일반논문 (Regular Paper)
방송공학회논문지 제22권 제4호, 2017년 7월 (JBE Vol. 22, No. 4, July 2017)
https://doi.org/10.5909/JBE.2017.22.4.496
ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

HDR 영상 복원을 위해 대비와 텍스쳐 영역 정보를 고려한 혼합 톤 매핑 기법

강 주 미[a)], 박 대 준[a)], 정 제 창[a)‡]

Hybrid Tone Mapping Technique Considering Contrast and Texture Area Information for HDR Image Restoration

Ju-Mi Kang[a)], Dae-Jun Park[a)], and Jechang Jeong[a)‡]

요 약

본 논문은 전역적 대비를 보존하는 동시에 경계 정보를 정확히 보존할 수 있는 혼합 톤 매핑 기법 (Tone Mapping Operator: TMO)을 제안한다. 우선, 넓은 동적 영역 (High Dynamic Rangae: HDR) 영상을 낮은 동적 영역 (Low Dynamic Range: LDR) 디스플레이에 적합하게 압축하기 위해 인간의 시각 시스템 (Human Visual System: HVS)에 기반한 임계 값 대 밝기 값 (Threshold vs. Intensity: TVI) 함수와 영상의 대비를 사용하였으며 이에 따라 영상의 전역적인 대비를 보존할 수 있었다. 또한, 가이디드 영상 필터링 (Guided Image Filtering: GIF)을 이용하여 검출된 경계 정보와 변화감지역 (Just Noticeable Difference: JND) 모델의 공간적 마스킹을 이용하여 검출된 경계 정보를 결합함으로써 영상의 경계를 보존하고 출력 영상의 인지적 화질을 향상시켰다. 기존에 TMO들은 크게 전역적 톤 매핑 (Global Tone Mapping: GTM)과 지역적 톤 매핑 (Local Tone Mapping: LTM)으로 분류되었다. GTM은 전역적인 대비를 보존하며 구현이 단순해 실행시간이 빠르다는 장점이 있지만 영상의 경계 정보가 손실되며 지역적 대비를 보존하지 못하는 단점이 있었다. 반면 LTM은 영상의 지역적 대비와 경계 정보를 잘 보존하였지만 경계 영역에서의 헤일로 열화 현상의 발생과 같이 일부 영역이 부자연스럽게 표현되는 경우가 발생하였으며 GTM과 비교하여 높은 계산 복잡도를 가졌다. 따라서 본 논문에서는 GTM과 LTM의 장점을 결합하여 전역적인 대비를 보존하는 동시에 영상의 경계 정보를 보존하는 TMO를 제안하였으며 실험결과를 통해 제안하는 톤 매핑 기법이 인지적 화질 측면에서 성능이 우수한 것으로 확인되었다.

Abstract

In this paper, we propose a Tone Mapping Operator (TMO) that preserves global contrast and precisely preserves boundary information. In order to reconstruct a High Dynamic Range (HDR) image to a Low Dynamic Range (LDR) display by using Threshold value vs. Intensity value (TVI) based on Human Visual System (HVS) and contrast value. As a result, the global contrast of the image can be preserved. In addition, by combining the boundary information detected using Guided Image Filtering (GIF) and the detected boundary information using the spatial masking of the Just Noticeable Difference (JND) model, And improved the perceived image quality of the output image. The conventional TMOs are classified into Global Tone Mapping (GTM) and Local Tone Mapping (LTM). GTM preserves global contrast, has the advantages of simple implementation and fast execution time, but it has a disadvantage in that the boundary information of the image is lost and the regional contrast is not preserved. On the other hand, the LTM preserves the local contrast and boundary information of the image well, but some areas are expressed unnatural like the occurrence of the halo artifact phenomenon in the boundary region, and the calculation complexity is higher than that of GTM. In this paper, we propose TMO which preserves global contrast and combines the merits of GTM and LTM to preserve boundary information of images. Experimental results show that the proposed tone mapping technique has superior performance in terms of cognitive quality.

Keyword : High Dynamic Range (HDR), Human Visual System (HVS), Contrast, Threshold vs. Intensity (TVI), Just Noticeable Difference (JND), Guided Image Filtering (GIF)

Ⅰ. 서 론

넓은 동적 영역 (High Dynamic Range: HDR) 기술은 영상의 품질을 향상시키기 위한 많은 기술들 중에 하나로 명암을 세밀하게 분석해 사람의 눈으로 보이는 것과 유사하게 자연스럽고 생동감 넘치는 영상을 표현하기 위해 개발된 기술이다. 그동안의 기술들은 한 화면에 화소 수를 증가시켜 공간적인 해상도를 높이거나 프레임율의 향상을 통해 시간적인 해상도를 높여왔으며, 초고화질 (Ultra High Definition: UHD)에 와서는 800만 화소까지 발전하였다. 고해상도, 고화질 영상에 대한 소비자의 요구는 지속적으로 늘어가고 있으며 이에 따라 차세대 비디오 서비스를 위한 부호화 기술 제안을 비롯하여 HDR과 관련된 국제 표준 단체들에서의 활발한 표준화를 진행이 이루어지고 있다[1],[2]. 일반적으로 사람이 실제 보는 밝기의 범위는 4만 니트까지 광범위하지만 기존의 낮은 동적 영역 (Low Dynamic Range: LDR) 모니터 표준 규격으로는 밝기 표현이 매우 제한적이기 때문에 이러한 광범위한 범위의 밝기를 담아내는 것이 어렵다. 그러나 HDR 영상 규격은 돌비비전 기준으로 0.0005에서부터 10,000 니트까지의 밝기 표현이 가능하기 때문에 사람의 눈을 통해 더 많은 정보를 얻을 수 있게 한다. 그렇기 때문에 영상 제작자들은 최근 높은 화질과 만족도를 줄 수 있는 HDR에 집중하게 되었으며 향후 HDR을 이용한 컨텐츠의 전망이 밝아졌다. 일반적으로 HDR 영상은 서로 다른 노출 값을 적용하여 촬영된 영상들을 결합하여 생성될 수 있다. 이와 관련해 영상을 고속으로 생성하는 효율적인 기법들도 제안되고 있다[3]. 현재 디스플레이 시장에서는 컨텐츠를 제대로 표현해줄 HDR 디스플레이의 필요성이 부각되고 있지만 HDR 표현이 가능한 디스플레이는 소수에 불과하며 높은 가격대로 인해 일반 소비자들이 구매하기에 어려움이 있다. 그렇기 때문에 HDR 영상을 압축하여 LDR 모니터에 표현할 수 있는 톤 매핑 기법 (Tone Mapping Operator: TMO)들이 제안되어 왔다. TMO를 통해서 10bit 이상의 빛의 범위를 LDR 모니터의 8bit의 범위로 매칭할 수 있으며, TMO는 영상처리를 위해 어떠한 기법을 적용했는지에 따라 크게 전역적 톤 매핑 (Global Tone Mapping: GTM), 지역적 톤 매핑 (Local Tone Mapping: LTM)으로 분류된다[4]. GTM은 한 이미지의 전체 픽셀 밝기를 수정하는 방법이다. 만약 두 개의 픽셀 값이 같은 밝기 값을 갖고 있다면 변환 후에 두 픽셀의 밝기 값이 동일해야 한다. LDR 모니터에서는 밝기의 범위를 0에서 255의 정수 값으로 표현하기 때문에 변환 함수를 사용하여 이에 맞는 밝기 값으로 매핑해야 한다. GTM은 비선형적인 사람의 시각 인지 시스템 (Human Visual System: HVS)에 맞추어 적당한 영상을 표현하기 위해 선형 스케일링, 로그 함수 또는 지수 함수와 같은 단순한 기법들을 사용한다. 대표적인 GTM 기법은 Schlick, Ward et al.와 Drago et al.에 의해 제안된 선형 매핑 (Linear Mapping: LM)[5], 히스토그램 조정 기법 (Histogram Adjustment: HA)[6]과 적응적 로그 기법 (Adaptive Logarithmic: AL)[7]이 있다. 이와 같은 기법들은 구현이 단순하기 때문에 처리 속도가 빠르다는 장점이 있지만 지역적인 대비를 유지하지 못하고 경계 정보가 보존되지 않는 단점이 있다. 이러한 GTM의 단점을 보완하기 위한 방법으로 LTM이 제안되었다.

