

구간별 히스토그램 평활화를 이용한 HDR 톤 맵핑

강태욱, 이원진, *정제창
한양대학교 융합전자공학부
*jjeong@hanyang.ac.kr

HDR Tone Mapping using Separated Histogram Equalization

Taeuk Kang, Wonjin Lee, Jechang Jeong
Department of Electronic Engineering of Hanyang University

요 약

본 논문에서는 HDR(high dynamic range)영상을 LDR(low dynamic range)영상장치에 표현하기 위해 히스토그램 변형기법과 구간별 히스토그램 평활화를 이용한 인지기반의 톤 맵핑(tone mapping)기법을 제안한다. 인간의 시각특성을 이용한 톤 맵핑 알고리즘은 상당히 효과적이지만 고정된 형태의 맵핑 함수를 사용하기 때문에 모든 영상에서 동일한 효과를 얻지 못한다. 그리고 히스토그램 변형 기법을 적용한 인지기반 톤 맵핑 알고리즘의 경우 인지기반 톤 맵핑 함수를 이용해서 원 영상의 히스토그램을 제한하고 보상과정을 통해서 적극적인 톤 맵핑 함수를 얻을 수 있다. 그렇기 때문에 contrast 의 향상과 원 영상의 디테일 보존을 함께 얻을 수 있다. 하지만 전역 히스토그램 평활화의 사용으로 영상이 지나치게 밝아지거나 지나치게 어두워지는 경우가 발생할 수 있다. 제안하는 방법은 구간별 히스토그램 평활화를 적용하여 톤 맵핑 함수를 얻는다. 이는 과도한 평활화를 방지하고 원 영상의 디테일 보존의 성능이 더 좋다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 성능을 비교하고 기존 방법에 비해 제안한 방법이 우수함을 입증한다.

1. 서론

동적영역(Dynamic Range)이란 한 화면에서 가질 수 있는 가장 밝은 값과 가장 낮은 값의 비율이다. 사람의 동적영역은 매우 넓은 범위를 가지고 있다. 예를 들어서 사람은 맑은 날에 밝은 빛과 그림자 속의 어두운 것을 함께 볼 때도 사물을 구분하기 쉽다. 하지만 이미지 센서 및 디스플레이 장치의 동적영역은 인간의 동적영역 보다 좁기 때문에 역광사진과 같이 밝은 빛과 어두운 것을 함께 찍는다면 구분하기 힘든 경우도 있고 자연영상과의 왜곡이 많이 발생한다. 이러한 현상을 극복하기 위한 영상이 HDR 영상이다. HDR 영상은 넓은 동적영역을 가지기 때문에 좁은 동적영역을 갖는 일반 디스플레이 장치에서 바로 출력할 수 없다. 일반 디스플레이 장치의 영상을 LDR(Low Dynamic Range)이라고 볼 때 LDR 영상으로 톤 재생 (tone reproduction)과정을 거쳐야 일반 디스플레이 장치에서 출력이 가능하다 [1, 2].

일반적인 톤 맵핑 알고리즘은 인간의 시각특성에 기반한 방법들이다. 대표적으로 Reinhard 는 인간이 인지하는 시각특성을 기반으로 밝기를 나눈 zone system 을 디지털 영상의 톤맵핑에 적용한 방법이다. 이 방법은 인간이 인지하는 시각 특성에 따라서 톤맵핑을 수행하기 때문에 실제로 사람이 눈으로 보는 자연 영상과 유사하게 변환할 수 있다[2].

히스토그램 평활화 기법은 영상에 대해 히스토그램을 구하고 히스토그램을 기준으로 PDF(Probability Density Function)와 CDF(Cumulative Distribution Function)를 구하고 CDF 를 톤 맵핑함수로 활용하여 luminance 값을 변환해주는 기법이다. 이를 통해서 명암값의 범위를 늘려서 영상의 동적 범위를 증가시킬 수 있다[2].

