

휘도 변화량 정보를 이용한 HDR 이미지 분할 기법을 통한 지역별 톤 매핑 기법

위승우^o, 박대준, 정제창
한양대학교 전자컴퓨터통신공학과

slike0910@naver.com, daejoon12@gmail.com, jjeong@hanyang.ac.kr

Region-wise Tone Mapping Operator for Decomposed High Dynamic Range Image using Luminance Gradient Information

Seungwoo Wee^o, Daejun Park, Jechang Jeong

Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University

요 약

본 논문에서는 하나의 넓은 동적 영역(High Dynamic Range: HDR)을 갖는 이미지를 Earth Mover's Distance(EMD)값을 이용한 이미지 분할 기법을 적용한 유사 지역 그룹화를 통해, 각 그룹별로 톤 매핑을 수행하는 기법을 제안하고자 한다. 기존의 EMD 값을 통한 이미지 분할 알고리즘은 이미지 내의 같은 그룹으로 분류된 지역에서 휘도(luminance)의 변화가 클 때 후광 현상(halo artifact)이 발생하는 문제점을 보였다. 본 논문에서는 기존의 알고리즘으로 분할된 이미지를 처리할 때 휘도 변화량(gradient)의 정보를 활용하여 후광 현상 제거함으로써 주관적 화질을 향상시켰다.

1. 서론

넓은 동적 영역(HDR) 이미지는 다중 노출 영상들을 적절히 합성시켜 얻어진 영상을 말한다. 동적 영역(dynamic range)이란 최대 휘도 성분과 최소 휘도 성분의 비율을 말한다. 일반적인 PC 모니터의 경우 약 1,000:1의 동적 영역을 가지고 있다. 하지만 실제 세상은 약 250,000:1의 동적 영역의 밝기가 존재한다. 사람의 눈은 적응을 통해 약 100,000:1의 동적 영역을 구별할 수 있는 것을 감안한다면 일반적인 디스플레이로 우리의 눈에 적합한 영상/이미지를 표현하는 데에는 어려움이 있다. 넓은 동적 영역을 가진 이미지 콘텐츠를 일반적으로 사용되는 좁은 동적 영역의 디스플레이로 선형 압축을 수행하면 많은 정보들이 포화되어 손실된다. 이를 해결하고자 동적 영역을 사람의 눈의 특성에 맞춰 압축하는 알고리즘들이 제안되었다.

실제 세상의 동적 영역을 일반적인 모니터가 가진 좁은 동적 영역(Low Dynamic Range: LDR)으로 압축하는 것을 톤 매핑(tone mapping)이라고 한다. 톤 매핑 기법은 크게 전역적 톤 매핑(global tone mapping), 지역적 톤 매핑(local tone mapping)의 두 가지로 나뉜다. 전역적인 톤 매핑은 이미지 픽셀들의 공간적, 지역적 성질들을 고려하지 않고 이미지 전체에 같은 기법을 적용한다. 즉, 구현이 간단하지만 전체적으로 이미지의 고주파 성분을 손실한다는 단점이 있다. 반면에 지역적 톤 매핑은 이미지의 고주파 성분을 포함한 중요한 시각적 특징이나 정보들을 보존하기 위해 사람의 시각 체계(Human Visual System: HVS)가 반영된 알고리즘을 사용한다.

지역적 톤 매핑을 위한 다양한 알고리즘들이 제안되었다. 넓은 동적 영역 이미지의 예지 성분을 보존하며

블러링(blurring)시키는 알고리즘으로 저곡률 이미지 간소화기(Low Curvature Image Simplifier: LCIS)와 양방향 확산 필터(bilateral filter) 등이 있다.

본 논문에서는 이미지의 고주파 성분을 보존하는 정도를 나타내는 ρ 값을 휘도 변화량을 고려하여 결정하는 알고리즘을 통해 ρ 값을 구하는 과정에서 발생하는 후광 현상을 제거하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 기존의 EMD 알고리즘을 이용한 이미지 분할 및 톤 매핑 방법, 양방향 확산 필터를 이용한 지역적 적응 휘도(local adaptation luminance) 값을 구하는 방법과 ρ 값을 통한 지역적 톤 매핑에 대해 설명한다. 3장에서 기존의 이미지 분할 방법에서 발생하는 문제점과 해결책을 제시한다. 4장에서 실험 결과를 제시하고, 분석을 수행한다. 마지막으로 5장에서 본 논문이 제시한 알고리즘에 대한 결론을 맺는다.

