

令和 5 年 5 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04197

研究課題名（和文）色覚異常における未知の色差知覚特性に立脚した色変換技術の開発

研究課題名（英文）Development of color conversion techniques utilizing unknown properties of color difference perception in individuals with color vision deficiencies

研究代表者

永井 岳大（Nagai, Takehiro）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：40549036

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、多様な色覚型に適した色変換法の確立を目指し、色覚型ごとの色覚特性を調べた。1型・2型色覚でも取得できる輝度信号と青黄信号のうち、2型色覚では色の目立ちの判断を青黄に依存する傾向が見出された。さらに、3色覚を対象とした実験から、大色差の判断や色配置の嗜好等の高次色彩判断に視環境の経験依存性が見出された。これらの結果から、多様な色覚型に向けた色変換法の確立には、高次色彩認知特性に着目する必要があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、少数派色覚の方々にも分かりやすい色使いの有効性を向上させるために、1型・2型色覚の色彩認知特性を多角的に検討した。実験では、1型・2型色覚の方々でも情報を正しく受け取れる輝度や青黄色の知覚を対象とした。結果として、色検出感度には3色覚と1型・2型色覚で差がなかったが、色の目立ち判断では2型色覚は青黄信号に依存しやすい可能性が示された。この結果は、少数派色覚のための色設計指針を策定する際の基礎的な知見となる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a color conversion method for protanopes and deuteranopes by examining the color vision characteristics of different color vision types. We found that deuteranopes relied more on blue-yellow signals than luminance signals for color saliency judgments. We also found that higher-order color judgments, such as large color differences and preferences for color designs, were influenced by individuals' experiences in visual color environments. These findings suggest that higher-order characteristics of color vision should be considered when developing a color conversion method for different types of color vision.

研究分野：視覚心理物理学による色彩科学

キーワード：色覚多様性 2色覚 色弁別 色差知覚 心理物理学

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

カラーユニバーサルデザイン（CUD）とは、様々な色覚型の人に適切に情報を伝達できる色彩デザインのことである。本研究では、次世代 CUD 技術の基盤となる色知覚特性の解明を目指した。従来の CUD は、L 錐体/M 錐体に異常がある 1 型/2 型色覚を主な対象とし、これらの色覚型で感度が低い赤緑方向の色を用いる代わりに、正常に機能する S 錐体で捉えられる色の差（S 色差と呼ぶことにする）と輝度差を活用し色の見分けを支援する方針となっている。しかし、S 色差と輝度差をどのように活用することが CUD にとって真に有効であるかはほとんど検証されていない。例えば、S 色差と輝度差のどちらが情報伝達に優れているかや、多数派色覚である 3 色覚と 1 型/2 型色覚では S 色差と輝度差の知覚特性に違いがあるのかもわかっていない。

2. 研究の目的

本研究課題では、以下 2 点を主な目的とした。

(1) 1 型/2 型色覚における色覚特性を様々な色情報処理レベルから多角的に明らかにする。特に、錐体の特性を考慮すると 3 色覚でも 1 型/2 型色覚でもほぼ同等に捉えられるはずの輝度差と S 色差に基づく色知覚特性にあえて着目し、3 色覚との特性の違いがあるかを検証する。

(2) (1) の検証にあたり、いくつかの前提条件がある。それは、日常生活において曝露される色情報が色覚の可塑性に影響し、それが色覚型の間での色知覚特性の差異の原因になりうること、また様々な色知覚課題に関わる情報処理レベルの違いが明確であることである。そこで、これらの前提条件の妥当性について、3 色覚の被験者を対象にした実験から検証する。

