

色相保存を考慮したトーンマッピング法

瀬尾 光希[†] アーティットビサワキットチャロエン[†] 木下 裕磨[†] 塩田さやか[†]

貴家 仁志[†]

[†] 首都大学東京システムデザイン学部 〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

E-mail: †{seo-kouki,kinoshita-yuma}@ed.tmu.ac.jp, ††artit.vis@gmail.com, †††{sayaka,kiya}@tmu.ac.jp

あらまし 本稿では、色相保存を考慮したトーンマッピング法を提案する。これまで、トーンマッピング処理に伴う色の歪みに関する研究は極めて少ない。本稿では、まず、丸め量子化およびクリッピング処理によって、トーンマッピングにより、HDR 画像から生成された LDR 画像の色相に歪みが生じることを指摘する。次に、HDR 画像から算出される純色情報を利用して、LDR 画像の色相を補正する方法を提案する。提案手法を適用した LDR 画像は、従来の手法でトーンマッピングされた LDR 画像に比べ、元の HDR 画像との色相差を改善することができる。また、提案手法は適用するトーンマッピングオペレータの種類に制限はない。実験の結果、提案手法は、TMQI, CIEDE2000 における色相差、および純色の差を評価基準としたとき、トーンマッピング処理自体の性能の低下をほとんど引き起こすことなく、生成された画像の色相を補正できることが示される。

キーワード トーンマッピング, 色補正, 純色, 色相保存

A hue-preserving tone mapping scheme

Kouki SEO[†], Artit VISAVAKITCHAROEN[†], Yuma KINOSHITA[†], Sayaka SHIOTA[†], and

Hitoshi KIYA[†]

[†] Department of Information and Communication Systems, Tokyo Metropolitan University 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

E-mail: †{seo-kouki,kinoshita-yuma}@ed.tmu.ac.jp, ††artit.vis@gmail.com, †††{sayaka,kiya}@tmu.ac.jp

Abstract We propose a novel hue-preserving tone mapping scheme. Various tone mapping operations have been studied so far, but there are very few works on color distortion caused in image tone mapping operations. First, LDR images produced from HDR ones by using a tone mapping operation are pointed out to have some distortion in hue due to clipping and rounding quantization processing. Next, a novel method which allows LDR images to have the same pure color values as those of HDR ones. Generated LDR images by the proposed method have smaller hue degradation than LDR ones generated by conventional tone mapping schemes. Moreover, the proposed method is applicable to any tone mapping operations. In an experiment, the proposed method is demonstrated not only to produce images with small hue degradation but also to maintain well-mapped luminance, in terms of three kinds of criterion : TMQI, the difference of hue values in CIEDE2000, and the difference of pure color values.

Key words Tone Mapping, Color Correction, Pure Color, Hue Preservation

1. ま え が き

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を表現でき、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、

現在普及しているディスプレイやプリンタで表現できる輝度の範囲は、LDR 画像の 256 階調である。そのため、HDR 画像を表示する際には、そのダイナミックレンジを 256 階調まで圧縮する必要がある。トーンマッピングは、HDR 画像から LDR 画像を生成する手法であり、多くの研究が行われている [1-8]。

トーンマッピングでは、HDR 画像の画素ごとの輝度値をトーンカーブによって圧縮し、その値を LDR 画像の画素値に変換

する．代表的な手法として，Reinhard らの手法 [1] や Drago らの手法 [2]，Fattal らの手法 [3] などが挙げられる．しかしながら，これらの代表的なトーンマッピング手法では，HDR 画像の輝度を圧縮することのみを議論しており，色の保存については検討されていない．

トーンマッピングにおける色の歪みの発生に関する代表的な研究として，Mantiuk らは，トーンマッピングによって生成された LDR 画像に生じる色の歪みはトーンカーブによるものであるとし，実験によって得られたコントラスト圧縮率と画像の彩度の関係から，画像の色相補正式を提案した [9]．ここでは，色の歪みの発生原因として，トーンカーブによるもののみを考慮している．

