

少数色覚者のための色覚補正ツールの開発と検証

— 個々人の錐体分光感度分布の推定と推定誤差の評価 —

岡崎祥吾* 青木誠** 山口英将** 鈴木浩之* 小谷佳宏** 川副裕之** 半田隆志*

Development and Validation of a Color Vision Compensation Tool for Color Vision Deficiency

— Cone Sensitivity Estimation and Error Evaluation —

OKAZAKI Shogo*, AOKI Makoto**, YAMAGUCHI Hidemasa**, SUZUKI Hiroyuki*,
KOTANI Yoshihiro**, KAWAZOE Hiroyuki**, HANDA Takashi*

抄録

芸術作品では色の知覚が作品の印象に大きく影響するため、少数色覚者の作品が標準色覚者に十分に意図どおり伝わらない可能性がある。また、その逆の状況も生じ得る。本研究では、任意の2者間で錐体刺激値を一致させる画像変換手法に必要となる、個人ごとの錐体分光感度パラメータを高精度に推定する測定法を検討した。数値シミュレーションの結果、提案手法は従来手法と比較して測定精度が向上することを確認した。

キーワード：色覚多様性，少数色覚，画像変換，配色，高色域ディスプレイ

1 はじめに

少数色覚者（かつての色弱・色盲）の色覚補助の方法として一般的なものにColor Universal Design (CUD) が提唱されている。この方法は、少数色覚者が色を識別しやすいように標準色覚者が識別できる配色の一部を制限するものである。ほかの先行研究では、色の識別に焦点を当て、分かりづらい色の情報を明るさの情報に変換するもの、認識しやすい色のグラデーションに色相を回転するものなどが提案されてきた^{1,2)}。これらの方法は高強度の色覚異常においても色の識別を与えるということには成功してきたが、配色の持つ効果（反対色等、脳内での色空間の構造の一致）までは伝えられなかった。この理由は、これまでの

色覚補助の目的が、意味の取り違えや事故の防止ができることであったためと思われる。

近年では暮らしのデジタル化も進み、娯楽としてのデジタルコンテンツも増えている。また、液晶ディスプレイの出荷時校正の正確性も増しており、標準色覚者にとっては制作者の意図どおりの配色で鑑賞しやすくなっている。しかし、一部の少数色覚者にとっては制作者の意図しない配色で鑑賞するという状況が生じており、これまで少数色覚の補助においてフォーカスされてきた情報の識別性のみならず、芸術的な意味での配色効果を伝達する方法の開発が必要である。

2 基礎となる考え方

2.1 開発する配色伝達方法について

2.1.1 本研究が目指すこと

最終目的は、異なる色覚を持つ者同士であっても同じように芸術作品を楽しめる、あるいは、異

* 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

** (株) ワコム

なる色覚の者に対しても自身の意図した芸術的効果を損なわずに作品を発表できるようになることである。これを目標として言い換えれば、多様な色覚を持つ者たちの間で、芸術的なテクニックが引き起こす神経の反応が一致することを保証する仕組みを作ることと考えている。

本研究において、美術作品の感動の根源は、本能的な刺激への反応、その相性や個人の経験や体験の想起、概念の理解度、そのニュアンスの記憶などに由来していると考えられる。ただし、本研究にて一致を目指す「神経の反応」とは、個人に依存する主観的な反応ではなく、同じ視覚機能を持つ者であれば概ね共通して生じると考えられる、視覚の初期段階 (V4 野まで) の処理を指すものとする。なぜならば、少数色覚者が色覚の補助に期待するであろうことは、もし同じ個性であった場合に同じ色覚であれば得られたはずの感動であり、各人の経験や信念に基づいた、その作品との相性、つまり、脳の高次機能への介入ではないと思われるからである。

2.1.2 前年度取り組みと問題点

前年度の取り組みから、本研究でカバーする少数色覚としては D 型 3 色覚、P 型 3 色覚とした。この 2 つは少数色覚の中でも割合が多い色覚であり、パラメトリックに色覚モデルを作成できると考えたからである。そうであればパラメータと色覚特性を紐づけられ、研究上の取り扱いがよい。

図 1 は、P 型 3 色覚において、標準 C 型色覚での L 錐体分光感度ピーク (赤実線) がシフトパラメータ P により M 錐体分光感度ピーク (緑実線) へシフトする様子 (赤破線) を表現したものである。なお、D 型 3 色覚では M 錐体分光感度ピーク (緑実線) がシフトパラメータ D により L 錐体分光感度ピーク (赤実線) へシフトする。このようなシフトは遺伝的な要因によりほとんど連続的に起こることが知られている⁴⁾。理想的な P 型 3 色覚においては、M 錐体と S 錐体の錐体分光感度分布は標準色覚の場合と同じであり L 錐体のみシフトが起こるとされる。このため、図 1 においては、

