

# 성능 모니터링 카운터를 이용한 모바일 프로세서의 전력 예측

윤희성<sup>○</sup> 심재원 이상정

순천향대학교 컴퓨터학과

[iloveyr2@gmail.com](mailto:iloveyr2@gmail.com), [piring@gwbs.net](mailto:piring@gwbs.net), [sjlee@sch.ac.kr](mailto:sjlee@sch.ac.kr)

## Power Prediction Using Performance Monitoring Counter in Mobile Processor

Heesung Yun<sup>○</sup> Jaewon Sim Sang-Jeong Lee

Dept of Computer Science and Engineering, Soonchunhyang University

최근 반도체 집적도의 증가, 고밀도 시스템 패키징 및 쿨링 비용의 증가로 인해 저전력을 소모하는 컴퓨팅 시스템의 설계가 주요 이슈 및 해결과제로 대두되고 있다. 특히 제한된 용량의 배터리로 동작하는 모바일 시스템에서 저전력 설계는 필수적이다. 일반적으로 프로세서의 전력소모는 실행 중인 프로그램의 워크로드(workload) 특성에 따라 소모되는 전력이 크게 변한다. 따라서 프로그램 실행 시에 변화하는 전력소모를 미리 예측할 수 있으면 저전력 소모를 위한 동적 전력관리에 크게 기여할 수 있다.

본 논문에서는 모바일 프로세서에서 실행되는 프로그램 워크로드를 10ms 단위로 주기적으로 모니터링하여 프로그램 실행 중에 동적으로 프로세서의 전력소모를 예측하는 전력소모 예측모델을 개발 제안한다. 제안되는 전력소모 예측모델은 Intel Xscale 마이크로아키텍처 기반한 Marvell사의 PXA320 프로세서 상에서 제공되는 4개의 성능 모니터링 이벤트 - L2 캐시미스, 실행 명령어 수, 데이터 스톨, 분기미스 - 들로부터 선형 회귀분석(regression analysis) 모델을 적용하여 설계하였다.

본 논문에서 사용한 Marvell 사의 PXA320 (Monahans) / ARM 11 프로세서는 Intel XScale 마이크로아키텍처를 기반으로 하고 있으며, 동적 전압/주파수 스케일링을 지원한다. 프로세서의 성능 모니터링을 위해 4개의 32비트 성능 카운터를 제공하고, 70개 이상의 성능 이벤트들 중에서 모니터링 되는 이벤트를 지정할 수 있으며, 이들 중 실행 명령어 수 (INST), L2 캐시 미스 (L2MISS), 데이터 종속으로 인한 스톨(DATASTALL), 분기예측 미스 (BRMISS) 등을 카운트하는 성능 이벤트들을 선택하였다. 이 4개의 성능 이벤트들을 매 10ms 단위로 모니터링 하기 위해 타임 스탬프 카운터를 10ms 단위로 오버플로우가 발생하도록 초기화시키고, 오버플로우가 발생하면 PMI (Performance Monitoring Interrupt) 핸들러를 호출하였다. PMI 핸들러는 리눅스 커널에서 EBS (event-based sampling) 기법을 사용하여 LKM (loadable kernel module)로 구현하였다.

본 논문에서는 프로세서의 성능 모니터링 카운터를 사용하여 프로그램의 실행 변화를 모니터링하고 데이터를 수집하여 프로그램의 성능을 예측하는 모델을 선형 회귀분석(linear regression analysis)을 사용하여 개발한다. 회귀분석 모델은 주어진 설계영역에서 종속변수와 독립변수 간의 관계를 수학적으로 표현하는 모델로, 설계 영역의 임의의 지점에서 종속변수를 예측하기 위해 사용되며 선형 회귀분석 모델이 널리 사용되고 있다. 제안되는 전력소모 예측 모델은 PXA320 프로세서 상에서 제공되는 4개의 성능 모니터링 이벤트인 L2 캐시미스, 실행 명령어 수, 데이터 스톨, 분기미스 이벤트 값들을 독립변수로 하여 프로세서의 전력소모를 예측하는 선형 회귀분석을 적용하여 아래와 같이 모델링한다.

$$Power = \beta_0 + \beta_1 INST + \beta_2 L2MISS + \beta_3 DATASTALL + \beta_4 BRMISS$$

여기서  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$ 는 회귀계수(regression coefficients)로 각 항의 상대적인 기여도를 나타내며 회귀분석에 의해 구해지는 값이다.

본 논문에서 PXA320 프로세서의 전력 예측 모델링과 예측성능 평가를 위해 리눅스 커널 2.6.14 상에서 동작되는 Microvision 사의 MV320-LCD 개발보드를 사용하여 4개의 성능 이벤트와 프로세서의 전력소모를 측정하였다. 적용되는 벤치마크로는 임베디드 프로세서의 벤치마크로 널리 사용되는 MiBench 벤치마크 프로그램 중에서 JPEG 디코더와 GSM 디코더 벤치마크를 선정하여 전력예측 모델링 및 성능평가를 실시하였다.

