

CIELAB 色空間における二分法を用いた色域把握法と その明度ヒストグラム均等化への応用

田中 豪[†] 末竹 規哲[†] 内野 英治^{†,††}

[†] 山口大学大学院理工学研究科 〒753-8512 山口県山口市吉田 1677-1

^{††} 財団法人ファジィシステム研究所 〒820-0067 福岡県飯塚市川津 680-41

E-mail: †{tanaka,suetake,uchino}@ic.sci.yamaguchi-u.ac.jp

あらまし ディスプレイに表示可能な色領域を色域という。RGB 色空間の色域は、R, G, B 値がそれぞれ [0, 255] の立方体である。それゆえ、RGB 空間では、その色が表示可能であるかの判定は易しい。しかし、CIELAB 色空間のように色域が複雑な形状をしている色空間では、その画素値が色域内にあるかどうかの判定が難しいことがある。本報告では、まず、CIELAB 色空間において、ある画素値が色域内にあるか否かを判定する方法を示す。次に、その判定法に基づき、二分法を用いて、ある色相での表示可能な色の限界を知る方法（色域を把握する方法）を提案する。更に、色域を把握することで可能になる処理の例を紹介し、色域把握の有効性を示す。

キーワード CIELAB 色空間, 色域, 二分法

A Gamut Grasping by Use of Bisection Method for CIELAB Color Space and Its Application to Lightness Histogram Equalization

Go TANAKA[†], Noriaki SUETAKE[†], and Eiji UCHINO^{†,††}

[†] Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University,

1677-1 Yoshida, Yamaguchi-shi, 753-8512 Japan

^{††} Fuzzy Logic Systems Institute,

680-41 Kawazu, Izuka-shi, 820-0067 Japan

E-mail: †{tanaka,suetake,uchino}@ic.sci.yamaguchi-u.ac.jp

Abstract The gamut of RGB color space is a cubic and its side range is [0, 255]. Therefore, it is very easy to judge whether the color is in a gamut or not in RGB color space. However, in other color spaces, for example, in CIELAB color space, sometimes it is difficult to do such a judge because the shape of its gamuts are very complex. In this report, the method to judge whether the color is in a gamut or not for CIELAB color space is shown. Then, by using the judging method and a bisection method, the algorithm to grasp the brightest color in the input hue, that is, the boundary of the gamut, is also proposed. Moreover, an application of the grasping a gamut is illustrated to prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words CIELAB color space, Gamut, Bisection method

1. まえがき

カラー画像は多くの場合、RGB 色空間上の値を用いて記録されている。また、多くのカラー画像処理手法が、RGB 色空間において与えられている。しかし、ヒトの色知覚に適応した処理を考える場合、各画素の RGB 値を“色相、彩度、明度”の三要素に変換して考えた方が都合の良いことが多い。その三要素に対応した色空間には、HSV 色空間 [1] や $YCbCr$ 色空間 [2]、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) 色空間 [1] などがある。

ディスプレイ上に表示可能な色領域を色域 (gamut) と呼ぶ。RGB 空間の色域は、R, G, B ともに [0, 255] とした立方体であり、ある画素値 (色) が表示可能なものであるかどうかの判定は非常に簡単である。また、仮に色域外の画素値がある場合、値を修正して色域内に収めることも容易である。HSV 空間の定義は何種類かあるが、例えば A.R. Smith の 6 角錐モデル [3] では、H, S, V ともに [0, 1] とした立方体が色域である。HSV 空間も RGB 空間と同様、色域が把握しやすい。しかし、 $YCbCr$ 空間や $L^*a^*b^*$ 空間では、いずれか一要素が変化するに

従って、残りの二要素における色域の断面形状が複雑に変化する。YCbCr空間の色域については、重村らによって明らかにされているが[2]、CIELAB空間については未だ明らかにされていない。

本報告では、CIELAB色空間の色域を把握する方法を提案する。まず、ある画素値が色域内の値であるか否かを判定する方法を示す。その後、二分法を用いることで、ある色相の下での表示可能な最大の彩度や明度を求める方法（色域を把握する方法）を提案する。更に、色域を把握することで可能になるカラー画像処理手法を紹介し、色域把握の有効性を示す。

2. CIELAB色空間

本報告では、カラー画像はsRGB (standard RGB) [1]により記録されているとする。ここでは、sRGBの値をCIELAB色空間上の値に変換する方法について述べる。

