

Retinex 기반의 가상 노출 이미지 생성을 통한 HDR 영상 생성 방법

박재성, 길태호, 황인성, 조남익
 서울대학교
 gogojs8902@gmail.com

Retinex-based Virtually Exposed Image Fusion for Single Image HDR

Jae Sung Park, Kil Taeho, Insung Hwang, Nam Ik Cho
 Seoul National University

요 약

본 논문에서는 단일 노출 영상으로부터 다수의 가상 노출 영상을 생성하고, 그 영상을 한 장의 HDR 영상으로 합성하여 SDR 디스플레이 시스템에 개선된 화질의 영상을 보여주도록 하는 방법을 제안한다. 이 방법에서는 주어진 단일 노출 영상을 Retinex 이론을 적용하여 조명 성분과 반사 성분으로 분리하고, 새로운 노출 조절 알고리즘을 제안하여 다수의 가상 조명 성분과 원본 이미지의 반사 성분을 생성하며 이들을 이용하여 다수의 가상 노출 영상을 생성한다. 생성된 다수의 가상 노출 영상은 가중치 합성 함수에 의해서 압부의 세부 표현력이 개선되고 명암비가 높아져 SDR display 에서도 우수한 화질의 HDR 영상으로 변환된다. 기존에 제안된 알고리즘과 비교 실험을 통해, 본 논문에서 제안된 HDR 영상 합성 기법의 성능을 증명한다.

1. 서론

고해상도와 high dynamic range imaging (HDMI)은 고품질의 TV 방송 시스템이나 디스플레이 장치를 위한 매우 중요한 요소이다. 특히, ultra-high definition (UHD) 디스플레이 시스템에서는 4K 이상의 해상도와 화소 당 10 bit 이상을 시스템 적정 사양으로 정의하고 있다. 일부 높은 사양의 카메라는 현재 각 화소 당 10bit 이상의 사양을 지원하지만, 이 또한 자연계의 영상을 생동감 있게 표시하기 위한 HDR 의 사양으로는 충분한 bit 수는 아니라고 여겨지고 있다. HDR 영상의 생성은 화소 당 높은 bit 수로 영상을 획득하는 것뿐만 아니라 정교한 카메라 설정이나 노출 bracketing 이 매우 중요하다. Bracketing 방법은 HDR 영상 획득을 위한 가장 많이 사용되는 방법으로 매우 짧은 시간 안에 노출 양이 다른 다수의 영상을 획득하는 방법이다. 그러나 이 방법을 이용하여 생성된 HDR 영상에서는, 비록 매우 짧은 시간 동안에 획득한다고 하더라도 획득된 영상에서 움직이는 물체나 배경이 있는 경우 ghost 가 발생하는 단점이 있다. 한편, 다수의 이미지 센서를 이용하여 서로 다른 노출 양으로 동시에 다수의 영상을 획득하는 카메라 시스템도 있다. 그러나 이 시스템은 비용이 매우 비싸고, 정확한 동기화를 위한 설정 등이 매우 어렵다는 단점이 있다.

최근에는 단일 노출 영상으로부터 다수의 가상의 노출 영상을 생성하여 합성하는 등 다양한 inverse tone mapping operator (iTMO) 방법이 보고되고 있다 [1-9]. 이 방법은 기존에 사용되어왔던 다수의 실제 노출 영상을 획득하는 방법보다 화질 측면에서는 열세이지만 구현을 위한 비용이 매우 적고, 생성된 HDR 영상에서 ghost 가 발생할 우려가 없다는 측면에서도 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다. iTMO 방법들은 일반적으로 매우 어두운 영역이나 포화된 영상의 각 영역에서 휘도 범위를 신장하는 기법을 사용하여