2. 지역별 톤 매핑 알고리즘

2.1 EMD 알고리즘 기반 지역 분할

EMD는 상호 지역간의 지각적 유사성을 계산하기 위해 사용된다[5]. EMD의 값은 두 지역의 특징들을 동일하게 변화시키는데 필요한 최소한의 일의 양을 의미한다. 그림 1에서 R은 지역을 나타낸다. 각 지역은 그 지역 내에서 휘도값에 따라 세 휘도 그룹(bright, middlegray, dark)으로 나뉜다. 각 구역의 평균값(m)과 같은 휘도 그룹에 속한 픽셀의 수, 즉 가중치(w)는 각 그룹의 특징 집합이다.

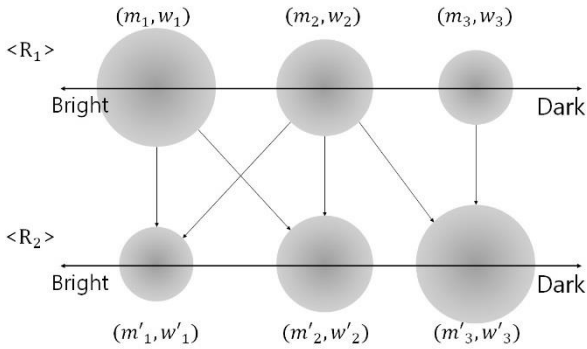


그림 1. EMD 의 값이 계산되는 예

EMD 의 값이 낮을수록 두 지역의 특징 집합이 동일하게 변화하는데 필요한 일의 양이 낮아지므로 두 지역간의 유사성은 높아진다. 이를 이용하여 특징이 비슷한 지역별로 적절한 톤 매핑을 수행하기 위해 EMD 값을 통해 특징이 유사한 지역끼리 이미지 분할을 수행한다. EMD 기반의 지역분할 알고리즘은 그림 2 와 같이 구성된다.

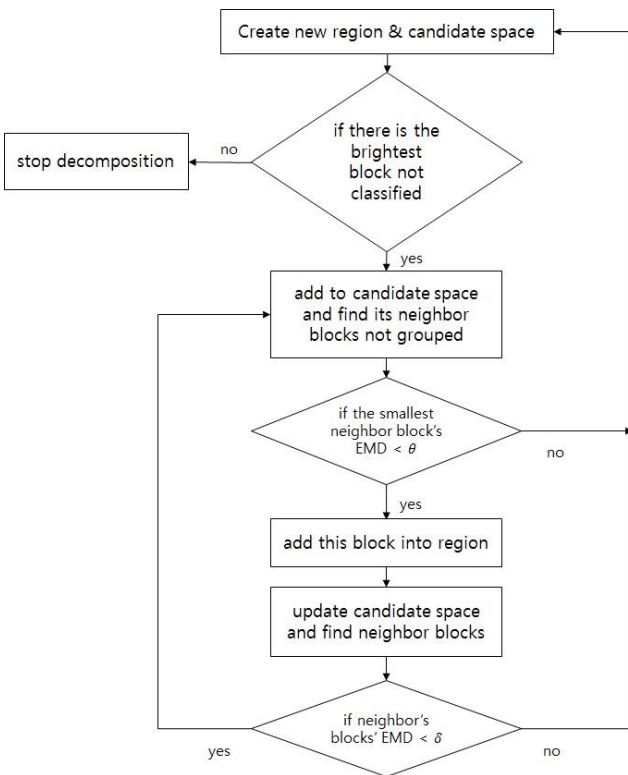


그림 2. EMD 기반 이미지 분할 알고리즘 순서도

가장 높은 휘도 성분을 갖는 블록을 찾고 이 블록을 현재 지역의 시작블록으로 선택한다. 이웃한 블록과의 EMD 값을 구하고 그 값이 δ 보다 작으면 포함시킬 블록의 후보블록으로 선정한다. 후보 블록 중 현재 지역과 EMD 의 값이 가장 작은 블록의 EMD 값이 θ 보다 작으면 그 블록을 현재 지역에 포함시키고 후보 블록에서 제외한다. 후보 블록과 합쳐진 지역의 EMD 변수들을 새로 갱신하고 최근에 포함된 블록의 이웃 블록들을 찾아 이 과정을 반복한다. 최근에 포함된 블록의 모든 이웃 블록들의 EMD 값이 δ 보다 크거나 합쳐질 후보 블록들 중 현재 지역과의 EMD 값이 가장 작은 블록의 EMD 값이 θ 보다 크면

