

논문 2008-45SP-2-2

다중 노출 복수 영상에서 장면의 다이내믹 레인지 추정을 통한 HDR 영상 획득

(Acquisition of HDR image using estimation of scenic dynamic range
in images with various exposures)

박 대 근*, 박 기 현*, 하 영 호**

(Dae-Geun Park, Kee-Hyon Park, and Yeong-Ho Ha)

요 약

일반적으로 HDR 영상을 얻기 위해서는 장면의 다이내믹 레인지를 충분히 포함하는 노출이 다른 많은 영상이 필요하고, 그 영상을 한 영상으로 합성한다. 본 논문에서는 적은 수의 영상으로 HDR 영상을 얻을 수 있는 효율적인 방법을 제안하였다. 먼저 노출이 다른 두 장의 영상을 사용해 장면의 다이내믹 레인지를 추정하였다. 이 두 영상은 장면의 다이내믹 레인지의 상한점과 하한점을 포함한다. 장면에 상관없이 노출 시간의 변화에 따라 상한점을 포함하는 영상의 최대 그레이레벨과 하한점을 포함하는 영상의 최소 그레이레벨이 일정한 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 이런 경향을 모델링하여, 장면의 다이내믹 레인지를 추정하였다. 추정한 장면의 다이내믹 레인지는 HDR 영상 획득을 위한 노출 시간을 찾는 데에 사용된다. 카메라의 다이내믹 레인지 세 개로 카메라가 만들 수 있는 전체 다이내믹 레인지를 포함할 수 있기 때문에, 영상 세 장만으로 HDR 영상을 얻을 수 있었다. HDR 영상의 오차를 평가하기 위해 가상의 카메라 영상을 사용하는 실험을 하였다. 실험을 통해 제안한 방법으로 얻은 HDR 영상의 오차가 10장 이상의 영상을 사용하여 얻은 HDR 영상의 오차가 큰 차이가 없음을 확인하였다.

Abstract

Generally, to acquire an HDR image, many images that cover the entire dynamic range of the scene with different exposure times are required, then these images are fused into one HDR image. This paper proposes an efficient method for the HDR image acquisition with small number of images. First, we estimated scenic dynamic range using two images with different exposure times. These two images contain the upper and lower limit of the scenic dynamic range. Independently of the scene, according to varied exposure times, similar characteristics for both the maximum gray levels in images that include the upper limit and the minimum gray levels in images that include the lower limit are identified. After modeling these characteristics, the scenic dynamic range is estimated using the modeling results. This estimated scenic dynamic range is then used to select the proper exposure times for the acquisition of an HDR image. We selected only three proper exposure times because entire dynamic range of the cameras could be covered by three dynamic range of the cameras with different exposure times. To evaluate the error of the HDR image, experiments using virtual digital camera images were carried out. For several test images, the error of the HDR image using proposed method was comparable to that of the HDR image which utilize more than ten images for the HDR image acquisition.

Keywords : HDR image, dynamic range, camera response curve, exposure time, virtual digital camera image

* 학생회원, ** 정회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
(School of Electrical Engineering and Computer
Science, Kyungpook National University)

* 본 결과물은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의
출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사
업의 연구결과입니다.

접수일자: 2007년7월13일, 수정완료일: 2008년2월26일

I. 서 론

최근 일상생활에서 디지털 카메라의 사용이 증가하
고 있으며, 디지털 카메라의 화소 수, 화질, 다양한 기능
과 디자인 등이 많이 개선되고 있다. 하지만 여전히 카

메라가 한 번의 노출로 받아들일 수 있는 밝기의 범위가 크지 않은 센서의 한계가 존재한다. 그래서 많이 밝은 부분과 어두운 부분이 동시에 있는 장면에서 사진을 찍을 경우에는 밝기 정보를 얻지 못해서 밝은 부분은 그레이레벨이 255, 어두운 부분은 그레이레벨이 0으로 나타나는 경우가 많다. 이것은 다이내믹 레인지(Dynamic Range)로 설명할 수 있는데, 다이내믹 레인지란 밝기가 가장 밝은 부분과 가장 어두운 부분의 밝기의 비율을 의미한다. 한 번의 노출로 감지할 수 있는 카메라의 다이내믹 레인지는 실세계의 다이내믹 레인지에 비해 매우 작기 때문에 사진을 찍으려고 하는 장면의 다이내믹 레인지가 큰 경우에는 카메라가 밝기 정보를 얻지 못하게 되는 것이다.

High dynamic range (HDR) 영상은 한 노출에 대하여 일반 디지털 카메라로 촬영이 가능한 범위보다 더 큰, 또는 일반적인 디스플레이 장치에서 표현될 수 있는 다이내믹 레인지보다 더 큰 HDR을 가지는 영상이다. 일반 디지털 카메라로 찍은 영상이 얻을 수 있는 밝기의 범위는 제한적이지만, HDR 영상은 훨씬 더 실세계에 가까운 밝기 정보의 표현이 가능하다. 실세계가 가지고 있는 밝기의 범위는 약 $108\text{cd}/\text{m}^2$ 정도이고 사람의 눈이 한 번에 수용할 수 있는 밝기의 범위는 약 $105\text{cd}/\text{m}^2$ 정도인데 비해, 일반 디지털 카메라의 센서가 한 번의 노출로 받아들일 수 있는 밝기 범위는 약 $102\text{cd}/\text{m}^2$ 정도로 이보다 훨씬 작다^[1-2]. 결국 채널 당 8비트의 일반적인 24비트 RGB 포맷으로 실세계의 밝기 정보를 표현하는 것은 불가능하다. 따라서 실세계의 HDR을 표현하기 위한 영상 포맷이 요구된다. 실세계의 HDR이나 사람의 눈이 실세계의 HDR을 감지할 수 있는 범위를 표현하기 위해서는 각 채널이 실수 정보를 나타낼 수 있어야 한다. HDR 영상 포맷을 이용하여 실세계의 밝기 정보를 표현할 수 있는 것과 이를 디스플레이 장치로 표현하는 것은 서로 다른 문제이다. 일반 디스플레이 장치가 표현할 수 있는 밝기의 범위는 약 $102\text{cd}/\text{m}^2$ 정도로 HDR 영상을 표현할 수 없다. 따라서 실수의 밝기 정보를 24비트의 일반 영상 포맷으로 나타내는 톤 매핑(Tone Mapping)이란 방법을 통하여 HDR 영상을 일반 디스플레이 장치로 표현하며 그에 관하여 연구가 활발히 진행 중이다^[3-5].

