

CIELAB 色空間に基づく色相補正法

木下 裕磨[†] 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, ^{††}kiya@tmu.ac.jp

あらまし 本研究では、CIELAB 色空間に基づく新しい色相補正法を提案する。従来の色相を考慮した画像処理法では、画像の色域を保証することの容易さから、RGB 空間上で定義される色相を保ちつつ処理を行っている。しかし、その RGB 空間上での色相の定義は、人間の視覚特性を十分に考慮していない。そこで、本研究では、人間の色覚の高精度なモデルである CIEDE2000 に基づき色相を計算する。提案する色相補正法は、CIEDE2000 に基づく色相差が、色歪みを含む画像と参照画像との間で 0 になるよう画像を補正することで、画像の色歪みを完全に取り除く。さらに、色域マッピングの適用が、補正後の画像の画素値をすべて RGB 色空間の色域に収めることを可能とする。加えて、提案法は任意の画像処理法と組み合わせて使用することができ、画像処理の効果を保持したまま色歪みを取り除くことが可能である。画像強調を例とした実験により、提案法の適用が入出力画像間の色相差をゼロにすることが確認される。加えて、離散エントロピーおよび Statistical naturalness を用いた画質評価により、提案法が画像強調の効果を保ちつつ色相補正できることが示される。

キーワード カラー画像処理, CIELAB 色空間, RGB 色空間, 色相補正, 色域マッピング

Hue Correction Scheme Based on CIELAB Color Space

Yuma KINOSHITA[†] and Hitoshi KIYA[†]

[†] Department of Information and Communication Systems,

Tokyo Metropolitan University, 191-0065, Tokyo, Japan

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

Abstract In this paper, we propose a novel color correction scheme based on the CIELAB color space. Image processing methods considering hue information have already proposed, but hue definitions utilized in those methods do not sufficiently take into account human visual perception. The proposed scheme employs the hue definition in CIEDE2000, which is a model for calculating perceptual color difference between two colors. In accordance with the hue definition, the proposed hue correction method perfectly removes hue difference between a color distorted image and a reference image. Furthermore, the use of a gamut mapping method in the proposed scheme enables us to compress a gamut into an output RGB color gamut, without hue changes. The proposed scheme can be applied to any image processing method, and distorted colors will be corrected by the proposed scheme while maintaining effects of the image processing method. Experimental results show that the proposed method can completely correct hue differences between a reference image and an image produced by an image enhancement method. In addition, the proposed method is also demonstrated to maintain effects of image enhancement, in terms of discrete entropy and statistical naturalness.

Key words Color Image Processing, CIELAB Color Space, RGB Color Space, Hue Correction, Gamut Mapping

1. はじめに

デジタルカラー画像は様々な分野に広く普及しており、画像強調、雑音除去、超解像、高ダイナミックレンジ (HDR) 画像撮影など、多岐にわたる画像処理技術がこれまでに数多く研究

されてきた [1] ~ [5]。デジタルカラー画像の符号化には RGB 色空間が広く用いられ、画素値は R, G, B の 3 チャンネルから構成されることが一般的である [6], [7]。一方、これまでに提案された画像処理法の多くは、画素値が単一チャンネルのみで表される画像を処理の対象としている。この理由から、カラー画像を

処理する場合には、画像の持つ RGB 成分を独立に処理する方式 [1],[2]、あるいは、RGB 成分から計算される輝度に対して処理を行う方式 [5],[8] が一般的である。また、輝度および色差成分を協調して処理する方式も提案されている。しかしながら、これらの方式でカラー画像を処理することは、入力画像と出力画像の色が一致することを保証できない。

入出力画像間の色歪みを抑制するため、画像の色や色相を考慮した様々な画像処理アルゴリズムが提案されている [9]~[12]。特に、RGB 空間上で定義される色相を保ちつつ処理を行う手法は、処理後の画像の色域を容易に保証できることから多く研究されてきた。Huang ら [9] は、画像の色空間を HSV 色空間 [13] に変換し、明度成分のみに処理を行う画像強調法を提案している。このとき、HSV 色空間における色相および彩度は保たれる。また、植田ら [12] は、RGB 色空間中の等色相平面上で画素値を変化させることで、色相を変化させずに画像強調を行う手法を提案している。しかしながら、HSV 色空間やこの等色相平面は RGB 色空間に基づいて定義されているため、人間の色覚特性を十分考慮できていない。したがって、これら手法を用いた場合でさえ、入出力画像間に色歪みが発生してしまう場合がある。

