

色空間および色差の理解を助けるツールの開発

三末 和男^{1,a)}

概要: データ可視化において色は便利な表現要素でありデータの表現において重要な役目を果たしている。その一方で不適切な配色も見受けられる。その要因としては、視覚的表現の作成者の無頓着や知識不足が考えられる。本論文は、色空間および色差の理解を助けるためのツールの開発について説明するものである。そのツールは、色空間の断面を表示し、その断面上に色差を表す多角形を描いて提示する。ツールを利用することで、人間の視覚特性を基準にした際の、色空間のゆがみを把握することができる。開発上の手法を紹介するとともに、ツールの有効性について議論する。

1. はじめに

データ可視化においては、値の表現に色を利用することが多いが、図 1 に示すような適切でない色の利用も数多く見られる。図 1 は、どちらも 11 段階の値、たとえば 0 から 10、を表す配色だと考えて欲しい。図 1(a) は HSV 色空間において色相環の一部を等間隔（等角）に取ったものであり、図 1(b) は RGB 色空間において白と赤の間を等間隔（等距離）に取ったものである^{*1}。図 1(a) では中央付近に緑が連続しているように見えるし、図 1(b) では右端に赤が連続しているように見える。このような配色では色の区別が明瞭でなく、値を読み取るのに支障をきたす。



図 1 不適切な配色の例

データ可視化の設計においてこのような配色が採用されること理由としては、設計者の無頓着の他に、色空間と色差が正しく理解されていないということも考えられる。色空間とは色を表現する空間であり、先に上げた RGB 色空間や HSV 色空間がよく知られている。一般的に 3 次元空間で表され、色空間内の点がそれぞれ色に対応している。つまり、色空間はあらゆる色がつまった空間である。

色差とは人間の感じる色の違いを数値化したものである。色の間の距離と考えることができることから、色空間内でのユークリッド距離も色差と言うことができる。

色指定に広く用いられている RGB 色空間は加法混色に基くことから、工学的には便利なモデルである。ある 2 色の混色がその 2 色をつなぐ直線上に現れるという特徴も備える。しかしながら、RGB 色空間内のユークリッド距離は人間の感じる色差をうまく表してはいない。人間の知覚特性との乖離があるため、RGB 色空間だけに頼った配色設計をすると、人に見せるための視覚的表現としては不適切なものとなる。図 1(b) に示した配色は RGB 色空間内では等間隔にあるが、人の目にはそのように見えないのは、この乖離によるものである。

人間の感じる色差を近似する色差式はいくつか提案されているが、その数式は必ずしもユークリッド距離のように単純ではない。そのため式を見ただけでは、その色差式がどのような特徴を備えているのかを理解するのは容易でない。

本研究の目的は色空間と色差の理解を助けることである。ただし人間の色差そのものの理解を助けるのではなく、人間の色差を近似する色差式の特徴の理解を助けることとする。本論文はそのためのツールの開発について報告するものである。

なお色空間や色差についての基本的な情報は色彩関係の教科書（たとえば、篠田、藤枝 [1]）や Wikipedia^{*2}に詳しく書かれている。そのため本論文では個々に引用することなく、色空間や色差の用語を用いることにする。

¹ 筑波大学 システム情報系
University of Tsukuba

^{a)} misue@cs.tsukuba.ac.jp

^{*1} 左端の白は背景色にまぎれて見えない。

^{*2} https://en.wikipedia.org/wiki/Color_difference

2. 関連技術と関連研究

関連技術および関連研究を、色空間の理解を助けるものと色差の理解を助けるものという2つの観点から紹介する。

2.1 色空間とその理解を助ける手法

色空間の理解を助けるためには、しばしば空間の構造を説明するイラストが用いられる。たとえば、RGB色空間の説明であれば直交する3軸を添えた立方体が描かれることが多い^{*3}。HSV色空間であれば円柱あるいは円錐が、HSL色空間であれば円柱あるいは双円錐が用いられる。RGB色空間については、立方体により R 、 G 、 B それぞれの値が同じ範囲 $[0,1]$ あるいは $[0,255]$ に収まり、各色が直交する R 、 G 、 B により表されることを端的に理解できる。さらには色空間を表す3次元立体の表面を着色することもあり、空間の構造の理解を助けている。このようなイラストは色空間を構成する3軸および空間の構造の理解に有用である。ただし、XYZ色空間、CIELAB色空間、CIELUV色空間などは、そのようなイラストを見かけない。これらの色空間は形状が複雑で、立方体、円柱、円錐のような単純な幾何体ではないことが理由であろう。

XYZ色空間は色度図と呼ばれる断面で表されることが多い[2]。ただし、色度図は3次元空間であるXYZ色空間の理解というよりも、視覚可能な色の分布の理解のために利用される。CIELAB色空間やCIELUV色空間は、3次元立体のイラストよりも、図2に示すような断面を示すことで説明されることが多い。

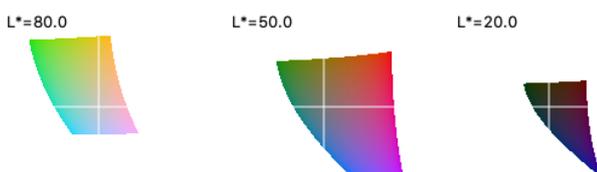


図2 CIELAB色空間の断面 (sRGB色域)

