

측정 기반 시스템 수준의 전력 소모 분석

홍대영¹, 김제웅², 임성수³

국민대학교 컴퓨터공학과 임베디드시스템 연구실

{vicente¹, sslim³}@kookmin.ac.kr

tall190²@hanmail.net

Measurement-based System-Level Power Consumption Analysis

Daeyoung Hong¹, Jewoong Kim², Sung-Soo Lim³

ES Lab., School of Computer Sci. & Eng., Kookmin University

요 약

오늘날 많은 임베디드 시스템이 배터리를 통해 전력을 공급한다. 이처럼 제한적인 배터리 용량 때문에 임베디드 소프트웨어는 개발 시에 전력소비를 고려하여 디자인하여야 한다. 이와 같은 이유로 최근 저전력 디자인과 소프트웨어 소비전력 분석 및 분석에 대한 연구가 두드러지게 진행되고 있다. 측정 기반 전력 소모 분석 기법의 대표적인 부류인 명령어 수준 전력 분석 기법이 CPU와 메모리의 전력 소비만을 고려하는 점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 시스템 전체의 소비 전력을 분석하기 위하여 이벤트 방식의 전력 소모 분석 기법을 제안한다. 사용자는 소비전력을 모니터링하고 싶은 코드 구간에 대해 이벤트로 지정하고 해당 이벤트가 발생하는 동안 소비되는 전력을 DAQ 장비로부터 측정된 후 결과를 바탕으로 소프트웨어의 수행시간, 소비전력량, 전력소비 병목현상, 커널 이벤트의 발생 빈도 및 횟수 등을 파악하여 소프트웨어의 성능을 계층적으로 분석할 수 있는 데이터를 제공한다.

1. 서론

오늘날 많은 임베디드 시스템이 배터리를 통해 전력을 공급한다. 제한된 배터리 용량 때문에 임베디드 소프트웨어는 개발 시에 전력소비를 고려하여 설계하여야 한다. 이와 같은 이유 때문에 최근에 저전력 디자인과 소비전력 분석에 대한 연구가 두드러지게 진행되고 있다.

임베디드 소프트웨어의 소비전력을 분석하기 위한 전력 소모 분석 기법은 크게 시뮬레이션 기반 전력 소모 분석 기법과 측정 기반 전력 소모 분석 기법으로 나뉘어진다. 시뮬레이션 기반 전력 소모 분석 기법은 타겟 프로세서에 대한 시뮬레이션을 통해 시스템 구성요소들이 소비하는 에너지를 계산하여 소비전력을 분석하는 기법이다. 그리고 측정 기반 전력 소모 분석 기법은 실제 하드웨어 동작 시 소비되는 전력을 측정된 후 측정된 결과를 바탕으로 소프트웨어의 소비전력을 분석하는 기법이다. 시뮬레이션 기반 전력 소모 분석 기법은 일반적으로 구할 수 없는 프로세서의 회로 단위의 디자인 정보가 있어야만 시스템의 구성요소들의 소모 전력을 정확히 계산할 수 있는 단점이 있기 때문에 측정 기반 전력 소모 분석을 수행하는 것이 시뮬레이션 기반 전력 소모 분석보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

측정 기반 전력 소모 분석 기법에 대한 기존 연구는

명령어 수준 전력 소모 분석에 집중되고 있다. 이러한 연구들은 CPU나 또는 CPU와 메모리의 소비전력만을 분석하기 때문에 전체 시스템이 소비하는 전력을 정확히 분석하기가 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 사용자가 소비전력을 모니터링하고 싶은 구간들을 이벤트로 지정하고 해당 이벤트가 발생하는 동안의 실행시간, 소비전력, 발생하는 커널 수준 이벤트의 소비전력을 측정하여 사용자 수준 이벤트와 커널 수준 이벤트를 연계하여 전력소모를 계층적으로 분석하는 기법을 제안한다. 이러한 이벤트의 소비전력에 대한 분석 결과는 명령어 수준 전력 소모 분석 기법과 병합하여 소프트웨어 실행 시에 발생하는 시스템 전체의 소비전력을 분석하는데 필요한 자료가 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 측정 기반 전력 소모 분석 기법에 대한 관련 연구에 대하여 설명하고 3장에서는 이벤트 방식의 측정 기반 시스템 수준의 전력 소모 측정 기법에 대하여 설명한다. 4장에서는 측정된 값들을 소프트웨어의 소비전력을 분석하는 기법을 설명하고 5장에서는 실험을, 그리고 6장에서는 논문에 대한 요약과 향후 과제에 대하여 설명한다.