このような背景から、本研究では、CIELAB 色空間 [14] に基づく新しい色相補正法を提案する。CIELAB 色空間、および色差の計算式である CIEDE2000 [15] は人間の色覚の高精度なモデルであり、従来の RGB 色空間より厳密に色の違いを計算することができる。一方、CIELAB 色空間での色相補正法は、補正後の画像を RGB 色空間の色域に収める困難さから十分研究されていない。そこで、本研究では、CIEDE2000 に基づく色相補正処理と既存の色域マッピング法 [16] を組み合わせることにより、高精度に色相補正を行いつつ RGB 色空間の色域にすべての画素値収めることを可能とする。特に、提案する色相補正法は、色歪みを含む画像と参照画像との間における色相差を 0 になるよう画像を補正することで、色歪みを完全に取り除く。加えて、提案法は任意の画像処理法と組み合わせて使用することが可能である。すなわち、深層学習に基づく手法など原理的に色歪みの抑制が難しい画像処理法についても、それに起因する色歪みを提案法により取り除くことができる。

提案法の有効性を評価するため、画像強調法を用いた実験を実施した。実験では、入力画像と画像強調後の画像間の色歪みを CIEDE2000 における色相差を用いて評価した。この実験により、提案法の適用が入出力画像間の色相差をゼロにすることが確認される。その一方で、従来の色空間に基づいた色相を保存することが CIEDE2000 における色相差を 0 にするとは限らないことが確かめられる。加えて、離散エントロピーおよび Statistical naturalness を用いた画質評価により、提案法が画像強調の効果を保ちつつ色相補正できることが示される。

2. 準備

本研究は、CIELAB 色空間に基づく新しい色相補正法を提案する。ここでは準備として、デジタル画像の符号化に用いられている RGB 色空間と、均等色空間の一つである CIELAB

色空間について簡単に要約する。

2.1 RGB 色空間

デジタル画像の符号化には、sRGB 色空間 [6] や Adobe RGB 色空間 [7] をはじめとする RGB 色空間が一般に利用されている。これらの RGB 色空間上では、 R, G, B ($0 \leq R, G, B \leq 1$) を要素とする 3 次元ベクトル $C_{\text{RGB}} = (R, G, B)^{\top}$ として色を表現することができる。RGB 色空間は CIE1931 XYZ 色空間 [17](以下、XYZ 色空間) に基づいて定義されている。XYZ 色空間では、 $X, Y, Z \geq 0$ を要素とする 3 次元ベクトル $C_{\text{XYZ}} = (X, Y, Z)^{\top}$ を用いて色を表現する。XYZ 色空間から RGB 色空間への変換は次式により与えられる。

$$C_{\text{RGB}} = (f(R_{\text{lin}}), f(G_{\text{lin}}), f(B_{\text{lin}}))^{\top} \quad (1)$$

ただし、

$$(R_{\text{lin}}, G_{\text{lin}}, B_{\text{lin}})^{\top} = \mathbf{M} C_{\text{XYZ}} \quad (2)$$

である。ここで、 \mathbf{M} は 3×3 の正則行列であり、 $f(\cdot)$ は光-電気変換関数である。式 (2) で得られた C_{RGB} の各要素は、 $0 \leq R, G, B, \leq 1$ となるようクリッピングされる。

例えば、画像符号化に最も広く用いられる sRGB 色空間の場合、変換行列 \mathbf{M} 、および非線形関数 $f(\cdot)$ は次式のように定義される。

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{cases} 12.92x & x \leq 0.0031308 \\ 1.055x^{1/2.4} - 0.055 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 CIELAB 色空間

RGB 色空間が画像の符号化のために定義された色空間である一方で、CIELAB 色空間は、人間の色覚を正確にモデル化する目的で定義された色空間である。CIELAB 色空間は、RGB 色空間と同様に、XYZ 色空間に基づいて定義される。