色空間内のすべての点には色が対応している。つまり色空間内には色が詰まっているわけであるが、上記のイラストおよび表面の着色だけでは、空間内にどのように色が分布しているかの把握は難しい。色空間の構造を理解すれば、空間内のどのあたりにどのような色が分布しているかを推測できなくはないが、容易ではない。Gossettが指摘しているように加法混色の演算に慣れていないことも要因の一つであろう[3]。そのため、断面を見せることも理解を助ける。

CIELAB色空間やCIELUV色空間は3次元立体としての形状が複雑であることから、3次元立体の周囲を眺めるこ

^{*3} https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB_color_solid_cube.png など

とができるムービーが作られている(たとえば[4]などに挿入されている)。Color Scheme Designer [5]は、CIELAB色空間内での配色を支援するツールであるが、選択された色がCIELAB色空間内のどこに位置するかを把握できるように、図3に示すような、CIELAB色空間の断面とともに3次元ビューを提供している。

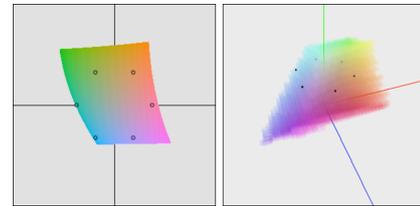


図3 Color Scheme Designer [5]の画面(一部)。左は L^* 軸に直交する断面、右は3次元ビュー

2.2 色差とその理解を助ける手法

色差とは色の違いを数値化したものであり、形式的には色空間内のユークリッド距離で定義することもできる。色差を色空間内のユークリッド距離で定義する場合には、色空間を理解すれば、色差の理解は難しくない。しかしながら、RGB色空間やHSV色空間などでは色空間内のユークリッド距離と人間の感じる色差に乖離がある。この乖離の理解に役立つものとしては、色度図上で人間の感じる色差(異なる色として弁別可能な閾値)を楕円(MacAdam楕円)で表したものがあ。この楕円によって色度図上のユークリッド距離と人間の色差の乖離に気付くことができ、さらに、たとえば、色度図上の緑の領域が広いにもかかわらず色差は大きくないことなどが分る。

CIELAB色空間やCIELUV色空間は色空間のユークリッド距離が人間の感じる色差の近似となるように設計された色空間であり、「均等色空間」と呼ばれる。CIE76色差式(式(1))は L^* 、 a^* 、 b^* の3次元で構成されるCIELAB色空間におけるユークリッド距離として定義されており、これについてもCIELAB色空間を理解すれば、色差の理解は容易であろう。むしろ、人間の感じる色差を空間内のユークリッド距離が近似するように設計しているため、空間がいびつな形状をしており、空間そのものの理解が難しい。

CIE76色差式の他にも、CIELAB色空間の見方を変えたCIELCh(LCh はLightness, Chroma, Hue)色空間に基づくCIE94色差式(式(2))もつくられている。式を見ると、多少の補正がなされているものの、ユークリッド距離の形をしている。したがって、こちらもCIELCh色空間の理解が先となる。

最新の色差式と言えるものはCIEDE2000[6]である。CIEDE2000色差式(式(3))は特定の空間内のユークリッド距離として定義されているのではなく、CIELAB

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (1)$$

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2} \quad (2)$$

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \quad (3)$$

色空間上の2点(2色)を与えたときに, CIE76 色差よりもより人間の感覚に近い色差の値を求める式として定義されている。そのため, 空間を理解すればユークリッド距離として理解できる色差式とは状況が異なる。

Luo らによる CIEDE2000 に関する論文 [6] では, CIELAB の $a^* - b^*$ 平面上に, MacAdam 楕円のような図形を描くことで, CIELAB 色空間における色差の歪みを説明している。コニカミノルタジャパン(株)のWebページ「新しい色差式(CIE DE2000)について*4」には, その図に着色してさらに分りやすくしたものが掲載されている。

Lindbloom.com*5や ColorMine.org*6は2色の値を入力すると CIE76, CIE94, CIEDE2000 などでの色差を計算するツールを提供している。インターネット上には他にもツールが公開されているが, いずれも2色の値を入力すると, 色差を値として出力するものであり, それだけで色差(式)を理解することは容易でない。

色差式の違いを直感的に把握することを目的として作られた図が, Web ページ「色差アルゴリズムの違いをビジュアル化してみた*7」に掲載されている。HSV 色空間の底面を変形した長方形(横軸に Hue を, 縦軸に Saturation を取った平面)において, 平面上のそれぞれの色をあらかじめ用意した13色*8の「近い」ものに置き換えることで, 13色の勢力図のような図が得られる。色差式を変えることで, 「近さ」も変わるため, 異なる勢力図が得られ, その違いが色差式の特徴を表している。これだけで色差式の特徴の理解には十分とは言えないが, 興味深い図である。

3. 開発方針

色空間を理解するとは, (1) その3次元空間を理解することであり, さらに(2) その空間内のユークリッド距離と人間の色差との乖離を理解することであると考えた。

