

Reinhard のグローバルオペレータのための特異点を考慮した 逆トーンマッピング法

木下 裕磨[†] 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
E-mail: †kinoshita-yuma@ed.tmu.ac.jp, ††{sayaka,kiya}@tmu.ac.jp

あらまし 本稿では, Reinhard のグローバルオペレータのための特異点を考慮した逆トーンマッピング法を提案する. 逆トーンマッピングには, 既存の LDR 画像から HDR 画像を生成すること, および, マッピングされた LDR 画像から HDR 画像を再構成することという 2つのアプリケーションがある. 提案法は Reinhard のグローバルオペレータの逆変換により, これら 2つのアプリケーションに適用可能な逆トーンマッピングを実行する. Reinhard のグローバルオペレータには, α, \bar{L}_w という 2つのパラメータがあり, その逆変換にはこれらパラメータの記憶が必要とされる. 提案法は, マッピング時の特異点回避の影響を考慮することによって, 1つのパラメータのみを用いて Reinhard のグローバルオペレータの逆変換を可能とする. 実行時間と再構築された HDR 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 HDR 画像, トーンマッピング, 逆トーンマッピング

An Inverse Tone Mapping Scheme Considering Singularities for Reinhard's Global Operator

Yuma KINOSHITA[†], Sayaka SIOTA[†], and Hitoshi KIYA[†]

[†] Department of Information and Communication Systems,
Tokyo Metropolitan University, 191-0065, Tokyo, Japan
E-mail: †kinoshita-yuma@ed.tmu.ac.jp, ††{sayaka,kiya}@tmu.ac.jp

Abstract A number of inverse tone mapping operators for dynamic range expansion have been proposed due to the need to visualize low dynamic range (LDR) images on high dynamic range (HDR) devices. This paper proposes a novel inverse tone mapping operator (TMO) considering singularities for Reinhard's global operator. Inverse TM operations have two applications: generating an HDR image from an existing LDR one, and reconstructing an HDR image from a mapped LDR image. The proposed inverse TMO allows to be applied to both applications. When the inverse transform of Reinhard's global operator is performed, two parameters α and \bar{L}_w are generally needed to be stored. The proposed method enables to carry out the inverse transform with only one parameter by considering singularities in Reinhard's global operator. Experimental results show the effectiveness of the proposed inverse TMO by comparing the proposed one with conventional ones.

Key words HDR Image, Tone Mapping, Inverse Tone Mapping

1. はじめに

ハイダイナミックレンジ (High Dynamic Range, HDR) 画像は, 一般に用いられるローダイナミックレンジ (Low Dynamic Range, LDR) 画像と比較して, 高いダイナミックレンジの記録が可能であり, 写真撮影, コンピュータグラフィックス, 車載カメラ, 医用画像など多くの分野で用いられている. しかし

ながら, HDR 画像は一般に, ハイダイナミックレンジ表現するために画素を浮動小数点数で表現しているためいくつかの課題がある.

まず, 既存のディスプレイでは HDR 画像を直接表示できない. 現在一般に用いられているディスプレイは, 整数値で表現された LDR 画像のみ表示可能であるため, HDR 画像の表示には一度 LDR 画像にトーンマッピングする必要がある. その

ため、HDR 画像を既存の LDR 画像へと変換するトーンマッピングオペレータ (Tone Mapping Operator, TMO) に関する研究が盛んに行われている [1-3]. Reinhard らは、HDR 画像の輝度をマッピングすることで、原画像が持つ広いコントラストのレンジを高品質に圧縮することに成功している [4, 5].

