

효율적인 전력 관리 기법을 위한 ARM Mali-400MP의 Utilization 산출 방법 개선

김도한^o, 송욱, 김지홍

서울대학교 컴퓨터공학부

amos_doan@davinci.snu.ac.kr, wooksong@davinci.snu.ac.kr, jihong@davinci.snu.ac.kr

Improved Utilization Estimation Method in ARM Mali GPU for Efficient Power Management

Dohan Kim^o, Wook Song, Jihong Kim

Seoul National University

요 약

모바일 GPU의 소비 전력이 전체 전력 소모에 있어 큰 비중을 차지하게 됨에 따라 제한된 용량의 배터리를 전력원으로 사용하는 스마트폰에 있어 중요한 전력 관리 대상 중 하나로 대두되었다. 그러나 모바일 GPU로써 널리 사용되는 ARM Mali-400MP의 디바이스 드라이버를 분석한 결과, 전력 관리 기법에서 주로 사용되는 부하 평가 지표인 Utilization이 GPU의 구조와 특성을 제대로 반영하고 있지 않음을 발견하였다. 따라서 본 논문에서는 먼저 GPU의 구조와 특성을 고려하여 기존의 Utilization 산출 방법을 개선하였다. 또한, Utilization을 활용하는 대표적인 예인 전력 모델 개발과 DVFS 알고리즘에 적용하여 기존의 Utilization을 활용할 때와의 정확도와 전력 효율을 각각 비교함으로써 제안한 Utilization의 우수성을 검증하였다. 제안한 Utilization을 적용한 GPU 소비 전력 모델의 오차는 평균 11%로 기존 Utilization을 활용하였을 때의 오차 34.74%에 비해 훨씬 더 정확한 예측이 가능하였으며, DVFS 알고리즘에 적용하였을 경우에는 기존 기법 대비 최대 15%의 에너지 효율 향상이 가능하였다.

1. 서 론

스마트폰은 최근 널리 보급되어 생활 환경의 핵심 장치로 부상하였다. 또한 대중화와 함께 그 성능에 대한 요구 사항도 데스크탑 못지 않게 증가하였고, 이러한 소비자들의 요구를 만족시키기 위하여 스마트폰 제조사들은 치열한 성능 개선 경쟁을 벌이고 있는 실정이다. 특히 유려한 UI, 화려한 3D 게임 등 사용자들의 시각적 요구를 만족시키기 위해 모바일 GPU의 성능이 매우 중요하게 되었고, 이와 함께 시스템 소모 전력의 평균 20% [1]로 큰 비중의 전력 소모를 보여 제한된 용량의 배터리를 전력원으로 사용하는 스마트폰에 있어 매우 중요한 전력 관리 대상 중 하나로 대두되었다.

한편, 스마트폰의 전력 최적화 기법으로는 외부 계측 장비 없이 해당 컴포넌트의 소모 전력을 측정할 수 있도록 제조사에서 전력 예측 모델 [2]을 만들어 응용 및 시스템 개발자에게 제공하거나, 시스템 내부적으로 해당 컴포넌트에 공급되는 전압이나 동작 속도를 동적으로 조절하여 소비 전력을 줄이는 방법(DVFS) 등이 일반적이며 해당 컴포넌트에 작용하는 작업 부하를 나타내는 지표로서 제조사의 API나 디바이스 드라이버에서 제공하는 Utilization을 사용 또는 참고하고 있다. 따라서 제조사가 제공하는 Utilization은 컴포넌트의 부하를 정확하게 표현해야 하는 중요한 지표이다.

본 논문에서는 최근 스마트폰에 많이 탑재되고 있는 모바일 GPU IP(Intellectual Property)중 하나인 ARM의 Mali-400MP를 선정하여 먼저 디바이스 드라이버에서 제공하는 Utilization이 어떻게 산출되고 있는지 분석하였다. 이를 바탕으로 현재 제공되는 Utilization이 GPU에 작용하는 작업 부하를 제대로 반영하지 못함을 밝힌 후, 개선 방법을 제시하였다. 제시한 방안을 평가하기 위하여 개선된 Utilization을 이용한 ARM Mali-400MP의 소모 전력 예측 모델을 개발하여 기존 디바이스 드라이버에서 제공하는 Utilization 기반 모델과의 실측 대비 정확도를 비교하였고, 기존 디바이스 드라이버에서 제공하는 Utilization 기반의 DVFS 알고리즘에도 개선한 Utilization을 적용하여 그 성능의 향상을 확인함으로써 제안한 Utilization이 Mali-400MP에 작용하는 작업 부하를 더 정확하게 나타내고 있음을 보였다. 실험 결과 개선 모델의 오차는 기존 모델 대비 평균 23.7% 줄었으며, DVFS는 기존 기법 대비 최대 15%의 에너지 이득을 얻을 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 대상 GPU Mali-400MP의 구조와 디바이스 드라이버에서 제공하는 Utilization의 문제점을 밝힌다. 3장에서는 Utilization의 개선방법을 설명한 후 4장에서 전력 모델링과 DVFS의 성능을 평가한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 연구 동기