영상의 명암 대비나 dynamic range 를 개선한다. iTMO 방법들은 기법에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 즉 영상 전체에 일괄적으로 같은 tone mapping 함수를 적용하는 global iTMO 방법 그리고 영상을 두 개 이상의 영역으로 나누고 각각 서로 다른 tone mapping 함수를 적용하는 local iTMO 방법이 그것이다. 대부분의 global iTMO 방법들은 선형 혹은 비선형 함수를 사용하는데, 영상 전체에 같은 함수를 적용하기 때문에 영상의 모든 영역에서 세밀한 표현력을 개선하거나 dynamic range 를 증가시킬 수는 없다. 때로는 이 방법들은 영상의 세부적인 영역의 정보나 dynamic range 를 오히려 감소시키는 결과를 초래하기도 한다. 이러한 global iTMO 방법들의 단점을 개선하기 위해서, 영상을 두 개 이상의 영역으로 나누고 각 영역에 적절한 함수를 적용하기 위해 제안된 방법이 local iTMO 기법이다. 예를 들면, Meylan 은 포화된 영역을 발생시키지 않고 dynamic range 를 증가시키기 위해서, 입력 영상을 highlight 영역과 그 외 영역으로 나누고 각 영역에서 서로 다른 선형 함수를 적용하였다 [8]. Banterle 는 포화된 영역의 휘도 정보를 개선하기 위해서 expand map 의 개념을 제안하였다 [1]. Kovaleski 는 bilateral filter 를 적용하여 영상의 잡음을 제거하고 밝기를 향상시키는 방법을 제안하기도 했다 [6]. 이와 같은 방법들은 주로 영상에서 포화된 영역이나 매우 어두운 영역의 세부적인 표현력을 증가시키기 위한 시도였다. 한편 Huo 는 HDR 디스플레이 장치에서 현재 주를 이루고 있는 LDR 영상을 표시하기 위해서 dynamic range 를 증폭하는 방법을 제안하였다 [4]. 이 방법은 명암 대비를 향상시키고 암부 영역에서 영상의 세부 표현력을 증가시키는 결과를 보였다. 즉, 대부분의 local iTMO 알고리즘은 영상에서 매우 어두운 영역의 세부 표현력을 증대시키고 명암 대비 또한 개선할 수 있는 방법이다.

본 논문에서는, 단일 노출 영상을 이용하여 그 영상이

획득될 때의 조명 성분의 추정과 조정을 통해서 HDR 영상을 생성하는 방법을 제안한다. 먼저, 입력 영상에 Retinex 알고리즘을 적용하여 조명 성분을 대략적으로 추정하여 조명 성분과 반사 성분으로 분리한 다음, 단일 조명 정보로부터 다수의 가상 노출 영상의 조명 성분을 생성한다. 이 때, 매우 어두운 영역에서 영상의 세부 표현력을 증가시키는 동시에 매우 밝은 영역에서의 최대 휘도와 세부 표현력을 유지 혹은 개선하기 위해서, 평균 휘도에 의존적인 노출 조정 함수와 가중치 함수를 제안한다. 이렇게 생성된 다수의 가상의 조명 성분을 원본 영상의 반사 성분과 곱하여 다수의 가상 노출 영상을 생성할 수 있다. 마지막으로, 가상으로 노출이 다르게 생성된 영상들을 본 논문에서 제안하는 가중치 함수를 적용하여 압부의 세밀한 표현이 가능하고 화질이 우수한 HDR 영상을 생성할 수 있다.

2. Retinex 기반의 가상 노출 영상 합성

최근, HDR 영상 생성을 위해, 다수의 가상 노출 영상을 생성하고 그 영상에 기존의 HDR 영상 합성 기법을 적용하여 화질이 우수한 HDR 영상을 생성하는 방법이 보고되었다 [9]. 이 방법의 단점은, 움직임이 없는 영상에 대해서는 기존에 HDR 영상 생성을 위해서 적용되었던 실제 다중 노출 영상 합성 방법보다 화질면에서는 일반적으로 열세라는 점이다. 한편, 획득한 다수의 노출 영상에서 움직임이 있는 경우에 기존의 HDR 영상 합성 방법이 항상 ghost 문제를 수반하는 단점이 있었다. 그러나 단일 노출 영상으로부터 생성한 가상의 다수의 노출 영상 사용하는 방법에서는 ghost 문제로부터 자유롭고, 단일 노출 영상 한 개를 이용하기 때문에 다수개의 노출 영상을 이용하는 방법보다 매우 간편하며 적은 비용으로 HDR 영상을 생성할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서는, 단일 노출 영상으로부터 다수의 가상 노출 영상을 생성하고 그 정보를 이용하여 한 장의 HDR 영상을 생성하기 위한 새로운 가상 노출 영상 합성 (Virtually-Exposed Multiple Tone Fusion, VEMTF) 방법을 제안한다. 우선, 한 장의 입력 영상에 Retinex 이론을 적용하여 조명 성분을 추정하여 반사 성분과 분리한다. 이렇게 추정된 조명 성분은 다양한 노출 효과를 주기 위해서 제안된 가중치 함수에 의해 변조된 후 원본 영상의 반사 성분과 곱해서 다수의 가상의 노출 영상으로 재생된다. HDR 영상 생성을 위한 처리 과정에서, 조명 성분의 강도는 일반적으로 노출의 양(시간)에 따라 비례적으로 증가하거나 감소하기 때문에, 조명 성분은 입력 영상에서 밝은 영역의 밝기 강도 정보를 나타내는 노출 지도(exposure map, EM)로 간주된다. 반대로, 조명 성분의 역 변환 정보는 영상에서 어두운 영역의 그늘 강도 정보를 나타내는 (shadow map, SM)으로 정의한다. 이렇게 분리된 두 영역에 밝기 개선을 통한 영상의 세부 표현력과 명암 대비 증가를 위해서, 본 논문에서 제안하는 S 자 모양의 가중치 함수를 적용한다. 이렇게 생성된 다수의 가상의 조명 성분을 원본 영상의 반사 성분과 곱하여 다수의 가상 노출 영상으로 생성할 수 있고, 다수의 가상의 노출 영상을 한 장의 HDR 영상으로 합성하기 위해서 기존의 노출 영상 합성 기법과 유사한 가중치 합성 함수를 적용한다.