3. 研究の方法

(1) 色覚型による輝度差/S 色差の感度特性

3 色覚 9 名、1 型 2 色覚 9 名、2 型 2 色覚 6 名に被験者として協力していただき、色覚特性を計測するための心理物理実験を行った。実験刺激の例を図 1 に示す。実験刺激は液晶ディスプレイに呈示される、色の異なる 4 つの円形画像からなるものであった。この刺激に対し、被験者の課題が異なる以下の 3 種類の実験を行った。なお、被験者の募集において、NPO 法人カラーユニバーサルデザイン機構にご協力いただいた。

a) 色弁別実験

目的は、色弁別に関わる低次な色メカニズムにおける色覚型間の違いを検証することである。実験の各試行で呈示される刺激において、4 つの円のうち一つだけ、S 方向、輝度方向、それらの中間方向のいずれかへ灰色からシフトさせた色となっており、その他は灰色であった。被験者は、色が異なる円を四肢強制選択により応答した。この試行を PSI 上下法により刺激強度を変更しながら繰り返し行った。その実験結果から、弁別感度（閾値）を推定し、さらに色方向間でそれらの感度を比較した。

b) 色差知覚実験

目的は、閾上色差に関わる高次な色メカニズムにおける色覚型間の違いを検証することである。各試行では、4 つの円に、S 方向、輝度方向、それらの中間方向から選ばれ、色コントラスト（背景からの輝度差と彩度）がランダムな異なる色が呈示された。被験者は、左右それぞれの上下 2 つの円の色差を判断し、左右どちらの色差が大きいかを二肢強制選択で応答した。この手法は最尤差スケージング (MLDS) 法と呼ばれる感覚量を定量化する実験方法である。この方法で、S 方向、輝度方向、中間方向それぞれの色差知覚の大きさを定量化することができる。色差知覚の大きさを感度とみなして色方向間で比較した。

c) 色の目立ち実験

目的は、日常的な色認知課題における色覚型間の違いを検証することである。具体的な実験課題として、色の代表的な役割の一つである色の目立ち判断を用いた。各試行では、4 つの円に、S 方向、輝度方向、それらの中間方向からランダムに選ばれた異なる色が呈示された。被験者は、4 つの円のうち最も目立つものを「できるだけ早く」選択して応答するように指示された。この実験では、3 種類の色方向のうち、どれが色の目立ちに最も強く寄与しているかを、応答時間を指標として検証した。

(2) 色覚の可塑性と情報処理分離の検証

a) 色の知覚学習

目的は、色覚の可塑性が生じる色情報処理段階を直接的に調べることである。各被験者は、

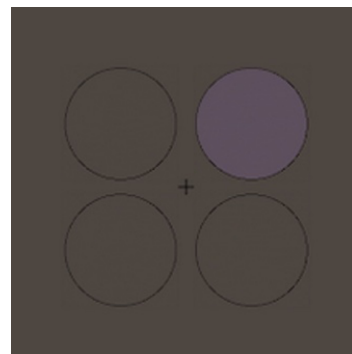


図 1 実験刺激の例

図1に示したような刺激に対して、特定の色の弁別を1日あたり10分ずつ5日間繰り返した。その学習の前後で、色差知覚特性や色カテゴリー認知に関わる全く同じ色認知課題を行ってもらうことで、色覚特性が学習によってどのように変化するのかを検証した。

b) 色彩環境と色彩認知

目的は、我々が過ごす色彩環境と色彩認知の関連性を明らかにすることで、高次色彩認知の可塑性を間接的に検証することである。日常の色彩環境における稀有性が異なる様々な色分布を抽象画のパターンに付与し、その嗜好度をサーストンの一対比較法により計測した。ここで、色分布の稀有性は、変分オートエンコーダ (VAE) を用いて色彩環境を学習させた後、その潜在変数空間の多変量正規性に基づいて定量化した。

4. 研究成果

(1) 色覚型による輝度差/S色差の感度特性

a) 色弁別実験

各色覚型の色弁別感度を図2に示す。この図の縦軸は、輝度弁別感度に対する相対的なS弁別感度（すなわち弁別感度比）を表している。横軸に示されている3色覚 (Trichromat)、1型色覚 (Protanope)、2型色覚 (Deuteranope) の間では、弁別感度比に違いがなく、統計的有意差もなかった。また、各色覚型においては、感度比の個人差も大きかった。この結果は、色弁別に対する輝度差とS色差の寄与において、色覚型による違いがほぼないことを示唆している。

