

CIEDE2000 色差式を用いた量的データ表現のための配色作成法

三井稔之^{†1} 三末和男^{†2}

概要: 情報可視化における配色については、これまで多くの研究がなされてきた。しかし我々の知る限りでは、量的データを表現する配色の作成について色差が厳密に扱われている手法は存在しない。そこで我々は新たに、最新の色差式である CIEDE2000 色差式を用いて色差が均等な配色の作成手法を提案する。CIEDE2000 色差式は CIE76 に比べて計算が複雑であるために CIELAB 色空間の値から色差を推測することが難しい。提案手法では力学モデルを用いて CIELAB 色空間を探索することで良い配色を求める。また、提案手法では量的データに適した配色として、与えられた 2 色を元にグラデーションを作成する。この方法では RGB で表現可能なすべての 2 色から配色を作成することが可能であり、可視化の設計者はあらゆる色の利用を検討することができる。

Creating Color Scheme for Quantitative Data Using CIEDE2000

TOSHIYUKI MITSUI^{†1} KAZUO MISUE^{†2}

Abstract: Many studies have been done on coloration in information visualization. However, to the best of our knowledge, there is no way that color differences are handled strictly for the creation of color schemes that represent quantitative data. Therefore we propose a new method of creating a color scheme with even color difference using CIEDE 2000, that is the latest color difference formula. As CIEDE 2000 color difference formula is more complicated than the CIE 76, it is difficult to estimate the color difference from the value of the CIELAB color space. In our proposed method, a good color scheme is obtained by searching in the CIELAB color space using a dynamic model. In our proposed method, a gradation is created based on the given two colors as a color scheme that is suitable for quantitative data. With this method, it is possible to create a color scheme from all two colors that can be represented by RGB, and the visualization designer can examine using various colors.

1. はじめに

量的データを表現するための配色には主にグラデーションが利用され、これまでもその作成についての研究がなされてきた。現在、多くの可視化ツールやプログラミング言語の可視化用ライブラリには ColorBrewer[1]の配色やそれを元にした配色が組み込まれている。しかし、ColorBrewerの配色は、数学的な理論あるいは定量的な評価に基づいたものではなく、Brewerらのチューニングによって作成されたものである。そのためそれらは色差の均一性を保証しない。また、用意された配色の種類には限りがあり、異なるイメージの配色を利用したい者は独自に配色を作成する必要に迫られる。そこで、我々は CIEDE2000 色差式を用いて、各階調間での色差が均一になるようなグラデーションを自由に作成する手法の開発を目指している。本論文では提案する作成手法について述べる。また提案手法について主観的評価を述べ、今後の方針を示す。

CIEDE2000 と CIE76

色差には、人間が感じる 2 色の心理的差異(i)と、色空間上での 2 色の距離(ii)という 2 つの意味がある[10]。(ii)の色差は色空間に依存し、それぞれの色差式から計算される数値で表現される。

CIEDE2000 色差は、CIELAB 色空間内の 2 点の座標を元に以下の式で計算される[7]。

$$dE_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right) \dots (1)$$

CIEDE2000 色差式は最新の色差式で、最もよく人間の視覚特性を反映している。すなわち、(i)としての色差に最も近似された(ii)としての色差である。一方で、計算式が複雑であることや CIELAB 色空間が歪なために、CIELAB 色空間を均等に分割するなどの簡単な方法で色差が均一な配色を求めることが困難である。可視化の配色についての研究では、計算時間の増大やその計算式の複雑さから CIE76(CIELAB 色空間上のユークリッド距離)の利用が選択されることがある[9]。しかし我々は、色差として CIEDE2000 色差を用いることでより人間の知覚に対応した配色が得られることをねらいとする。以下、色 A と色 B の色差を $dE^{A,B}$ と表記する。またそれが CIEDE2000 色差である場合は、 $dE_{00}^{A,B}$ と表記する。

