

Generation and Evaluation of Power Model for Mobile AMOLED Display Using RGB Color Space Partitioning Method Considering Power

Dusan Baek[†] · Yoo-Rim Choi^{**} · Byungjeong Lee^{***} · Jung-Won Lee^{****}

ABSTRACT

The power model is needed to handle the power consumption of mobile AMOLED display at the software level. However, the existing studies to generate the power model have required the experimental environment and equipment for the power measurement activity. In addition, the combination of RGB values used for modeling was imprudent and small, so it was difficult to reflect the mutual influence between the RGB values into the model. To solve these problems, we propose an RGB color space partitioning method, which is used to prudently sample the combinations of the RGB values based on the color or the power. We also propose a process for generating a mapping table composed of <RGB values, power consumption>. We analyzed the characteristics of the samples generated according to the proposed partitioning methods, taking into account the color and the power, and generated the mapping table for the AMOLED display. Furthermore, we confirmed the reusability of the mapping table by utilizing one mapping table multiple times in evaluating different power models. These mapping tables are provided to researchers and can be used to generate and evaluate power models without power measurement activities.

Keywords : Power Model, Model Evaluation, Model Generation, AMOLED

전력을 고려한 RGB 색 공간 분할 기법 및 이를 활용한 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 모델 생성 그리고 평가

백 두 산[†] · 최 유 림^{**} · 이 병 정^{***} · 이 정 원^{****}

요 약

모바일 AMOLED 디스플레이의 소모 전력을 소프트웨어 수준에서 참조하기 위해서는 소모 전력에 대한 모델이 필요하다. 하지만, 전력 모델을 얻기 위한 기존 연구들은 전력 측정 활동을 위한 실험 환경 및 장비가 필수적으로 요구되었다. 또한, 모델링을 위해 사용된 RGB 값의 조합이 무분별하고, 매우 적어 RGB 값들 간의 상호 영향을 모델에 반영하기 어려웠다. 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 RGB 색 공간 분할 기법 및 <RGB 값, 소모 전력>으로 구성된 맵핑 테이블 제공 방법을 제안한다. 제안된 분할 기법을 통해 색과 함께 전력을 고려하며 RGB 조합들을 샘플링하고, 제안된 맵핑 테이블 제공 방법에 따라 샘플링된 RGB 조합들로 구성된 맵핑 테이블을 생성한다. 실험을 통해 색 차원과 전력 차원에서의 분할 기법에 따른 샘플들의 특징을 분석하였고, 이를 바탕으로 AMOLED 디스플레이에 대한 맵핑 테이블을 생성하였다. 더불어, 맵핑 테이블을 활용하여 각기 다른 4개의 전력 모델을 평가함으로써 맵핑 테이블의 재사용 가능성을 확인하였다. 이러한 맵핑 테이블은 연구자들에게 제공되어 전력 측정 활동 없이도 전력 모델을 생성하는데 활용될 수 있다.

키워드 : 전력 모델, 모델 평가, 모델 생성, AMOLED

1. 서 론

모바일 기기를 구성하고 있는 다양한 모듈들의 소모 전력을 소프트웨어 수준에서 관리하기 위한 다양한 연구들이 존재하고 있다[1]. 이러한 연구들은 모바일 기기가 가지고 있는 제한된 전력이라는 한계점을 극복하기 위해 모듈 별 소모 전력 모델을 활용하여 시스템-레벨 뿐만 아니라 어플리케이션-레벨, 코드-레벨 등으로 소모 전력을 프로파일링 한 뒤, 비효

※ 이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며(NRF-2016R1A2B1014376), 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-차세대정보 컴퓨팅기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2014M3C4A7030504).

[†] 준 회 원 : 아주대학교 전자공학과 박사

^{**} 준 회 원 : 아주대학교 전자공학과 석사과정

^{***} 정 회 원 : 서울시립대학교 컴퓨터과학부 교수

^{****} 종신회원 : 아주대학교 전자공학과 교수

Manuscript Received : March 7, 2018

Accepted : March 27, 2018

* Corresponding Author : Jung-Won Lee(jungwon@ajou.ac.kr)

울적으로 소모되고 있는 전력 버그를 식별하고, 수정한다. 특히, 모바일 기기를 구성하고 있는 다양한 모듈 중에서도 디스플레이는 모바일 시스템의 소모 전력 중 많은 비중을 차지하고 있기 때문에 디스플레이의 소모 전력 모델의 필요성은 크다고 할 수 있다[2-4].

모바일 기기의 디스플레이는 크게 AMOLED (Active-Matrix Organic Light Emitting Diode) 디스플레이와 LCD 디스플레이로 나뉘어진다. AMOLED 디스플레이는 LCD(Liquid Crystal Display)와 달리 백라이트 유닛, 컬러필터 등이 필요없어 얇게 만들 수 있으며, 적은 전력 소비량, 상대적으로 높은 명암비, 시야각, 색재현율 등의 이점을 갖고 있어 모바일 기기의 디스플레이로 각광받고 있다. 근래에 들어 LCD와의 기술 격차(해상도 등)가 줄어드는 한편, 단가 또한 저렴해지고 있어, 2020년 이후에는 AMOLED 디스플레이의 출하량이 LCD의 출하량을 넘을 것이라 예상된다[5].

이러한 흐름에 맞추어, AMOLED 디스플레이의 전력 모델에 대한 연구들이 진행되고 있다. [6]은 모바일 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 모델을 처음으로 제안한 연구로서 R, G, B 값과 소모 전력 간의 선형성에 기반한 모델을 제안하였다. [7]은 [6]의 모델을 개선하여 R, G, B 값과 소모 전력 간의 비선형적 특성을 모델에 반영하여 정확도를 향상시켰다. 또한, [8]은 R, G, B 채널 간의 의존관계를 밝히고, 이를 모델에 반영하여 [6]보다 높은 정확도를 갖는 모델을 생성하였다. 이와 같은 연구들이 제안하는 모델들은 회귀 분석에 기반한 모델로서 모델 내 계수는 AMOLED 디스플레이의 종류에 따라 달라지며, 샘플 이미지를 활용해서 획득한다.

하지만 기존 연구들이 사용한 샘플 이미지는 실제 RGB 값의 조합(각 8bits 시, 약 1670만개)에 비해 매우 적은 조합을 사용하기 때문에 RGB 값들 간의 상호 영향을 모델에 반영하기 어려우며, RGB 값의 조합들을 무분별하게 샘플링하기 때문에 효과적인 테스트를 기대하기 어렵다. 또한, 모델 생성 과정에서 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 측정 활동을 진행해야 하기 때문에 필수적으로 소모 전력 측정을 위한 실험 환경 및 장비를 구축해야만 한다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 RGB 색 공간 분할 기법을 제안한다. RGB 색 공간 분할 기법은 모든 RGB 값의 조합을 테스트할 수 없는 한계를 개선하고자, 주어진 테스트 제약 사항(테스트 시간 등)에 기반하여 색 차원과 전력 차원에서 효율적인 샘플을 추출하는 방법이다. 동일한 개수의 샘플을 추출하더라도, 색 차원에서 분할 할 경우 인접 샘플들 간의 색 차이가 적어지고, 전력 차원에서 분할 할 경우에는 인접 샘플들 간의 소모 전력 차이가 적어진다. 실험을 통해 구체적으로 이에 대한 상관관계를 분석하였다.

