

지역 엣지 보존 필터와 평균 필터를 이용한 HDR 이미지 톤 매핑 기법

김현기, 최현호, 정제창

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과

hyun-gi@naver.com, hyunho0619@gmail.com, jjeong@hanyang.ac.kr

High Dynamic Range Image Tone Mapping Method by Using Local Edge-Preserving Filter and Mean Filter

Hyungi Kim, Hyunho Choi, Jechang Jeong

Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University

요 약

본 논문에서는 넓은 동적 영역(High Dynamic Range: HDR) 이미지에 지역 엣지 보존 필터를 적용한 개선된 다중 스케일 톤 매핑 기법을 제안하고자 한다. 기존 알고리즘의 다중 스케일 분해 과정에서는 과도하게 많은 정보를 보존하여 결과 이미지가 비현실적으로 표현되고 일부 테스트 이미지에서는 화소 값 변화량이 큰 엣지 영역에서 후광 효과가 발생하는 단점이 있다. 본 논문에서는 기존 알고리즘의 다중 스케일 분해 과정을 개선하여 엣지를 적절히 보존함으로써 후광 효과를 제거함과 동시에 주관적 화질을 향상시켰다.

1. 서론

자연 영상은 카메라 또는 모니터 등 디스플레이들의 제한되어 있는 동적 영역(dynamic range)과 비교하여 넓은 동적 영역(high dynamic range: HDR)을 가진다. 동적 영역은 최대 휘도 성분과 최소 휘도 성분의 비로 정의된다. 일반적으로 HDR 이미지는 다중 노출 이미지들을 융합하여 얻을 수 있다. 이렇게 융합된 HDR 이미지는 8 비트보다 많은 비트로 표현되기 때문에 디스플레이로 표현할 수 있는 영역을 초과한다. 따라서 HDR 이미지의 넓은 동적 영역을 압축하기 위해 톤 매핑(tone mapping) 기술이 필요하다 [1]. 압축은 인간의 시각 시스템(human visual system: HVS)의 특징을 반영하기 때문에 시각적으로 민감한 고주파 성분은 그대로 유지되고 보다 덜 민감한 저주파 성분만 압축이 이루어진다. 이러한 과정을 수행하게 되면 압축된 이미지와 실제 이미지는 시각적으로 미미한 차이를 보이게 된다.

E. Land 는 1971 년 Retinex 이론을 제안했다 [2]. Retinex 이론은 HVS 의 특징을 기반으로 하며 이미지를 조명(illumination) 이미지와 반사(reflectance) 이미지로 분해한다. 조명 이미지와 반사 이미지는 각각 저주파와 고주파 성분에 대응된다. 이 이론은 일반적으로 이미지의 품질을 향상시키는 데 사용된다 [3]. 분해 과정에서는 일반적으로 가우시안 필터가 사용되며 이로 인해 결과 이미지에 후광 현상이 발생하게 된다. 후광 현상을 피하고자 양방향(bilateral) 필터 [4]가 대체 되어 사용되었으며 가우시안 필터를 사용했을 때 보다 더 나은 결과를 만들어냈다. 하지만 양방향 필터도 여전히 후광 현상이 발생했다 [5].

B. Gu *et al.* 은 Retinex 이론을 기반으로 한 다중 스케일 엣지 보존 필터를 제안했다 [6]. 엣지 보존은 후광 현상을 피하기 위한 필터링 디자인의 중요한 기법으로 사용된다. 이 기법은 이미지를 기초 계층(base layer)과 세부 계층(detail