開発方針 1

色空間を表す3次元空間は無限に広がる空間ではなく境界があるため, その境界を示すこと, すなわちその空間を

外から眺めた外形を示すことが空間の理解につながると考えられる。しかし, たとえば RGB 色空間はその外形が立方体であることは分っているが, その知識だけでは空間を理解したとは言いがたい。そのため(1)に関しては, 色空間の理解を助けるために, 内部の色の分布, つまり空間内どのように色が詰まっているかを示すことにした。

開発方針 2

色空間内のユークリッド距離と人間の色差との乖離は, その色空間において色がそれらの差(つまり色差)が均等になるように配置されているという前提に立った時に違和感として知覚できそうであるが, そもそもそのような前提に立って色空間を観察することが必ずしも容易でない。そのため, (2)に関しては人間の色差の代替として, すでに提案されている色差式を利用することにして, 色差式の特徴を色空間において観察できるようにすることにした。

4. 開発したツール

開発したツールの画面例を図4に示す。

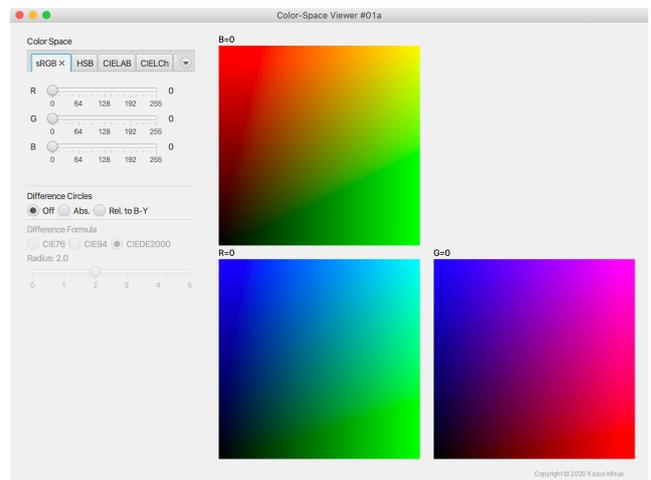


図4 開発したツールの画面例: RGB 色空間の断面を表示

4.1 色空間の断面

色空間の理解を助けるために, 色空間の断面を表示し, その平面上の色の分布を実際の色で示している。図4は, sRGB 色空間の各軸に直交する3つの断面($R = 0$, $G = 0$, $B = 0$)を表示した状態を表している。画面左側にはコン

*4 <https://www.konicaminolta.jp/instruments/knowledge/color/section2/06.html>

*5 <http://www.brucelindbloom.com/>

*6 <http://colormine.org/delta-e-calculator> など

*7 <https://qiita.com/hachisukansw/items/98c218bc5616eaaba9a0>

*8 赤, 橙, 黄, 黄緑, 緑, 青, 紫, 桃, 白, 黒, 灰, 茶, 水

トロールが配置されており、上部には色空間を選択するタブと、断面の位置を指定するためのスライダーが配置されている。sRGB 色空間の場合には、 $R = r$, $G = g$, $B = b$ (r, g, b はそれぞれ 0 から 255 までの数値) のように 3 軸のいずれかに直交する断面を指定できる。色空間としては、sRGB, HSV, CIELAB (CIELCh), CIELUV を選ぶことができる。なお、CIELAB と CIELUV に関しては、色空間の外形は、sRGB による色域を境界としている。

4.2 断面上の色差円

色差式の特徴を色空間において観察するために、色空間の断面上に色差を表す「円」を表示する。ここで言う「円」は、ある点を中心に「色差式に基いた距離で」一定距離(「半径」と呼ぶ)の点からなる集合である。このような「円」を「色差円」と呼ぶことにする。ただし、見かけ上は一般的に真円ではない。図 5 では、RGB 色空間の断面上に、CIE76 の色差式に基く半径 2.0 の色差円が描かれている。色差円は各断面上に 100 個 (=10 行 × 10 列) 描くことにした。各断面上に 100 個の点を格子状に配置し、その点を中心とする色差円を描いている。色差式としては、CIE76, CIE94, CIEDE2000 を選ぶことができる。

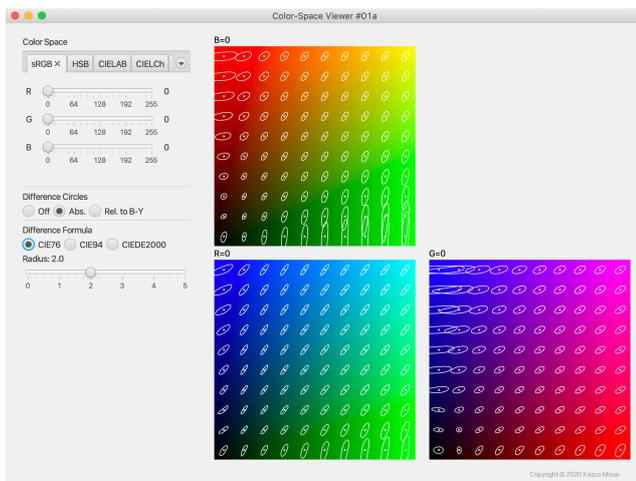


図 5 開発したツールの画面例: RGB 色空間の断面上に色差円を表示

CIE76, CIE94, CIEDE2000 のいずれの色差式でも、黒 (#000000) と白 (#FFFFFF) の距離は 100.0 である*9。その一方で、青 (#0000FF) と黄 (#FFFF00) の距離は、235.2 (CIE76), 98.6 (CIE94), 103.4 (CIEDE2000) とかなり異なる*10。この違いは色差円の大きさの違いとして現れる。しかしながら、色差円の真円からの乖離を空間のゆがみとして捉える際には、大きさの違いよりもゆがみの違いを見たいと考えられる。そこで、青と黄の距離を基準とする相対色差による半径の指定もできるようにしている。赤 (#FF0000) と緑 (#00FF00) の距離も、色差式によ