LTM은 지역적인 대비를 개선시키기고 경계 정보를 보존하기 위해 제안된 방법으로 해당 위치 픽셀의 밝기 값에만 의존하는 것이 아니라 원본 밝기의 주변까지 고려하는 방법이다. 그러나 높은 대비의 가장자리 영역에서 헤일로 열화(halo artifact) 현상이 발생하는 단점이 있다. 그렇기 때문에 최근 이러한 열화 현상을 제거하기 위한 다양한 알고리듬이 제안되고 있다. 기존의 많은 LTM 기법들은 레티넥

a) 한양대학교 지능형로봇공학과(Department of Intelligent Robotics, Hanyang University)
‡ Corresponding Author : 정제창(Jechang Jeong)
E-mail: jjeong@hanyang.ac.kr
Tel: +82-02-2220-0369
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3759-3116
※ 본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구임(NRF-2015R1A2A2A01006004).
※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and future Planning(NRF-2015R1A2A2A01006004).
· Manuscript received May 10, 2017; Revised June 28, 2017; Accepted July 4, 2017.

Copyright ⓒ 2017 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.
"This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered."

스 이론을 기반으로 개발되었다. 레티넥스 이론은 인간의 감각계가 느끼는 물체의 밝기나 색채는 물체 표면에서 반사되어 망막에 입사된 빛의 강도나 분광 분포와 반드시 대응한다는 이론으로 감각계의 현상을 설명하기 위한 모델이다. 대표적인 LTM 기법으로는 Reinhard et al., Pattanaik et al.와 Ashikhmin에 의해 제안된 광학적 톤 재생기법 (Photographic Tone Reproduction: PTR)[8], 다중 스케일 기법 (Multi-Scale: MS)[9] 그리고 고대비 영상를 위한 톤 매핑 기법 (Tone Mapping Operator for High Contrast Images: TMOHCI)[10]이 포함된다.

위에서 설명한 GTM과 LTM이 갖는 단점을 보완하고 장점을 살리기 위해 최근에 다양한 기법을 결합한 혼합 톤 매핑 기법들이 제안되고 있으며[11], 이에 맞춰 본 논문에서도 전역적인 대비와 경계 정보를 유지하는 혼합 톤 매핑 기법을 제안한다. 우선, 출력 영상에서 발생하는 색상 왜곡 현상을 방지하기 위해 RGB 채널을 갖는 HDR 영상을 HSV 공간으로 변환하여 사용한다. 여기서 밝기(V) 채널에 대해 HVS 기반의 임계 값 대 밝기 값 (Threshold vs. Intensity: TVI) 함수와 영상의 대비를 사용하여 휘도 값을 LDR 모니터의 밝기 범위에 적합하게 압축을 수행한다. 압축된 휘도 영상에 가이디드 영상 필터링 (Guided Image Filtering: GIF)을 적용하여 경계 정보를 검출하고 변화감지역 (Just Noticeable Difference: JND) 모델의 공간적 마스킹을 적용하여 텍스쳐 영역을 검출하여 이를 결합한다. 생성된 경계 정보는 GIF를 통해 생성된 베이스 층에 더해져 색상 채널과 결합되어 출력되며 결과적으로 전역적 대비와 경계 정보가 보존된 출력 영상을 생성할 수 있다.

2장에서는 기존에 제안된 톤 매핑 기법을 전역적, 지역적 방법에 따라 분류하여 분석하며, 3장에서는 관련 기법들과 함께 제안하는 톤 매핑 기법에 대해 소개한다. 또한, 4장에서 기존의 톤 매핑 기법과의 비교를 통한 실험 결과를 사용하여 제안하는 기법의 성능을 증명하고 5장에서 결론을 통해 마무리 한다.

Ⅱ. 기존의 톤 매핑 기법

1. 전역적 톤 매핑 기법 (Global Tone Mapping: GTM)

대표적인 GTM 기법으로는 HA와 AL이 존재한다. 우선, HA는 로그 공간에서 선형으로 히스토그램을 제한하는 톤 매핑 기법이다. 로그 공간에서 히스토그램을 구하는 이유는 로그 공간의 픽셀 값이 HVS 기반의 대비와 직접적인 관련이 있기 때문이다. 히스토그램은 영상을 시야각 내에서 1°에 상응하게 샘플 영상을 추출한 이후에 샘플 영상을 로그 공간으로 변환하여 계산한다. 여기서 최댓값, 최솟값의 로그 휘도 값을 통해 히스토그램의 범위를 지정한다. HA 기법의 전개도는 그림 1과 같다.

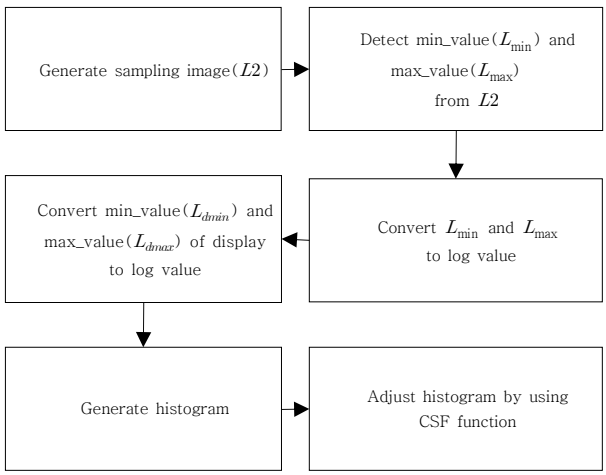


그림 1. HA 기법의 전개도
Fig. 1. Flow chart of HA method

HA 기법의 목적은 히스토그램 상승 한도치를 설정하여 과도한 평활화 현상을 방지하고 대비 민감도 함수 (Contrast Sensitivity Function: CSF)를 사용하여 사람의 시야에 따른 대비를 제한하는데 있다. 결과적으로 HA를 이용한 톤 매핑을 통해 전역적인 대비를 보존하여 영상의 전체적인 대비가 향상되었으며 기존의 단순 히스토그램 평활화 기법과 비교해 빛 번짐 현상이 줄어들었다. 그러나 낮은 빈도를 갖는 부분은 더욱 압축이 되기 때문에 기존 히스토그램 기반의 영상 향상 기술의 문제점을 개선시키지는 못하였으며, 너무 어두운 부분과 밝은 부분에서는 여전히 경계 정보의 손실이 발생하여 물체를 구분하는 것이 어려웠다.