HDR 영상을 얻을 때 다이내믹 레인지가 넓은 HDR 카메라를 사용하는 방법과 일반 카메라로 노출을 달리 해서 영상을 여러 장 찍어 합성하는 두 가지의 방법이 있다. 일반 카메라를 사용하여 기존에 Debevec, Malik,

Mitsunaga, Nayar 그리고 Robertson 등이 HDR 영상을 얻는 것에 관한 방법을 제안하였다^[6-12]. 모든 방법에서 노출이 다른 사진을 여러 장 찍고, 이 영상을 합성하여 HDR 영상을 얻었다. 이 때 노출 시간을 두 배의 차이로 해서 보통 10장 이상의 사진을 찍었는데, 이는 장면의 다이내믹 레인지가 어느 정도 되는지 알기 어렵기 때문에 장면의 다이내믹 레인지를 충분히 포함하는 넓은 노출의 범위를 가진 많은 영상이 필요한 것이다. Debevec이 적은 수의 영상으로 HDR 영상을 얻는 것에 관하여 언급은 하였으나 구체적인 방법에 대해서는 기술하지 않았다^[7].

사진을 찍을 때에는 움직이지 않는 동일한 장면에 대한 정지 영상이 필요하다. 하지만 여러 장면에서 사람이거나 자동차 등 움직이는 물체가 존재하는데 그런 움직이는 물체들로 인해서 많은 수의 영상을 얻는 데에 어려움이 있기 때문에 영상의 수를 줄일 필요가 있다. 또한 기존의 방법들에서는 노출이 다른 영상 각각의 다이내믹 레인지가 중복되는 영역이 많이 생기는데 이런 중복되는 영역을 줄임으로써 필요한 영상의 수를 줄일 수 있다^[13]. 이와 함께 사진을 찍기 전에 장면의 다이내믹 레인지를 알고 있다면, 장면의 다이내믹 레인지를 벗어난 영상을 찍지 않을 수 있기 때문에 영상의 수를 줄일 수 있다.

본 논문에서는 HDR 영상을 얻을 때에 필요한 영상의 개수를 줄였다. 장면의 다이내믹 레인지를 추정하고, 영상의 중복되는 다이내믹 레인지를 줄여서 필요한 영상의 개수를 최소한으로 줄이는 방법을 제안하였다.

II. 기존의 HDR 영상 얻는 방법

디지털 카메라는 노출 등의 단계를 거치면서 실제 장면의 밝기인 radiance와 최종으로 얻어진 그레이레벨과의 관계가 선형적이지 않다. 이 비선형적인 관계를 카메라 특성 곡선 또는 카메라 응답 곡선이라 하고, 이를 추정하기 위해 많은 연구가 행해져 왔다. 카메라 특성 곡선은 주로 radiance와 노출 시간의 곱을 그레이레벨과의 관계로 나타내고, 식 (1)과 같이 표현한다.

$$r \cdot t = f(z) \quad (1)$$

식 (1)에서 r 은 밝기를 실수로 나타내는 radiance를 나타내고, t 는 노출 시간, z 는 그레이레벨을 나타낸다. 그리고 f 는 카메라 특성 곡선이다. Mann이 이 비선형

적인 관계의 문제를 설명하였으나, 카메라 특성 곡선을 추정하는 데에는 다소 제한된 방법을 사용하였다^[6]. 후에 Debevec이 radiance와 노출 시간과의 곱과 그레이레벨과의 관계를 특이값 분해(Singular Value Decomposition)를 사용하여 최소 자승법을 통해서 카메라 특성 곡선을 추정하는 방법을 개선하였다^[7]. Robertson은 Gauss-Seidel relaxation 방법을 이용하여 카메라 특성 곡선을 추정하였고^[8], Mitsunaga와 Nayar는 두 영상의 radiance의 비율이 노출 시간의 비와 같음을 이용하여 카메라 특성 곡선을 다항식으로 모델링하여 추정하였는데, 이 방법에 대해 구체적으로 알아보겠다^[9]. Mitsunaga와 Nayar는 카메라 특성 곡선을 식 (2)와 같이 다항식으로 가정하였다.

$$I = f(z) = \sum_{n=0}^N c_n z^n \quad (2)$$

식 (2)에서 I 는 radiance, z 는 그레이레벨을 나타내고, N 은 다항식의 차수, c_n 은 계수를 나타낸다. 그리고 카메라 특성 곡선의 추정은 노출 시간의 비율을 이용하였다.

$$\frac{I_{p,q}}{I_{p,q+1}} = \frac{k_p t_q}{k_p t_{q+1}} = R_{q,q+1} \quad (3)$$

식 (3)에서 p 는 픽셀, q 는 영상을 나타내고, k 는 카메라 설정에 의한 상수, t 는 노출 시간이고, $R_{q,q+1}$ 은 q 번째와 $q+1$ 번째 영상의 노출의 비율을 나타낸다. 식 (3)에서 나타내듯이 radiance의 비율이 노출 시간의 비율과 같음을 알 수 있다.

$$R_{q,q+1} = \frac{f(z_{p,q})}{f(z_{p,q+1})} = \frac{\sum_{n=0}^N c_n z_{p,q}^n}{\sum_{n=0}^N c_n z_{p,q+1}^n} \quad (4)$$

노출 시간은 알 수 있기 때문에 $R_{q,q+1}$ 은 알고 있는 값이고, 식 (4)를 풀고 c_n 의 값을 알아냄으로써 식 (2)의 카메라 특성 곡선을 추정할 수 있다. 일반적인 카메라 특성 곡선은 그림 1과 같다.

기존의 HDR 영상 획득 방법은 일반 디지털 카메라로 노출을 다르게 사진을 여러 장 찍고 한 장의 영상으로 합성하였다. HDR 영상은 일반 영상 포맷의 24비트와 달리 32비트 이상으로 디지털 값이 아닌 실수 값을 저장함으로써 넓은 범위의 정보를 포함한다. 이 때 픽

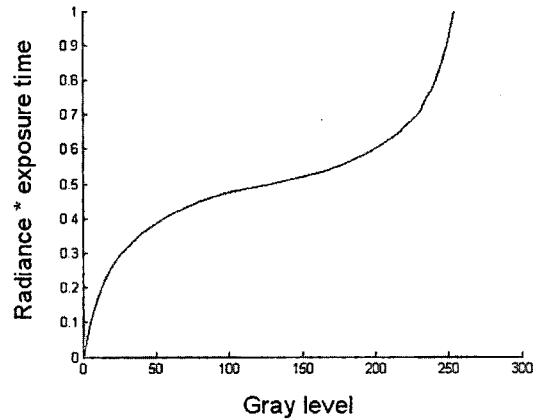


그림 1. 카메라 특성 곡선
Fig. 1. Camera response curve.

