

スマートフォンで利用可能な 2 色 覚補助のための実時間画像処理法 の研究

2020年3月

比良 祥子

目次

第 1 章 序論	1
1.1 まえがき	1
1.3 本論文の構成と概要	2
1.4 赤緑色覚異常	4
1.5 色覚異常をサポートする既存技術	10
1.5.1 光学フィルターによる色の強調	10
1.5.2 ソフトウェアによる色の強調	10
1.5.2 既存技術の現状	11
1.6 新しい色覚支援コミュニケーションツールの要件	11
1.7 むすび	12
第 2 章 MDS に基づく色対比知覚の個人差の検討	15
2.1 まえがき	15
2.2 仮説：色覚の進化と出生後の発達の類似性	16
2.3 実験方法	19
2.3.1 被験者	19
2.3.2 実験刺激と色票による評価実験の実験環境	19
2.3.3 色名（言語）による評価実験の実験刺激	19
2.3.4 主観評価について	21
2.3.5 分析手法：多次元尺度構成法（MDS）	21
2.4 実験結果と考察	21
2.4.1 色票による評価実験の結果	21
2.4.2 色名（言語）による評価実験の結果	24
2.4.3 考察	24
2.5 むすび	27
第 3 章 MDS 分析に基づく 3 色覚者に内在する 2 色性の検討	29
3.1 まえがき	29

3.2	実験方法	30
3.2.1	実験環境	30
3.2.2	呈示刺激	30
3.2.3	被験者	33
3.2.4	主観評価について	33
3.2.5	分析手法	33
3.3	実験結果と考察	33
3.3.1	10色呈示刺激実験の結果	33
3.3.2	14色呈示刺激実験の結果	36
3.3.3	考察	36
3.4	むすび	39
第4章	色覚支援コミュニケーションツールの開発コンセプト	41
4.1	まえがき	41
4.2	提案ツールの概要とコンセプト	43
4.3	携帯端末環境での軽量なリアルタイムビデオ処理の実現	44
4.4	3色覚向けの簡易な2色覚シミュレーション手法	46
4.5	動作モード	46
4.6	むすび	47
第5章	90度色相回転法	49
5.1	まえがき	49
5.2	提案手法の理論	49
5.3	検証実験	52
5.3.1	実験装置	52
(a)	仕様	52
(b)	ユーザーインターフェース	52
(c)	ビデオパフォーマンス	52
5.3.2	実験手順	52
(a)	一般的な方法	52

(b) 90 度色相回転法を使用するための手順	53
(c) 被験者	54
5.3.3 実験 1 : R-G カラー分類実験	54
(a) 方法	54
(b) 結果	54
5.3.3 実験 2 : 混同しやすい色の分類実験	56
(a) 方法	56
(b) 結果	56
5.3.3 実験 3 : 一般的な環境での使用感の評価実験	58
(a) 方法	58
(b) 結果	58
5.3.3 実験 4 : 2 色覚シミュレーションの性能調査	61
(a) 方法	61
(b) 結果	61
5.1 むすび	61
第 6 章 色相ブレンド法	63
6.1 まえがき	63
6.2 提案手法の理論	63
6.2.1 基本アルゴリズム	63
6.2.2 R-G カラー領域の選択	67
6.2.3 正方向および逆方向の色相ブレンド	67
6.3 検証実験	69
6.3.1 実験手順	69
(a) 一般的な方法	69
(b) 被験者	69
(c) 色相ブレンド法の使用手順	69
(d) 装置	69
6.3.2 実験 5 : R-G カラー分類実験	70
(a) 方法	70

(b) 結果	70
6.3.4 実験 6 : 混同しやすい色の分類実験	72
(a) 方法	72
(b) 結果	72
5.3.5 実験 7 : 一般的な環境での使用感の評価実験	75
(a) 方法	75
(b) 結果	75
5.1 考察	77
5.1 むすび	79
第 7 章	81
謝辞	85
参考文献	87
研究業績	93
付録 A	95
付録 B	103

第1章 序論

1.1 まえがき

視覚は人間にとって非常に重要な感覚である。視覚情報には「百聞は一見に如かず」という諺にもあるように言語化できない情報が数多く含まれており、色彩感覚はその最たるものであろう。近年の色関連デバイス技術、カラーマネジメント技術、そして、情報通信技術の革新に伴い、色彩情報をいとも簡単に交換可能なスマートフォンやタブレットなどのモバイル端末が個人間に急速に普及した。このように、色を用いた情報伝達の機会が飛躍的に増えているのは色彩情報の重要性の証である。色を用いた情報伝達機会の増加は、とりもなおさず、従来は目立たなかった「色覚の個人差の影響」が、人々の間の情報相互理解に重大な悪影響を与える可能性があること示唆する。

したがって、色知覚の違いについての正しい認識と適切な配慮が必要である。まず、前者については、色知覚の個人差の研究には長い歴史があるが、最近の遺伝子レベルの研究によると、2色覚や3色覚といった従来の色覚の明確な区別とは異なり、変化が連続的であるとの見方が有力である。また、後者については、反対色の第1軸がR-Gである3色覚と、反対色の第1軸がY-Bである2色覚では見え方が明確に異なることに留意する必要がある。従来から2色覚への色覚補助法は数多く検討されているが、色弁別を目的としたものが多く、3色覚のR-G反対色の感覚を2色覚が理解できるような補助機能は見当たらなかった。

そこで、本論文は、まず、色覚の個人差について多次元尺度構成法（MDS）を用いて調査し、色覚の個人差が遺伝子レベルのみならず知覚的にも連続であること示した。つぎに、色覚の異なる人々がお互いの色の見え方を理解するための2種類の新しい色覚支援コミュニケーション手法（色相回転法および色相ブレンド法と命名）を提案し、複数の携帯端末に対して実用的な実装が可能であることを示した。

1.3 本論文の構成と概要

本論文は7章で構成されており、第1章では、まず、色を用いたコミュニケーションの重要性が増大している事実と、色覚の多様性について色覚の仕組みや分類などを含めた基本的な事柄を説明し、色覚の異なる人同士（主に2色覚者と3色覚者）による色を使用したコミュニケーションが難しいという現状を述べている。つぎに、それらをサポートする既存の技術を紹介し、現状の問題点や課題を議論する。そして、その問題点や課題を解決し、色覚の異なる人々がお互いの色の見え方を理解することができる、新しい色覚支援コミュニケーションツールについて検討した内容を述べる。

第2章では、第1章で述べた色覚の多様性について、多次元尺度構成法（MDS）を用いて個人の色空間とその個人差を調査した内容を述べている。色覚の個人差の研究には長い歴史があるが、最近の遺伝子レベルの研究によると、2色覚や3色覚といった従来の色覚の明確な区別とは異なり、変化が連続的であるとの見方が有力である。そこで、色覚の個人差が遺伝子レベルのみならず知覚的にも連続であるのではないかと仮説を立て調査を実施した。調査の結果、(1) 色名（言語）による色空間の配置は色覚とは無関係に概ね色相環状の円形の結果が得られたが、一方で、(2) 色票に基づく色空間の配置は、2色覚者では凹形状になり、その形状から3色覚者の楕円形へと滑らかに変化した結果を得た。また、仮説として色覚の進化と出生後の発達の類似性について考察した。

第3章では、第2章で調査した結果と仮説検証により、3色覚者は2色性を内在しているという新たな仮説を立て検証した内容を述べている。その結果、3色覚者に(1)

R-G 成分を除去した呈示刺激を使用した場合の色空間の配置は、2 色覚者と同様の凹形状となり仮説を裏付ける結果が得られ、(2) Y-B 成分を除去した呈示刺激を使用した場合の色空間の配置は、第 2 軸が輝度と解釈可能な楕円形状の結果が得られた。

第 4 章では、第 1 章で検討した色覚の異なる 2 色覚者と 3 色覚者がお互いの色の見え方を理解可能な、新しい色覚支援コミュニケーションツールの提案について概要を説明する。主にツールの特徴やコンセプトなどについて述べている。まず、2 色覚者向けに考案した 2 つの色覚補助法（90 度色相回転法、色相ブレンド法と命名）の概要と、オリジナル画像と変換画像を交互に表示することで 3 色性の感覚を実現させた手法について説明し、つぎに、それらの手法を携帯端末環境での軽量なリアルタイムビデオ処理にて実現可能であること、3 色覚者向けの簡易な 2 色覚シミュレーション手法、およびそれらの動作モードについて述べる。

第 5 章では、第 4 章で述べた 2 色覚者向けに考案した基本的な手法の 90 度色相回転法について、その理論と検証実験について詳細を述べている。2 色覚者は、黄と青は 3 色覚者と同じ感覚を持つが、赤と緑を混同しやすいという特徴を持つ。したがって、色相を 90 度色相回転することで赤を同じ暖色系の黄へ、緑を寒色系の青へ変換することで 3 色覚の感覚へ近づけた。検証実験では、R-G カラー分類実験、混同しやすい色の分類実験、および一般的な環境での使用感の評価実験の 3 つの実験を行い検証した。何れの実験結果も既存技術に比べて有意に良好な結果を得ることができた。

第 6 章では、第 5 章で述べた 90 度色相回転法を一般向けに改良した色相ブレンド法について、その理論と検証実験について詳細を述べている。90 度色相回転法では、2 色覚者が混同しやすい R-G 以外の色も変換される。よって R-G 成分のみを色変換することの有効性について検討し、色相回転後に色相のブレンドを行い、色相回転を元に戻すという方法により R-G 成分のみを色変換する色相ブレンド法を考案した。検証実験では、90 度色相回転法の検証実験と同様の R-G カラー分類実験、混同しやすい色の分類実験、および一般的な環境での使用感の評価実験の 3 つの実験を行い検証した。何れの実験結果も既存技術に比べて有意に良好な結果を得ることができた。

第7章は、結論として、これまで述べた第1章から第6章を総括している。

1.4 赤緑色覚異常

2色覚または異常3色覚といった赤緑色覚異常（R-G CVD）は、日本人の場合、男性の約5%、女性の約0.2%の頻度で発生する[1]。赤緑色覚異常には、P型（Protanopia / Protanomaly, 網膜内の長波長（L）錐体の欠如 / 働きが弱い）とD型（Deuteranopia / Deuteranomaly, 中波長（M）錐体の欠如 / 働きが弱い）があり、両方とも赤と緑の色を識別するのが困難という特徴がある。また、L錐体またはM錐体が欠損している（もしくは機能していない）ProtanopiaとDeuteranopiaを2色覚、欠損はしていないが働きが弱いProtanomalyとDeuteranomalyを異常3色覚という。P型、D型どちらのタイプも、約495 nm（それぞれ494 nmと499 nm）に中性点があり、CIE（国際照明委員会）xy色度図上に一直線の傾斜を持つ混同線が引ける。ただし、青と紫の領域は例外である[2]。P型、D型どちらの混同線の傾きは類似していることから、両方のタイプの見え方は似ていることが分かる。図1は、2色覚シミュレーションを使用した色度図の例を示す¹。図1の（b）および（c）の点線は、それぞれ、無彩色の色知覚を示す。

