

# 기계학습을 사용한 OLED 디스플레이의 컬러 프로파일링 연구

## Machine Learning Approaches for OLED Display Color Profiling

김한<sup>1</sup>, 김동호<sup>2\*</sup>

Howard Kim<sup>1</sup>, Dong Ho Kim<sup>2\*</sup>

### 요약

본 연구는 디스플레이의 컬러 프로파일링시 인공신경망 기반 기계학습을 적용하여 더 높은 정확도를 확보하는 방법으로 접근하였다. PC 시장에서도 올레드(OLED) 방식 디스플레이의 사용이 증가하는 추세에 맞추어 삼성디스플레이의 15인치급 OLED 디스플레이 패널을 기준으로 분광복사계를 사용하여 광범위한 계측을 실시한 후 기계학습을 위한 훈련 및 데이터 세트를 정의하였다. 삼자극치 데이터인 XYZ와 색좌표인 Yxy 데이터를 기반으로 훈련 세트를 정의하였으며, 네트워크 학습을 바탕으로 색차(color difference)를 구하였다. 본 연구에서 사용한 모델은 평균적으로 기존 모델 대비 더 낮은 색차와 높은 품질의 결과를 도출하였다. 평균색차와 최대색차가 모두 안정적으로 낮아졌으며, 재현 컬러의 품질은 표준편차의 결과를 통해 확인하였고, 계조 단계별 밝기 정확도와 선형성은 감마표준편차를 통해 확인하였다. 심층신경망 모델간의 차이에는 Yxy-RGB 관계보다 XYZ-RGB 관계가 기계학습 방식으로 접근하는데 미세하나마 더 유리한 결과를 도출하였다.

핵심어 : 올레드, 프로파일링, 머신러닝, 색채관리, 캘리브레이션

### Abstract

This study approaches the method of ensuring higher accuracy by applying artificial neural network-based machine learning to color profiling of displays. We conduct extensive measurements using a spectroradiometer based on Samsung Display's 15-inch OLED display panel, and then define training data sets for machine learning. The training set is defined based on the tristimulus data XYZ and the color coordinates Yxy data, and the color difference is obtained based on network learning. The model used in this study produce on average, lower color difference and higher quality results than the existing model. Both the average color difference and the maximum color difference are stably lowered, and the quality of the reproduced color is confirmed through the standard deviation result, and the brightness accuracy and linearity for each gray level are confirmed through the gamma standard deviation. Regarding the differences between the deep neural network models, the XYZ-RGB relationship rather than the Yxy-RGB relationship yield a slightly more advantageous result in approaching the machine learning method.

Keyword : OLED, color profiling, deep learning, color management

1 Department of Information Technology & Media Engineering, Graduate School of Convergence Science, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, Korea [Graduate Student]

e-mail: howardkim@seoultech.ac.kr

2 Department of Information Technology & Media Engineering, Graduate School of Convergence Science, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, Korea [Professor]

e-mail: dongho.kim@seoultech.ac.kr (Corresponding author)

\* 본 논문은 2021년도 차세대컨버전스정보서비스학회 동계학술대회에서 발표한 논문을 수정 및 보완한 것임

Received(July 7, 2022), Review Result(1st: August 3, 2022), Accepted(September 8, 2022), Published(September 30, 2022)



© 2022 The Authors. Published by NCISS.  
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.  
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

## 1. 서론

운영체제를 기반으로 영상을 재현하는 컴퓨터 디스플레이에서는 보다 정확한 컬러를 재현하기 위해 장치 프로파일을 운영체제에 등록하고 애플리케이션에서 이를 호출하여 컴퓨터에 연결된 디스플레이의 특성을 파악하였다. 디스플레이의 유형, 기기, 제조사마다 다르게 재현되는 모니터 디스플레이의 컬러는 장치 프로파일을 기반으로 컬러 매핑을 거쳐 사용자에게 정확한 컬러로 재현이 가능하다 [1].

OLED 방식 디스플레이 기술의 발전은 방송 텔레비전에서 스마트폰용 모바일 디스플레이와 태블릿 디스플레이를 거쳐 PC 용 디스플레이에서도 본격적인 보급과 확대가 진행되고 있다. OLED 방식 디스플레이는 기존의 LCD 방식 디스플레이와 비교시 상대적으로 더 포화된 채도, 더 깊은 검정 등 영상과 이미지의 재현에서 상당한 시청경험의 차이를 일으킨다. 이와 같은 상황에서 정확한 컬러와 계조의 재현은 시청자 관점 뿐만 아니라 광색역의 UHD 콘텐츠를 다루는 생산자 측면에서도 중요성이 증대되고 있다 [2].

