

QoS를 고려한 스마트폰 GPU의 에너지 최적화 기법

(A QoS-Aware Energy Optimization Technique for Smartphone GPUs)

김도한[†] 송욱[†] 김형훈^{**} 김지홍^{***}
(Dohan Kim) (Wook Song) (HyungHoon Kim) (Jihong Kim)

요약 모바일 GPU의 소비 전력이 전체 시스템 소모 전력에서 큰 비중을 차지하게 됨에 따라 스마트폰에서 중요한 전력 관리 대상 중 하나로 대두되었다. 그러나 모바일 GPU로써 널리 사용되는 ARM Mali-400MP의 장치 드라이버를 분석한 결과, 전력 관리 기법으로 사용되는 장치 사용률 기반 DVFS 알고리즘이 부하가 요구하는 성능보다 높은 주파수로 GPU를 동작하게 하여 비효율적인 전력 에너지 소모가 발생하였다. 따라서 본 논문은 장치 사용률뿐만 아니라 스마트폰 응용의 서비스 품질 요소로써 초 당 프레임 수와 배터리 시간을 함께 고려하여 기존 DVFS에서 발생한 비효율적인 주파수 상승을 방지할 수 있는 전력 에너지 최적화 기법을 제안한다. 제안한 에너지 최적화 기법을 적용하면 성능저하 없이 기존 장치 사용률 기반의 DVFS 대비 최대 23%의 에너지 이득을 보였으며, 배터리 시간 연장을 위하여 최대 10%의 성능 하락을 허용한 경우, 최대 33%의 에너지 효율 향상이 가능하였다.

키워드: 모바일 GPU, 서비스 품질, 초 당 프레임 수, 배터리 시간

Abstract We proposed a novel energy optimization technique for smartphone GPUs, more aggressively lowering the GPU frequency while obtaining higher energy efficiency with a negligible negative impact on the GPU performance. In order to achieve the Quality of Service (QoS) specified by the smartphone application, the proposed optimization technique employed the minimal acceptable GPU frequency based on average Frames per Second (FPS) for each GPU frequency level. Our experimental results on a smartphone development board showed that the proposed technique can reduce the GPU energy consumption by up to 23% over the default DVFS algorithm with only a 0.45 frame drop.

Keywords: mobile GPU, quality of service, frames per second, battery time

-
- 이 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터 연구소에 감사 드립니다. 본 논문은 삼성전자 DMC 연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.
 - 이 논문은 2014 한국컴퓨터종합학술대회에서 '효율적인 전력 관리 기법을 위한 ARM Mali-400MP의 Utilization 산출 방법 개선'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

논문접수 : 2014년 8월 28일
(Received 28 August 2014)
논문수정 : 2014년 12월 19일
(Revised 19 December 2014)
심사완료 : 2015년 1월 24일
(Accepted 24 January 2015)

- † 학생회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부
amos_dohan@davinci.snu.ac.kr
wooksong@davinci.snu.ac.kr
- ** 비회원 : 삼성전자 DMC연구소 수석연구원
pastelom@samsung.com
- *** 종신회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부 교수(Seoul National Univ.)
jihong@davinci.snu.ac.kr
(Corresponding author임)

Copyright©2015 한국정보과학회 : 개인 목적이나 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 제42권 제5호(2015. 5)

1. 서론

스마트폰이 최근 널리 보급되어 생활환경의 핵심 장치로 부상함에 따라 고사양, 고화질의 시각 콘텐츠가 폭발적으로 증가하였다. 이러한 시각 콘텐츠인 고사양의 3D 게임, 유려한 UI 등을 문제없이 구동하기 위해서는 스마트폰에서도 데스크톱 PC와 같이 고성능의 GPU가 필요하게 되었다. 이에 스마트폰 제조사들은 모바일 GPU의 성능 개선을 위하여 CPU와 같이 코어의 수를 늘린 멀티코어 형태로 개발하거나 복잡한 셰이더 연산을 지원하도록 내부 구조의 복잡도를 증가시키게 되었다. 이러한 복잡도 증가로 모바일 GPU의 전력 소모가 시스템 전체 전력 소모에서 차지하는 비중이 계속해서 증가될 것으로 예상되었으며 연구 결과[1]에 따르면 최근 그 비율이 평균 20%에 이를 정도로 제한된 용량의 배터리를 전력 원으로 사용하는 스마트폰에 있어 매우 중요한 전력 관리 대상으로 대두되었다.

