



色識別支援のための感覚代替インタフェースに向けた 感覚間協応に基づく色-振動協応マップ構築手法の提案と評価

長岡瞬¹⁾, 平尾悠太郎¹⁾, ペルスキアエルナンデス モニカ¹⁾, 内山英昭¹⁾, 清川清¹⁾

1) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地 5)

概要: 本研究は、感覚間協応に基づき、色覚異常者の視覚を損なわない色識別支援インタフェースの基盤構築を目指す。そこで、紫、紺、青、緑、黄、橙、赤の 7 色に対し、感覚的に対応する振動を周波数 (30 – 250 Hz) と振幅 (0 – 100 %) の 2 次元空間で探索させる課題を実施した。19 名の実験参加者のデータの相関分析や Friedman 検定等で分析した結果、特に、暖色系は高振幅、寒色系は低振幅に対応し、知覚輝度の高い色は高周波数に結びつく傾向が見られた。本研究は、色と振動の明確な協応パターンを明らかにするもので、今後の感覚代替インタフェースの設計指針を提供する。

キーワード: 感覚間協応, 感覚代替, 色覚異常, 色-振動協応マップ

1. はじめに

色覚異常は、錐体細胞の欠損や機能不全により、赤と緑などの区別が困難になる視覚特性である。世界で約 2 億人がこの特性を有すると推計されており [1], 図表の読み取りや信号識別など日常生活で困難を抱える場面が多い。近年、公共施設や交通機関でユニバーサルデザイン導入が進む一方、医療、製造など色の識別が不可欠な職種では、この特性が依然として制約となっている。そのため、色覚異常者を支援する多様な手法が提案されてきたが、当事者本来の見え方を損なわずに瞬時に色識別を可能にする手法は確立されていない。例えば、画像処理を用いた視覚的な色補正手法 [2] は区別しづらい色を別の色に変換するため、変換前後の対応付け処理が利用者の認知負荷を高める懸念がある。また、色を特定の音色や振動パターンに記号的に変換して色を伝達する手法 [3][4] は、提示刺激とラベルの逐次的な照合が必要であり、学習コストを要し、即時的な理解を妨げうる。ユニバーサルデザインや遺伝子治療といったアプローチも存在するが、倫理的・経済的課題から社会適用は容易ではない。そのため、色覚異常者本来の見え方を損なわず、低学習コストで色情報を即時的かつ自然に識別可能とする支援手法が求められる。

この課題に対し本研究では、感覚代替と感覚間協応に着目する。感覚間協応とは、ブーバ・キキ効果 [5] に代表される、異なる感覚同士が直感的に対応付けられる現象である。この効果では、事前学習なしに特定の音 (=ブーバ, キキ) と特定の形状が自然に結び付けられることが知られている。本研究では、この原理を、図 1 右下のように触覚や聴覚など他感覚への代替に応用することを提案する。これにより図 1 左下に示す現在の主流である視覚的な色補正手法とは異なり、視覚に依存しない色識別手法が実現できると考えている。色情報を代替する感覚として、本研究では触覚を用いる。色と協応する他感覚として、聴覚や嗅覚との対応な

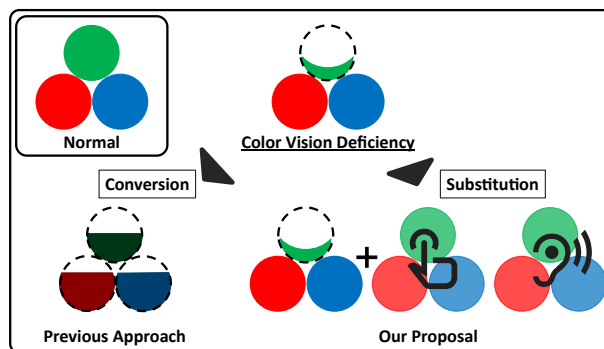


図 1: 従来手法と提案手法の概念図

どの報告 [6][7] があるが、聴覚は音声の把握に必須であり、色情報伝達への転用は実生活での支障や認知負荷の増大を招きうる。嗅覚への提示は装置の応答性や携帯性の点で実用的でない。一方、触覚は振動や温冷覚など多様な提示軸で身体各部へ並列かつ即時的に情報を提示可能である。したがって、触覚は色情報の代替において実用性と応答性に最も優れたモダリティであると考えられる。