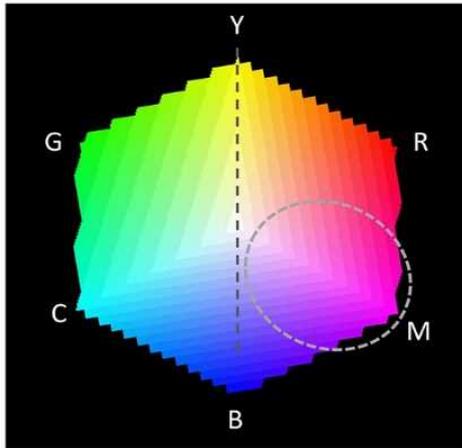
一般色覚である3色覚者と赤緑色覚異常（R-G CVD）の人々との間の色知覚の違い、およびカラーユニバーサルデザインの重要性は広く議論されている。たとえば、NPO法人カラーユニバーサルデザイン機構（CUDO）は、日本での理解を大幅に広げた[3]。

それでは、赤緑色覚異常者と3色覚者間の相互理解の確立を妨げるものは何であるか。図1に示すように、第一に、赤緑色覚異常は黄色と青色の区別は明確にできるが、赤色と緑色を区別するのは困難である。第二に、赤紫または紫の色領域、つまり図1（a）に示す楕円の部分の色知覚は、一般色覚である3色覚の知覚とは異なる。一般的に、赤紫や紫といったマゼンタ、バイオレット、パープルの色は非常に顕著であり、3色覚者はそれらを同じ暖色系である赤と関連付ける。しかし、赤緑色覚異常者の場

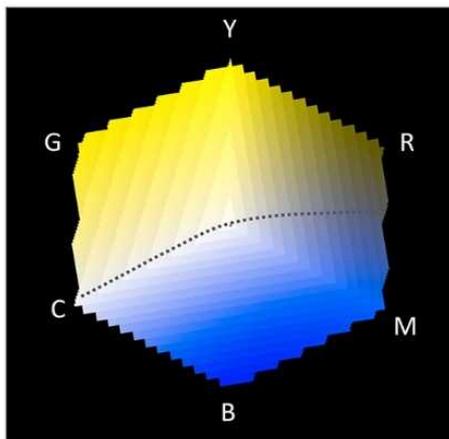
¹ 全ての2色覚シミュレーションはAdobe Photoshopにて作成している。

合、これらの色は彩度が弱いか、グレー、つまり中間色になる傾向がある。色の関連付けは、ほとんどが3色覚とは異なる寒色系の青と認識し、一部は3色覚と同じ赤と関連付ける。同様の問題は、緑と青緑（シアン）の間の領域でも発生する。ただし、これらの色領域は、3色覚では顕著に色弁別されないため、大きな問題となることはほとんどないが、これらの色相領域の色の違いは赤緑色覚異常者によって非常に強く知覚される。図2および図3は、2色覚の色弁別能力が3色覚の色弁別能力よりも優れている、またはその逆の例を示している。P型、D型両方のタイプの2色覚シミュレーションが類似しているため、D型のシミュレーション結果のみを表示する。赤緑色覚異常（2色覚および異常3色覚）にはカラフルな色知覚があるが、赤緑色覚異常と一般色覚である3色覚には色の組み合わせに対する異なる知覚も存在する（図4参照）。また、第2章で述べているMDS（多次元尺度構成法）に基づく色対比知覚の個人差の検討では、赤緑色覚異常者の言語による色の認識と視覚による色の認識が一致していない結果を得ている[4]。

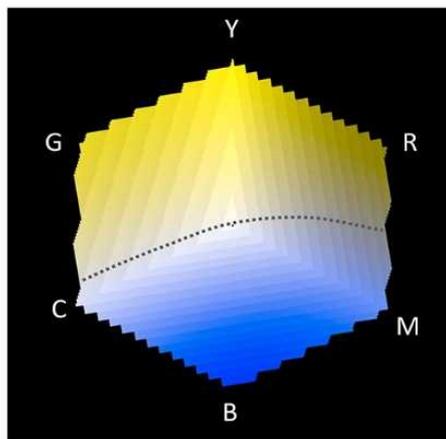
以上の複雑な状況を考慮すると、近年、カラー印刷技術やデジタルサイネージ、モバイルデバイス、カラーLED等の普及により、色を用いた情報交換が増えており、かつそれらは色覚の多様性が考慮されず、一般色覚者（3色覚）の都合で作られることも多いため、一般色覚である3色覚者と赤緑色覚異常者の明確な相互理解が今や必要不可欠である。カラーユニバーサルデザインやカラーバリアフリーといった概念の普及と、色覚の異なる人々がお互いの色の見え方を理解することは非常に重要である。



(a) Trichromacy



(b) Dichromacy (Protanopia)



(c) Dichromacy (Deuteranopia)

図 1. 作成した色度図の例 (Adobe Photoshop による 2 色覚シミュレーションを使用).

(b)と(c)内の点線は、それぞれ無彩色の色知覚を示している.



(a) Original trichromatic image



(b) Simulation of Deuteranopia (type D)



(c) Original trichromatic image



(d) Simulation of Deuteranopia (type D)

図 2. 2色覚が3色覚よりも優れた色分類性能をもたらした例.



(a) Original trichromatic image



(b) Simulation of Deuteranopia (type D)

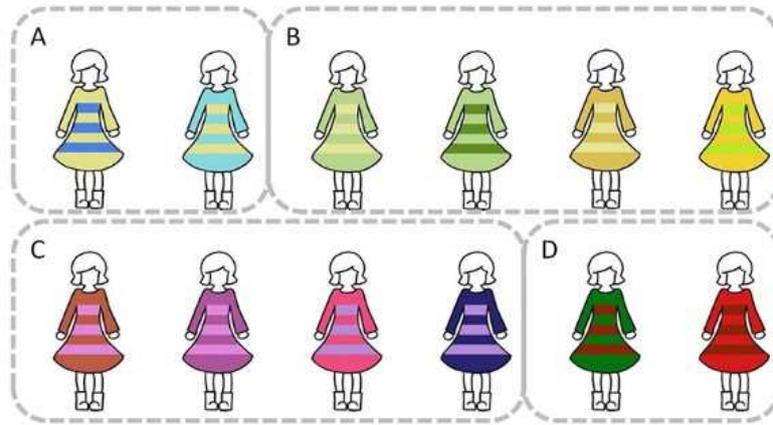


(c) Original trichromatic image

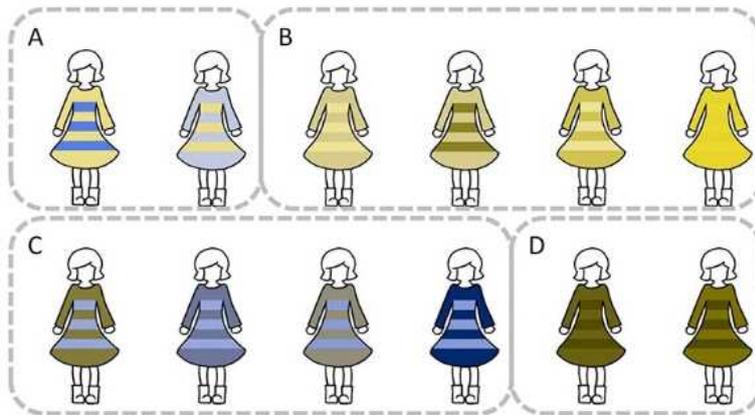


(d) Simulation of Deuteranopia (type D)

図 3. 色分類能力を必要とする例.



(a) Trichromacy



(b) Dichromacy (Deuteranopia)

図 4. 3 色覚と 2 色覚のシミュレーションにおける色知覚の比較. どちらも色が豊富である. しかし(a)と(b)を比較した場合, A グループの色のコントラストはどちらも似ているが, B, C, および D グループの色のコントラストは全く異なる.

1.5 色覚異常をサポートする既存技術

1.5.1 光学フィルターによる色の強調

長い間、赤緑色覚異常者が赤と緑を区別するために、色付きガラスなどの光学フィルターリング技術が採用されている。最も一般的な方法は、赤と緑のフィルターを使用することである。これに対して、マゼンタフィルターを使用した効果的な方法が開発されている[5]。マゼンタフィルターにより赤い部分が明るく変化し、緑の部分が暗く変化することで赤と緑を弁別する。赤緑フィルタ法と異なり、マゼンタフィルタは色情報が色平面に明確に保存され、輝度方向にわずかに失われるだけなので、複雑な三色画像においてさえ、赤 - 緑の色コントラストによって誘発される色知覚を容易に予測することができる。これは、彩度の色情報を可能な限り色平面内で処理する必要があることを示唆している。

1.5.2 ソフトウェアによる色の強調

ソフトウェア製品を取り巻く環境は大きく変化し続けている。スマートフォンやタブレットなどの最新世代のモバイル機器には、ハイエンドコンピューター、タッチパネル付きの高解像度ディスプレイ、ビデオカメラが含まれる。したがって、2色覚補助のソフトウェア製品をサポートできる環境は、すでに第1段階に入っている。

その結果、色覚補助に関連する多くのソフトウェア製品が、スマートフォンやタブレット等のアプリケーションのオンラインストアで見つかる。筆者が2015年および2018年に調査した範囲では、色名ピッカー（タップした箇所の色名が表示される）、2色覚シミュレーター、色知覚テストなど色に関係するサポートツールが数百件存在する。その中で、画像処理または強調技術を採用した2色覚補助用のソフトウェアは、約30の製品が存在している。何れも有名なオンラインストア（iOSおよびAndroid OSなど）で販売されている（フリーウェアを多数含む）。

2色覚補助用の製品またはプロトタイプ（たとえば、[6][7]）は、その多くがしきい値処理を採用している。いくつかは優れており、わずかな障害を引き起こすだけであ

るが，一部はしきい値処理により誤った偽輪郭のような結果を引き起こしている．色覚補助の方法としては，光学的方法と同様に，色相方向，すなわち赤または緑の輝度変化に基づく技術が一般的であり，Daltonize [8][9]はそのようなテクニックの 1 つである．また，色相処理によるいくつかのタイプの色処理，たとえば，+ 90 度，-90 度の色相回転，またはミラーリングによる任意の色相交換もいくつか散見される．もちろん，筆者の指導教員である大塚教授が 2010 年に色相回転の効果をアナログ NTSC ビデオ信号のハードウェア実時間処理により初めて実証した際には，このようなソフトウェアはほとんど存在していなかった[10]．