본 논문에서는 구간별로 히스토그램 평활화를 이용한 톤

맵핑 알고리즘을 제시한다. 기존의 알고리즘 중에서 photographic tone mapping 의 경우 모든 영상에 대해서 동일한 기술품을 가지고 변환하기 때문에 영상에 따라서 성능이 다르다는 단점이 있다. 그리고 이를 보완한 히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑의 경우 전역 히스토그램 평활화를 적용했기 때문에 영상이 지나치게 어두워지거나 지나치게 밝아지는 경우가 생길 수 있다. 이에 대해서 영역을 나누어 구간별로 히스토그램 평활화를 적용함으로써 개선된 톤 맵핑 함수를 얻을 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 기존의 알고리즘에 대해 설명하고 3 절에서는 제안하는 알고리즘에 대해 설명한다. 4 절에서는 여러 샘플에 대해서 기존 알고리즘의 결과와 제안하는 알고리즘의 결과를 비교하였고 5 절에서는 그에 대한 결론을 기술한다.

2. 기존의 알고리즘

2.1 Photographic Tone Mapping

디스플레이 장치의 동적영역은 좁기 때문에 촬영한 영상을 현실과 유사하게 출력하는 데에 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 사진사들은 zone system 을 사용했다. zone 이란 luminance 범위와 출력영상의 반사율로 얻을 수 있는 것을 숫자로 표현한 것이다. 출력할 사진에서의 zone 은 11 단계로 (zone 0, I, II, ..., X)를 가지고, 가장 어두운 영역을 zone 0, 가장 밝은 영역을 zone X로 표기한다. 실제 영상의 15 단계의 zone 에서 가운데 부분과 사진에서의 zone 에서 가운데 부분인 zone V가 같이 위치하도록 맵핑할 수 있도록 한다. Zone V는 일반적으로 18%의 반사율을 갖는 단계이다 [1]. PTM(Photographic Tone Mapping)방법은 위와 유사한 처리방식을 디지털 이미지에 적용해서 실제 영상에서

얻어진 HDR 이미지를 좁은 동적영역을 갖는 디스플레이 장치에 실제영상과 유사하게 출력되도록 하는 알고리즘이다.

먼저, key 값을 구한다. key 값은 획득한 영상의 전체적인 밝기를 나타내는 값이고, key 값이 크면 전체적으로 밝은 영상을, 작으면 전체적으로 어두운 영상을 의미한다[1].

$$L_{avg} = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{x,y} \log(\delta + L_w(x,y))\right) \quad (1)$$

$L_w(x,y)$ 는 이미지의 (x,y) 에서 world luminance 를 의미하고, δ 는 log 값이 $-\infty$ 로 발산하는 것을 막기 위한 매우 작은 값이다. N 은 이미지의 전체 픽셀 수를 나타낸다. 출력이미지의 중간밝기가 zone V 에 해당되도록 아래와 같이 world luminance 를 변환해준다[1,2]. α 는 출력 이미지의 중간 밝기를 나타내는 key 값이고 아래와 같이 정의한다.

$$L_m = \frac{\alpha}{L_{avg}} L_w(x,y) \quad (2)$$

$$\alpha = 0.18 \times 4^{\left(\frac{2 \log_2 L_{avg} - \log_2 L_{max}}{\log_2 L_{max} - \log_2 L_{min}}\right)} \quad (3)$$

여기서 L_m 은 스케일 된 luminance 를 나타내고 L_{min} , L_{max} 은 입력영상의 히스토그램에서 가장 작은 luminance 보다 1%만큼 큰 luminance, 가장 큰 luminance 보다 1%만큼 작은 luminance 를 의미한다. 최종적으로 톤 맵핑 함수는 로그스케일에서 S-커브 형태를 갖도록 아래와 같은 식을 사용한다. $L_d(x,y)$ 는 톤 맵핑된 출력될 luminance 값이고, L_{white} 는 톤 맵핑함수가 포화되는 것을 방지하기 위한 parameter 로 아래와 같이 정의한다[2].

$$L_d(x,y) = \frac{L_m(x,y) \left(1 + \frac{L_m(x,y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L_m(x,y)} \quad (4)$$

$$L_{white} = 1.5 \times 2^{(\log_2 L_{max} - \log_2 L_{min} - 5)} \quad (5)$$

PTM 방법은 zone system 을 이용해서 톤 맵핑을 진행하기 때문에 사람이 인지하는 영상과 유사한 결과를 얻을 수 있다. 영상에 따라서 영상에 적용되는 맵핑 함수의 중심은 달라지지만 동일한 기울기를 가지고 변환하기 때문에 영상에 따라서 성능이 다른 단점이 있다[2].