layer)으로 분해한다. 기초 계층은 저주파 정보와 고주파 정보를 포함한다. 기초 계층에 반복적으로 엣지 보존 기법을 적용하게 되면 다중 스케일 분해가 가능해진다. 여기서 다중 스케일은 마지막으로 분해된 기초 계층에서 다른 세부 계층을 점진적으로 분해하기 위해 사용된다. 이러한 엣지 보존 필터를 사용하는 톤 매핑 이미지는 이전 톤 매핑 기법보다 시각적으로 우수한 결과를 보여준다. 하지만 다중 스케일 분해 시 과도하게 많은 정보를 보존하여 결과 이미지가 비현실적으로 표현되고 일부 결과 이미지에서는 후광 현상이 발생하는 경향이 있다. 따라서 본 논문에서는 다중 스케일 분해 과정을 개선하여 이전의 톤 매핑 알고리즘에서 발생하는 비현실적으로 표현되는 현상을 개선하고 후광 현상을 제거하는 방안을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 엣지 보존 필터를 이용한 기존 알고리즘에 대해 설명하고 3 장에서는 기존 알고리즘의 문제점과 함께 본 논문에서 제안하는 기법을 설명한다. 4 장에서는 제안한 기법의 성능을 실험을 통해서 확인한다. 마지막으로 5 장에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘에 대한 결론을 맺는다.

2. 기존의 알고리즘

기존 알고리즘의 전체 순서도는 그림 1 과 같다. 기초 계층이 지역 평균을 보존한다고 가정하면 세부 계층은 0 주위로 진동하는 신호를 가지게 된다. 이 가정에 대해 일반적으로 사용되는 제한 조건 중 하나는 식 (1)을 최소화하는 것이다.

$$\iint_w (I - B)^2 dx dy \quad (1)$$

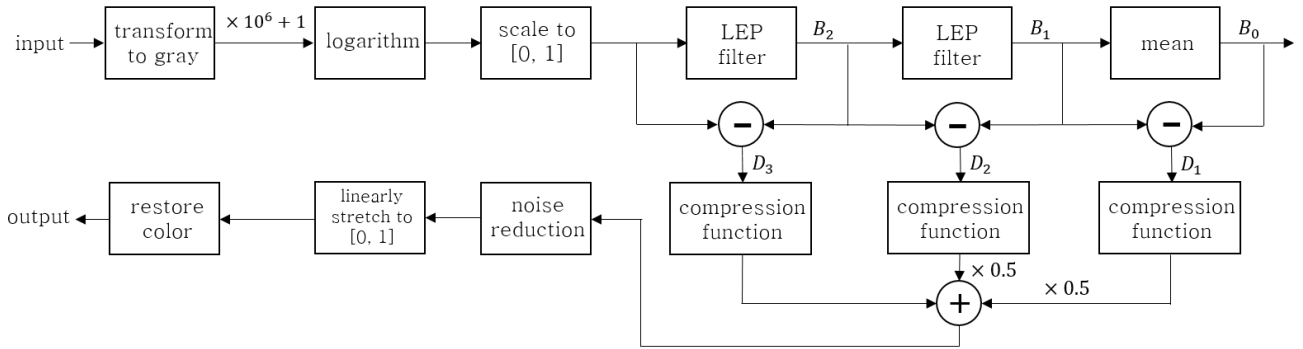


그림 1. 기존 알고리즘의 순서도

여기서 w 는 지역 윈도우를, I 는 이미지의 휘도를 나타내며 B 는 기초 계층을 나타낸다. 기초 계층이 모든 화소에서 일정한 값을 가지며 동일한 윈도우 내에서 충분히 스무딩 되었다면 최소화 식 (1)은 아래 과생 함수를 모든 점에서 0으로 취하고, 식 (2)와 같이 표현한다.

$$2 \cdot \iint_w (I - B) dx dy = 0 \Rightarrow B = \frac{1}{N} \iint_w I dx dy \quad (2)$$

여기서 N 은 윈도우 내에 있는 화소의 수를 의미한다. 이 때, B 는 지역 평균과 같을 수 있다.