その他に，テクスチャを追加する補助方法，たとえばハッチングも，いくつかの製品で使用されている．この場合，自然な色のコントラストを知覚するには限界があるが，図などの人工的なオブジェクトのための明確な分離には利点がある．この種の補助法も研究されている[11]．

1.5.2 既存技術の現状

2 色覚や異常 3 色覚といった赤緑色覚異常の色知覚を向上させるための多くの方法が提案されている．ただし，2 色覚向け色覚補助の既存のツールは，色の弁別だけに焦点を当てており，色の印象（彩度，コントラストなど）をサポートできない．色の弁別だけでは 3 色覚の反対色の感覚を理解することはできない．さらに，相互理解を支援するための 2 色覚と 3 色覚の両方の同時サポートは，既存のツールでは十分に対処されていない．

1.6 新しい色覚支援コミュニケーションツールの要件

これまでに述べてきた既存技術の問題点や課題を踏まえて，本稿では新しい色覚支援コミュニケーションツールを提案する．しきい値処理により発生する偽輪郭の課題を解決し，色の弁別だけでなく色の印象，特に 3 色覚の反対色の感覚を理解できるような色覚補助法を考案する．リアルタイム動画像の利便性と，かつ広く公開すること

を目的として、どのようなスペックのデバイスにも搭載できるような比較的軽量の仕組みが望ましい。さらに、3色覚者向けの2色覚シミュレーションを取り入れ、2色覚・3色覚双方向の補助ツールとし、2色覚者のみならず、その保護者や学校の先生等にも使用してもらえるようなコミュニケーションツールを必要要件とする。

詳細については、まず第4章で主にツールの特徴やコンセプトを述べ、2色覚者向けに考案した2つの色覚補助法(90度色相回転法, 色相ブレンド法と命名)の概要と、オリジナル画像と変換画像を交互に表示することで3色性の感覚を実現させた手法について説明し、つぎに、それらの手法を携帯端末環境での軽量なリアルタイムビデオ処理にて実現可能であること、3色覚者向けの簡易な2色覚シミュレーション手法、およびそれらの動作モードについて述べている。つぎに、第5章で、第4章で述べた2色覚者向けに考案した基本的な手法の90度色相回転法について、その理論と検証実験について詳細を述べている。さらに第6章で、第5章で述べた90度色相回転法を一般向けに改良した色相ブレンド法について、その理論と検証実験について詳細を述べている。

1.7 むすび

近年、色関連デバイス技術、カラーマネジメント技術、そして、情報通信技術の革新に伴い、色彩情報をいとも簡単に交換可能なスマートフォンやタブレットなどのモバイル端末が個人間に急速に普及した。このように、色を用いた情報伝達の機会が飛躍的に増えているのは色彩情報の重要性の証である。色を用いた情報伝達機会の増加は、とりもなおさず、従来は目立たなかった「色覚の個人差の影響」が、人々の間の情報相互理解に重大な悪影響を与える可能性があること示唆する。

したがって、色知覚の違いについての正しい認識と適切な配慮が必要である。2色覚または異常3色覚といった赤緑色覚異常(R-G CVD)は、日本人の場合、男性の約5%、女性の約0.2%の頻度で発生する[1]。2色覚や異常3色覚といった赤緑色覚異常の色知覚を向上させるための多くの補助法が提案されているが、既存のツールは、色

の弁別だけに焦点を当てており，色の印象（彩度，コントラストなど）をサポートできない．色の弁別だけでは 3 色覚の反対色の感覚を理解することはできない．さらに，相互理解を支援するための 2 色覚と 3 色覚の両方の同時サポートは，既存のツールでは十分に対処されていない．そこで，本稿では，色覚の異なる人々がお互いの色の見え方を理解するための 2 種類の新しい色覚支援コミュニケーション手法（色相回転法および色相ブレンド法と命名）を提案する．

第2章 MDS に基づく色対比知覚の個人差の検討

2.1 まえがき

近年，カラー印刷技術やデジタルサイネージなどのカラーディスプレイ，スマートフォンやタブレットなどのモバイルデバイスの普及により，色を用いた情報伝達の機会が飛躍的に増大した．このため，色覚の個人差，即ち 3 色覚者と赤緑色覚異常者（2 色覚または異常 3 色覚）の色知覚の違いについての正しい認識と適切な配慮が必要である．これは色覚異常を持つ人々がより頻繁に赤と緑を区別する必要があることを意味する．したがって，2 色覚を持つ人々が他の人とコミュニケーションするための効果的な支援ツールを作ることは非常に重要である[12]-[13]．

一方で，2 色覚および異常 3 色覚の色知覚の詳細については，未だ正確に調査されていない．色知覚の個人差の研究には長い歴史があるが，最近の遺伝子レベルの研究によると，2 色覚や 3 色覚といった従来の色覚の明確な区別とは異なり，変化が連続的であるとの見方が有力である．そこで，本章では，色覚の個人差が遺伝子レベルのみならず知覚的にも連続であるとの仮説を立て，色覚の個人差について多次元尺度構成法（MDS）を用いて調査した内容を述べる．

ここで，色票を用いた知覚構造と言語を用いた知覚構造が必ずしも一致しないこと

について留意する必要がある。まず、色票について述べる。例えば Shepard ら [14] は、1992 年に行った色票を使用した多次元尺度構成法 (MDS) による分析で、2 次元の色配置が (直線や楕円形状ではなく) 凹形状になったと述べている。関連するそれ以前の研究では Wish ら [15] が 1974 年に行った同様の分析で色の配置が楕円形になるとされていた。つぎに言語につて述べる。先に紹介した Shepard ら [14] が行った色覚異常者および全盲者を対象とした色名 (言語) による同様の調査では 3 色覚者に似た楕円形であった。近年奥寺ら [16]-[17] が全盲者を対象とした色名 (言語) による調査でも Shepard らと同様に楕円形の結果が得られた。

したがって、2 色覚および異常 3 色覚の色知覚を体系的にまとめて理解することが大切である。

そこで、本章では、人間の色覚の進化と発達の観点から 2 色覚と 3 色覚の関係について議論し、多次元尺度構成法 (MDS) を用いた 3 色覚者と色覚異常者 (2 色覚者および異常 3 色覚者) の色知覚の個人差について調査した結果を紹介する [18]。

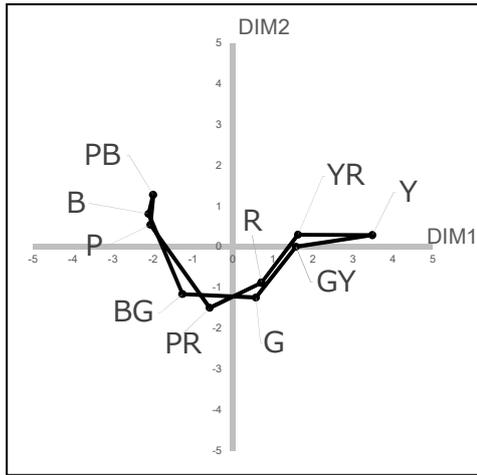
2.2 仮説：色覚の進化と出生後の発達の類似性

人間の色覚は、哺乳類から霊長類が誕生する際に突然変異および自然選択によって、2 色覚から 3 色覚へ進化したと考えられている [19]-[20]。網膜には 3 種類の錐体 (L, M, S) があるが、脳内ではそのままの形で情報が利用されている訳ではなく、段階説と周知のように色知覚では赤・緑と黄・青の 2 つの反対色システムが利用されている [21]-[22]。黄・青の反対色システムに寄与する S 錐体は、L 錐体または M 錐体から随分と独立している。そのため網膜の錐体の分布は、中心視 (L, M 錐体) から周辺視 (S 錐体) へと色覚の進化の歴史を辿っていると考えられている [21]。また、赤・緑反対色システムは、ヒトを含む霊長類では輪郭検出システムと同じ回路を使用しているため、輪郭検出の能力を損なうことが実験的に確かめられている [23]-[24]。したがって、赤・緑反対色システムが後から誕生したことを示唆する。

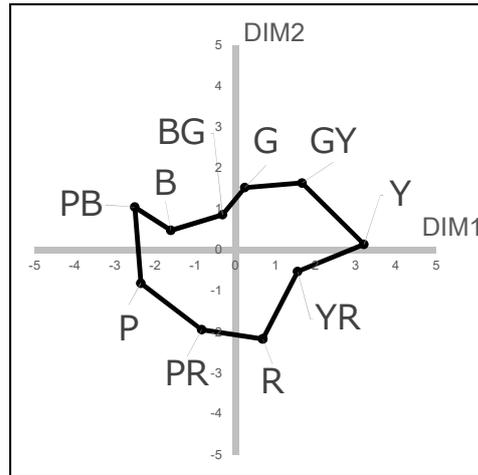
つぎに、新生児の色知覚は 2~3 ヶ月で急速かつ大幅に変化する [25]-[28]。まず、

新生児は無色のものから色彩的な刺激を区別することができ、赤色と青色のみを知覚することができる。換言すると、赤色や橙色、黄色と緑色との間の差異は知覚できない。しかし、3ヶ月後には赤-緑反対色システムが構築される。より若い新生児が赤-緑区別で失敗する理由は、L錐体またはM錐体の欠損または異常ではなく、未熟な神経処理に起因するものと考えられる。また、発達における明らかな性差も観察され、女兒は男児よりも早く色覚が発達する。赤緑色覚異常者は、新生児とは対照的に、神経系の構造は正常であるにもかかわらず、L錐体またはM錐体の欠損または異常が2色覚の原因であることにより、不適切な神経処理が引き起こされることに留意されたい。