画像ファイルに記録されたRGB値をCIELAB空間上の値に変換するには、まず、 γ 補正によりリニアRGB値を得る。その後、リニアRGB値をCIE 1931 XYZ空間の値へと変換し、XYZ値から $L^*a^*b^*$ 値を得る。具体的な変換方法を以下に示す[1]。

画像ファイルのRGB値は[0, 255]の整数(8ビット)で符号化されており、それを E'_{8bit} で表す。ただし、 E の文字は $\{R, G, B\}$ である。リニアRGB値 E_{sRGB} は以下で得られる。

$$E_{sRGB} = \begin{cases} E'_{sRGB}/12.92 & E'_{sRGB} \leq 0.03928 \\ \left(\frac{E'_{sRGB} + 0.055}{1.055}\right)^{2.4} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

$$E'_{sRGB} = E_{8bit}/255, \quad (2)$$

ここで、'はノンリニア値であることを示している。式(1)が γ 補正であり、これは、駆動信号(ノンリニア値)とディスプレイ上での実際の光の強度(リニア値)との関係を表している。次に、リニアRGB値($R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB}$)をCIE 1931 XYZ空間上の値(X, Y, Z)へと次式で変換する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3756 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

最後に、XYZ値からCIELAB空間上の値を得る。

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16, \quad (4)$$

$$a^* = 500\{f(X/X_n) - f(Y/Y_n)\}, \quad (5)$$

$$b^* = 200\{f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)\}. \quad (6)$$

ただし、

$$f(\alpha) = \begin{cases} \alpha^{1/3} & \alpha > 0.008856 \\ 7.78\alpha + 16/116 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

である。また、 X_n, Y_n, Z_n は、標準の光の下での三刺激値である。sRGBでは、標準の光はD65であり、(X_n, Y_n, Z_n)=(95.05, 100.0, 108.9)となる。

また、 a^*, b^* 値に基づいて、

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}, \quad (8)$$

$$h = \arctan(b^*/a^*) \quad (9)$$

が定義される。 C^*, h はそれぞれ、心理メトリッククロマ(CIE 1976 a, b chroma)、心理メトリック色相角(CIE 1976 a, b hue-angle)と呼ばれる。 L^*, C^*, h はそれぞれ、明度、彩度、色相に対応している。ただし、表記を簡単にするために、これ以降、 L^* と C^* をそれぞれ L と C で表す。

3. 色域内の色であるか否かの判定方法

式(4)~(7)から分かるように、RGB空間からCIELAB空間への変換は非線形であり、RGB空間の色域をCIELAB空間の色域に対応づけることは難しい。それゆえ、 $L^*a^*b^*$ (LCh)値では、その画素値が色域内であるか否かの判定は難しい。しかし、 $L^*a^*b^*$ 値をリニアRGB値に変換すれば、判定は容易にできる。そこで、式(1)、(3)~(7)により、画素値を[0, 1]のリニアRGB値(R, G, B)に変換し、

$$D(R, G, B) = d(R)d(G)d(B), \quad (10)$$

$$d(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

で定義される D を計算する。 $D=1$ ならば色域内、そうでなければ色域外の色と判定できる。

4. 二分法を利用した色域の把握方法

本章では、CIELAB色空間の色域を把握する方法を説明する。提案手法は、ある色相において、表示可能な最大彩度と最大及び最小明度を得る方法である。

4.1 表示可能な最大彩度を求める方法

ここでは、ある明度 $L^†$ と色相 $h^†$ を指定した場合において、ディスプレイに表示可能な最大の彩度 $C(L^†, h^†)$ を求める方法を説明する。求める精度は ϵ とする。

(1) $C_{in}=0, C_{out}=C_{max}$ とする。

(2) $C_{out}-C_{in} < \epsilon$ ならば、 $\bar{C}(L^†, h^†)=C_{in}$ として終了。

(3) $C_{mid}=(C_{in}+C_{out})/2$ を求める。

(4) $(L^†, C_{mid}, h^†)$ をリニアRGB値(R, G, B)に変換し、 D を求める。 $D(R, G, B)=1$ ならば、 $C_{in}=C_{mid}$ とする。そうでなければ、 $C_{out}=C_{mid}$ とする。

(5) 手順(2)へ戻る。

ここで、 C_{max} は、CIELAB空間内の最大の C よりも大きな値であり、例えば $C_{max}=200$ で十分である。この色域把握法は、二分法[4]を応用したものである。特に、手順(4)の様子を図1に示す。