XYZ 色空間の色 C_{XYZ} から CIELAB 色空間の色 $C = (L^*, a^*, b^*)^{\top}$ への変換は次式により与えられる。

$$L^* = 116g(Y/Y_w) - 16 \quad (5)$$

$$a^* = 500(g(X/X_w) - g(Y/Y_w)) \quad (6)$$

$$b^* = 200(g(Y/Y_w) - g(Z/Z_w)) \quad (7)$$

ここで、

$$g(x) = \begin{cases} x^{1/3} & x > \delta^3 \\ \frac{x}{3\delta^2} + \frac{4}{29} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \delta = \frac{6}{29} \quad (8)$$

であり、 (X_w, Y_w, Z_w) は XYZ 色空間における白色点の座標である。

CIELAB 色空間を用いることで、人間が知覚する 2 色 C_1, C_2 間の差 (色差) を定量的に計算することができる。色差の計算式である CIEDE2000 では、明度差 $\Delta L'$ 、彩度差 $\Delta C'$ 、色相差 $\Delta H'$ に基づき色差を定義している (付録 1. および文献 [15],

[18] 参照) .

2.3 問題設定

これまでに提案されている多くの画像処理法は、以下の方式に分類できる .

- 画像の RGB 成分をそれぞれ独立に処理する方式 .
- RGB 色空間から他の色空間 (XYZ 色空間など) に変換した後、それら色空間における輝度に対して処理する方式 .
- RGB 色空間から他の色空間にした後、輝度および色差成分を協調して処理する方式 .

しかしながら、どの方式を用いたとしても、入力画像と出力画像の色が一致することを保証できない . RGB 成分を独立に処理した場合には、各成分の相互関係が考慮されないため色歪みが発生する . また、XYZ 色空間や YCbCr 色空間は人間の色覚を十分正確にモデル化できていないため、これら色空間における輝度および色差に処理を行ったとしても色歪みの発生を回避することは難しい .

このような色歪みを抑制するために HSV 色空間や等色相平面上で処理をする方式 [9], [10], [12] が検討されている . RGB 空間上で定義される色相を保ちつつ処理を行うこれらの方式は、RGB 色空間の色域に処理後の画像を収めることが容易である . 一方、RGB 色空間は、XYZ 色空間と同様に人間の色覚を正確にモデル化できていない . そこで、本研究では、色覚を高精度にモデル化した CIELAB 色空間に基づく新しい色相補正法を提案する . 提案法は、色相補正処理と既存の色域マッピング法を組み合わせることで、高精度に色相補正を行いつつ RGB 色空間の色域にすべての画素値収めることを可能とする .

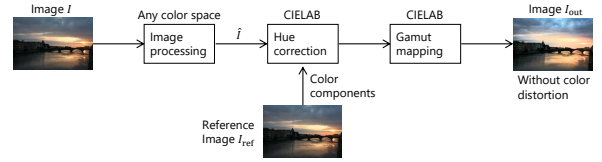
3. CIELAB 色空間に基づく色相補正法の提案

図 1 に、提案する色相補正法の枠組みを示す . まず、入力画像 I に対し任意の画像処理を施す . この処理より得られた画像 \hat{I} は、前述のとおり色歪みを含む . この画像 \hat{I} に対し、 I_{ref} を参照画像として色相補正を行う . 色相補正処理によって、画像 \hat{I} の各画素と参照画像 I_{ref} の対応する画素の色相が完全に一致する . 色相補正は CIELAB 色空間上で実行するため、色相補正によって得られる色は RGB 色空間の色域に収まらないことがある . そこで、色域マッピングを施すことにより、色相を保ったまま色域を RGB 色空間における色域へ圧縮する .

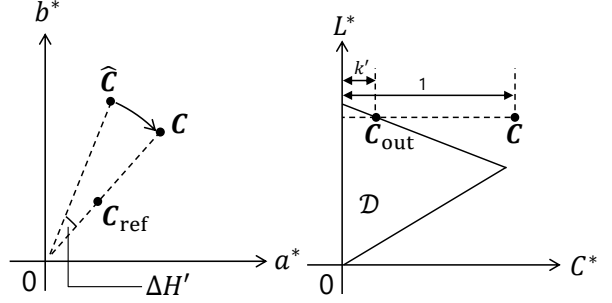
提案法における色相の定義は CIEDE2000 に基づく . 加えて、提案する色相補正法に用いる参照画像 I_{ref} は、画像 \hat{I} と画素数の等しい任意のカラー画像を用いることができる . 特に、入力画像 I を参照画像 I_{ref} として用いることで、画像処理の前後における色歪みを完全に補正することができる .