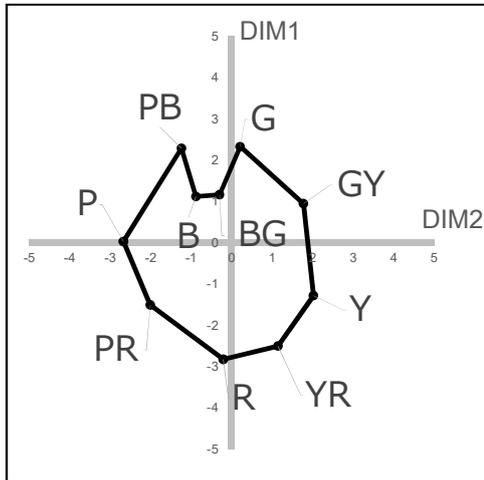
以上の議論から、色覚の進化の過程と新生児の色覚の発達過程が類似しているという仮説を立てることが可能である。したがって、色票による人間の心理的色空間の配置は、文献[14]で報告されている2色覚の凹形状から3色覚の楕円形へと滑らかに変化することが予測できる。我々が仮定した色覚の連続的変化の模式図を図5に示す。2色覚の場合、主軸は黄-青軸である。ここで、明るさと何らかの相関関係にあることに注意が必用である。なお、3色覚の被験者であっても、色対比知覚に明るさの寄与があり、その程度に個人差があることが知られている[29]。一方で、第2軸つまり「(赤/緑)-青」軸は、明るさ知覚との相関が少ないように想定される。第2軸は赤-緑反対色システムの発達にともなって、「(赤/緑-青)」軸から「赤-緑」軸へ変化している。最後に3色覚では主軸と第2軸とが入れ替わり、主軸が「赤-緑」対比、第2軸が「黄-青」対比となる。図5のその他の詳細については後述する。



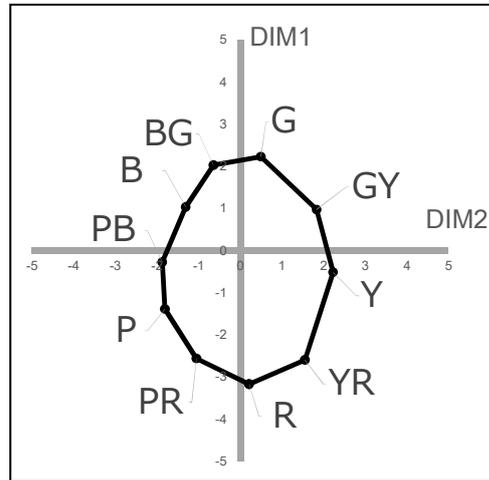
(a) S1



(b) S2



(c) S3



(d) S4

図 5.2 色覚から 3 色覚への色覚の変化の模式図. 主軸 (横軸) および第 2 軸 (縦軸) は, それぞれ黄-青および赤-緑を表す. S3 および S4 では, 主軸は縦軸, 第 2 軸が横軸の 3 色覚であることに注意.

2.3 実験方法

2.3.1 被験者

被験者は、2色覚者が8名、異常3色覚者が2名、3色覚者14名の全24名であった。色覚異常者の10名中9名が、アノマロスコープ OT-II (株式会社ナイツ) による色覚検査を行った。すべての被験者が正常な視力を有しており、また被験者には著者の一部が含まれていた。

2.3.2 実験刺激と色票による評価実験の実験環境

表1に実験に使用した色票を示す。色票は日本色研事業株式会社へ特注した艶ありの色票であった。マンセル値は、青を除いて奥寺らの実験[5]-[6]と同じ値の色票を使用した。青について、奥寺らは「5B 4/9」を採用したが、入手不可能であったため「5B 4/8」を採用した。

2枚の色票をプラスチックマウント 35mm 判 (富士フイルムイメージングシステムズ株式会社) に取り付けた。プラスチックマウントの色はほぼ中性の灰色 (D65 $L^*a^*b^*$: 79.92, -0.64, 1.98) で、取り付け後の色票のサイズは 3.4cm x 2.3cm であった。

実験環境は、暗室を用いて、テーブルにはテーブルクロスとして灰色の布を使用し、高演色性の色評価用蛍光灯 (FL20SN-EDL, 東芝ライテック株式会社) のみを照明として使用した。

2.3.3 色名 (言語) による評価実験の実験刺激

色名 (言語) は、表2の色票名と同じ名前を使用した。

表 2. 色票の色名とマンセル表記

Red (赤)	Orange (橙)	Yellow (黄)	Yellow- Green (黄緑)	Green (緑)
5R 4/14	5YR 6.5/14	5Y 8/14	5GY 6.5/10	5G 4.5/10
Purple- Red (赤紫)	Purple (紫)	Purple- Blue (青紫)	Blue (青)	Blue- Green (青緑)
5RP 4/12	5P 4/11	5PB 4/12	5B 4/8	5BG 4/9

2.3.4 主観評価について

被験者には 2 色（即ち一対）の色票または色名（言語）を呈示し，その 2 色間の心理的な距離を非類似度の 5 段階尺度（1. 非常に近い，2. やや近い，3. どちらでもない，4. やや遠い，5. 非常に遠い）で回答を求めた．10 色の組み合わせの 45 ペアを，左右の影響と順序による影響を考慮して昇順，降順の 2 組 90 ペアを評価した．

2.3.5 分析手法：多次元尺度構成法（MDS）

ユークリッド距離の一般的に使用される非計量 MDS（isoMDS[30]）を分析に使用した．

2.4 実験結果と考察

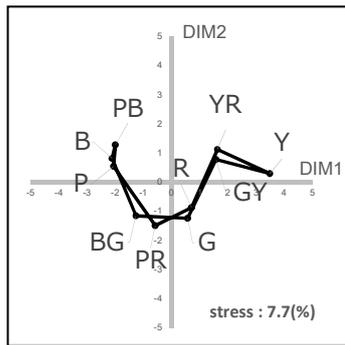
2.4.1 色票による評価実験の結果

表 3 および図 6 は，それぞれ結果の概要と典型的な例を示している．Stage3（S3）では，異常 3 色覚から 3 色覚への少なくとも 2 つの移行タイプが観察された．第 1 のタイプ，つまり S3a は予想通り色相環にくぼみを有し，第 2 のタイプである S3b は，くぼみは無く，軸が約 45 度回転している．予想に反して，我々が典型的であると考えた正常な 3 色覚の配置の割合はわずかであり，約 20%であった．また例外として，石原式色覚検査表では正常な 3 色覚であった 1 名の被験者が，この実験では S1 に分類された（図 6 (c) 参照）．この結果から，新生児の色覚の発達と育った色彩環境との関係について更に多くの調査が必要であることが示唆される．

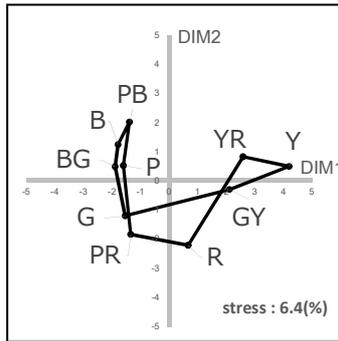
以上の結果を要約すると，我々が予想した通りに，2 色覚から 3 色覚への連続的な変化が観察された．

表 3. 実験結果：色票による評価実験の結果（被験者の分類と割合）

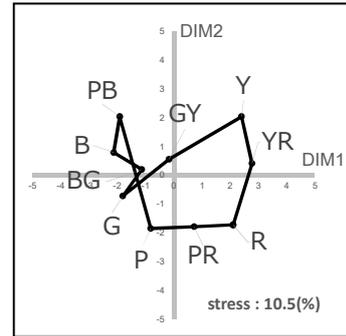
Category	Stage	Class	Description	# of Os	Subtotal	Remarks
Dichromacy (Dc)	S1 (C)		Y-B primary with clear concave	9	9	Protanopia: 4 Deuteranopia: 4 Normal: 1
			Y-B primary with/without partial dip	1	1	Protanomaly: 1
Anomalous Trichromacy (ATc)	S2 (C)	a	R-G primary with partial dip	5	14	Deuteranomaly: 1 Normal: 10
		b	Rotated primary with/without partial dip	6		
			R-G primary without dip	3		
Normal Trichromacy (NTc)	S3 (C)				14	Deuteranomaly: 1 Normal: 10
	S4 (C)					
Total					24	



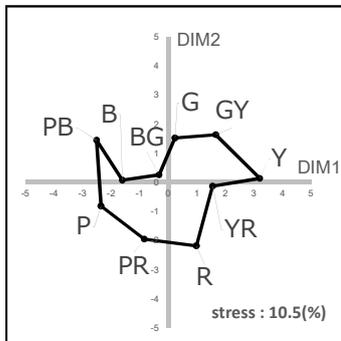
(a) S1 (1)



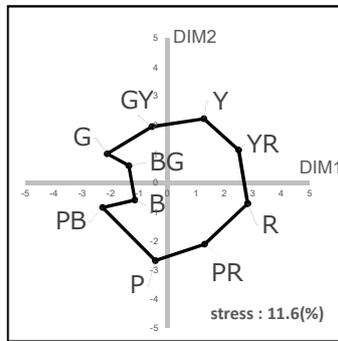
(b) S1 (2)



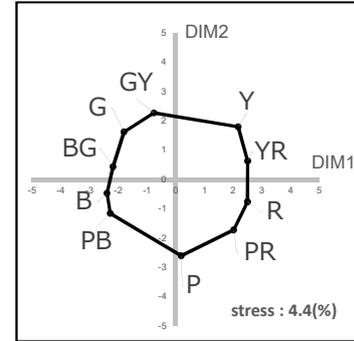
(c) S1 (3)



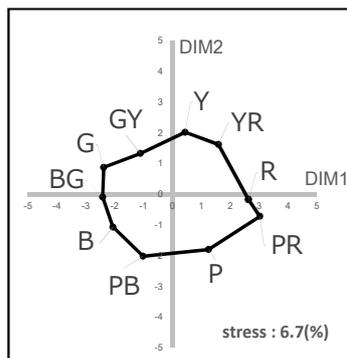
(d) S2



(e) S3a



(f) S3b



(g) S4

図 6. 各 Stage の実験結果（色票）の例．横軸は主軸を表す．

2.4.2 色名（言語）による評価実験の結果

表 4 および図 7 は、それぞれ結果の概要と典型的な例を示している。この実験では、特例を除いて、大きな差異は見られなかった。1 名の 2 色覚者は、2 色覚の被験者としてプロの仕事で頻繁に感覚能力を集中して使っているため、この色名（言語）の実験でも混同を招いたと推定される（図 7 (a) 参照）。またそれ以外の 2 色覚者の一部は、紫もしくは黄の辺りの混同が観察された。

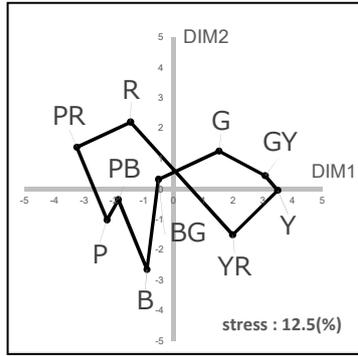
色票および色名（言語）による評価実験の結果、2 色覚者は、1 つの軸（黄-青）のみの 2 色性色系ではなく、3 色覚の持つ 2 つの軸（赤-緑と黄-青）とは異なる別の 2 つの軸（黄-青および（青緑-赤紫）-青）を有している。つまり、紫が彼らの第 2 軸の中間点にあるため、彼らは紫を知覚することはできない。また、軸が回転している割合は予想よりも高く、正常な 3 色覚の割合は低かった。