2. 関連研究

可視化における配色研究は多岐にわたる。ここでは特に量的データを表現する配色の研究について言及する。これまで、可視化用配色作成のためのいくつかのツールが開発

^{†1} 筑波大学
University of Tsukuba.
mitsui@vislab.cs.tsukuba.ac.jp

^{†2} 筑波大学
University of Tsukuba.
misue@cs.tsukuba.ac.jp

されてきたが、量的データを表現する配色を扱うものとしては、Bergman の PRAVDAColor[3] や、Brewer の ColorBrewer[1]、Mittelstadt らの ColorCAT[2]といったツールが挙げられる。これらのツールは量的データの表現に限らず、可視化用の配色作成を支援するもので、ユーザは可視化するデータの尺度や次元に応じて適した配色を作成あるいは選択する。ただし、これらのツールは配色の作成において、色差が厳密には考慮されていない。

また Wijnfelaars らは、CIELUV 色空間と呼ばれる均等色空間を用いたカラーパレット作成の研究[4]を行った。CIELUV 色空間は CIELAB 色空間と同じように均等色空間であるが、ユークリッド距離や CIEDE2000 色差では彼らにとって思うような配色が得られなかったため、彼らは独自の距離関数を定義して配色の作成を行った。

3. 良い配色の条件

本研究で扱う量的データ表現のための理想的な配色について述べる。色を利用して、量的データをその値の分布によらず均等な n 段階に分割して表現する場合を考える。このとき、以下に示す I~III の条件を満たす配色を理想的な配色とする。

- I. 配色は n 階調のグラデーションである。(以下本論文では i 階調目の色を p_i として表す)
- II. 隣り合う階調の色差(p_i と p_{i+1} の色差)は $i = 1, \dots, n-1$ の範囲において一定である。すなわち、 $dE^{p_1, p_2} = dE^{p_2, p_3} = \dots = dE^{p_{n-1}, p_n}$ である。
- III. p_i と p_{i+k} の色差は dE^{p_1, p_2} の k 倍である。すなわち、 $dE^{p_i, p_{i+k}} = kdE^{p_1, p_2}$ である。ただし、 k は 1 以上 $n-i$ 以下の整数である。

4. 色空間

本研究では、色を CIELAB 色空間で表現し、その値から CIEDE2000 色差を計算する。ここでは、3 節で述べた理想的なグラデーションを作成することにおいて、この色空間と色差の組み合わせが適当であるかどうかについて述べる。

4.1 RGB、HSV

RGB や HSV は、一般に馴染み深い色空間である。ただし、これらの色空間は均等色空間ではないため、数値を単純に変化させるだけでは条件 II を満たすような、色差が一定の配色を作成することは不可能である。

4.2 CIELAB+CIE76

CIELAB 色空間は、色を L^*, a^*, b^* の 3 値で表現する均等色空間である。CIE76 は CIELAB 色空間でのユークリッド距離であり、(ii) としての色差の一種である。CIE76 を色差として利用することで 3 節で述べたような条件を満たすグラデーションを容易に作成することができる。例えば、2 色を結ぶ線分からその長さを $n-1$ 等分する $n-2$ 点を決定することで 3 節で述べた I~III の条件を満たすグラデーショ

ンが作成可能である。しかし、CIEALB 色空間は均等色空間として設計されたものの、知覚的に非均等であることがわかっている[5]。

4.3 CIELAB + CIEDE2000

CIEDE2000 色差式は、現在最も知覚的均一性を確保する色差式である。この式は、CIELAB 色空間から 2 色を与えると色差を返すが、計算式が複雑であり CIELAB 値の変化によって色差がどう変化するのか、CIE76 に比べて推測が難しい。例えば色 A と色 B の色差を考える時、色 B の L 値を 1 変化させると、CIE76 では色差はその値に比例して変化するが、CIEDE2000 ではその限りではない。また、CIELAB 色空間で 2 色を結ぶ線分を $n-1$ 等分するような配色は CIEDE2000 色差が均等ではない。

5. 提案手法

理想的な配色を作成するためには、CIELAB と CIEDE2000 の組み合わせが適しているが、作成には CIELAB 色空間内の探索が必要である。本節では、CIELAB 色空間を探索して配色を作成する手法を説明する。

本手法では、ある 2 色(p_1, p_n)とグラデーションの階調数 (n)をもとに、開始色が p_1 、終了色が p_n であるような n 階調 (開始色と終了色を含む)のグラデーションを作成する。色は CIELAB 色空間で表現し、点 x で色 x の CIELAB 色空間上での座標を表す。