3.1 色相補正法の導出

提案する色相補正法の目的は、色 $\hat{C} = (\hat{L}^*, \hat{a}^*, \hat{b}^*)^\top$ と参照色 $C_{\text{ref}} = (L_{\text{ref}}^*, a_{\text{ref}}^*, b_{\text{ref}}^*)^\top$ と与えられたとき、参照色との色相差 $\Delta H'(C, C_{\text{ref}})$ が $\Delta H'(C, C_{\text{ref}}) = 0$ になるような色 $C = (L^*, a^*, b^*)^\top$ を求めることである (図 1(b) 参照) . ここで、色 \hat{C} の明度と彩度を保存するため、色 C と色 \hat{C} との明度差 $\Delta L'(C, \hat{C})$ および彩度差 $\Delta C'(C, \hat{C})$ は、共に 0 であるものとする .



(a) Use of proposed hue correction scheme in image processing pipeline



(b) Hue correction (c) Gamut mapping

図 1 Proposed scheme

式 (A.1)-(A.10) より、色 C が $\Delta H'(C, C_{\text{ref}}) = 0$ を満たすためには、 $k \geq 0$ として

$$a^* = k a_{\text{ref}}^* \text{ かつ } b^* = k b_{\text{ref}}^* \quad (9)$$

であれば十分であることがわかる . また、式 (A.7) より、 $\Delta L'(C, \hat{C}) = 0$ であるための必要十分条件は、

$$L^* = L_{\text{in}}^* \quad (10)$$

である . 加えて、色 C が式 (9) を満たすとき、 $\Delta C'(C, \hat{C}) = 0$ であるための必要十分条件は、式 (A.1)-(A.5)、および (A.8) より、

$$k = \frac{\hat{C}^*}{C_{\text{ref}}^*} \quad (11)$$

である . 以上のことから、求めたい色 C は、

$$C = \left(\hat{L}^*, \frac{\hat{C}^*}{C_{\text{ref}}^*} a_{\text{ref}}^*, \frac{\hat{C}^*}{C_{\text{ref}}^*} b_{\text{ref}}^* \right)^\top \quad (12)$$

となる .

色相補正を実行する CIELAB 色空間の色域は、RGB 色空間の色域と比べて広い . この色域の差により発生する画素値のクリッピングは、出力画像における色歪みの原因となる . そこで、次節に示す色域マッピングにより、色相補正法で得られる色 C を RGB 色空間内の色へ変換する .

3.2 色域マッピング法の導出

色域マッピングは、色の変化が最小になるよう、広い色空間上の色をより狭い色空間 \mathcal{D} 上の色に変換する処理である [16] . 本研究では、色 C の色相を保存するため、 $\Delta H'(C_{\text{out}}, C) = 0$ となる色 $C_{\text{out}} \in \mathcal{D}$ を求める . また、計算を簡単にするため、 $\Delta L'(C_{\text{out}}, C) = 0$ とする . このとき、求めたい色 C_{out} は、以下の最適化問題の解である .

$$\begin{aligned} C_{\text{out}} &= \arg \min_{C \in \mathcal{D}} \Delta C'(C_{\text{out}}, C) \\ \text{s.t. } &\Delta H'(C_{\text{out}}, C) = 0, \Delta L'(C_{\text{out}}, C) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、式 (9) および (10) を用いると、式 (13) は、

$$k' = \arg \max_m m \quad (14)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq m \leq 1, (L^*, ma^*, mb^*)^\top \in \mathcal{D}$$

となる k' を求める問題に帰着する (図 1(c) 参照) . 本研究では、式 (14) の計算に二分法を用いる .

3.3 実行手順

提案法の実行手順を以下に示す .

