 개발비가 수백 달러에 이른다. 표 1은 UIUC에서 개발한 범용 태양 에너지 기반 센서 시스템[5]에서 사용한 각 부분의 비용을 보여준다. 전체 비용도 높거니와, 전체 비용에 대한 솔라 패널 비용의 비율이 매우 큼을 알 수 있다.

표 1. 솔라 패널 기반 센서 시스템 구축비용
Table. 1 The cost for building solar-powered sensor

컴퍼넌트	비용
내장형 PC	$ 150
재충전 가능 배터리	$ 65
음향 센서	$ 60
솔라 패널	$ 950
패널 지지대 구조물	$ 80
전류 및 전압 센서	$ 50
기타	$ 30
총액	$ 1385

그러나 만약 한 센서 시스템에서 다수의 응용 프로그램을 조화롭게 동작시킬 수 있다면, 즉 센서 시스템의 가용량(Availability)을 최대화할 수 있다면, 고비용의 문제점은 어느 정도 해소될 수 있을 것이다. 더욱이, 앞서 살펴본 것처럼 수집되는 에너지가 여러 응용을 돌릴 수 있을 만큼 충분하므로, 태양 에너지 기반 센서 시스템의 공유에 대한 본 연구는 그 가치가 충분하다 생각된다.

본 논문의 나머지 내용은 아래와 같이 구성되어 있다. II장에서는 태양 에너지 기반 센서 시스템의 구조를 실제 구현 사례에 비추어 살펴볼 것이고, III장에서는 에너지 공유의 근간이 되는 가상 시스템 기법에 대해 살펴볼 것이다. IV, V, VI장에서는 각 응용프로그램이 에너지를 예약하고, 정확히 예약한 만큼만 사용하기 위한 에너지 관리 기법을 설명한다. VII장에서는 실험을 통해 제안된 기법의 성능 검증을 하고, 마지막 VIII장에서 결론을 맺는다.

II. 태양 에너지 기반 센서 시스템

그림 2는 연구 [5]에서 수행한 태양 에너지 기반 센서 시스템의 구조도 이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 노드들은 크게 에너지 수집 시스템과 센서 시스템의 두 가지 서브시스템으로 구성되어 있다.

에너지 서브시스템에는 에너지 수집과 저장을 위해 솔라 패널과 재충전 가능 배터리가 포함되어 있다. 또한 배터리의 과충전과 디바이스들에 전기적인 충격을 줄 수 있는 가능한 요인들을 피하기 위해 충전 제어기가 사용되었고, 부하 제어기는 배터리가 거의 방전된 상태가

되면 배터리와 부하를 분리함으로서 배터리의 과방전을 막는 역할을 수행한다. 또한 시스템이 에너지 관련 정보를 얻게 하기 위하여 전압 센서와 전류 센서가 추가적으로 사용되었다.

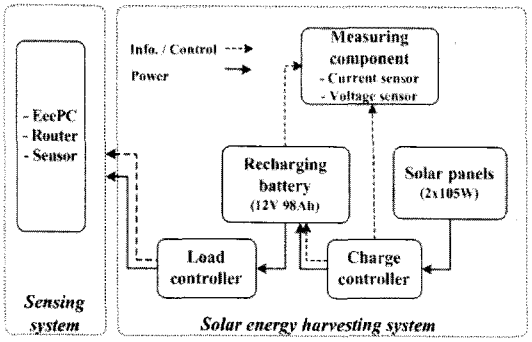

그림 2. 태양에너지 기반 센서 시스템의 구조도 [5]
Fig. 2 The architecture of a solar-powered sensor system

Ⅲ. 가상 시스템 기법

CPU나 메모리 혹은 에너지 등의 자원을 공유하기 위한 가장 좋은 방법은 가상화 기법을 이용하는 것이다. 즉, 한 시스템에서 동작하는 각각의 응용 프로그램을 하나의 가상 시스템으로 간주하는 것인데, 이렇게 함으로서 각각의 가상 시스템은 자신만의 자원을 분리 시켜서 독립적으로 관리할 수 있게 된다. 우리가 일반적으로 많이 사용하는 VMWare나 Xen과 같은 기술이 대표적인 예이다. 본 연구에서는 각 응용프로그램이 자신의 에너지 시스템을 관리하는 하나의 가상 시스템으로서 동작하도록 한다.