2. 관련 연구

참조문헌 [1]에서는 측정 기반 전력 소모 분석의 대표적인 예인 명령어 수준 전력 소모 분석에 대해 설명

하고 있다. 명령어의 실행에 소비되는 전력은 base cost와 inter-instruction cost로 구분할 수 있다.

Base cost는 명령어에 의한 연산을 실행하기 위해 필요한 전력량으로 프로세서마다 고정된 값을 가진다. 반면에 Inter-instruction cost는 명령어들의 연속적인 실행 시 발생하는 오버헤드 때문에 발생하는 추가 전력량을 나타낸다. 오버헤드가 발생하는 요인으로는 다른 명령어들이 실행될 때 발생하는 프로세서의 회로 상태에 대한 오버헤드와 파이프라인 지연, 쓰기 버퍼 지연 등과 같은 지연에 대해 발생하는 지연 전력 오버헤드, 캐시 미스 때문에 발생하는 캐시 미스 오버헤드가 있다.

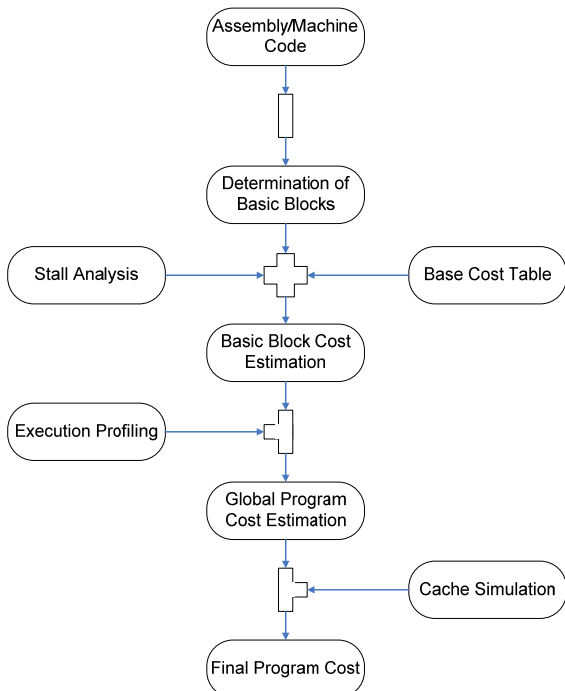


그림 1. 명령어 수준의 전력 소모 분석 절차

Base cost와 Inter-instruction const를 이용하여 소프트웨어의 소비전력을 분석하는 절차는 그림 1과 같다. 먼저 어셈블리 수준 혹은 기계어 수준의 프로그램을 베이직 블록으로 나누고 나누어진 베이직 블록의 명령어에 대한 명령어의 Base cost를 통해 계산한다. 명령어의 Base cost는 Base cost table에 의해 주어진다. 또한 파이프라인, 쓰기 버퍼 등과 같은 지연에 대한 소비전력을 분석하기 위해 stall analysis를 수행한다. 이를 통해 베이직 블록 단위의 소비 전력 값을 분석할 수 있다. 그런 다음 회로 상태에 대한 오버헤드를 분석하기 위하여 프로그램의 제어 흐름에 따라 execution profiler를 수행하여 전체적인 프로그램의 흐름에 따라 소비되는 전력을 분석하여 프로그램에 대한 소비전력을 분석한다. 마지막으로 캐시 미스에 대한 오버헤드를 분석하기 위하여 캐시 시뮬레이션을 수행하여 cache miss ratio를 구하고 이에 대한 소비전력을 계산하여 최종 프로그램의 소비전력을 분석한다.

참조문헌 [2]에서는 명령어 수준 전력 소모 분석을 이용하여 소프트웨어의 소비전력을 분석하는 환경을 구축하는 것에 대한 실험을 대하여 설명하였다. [3]은 외부 전력 측정 장치를 이용하여 전력 소비를 분석하는 Dynamic power profiling 기법을 설명하였다.

3. 이벤트 방식의 시스템 수준의 소프트웨어 소비 전력 측정

위 관련 연구들은 CPU만 혹은 CPU와 메모리의 소비 전력만을 대상으로 하는 소모 분석 기법이다. 위의 소모 분석 기법들의 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 이벤트를 이용하여 시스템 수준 소프트웨어 소비전력을 분석하는 기법을 제안한다.