셀의 값을 실수로 표현하기 위해서 카메라 특성 곡선을 사용하는데, 노출 시간과 그레이레벨을 통해 radiance를 추정하는 것이다. 카메라 특성 곡선으로 각 픽셀의 radiance를 추정하고 식 (5)와 같이 노출이 다른 여러 영상을 한 장의 영상으로 합성한다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^I w(z_i) r_i}{\sum_{i=1}^I w(z_i)} \quad (5)$$

식 (5)에서 w 는 그레이레벨에 따른 가중치, i 는 픽셀을 나타낸다. 픽셀의 그레이레벨에 따라 가중치를 두어 한 픽셀에 대해 여러 영상의 값을 평균하여 하나의 영상을 만든다. 이 가중치를 구할 때에는 논문마다 조금씩 다른 방법을 사용했다. Debevec은 그레이레벨 128에서 최고이며 128을 중심으로 가중치가 선형적으로 작아지도록 했다. Robertson은 128을 중심으로 가우시안 모양으로 가중치가 작아지도록 하였고, Mitsunaga와 Nayar는 카메라 특성 곡선을 카메라 특성 곡선의 도함수로 나눈 것을 가중치 하였다. 이는 카메라 특성 곡선의 기울기가 완만할 때에는 그레이레벨에 대해 radiance 추정이 정밀하지만, 기울기가 급할 때에는 그레이레벨에 대해 radiance 추정 오차가 크다는 것을 이용한 것이다. 논문마다 가중치를 구하는 것에서 조금씩의 차이가 있긴 하지만 큰 형태는 비슷했다. 이렇게 그레이레벨에 가중치를 두어 여러 영상을 합성하여 radiance 정보를 가지는 한 장의 HDR 영상을 얻었다.

기존의 방법에서는 그림 2 (a)와 같이 노출이 다른 영상을 10장 이상 찍어서 HDR 영상을 얻었고, 이 때에 카메라의 다이내믹 레인지가 중복되는 영역이 많이 발

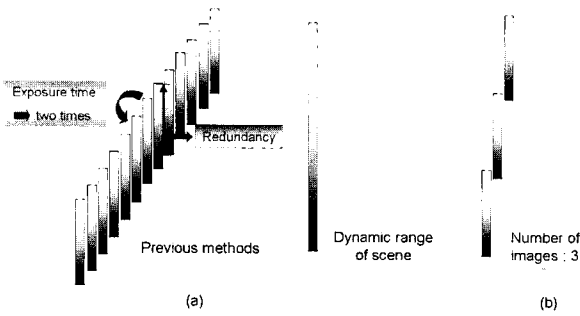


그림 2. 기존 방법에서의 중복된 부분의 존재
 (a) 기존의 방법 (b) 영상 3장을 사용
 Fig. 2. Existence of redundancy in previous methods.
 (a) Previous methods.
 (b) Usage of three images.

생하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 기존의 방법에서는 노출 시간을 두 배의 차이로 해서 사진을 13장 찍었는데 비해 동일한 장면에서 그림 2 (b)에서처럼 노출이 다른 사진 3장으로도 HDR 영상을 얻을 수 있다. 장면의 다이내믹 레인지를 추정하고 카메라의 다이내믹 레인지가 중복되는 영역을 줄임으로써 HDR 영상을 얻을 때 필요한 영상의 개수를 줄일 수 있다.

III. 제안한 HDR 영상 얻는 방법

1. 장면의 다이내믹 레인지 추정

장면의 다이내믹 레인지란 장면의 밝기 범위를 나타낸다. 노출이 다른 영상 두 장을 찍고, 이 영상의 정보를 이용해 장면의 다이내믹 레인지를 추정하였다. 사진을 찍을 때 노출을 길게 하면 영상은 밝아지고, 노출을 짧게 하면 영상은 어두워지는 등 영상의 그레이레벨이 바뀌게 된다. 어떤 한 장면에서 찍은 사진의 영상이 장면의 밝은 부분과 어두운 부분의 밝기를 모두 다 표현하지 못한다면, 그 영상의 최소 그레이레벨은 0, 최대 그레이레벨은 255가 되고, 이 때의 영상이 장면의 다이내믹 레인지 안에 있다고 정의하였다. 그리고 이 때 카메라의 노이즈를 고려하여 오차를 그레이레벨 5까지 허용하였다.

그림 3에서 노출 시간의 변화에 따라 장면의 다이내믹 레인지에 대해 카메라의 다이내믹 레인지가 어떻게 변하는지 나타내었다. 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 갈수록 노출 시간이 짧아지는 것을 나타내고, 각각 노출 시간과 그에 따른 영상의 히스토그램을 나타내었다. 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 안에 포함될 때에 영상에서 가장 어두운 곳의 그레이레벨은

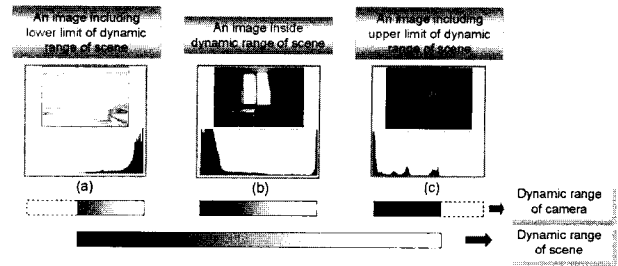


그림 3. 노출 시간의 변화에 따른 영상에서의 최대최소 그레이레벨 변화
 Fig. 3. Variation of maximum and minimum gray levels in images according to varied exposure times.

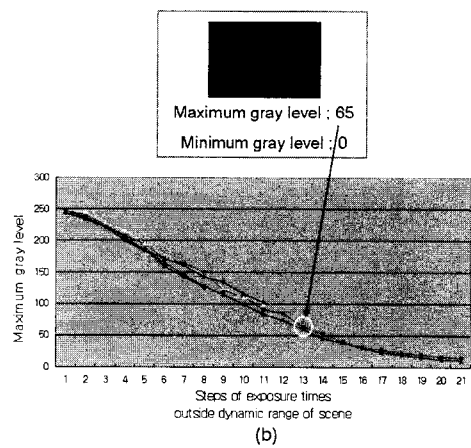
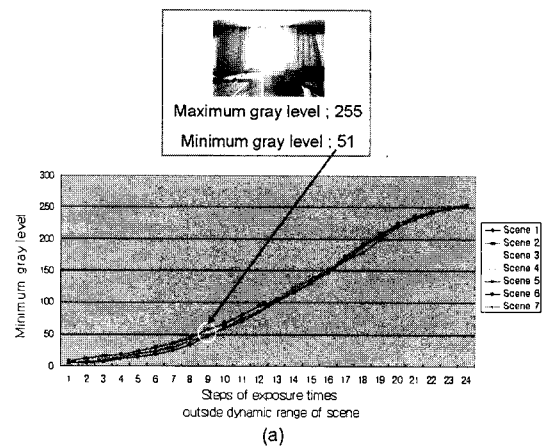


그림 4. 장면의 다이내믹 레인지의 하한점의 최소 그레이레벨과 상한점의 최대 그레이레벨
 (a) 하한점 (b) 상한점
 Fig. 4. Minimum gray level of the lower limit and maximum gray level of the upper limit on scenic dynamic range.
 (a) The lower limit. (b) The upper limit.