赤の破線で示される L 錐体分光感度分布のみが、赤実線の標準色覚の分布からシフトしている。D 型 3 色覚でも同様にグラフを描けるが省略する。このように錐体分光感度が人によって異なることで、同じ光を見ても一般には 2 人の間で錐体刺激である LMS 刺激値は一致せず多様な色覚 (少数色覚と標準色覚を連続的に包括する色覚) が生じる。

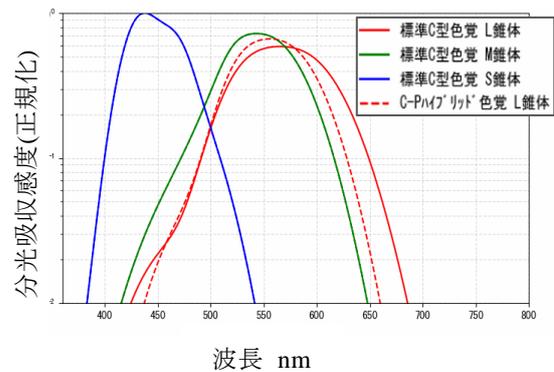


図 1 開発した色覚モデルによる P 型 3 色覚の錐体分光感度

前年度、我々は LMS 刺激値を一致させることを指針とした色調整装置を試作し、当事者 1 名に対しその効果検証・改良した⁵⁾。ここで課題となったのは多様な色覚者の個別の錐体分光感度の精度の高い推定である。我々が開発した色覚調整アプリケーションは使用者の錐体分光感度 $l(\lambda)$, $m(\lambda)$, $s(\lambda)$ が既知であることが必要である。既存の色覚特性診断装置であるアノマロスコープ検査では、本研究におけるシフトパラメータ D, P に相当する色覚特性の強度が高くなるほど、その強度に紐づく測定値 (等色ノブ値) の範囲が広くなってしまい、色覚調整アプリケーションの設定値を求めるといった目的に対し精度が不十分である。そこで我々はアノマロスコープ検査をヒントに、より精度高く色覚特性を選択的に判定する方法を検討した。

2.2 誤差の起源の分析と精度向上の指針

アノマロスコープは3つの光源を用い、色覚を判定する医療上の色覚検査装置である。黄色の単色スペクトル光源と、赤、緑の単色スペクトル光源の混色を等色するよう操作することで色覚特性を判定する。

アノマロスコープでは、図2に示すように x - y 色度図上 $y = 1 - x$ 線分上の赤と緑の混色で、同線分上の黄色を作る。被検者の感度ピークのシフトが大きくなるにつれ認識できる色空間が縮退していくため、色空間上の混色範囲であるこの線分も短くなる。これが測定の誤差拡大の原因と考えられる。そこで、我々はアノマロスコープ検査で採用される色よりも、色空間上の距離が遠い色の組み合わせを使用するために“青と黄の混色”と“緑と赤の混色”を等色する仕組みを採用した。図3はこのアイデアの模式図であり、図4はこのアイデアを搭載した試作機である。