本研究では，トーンマッピングによって生成された LDR 画像に生じる色の歪みは，主に丸め量子化およびクリッピング処理によって生じることを指摘する．その上で，複数の原因による色の歪みに対する色相補正式を提案する．提案手法では，HDR 画像から算出した各画素の純色情報を用いて LDR 画像の色相を補正することによって，色の歪みを抑制することを目指す．文献 [10] に基づき，白，黒，純色の三色の重み付き和によって各画素を表現する等色相平面を基礎とする．

提案法の有効性を評価するため，CIEDE2000 における色相差 [11] の平均 ΔH ，各画素の純色の差の平均 Δc によって，従来のようにトーンマッピングされた LDR 画像と提案法を適用した画像の，色に関する比較実験を実施した．実験の結果，提案法を施すことによって元の HDR 画像との色相差を改善できることが確認された．さらに，HDR 画像に基づく画質評価基準の一つである TMQI [12] によって，それらの画像の比較実験を実施した．TMQI では，画像の構造的類似性と自然さの尺度を組み合わせることにより，トーンマッピング画像の画質評価を行う．実験の結果，提案手法を施すことによる，トーンマッピング処理自体への影響はほとんどないことが確認された．

2. 準備

ここでは，本稿で用いる TMO の一般的な処理と，RGB 色空間における等色相平面および等色相平面上での画素の表現について述べる．

2.1 トーンマッピング

一般的なトーンマッピングの処理について簡単に要約する．トーンマッピングは以下の 4 つのステップで実行される．

(a) HDR 画像 I_H の各画素 p 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 の画像の画素 p における RGB 値である．

(b) display luminance $L_d(p)$ を，トーンマッピングオペレータを用いて求める．

(c) 浮動小数点表現された画素値 $C_f(p)$ が次式によって与えられる．

$$C_f(p) = \frac{L_d(p)}{L_w(p)} C(p) \quad (2)$$

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

(d) 24-bit の LDR 画像 I_L における RGB 値 $C_i(p)$ を次式によって求める．

$$C_i(p) = \text{round}(C_f \cdot 255) \quad (3)$$

ここで， $\text{round}(A)$ は A をもっとも近い整数値に置き換える操作である．また， $C_i(p) \in \{R_i(p), G_i(p), B_i(p)\}$ である．さらに，以下の条件に従って $C_i(p)$ の値を， $[0, 255]$ の範囲になるように再定義する．

$$C_i(p) = \begin{cases} 0 & (C_i(p) < 0) \\ C_i(p) & (0 \leq C_i(p) \leq 255) \\ 255 & (255 < C_i(p)) \end{cases} \quad (4)$$

ここで， $C_i(p)$ が 255 を超える値をとる場合，255 でクリッピングされる．また， $C_i(p)$ が負の値をとる場合，0 でクリッピングされる．上述の式 (3) の丸め量子化と，式 (4) のクリッピング処理によって， $C_i(p)$ の値に誤差が発生する．

ステップ (b) において，代表的なトーンマッピング法である Reinhard のグローバルオペレータ [1] では，以下の手順に従って display luminance $L_d(p)$ を求める．まず，world luminance $L_w(p)$ の幾何平均 $\bar{L}_w(p)$ を次式によって計算する．

$$\bar{L}_w(p) = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log L_w(p)\right) \quad (5)$$

ここで， N は入力画像 I_H の画素の総数を表す．次に，scaled luminance $L(p)$ を，次式によって計算する．

$$L(p) = \frac{\alpha}{L_w} L_w(p) \quad (6)$$

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．最後に，次式の TMO によって，display luminance $L_d(p)$ を求める．

$$L_d(p) = \frac{L(p)}{1 + L(p)} \quad (7)$$

2.2 RGB 色空間における等色相平面

入力画像の各画素 p における画素値を $x = (x_r, x_g, x_b)$ とする．ここで， x_r, x_g, x_b はそれぞれ R, G, B 成分であり， $[0, 1]$ の範囲に正規化されているものとする．