한편, 스마트폰에 탑재된 모바일 GPU의 전력 소비와 관련된 연구들은 주로 계측 장비 없이 응용 및 시스템 개발자에게 소모 전력을 측정할 수 있도록 전력 예측 모델을 만들거나 그 필요성을 주장하는 연구들[1-4]이 주를 이루었으나, 실제 에너지 최적화 기법과 관련된 연구는 부족한 실정이다. 그 이유로 대부분의 제조사들이 모바일 GPU의 내부 구현을 모두 공개하지 않아 스마트폰 이전의 모바일 GPU를 대상으로 한 연구[5]와 같이 렌더링 파이프라인을 고려하는 등 GPU에 특화된 다양한 에너지 최적화 기법 연구가 제한적이기 때문이다. 따라서 제조사들이 GPU 장치 드라이버를 통하여 주로 공개하고 있는 대표적인 에너지 최적화 알고리즘으로 부하량에 따라 성능을 동적으로 조절하는 DVFS(Dynamic Voltage Frequency Scaling)나 DPM(Dynamic Power Management)등의 효율을 향상할 수 있는 방향으로 에너지 최적화 연구가 필요하다.

본 논문에서는 최근 스마트폰에 많이 탑재되고 있는 모바일 GPU IP(Intellectual Property)중 하나인 ARM사의 Mali-400MP를 선정하여 먼저 장치 드라이버에서 기본으로 제공하는 에너지 최적화 기법인 GPU 장치 사용률(GPU Utilization) 기반 DVFS 알고리즘의 효율을 평가한다. 평가 결과, 실제 사용자가 체감 가능한 GPU 성능 지표인 초 당 프레임 수, FPS(Frames per Second)의 저하가 없음에도 불구하고 비효율적인 동작 주파수 상승이 빈번하게 발생하는 문제점을 밝힌다.

따라서 본 논문에서는 장치 사용률뿐만 아니라 GPU의 성능 지표인 FPS를 함께 고려하여 기존 DVFS 알고리즘에서 발생한 비효율적인 전력 소모량을 줄이고 동시에 스마트폰 배터리 시간을 고려한 전력 에너지 최

적화 기법을 개발한다. 즉, 실제 사용자가 체감할 수 있는 FPS의 저하가 없는 범위에서 동작 주파수 상승을 방지하여 전력 에너지 소모량을 줄이고, 배터리 잔량이 일정량 이하 일 때 사용자가 배터리 시간의 연장을 원한다면 모바일 GPU의 성능을 어느 정도 하락시켜 그 목표를 달성할 수 있도록 한다. 이로써 에너지 효율 향상과 함께 실제 GPU의 성능과 스마트폰의 사용시간에 대한 일정한 서비스 품질, 즉 QoS(Quality of Service)를 보장할 수 있는 전력 에너지 최적화 기법을 제안한다. 제안한 기법을 평가하기 위하여 기존 장치 사용률 기반의 DVFS 알고리즘과 제안한 기법을 각각 적용하여 전력 에너지 소모량과 성능 차이를 확인하였다. 실험 결과 제안 기법의 전력 소모량은 기존 기법 대비 평균 9.9%의 에너지 이득을 얻을 수 있었으며, 이 때 평균 FPS는 0.4 정도의 차이로 성능 하락이 거의 없었다. 또한 배터리 잔량이 20%이하이며 FPS 하락을 응용 요구치의 최대 10%만큼 허용했을 경우 평균 16.4%, 최대 33.8%의 에너지 이득을 얻을 수 있었다.