- i 入力画像 I に対し任意の画像処理を施し、画像 \hat{I} を得る .
- ii 式 (1), (2), および (5)-(8) に従い、画像 \hat{I} および参照画像 I_{ref} の各画素を CIELAB 色空間上の色 $\hat{C} = (\hat{L}^*, \hat{a}^*, \hat{b}^*)^\top$ および $C_{\text{ref}} = (L_{\text{ref}}^*, a_{\text{ref}}^*, b_{\text{ref}}^*)^\top$ へそれぞれ変換する .
- iii 式 (12) に従い、各画素の色 \hat{C} について色相補正を施し、色 C を得る .
- iv 各画素の色 C に対して色域マッピングを施し、色 C_{out} を得る .
 - (a) 出力画像の色域を \mathcal{D} とし、式 (14) に従い k' を計算する .
 - (b) 計算された k' を用いて、色 C_{out} を $C_{\text{out}} = (\hat{L}^*, k' a_{\text{ref}}^*, k' b_{\text{ref}}^*)^\top$ とする .
- v 各画素の色 C_{out} を RGB 色空間の色へ変換し、出力画像 I_{out} を得る .

4. 実験

提案する色相補正法の有効性を確認するため客観評価尺度を用いた画質評価実験を実施した .

4.1 実験条件

本実験では画像処理法として、代表的な画像強調法である Histogram Equalization (HE) を利用した . HE への入力画像として、オンライン上で利用可能なデータベース [19] から収集した 8 枚の画像を利用した . HE により強調された画像に対して提案する色相補正法を適用し、その出力画像と入力画像間の CIEDE2000 の色相差 $\Delta H'$ 、および出力画像の品質を評価した . 出力画像の品質評価には、Tone mapped image quality index (TMQI) [20] における Statistical naturalness、および離散エントロピーを利用した .

TMQI は、HDR 画像からトーンマッピングされた画像の品質を評価するための尺度であり、Structural fidelity および Statistical naturalness という 2 つの項からなる . Structural fidelity を計算するためには HDR 画像を参照画像として用いる必要があるが、Statistical naturalness の計算には参照画像を必要としない . トーンマッピングと写真撮影の過程は類似しているため、TMQI はカメラによって撮影された画像の品質を評価する目的でも有用である . また、離散エントロピーは画像の持つ情報量を表し、コントラスト強調法の品質評価において広く利用されている評価尺度である .

また、比較手法として、文献 [12] で用いられる等色相平面に基づき色相を補正したもの (WKC)、HSV 色空間に基づき色相を補正したもの (HSV)、CIELAB 色空間に基づき色相を補正

表 1 Hue difference scores

Scene	Input	HE	WKC	HSV	Lab	Proposed
Arno	0.000	1.375	0.059	0.059	0.725	0.001
Cave	0.000	0.181	0.102	0.102	0.023	0.000
Chinese garden	0.000	0.313	0.311	0.311	0.001	0.000
Estate rsa	0.000	0.728	0.063	0.063	0.092	0.001
Kluki	0.000	0.010	0.010	0.010	0.000	0.000
Laurenziana	0.000	0.094	0.091	0.091	0.001	0.000
Mountains	0.000	0.081	0.007	0.007	0.014	0.000
Ostrow tumski	0.000	0.669	0.089	0.089	0.386	0.001
Average	0.000	0.431	0.091	0.091	0.155	0.000

表 2 Entropy scores

Scene	Input	HE	WKC	HSV	Lab	Proposed
Arno	6.441	6.880	6.852	6.852	6.882	6.880
Cave	2.656	5.227	5.247	5.247	5.239	5.227
Chinese garden	5.767	6.669	6.672	6.672	6.670	6.669
Estate rsa	5.898	6.941	6.993	6.993	6.945	6.941
Kluki	7.104	6.276	6.276	6.276	6.276	6.276
Laurenziana	6.706	6.399	6.400	6.400	6.398	6.399
Mountains	7.295	6.018	6.129	6.129	6.030	6.018
Ostrow tumski	6.517	6.758	6.758	6.758	6.767	6.759
Average	6.048	6.396	6.416	6.416	6.401	6.396

したもの (Lab, 色域マッピングなし) の 3 つを用いた .