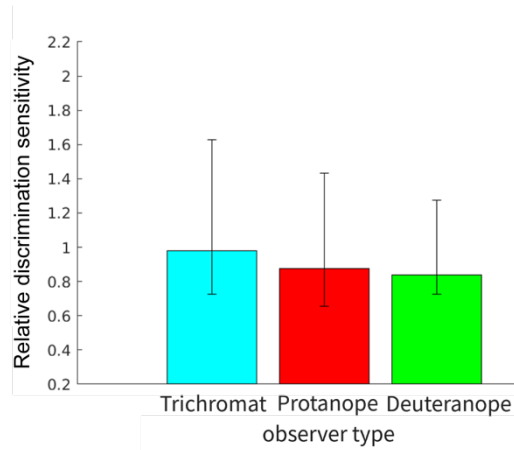


図2 色弁別感度

今回実験対象としたすべての色覚型において、S錐体は正常であり、かつL錐体もしくはM錐体のいずれかが正常である。そのため、S錐体情報は正常に受け取ることができ、輝度情報もL錐体、M錐体のどちらかに依存することによりほぼ正常に受け取ることができる。この特性を考慮すれば、3色覚と1型/2型色覚の間で色弁別の特性が類似していることは自然な結果であるといえる。

b) 色差実験

この実験では、輝度方向、S方向、中間方向の各色方向における色空間の距離と色差感覚の強さの関係を計測した。そこで、単位色空間距離あたりの色差感覚の強さの変化量を色差感度と定義し、各色方向に対して求めた。最後に、輝度方向とS方向の色差感度比を算出した。その結果、色差感度比はほぼ図2と同じグラフとなり、色覚型の中に有意な違いが見られなかった。この結果から、色弁別閾値のみならず大きな色差知覚の感度においても、輝度差とS色差の活用という点において色覚型によってほとんど変わらない可能性が示唆される。色弁別と閾上色差には、色表現の異なる別々のメカニズムが関与していると考えられる (例: Sato et al., 2016)。さらに、閾上色差は、シーンのコンテクストなどの高次な情報の影響を受けやすいため (例: Hurlbert and Wolf, 2004)、色弁別よりも高次なメカニズムが関与しているはずである。したがって、今回の色差実験の結果は、閾上色差に至るまでの色情報表現には色覚型による違いがほとんどない可能性を示唆しているといえる。

c) 色の目立ち実験

色の目立ち実験においては、各色方向に対し目立つ色を判断できるまでの応答時間を、その感度の指標とした。この場合、応答時間が短いほどその色方向が目立つと判断されたとみなすことができるため、応答時間の逆数を「目立ち度」として定義した。さらに、目立ち度について輝度方向とS方向の比率をとり、「S相対目立ち度」と定義した。

その結果を図3に示す。縦軸はS相対目立ち度を表している。この結果において、2型色覚において他の色覚型よりも統計的に有意にS相対目立ち度が大きかった。また、1型色覚においても、有意ではないものの3色覚よりもS相対目立ち度が大きい傾向があった。また、3色覚においてS相対目立ち度が個々の2型色覚よりも大きい被験者は2名しかおら

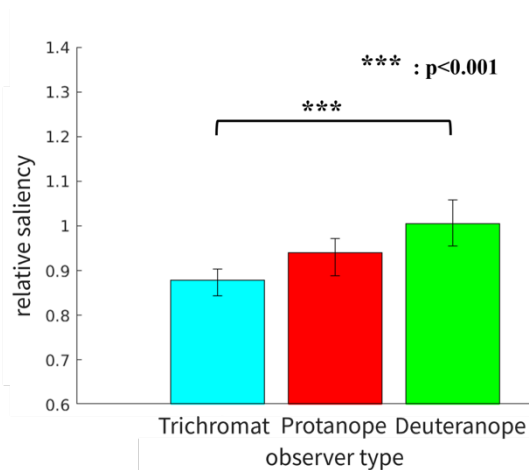


図3 色弁別感度

ず、特定の被験者の特性だけを反映した結果というわけでもなかった。この結果から、2型色覚では、色の目立ち判断において輝度差よりもS色差により強く依存することが示唆される。つまり、色の目立ちという日常的な課題においては、1型/2型色覚の方々に色により情報を提示する場合、S色差を活用することが有用である可能性がある。