2.1 Retinex 이론

제안된 알고리즘에서는 가장 먼저, RGB 영상을 HSV 색 공간으로 변환 한 후, V(value) 채널의 정보를 Retinex 알고리즘에 적용하여 조명 성분을 대략적으로 추정한다. Retinex 이론은

인간 시각의 시스템의 망막과 대뇌 피질의 인지 모델을 이론으로 정립한 것으로서, 영상의 화질 개선 분야에서 다양하게 응용이 되고 매우 폭 넓게 적용되고 있는 이론이다. 단일 스케일 Retinex (SSR) 알고리즘은 입력 영상은 조명 성분과 반사 성분의 곱으로 표현될 수 있다는 Retinex 이론에 기반한 방법이다. 반사 성분은 아래 식(1)과 같이 입력 영상에서 조명 성분을 뺀 성분으로 표현 할 수 있다.

$$R = \log(I) - \log(I * F) \quad (1)$$

이 때, R 은 반사 성분, I 는 입력 영상, '*'은 컨벌루션, F 는 Gaussian 함수에서 주로 사용되는 필터의 커널, $\log(I * F)$ 는 추정된 조명 성분을 각각 나타낸다.

2.2 가상 노출 영상의 생성

가상으로 노출된 다수의 영상을 생성하기 위해서 평균 밝기에 적응적인 변형된 sigmoid 함수를 사용한다. 이 때, 평균 밝기는 HSV 색 공간에서 V 채널 신호의 평균 값이다. 제안하는 S 자 모양의 밝기 조정을 위한 가중치 함수는 다음 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$f(x, m, s_s, r) = r_{e/s} \left(\frac{1}{1 + e^{-s_s(x-m)}} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

위 식에서, x 는 다수의 노출 영상의 밝기 조정을 위한 상대적인 위치, m 은 V 채널의 평균 신호 수준, $r_{e/s}$ 는 EM 혹은 SM 영역의 밝기 조정을 위한 전체 범위, s_s 는 S 자 모양 함수의 평탄화 조정 상수 이다. 제안된 방법에서 V 채널의 평균 신호 수준은 매우 중요한 역할을 한다. 무엇보다, 생성되는 가상의 노출 영상들의 밝기가 입력 영상의 평균 밝기에 따라 달라진다. 또한, 평균 신호 수준은 가상으로 생성될 다수의 영상들의 밝기 차이를 다르게 조정하는 역할을 한다. 모든 가상으로 노출된 영상이 HDR 영상 합성 과정에서 모두 기여하도록 하기 위해서 EM 과 SM 영역을 서로 다른 가중치로 조정하는 것이 필요한데 V 채널 신호의 평균 수준과 각 영역에 적용되는 서로 다른 파라미터 값이 그 역할을 한다. 본 논문에서는 주로 아주 어두운 영상 영역의 세부 표현력 증가를 위해서 SM 영역에 적용되는 가중치 값이 EM 영역에 적용되는 가중치 보다 크게 설정되었다. 아래 식(3)은 EM 과 SM 영역에 적용되는 서로 다른 두 개의 밝기 조정 범위를 나타낸다.