*9 CIE94 は Graphic Arts の場合。

*10 白色点を D65 として計算。

て異なるが、その違いは青と黄の方が大きい。ちなみに、黒と白、青と黄、青と赤の 3 組を基準として検討したのは、それらが反対色理論における反対色の組であることから、人にとって色差の大きな色の組だと考えたからである。

5. ツール開発に用いた手法

ツールの機能は、色空間の断面を表示し、その断面上に色差円を表示するというものであり、その表示を、スライダーで指定された値に従って更新するというものである。

5.1 断面表示

断面を表示するために、表示領域内をピクセル単位で色空間内の座標に変換し、その位置の色を求めている。CIELAB や CIELUV 色空間の断面を表示する際には、求めた色を sRGB に変換し、sRGB の色域内であれば、その色で当該ピクセルを着色し、色域外であれば、ピクセルは背景色のままとする。これにより、CIELAB と CIELUV に関して、sRGB による色域を境界とする色空間の外形を表示することができる。この方式では、ピクセル単位で色を計算するため、表示領域が広がるほど計算時間がかかる。

5.2 色差円の計算

CIE76 による距離は CIELAB 色空間内のユークリッド距離であるため、色差円の計算も容易である。その一方で CIEDE2000 による距離は、CIELAB 色空間内の 2 点が与えられると求まる数値として定義されている。そのため、ある点から距離 d だけ離れた点を直截的に求めることは容易でない。本ツールの実装においては、ある色空間の断面(平面)において、基準点を通過する直線をあらかじめ決めておき、その直線上で距離 d だけ離れた点を求める問題として扱うことにした。基準点で $t = 0$ となるような媒介変数 t を用いて直線上の点を表し、十分に大きい値と 0 の間で、色差が d となる t を 2 分探索により求めている。なお、 t は連続値を取るため、探索区間が十分に小さい値 ϵ よりも小さくなることを探索の終了条件としている。

色差円は実際には n 多角形として求めている。基準点を中心として等角に開いた n 本の放射線上で、基準点から半径 d の点を 2 分探索により求め、 n 多角形の頂点としている。

5.3 計算の簡略化

第 4.1 節で説明したように、開発したツールではスライダーにより表示する断面を変更できるようにしているが、計算機の描画処理能力が十分でない、1 画面の計算時間がスライダーのドラッグに追い付かない。対策としては、スライダのドラッグイベントは無視し、マウスリリースの時だけ再描画するという方式が考えられる。しかしなが