2.4.3 考察

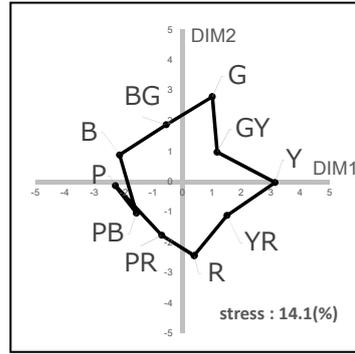
本検討から得られた最も重要な知見は、2 色性を有する赤緑色覚異常者は、明るさとは独立して色差について 1 次元の主軸のみを持つ 2 色覚ではなかったことである。つまり、正常な 3 色覚とは異なる様態で、色差に対する独立した 2 軸を持つ 3 色覚性であった。驚くべきことに、この結果は青緑の部分を除いて（図 6 参照）、Shepard ら[14] が 1992 年に示した結果と同様であった。残念なことに、彼らの論文には十分な考察が述べられておらず、結果の意味を完全に解明するまでには至っていなかった。この結果として、2 錐体のみが正常である 2 色性の視覚システムは、明るさおよび 1 つの軸の色相を生成すると一般的に理解されている。したがって、この点を明確にするためには、より詳細な調査が必要であろう。

表 4. 実験結果：色名（言語）による評価実験の結果（被験者の分類と割合）

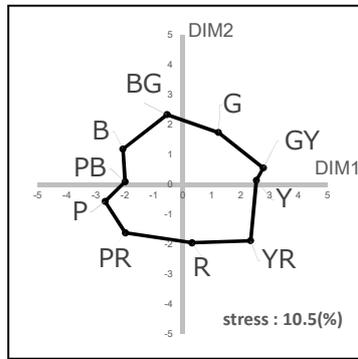
Category	Stage	Class	Description	# of Os	Subtotal	Remarks
Dichromacy (Dc)	S1 (W)		Y-B primary with clear confusion	1	1	Protanopia: 1
	S2 (W)		Y-B primary with/without partial confusion	11	11	Protanopia: 3 Deuteranopia: 4 Normal: 4
Normal Trichromacy (NTw)	S3 (W)	a	R-G primary with partial confusion	0	12	Protanomaly: 1 Deuteranomaly: 1 Normal: 10
		b	Rotated primary with/without partial confusion	10		
	S4 (W)		R-G primary without confusion	2	24	Normal: 2 % of (S4/NT) = 14%
Total						



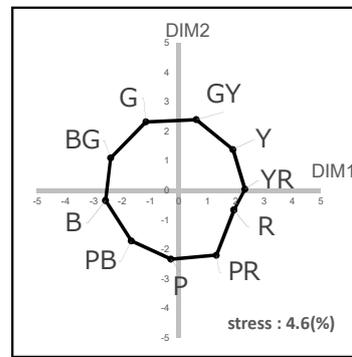
(a) S1



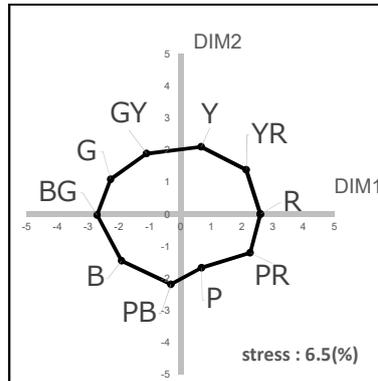
(b) S2 (1)



(c) S2 (2)



(d) S3b



(e) S4

図 7. 各 Stage の実験結果（色名（言語））の例。横軸は主軸を表す

2.5 むすび

スマートフォンやタブレットなどのモバイルデバイスの普及により、色を用いた情報伝達の手がかりが飛躍的に増大した。このため、色覚の個人差、即ち3色覚者と赤緑色覚異常者（2色覚または異常3色覚）の色知覚の違いについての正しい認識と適切な配慮の重要性が増大している。

色知覚の個人差の研究には長い歴史があるが、最近の遺伝子レベルの研究によると、2色覚や3色覚といった従来の色覚の明確な区別とは異なり、変化が連続的であるとの見方が有力である。そこで、本章では、色覚の個人差が遺伝子レベルのみならず知覚的にも連続であるとの仮説を立て、色覚の個人差について多次元尺度構成法(MDS)を用いて調査した。その結果、(1)色名(言語)による色空間の配置は色覚とは無関係に概ね色相環状の円形であったが、一方で、(2)色票に基づく色空間の配置は2色覚者では凹形状であり、その形状から3色覚者の楕円形へと滑らかに変化した。

したがって、色覚の多様性(即ち、3色覚者と赤緑色覚異常者の知覚の違い)をふまえた上で相互の色コミュニケーションを支援するためには、3色覚と2色覚の色知覚の差異をより正確に理解する必要がある。

第3章 MDS 分析に基づく 3 色覚者に内在する 2 色性の検討

3.1 まえがき

第 2 章では、多次元尺度構成法 (MDS) を用いて 3 色覚者と色覚異常者の色知覚の個人差を調査した。その結果、(1) 色名 (言語) による色空間の配置は色覚とは無関係に概ね色相環状の円形であったが、一方で、(2) 色票に基づく色空間の配置は 2 色覚者では凹形状であり、その形状から 3 色覚者の楕円形へと滑らかに変化した。これらは、第 2 章 2.2 で述べた色覚の進化の過程と新生児の色覚の発達過程が類似しているという仮説を支持するものであった。人間の色覚は、哺乳類から霊長類が誕生する際に突然変異および自然選択によって、2 色覚から 3 色覚へ進化したと考えられている [19]-[20]。3 色覚者であっても、かつて 2 色覚であったなごりがあるのでないかと考えられる。

したがって、本章では、R-G 成分を除去した Y-B 成分のみの呈示刺激を使用することにより、3 色覚者に内在する 2 色性 (すなわち、2 色覚者と同様の要因) を集中的に調査する。

3.2 実験方法

3.2.1 実験環境

第 2 章で使用した紙の色票の代わりに，24 インチ LCD sRGB カラーディスプレイ（EIZO ColorEdge CG242W）上に色票を描画して実験を実施した．照明は，高演色性の色評価用蛍光灯（約 300 lx，FLR40S N-EDL / M-NUJ）を採用した．最大白色輝度は 211 cd / m² であった．各刺激の視野角は 10 度（つまり，8.8 cm の辺を持つ正方形の刺激と約 50 cm の視野距離）であった（図 8 参照）．

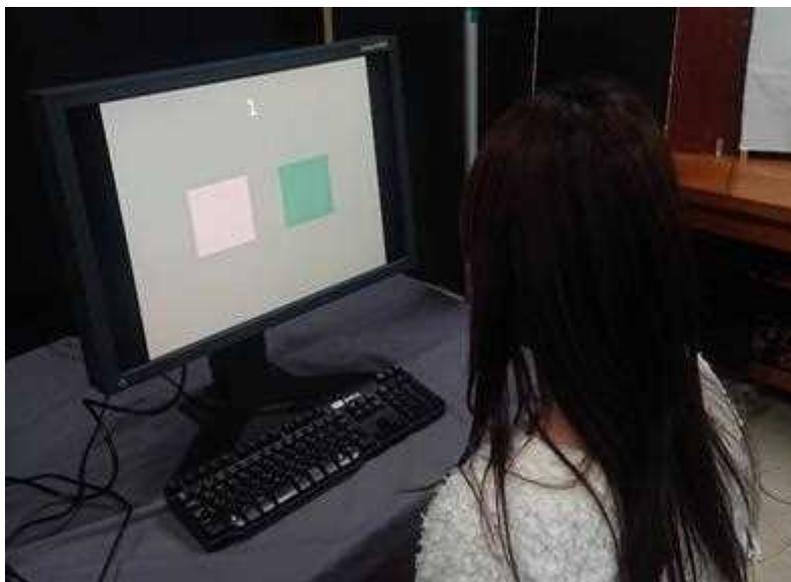


図 8. 実験環境.

3.2.2 呈示刺激

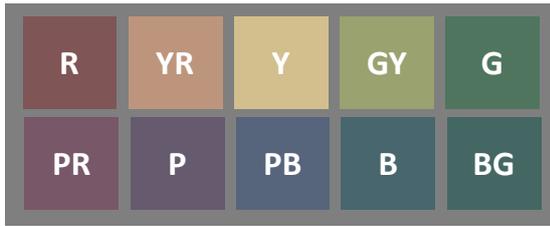
表 5 は，第 2 章で使用した色票より彩度を落とした中彩度の色票のマンセル値を示している．本実験ではマンセル色票をそのまま実験刺激とするのではなく，ディスプレイを用いて刺激を表示する．このため，分光測色計（コニカミノルタ CM-700d）を用いてこの色票の反射色を測定し，3 刺激値から sRGB 空間の RGB 値を算出した（以下，変換刺激と呼ぶ）．付録 B の表 B2 に変換した RGB 値を示す．この際，川原崎氏作製の CCConv[31]を使用した．換言すると，今回，個別のディスプレイ上でキ

ャリブレーションを行って、色票の色をディスプレイ上で測色的に忠実に再現することは行っていない。この意図は、元来、反射光による物体色とディスプレイ上での色の見え方自体を厳密に統制することは非常に困難であり、マンセル色票を参考にしてディスプレイで表示する新たな中彩度の色票セットを作成するところにあった。

この変換刺激を用いて新たに 2 つの色票セットを作成した。1 つ目は、元の色票から作成した CIE $L^*a^*b^*$ 空間の a^* または b^* 方向でのみ変化する 10 色刺激の 2 つのサブセットで構成される (図 9 (c) および (d) 参照)。なお、サブセットの刺激作成には Adobe Photoshop を使用した。2 つ目は、4 色の原色 (彩度の高い R, Y, G, B, 図 9 (b) 参照) を追加した 14 色刺激の 2 つのサブセットで構成される。図 9 (e) に実験環境で実測した変換刺激それぞれの色票の xy 色度値を示す。1 つ目の 10 色のセットは、新生児の視覚 (つまり Y-B 成分のみ) とその反対 (つまり R-G 成分のみ) を大まかにシミュレートしようとする特別なカラー環境を表す。また、2 つ目のセットは、観察者に色域を十分広く意識させることを目的として、1 つ目のセットに目安となる 4 原色の反対色を追加した 14 色の色票セットである。

表 5. 中彩度の色票とそれぞれのマンセル値.