$$r_e = \left(1 - \frac{m}{M}\right) p_{se}, r_s = \left(1 - \frac{m}{M}\right) p_{ss} \quad (3)$$

위 식에서, r_e 와 r_s 는 각각 EM 과 SM 영역을 위한 밝기 조정 범위, M 은 평균 신호 수준, p_{se} 와 p_{ss} 는 각각 가상으로 생성되는 영상에서 EM 과 SM 영역이 심각하게 어두워지거나 밝아지는 것을 회피하기 위한 상수 값이다. 이러한 두 개의 서로 다른 가중치 함수 곡선을 이용해서, 아래 식(4)와 같이 4개의 가상 조명 성분 (낮은 노출 영상을 위한 두 개의 조명 성분과 높은 노출 영상을 위한 두 개의 조명 성분)을 생성할 수 있다.

$$w_i' = \left(1 + w_i^e (L^e + w_i^s L^s)\right), L_i = w_i' L_s, i = 1 \sim 5 \quad (4)$$



그림 1. 가상으로 생성된 조명 지도와 가상 노출 영상, (좌측에서 우측으로) 매우 어두운 영상, 어두운 영상, 입력 영상, 밝은 영상, 매우 밝은 영상



그림 2. 가중치 지도

이 때, w_i^l 는 i 번째 영상을 위한 가상의 조명 성분을 위한 가중치 지도, L^e 와 L^s 는 각각 입력 영상의 EM 영역과 SM 영역, w_i^e 와 w_i^s 는 각각 노출된 영역과 어두운 영역의 밝기 조정 가중치 값이다. 여기서 생성되는 조명 지도는 L_i 로 정의하고 그에 대응하는 4 개의 (매우 어두운, 비교적 어두운, 평균적인, 밝은 매우 밝은) 영상들은 V_i 로 정의한다. 위에서 생성된 가상의 조명 정보와 원본 영상의 반사 성분을 이용하여 가상으로 노출된 다수의 영상을 생성할 수 있다. 그림 1 은 위와 같은 방법으로 생성된 가상의 조명 성분과 영상을 나타낸다.

2.3 가중치 지도 조정과 HDR 영상 생성

4 개의 가상 노출 영상을 생성한 후, tone mapping 을 위한 가중치 지도를 생성한다. 밝은 영역의 영상 세부 표현력을 개선 혹은 유지하기 위해서, 노출이 적게 된 매우 어두운 영상과 어두운 영상을 위한 가중치 지도는 각각 w_3^l 와 w_4^l 를 선택한다. 한편, 노출이 많이 된 영상에서 매우 어두운 영역의 세부 표현력 개선을 위해서 매우 밝은 영상과 비교적 밝은 영상의 가중치 지도는 각각 w_2^l 와 w_1^l 의 역 변환 결과인 \tilde{w}_2^l 와 \tilde{w}_1^l 을 선택한다. 이러한 가중치 지도 선택 방법은 다음 수식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} w_1^b &= S_1 w_3^l, w_2^b = S_2 w_4^l, \\ w_3^b &= S_3 w_2^l, w_4^b = S_4 \tilde{w}_2^l, w_5^b = S_5 \tilde{w}_1^l \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 N 은 영상의 개수, S_i 는 i 번째 가중치 지도에 곱해지는 상수 값으로 설정에 따라 개선하는 영역이 달라질 수 있다. 위와 같은 방법으로 생성된 가중치 지도를 그림 2 와 같이 나타낼 수 있다.

마지막으로, 가상으로 생성된 영상과 가중치 지도를 이용하여 HDR 영상을 생성할 수 있는데, 영상의 모든 영역에서 세부 표현력을 증가시키고 dynamic range 를 개선하기 위해서 다음 식 (5)와 같이 방법을 적용한다.

$$I_{HDR}(i, j) = \frac{\sum_k w_k^b(i, j) V(i, j)}{\sum_k w_k^b(i, j)} \quad (5)$$