2. 연구 동기

2.1 모바일 GPU의 전력 소비량

스마트폰에서 모바일 GPU가 차지하는 전력 에너지의 비중을 알아보기 위하여 갤럭시 S3 개발보드에서 6개의 게임 응용을 1분 동안 실행하며 GPU를 포함한 5개 주요 컴포넌트(CPU, GPU, Memory Controller, Memory, Co-processor Bus)의 에너지 소모량을 실측하였으며 그 결과는 그림 1과 같다. 이 때 모바일 GPU는 주요 컴포넌트들의 전체 에너지 소모량 중 평균 27%를 차지하였고 Truck Park 응용에서 최대 51%를 보이며 상당한 비중을 차지하였다. 또한 모바일 GPU의 장치 드라이버에서 제공하는 함수로 GPU 처리를 요청한 프로세

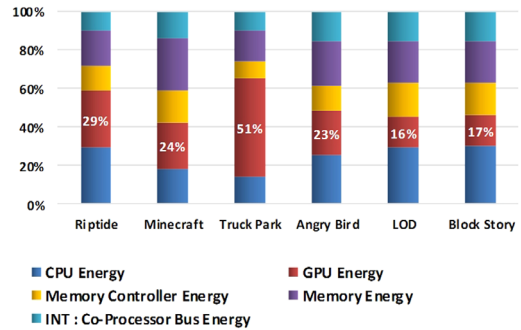


그림 1 게임 응용 실행 시 스마트폰 주요 컴포넌트의 에너지 소비량

Fig. 1 The energy consumption of major components in smartphones for 6 different applications

스 번호를 분석한 결과 현재 실행중인 전경 응용(Fore-ground Application)이 GPU를 독점하여 사용하는 것을 알 수 있었다. 이러한 실험 결과로부터 모바일 GPU가 스마트폰에서 소비하는 전력 에너지의 양이 상당하고 전경 응용의 성능 하락이 없는 선에서 전력 소비를 최소화하여 에너지 효율 향상의 가능성을 알 수 있다.

2.2 ARM Mali-400MP 장치 드라이버가 제공하는 전력 관리 기법의 문제점

본 논문의 연구 대상 모바일 GPU로 최근 스마트폰 및 태블릿 PC에서 널리 사용되고 있는 ARM Mali-400MP의 장치 드라이버를 분석하였다. 분석 결과, 장치 드라이버에서 기본적으로 장치 사용을 기반의 DVFS를 제공하며, 그 알고리즘은 그림 2와 같다. 기본적으로 총 4개의 동작 주파수(160MHz, 266MHz, 350MHz, 440MHz) 및 전압 상태(0.875V, 0.90V, 0.95V, 1.025V)가 제공되고, 단위 시간마다 GPU 내부에서 1개 이상의 코어가 동작한 시간으로 장치 사용률을 산출하며, 이를 이용하여 미리 정의된 장치 사용률 임계 값(Utilization Threshold)과 비교하여 동작 주파수 및 전압을 결정한다. 예를 들어 현재 주파수가 160MHz일 때, 단위 시간 동안 산출한 장치 사용률 값이 70%를 넘는다면 GPU 부하가 현재 주파수보다 높은 성능을 요구하는 것으로 판단하여 동작 주파수를 한 단계 위의 266MHz로 조절한다. 이 때 몇 가지 게임응용을 2분동안 실행하며 시간에 따른 DVFS에 의한 동작 주파수 천이를 관찰하였다.

그림 3과 4는 게임 응용 Pixelgun3D 및 Minecraft를 2분간 플레이하며 장치사용률 기반의 DVFS 수행 시 시간에 따른 동작 주파수 천이를 나타낸 것이다. 결과에서 확인할 수 있는 특징으로 동작 주파수의 진동현상이 빈번하게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 진동은 그림 1의 알고리즘에서 공격적으로 설정된 장치 사용률 임계 값으로 인하여 GPU의 부하가 현재 주파수에서 처리가 가능함에도 불구하고 한 단계 상위 동작 주파수로 상승시키기 때문이다.