(2) 色覚の可塑性と情報処理分離の検証

a) 色の知覚学習

被験者は、赤色付近の色の弁別を5日間学習した。その間の弁別感度の変化を図4に示す。この図では縦軸は色弁別閾値を表しており、数値が小さいほど感度が高いことを示している。予想どおり日が進むにつれて弁別感度が向上していったことから、色弁別に対して学習効果があったことが確認された。

次に、学習前後の様々な色に対する色差知覚量を比較した。具体的には、赤、青、緑、黄付近の2色の組み合わせに対する知覚的色差を、無彩色刺激2色を使って被験者に再現してもらい、その応答を学習前後で比較した。その結果、個人差が大きいこともあるが、学習前後に大きな違いは見られなかった。

続いて、色カテゴリー境界の学習前後の違いについて検証した。色カテゴリーは、多数の色をまとめて知覚する(トマトの表面の色は赤っぽい様々な色から構成されるが、我々はそれらをまとめて「赤」と知覚する)機能のことを指し、色認知において色弁別よりもかなり高次な情報処理が関わると考えられる。この実験では、赤色付近の色に対して色カテゴリーを学習したため、その付近にある色カテゴリー境界である紫-ピンク、ピンク-オレンジに該当する色を学習前後で比較した。

測定したカテゴリー境界の結果を図5(紫-ピンク)と図6(ピンク-オレンジ)に示す。これらの図で縦軸はカテゴリー境界に対応する色角度(色相)を示し、0度が学習色、正の色角度が青色方向、負の色角度が黄色方向を示す。紫-ピンクの境界は学習前には正の色角度であったが、学習後に0度方向に有意にシフトした。また、ピンク-オレンジの境界は学習前には負の色角度であったが、学習後にはやはり0度方向にシフトした。この結果は、色弁別の経験により色カテゴリーという高次な色認知特性が変化することを示唆している。さらに、同様な実験で、色の見えを反映していると考えられるユニーク赤(青みも黄みもない赤)に対応する色角度を学習前後で比較したところ、色カテゴリーと同様に、学習後には、0度方向へのシフトが生じた。したがって、色弁別の学習による色カテゴリーの変化は、単に色の呼び方が変わったというよりも、色の見え方そのものが変化したことを反映していると考えられる。

本研究課題では、この知覚学習について1型/2型被験者を対象に実験を行ったわけではない。しかし、1型/2型色覚の方々は3色覚とは異なる色情報を日常生活において常に受け取っていることから、本研究の結果から色カテゴリー等の判断において1型/2型色覚が3色覚と全く異なる特性を有する可能性が強く示唆される。実際、1型/2型色覚の色名の使い方には3色覚と比較して非常に大きな個人差があることが知られており、これは個人間での経験の違いが1型/2型色覚の高次色認知に支配的に影響するという考えと矛盾しない。