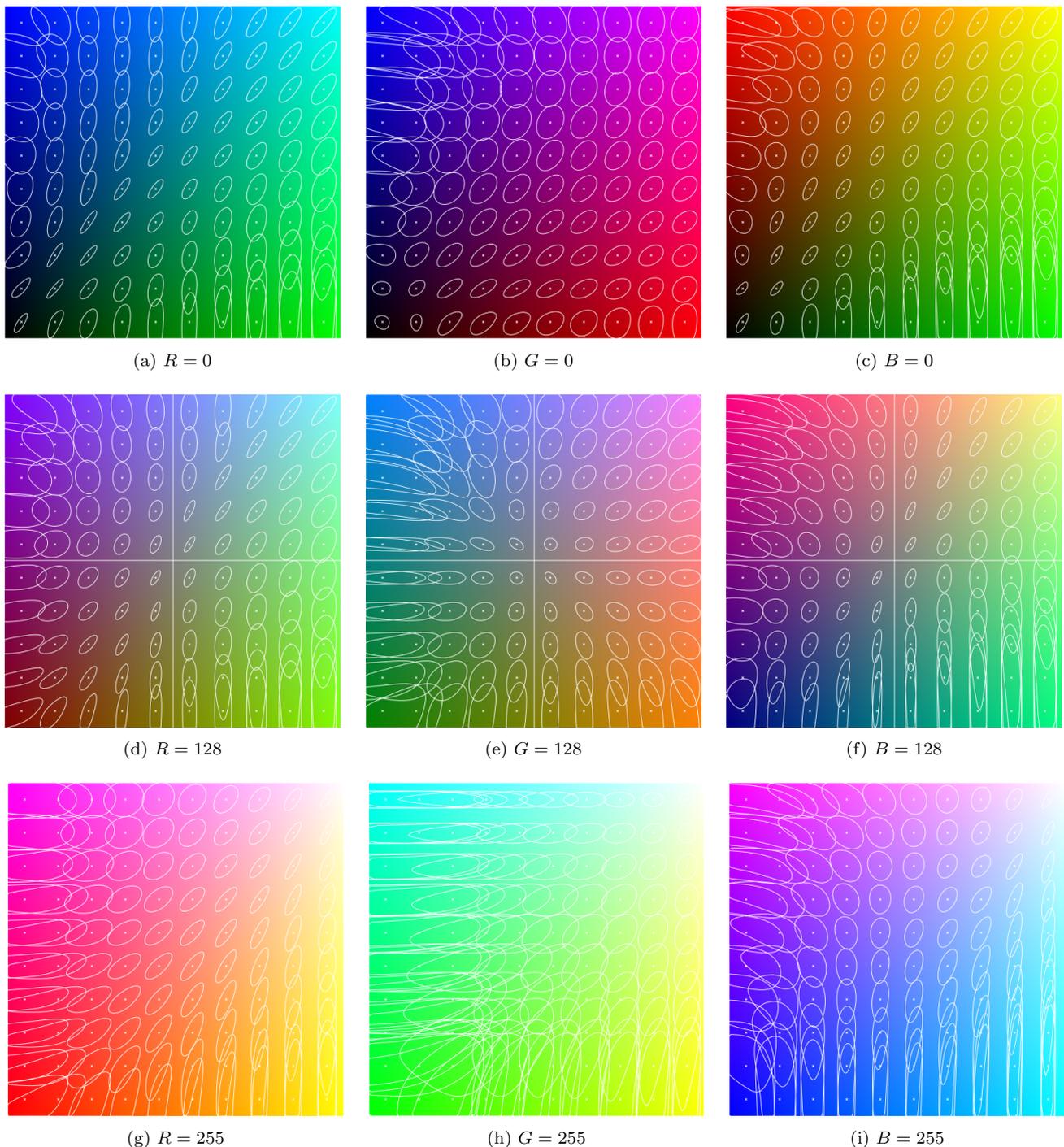


図 6 sRGB 色空間の 9 断面における CIEDE2000 による色差円 (半径 2.0)

ら、その方式では、ドラッグ中の表示は変わらないため、断面が空間内を移動している雰囲気が得られないと考えた。そこで、高速化のために簡略化した断面表示と色差円の計算を実装した。

色空間の断面表示に関しては、スライダーがドラッグイベントを受け取っている間は、ピクセル単位の精細な描画はあきらめ、モザイク画風の表示にした。色の計算回数を減らすことで、1画面の計算の高速化を図っている。

色差円の計算には、色差円の数 (100) × 頂点の数だけ、

2分探索が必要である*11。この計算は断面の計算よりも時間を要する場合がある。そこで、色差円の計算に関しては、描画の1フレームにおいて、毎回 n_0 個の頂点だけを計算し、 m フレーム描画後に精密な $n (= n_0 \times m)$ 多角形が描かれるようにした。スライダーのドラッグ中は、中心点が毎フレーム変わるため、毎回 n_0 個の頂点が新しく計算され、粗い n_0 多角形が表示され続ける。それでも、断面の移動に伴う多角形の変化はある程度把握できるため、描画が変化しないよりも、有用であろうと判断した。なお、今回の