2.2 히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑

히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑 기법은 히스토그램 평활화 기법을 적용하고 PTM 함수의 모양을 최대한 유지하는 톤 맵핑 함수를 구한다.

이미지의 히스토그램을 영상의 luminance 가 아닌 로그스케일 도메인에서 구한다. 로그 도메인에서의 픽셀 값이 인지기반의 contrast 와 직접적으로 관련이 있고, 전체 이미지를 균등하게 처리할 수 있기 때문이다. 히스토그램을 구하기 전에 스케일 된 luminance 는 다음과 같은 식을 사용한다[2].

$$L_m(x,y) = \frac{\alpha}{L_{avg}} \exp(B_w(x,y)) \quad (6)$$

여기서 $B_w(x,y)$ 는 영상의 (x,y) 위치에서 world brightness 를 나타내고 $B_w = \log(L_w)$ 와 같이 계산된다[2].

히스토그램 평활화 방법은 입력 영상의 CDF 를 활용한다. PTM 함수를 활용하기 위해서 PTM 함수가 CDF 라고 생각한다면 PDF 를 PTM 의 미분형태로 입력 받으면 된다[2].

$$P_d(k) = L_d((k+1)\Delta b + B_{wmin}) - L_d(k\Delta b + B_{wmin}), \quad (7)$$

$$k = 0, 1, \dots, T-1$$

$$\Delta b = \frac{B_{wmax} - B_{wmin}}{T} \quad (8)$$

Δb 는 로그 도메인에서 히스토그램의 bin 스텝 사이즈(bin step size)를 나타내며, T 는 히스토그램의 bin의 전체 수를 말한다. B_{wmin} , B_{wmax} 는 로그 도메인인 world brightness 의 최소, 최대 값을 가리킨다.

아래와 같은 클리핑 과정을 통해 P_d 와 P_{in} 중 낮은 값을 사용한다. 이와 같이 클리핑 과정을 거치게 되면 높은 분포를 갖는 부분에서 PTM 함수의 커브를 따르게 되기 때문에 히스토그램 평활화로 인한 과도한 밝기 변화를 방지할 수 있고 인지기반 톤 맵핑 방법도 적용할 수 있다. 낮은 분포를 갖는 부분은 히스토그램 평활화 방법과 같은 맵핑 함수 형태를 갖기 때문에 그 부분에서 동적 영역이 과도하게 압축되는 현상이 발생한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 P_{CL} 에 대해 보상해주는 과정을 거친다[2]. 클리핑 과정과 보상 과정의 식은 아래와 같다.

$$P_{CL}(k) = \begin{cases} P_d(k), P_{in}(k) > P_d(k) \\ P_d(k), P_{in}(k) \leq P_d(k) \end{cases} \quad (9)$$

$$P_t(k) = P_{CL}(k) + \left(1 - \sum_{i=0}^{T-1} P_{CL}(i)\right) P_{in}(k) \quad (10)$$

$$k = 0, 1, \dots, T-1$$

그러나 P_t 로부터 얻어진 CDF 를 맵핑 함수로 사용하면 커브형태는 PTM 함수의 형태를 유지하지만 보상 과정에서 일정한 값을 더해주기 때문에 원래 PTM 보다 먼저 포화되어 영상의 밝은 부분에서는 디테일을 유지할 수 없게 된다. 따라서 이 알고리즘은 다음과 같은 히스토그램 변형 기법을 적용한다[2].

$$P_m = \underset{p}{\operatorname{argmin}} [(P - P_d)^T (P - P_d) + \varphi (P - P_t)^T (P - P_t)] \quad (10)$$

여기서 P_m 은 최종적으로 변형된 PDF 를 나타내고, φ 는 PTM 함수의 미분인 P_d 와 입력함수의 PDF 에 대해서 클리핑과 보상과정을 거친 P_t 의 결합 정도를 조절하는 파라미터이다. 식(10)을 만족하는 식은 다음과 같다[2].

$$P_m = \left(\frac{1}{1 + \varphi} \right) P_d + \left(\frac{\varphi}{1 + \varphi} \right) P_t \quad (11)$$