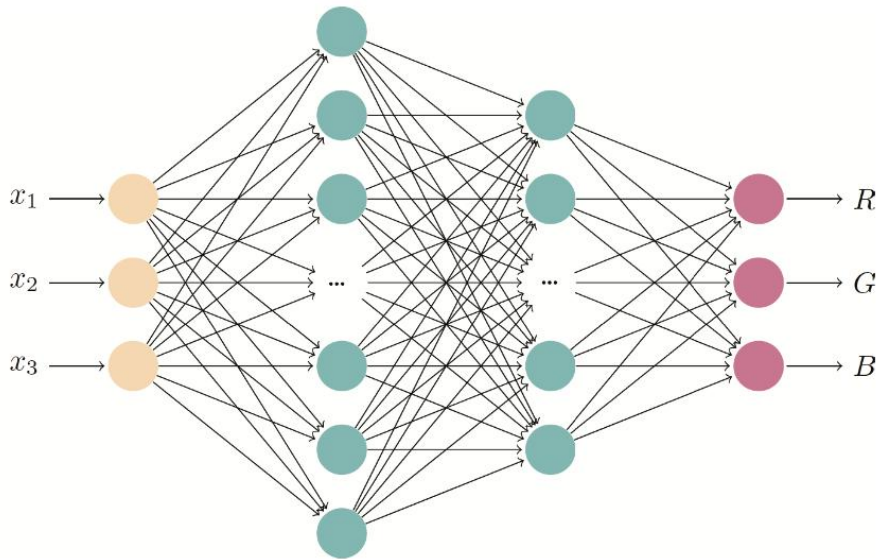
ISO 15076 표준으로 정의되어 있는 ICC의 컬러 매니지먼트 [3] 방법은 1990년대 이후로 업계에서 표준으로 사용되어 왔으며, 프로파일링 방법은 필터식 색채계나 분광계와 같은 계측 장비를 사용하여 디스플레이의 컬러를 계측한 후 수학적 모델을 사용하여 RGB 원색의 입출력 테이블이나 행렬을 구하는 형태이다 [4][5]. 본 연구에서는 계측치인 XYZ와  $Y_{xy}$  값을 기초로 최적의 RGB 매핑 값을 얻기 위한 방법을 계산할 수 있도록 훈련된 뉴럴 네트워크 모델을 구축하여 기계학습 모델이 컬러 재현의 정확도와 색차를 개선시킬 수 있을지 실험을 통해 알아보았다.

## 2. 기계학습 과정

본 연구에서는 실험을 위해 시료 OLED 디스플레이로 ASUS 사의 비보북 프로 15 OLED 노트북의 패널을 사용하였다. 해당 패널은 삼성디스플레이가 제조 공급하는 OLED 패널로 현 시점 PC 노트북용 OLED 디스플레이의 다수를 점하는 패널이다. 디스플레이 컬러의 계측에는 X-Rite사의 Eye-one Pro 2 스펙트로포토미터를 분광복사계로 사용했다. 훈련 세트를 만들기 위해 각 RGB 채널 별로 입력 범위를 8개의 균등한 간격으로 나누고 입력공간의 3차원 연결망을 형성하기 위해  $8^3=512$  개의 조합을 만들었다. 계측 장치의 고유 오차와 OLED 디스플레이가 가진 밝기와 색상의 가변 특성을 고려하여 3번의 측정을 실시하여  $512 \times 3=1,536$  개의 데이터를 최종적으로 확보하였다. 평가 데이터 세트는 훈련 세트보다 한단계 낮은 7개의 간격에 대한  $7^3=343$  조합을 사용하였다.

XYZ와  $Y_{xy}$  좌표에서 지정한 컬러를 재현하기 위해 디스플레이에서 설정해야 하는 RGB 입력값을 찾는 문제를 해결하도록 훈련을 실시하였다. 이와 같은 방법은 디스플레이에 대한 역모델

(inverse model)로 알려져 있다 [6]. XYZ 좌표를 사용하는 경우 RGB 입력과 밀접하게 관련을 지을 수 있다는 장점이 있으나, Yxy 색도좌표를 이용하는 경우 휘도 정보인 Y와 색도정보인 xy를 분리하는 문제가 발생한다. 두 좌표 공간 모두 학습으로 인한 장점이 발생하므로 두 좌표를 모두 기계학습에 사용하였다 [7]. 정량적인 비교 데이터 산출을 위해 두 좌표를 사용한 신경망에 동일한 구조를 적용하였다. 두 신경망 모두 Python 기반으로 Scikit-learn 및 Keras 라이브러리를 사용하여 객체 정의 및 훈련을 진행하였다 [8][9].