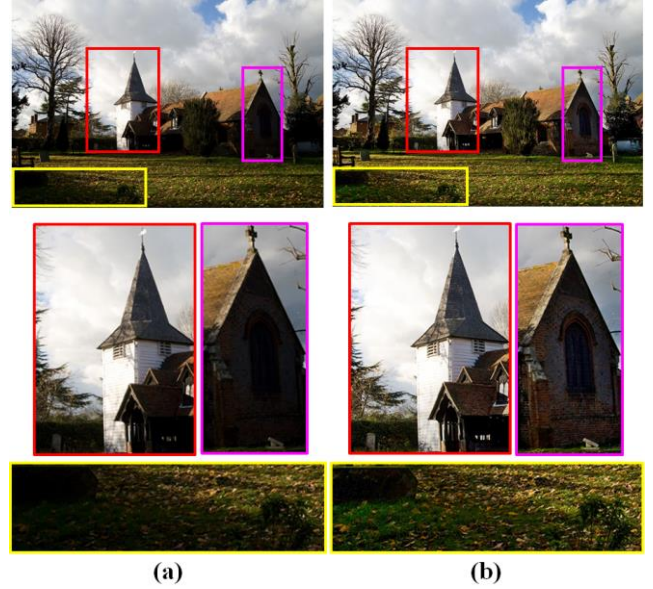


그림 3. 알고리즘 적용 결과 비교 (a) 입력 영상과 영역별 확대 영상, (b) 알고리즘 적용 결과 영상과 영역별 확대 영상

3. 실험 결과

본 논문의 실험을 위한 입력 영상은 너무 적게 혹은 많이 노출된 영상이 아니라 정상적으로 노출 되었다고 가정한다. 디스플레이 device 의 패널 감마는 2.2 로 가정하고 입력 영상은 가해진 감마 값의 역 감마 처리를 통해 계조 특성이 선형이 되도록 보상한다. Retinex 알고리즘 적용을 위해서 Matlab 에서 제공하는 필터 함수를 사용하였고 필터 크기와 시그마 값은 각각 80 과 28 을 사용한다. 가상으로 생성된 다수 개의 영상 합성을 위한 가중치 상수 값 S 는 [0.4 0.6 1.0 1.4 1.6] 을 사용하고, 밝은 영상의 가중치 상수 값이 높은 설정이 의미하는 것은 본 실험의 목적이 주로 매우 어두운 영역의 세부 표현력 개선에 있음을 나타낸다.

위와 같은 설정으로 본 논문에서 제안된 알고리즘을 통해 생성된 HDR 영상은 그림 3 과 같다. 어두운 영역과 밝은 영역의 화질 개선 효과를 보여주기 위해서 각 영상에서 표시된 영역의 확대 영상을 그림에 표시하였다. 실험 결과, 영상에서 매우 어두운 영역의 세부 표현력이 상당히 증가했음을 알 수 있다. 밝은 영역의 밝기 또한 개선되었지만 포화 현상을 일으키거나 밝은 영역의 세부 표현력을 감소시키는 부작용은 일으키지 않는 정도로 개선되었음을 알 수 있다.

그림 4 는 기존에 제안된 방법과 본 논문에서 제안된 방법의 비교를 위한 비교 실험 결과를 나타낸다. 무엇보다도 본 논문에서 제안된 방법의 결과 영상에서는 어두운 영역의 세부 표현력이 상당히 증가한 것을 볼 수 있다. 한편, 영상의 밝기 측면에서는 기존에 제안된 방법이 우수한 반면에 상당한 포화 현상도 동시에 관찰할 수 있다. 기존에 제안된 방법의 결과에서 보이는 밝기 수준은 본 논문에서 제안된 방법에서도 휘도 범위 조정을 통해 구현이 가능한 수준이다. 그러나 서론에서 언급한 바와 같이, 이 알고리즘이 SDR 디스플레이에 적용될 수 있다는 내재적인 가정을 고려해본다면 영상의 전체적인 밝기 개선보다 더 중요한 것은 블랙 레벨 표현력과 명암 대비이다. 따라서 본 논문에서는 영상의 밝기를 크게 증가시키지 않고 어두운 영역의 세부 표현력 개선에 집중하였다. 그림 4 의 세

번째 영상에서, 기존 방법과 본 논문에서 제안된 방법의 차이를 확연히 알 수 있다. 기존 논문의 방법에서는 영상에서 어두운 영역의 세부 표현력이 상당히 증가한 것을 볼 수 있다. 그러나 영상이 원래 가지고 있는 블랙 레벨이 크게 증가하고 명암 대비가 상당히 감소 한 결과를 보였다. 반면에 본 논문에서 제안된 방법의 결과에서는, 영상에서 포화 현상과 같은 부작용이나 명암 대비의 큰 감소 없이 어두운 영역의 세부 표현력을 개선한 것을 볼 수 있다.