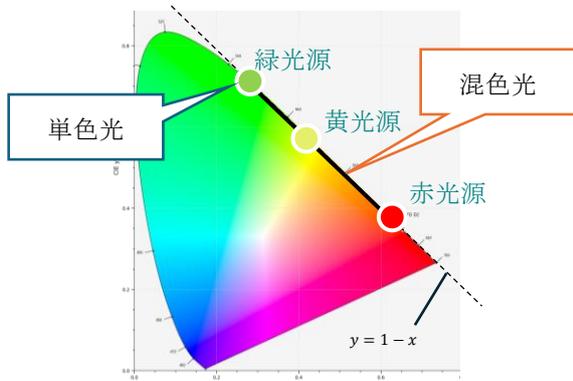


図2 3光源を用いる比較手法での等色の概念図

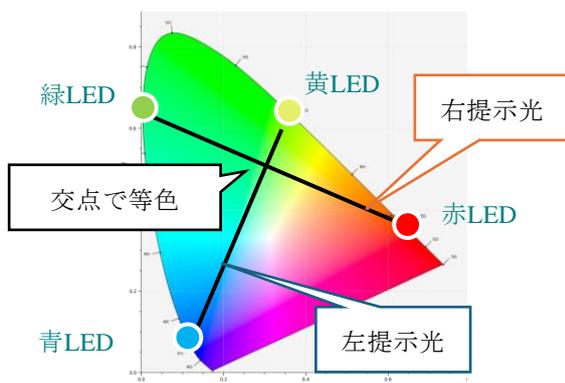


図3 4光源を用いる提案手法での等色の概念図

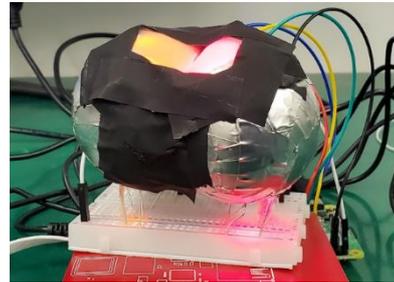
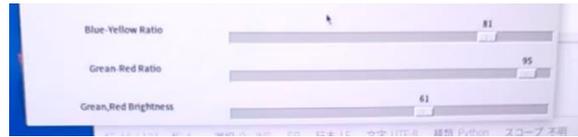


図4 左右それぞれ2光源の等色である試作機

注) 混色はアプリのスライダーから行う。

x - y 色度図上、色のついている領域の外縁である曲線は単色スペクトル光の波長を掃引した際に認識される色に相当する。今回の光源はほとんど単色スペクトル光であるLEDを採用したため、模式的に4光源はこの曲線上に配置される。光源2つの混合調整によって作り出せる色は光の線形な性質により辺を成し、図4装置の左右の提示光が等色したとき、ユーザーに認識される色は図3上の交点に相当する。

3 実験方法

3.1 数値計算による誤差評価の方法

アノマロスコープは医療現場にて色覚の確定診断を目的とし使用される装置である。本報告では、アノマロスコープと比較して試作機の計測精度がどの程度向上するのかシミュレーションにより検証した。その方法としては、仮想的に条件をそろえた場合の誤差比較とし、規格上で定義されるような確定的な色の見分け誤差（色弁別）に基づいて計算を行った。前提条件は以下のとおりである。

シミュレーションの前提条件：

- 1) 色空間上の色弁別範囲は多様色覚者間で共通であり、色覚特性の強度によって認識可能な色空間上の領域が変形・縮小するものとする。これは、色弁別の限界が、LMS 錐体によ

る光の符号化の後段の処理により決まると仮定することに相当する。また、簡易のため人の色の見分けのつかない色空間の距離（色弁別範囲）を $L^*a^*b^*$ 色空間における半径 1 の真球とみなすこととする。

- 2) 装置に用いる 4 つの光源スペクトルは既知とする。また、色覚モデルに L 、 M 錐体それぞれのシフトパラメータ D, P を与えた場合の仮の錐体分光感度分布は計算できるとする（ただし、本装置ユーザーの真の錐体分光感度分布は未知とする）。このとき、図 4 装置の左右提示光が等色する、青-黄色スライダー割合 $S_{by}(D, P)$ 、緑-赤色スライダー割合 $S_{gr}(D, P)$ をベクトル空間上の問題として解ける。また、 $S_{by}(D, P)$ 、 $S_{gr}(D, P)$ から等色時にユーザーの認識する色も得られ、 $L^*a^*b^*$ 色空間での表示では $Lab(S_{by}, S_{gr})$ となる。ただし、本解析では、簡易のためシフトパラメータやスライダー割合を片方のみに限定する。例えば D について解析する際は $P = 0$ とすることで、等色するスライダー割合は $S_{by}(D)$ 、 $S_{gr}(D)$ となる。また、等色するスライダー割合 (S_{by}, S_{gr}) から変化させるスライダー割合も S_{by}, S_{gr} のいずれかとし S と表現すれば、シフトパラメータが D であるユーザーの認識する色は $Lab^D(S)$ である。

- 3) 本数値計算で求める誤差とは、「色覚測定装置の等色スライダー値 S_{by}, S_{gr} よりシフトパラメータ D' が測定（逆算）されたとき、真のシフトパラメータ D がどの程度 D' の周辺範囲 ΔD に含まれているか」を示すものとする。したがって誤差は、 D' の関数 $\Delta D(D')$ となる。なお D' は $[0, 1]$ に正規化されている。

これらの前提の下解析を行ったところ、以下誤差に関する式が得られた。 $\Delta P(P')$ についても $\Delta D(D')$ と同様の議論が成り立つため、同時に掲載する。

$$\Delta D(D') \Big|_S < \frac{1}{\frac{\partial S(D')}{\partial D} \left| \frac{\partial Lab^{D'}(S)}{\partial S} \right|} \quad (1)$$

$$\Delta P(P') \Big|_S < \frac{1}{\frac{\partial S(P')}{\partial P} \left| \frac{\partial Lab^{P'}(S)}{\partial S} \right|} \quad (2)$$