次に、HDR 画像は高いビット深度の浮動小数点数を用いて表現されているため、LDR 画像と比較してデータ量が大きくなる上、既存の効率的な圧縮手法を利用できない。HDR 画像の圧縮に関する研究や標準化は進行中であるが、圧縮効率の改善など未だ多くの課題がある [6, 7]. これらの課題を解決するため、HDR 画像をトーンマッピングにより LDR 画像に変換・記録し、必要に応じて HDR 画像を再構成する手法が考えられる。

1 枚の LDR 画像から HDR 画像を生成するための手法として、逆トーンマッピング処理に関する研究が多く行われている [8-12]. 逆トーンマッピングには以下に示す 2 つのアプリケーションが考えられる。1 つは、既存の LDR 画像から HDR 画像を生成することであり、もう 1 つは、マッピングされた LDR 画像から元の HDR 画像を再構成することである。また逆トーンマッピング処理は、既存の LDR 画像を HDR 画像へと拡張するのみならず、HDR 画像のデータ圧縮にも応用されており、JPEG-XT として標準化が進行中である [7]. 既存の逆トーンマッピングに関する研究の多くは、既存の LDR 画像から HDR 画像を生成することを目的としている [8-11]. しかしながら、これらの逆トーンマッピング法は、マッピングされた LDR 画像から元の HDR 画像を再構築することを考慮していない。したがって、マッピングされた LDR 画像から、これらの逆トーンマッピング法により生成される HDR 画像は、元の HDR 画像とは異なったものになる。

本研究では、代表的なトーンマッピングである Reinhard のグローバルオペレータに基づき、上記の 2 つのアプリケーションに利用可能な逆トーンマッピング法を提案する。従来、Reinhard のグローバルオペレータによりマッピングされた LDR 画像から HDR 画像を再構成するためには、トーンマッピングにおいてユーザが設定するパラメータ α と、HDR 画像における輝度の幾何平均 \bar{L}_w の 2 つのパラメータが必要とされる。文献 [12] では、これら 2 つのパラメータの保存を必要としない逆 TMO が提案されているが、この手法では 2 つのパラメータを任意の値としているため、生成された HDR 画像は元の HDR 画像と一致しない場合がある。提案法は、Reinhard のグローバルオペレータ [4, 5] を用いたトーンマッピングにおける特異点とそれを回避することによる影響を考慮しつつ逆変換を行うことにより、1 つのパラメータのみを用いて高速かつ高品質な逆トーンマッピング処理を実行する。Reinhard のグローバルオペレータ [4] により生成された画像は従来の画像符号化法を利用可能なため、HDR 画像を LDR 画像として圧縮・記憶することができ、提案する逆 TMO によって、記憶された LDR 画像から HDR 画像を高品質に再構成可能となる。

提案手法の有効性を評価するため、実行時間、および、生成される HDR 画像の品質に関して、既存の逆トーンマッピング法との比較実験を実施した。実験の結果、提案手法がパラメー

タを用いる従来の手法と同等の画質を持つ HDR 画像が生成可能であることが示された。また、既存の逆トーンマッピング法に比べ、提案手法が高速に逆トーンマッピングを実行可能であることが確認される。

2. 準備

図 1 に示すように、TMO は HDR 画像 I_H から LDR 画像 I_L を生成する。

2.1 Photographic Tone Reproduction

ここでは代表的なトーンマッピング法である”Photographic Tone Reproduction” [4] について簡単に要約する。この手法は 6 つのステップからなる (図 1 参照)。

- (a) HDR 画像 I_H の RGB 値から world luminance $L_w(p)$ を計算する。

$$L_w(p) = 0.27R(p) + 0.67G(p) + 0.06B(p) \quad (1)$$

ここで $R(p)$, $G(p)$ および $B(p)$ は、HDR 画像の画素 p における RGB 値である。

- (b) world luminance $L_w(p)$ の幾何平均 \bar{L}_w を計算する。幾何平均 \bar{L}_w は次式により与えられる。

$$\bar{L}_w = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \log L_w(p)\right) \quad (2)$$

ここで、 N は入力画像 I_H の画素の総数を表す。式 (2) は、 $L_w(p) = 0$ において特異点を持つ。したがって、入力画像 I_H が $L_w(p) = 0$ となる画素 p を持つ場合には、特異点を回避するため、 $L_w(p) = 0$ を微小な値 ϵ で置き換え以下のように計算する。

$$\bar{L}_w = \exp\left(\frac{1}{N} \left(\sum_{p \notin B} \log L_w(p) + \sum_{p \in B} \log \epsilon\right)\right) \quad (3)$$

