

[研究助成 (A)]

色覚の多様性を考慮した見えのシミュレート画像に基づく 簡易な色覚異常強度測定法

Simple evaluation of color vision using simulated image of color appearance for anomalous trichromats

2191015



研究代表者

香川大学
創造工学部 創造工学科

准教授

佐藤 敬子

[研究の目的]

色覚異常者は20人に1人の割合で存在し、特定の範囲の色に対する応答や色の識別が困難である。日本では強制の色覚検査が廃止されており、成人後に異常に気づく人が少なくないが、異常の型と強度を知るためには、特殊な測定機器が必要となる。本課題では、色覚異常強度の多様性に着目し、弱度から強度までの多様な見えを表現する画像を用いて、異常強度をチェックする手法を提案する。これにより、種々の表示デバイスを用いて簡易に異常強度を測定でき、個々の特性にあわせた効果的な色覚バリアフリーの実現が可能である。まず課題1として、色覚異常の多様な見えを表現するための最適なアピアランスモデルの決定を行った。さらに、課題2として、課題1で決定したモデルによる見え画像を用いた視覚実験の実施、及び異常強度と関連性について分析を行った。

色覚異常者の色見えを表現する最も有名なモデルとしては、Brettel et al. (1997) [1] のものがよく用いられる。しかし、これは異常強度が最も強い2色覚者の見えモデル（以降2色覚モデルと呼ぶ）である。実際は2色覚者より異常3色覚者の方がはるかに多く、2色覚モデルは異常3色覚の見えを表現するには不適である。異常3色覚の見えを表現するモデルとして、Yang et al. (2008) [2]（以降錐体モデルと呼ぶ）、Machado et al. (2009) [3]（以降反対色

モデルと呼ぶ）の手法が存在するが、実験条件の統制、詳しい評価実験がされておらず、どの程度見えを表現できているのか不明であった。異常強度を簡易にチェックできる手法の提案のためには、まずどちらのモデルが正確に異常3色覚の異常強度に沿った見えの表現が可能であるかを調べる必要がある。

そこで課題1では、2つの異常3色覚モデルについて統一した条件で視覚実験を行い、シミュレートの精度を比較して最適なモデルの決定を行った。その結果を踏まえ、課題2では、最適なモデルにより異常強度を弱度から強度に設定した見え画像を用いた視覚実験を行い、色覚異常者の異常強度との関係を調べた。

[課題1の内容, 成果]

課題1では、2つの異常3色覚シミュレートモデルである錐体モデル[2]と反対色モデル[3]の精度を比較する事を目的とした。正常色覚者と色覚異常者に対して、錐体モデルと反対色モデル、及び2色覚モデルの3つのモデルで変換した条件で、色の並び替えテストである100-hueテストをモニタ上で実施した。並び替え順から算出される、色覚異常指数によって比較と評価を行った。なお、2つの異常3色覚モデルについては、使用するモニタの分光分布と錐体感度関数を統一した。異常強度の多様性は、異常錐体のシフトによって表現した。図1に示

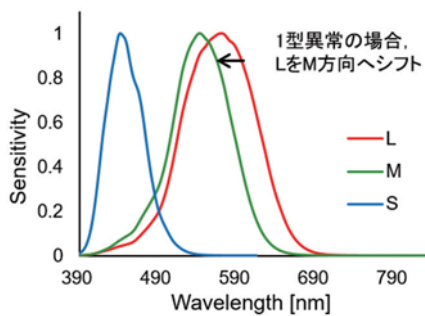


図1 LMS錐体感度関数のシフトによる、色覚異常の多様性の表現

すように、1型色覚異常の場合はL錐体をM錐体側へ、2型の場合はM錐体をL錐体側へシフトさせた。

実験参加者は、正常色覚者10名と色覚異常者6名（1型：2色覚1名，異常3色覚2名，2型：異常3色覚3名）であった。全参加者から香川大学創造工学部の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会にて承認された（承認番号30-002）インフォームドコンセントを得た。正常色覚者は石原式検査により確認し，色覚異常者は，石原式検査，D-15テストを実施し，さらに異常の型と等色範囲をアノマロスコープ（NEITZ OT-II）にて測定した。