4.2 実験結果

表 1 に、入力画像と出力画像間の色相差を計算した結果を示す . ここで、画像間の色相差は、画像内のすべての画素について色相差 $\Delta H'$ を計算し、その絶対平均とした . 表より、HE を適用することによって色歪みが発生していることがわかる . また、提案法を用いることで、HE によって発生した色歪みをほとんど完全に補正できることが確認できる . 一方、WKC および HSV に基づいて色相を補正することは色歪みの抑制に一定の効果があるが、完全に色歪みを取り除くことはできていない . また、色域マッピングを用いない場合は、提案法と比較して色歪みが大きいことが確認できる . これは、CIELAB 色空間と RGB 色空間の色域の差に起因する画素値のクリッピングが色歪みを生じさせることを示している . 提案法における色域マッピング法の適用は、このクリッピングによる色歪みの発生を抑制することに効果的である . 以上の結果より、提案する色相補正法が色歪みを取り除くことに有効であることが確認できた .

表 2 および 3 には、出力画像の品質を離散エントロピーおよび Statistical naturalness でそれぞれ評価した結果を示す . ただし、どちらの評価尺度も、値が大きいほど画像の品質が高いことを示している . これらの表より、提案法を含む各色相補正法により得られたすべての画像は、色相補正法を用いない場合の画像と同等あるいはそれ以上のスコアとなった . このことから、提案法は画像強調法により得られた効果を保ったまま、色相を補正できるといえる . この結果は図 2 および 3 に示す色相補正の結果画像からも確認できる .

以上のことから、提案する色相補正法は、画像強調により得



図 2 Results of hue correction (Arno)



図 3 Results of hue correction (Estate rsa)

表 3 Statistical naturalness scores

Scene	Input	HE	WKC	HSV	Lab	Proposed
Arno	0.200	0.577	0.570	0.570	0.573	0.578
Cave	0.005	0.072	0.068	0.068	0.068	0.075
Chinese garden	0.479	0.480	0.481	0.481	0.480	0.480
Estate rsa	0.352	0.714	0.729	0.729	0.714	0.713
Kluki	0.815	0.894	0.894	0.894	0.894	0.894
Laurenziana	0.988	0.906	0.906	0.906	0.906	0.906
Mountains	0.249	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909
Ostrow tumski	0.207	0.413	0.410	0.410	0.413	0.415
Average	0.412	0.621	0.621	0.621	0.620	0.621

られた画像の品質を保ったまま、その色相を完全に補正可能であることが確認された。

5. おわりに

本研究では、CIELAB 色空間に基づく新しい色相補正法を提案した。提案する色相補正法は、人間の視覚特性を高精度にモデル化した CIEDE2000 に基づき、色歪みを含む画像と参照画像との間における色相差が 0 になるよう画像を補正することで、画像の色歪みを完全に取り除く。さらに、色相保存を考慮した色域マッピングの適用が、補正後の画像の画素値をすべて RGB 色空間の色域に収めることを可能とする。画像強調を例とした実験により、提案法の適用が入出力画像間の色相差をゼロにすることが確認された。加えて、離散エントロピーおよび Statistical naturalness の 2 つの客観評価尺度を用いた画質評価により、提案法が画像強調の効果を保ったまま色相を補正できることが示された。一方、提案法で用いる色域マッピング法には自由度があり、現在用いている手法が最適であるとはい

えない。このため、より高性能な色相補正法の開発には、色域マッピング法のさらなる研究が必要である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18J20326 の助成を受けたものである。