이러한 동작 주파수의 공격적인 상승으로 인한 비효

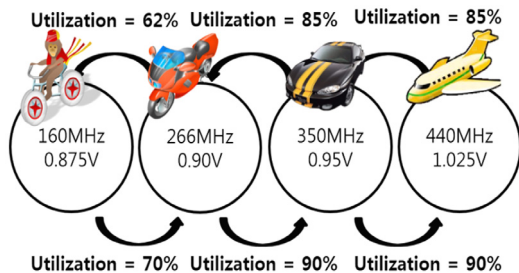


그림 2 ARM Mali-400MP의 DVFS 알고리즘
Fig. 2 The overview of ARM Mali-400MP DVFS algorithm

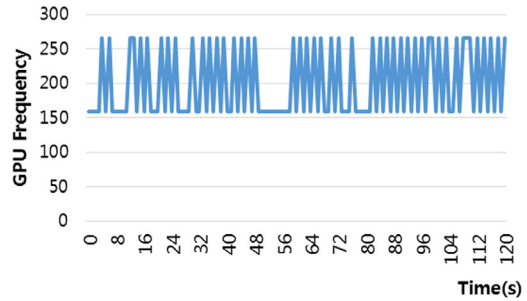


그림 3 기존 DVFS 기법에서 Pixelgun3D 실행 시 시간에 따른 동작 주파수 천이

Fig. 3 The transition of GPU frequency for Pixelgun3D

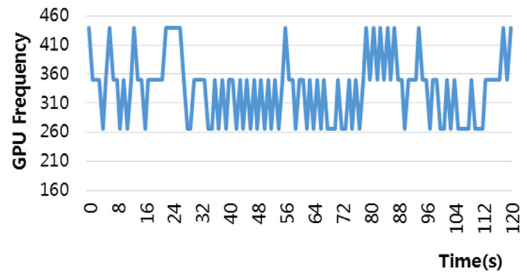


그림 4 기존 DVFS 기법에서 Minecraft 실행 시 동작 시간에 따른 동작 주파수 천이

Fig. 4 The transition of GPU frequency for Minecraft

표 1 동작 주파수 고정 시 게임 응용의 FPS 분포
Table 1 The average FPS at different GPU frequency for 7 different applications

	App.1	App.2	App.3	App.4	App.5	App.6	App.7
FPS @160MHz	49.52	59.8	52.6	38.2	58.38	39.9	33.07
FPS @266MHz	57.08	59.84	58.3	57	58.47	49.76	46.81
FPS @350MHz	58.29	59.86	59.0	58.58	58.45	52.51	58.39
FPS @440MHz	59.53	59.93	59.4	59.49	58.85	51.41	58.5
FPS @DVFS	58.75	59.76	58.7	58.6	59.1	52.1	57.9
Average frequency for DVFS	333.3	205.5	274.4	353.3	210.8	396.3	354.6

율이 얼마나 발생하는지 그 빈도를 확인하기 위하여 ARM Mali-400MP에서 제공하는 4개의 기본 동작 주파수 및 전압을 각각 고정시킨 후 7개의 게임 응용을 플레이하며 성능을 관찰하였다. 이 때 성능 지표는 사용자가 실제로 체감 가능한 전경 응용의 초당 프레임 수를 측정하였으며 그 결과는 표 1과 같다. 표 1의 음영으

로 표시된 부분은 전경 응용의 FPS 하락 없이 성능이 유지되는 최저 동작 주파수이다. 실험한 7개의 모든 응용에서 성능이 유지되는 최저 동작 주파수가 장치 사용률 기반의 DVFS 수행 시 평균 동작 주파수보다 작은 것을 알 수 있다. 이로써 기존 DVFS에서 공격적으로 설정된 장치 사용률 임계 값으로 인한 동작 주파수의 진동이나 부하가 요구하는 것보다 높은 성능의 주파수로 동작함으로 발생하는 비효율적인 전력 소모가 빈번한 것을 알 수 있다.

3. QoS를 고려한 스마트폰 GPU 에너지 최적화 기법

본 장에서는 앞서 언급한 공격적인 동작 주파수 상승으로 인한 전력 소모를 방지하기 위하여 GPU를 성능이 유지되는 최저 동작 주파수로 동작하도록 하여 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 제안기법인 QoS를 고려한 전력 에너지 최적화 기법에 대해 설명한다.