ここで、 B は $L_w(p) = 0$ となる画素 p の集合を表す。

- (c) scaled luminance $L(p)$ を、次式のように計算する。

$$L(p) = \frac{\alpha}{L_w} L_w(p) \quad (4)$$

ここで、 $\alpha \in [0, 1]$ は”key value”と呼ばれるパラメータであり、この操作は輝度の幾何平均を α に正規化する。

- (d) display luminance $L_d(p)$ を、トーンマッピングオペレータ $y(\cdot)$ を用いて求める。

$$L_d(p) = y(L(p)) \quad (5)$$

Reinhard のグローバルオペレータ [4] は次式で与えられる。

$$L_d(p) = \frac{L(p)}{1 + L(p)} \quad (6)$$

- (e) 浮動小数点表現された画素値 $C_f(p)$ が次式で与えられる。

$$C_f(p) = \frac{L_d(p)}{L_w(p)} C(p) \quad (7)$$

ここで、 $C(p) \in \{R(p), G(p), B(p)\}$ は入力画像 I_H に

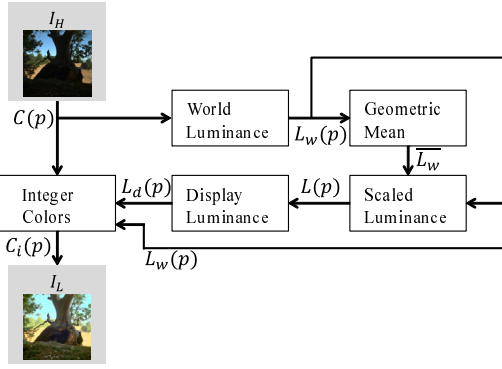


図1 Photographic Tone Reproduction

における浮動小数点の RGB 値であり、また、 $C_f(p) \in \{R_f(p), G_f(p), B_f(p)\}$ である。

- (f) 24-bit の LDR 画像 I_{Lg} における RGB 値 $C_i(p)$ を次式によって求める。

$$C_i(p) = \text{round}(C_f(p) \cdot 255) \quad (8)$$

ここで $\text{round}(x)$ は x をもっとも近い整数値に丸める操作である。また、 $C_i(p) \in \{R_i(p), G_i(p), B_i(p)\}$ である。さらに、必要に応じて $C_f(p)$ に対しガンマ補正を行う。

2.2 問題設定

逆 TMO は LDR 画像から HDR 画像を生成するための操作である [8, 11]。本稿では、Reinhard のグローバルオペレータによりマッピングされた LDR 画像から、HDR 画像を再構成するための新しい逆 TMO を提案する。

直接的な逆トーンマッピング関数は、次式のように式 (4) と式 (6) から導出される。

$$L_w(p) = \frac{\bar{L}_w}{\alpha} \cdot L(p) = \frac{\bar{L}_w \cdot L_d(p)}{\alpha(1 - L_d(p))} \quad (9)$$

また、文献 [12] では、HDR 画像の再トーンマッピングを目的として、式 (9) における 2 つのパラメータ α, \bar{L}_w をそれぞれ任意の値で置き換える、パラメータ値の保存の必要がない逆 TMO が提案されている。

これら 2 つの逆トーンマッピング法には、以下に述べる問題がある。

- 式 (9) の計算には α および \bar{L}_w が必要であり、元の HDR 画像 I_H あるいはこれら 2 つのパラメータを記憶することが必要となる。
- パラメータなしの逆 TMO は HDR 画像を生成可能であるが、パラメータを任意の値としていることから、生成された HDR 画像は元の HDR 画像 I_H と一致しない場合がある。
- パラメータなしの逆 TMO において、再トーンマッピング処理として Photographic Tone Reproduction の枠組みの利用が仮定されており、他の手法による再トーンマッピングが考慮されていない。

本稿では、式 (3) による特異点回避の影響を考慮することによりこれらの課題を解決する、1 つのパラメータ (α または \bar{L}_w)

を記憶することを前提とした、新しい逆 TM 法を提案する。

3. 逆トーンマッピング法の提案

Reinhard のグローバルオペレータの使用を仮定した、Photographic Tone Reproduction の逆変換 (Inverse Photographic Tone Reproduction, IPTTR) に基づく、新しい逆トーンマッピング法を提案する。