엣지를 보존하기 위해서는 또 다른 제한 조건이 필요하다. 지역 적으로 두드러진 엣지(local salient edge)는 기초 계층에 보존되어야 한다. 화소 값의 변화가 크면 두드러진 엣지가 될 확률이 높아지게 되며 위의 제한 조건을 만족시킬 수 있게 된다. 또한 필터를 거치고 나온 기초 계층은 원래의 휘도와 최대한 비슷해야 한다. 이와 같은 제한 조건들은 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$\iint_w \left[(I - B)^2 + \frac{\alpha}{|\nabla I|^\beta} |\nabla B|^2 \right] dx dy \quad (3)$$

여기서 $\frac{\alpha}{|\nabla I|^\beta}$ 는 두 항 사이에서 균형을 이루는 계수이고 β 는 I 의 변화에 대한 민감도를 결정하는 계수이며 α 는 자유 매개 변수이다. I 의 변화량이 일부 영역에서 상대적으로 크다면 계수 $\frac{\alpha}{|\nabla I|^\beta}$ 는 작아지고 첫 번째 제한 조건이 우세해지며 B 는 최대한 I 와 비슷해진다. 따라서 B 에서 두드러진 엣지가 보존 된다. 반면 I 의 변화량이 작아지면 $\frac{\alpha}{|\nabla I|^\beta}$ 는 커지고 두 번째 제한 조건이 우세해지며 B 는 스무딩 된다.

두 가지 제한 조건은 아래 에너지 함수에 포함된다.

$$\begin{aligned} \iint_w (I - B)^2 dx dy + \lambda \iint_w \left[(I - B)^2 + \frac{\alpha}{|\nabla I|^\beta} |\nabla B|^2 \right] dx dy \\ \Rightarrow \iint_w \left[(I - B)^2 + \frac{\alpha'}{|\nabla I|^\beta} |\nabla B|^2 \right] dx dy \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 λ 는 두 제한 조건 사이에서 균형을 조정하는 계수이며 α' 에 흡수되게 된다.

2.1 지역 엣지 보존 필터

위에서 구한 에너지 함수를 이산 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_{i \in w} (I_i - B_i)^2 + \frac{\alpha'}{|\nabla I_i|^\beta} |\nabla B_i|^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 화소 값들이 지역적으로 높은 상관관계를 가지기 때문에 B 가 윈도우 내에서 I 와 선형 종속성을 갖는다고 가정한다. 따라서 다음 식 (6)과 같이 B 의 근사치를 제안한다.

$$B_i = a_w I_i + b_w, \quad i \in w \quad (6)$$

여기서 a_w 와 b_w 는 윈도우 w 에서의 상수 계수이다. 식 (5)의 B_i 를 식 (6)으로 대체하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\sum_{i \in w} (I_i - a_w I_i - b_w)^2 + \alpha' |\nabla I_i|^{2-\beta} \cdot a_w^2 \quad (7)$$

이제 최적화 문제는 매개 변수 추정 문제로 바뀌게 된다. 식 (7)의 최소값은 각 매개 변수의 부분 도함수를 0으로 설정하면 알 수 있으며 이 선형 최소 자승법 (linear least square's method)의 솔루션은 다음과 같다.

$$\begin{cases} a_w = \frac{\sigma_w^2}{\sigma_w^2 + \frac{1}{N} \cdot \alpha' \cdot \sum_{i \in w} |\nabla I_i|^{2-\beta}} \\ b_w = \bar{I}_w - a_w \bar{I}_w \end{cases} \quad (8)$$

여기서 σ_w^2 는 윈도우 내의 I 의 분산을 나타내며 \bar{I}_w 는 윈도우 내 I 의 평균을 나타낸다. 만약 $\alpha' = \beta = 1$ 이면, $\frac{1}{N} \cdot \alpha' \cdot \sum_{i \in w} |\nabla I_i|^{2-\beta}$ 는 윈도우 내 I 변화량의 평균을 표현하게 된다. 따라서 a_w 는 항상 1보다 작고 식 (6)으로부터 출력되는 이미지의 화소 값은 항상 압축됨을 추론할 수 있다. 즉, B 는 I 가 스무딩 된 결과이다.