\*"이 논문은 2007년 정부 (교육인적자원부) 의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임"  
(KRF-2007-지역대학우수과학자지원사업-D00394)

이들 벤치마크의 입력 데이터 세트로는 MiDataSets 을 사용하였다. MiDataSets 은 MiBench 벤치마크 프로그램에 대해 각각 20개의 입력 데이터 세트를 제공한다. 본 논문에서는 이들 20개의 입력 데이터 세트 중에서 홀수 번호의 10개 데이터(트레이닝 데이터)에 대해 JPEG, GSM 벤치마크를 실행하여 10ms 단위로 4개의 성능 이벤트들과 프로세서의 실제 소모되는 전력을 측정하였다. 그리고 성능 이벤트들을 독립변수로 하고, 전력을 독립변수로 하는 선형 회귀분석을 적용하여 5개의 회귀계수( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ )를 구하여 전력예측 모델을 구축하였다. 회귀분석을 위해 SPSS 통계 패키지를 사용하였다. 구축된 전력예측 모델의 정확도 측정을 위해 MiDataSets의 짝수번호 10개의 입력 데이터(예측 데이터)에 대해 JPEG, GSM 벤치마크를 실행하고 전력예측 모델을 적용하여 예측전력을 계산하고 실제 측정된 전력과 비교하여 예측 에러율을 산출하였다. 실험 시 운영체제 상에서 CPU 부하에 영향을 미칠 수 있는 부가적인 데몬 프로세스와 LCD 드라이버, AC97 등의 불필요한 드라이버들은 모두 비활성화시켰다. 또한 실험 및 평가 시 PXA320 프로세서의 동작 주파수는 806MHz 으로 고정하였다.

그림 1은 전력측정 실험환경 구성도를 보여주는 그림이다. PXA320 프로세서의 성능 카운터와 10ms 단위의 인터럽트 발생을 위해 리눅스 상에서 디바이스 드라이버를 제작하였다. 드라이버는 10ms 마다 트리거 신호를 생성하여 GPIO 인터페이스를 통하여 트리거 신호를 디지털 멀티미터(NI PXI-4071 DMM)로 전송한다. 디지털 멀티미터는 트리거 신호가 생성될 때마다 전류와 전압을 측정하여 LABVIEW 소프트웨어가 탑재된 컨트롤러(NI PXI-8106)로 송신한다. 송신된 전류와 전압은 LABVIEW 에서 수집하고 파일로 저장한다.

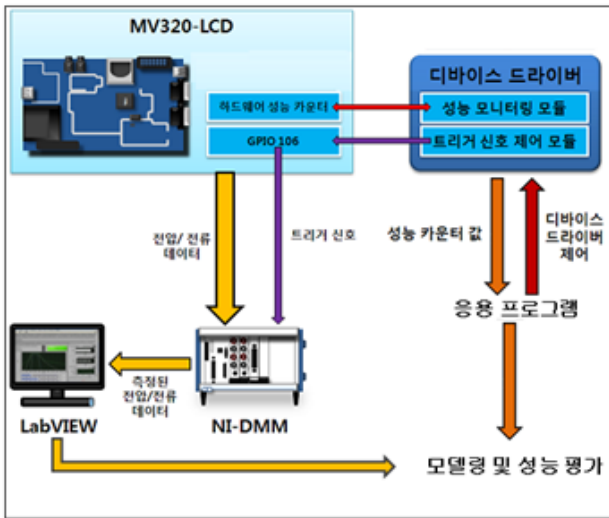


그림 1. 전력측정 실험환경

하여 회귀분석을 실시한 경우를 나타낸다. 본 논문에서 사용한 JPEG+GSM 모델을 적용한 전력예측 모델은 JPEG 벤치마크에 대해 0.46%, GSM 벤치마크에 대해 예측 데이터에 대해 0.58%의 전력예측 에러율을 보여 매우 정확하게 전력을 예측함을 알 수 있다. 반면에 JPEG 모델은 JPEG, GSM 벤치마크에 대해 각각 3.22%, 0.85%의 예측 에러율을 보였다. GSM 모델은 JPEG, GSM 벤치마크에 대해 각각 0.57%, 1.6%의 에러율로 전력을 예측하였다.

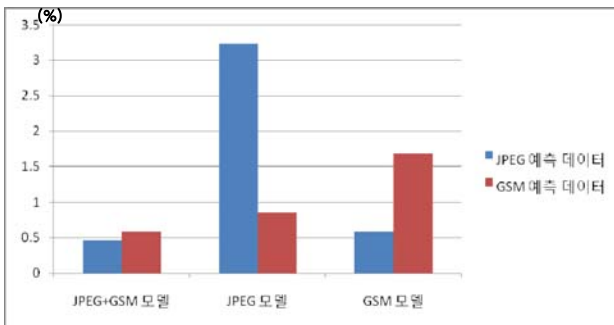


그림 2. 전력예측 에러율

이벤트로부터 추출하였다. 제안된 전력소모 예측모델은 MiBench 벤치마크 프로그램에 적용하고 실제 측정된 전력값과 비교한 결과 평균 0.52% 정도의 전력 예측율을 갖고 정확하게 프로세서의 전력소모를 예측하였다. 본 논문에서 제안한 모델은 임베디드 시스템의 전력소모를 줄이기 위한 DVFS 스케줄러의 판단기준으로 사용될 수 있다.

향후 프로세서의 좀 더 많은 성능 카운터 이벤트들을 추가적인 벤치마크들에 적용할 예정이다. 또한 개발된 전력예측 모델을 DVFS를 적용한 동적 전력관리 기법에 적용할 예정이다.