本研究の目的は、色-触覚の協応関係を実験的に解明し、その知見を色覚異常者の色識別支援に応用可能な感覚代替インタフェースを構築することである。本稿では、触覚刺激として振動を用い、色と振動の関係性を既存研究とは異なる視点から調査した結果について報告する。

2. 関連研究

これまで、色と触覚の感覚間協応に関する研究は複数報告されている。温度では、Ho らが Implicit Association Test 等を用い、赤と温かさ、青と冷たさといった直感的な対応が統計的に支持されることを示した [8]。また、Kahol らは、表面テクスチャと色の対応付け学習により、盲者を含む実験参加者で色カテゴリーの識別可能性を実証した [9]。さらに、振動と色の対応関係に関する研究として、Dalezio らは 6 種

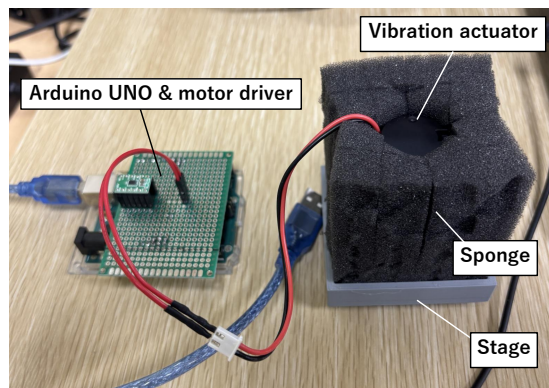


図 2: 実験用システムの構成

の振動刺激 (10 – 200 Hz, 10 – 40 dB) を提示し、それに対応する色を選択させる実験を行った [10]。この研究では、振幅が大きいほど彩度が高く感じられる傾向や、周波数によって選ばれる色相が変化する傾向が示された。

しかし、温度刺激は応答速度に課題があり、瞬時の提示や可搬性に乏しい。テクスチャ刺激も提示軸が限定的であり、色の微細な差異の表現には限界があることが示されていた。Dalezio らの研究も、あらかじめ定められた振動から色を選ぶ方式であり、表現できる色の範囲が限定されてしまう。そこで、本研究では周波数・振幅といった多次元的な表現が可能かつ、応答性・携帯性に優れた振動に着目する。さらに、Dalezio による先行研究とは逆に、色を先に提示し、実験参加者がその色に対応する振動を能動的に探索・選択する手法を提案する。これにより、個人内に潜在する色と振動の協応関係を柔軟かつ網羅的に把握することが可能となる。これは、色覚特性の有無を問わずに色情報を共有可能とする新たな感覚代替インタフェースの構築に繋がるものである。

3. 提案手法

本研究は、色情報を視覚以外の感覚へと代替する手法を提案する。先行研究では、予め用意された振動刺激から色を選択させる受動的な形式であったのに対し、本手法は、提示された色に「合う」と感じる振動 (周波数・振幅) を実験参加者自身が能動的に調整し、構築するという点に最大の特徴がある。この自己構築的なマッピング方式により、個人内に潜在する色と振動の協応関係 (協応マップ) を取得し、その共通性や個人差を分析することが可能となる。

本実験では、PC 画面上に提示される色刺激に対して、実験参加者がその色に対応する振動パターンをリアルタイムに探索できる GUI 環境を構築した。実験用システムのシステム構成を図 2 に示す。振動提示には、Foster 社製の振動アクチュエータ (型番 639897) を使用し、防振材 (スポンジ) に埋め込んで 3D プリンタで作成した固定台に設置した。アクチュエータは Arduino UNO に搭載した DRV8835 モータドライバを介し、PC からのシリアル通信に基づいてソフトウェア PWM で制御される。安定的な動作が可能で

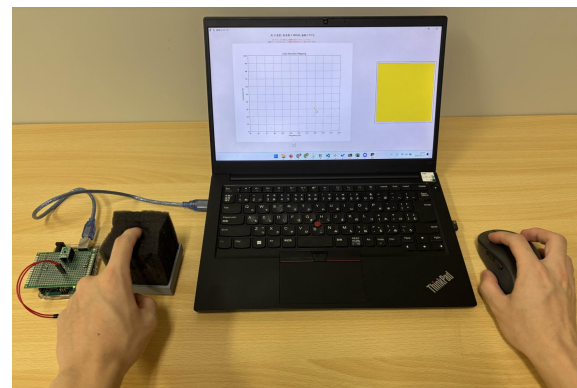


図 3: 実験時の様子

あった範囲として、周波数: 30 – 250 Hz, 振幅: 0 – 100 % で連続的に変更可能な環境を構築した。

また、振動提示のための操作インタフェースとして、Python の Tkinter ライブラリを用い、GUI を開発した。図 3 に示すように、画面右側に色刺激を提示し、左側には周波数と振幅を軸とする 2 次元の操作領域を配置した。実験参加者はこの領域内をマウスクリックすることで、対応する振動をリアルタイムに体感できる。納得がいくまで試行錯誤による調整が可能で、最終的に選択した周波数-振幅座標がデータとして記録される設計である。