RGB 色空間の概念図を図 1 に示す．RGB 色空間上では，等しい色相をもつ画素の集合はひとつの平面上に存在する．本稿では，文献 [10] に従って，この平面を等色相平面と呼ぶ．図 1 における灰色の領域は等色相平面の一例である．図 1 より，RGB 色空間内における等色相平面は白，黒，純色によって囲まれた領域である．ここで，白は $(1, 1, 1)$ ，黒は $(0, 0, 0)$ ，純色は最大値が 1，最小値が 0 の三次元ベクトルであり， x と等しい色相をもつ．純色 $c = (c_r, c_g, c_b)$ は次式によって求められる．

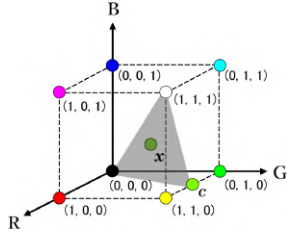


図 1 RGB 色空間の概念図

$$c_r = \frac{x_r - \min(\mathbf{x})}{\max(\mathbf{x}) - \min(\mathbf{x})},$$

$$c_g = \frac{x_g - \min(\mathbf{x})}{\max(\mathbf{x}) - \min(\mathbf{x})},$$

$$c_b = \frac{x_b - \min(\mathbf{x})}{\max(\mathbf{x}) - \min(\mathbf{x})}$$
(8)

ここで、 $\max(\cdot)$ 及び $\min(\cdot)$ は画素値 x の要素の最大値および最小値を返す関数である。式 (8) より、画素値 x における純色 c の最大の成分は 1 であり、最小の成分は 0 である。また、画素値 x における RGB 値がすべて等しい場合、画素値 x は色相を持たず、その純色も定義されない。

2.3 等色相平面上での画素表現 (LDR 画像)

RGB 色空間における等色相平面は、白、黒および純色の三点を通る平面によって定義される。ここでは、文献 [10] に従って、画素値 x の線型結合表現について述べる。

白を $w = (1, 1, 1)$ 、黒を $k = (0, 0, 0)$ 、画素値 x と等色相の純色を c とする。画素値 x は、以下の線型結合によって表される。

$$x = a_w w + a_k k + a_c c$$
(9)

ここで、 a_w, a_k, a_c は、それぞれ白、黒、純色の係数である。これらは、それぞれ次式によって求められる。

$$a_w = \min(\mathbf{x})$$

$$a_c = \max(\mathbf{x}) - \min(\mathbf{x})$$

$$a_k = 1 - \max(\mathbf{x})$$
(10)

入力画像を 24 ビットのカラー画像としたとき、 w, k, c, x はひとつの平面上に存在すること、および x は w, k, c によって構成される三角形の内点にあることから次式が成り立つ。

$$a_w + a_k + a_c = 1,$$
(11)

$$0 \leq a_w, a_k, a_c \leq 1$$
(12)

また、このとき r, g, b を $r = (1, 0, 0), g = (0, 1, 0), b = (0, 0, 1)$ のようにそれぞれ RGB 色空間の基底とすると、画素値 x は以下のように表される。

$$x = a_r r + a_g g + a_b b$$
(13)

ここで、 a_r, a_g, a_b は、それぞれの基底に対する重みであり、式

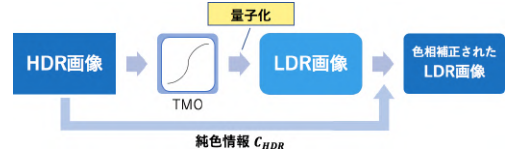


図 2 提案手法の概要

(8)、式 (9) から、それぞれ以下のように表される。

$$a_r = a_w + a_c c_r$$

$$a_g = a_w + a_c c_g$$

$$a_b = a_w + a_c c_b$$
(14)