ここで、 $\partial Lab^{D'}(S)/\partial S$ は、真のシフトパラメータ $D \approx D'$ である任意のユーザーが等色をしている $L^*a^*b^*$ 色空間局所において、スライダー操作によって図 4 装置の左右それぞれの提示色がどの程度変化するかを示す。 $\partial Lab^{P'}(S)/\partial S$ も同様である。なお、前述の 3.1.2) に記載のとおり、右辺中の偏微分は数値的に計算できるため、左辺をシミュレーション可能である。

右辺は、前提とした色弁別から想定される最大測定誤差範囲を示している。数式(1)の右辺分母を両辺にかけると、シフトパラメータ D -スライダー割合 S -色空間 Lab を局所接続する式に相当していることが分かる。この局所接続の式の右辺は 1 となるが、前述の 3.1.1) にて色弁別範囲を $\Delta Lab = 1$ としたことに由来している。

ただし、数式(1)、(2)は簡易的なものであり、 $L^*a^*b^*$ 色空間の弁別球に相当するスライダー割合の 2 次元空間 (S_{by}, S_{gr}) 上の楕円が斜め（非直交）方向に伸長するときには精度が悪化する。

数式(1)、(2)は、図4の装置のユーザーが等色するスライダー S を選んだとき、これに相当する図3の色度図上の交点を与える錐体分光感度シフトパラメータ D' を計算（逆算）によって得たとして、ユーザーの真の錐体分光感度分布のシフトパラメータ D が D' のどの程度の周囲 ΔD 内 ($D' \pm \Delta D$) にあるかを与えている。

4 結果及び考察

4.1 数値計算結果について

4 光源としていくつかのパターンを試したうち、比較手法のアノマロスコープよりも精度が明らかに向上した組み合わせについて、数値計算結果を図 5 に示す。

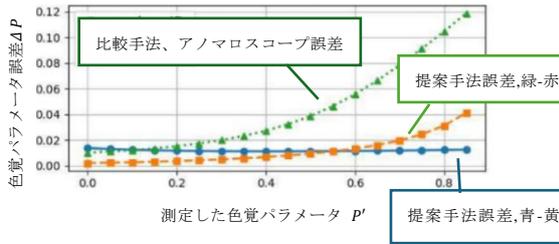


図5 色覚パラメータに対する測定誤差

注) 測定 P' に対し、その周囲に真の P があるとする場合の誤差

図5はP型色覚の錐体分光感度シフトパラメータの推定誤差について、アノマロスコープ検査と提案手法を比較したものである。前項にて説明したとおり、ここでの誤差の由来は、色弁別（人の色の見分けのつかない色空間の距離）のみに基づいており、信頼区間など統計的要素のない確定的なものである。ただし、この色弁別は均等色空間である $L^*a^*b^*$ 色空間において半径1の球と単純化した仮定に基づく。

グラフの横軸は、錐体分光感度分布（図1）における、標準色覚から少数色覚への正規化済みシフトパラメータであり、0にてシフトなし、1にて完全シフトに対応する。したがって、P型色覚の場合には、 $P' = 0$ で標準色覚（C型色覚）に一致し、 $0 < P' < 1$ ではP型3色覚、 $P' = 1$ ではP形2色覚に対応する。また、縦軸は横軸である錐体分光感度分布のシフトパラメータの測定値に対し、真の錐体分光感度分布のシフトパラメータが存在する誤差範囲を示すものである。

ユーザーがスライダー値 S_{by}, S_{gr} にて等色した際に、この値を算出する錐体分光感度分布のシフトパラメータ計測値 P' は理論から一意に得られる。しかし実際には、色弁別に由来して設定したスライダー値 S_{by}, S_{gr} 付近においても等色してしまう。そのため、真の錐体分光感度分布のシフトパラメータ P は計測値 P' から区別する必要がある。

個人の色覚特性及び色弁別範囲と使用光源に由来する ΔP は、シフトパラメータ P' の色の見分けのつかない範囲であるため、真の P が存在する可能性のある範囲は測定値 P' の周辺($P' \pm \Delta P$)と表

せる。したがって ΔP が小さい方が、錐体シフトパラメータ計測装置の性能が高いため、図5において、横軸のどの P' においても、縦軸の ΔP が小さい提案手法は高精度な計測手法と言える。

