

単一画像に基づく擬似的多重露出画像合成法

木下 裕磨[†] 吉田 太一^{††} 塩田さやか[†] 貴家 仁志[†]

[†] 首都大学東京大学院システムデザイン研究科 〒 191-0065 東京都日野市旭ヶ丘 6-6

^{††} 長岡技術科学大学電子電気情報工学専攻 〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

E-mail: †kinoshita-yuma@ed.tmu.ac.jp, ††yoshida@vos.nagaokaut.ac.jp, †††{sayaka,kiya}@tmu.ac.jp

あらまし 本研究では、単一画像に基づく擬似的な多重露出画像合成法を提案する。多重露出画像合成法は、同一シーンを複数の露出条件で撮影した多重露出画像を用いて、広い輝度のダイナミックレンジを高品質に表現する画像を生成する手法である。しかしながら、動的なシーンや動画画像を撮影する場合には条件の良い多重露出画像の獲得が困難である。さらに、既に存在する単一画像に対して、多重露出画像法は適用できない。提案法では、個々のカメラが線形なカメラ応答関数 (Camera Response Function, CRF) を持つという仮定の下で得られる露出と画素値の関係を利用することで、多重露出画像を単一画像から擬似的に生成する。さらに、局所コントラスト強調法の適用が、より高品質な多重露出画像を生成できることを示す。生成された擬似的な多重露出画像は、従来の多重露出画像合成法が直接適用可能である。生成される画像の品質の観点から従来法との比較実験を行い、提案法の有効性が示される。

キーワード 多重露出画像合成, 画像強調, コントラスト強調, トーンマッピング

Pseudo Multi-Exposure Image Fusion Based on a Single Image

Yuma KINOSHITA[†], Taichi YOSHIDA^{††}, Sayaka SHIOTA[†], and Hitoshi KIYA[†]

[†] Department of Information and Communication Systems,
Tokyo Metropolitan University, 191-0065, Tokyo, Japan

^{††} Department of Electrical, Electronics and Information Engineering,
Nagaoka University of Technology, 940-2188, Niigata, Japan

E-mail: †kinoshita-yuma@ed.tmu.ac.jp, ††yoshida@vos.nagaokaut.ac.jp, †††{sayaka,kiya}@tmu.ac.jp

Abstract This paper proposes a novel pseudo multi-exposure image fusion based on a single image. Multi-exposure image fusion is a method to produce images without saturation regions, by using photos with different exposures. However, it is difficult to take photos suited for the multi-exposure image fusion when we take a photo of dynamic scenes or photograph a video. In addition, the multi-exposure image fusion cannot be applied to existing single images or videos. The proposed method enables us to produce pseudo multi-exposure images from a single image. To produce multi-exposure images, the proposed method utilizes a relationship between exposure values and pixel values. The relationship is obtained by assuming that a digital camera has a linear response function. Moreover, it is shown that the use of a local contrast enhancement method allows us to produce pseudo multi-exposure images with higher quality. Most of conventional multi-exposure image fusion methods are also applicable to the pseudo multi-exposure images. Experimental results show the effectiveness of the proposed method by comparing the proposed one with conventional ones.

Key words Multi-Exposure Image Fusion, Image Enhancement, Contrast Enhancement, Tone Mapping

1. はじめに

撮像センサにおける輝度のダイナミックレンジは、現実シーンにおけるダイナミックレンジよりもはるかに狭い。そのため、現在のデジタルカメラによる撮影では、人間が知覚して

いる輝度のダイナミックレンジを忠実に表現するには至っていない。このような背景から、一般の画像の持つこの課題を解決するため、多重露出画像合成に関する研究が盛んに行われている [1-4]。