더불어, 본 연구는 <RGB 값, 소모 전력>으로 구성된 맵핑 테이블 제공 방법에 대해 제안한다. RGB 색 공간 분할 기법을 통해 얻어진 RGB 값의 조합을 대상으로 소모 전력을 측정하였으며, 이를 맵핑 테이블로 생성하였다. 맵핑 테이블은 관련 연구자들에게 제공되어 전력 측정 활동 없이도 전력 모

델을 생성 할 수 있도록 재사용될 수 있다. 마지막으로, 3가지 모바일 디바이스를 대상으로 맵핑 테이블을 생성하여, 3가지 전력 모델의 정확도를 평가함으로써 맵핑 테이블의 재사용 가능성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구를 설명하고, 3장에서는 RGB 색 공간 분할 기법을 제안한다. 4장에서는 맵핑 테이블을 생성 및 제공하기 위한 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 정보 제공 방안을 제안하고, 5장에서는 실험을 진행하고 결과를 분석한다. 끝으로 6장에서 결론과 함께 마무리한다.

2. 관련 연구

Android 시스템은 기본적으로 시스템에서 소비하는 전력을 산출하기 위해 컴포넌트 별 전력 모델을 탑재하고 있으며, 기기 제조사로 하여금 power_profile.xml 파일을 이용하여 모델에 필요한 계수를 입력하도록 하고 있다. 또한, [9, 10]에서도 모바일 기기를 구성하고 있는 다양한 컴포넌트들의 소모 전력을 소프트웨어 수준에서 관리하기 위한 방법을 제시하고 있다. 하지만 이러한 연구들이 제시하고 있는 디스플레이 모델은 밝기 레벨과 구동 시간만을 고려하고 있어, 픽셀을 구성하는 RGB 값에 따라 소모 전력이 크게 달라지는 AMOLED 디스플레이에 적합하지 않다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위한 연구들도 진행되고 있다. 이러한 연구들은 AMOLED 디스플레이의 특징을 반영하기 위해 RGB 값에 따른 소모 전력을 추정하는 모델을 제안한다. [6]은 모바일 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 모델을 처음으로 제안한 연구로서 R 채널, G 채널, B 채널을 구성하는 각각의 값과 소모 전력 간의 선형성에 기반한 모델을 제안하였다. 하지만, AMOLED 디스플레이의 소모 전력이 갖는 비선형적 특성을 반영하지 못하였기 때문에 매우 큰 오차를 갖는다.

[7]은 [6]의 모델을 개선하여 R, G, B 값과 소모 전력 간의 비선형적 특성을 모델에 반영하여 정확도를 향상시켰다. 각 픽셀의 소모 전력(P_{pixel})은 Equation (1)과 같이 R, G, B 값의 함수로 계산된다.

$$P_{pixel}(R, G, B) = f(R) + h(G) + k(B) \quad (1)$$

f(R)은 G, B 채널의 값을 0으로 한 뒤, R채널의 값을 0에서부터 255로 증가하며 측정된 디스플레이의 소모 전력 값이다. h(G)와 k(B)는 f(R)과 같이 다른 채널의 값을 0으로 한 뒤 측정된 디스플레이의 소모 전력 값이다. 전체 소모 전력은 Equation (2)와 같이 정적으로 소모되는 전력(C)과 화면을 구성하고 있는 모든 픽셀의 소모 전력 합으로 계산된다.

$$P = C + \sum_{i=1}^n \{f(R_i) + h(G_i) + k(B_i)\} \quad (2)$$

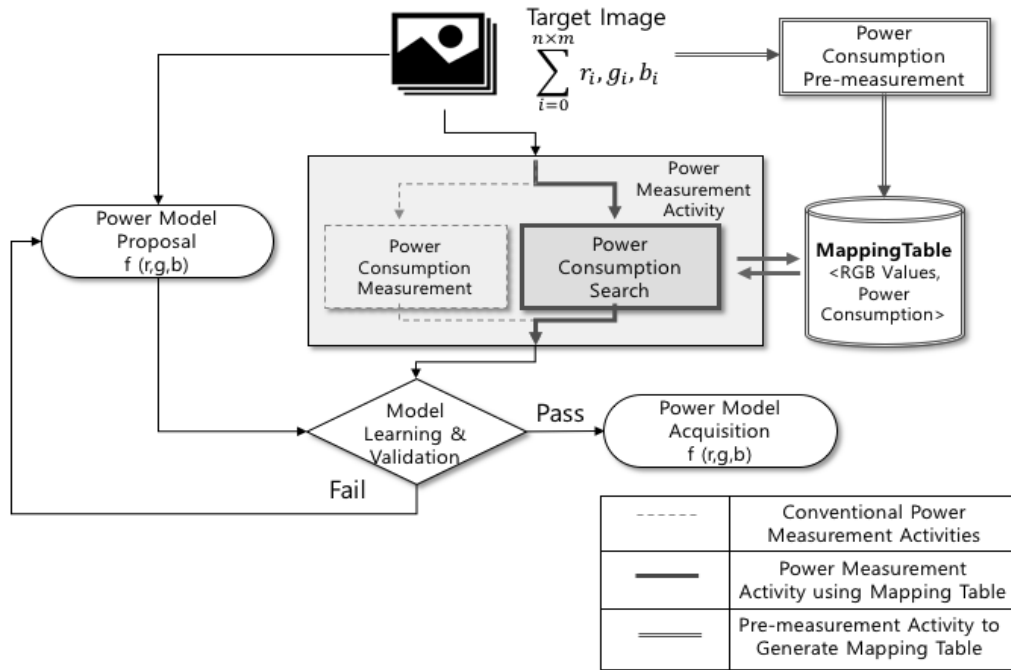


Fig. 1. Comparison of Power Model Generating Processes with and Without Mapping Table

[11]은 실험을 통하여 R, G, B 값의 합이 커질수록 (즉, 밝아질수록) [7]에서 제안한 모델의 오차가 커지는 것을 확인하였다. 따라서, [11]은 R, G, B 값의 합을 회귀 분석하고, 이를 [7]에서 제안한 모델에 추가하여 오차를 감소 시켰다.

[8]은 이전 모델들이 고려하지 못하였던 R, G, B 채널 간의 의존관계를 밝히고, 이를 모델에 반영하여 이전 연구들보다 높은 정확도를 갖는 모델을 생성하였다.