*11 基準点が sRGB 色域外の場合には、探索は行わない。

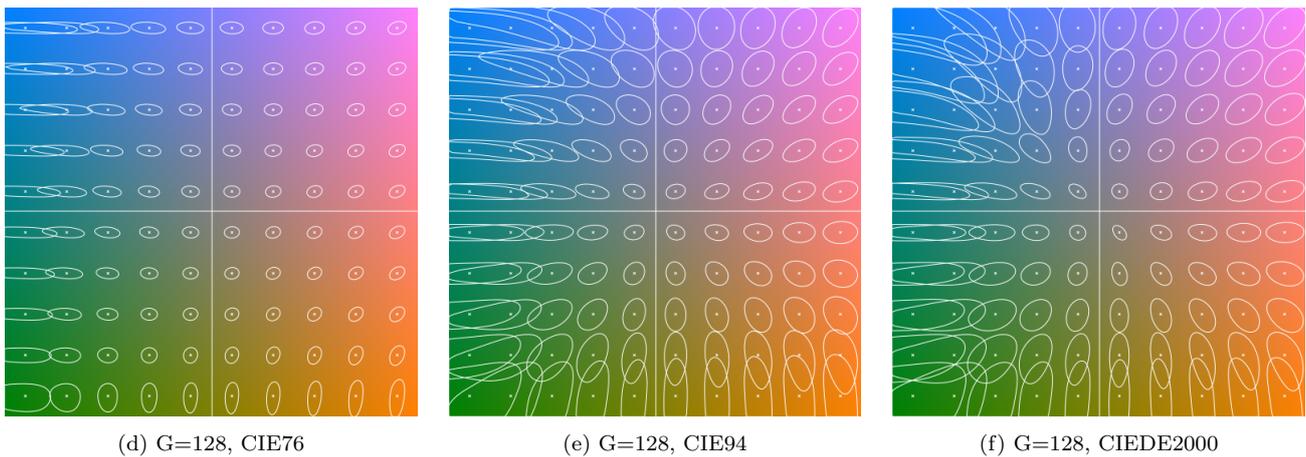


図 7 sRGB 色空間の断面における色差式（絶対値）による違い（半径 2.0）

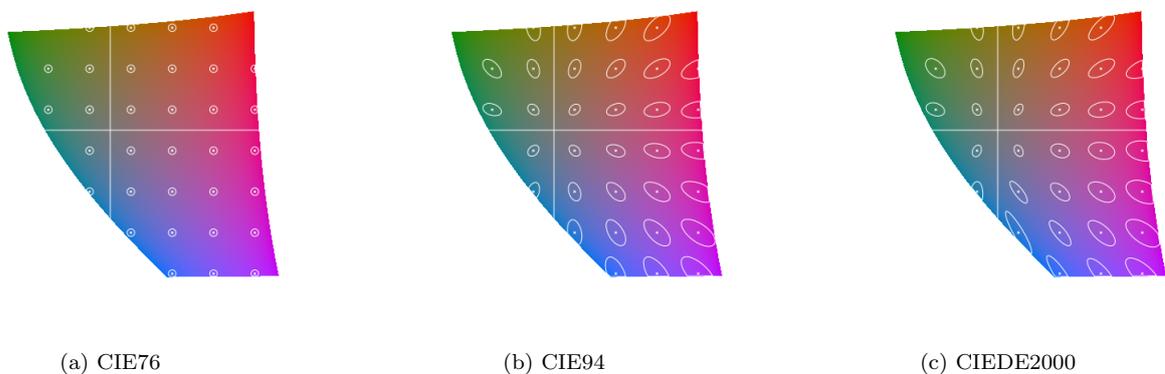


図 8 CIELAB 色空間の $L^* = 50$ 断面における色差式（絶対値）による違い（半径 2.0）

実装では $n_0 = 6$, $m = 32$ とした。

6. 使用例と考察

6.1 RGB 色空間と CIEDE2000 色差式

図 6 は、RGB 色空間上のユークリッド距離と CIEDE2000 色差式の乖離を見るために作成した図である。RGB 色空間を表す立方体の 6 つの表面と、立方体の中心を通る 3 つの断面、それぞれの上に CIEDE2000 色差式による色差円（半径 2.0）を表示している。中心を通る断面図 6(d), (e), (f) の中心はグレー（RGB 色空間での 50% グレー）であり、まずそのあたりは他よりも色差円が小さいことが分る。彩度が高くなると色差円が大きくなっており、特に緑の領域（図 6(a), (c), (d), (f) の右下付近や (h)）は色差円が大きい。また緑でなくても、彩度あるいは明度が高い領域は色差円が大きくゆがんでいる。

6.2 CIE76, CIE94, CIEDE2000 色差式の違い

図 7 は、3 つの色差式の違いを見るために作成した図である。RGB 色空間を表す立方体の中心を通る 3 つの断面と、その上に CIE76, CIE94, そして CIEDE2000 色差式による色差円（半径 2.0）を表示している。どの断面においても、CIE76 の色差円が他の 2 つの色差式よりも小さい

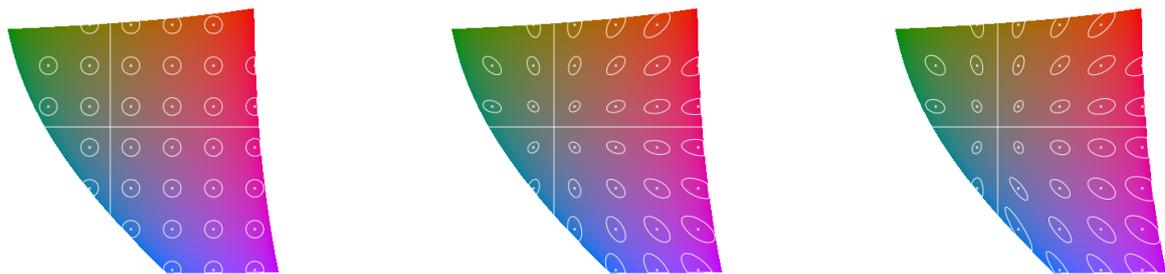
ことが分る。また、色差円の形状もそれぞれ異なることは分るが、それぞれの特性を理解するのは容易でない。

図 8 は、CIELAB 色空間内の断面で同様に 3 つの色差式による色差円を表示したものである。いずれも明度の軸 L^* 軸に直交する断面を表示しており、縦線と横線は a^* 軸と b^* 軸上を表している。CIELAB 色空間においても、CIE76 の色差円が他の 2 つの色差式よりも小さいことが分る。

図 9 は、色差円の形状に着目するために、図 8 と同じ断面上に、青と黄の距離を基準とする相対色差に基く色差円（半径 2.0%）を表示したものである。図 10 と図 11 も同様で、それぞれ a^* 軸と b^* 軸に直交する断面を示している。なお、 a^* 軸による断面はツールでは時計回りに 90° 回転した図が表示されるが、ここでは縦方向が L^* 軸になるように半時計回りに 90° 回転した図を示している。