多重露出画像合成は、同一シーンを異なる露出条件で撮影した複数枚の画像（多重露出画像）を合成することで、広い輝度のレンジを高品質に表現した画像を生成する手法であり、現実シーンの広い輝度のレンジを記録可能な高ダイナミックレンジ（High Dynamic Range, HDR）画像の生成を目的として多くの研究が実施されている [1, 4]。HDR 画像に対応したディスプレイは開発が進行中であるが、非常に高価な上、性能面に課題があり普及には至っていない。一方、現在普及しているディスプレイでは、HDR 画像が持つ広いダイナミックレンジを直接表現することができない。これらの理由から、Mertens らは、一般のディスプレイで表示可能かつ高品質な画像の生成を目的とする多重露出画像合成法を提案している [2]。しかしながら、これらの多重露出画像合成法は多重露出画像を必要とすることから、その適用には多くの課題がある。

まず、動的なシーンなど位置ずれのない多重露出画像の撮影が困難な場合、多重露出画像合成法の利用は難しい [5, 6]。多重露出画像には、対応する各画素に位置のズレがないことが求められる。したがって、被写体やカメラが移動する状況で条件の良い多重露出画像を撮影することは困難である。位置ずれのある多重露出画像を用いた手法も試みられているが [4]、条件の良い多重露出画像の獲得が困難な動画の HDR 化などには適用できず、その有効性は限定的である。また、既に存在する単一の画像に対して、多重露出画像合成法は適用できない。

このような背景から、本研究では単一画像に基づく擬似的な多重露出画像合成法を提案する。提案法は、個々のカメラが線形なカメラ応答関数（Camera Response Function, CRF）を持つという仮定の下で得られる露出と画素値の関係を利用することで、多重露出画像を単一画像から擬似的に生成する。さらに、局所コントラスト強調法の適用が、より高品質な擬似的多重露出画像の生成を可能とする。また、トーンマッピング処理を利用することによって、擬似的多重露出画像の生成において画素値が上限値を上回ることによって発生する、画素情報の欠落を防ぐことができる。生成された擬似的な多重露出画像は、従来の多重露出画像合成法が直接適用可能である。加えて、単一画像からの擬似的な多重露出画像の生成は、多重露出画像からさらに多くの多重露出画像を擬似的に生成可能とする。これにより、既存の多重露出画像合成法において必要となる多重露出画像の撮影枚数を削減できることが期待される。

提案法の有効性を確認するため、いくつかの実験を実施した。実験により、複数枚の画像を用いる従来の多重露出画像合成法と比較して、提案法が同等の品質を持つ画像を生成できることが確認される。また、単一画像からコントラスト強調を行う代表的な手法と比較して、提案法は色歪みの観点から優れていることが示される。

2. 準備

多重露出画像合成法に用いられる多重露出画像は、複数の露出条件で同一シーンを撮影することで取得できる。以降では、一般的なデジタルカメラを使用した画像撮影について要約する。また簡単のために、本章ではグレースケールの画像のみを

扱う。

2.1 デジタル画像の撮影

図 1 に、デジタルカメラを用いた画像撮影のモデルを示す [7]。このモデルは、以下に示す 3 つのステップからなる。

- (a) シーンから放射される光がレンズの開口部を通り、センサに照射される。このとき照射される光の、単位時間・単位面積あたりのエネルギーを放射照度という。
- (b) シャッターの開閉により、ある時間 Δt の間のみ、センサに対して光が照射される。シャッターが開いている間センサに累積される、単位面積当たりの光のエネルギーを露出と呼ぶ。静的なシーンであれば、放射照度 E と露出 X の間には以下の関係が成り立つ。

$$X(p) = E(p)\Delta t \quad (1)$$

ここで、 Δt はシャッタースピードを表し、 $p = (x, y)$ は点 (x, y) における画素を表す。

- (c) 撮影される画像 I は、センサの飽和特性と個々のカメラの特性を表した関数である CRF により、露出をマッピングしたものと与えられる。センサの飽和特性と CRF の合成関数を f とすると、画素値 $I(p) \in [0, 1]$ は次式により与えられる。

$$I(p) = f(X(p)) \quad (2)$$

2.2 露出と撮影される画像の相互関係

露出の大きさは、撮影される画像の全体的な明るさを決定する。露出の大きさは様々なカメラパラメータにより変化するが、多重露出画像の撮影ではシャッタースピードのみを変化させ露出を制御することが一般的である。本研究でも同様に、シャッタースピード以外のパラメータ (e.g. 絞り値, ISO 感度) は固定のものとして取り扱う。