ここで、式 (11) より、 a_k は、

$$a_k = 1 - (a_w + a_c)$$
(15)

のように表され、式 (12) より、 $[0,1]$ の範囲の値をとる。よって、式 (8) から求められる純色の成分が $[0,1]$ の範囲の値をとることから、式 (14) より、

$$a_w + a_c \geq a_{r,g,b}$$
(16)

となる。したがって、式 (15)、式 (16) より、 a_r, a_g, a_b は、 $[0,1]$ の範囲の値をとることがわかる。

3. 色相補正法の提案

HDR 画像の純色情報を用いた、LDR 画像の色相補正法を提案する。提案法では、使用する TMO の種類に制限はない。さらに、複数の色相歪みの発生原因に対して、同時に一度の補正により対応することができる。

3.1 色相歪みの発生

HDR 画像からトーンマッピングを行って LDR 画像を生成するとき、色相に歪みが生じる。本稿では、その歪みは以下の (a) ~ (c) の 3 つの理由によって生じると考える。

- (a) トーンカーブによる歪み
- (b) 丸め量子化による歪み
- (c) クリッピング処理による歪み

文献 [9] によって、CIECAM02 カラーアピランスモデル上で色相の歪みが既に指摘され、その補正式も提案されている。しかし、そこでは、その原因は (a) のみによるものとしており、(b) および (c) についての指摘はない。したがって、提案された補正法は (b)、(c) に対しては考慮されていない。本稿では、純色という観点から、主に (b) および (c) によって色相の歪みが生じることを指摘し、(a)、(b)、(c) のすべてに起因する色相の歪みを抑制する手法を提案する。その提案手法の概要を図 2 に示す。

(b) および (c) によって色相の歪みが生じるとする理由を述べる。ある画素 p における 2 つの画素値、 $x = (x_r, x_g, x_b), x' = (x'_r, x'_g, x'_b)$ を考える。ここで、2 つの画素値 x, x' の比は等しい。すなわち、定数 β を用いて以下のような関係にあると仮定する。

$$x_r = \beta x'_r, \quad x_g = \beta x'_g, \quad x_b = \beta x'_b \quad (17)$$

このとき、画素値 x, x' の純色 $c = (c_r, c_g, c_b)$, $c' = (c'_r, c'_g, c'_b)$ は、式 (8) から、以下のような関係にあることがわかる。

$$\begin{aligned} c_r &= \frac{x_r - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \\ &= \frac{\beta x'_r - \beta \min(x')}{\beta \max(x') - \beta \min(x')} \\ &= c'_r \end{aligned} \quad (18)$$

式 (18) は赤の成分のみ示したものであるが、緑および青の成分においても同様に表現される。したがって、2つの画素値 x, x' が異なる値を持っていても、それらの比が等しいならば、それらの純色 c, c' は等しいことになる。しかし、トーンマッピングされた LDR 画像では、丸め量子化およびクリッピング処理の影響によって、元の HDR 画像と画素値の比が異なってしまうため、純色が誤差を持つ。丸め量子化およびクリッピング処理によって生じる純色の差の一例を図 3 に示す。同図 (c) は、クリッピング処理により生じる元の HDR 画像との純色の差であり、同図 (d) は、丸め量子化によって生じる純色の差を示したものである。

3.2 等色相平面上での画素表現 (HDR 画像)

HDR 画像における RGB 色空間での画素表現について述べる。LDR 画像との表現の整合性を考慮して、白を (1, 1, 1), 黒を (0, 0, 0) とする。次に、式 (8) から HDR 画像の純色 $c_H = (c_{Hr}, c_{Hg}, c_{Hb})$ を算出し、式 (9) の線形結合によって画素値 x を表す。

$$x = a_w w + a_k k + a_c c_H \quad (19)$$

白, 黒, 純色の係数は, LDR 画像の場合と同様に式 (10) によって算出する。このとき, HDR 画像では, w, k, c, x はひとつの平面上に存在するが, x は w, k, c によって構成される三角形の内点にあるとは限らない。すなわち, 係数 a_w, a_k, a_c は式 (11) を満たすが, 式 (12) を満たさない。