이벤트 방식의 측정 기반 시스템 수준의 전력 소모 분석을 하기 위하여 전력 소모 값을 측정하는 기법은 이벤트 관리모듈, 이벤트 그리고 전력 측정 프로그램으로 구성되며 소비전력을 측정하는 절차는 그림 2와 같다.

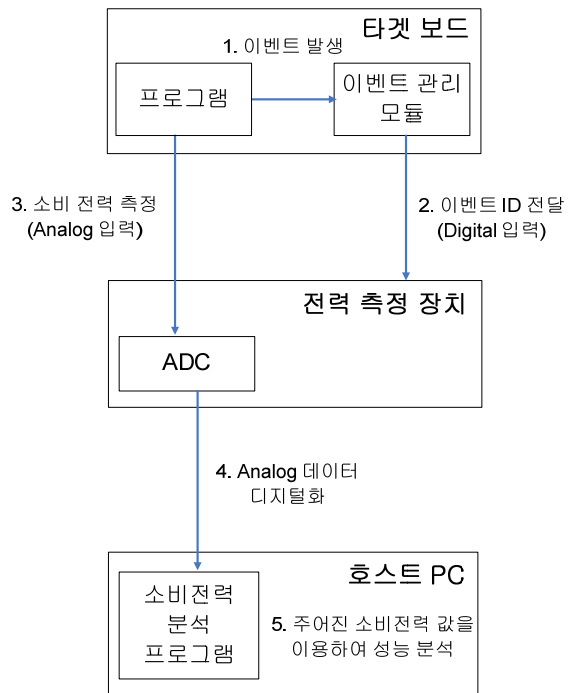


그림 2. 소비전력 측정 환경 구성 및 측정 절차

소프트웨어의 소비전력을 측정하기 위해 사용되는 이벤트는 커널 수준 이벤트와 사용자 수준 이벤트로 구성된다. 커널 수준 이벤트는 페이지 폴트, 메모리 연산, 인터럽트 핸들링 등과 같은 소프트웨어가 실행되는 동안 커널 내에서 수행되는 연산들에 대한 이벤트이다. 반면에 사용자 수준 이벤트는 사용자가 소프트웨어 내에서 소비전력을 측정하고 싶은 구간에 대한 단위이다. 즉 사용자 수준 이벤트는 그 구간 내에 발생하는 커널 이벤트들의 조합으로 나타낼 수 있다. 이러한 사용자 수준

이벤트와 커널 수준 이벤트 간의 관계는 이벤트 관리모듈을 통해 관리된다.

이벤트 관리모듈은 해당 이벤트의 발생과 종료 시에 이벤트에 대한 ID를 전력측정 장치로 전달하여 전력측정 장치가 해당 이벤트에 대한 소비전력을 측정하게 하고 이벤트가 발생하였을 때의 부가정보들을 관리하는 역할을 한다.

이와 같이 사용자 수준 이벤트와 커널 수준 이벤트, 그리고 시스템 구성요소들은 서로 연계되어 전력 소모가 발생하였을 때 시스템의 어떤 구성요소가 얼마만큼의 전력을 소비하는지 분석할 수 있다.

이벤트의 동작시간과 소비전력을 측정하기 위해 전력 측정 장치의 디지털 입력과 아날로그 입력을 사용한다. 디지털 입력은 이벤트의 동작시간을 측정하기 위해 사용되고 아날로그 입력은 발생한 이벤트의 전력 측정을 위한 전압 측정에 사용된다.

전력 측정 장치가 이벤트 관리모듈로부터 이벤트의 ID를 디지털 입력으로 받게 되면 타겟 보드로부터 소비 전력에 대한 아날로그 데이터를 입력 받는다. 이러한 아날로그 데이터는 전력측정 장치 내부에 있는 ADC 칩을 통해 디지털 데이터로 변환된다.

4. 소비전력 측정 값에 기반한 소프트웨어 성능 분석

소비전력 분석 프로그램은 전력 측정 장치에서 얻은 측정 값을 이용하여 사용자 수준 이벤트의 실행시간과 소비전력, 사용자 수준 이벤트가 실행되는 동안 발생하는 커널 수준 이벤트의 횟수 및 소비전력, 소비전력의 병목현상을 분석한다. 소비전력 분석 프로그램의 화면은 그림 3과 같다.