또 하나의 GTM 기법으로는 AL 기법이 존재한다. 이 기법은 HVS가 휘도에 비선형적으로 반응하는 현상을 모방하여 휘도 값에 따른 로그 압축을 수행한다. 로그함수를 기반

으로 영상처리를 하기 위해 식 (2.1)과 같은 형태의 방법이 제안되었다.

$$L_d = \frac{\log(L_w+1)}{\log(L_{wmax}+1)} \quad (1)$$

$$L_w = \frac{L}{L_{wa}} \quad (2)$$

$$L_{wa} = L_{avg} = \exp(\frac{1}{N}\sum\log[\delta + L(x,y)]) \quad (3)$$

L_d는 디스플레이로 출력되는 휘도 값이며, L_w는 영상의 휘도 값을 실세계 적응 값인 L_{wa}로 나눠준 값이다. L_{wa}는 전체 영상의 로그 평균값을 의미한다. 영상의 특성이 모두 다르기 때문에 L_{wa}는 영상의 특성에 따라 다르게 측정될 수 있으며 이로 인해 영상마다 적응적으로 톤 매핑이 가능하게 된다. δ는 영상의 휘도 값이 0일 경우에 결과가 발산하는 경우를 방지하기 위해 매우 작은 값으로 설정한다. L_{wmax}는 L_w 값의 최댓값을 의미한다. 식 (2.1)은 로그의 밑을 변형함에 따라 다른 결과를 얻기 위해 식 (2.4)와 같이 변형 된다.

$$L_d = \frac{\log_{bs}(L_w+1)}{\log_{10}(L_{wmax}+1)} \quad (4)$$

변환된 식에서 bs는 base를 뜻하며 이는 고정으로 사용한다. base가 2이면, 어두운 부분의 밝기를 적절히 조정하고 경계 정보가 유지되고 base가 10이면, 밝은 부분의 밝기를 유지한다. Drago는 두 가지 base의 특징을 유지하기 위해 식 (2.5)과 같은 기법을 제안하였다.

$$L_d = \frac{L_{dmax} \cdot 0.01}{\log_{10}(L_{wmax}+1)} \cdot \frac{\log(L_w+1)}{\log(2+((\frac{L_w}{L_{wmax}})^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}} \cdot 8))} \quad (5)$$

여기서 L_{dmax}는 디스플레이 특성에 따른 최댓값이며, b는 사용자 정의 파라미터이다. 감마 보정에서 2.2의 감마값을 사용했을 때 결과가 b 값이 0.73일 때와 가장 유사하게 표현되었다. HDR 영상에 대해 실험적으로 b 값을 조정해 본 결과, 0.85일 때 가장 감마 보정의 그래프와 형태가 유사하고 적당한 색상 보정이 가능하기 때문에 톤 매핑은 b 값이 0.85인 경우의 값을 사용한다.

이와 같은 GTM 기법들은 구현이 단순하기 때문에 실행 시간이 빠르며 전역적인 대비를 보존할 수 있다는 장점이 있지만, 영상의 지역적 대비를 표현하는데 어려움이 있으며 경계 정보가 손실되는 단점을 가지고 있다.

2. 지역적 톤 매핑 기법 (Local Tone Mapping: LTM)

LTM은 GTM의 단점을 보완하여 지역적인 대비를 개선시키기 위해 제안된 방법으로 해당 위치 픽셀의 밝기 값에만 의존하는 것이 아니라 주변 밝기까지 고려하는 방법이다. 대표적인 LTM 기법으로는 PTR, MS, TMOHCI가 포함된다.

PTR은 사진 현상을 위해 사용하던 존 시스템(zone system)을 사용하였다. 존 시스템은 필름을 사용하여 사진을 기록하는 작업에 있어서 필름 노출과 관련된 가장 기초적이며 중심이 되는 개념이다. 이는 필름이 갖게 되는 컬러에 대한 사항이 아닌 광량에 관련된 이론으로 인화상에서 어떤 장면의 톤이 어떻게 시각화 될 것인지를 도와준다. 피사체의 명도는 사물에서 반사되어 방출되는 광량을 나타내며, 촬영 시 필름에 도달하는 광량은 일반적으로 표 1과 같이 11단계로 나눠진다.

표 1. 광량에 따른 각 존의 반사도 (단위: %)
Table 1. Reflectance of zone (unit: %)

zone0	zone Ⅰ	zone Ⅱ	zone Ⅲ	zone Ⅳ	zone Ⅴ
3.5	4.5	6.0	9.0	12.5	17.5
zone Ⅵ	zone Ⅶ	zone Ⅷ	zone Ⅸ	zone Ⅹ	
25	35	50	70	100	

이것은 사진의 가장 밝은 영역과 가장 어두운 영역의 톤이 갈수록 압축되는 것을 나타낸다. PTR은 이와 유사한 방식을 디지털 이미지에 적용함으로써 HDR 영상을 LDR에 실제의 영상과 유사하게 출력되도록 하는 기법이다. 우선, 식 (2.6)을 통해 동적 범위를 줄이고 영상의 특성을 분석한다.

$$L_{avg} = \exp(\frac{1}{N}\sum_{x,y}\log(\delta + L_w(x,y))) \quad (6)$$

여기서 N은 영상 전체 픽셀 수이며, $L_w(x,y)$는 영상 (x,y) 지점에서의 실세계 휘도 값을 의미한다. δ는 log0이 되어 -∞으로 발산하는 것을 방지하기 위해 아주 작은 값이다. 출력 영상의 중간 밝기 값이 존V에 매핑될 수 있도록 식 (2.7)와 식 (2.8)을 적용한다.

$$L(x,y) = \frac{\alpha}{L_{avg}} L_w(x,y) \quad (7)$$

$$\alpha = 0.18 \times 4^{(\frac{2\log_2 L_{avg} - \log_2 L_{\max}}{\log_2 L_{\max} - \log_2 L_{\min}})} \quad (8)$$

α는 키 값(key value)이며, 0.18을 기준으로 α 값이 크면 전체적으로 밝은 영상을 나타내며 α 값이 작으면 전체적으로 어두운 영상을 나타낸다. 여기서 $L(x,y)$는 스케일 된 휘도 값을 나타내고 $L_{\min}, L_{\max}$는 각각 입력영상의 히스토그램의 가장 낮은 밝기 값 보다 1% 정도 큰 휘도 값과 가장 높은 밝기 값 보다 1% 정도 작은 휘도 값을 나타낸다. 위에서 얻은 $L(x,y)$을 이용한 디스플레이에 매핑되는 휘도 값은 식 (2.9)과 같이 표현된다.