하지만 이전 연구들은 AMOLED 디스플레이 소모 전력 모델의 정확성에 초점을 두고 진행되어 왔기 때문에, 모델 생성 과정에서 비효율적으로 반복되는 전력 측정 활동을 개선할 수 없었다. 또한, 회귀 모델에서 사용되는 샘플의 수가 적으며, 샘플 간의 색 차이를 고려하지 않았다. 이전 연구로서 색 차이를 고려한 RGB 색 공간 분할 기법에 대한 연구가 진행되었으나[12], 이전 연구에서는 전력 차이를 고려하지 않아 전력 차원에서 균등한 분할이 불가능하다는 단점을 가지고 있었다.

3. RGB 색 공간 분할 기법

3.1 연구 동기

모바일 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 모델링에 관한 기존 연구들은 전력 모델을 통해 산출된 평가 이미지의 전력 추정값과 이미지를 디스플레이에서 출력하기 위해 소모된 전력 추정값을 비교하여 전력 모델을 제안, 수정 및 검증한다. 하지만, 이러한 모델 생성 과정에서 사용되는 단일 색으로 구성된 이미지들의 RGB 값은 가능한 RGB 값의 모든 조합에

비해 매우 적어 RGB 값들 간의 상호 영향을 모델에 반영하기 어려웠다. 또한, 기존 연구들은 모델 생성 과정에서 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 측정 활동을 진행해야 하기 때문에 필수적으로 소모 전력 측정을 위한 실험 환경 및 장비를 구축해야 하며, 관련된 하드웨어 전문 지식을 필요로 한다.

본 연구는 위와 같은 문제를 해결하기 위해서 여러 RGB 값의 조합으로 구성된 단일 색 이미지들을 통해 소모 전력을 사전에 측정하여 <RGB 값, 소모 전력> 맵핑 테이블의 형태로 제공한다. Fig. 1은 기존 연구의 전력 모델 생성 과정과 본 연구의 결과로서 제공되는 맵핑 테이블을 활용한 전력 모델 생성 과정을 비교한 그림이다.

맵핑 테이블을 활용하는 전력 모델 생성 과정은 실제 전력을 측정하는 활동을 전력 모델 생성 과정에서 분리시킬 수 있다. 따라서, 맵핑 테이블만 있다면 소모 전력 측정을 위한 실험 환경 및 장비가 없더라도 전력 모델 생성이 가능하다. 더불어, 맵핑 테이블은 매우 많은 수의 RGB 값들로 조합되어 RGB 값들 간의 상호 영향을 검증하기 위해 사용하기 용이하며, 한번 생성된 맵핑 테이블은 재사용이 가능하기 때문에 효율적이다.

본 논문에서는 모바일 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 모델링에 관한 기존 연구들과 같이 픽셀 상호간의 의존성은 없다고 가정한다. 그럼에도 불구하고, 픽셀을 구성하는 RGB 값 상호간에는 의존성을 반영하기 때문에 RGBA8888의 경우, 모든 RGB 값의 조합은 총 16,777,216(256×256×256)개가 존재하며 각 조합을 1초씩 측정한다 해도 약 194일이 소요된다. 모바일 AMOLED 디스플레이의 소모 전력을 측정하기 위해서는 그래픽 유닛 프로세싱, 프레임 버퍼, 데이터 버스 등의

전력 오버헤드를 제거해야 하기 때문에 측정 시간은 더욱 늘어나며, 모바일 기기들의 개발 및 출시 주기가 매우 빠른 현실을 고려한다면, 모든 RGB 값의 조합을 테스트하는 것은 현실적으로 불가능하다.

본 논문은 이러한 현실 상황을 반영하여, 주어진 시간에서 가장 효과적인 샘플들의 조합을 가진 <RGB 값, 소모 전력> 맵핑 테이블을 제공하기 위한 소모 전력 정보 제공 방법을 제안한다.

3.2 1차원 공간 분할 기법

모바일 AMO모든 RGB 값의 조합을 평가할 수 없기 때문에 가장 효과적인 RGB 값의 조합을 샘플링해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 RGB 색 공간 분할 기법을 제안한다. Fig. 2는 G, B 채널의 값을 0으로 고정 한 뒤, R 채널의 값을 변화한 그래프로서, 색 공간 분할 기법을 소개하기 위한 예시이다.

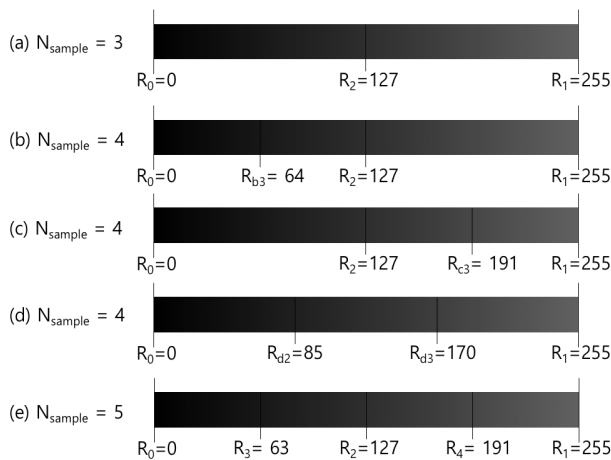


Fig. 2. 1-dimensional R Color Space Partitioning

Nsample은 색 공간에서의 샘플 개수를 의미하며, 0과 255 값을 갖는 양 끝 지점은 필수적으로 샘플링을 수행한다. Nsample=3일 경우 Fig. 2a, 양 끝 지점을 제외하면 1개의 R 값을 추가적으로 샘플링 할 수 있으며, 색 공간에서 가장 균등한 샘플 값은 중간 값인 R2(127 혹은 128)일 것이다. 그 뒤, 추가적으로 하나의 샘플을 선택한다면, Fig. 2b와 같이 R0과 R2의 중간 값인 Rb3 혹은 Fig. 2c와 같이 R2와 R1 사이의 중간 값인 Rc3일 것이다. 이 때, 두 값 중 어떠한 값을 취하더라도, Fig. 2d와 같이 R0과 R1 사이를 삼등분하는 Rd2, Rd3보다 색 공간에서 균등한 샘플링은 불가능할 것이다. 다만, Fig. 2d와 같이 샘플을 취했다 하더라도, 샘플을 하나 더 취하여 Nsample=5 인 경우에는 Fig. 2b, Fig. 2c의 경우에서와 같이 Fig. 2e 보다는 균등하지 못한 샘플링이 될 것이다.

본 논문에서 제안하는 방법은 보다 포괄적인 전력 측정값들을 제공하기 위해, 선형적으로 샘플의 개수(Nsample)를 알 수 없다고 가정한다. 따라서 RGB 색 공간에서의 전력 분할은 순차적으로 진행하며, 위 예에서는 Fig. 2a -> Fig. 2b ->

Fig. 2e 혹은 Fig. 2a -> Fig. 2c -> Fig. 2e 순으로 진행한다. 순차적인 분할 과정 중 분할 이후 샘플 간의 최소 간격이 분할 이전의 최소 간격의 1/2이하가 될 때, 깊이가 증가한다고 표현한다. 위 예에서는 Fig. 2a의 경우, 깊이는 1이고, Fig. 2b, 2c, 2e의 경우, 깊이가 2이다.