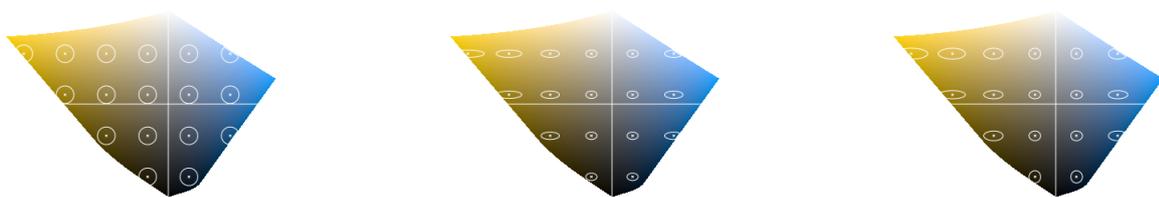
当然のことであるが、CIELAB 色空間では、CIE76 の色差円は真円として描かれる。それに対して、CIE94 色差式や、CIEDE2000 色差式では、色差円が彩度方向に長くゆがんでおり、彩度が高い領域において人間の色差が鈍感である^{*12}ことに対して補正がなされていることが分る。さらに、図 9(c)（や図 8(c)）の右下の青色の領域に着目すると、楕円が中心方向よりも左に傾いて長くなっていること

*12 CIELAB 色空間が人間の感度を過大評価している



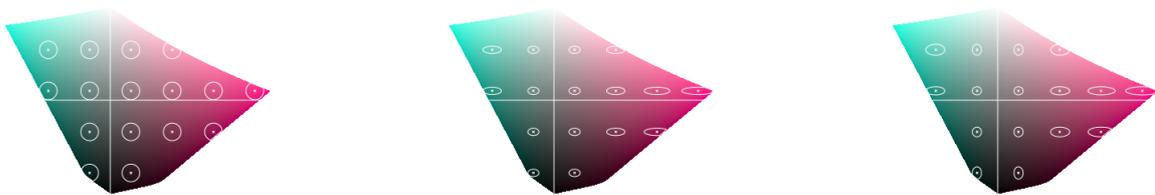
(a) CIE76 (b) CIE94 (c) CIEDE2000

図 9 CIELAB 色空間の $L^* = 50$ 断面における色差式 (相対値) による違い (半径 2.0%)



(a) CIE76 (b) CIE94 (c) CIEDE2000

図 10 CIELAB 色空間の $a^* = 0$ 断面における色差式 (相対値) による違い (半径 2.0%)



(a) CIE76 (b) CIE94 (c) CIEDE2000

図 11 CIELAB 色空間の $b^* = 0$ 断面における色差式 (相対値) による違い (半径 2.0%)

が分る。このあたりが、CIEDE2000 色差式による補正の効果 (の一部) を表していると言える。

6.3 HSV, CIELCh 色空間

HSV 色空間や CIELAB (CIELCh) 色空間などは、平面の断面よりも無彩色からなる直線を中心軸とする円柱の表面を断面とした方が直感に合うことがある。

図 12 と図 13 は、それぞれ HSV 色空間の 3 つの断面と CIELCh 色空間の 3 つの断面を表している。図 12(a) は $V = 0.80$ の断面であり、HSV 色空間を円柱や円錐で表した時の底面の様子とはほぼ同じである。同図中に $S = 0.32$ の円と $H = 0$ の直線が表示されている。図 12(b) は $S = 0.32$ の断面であり、円柱の側面を展開したものと言える。図 12(c) は $H = 0$ の断面である。 $H = 0^\circ$ の色相は赤であるが、その逆側 ($H = 180^\circ$) のシアンも左側に表示される。HSV 色空間は円錐で表されることもあるように円柱の下に行くほど黒に近付き、色相や彩度の影響が小さくなる。

図 12(b) と (c) の底辺付近で色差円が横方向に大きく伸びていることがこのことを表している。HSV 色空間は、 S が $[0, 1.0]$ の範囲内であれば、円柱の側面はすべて色で埋まっているが、CIELCh 色空間では、 C^* の値によって円柱の側面がまばらになる。図 13(b) は $C^* = 32$ の断面であるが、青色部分には彩度の高い色が乏しいことが分る。

7. まとめと今後やりたいこと

色空間と色差の理解を助けることを目的としたツールの開発について説明した。そのツールの機能は、(1) 色空間の断面を表示する、(2) 断面上に色差円を表示するという単純なものである。単純とは言え、筆者の知る限り、このようなツール、特に「色差円」を表示するツールは他にはない。