本手法では CIELAB 色空間での中間色(p_2, \dots, p_{n-1})の初期配置を決定した後、力学モデルを利用して漸次的に修正を行うことでグラデーションを作成する。いくつかの初期配置について力学モデルを適用し、得られた配色の中から最も良いと考えられるものを選択する。初期配置の決定と力学モデルによる修正について、5.1 および 5.2 で述べる。5.3 では最終的にグラデーションを選択する評価指標について述べる。

5.1 初期配置の決定

与えられた 2 色から n 階調のグラデーションを作成するには、与えられた 2 色を除いた $n-2$ 個の色を決めなければならない。中間色 p_i ($2 \leq i \leq n-1, n \in \mathbb{Z}$) は以下の式で定める点 q_i について、 q_{i-1} と q_i を対角にとり各辺が CIELAB 色空間の 3 軸に平行な直方体の内部かつ、CIELAB 色空間に収まる (RGB で表現可能な) 領域からランダムに決定する。

q_i はすなわち、点 p_1 と点 p_n を含む線分 $p_1 p_n$ を $n-2$ 等分する点列の中の、 p_1 から i 番目の点であり、 $q_1 = p_1$ である。

$$q_i = p_1 + (i-1) \frac{p_n - p_1}{n-2} \quad \dots (2)$$

仮に、CIELAB 色空間において p_1 と p_n を結ぶ線分上からその線分を $n-1$ 分割する $n-2$ 点を選択すると、力学モデルの探索空間がその線分上に限られることになる。CIELAB 色空間での線分上に、3 節で述べた I~III の条件を

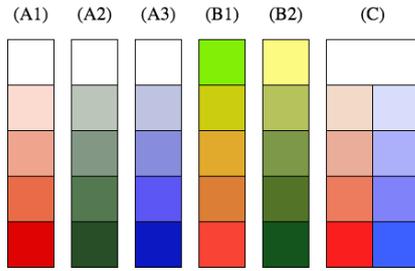


図 1. 提案手法で作成可能な配色例

Figure 1. Examples of color scheme created by our method

満たす色の組み合わせが存在するとは限らないため、CIELAB 色空間での線分上だけを探索することは望ましくない。

5.2 力学モデル

5.1 に述べた方法で点列 $P(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$ を作成し、力学モデルを用いて修正する。点 $p_i (2 \leq i \leq n-1, n \in \mathbb{Z})$ に対して働く力 F_i を以下のように定義する。

$$F_i = d_{i-1,i} u_{i-1,i} + d_{i,i+1} u_{i+1,i} \quad \dots (3)$$

$$d_{i,j} = \frac{dE_{00}^{p_i p_j} - \overline{dE_{00}}}{\|p_i - p_j\|}$$

$$u_{i,j} = \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|}$$

$$\overline{dE_{00}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} dE_{00}^{p_i p_{i+1}}$$

すなわち、力 F_i は点 p_i とそれを基準とした前後の点に対する「色差の偏差」×「単位ベクトル」の和である。提案手法ではすべての中間色についてそれぞれに働く力 F_i を計算し同時に加算する。その加算を 1 ステップとし、1 ステップ後の点 p_i を点 p'_i としたとき、 $p'_i = p_i + \frac{1}{t} F_i$ として計算する。 t は 1 以上の実数とする。これは各ステップの変化量を抑えることによって、点 p_i が振動あるいは発散することを防ぐための定数である。これを、前後の色差の分散が十分に小さくなるまで繰り返すことで、5.1 で作成した点列を修正する。筆者らの経験では、 t は 1.5 から 2 の範囲において

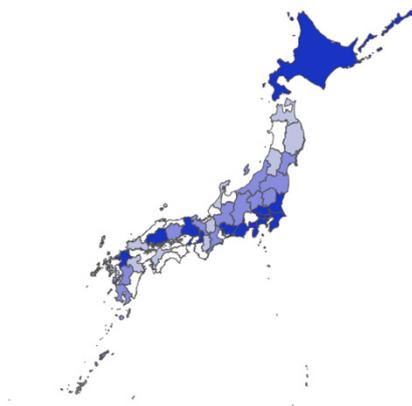


図 3. 図 1(A3)を用いた可視化

Figure 3. Visualization using Fig.1 (A3).

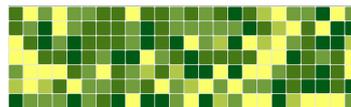


図 4. 図 1(B2)を用いた可視化

Figure 4. Visualization using Fig.1 (B2).