露出の大きさを示すための数値として、露出値 (Exposure Value, EV) がある。個々のカメラにより決定されるシーンに対して適切な露出値を $R_0 = 0[\text{EV}]$ とし、そのときのシャッタースピードを Δt_0 とする。このとき、シャッタースピード Δt_k で撮影される画像の露出値 $R_k[\text{EV}]$ は以下のように与えられる。

$$R_k = \log_2 \Delta t_k - \log_2 \Delta t_0 \quad (3)$$

また、 $0[\text{EV}]$ で撮影される画像 I_0 と $R_k[\text{EV}]$ で撮影される画像 I_k は、式 (1) から式 (3) を用いて

$$I_0(p) = f(E(p)\Delta t_0) \quad (4)$$

$$I_k(p) = f(E(p)\Delta t_k) = f(2^{R_k} E(p)\Delta t_0) \quad (5)$$

と表すことができる。ここで、 f が線形だと仮定することによって

$$I_k(p) = 2^{R_k} I_0(p) \quad (6)$$

を得る。したがって、画像 I_0 を定数倍することにより、擬似的に露出を変更することが可能である。この結論が、次章に示す擬似的多重露出画像合成法を導く。

3. 擬似的多重露出画像合成法の提案

本研究では、単一画像から擬似的に生成された多重露出画像を合成する、擬似的多重露出画像合成法を提案する。提案法の

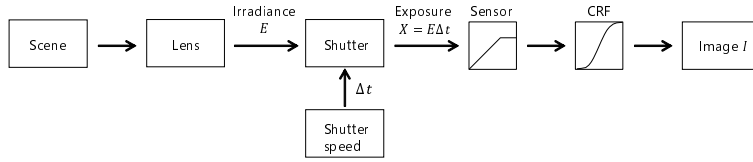


図 1 Imaging model of digital cameras

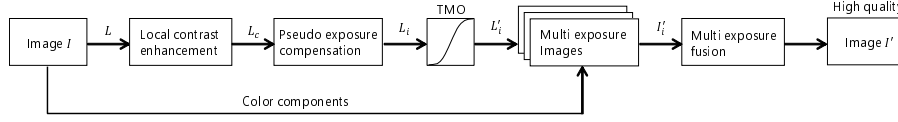


図 2 Proposed method

枠組みを図 2 に示す．提案法は，原画像 I から計算される輝度 L に対して，局所コントラスト強調，擬似的な露出の変更，およびトーンマッピングを行うことで擬似的な多重露出画像を生成する，その後，従来の多重露出画像合成法を適用することによって高品質な画像 I' の生成を可能とする．

3.1 局所コントラスト強調

提案法は単一画像を用いて擬似的に多重露出画像を生成するため，複数枚の画像を用いる従来法と比較して，十分なコントラスト強調効果を得ることができない．そこで，Dodging and burning アルゴリズムを用いた局所コントラストの強調処理を行う [8]．Dodging and burning アルゴリズムは以下の式により行われる．

$$L_c(p) = \frac{L^2(p)}{L_a(p)} \quad (7)$$

ここで $L_a(p)$ は， $L(p)$ に対してローパスフィルタを適用することで得られる， $L(p)$ における画素 p まわりの平均的な輝度値である．本研究では，ローパスフィルタとしてバイラテラルフィルタを用いる．

バイラテラルフィルタを用いた $L_a(p)$ の計算は，以下の式に従う．

$$L_a(p) = \frac{1}{c(p)} \sum_{q \in \Omega} L(q) g_{\sigma_1}(q-p) g_{\sigma_2}(L(q) - L(p)) \quad (8)$$

ここで， Ω は画素全体の集合を示し， $c(p)$ は次式で表される正規化係数である．

$$c(p) = \sum_{q \in \Omega} g_{\sigma_1}(q-p) g_{\sigma_2}(L(q) - L(p)) \quad (9)$$