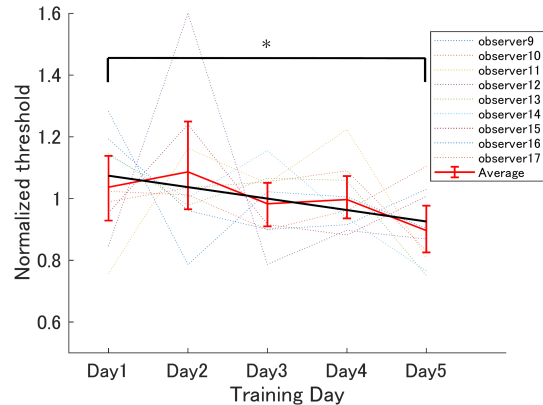


図4 学習による色弁別感度の向上

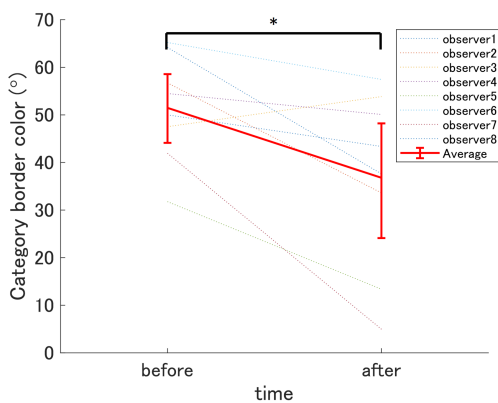


図5 紫とピンクの境界

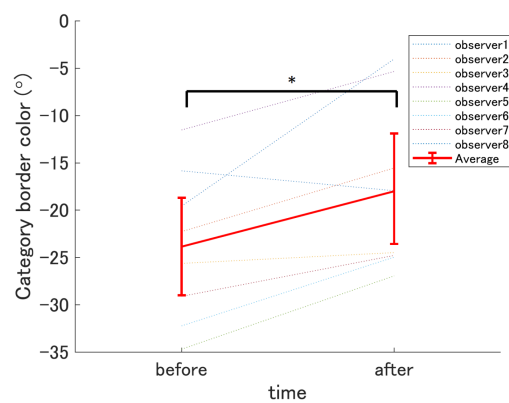


図6 ピンクとオレンジの境界

b) 色彩環境と色彩認知

実験刺激の例を図7に示す。この図では、右にある画像ほど稀有性が高くなるように並んでいる。このように、空間パターンが同一だが、色分布とその色彩環境中の稀有性が異なる画像の選好度をサーストンの一対比較法により計測した。

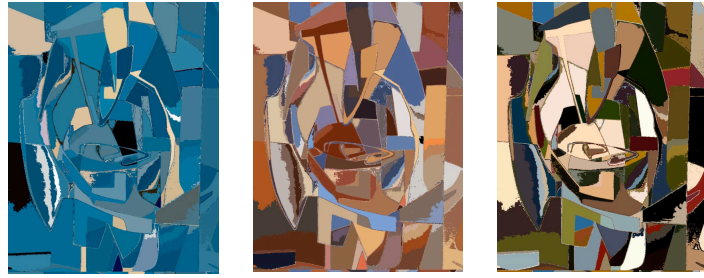


図7 稀有度の異なる画像例

4種類のパターンの画像に対する選好度を図8に示す。各パネルが各空間パターンに対する結果を示しており、横軸が稀有性(稀有度)、縦軸が選好度を示す。右下のパターンを除いた全てのパターンにおいて、稀有性が高い色分布の画像ほど好まれやすい傾向があることがわかる。統計的にも、右下以外の全パターンにおいて、稀有度と選好度に有意な正の相関があった。この結果は、色彩環境中において稀有な色分布ほど、絵画において好まれやすい傾向があることを示唆している。ただし、この結果は必ずしも稀有な色分布が好まれるという単純な関係性を示すわけではないことに留意する必要がある。従来研究においては、絵画の元画像の色分布の色相を回転させると、元画像と比較して選好度が低下してしまうロバストな現象が報告されている。色相を機械的に回転させた場合、ネガポジ反転の画像が強い違和感を与えるように、色彩環境中ではかなり稀有性の高い色分布になってしまう可能性が高いと考えられる。この結果は、色彩環境における稀有性が高すぎると今度は選好度が悪化する可能性を示唆している。