2.1 ARM Mali-400MP의 기본 구조

Mali-400MP는 멀티코어 구조로 1개의 Geometry Processor(GP)와 4개의 Pixel Processor(PP)로 구성되어있다. 동작 주파수 및 전압 레벨은 4개의 대역 (160MHz-0.875V, 266MHz-0.9V, 350MHz-0.95V, 440MHz-1.025V)이 제공되며, 칩 수준 DVFS에 의해 조절된다. DVFS는 디바이스 드라이버에서 단위시간마다 Utilization을 계산하고 미리 정의된 Utilization Threshold와 비교하여 주파수 및 전압 레벨을 조절한다.

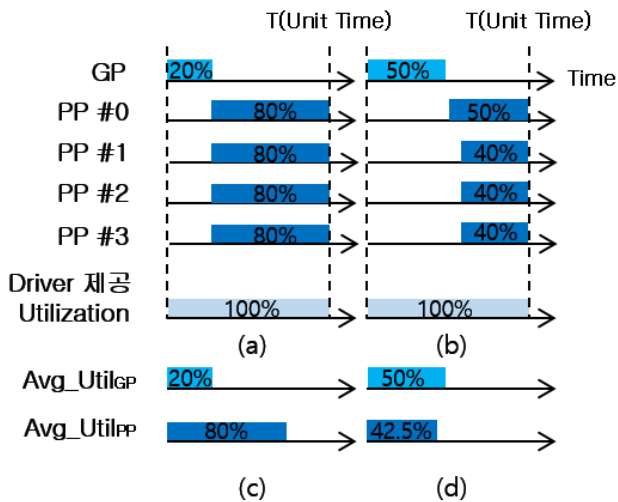


그림 1. 기존 Utilization과 개선한 Utilization

2.2 ARM Mali-400MP 디바이스 드라이버가 제공하는 Utilization의 문제점

Mali-400MP의 디바이스 드라이버상에서 제공하는 Utilization은 그림 1과 같이 단위 시간(T) 동안 하나 이상의 코어가 동작한 시간으로 계산된다. 이렇게 정의된 Utilization은 GPU의 부하를 제대로 반영하지 못하는데, 그 이유로는 다음과 같다.

첫째, 각 개별코어의 부하를 정확하게 반영하지 못한다. 예를 들어 그림 1의 (a)와 (b)는 각 코어 별 사용량이 상이하나 같은 Utilization을 갖는다. 이와 동시에 서로 다른 코어의 동작이 오버랩 되는 경우도 반영하지 못하는 문제점이 있다. 그림 1(a)처럼 특정 PP의 부하가 80%일 때 오버랩 되는 다른 PP들은 어떠한 부하 값을 갖더라도 Utilization은 항상 100%일 것이다.

둘째로 Utilization에 두 종류의 코어(GP와 PP)가 서로 다른 전력 특성을 갖고 있음에도 반영되지 않는다. 그림 1의 (a)와 (b)에서 GP의 작업 부하는 서로 다르지만, Utilization에서 이를 확인할 방법이 없다.

마지막으로 Utilization이 개별 코어 사용량보다 과대평가(Overestimate)되어 DVFS 수행 시 문제가 발생한다. 예를 들어 Utilization Threshold를 70%라 가정할 때, 그림 1 (a)와 같이 특정 코어(PP)의 부하가 Threshold값보다 크면 동작 주파수 대역의 상승은 합당하지만 (b)와 같이 각 코어 별 부하는 크지 않으나 계산되는 Utilization이 Threshold를

넘는 경우가 발생한다. 이 경우 각 코어의 관점에서는 주파수 조절이 필요 없으나 DVFS 정책상 높은 주파수 대역에서 동작하므로 추가 에너지 소모가 발생한다. 따라서 효율적인 전력 관리 기법을 위해서는 부하를 정확히 반영할 수 있도록 Utilization의 개선이 필요하다.