4.2 表示可能な最大明度及び最小明度を求める方法

4.1と同様、ある彩度 $C^†$ と色相 $h^†$ を指定したときに、表示可能な最大の明度 \bar{L} または最小の明度 \underline{L} を求める方法について説明する。

ここでは、 $(h^†, C^†)$ の下で、色域内となる \hat{L} が一つ与えられ

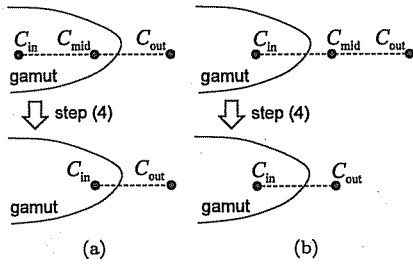


図1 提案手法における手順(4)の様子 (a) C_{mid} が色域内の場合、(b) C_{mid} が色域外の場合

ているとする。この場合、以下のようにして、 $\bar{L}(h^i, C^i)$ を求めることができる (\bar{L} が存在しない場合は、 (h^i, C^i) の下で色域内となる色がないということである)。

- (1) $L_{in} = \bar{L}$, $L_{out} = L_{max}$ とする。
- (2) $L_{out} - L_{in} < \epsilon$ ならば、 $\bar{L}(h^i, C^i) = L_{in}$ として終了。
- (3) $L_{mid} = (L_{in} + L_{out})/2$ を求める。
- (4) (L_{mid}, C^i, h^i) をリニア RGB 値 (R, G, B) に変換し、 D を求める。 $D(R, G, B) = 1$ ならば、 $L_{in} = L_{mid}$ とする。そうでなければ、 $L_{out} = L_{mid}$ とする。
- (5) 手順(2)へ戻る。

最小値 \underline{L} を求めるには、 $L_{in} = \bar{L}$, $L_{out} = L_{min}$ として、上記の手続きの手順(2)から始めればよい。また、 L のとりうる値は $[0, 100]$ の実数であり、 $L_{min} = 0$, $L_{max} = 100$ である。

5. 色域把握法の応用例

本章では、4. で提案した色域把握法の応用例を示す。

よく知られた簡単なコントラスト強調処理として、ヒストグラム均等化法 [1] がある。カラー画像にヒストグラム均等化を施す場合、RGB チャンネルに対して、それぞれ処理を行うことが最も簡単な方法である。しかし、入力画像と比べて色相が変化してしまい、不適切な変換結果となってしまう場合がある。そこで、カラー画像の画素値を色相、彩度、明度の値に変換し、明度や彩度に対してのみ処理を施せば、色相は変化することなく自然な強調結果が得られると期待される。実際、HSV (HSI) 空間でのカラー画像強調法が多く検討されている [5]~[7]。また、 $YCbCr$ 空間における明度及び彩度ヒストグラム均等化については、重村らによって明らかにされており、その有効性が示されている [2]。重村らの手法では、変換の前後で色相が保存され、自然な色強調結果が得られる。

ここでは、CIELAB 空間での明度ヒストグラム均等化を提案する。これは、色域の把握ができて初めて可能になる処理である。以下に、CIELAB 空間における明度ヒストグラム均等化法について説明し、実験を通してその有効性を示す。

5.1 CIELAB 色空間における明度ヒストグラム均等化法

まず、 L 及び C を $[0, 1]$ に規格化する。規格化された L , C をそれぞれ \bar{L} , \bar{C} で表し、

$$\bar{L}_i = \frac{L_i - \underline{L}_i(C_i, h_i)}{L_i(C_i, h_i) - \underline{L}_i(C_i, h_i)}, \quad (12)$$

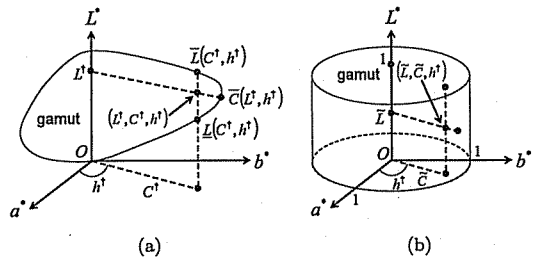


図2 明度と彩度の規格化の様子 (a) CIELAB 色空間、(b) 円柱座標

$$\bar{C}_i = C_i / \bar{C}(L_i, h_i) \quad (13)$$

で定義する。ここで、下付きの i は、画素 i における値であることを表す。色相 h は、画像の自然さを保つために変換の前後で不変とするので、規格化の必要はない。また、 \bar{L} , \underline{L} を求める際の \bar{L} は、 L_i とすればよい。この規格化は、色域内の値を円柱座標上の値に変換するものである。この規格化の様子を図2に示す。