$$L_d(x,y) = \frac{L(x,y)(1 + \frac{L(x,y)}{L^{2_{white}}})}{1 + L(x,y)} \quad (9)$$

$$L_{white} = 1.5 \times 2^{(\log_2 L_{\max} - \log_2 L_{\min} - 5)} \quad (10)$$

여기서 $L_d(x,y)$는 톤 매핑되어 디스플레이에 출력될 휘도 값을 의미하며, L_{white}는 1(white) 값으로 매핑될 가장 작은 휘도 값으로 디폴트 값인 경우 입력영상 휘도의 제일 높은 값이 된다. 만약 L_{white}가 입력 영상 휘도의 최댓값보다 작으면 L_{white}보다 큰 값은 L_{white}로 매핑된다. 이와 같은 기법을 적용하면 비교적 효율적인 톤 매핑 영상을 생성할 수 있지만 밝은 영역에서 상당량의 영상 세부 정보를 잃게 되는 단점이 발생한다. 또한 모든 영상에 동일한 기울기를 적용하기 때문에 영상 특성에 따라 성능차이가 크게 발생할 수 있다.

또 다른 LTM 방법으로 TMOHCI가 존재한다. PTR과 유사한 모델로써 헤일로 열화 현상을 방지하고 경계 정보를 보존하는 것을 목표로 제안되었다. Ashikhmin은 사용자의 목적이 지역적인 대비를 보존할 것인지, 시각적인 대비를 보존할 것인지에 따라 알고리듬을 설계했다. 우선 지역적인 적응 휘도 값을 영상의 각 픽셀마다 계산하고 TVI 함수를 사용해 디스플레이의 동적 범위에 적당히 압축을 수행한다. 이 과정에서 영상의 중요한 경계 정보가 손실될 수 있기 때문에 마지막으로 경계 정보를 재생하는 과정이 포함된다. 최종 목적이 지역적인 대비를 보존하는 것이라면 디스플레이에 표현되는 휘도 값은 식 (2.11)이 사용된다.

$$L_d(x,y) = \frac{L_w(x,y) f(L_{w,a}(x,y))}{L_{w,a}(x,y)} \quad (11)$$

여기서 f는 톤 매핑 함수이며, $L_{w,a}(x,y)$는 지역적 적응 휘도 값이고 $L_w(x,y)$는 (x,y) 지점에서의 휘도 값을 나타낸다. 또한, 목적이 시각적인 대비를 보존하는 것이라면 디스플레이 휘도 값을 계산하는 방법은 식 (2.12)와 같다.

$$L_d(x,y) = f(L_{w,a}(x,y)) + \frac{TVI(f(L_{w,a}(x,y)))}{TVI(L_{w,a}(x,y))}(L_w(x,y) - L_{w,a}(x,y)) \quad (12)$$

식 (2.12)에서 사용되는 TVI 함수는 식 (2.13)과 같이 단순하게 표현되며 이를 이용하여 LDR 모니터에 적합한 밝기 값으로 압축이 수행된다.

$$C(x) = \begin{cases} \frac{x}{0.0014} & if\ x \le 0.0034, \\ 2.4483 + \frac{\log(\frac{x}{0.0034})}{0.4027} & if\ 0.0034 \le x \le 1.0, \\ 16.5630 + \frac{x - 1.0}{0.4027} & if\ 1.0 \le x \le 7.2444, \\ 32.0693 + \frac{\log(\frac{x}{7.2444})}{0.0556} & otherwise, \end{cases} \quad (13)$$

여기서 x는 cd/m^2에서의 휘도 값을 의미한다. 톤 매핑 함수 f는 인지적 특성을 선형 매핑될 수 있도록 하는 원칙에 기반한 함수이다. 따라서 실세계의 휘도 값은 상응하는 인지적 스케일에 대한 상대적인 위치에 따라 식 (2.14)과 같이 디스플레이의 휘도 값으로 변환된다.

$$L_d(x,y) = f(L_w(x,y)) + \frac{C(L_w(x,y)) - C(L_{w,\min})}{C(L_{w,\max}) - C(L_{w,\min})} \quad (14)$$

여기서 $L_{d,\max}$는 디스플레이에서 표현할 수 있는 최대 휘도 값을 의미하며 $L_{w,\max}, L_{w,\min}$은 지역적 적응 휘도 값 $L_{w,a}(x,y)$의 최댓값, 최솟값을 의미한다. 지역적 적응 휘도 값 $L_{w,a}(x,y)$은 충분히 경계 정보를 유지하는 동시에 지역적 대비를 보존할 수 있도록 예측된다. TMOHCI를 적용한 결과, 영상의 지역적 대비와 경계 정보가 보존되었지만 전체적으로 부자연스럽게 거칠게 표현되는 단점이 있었다. 또한, 텍스쳐 영역과 같은 경계 정보 영역이 잘 보존되지 않고 번져 보이는 현상이 나타났다.

Ⅲ. 제안하는 톤 매핑 기법

본 논문에서는 제안하는 톤 매핑 기법과 관련하여 HVS 기반의 TVI 함수, GIF 그리고 JND의 개념이 사용되었다.

사람의 눈은 배경과 물체를 구분 할 수 있도록 빠르게 배경 조명에 적응할 수 있어야 한다. 적응 휘도에 대한 임계 휘도의 의존성은 TVI 함수에 의해 정의되며[12], TVI 함수는 효율적인 HDR 휘도 인코딩에서 핵심적인 역할을 한다. 휘도 L에서 정수단위 휘도로의 비선형 변환 구성 $I_{HDR}(L)$은 그림 2에서 표현한다.

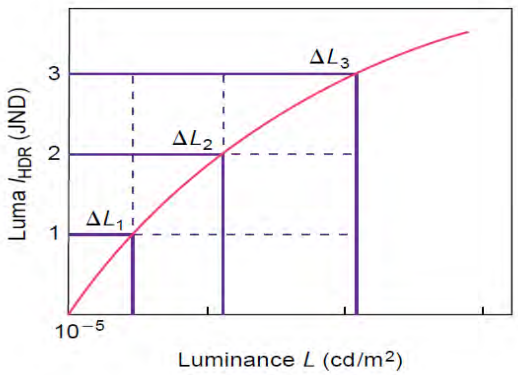


그림 2. 휘도 L에서 정수단위 휘도로의 비선형 변환 구성
Fig. 2. Non-linear conversion of luminance

어떠한 TVI 함수를 선택하는지에 따라 휘도 매핑의 결과는 다소 차이가 있을 수 있으며, 대표적인 TVI 함수는 Daly에 의해 제안 된 대비 민감도 함수(Contrast Sensitivity Function: CSF)[13]에 기반을 두고 있다. 또 다른 인기 있는 TVI 함수는 Blackwell에 의해 측정 된 실험 데이터[14]에 바탕을 두고 있으며, 이는 CIE 표준으로 채택되어 사용되고 있다. Ward의 톤 매핑 알고리즘은 TVI 모델을 사용하는 최초의 톤 매핑 기법으로 임의의 배경 밝기 I_b에서 임계치 $\triangle I_b$는 시각적 외관의 상관관계를 계산하기 위한 단위로 사용되었다. 또한, Ferwerda는 이후에 이 개념을 간상체와 추상체 특유의 JND를 계산하기 위해 적용하였고 넓은 범위의 밝기를 갖는 톤 매핑 영상에 사용하였다. 본 논문에서는 Ferwerda의 TVI 모델을 선형으로 근사한 함수와 영상의 대비를 사용하여 LDR 모니터에 적합한 밝기 값으로 압축을 수행한다. 영상의 대비는 식 (3.1)과 같이 계산된다.