3. ARM Mali-400MP Utilization의 정확도 개선 방법

$$Avg_Util_{GP} = \frac{Sum\ of\ GP\ Active\ Time}{T}$$

$$Avg_Util_{PP} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 \frac{Sum\ of\ i_{th}\ PP\ Active\ Time}{T}$$

식 1. 개선한 Utilization의 계산식

Utilization이 GPU의 부하를 보다 정확하게 반영할 수 있도록 식 1과 같이 개선한다. 우선 단위 시간 동안 코어 각각의 Utilization을 구하고 코어의 종류에 따라 평균 GP Utilization과 평균 PP Utilization으로 계산한다.

이러한 정의에 따라 Utilization을 새로 계산하면 그림 1의 (c), (d)와 같다. 이로써 각 코어들이 서로 다른 부하를 가지더라도 더 이상 같은 Utilization을 갖지 않으며 코어의 동작이 서로 오버랩 되더라도 이를 반영하여 Utilization이 계산된다. 또한 코어의 종류(GP, PP)에 따라 Utilization을 두 개의 변수로 분리함으로써 코어 종류에 따른 전력 특성을 나타낼 수 있게 하였다.

$$DVFS_Utilization = MAX(Avg_Util_{GP}, Avg_Util_{PP})$$

식 2. 효율적인 DVFS를 위한 개선식

각 코어의 작업부하보다 Utilization이 과대평가되는 문제점은 DVFS를 수행할 때 식 2와 같이 평균 GP Utilization과 평균 PP Utilization 중 최대값을 이용하여 해결한다. 이로써 과대평가로 인한 주파수 대역의 증가를 방지할 수 있다. 예를 들어 그림 1의 (c)에서는 평균 PP Utilization이 Threshold를 넘게 되어 주파수 대역이 증가하지만 (d)에서는 주파수 대역의 변화가 없게 되어 비효율적인 에너지 소모를 방지할 수 있다.

4. 개선한 Utilization의 활용 및 평가

4.1 전력 모델 개발에의 활용 및 평가

$$P(Frequency) = \alpha_1 * Util + \alpha_0$$

식 3. 기존 Utilization 기반 전력 모델 식

전력 모델은 디바이스의 실측 전력과 상관도가 높은 변수들의 회귀분석을 통하여 추정 식을 생성한다. 보편적으로 식3과 같이 디바이스의 Utilization을 이용하여 전력 모델을

생성하며 적은 오차의 모델을 위해서는 Utilization이 실측 전력과 상관도가 높아야 한다. 그러나 Mali-400MP의 디바이스 드라이버에서 제공하는 Utilization은 GPU의 부하를 정확하게 반영하지 못하는 문제점이 있다.

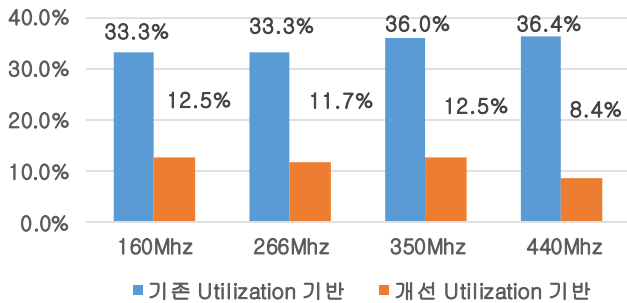


그림 2. Utilization 개선 전후 전력 모델의 평균오차

$$P(\text{Frequency}) = \alpha_2 * \text{Avg_Util}_{GP} + \alpha_1 * \text{Avg_Util}_{PP} + \alpha_0$$

식 4. 개선한 Utilization 기반 전력 모델 식

따라서 식 4와 같이 앞서 정의한 평균 GP Utilization과 평균 PP Utilization을 실측 전력과 선형 회귀 분석하여 전력 모델을 개선하였다. 그림 2는 구글 플레이 스토어로부터 선별한 12개의 게임 및 GPU 벤치마크 응용을 이용하여 4개의 주파수 대역에서 기존의 Utilization으로 생성한 전력 모델과 개선한 모델의 평균 오차를 비교한 것이다. 개선한 모델은 평균 11.2%의 오차를 보이며 평균 34.7%의 오차를 갖는 기존 모델보다 정확하였다.