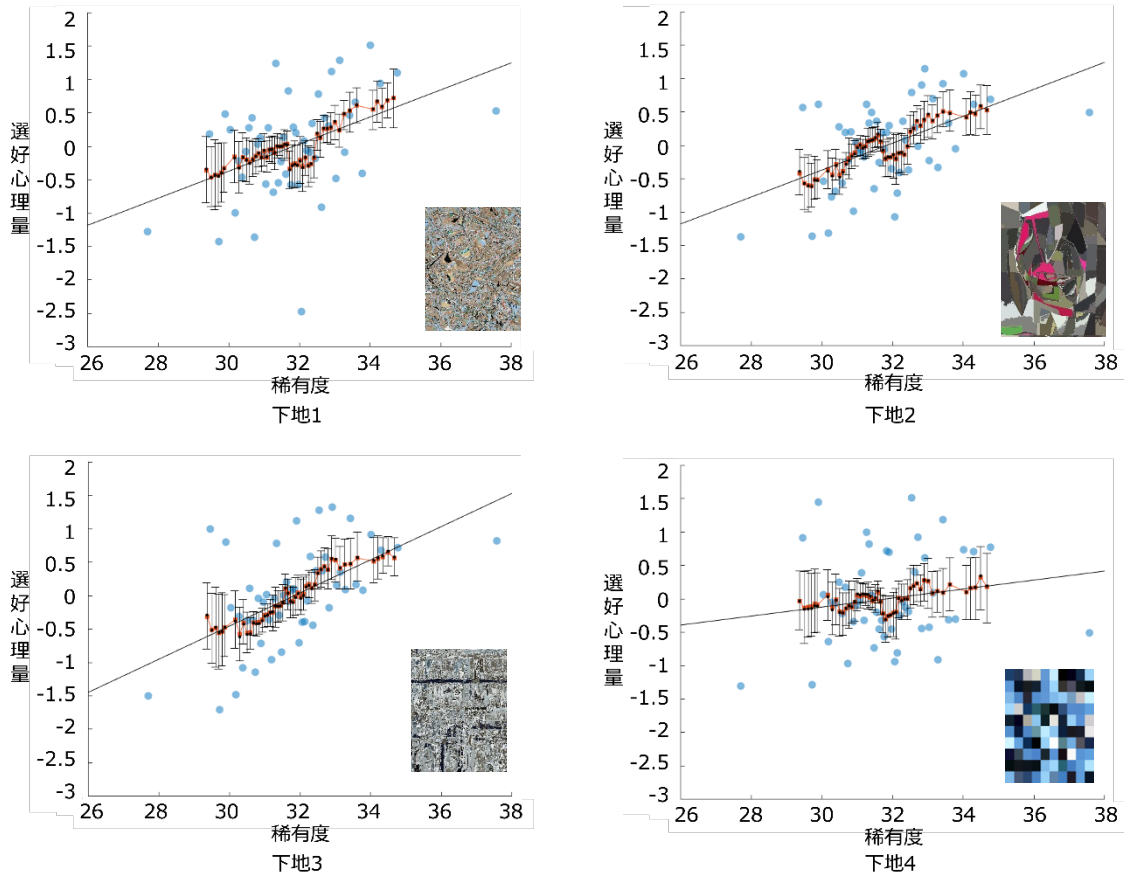


図8 稀有度と選好度の関係

(3) まとめ

本研究課題から、1型/2型色覚では、色の目立ちを判断するような高次な色課題において、輝度情報とS色差情報の使い方が3色覚とは異なる可能性が示された。今回の被験者の色覚型では輝度情報もS色差情報も同等に取得できるはずであることから、高次色情報処理段階に色覚型による違いがあると考えられる。さらに、色の知覚学習により色カテゴリーが変容すること、また色の選好が色分布の稀有性の影響を受ける可能性が示された。この結果は、色覚間の高次色覚特性の違いが曝露される色分布の違いに起因して生じるという仮説につながるものである。今後の課題として、この仮説を1型/2型色覚の方々を対象とした実験で直接的に検証するとともに、その特性を考慮した色デザイン手法を開発していくことが挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Cai Yuyang, Kiyokawa Hiroaki, Nagai Takehiro, Haghzare Leyla, Arnison Matthew, Kim Juno	4. 巻 40
2. 論文標題 Effects of specular roughness on the perception of color and opacity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 A220 ~ A220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAA.479972	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Koizumi Kazuto, Nagai Takehiro	4. 巻 23
2. 論文標題 The dominating impacts of Helmholtz-Kohlrausch effect on color-induced glossiness enhancement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Vision	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1167/jov.23.1.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nagai Takehiro, Kakuta Kana, Yamauchi Yasuki	4. 巻 22
2. 論文標題 Luminance dependency of perceived color shift after color contrast adaptation caused by higher-order color channels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Vision	6. 最初と最後の頁 8 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1167/jov.22.7.8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sato Tomoharu, Nagai Takehiro, Kuriki Ichiro	4. 巻 37
2. 論文標題 Hue selectivity of collinear facilitation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 A154 ~ A154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAA.382870	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yuyang Cai, Hiroaki Kiyokawa, Takehiro Nagai, Leyla Haghzare, Matthew Arnison, Juno Kim
2. 発表標題 Interactions in the material appearance of colored semi-opaque 3D objects simulated on generic computer displays
3. 学会等名 The 29th International Display Workshops (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuto Koizumi, Yuma Watanabe, & Takehiro Nagai
2. 発表標題 What factors determine the effects of color on perceived gloss? -Helmholtz-Kohlrausch effect vs highlight-shading color contrast-
3. 学会等名 Vision Sciences Society 2021 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀内涼葉, 永井岳大
2. 発表標題 色弁別の知覚学習がカテゴリカル色知覚を変化させる
3. 学会等名 日本色彩学会第53回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口正治, 永井岳大