각 윈도우는 N 개의 화소를 포함하며 각 화소는 N 개의 윈도우와 관련되어 있다. 모든 윈도우에 대해 a_w, b_w 의 집합이 존재하며 (6)의 필터링 된 출력 B_i 는 N 개의 다른 값을 가지게 된다. 이 값들은 정확한 결과를 유지하고 왜곡된 값을 줄이기 위해 가중치가 추가되어야 한다. 하지만 가중치 파악이 어렵기

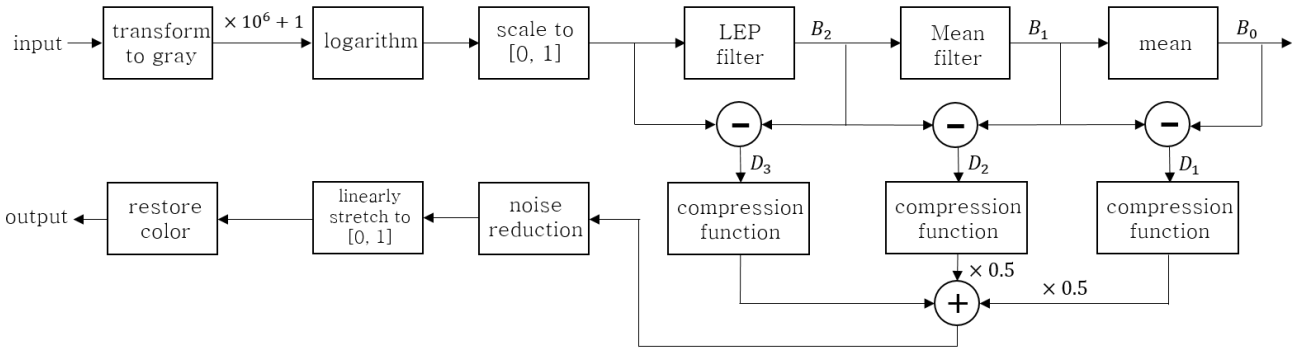


그림 2. 제안하는 알고리즘의 순서도

때문에 간단하게 B_i 의 모든 값을 평균하여 사용한다. 지역 윈도우가 중심 화소로부터 식별되면 a_w, b_w 를 a_k, b_k 로 변경한다. 여기서 k 는 중심 화소의 위치를 나타낸다. 결과적으로 지역 엣지 보존 필터의 출력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B'_i = \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \quad i \in \Omega \quad (9)$$

여기서 Ω 는 이미지의 영역을 나타내며 \bar{a}_i, \bar{b}_i 는 각각 윈도우 내 a_k, b_k 의 평균을 나타낸다.

2.2 다중 스케일 분해

원본 이미지로부터 단일 스케일로 수행되는 지역 엣지 보존 기법은 기초 계층과 세부 계층을 생성한다. 기초 계층은 지역 평균과 두드러진 엣지를 보존하게 된다. 세부 계층은 0 주위의 진동하는 신호를 포함한다. 반복적으로 기초 계층에 지역 엣지 보존 방식을 적용하게 되면 다중 스케일 분해가 가능해진다. 따라서 기초 계층은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$B_{l-1} = LEP_l(B_l), \quad \text{for } l = n, \dots, 2, \quad \text{and } B_n = I \quad (10)$$

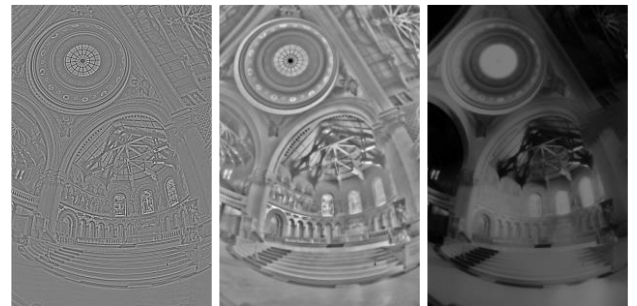
여기서 LEP_l 은 지역 엣지 보존 필터를 나타내며 l 은 스케일 레벨을 나타낸다. 또한 세부 계층은 다음과 같이 표현된다.