$$C = \frac{(\max L_{TVI} - \min L_{TVI})}{(\max L_{TVI} + \min L_{TVI})} \quad (15)$$

여기서 C는 계산된 대비 값을 의미하며 $\max L_{TVI}, \min L_{TVI}$는 TVI 함수를 적용하여 압축된 영상의 최대 밝기 값과 최소 밝기 값을 의미한다. 계산된 대비 값과 TVI 함수를 이용하여 매핑되는 휘도 값은 식 (3.2)와 같이 계산된다.

$$L_d(x,y) = \frac{C \bullet f(L(x,y))}{\max L_{TVI} - \min L_{TVI}} \quad (16)$$

식 (3.2)에서 f는 TVI 함수를 활용한 톤 매핑을 의미하며, $L_d(x,y)$는 디스플레이로 매핑되는 휘도 값을 나타낸다. 다음으로 GIF는 가장 최신에 제안된 경계 정보 보존 기법으로 성능이 우수하고 기존의 최소 제곱 합 필터링(Weighted Least Square: WLS)과 비교하여 실행 시간도

절약되어 다양한 논문에서 사용되고 있다. 초기 GIF 모델은 구현이 단순하고 속도가 빠르지만 헤일로 열화 현상이 발생하는 단점이 있었기 때문에 이를 보완하기 위해 최근에는 가중치를 포함하는 가중치 가이디드 필터링 (Weighted Guided Image Filtering: WGIF) 방법이 제안되기도 하였다. GIF는 원본 입력 영상과 가이던스 영상을 함께 사용하여 필터링을 수행한다. 출력 영상은 가이던스 영상을 사용하는 선형변환을 통해 생성되며, 식 (3.3)과 같다[15].

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in w_k \tag{17}$$

여기서 q, I는 각각 출력 영상과 가이던스 영상을 의미한다. GIF는 입력 영상에 가이던스 영상 특징을 적용하여 출력 영상을 생성하며, 가이던스 영상은 입력 영상과 동일하게 설정할 수 있다. 식 (3.3)에 포함된 계수 a_k, b_k를 계산하기 위해 비용 함수를 이용한다. 비용 함수는 식 (3.4)과 같이 계산되며, 이를 최소화 하는 계수 a_k, b_k를 구하여 선형변환에 사용한다.

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a^{2_k}) \tag{18}$$

여기서 ε는 a_k 값을 조정하기 위한 정규화 변수이며, p는 입력영상이다. 비용 함수를 최소화하기 위한 계수 a_k, b_k를 Draper et al.[16]에 의해 계산하면 식 (3.5)과 같이 표현할 수 있다.

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|}\sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \overline{p_k}}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \tag{19}$$

$$b_k = \overline{p_k} - a_k \mu_k$$

가이던스 영상에서 윈도우 ω_k의 평균과 분산은 μ_k와 σ_k^2로 표현하며, $|\omega|$는 ω_k내의 픽셀 수를 의미한다. $\overline{p_k}$는 입력 영상에서 윈도우 ω_k의 평균이다. 만약 가이던스 영상과 입력 영상을 동일하다고 볼 때, $\varepsilon = 0$이면 $\sigma_k^2 + \varepsilon = \sigma_k^2$가 되며 중심 픽셀 k의 위치가 물체와 물체 사이의 경계에 위치해 있을 경우에 σ_k^2 값이 ε 값의 영향을 받지 않을 정도로 크기 때문에 a_k 값이 1에 가까워진다. 즉, 출력 영상은 가이던스 이미지에 가깝게 되며 경계 정보가 보존된다. 반대의 경우 σ_k^2 값이 작아지게 되어 a_k 값은 0에 가까워지며, 출력 영상이 가이던스 영상의 성분을 잃고 평탄해진다. 본 논문에서는 영상의 경계 정보를 검출하기 위해 가이던스 영상을 입력 영상과 동일하게 설정하여 필터링을 수행하며 이를 통해 베이스 층과 경계 정보 층을 분리한다. 그러나 GIF를 사용하여 검출한 경계 정보에는 영상의 텍스쳐 영역과 같은 부분이 잘 검출되지 않기 때문에 영상의 인지적 화질을 떨어트릴 수 있다. 따라서 JND 모델의 공간적 마스킹을 도입하여 영상의 텍스쳐 영역을 검출하고 이를 추가함으로써 출력 영상의 화질을 향상시켰다.

JND는 차이가 눈에 띄기 위해 변경되어야하는 양을 뜻한다. HVS 특성에 의해 사람은 규칙적인 영역에서의 변화에 더 민감하게 반응하며, 불규칙적인 영역의 변화에는 덜 민감하게 반응한다. 이러한 특성에 기반한 JND 모델을 통해 영상의 규칙적인 영역과 불규칙적인 영역을 가시적으로 표현할 수 있다. JND 예측 모델은 정지 영상 및 동영상 압축 분야를 비롯하여 움직임 예측과 화질 평가 등에 사용되며 JND 모델을 적용하여 분류한 규칙적인 영역은 텍스쳐 영역을 포함하여 영상의 중요한 경계 정보들을 포함하고 있다. 규칙적인 영역을 표현하기 위해 휘도 적응과 공간적 마스킹 개념이 사용되며 식 (3.6)를 통해 적응 휘도 값과 공간적 마스킹을 수행할 수 있다[17].

$$LA(x) = \begin{cases} 17 \times (1 - \sqrt{\frac{B(x)}{127}}), & \text{if } B(x) \le 127 \\ \frac{3}{128} \times (B(x) - 127) + 3, & else \end{cases} \tag{20}$$

$$SM(x) = [0.01B(x) + 11.5][0.01G(x) - 1] - 12$$

여기서 $B(x)$는 (x, y) 지점의 배경 휘도이며, $G(x)$는 윈도우내에서의 최대 경계 크기이다. $G(x)$는 그림 3의 4방향 고주파 필터를 적용하였을 때의 최댓값으로 표현된다.

