

異常三色型色覚異常者のための線形的色補正方式の改良と評価

Improvements and evaluations of the linear color correction method for supporting anomalous trichromats

久保 麗[†] 國島 丈生^{††}

Urara Kubo[†] Takeo Kunishima^{††}

[†] 岡山県立大学大学院 情報系工学研究科 システム工学専攻 ^{††} 岡山県立大学 情報工学部 情報通信工学科

1 はじめに

一般に異常三色型色覚異常者は色の認識、識別が困難であるが、その程度には個人差がある [1]。また人間の色知覚は外部から観測することが難しく、色彩補正技術の実現のためには、個人の色知覚特性を推定する技術が不可欠である。

望月ら [2][3] は、色空間のリーマン空間としての幾何学的特性に着目し、色覚異常者と正常三色型色覚者の色弁別しきい値データからリーマン正規座標系を構築し色差感覚の補正を行う方式を提案しており、評価実験においては極めて良好な結果が得られている。しかし、この研究では多数の色弁別しきい値データの測定を必要とし、色覚異常者が手軽に利用できる技術とは言い難い。

色覚異常者が不都合なく認識できるように実際の色情報を補正するためには、色を弁別可能にすればよく、精度の高い色空間を構築しなくても実現できる可能性がある。この観点に基づき、著者らは、Brettel ら [4] が提案した色見えシミュレーション手法を応用することで、望月らによる先行研究より簡便な方法で十分な色弁別を可能とする方式を提案した [5]。本研究はこの方式の改良に関する提案を行うものであり、異常三色型第 2 色覚異常者 1 名を被験者とする検証実験を行ったところ、[5] に比べて良好な結果が得られた。

2 先行研究

ここでは、Brettel らが提案した、二色型第 2 色覚異常者の見る色のシミュレーション方法について述べる。

まず、RGB 色空間から LMS 色空間への変換を行うために、Brettel らが測定した、R, G, B の単色光のディスプレイ上の最大出力に対する L 錐体, M 錐体, S 錐体の反応値の組をそれぞれ、 $\mathbf{P} = (L_i, M_i, S_i)^T (i = R, G, B)$ とすると、任意の色刺激 \mathbf{Q} の RGB-LMS 変換式は、次のように書ける。

$$\begin{pmatrix} L_Q \\ M_Q \\ S_Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_R & L_G & L_B \\ M_R & M_G & M_B \\ S_R & S_G & S_B \end{bmatrix} \begin{pmatrix} R_Q \\ G_Q \\ B_Q \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、LMS 色空間を三次元的に図示し、正常三色型色覚者の見ている色刺激を二色型第 2 色覚異常者

の見ている色刺激に移すことを考える。その変換アルゴリズムを模式的に表したのが図 1 である。

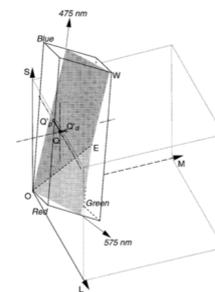


図 1: LMS 空間における変換アルゴリズムの幾何学的模式図

図 1 において、平行六面体はディスプレイ上で表現可能な色空間を表しており、斜線部で示される平面 P はその中でも二色型第 2 色覚異常者の感じる色空間を表している。色 Q に対応する二色型第 2 色覚異常者が感じる色 Q' を求めるためには、色 Q を平面 P へ射影することを考えるから、 $(\mathbf{E} \times \mathbf{A})\mathbf{Q}' = 0$ を解けばよい。 $(\mathbf{E}$ は無彩色, \mathbf{A} は赤緑系二色型色覚の色覚特性を表す色刺激をそれぞれ表し、 \mathbf{A} の波長は 475nm および 575nm である。) その結果、 $\mathbf{Q}' = (L_Q, M'_Q, S_Q)^T$ を得る。

3 提案手法

本研究で使用する変換模式図を図 2 に示す。

まず Brettel らが提案したアルゴリズムにおいて、錐体の分光感度を用いて LMS 空間を定義し、任意の色刺激 $\mathbf{Q} = (L, M, S)$ から二色型第 2 色覚異常者の感じる色刺激 $\mathbf{Q}' = (L, M', S)$ への変換を実装する。

次に求めた色刺激 \mathbf{Q}' から、補正後の色の基準点 $\mathbf{Q}_s = (L, M_s, s)$ を考える。被験者の感じる色刺激は、元の色 \mathbf{Q} と二色型第 2 色覚異常の見える色 \mathbf{Q}' の間に位置すると考え、したがって、補正後の色 $\mathbf{Q}_x = (L, M_x, S)$ およびその基準点 \mathbf{Q}_s はその逆側にあると考える。補正後の色の基準点 \mathbf{Q}_s の M 値は、線分の長さについて、 $\frac{Q_0 Q'}{Q_0 Q} = \frac{Q_0 Q}{Q_0 Q_s}$ になる点と考え、