$$D_l = B_l - B_{l-1}, \quad \text{for } l = n, \dots, 2 \quad (11)$$

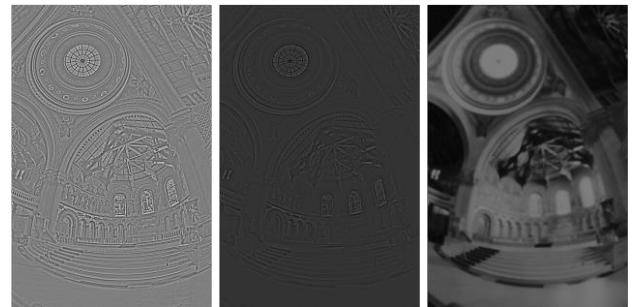
오직 변화 량이 없는 부분만 기초 계층에 포함시키기 위하여 마지막 기초 계층 B_0 는 기초 계층 B_1 을 평균 취함 ($B_0 = \text{Mean}(B_1)$)으로써 얻을 수 있다. B. Gu *et al.*의 연구에서는 이미지를 3개의 세부 계층과 하나의 기초 계층으로 분해하였다 [6].

3. 제안하는 알고리즘

기존 알고리즘의 다중 스케일 분해 과정의 경우 기초 계층 2와 1을 생성하는 과정에서 지역 엣지 보존 필터를 사용한다. 지역 엣지 보존 필터를 통과하게 되면 두드러진 엣지들은 보존



(a) 기존 알고리즘



(b) 제안하는 알고리즘

그림 3. 세부 계층 이미지(순서대로 세부 계층 3, 2, 1)

되지만 진동하는 신호들은 압축되게 된다. 그림 3은 기존 알고리즘과 제안하는 알고리즘의 각 세부 계층 이미지를 나타낸다. 지역 엣지 보존 필터를 사용한 기존 알고리즘의 세부 계층 2를 보면 두드러진 엣지와 평탄한 영역이 적절히 보존되어 있는 세부 계층 3과 달리 정보를 과도하게 보존함으로써 넓은 동적 영역 내의 높은 값을 다수 포함하게 된다. 이로 인해 결과가 비현실적으로 보이게 된다. 또한 화소 값 간의 차이가 커지게 되므로 일부 영역에서 후광 효과가 발생하게 된다.

제안하는 알고리즘의 경우 기존의 톤 매핑 알고리즘과 유사하지만 다중 스케일 분해 과정에 차이가 있다. 제안하는 알고리즘의 순서도는 그림 2와 같다. 세부 계층 2의 출력을 개선하기 위해 기존 지역 엣지 보존 필터 대신 평균 필터를 사용하였다. 평균 필터를 사용함으로써 기존 엣지 보존 알고리즘의 특성인 진동하는 신호, 즉 보존이 필요 없는 신호를 뭉개 수 있을뿐더러 두드러진 엣지들은 적절하게 보존시킬 수 있다. 또한 지역적으로 블록단위 평균값을 계산하므로 결과 이미지에 후광 현상이 발생하지 않게 된다. 평균 필터는 엣지 보존 필터에서 사용한 것과 마찬가지로 5×5 크기의 윈도우를 사용하였다.

4. 실험 결과 및 분석

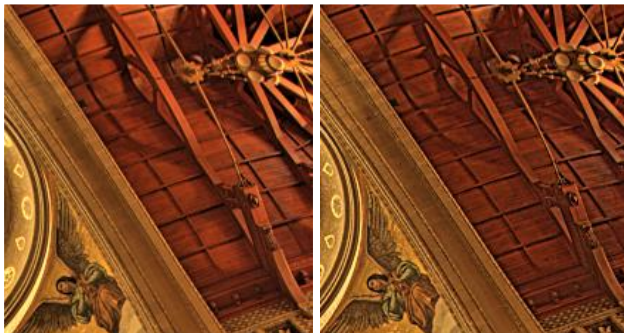
Windows 10 64 비트 운영체제 Intel Core i7-4790 CPU@ 3.60GHz 의 PC 환경에서 MATLAB R2016a 로 실험을 진행했다. 기존 알고리즘과 제안하는 알고리즘 모두 윈도우 크기 w 를 5 x 5 로 설정하였고 민감도를 결정하는 계수인 α 와 β 는 각각 0.1 과 1.0 으로 설정했다. 제안하는 알고리즘의 성능평가를 위해 기존의 알고리즘과 결과 이미지의 주관적인 화질을 비교하였다. 본 연구에서는 memorial.hdr 및 office.hdr 이미지를 평가 영상으로 선정하였다. 그림 4 는 두 개의 테스트 이미지에 대한 주관적 화질 비교 결과이다. 그림 4 에서 (c)와