3.3 3차원 공간 분할 기법

R, G, B 채널로 구성되어 있는 RGB 색 공간에서 RGB 값의 조합을 샘플링하기 위해서는 3차원 공간을 다루어야 한다. 이를 위해, 본 논문에서는 3.2절에서 제시한 공간 분할 기법을 확장한 3차원 RGB 색 공간 분할 기법을 제안한다. Fig. 3은 본 논문에서 제안하는 3차원 RGB 색 공간 분할 기법을 설명하기 위한 그림이다.

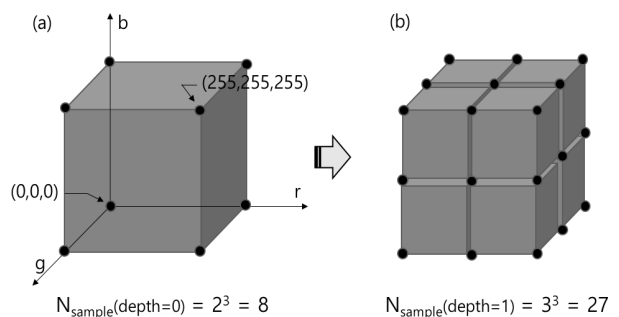


Fig. 3. 3-dimensional RGB Color Space Partitioning based on Color

Fig. 3은 R, G, B 채널로 구성된 색 공간을 3차원의 직교 좌표계에 표현한 그림이다. Fig. 3의 정육면체(a)는 원점 (0,0,0)과 최댓값 (255,255,255)을 양 끝 꼭지점으로 하는 정육면체를 나타내며, 공간 분할을 진행하는 첫 번째 대상이 된다. 정육면체를 구성하고 있는 각 꼭지점(8개)은 샘플링의 대상이 되는 RGB 값의 조합이며, 중복을 제거하기 위해 RGB 값의 조합은 집합의 원소로 저장된다. 그 뒤, 보다 많은 RGB 값의 조합을 샘플링하기 위해서는 Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 정육면체(a)를 8개의 작은 정육면체(b)로 분할하고, 분할된 각각의 정육면체를 구성하고 있는 꼭지점을 샘플링한다. 이와 같은 과정을 주어진 시간에서 수행할 수 있는 샘플의 개수를 고려하며 반복한다.

3.4 전력을 고려한 RGB 색 공간 분할 기법

3.3 절에서 제안한 RGB 색 공간 분할 기법은 색 공간을 균등하게 분할하며 진행되었기 때문에 색 차원에서는 균등한 분할이었으나, 전력 차원에서는 매우 불균등한 분할이었다. Fig. 4는 G, B 채널의 값을 0으로 고정 한 뒤, R 채널의 값을 변화한 그래프로서, 색을 기준으로 하는 분할과 전력을 기준으로 하는 분할의 차이를 설명하기 위한 예시이다.

Fig. 4에서 보이는 바와 같이 R0(0,0,0)에서 측정된 전력 값 P0은 33mW 이고, R1(255,0,0)에서 측정된 전력 값 P1은

133mW이다. 만약 이 두 점을 색 차원에서 균등하게 분할 할 경우, 분할 지점은 Fig. 4a와 같이 R0와 R1 사이의 값인 $R_{a2}=127(P_2=65mW)$ 이다. 하지만, R0와 R1을 전력 차원에서 균등하게 분할 할 경우에는 분할 지점이 Fig. 4b와 같이 $R_{b2}=200 (P_2=83mW)$ 가 된다. 이러한 차이는 색 차원에서의 RGB 값이 선형성을 갖는 반면, RGB 값에 따른 소모 전력 값은 비선형성을 띄기 때문에 발생한다.

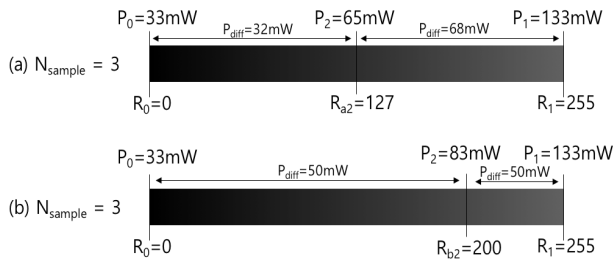


Fig. 4. Comparison Between Color-based Partitioning and Power-based Partitioning

R, G, B 채널로 구성되어 있는 RGB 색 공간에서 RGB 값의 조합을 샘플링하기 위해서는 3차원 공간을 다루어야 한다. 이를 위해 본 절에서는 3.3절에서 설명한 RGB 색 공간 분할 기법을 확장하여, 전력 차원에서 균등한 분할을 가능하게 하는 RGB 색 공간 분할 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 R, G, B 채널의 값과 이들의 조합으로 측정된 소모 전력 간의 단조 증가적 관계를 활용한다. 제안하는 기법은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- 1) 분할된 모든 색 공간은 직육면체의 형태를 취하며, 직육면체를 구성하는 꼭지점 중 원점(0,0,0)과 가장 가까운 꼭지점과 가장 먼 꼭지점의 RGB 조합으로 측정된 소모 전력의 차이는 분할된 직육면체의 소모 전력을 대표한다.
- 2) 다음 분할의 대상을 식별하기 위해, RGB 색 공간 내 분할된 모든 직육면체의 소모 전력의 차이를 비교한다. 그 차이가 가장 큰 값을 갖는 직육면체를 다음 분할의 대상으로 한다.
- 3) 분할의 대상이 되는 직육면체를 분할한다. 이 때, 소모 전력을 고려하기 위해서 2개의 직육면체로 분할한다. 분할은 R, G, B 채널 각각으로 가능하며, 어떠한 채널을 분할 할 것인지를 결정하기 위해서 원점과 가장 가까운 꼭지점과 변을 구성하는 꼭지점(3개)의 소모 전력을 측정한다. 3개의 꼭지점 중에서 그 소모 전력이 가장 큰 차이를 갖는 꼭지점과 원점과 가장 가까운 꼭지점 사이를 분할한다.
- 4) 분할이 완료된 직육면체를 구성하는 모든 꼭지점은 전력 측정의 대상이 된다. 다만, 인접 직육면체의 샘플로서 이미 전력 측정의 대상이었다면, 반복할 필요가 없기 때문에 제외한다.
- 5) 테스트가 설정한 시간, 샘플의 개수 등 제약 사항을 비교하고, 분할 과정을 반복하거나, 중지한다.

Fig. 5는 위 과정을 설명하기 위한 그림이다.