센서 네트워크에서 에너지 가상화와 관련된 가장 최근의 연구는 UIUC에서 수행한 [6]인데, 이는 배터리 기반 센서 시스템을 위한 것이므로 에너지 소비 모델만을 가정하고 있다. 반면 태양 에너지 기반 센서 시스템은 주기적으로 에너지가 충전되고, 충전되는 에너지의 양이 시간마다 다르기 때문에 에너지 소모 모델과 함께 에너지 수집 모델이 함께 고려되어야 한다. 그림 3은 솔라 셀 기반 센서 시스템에서 여러 개의 응용프로그램이 가상 시스템으로서 동작하는 모습을 보여주고 있다. 각 가상 시스템은 솔라 셀과 재충전 가능 배터리로 이루어진 가상 에너지 시스템을 관리한다.

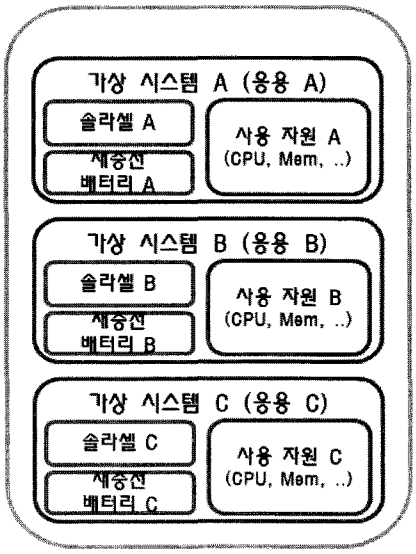

그림 3. 여러 개의 가상 시스템으로 구성된 태양 에너지 기반 센서 시스템
Fig. 3 Solar-powered sensor composed of several virtual machines

Ⅳ. 가상 시스템의 에너지 예약

태양 에너지 기반 센서 시스템에서 동작하는 각각의 가상 시스템들은 자신이 얼마만큼의 솔라 셀과 배터리를 사용할 것인지 실제 시스템에서 동작하는 에너지 예약 관리자에게 미리 예약을 하여야 한다. 그러면 에너지 예약 관리자는 현재 예약 상태 등을 고려하여, 이러한 예약이 가능한지의 여부를 결정한다. 이 후 에너지 가상화 관리자가 각 가상 시스템이 사용할 에너지 자원(솔라 셀과 재충전 배터리)의 크기를 확정한 후, 할당하게 된다. 그림 4는 각 가상 시스템과 실제 시스템의 에너지 예약 관리자 및 에너지 가상화 관리자 사이의 관계를 보여주고 있다.

에너지 자원이 할당된 후 각 가상 시스템들은 자신에게 할당된 양을 초과하지 않는 범위 내에서 주어진 에너지를 최대한 활용할 수 있도록 동작해야 한다. 이를 위하여 가상 시스템들은 자신이 사용한 에너지양을 지속적

으로 업데이트하여야 한다. 그러나 각 가상 시스템이 사용하는 에너지양을 실제로 측정하는 것은 거의 불가능하므로, 이를 예측하고 계산하는 작업이 필요하다. 이는 다음 장에서 살펴본다.

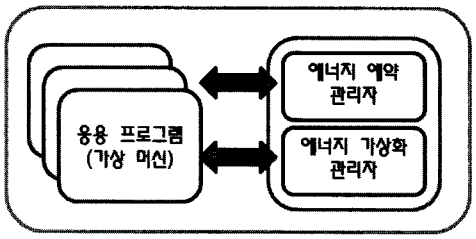

그림 4. 에너지 예약 및 할당을 지원하기 위한 시스템 모델
Fig. 4 System model for supporting an energy reservation and allocation

V. 가상 시스템의 에너지 소모량 예측

각 가상 시스템의 에너지 상태를 파악하기 위해서는 가상 시스템의 에너지 소모량을 계산하는 작업이 필요하다. 현재 시간 t에 가상 시스템 i 의 에너지 소비율을 $P[i]_t$라고 하면, 이는 아래와 같이 계산 될 수 있다.

$$P[i]_t = A[i]_t^{cpu} C^{cpu} + A[i]_t^{read} C^{read} + A[i]_t^{write} C^{write} + A[i]_t^{send} C^{send} + A[i]_t^{receive} C^{receive} + C^0$$

$A[i]_t^{cpu}$, $A[i]_t^{read/write}$, $A[i]_t^{send/receive}$는 시간 t에서 가상 시스템 i 의 CPU 사용량, 디스크를 읽고 쓰는 양, 데이터를 보내고 받는 양을 의미한다. 이 세 가지 작업들이 에너지 소비의 대부분을 차지하기 때문에, 우리는 에너지 소비 모델에서 이 세 가지 부하들만을 고려하고 있다. 이 세 값들은 실행 시간에 실시간으로 모니터링하고 프로파일링 함으로서 얻을 수 있다.