文 献

- [1] P.E. Debevec and J. Malik, “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs,” Proceedings of annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.369–378, ACM Press, New York, New York, USA, aug 1997.
- [2] C. Tomasi and R. Manduchi, “Bilateral filtering for gray and color images,” Proceedings of International Conference on Computer Vision, pp.839–846, Narosa Publishing House, Bombay, India, jan 1998.
- [3] 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, mar 2009.
- [4] X. Guo, Y. Li, and H. Ling, “LIME: Low-Light Image Enhancement via Illumination Map Estimation,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.26, no.2, pp.982–993, feb 2017.
- [5] Y. Kinoshita and H. Kiya, “Automatic exposure compensation using an image segmentation method for single-image-based multi-exposure fusion,” APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, vol.7, p.e22, dec 2018.
- [6] IEC 61966-2-1:1999, “Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB,” 1999.
- [7] Adobe Systems Incorporated., “Adobe RGB (1998) Color Image Encoding,” Technical report, 2005.
- [8] X. Wu, X. Liu, K. Hiramatsu, and K. Kashino, “Contrast-accumulated histogram equalization for image enhancement,” Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, pp.3190–3194, IEEE, Beijing, sep 2017.
- [9] S.-C. Huang, F.-C. Cheng, and Y.-S. Chiu, “Efficient Contrast Enhancement Using Adaptive Gamma Correction With Weighting Distribution,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.22, no.3, pp.1032–1041, mar 2013.
- [10] S.K. Naik and C.A. Murthy, “Hue-preserving color image enhancement without gamut problem,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.12, no.12, pp.1591–1598, dec 2003.
- [11] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, and K. Egiazarian, “Color Image Denoising via Sparse 3D Collaborative Filtering with Grouping Constraint in Luminance-Chrominance Space,” Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, pp.313–316, IEEE, sep 2007.
- [12] Y. Ueda, H. Misawa, T. Koga, N. Suetake, and E. Uchino, “HUE-Preserving Color Contrast Enhancement Method Without Gamut Problem by Using Histogram Specification,” Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, pp.1123–1127, IEEE, Athens, oct 2018.
- [13] A.R. Smith, “Color gamut transform pairs,” ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol.12, no.3, pp.12–19, aug 1978.
- [14] ISO/CIE 11664-4:2008, “Colorimetry – Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space,” 2008.
- [15] ISO/CIE 11664-6:2014 “Colorimetry-Part 6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula,” 2014.
- [16] J. Morović, Color gamut mapping, vol.10, John Wiley & Sons, 2008.
- [17] CIE, “Commission internationale de l’Eclairage proceedings,” Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1932.
- [18] G. Sharma, W. Wu, and E.N. Dalal, “The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations,” Color Re-

search & Application, vol.30, no.1, pp.21–30, feb 2005.

- [19] “HDR photography gallery”.
https://www.easyhdr.com/examples/
- [20] H. Yeganeh and Z. Wang, “Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.22, no.2, pp.657–667, feb 2013.

付 録

1. CIEDE2000

2 色 $C_i = (L_i^*, a_i^*, b_i^*)^T$, $i = 1, 2$ 間の CIEDE2000 における明度差 $\Delta L'(C_1, C_2)$, 彩度差 $\Delta C'(C_1, C_2)$, 色相差 $\Delta H'(C_1, C_2)$ は、以下の手順に従い計算される [18] .

i C'_i, h'_i を計算する

$$C_{i,ab}^* = \sqrt{(a_i^*)^2 + (b_i^*)^2} \quad (\text{A}\cdot 1)$$

$$\bar{C}_{ab}^* = \frac{C_{1,ab}^* + C_{2,ab}^*}{2} \quad (\text{A}\cdot 2)$$

$$G = 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{(\bar{C}_{ab}^*)^7}{(\bar{C}_{ab}^*)^7 + 25^7}} \right) \quad (\text{A}\cdot 3)$$

$$a'_i = (1 + G)a_i^* \quad (\text{A}\cdot 4)$$

$$C'_i = \sqrt{(a'_i)^2 + (b_i^*)^2} \quad (\text{A}\cdot 5)$$

$$h'_i = \begin{cases} 0 & b_i^* = a'_i = 0 \\ \tan^{-1}(b_i^*, a'_i) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A}\cdot 6)$$

ii 明度差 $\Delta L'$, 彩度差 $\Delta C'$, 色相差 $\Delta H'$ を計算する

$$\Delta L'(C_1, C_2) = L_2^* - L_1^* \quad (\text{A}\cdot 7)$$

$$\Delta C'(C_1, C_2) = C_2' - C_1' \quad (\text{A}\cdot 8)$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_2 - h'_1| \leq 180^\circ \\ (h'_2 - h'_1) - 360^\circ & (h'_2 - h'_1) > 180^\circ \\ (h'_2 - h'_1) + 360^\circ & (h'_2 - h'_1) < -180^\circ \end{cases} \quad (\text{A}\cdot 9)$$

$$\Delta H'(C_1, C_2) = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \quad (\text{A}\cdot 10)$$