[그림 1] 심층신경망 구조

[Fig. 1] Deep Neural Network Structure

훈련에는 [그림 1]과 같이 128개와 32개로 이루어진 두 개의 은닉층 구조로 심층신경망을 형성하였다. 활성화 함수로는 ReLU 함수를 사용하였으며, 학습을 위해 ADAM 최적화 알고리즘을 사용하였다 [10][11]. 동일한 훈련 데이터 세트를 사용하여 서로 다른 네트워크를 훈련하도록 하였다. XYZ는 최종 수렴에 400 Epoch 가 필요하였으며, Yxy 의 경우 600 Epoch 가 필요하였다 [12].

### 3. 실험 결과

훈련 결과 산출된 RGB 값을 바탕으로 이를 디스플레이 장치 프로파일로 반영한 후 디스플레이에 실제 재현되는 컬러를 측정하여 정확도를 분석하였다. 실제 재현되는 영상의 화질 분석에서 각 밝기 영역별 계조의 정확한 밝기를 파악하기 위해 검정에서부터 흰색까지 총 21단계의 샘플링을

실시하였으며, RGB 컬러의 단일 결과 및 합산 결과를 파악하기 위해 30개의 컬러를 샘플링하였다 [13]. 영상의 재현 품질을 확인하기 위한 각 샘플링 컬러의 색차(color difference)는  $\Delta E_{00}$ 을 기준으로 산출하였다 [14].

	Measured Values				Color distance			
	L*	a*	b*	y	$\Delta L^*_{00/w}$	$\Delta C^*_{00/w}$	$\Delta H^*_{00/w}$	$\Delta E_{00}$
	100	0	0		0	0	0	0
	0.57	0.22	-0.02		0.17	0.33	0	0.38
	1.7	0.22	-0.02	2.1	0.11	0.33	-0.01	0.35
	6.49	0.19	-0.25	2.14	0.33	0.38	0.01	0.5
	13.56	-0.09	-0.24	2.16	0.36	0.27	0.01	0.45
	20.05	0.06	-0.35	2.18	0.22	0.35	0.01	0.42
	25.97	-0.22	-0.25	2.2	-0.04	0.41	0.01	0.41
	32.35	-0.35	0.08	2.18	0.27	0.52	0	0.59
	37.98	-0.48	0.19	2.19	0.21	0.74	0	0.77
	43.43	-0.55	0.22	2.19	0.16	0.84	0	0.86
	48.76	-0.42	-0.39	2.19	0.17	0.73	0.01	0.75
	53.79	-0.02	-1.01	2.2	0.01	0.99	0.02	0.99
	58.83	-0.23	-1.1	2.2	0.01	1.13	0.02	1.13
	63.84	-0.71	-0.12	2.19	0.07	1.04	0.01	1.05
	68.36	-0.66	-0.52	2.22	-0.17	1.09	0.01	1.1
	73.21	-0.37	-0.39	2.21	-0.07	0.67	0.01	0.67
	77.94	0.09	-0.3	2.2	0	0.33	0.01	0.33
	82.39	0.62	-0.8	2.21	-0.06	1.19	0.02	1.19
	86.81	0.02	-0.99	2.23	-0.1	0.97	0.02	0.98
	91.3	0.42	-1.13	2.22	-0.04	1.26	0.02	1.26
	95.75	-0.28	-0.12	2.18	0.02	0.43	0	0.43
	27.71	56.8	47.41		0.16	0.03	-0.04	0.17
	57.12	94.88	99.81		0.82	0.18	0.24	0.88
	69.94	61.92	27.67		0.02	0.5	-0.69	0.85
	46.32	-64.69	62.05		0.56	0.18	0.05	0.59
	88.33	-109.6	104.56		1.1	0.45	0.21	1.2
	90.79	-74.62	56.23		0.6	0.57	0.34	0.9
	12.69	42.83	-70.58		0.15	0.34	0	0.37
	30.83	71.41	-117.09		-0.19	0.27	0.05	0.32
	57.96	29.34	-70.65		-0.89	0.67	0.43	1.04
	48.01	-41.49	-11.28		0.35	0.18	0.34	0.52
	90.27	-70.43	-17.21		0.29	0.43	-0.45	0.69
	94.24	-36.22	-10.1		0.02	0.68	-0.29	0.74
	31.14	63.79	-38.48		-0.01	0.24	-0.49	0.55
	62.23	106.32	-62.33		-0.09	0.14	-0.13	0.21
	80.89	50.86	-31.18		-0.33	0.7	0.15	0.79
	52.48	-10.72	73.21		0.28	0.05	0.12	0.31
	98.4	-18.1	123.4		0.6	0.24	0.2	0.68
	98.97	-9.98	47.02		0.29	0.53	-0.21	0.64
	47.74	43.96	20.92		-0.09	-0.05	0.14	0.17
	63.23	-55.14	41.92		0.53	0.51	0.18	0.76
	39.34	20.92	-51.66		-0.31	0.33	-0.03	0.46
	64.75	-37.73	-10.04		0.33	0.52	-0.25	0.66
	50.08	53.55	-32.9		-0.36	0.25	-0.22	0.49
	69.13	-10.48	52.41		0.38	0.29	0.23	0.53
	59.26	100.1	-16.14		0.36	0.11	0.26	0.46
	92.5	-62.94	112.37		0.75	0.39	0.66	1.08
	65.52	-22.27	-58.42		-0.2	0.3	0.34	0.42
	88.98	-91.82	28.84		0.66	0.58	-0.33	0.94
	47.15	88.48	-88.61		-0.54	0.23	-0.42	0.73
	77.96	33.38	107.99		0.28	0.21	-0.72	0.8