次に、 \bar{L} に対して、通常のヒストグラム均等化 [1] を施す。ただし、 \bar{L} は $[0, 1]$ であることに注意する。ここでは、 $\lfloor 100\bar{L} \rfloor$ とした明度に対してヒストグラム均等化を行い、均等化後の明度を 100 で割って $[0, 1]$ としたものを \bar{L}' とする。 $\lfloor x \rfloor$ は床関数であり、 x を超えない最大の整数を表す。

最後に、ヒストグラム均等化後の (規格化された) 値 (\bar{L}', \bar{C}) を通常の L^*C^*h 空間における値 (L', C') に変換する。具体的には、以下のようにする。

$$L'_i = \bar{L}'_i \times \{\bar{L}(C_i, h_i) - \underline{L}(C_i, h_i)\} + \underline{L}(C_i, h_i), \quad (14)$$

$$C'_i = \bar{C}_i \times \bar{C}(L'_i, h_i). \quad (15)$$

出力画像は、 (L', C', h) を RGB 値に変換して得る。

この明度ヒストグラム均等化法は、重村ら [2] が提案した $YCbCr$ 空間における彩度ヒストグラム均等化法に倣ったものである。

5.2 実験

実験により、CIELAB 空間における明度ヒストグラム均等化法の有効性を示す。他の色空間 (RGB 空間、HSV 空間) におけるヒストグラム均等化を比較手法とした。RGB 空間を用いる場合は、RGB チャンネルそれぞれにおいて、ヒストグラム均等化を行った。また、HSV 空間 [3] を用いる場合は、明度 V に対してのみヒストグラム均等化を施した。重村らの手法 [2] は、彩度ヒストグラムの均等化を主眼としているので、今回は比較対象としなかった。実験には、標準画像データベース SIDBA [8] のカラー画像を用いた。ここでは、Girl と Pepper の結果について述べる。

はじめに、Girl の結果について述べる。図 3(a) が入力画像であり、(b), (c), (d) が順に、RGB, HSV, CIELAB 空間におけるヒストグラム均等化結果である。いずれの結果画像でも、コントラストの改善が認められる。しかし、図 3(b) では、人物に向かって左側の背景 (壁) の色相が変化しており、入力画

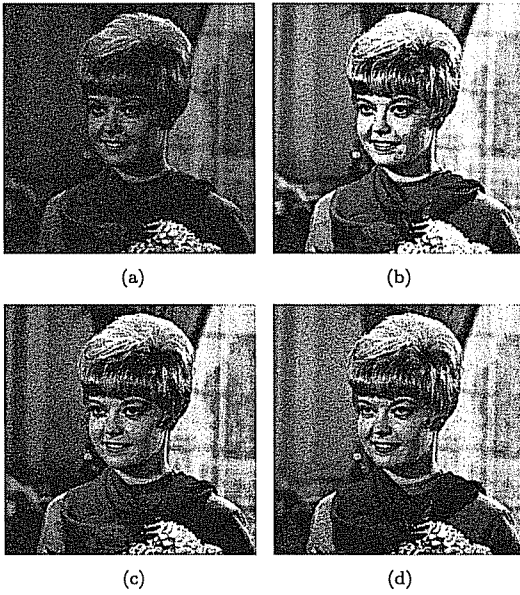


図3 様々な色空間におけるヒストグラム均等化結果 (Girl) (a) 入力画像, (b) RGB 空間, (c) HSV 空間, (d) CIELAB 空間

像(図3(a))と比べると不適切であるといえる。一方、図3(c), (d)より、HSV空間とCIELAB空間での結果ではそのような色相の変化はなく、良好な変換結果であるといえる。また、この例では、HSV空間とCIELAB空間での変換結果において際立った差異はない。