0이고, 가장 밝은 곳의 그레이레벨은 255이다. 한편 노출 시간이 길어지면 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지의 하한점을 벗어나게 되고 최소 그레이레벨이 0이 아닌 0보다 큰 값이 된다. 즉, 노출 시간이 길 때에는 카메라의 센서는 장면의 어두운 영역을

감지하고, 하지만 노출 시간이 긴 만큼 그레이레벨이 커져서 영상은 밝아지게 된다. 반대로 노출 시간이 짧아지면 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지의 상한점을 벗어나게 되고 최대 그레이레벨이 255가 아닌 255보다 작은 값이 된다. 즉, 노출 시간이 짧을 때에는 카메라의 센서는 장면의 밝은 영역을 감지하고, 그레이레벨이 작아져서 영상은 어두워지게 된다.

노출 시간이 변함에 따라 영상에서 최대 그레이레벨과 최소 그레이레벨의 증감이 장면에 상관없이 일정한 경향을 가지고 있고 그림 4에 그 경향을 나타내었다. 여러 장면에 대한 경향을 나타내기 위해서는 절대적인 노출 시간이 장면마다 다르기 때문에 가로축을 절대적인 노출 시간으로는 나타낼 수 없고, 그림 4 (a)와 같이 노출 시간이 증가함에 따라 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지를 벗어나는 단계로 나타낸다. 예를 들어 '1'은 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지를 첫 번째로 벗어났을 때를 나타낸다. 그리고 세로축은 영상에서의 최소 그레이레벨을 나타낸다. 그림에서 노출 시간 증가의 단계가 증가할 때, 영상의 최소 그레이레벨이 장면에 상관없이 일정한 경향을 가지고 증가함을 볼 수 있다. 그림 4 (b)처럼 장면의 다이내믹 레인지의 상한점도 마찬가지로이다. 노출 시

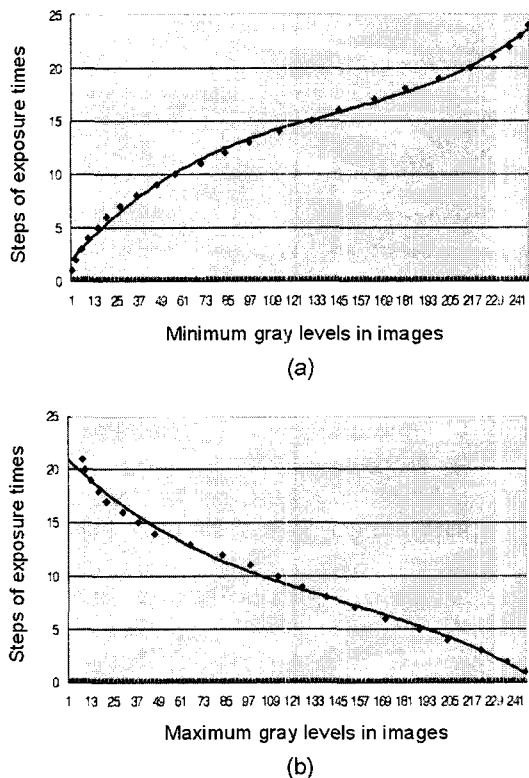


그림 5. 장면의 다이내믹 레인지 추정의 모델링
Fig. 5. Modeling estimation of scenic dynamic range.

표 1. 모델링에서의 계수
Table 1. Modeling coefficients.

계수 종류	계수	계수 종류	계수
l_1	0.000003	u_1	-0.000002
l_2	-0.0011	u_2	0.0008
l_3	0.1988	u_3	-0.16
l_4	1.8024	u_4	19.68

간 감소의 단계가 증가할 때, 영상의 최대 그레이레벨이 장면에 상관없이 일정한 경향을 가지고 감소함을 볼 수 있다. 이러한 경향을 3차 다항 회귀방정식을 이용하여 모델링하였다.

$$f_L(d) = l_1d^3 + l_2d^2 + l_3d + l_4 \quad (6)$$

$$f_U(d) = u_1d^3 + u_2d^2 + u_3d + u_4 \quad (7)$$

여기서, $f_L(d)$ 는 장면의 다이내믹 레인지의 하한점을 나타내고, $f_U(d)$ 는 장면의 다이내믹 레인지의 상한점을 나타낸다. d 는 그레이레벨을 나타내고, 모델링을 통한 계수는 표 1과 같다. 그림 5에 장면의 다이내믹 레인지 추정의 모델링 그래프를 나타내었다.

이렇게 근사화의 결과를 이용하면 장면의 다이내믹 레인지를 추정할 수 있다. 두 개의 노출 시간은 그림 6과 같이 전체 노출 시간의 중심에서 장면의 다이내믹 레인지의 상한점 근사화에서 마지막 값만큼의 단계로 노출 시간을 증가시켰을 때의 노출 시간, 그리고 반대로 전체 노출 시간의 중심에서 장면의 다이내믹 레인지의 하한점 근사화에서 마지막 값만큼의 단계로 노출 시간

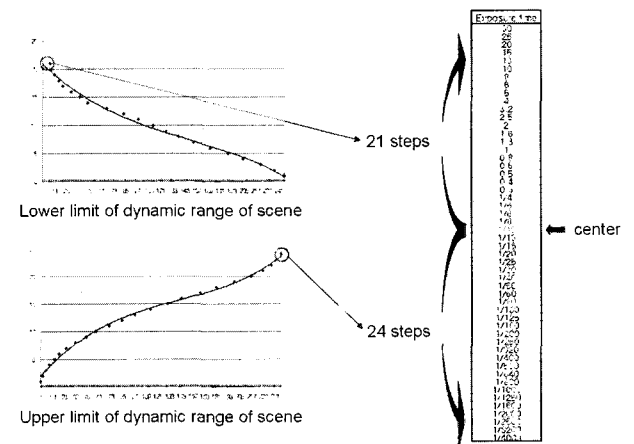


그림 6. 장면의 다이내믹 레인지를 추정하기 위한 2개의 노출 시간
Fig. 6. Two exposure times for estimation of scenic dynamic range.

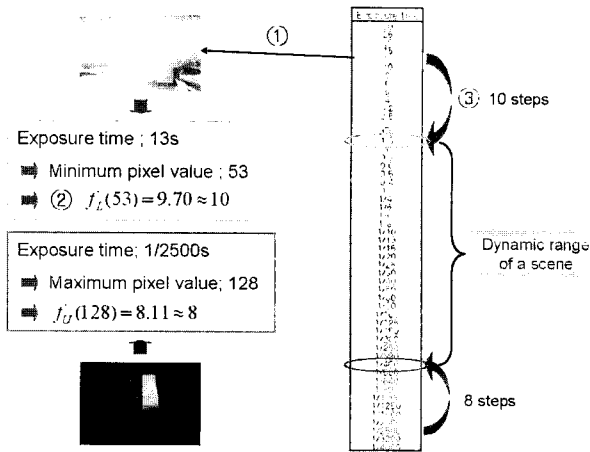


그림 7. 장면의 다이내믹 레인지를 추정하는 예
Fig. 7. An example of estimating scenic dynamic range.