(d) 그리고 (g)와 (h)는 기존 알고리즘과 제안하는 알고리즘을 자세히 비교해 보기 위해 확대한 것이다. 그림 4(c)의 기존 알고리즘에서는 과도하게 많은 정보를 보존 후 결합하여 사진이 비현실적으로 보이는 것을 볼 수 있다. 반면 그림 4(d)의 제안하는 알고리즘은 두드러진 엣지를 보존시키는 지역 엣지 보존 필터를 세부 계층 1 에만 적용함으로써 엣지를 적절히 보존하여 결과 사진이 비현실적으로 보이는 것을 개선하였다. 그림 4(g)의 기존 알고리즘에서는 화소 값 변화량이 큰 외곽선 영역인 액자 주변으로 후광 현상이 나타남을 확인하였다. 이에 반해 그림 4(h)의 제안된 알고리즘은 후광 현상이 제거됨으로써 이미지 품질이 개선된 것을 볼 수 있다.



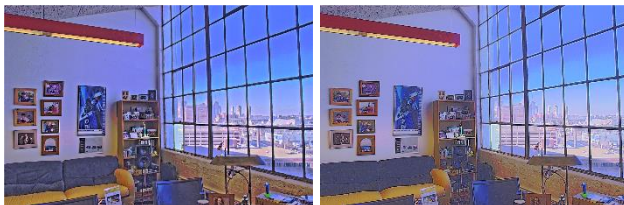
(a) 기존 알고리즘

(b) 제안하는 알고리즘



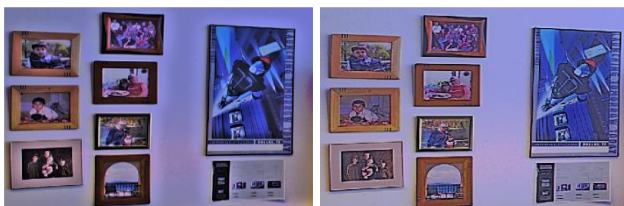
(c) (a) 이미지 확대

(d) (b) 이미지 확대



(e) 기존 알고리즘

(f) 제안하는 알고리즘



(g) (e) 이미지 확대

(h) (f) 이미지 확대

그림 4. 결과 비교 이미지

5. 결론

본 논문에서는 톤 매핑 과정 중에 발생하는 후광 현상 및 비현실적으로 보이는 결과를 개선하기 위하여 지역 엣지 보존 필터와 평균 필터를 기반으로 하는 다중 스케일 톤 매핑 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘과 기존의 알고리즘을 비교하여 후광 현상 및 비현실적으로 보이는 결과가 개선된 것을 확인하였다.

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. On Graphics*, vol. 21, pp. 267-276, July 2002.
- [2] E. H. Land and J. J. McCann, "Lightness and retinex theory," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 61, no. 1, pp. 1-11, Jan. 1971.
- [3] Z. Rahman, D. J. Jobson, and G. A. Woodell, "Retinex processing for automatic image enhancement," *J. Electron. Imag.*, vol. 13, no. 1, pp. 100-110, 2004.
- [4] C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images," *Proc. Sixth Int'l Conf. Computer Vision*, pp. 839-846, Jan. 1998.
- [5] Z. Farbman, R. Fattal, d. Lischinski, and R. Szeliski, "Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation," *ACM Trans. Graph.*, vol. 27, no. 3, pp. 1-10, Aug. 2008.
- [6] B. Gu, W. Li, M. Zhu, and M. Wang, "Local edge-preserving multiscale decomposition for high dynamic range image tone mapping," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 1, pp. 70-79, Jan. 2013.