

## Truncated Nuclear Norm 최소화를 이용한 HDR 영상 합성

이철

부경대학교

chullee@pknu.ac.kr

## HDR Image Synthesis Using Truncated Nuclear Norm Minimization

Chul Lee

Pukyong National University

## 요약

본 논문은 low-rank 행렬의 truncated nuclear norm 최소화를 이용한 HDR (high dynamic range) 영상 합성 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서는 기존의 LDR (low dynamic range) 영상에서 얻은 밝기의 선형 관계에 기반하여 HDR 합성을 low-rank 행렬 완성 문제로 변환한 후, ALM (augmented Lagrange multiplier) 기법을 이용하여 효율적으로 최적의 해를 구한다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안하는 기법이 기존 기법에 비해서 낮은 계산 복잡도를 보이면서도 더 높은 품질의 HDR 영상을 합성하는 것을 확인한다.

## 1. 서론

최근 디지털 영상 기술의 발전으로 스마트폰을 포함한 다양한 장치를 이용하여 고해상도의 영상을 취득할 수 있는데 반해, 일반적인 디지털 카메라는 실제 장면보다 훨씬 낮은 동적 영역을 갖는 영상만을 취득할 수 있다 [1]. 따라서 취득된 영상은 제한된 동적 영역으로 인하여 장면의 모든 정보를 포함할 수 없는 한계가 있다. 이러한 단점을 극복하고 장면의 모든 동적 영역의 정보를 취득하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 이와 같은 높은 동적 영역을 갖는 영상을 HDR (high dynamic range) 영상이라고 한다. HDR 영상을 취득하는 가장 기초적인 방법은 서로 다른 노출 시간으로 촬영된 LDR (low dynamic range) 영상을 합성하는 것이다 [1]. 하지만 촬영을 하는 동안 일반적으로 객체 또는 카메라의 움직임이 있기 때문에 이러한 간단한 방법으로 HDR 영상을 합성할 경우 ghosting artifact가 발생한다. 따라서 ghosting artifact가 없는 고품질의 HDR 영상을 취득하는 기법은 매우 중요한 연구 주제이며, 그동안 많은 연구가 진행되었다 [2-4].

움직임이 있는 장면에서 고품질의 HDR 영상을 취득하기 위해서 먼저 입력 LDR 영상을 정합한 후, 결과 영상을 이용하여 HDR 영상을 합성할 수 있다. 예를 들어, Hu 등은 PatchMatch 기법을 이용하여 영상 사이의 움직임을 추정하여 높은 품질의 HDR 영상을 합성할 수 있는 기법을 제안하였다 [2]. 하지만 이러한 기법은 높은 계산 복잡도를 보이는 단점이 있다. 움직이는 객체에 의해서 발생하는 ghosting artifact를 제거하기 위해서 입력 영상 내에서 움직이는 객체에 해당하는 부분이 결과 HDR 영상에의 영향을 줄여 고품질의 HDR 영상을 합성할 수 있다. 예를 들어, 최근 Lee 등은 입력 영상에서 배경 부분은

정적이고 움직이는 물체는 희소하다는 가정 하에, low-rank 행렬 완성 문제를 적용한 HDR 합성 기법을 제안하였다 [3]. 하지만 Lee 등의 기법은 행렬의 rank를 정확하게 근사화하지 못하는 단점이 있다. Oh 등은 행렬 rank를 더 정확하게 근사화할 수 있는 기법을 제안하였으나 [4], 높은 계산 복잡도를 갖는다는 단점이 있다.

본 논문에서는 행렬의 truncated nuclear norm 최소화를 이용하여 기존 기법에 비해서 더 정확한 행렬 rank를 근사화할 수 있도록 문제를 공식화한 후, ALM (augmented Lagrange multiplier) 기법을 이용하여 효율적으로 최적의 해를 구하는 기법을 제안한다. 컴퓨터 모의 실험을 통하여 제안하는 기법이 기존 기법[2-4]에 비해서 고품질의 HDR 영상을 합성하면서도 훨씬 낮은 계산 복잡도를 보임을 확인한다.