3.3 HDR 画像の純色情報を利用した色相補正法

提案法では, トーンマッピングにより生成された LDR 画像の各画素値を, 元の HDR 画像の各画素値から算出した純色を用いて再計算することで, 色相の歪みを抑制する。

いま, x' を, HDR 画像に対してトーンマッピングを施し, 丸め量子化およびクリッピング処理の両方を施した LDR を画像の画素値とする。式 (9) にしたがって, 画素値 x' を以下のように表す。

$$x' = a'_w w + a'_k k + a'_c c' \quad (20)$$

c' は, 式 (8) により画素値 x' から算出された純色である。 a'_w, a'_k, a'_c は, 式 (10) により算出された係数である。ここで, 一般に $c' = c_H$ は上述の理由により成立しない。そこで, x' の色相を補正するため, 画素値 x' を $x'' = (x''_r, x''_g, x''_b)$ として次式により補正する。

$$x'' = a'_w w + a'_k k + a'_c c_H \quad (21)$$

また, 式 (13) に基づき, 画素値 x'' は以下のように表される。

$$x = a'_r r + a'_g g + a'_b b \quad (22)$$

ここで, 式 (14), 式 (21) より, a'_r, a'_g, a'_b は, 純色 c_H を用いてそれぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} a'_r &= a'_w + a'_c c_{Hr} \\ a'_g &= a'_w + a'_c c_{Hg} \\ a'_b &= a'_w + a'_c c_{Hb} \end{aligned} \quad (23)$$

このとき, 式 (13) と同様に, a'_r, a'_g, a'_b は, それぞれ [0,1] の範囲内の値をとる。

3.4 実行手順

提案手法により, HDR 画像をトーンマッピングし生成された LDR 画像の色相を補正するための手続きを以下に要約する。

- (1) 各種 TMO を用いて, HDR 画像から LDR 画像を生成する。
- (2) 式 (8) に従い, HDR 画像における各画素の純色 c_H を算出する。
- (3) 式 (10) に従って, 生成された LDR 画像の各画素値 x' に対する線形結合表現のための係数 a'_w, a'_k, a'_c を求める。
- (4) 式 (21) のように, 元の HDR 画像から算出した純色 c_H を用いて, 色相を補正した LDR 画像の各画素値 $x'' = (x''_r, x''_g, x''_b)$ を計算する。

式 (8) より, c_H の各成分は [0,1] の範囲にある。したがって, 式 (21) の x'' の R,G,B 成分は, 補正後も [0,1] の範囲にあり, 補正によって再度クリッピング誤差の発生はしない。

4. 実験

提案手法を適用した LDR 画像の品質を, 従来の手順でトーンマッピングされた LDR 画像と比較するため, いくつかの HDR 画像を用いて実験を行った。また, Mantiuk らの色相補正式を適用した画像との比較も行った。

4.1 実験条件

HDR 画像データベース [13] から選択した 10 枚の HDR 画像を実験に使用した。提案手法の有効性の評価は, 以下の手順に従って実施した。

- (1) 4 種類の TMO (Reinhard のグローバルオペレータ [1], Reinhard のローカルオペレータ [1], Drago の TMO[2], Fattal の TMO[3]) を用いて, 用意した HDR 画像を LDR 画像にそれぞれ変換する。
- (2) 生成された LDR 画像に提案手法を適用し, 色相補正された LDR 画像を得る。
- (3) 従来法と提案法により生成された 2 種類の画像を, 各種評価基準のもとで比較する。

4.2 実験結果

A 色相歪みの補正効果

実験によって得られた画像の色に対する評価尺度として用いた CIEDE2000 における色相差の平均 ΔH [11] と, 各画素の純



図 3 "Tree"におけるトーンマッピング後の純色の差。(a)TMO を使用した後丸め量子化およびクリッピング処理を行った LDR 画像，(b)HDR 画像との純色の差（丸め量子化およびクリッピング処理の両方を実施），(c)HDR 画像との純色の差（クリッピング処理のみ実施），(d)HDR 画像との純色の差（丸め量子化のみ実施）