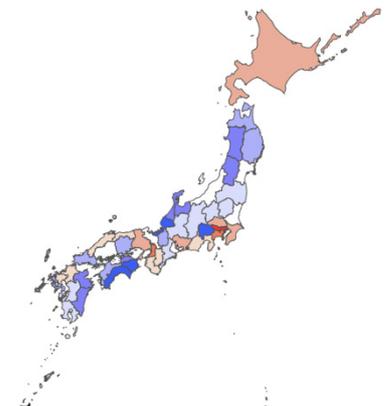


図 5. 図 1(C)を用いた可視化

Figure 5. Visualization using Fig.1 (C).



図 2. 青色を含む作成結果

Figure 2. Color scheme including blue

良い配色を得ることができた。

5.3 選択

我々の経験では 5.2 で述べた力学モデルは、中間色の初期配置に対する依存度が高く、良い結果を得るには良い初期配置を与える必要がある。しかし、現状ではよい初期配置がどのようなものか判明していないため、配色を幾つか作成し、最良であると考えられるものを最終的に選択することで、局所的最適解に陥ることがないようにしている。その際、前後の色差の分散と、条件 III にある k の誤差の総和 (以下倍率誤差の総和と呼ぶ) が小さいものが最良であるとして評価する。分散 s^2 および、倍率誤差の総和 $S_{\Delta k}$ はそれぞれ以下の式で表される。

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (dE_{00}^{p_i p_{i+1}} - \overline{dE_{00}})^2 \quad \dots (4)$$

$$S_{\Delta k} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| \frac{dE_{00}^{p_i p_j}}{dE_{00}^{p_1 p_2}} - |j - i| \right| \quad \dots (5)$$

分散が 0 であれば条件の II を、倍率誤差の総和が 0 であれば条件の III を満たす。よって、これらが小さい配色がより理想的な配色に近く、良い配色であると考えられることができる。

6. 作成可能な配色例とその応用

まず、提案手法を用いて作成した配色を図 1 に示す。(A)

のグループはそれぞれ白から赤・緑・青へのグラデーションである。(B)のグループは有彩色から有彩色へのグラデーションである。これらはどちらも正負どちらか一方の値を持つ量的データの表現に利用することができる。(C)は(A)を2つ組み合わせることで作成することができ、正負の値を持った量的データの表現に利用することができる。これらの配色は、3節で述べた手法において、生成する数を50とし、力学モデルの終了条件を $s^2 \leq 0.01$ 、反復上限回数を1000回として作成した。図3には(A3)を利用したコプロレスマップを、図4には(B2)を利用したヒートマップを、図5には(C)を利用したコプロレスマップを示す。主観的ではあるが、各図において判別のつきにくい段階はなく、またどこかの段階が突出している印象もない。これにより、これらの配色が量的データの表現に利用可能であることが考えられる。

次に、提案手法で作成した配色と、CIELAB色空間の線分上等間隔に区切ったもの、そしてColorBrewerの配色を、 s^2 と $S_{\Delta k}$ について比較する。比較する配色は、ColorBrewer2.orgでのSequential Single Hueに用意された6種の配色(5-class)と、それらの開始色と終了色をもとに作成した配色である。図6に、各配色での隣接する階調の色との色差についての箱ひげ図を示す。表1で、これらの配色における $S_{\Delta k}$ を示す。また、表2には提案手法で作成し、比較に用いた配色のCIELAB値を掲載する。なお、ColorBrewer(CB)はColorBrewerの配色を、CIELAB(LAB)はCIELAB色空間を等間隔に区切った配色を、ProposedMetho(PM)は提案手法で作成した配色を表している。

図6を見ると、他の手法に比べて提案手法の分散は非常に小さく、表1を見ると提案手法で作成した配色の倍率誤差の総和が最も小さいことがわかる。これらにより、提案手法で作成した配色が、3節で述べた理想的な配色に最も近いことがわかる。それに対してColorBrewerの配色は、提案手法に比べて分散が大きく、倍率誤差の総和も大きい。分散が大きいということは、色の変化が均一でないということであり、倍率誤差の総和が大きければ、値の比較が難しくなってしまう可能性がある。