4. 実験

提案手法を用いて、色と振動の感覚間協応マップを個人ごとに構築する実験を行った。実験参加者は、自己申告で色覚が正常な成人 19 名 (平均: 25.2 歳, 男性 10 名, 女性 9 名) であり、全員が同意の上で参加した。実験は 1 名ずつ個別に実施した。本実験で用いた色刺激は次の 7 色である: 紫 (128,0,128), 紺 (0,0,128), 青 (0,0,255), 緑 (0,255,0), 黄 (255,255,0), 橙 (255,165,0), 赤 (255,0,0)。なお、3 つの値の組はそれぞれ RGB 値を意味する。実験参加者は、振動アクチュエータの端面に左手の人差し指を触れて振動を体感した。各色につき 5 回の試行を設け、1 参加者あたり 35 個の選択データを収集した (総データ数: $35 \times 19 \text{ 名} = 665$)。色提示の順序はランダム化され、順序効果を最小限に抑えた。また実験中には振動アクチュエータの動作に伴って発生する音によるバイアスを抑制するため、イヤーマフを着用した。各試行の後には、選択時の理由等について簡易的にインタビューをした。これらのデータに基づき、統計解析およびクラスタリング分析を通じて、色と振動の協応パターンについて検討する。

5. 結果

5.1 色-振動協応マップの全体傾向

図 4 に、実験参加者 (19 名) が設定した色ごとの全振動パターンを示す。全体として、紫や紺などの寒色では低周波・低振幅領域に、赤や黄などの暖色では高周波または高振幅領域に分布する大局的な傾向が見られた。ただし、同

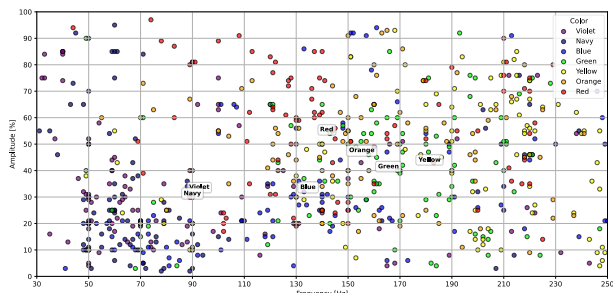


図 4: 全データの色-振動分布

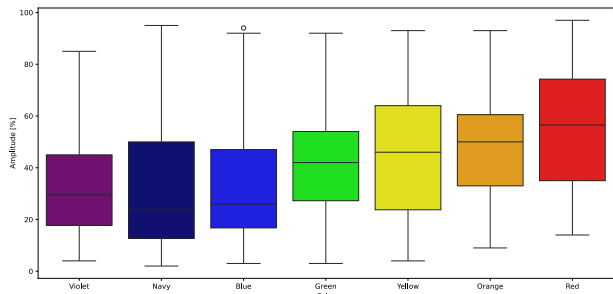


図 5: 各色と振幅の関係

一色内でも実験参加者間の選択には大きなばらつきもまた確認された。

5.2 色ごとの振幅・周波数分布の統計的傾向

次に各色に対する振幅および周波数の分布を図 5, 6 に示す。振幅については、暖色系（赤・橙・黄）は中央値が高く（おおそ 50 – 60 %）、寒色系（紫、紺、青）で低い傾向が見られた。特に赤は他の色より高振幅が選択され、紫・紺では低振幅が選択された。緑はこれらの中間に位置しつつ、やや高めめの振幅が選ばれる傾向を示した。色を要因とする Friedman 検定を実施した結果、統計的に有意な主効果が認められた ($\chi^2(6) = 18.8102, p = .0045$)。事後多重比較 (Dunn 法, $\alpha = .05$) では、赤と青 ($p = .027$)、赤と紺 ($p = .048$) の間に有意差が確認された。これは、実験参加者は赤を青系の色とは明確に区別し、より強い振動と結びつけていることを示唆する。