JND 모델의 공간적 마스킹을 통해 생성된 텍스쳐 영역은 GIF를 통해 생성된 경계 정보 와 결합되어 출력 영상의

0	0	0	0	0
1	3	8	3	1
0	0	0	0	0
-1	-3	-8	-3	-1
0	0	0	0	0

g_1

0	0	1	0	0
0	8	3	0	0
1	3	0	-3	-1
0	0	-3	-8	0
0	0	-1	0	0

g_2

0	0	1	0	0
0	0	3	8	0
-1	-3	0	3	1
0	-8	-3	0	0
0	0	-1	0	0

g_3

0	1	0	-1	0
0	3	0	-3	0
0	8	0	-8	0
0	3	0	-3	0
0	1	0	-1	0

g_4

그림 3. 텍스쳐 영역 검출을 위한 4방향 고주파 필터
Fig. 3. 4-direction high-frequency filter for texture region detection

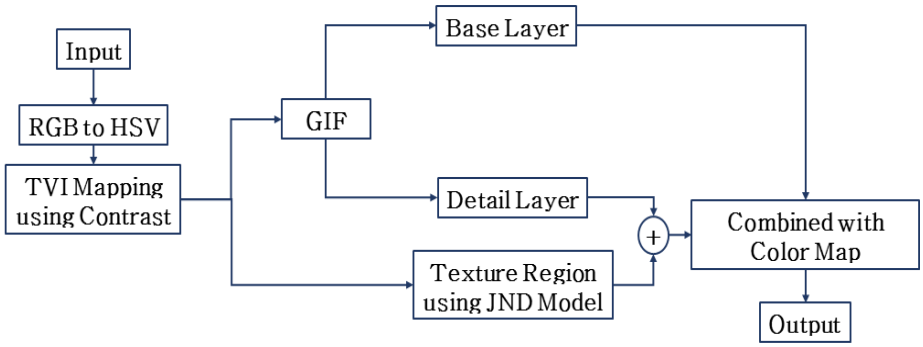


그림 4. 제안하는 톤 매핑 기법의 흐름도
Fig. 4. Flow chart of proposed tone mapping method

경계 정보를 더욱 정확하게 표현한다. 앞서 설명한 연구들을 바탕으로 하여 제안하는 알고리듬이 구성되며 이를 통해 영상의 전역적인 대비와 경계 정보를 보존하고 우수한 화질의 출력 영상을 생성할 수 있다. 제안하는 톤 매핑 기법의 전체적인 전개도는 그림 4와 같다.

그림 4와 같이 입력 영상은 우선 RGB 채널에서 HSV 채널로 변환된다. HSV는 색상, 채도 그리고 명도라는 세 가지 특성들로 구성되며, 주로 머신 비전에서 서로 다른 물체들의 컬러를 식별하기 위해 HSV 컬러 공간을 사용한다. RGB 채널은 방법은 간단하지만 색 공간 사이의 상호관계가 크기 때문에 각각의 채널에 대한 톤 매핑을 수행하여 출력 영상을 생성할 경우 색상 왜곡 현상이 발생할 수 있으며, 좋은 품질의 결과를 얻기 힘들다. 이에 비해 HSV 색 공간은 상호관계가 낮고 이로 인해 색상 왜곡 현상을 방지하고 인지적 화질을 높일 수 있다. 변환된 영상의 V 채널에 대해 TVI 함수와 영상의 대비를 이용한 압축을 수행하고 압축된 영상에 GIF를 적용하여 베이스 층과 경계 정보 층을 얻을 수 있다. 다음으로 JND 모델의 공간적 마스킹을 통해 텍스쳐 영역을 검출하여 GIF를 통해 검출된 경계 정보와 결합을 수행한다. 이로 인해 더욱 정확한 경계 정보 맵의 구성이 가능해지며 마지막으로 베이스 층을 더하여 색 공간과 재결합함으로써 출력 영상을 생성할 수 있다. 또한, 사용자는 사용 목적에 따라 감마 보정을 사용하여 출력 영상을 변화시킬 수 있다.

Ⅳ. 실험 결과

1. 객관적 화질 평가

HDR 영상의 모든 정보는 광범위한 동적 영역의 영상을 압축하는 것이기 때문에 톤 매핑 기법을 통해 완전하게 보

존될 수는 없다. 또한 사람은 LDR 모니터로 표현된 HDR 영상의 정보가 손실되었음을 인지하지 못할 수도 있다. 따라서 영상의 품질을 객관적으로 평가하기 위해 구조적 충실도(Structural Fidelity)를 사용한다. 본 논문에서는 구조적 충실도를 측정하기 위한 알고리듬으로 SSIM(Structural Similarity)을 사용한다[18]. 지역적으로 적용되는 SSIM 알고리즘은 이미지 간의 휘도, 대비 및 구조를 비교할 수 있다.

HDR 영상과 톤 매핑 된 LDR 영상으로부터 추출 된 2개의 로컬 영상을 패치로 가정한다. 지역적 구조 충실도 측정은 이미지 공간을 가로 질러 움직이는 슬라이딩 윈도우를 사용하여 이미지에 적용된다. 결과적으로 공간 전체에서 구조적 충실도의 변화를 나타내는 맵이 생성된다. 이미지의 샘플링 밀도는 이미지의 가시성, 이미지와 관찰자 간의 거리, 디스플레이의 해상도 및 관찰자의 시각 시스템의 지각 능력을 결정한다. 단일 스케일 방법은 이러한 변화를 포착 할 수 없기 때문에 지역 구조 충실도 맵이 각 스케일에서 생성된다. 각 스케일에서의 맵은 식 (4.1)을 통해 계산된다.

$$S_l = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} S_{local}(x_i, y_i) \tag{21}$$

여기서 x_i, y_i는 HDR과 LDR 영상에서의 i번째 패치를 의미하며 S_{local}은 식 (4.2)와 같이 계산된다.

$$S_{local}(x,y) = \frac{2\sigma_x'\sigma_y' + C_1}{2\sigma_x'^2\sigma_y'^2 + C_1}\,\frac{\sigma_{xy} + C_2}{\sigma_x\sigma_y + C_2} \tag{22}$$

여기서 σ_x, σ_y와 σ_{xy}는 HDR과 LDR 영상 사이에서 해당 패치 간의 지역적인 표준 편차 및 상호 상관관계를 의미하며 C_1과 C_2는 양의 안정화 상수를 의미한다. 전체 구조적 충실도는 각 스케일 수준의 구조적 충실도 점수를 식 (4.3)과 같이 결합하여 결정된다.

$$S = \prod_{i-1}^{L} S_l^{\beta l} \tag{23}$$

여기서 L은 전체 스케일의 수이며, βl은 l번째 스케일에 할당된 가중치이다. 표 2는 기존의 톤 매핑 기법과 제안하는 톤 매핑 기법의 구조적 충실도를 비교한 결과이다.