$\frac{M}{M'} = \frac{M_s}{M}$ を満たす値、つまり $M_s = \frac{M^2}{M'}$ と定義した。そして、補正後の色 \mathbf{Q}_x は、図 2 に示すように、線分 $Q Q_s$ を 1 とし、それに対して補正度 $r (r \geq 0)$ なるものを定義し、補正後の色 \mathbf{Q}_x を計算することにし

た. 本稿では, このような色変換のモデルに従い, いくつかの色 Q_i に対して補正度 r_i を被験者が測定し集めた点から L, M, S の三つを変数として補正度 r を近似することで, 任意の画素に対する, 被験者にとって最適な色の補正度を求めるという手法を提案した.

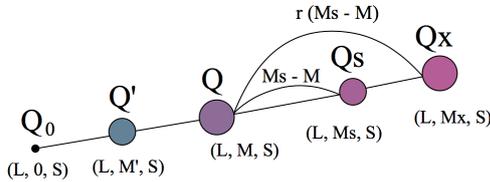


図 2: 変換模式図

今回は測定点はパネル D-15 (図 3) から得られる 16 点とし, 補正度 r の近似には最小二乗法を用いその次数は 1 次とした. なお, パネル D-15 は色覚異常検査に用いられ, 低彩度の 16 色から成り, はじめの色を基準として順に並び替えることで色覚異常の検査ができる医療器具である. 今回はその色のデータはスマートフォン用アプリ [6] から得たものを使用した.



図 3: パネル D-15 テストの色

4 実験

4.0 実験環境

- 使用機器
 - モニター: MacBookAir (キャリブレーションされていない)
- 開発環境
 - X-code(使用言語: swift, obj-C)
 - openCV

4.1 補正度 r の測定および近似と適用結果

本実験では, 補正度 r の測定値を集めるために簡単な GUI を設計した. 被験者は表 1 に示した色名と単色画像を一つ一つ照らし合わせ, 自らの中の色認識と一致するように各色をを調整し, 補正度を確定する作業をする. なお, 図 3 の色に左から色番号を (0, 1, ..., 15) と振り, 表 1 と対応させている.

被験者は, 以下の 3 つの段階に分けて測定をした. 測定にかかった時間は約 20 分であった.

1. 図 4(a) のように, 元の色番号順に並んだ単色画像を表 1 の色に照らし合わせて調整する.
2. 1 で調整した色を, 図 4(b) に示した, 被験者にとって区別のつきにくい色順に並べ直してさらに調整する. この時, 隣り合った色同士がはっきりと区別がつくことを意識する.
3. 元の色番号順に並べ直して, 最終調整をする.



(a) 色番号順 (図 3 再掲)

(b) 被験者が区別しにくい順

図 4: 調整に用いた単色画像の並び

表 1: 調整に使用した色の見え方のラベル

色番号	正しい色の見え方
0	青
1	～
2	青緑
3	～
4	緑
5	やや黄緑がかった緑
6	くすんだ黄緑
7	やや黄色がかったくすんだ黄緑
8	黄土色
9	ややオレンジがかった黄色
10	やや赤みの強いオレンジ
11	ややオレンジがかったピンク
12	やや赤みがかったピンク
13	紫がかったピンク
14	ピンクがかった紫
15	青みがかった紫

被験者による調整が終わった後の結果を図 5 に示す. 変換前の色 Q の L, M, S と合わせた測定結果は表 2 のようになった.



図 5: 調整結果

表 2: 補正度 r の測定結果

色番号 i	補正度 r_i	L_i	M_i	S_i
0	0.0	0.321	0.160	0.949
1	0.7	0.320	0.158	0.881
2	1.9	0.314	0.157	0.838
3	1.4	0.315	0.157	0.796
4	1.5	0.315	0.155	0.750
5	2.7	0.315	0.152	0.664
6	2.8	0.320	0.150	0.592
7	1.8	0.323	0.148	0.533
8	2.0	0.325	0.141	0.474
9	1.1	0.330	0.142	0.494
10	1.0	0.332	0.142	0.556
11	1.5	0.335	0.143	0.624
12	1.2	0.334	0.145	0.702
13	0.5	0.337	0.149	0.797
14	0	0.337	0.152	0.847
15	0	0.338	0.155	0.880