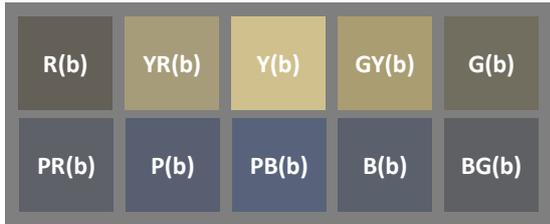
Red (赤)	Orange (橙)	Yellow (黄)	Yellow- Green (黄緑)	Green (緑)
5R 4/4	5YR 6.5/4	5Y 8/4	5GY 6.5/4	5G 4.5/4
Purple- Red (赤紫)	Purple (紫)	Purple- Blue (青紫)	Blue (青)	Blue- Green (青緑)
5RP 4/4	5P 4/3	5PB 4/4	5B 4/3	5BG 4/3



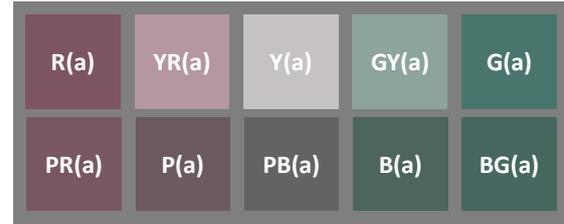
(a) オリジナルの中彩度色票 10 色
(本章の実験では使用していない).



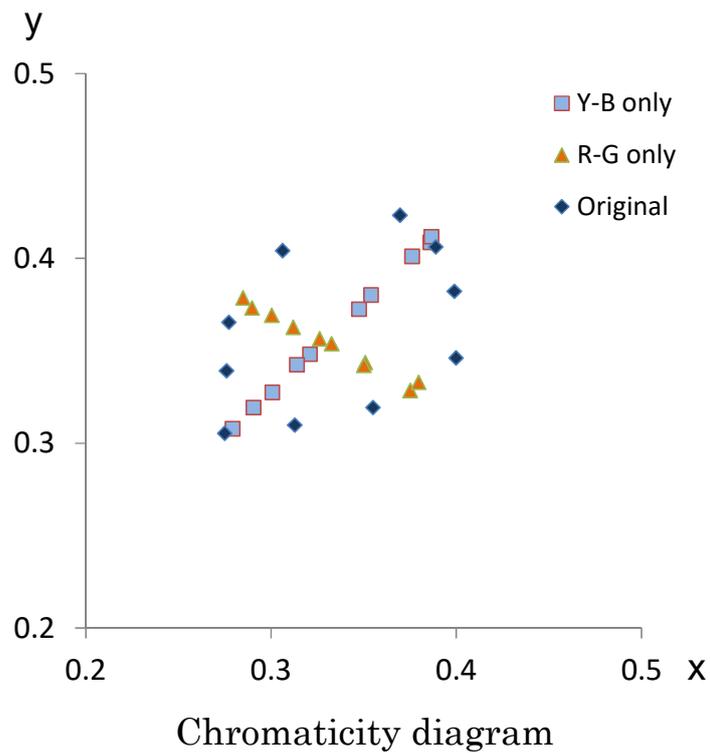
(b) 追加した高彩度の 4 つの原色.



(c) b^* 成分のみの色票 (Y-B only).



(d) a^* 成分のみの色票 (R-G only).



(e) それぞれの色票の xy 色度値

図 9. 呈示刺激色票のバリエーションと xy 色度値.

3.2.3 被験者

被験者の総数は 12 名であった（男性 10 名，女性 2 名）．すべてが石原式色覚テストによって 3 色覚として確認され，正常な視力またはメガネやコンタクトレンズにより正常な視力に矯正されている．また参加者には筆者が含まれている．

3.2.4 主観評価について

3.2.5 分析手法

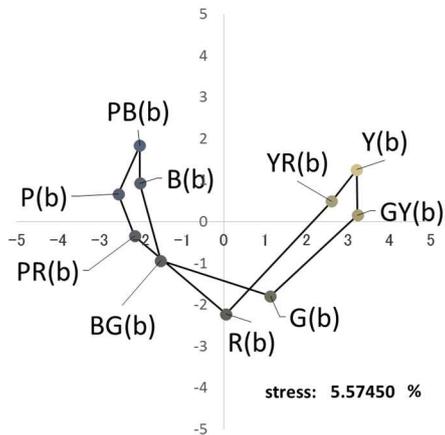
第 2 章と同様に，2 色間の心理的な距離を非類似度の 5 段階尺度（1. 非常に近い，2. やや近い，3. どちらでもない，4. やや遠い，5. 非常に遠い）で被験者に回答を求めた．10 色呈示刺激実験では，10 色の組み合わせのランダムに並び替えた 45 ペアを，左右の影響と順序による影響を考慮して昇順，降順の 2 セット 90 ペアを評価した．14 色呈示刺激実験では，91 組のランダム化されたペアを左右と順序の影響を考慮して 2 セット 182 ペアを評価した．10 色呈示刺激実験と 14 色呈示刺激実験の間に少なくとも 1 日の間隔をあけて実施した．

3.3 実験結果と考察

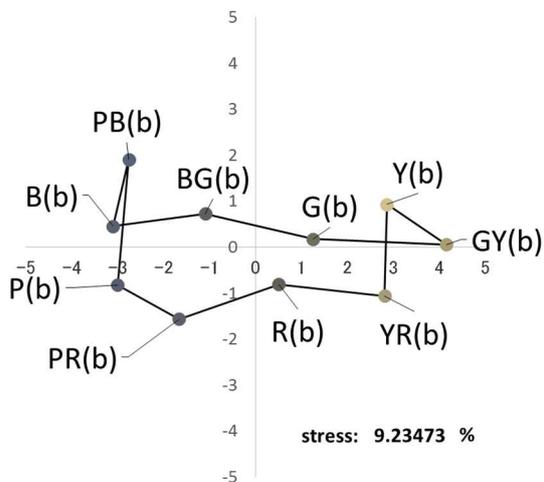
3.3.1 10 色呈示刺激実験の結果

図 10 と図 11 は，それぞれ「 a^* 成分を除去した b^* 成分のみの色票 10 色」および「 b^* 成分を除去した a^* 成分のみの色票 10 色」による結果を示している． b^* 成分のみの色票による実験結果では，主軸は輝度と組み合わされた $Y\cdot B$ 成分であり，副軸は未知の成分であることが示唆される．仮説で予想されたように，この結果は第 2 章での実験の 2 色覚者の結果である凹型と似ていた（図 10 (a)）．12 名中 3 名は凹型とならず主軸の一直線に近い形であった（図 10 (b)）．一方， a^* 成分のみの色票による実験結果は，2 つの軸の意味をすべての場合において解釈でき，妥当な結果となった．3 つのパターンに分類され，色相と輝度の組み合わせの違いで構成される．(a)と(c)では，第 1 軸が色相，第 2 軸が輝度を示し，(b)では，第 1 軸が輝度，第 2 軸が色相を示す．(a)の結果となった被験者は 8 名，(b)と(c)はそれぞれ 2 名ずつであった．

R(b)	YR(b)	Y(b)	GY(b)	B(b)
PR(b)	P(b)	PB(b)	B(b)	BG(b)



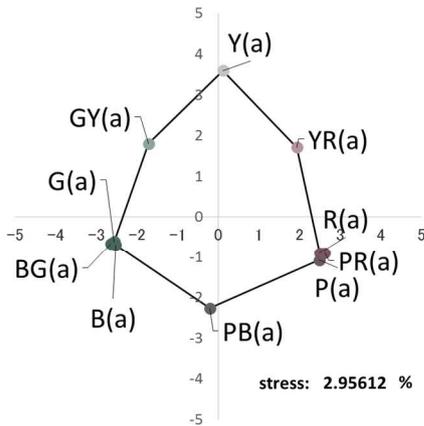
(a) Example of Group-b1 (10)



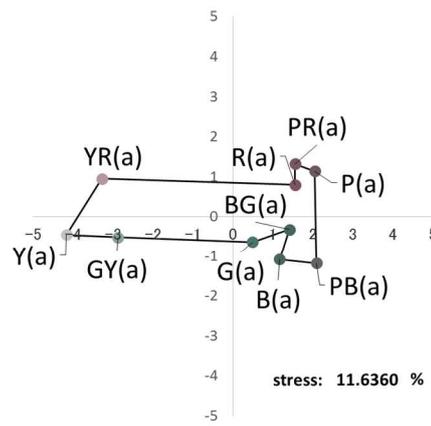
(b) Example of Group-b2 (10)

図 10. 「a*成分を除去した b*成分のみの色票 10 色」の実験結果の例。(a)は凹型の結果を強く示した。(b)は若干の凹形を示した結果となった。第 1 軸は輝度と組み合わされた Y-B 成分を表し、第 2 軸は未知の成分を表すことが示唆された。(a)の結果となった被験者は 9 名、(b)は 3 名であった。

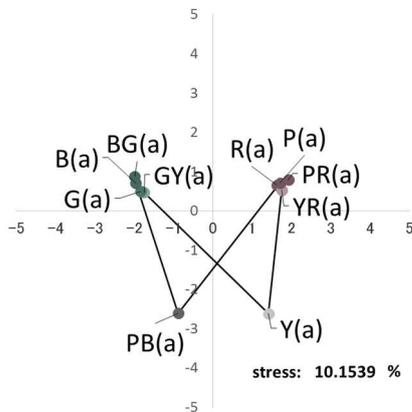
R(a)	YR(a)	Y(a)	GY(a)	B(a)
PR(a)	P(a)	PB(a)	B(a)	BG(a)



(a) Example of Group-a1 (10)



(b) Example of Group-a2 (10)



(c) Example of Group-a3 (10)

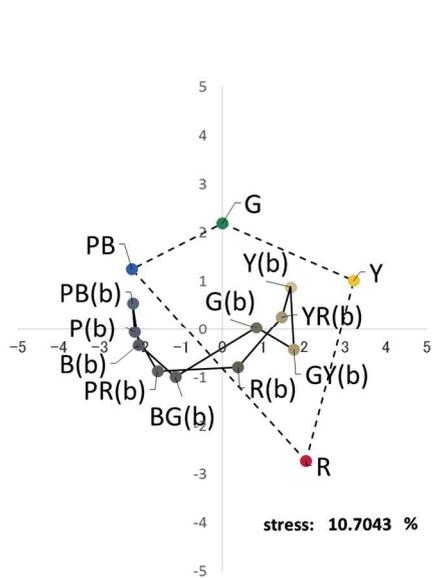
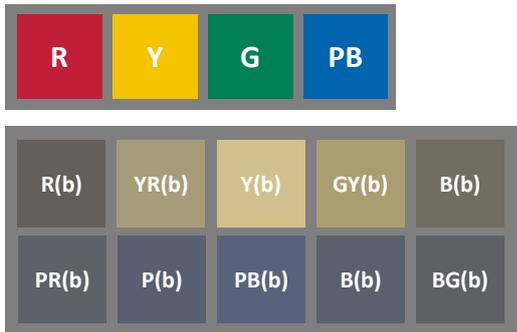
図 11. 「b*成分を除去した a*成分のみの色票 10 色」の実験結果の例. (a) ~ (c)の 3 つのパターンに分類された. 色相と輝度の組み合わせの違いで構成されることが示唆された. (a)と(c)では, 第 1 軸が色相, 第 2 軸が輝度を示し, (b)では, 第 1 軸が輝度, 第 2 軸が色相を示す. (a)の結果となった被験者は 8 名, (b)と(c)はそれぞれ 2 名ずつであった.