식(12)는 φ 값을 조절하여 맵핑함수를 변형할 수 있다. φ 값이 커질수록 P_m 은 P_t 에 가깝게 변형되기 때문에 좀 더 개선된 맵핑 함수를 얻을 수 있다. 이후 과정은 PDF P_m 에 대해 CDF 를 구하고 히스토그램 평활화 방식을 사용한다[2].

$$C_m(k) = \sum_{i=0}^k P_m(i) \quad (12)$$

$$T_m(k) = (D_{max} - D_{min}) \frac{C_m(k)}{C_m(T-1)} + D_{min} \quad (13)$$

$$k = 0, 1, \dots, T-1$$

히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑기법은 히스토그램 변형을 사용했기 때문에 contrast 가 향상된 결과를 얻을 수 있고, 어두운 영역과 밝은 영역의 디테일이 보존되는 것을 볼 수 있다. 하지만 전역 히스토그램 평활화 과정을 거쳤기 때문에 지나치게 밝거나 어두운 영상이 출력될 수 있다는 단점이 있다.

3. 제안하는 알고리즘

제안하는 알고리즘에서는 히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑 알고리즘에서 히스토그램 평활화 과정에서 RMSHE (Recursive Mean-Separate Histogram Equalization) [6]의 변형을 통한 구간별 평활화를 통해서 과도한 평활화를 방지하도록 알고리즘을 제안한다.

입력히스토그램으로 P_m 을 입력 받는다. P_m 은 로그스케일 도메인에 분포되어있기 때문에 B_0, B_1, \dots, B_{T-1} 에 분포되어있다. 구간 분할을 하는 과정을 그림 1 의 예로 설명하면 첫 번째로는 전체 히스토그램 분포에서 평균 밝기값(B_{m1})을 구한다. 두 번째로 $B_{m1} \sim B_{T-1}$ 의 범위에서 평균 밝기값(B_{m2})을 구하고 세 번째로 $B_{m2} \sim B_{T-1}$ 의 범위에서 평균 밝기값(B_{m3})를 구해서 그림 1 에서의 (R_1, R_2, R_3, R_4)와 같이 4 개의 구간으로 분할한다.

구간을 분할해주는 B_{m1}, B_{m2}, B_{m3} 에 대한 식은 다음과 같다.

$$B_{mi} = \frac{\sum_{k=B_{m(i-1)}}^{B_{T-1}} P_m(k)k}{\sum_{k=B_{m(i-1)}}^{B_{T-1}} P_m(k)} \quad (14)$$

$$(1 \leq i \leq 3, B_{m0} = B_0)$$

B_{m1}, B_{m2}, B_{m3} 을 바탕으로 4 개의 구간에서 각각의 PDF 와 각각 PDF 를 바탕으로 CDF 를 구하면 다음과 같다.

$$P_i(B_j) = \frac{P_m(B_j)}{\sum_{k=B_{m(i-1)}}^{B_{mi}} P_m(k)}, m(i-1) \leq j \leq mi \quad (15)$$