현재 지역의 확장을 멈춘다. 합쳐지지 않은 블록들 중 가장 휘도 성분의 크기가 높은 블록을 찾아 위와 같은 과정을 반복한다. 최종적으로 특징이 비슷한 지역끼리 이미지가 분할된다.

2.2 지역적 적응 휘도

$$\tilde{V}(x, y) = \frac{1}{\tilde{Z}_{x,y}} \left\{ \sum_{(i,j) \in \mathcal{R}_k} \tilde{L}(i, j) G_{x,y}(i, j) K_{x,y}(i, j) + \sum_{(i,j) \in \mathcal{R}_k} \tilde{L}(i, j) G_{x,y}(i, j) K'_{x,y}(i, j) \right\} \quad (1)$$

식 (1)은 지역적 적응 휘도로 사람의 눈이 지역적으로 적응하여 빛을 감지하는 특성을 이용하여 구한 휘도 성분이며 양방향 확산 필터를 이용하여 구한다. \tilde{L} 은 이미지의 휘도값을 의미한다.

$$G_{x,y}(i, j) = \exp\{-((i-x)^2 + (j-y)^2)/2\sigma_s^2\} \quad (2)$$

$$K_{x,y}(i, j) = \exp\{-\tilde{L}(i, j) - \tilde{L}(x, y)^2/2\sigma_r^2\} \quad (3)$$

$$K'_{x,y}(i, j) = \exp\{-\tilde{L}(i, j) - \tilde{L}(x, y)^2/2\sigma_r'^2\} \quad (4)$$

$$\tilde{Z}_{x,y} = \sum_{(i,j) \in \mathcal{R}_k} G_{x,y}(i, j) K_{x,y}(i, j) + \sum_{(i,j) \in \mathcal{R}_k} G_{x,y}(i, j) K'_{x,y}(i, j) \quad (5)$$

식 (2)는 공간 도메인 필터, 식 (3)과 식 (4)는 범위 도메인 필터를 의미한다. 식 (2)-(4)를 통해 구한 지역적 적응 휘도는 식 (5)를 통해 정규화 된다. 지역적 적응 휘도는 앞에서 분할한 이미지 정보를 활용한다. 식 (1)은 현재 처리하려는 픽셀이 속한 지역과 그 이외의 지역에 대해 다른 가중치로 필터링하는 것을 의미한다. 이렇게 계산된 지역적 적응 휘도값은 지역적 톤 매핑을 구현하는데 사용된다.

$$\varphi(x) = \frac{x}{1+x} \quad (6)$$

$$\psi(L, V; \rho, \gamma) = \left(\frac{L}{V}\right)^\rho \varphi^\gamma(V) = \left(\frac{L}{V}\right)^\rho \left(\frac{V}{1+V}\right)^\gamma \quad (7)$$

식 (6)은 전역적 톤 매핑 함수, 식 (7)은 지역적 톤 매핑 함수를 의미한다. 식 (7)에서 L/V 은 예지와 같은 이미지의 상세한 영역을 의미하고, $V/(1+V)$ 는 지역적 적응 휘도값의 동적 영역을 압축한 값을 나타낸다. ρ 값과 γ 값은 공간 의존적인 변수다. ρ 값은 이미지의 상세한 영역을 보존하려는 정도를 나타낸다. γ 값은 동적 영역을 압축하는 정도를 나타내며 그림 3과 같이 $\gamma < 1$ 일 때 γ 값이 작을수록 어두운 영역을 더 넓은 동적 영역으로 매핑하는 역할을 한다.