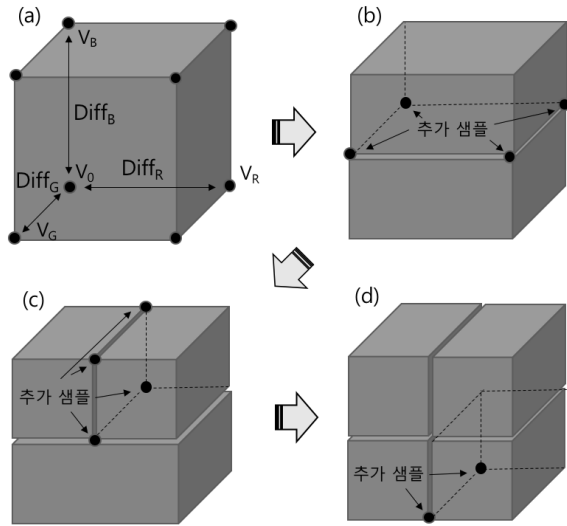


Fig. 5. 3-dimensional RGB Color Space Partitioning based on Power

Fig. 5a 는 과정을 설명하기 위한 그림으로서, 분할을 진행하는 채널을 결정하기 위해 꼭지점 V0 (원점과 가장 가까운 꼭지점)과 변을 구성하는 꼭지점(VR, VG, VB)의 소모 전력을 측정한다. 그림의 예와 같이 VB의 RGB 값의 조합으로 측정된 소모 전력이 가장 클 경우에는 B 채널이 분할의 대상이 되며, Fig. 5b와 같이 두 직육면체로 분할된다. 인접한 두 직육면체가 가질 수 있는 샘플(꼭지점)의 수는 총 12개이며, Fig. 5b와 같이 Fig. 5a의 8개를 제외한다면, 추가적으로 4개의 샘플이 추가될 수 있다. 다만, Fig. 5c에서 Fig. 5d로 분할되는 과정과 같이 추출된 샘플이 인접된 직육면체의 분할 과정에서 이미 추출되었다면, 이 또한 샘플에서 제외된다.

이와 같이 동일한 개수의 샘플을 추출하더라도, 전력 차원에서 균등하게 샘플링을 수행 할 경우, 색 차원에서 균등하게 분할하여 샘플을 추출한 경우 보다 인접 샘플 간 전력 차이의 최댓값이 적은 샘플들을 획득할 수 있다. 다만, 이러한 경우, 인접 샘플들 간의 색 차이가 커진다. 따라서 샘플링을 수행하는 테스트는 '무엇이 가장 적합한 샘플인가'에 대한 자신의 기준에 따라, 색 차원과 전력 차원에서 분할을 진행해야 한다.

4. AMOLED 디스플레이의 소모 전력 정보 제공

본 논문에서 제안하는 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 정보 제공 과정은 Fig. 6과 같이 크게 3가지 단계로 구성되어있다.

먼저, 샘플 추출 과정에서는 맵핑 테이블을 구성하는 RGB 조합의 집합을 생성한다. 그 뒤, 출력된 화면의 무결성 검증 과정에서 소모 전력 측정을 위해 출력된 화면이 실제 입력 샘플과 동일한 것인지에 대해 검증한다. 마지막으로, 소모 전력 측정 과정에서 AMOLED 디스플레이의 소모 전력을 측정하고, 맵핑 테이블 <RGB 값, 소모 전력>을 완성한다.

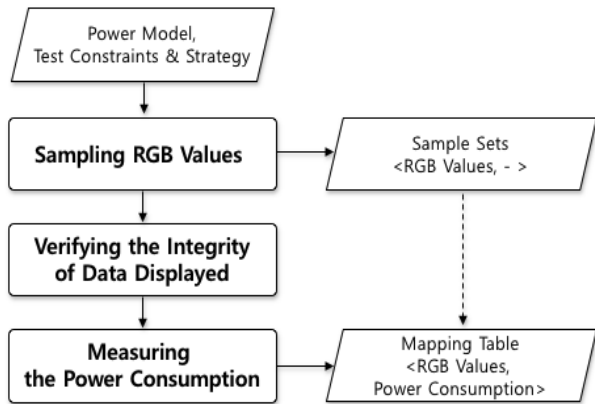


Fig. 6. Process for Providing Power Consumption Information for Mobile AMOLED Display

4.1 샘플 추출 과정

샘플 추출 과정에서는 본 논문에서 제안하는 RGB 색 공간 분할 기법을 통해 샘플링을 수행한다. 이 때, RGB 색 공간 분할은 색 차원 혹은 전력 차원에서 진행될 수 있다. 이 중 전력을 고려한 RGB 색 공간 분할은 3.4절에서 설명한 바와 같이 분할이 진행되는 채널을 선택하기 위해 샘플(3개)의 소모 전력 정보를 필요로 한다. 이를 지원하기 위해서는 2가지 방법이 가능하다.

첫 째, 실시간으로 샘플 추출기에서 모바일 기기로 각 샘플의 출력을 지시 한 뒤, 전력 정보를 수집하며 RGB 색 공간을 분할하는 것이다. 이 방법은 실측을 기반으로 하고 있기 때문에 정확한 분할이 가능하나, 무선 통신(블루투스 등) 과정에서 소모되는 전력의 다변적인 특성으로 인해 전체 소모 전력에서 디스플레이만의 소모 전력을 추출하는데 어려운 한계를 가지고 있다. 또한, USB를 통한 유선 통신은 USB를 통해 인가된 전류 중 통신을 위한 전류와 충전을 위한 전류를 구별할 수 없기 때문에 전력 측정에 한계를 갖는다.

두 번째 방법은 전력 모델을 활용하여 RGB 색 공간을 분할하는 것이다. 이와 같은 방법은 실측을 기반으로 분할하는 첫번째 방법에 비해 정확성은 떨어지는 단점을 가지고 있다. 하지만, 분할 과정은 높은 정확성이 요구되지 않으며, 전력 모델을 사용할 경우, 샘플링 과정이 매우 빠르기 때문에 실측 이전에 샘플들의 추세를 지켜볼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 전력 모델을 활용하여 분할을 위한 전력 정보를 제공 받는다. 다양한 전력 모델 중 본 연구에서는 모델 생성에 필요한 샘플의 수가 적은 [7]에서 제안한 OLED 전력 모델을 사용한다.

3장에서 설명한 바와 같이 RGB색 공간 분할은 색 차원 혹은 전력 차원에서 진행될 수 있기 때문에 테스트가 설정한 기준에 따라 각기 다른 샘플들이 추출될 수 있다.

4.2 출력 화면의 무결성 검증 과정

모바일 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 모델링에 관한 기존 연구들은 입력 이미지의 픽셀 정보를 획득하기 위해서

안드로이드 프레임워크의 Surface Manager [7, 11] 내 FrameBuffer를 관측한다. 하지만, FrameBuffer를 접근하기 위해서는 rooting을 수행하거나, Cyanogenmod, LineageOS [13] 과 같은 커스텀 롬을 필요로 하기 때문에 출시 시기가 오래되지 않은 기기를 대상으로는 적용이 불가능하다. 게다가, Android 문서에 따르면 보다 효율적인 버퍼의 통합을 위해서 향후 Android는 Hardware Composer HAL(HWC)를 사용할 것이라고 하고 있다. 이는 결국 디스플레이 제조사 이외에는 FrameBuffer의 접근이 더욱 힘들어진다는 것을 의미한다[14]. 이러한 한계를 개선하기 위해 본 연구에서는 ADB (Android Debug Bridge)의 명령어 중 하나인 screencap을 사용하여 디스플레이의 화면 정보를 가져온다. Fig. 7은 출력된 화면의 무결성을 검증하는 과정을 나타낸다.