次に、Pepper に対するコントラスト強調結果を図4に示す。(a)が入力画像であり、(b), (c), (d)が順に、RGB, HSV, CIELAB空間におけるヒストグラム均等化結果である。図4(b)より、RGB空間での変換では色相が変化し、不自然な結果画像になっていることが分かる。また、この画像は、元からコントラストが高く、あまり強調を必要としない画像である。しかし、HSV空間での明度ヒストグラム均等化(図4(c))では、黒に近い画素が増え過ぎ、局所コントラストの低下が生じている。例えば、左隣の赤いピーマンの部分で局所コントラストの低下が確認できる。CIELAB空間での明度ヒストグラム均等化(図4(d))では、画像中央の緑のピーマンに見られるように、コントラストが適度に強調されている。一方で、色相の変化や局所コントラストの低下はなく、良好な色変換結果であるといえる。

今回、5.1で提案した明度ヒストグラム均等化法は素朴なものであり、改良の余地はあるものの、CIELAB空間を利用した処理が効果的である例(図3, 図4)を示せたといえる。

6. むすび

本報告では、CIELAB空間において、ディスプレイにおける表示可能領域(色域)を把握する方法を提案した。また、色域を把握することで、有用なカラー画像処理が可能になる例を示した。提案手法は、CIELAB空間以外の、色相、彩度、明度を表現する色空間にも適用可能である。他の色空間に適用する場

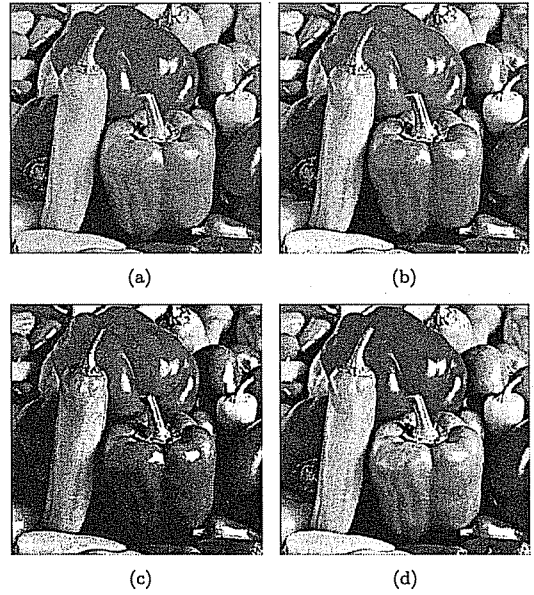


図4 様々な色空間におけるヒストグラム均等化結果 (Pepper) (a) 入力画像, (b) RGB 空間, (c) HSV 空間, (d) CIELAB 空間

合は、定数 C_{max} , L_{max} , L_{min} を適切に変更すればよい。

提案した色域把握法は、 \hat{L} が与えられていることを前提としている。5.1で提案した明度ヒストグラム均等化法では、色域の把握を行う時点で \hat{L} は既知であった。しかし、処理によっては、 \hat{L} を求める必要がある場合が考えられる。ある (h^i, C^i) が与えられたときに、 \hat{L} を求める(若しくはそのような \hat{L} は存在しないと判定する)アルゴリズムの開発が今後の課題である。

謝辞 本研究は科研費(19650041)の助成を受けたものである。

文献

- [1] 高木幹雄, 下田陽久(監修), 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2004.
- [2] 重村進也, 木村誠聡, 田口 亮, “表示可能性を保証したヒストグラム平坦化に基づくカラー画像強調手法,” 信学論(A), vol. J91-A, no.6, pp.699-703, June 2008.
- [3] A.R. Smith, “Color gamut transformation pairs,” ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol.12, no.3, pp.12-19, Aug. 1978.
- [4] 名取 亮, 数値解析とその応用, コロナ社, 東京, 1990.
- [5] A.R. Gillespie, A.B. Kahle, and R.E. Walker, “Color enhancement of highly correlated images I. Decorrelation and HSI contrast stretches,” Remote Sensing of Environment, vol.20, no.3, pp.209-235, Dec. 1986.
- [6] A.R. Gillespie, A.B. Kahle, and R.E. Walker, “Color enhancement of highly correlated images II. Channel ratio and ‘chromaticity’ transformation techniques,” Remote Sensing of Environment, vol.22, pp.343-365, 1987.
- [7] B.A. Thomas, R.N. Strickland, and J.J. Rodriguez, “Color image enhancement using spatially adaptive saturation feedback,” Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, vol.3, pp.30-33, Oct. 1997.
- [8] 坂内正夫, 大沢 裕, 曾根光男, 尾上守夫, “画像処理研究用標準画像データベース SIDBA の運用について,” テレビ学技報, vol.8, no.38, pp.7-12, Dec. 1984.