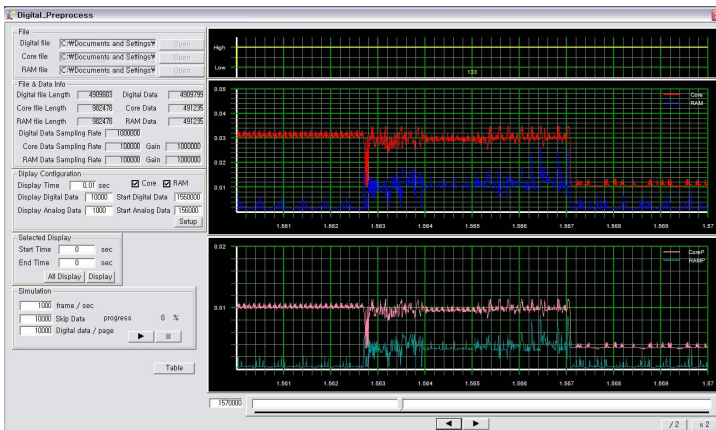


그림 3. 소비전력 분석 프로그램 화면

사용자 수준 이벤트가 수행되는 동안 소비되는 전력은 발생하는 커널 수준 이벤트들과 그 외 소프트웨어만의 소비전력으로 이루어진다. 그러므로 사용자 수준 이벤트와 그 구간 안에 발생하는 커널 수준 이벤트의 소

비전력을 분석하여 소프트웨어만의 연산에 대한 소비전력을 구할 수 있다.

소비전력의 병목현상이란 해당 사용자 수준 이벤트가 과도하게 전력을 소비하는 경우를 말한다. 병목현상이 발생하였을 때 위와 같은 계층적인 전력 소모 분석을 통해 시스템의 어느 부분에서 전력누수가 발생하였는지 파악할 수 있다.

이러한 측정 기반 전력 소모 기법은 소비되는 전력을 계층적으로 분석할 수 있다. 소비전력 병목현상이 발생하였을 때 소프트웨어 수준 이벤트와 커널 수준 이벤트를 연계하여 시스템의 어느 부분에서 병목현상을 발생시키는지 알아낼 수 있다. 이러한 정보를 이용하여 소프트웨어 전력 최적화 도구를 사용하여 소프트웨어의 소비전력 최적화를 수행할 수 있다.

5. 실험 결과

1) 실험 환경

본 논문에서는 소프트웨어의 소비전력을 측정하기 위한 전력 측정 장치로 National Instruments사의 NI6259 PCI 타입을 사용하였다. 실험하기 위한 구성도는 그림 4와 같다.

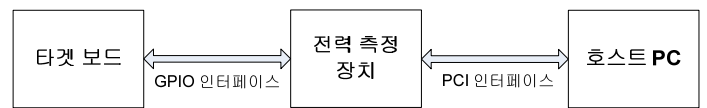


그림 4. 실험 환경

전력 측정 장치는 호스트 PC와 PCI 인터페이스를 통해 연결되어 있고 타겟 보드와는 GPIO 핀을 통하여 연결되어 있다.

2) 실험 및 결과

소비전력 측정 실험을 위하여 음악 재생 프로그램에 소프트웨어 수준 이벤트를 삽입(표1)하고 이벤트가 발생하는 동안 CPU와 메모리가 소비하는 전력량을 측정하였다. 현 단계에서는 소프트웨어 수준 이벤트의 소비전력만을 측정하였다.

표 1. 음악 재생 프로그램의 이벤트 ID

이벤트 ID	설명
0	각 이벤트의 종료 시점을 알림
1	프로그램 초기화 및 오디오 디바이스 파일 열기
2	재생할 오디오 파일에 대한 버퍼 할당
3	오디오 파일 열기
4	오디오 파일의 헤더 분석
5	오디오 파일 재생 (하드웨어 코덱 사용)

측정된 결과값(표2)을 보면 이벤트 1, 2, 3, 4번에서

CPU의 소비전력이 약 0.61(kW/s) 증가한 것을 발견했다. 5번 이벤트는 하드웨어 오디오 코덱을 사용한 음악 재생이기 때문에 CPU의 소비전력은 평균 값들과 큰 차이가 없다. 메모리의 소비전력은 이벤트 1, 2번에서 약 0.02 (kW/s) 정도 증가하는 것을 확인하였다. 이는 1, 2번 이벤트가 메모리 연산을 수행하기 때문에 더 많은 전력을 소비하는 것으로 볼 수 있다. 그림 5는 소비전력 측정 결과값들을 그래프로 나타낸 것이다.