그림 5는 제안 기법 알고리즘의 플로우 차트이다. 알고리즘은 GPU가 유휴상태(IDLE)로부터 부하의 처리가 요청될 때 시작되며 이는 장치 사용률이 0으로부터 변화가 있음을 통하여 감지한다. 먼저 3초간 기존 장치 사용률 기반의 DVFS를 실행하며 현재 응용의 현재 장면에서 요구하는 최대 동작 주파수와 FPS를 파악한다. 그 후, 배터리의 잔량을 고려하여 FPS 최대 하락 허용 값을 설정한다. 배터리의 잔량이 20%이상으로 충분할 때에는 평균 FPS의 5%(60프레임을 요구하는 응용의 경우 최대 2프레임 저하까지 허용)까지 하락을 허용하고 배터리의 잔량이 부족할 때에는 5%보다 큰 범위까지 FPS 하락을 허용한다. 그 다음, 파악한 최대 동작 주파수로부터 한 단계씩 주파수를 떨어뜨려 3초간 고정시킨 후 평균 FPS를 파악한다. 이 때 고정된 주파수에서 FPS가 허용한 범위보다 큰 하락이 있으면 한 단계 위의 주파수를 성능 하락 없이 전력 소모가 최소인 최적 동작 주파수로 판단한다. 또한 현재 주파수에서 FPS의 하락이 없더라도 장치 사용률이 100%에 가까운 값을 보이면 다음 한 단계 하위 동작 주파수에서 성능 하락이 있을 것으로 예측하여 현재 주파수를 최적 동작 주파수로 판단한다. 마지막으로 파악한 최적 동작 주파수로 GPU를 동작시킨다. 그 후 단위 시간마다 FPS의 하락이 있는지, 장치 사용률이 기존 DVFS의 하락 임계 값보다 낮은지 체크한다. FPS의 하락이 발생하거나 장치 사용률의 값이 임계 값보다 낮으면 부하의 특성이 바뀐 것으로 간주하여 성능을 만족시키는 최적 주파수를 파악하기 위하여 알고리즘을 처음부터 다시 시작한다. 위와 같은 알고리즘을 통하여 FPS와 배터리 시간의 QoS를 일정 수준으로 보장하고 모바일 GPU의 소모 에

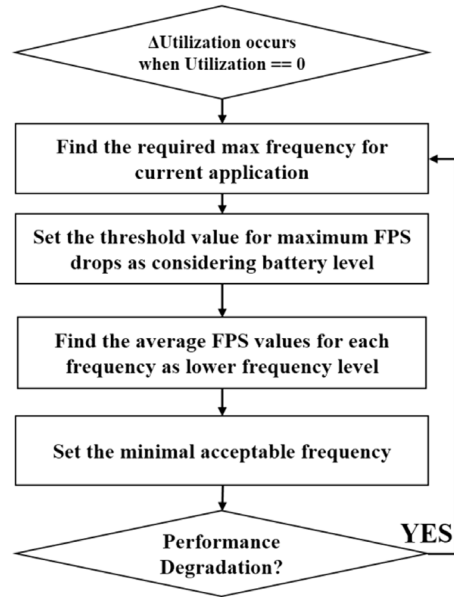


그림 5 QoS를 고려한 에너지 최적화 기법 플로우 차트
Fig. 5 The flowchart of QoS-aware GPU energy optimization technique algorithm

너지가 최적의 효율을 제공할 수 있도록 한다.