実験参加者はマウスを操作し，モニタ上で100-hueテストを行った。実験参加者の頭部は顎台で固定され，モニタと実験参加者の視距離は50 cmとした。実験刺激は校正済みEIZO ColorEdge CX270（解像度1920×1200）上に呈示した。実験は暗室内，D65光源下で行われた。

実験刺激は，100-hueテストの85色のカラーキャップをモニタ上で再現した。この刺激を，2色覚モデル，錐体モデル，反対色モデルで，1型と2型の見えにそれぞれ変換した。異常3色覚の異常強度を想定した錐体感度シフト量は，10 nmと20 nmの2種類とした。20 nmは最大シフト量であり，理論的には2色覚，10 nmはその中間で弱度相当となる。2色覚モデルは，異常3色覚モデルの20 nm条件との比較条件とした。カラーキャップの視野角は1.7

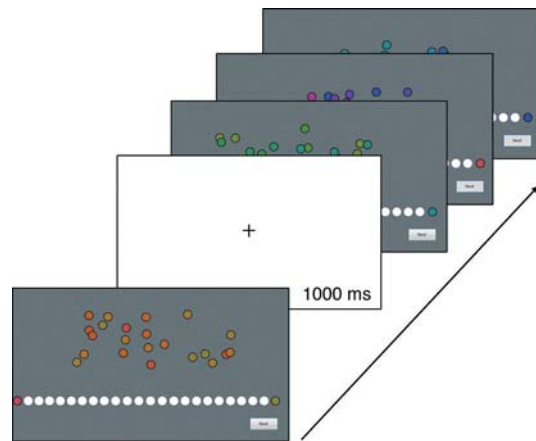


図2 100-hue testの実験の流れ

度とし，背景色は色刺激と同様の輝度値19.27 cd/m^2 とした。

実験はモデル条件ごとに4ブロックで構成された。図2に示すように，各ブロックは85色を4分割した各色域であり，参加者は，1ブロック目は22色，2～4ブロックは21色，計85色の並べ替えを行った。モデル条件は，参加者間で異なり，正常色覚者は変換無しオリジナル条件，1型と2型で変換された2色覚モデル，錐体モデル（10，20 nm），反対色モデル（10，20 nm）の計11条件とした。色覚異常者は，オリジナル条件，参加者の異常の型で変換した2色覚モデル，錐体モデル（10，20 nm），反対色モデル（10，20 nm）の計6条件とした。実験条件の呈示順番は参加者ごとにランダムであった。

解析には，Confusion index（C-index）を用いた。これは，カラーキャップの並び位置によって求められる指数であり色覚異常の強度を表す。キャップが完璧に並べ替えられた場合は1，1.5～2程度で弱度，2程度以上の値で色覚異常が強度とされる。

正常色覚者の結果では，2つのモデル間で差が見られた。反対色モデルは10 nmでも2色覚モデルと同等の異常強度値となった一方，錐体モデルはシフト量最大の20 nmでもC-indexが低くなった。このことから，2つのモデルでは，シフト量による強度設定が同等にな

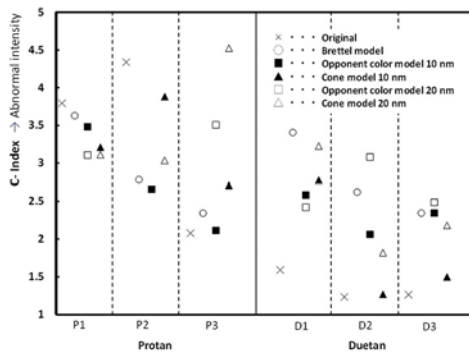


図3 100-hue testの結果（色覚異常者の個人別 C-index）

らないことが示された。図3に色覚異常者の結果を示す。横軸は参加者、縦軸は C-index を表す。2型（Duetan）では、弱度色覚異常の参加者（D2 と D3）は正常色覚者の2型シミュレートの結果と同様の傾向が見られた。まとめると、2つのモデルの20 nm シフト時と2色覚モデルの結果から、反対色モデルの方が優れている可能性が高いことが示された。

〔課題2の内容、成果〕

課題2では、反対色モデルによるシミュレート画像が、色覚異常者の見えをどの程度表現できているのかを検証した。具体的には、錐体感度関数を0.5 nm から20 nm までシフトさせ、各型についての見え画像を作成し、色覚異常者を対象に、どのシフト量まで原画像と同じに見えるかを調べた。さらに、アノマロスコープで測定された異常強度及び課題1で得られた C-index とシフト量の関係を調べた。