$$C_i(B_k) = \sum_{k=B_{m(i-1)}}^{B_{mi}} P_i(k) \quad (17)$$

$$(1 \leq i \leq 4, m_0 = 0, m_4 = T-1)$$

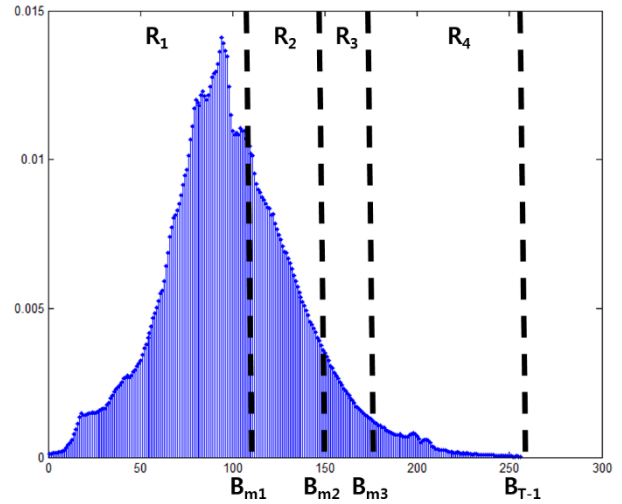


그림 1. 히스토그램의 영역분할

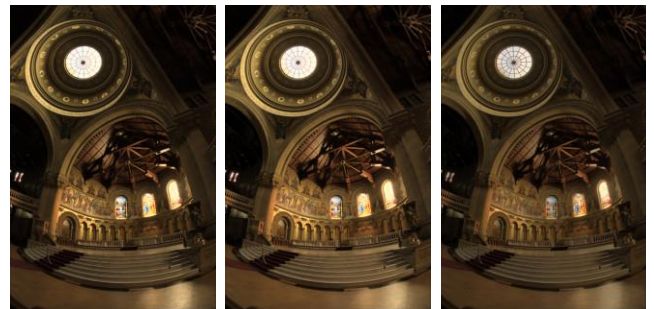
이 CDF 를 바탕으로 톤 맵핑 함수를 구하면 아래와 같다.

$$Y_m(k) = \begin{cases} \frac{m1C_1(k)}{C_1(B_{m1})}, B_0 \leq k < B_{m1} \\ m1 + \frac{(m2 - m1)C_2(k)}{C_2(B_{m2})}, B_{m1} \leq k < B_{m2} \\ m2 + \frac{(m3 - m2)C_3(k)}{C_3(B_{m3})}, B_{m2} \leq k < B_{m3} \\ m3 + \frac{(T-1 - m3)C_4(k)}{C_4(B_{T-1})}, B_{m3} \leq k \leq B_{T-1} \end{cases} \quad (18)$$

식(18)을 바탕으로 톤 맵핑을 진행하면 로그스케일 도메인을 가지던 영상을 0~255 의 값을 갖는 8 비트 영상으로 맵핑 가능하다.

4. 실험결과 및 분석

제안한 알고리즘의 성능평가를 위해 앞에서 함께 설명한 Photographic tone mapping, 히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑과 제안하는 알고리즘의 결과를 각각 분석하여 주관적 화질을 통해 비교하였다. 각 방법들은 입력영상의 RGB 색공간에서 luminance 성분을 추출하여 luminance 성분만으로 알고리즘을 작성하고 톤 맵핑을 수행하였다. 그리고 변환된 luminance 에 맞게 색상보정 과정을 거친 후 최종 결과이미지를 얻었다[2].



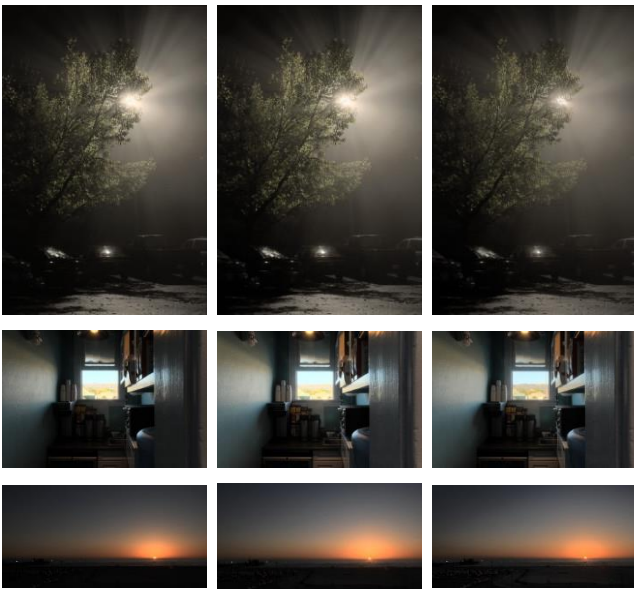


그림 2. 주관적 화질비교, 좌측부터 우측방향으로 PTM, 히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑, 제안하는 알고리즘

그림 2 는 4 개의 테스트 영상에 대한 주관적 화질 비교결과를 나타낸다. 각 영상은 위에서부터 아래방향으로 Im01, Im02, Im03 으로 지칭한다. 그리고 각 영상마다 PTM 과정의 결과를 a, 히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑의 결과를 b, 제안하는 알고리즘의 결과를 c 라고 지칭한다.

Im01 을 보면 a 나 b 에 비해 c 에서 천장과 벽에 있는 창문에서 나오는 빛에 해당하는 매우 밝은 부분의 밝기가 낮아진 것을 볼 수 있고, 창문의 스테인드글라스, 창문 위에 있는 나무 지지대 그리고 벽화의 디테일을 더 살린 것을 볼 수 있다.