을 감소시켰을 때의 노출 시간으로 정한다. 그림 7에서 장면의 다이내믹 레인지를 추정하는 예를 나타내었다.

2. 가상 카메라 영상을 사용한 HDR 영상의 평가

HDR 영상이 얼마나 정확하게 만들어졌는지는 측정을 통해 알 수 있다. 하지만 HDR 영상은 단일 패치가 아니기에 측정이 어렵다. 그래서 측정이 아닌 시뮬레이션을 통하여 HDR 영상을 평가하는 방법을 제안하였고, 그림 8에서 흐름도를 나타내었다.

먼저 기존의 방법으로 HDR 영상을 만들고, 이 영상을 원본 HDR 영상이라 한다. 그리고 원본 HDR 영상에서 카메라 특성 곡선의 역함수를 사용하여 각각의 노출 시간을 입력으로 주어 실제 찍은 영상과 같이 그레이 레벨을 디지털 값으로 가지는 가상의 카메라 영상을 만든다^[14]. 그림 9에서 실제 찍은 영상과 가상 영상을

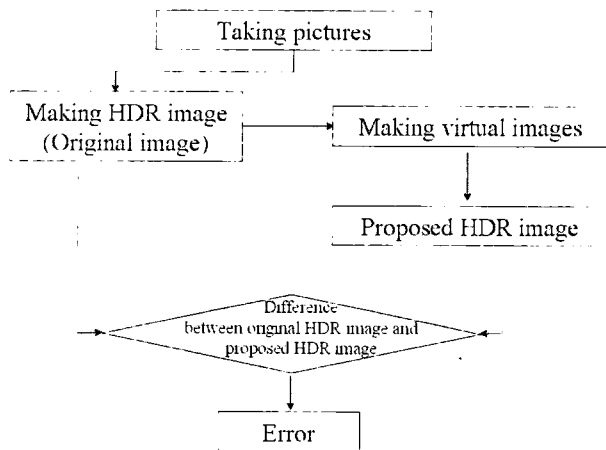


그림 8. HDR 영상의 평가를 위한 실험의 흐름도
Fig. 8. A flowchart of an experiment for evaluation of HDR image.

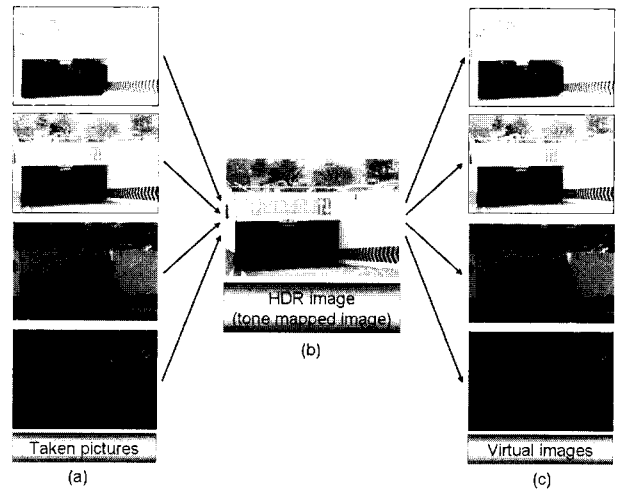


그림 9. 실제 찍은 영상과 가상 영상의 비교
Fig. 9. Comparison with real taken pictures and virtual camera images.
(a) Real taken pictures. (b) The HDR image.
(c) Virtual camera images.

비교하였는데, 그 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. Cerman는 위와 같이 가상 영상들을 이용해 기존의 카메라 특성 곡선을 구하는 논문들의 방법이 실제의 카메라 특성 곡선과 비교해 얼마나 정확한지 평가하였다. 본 논문에서는 카메라 특성 곡선의 정확도가 아닌, HDR 영상의 정확도를 평가하였다. 여러 가상 영상을 합성하여 HDR 영상을 만들고, 원본 HDR 영상과 비교하여 재생한 HDR 영상의 오차를 구하였다. 재생한 HDR 영상의 오차를 다음 식 (8)과 같이 구하였다.

$$error = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|O_r - R_r|}{O_r} + \frac{|O_g - R_g|}{O_g} + \frac{|O_b - R_b|}{O_b} \right) \times \frac{1}{3n} \tag{8}$$

식 (8)에서 O 는 원본 HDR 영상의 radiance, R 는 재생한 HDR 영상의 radiance를 나타낸다. r, g, b 는 각각 RGB 채널을 나타내고, n 은 총 픽셀의 개수, i 는 픽셀의 위치를 나타낸다. RGB 각각의 채널에 대해 원본 HDR 영상의 radiance와 재생한 HDR 영상의 radiance의 차를 원본 HDR 영상의 radiance로 나누고 이를 각각의 채널에 대해 더한 다음 평균하였다. 원본 HDR 영상의 radiance를 나누지 않으면, radiance가 큰 픽셀에서는 radiance 추정이 조금만 잘못 되어도 그 오차가 너무 크게 나고, radiance가 작은 픽셀에서는 radiance 추정이 크게 잘못 되더라도 그 오차가 크지 않는 등의 문제가 생긴다. 이에 대한 문제를 해결하기 위해 신호 대 잡음비의 개념을 사

용해 원본 HDR 영상의 radiance를 나누어주었다. 실제로 식 (8)은 신호에 해당하는 HDR 영상의 radiance는 분모에, 그리고 잡음에 해당하는 재생한 HDR 영상의 radiance와 원본 HDR 영상의 radiance 차이를 분자에 담으로써 신호 대 잡음비의 역의 개념이 된다. 그러므로 식 (8)의 오차가 크면 재생한 HDR 영상의 오차가 크고, 오차가 작으면 재생한 HDR 영상의 오차가 작은 것이다.