남은 문제는 위 식에서 C로 표현된 계수들을 결정하는 일이다. 이 계수들은 실제 시스템의 특성을 반영하기 때문에, 각 시스템마다 고유하다. 가상 시스템들은 한 시스템 내에서 동작하므로, 당연히 모든 가상 시스템에서는 같은 계수들을 사용하게 된다. 이 계수들은 아래 실제 시스템의 파워 소모량 선형식을 사용하여 구할 수 있다.

$$P_t = A_t^{cpu} C^{cpu} + A_t^{read} C^{read} + A_t^{write} C^{write} + A_t^{send} C^{send} + A_t^{receive} C^{receive} + C^0$$

P_t는 실제 시스템의 에너지 소비율이므로, 전류 센서를 이용하여 쉽게 얻어낼 수 있고, A_t^{cpu}, $A_t^{read/write}$, $A_t^{send/receive}$들도 실제 시스템의 부하들로서 실시간으로 모니터링 할 수 있으므로, 각 계수 값들을 위 선형식의 선 맞춤(curve fitting) 기법을 통해 구할 수 있다. 많은 모니터링을 통하여 위의 선형식을 여러 번 풀어낼수록 계수 값들이 정확해 진다. 따라서 실제로 센서 시스템을 필드에 배치하기 전에 오프라인에서 많은 실험을 통해 이 계수 값들을 얻어내는 것이 좋다.

VI. 가상 시스템의 에너지 관리

IV절에서 살펴본 것처럼, 각 가상 시스템은 자신이 사용할 솔라 셀과 배터리의 크기(portion)를 예약하게 된다. 예를 들어 가상 시스템 i 가 솔라 셀의 X_i%를 예약하고, 충전 배터리의 Y_i%를 예약 하였다고 하자. 그러면 t 시간에 가상 시스템 i의 에너지 수집 속도 $H[i]_t$ 와 에너지 사용속도 $S[i]_t$는 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$H[i]_t = X[i]H_t$$
$$S[i]_t = V[i]_t S_t$$

이 식에서 H_t, S_t는 전체 시스템의 에너지 수집 속도와 사용 속도로써, 전류 센서를 통해 얻을 수 있고, $V[i]_t$는 $P[i]_t/P_t$ 이다.

가상 시스템의 에너지 관리를 위해서 가장 필요한 것은 가상 시스템의 배터리, 즉 가상 배터리의 관리인데, $H[i]_t$와 $S[i]_t$를 이용하여 아래와 같이 t 시간에 가상 배터리에 남아 있는 에너지양 $E[i]_t$를 계산할 수 있다.

$$E[i]_0 = Y[i]E_0$$
$$E[i]_t = E[i]_{t-d} + H[i]_{t-d} - S[i]_{t-d}$$

이 식에서 E_0는 실제 시스템의 초기 배터리 양을 의미하고, d는 $E[i]_t$가 갱신되는 주기이다.

각 가상 시스템은 주기적으로 $E[i]_t$를 계산하여, 실제 시스템의 에너지 가상화 관리자(그림 4 참고)에게 그 값을 전달한다. 에너지 가상화 관리자는 이 값을 검사하여 특정 문턱 값($E_{LowerBound}$)보다 낮으면, 그 가상 시스템을 수면 상태로 만들어 에너지를 보존한다. 추후 이 값이 문턱 값보다 높아지면 다시 활성화 상태로 바꾸게 된다.

이렇게 함으로서 각 가상 시스템은 자신이 할당 받은 에너지 리소스들을 최대한 활용할 수 있게 된다.

Ⅶ. 실험 결과

본 논문의 가상화 기법을 검증하기 위해 우리는 간단한 C++을 사용한 간단한 시뮬레이터를 작성하여 실험을 하였다. 그림 5는 솔라 셀 기반 센서 시스템에서 동작하는 두 개의 응용 프로그램(가상 시스템)이 사용한 각각의 에너지양을 보여주는 그래프이다. 이 실험에서 응용프로그램 1은 솔라 셀과 재충전 배터리 두 가지 모두 70%를 예약하였으며, 응용 프로그램은 2는 두 가지 모두 30%를 예약하였다. 그래프에서 보인 것처럼, 두 프로그램 모두 자신이 예약한 에너지 리소스 범위를 벗어나지 않으면서, 즉 서로의 리소스를 침해하지 않으면서, 주어진 에너지를 최대한 활용함을 알 수 있다.