実験参加者は、色覚異常者16名（1型：2色覚3名、異常3色覚5名、2型：2色覚3名、異常3色覚5名）、コントロール群として正常色覚者5名が参加した。全参加者から香川大学創造工学部の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会にて承認された（承認番号30-002）インフォームドコンセントを得た。正常色覚者には石原式検査を、色覚異常者には、石原式検査とD-15テストを実施し、さらに異常の型と等色範囲をアノマロスコープ（NEITZ OT-II）



（1型、左からオリジナル、シフト量5 nm、10 nm、20 nm）

図4 反対色モデルによる見え画像例

にて測定した。

実験環境は課題1と同様であった。実験刺激の画像は、著作権フリーの Wikimedia commons [4]、パブリック美術館 [5] から選んだ。画像の内容は、花（Flower 1-5）、絵画（Painting 1-5）、食べ物（Food 1-5）の3カテゴリとし、各カテゴリの画像枚数は5枚とした。各画像に対して、1型及び2型で反対色モデルによる変換を行った。錐体基本感度関数のシフト量は0.5 nm から10 nm までは0.5 nm ステップ、11 nm から20 nm までは1 nm ステップとした。変換後、画像間の明るさの違いが判断に影響することを防ぐため、原画像も含めた全ての画像の輝度値を2乗平均平方根により正規化した。実験刺激の例として、Flower 1の原画像、シフト量5 nm、10 nm、20 nm で1型の見えに変換した画像を図4に示す。

実験刺激は、モニタ上の左側に原画像が、右側に変換画像が2枚並べて呈示された。実験参加者は、呈示された2枚の画像（原画像と変換画像）を比較し、両画像の見えが異なると感じたシフト量に調整する作業を行った。左側の原画像と右側の変換画像が同じに見えると感じるまでマウスのクリックにより調整し、見えが異なると感じたときに操作を止めた。1つのカテゴリに含まれる5枚の画像についてこの試行を行い、5回の試行を1ブロックとした。

実験条件は、色覚異常者に対しては、参加者の型で変換された、花、絵画、食べ物の3カテゴリについて1ブロックずつ行った後、同じ画像で再度1ブロックずつ行った。正常色覚者に対しては、1型と2型で変換された画像を用いて、3カテゴリについて1ブロックずつ行った。全参加者に対して、カテゴリの呈示順はランダムとした。

表1 画像ごとのシフト量とアノマロスコープ等色範囲の相関係数

Category	No.	Protan (N=8)	Deutan (N=8)	All (N=16)
Flower	1	-0.19	0.30	0.31
	2	0.82	0.55	0.73
	3	-0.43	0.45	0.23
	4	0.63	0.54	0.54
	5	0.83	0.67	0.73
Painting	1	0.65	0.43	0.69
	2	0.62	0.55	0.56
	3	0.66	0.41	0.66
	4	0.70	0.54	0.63
	5	0.80	0.54	0.67
Food	1	0.89	0.50	0.77
	2	0.84	0.41	0.57
	3	0.88	0.62	0.79
	4	0.68	0.47	0.48
	5	-0.31	0.32	0.27

実験参加者が原画像の見えと異なると判断した変換画像のシフト量を分析した。色覚異常者の測定値は、2回分のシフト量のうち大きい値を分析対象とした。その結果、全ての画像を通して異常強度が強い参加者のシフト量は大きくなった。しかしいくつかの画像では、2色覚者でもシフト量が10 nm前後となったものや、弱度異常3色覚者でもシフト量が20 nmになるものも見られた。正常色覚者の結果では、シフト量は高い画像でも1.2 nm以下となった。

次に、各画像について、色覚異常者16名分のアノマロスコープの等色範囲（等色範囲が大きいほど色覚異常強度が高いとみなす）とシフト量の相関係数を算出したものを表1に示す。さらに、カテゴリごとに最も相関が高い画像（Flower 5, Painting 4, Food 3）について、横軸を等色範囲、縦軸をシフト量としてプロットしたものを図5に示す。また、同参加者のC-indexとシフト量の間を関係を図6に示す。等色範囲とシフト量の間を線形回帰により求めたところ、決定係数はFlower 5で $R^2=0.492$ 、Painting 4で $R^2=0.345$ 、Food 3で $R^2=0.539$ となった。また、同様にC-indexとシフト量の間を関係式の決定係数は、Flower 5で $R^2=0.427$ 、Painting 4で $R^2=0.357$ 、Food 3で $R^2=0.559$ となった。