본 논문에서 제안된 방법의 단점은, 대략적인 조명 성분 추정 과정에서 필터 크기와 시그마 값을 크게 적용하여 발생하는 halo 가 있을 수 있다. 주로 그림 4 의 첫 번째 영상과 같이 밝은 배경과 어두운 물체의 경계 부분 (혹은 그 반대의 경우)에서 일어날 수 있는데 이는 다양한 필터를 적용하여 경감시킬 수 있다. 현재 본 논문의 실험에서 적용된 Gaussian 함수의 필터 크기와 시그마 값은 위에서 언급한 halo 부작용을 최소화 하는 설정 값으로 실험된 결과이다. halo 부작용 문제는 bilateral 필터 혹은 weighted least square filter 등을 적용하여 개선하는 것을 추후 연구 과제로 고려할 수 있다 [10].

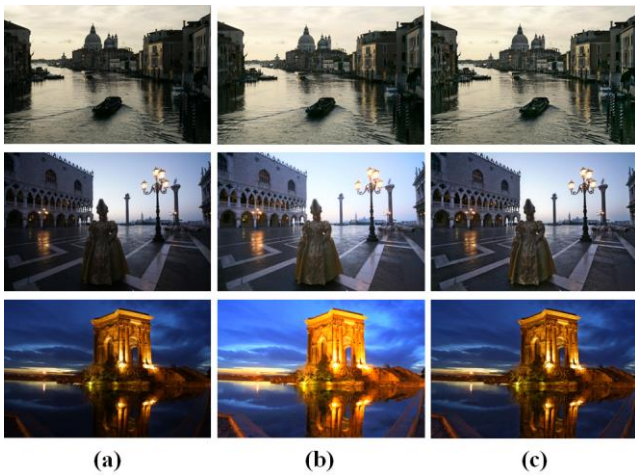


그림 4. 기존 방법과 비교 (a) 입력 영상, (b)PMETF 방법, (c) 제안된 방법

4. 결론

본 논문에서는 Retinex 기반의 다수의 가상 노출 영상 생성과 그 영상의 합성 기법을 제안하였다. 실험 결과, 제안된 방법이 암부의 세밀한 표현력을 상당히 증가시킴과 동시에 밝은 영역의 밝기 수준을 잘 유지하거나 개선하는 것을 기존에 제안된 방법과 비교 실험을 통해 증명하였다.

참고문헌

[1] F. Banterle, P. Ledda, K. Debattista, A. Chalmers, and M. Bloj. A framework for inverse tone mapping. *The Visual Computer*, 23(7):467–478, 2007.

[2] Z. Farbman, R. Fattal, D. Lischinski, and R. Szeliski. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 27, page 67. ACM, 2008.

[3] X. Fu, Y. Sun, M. Li Wang, Y. Huang, X.-P. Zhang, and X. Ding. A novel retinex based approach for image enhancement with illumination adjustment. In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014 IEEE International Conference on*, pages 1190–1194. IEEE, 2014.

[4] Y. Huo, F. Yang, and V. Brost. An inverse tone mapping method for displaying legacy images on hdr monitor. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Volume 4*, pages 733–741. Springer, 2014.

[5] X. Jin, J. Bao, and J. Du. Image enhancement based on selective-retinex fusion algorithm. *Journal of Software*, 7(6):1187–1194, 2012.

[6] R. P. Kovaleski and M. M. Oliveira. High-quality brightness enhancement functions for real-time reverse tone mapping. *The Visual Computer*, 25(5-7):539–547, 2009.

[7] J. W. Lee, R.-H. Park, and S. Chang. Local tone mapping using the k-means algorithm and automatic gamma setting. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 57(1):209–217, 2011.

[8] L. Meylan, S. Daly, and S. The reproduction of specular highlights on high dynamic range displays.

[9] T.-H. Wang, C.-W. Chiu, W.-C. Wu, J.-W. Wang, C.Y. Lin, C.-T. Chiu, and J.-J. Liou. Pseudo-multiple-exposure-based tone fusion with local region adjustment. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 17(4):470–484, 2015.

[10] Z. Farbman, R. Fattal, D. Lischinski, and R. Szeliski, “Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation,” in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 27, no. 3. ACM, 2008, p. 67.