一方で図6より、提案手法の色差の平均が他の手法のそれに比べて小さい傾向にあることがわかる。つまり、階調

表1. 各手法で作成した配色の倍率誤差の総和

Table 1. $S_{\Delta k}$ of each color scheme

	Red	Green	Blue	Orange	Purple	Grays
CB	4.994	3.916	9.596	7.576	13.37	27.97
LAB	1.598	1.918	4.350	2.094	1.476	11.39
PM	0.929	0.728	0.665	1.009	1.158	2.572

が多くなるあるいは指定した開始色と終了色の色差が小さい場合には、隣接する階調が判別不可能であるような配色を作成してしまう可能性が、他の手法に比べて高い。

7. 議論

6節に示したことから、提案手法を用いて種々の2色から量的データの表現に利用可能な配色の作成が可能であることがわかる。一方で、提案手法には改良の余地が存在する。5.3でも述べたが、提案手法の力学モデルは初期配置への依存度が高く、よい初期配置を与える必要がある。その初期配置の決定において、現在は5.1で述べた単純な決定法を採用しているが、今後は初期配置から力学モデルを経て配色が変化の様子を検証し、良い配色を得やすい初期配置について分析していく。

また、青色方向のグラデーションの作成が困難であることが課題として挙げられる。提案手法で作成された青色方向を含む配色の1つを図2に示す。図2のグラデーションは白から青のグラデーションの途中に紫が含まれており自然なグラデーションに感じづらくなってしまっている。これは、力学モデルにおいてCIEDE2000色差式中 R_T の項を考慮していないためだと考えられる。この項は、CIE76では青色の色相において色弁別楕円が回転してしまうことを修正するものである[7]。青と紫はCIELAB色空間上で非常に近い場所に分布しており、回転を考慮しないために紫方向の力が青方向に比べて大きくなってしまっていると考えられる。これについては力学モデルに色相についての制限などを与えることを検討している。

次に、低彩度色を回避できないという問題が有る。正負一方の量的データを表現する際、開始色と終了色が高彩度であり、中間色が低彩度であることは好ましくない。実際、ColorBrewerでは低彩度部分を避けるような設計がされている。しかし、本提案手法では、CIELAB色空間上で低彩

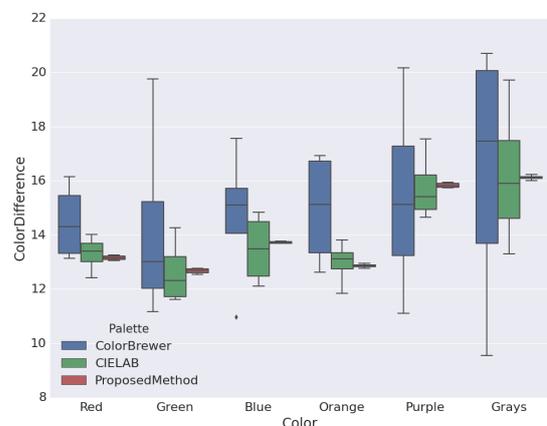


図6. 各手法で作成した配色における隣接する階調との色差を示す箱ひげ図
Figure 6. Color difference between adjacent tone levels of each color scheme.

度を挟んで位置する2色を入力として与えた場合、低彩度部分を回避するような計算は行われぬ。

提案手法を利用することで、あらゆる2色からグラデーションを作成することができるが、得られた配色が必ずしも量的データの表現に効果的であるとは限らない。例えば、色差が非常に小さく各段階での見分けがつかないことが考えられる。また、配色の設計者がどのようなデータに対する配色を設計しているのかは考慮されないため、設計者が誤った知識に基づいて配色を作成すると、結果としてデータに適していない配色を利用してしまふ可能性がある。

また、CIELAB色空間が歪であることや、RGB色空間のように馴染みのある空間でないことから、数値だけで色を想像したり、想像する色から数値を決定したりすることが非常に難しい。そこで、より効率的に配色を作成可能にする環境の構築、例えばColorBrewerやColorgical[8]のようなツールや、chroma.jsのようなプログラミング言語ライブラリの製作が必要になるだろう。