표 2. 각 이벤트에 대한 전력소모 측정 결과 값

ID	수행 시간 (s)	CPU 평균 소비 전력 (kW/s)	메모리 평균소비 전력(kW/s)
0	1.508770	0.348030	0.0517653
1	0.006338	0.953570	0.0700858
0	0.005874	0.960534	0.0526687
2	0.006223	0.954802	0.0696521
0	0.005880	0.959233	0.0510379
3	0.005886	0.959386	0.0543211
0	0.005974	0.956640	0.0555675
4	0.005997	0.958421	0.0597528
0	0.005861	0.959149	0.0511172
5	2.608980	0.349201	0.0553843
0	0.744015	0.350627	0.0525681

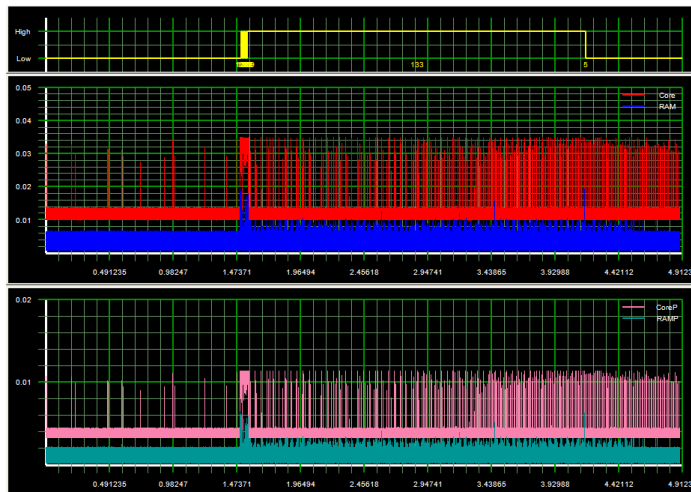


그림 5. 음악 재생 프로그램의 소비전력 그래프

6. 결론 및 향후 과제

본 논문에서 제안한 측정 기반 시스템 수준의 전력 소모 분석 기법은 CPU와 Memory 뿐만 아니라 시스템 전체의 전력소모를 측정 및 분석하고자 하였다. 본 논문은 사용자 수준 이벤트를 지정하여 해당 이벤트가 발생하였을 시의 수행시간, 소비전력을 측정하고 이를 이용하여 커널 수준 이벤트의 발생 빈도 및 횟수, 소비전력 병목현상 등을 측정하였다. 이와 같은 분석 결과를 바탕

으로 사용자 수준 이벤트와 커널 수준 이벤트가 연계되어 전체적인 시스템 전력 소모를 계층적으로 분석하고자 하였다.

이와 같은 결과는 소비전력 병목현상이 발생하였을 때 최적화되어야 하는 소프트웨어의 구간에 대한 정보를 제공할 수 있고 명령어 수준 전력 소모 분석 기법의 Base cost 값과 Inter-instruction cost 값을 사용하여 더욱 계층적인 소비전력을 분석할 수 있을 것이라 생각된다.

향후 과제는 다음과 같다. 첫 번째, 많은 커널 수준 이벤트를 추가하여 소프트웨어 수준 이벤트 분석 시 커널에서 수행되는 연산에 대한 정확한 전력소비를 파악할 수 있을 것이다.

두 번째, 현재는 사용자가 수동적으로 각 이벤트에 대해서 소비전력 측정을 위한 장치 코드를 삽입해야 한다. 이 과정을 효율적으로 수행하기 위해서 사용자가 소비전력을 측정할 부분에 장치 코드를 삽입해 주는 자동화 도구를 개발할 것이다. 더 나아가서는 소프트웨어에 대한 바이너리 파일을 분석하여 해당 이벤트를 삽입하는 도구로 발전시킬 것이다.

마지막으로 이벤트 방식 측정 기법을 통해 측정된 이벤트에 대한 소비전력 값과 명령어 수준의 소비전력 값을 이용하여 시스템 전체의 계층적 소비전력 모델링에 대한 연구도 진행할 계획이다.

참조 문헌

- [1] V. Tiwari, S. Malik, and Andrew Wolfe, "Power Analysis of Embedded Software: A First Step towards Software Power Minimization", VLSI Systems, IEEE Transactions on, vol. 2. pp. 437-445, Dec. 1994
- [2] S. Nikolaidis, Th. Laopoulos, and A. Chatzigeorgiou, "Developing an Environment for Embedded Software Energy Estimation", Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2003. Proceedings of the Second IEEE International Workshop on, pp. 20-24, 2003
- [3] Coleman D. Bagwell, Emil Jovanov, and Jeffery H. Kulick, "A Dynamic Power Profiling of Embedded Computer Systems", Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on, pp. 15-19, Mar. 2002