3. HDR 영상 획득을 위한 적절한 노출 시간 찾기

HDR 영상 획득을 위해서 영상 세 장을 사용하였다. 이는 그림 10에서 볼 수 있듯이 일반적으로 카메라에서 노출 시간을 다르게 해서 만들 수 있는 최대의 다이내믹 레인지를 카메라의 다이내믹 레인지 세 개로 포함할 수 있기 때문이다. 그림 10에서 노출 시간이 짧아질수록 카메라는 밝기가 밝은 부분의 정보를 얻게 됨을 나타낸다. 영상 세 장으로 HDR 영상을 만들 때 그 세 장의 최적의 노출 시간을 정하기 위해 먼저 임의의 노출 시간 세 개로 HDR 영상을 만들었는데, 이때엔 HDR 영상의 오차가 컸다. HDR 영상의 오차가 작을 때는 영상 한 장의 노출 시간은 카메라의 다이내

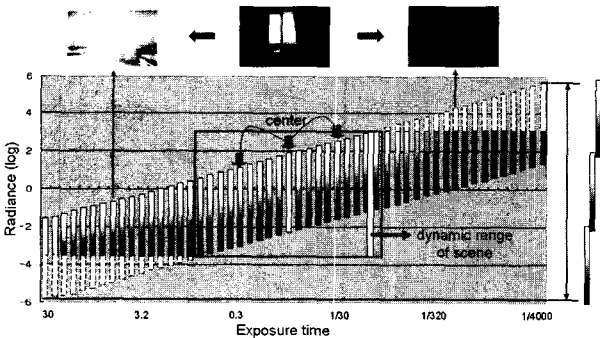


그림 10. 노출 시간에 따른 카메라의 다이내믹 레인지
Fig. 10. Dynamic range of the camera according to exposure times.

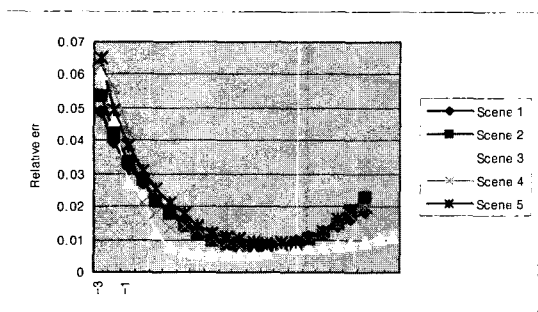


그림 11. HDR 영상의 오차
Fig. 11. The error of the HDR image.

믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 중간이 되도록, 그리고 다른 두 장의 노출 시간은 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 중간에서 대칭이 되도록 했을 때이다.

그림 11은 영상 한 장의 노출 시간은 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 중간, 그리고 다른 두 장의 영상은 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 중간에 대해 대칭이 되도록 해서 HDR 영상을 만들고, 그에 대한 HDR 영상의 오차를 나타낸 것이다. 여기서 가로축은 대칭이 되는 영상 두 장의 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지로부터 벗어 나는 정도를 나타낸다. 숫자 앞에 '-'가 있는 것은 영상 두 장의 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 안에 있는 것이고, '-'가 없는 것은 다이내믹 레인지 밖에 있다는 것을 나타내는데, 예를 들어 '-1'은 두 장의 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 끝으로부터 첫 번째로 안에 있는 것을 나타낸다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 두 장의 카메라 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 안에서 밖으로 갈수록 오차는 작아지다가 어느 정점을 기준으로 다시 높아지는 경향을 가진다. 이는 카메라 특성 곡선으로 인한 것이고, 그림 12에서 일반적인 카메라의 응답 곡선을 나타내었다. 그레이레벨이 중간 정도일 때에는 기울기가 완만하고, 그레이레벨이 0과 255로 양 끝에 가까울수록 기울기는 급하다. 기울기가 완만할 때에는 그레이레벨에 대해 radiance 추정이 정밀하지만, 기울기가 급할 때에는 그레이레벨에 대해 radiance 추정 오차가 크다.

그림 13에서 오차에 대한 경향의 분석을 나타내었다. 먼저 그림 13 (a)는 radiance 추정 민감도가 큰 그레이레

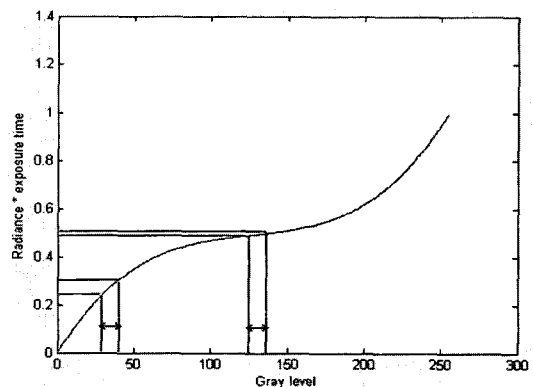


그림 12. 일반적인 카메라 특성 곡선과 radiance 추정 민감도
Fig. 12. General camera response curve and radiance estimation sensitivity.

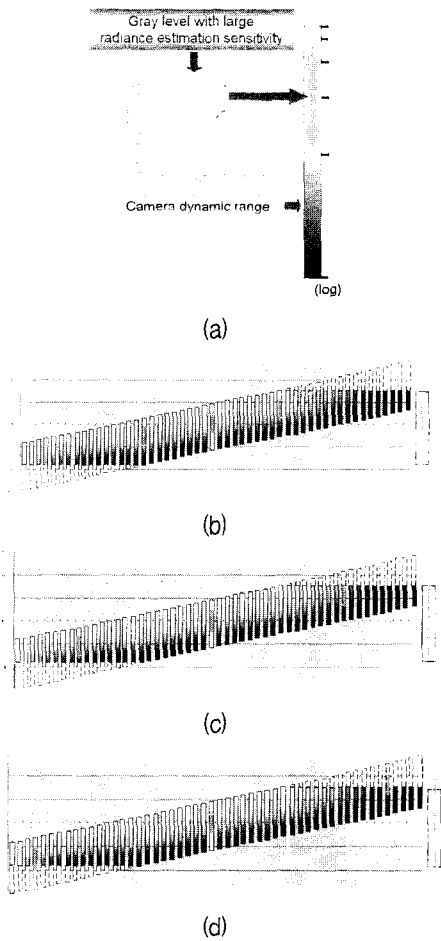


그림 13. 오차의 경향의 분석

- (a) radiance 추정 민감도가 큰 그레이레벨을 카메라의 다이내믹 레인지에 사상
- (b) 두 장의 영상의 노출 시간이 장면의 다이내믹 레인지 안에 있을 때
- (c), (d) 두 장의 영상의 노출 시간이 장면의 다이내믹 레인지 밖에 있을 때

Fig. 13. Analysis of the error tendency.

- (a) Mapping gray levels of large radiance estimation to a camera dynamic range.
- (b) Using two images inside dynamic range of scene.
- (c), (d) Using two images outside dynamic range of scene.