表 1 実験結果 (Reinhard のグローバルオペレータ)

画像名	Δc (純色差)		ΔH (色相差)	
	TMO のみ	提案法	TMO のみ	提案法
Apartment_float	0.0766	0.0672	0.8193	0.2674
dani_belgium	0.0130	0.0104	0.5589	0.3940
Desk	0.0227	0.0136	2.6314	0.6395
Display1000_float	0.0222	0.0184	0.4630	0.2664
MtTamWest	0.0605	0.0429	3.2015	0.4858
memorial	0.0053	0.0024	1.0522	0.5513
rosette	0.0159	0.0037	1.9946	0.5657
rend06	0.0056	0.0035	0.7701	0.4208
StillLife	0.0221	0.0029	7.9052	2.5178
Tree	0.0434	0.0152	6.4565	0.5583

表 2 実験結果 (Reinhard のローカルオペレータ)

画像名	Δc (純色差)		ΔH (色相差)	
	TMO のみ	提案法	TMO のみ	提案法
Apartment_float	0.1405	0.1318	0.4721	0.3147
dani_belgium	0.0388	0.0315	0.9748	0.7122
Desk	0.0655	0.0450	3.3420	1.3861
Display1000_float	0.0830	0.0737	0.9950	0.7335
MtTamWest	0.1116	0.0973	1.8574	0.7741
memorial	0.0449	0.0121	4.0217	1.8243
rosette	0.0463	0.0322	2.0995	1.4428
rend06	0.0558	0.0062	10.3067	4.9597
StillLife	0.0507	0.0190	6.8135	2.8522
Tree	0.0844	0.0622	3.2179	1.0439

色の差の平均 Δc について要約する。

2つの画素値 x, x' に対する CIEDE2000 における色相差と，その平均 ΔH は，以下の4つのステップによって得られる。

- RGB 色空間における画素値 x, x' を，それぞれ CIELAB 色空間の値へと変換する。
- それぞれの画素値 x, x' におけるクロマおよび色相の値を得る。
- クロマおよび色相の値から色相差を得る。
- すべての画素から算出された色相差を平均し，画像全体の色相差 ΔH を得る。

また，2つの画素値 x, x' における純色の差と，その平均 Δc は，以下の3つのステップによって得られる。

- 式(8)に従って，画素値 x, x' から純色 c, c' をそれぞれ

表 3 実験結果 (Drago の TMO)

画像名	Δc (純色差)		ΔH (色相差)	
	TMO のみ	提案法	TMO のみ	提案法
Apartment_float	0.0198	0.0133	0.4177	0.1720
dani_belgium	0.0150	0.0036	0.9940	0.4174
Desk	0.0276	0.0028	3.9240	0.9566
Display1000_float	0.0137	0.0050	0.6737	0.2687
MtTamWest	0.0345	0.0054	3.5305	0.2863
memorial	0.0468	0.0009	6.9016	1.9800
rosette	0.0204	0.0016	1.7591	1.1248
rend06	0.0640	0.0008	18.1123	2.9129
StillLife	0.0355	0.0007	11.3119	4.9404
Tree	0.0435	0.0029	5.6125	0.9509

表 4 実験結果 (Fattal の TMO)

画像名	Δc (純色差)		ΔH (色相差)	
	TMO のみ	提案法	TMO のみ	提案法
Apartment_float	0.0136	0.0099	0.2542	0.1514
dani_belgium	0.0103	0.0036	0.6488	0.3175
Desk	0.0166	0.0030	2.0510	0.7582
Display1000_float	0.0127	0.0076	0.4691	0.2634
MtTamWest	0.0175	0.0081	1.1497	0.2810
memorial	0.0308	0.0016	3.8368	1.5534
rosette	0.0106	0.0023	0.8894	0.9286
rend06	0.0396	0.0016	8.4673	3.7136
StillLife	0.0247	0.0009	6.8368	3.8103
Tree	0.0213	0.0045	2.1995	0.7863