6節には提案手法と他の手法について簡単な比較を掲載したが、将来的には「CIELAB+CIE76」や先行研究(ColorBrewer等)に比べてデータの読み取りに効果があるのか、また本手法を用いて作成された配色が真に量的データの表現に有効であるかについて、定量的な評価[6,7]あるいは被験者実験による客観的な評価を行う必要がある。[7]で提供されるカラーマップに対する定量的な指標は、そのカラーマップの持つ特性を反映し、本手法で作成した配色が量的データの表現に適切であるかどうかを判断する材料となる。また、本論文ではColorBrewerとの比較を述べたが、Wijffelaarsらの研究との比較は今後の課題とする。

8. まとめ

本論文では、与えられた2色から色差の分散と倍率誤差の総和が小さいグラデーションを作成する手法を提案した。これによりデザイナーあるいは可視化設計者は量的データを表現する配色について様々な色の利用を検討することが可能になる。一方で、提案手法にはいくつかの課題が存在する。7節で議論したような課題が解決できれば、より容易により配色を作成することができるだろう。今後は課題解決を試みるとともに、作成した配色が量的データの表現に適しているかを評価していく。

参考文献

[1] M. Harrower and C. A. Brewer. Colorbrewer.org: an online tool for selecting colour schemes for maps. *The Cartographic Journal* Vol. 40, No. 1, pp. 27–37, 2003.

[2] S. Mittelstadt, D. Jackle, F. Stoffel, and D. A. Keim. Colorcat: Guided design of colormaps for combined analysis tasks. *Computer Graphics Forum on Visualization (EuroVis 2015: Short Papers)*, pp.115-119, 2015.

表 2. 提案手法で作成し比較に用いた配色の CIELAB 値

Table 2. Color values(CIELAB) of color schemes made using the proposed method

Color		1	2	3	4	5
Red	L	92.764	75.238	61.164	48.563	35.516
	a	7.431	15.080	27.434	40.891	56.645
	b	9.148	12.762	21.717	28.482	41.316
Green	L	96.441	79.224	65.149	52.832	39.775
	a	-5.737	-12.215	-22.783	-37.053	-39.563
	b	5.911	8.999	14.747	23.267	27.883
Blue	L	95.797	76.770	61.180	49.126	33.916
	a	0.268	0.698	1.580	3.132	3.197
	b	-6.274	-15.279	-27.582	-48.935	-47.443
Orange	L	94.819	78.034	65.243	51.834	39.805
	a	4.150	10.528	22.471	32.449	45.545
	b	9.472	15.990	30.645	35.263	50.989
Purple	L	95.102	74.217	59.975	45.623	26.995
	a	1.622	7.501	21.881	36.142	37.871
	b	-3.137	-10.554	-27.597	-44.645	-50.437
Gray	L	97.232	72.577	53.474	36.451	14.68
	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

[3] L. D. Bergman, B. E. Rogowitz, and L. A. Treinish. A rule-based tool for assisting colormap selection. In *Proceedings of the 6th conference on Visualization '95*, p. 118. IEEE Computer Society, 1995.

[4] M. Wijffelaars, R. Vliegen, J. J. Van Wijk, and E.-J. Van Der Linden. Generating color palettes using intuitive parameters. *Computer Graphics Forum*, Vol. 27, No. 3, pp.743–750, 2008.

[5] M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Research & Application*, Vol. 26, No. 5, pp. 340–350, 2001.

[6] C. Ware, T. L. Turton, F. Samsel, R. Bujack, and D. H. Rogers. Evaluating the Perceptual Uniformity of Color Sequences for Feature Discrimination. In K. Lawonn, N. Smit, and D. Cunningham, eds., *EuroVis Workshop on Reproducibility, Verification, and Validation in Visualization (EuroRV3)*. The Eurographics Association, 2017. doi: 10.2312/eurov3.20171107.

[7] R. Bujack, T. L. Turton, F. Samsel, and C. Ware. The Good, the Bad, and the Ugly: A theoretical framework for the assessment of continuous colormaps. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 1, pp. 923-933, January 2018.

[8] C. C. Gramazio, D. H. Laidlaw, and K. B. Schloss. Colorgical: Creating discriminable and preferable color palettes for information visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 1, pp. 521–530, 2018.

[9] D. A. Szafir. Modeling color difference for visualization design. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 1, pp. 392-401, January 2018.

[10] Mokrzycki. W. S, Tatol. M. Color difference Delta E - A survey. *Machine Graphics and Vision*, Vol. 20, No. 4, pp. 383-411, 2011.