3.3.2 14色呈示刺激実験の結果

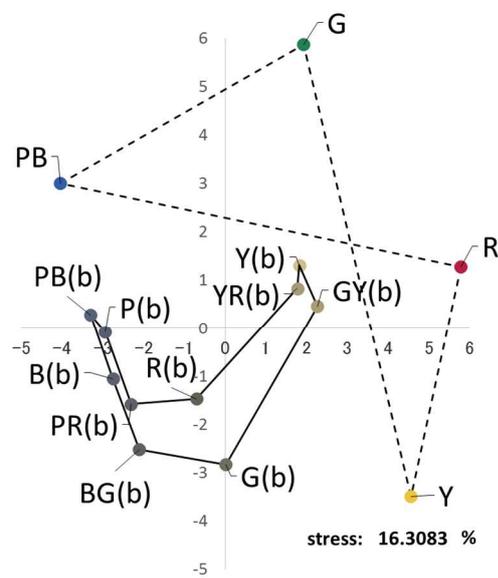
図 12 および図 13 は、それぞれ「a*成分を除去した b*成分のみの色票 14 色」および「b*成分を除去した a*成分のみの色票 14 色」による結果を示している。これらの結果は、(1) すべてのストレス値が約 10 以上であるため、実験は被験者にとって比較的困難であり、(2) 個人差は非常に大きく、結果を正確に分類することは困難であった。本実験から示唆された唯一のことは、4 つの原色の布置が通常回転と交差回転の 2 つのグループが観察されたことである。

3.3.3 考察

「a*成分を除去した b*成分のみの色票 10 色」の実験結果は、3 色覚者に内在する 2 色性が存在する可能性を示唆した。これは都市景観のようなカラフルな環境では機能していないと考えられる。常識では「R-G 反対色の色差が支配的」であるため、3 色覚者の内在性 2 色性機能に関する報告はほとんどない。ただし、実際には、3 色覚者は a*成分の変化が比較的小さい状況（たとえば、図 14 に示すようにくすんだ色で満たされた田園風景）に頻繁かつ無意識に遭遇する可能性がある。これらの状況では、R-G 反対色の代わりに Y-B 反対色が目立つ可能性があり、3 色覚者の内在性の 2 色性が機能していることを示唆している。

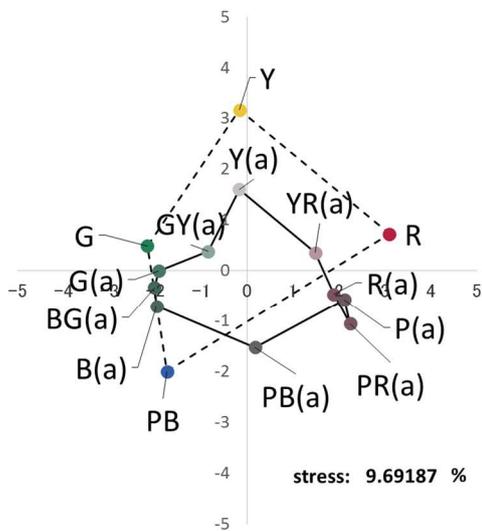
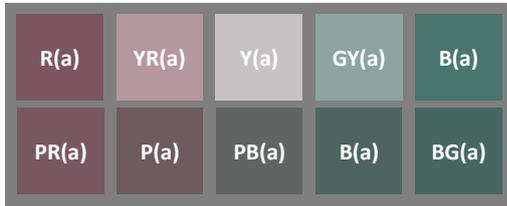


(a) Example of Group-b1 (14)

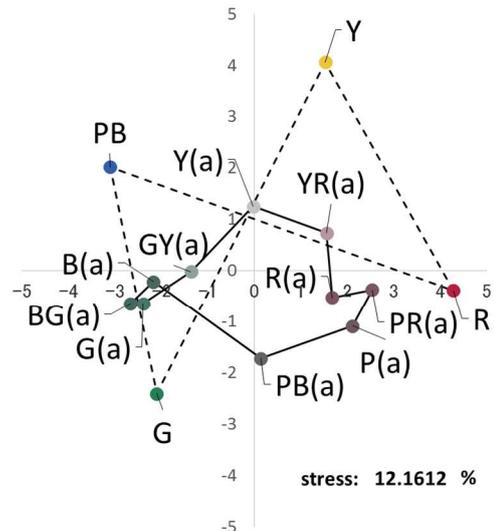


(b) Example of Group-b2 (14)

図 12. 「b*成分を除去した a*成分のみの色票 14 色」の実験結果の例. (a)は 4 つの原色が色相環を成すが, (b)は 4 つの原色が交差している例. (a)と(b)どちらも被験者の結果は 6 名ずつであった.



(a) Example of Group-a1 (14)



(b) Example of Group-a2 (14)

図 13. 「a*成分を除去した b*成分のみの色票 14 色」の実験結果の例. (a)は 4 つの原色が色相環を成すが, (b)は 4 つの原色が交差している例. (a)の結果となった被験者は 4 名, (b)は 8 名であった.



図 14. 黄色と青が目立つ田園風景の例.

3.4 むすび

R-G 成分を除去した Y-B 成分のみの呈示刺激を使用することにより、一般色覚である 3 色覚者の内在性 2 色性（すなわち、色覚異常（CVD）と同様の要因）を MDS 分析により調査した。結果は、(1) R-G 成分を除去した Y-B 成分のみの呈示刺激を観察した場合は、2 色覚者と同様の凹形状となり、一方 (2) Y-B 成分を除去した R-G 成分のみの呈示刺激にて観察した場合は、第 2 軸が輝度と解釈される楕円形となった。常識では、3 色覚は非常に安定していると考えられているため、成人してから 2 色性を作り出すこと（つまり、内在性 2 色性を保持すること）はないと考えられるので、この発見は極めて斬新である。

色差は通常 CIE $L^*a^*b^*$ のような「均一色空間」内で、3 色覚が個々の成人で安定であるという考えに基づいて客観的に評価される。しかし、今回のこの発見は、以前の基本的な考えを再考することを示唆する。言い換えれば、3 色覚者はそれらの観察シーンが変化するときには内在的な 2 色性特徴を使用する可能性があるため、これらのアイデアの適用範囲を考慮する必要があると考える。この種の研究が将来取り上げられることを願いたい。

第4章 色覚支援コミュニケーションツールの開発コンセプト

4.1 まえがき

本章では，第1章で検討した色覚の異なる2色覚者と3色覚者がお互いの色の見え方を理解可能な，新しい色覚支援コミュニケーションツールの提案について概要（図15参照）を説明する．主にツールの特徴やコンセプトなどについて述べる．まず，しきい値処理により発生する偽輪郭の課題を解決し，色の弁別だけでなく色の印象，特に3色覚の反対色の感覚を理解できる，2色覚者向けに考案した2つの色覚補助法（90度色相回転法と色相ブレンド法と命名）の概要と，オリジナル画像と変換画像を交互に表示することで3色性の感覚を実現させた手法について説明し，つぎに，それらの手法を携帯端末環境での軽量なリアルタイムビデオ処理にて実現可能であること，3色覚者向けの簡易な2色覚シミュレーション手法，およびそれらの動作モードについて述べる．2色覚・3色覚双方向の色覚補助ツールとして，2色覚者のみならず，その保護者や学校の先生等にも使用してもらえらるようなコミュニケーションツールを提案する．