4. 제안 기법의 평가

4.1 실험환경

실험은 ARM Mali-400MP가 탑재된 갤럭시 S3 개발 보드에서 진행되었다. 기존 장치 사용률 기반의 DVFS와 제안한 QoS를 고려한 에너지 최적화 기법을 비교하기 위하여 Google Play Store로부터 11개의 게임 응용을 선정하고 2분 동안 각각의 기법을 적용하여 플레이할 때 소비된 전력 에너지와 성능 지표인 평균 FPS를 산출하였다. 이 때 전력 실측은 NI사의 DAQ USB-6289를 이용하였으며 초당 1000번의 전압 전류 샘플을 평균 내어 소비 전력을 산출하고 이를 이용하여 2분 동안 소모 에너지를 구하였다. 성능 지표인 FPS는 Android 프레임워크의 SurfaceFlinger에서 실제 화면을 그리는 함수의 초당 호출 횟수를 이용하여 산출하였다.

4.2 실험 결과

그림 6은 기존 장치 사용률 기반 DVFS 기법 대비 제안 기법의 에너지 소모량으로 평균 9.9%, 최대 23.0%까지 감소하였다. 이와 함께 측정된 응용의 평균 FPS 하락은 그림 7과 같이 평균 0.44 프레임으로 측정되었으며 11개의 모든 응용에서 1 프레임 미만의 저하가 나타났다. 이는 성능 하락이 거의 없는 미미한 수치로 제안 기법이 사용자 경험을 저해하지 않은 것을 알 수 있다.

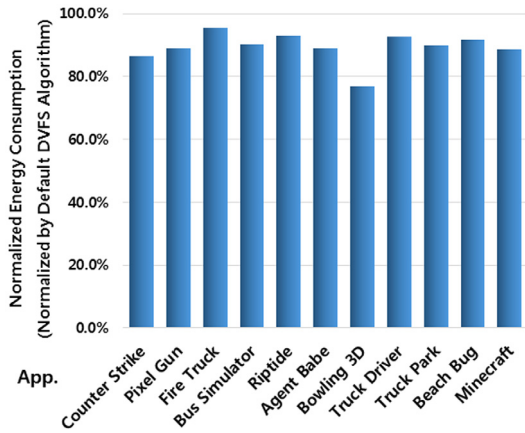


그림 6 기존 GPU 장치 사용률 기반의 DVFS 대비 제안 기법의 소모 에너지

Fig. 6 Normalized energy consumptions of the proposed technique for different applications

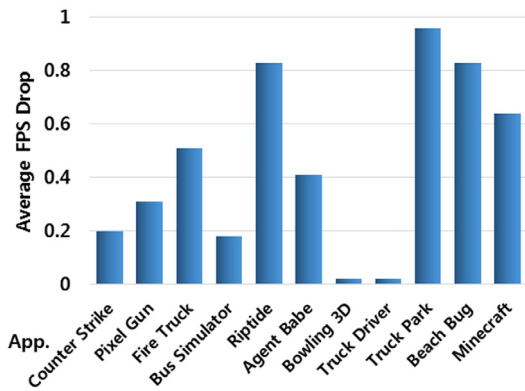


그림 7 기존 GPU 장치 사용률 기반의 DVFS 대비 제안 기법의 평균 FPS 하락

Fig. 7 The average FPS drop of the proposed technique for different applications

그림 8, 9는 게임 응용 Bowling 3D과 Counter Strike를 기존 장치 사용률 기반 DVFS와 제안 기법을 각각 적용하여 2분 동안 수행하며 얻은 주파수 천이의 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 제안 기법에서 실행 한 두 응용에서 GPU의 동작 주파수 160MHz에서 266MHz로의 상승 수가 줄어든 것을 알 수 있다. 이로써 기존 DVFS에서 발생한 비효율적인 주파수 상승을 방지하여 성능 하락 없이 에너지 이득을 얻을 수 있었다.