3.1 Reinhard's TMO に基づく逆トーンマッピング法

本稿で提案する逆 TMO を以下に示す。

$$L'_w(p) = \frac{G}{A} \cdot L(p) = \frac{G \cdot L_d(p)}{A(1 - L_d(p))} \quad (10)$$

ここで、 \bar{L}_w を記憶する場合には

$$\begin{cases} A = \exp\left(\frac{N}{|B^C|} \log \bar{L} - \frac{|B|}{|B^C|} \log \bar{L}_w\right) \\ G = \bar{L}_w \end{cases} \quad (11)$$

と与える。一方、 α を記憶する場合には

$$\begin{cases} A = \alpha \\ G = \exp\left(\frac{N}{|B|} \log \bar{L} - \frac{|B^C|}{|B|} \log \alpha\right) \end{cases} \quad (12)$$

とする。さらに、 B^C は集合 B の補集合であり、 $L_w(p) \neq 0$ となる画素 p の集合を表す。また、 \bar{L} は display luminance $L(p)$ の幾何平均であり、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{L} &= \exp\left(\frac{1}{N} \left(\sum_{p \notin B} \log L(p) + \sum_{p \in B} \log \epsilon\right)\right) \\ &= \exp\left(\frac{1}{N} \left(\sum_{p \notin B} \log \frac{L_d(p)}{1 - L_d(p)} + \sum_{p \in B} \log \epsilon\right)\right) \end{aligned} \quad (13)$$

式 (10) は、式 (9) における α, \bar{L}_w を LDR 画像から計算可能なパラメータ A, G でそれぞれ置き換えたものに相当する。

a \bar{L}_w を記憶する場合

記憶された \bar{L}_w を利用して逆トーンマッピングを実行する際には、式 (11) を用いてパラメータ A, G を計算する。ここで、式 (11) は $|B| = 0$ となる場合でも適用できることから、特異点回避 ($L_w(p) \neq 0$) の下で任意の HDR 画像から生成された LDR 画像に対して逆トーンマッピングが実行可能である。一方、 \bar{L}_w は画像依存のパラメータであることから、画像 1 枚につき 1 つの \bar{L}_w を記憶する必要がある。

b α を記憶する場合

記憶された \bar{L}_w を利用して逆トーンマッピングを実行する際には、式 (12) を用いてパラメータ A, G を計算する。 α は画像依存のパラメータではないため、同一の α を用いてマッピングされた複数枚の LDR 画像に対しては 1 つの α を記憶すればよい。ただし、 α を記憶した逆トーンマッピングには、以下に述べる条件がある。HDR 画像 I_H において $|B| = 0$ となる場合には、式 (12) が計算できないため \bar{L}_w を求めることができない。したがって、 α を記憶した逆トーンマッピングを実行する場合には、 $|B| \neq 0$ となるよう HDR 画像における輝度 $L_w(p)$ の最小値を 0 と置き換え、2.1 のトーンマッピングに従って LDR 画

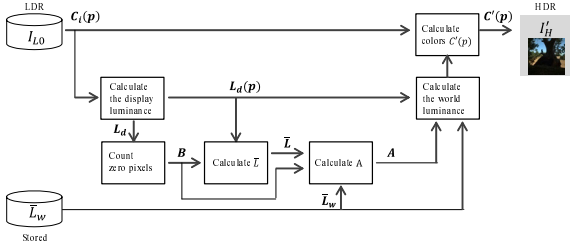


図2 Proposed inverse tone mapping operation

像 I_{L0} を生成する.

3.2 実行手順

提案手法により, LDR 画像 I_L から HDR 画像 I'_H を生成するための手続きを以下に要約する (図2 参照). ただし, 上述したように α を記憶する場合には, $|B| \neq 0$ となるようトーンマッピング時に処理されているものとする.