2.3 ρ 값을 통한 지역적 톤 매핑

$$\rho_{x,y} = \begin{cases} \gamma, & \text{if } \log\left(\frac{L_{x,y}}{V_{x,y}}\right) \leq -1 \\ 0.5 \times (\gamma + \rho_{max}), & \text{if } \log\left(\frac{L_{x,y}}{V_{x,y}}\right) \geq 1 \\ \rho_{max}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

ρ 값은 식 (8)과 같이 계산된다. 휘도값 L 과 지역적 적응 휘도값 V 의 크기가 비슷하다면 ρ 값에 최대값을 할당하여 지역적 톤 매핑 함수의 $(L/V)^\rho$ 를 강조함으로써 이미지의 상세한 부분을 최대한 보존한다.

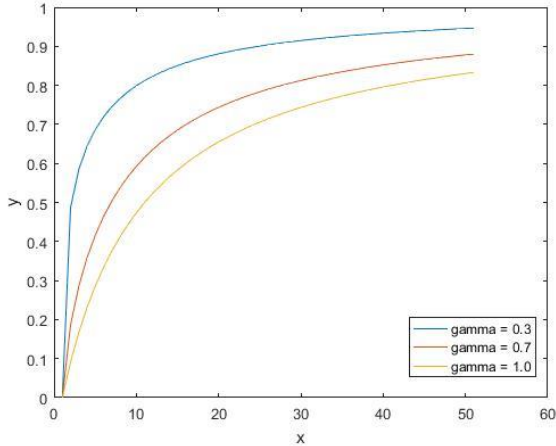


그림 3. Gamma 값에 따른 톤 매핑 함수의 변화

휘도값이 지역적 적응 휘도값 보다 10 배이상 작으면 $\rho = \gamma$ 가 되어 그림 3 과 같이 지역적 톤 매핑 함수가 $(L/(1+V))^\gamma$ 이 된다. 반대로 휘도값이 지역적 적응 휘도값 보다 10 배 이상 크면 ρ 는 γ 와 ρ_{max} 값의 평균값을 취한다. 이와 같이 휘도값과 지역적 적응 휘도값 간의 관계를 이용하여 이미지의 상세한 부분들을 보존하는 정도를 조절한다.

최종적으로 식 (9)의 재구성된 전역적 매핑 함수와 지역적 매핑 함수를 통해 지역별 톤 매핑을 수행한다.

$$L'(x,y) = \alpha_k \left(\frac{L(x,y)}{V(x,y)} \right)^{\rho(x,y)} \left(\frac{V(x,y)}{1+V(x,y)} \right)^\gamma + \beta_k \quad (9)$$

$$\phi^y \rightarrow \hat{\phi}^y(L) = \alpha \phi^y(L) + \beta \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{L_{max}}{1+L_{max}} \right)^\gamma & 1 \\ \left(\frac{L_{min}}{1+L_{min}} \right)^\gamma & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\hat{\psi}(L,V;\rho,\gamma) = \alpha_k \psi(L,V;\rho,\gamma) + \beta_k \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_1 & \psi_2 & \dots & \psi_N \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha_k \\ \beta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1^y & \hat{\phi}_2^y & \dots & \hat{\phi}_N^y \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

식 (10)과 식 (12)는 각각 재구성된 전역적 톤 매핑, 지역적 톤 매핑을 나타낸다. 식 (11)과 식 (13)은 각각 전역적 톤 매핑, 지역적 톤 매핑의 α 값과 β 값을 구하는 것을 나타낸다. α 는 scaling 변수, β 는 shifting 변수로 전역적 톤 매핑에는 지역별 톤 매핑의 전체적인 이미지의 인상을, 지역적 톤 매핑에는 지역간의 자연스러운 조화를 위해 이용된다.

3. 제안하는 알고리즘

기존의 EMD 만을 이용한 이미지 분할에서 사용된 ρ 값은 같은 지역내의 휘도 변화량을 고려하지 않았다. 따라서 그림 4 와

같이 상세한 부분을 최대로 보존하는 부분($\rho=1.8$)에서 후광 현상이 발생했다.