また， g_{σ} はガウス関数であり，正規化係数 C_{σ} を用いて

$$g_{\sigma}(p|p = (x, y)) = C_{\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \quad (10)$$

と与えられる．パラメータ $\sigma_1 = 16, \sigma_2 = 3/255$ は，文献 [8] に従い設定した．

3.2 擬似的な露出補正

擬似的な露出補正は，まず基準の露出値 (0[EV]) を持つとする画像の輝度値 $L_0(p)$ を， $L_c(p)$ から推定する．次に，その $L_0(p)$ を用いて N 枚の擬似的な輝度 L_i を生成する．

露出値が 0[EV] となる輝度値 $L_0(p)$ の推定法は，原画像 I を撮影する際の露出値が既知かどうかによってそれぞれ異なる．

a 原画像撮影時の露出値が既知である場合

原画像 I をカメラにより撮影する場合，原画像 I を撮影する

際の露出値 R_k [EV] を，カメラから得ることができる．そのように R_k [EV] が既知である場合には， L_0 を次式により与える．

$$L_0(p) = 2^{-R_k} L_c(p) \quad (11)$$

b 原画像撮影時の露出値が未知である場合

既に存在する画像が持つ露出値 R_k [EV] は一般に未知である．このように， R_k [EV] が未知である画像 I に対して提案法を適用する場合，式 (6) の関係を利用した L_0 の推定ができない．そのため，以下の式により L_0 を与える．

$$L_0(p) = \frac{0.18}{\bar{L}_c} L_c(p) \quad (12)$$

ここで， \bar{L}_c は $L_c(p)$ の幾何平均であり，次式により与えられる．

$$\bar{L}_c = \exp\left(\frac{1}{|\Omega|} \sum_{p \in \Omega} \log L_c(p)\right) \quad (13)$$

式 (13) は， $L_c(p) = 0$ において特異点を持つ．したがって，画像 I が $L_c(p) = 0$ となる画素 p を持つ場合には，特異点を回避するため， $L_c(p) = 0$ を微小な値 ϵ で置き換え以下のように計算する．

$$\bar{L}_c = \exp\left(\frac{1}{|\Omega|} \left(\sum_{p \notin B} \log L_c(p) + \sum_{p \in B} \log \epsilon\right)\right) \quad (14)$$

ここで， B は $L_c(p) = 0$ となる画素 p の集合を表す．

次に式 (6) の関係を利用して，露出値が $R_i (1 \leq i \leq N, i \in \mathbb{N})$ [EV] となるように， N 枚の画像の輝度 L_i をそれぞれ計算する．

$$L_i(p) = 2^{R_i} L_0(p) \quad (15)$$

3.3 トーンマッピング

擬似的な露出補正処理により生成された輝度値 $L_i(p)$ は，一般的な画像形式で表現可能な上限値を超えてしまう場合がある．そのため，これらの輝度値 $L_i(p) > 1$ の切り捨てにより画素情報の欠落が発生する．そこで提案法では，人間の視覚特性を考慮したトーンマッピング処理を利用して輝度値が区間 $[0, 1]$ の範囲に収まるようにする．

擬似的な多重露出画像の輝度 L'_i は， L_i それぞれに対してトーンマッピングオペレータ F_i を適用することで得られる．

$$L'_i = F_i(L_i(p)) \quad (16)$$

本研究では，トーンマッピングオペレータ F_i として，Reinhard のグローバルオペレータを使用する [9]．Reinhard のグローバルオペレータは次式で与えられる．

$$F_i(L(p)) = \frac{L(p) \left(1 + \frac{L(p)}{L_{white_i}^2}\right)}{1 + L(p)} \quad (17)$$

ここでパラメータ $L_{white_i} > 1$ は、 $L'(p) = F_i(L(p)) = 1$ となる輝度値 $L(p)$ を決定する値である。Reinhard のグローバルオペレータ F_i は単調増加関数であるため、 $L_{white_i} = \max L_i(p)$ とすることで、任意の p について $L'_i(p) \leq 1$ が成り立つ。したがって、輝度値の切り捨てを防ぐことが可能となる。