算出する。

- 算出された純色 c, c' の差を求める。
- すべての画素から算出された純色の差を平均し，画像全体の純色の差 Δc を求める。

これらの評価尺度 $\Delta H, \Delta c$ を用いて，実験によって得られた画像を評価した結果を表 1~4 に示す。これらの評価尺度は，それぞれ値が小さいほど元の HDR 画像の色相に近いことを示す。ただし，HDR 画像の純色情報を利用して LDR 画像を生成する際に，再度丸め量子化の影響を受けるため，零にならない。表 1~4 より，提案法を適用した画像は，ほぼすべての場合において色相差が改善された。

B トーンマッピングへの影響

提案手法を適用することのトーンマッピングへの影響を調

表 5 実験結果 (TMQI)

画像名	Reinhard Global		Reinhard Local		Drago		Fattal	
	TMOのみ	提案法	TMOのみ	提案法	TMOのみ	提案法	TMOのみ	提案法
Apartment_float	0.8024	0.8029	0.8235	0.8241	0.7935	0.7941	0.7342	0.7342
dani_belgium	0.9219	0.9214	0.9011	0.9009	0.9072	0.9072	0.7859	0.7873
Desk	0.9609	0.9535	0.9495	0.9407	0.9604	0.9443	0.8693	0.8723
Display1000_float	0.9551	0.9537	0.8609	0.8596	0.9370	0.9363	0.8185	0.8188
MtTamWest	0.8271	0.8475	0.8563	0.8601	0.8325	0.8590	0.8264	0.8279
memorial	0.9673	0.9643	0.8936	0.8797	0.9518	0.9185	0.9263	0.9303
rosette	0.9491	0.9441	0.8149	0.8108	0.9385	0.9277	0.8982	0.8961
rend06	0.8265	0.8231	0.8469	0.8304	0.8136	0.7566	0.8160	0.8015
StillLife	0.8825	0.8436	0.8211	0.7996	0.8611	0.8117	0.8508	0.8369
Tree	0.9609	0.9430	0.9212	0.9117	0.9641	0.9473	0.9204	0.9244

表 6 Mantiuk らの手法と提案手法の比較結果

画像名	Δc (純色差)			ΔH (色相差)		
	TMOのみ	Mantiuk[9]	提案法	TMOのみ	Mantiuk[9]	提案法
dani_belgium	0.0505	0.0548	0.0467	1.8327	1.8655	1.6308
memorial	0.0490	0.0548	0.0184	5.3609	5.5372	3.0708
Tree	0.1123	0.1151	0.0894	6.7300	6.0663	3.3379

べるため、評価尺度として TMQI[12] を用いた。TMQI とは、トーンマッピングによって生成された LDR 画像を元の HDR 画像をリファレンスとして評価する評価尺度である。TMQI は 0~1 の範囲の値をとり、1 に近いほど生成された LDR 画像が元の HDR 画像をより再現していることを示す。

TMQI を用いて、実験によって得られた画像を評価した結果を表 5 に示す。表 5 より、提案手法は、トーンマッピングにより生成した LDR 画像に対しさらに変換を行うものであるが、TMQI スコアの劣化はほとんど見られない結果となっている。また、TMO と画像の組み合わせによっては TMQI スコアが向上した例もみられる。表 5 より、提案手法は、トーンマッピングにより生成した LDR 画像の品質をほとんど損なうことなく色相を補正できる操作であると言える。実験結果の一例を図 4、図 5 に示す。それぞれ (a) が Reinhard のグローバルオペレータによって生成した LDR 画像であり、(b) がその画像に提案手法を適用したものである。