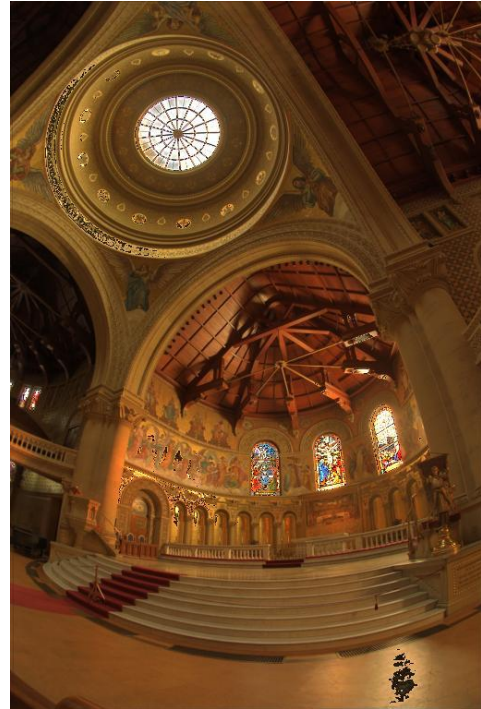


그림 4. 기존의 알고리즘으로 인한 후광 현상이 발생한 결과
후광 현상은 주변에 이웃한 픽셀들이 톤 매핑 이후 반전되어 발생하는 현상으로 전체적인 휘도값의 자릿수가 보존되지 않을 때 발생할 확률이 높아진다. 이를 해결하고자 다음과 같은 알고리즘을 제안한다.

3.1 ρ 값 결정 알고리즘

휘도 변화량이 큰 경우 할당되는 ρ 값의 최대값을 기본보다 낮게 설정하여 상세한 부분에 대한 지나친 강조를 제한하기 위해, 현재 픽셀을 중심으로 한 11x11 영역의 픽셀 단위의 휘도 변화량을 고려했다. 이 방법으로 휘도 변화량이 커져 후광 현상이 발생할 확률을 낮췄다. 또한 같은 지역 내의 휘도 변화량이 클 때 만을 고려 함으로써 지역 경계 부분에서의 휘도 변화량이 큰 지역에 대한 디테일 강조는 유지했다.

$$\rho'_{x,y} = \begin{cases} \gamma & \text{if } \log\left(\frac{L_n}{V_n}\right) \leq -1 \\ 0.5 \times (\gamma + \rho_{max}) & \text{if } \log\left(\frac{L_n}{V_n}\right) \geq 1 \\ \rho_{max} & \text{otherwise} \\ 0.32 & \text{if gradient} > 1.2 \text{ and possession of the same region} > 86\% \end{cases} \quad (14)$$

식 (14)와 같이 기존의 ρ 값을 구하는 알고리즘에서 같은 지역내의 휘도 변화량을 고려했다. ρ 값이 최대값으로 할당된 경우 현재 픽셀을 중심으로 11x11 블록내에서 휘도 변화량이 1.2 이상이고 11x11 블록의 영역 중 현재 픽셀이 속해있는 지역의 픽셀의 수가 86% 이상 차지할 때 ρ 값을 0.32로 한정시켰다. 그 결과 그림 5 와 같이 기존의 알고리즘에 의해 구해진 ρ 값보다 낮아졌다.

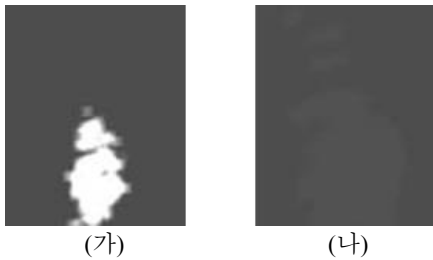


그림 5. 후광 현상이 생긴 지역(바닥 부분)에서 기존의 알고리즘의 ρ 값(가)과 제안하는 알고리즘의 ρ' 값(나)

4. 실험 결과 및 분석

Windows7 64 비트 운영체제 Intel Core i7-4770K CPU@ 3.50GHz 의 PC 환경에서 MATLAB R2016a 으로 실험을 진행했다. 알고리즘에 필요한 실험 변수들은 다음과 같이 설정했다. 이미지 분할에서 사용되는 블록과 블록 사이의 EMD 값의 문턱치 δ 와 지역과 블록 사이의 EMD 값의 문턱치 θ 는 각각 1.0 과 2.0 으로 설정했다. 동적 영역 압축의 정도를 나타내는 γ 와 상세한 부분을 최대한 보존하기 위한 ρ_{\max} 의 값은 기존의 알고리즘과 같이 각각 0.3, 1.8 로 설정했다. 실험 이미지는 'memorial.hdr' 을 사용했다.