4.2 DVFS 알고리즘에의 적용 및 평가

Mali-400MP는 Utilization을 이용하여 동작 주파수 및 전압을 동적으로 변경하는 DVFS를 드라이버 상에서 기본으로 제공한다. 그러나 2.2절에서 설명했듯이 Utilization이 각 코어의 실제 작업 부하보다 과대평가 되는 문제가 있어 필요 없는 주파수 대역의 증가로 인한 에너지 낭비가 발생하였다. 이를 개선하기 위하여 식2와 같이 새로운 지표를 이용하여 DVFS를 수행하도록 개선하였다.

제안한 기법을 평가하기 위해 총 13개의 게임을 대상으로 에너지 소모량과 평균 FPS를 기존의 기법과 비교하였다. 그림 3은 기존 DVFS 기법 대비 제안기법의 소모 에너지로, 평균 9.3%, 최대 15%까지 감소하였다. 에너지 이득이 작은 응용은 그림 1의 (a)와 같이 특정 코어의 작업 부하가 높아 주파수의 상승 요구가 합당하거나, 원래 낮은 주파수 영역에서 동작하기 때문에 개선의 폭이 크지 않았기 때문이다. 그림 4는 사용자 경험의 변화를 알아보기 위해 평균 FPS를 비교한 것으로 최대 4프레임 정도 차이를 보였으며 이는 사용자 경험 측면에서 큰 차이가 없는 수치이다.

5. 결론

최근 모바일 GPU가 차지하는 소비 전력의 비중이 증가됨

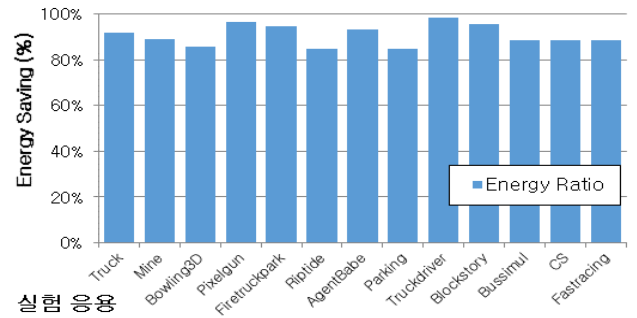


그림 3. 기존 DVFS 기법 대비 개선 기법 소모 에너지

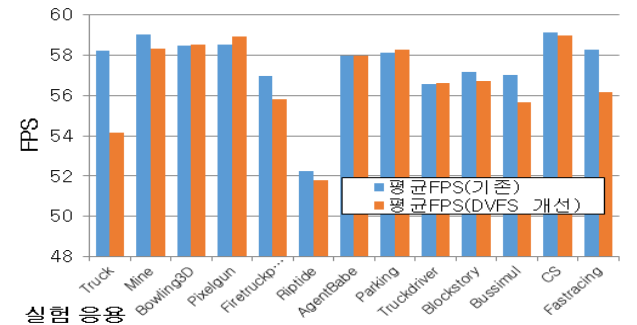


그림 4. 기존 DVFS 기법 대비 개선 기법의 평균 FPS

에 따라 중요한 전력 관리 대상으로 대두되었다. 따라서 본 논문은 Mali-400MP를 전력 관리 연구 대상으로 선정하여 디바이스 드라이버를 분석하였다. 그 결과, 제공되는 Utilization이 GPU의 부하를 정확히 반영하지 못함을 밝히고 개선 방법을 제시하였다. 제안한 방법을 평가하기 위하여 디바이스 드라이버에서 제공된 Utilization과 개선된 Utilization을 이용하여 전력 모델을 만들어 그 정확도를 비교하였고, DVFS 알고리즘에도 각각 적용하여 그 성능의 향상을 확인하였다.

감사의 글

이 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터 연구소에 감사 드립니다. 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-차세대정보-컴퓨팅기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0020724). 또한, 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013R1A2A2A01068260).

참고 문헌

[1] Kim, M. and Chung, S., "Accurate GPU Power Estimation for Mobile Device Power Profiling", In *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 2013.

[2] Yoon, C., Kim, D., Jung, W., and Kang, C., "Appscope: Application Energy Metering Framework for Android Smartphone using Kernel Activity Monitoring", In *Proceedings of USENIX Annual Technical Conference*, 2012.