## 2. 제안하는 기법

제안하는 기법에서 입력은 서로 다른 노출 시간을 이용하여 촬영된 영상의 행렬  $\mathbf{D} = \{\text{vec}(I_1), \text{vec}(I_2), \dots, \text{vec}(I_n)\}$ 이며,  $\text{vec}(I_i)$ 는 카메라 반응 함수를 이용하여 구한 입력 밝기 벡터이다. 장면의 밝기  $\mathbf{D}$ 는 배경  $\mathbf{X}$ 와 전경  $\mathbf{E}$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 배경은 정적이므로 행렬  $\mathbf{X}$ 는 low-rank이며,  $\mathbf{E}$ 는 희소 행렬이다. 또한, 불완전한 노출로 인하여 각 입력 영상은 장면의 일부분만을 취득한다. 따라서 HDR 영상 취득을 아래와 같은 rank 최소화 문제로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{X}, \mathbf{E}}{\text{minimize}} \quad \text{rank}(\mathbf{X}) + \lambda \|\mathbf{E}\|_0 \\ & \text{subject to} \quad \mathcal{P}_\Omega(\mathbf{X} + \mathbf{E}) = \mathcal{P}_\Omega(\mathbf{D}). \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $\mathcal{P}_\Omega$ 는 측정 영역  $\Omega$ 에서의 샘플링 연산자를 나타내며,  $\lambda$ 는

$\mathbf{X}$ 의 rank와  $\mathbf{E}$ 의 희소성 사이의 상대적 중요성을 조절한다.

위의 수식 (1)의 최적화 문제는 일반적으로 직접 풀기가 매우 어렵기 때문에 기존의 컨벡스 최적화 연구에서는 여러 가지 근사 기법을 이용한다. 본 연구에서는 (1)의 rank 함수를 잘 근사할 수 있도록 truncated nuclear norm으로 근사하며,  $l_0$ -norm은  $l_1$ -norm으로 근사한다. 즉, 수식 (1)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{X}, \mathbf{E}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{X}\|_r + \lambda \|\mathbf{E}\|_1 \\ & \text{subject to} \quad \mathcal{P}_\Omega(\mathbf{X} + \mathbf{E}) = \mathcal{P}_\Omega(\mathbf{D}), \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서  $\|\mathbf{X}\|_r = \sum_{k=r+1}^{\min(m,n)} \sigma_k(\mathbf{X})$ 는 행렬  $\mathbf{X}$ 의 truncated nuclear norm을 나타내며,  $\sigma_k(\mathbf{X})$ 는  $\mathbf{X}$ 의  $k$ 번째 특이값(singular value)이다. 본 연구에서는 장면이 정적이라는 가정 하에  $k=1$ 로 고정한다.

본 연구에서는 ALM 기법을 이용하여 수식 (2)의 최적화 문제의 최적의 해를 구한다. 이를 위해서 수식 (2)를 다음과 같이 수정한다.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{X}, \mathbf{E}, \mathbf{S}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{X}\|_r + \lambda \|\mathbf{E}\|_1 \\ & \text{subject to} \quad \mathbf{X} + \mathbf{E} + \mathbf{S} = \mathcal{P}_\Omega(\mathbf{D}), \\ & \quad \quad \quad \|\mathcal{P}_\Omega(\mathbf{S})\|_F = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $\mathbf{S}$ 는 여유 변수를 나타내는 행렬이다. 본 연구에서는 (3)의 최적화 문제의 해를 표준 ALM 기법을 이용해서 구한다 [5].

마지막으로, 아래와 같이 행렬  $\mathbf{X}$ 의 배경 밝기맵의 평균을 취해서 HDR 영상을 합성한다.

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (3)$$

여기에서  $R_i$ 는  $i$  위치에서의 추정된 밝기값을 나타낸다.

### 3. 실험 결과

본 논문에서는 제안하는 HDR 영상 합성 기법의 성능을 실제 영상을 이용하여 평가하였다. 수식 (1)의  $\lambda$ 는  $1/\sqrt{\max(m,n)}$ 로 고정하였으며,  $\Omega$ 는 화소값이 [2, 253] 사이의 값을 갖는 화소의 위치로 정의하였다.