또한, 영상의 속성 중에서 밝기와 대비는 인식된 자연스러움과 더 관련이 있다. 통계적인 자연스러움을 모델링하기 위해 이 두 가지 속성을 사용한다. 이러한 특성을 모델링함으로써 구조적 충실도의 객관적 평가를 보완한다. 결과적으로, 밝기와 대비에 대한 결합 확률 밀도 함수는 식 (4.4)와 같이 계산될 수 있다.

$$N = \frac{1}{K} P_m P_d \tag{24}$$

여기서 K는 P_m, P_d에서 최댓값을 사용한 정규화 인자이다. 결과는 0과 1 사이의 값으로 표현되며 통계적 자연스러움 측정한다[19]. 앞서 구한 구조적 충실도 (S)와 통계적 자연스러움 (N)은 톤 매핑 된 영상의 품질을 평가해주며 이들은 개별적으로 또는 두 가지 척도를 결합하여 결과 영상의 품질 평가를 위해 사용될 수 있다. 식 (4.5)는 S와 N을 결합한 모델을 보여준다.

$$Q = aS^{\alpha} + (1-a)N^{\beta} \tag{25}$$

여기서 a는 0과 1사이 값으로 두 가지 척도에 대한 상대적 중요도를 조정하는 인자이며, α, β는 각 척도의 감도를 의미한다. S와 N의 최대치는 1이며 전체적인 화질 측정 Q 또한 최대치는 1로 표현된다[20]. 표 2는 기존의 톤 매핑 기법과 제안하는 톤 매핑 기법의 Q를 이용한 객관적 화질 비교를 보여준다.

기존 대표적인 GTM, LTM 기법인 HA와 TMOHCI를 객관적 화질 비교를 위해 사용하였다. 표 2의 결과를 살펴보면 제안하는 톤 매핑 기법의 Q 값이 상대적으로 높게 측정된 것을 확인할 수 있다. wreathbu 영상은 다른 비교 영상들에 비해 경계 정보가 많이 포함되어 있으며 이와 같이 경계 정보를 많이 포함된 영상에서 제안하는 톤 매핑 기법의 성능이 기존의 매핑 기법들과 비교하여 높게 측정되었다.

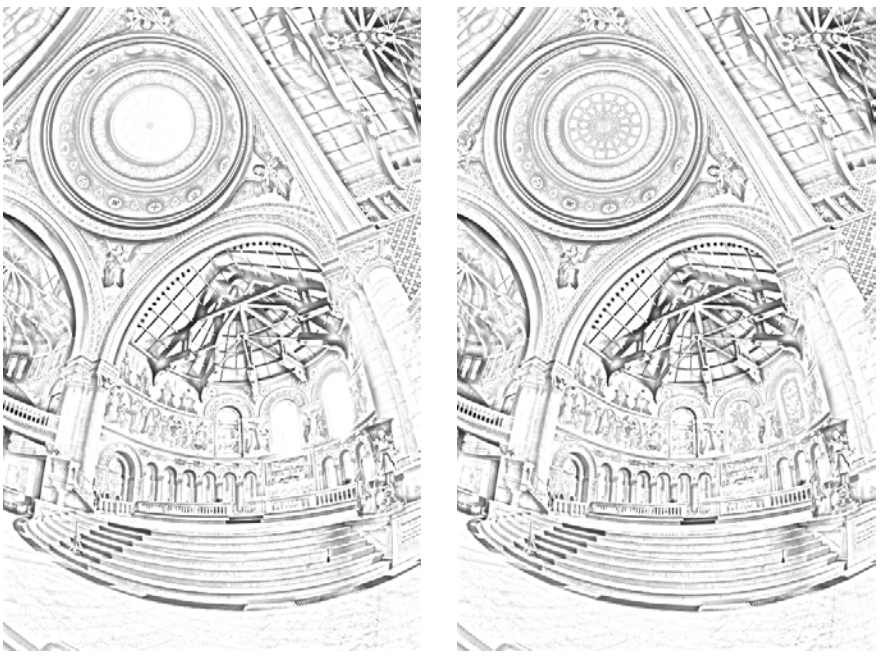
표 2. 화질 평가 모델 비교
Table 2. Comparison of quality assessment model

Image	Tone Mapping Operator (TMO)	Quality Assessment Model (Q)
1. memorial	AshikhminTMO	0.8232
	Proposed	0.8638
2. CarWall	DragoTMO	0.7371
	Proposed	0.8666
3. CoffeeShop	AshikhminTMO	0.8655
	Proposed	0.8081
4. KitchenWindow	DragoTMO	0.7222
	Proposed	0.7824
5. Egyptian	AshikhminTMO	0.6754
	Proposed TMO	0.7730
6. wreathbu	DragoTMO	0.7561
	Proposed TMO	0.9218
7. belgium	AshikhminTMO	0.7298
	Proposed TMO	0.8485
8. Popcorn_Counter	DragoTMO	0.7561
	Proposed TMO	0.7573

2. 주관적 화질 평가

인지적 성능 비교를 위해 GIF만을 사용하여 경계 정보를 검출한 것과 JND 개념을 도입하여 텍스쳐 영역의 경계 정보를 결합했을 때의 결과를 그림 5를 통해 보여준다.

(a)는 GIF를 이용하여 경계 정보를 검출하였을 때의 결과이며 (b)는 JND 모델의 공간적 마스킹 개념을 도입하여 텍스쳐 영역의 경계 정보를 결합한 결과 영상이다. GIF를 적용하는 과정에서 비용함수를 최소화하기 위한 계수를 계산하게 되는데, 여기서 계수는 윈도우 내에서 계산된 계수의 평균을 사용한다. 그렇기 때문에 픽셀단위의 정확한 경계 정보 검출이 어려우며 이를 보완하기 위해 JND 모델의 공간적 마스킹 함수를 사용하였다. 검출된 텍스쳐 영역 정보를 (a)의 경계 정보 맵과 결합하면 (b)의 최종 경계 정보 맵을 생성할 수 있다. 결과를 살펴보면 (a)의 memorial 영상 상층의 창 부분과 중간층의 창 부분에서 희미하게 검출되었던 경계 정보가 (b)에서 정확하고 또렷하게 검출된 것을 확인할 수 있다. 그림 6는 Ashikhmin에 의해 제안된 TMOHCI 기법과 제안하는 톤 매핑 기법의 결과를 비교한 영상이다.



(a) (b)

그림 5. memorial 영상에 (a): GIF를 사용한 경계 정보 층 (b): JND 모델을 통해 검출된 경계 정보를 결합한 결과
Fig. 5. (a): Detail layer using GIF (b): Detail layer combining detail of GIF and JND model of memorial image

그림 6. HDR 영상을 활용한 톤 매핑 결과 비교. (a), (b), (c), (d): 제안하는 기법 (e), (f), (g), (h): TMOHCI
Fig. 6. Comparison of result using HDR images. (a), (b), (c), (d): Proposed method (e), (f), (g), (h):: TMOHCI

그림에서 (a), (b), (c), (d)는 제안하는 기법에 의해 출력된 결과이며, (e), (f), (g), (h)는 TMOHCI를 사용하여 톤 매핑된 결과이다. 결과와 같이 제안하는 기법이 세부적인 경계 정보와 대비를 잘 보존한 것을 확인할 수 있으며, TMOHCI를 적용한 결과에서 나타나는 색상 왜곡 현상이 발생하지 않았기 때문에 인지적 화질 측면에서 성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