- (1) 次式により, LDR 画像の RGB 値から輝度値を計算する.

$$L_d(p) = \frac{0.27R_i(p) + 0.67G_i(p) + 0.06B_i(p)}{255} \quad (14)$$

- (2) $L_d(p) = 0$ となる画素 p の集合を B とする.
(3) 式 (13) により \bar{L} を計算する.
(4) パラメータ A, G を計算する.
(a) \bar{L}_w が記憶されている場合, 式 (11) を用いて A, G を計算する.
(b) α が記憶されている場合, 式 (12) を用いて A, G を計算する.
(5) 式 (10) に従い, A, G を用いて world luminance $L'_w(p)$ を計算する.
(6) 次式によって, HDR 画像 I'_H の RGB 値 $C'(p) \in \{R'(p), G'(p), B'(p)\}$ を計算し, HDR 画像を得る.

$$C'(p) = \frac{L'_w(p)}{L_d(p)} \cdot C_f(p) = \frac{L'_w(p)}{L_d(p)} \cdot \frac{C_i(p)}{255} \quad (15)$$

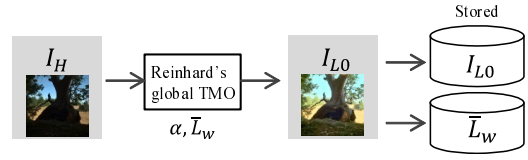
以上の手順により, 逆トーンマッピングは実行される. さらに, 生成された HDR 画像 $I'_H(p)$ に対して任意のオペレータ TMO_i を適用することによって, 再トーンマッピングされた LDR 画像を得ることができる (図3 参照). ここで, 再構成された HDR 画像 I'_{H1} は, 真のパラメータ α, \bar{L}_w を用いて再構成された HDR 画像 I'_{H2} と一致することから, TMO_i を I'_{H1} に適用した結果は, TMO_i を I'_{H2} に適用した結果と一致する.

3.3 逆トーンマッピング法の導出

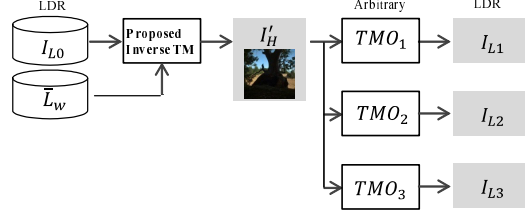
提案する逆トーンマッピング法における, パラメータ A, G の計算式を導出する.

display luminance $L(p)$ の幾何平均 \bar{L} を考えると, \bar{L} は, 式 (3) と式 (4) から以下のように変形できる.

$$\begin{aligned} \bar{L} &= \exp \left(\frac{1}{N} \left(\sum_{p \notin B} \log \frac{\alpha}{\bar{L}_w} L_w(p) + \sum_{p \in B} \log \epsilon \right) \right) \\ &= \exp \left(\frac{1}{N} \sum_{p \notin B} \log \alpha - \frac{1}{N} \sum_{p \notin B} \log \bar{L}_w \right) \end{aligned}$$



(a) 1st TM



(b) 2nd TM

図3 Re-tone mapping operation

$$\begin{aligned} &\cdot \exp \left(\frac{1}{N} \sum_{p \notin B} \log L_w(p) + \frac{1}{N} \sum_{p \in B} \log \epsilon \right) \\ &= \exp \left(\frac{|B^C|}{N} \log \alpha - \frac{|B^C|}{N} \log \bar{L}_w \right) \bar{L}_w \\ &= \exp \left(\frac{|B^C|}{N} \log \alpha + \frac{|B|}{N} \log \bar{L}_w \right) \quad (16) \end{aligned}$$

以上より,

$$\alpha = \exp \left(\frac{N}{|B^C|} \log \bar{L} - \frac{|B|}{|B^C|} \log \bar{L}_w \right) \quad (17)$$

$$\bar{L}_w = \exp \left(\frac{N}{|B|} \log \bar{L} - \frac{|B^C|}{|B|} \log \alpha \right) \quad (18)$$

という関係式を得る. さらに, 式 (17) における α を A に置き換えることで, 式 (11) を得る. 同様に, 式 (18) における \bar{L}_w を G に置き換え, 式 (12) を得る. したがって, 一方のパラメータの値を計算するためには, 他方のパラメータの値と \bar{L} のそれぞれの値が必要となる. \bar{L} は, マッピングされた LDR 画像から式 (13) を用いて計算できる. 一方 α, \bar{L}_w は, LDR 画像から計算することができないため, マッピング時に HDR 画像から計算された α, \bar{L}_w のうち 1 つを記憶しておくことが必要となる.