図5では、個人の色覚特性を表す錐体シフトパラメータ $P \approx P'$ が大きくなるにつれ、比較手法も提案手法も誤差が拡大するが、提案手法の方が誤差の拡大を抑えられている。両者とも誤差が拡大する理由は、錐体分光感度分布のシフトパラメータが大きくなるにつれ、知覚できる色空間上の全体の領域が狭まる一方、区別のつかない局所的な色空間上の領域（色弁別）は一定となると仮定したことによると考えられる。3.1 1)で述べたように、色覚特性の強度によって認識可能な色空間上の領域が変形・縮小するため、シフトパラメータが大きい際には、いずれの手法でもスライダーによって表現できる色空間上の線分が、色弁別（XYZ色空間にて楕円体）に対し相対的に小さくなる。極限的には、この線分が色弁別に収まる時、スライダーを変化させても色の変化は感じられなくなる。このときには真のシフトパラメータを含むどのパラメータでも等色してしまうようになるため誤差は極めて大きくなる。数式(2)においては、 $\partial Lab^{P'}(S)/\partial S$ 減に相当する。この傾向は色空間の縮退方向である緑-赤方向に対し強いため、完全に混同線上にあるアノマロスコープや、提案手法においても、緑-赤混色線分で顕著となる。

提案手法の緑-赤スライダーによる錐体分光感度分布のシフトパラメータ推定誤差 $\Delta P(P')$ が比較手法より小さくなる理由については、比較手法での制約である色度図上の $x + y = 1$ 以外の範囲の光源をえることで、シフトパラメータ P' に対しより大きく S_{gr} や $L^*a^*b^*$ 色空間上の等色点ベクトルが変化する光源を選んでいたからと思われる。なぜ、より大きな変化がもたらされたかという $x + y = 1$ 制約がなくなることで、錐体分光感度分布中、シフトパラメータの変化に対し、急峻に分光感度の変化を検知できる波長付近に光源スペクトルをおけたからと考えている。これは、

錐体分光感度分布の裾における非線形さと光源が LED であることによるスペクトルの鋭さに由来していると考えられる。数式(2)においては、 $\partial S(P')/\partial P$ 増に対応する。

なお、 $P = 0.1$ 未満において、青黄比率スライダー S_{by} を用いる際の提案手法の誤差が、比較手法より大きくなっているが、測定ではスライダーは誤差 ΔP が小さい方 (今回の場合 S_{gr}) のみを使えば基本的には十分である。

また、図を掲載していないが、 $\Delta D(D')$ の数値計算も行った。この結果においては $D > 0.6$ にて、スライダー比率がマイナス (線分外) となり測定不能となってしまったが、 $D < 0.6$ にて $\Delta P(P')$ 同様に精度の改善が認められた。測定不能領域については光源の取り方などで改善できる可能性がある。

5 まとめ

5.1 今年度進捗

本研究では、芸術作品における色彩構造の知覚を多様な色覚の間で共有するため、個人ごとの錐体分光感度パラメータを高精度に推定する測定手法の検討を行った。今年度は、アノマロスコープと比較した数値シミュレーションにより、提案した4光源等色方式が比較手法よりも誤差を低減できることを確認した。

これにより、今後の実機評価及び色覚調整アプリケーションへの適用に向けた有効性を示すことができた。

5.2 今後の課題

本手法はシミュレーション上で比較手法に対し精度向上が見られたため、少数色覚当事者を対象とした実機による性能検証を進める必要がある。

また、本報告では色弁別として $L^*a^*b^*$ 空間上の球近似を用いた 1 次元解析を行ったが、今後は DE2000 などの色差式を用いた楕円体色弁別の採用や 3 次元での解析に拡張し、より実際の知覚に即したシミュレーションを行う必要がある。

さらに、色覚調整アプリケーションについては、当事者を対象とした美術的・実用的観点での介入効果の検証を行い、調整アルゴリズムの改善につなげていく予定である。

参考文献

- 1) 山下雅彦, 横田一正, 株式会社両備システムソリューションズ “色覚異常の人々を補助するソフトウェアの開発”, 26th Fuzzy System Symposium Hiroshima, September 13-15, (2010)
- 2) 大塚作一, 比良祥子 “色相ブレンド法を用いた携帯型2色覚補助ツール” 電子情報通信学会大会講演論文集 (Sep.03,2013)
- 3) 内川恵二, 篠森敬三 “視覚 I 視覚系の構造と初期機能”, 朝倉書店
- 4) 江島義道, “三色過程から反対色過程への変換機序”, 心理学評論, vol.28. no. 1, 87-110 (1985)
- 5) 岡崎祥吾, 鈴木浩之, 半田隆志, “多様な色覚者同士が美術的意図を損なわずに配色を伝達する手法”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 22, pp. 46-50 (2024).