2. 発表標題 1型・2型色覚の色知覚へのS錐体情報の寄与
3. 学会等名 日本色彩学会色覚研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小泉和人, 永井岳大
2. 発表標題 有彩色色度が光沢感知覚に与える影響～自然な色分布を持つ物体表面における検討～
3. 学会等名 日本視覚学会2023年冬季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀内涼葉, 永井岳大
2. 発表標題 色弁別の知覚学習による様々な色知覚課題への波及効果
3. 学会等名 日本視覚学会2023年冬季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小泉和人, 永井岳大
2. 発表標題 ハイライト領域のHelmholtz-Kohlrausch効果が有彩色表面における光沢感を上昇させる
3. 学会等名 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口正治, 永井岳大
2. 発表標題 1型・2型色覚の色知覚へのS錐体情報の寄与
3. 学会等名 日本色彩学会色覚研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内涼葉, 永井岳大
2. 発表標題 色弁別の知覚学習による色カテゴリー境界の変化
3. 学会等名 日本視覚学会2022年冬季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小泉和人, 永井岳大
2. 発表標題 有彩色付与による明るさ感の増加が光沢感増大に与える影響
3. 学会等名 日本視覚学会2022年冬季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鐘 依林, 永井岳大
2. 発表標題 Color space distortion induced by perceptual learning on color discrimination
3. 学会等名 日本視覚学会2021年冬季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長澤一翔, 田代知範, 山内泰樹, 永井岳大
2. 発表標題 1型・2型色覚の色知覚における輝度信号と色信号の役割について
3. 学会等名 日本視覚学会2021年冬季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤雄謙, 田代知範, 山内泰樹, 永井岳大
2. 発表標題 視対象の色差の大きさによる色差知覚の感度特性の変化
3. 学会等名 日本視覚学会2021年冬季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角田佳菜, 田代知範, 山内泰樹, 永井岳大
2. 発表標題 色方向と空間周波数の組み合わせに対する随伴性色順応はあるか?
3. 学会等名 日本視覚学会2021年冬季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuken Ito, Tomoharu Sato, Tomonori Tashiro, Yasuki Yamauchi, & Takehiro Nagai
2. 発表標題 Sensitivity to different levels of supra-threshold color difference
3. 学会等名 The 15th Asia-Pacific Conference on Vision (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kana Kakuta, Tomonori Tashiro, Yasuki Yamauchi, & Takehiro Nagai
2. 発表標題 Color adaptation to temporal color modulations along complicated loci in the chromaticity-luminance plane
3. 学会等名 The 15th Asia-Pacific Conference on Vision (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Nagai, Kana Kakuta, Tomonori Tashiro, & Yasuki Yamauchi
2. 発表標題 Color contrast adaptation to temporal variations on complex luminance-chromaticity loci
3. 学会等名 The 25th symposium of the International Colour Vision Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	須長 正治 (Sunaga Shoji) (60294998)	九州大学・芸術工学研究院・教授 (17102)	
研究分担者	山内 泰樹 (Yamauchi Yasuki) (60550994)	山形大学・大学院理工学研究科・教授 (11501)	
研究分担者	増田 修 (Masuda Osamu) (90775967)	新潟医療福祉大学・医療技術学部・教授 (33111)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
オーストラリア	ニューサウスウェールズ大学		