周波数については色間の差がより顕著であった。図 6 より、黄、緑、青は高周波数帯（中央値 170 – 200 Hz）に、紫や紺は低周波数帯（中央値 60 – 70 Hz）に分布が集中した。赤・橙は中周波数帯に位置した。Friedman 検定では極めて有意な主効果が得られ ($\chi^2(6) = 49.6917, p < .001$)、事後比較では多数のペアで有意差が認められた（例：黄-青, $p = .0269$; 緑-紺, $p < .001$; 橙-紫, $p = .0013$ ）。これらは、高周波寄りの色群（黄・緑など）と低周波寄りの色群（紺・紫）の間に感覚的に明確な分離があることを示している。さらに、色の知覚輝度と対応する周波数の平均値との間には強い正の相関が認められた (Pearson の相関係数 $r = .892, p = .007$)。これは、視覚的に明るく感じられる色ほど、高い周波数に対応づけられる傾向があることを示しており、色の知覚的明るさと振動周波数との間に一貫した対応関係が存在する可能性を示唆している。

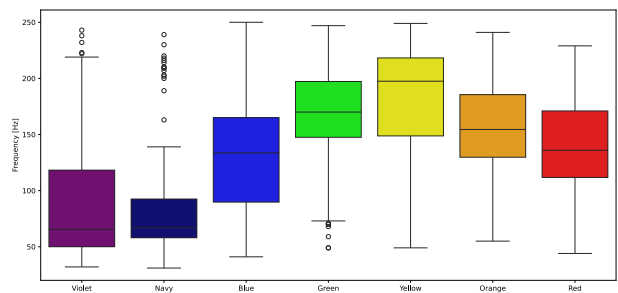


図 6: 各色と周波数の関係

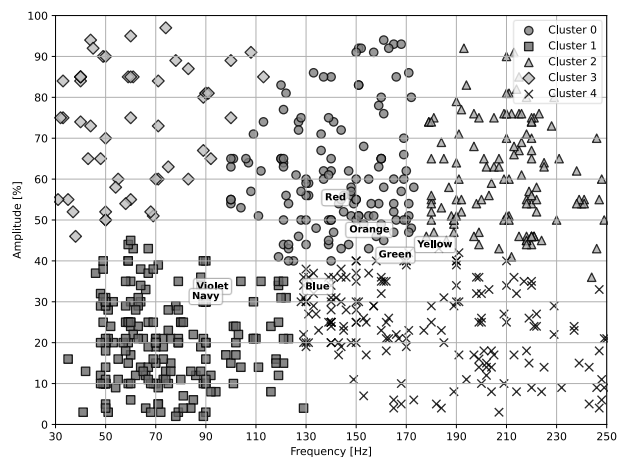


図 7: k=5 のクラスタリング結果

5.3 クラスタリングによる色-振動協応関係

色と振動の関係に潜在的な構造が存在するかを検討するため、全 665 点に対し k-means クラスタリングによる分析を実施した。Elbow 法およびシルエットスコアの算出の結果、クラスタ数は $k = 5$ となった（シルエットスコア: 0.42）。図 7 に、 $k = 5$ でのクラスタリング結果を示す。図 7 中のラベルは各色に対して実験参加者が設定した振動パターンの重心（平均周波数・平均振幅）である。また、図 8 のヒートマップは、各クラスタの色分布を示している。これらの図から、各クラスタがどの色と強く関連しているかが示される。たとえば赤、橙は高振幅・高周波領域に多く分布し、紫や紺、一部青は低振幅・低周波域に集中する傾向がみられた。また、青や緑、黄は周波数が中周波領域から高周波領域にかけて幅広く分布し、振幅は黄を除き、低振幅から中振幅にかけて分布する傾向が確認された。この結果は、7 色に対する振動パターンが完全にランダムではなく、およそ 5 種類の感覚的カテゴリに収束する可能性を示唆している。

6. 考察

本実験の結果、暖色系は高振幅、寒色系は低振幅に、また知覚輝度の高い色は高周波数に対応づけられる傾向が示された。インタビュー調査によれば、この協応は色に対する「活動的/静的」といった印象が振幅の強弱に、「明るさ」が周波数の高低に結びつくといった、複数の心理的メカニズムが作用した結果と解釈できる。また、この結果は、聴覚刺激で知られる音高と明度の協応 [6] が触覚でも存在する