[그림 2] XYZ 모델 실제 계측 샘플링 색차

[Fig. 2] Color Differences of XYZ model

XYZ 모델을 기반으로 제작된 프로파일을 운영체제에 반영 후 실제 디스플레이에서 재현되는 영상의 컬러와 계조를 측정하여 색차를 계산한 결과는 [그림 2]와 같다. Yxy 모델을 사용한 경우 [그림 3]과 같은 색차 결과를 도출하였다.

Measured Values					Color distance			
	L*	a*	b*	y	$\Delta L^*_{00/w}$	$\Delta C^*_{00/w}$	$\Delta H^*_{00/w}$	$\Delta E_{00}$
	100	0	0		0	0	0	0
	0	0.06	0		-0.16	0.02	-0.01	0.16
	0.98	0.04	0	2.28	-0.31	0.02	-0.01	0.31
	5.09	-0.06	-0.14	2.25	-0.52	0.15	-0.06	0.54
	12.25	0.6	0.18	2.23	-0.49	0.89	-0.01	1.02
	19.19	-0.42	0.62	2.22	-0.37	0.86	0	0.94
	25.25	-0.4	-0.11	2.24	-0.57	0.6	0.01	0.82
	31.24	0.4	-0.36	2.24	-0.6	0.69	0.02	0.92
	36.9	0.18	0.25	2.24	-0.71	0.37	-0.01	0.8
	42.78	-0.71	0.31	2.23	-0.43	1.08	0	1.17
	48.16	-0.73	0.38	2.22	-0.43	1.13	0	1.21
	53.25	-0.46	0.44	2.23	-0.51	0.81	0	0.96
	58.34	-0.65	0.17	2.23	-0.43	0.96	0	1.05
	63.31	0.22	0.31	2.23	-0.37	0.44	-0.01	0.58
	68.21	-0.06	-0.25	2.23	-0.29	0.26	0.01	0.39
	73.08	0.11	-0.15	2.22	-0.16	0.23	0.01	0.28
	77.74	-0.18	0.4	2.22	-0.14	0.48	0	0.5
	82.24	0.37	-0.1	2.23	-0.16	0.56	-0.01	0.58
	86.68	-0.37	0.12	2.25	-0.18	0.56	0	0.59
	91.26	0.04	-0.03	2.23	-0.07	0.07	0	0.1
	95.72	-0.52	0.51	2.2	0	0.91	0	0.91
	26.8	55.52	46.02		-0.52	-0.4	-0.18	0.68
	56.57	94.12	97.1		0.32	-0.17	-0.31	0.47
	69.38	60.51	28.16		-0.42	0.23	-0.15	0.5
	44.28	-62.92	60.74		-1.38	-0.25	-0.05	1.4
	85.91	-106.21	102.61		-0.46	-0.04	-0.03	0.47
	89.49	-72.29	56.16		-0.21	0.2	-0.13	0.32
	11.09	43.41	-70.34		-0.88	0.37	0.4	0.98
	30.21	70.6	-115.89		-0.68	0.07	0.01	0.68
	58.09	27.39	-68.18		-0.77	-0.02	-0.19	0.79
	46.15	-39.86	-11.44		-1.46	-0.34	0.7	1.66
	88.86	-67.95	-18.24		-0.6	-0.08	0.34	0.69
	93.51	-34.42	-10.1		-0.43	0.03	0.03	0.43
	30.32	63.03	-36.93		-0.65	-0.09	-0.1	0.67
	61.67	105.58	-61.1		-0.57	-0.05	0.08	0.57
	80.6	49.04	-30.03		-0.52	0.11	0.16	0.56
	51.34	-9.93	72.57		-0.85	-0.12	-0.27	0.89
	97.12	-17.65	122.22		-0.14	0.05	0.07	0.17
	98.02	-9.88	45.79		-0.26	0.14	-0.1	0.31
	47.08	43.85	21.04		-0.73	-0.07	0.23	0.77
	61.8	-53.5	41.46		-0.69	0.13	-0.08	0.7
	38.94	21.25	-51.38		-0.65	0.29	0.28	0.7
	63.62	-35.99	-10.48		-0.61	-0.06	0.32	0.69
	49.82	53.23	-32.36		-0.63	0.11	-0.09	0.64
	68.19	-9.94	52.08		-0.35	0.17	-0.06	0.39
	58.77	99.39	-16.48		-0.08	0	0.12	0.14
	91.03	-61.07	111.61		-0.16	0.16	0.25	0.33
	64.67	-21.63	-58.02		-0.9	0.14	0.53	1.03
	87.31	-89.47	27.01		-0.41	0.05	0.05	0.41
	46.8	87.73	-86.95		-0.88	-0.03	-0.17	0.9
	77.19	31.5	107.72		-0.27	0.08	0.15	0.32