그림 10과 11은 11개의 응용을 대상으로 배터리의 잔량이 20% 이하일 때, 배터리 시간 연장을 위한 FPS 최대 하락 허용 값을 다양하게 변화시키며 기존 DVFS 기법 대비 소모 에너지와 평균 FPS 하락을 측정 한 것

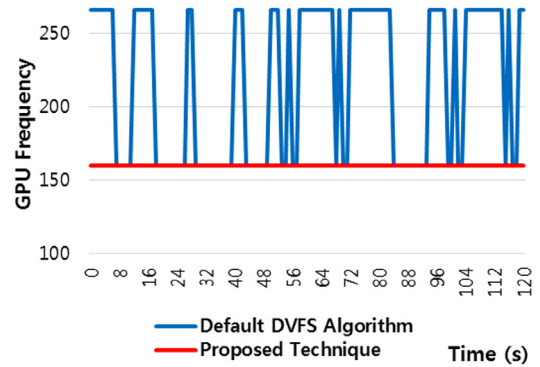


그림 8 Bowling 3D를 플레이 할 때 기존 GPU 장치 사용률 기반 DVFS와 제안 기법의 주파수 천이 비교

Fig. 8 A comparison of GPU frequency transition for Bowling 3D between the default DVFS algorithm and the proposed technique

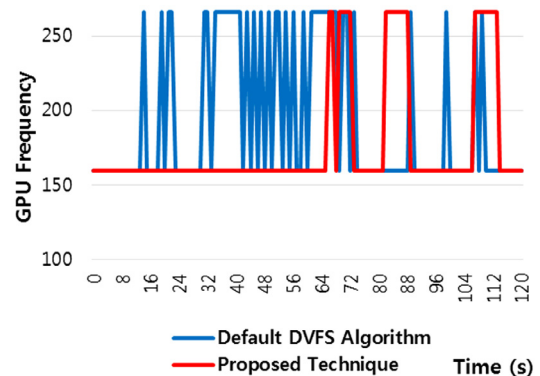


그림 9 Counter Strike를 플레이 할 때 기존 GPU 장치 사용률 기반 DVFS와 제안 기법의 주파수 천이 비교

Fig. 9 A comparison of GPU frequency transition for Counter Strike between the default DVFS algorithm and the proposed technique

이다. 실험 결과 허용 값이 증가함에 따라 에너지 이득과 평균 FPS 하락 값은 증가하였으며 사용자 경험을 크게 해치지 않는 10% 정도 까지가 현실적인 허용수치가 될 것으로 예상된다. 10%만큼 하락을 허용할 경우 기본 5%만큼 허용할 때보다 증가된 평균 16.4%의 에너지 이득으로 배터리 시간 연장이 가능할 것으로 예상된다.

5. 결론 및 논의

최근 모바일 GPU가 고성능화됨에 따라 소모하는 전력이 스마트폰 전체 전력 소모에서 차지하는 비중이 증가하여 중요한 전력 관리 대상으로 대두되었다. 따라서 본 논문은 ARM Mali-400MP를 전력 관리 연구 대상

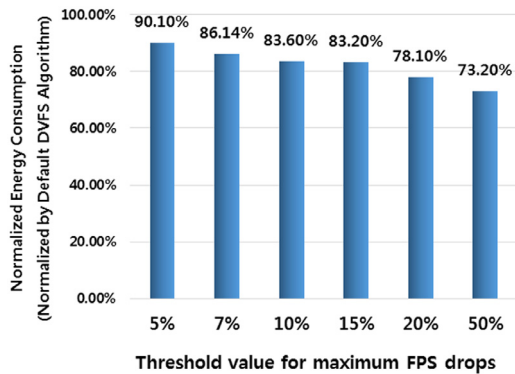


그림 10 FPS 최대 하락 허용 값에 따른 기존 장치 사용률 기반의 DVFS 대비 제안 기법의 에너지 소모량
 Fig. 10 Normalized energy consumptions of the proposed technique at five threshold values for maximum FPS drops

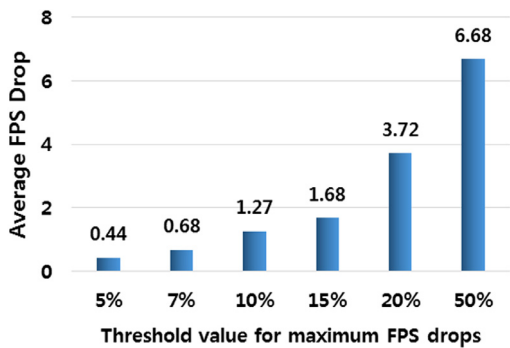


그림 11 FPS 최대 하락 허용 값에 따른 기존 장치 사용률 기반의 DVFS 대비 제안 기법의 평균 FPS 하락
 Fig. 11 A comparison of average FPS drop value at five threshold values for maximum FPS drops