図 8: 各クラスタの色分布

ことを示唆している。

本実験の結果は、今後の感覚代替インタフェースの設計思想に重要な示唆を与える。例えば、本実験では、振動の周波数は色の知覚輝度と強く対応し、振幅は「暖色/寒色」に対応するという大局的な分離には寄与したものの、個々の色相の違いを細かく表現するには至らなかった。このことから、振動は色の3属性（色相、明度、彩度）の中でも、特に明度情報を伝達する役割に割り当てるのが合理的であると考えられる。そして、より繊細な色相や彩度の情報を伝達するには、圧覚や温冷覚といった他の触覚モダリティを組み合わせることが有効となるだろう。さらに、具体的な実装にあたっては、本実験で得られた共通傾向と個人差の知見が重要な指針となる。本実験で見出された共通傾向は、各モダリティにおけるデフォルト設定として応用可能である。しかし、インタビューでは「緑や橙の位置が定まらない」といった声に代表されるように、無視できない個人差の存在も明らかとなった。そのため、固定的な単一のマッピングを全ユーザに適用するのは困難と考えられ、実用化においてはユーザが自身の感覚に合わせて調整できるカスタマイズ機能が不可欠となる。

上記の設計思想の確立に加え、本研究にはいくつかの課題も残る。第一に、実験参加者の多様性である。今回は一般色覚者のみを対象としたため、今後は色覚特性の異なる人々でも同様の評価を行い、協応パターンの普遍性を検証する必要がある。第二に、実験時間増大への対策である。今後予定している触覚モダリティの追加は実験時間の増大に直結するため、効率的な実験設計の工夫が求められる。今後はこれらの課題に取り組み、少数のキャリブレーション操作から個別の協応マップを自動生成する技術の確立や、色識別タスクでの有効性検証を通じ、より実用的な感覚代替インタフェースの実現を目指す。

7. おわりに

本稿では、色と触覚の感覚間協応に基づき、色識別を支援する新たな感覚代替インタフェースの基盤構築を目指し、その第一歩として、提示された色に対して実験参加者が直感的に対応すると感じる振動パターンを能動的に探索する

実験を実施した。その結果、暖色系は高振幅に、明度の高い色は高周波数に対応づけられるといった、色と振動の間に存在する共通の協応傾向を定量的に明らかにした。

本実験で得られた知見は、色識別支援インタフェースを設計する上で、多くのユーザが直感的に理解できるデフォルト設定の指針となる。同時に、結果に現れたばらつきや個人差の分析から、ユーザ自身が感覚に合わせて調整できるカスタマイズ機能の重要性も示された。

今後は、本実験のアプローチを発展させ、少数のキャリブレーション操作からユーザ個別の協応マップを自動生成する技術の確立を目指す。さらに、色識別タスクでの有効性検証や、他の触覚モダリティとの統合を通じ、より実用的で直感的な色情報支援の実現に貢献していく。

参考文献

[1] Machado et al.: A Physiologically-based Model for Simulation of Color Vision Deficiency, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 15, No. 6, pp.1291–1298, 2009.

[2] Langlotz et al.: ChromaGlasses: Computational Glasses for Compensating Colour Blindness, CHI'18, pp.1–12, 2018.

[3] Gonzalez et al.: Coloresia: An Interactive Colour Perception Device for the Visually Impaired, Multimodal Interaction in Image and Video Applications, Vol. 48, pp.47–66, 2013.

[4] Carcedo et al.: HaptiColor: Interpolating Color Information as Haptic Feedback to Assist the Colorblind, CHI'16, pp.3572–3578, 2016.

[5] Ramachandran et al.: Synaesthesia — A Window Into Perception, Thought and Language, Journal of consciousness studies, Vol. 8, No. 12, pp.3–34, 2001.

[6] Henrik et al.: Cross-modal communication : sound frequency influences consumer responses to color lightness, Journal of Marketing Research, Vol. 53, No. 4, pp.551–562, 2016.

[7] Gilbert et al.: Cross-Modal Correspondence between Vision and Olfaction: The Color of Smells, The American Journal of Psychology, Vol. 109, No. 3, 1996.

[8] Ho et al.: Colour-Temperature Correspondences: When Reactions to Thermal Stimuli Are Influenced by Colour, PLoS ONE, Vol. 9, Issue. 3, 2014.

[9] Kahol et al.: Learning and Perceiving Colors Haptically, ASSETS06, pp.173–180, 2006.

[10] Delazio et al.: Cross-modal Correspondence between Vibrations and Colors, IEEE World Haptics Conference, pp.219–224, 2017.