測定結果から, 16 個の色データ $(L_i, M_i, S_i, r_i)(i = 0, 1, \dots, 15)$ が得られた. これを最小二乗法近似で近似した結果,

$$r = -24.7L + 102M - 8.56S - 0.083 \quad (2)$$

を得た. 図 2 にしたがってこれを適用すると, 色刺

刺激 $Q = (L, M, S)$ に対する補正後の色 Q_x は,
 $L_x = L, M_x = M + r(M_s - M), S_x = S$ と計算すれば良いことがわかる. 図 3 に対してこの変換をかけて比較したところ, 図 6 を得た. 補正度 r のプロット点と実際の近似結果の比較は図 7 のようで, 概ね妥当な近似結果と考える. 被験者からは, 色のグラデーションがはっきり見えるようになったという評価を得た.



図 6: 16 色を並べた画像 (図 3) への変換結果

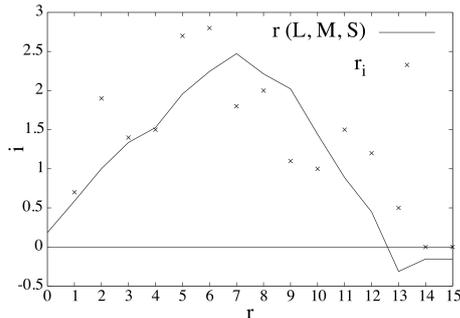
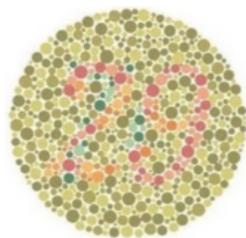


図 7: 補正度 r のプロット点と近似結果

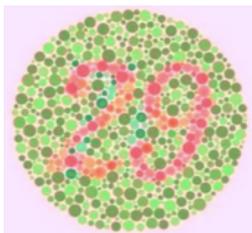
4.2 石原検査表への適用

測定により近似した r を用いた色変換を, 図 8(a) に示した図に対して行った結果を 図 8(b) に示す. これは, 色覚検査にも用いられている石原検査表という画像の一つで, 第一および第二色覚異常者にとっては "70" という数字が見えることが多いが, 正常三色型色覚者には "29" という数字がそれぞれ中央に見えるものである.

被験者の, 変換前と変換後の数字の見え方の評価を表 3 に示す. 濃い緑色の水玉で描かれた線に惑わされることなく, オレンジ色の線を背景のくすんだ黄緑色と区別して認識できるようになったことが示された.



(a) 変換前



(b) 変換後

図 8: 石原検査表の一つ

表 3: 石原検査表に対する評価

	変換前 (図 8(a))	変換後 (図 8(b))
正常色覚者に見える数字	29	29
被験者に見えた数字	70	29

4.3 自然画像への適用

次に, 図 9(a) のような自然画像に対して同様の変換を行った結果を図 9(b) に示す. 被験者の, 変換前と変換後のパプリカの色の評価を表 4 に示す. なお, それぞれのパプリカに振った番号は, 評価の後につけたものである. 第一および第二色覚異常者にとって, このような赤と緑の区別はつきにくい. 画像変換後, 元は見分けのつきにくかった赤と緑のパプリカの識別がはっきりできるようになったことが確認された. しかし, 黄色のパプリカが緑色に変換され過ぎてしまい, 被験者にとってもやや黄緑がかった印象を与えてしまっている点が問題点となった.



(a) 変換前



(b) 変換後

図 9: パプリカの写真

表 4: 自然画像に対する評価 (1)

	番号	変換前 (図 9(a))	変換後 (図 9(b))
正常三色型	1	赤	赤 (ほぼ変化なし)
	2	オレンジ	オレンジ (ほぼ変化なし)
	3	黄色	明るい黄緑
	4, 5, 6	明るい黄緑	より明るい黄緑
	7, 8	緑	やや明るい緑
被験者	1	紅 (少し緑に見える)	鮮やかな赤
	2	オレンジ	やや明るいオレンジ
	3	黄色	黄色がかった黄緑
	4, 5, 6	暗い黄緑	若々しい黄緑
	7, 8	暗い緑	鮮やかな緑

表 4 より, 低彩度の画像 (図 3, 図 8(a) など) に対しては適切な変換ができていたが, 図 9(a) のような元々鮮やかな画像に対しては r の値が大きくなり計算され過ぎていたのではないかと考えられた. そこで, 補正度 r に式 (2) を適用せず, 一律で $r = 1.0$ として変換をかける実験を行った結果を図 10 に示す. 被験者の色の評価は表 5 のようになり, 全て正常色覚者と