3.4 提案手法の評価

提案する逆 TMO が生成する HDR 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 HDR 画像が必要である. HDR 画像は LDR 画像と異なり, ダイナミックレンジが制限されておらず, モニタへの出力を考慮した画素値の制限がなされていない. この理由から, LDR 画像の評価に幅広く用いられる PSNR や SSIM といった尺度により直接評価することができない. そのため, HDR 画像のための様々は評価法が研究されている [13]. 本稿では, 評価尺度として代表的な HDR-VDP-2.2 [14], PU encoding [15] に基づき HDR 画像を評価する.

これらの手法による HDR 画像品質の評価には, 品質の基準となる HDR 画像が必要とされる. LDR 画像データベースを用いて実験を行う場合, 基準となる HDR 画像は一般に存在しない. そこで本稿では, HDR 画像データベースから HDR 画像を選択して, それらの画像から種々のトーンマッピング処理

表 1 Machine spec used in the simulation

Processor	Intel Core i7-3770 3.40GHz
Memory	16GB
OS	ubuntu 14.04 LTS
Software	MATLAB R2014b

により LDR 画像を生成する。

次章では、上記の評価法を用いた実験により、提案手法が生成する HDR 画像の品質を確認する。

4. 実験

提案手法が生成する HDR 画像 I'_{H1} の品質と実行時間を従来の逆トーンマッピングオペレータと比較するため、いくつかの HDR 画像を用いて実験を行った。

4.1 実験条件

HDR 画像データベース [16, 17] から選択した 60 枚の HDR 画像を実験に使用した (図 4 参照)。提案手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) Reinhard のグローバルオペレータを用いて、HDR 画像 I_H を LDR 画像 I_{L0} へそれぞれ変換する。
- (2) I_{L0} に対し複数の逆トーンマッピングオペレータ $iTMO_i$ を適用し、それぞれ I'_{Hi} を得る。
- (3) I_H を基準にする I'_{Hi} の品質を HDR-VDP-2.2 MOS value [14]、および、PU encoding [15]+ MS-SSIM [18] の二種類の評価尺度を用いて評価する。これらの評価尺度は、Hanhart らにより HDR 画像の評価に適していると推奨されたものである [13]。

比較する逆トーンマッピングオペレータ $iTMO_1, \dots, iTMO_6$ はそれぞれ、IPTR (Proposed), IPTR (with true parameters), IPTR (without parameters), PMET [11], Kuo's method [9], Huo's method [10] の 6 種類である。また、本実験において、提案手法は \bar{L}_w を記憶し A を推定するものとした。本実験は、表 1 に示す、3.4GHz プロセッサと 16GB のメインメモリを搭載するコンピュータにより実施した。

4.2 実験結果

図 5 は、各 $iTMO$ を 60 種類の画像にそれぞれ 100 回適用した際の平均実行時間を表したグラフである。図より、提案手法はパラメータなしの IPTR に比べわずかに多くの時間がかかるものの、他の手法と比較して少ない計算コストで実行可能であると言える。一方、一般に高品質な HDR 画像を生成できる PMET は大きな計算コストを必要とすることがわかる。

表 2, 表 3 は、 I_H に対する I'_{Hi} の品質をそれぞれ HDR-VDP-2.2, PU encoding + MS-SSIM により計算したもののうち、5 種類の画像に関する実験結果と、全画像に関する平均値を示す。HDR-VDP-2.2 $\in [0, 100]$ 、および、MS-SSIM $\in [0, 1]$ は値が大きいほど画像間の類似性が高いことを示す。

表 2 より、IPTR は PMET, Kuo's ITMO, Huo's ITMO と比較して、Reinhard のグローバルオペレータで生成された画像を高い品質で逆トーンマッピング可能だといえる。提案する逆