Im02 를 보면 a 와 b 는 광원에 해당하는 밝은 부분이 너무 밝게 출력된 것을 볼 수 있다. 이에 반해 c 는 광원에 해당하는 부분이 다른 두 결과에 비해 약간 어둡게 출력되었다. 그리고 나무에 대한 디테일을 더 살려서 출력되었다.

Im03 에서 a 를 보면 실내부분이 가장 어둡게 출력되었고 창문의 밝기가 너무 밝아서 창문 밖의 영상을 구분할 수 없다. b 는 실내부분의 밝기는 증가했지만 창문의 밝기는 a 와 비슷한 수준이다. 제안하는 알고리즘을 보면 실내부분의 밝기는 b 와 유사하지만 창문의 밝기가 줄어든 것을 볼 수 있다. 그리고 그 결과로 창문 밖의 영상을 구분할 수 있는 결과를 출력하였다.

Im04 를 보면 a 는 태양부분을 제외한 다른 부분에서 영상의 밝기가 너무 어두워 사물을 구분할 수 없을 정도이다. b 에서는 전체적인 영상의 밝기가 커져 태양부분을 제외한 영역에서 사물을 구분할 수 있을 정도가 되었다. 하지만 태양부분의 밝기가 같이 증가했기 때문에 좋은 영상이라고 보긴 힘들다. 마지막으로 c 를 보면 태양부분의 밝기는 a 와 유사하게 출력되었고 태양부분 이외의 영역에서의 디테일도 더 증가하였다.

5. 결론

제안하는 알고리즘은 HDR 영상의 동적영역을 줄이는 것이 목표인 HDR 톤 맵핑 방법이다. 원 영상의 히스토그램을 인지기반 톤 맵핑 함수로 제한하고 각 단계별로 알고리즘에

따라 변경된 PDF 를 도출하고, 알고리즘에 따라 나뉜 구간 내에서 히스토그램 평활화 기법을 적용하여 최종 맵핑함수를 구한다. 이 과정은 인지기반 톤 맵핑 함수의 형태를 유지할 수 있고, 히스토그램 평활화 과정을 구간별로 진행하여 영상이 지나치게 밝아지거나 지나치게 어두워지는 현상을 막을 수 있다. 실험결과 이전의 인지기반 톤 맵핑 함수와 히스토그램 변형을 이용한 톤 맵핑 함수와 비교하여 제안하는 알고리즘의 화질이 우수함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1A2A2A01006004).

참고문헌

- [1] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," *ACM Trans. Graphics*, vol. 21, no. 3, pp.267-276, July 2002
- [2] 김원균, 하창우, 정계창, "히스토그램 변형을 이용한 HDR 영상 렌더링을 위한 인지기반 톤 맵핑 기법," *한국통신학회*, vol. 38, no. 11, pp. 919-927, Nov. 2013
- [3] 윤현섭, 한영준, 한현수 "밀도기반의 분할된 히스토그램 평활화를 통한 대비 향상 기법" *한국전자공학회, 한국전자공학회 논문지 제 46 권 SC 편 제 1 호* pp.10-21, Jan. 2009
- [4] Y. Kim, "Contrast Enhancement Using Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization," *IEEE Trans. Consum. Electron*, vol. 43, no. 1, pp.1-8, Feb. 1997
- [5] Y. Wan, Q. Chen, and B. Zhang, "Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method," *IEEE Trans. Consum. Electron*, vol. 45, no.1, pp. 68-75, Feb. 1999
- [6] S. Chen, "Contrast Enhancement using Recursive Mean-Separate Histogram Equalization for Scalable Brightness Preservation," *IEEE Trans. Consum. Electron*, vol. 49, no. 3, pp.1301-1309, Nov. 2003
- [7] K. S. Sim, C. P. Tso, and Y. Y.Tan, "Recursive sub-image histogram equalization applied to gray-scale image," *Pattern Recognition Letters*, vol. 28, pp.1209-1221, Feb. 2007
- [8] M. Kim, Min. Chung, "Recursively separated and weighted histogram equalization for brightness preservation and contrast enhancement," *IEEE Trans. Consum. Electron*, vol. 54, no. 3, pp. 1389-1397, Aug. 2008