모바일 GPU로 선정하여 장치 드라이버를 분석하였다. 그 결과 기본으로 제공되는 전력 에너지 최적화 기법인 장치 사용률 기반의 DVFS에서 사용자가 실질적으로 인지할 수 있는 전경 응용의 FPS 하락이 없음에도 불구하고 동작 주파수를 상승시켜 비효율적인 에너지 소모가 있었음을 밝혔다.

따라서 본 논문은 GPU의 장치 사용률 뿐만 아니라 FPS와 배터리 잔량을 함께 고려하여 응용의 성능을 유지하며 전력 소모가 최소인 주파수로 GPU를 동작하도록 하는 기법을 제안함으로써 QoS를 보장하고 높은 에너지 효율을 제공할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 평가한 결과, 기존 DVFS 기법 대비 에너지 이득은 평균 9.9% 최대 23%를 얻을 수 있었으며 FPS는 평균 0.44만큼의 하락을 보여 사용자 경험을 크게 저해하지

않았다. 추가로 배터리의 잔량을 고려하여 응용이 요구하는 FPS의 10%만큼의 성능 하락을 허용할 경우 평균 16.4%의 증가된 에너지 이득을 얻어 배터리 시간을 연장할 수 있었다.

더불어 본 논문의 제안 기법을 확장하여 FPS 최대 하락 허용 값을 사용자가 응용을 사용하는 평균 시간 등을 함께 고려하여 동적으로 조절하는 연구를 진행할 계획이다.

References

- [1] M. Kim, and S. Chung, "Accurate GPU Power Estimation for Mobile Device Power Profiling," *Proc. of the IEEE International Conference on Consumer Electronics*, pp. 183-184, 2013.
- [2] C. Yoon, D. Kim, W. Jung, and C. Kang, "Appscope: Application Energy Metering Framework for Android Smartphone using Kernel Activity Monitoring," *Proc. of the USENIX Conference on Annual Technical Conference*, pp. 387-400, 2012.
- [3] W. Jung, C. Kang, C. Yoon, D. Kim, and H. Cha, "Devscope: A Non-intrusive and online power analysis for smartphone hardware components," *Proc. of the IEEE/ACM/IFIP international conference on Hardware/software codesign and system synthesis*, pp. 353-362, 2012.
- [4] C. Wang, F. Yan, Y. Guo, and X. Chen, "Power Estimation for Mobile Applications with Profile-Driven Battery Traces," *Proc. of the IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp. 120-125, 2013.
- [5] C. Park, H. Kim, and J. Kim, "A Low-Power Implementation of 3D Graphics System for Embedded Mobile Systems," *Proc. of 2006 IEEE Workshop on Embedded Systems for Real Time Multimedia*, pp. 53-58, 2006.



김도한
 2013년 성균관대학교 전자전기공학부 학사. 2015년 서울대학교 컴퓨터공학부 석사. 관심분야는 임베디드 소프트웨어, 모바일 시스템, 저전력 시스템



송옥
 2007년 성균관대학교 정보통신공학부 학사. 2009년 서울대학교 컴퓨터공학부 석사. 2009년~현재 서울대학교 컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 모바일 시스템, 사용자 중심 성능/전력 최적화



김형훈

2000년 인하대학교 전자공학과 석사. 2015년 삼성전자 DMC 연구소 수석 연구원
관심분야는 시스템 구조 설계, 시스템 엔지니어링, 저전력 시스템



김지홍

1986년 서울대학교 계산통계학과 학사
1988년 University of Washington 컴퓨터과학과 석사. 1995년 University of Washington 컴퓨터과학 및 공학과 박사
1995년~1997년 미국 Texas Instruments 선임연구원. 1997년~현재 서울대학교 컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 임베디드 소프트웨어, 저전력 시스템, 멀티미디어 시스템, 컴퓨터 구조