擬似的多重露出画像 I'_i の RGB の各成分 $C'_i(p) \in \{R(p), G(p), B(p)\}$ は、上記の処理により得られた L'_i と、原画像 I の輝度 L および RGB の各成分 $C(p) \in \{R(p), G(p), B(p)\}$ を用いて次式により与えられる。

$$C'_i(p) = \frac{L'_i(p)}{L(p)} C(p) \quad (18)$$

3.4 擬似的多重露出画像の合成

上記の処理により得られた L'_i と、原画像 I の色成分を組み合わせることにより擬似的多重露出画像 I'_i を得る。 I'_i は、複数枚の画像を用いる既存の多重露出画像合成法

$$I = \mathcal{F}(I_1, I_2, \dots, I_N) \quad (19)$$

の入力画像として使用することが可能である。ここで $\mathcal{F}(I_1, I_2, \dots, I_N)$ は、 N 枚の画像 I_1, I_2, \dots, I_N を 1 枚の画像に合成する処理を示す関数である。既存の多重露出画像合成法 \mathcal{F} には、Mertens ら [2] や坂井ら [3] の手法が挙げられる。これらの手法による擬似的多重露出画像 I'_i の合成として、画像 I' が生成される。

3.5 実行手順

提案する擬似的多重露出画像合成法によって、原画像 I から高品質な画像 I' を生成するための手続きを以下に要約する。

- (1) 原画像 I の輝度値 L を計算する。
- (2) 式 (7) から式 (10) を用いて L_c を得る。
- (3) 式 (15) を用いて L_i を計算する。
 - a. 原画像 I の露出値が既知の場合
式 (11) に従い、 L_0 を計算する。
 - b. 原画像 I の露出値が未知の場合
式 (12) および式 (14) に従い、 L_0 を計算する。
- (4) L_i に対して、それぞれ式 (16) を適用し擬似的多重露出画像の輝度値 L'_i を得る。
- (5) 式 (18) に従い、擬似的多重露出画像 I'_i を生成する。
- (6) 既存の多重露出画像合成法 \mathcal{F} を用いて、多重露出画像 I'_i に対して式 (19) を適用し、高品質な画像 I' を得る。

4. 実験

提案法が生成する画像 I' の品質を、既存の多重露出画像合成法および単一画像に基づく従来の代表的なコントラスト強調法と比較するため、いくつかの実験を実施した。

4.1 提案法の評価

提案法の評価は、複数枚の画像を用いる既存の多重露出画像合成法と、単一画像に基づく従来のコントラスト強調法との比較により行う。既存の多重露出画像合成法の入力画像として必要と

される多重露出画像は、HDR 画像からトーンマッピングにより生成したもの、および実際にカメラで撮影したものを使用する。また、提案する擬似的多重露出画像合成法が生成する画像品質の評価には、客観評価尺度とリファレンスとなる画像が必要である。しかしながら、トーンマッピングやカメラにより生成される 0[EV] の画像は、そのシーンを表現する最も高品質な画像であるとは限らない。したがって、画像評価に幅広く用いられる PSNR や SSIM といった尺度では、提案法が生成する画像品質を評価することができない。そこで本研究では、HDR 画像をリファレンスとして使用する Tone Mapped Image Quality Index (TMQI) [10]、およびリファレンスとの色歪みを評価する CIEDE2000 Color Difference Formula (CIEDE2000) [11] という 2 つの尺度を利用して、画像品質を評価する。

TMQI は、HDR 画像からトーンマッピング処理により生成された画像の品質を、Structural Fidelity および Statistical Naturalness という 2 つの観点から評価する尺度である。HDR 画像 I_H からトーンマッピングされた画像に対して提案法を適用することで、 I_H を基準とした TMQI によって、提案法により生成される画像 I' の品質を評価できる。また、Statistical Naturalness はリファレンスなしで評価できることから、HDR 画像が存在しない場合には、Statistical Naturalness のみを用いて I' の品質を評価できる。