トーンマッピング法でも同様の特徴を持ち、パラメータなしの IPTR と比べると良好な結果が得られる。さらに、トーンマッピング時のパラメータを用いた IPTR と比べても大きな品質の差はなく、画像によっては提案法がパラメータありの IPTR を上回る結果が得られた。このパラメータを 2 つ用いた IPTR と提案法の品質の差は、LDR 画像における量子化が式 (11) における \bar{L}, B に影響することで、推定されたパラメータ A が真の α と完全には一致しないことによると考えられる。

表 3 を見ると、HDR-VDP-2.2 における結果と同様に、提案法とパラメータありの IPTR が平均して高い MS-SSIM スコアを示した。加えて提案法は、平均的にパラメータありの IPTR より高いスコアを示した。以上のことから、提案法は他の手法と比較して、Reinhard のグローバルオペレータにより生成された LDR 画像から高い品質の HDR 画像を生成できるといえる。

5. おわりに

本稿では、Reinhard のグローバルオペレータにおける特異点を考慮した新しい逆トーンマッピング法を提案した。提案法は、特異点の影響を考慮することで、1 つのパラメータから他方のパラメータを推定することが可能である。さらに提案法は、軽微な演算により Reinhard のグローバルオペレータを用いてマッピングされた LDR 画像から HDR 画像への変換が可能である。また、いくつかの実験により提案手法の有効性を示した。実験では、提案法が他の手法と比較して、高速かつ高品質に逆トーンマッピング可能であることが明らかになった。

文 献

- [1] Z. Zhu, Z. Li, S. Wu, and P. Fränti, "Noise reduced high dynamic range tone mapping using information content weights," Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015 IEEE International Conference on, pp.1255–1259, 2015.
- [2] S. Thakur, M. Sivasubramanian, K. Nallaperumal, K. Marappan, and N. Vishwanath, "Fast tone mapping for high dynamic range images," Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 2013 IEEE International Conference on, pp.1–4, IEEE, 2013.
- [3] T. Dobashi, A. Tashiro, M. Iwahashi, and H. Kiya, "A fixed-point implementation of tone mapping operation for hdr images expressed in floating-point format," APSIPA Trans. Signal and Information Processing, vol.3, no.e11, pp.1–11, 2014.
- [4] 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.
- [5] E. Reinhard, W. Heidrich, P. Debevec, S. Pattanaik, G. Ward, and K. Myszkowski, High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting, Morgan Kaufmann, 2010.
- [6] M. Iwahashi, T. Yoshida, N.B. Mokhtar, and H. Kiya, "Bit-depth scalable lossless coding for high dynamic range images," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol.2015, no.1, pp.1–15, 2015.
- [7] ISO/IEC, "ISO/IEC 18477 Information technology - Scalable compression and coding of continuous-tone still images," 2015.
- [8] F. Banterle, P. Ledda, K. Debattista, and A. Chalmers, "Inverse tone mapping," Proceedings of the 4th international

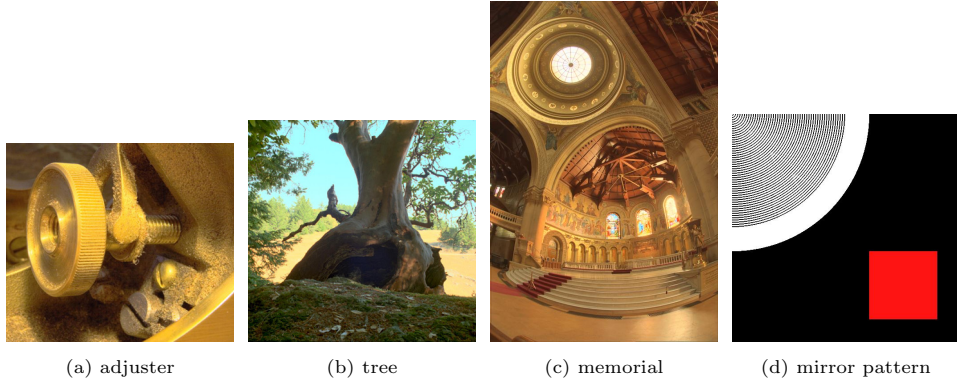


图 4 Examples of tone mapped images

表 2 Experimental results without α (HDR-VDP-2.2)