제안하는 기법의 성능은 Hu [2], Lee [3], Oh [4] 등에 의해서 제안된 기법의 결과와 비교하였다. 그림 1은 “SculptureGarden” 영상에 대한 결과의 디테일을 비교한다. 그림 1.(a) 및 (b)의 Hu의 기법 및 Lee의 기법의 결과는 입력 영상의 움직이는 객체를 포함하지만, 그림 1.(c) 및 (d)의 Oh의 기법 및 제안하는 기법은 정상적으로 노출이 된 영역만 자동으로 선택하여 결과 영상을 합성하므로 배경 영상만을 표현한다. 그림 1.(a)의 Hu의 기법은 부족한 노출로 인해 움직임 추정에 실패하는 사람의 경계 부분에서 블러링 현상이 발생한다. 그림 1.(b)의 Lee의 기법은 블러링 현상이 없는 영상을 합성하지만 노출이 부족한 영역에서 색상 에러를 발생시킨다. 그림 1.(c) 및 (d)의 Oh의 기법 및 제안하는 기법은 모두 고품질의 영상을 합성하지만, 제안하는 기법이 벽의 디테일을 더 잘 표현하는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 제안하는 기법이 기존의 기법에 비해서 현저하게 적은 계산 복잡도를 갖는다. 구체적으로, Hu의 기법 [2], Lee의 기법 [3],

Oh의 기법 [4] 및 제안하는 기법은 2.6 GHz CPU의 PC에서 그림 1의 결과를 합성하는데 각각 392초, 91초, 149초, 및 52초에 실행되었다.

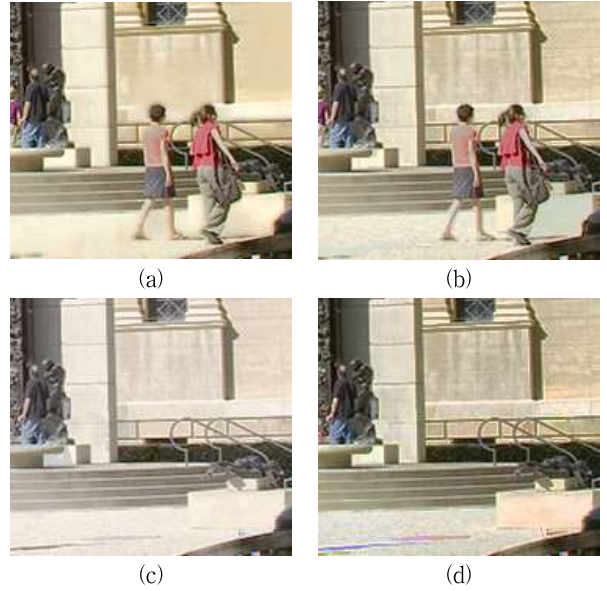


그림 1. HDR 영상 합성 결과 비교.

(a) Hu [2], (b) Lee [3], (c) Oh [4], (d) 제안하는 기법.

### 4. 결론

본 논문에서는 low-rank 행렬의 truncated nuclear norm 최소화 기법을 이용한 HDR 영상 합성 기법을 제안하였다. 제안하는 방법에서는 배경이 정적이라는 가정 하에, 배경과 움직이는 객체를 각각 low-rank 행렬과 희소 행렬로 표현하였다. 그런 다음 배경 추정을 low-rank 행렬 완성 문제로 표현하고 ALM 기법을 이용하여 효율적으로 최적해를 얻었다. 실험을 통하여 제안하는 기법이 기존의 HDR 합성 기법에 비해서 훨씬 작은 계산 복잡도를 가지면서도 더 높은 품질의 결과 영상을 제공하는 것을 확인하였다.

### 5. 참고문헌

- [1] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, P. Debevec, W. Heidrich, and K. Myszkowski, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann Publishers, 2nd edition, 2010.
- [2] J. Hu, O. Gallo, K. Pulli, and X. Sun, “HDR deghosting: How to deal with saturation?,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, June 2013, pp. 1163–1170.
- [3] C. Lee, Y. Li, and V. Monga, “Ghost-free high dynamic range imaging via rank minimization,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 21, no. 9, pp. 1045–1049, Sept. 2014.
- [4] T.-H. Oh, J.-Y. Lee, Y.-W. Tai, and I. S. Kweon, “Robust high dynamic range imaging by rank minimization,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 37, no. 6, pp. 1219–1232, June 2015.
- [5] C. Lee and E. Y. Lam, “Computationally efficient truncated nuclear norm minimization for high dynamic range imaging,” submitted to *IEEE Trans. Image Process.*, Aug. 2015.