벨의 중간 부분을 카메라의 다이내믹 레인지에 사상한 것이다. 카메라의 다이내믹 레인지 안의 화살표 부분이 radiance 추정 민감도가 큰 부분이다. radiance를 로그 스케일로 변환했기 때문에 카메라의 다이내믹 레인지를 나타내는 막대와 화살표가 비선형적이다. 그림 13 (b)에서는 영상 세 장 중 한 장의 영상의 카메라 다이내믹 레인지를 장면의 다이내믹 레인지 중간에 그리고 다른 두 장의 영상은 장면의 다이내믹 레인지 안에 두고 HDR 영상을 만들 경우이고, 그림 오른쪽 부분에 radiance 추정 민

감도가 큰 화살표를 한 평면으로 투영시켰다. 이 때에 화살표 부분이 장면의 다이내믹 레인지 양끝 쪽 부분에는 존재하지 않기 때문에 HDR 영상의 오차가 크다. 그림 13 (c)는 영상 두 장의 카메라 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 8 단계 밖에 있는 경우인데, 이 때에는 화살표의 겹친 영역이 장면의 다이내믹 레인지 전체에 분포하기 때문에 HDR 영상의 오차가 작게 된다. 그림 13 (d)는 영상 두 장의 카메라 다이내믹 레인지를 장면의 다이내믹 레인지에서 밖에 두되 그림 13 (c)보다 더 많이 밖으로 놓는다. 이 때에는 화살표 부분이 장면의 다이내믹 레인지를 벗어나기 때문에 오차가 다시 증가한다. 이러한 이유로 세 장의 영상으로 HDR 영상을 만들 때, 영상 한 장의 카메라 다이내믹 레인지는 장면의 다이내믹 레인지 중간에 두고, 그리고 다른 두 장의 영상의 카메라 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지 안에서 밖으로 갈수록 HDR 영상 오차가 작아지다가 다시 커지게 되는 이유이다.

따라서 영상 세 장으로 HDR 영상을 만들 때에 영상 한 장의 카메라 다이내믹 레인지는 장면의 다이내믹 레인지 중간에 오도록 하고, 다른 두 장의 영상의 카메라 다이내믹 레인지는 장면의 다이내믹 레인지 밖으로 대칭적으로 약 8단계 정도 벗어나도록 했을 때 오차가 가장 작은 HDR 영상을 만들 수 있다.

IV. 실험 및 결과

실험에는 캐논 10D와 코니카미놀타 Dynax 5D 카메라

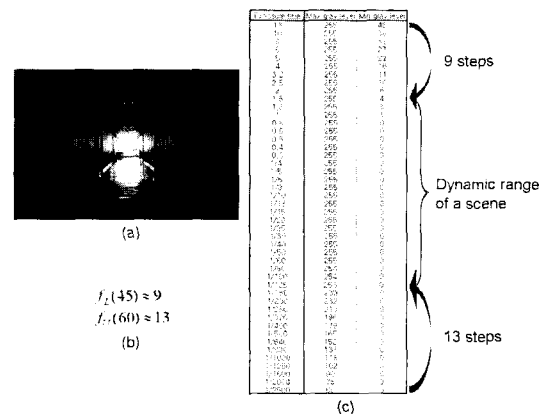


그림 14. 장면의 다이내믹 레인지 추정

- (a) 영상 (b) 추정한 장면의 다이내믹 레인지
- (c) 실제 장면의 다이내믹 레인지

Fig. 14. Estimation of scenic dynamic range.

- (a) A image. (b) Estimated scenic dynamic range. (c) Real scenic dynamic range.

표 2 오차 비교

Table 2. Comparison of the error.

	노출 시간 두 배의 기존의 방법 ^(7~9)	제안한 방법
영상 수	15	5 (2+3)
오차	0.009	0.026
PSNR	66.22 [dB]	63.56 [dB]

두 대를 사용했고, 실외와 실내, 그리고 낮과 밤 등 장면의 다이내믹 레인지가 넓은 장면과 그렇지 않은 장면 등 여러 장면에서 사진을 찍었다. 그림 14는 어두운 복도에서 창문을 바라보는 장면이다. 두 장의 영상으로 장면의 다이내믹 레인지를 추정할 때, 노출 시간이 긴 13초에서의 최소 그레이레벨 45를 식 (6)에 대입하면 9단계, 노출 시간이 짧은 1/2500초에서의 최대 그레이레벨 60을 식 (7)에 대입하면 13단계로 추정한다. 그림 14 (c)에서 실제 장면의 다이내믹 레인지를 나타내었는데 장면의 다이내믹 레인지를 정확하게 추정한다.

Debevec, Robertson, Nayar의 방법인 노출 시간을 두 배의 차이로 해서 여러 장 합성한 HDR 영상^(7~9) 중 오차가 가장 작은 HDR 영상과 제안한 방법의 HDR 영상의 오차를 비교하였다. 불빛이 있는 밤의 장면에서의 예를 들면, 노출 시간이 기존의 방법대로 두 배의 차이 일 때는 영상의 수가 15장, 제안한 방법은 영상의 수가 장면의 다이내믹 레인지를 추정할 때 2장, 그리고 HDR 영상을 만들 때 3장, 합해서 5장이다. 표 2에서 결과 오차를 비교하였는데 두 배의 노출 시간의 차이를 가진 영상으로 얻은 HDR 영상과 제안한 방법으로 얻은 HDR 영상이 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 영상의 radiance를 선형적으로 디지털 값으로 사상한 영상을 PSNR로도 구하였는데, 비교 영상 둘 다 일반적으로 원본 영상과 눈으로 차이를 확인할 수 없다고 하는 30[dB] 이상이며, 그리고 두 영상의 PSNR이 큰 차이가 없다. 또한 그림 15에서와 같이 영상으로도 두 가지의 방법이 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다.