HDR 영상을 톤 매핑하여 표현하기 위한 다양한 톤 매핑 기법들을 비교해 본 결과, 전역적 톤 매핑 기법을 적용하면 영상의 전역적인 대비가 보존되고 시간이 단축되는 장점을 발견할 수 있었지만 지역적인 대비와 경계 정보가 보존되지 못하는 단점이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 대표적인 전역적 톤 매핑 기법들을 살펴보면 주변 영역을 고려하지 않고 해당 픽셀의 밝기 값만을 이용하여 톤 매핑을 수행하기 때문에 영상의 지역적인 정보를 인식하기 힘든 경우가 발생한다. 또한, 지역적 톤 매핑 기법을 적용하면 영상의 주변 영역을 고려하여 톤 매핑을 수행하기 때문에 지역적인 대비와 경계 정보가 보존되지만 경계 영역에서의 헤일로 열화 현상과 같이 특정 영역에서의 부자연스러움이 발생한다. 비교를 위해 사용된 TMOHCI 기법은 대표적인 지역적 톤 매핑 기법으로써 영상의 대비를 계산하고 경계 정보를 분리하기 위해 가우시안 기법을 적용한다. 이 과정에서 필터링이 정확히 수행되지 않아 경계가 정확히 검출되지 않으며 단계적인 가우시안 필터링을 수행하는 과정에서 연산량이 높아져 수행시간이 길어진다. 따라서 본 논문에서는 각 기법에서의 단점을 보완할 수 있도록 영상의 대비와 TVI 함수를 사용하여 휘도 값 압축을 수행함으로써 HVS에 기반하여 영상의 전역적인 대비를 유지하는 동시에 계산 복잡도를 줄였으며, JND 모델의 공간적 마스킹을 통한 텍스쳐 영역 정보를 GIF를 통해 검출된 경계 정보와 결합함으로써 정확한 경계 정보 보존을 수행하였다. 이로 인해 영상의 전반적인 인지적 화질이 향상되는 결과를 얻을 수 있었으며 RGB 채널 각각을 처리하는 것이 아닌 밝기 영역에 대한 매핑만을 수행하여 결합함으로써 계산 복잡도를 줄이고 색상 왜곡 현상을 방지할 수 있었다.

참 고 문 헌 (References)

[1] Jeongyun L., Yong-Jo A., Woong L., Seanae P., Donggyu S., and Jung-Won K., "Layered Codeing Method for Scalable Coding of HDR and SDR videos," *Journal of Broadcast Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 756-769, Sep. 2015.

[2] Jeongyun L., Woong L., and Donggyu S., "Standard technology trend for HDR / WCG image compression," *The Korean Society of Broadcast and Media Engineers*, vol. 21, no. 1, pp.59-69, 2016.

[3] Tae-Jang P. and In-Kyu P., "HDR Image Acquisition from Two LDR Images," *Journal of Broadcast Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 247-257, 2011.

[4] K. Devlin, *A Review of Tone Reproduction Techniques*, Dept. Comput. Sci. Univ. Bristol, Bristol, U.K., Nov. 2002.

[5] Christophe Schlick, “Quantization Techniques for Visualization of High Dynamic Range Pictures,” *Proceeding of the Fifth Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 7-18, 2014.

[6] Gregory Ward Larson, Holly Rushmeier, and Christine Piatko, “A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.*, vol. 3, no. 4, pp. 291-306, Dec. 1997.

[7] Frederic Drago, Karol Myszkowski, Thomas Annen, and Norishige Chiba, “Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes,” *Computer Graphics Forum.*, vol. 22, no. 3, pp. 419-426, Sep. 2003.

[8] Erik Reinhard, Michael Stark, Peter Shirley, and James Ferwerda, “Photographic Tone Reproduction for Digital Images,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 21, no. 3, pp. 267-276, Jul. 2002.

[9] Sumanta N. Pattanaik, James A. Ferwerda, Mark D. Fairchild, and Donald P. Greenberg, “A Multiscale Model of Adaptation and Spatial Vision for Realistic Image Display,” *In SIGGRAPH'98: Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 287-298. New York, NY, USA: ACM, 1998.

[10] Michael Ashikhmin, “A Tone Mapping Algorithm for High Contrast Images,” *EGRW'02: Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 145-156, Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2002.

[11] H. Shahid, D. Li, A. Fanaswala, M. T. Pourazad, and P. Nasiopoulos, "A New Hybrid Tone Mapping Scheme for High Dynamic Range (HDR) Videos," *IEEE International Conference on Consumer lectronics (ICCE)*, pp. 351-352, 2015.

[12] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec, *High Dynamic Range Imaging, Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann, 2005.

[13] S. Daly, *The Visible Differences Predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity*, Digital Images and Human Vision, vol. 1666, 1992.

[14] O. Blackwell and H. Blackwell, “Visual performance data for 156 normal observers of various ages,” *Journal of the Illuminating*

Engineering Society, vol. 1, no. 1, pp. 3 – 13, 1971.
[15] K.He, J.Sun, and X.Tang, "Guided Image filtering," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Learn.*, vol. 35, no. 6, pp. 1397-1409, Jun. 2013.
[16] N.Draper and H.Smmith, *Applied Regression Analysis*, 2^{nd} edition, JohnWiley, 1981.
[17] Wu, J., Shi, G., Lin, W., Liu, A., and Qi, F., "Just noticeable difference estimation for images with free-energy principle," *IEEE Trans. Multimed.*, vol.15, no.7, pp.1705-1710, 2013.
[18] H. Yeganeh and Z. Wang, "High dynamic range image tone mapping by maximizing a structural fidelity measure," *IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process.*, pp. 1879 – 1883, May 2013.
[19] M. Cadík and P. Slavík, "The naturalness of reproduced high dynamic range images," *In Proc. 9th Int. Conf. Inf. Vis.*, pp. 920 – 925, 2005.
[20] K. Ma, H. Yeganeh, K. Zeng, and Z. Wang, "High dynamic range image tone mapping by optimizing tone mapped image quality index," *IEEE Int. Conf. Multimedia Expo,* pp. 1 – 6, Jul. 2014.

저 자 소 개

강 주 미

- 2015년 02월 : 국립한국교통대학교 전자공학과 학사
- 2015년 09월 ~ 현재 : 한양대학교 지능형로봇공학과 석사
- ORCID : http://orcid.org/0000-0002-8638-9891
- 주관심분야 : 영상압축, FRUC, HDR

박 대 준

- 2011년 02월 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 학사
- 2011년 03월 ~ 현재 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석박사
- ORCID : http://orcid.org/0000-0001-9255-071X
- 주관심분야 : 영상압축, HEVC, FRUC, HDR

정 제 창

- 1980년 02월 : 서울대학교 전자공학과 학사
- 1982년 02월 : KAIST 전기전자공학과 석사
- 1990년 : 미국 미시간대학 전기공학과 박사
- 1980년 ~ 1986년 : KBS 기술연구소 연구원 (디지털 및 뉴미디어)
- 1990년 ~ 1991년 : 미국 미시간대학 전기공학과 연구교수 (영상 및 신호처리)
- 1991년 ~ 1995년 : 삼성전자 멀티미디어 연구소 (MPEG, HDTV, 멀티미디어)
- 1995년 ~ 현재 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 교수 (영상통신 및 신호처리)
- ORCID : http://orcid.org/0000-0002-3759-3116
- 주관심분야 : 영상처리, 영상압축, 3DTV