色空間と色差の理解を助けることを目的としてツールを開発したが、筆者自身の色空間および色差式に対する理解は、ツールの使用よりもむしろツールの開発過程によって

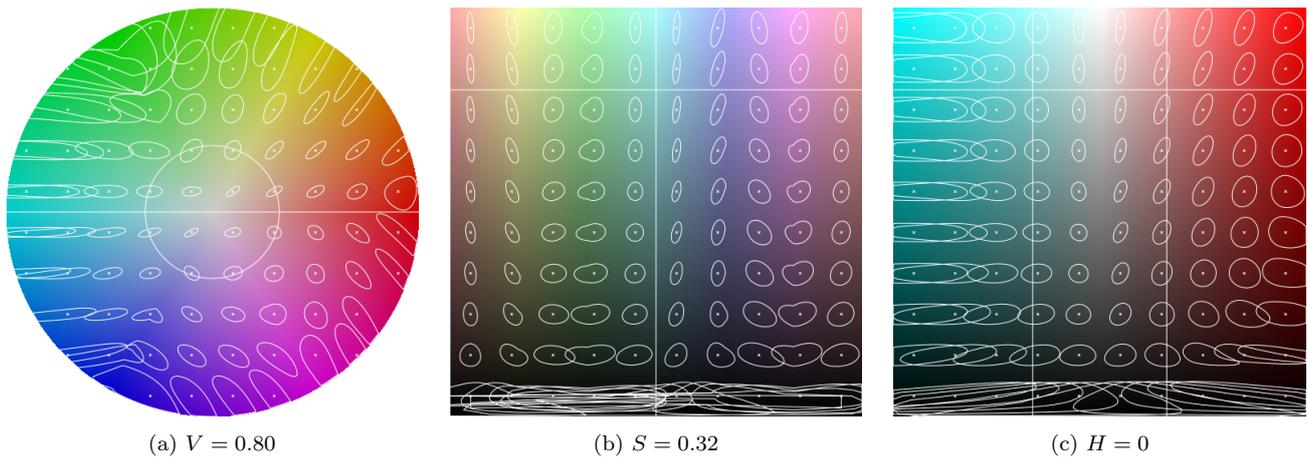


図 12 HSV 色空間の各断面における CIEDE2000 による色差円 (半径 2.0)

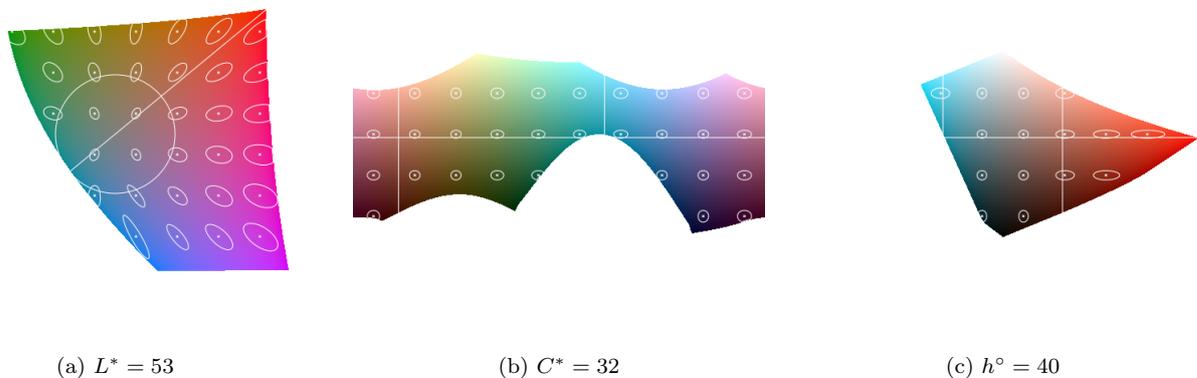


図 13 CIELAB (CIELCh) 色空間の各断面における CIEDE2000 による色差円 (半径 2.0)

進んだと感じている。開発過程で予期しない図や形状が表示された際に、それが色空間や色差式の新しい姿なのか、プログラムのバグなのか、その切り分けに苦労した。色差式の計算など、インターネット上の関連情報とも照合しながら検証したが、まだバグが残っているかも知れない。当然のことながら、もし大きな間違いがあれば、第 6 節の考察は無意味になる可能性がある。

デバッグは継続するとして、今後はさらに以下のような機能を追加したいと考えている。

- 色差円の分布を同心円状にする。現在の実装では色差円は格子状に配置している。CIELAB 色空間や CIELUV 色空間で L^* 軸に直交する断面では中心に無彩色があり放射状に彩度が高くなる。色差円を同心円状に配置する方が、彩度と色差の関係を読み取りやすくなると考えられる。
- 色差円の表現を工夫して比較を容易にする。3 種類の色差式を実装しているが、現状では、色差式による違いを観察するためには、画面の切り替えが必要である。比較のための表現手法 [7] に基いた表現を設計したい。

参考文献

- [1] 篠田 博之, 藤枝 一郎. 色彩工学入門-定量的な色の理解と活用-. 森北出版, 2007.
- [2] 犬井正男. 色度図の着色. 東京工芸大学工学部紀要, Vol. 36, No. 1, pp. 55-62, 2013.
- [3] Nathan Gossett and Baoquan Chen. Paint inspired color mixing and compositing for visualization. In *IEEE Symposium on Information Visualization*, pp. 113-118, 2004.
- [4] Wikipedia. CIELAB color space — Wikipedia, the free encyclopedia, 2019. [Online; last edited on 11 December 2019, at 05:57 (UTC)].
- [5] Kazuo Misue and Hatsune Kitajima. Design tool of color schemes on the CIELAB space. In *Proceedings of 20th International Conference on Information Visualisation (iV 2016, July 20-22, 2016, Lisbon, Portugal)*, pp. 33-38, 2016.
- [6] M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *COLOR research and application*, Vol. 26, No. 5, pp. 340-350, 2001.
- [7] Michael Gleicher, Danielle Albers, Rick Walker, Ilir Jusufi, Charles D. Hansen, and Jonathan C. Roberts. Visual comparison for information visualization. *Information Visualization*, Vol. 10, No. 4, pp. 289-309, October 2011.