CIEDE2000 は、色空間における画像間の距離を測ることで、画像品質を評価する尺度である。本研究では、輝度のコントラストを高品質に表現した画像の生成を目的としており、提案法の処理に起因する色歪みは望ましいものではない。そこで、0[EV] の画像 I_0 を基準として、提案法により生成される画像 I' の色歪みを評価するために CIEDE2000 を用いる。

上記の評価法を用いた実験により、提案法が生成する画像 I' の品質を確認する。

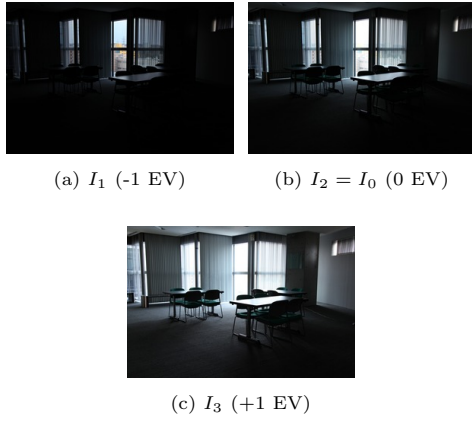
4.2 実験条件

HDR 画像から生成された多重露出画像を入力画像として用いる実験 (実験 1)、および実際にカメラを用いて撮影された多重露出画像を入力画像として用いる実験 (実験 2) を実施した。比較する手法は、合成法 \mathcal{F} として Mertens らの手法 [2] および坂井らの手法 [3] をそれぞれ利用する 2 つの提案法と、Mertens らによる多重露出画像合成法 [2]、Sakai らによる多重露出画像合成法 [3]、Histogram Equalization (HE)、Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) [12] の 4 つの従来法、計 6 種類を比較する。

a 実験 1 (HDR 画像使用)

実験 1 において、提案法の有効性の評価は以下の手順にしたがって実施した。

- (1) トーンマッピングオペレータを用いて、HDR 画像 I_H から多重露出画像 I_k を生成する。
- (2) I_k に対し比較する 6 種類の手法を適用し、それぞれ I'_1, \dots, I'_6 を得る。ただし、提案法、HE、CLAHE の入力画像には、0[EV] の画像のみを利用している。



(a) I_1 (-1 EV) (b) $I_2 = I_0$ (0 EV)



(c) I_3 (+1 EV)

図 3 Examples of multi-exposure images I_k (Lobby) taken by Canon EOS 5D Mark II

(3) I'_1, \dots, I'_6 の品質を, I_H と基準とした TMQI, および I_0 を基準とした CIEDE2000 の二種類の評価尺度を用いて評価する. TMQI $\in [0, 1]$, Statistical Naturalness $\in [0, 1]$ は値が大きいくほど画像が高品質であることを表し, CIEDE2000 $\in [0, \infty)$ は値が小さいほど色の観点から画像間の類似性が高いことを示す.

実験では, HDR 画像データベース [13, 14] から選択した 60 枚の HDR 画像を I_H として使用した. またトーンマッピングオペレータには, 式 (6) の導出における f の仮定から, 線形なオペレータを使用した.

b 実験 2 (直接撮影)

カメラを用いて撮影された多重露出画像 I_k を各手法の入力画像として使用する場合, 実験 1 における手順 (1) の実行は不要である. また TMQI を用いた品質の評価においては, TMQI における Structural Fidelity が計算できないため, Statistical Naturalness のみを用いて評価する. 他の実験条件は実験 1 と同様である. 実験には, Canon EOS 5D Mark II を用いて撮影された 2 組の多重露出画像 I_k を使用した (図 3 参照).

4.3 実験結果

表 1, 表 2, 表 3 は, 実験 1 の手順に従いそれぞれの客観評価尺度を用いて計算されたスコアを示す. また, 表 4 および表 5 は, 実験 2 の手順に従いそれぞれスコアを計算したものである.

a 実験 1

表 1 より, 提案法が, 複数枚の画像を用いる既存の多重露出画像合成法および CLAHE と比較して高い TMQI スコアを示していることが確認できる. また, 表 2 にも同様の傾向が現れている. HE は, TMQI および Statistical Naturalness のスコアが最も高い一方で, CIEDE2000 スコアが他の手法と比較して大きい (表 3 参照). したがって, HE は大きな色歪みを発生させる手法だといえる.