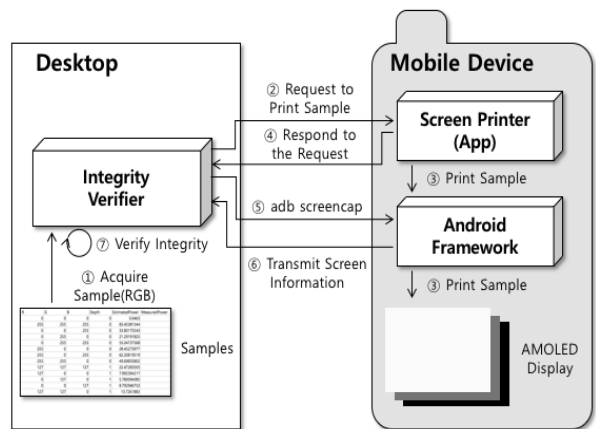


Fig. 7. Process for Verifying the Integrity of the Output Screen

먼저, 화면 출력 검증기는 RGB 색 공간 분할 기법을 통해 추출된 각각의 샘플들(①)을 모바일 기기에서 동작하는 화면 출력기에 보낸다(②). 화면 출력기는 샘플의 RGB 값으로 구성된 단일 색 이미지를 디스플레이에 출력한 뒤(③), 출력 완료 후 화면 출력 검증기에 보고한다(④). 화면 출력기의 보고를 받은 화면 출력 검증기는 ADB의 screencap 명령어를 사용(⑤)하여 디스플레이에 출력 중인 이미지 정보를 가져오고(⑥), 이미지의 모든 픽셀이 샘플값과 동일한지 검증한다(⑦).

4.3 소모 전력 측정 과정

보다 정확한 측정을 위해 모바일 기기의 비행기 모드로 실험을 진행했으며, 화면 출력기 앱 이외의 모든 중지 가능한 앱들은 중지를 시켰다. 또한, 화면 출력기는 샘플 집합을 CSV(Comma-Separated Value) 형식의 파일로 읽어, 메모리에 로드 한 뒤, 테스트가 정한 시간에 따라 샘플들을 테스트 하도록 구현하였다. 기기의 소모 전력을 측정하기 위해서 고속 충전이 지원되지 않는 구형 기기들은 배터리를 분리한 뒤, 배터리 단자로 전력을 공급했으며, 고속 충전이 지원되는 기기들은 배터리를 완충한 뒤 USB 단자를 사용하여 전력을 공

급하였다[15]. 공급되는 전력은 NI PCI-6250 DAQ(측정 전압 범위:-10~10V, 해상도: 16bits, 측정 속도: 100Hz)를 통해 측정되었다 [16].

5. 실험 및 결과 분석

5.1 색 차원과 전력 차원에서의 RGB 색 공간 분할 기법의 샘플링 비교

색 차원에서 진행되는 RGB 색 공간 분할은 깊이가 증가함에 따라 샘플의 수가 기하 급수적으로 증가된다. 반면, 전력 차원에서 진행되는 RGB 색 공간 분할은 소모 전력의 비선형성으로 인해 인접 샘플과의 색 차이가 크다는 한계를 가진다.

따라서 테스트는 두 가지 방법을 적절히 활용하여 균형 잡힌 샘플링을 수행해야 하는데, 본 절에서는 이에 대한 근거와 함께 색 차원과 전력 차원에서의 RGB 색 공간 분할 기법에 따른 샘플들의 특징을 분석한다.

Table 1은 색 차원의 분할 깊이에 따른 샘플들의 특징을 분석한 결과이며, Table 2는 전력 차원에서 분할되어 추출된 샘플들의 개수에 따른 인접 샘플 간 전력 차이의 최댓값을 분석한 결과이다. 실험은 갤럭시 S8을 대상으로 진행하였다.

Table 1. Sample Information According to the Partitioning Depth

Depth	0	1	2	3	4	5
Difference (RGB color space)	256	128	64	32	16	8
# of samples	8	27	125	729	4913	35937
Maximum power consumption difference between adjacent samples (mW)	83.41	60.98	37.92	21.14	11.16	5.73
# of additional samples*	46	760	6742	56028	∞	∞

* The number of samples divided and added at the power dimension to include all samples of the next depth

Table 2. Comparison of Power Differences According to the Partitioning Depth and the Number of Samples

# of samples	Depth (mW)					
	0	1	2	3	4	5
1000	11.06	11.06	11.06	12.9	-	-
5000	6.16	6.16	6.16	6.16	9.34	-
10000	4.79	4.79	4.79	4.79	5.13	-
20000	3.75	3.75	3.75	3.75	3.81	-
50000	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	3.16

위 실험의 결과에서 보이는 바와 같이 색 차원의 분할 깊이에 따라 샘플들의 개수는 기하급수적으로 증가하는 반면, 인접 샘플 간 전력 차이의 최댓값은 샘플 개수에 비해 큰 것을 확인 할 수 있다. 예를 들어, 색 차원에서 깊이 4로 분할을 진행한 경우, 샘플은 총 4913개가 추출되며, 인접 샘플 간 전력 차이의 최댓값은 11.16mW이다. 반면, 색 차원에서 분할을 하지 않았을 경우에는 1000개의 샘플만을 테스트하더라

도, 인접 샘플 간 전력 차이의 최댓값이 11.06mW로서 더 낮은 것을 확인 할 수 있으며, 5000개의 샘플을 테스트 할 경우에는 거의 절반인 6.16mW인 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 차이에도 불구하고, 전력 차원에서의 분할을 통해 획득한 샘플이 많아질 경우에는 색 차원에서의 분할을 통해 획득한 샘플을 모두 포함하여 추출된 샘플간에 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 색 차원에서 깊이 1로 분할 후, 전력 차원에서 분할하여 총 1000개의 샘플을 추출한 경우에는 이미 787번째 샘플(27+760)이 색 차원에서 깊이 2로 추출 후 전력 차원에서 분할하여 얻어지는 샘플들(125개)을 모두 포함한다. 그 결과, Table 2에서 보이는 바와 같이 색 차원에서 깊이 1과 깊이 2로 추출된 샘플들은 1,000개 이상의 모든 경우에서 동일한 결과값을 가진다.

5.2 AMOLED 디스플레이의 RGB 값과 소모 전력 간 맵핑 테이블

본 절에서는 5.1절의 실험 결과에 기반하여 갤럭시 S8에 탑재된 AMOLED 디스플레이의 RGB값과 소모 전력 간 맵핑 테이블을 생성하는 과정을 설명한다.