ITMO	IPTR (Proposed)	IPTR (with parameters)	IPTR (without parameters)	PMET	Kuo's ITMO	Huo's ITMO
Adjuster	58.3167	58.1664	57.8092	57.4111	42.6474	53.1271
Cannon	95.5304	95.5305	70.6938	55.1742	49.9182	56.5839
Flowers	83.2249	83.2241	63.9228	54.7001	58.2037	55.3926
Kapaa	90.8829	90.8840	64.2089	54.4748	44.5373	55.4552
memorial	49.7141	49.6110	51.6077	45.3261	39.6033	44.6477
Average (60 images)	63.0612	63.2221	57.3406	53.3804	43.3830	52.7576

表 3 Experimental results without α (PU encoding + MS-SSIM)

ITMO	IPTR (Proposed)	IPTR (with parameters)	IPTR (without parameters)	PMET	Kuo's ITMO	Huo's ITMO
Adjuster	0.9914	0.9911	0.9311	0.9440	0.5341	0.9086
Cannon	1.0000	1.0000	0.9902	0.7725	0.7441	0.7470
Flowers	1.0000	1.0000	0.9470	0.7062	0.8711	0.6751
Kapaa	1.0000	1.0000	0.9501	0.7015	0.5240	0.6697
memorial	0.9818	0.9814	0.9609	0.8785	0.5813	0.8456
Average (60 images)	0.9788	0.9772	0.9199	0.8604	0.5970	0.8313

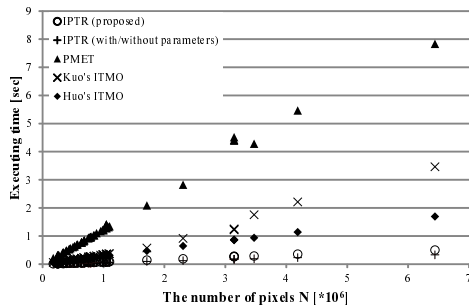


图 5 Executing time of iTMOs

conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia, pp.349–356, ACM, 2006.

- [9] P.-H. Kuo, C.-S. Tang, and S.-Y. Chien, “Content-adaptive inverse tone mapping,” *Visual Communications and Image Processing (VCIP)*, pp.1–6, IEEE, 2012.
- [10] H. Youngqing, 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.
- [11] T.-H. Wang, C.-W. Chiu, W.-C. Wu, J.-W. Wang, C.-Y. Lin, C.-T. Chiu, and J.-J. Liou, “Pseudo-multiple-exposure-based tone fusion with local region adjustment,” *Multimedia, IEEE Transactions on*, vol.17, no.4, pp.470–484, 2015.

- [12] Y. KINOSHITA, S. SHIOTA, and M. IWAHASHI, “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.
- [13] P. Hanhart, M.V. Bernardo, M. Pereira, A.M. Pinheiro, and T. Ebrahimi, “Benchmarking of objective quality metrics for hdr image quality assessment,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol.2015, no.1, pp.1–18, 2015.
- [14] M. Narwaria, R.K. Mantiuk, M.P. Da Silva, and P. Le Callet, “Hdr-vdp-2.2: a calibrated method for objective quality prediction of high-dynamic range and standard images,” *Journal of Electronic Imaging*, vol.24, no.1, pp.010501–010501, 2015.
- [15] T.O. Aydin, R. Mantiuk, and H.-P. Seidel, “Extending quality metrics to full luminance range images,” *Electronic Imaging 2008*, pp.68060B–68060B, International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [16] “Github - openexr”. <https://github.com/openexr/>
- [17] “High dynamic range image examples”. <http://www.anyhere.com/gward/hdrenc/pages/originals.html>
- [18] Z. Wang, E.P. Simoncelli, and A.C. Bovik, “Multiscale structural similarity for image quality assessment,” *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on*, vol.2, pp.1398–1402, IEEE, 2003.