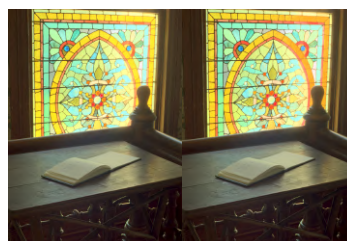
4.3 Mantiuk らの手法と提案手法の比較

文献 [9] によって提案された Mantiuk らの色相補正式と、提案手法の比較を行った。3 枚の HDR 画像から文献 [9] で使用されていた Durand の TMO[4] を用いて生成された LDR 画像について、実験と同様の手順で、提案手法、Mantiuk らの手法をそれぞれ適用し、その有効性を比較した。その比較結果を表 6 に示す。表 6 より、提案手法は、Mantiuk らの手法に対し、色相差と純色の差が共に改善可能であることがわかる。これは、Mantiuk らの手法では、先に述べたように丸め量子化およびクリッピング処理による影響を考慮していないことによる。一方、提案手法は、一度の処理によって複数の原因による色の歪みを補正することができる。



(a) TMOのみ (b) TMO+ 提案法

図 4 "Tree"における実験結果 (Reinhard のグローバルオペレータを使用)



(a) TMOのみ (b) TMO+ 提案法

図 5 "Desk"における実験結果 (Reinhard のグローバルオペレータを使用)

5. おわりに

本稿では、トーンマッピングによって生成した LDR 画像を、元の HDR 画像から算出した純色情報を利用することで、各画素の色相を補正するトーンマッピング法を提案した。HDR 画像をリファレンスとした色に関する評価尺度と、画質に関する評価尺度を用いての評価実験を実施することで、提案手法が従来のトーンマッピング法と比較して、画質の低下をほとんど引き起こさずに、より元の HDR 画像の色相に近い LDR 画

像が生成可能であることが示された .

文 献

- [1] 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.
- [2] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen and N. Chiba, "Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes," EUROGRAPHICS, vol.22, no.3, pp.419-426, 2003.
- [3] R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman, "Gradient domain high dynamic range compression," ACM transactions on graphics (TOG), vol.21, no.3, pp.249-256, 2002.
- [4] F. Durand and J. Dorsey, "Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images," ACM transactions on graphics (TOG), vol.21, no.3, pp.257-266, 2002.
- [5] Y. Kinoshita, S. Shiota, M. Iwahashi, and H. Kiya, "An Remapping Operation without Tone Mapping Parameters for HDR images," IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci., vol.99, no.11, pp.1955-1961, 2016.
- [6] T. Murofushi, M. Iwahashi, and H. Kiya, "An integer tone mapping operation for HDR images expressed in floating point data," IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci., vol.97, no.11, pp.2147-2153, 2014.
- [7] T. Murofushi, T. Dobashi, M. Iwahashi, and H. Kiya, "An integer tone mapping operation for HDR images for OpenEXR with denormalized numbers," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. Vancouver, BC: IEEE, pp.2479-2483, 2013.
- [8] T. Dobashi, T. Murofushi, M. Iwahashi, and H. Kiya, "A Fixed-Point Global Tone Mapping Operation for HDR Images in the RGBE Format," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. Vancouver, BC: IEEE, pp.2479-2483, 2013.
- [9] R. Mantiuk, A. Tomaszewska and W. Heidrich, "Color correction for tone mapping," EUROGRAPHICS, vol.28, no.2, pp.193-202, 2009.
- [10] Y.Ueda, H.Misawa, T.Koga, N.Suetake, and E.Uchino, "HUE-Preserving Color Contrast Enhancement Method Without Gamut Problem by Using Histogram Specification," IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), IEEE, pp.1123-1127, 2018.
- [11] M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "The development of the CIE 2000 colour difference formula: CIEDE2000," Color Research and Application, 26.5, John Wiley and Sons, pp.340-350, 2001.
- [12] 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.
- [13] " High dynamic range image examples " .
<http://www.anyhere.com/gward/hdrenc/pages/originals.html>