1) 샘플 추출 과정

맵핑 테이블을 생성하기 위해서는 주어진 실험 제약 조건에 따른 샘플링 개수를 산정하고, 샘플 추출을 위한 기법을 특정해야 한다. 본 실험에서는 테스트 시간을 10시간으로 제한하고, 샘플 1개당 30초씩 총 1200개의 샘플을 테스트한다.

Table 1에서 보여지는 바와 같이 1200개의 샘플을 통해서 색 차원에서의 분할 깊이 3까지의 샘플들을 보장하며, 깊이 4이상은 보장 할 수 없다(깊이4의 경우, 최소 4913개의 샘플이 필요). 깊이를 1로 분할 할 경우, 787번째 샘플이 깊이를 2로 분할하여 생성되는 모든 샘플을 포함하기 때문에 깊이 0~2로 추출되는 샘플은 모두 동일하다. 따라서 1200개의 샘플을 추출할 경우에는 색 차원에서 깊이 2 혹은 깊이 3으로 분할 한 뒤, 전력 차원에서 분할하여 샘플을 추출할 수 있다.

본 연구는 Table 2에서 보여지는 바와 같이 샘플 1000개일 경우, 깊이2와 깊이3의 인접 샘플 간 전력 차이의 최댓값이 약 1.84mW 인 것을 고려하여 색 차원에서 깊이 2로 분할 한 뒤, 전력 차원에서 분할하여 샘플 1200개를 추출하였다.

2) 출력된 화면의 무결성 검증 과정

4장에서 언급한 바와 같이 1200개 샘플 각각을 모바일 기기에 출력하고, ADB 명령어인 screencap을 활용하여 출력된 이미지의 모든 픽셀이 샘플의 RGB 값과 동일인지 검증한다. 이러한 과정은 추가적인 전력을 소모하기 때문에 소모 전력 측정 과정 이전에 별도로 진행한다. 이러한 과정을 통해 1200개의 샘플 모두가 문제 없이 출력되는 것을 검증하였다.

3) 소모 전력 측정 과정

샘플 추출 과정에서 RGB 색 공간 분할 기법을 통해 추출

된 샘플들 각각에 대해 단일 RGB 값으로 구성된 이미지를 30초간 출력하고, 이 때 소모되는 전력을 측정하였다. Fig. 8은 측정된 전력 값의 예이다. 모바일 기기에서 출력 이미지가 업데이트되며 발생하는 다양한 오버헤드는 본 연구 범위에 포함되지 않기 때문에 측정된 30초 중 앞, 뒤 1초씩 2초를 제외한 28초의 평균값을 전력 측정값으로 한다.

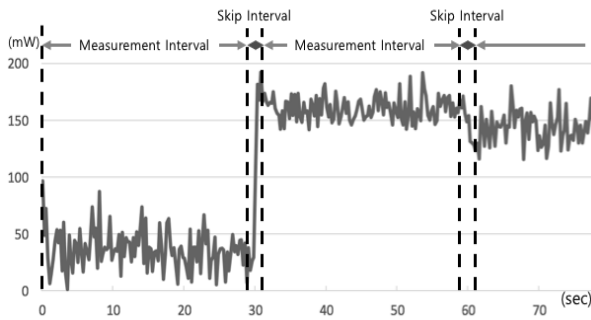


Fig. 8. Example of Power Consumption Measurement Results

위 과정을 통해 1200개의 샘플들로 구성된 갤럭시 S8에 탑재된 AMOLED 디스플레이의 RGB값과 소모 전력 간 맵핑 테이블을 생성한다. Fig. 9는 완성된 맵핑 테이블의 예이다.

R	G	B	Power
239	255	255	0.160221136
239	223	239	0.140740477
175	191	127	0.084311117
175	191	159	0.092503014
175	223	127	0.098243075
175	223	239	0.13041792
175	191	223	0.11597902

Fig. 9. Example of Mapping Tables

5.3 AMOLED 디스플레이의 소모 전력 모델의 정확도와 계산 복잡도의 상관관계

AMOLED 디스플레이의 소모 전력 모델은 정확도 뿐만 아니라 계산 복잡도를 고려해야 한다. 특히, 모바일 기기에 탑재되는 디스플레이의 해상도가 증가함에 따라 디스플레이의 전력 모델이 갖는 계산 복잡도의 중요성은 더욱 커지고 있다. 예를 들어, 갤럭시 S8의 경우에는 최대 2960 * 1440 픽셀로 구성되어 있기 때문에 소모 전력 추정을 위해서는 1프레임당 약426만번의 연산이 필요하다. 물론 [7]에서와 같이 특정 픽셀만을 샘플링하여 연산 횟수를 줄이는 연구들은 있으나, 샘플링 기법이 학습을 필요로 하기 때문에 이미지에 의존적이며, 샘플의 개수가 적어질 수록 오차가 증가한다는 단점을 가지고 있다.

따라서 전력 모델의 정확도와 계산 복잡도에 대한 상관관계를 제시하여 전력 모델을 필요로 하는 사용자가 자신의 필요에 따라 모델을 선택할 수 있도록 관련된 정보를 제공해야

할 필요가 있다. 만약 기존의 전력 모델 생성 과정을 통해 이에 대한 실험을 진행하였다면, 분석되는 전력 모델의 개수에 따라 전력 측정 활동을 반복해서 진행했어야 할 것이다. 하지만, 본 연구에서 제안하는 RGB 색 공간 분할 기법을 통해 생성된 RGB 값과 소모 전력 간 맵핑 테이블을 이용한다면 단 한번의 전력 측정 활동을 통해 다양한 전력 모델의 정확도를 계산할 수 있을 것이다.

Table 3은 갤럭시 S4, S7, S8을 대상으로 3가지 전력 모델의 정확도 및 계산 복잡도의 상관관계를 분석한 표이다. 실험을 진행한 전력 모델들은 회귀 분석을 기반으로 하고 있다. 다중 회귀 분석에 사용되는 독립변수로서 Table 3의 ①은 R, G, B 값, <표 3>의 ②는 R², G², B² 값, Table 3의 ③은 R * G, G * B, B * R 값을 활용하였다. 계산 복잡도는 각각의 모바일 기기에서 각각의 전력 모델을 통해 1프레임의 전력 추정에 소요되는 상대 시간을 측정하였다.

상대적으로 출시 시기가 오래된 갤럭시 S4의 경우에는 전력 모델이 복잡해짐에 따라 소모 전력을 추정하는 시간이 상대적으로 더욱 오래 소요되는 것을 확인할 수 있다. 반면, 갤럭시 S8의 경우에는 전력 모델이 복잡해지더라도 소모 전력을 추정하는데 소요되는 시간이 상대적으로 적게 소요되면서도, 오차의 폭은 큰 폭으로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 소모 전력을 추정하기 위해서 연산 능력이 낮은 기기를 대상으로는 단순한 모델을, 연산 능력이 높은 기기를 대상으로는 복잡한 모델을 적용하는 것이 효과적이다.