[그림 3] Yxy 모델 실제 계측 샘플링 색차

[Fig. 3] Color Differences of Yxy model

두 결과를 종합한 결과는 아래 [표 1]과 같다.

[표 1] 모델별 색차

[Table 1] Color Differences by models

모델 Model	평균색차 Average $\Delta E_{00}$	최대색차 Maximum $\Delta E_{00}$	표준편차 Standard Deviation $\Delta E_{00}$	감마표준편차 Gamma Standard Deviation
기존	1.12	2.18	0.48	0.15
XYZ	0.66	1.26	0.30	0.03
Yxy	0.65	1.66	0.34	0.02

[표 1]은 기존의 전통적인 프로파일링 방법을 사용한 결과와 비교하여 기계학습을 기반으로 한 XYZ 모델과 Yxy 모델에 대한 실제 재현 컬러의 종합 결과를 나타낸다. 신경망 기반 모델의 색차는 기본 모델대비 모두 우위를 보였다. 평균색차, 최대색차, 표준편차, 감마표준편차 등 모든 측정 항목에서 기본 모델 대비 더 나은 품질을 재현하였다. 신경망 기반 두 모델 사이에서 최대 색차와 표준 편차에서는 작게나마 XYZ 모델이 유의미하게 더 나은 결과를 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 PC 기반 영상의 정확한 재현을 위해 OLED 디스플레이 장치를 프로파일링하는 방법으로 심층신경망 기반 기계학습 기술을 적용하여 보았다. 삼성디스플레이의 15인치급 노트북용 OLED 디스플레이를 기준으로 분광복사계를 사용하여 계측을 실시한 후 머신러닝을 위한 훈련 및 데이터 세트를 정의하였다. 삼자극치 기반의 XYZ와 함께 색좌표인 Yxy를 사용하여 훈련세트와 평가세트를 정의하였으며, 도출된 RGB 값을 기반으로 디스플레이 장치 프로파일을 생성하였다. 생성한 프로파일을 실제 디스플레이에 적용한 후 실측을 통해 색차(color difference)를 구하였으며 기존 모델 대비 심층신경망 모델이 얼마나 화질을 개선시킬 수 있는지를 살펴보고, XYZ 모델과 Yxy 모델간의 차이를 확인하였다.