同じ色味に認識されておりかなり理想的な評価が得られたと考える。全体的な印象としても、図 9(b) より自然な色合いに感じるという評価を受けた。このことから、やはり鮮やかな色に対しては補正度 r が大きく計算され過ぎていることが確認された。



図 10: 図 9(a) に $r = 1$ で変換をかけたもの

表 5: 自然画像に対する評価 (2)

	番号	変換前 (図 8(a))	変換後 (図 9)
正常 三色 型	1	赤	やや明るい赤
	2	オレンジ	オレンジ (ほぼ変化なし)
	3	黄色	かすかに黄緑がかった黄色
	4, 5, 6	明るい黄緑	より明るい黄緑
	7, 8	緑	明るい黄緑
被 験 者	1	紅 (少し緑に見える)	鮮やかな赤
	2	オレンジ	少し明るいオレンジ
	3	黄色	より鮮やかな黄色
	4, 5, 6	暗い黄緑	若々しい黄緑
	7, 8	暗い緑	鮮やかな緑

5 今後の課題

本稿に述べた実験を通じて、今後の課題として以下の事柄が挙げられた。

- 実験 4.3 節からわかるように、比較的鮮やかな画像に対する変換を考えた際、補正度 r の値が大きく計算され、理想的な色の変換が行われなかった。これは補正度の測定にマンセルのパネルの低彩度の色のみを用いたことによると思われる。この点の改善策として、鮮やかな色に対する補正度の測定結果をなんらかの方法で反映することが挙げられ、場合によっては近似方法の見直しも検討しなければならないと考えた。
- 特に、鮮やかな色に対して変換を行った時、 r の値を調整しないと RGB 値が振り切れてしまうことがあった。その時は、 RGB の 3 つの値が全て振り切れない範囲になるように r を調整する処理を加えることで解決はできたが、この制約のために理想的な色変換ができない色域がある可能性があるため、今後検証し、改善策を考える必要がある。
- 今回の実験において、被験者は表に示した色名のラベルと照らし合わせることで補正度の調整をしたが、この方法では絶対的な加減がないため、測定のたびにばらつきが出てしまった。より明確な基準を考えるか、測定方法の見直しが必要であると考えた。

- 今回の実験に協力した被験者は一人で、評価した画像も少ないため、今後より多くの被験者に協力を募り、様々な画像を用いて色補正の評価をしていくことが必要である。被験者を増やした場合、被験者の色覚に合わせて変換式は変わるものの、三色型の色覚異常であれば同じ手法で同様に色補正ができる可能性が高いと考える。

6 結論

本稿では、元の色に対応する二色型色覚異常者の感じる色を求めることで、その逆の位置に当たる色を線形的に考え、補正後の色の基準点とし、被験者の中での色味の認識に合わせた簡単な測定をすることにより、個人に合わせた最適な補正度の関数を求めて全ての色に対して変換ができることを目指した。結果として、色覚検査に用いられるような低彩度の色味の区別はつくようになったが、元々鮮やかな色の変換においては理想的な補正度を求められていないという課題が残った。今後の解決策として、簡便さを保ちつつさらに補正度の精度を上げるべく、鮮やかな色への補正度のデータを反映すること、測定方法の見直し、補正できる色域の調査などが挙げられた。今後の予定としては、課題を解決しつつ、被験者の数を増やしてさらに検証実験を進めていくことが挙げられている。なお、今後の実験にはキャリブレーション機能付きのモニターを使用する予定である。

参考文献

- [1] 小瀬 輝次・ほか, 川上 元朗, 色彩の辞典, 朝倉書店, 東京都, 1992 年.
- [2] R. Mochizuki, T. Nakamura, J. Chao, and R. Lenz, Color-weak correction by discrimination threshold matching, In Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, Vol.2008, No.1, pp.208-213, Jan. 2008.
- [3] 大島 哲, 望月 理香, 趙 晋輝, リーマン正規座標系を用いた色空間における色差保存写像の構築と色弱補正方式への応用, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J94-D, No.1, pp.68-76, 2011.
- [4] Brettele, H., Vienot, F., and Mollon, J. D. "Computerized simulation of color appearance for dichromats," *Journal of the Optical Society of America, A*, Vol.14, No.10, pp.2647-2655, 1997.
- [5] 久保麗, 國島 丈生. 異常三色型色覚異常者のための線形的色補正. 第 18 回情報科学技術フォーラム, 18(3), pp. 379-380, 2019.
- [6] マンセル d-15-テスト
[https://itunes.apple.com/jp/app/マンセル-d-15-テスト](https://itunes.apple.com/jp/app/マンセル-d-15-テスト/id576175224?mt=8&ign-mpt=uo%3D4)
/id576175224?mt=8&ign-mpt=uo%3D4