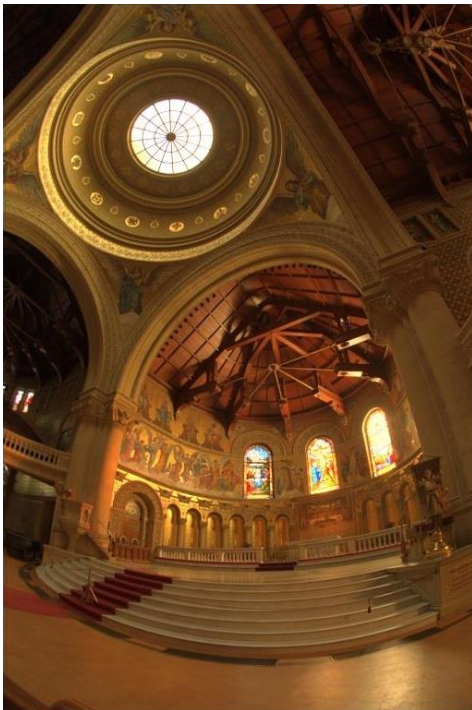


그림 6. 제안하는 알고리즘을 이용한 후광 현상이 제거된 결과

그림 6 은 제안하는 알고리즘을 이용한 결과 이미지다. 그림 5 와 같이 ρ 값 제한을 통해 그림 4 의 기존의 알고리즘을 이용했을 때 발생했던 후광 현상이 효과적으로 제거된 것을 확인할 수 있었다. 그림 7 은 기존의 알고리즘과 제안하는 알고리즘의 결과 영상의 두 히스토그램을 비교한 것이다. 그림 7 의 (가)와 (나)의 밝은 휘도값 부근의 빨강색 원 부분의 차이를 통해 기존 알고리즘에서 생긴 후광 현상으로 인한 클리핑(clipping) 현상이 없어진 것을 알 수 있다.

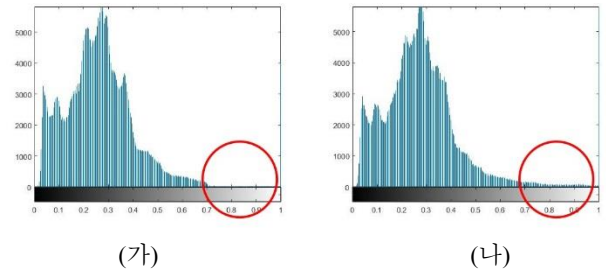


그림 7. 기존 알고리즘의 결과 영상의 히스토그램(가)과 제안하는 알고리즘의 결과 영상의 히스토그램(나)

5. 결론

본 논문에서는 같은 지역 내의 휘도 변화량을 이용한 후광 현상 보정 기법을 제안했다. 이를 통해 지역적 적응 휘도 성분만을 활용한 기존의 알고리즘에서 발생했던 후광 현상을 제거했다. 실험 결과를 통해 본 논문에서 제안한 알고리즘으로 인한 성능 향상을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2016-B0101-16-1377, 4K UHD 방송용 16 채널 멀티뷰어, H/W 인코더 및 트랜스코더 시스템 기술 개발)

참고문헌

- [1] H. Chen, T. Liu, and C. Fuh, "Tone Reproduction: A Perspective from Luminance-Driven Perceptual Grouping," *International Journal of Computer Vision*, vol. 65, no. 1, pp. 73-96, Nov. 2005.
- [2] SumantaN. Pattanaik, James A. Ferwerda, Mark D. Fairchild, and Donald P. Greenberg, "A Multiscale Model of Adaptation and Spatial Vision for Realistic Image Display," *SIGGRAPH ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 287-298, July 1998.
- [3] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," *ACM Trans. On Graphics*, vol. 21, pp. 267-276, July 2002.
- [4] R. Fattal, D. Lischinski and M. Werman, "Gradient Domain High Dynamic Range Compression," *ACM Trans. on Graphics*, vol. 21, no. 3, pp. 249-256, July 2002.
- [5] Y. Rubner, C. Tomasi, and L.J. Guibas, "The earth mover's distance as a metric for image retrieval," *International journal of computer vision*, pp. 99-121, vol. 40, no. 2, Nov. 2000.