Table 3. Evaluation of Power Models (accuracy, relative time spent estimating power)

Device	Test Item	4	①+②	①+③	①+②+③
S4	Error (%) N=240	5.83	4.5	5.33	2.70
	Execution Time(msec)	-	+ 21	+ 41	+ 83
S7	Error (%) N=240	11.84	8.67	11.45	6.69
	Execution Time(msec)	-	+ 22	+ 18	+ 27
S8	N=240	13.32	8.00	12.49	3.10
	Error (%) N=1200	11.91	8.44	11.49	3.50
	Execution Time(msec)	-	+ 15	+ 22	+ 40

N: Number of Sample

이러한 분석 과정과 같이 본 논문에서 제안하는 맵핑 테이블을 사용할 경우, 소모 전력 측정 활동을 한번만 수행하더라도 맵핑 테이블을 재사용하여 다양한 전력 모델을 생성하고 평가할 수 있다.

6. 결론 및 향후 계획

본 논문은 모바일 AMOLED 디스플레이의 전력 모델을 생성하는 과정에서 전력 측정 활동을 제거하기 위해 RGB 값과 소모 전력으로 구성된 맵핑 테이블을 제공하는 방법에 대해 제안한다. 또한, 모든 RGB 조합을 테스트할 수 없는 한계를 개선하기 위한 색 차원과 전력 차원을 고려한 2가지의 서로 다른 RGB 색 공간 분할 기법을 제안한다.

실험을 통해 색 차원과 전력 차원에서의 분할 기법에 따른 샘플들의 특징을 분석하고 제시하여, 테스터가 자신의 기준에 맞는 샘플을 취득할 수 있도록 돕는다. 또한, 갤럭시 S8에 탑재된 AMOLED 디스플레이의 RGB 값과 소모 전력 간 맵핑 테이블을 생성 및 제공하여, 관련 연구자들이 전력 측정 활동 과정 없이도 전력 모델을 생성할 수 있도록 지원한다. 마지막으로, 3가지 모바일 디바이스를 대상으로 4가지 전력 모델의 정확도와 계산 복잡도의 상관관계를 제시하여, 맵핑 테이블의 재사용 가능성을 확인하는 한편, 전력 모델 사용자가 자신의 필요성에 부합하는 모델을 선택함에 있어 참조 가능한 정보를 제공했다.

향후 연구로서, 더욱 다양한 모바일 AMOLED 디스플레이를 대상으로 맵핑 테이블을 생성하고, 공개할 계획이다.

References

[1] M. A. Hoque et al., "Modeling, profiling, and debugging the energy consumption of mobile devices," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol.48, No.3, p.39, 2016.

[2] A. Carroll, and G. Heiser, "The systems hacker's guide to the galaxy energy usage in a modern smartphone," *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Workshop on Systems*, ACM, 2013.

[3] M. Dong and L. Zhong, "Chameleon: a color-adaptive web browser for mobile OLED displays," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.11, No.5, pp.724-738, 2012.

[4] D. Li, A. H. Tran, and W. G. Halfond, "Making web applications more energy efficient for OLED smartphones," *Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering*, (pp. 527-538), ACM, 2014.

[5] OLED Readies LCD Takeover in Smartphones [Internet], <https://epsnews.com/2016/07/25/oled-readies-lcd-takeover-smartphones/>

[6] S. Iyer et al., "Energy-Adaptive Display System Designs for Future Mobile Environments," *MobiSys.*, Vol.3. pp.245-258, 2003.

[7] M. Dong, Y.-S. K. Choi, and L. Zhong, "Power modeling of graphical user interfaces on OLED displays," *Proceedings of the 46th Annual Design Automation Conference*, (pp. 652-657), ACM, 2009.

[8] Seongwoo Hong, Suk-Won Kim, and Young-Jin Kim, "3 channel dependency-based power model for mobile AMOLED displays," *Proceedings of the 54th Annual Design Automation Conference 2017* (p. 4). ACM, 2017.

[9] Z. Yang, "Powertutor—a power monitor for android-based mobile platforms," EECS, University of Michigan, retrieved September 2 (2012): 19.

[10] Chanmin Yoon et al., "AppScope: Application Energy Metering Framework for Android Smartphone Using Kernel Activity Monitoring," *USENIX Annual Technical Conference*, Vol.12. 2012.

[11] Dongwon Kim, Wonwoo Jung, and Hojung Cha, "Runtime power estimation of mobile AMOLED displays," *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2013. IEEE, 2013.

[12] D. Baek et al., "Generation and Evaluation of Power Model for Mobile AMOLED Display using RGB Color Space Partitioning Method," *Korea Conference on Software Engineering (KCSE)*, 2018 20th: 42-43.

[13] LineageOS [Internet], <https://lineageos.org>

[14] Android Open Source Project [Internet], <https://source.android.com/devices/graphics/arch-sf-hwc>

[15] Barsukov, Yevgen, and Jinrong Qian. Battery power management for portable devices. Artech house, p.67, 2013.

[16] NI PCI-6250-National Instruments [Internet], <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ko/nid/14122>



백 두 산

<https://orcid.org/0000-0003-4644-9543>

e-mail : whitedusan@gmail.com

2012년 아주대학교 전자공학과(학사)

2012년~2018년 아주대학교 전자공학과
(박사)

2018년~현 재 (주)KT 전임연구원

관심분야: Low-Power Mobile Software, Embedded Software,
SW Engineering(Traceability)



최 유 림

<https://orcid.org/0000-0002-4860-575X>

e-mail : cy15780@ajou.ac.kr

2017년 아주대학교 전자공학과(학사)

2017년~현 재 아주대학교 전자공학과
석사과정

관심분야: Low-Power Mobile Software,
Embedded Software



이 병 정

<http://orcid.org/0000-0002-2750-7608>

e-mail : bjlee@uos.ac.kr

1990년 서울대학교 계산통계학과(학사)

1998년 서울대학교 전산학과(석사)

2002년 서울대학교 전기컴퓨터공학부
(박사)

1990년~1998년 (주) SK하이닉스 연구원

2002년~현 재 서울시립대학교 컴퓨터과학부 교수

관심분야: Software Testing, Software Engineering



이 정 원

<http://orcid.org/0000-0001-8922-063X>

e-mail : jungwony@ajou.ac.kr

1993년 이화여자대학교 전자계산학과(학사)

1995년 이화여자대학교 전자계산학과(석사)

1995년~1997년 LG종합기술원 주임연구원

2003년 이화여자대학교 컴퓨터학과(박사)

2003년~2006년 이화여자대학교 컴퓨터학과 BK교수, 전임강사(대우)

2006년~현 재 아주대학교 전자공학과 교수

관심분야: Embedded Software, Automotive Software,

Bio·Medical Data Modeling