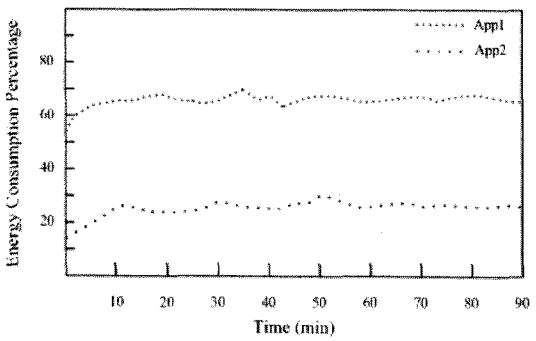

그림 5. 두 응용 프로그램의 에너지 사용량
Fig. 5 Energy consumption of the two different applications

아울러 그림 6에서 보이듯이 응용 프로그램이 3개일 경우에도 무난한 성능을 보여주었다. 그림 6에서 세 응용프로그램은 각각 10%, 30%, 60%의 에너지 자원을 예약하였다.

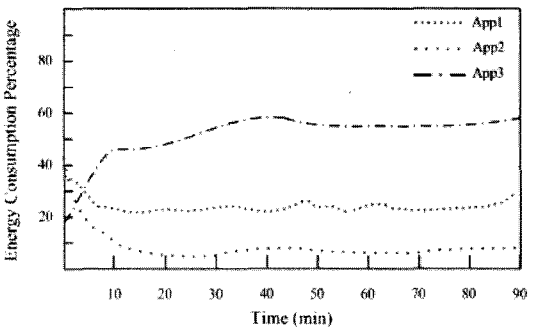

그림 6. 세 응용 프로그램의 에너지 사용량
Fig. 6 Energy consumption of the three different applications

Ⅷ. 결 론

태양 에너지 기반 센서 시스템의 경우, 풍부한 에너지 수집량에도 불구하고, 높은 가격 때문에 항상 부담이 되어왔다. 본 논문에서는 이를 어느 정도 보완하기 위해, 하나의 센서 시스템에서 여러 개의 센싱 응용 프로그램이 동작할 수 있는, 에너지 가상화 기법을 제안하였다. 센서 네트워크는 여러 개의 센서 시스템들로 이루어지기 때문에, 본 연구는 고비용으로 구축한 태양 에너지 기반 센서 네트워크의 효율적 활용에 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

요컨대, 본 논문의 주요 기여점은 다음과 같다. 첫째로 본 논문은 에너지 분리와 예약 등 에너지 가상화 기법을 위한 추상화 계층을 제공하였다. 따라서 응용이나 OS에 별도의 수정을 가하지 않아도, 여러 개의 응용 프로그램이 조화롭게 에너지를 공유할 수 있다.

둘째, 태양 에너지 기반 센서 시스템은 배터리 기반 센서 시스템과는 달리 에너지의 소비의 최소화에 목적을 두는 것이 아니라 수집되는 에너지를 최대한 활용하는 것에 목적을 둔다. 우리의 에너지 가상화 기법은 수집되는 태양 에너지를 여러 응용이 최대한 활용할 수 있는 기반이 된다. 그러나 현재 본 연구는 시뮬레이터를 통한 검증만이 완료된 상태이다. 현재 오픈 소스인 가상화 프로그램 Xen을 이용하여, 에너지 가상화와 관련한 API를 구현 중에 있다. 이를 완료하면 내장형 리눅스 등이 동작하는 센서에서의 에너지 가상화 기법이 현실화가 될 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, T. Aoyama, "Solar biscuit: a battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications," IEEE INSS, 2005.

[2] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, M. B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," ACM Trans. on Embedded Computing Systems, vol. 6, no. 4, pp. 1 - 38, 2007.

[3] C. Alippi, C. Galperti, "An adaptive system for optimal solar energy harvesting in wireless sensor network nodes,", IEEE Trans. on Circuits and Systems, vol 55, no 6, pp. 1742 - 1750, 2008.

[4] I. Stojmenovic, Handbook of Sensor Network, Wiley, 2006.

[5] 노동건, "태양 에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터의 안정성을 향상시키기 위한 적응형 저장 시스템", 정보과학회 논문지 - 시스템 및 이론, 36권 5호, pp. 360-370, 2009.

[5] Q. Cao, D. Kass, N. Pham, Y. Sarwar, T. Abdelzaher, "'Virtual Battery: An Energy Reserve Abstraction for Embedded Sensor Networks,'' IEEE RTSS, 2008.

저자소개

노동건 (Dong Kun Noh)

2000 서울대 컴퓨터공학과 학사
2002 서울대 컴퓨터공학부 석사
2007 서울대 컴퓨터공학부 박사
2007-2010 UIUC 박사후연구원
2010-현재 배재대학교 전임강사
2010 NBiS, PMECT TPC
2011 ICCCN/PMECT Co-Chair
※관심분야 : 모바일 네트워크, 센서 네트워크, 내장형 시스템, 내장형 OS