以上のことから, 提案法は, 複数枚の画像を用いる既存の多重露出画像合成法と同等の, 高い品質を持つ画像を生成可能であるといえる. さらに, 代表的なコントラスト強調手法である HE に比べ, 提案法が色歪みの観点から優れた手法であると考えられる.



(a) Proposed (Mertens) (b) Proposed (Sakai)



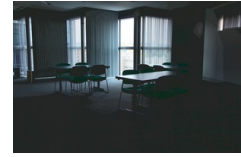
(c) Mertens



(d) Sakai



(e) HE



(f) CLAHE

図 4 Resulting images generated by each method (Lobby)

b 実験 2

表 4 を見ると, 既存の多重露出画像合成法およびコントラスト強調手法の Statistical Naturalness スコアが極めて小さいことが確認できる, これは, 図 3 に示したように原画像が全体的に暗い画像であり, 既存の多重露出画像合成法や CLAHE では, 画像の全体的な明るさが変化しないためであると考えられる. (図 4 参照). また HE では, コントラスト強調の効果が強すぎる影響により, 不自然な画像が生成されているため, スコアが低くなっているものと考えられる. 一方提案法では, 適切にコントラストを強調し原画像における暗部をよく表現できていることがわかる (図 4 参照). このため, 提案法が高い Statistical Naturalness スコアを示していると考えられる.

また, 表 5 より, カメラにより撮影された画像を入力画像として用いた場合でも実験 1 と同様に, 提案法が HE と比較して色歪みが小さいという実験結果が得られていることがわかる. 以上のことから, 提案法は単一画像のみを用いて, 複数枚の画像を用いる既存の多重露出画像合成法と同等の品質を持つ画像を生成可能であるといえる. さらに提案法は, 色歪みの観点から従来のコントラスト強調法と比較して優れているといえる.

5. おわりに

本研究では, 単一画像に基づく擬似的多重露出画像合成法を提案した. 提案法は, 単一画像から擬似的に多重露出画像を生成することにより, 従来の多重露出画像合成法を用いて高品質な画像を生成可能である. また, いくつかの実験により提案法の有効性を示した. 実験では, 複数枚の画像を用いる従来の多重露出画像合成法と比較して, 提案法が同等の品質を持つ画像を生成できることが明らかになった. さらに, 単一画像からコントラスト強調を行う代表的な手法と比較して, 提案法は色歪みの観点から優れていることが明らかとなった.

表 1 Experimental results for Simulation 1 (TMQI)

Methods	Input image	Proposed (Mertens)	Proposed (Sakai)	Mertens	Sakai	HE	CLAHE
Adjuster	0.8793	0.9259	0.9305	0.8879	0.8907	0.9704	0.9240
ApartmentFloat	0.7466	0.8540	0.8512	0.8328	0.8294	0.8100	0.8503
Balls	0.8371	0.8224	0.8343	0.8269	0.8419	0.8376	0.8235
BrightRings	0.7748	0.7956	0.7959	0.7770	0.7774	0.8308	0.7767
Cannon	0.8413	0.9164	0.9308	0.9203	0.9336	0.8657	0.8517
Average (60 images)	0.7996	0.8673	0.8688	0.8458	0.8463	0.8816	0.8576

表 2 Experimental results for Simulation 1 (Statistical Naturalness)

Methods	Input image	Proposed (Mertens)	Proposed (Sakai)	Mertens	Sakai	HE	CLAHE
Adjuster	0.4350	0.7235	0.7528	0.4974	0.5129	0.9860	0.6701
ApartmentFloat	0.2750	0.5382	0.5217	0.4541	0.4337	0.2847	0.5416
Balls	0.1145	0.0765	0.1196	0.0930	0.1503	0.1682	0.0985
BrightRings	0.0224	0.1153	0.1162	0.0339	0.0341	0.6183	0.0288
Cannon	0.1054	0.4731	0.5590	0.4958	0.5765	0.2362	0.1669
Average (60 images)	0.2053	0.4860	0.4931	0.3718	0.3752	0.6063	0.4742