본 연구에서 사용한 모델은 평균적으로 기존 모델 대비 전반적으로 더 낮은 색차와 높은 품질의 결과를 도출하였다. 평균색차와 최대색차가 모두 안정적으로 낮아졌으며, 재현 컬러의 품질은 표준편차의 결과로, 계조 단계별 밝기 정확도와 선형성은 감마표준편차를 통해 확인할 수 있었다.

심층신경망 모델간에는 Yxy-RGB 관계보다 XYZ-RGB 관계가 기계학습 방식으로 접근하는데 미세하나마 더 유리할 수 있음을 확인하였다. XYZ는 입력과 출력 사이에서 Yxy 보다 조금 더 직접적인 개별 상관관계를 가짐을 추론해 볼 수 있다.

본 연구를 바탕으로 추후 더 많은 유형의 디스플레이 기술 및 다양한 신경망 모델을 사용한 연구의 확장을 통해 고화질 디스플레이 성능 유지와 신경망 기반 컬러 관리에 기여할 것으로 예상된다.

다. 본 연구는 한 대의 OLED 디스플레이 및 계측장치, 제한된 수의 훈련 모델을 이용하여 실험한 결과로 적용에 한계를 가지며, 보다 다양한 디스플레이 기술 및 더 많은 시료, 훈련 모델의 시험을 통한 추가적인 연구를 기대한다.

## References

- [1] H. Kim, D. H. Kim, "OLED Display Color Characterization with Deep Learning Method", Next-generation Convergence Information Services Society Conference, December 29-30, 2021, Jeju, Korea, pp. 13-16.
- [2] H. Kim, D. H. Kim, "Display Characterization Methods for Accurate Color Representation Quality", *Journal of Digital Art Engineering & Multimedia*, vol. 9, no. 1, March 2022, pp. 85-92. doi: 10.29056/jdaem.2022.03.08.
- [3] M. Sugawara, S. Choi, D. Wood, "Ultra-High-Definition Television (Rec. ITU-R BT.2020): A Generational Leap in the Evolution of Television [Standards in a Nutshell]", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 3, pp. 170-174, May 2014, doi: 10.1109/MSP.2014.2302331.
- [4] International Color Consortium, Image technology colour management-Architecture, profile format, and data structure. Specification ICC. 1: 2004-10 (Profile version 4.2. 0.0), 2004.
- [5] M. Fairchild, D. R. Wyble, "Colorimetric characterization of the apple studio display (flat panel LCD).", Munsell Color Science Laboratory Technical Report, Center for Imaging Science Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA, July 1998. [online]. Available: scholarworks.rit.edu/article/920/.
- [6] R. Berns, "Methods for characterizing CRT displays", *Displays*, vol. 16, iss. 4, May 1996, pp. 173-182, doi: 10.1016/0141-9382(96)01011-6.
- [7] K. E. Spaulding, G. J. Woolfe, E. J. Giorgianni, "Reference input/output medium metric RGB color encodings", *PICS 2000: Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems Conference*, March 2000, Portland, OR, USA, pp. 155-163.
- [8] S. Westland, C. Ripamonti, V. Cheung, *Computational colour science using MATLAB*, John Wiley & Sons, 2012.
- [9] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, É. Duchesnay, "Scikit-learn: Machine Learning in Python", *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, October 2011, pp. 2825-2830.
- [10] F. Chollet, "Keras", [github.com, https://github.com/fchollet/keras](https://github.com/fchollet/keras), (accessed February 1, 2022).
- [11] A. F. Agarap, "Deep learning using rectified linear units (relu)", eprint arXiv:1803.08375. March 2018, doi: 10.48550/arXiv.1803.08375.
- [12] D. P. Kingma, J. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization", *3rd International Conference on Learning Representations*, May 7-9 2015, San Diego, CA, USA, doi: 10.48550/arXiv.1412.6980.
- [13] H. Larochelle, Y. Bengio, J. Louradour, P. Lamblin, "Exploring strategies for training deep neural networks", *Journal of Machine Learning Research*, vol. 10, no. 1, December 2009, pp. 1-40.

- [14] M. I. Cho, Y. S. Jeong, H. S. Kim, H. Kim, "A New Multimodal Database for Performance Evaluation in System Level", *IT CoNvergence PRActice (INPRA)*, vol. 3, no. 3, September 2015, pp. 11-17.
- [15] G. Sharma, W. Wu, E. Dalal, "The CIEDE2000 color difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations", *Color Research & Application*, vol. 30, no. 1, December 2004, pp. 21-30. doi: 10.1002/col.20070.