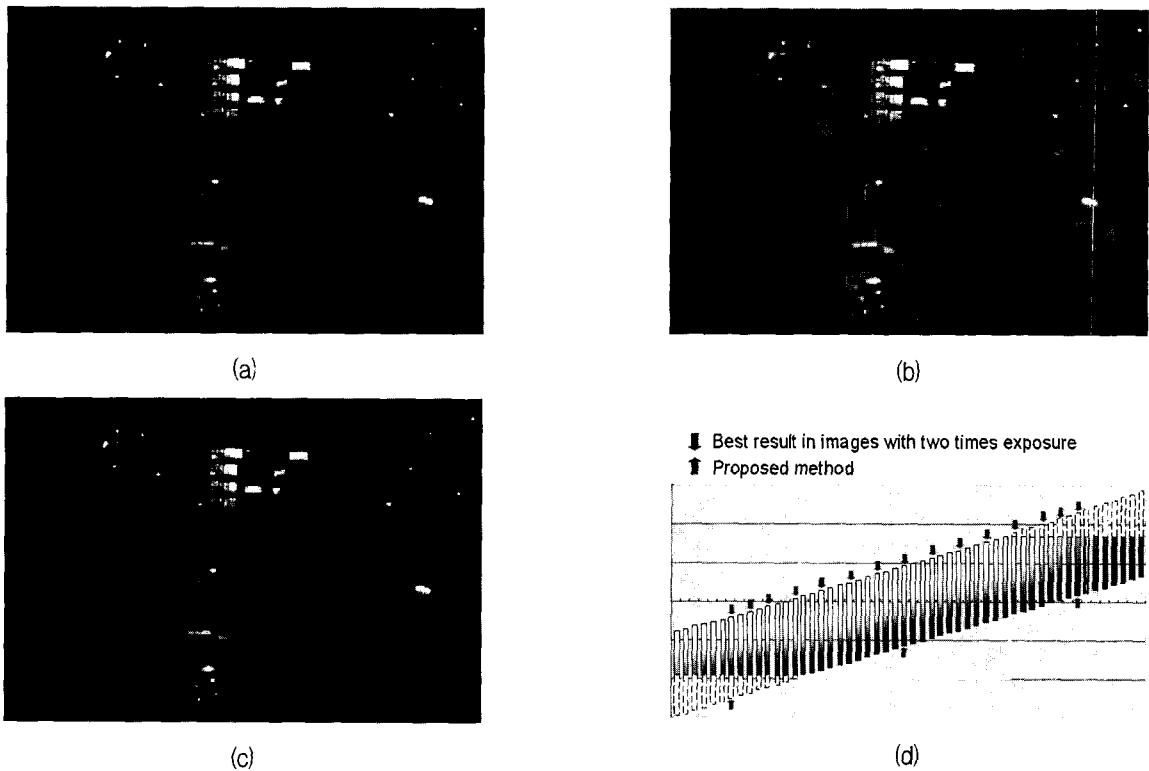


그림 15. 결과 HDR 영상

(a) 원본 HDR 영상 (b) 노출 시간 2배 차의 영상으로 만든 HDR 영상 중 가장 오차가 적은 영상
(c) 제안한 방법의 HDR 영상 (d) (b)와 (c) 방법에서 사용된 영상의 카메라 다이내믹 레인지

Fig. 15. The resultant HDR image.

(a) The original HDR image. (b) Best result in HDR images with double every exposure times.
(c) The proposed method. (d) Dynamic range of a camera corresponding to used images in (b) and (c) method.

V. 결 론

본 논문에서는 일반 디지털 카메라로 HDR 영상을 얻을 때 기존의 방법에 비해 효율적인 방법을 제안하였다. 기존의 방법에서는 장면의 다이내믹 레인지를 모르기 때문에 많은 수의 영상을 필요로 한다. 본 논문에서는 노출이 다른 두 장의 영상 정보를 사용하여 장면의 다이내믹 레인지를 추정하였다. 노출 시간의 변화에 따라 카메라의 다이내믹 레인지가 변하고, 카메라의 다이내믹 레인지가 장면의 다이내믹 레인지를 벗어날 때 영상의 그레이레벨의 최대값과 최소값이 일정한 경향을 가지고 변화하는데, 이런 경향을 모델링함으로써 장면의 다이내믹 레인지를 추정하였다. 그리고 추정한 장면의 다이내믹 레인지를 이용하여 카메라의 다이내믹 레인지가 중복되는 부분을 줄임으로써 필요한 영상의 개수를 줄였다. 카메라에서 노출 시간을 바꿈으로써 만들 수 있는 최대의 다이내믹 레인지를 카메라의 다이내믹 레인지 세 개로 포함할 수 있기 때문에 본 논문에서는 영상 세 장으로 HDR 영상을 획득하였다. 가상 카메라 영상을 만들어 HDR 영상을 평가하였는데, 기존의 방법으로 얻은 HDR 영상과 제안한 방법으로 얻은 HDR 영상의 오차의 차가 크지 않으며 제안한 방법이 효율적임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. Y. Lee, C. H. Son, J. M. Kim, C. H. Lee and Y. H. Ha, "Illumination-Level Adaptive Color Reproduction Method with Lightness Adaptation and Flare Compensation for Mobile Display," *Journal of Imaging Science and Technology*. Vol. 51, No. 1, pp. 44 - 52, Jan.-Feb., 2007.
- [2] B. Wandell, P. Catrysse, J. DiCarlo, D. Yang and A. E. Gamal, "Multiple Capture Single Image with a CMOS Sensor," *Chiba Conference on Multispectral Imaging*, pp. 11-17, 1999.
- [3] A. O. Akyüz and E. Reinhard, "Color appearance in high-dynamic-range imaging," *Journal of Electronic Imaging* Vol. 15, Issue 3, Jul. - Sep. 2006.
- [4] E. A. Khan, A. O. Akyuz and E. Reinhard, "Ghost Removal in High Dynamic Range Images," *IEEE International Conference on Image Processing*, Atlanta, USA, Oct. 2006.
- [5] K. Devlin, "A review of tone reproduction techniques," *Tech. Rep. CSTR-02-005*, Department of Computer Science, University of Bristol, Nov. 2002.
- [6] S. Mann and R. Picard, "Being 'Undigital' with Digital Cameras: Extending Dynamic Range by Combining Differently Exposed Pictures," *Proc. of IST's 48th Annual Conference*, pp. 422 - 428, May. 1995.
- [7] P. E. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp. 369 - 378, 1997.
- [8] M. A. Robertson, S. Borman and R. L. Stevenson, "Estimation-theoretic approach to dynamic range enhancement using multiple exposures," *Journal of Electronic Imaging* Vol. 12, Issue 2, pp. 219 - 228, Apr. 2003.
- [9] T. Mitsunaga and S. K. Nayar, "Radiometric Self Calibration," *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 374 - 380, Jun. 1999.
- [10] E. Reinhard, G. Ward, P. Debevec, and S. Pattanaik, "High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image Based Lighting," *Morgan Kaufmann*, San Francisco, CA, 2005.
- [11] S. Battiato, A. Castorina and M. Mancuso, "High dynamic range imaging for digital still camera: an overview," *Journal of Electronic Imaging* Vol. 12, Issue 3, pp. 459 - 469, Jul. 2003.
- [12] H. Haneishi, S. Miyahara and A. Yoshida, "Image Acquisition Technique for High Dynamic Range Scenes Using a Multiband Camera," *Color research and application* Vol. 31, Issue 4, pp. 294-302, Aug. 2006.
- [13] M. D. Grossberg and S. K. Nayar, "High Dynamic Range from Multiple Images: Which Exposures to Combine?," *ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision*, Oct. 2003.
- [14] L. Cerman and V. Hlaváč, "Exposure time estimation for high dynamic range imaging with hand held camera," *Computer Vision Winter Workshop*, Feb. 2006.

 저 자 소 개



박 대 근(학생회원)
 2005년 8월 경북대학교
 전자전기공학부 졸업.
 2007년 8월 경북대학교
 전자전기컴퓨터학부
 석사 졸업.
 2007년 8월~현재 삼성테크윈.

<주관심분야 : 칼라 영상 처리, 카메라 화질 향상>

박 기 현(학생회원)
 대한전자공학회 논문지
 제43권 SP편 제6호 참고

하 영 호(정회원)
 대한전자공학회 논문지
 제38권 SP편 제3호 참조