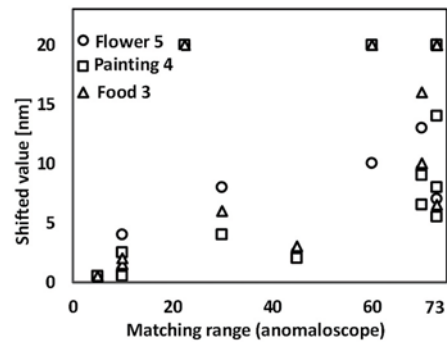


図5 実験によって得られたシフト量と等色範囲の関係

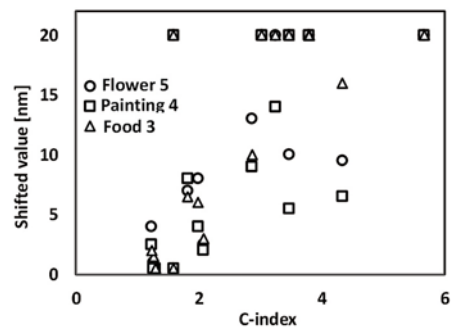


図6 実験によって得られたシフト量とC-indexの関係

実験結果から、全ての画像でアノマロスコープの等色範囲が広い（異常強度が強い）ほど、シフト量が高くなる関係が見られた。このことから、反対色モデルによる見え画像は、ある程度異常強度を表現できることが示された。しかし、画像によっては相関が弱いものも見られた。また型による違いもあり、Flower 1, 3, Food 5については、1型では負の相関、2型では正の相関と逆の結果となった。

課題1および2から、異常3色覚モデルとして反対色モデルが適しており、反対色モデルによるシミュレート画像がある程度色覚異常者の見えを表現していること、シミュレート画像により、色覚異常者の色覚強度を簡易に測定できる可能性を示唆した。

[今後の研究の方向、課題]

本課題によって、変換画像を用いた簡易な色覚異常強度の測定が可能であることを示した。しかし、いくつかの問題点があると考えられる。

1つ目に、課題2において色覚異常者が画像のどの部分を見て見えの違いを判断したのかわからないことである。色覚異常者の見えとシフト量の関係は明らかにされたが、画像のどの部分に注目して見えの判断を行っていたかは、参加者によって異なる可能性がある。これにより、画像によって結果に影響が出る可能性も否定できない。できるだけ正確な異常強度測定のためには、色覚異常者の混同色線上にある色分布を持つ画像が適しているだろう。このような画像を選定することによって、より正確な異常強度測定法の実現が可能となると考えられる。

[成果の発表, 論文等]

- ・西谷, 佐藤: 異常3色覚者の強度測定を目的とした最適なシミュレート手法の比較と評価. 電気学会産業計測制御研究会資料, 33-36, 2018.
- ・齋藤, 佐藤, 滝本: デジタルカラーフィルタを通した赤緑色覚異常者の弁別. 第20回SICE SI部門講演会講演論文集, 3頁, 2019.

講演論文集, 3頁, 2019.

- ・K. Sato, K. Nishitani, and H. Takimoto: Verification of the color appearance model for anomalous trichromats based on the shift of cone spectral sensitivities. *Abstract book of the 25th Symposium of ICVS*, 1 page, 2019.

[引用文献]

- [1] Brettel, et al. (1997). Computerized simulation of color appearance for dichromats. *JOSA A*, 14(10), 2647-2655.
- [2] Yang, et al. (2008). Quantification and standardized description of color vision deficiency caused by anomalous trichromats-Part I: Simulation and measurement. *J Image Video Proc*, 487618.
- [3] Machado, et al. (2009). A physiologically-based model for simulation of color vision deficiency. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 15(6), 1291-1298.
- [4] Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page)
- [5] パブリックドメイン美術館 (<http://www.bestweb-link.net/PD-Museum-of-Art/>)