表 3 Experimental results for Simulation 1 (CIEDE2000)

Methods	Input image	Proposed (Mertens)	Proposed (Sakai)	Mertens	Sakai	HE	CLAHE
Adjuster	0.000	9.141	9.181	7.257	7.234	19.826	11.897
ApartmentFloat	0.000	10.932	10.937	4.718	4.716	14.935	5.692
Balls	0.000	9.487	9.371	8.618	8.512	20.618	16.793
BrightRings	0.000	6.532	6.507	1.568	1.535	29.110	0.828
Cannon	0.000	12.503	12.455	12.430	12.391	24.950	17.346
Average (60 images)	0.000	9.664	9.644	7.222	7.200	19.812	9.502

表 4 Experimental results for Simulation 2 (Statistical Naturalness)

Methods	Input image	Proposed (Mertens)	Proposed (Sakai)	Mertens	Sakai	HE	CLAHE
Corridor	0.0000	0.4244	0.4139	0.0000	0.0000	0.0311	0.0000
Lobby	0.0007	0.4668	0.5066	0.0074	0.0065	0.0430	0.0024

表 5 Experimental results for Simulation 2 (CIEDE2000)

Methods	Input image	Proposed (Mertens)	Proposed (Sakai)	Mertens	Sakai	HE	CLAHE
Corridor	0.0000	27.5733	27.5678	0.7017	0.7490	62.1671	1.5222
Lobby	0.0000	26.9430	26.9298	5.1899	5.2196	57.1204	2.7025

文 献

- [1] P.E. Debevec and J. Malik, "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs," ACM SIGGRAPH 2008 classesACM, p.31 2008.
- [2] T. Mertens, J. Kautz, and F. Van Reeth, "Exposure fusion: A simple and practical alternative to high dynamic range photography," Computer Graphics Forum, vol.28, no.1, pp.161–171, 2009.
- [3] T. Sakai, D. Kimura, T. Yoshida, and M. Iwahashi, "Hybrid method for multi-exposure image fusion based on weighted mean and sparse representation," 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)IEEE, pp.809–813 2015.
- [4] T.-H. Oh, J.-Y. Lee, Y.-W. Tai, and I.S. Kweon, "Robust high dynamic range imaging by rank minimization," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.37, no.6, pp.1219–1232, 2015.
- [5] Y. Kinoshita, S. Shiota, M. Iwahashi, and H. Kiya, "An remapping operation without tone mapping parameters for hdr images," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.99, no.11, pp.1955–1961, 2016.
- [6] Y. Kinoshita, S. Shiota, and H. Kiya, "Fast inverse tone mapping with reinhard's global operator," 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)IEEE, pp.1972–1976 2017.
- [7] F. Dufaux, P.L. Callet, R. Mantiuk, and M. Mrazek, High Dynamic Range Video, From Acquisition, to Display and Applications, Elsevier Ltd., 2016.
- [8] H. Youngquing, Y. Fan, and V. Brost, "Dodging and burning inspired inverse tone mapping algorithm," Journal of Computational Information Systems, vol.9, no.9, pp.3461–3468, 2013.
- [9] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," ACM Transactions on Graphics (TOG), vol.21, no.3, pp.267–276, 2002.
- [10] H. Yeganeh and Z. Wang, "Objective quality assessment of tone mapped images," IEEE Transactions on Image Processing, vol.22, no.2, pp.657–667, 2013.
- [11] G. Sharma, W. Wu, and E.N. Dalal, "The ciede2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations," Color research and application, vol.30, no.1, pp.21–30, 2005.
- [12] K. Zuiderveld, "Contrast limited adaptive histogram equalization," Graphics gems IVAcademic Press Professional, Inc., pp.474–485 1994.
- [13] "Github - openexr". <https://github.com/openexr/>
- [14] "High dynamic range image examples". <http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/pages/originals.html>