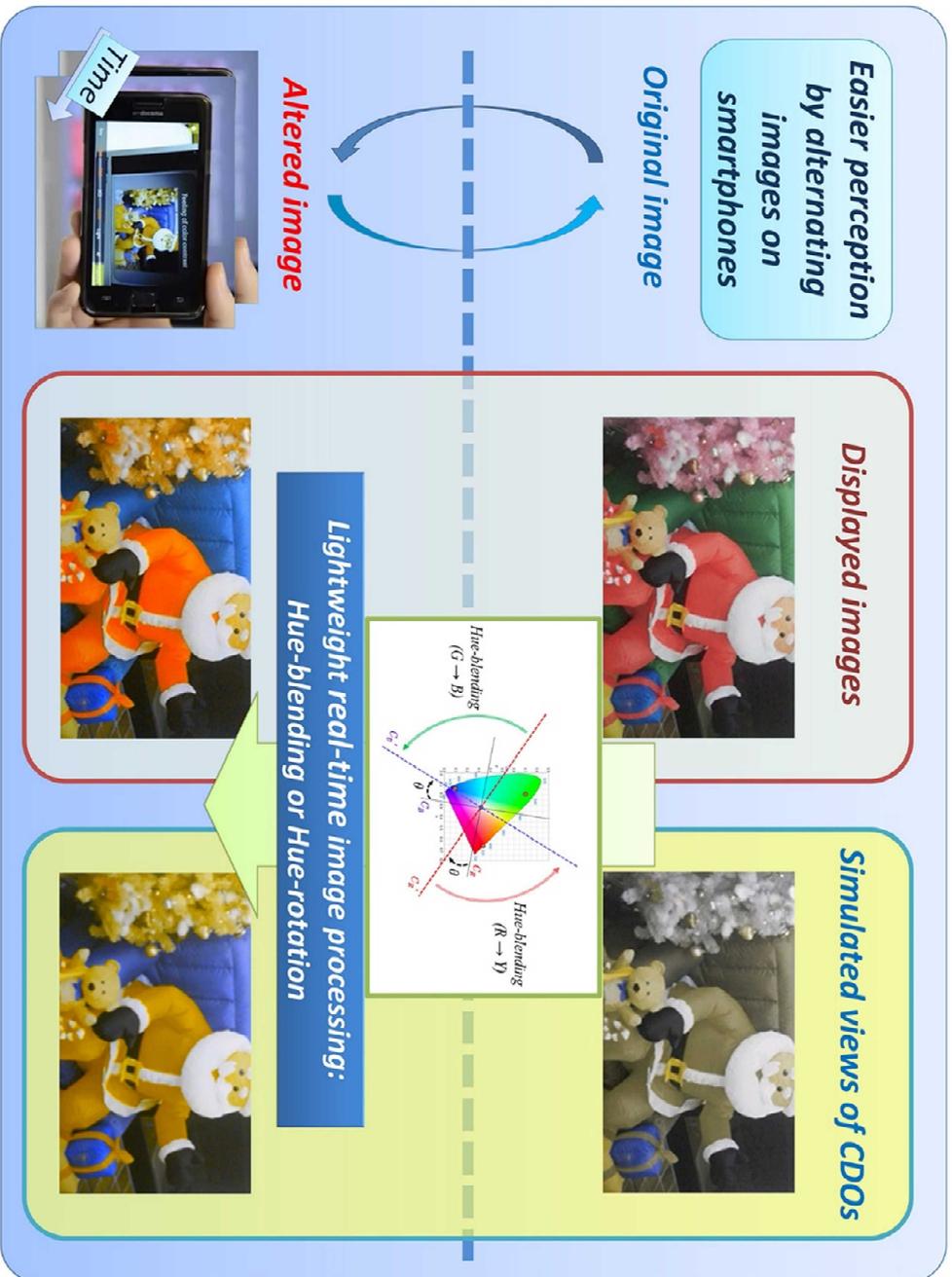


図 15. 色覚支援コミュニケーションツールの概要

4.2 提案ツールの概要とコンセプト

2色覚者と3色覚者との相互理解による完全なコミュニケーションのために、より重要な特性は、色の印象、たとえば、鮮やかさおよび色のコントラストである。したがって、彩度やコントラストを維持しながら、相手の色対比（ここでは赤・緑と黄・青）を認識するのに役立つ新しいツールが必要である。さらに、3色覚者と2色覚者間の効果的なコミュニケーションを実現するためには、両方が同時に他方の色知覚を理解できることが重要である。

この困難な目標を実現するための3つの重要な技術を紹介する[32][33]。1つ目は、元の画像と処理された画像を交互に連続して繰り返し表示し、3色覚者が持つ赤・緑と黄・青の両方の反対色の認識をサポートすることである。元の画像では、2色覚者にとっては黄・青の反対色は認識できるが赤・緑の反対色は認識できない。変換画像では、赤・緑の反対色を2色覚者にとって認識可能な黄・青の反対色に変換する。この方法により、オリジナル画像と変換画像を交互に表示することで、2色覚者には認識できない赤・緑の反対色を黄・青反対色を活用することで、3色覚者の2つの反対色を理解することができる。ここで、2つの補完的な処理方法（90度色相回転法（HR）と色相ブレンド法（HB））を提案する。まず、90度色相回転法（HR）は専門家ユーザーに役立つ。理由は、(1) この方法の利点は、処理された画像が通常の画像から完全に色相回転したカラー画像を持ち、2色覚者が回転した画像のRG色差を正確に観察できることであるが、(2) この方法では、2つの画像を交互に切り替えると画像全体の色の印象が大きく変化する可能性があるため、使用前に何らかのトレーニングが必要という点である。一方、色相ブレンド法（HB）は一般ユーザーに適している。その理由は、(1) この方法の利点は、2色覚者が知覚できるRG色差を含む部分のみが変化するため、トレーニングなしで簡単に使用できることであるが、(2) 欠点はこの方法によるRG色差の変換精度が、HRのそれよりわずかに劣る。したがって、2つの方法は補完的である。2つ目は、スマートフォンでリアルタイムのビデオ処理を実現することである。デジタルコンポーネントのビデオ信号形式（Y, CR, CB など）を直

接処理するアルゴリズムを導入している。3 つ目は、3 色覚者向けの簡易なリアルタイム 2 色シミュレーション機能をスマートフォンに組み込むことである。

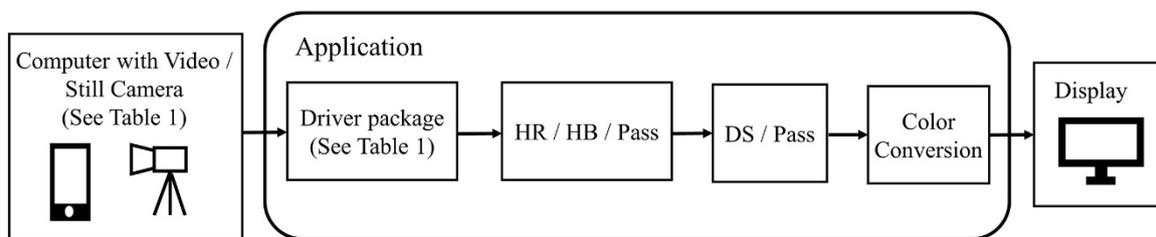
4.3 携帯端末環境での軽量なリアルタイムビデオ処理の実現

使いやすさや利便性を確保するために、携帯用のリアルタイムの個人環境で色知覚強化ツールやその他の色識別システムを利用できることが重要である。幸いなことに、第 1 章の 1.5.2 で述べたように、スマートフォンや次世代のタブレット端末は十分に強力であり、広く採用されている。これらは、適切な周辺機器（ビデオカメラ、中解像度または高解像度のフルカラーディスプレイ、タッチスクリーンなど）を備えた強力な環境を提供している。

最新のスマートフォンやタブレット端末には別の利点がある。従来のタブレット端末では、静止画像の処理に sRGB カラースペース[34]などの RGB ベースのカラー画像キャプチャが使用されていた。このため、RGB から色差成分に変換する 3×3 のマトリックス演算が必要となる。換言すると、色差成分（輝度と反対色）をベースにしたビデオ信号によるキャプチャ（Y, CR, CB 色空間[34][35]など）よりも処理のオーバーヘッドがはるかに高いため、GPU (Graphics Processing Unit) など特殊な補助演算装置を使用しなければリアルタイム処理は困難であった。一方で、最新の端末は、コンポーネント信号がビデオ処理システムでごく普通に用いられており、色相や彩度の変更などの色信号処理が簡単に実行可能となった。

したがって、最新のスマートフォンやタブレット端末は、提案しているリアルタイム色覚支援ツールの最も有望なプラットフォームである。図 16 と表 6 は、それぞれ処理の簡略化されたブロック図と、各プラットフォームのカメラ/ビデオ入力からの一般的な色変換機能のリストを示している。画像取得段階では、プロトタイプ現在のバージョンは OpenCV ライブラリを用いている。色変換段階では、ユーザーは HR, HB, またはパスを選択できる。2 色覚シミュレーション段階では、ユーザーは DS (Dichromatic Simulation) またはパスを選択できる。出力色変換段階では、Y, CR, CB

色空間を sRGB 色空間に変換している.



HR: 90-Degree-Hue-Rotation Method
 HB: Hue-Blending Method
 DS: Dichromatic Simulation

図 16. 処理を簡略化したブロック図.

表 6. ビデオカメラの動画像を処理する一般的なパッケージのリスト.

Computer with Video / Still Camera	Driver package	
iOS	AVFoundation Framework	OpenCV
Android	android.hardware.Camera.PreviewCallback (API level 21 or later: android.hardware.camera2)	
Other devices with Video / Still Camera	Camera driver	

4.4 3色覚向けの簡易な2色覚シミュレーション手法

3色覚者と2色覚者間の完全な通信を行うには、同じツールで2色覚への色覚補助機能と3色覚への2色覚シミュレーション機能を同時に操作する必要がある。

P型2色覚またはD型2色覚を正確にシミュレートするには、複雑なカラーマトリックス操作が必要である[2]。たとえば、あるディスプレイメーカーは、ハードウェアサポートによりリアルタイムシミュレーションを提供している。特別に開発されたASIC（特定用途向け集積回路）等がモニター内で使用されている[36]。

しかしながら、シミュレーションの精度は少し損なわれるが、はるかに単純で軽い方法が実現可能である。本稿のアプローチは、R-G色信号のゲインをゼロ、すなわちY, C_R , C_B 色空間の C_R 要素をゼロにすることである。結果の画像の例を第5章の図17(b)に示している。変換された画像は、ほとんどの目的で、たとえば色の印象の大きなチェック、色の識別の程度などに対して十分に正確であると考えられる。

したがって、本ツールではこの方法を採用し、2色覚者の被験者と実施した主観評価実験によりその精度を評価している。

4.5 動作モード

3色覚者が色相を回転させた画像を観察すると、奇妙な色を知覚し、それらに注意を払う傾向がある（たとえば、第5章の図17(c)を参照：この場合、黄緑色が目立つ）。ただし、黄-青の色成分のみの減色画像を観察する場合（たとえば、図17(d)を参照）、彼らはそれほど奇妙な色とは認識せず、それらにあまり注意を払わない。一方、2色覚者は、色相を回転させた画像を観察してもわずかな不快感しか感じない。

両者の観察者のさまざまな組み合わせに合うように、ベース（オリジナル）画像と変換（比較）画像のさまざまな組み合わせを検討できる。画像処理の観点からは、通常色（NC）および色相回転／ブレンド色（RC）モードが存在し、表示モードの観点からは、フルカラー（3色覚：3C）およびR-G減色（2色覚：2C）モードが存在する。表7に組み合わせを示す。モード1は、基本的に2色覚者向けの補助と、2色覚者と

3色覚者の間の通信用に用いる。モード2は、周囲の人々の注意を避けるために、秘密裏に2色覚補助を使用するためのモードである。モード3は、3色覚者向けの2色覚シミュレーションに用いる。モード4は、2色覚シミュレーターの動作を確認するためのモードである。2色覚者が観察した際に、ベース画像と変換画像にほとんど違いが見られなければ、2色覚シミュレーションは正常であることが確認できる。

表 7. オリジナル画像と変換画像の組み合わせ。

Mode No.	Purpose	Base image	Alternative image
1	Dichromatic normal / 2C-3C communication	NC-3C	RC-3C
2	Surreptitious dichromacy use	NC-3C	RC-2C
3	Trichromatic	NC-3C	NC-2C
4	Confirmation of 2C percept for trichromacy	NC-2C	RC-2C

4.6 むすび

本章では、第1章で検討した色覚の異なる2色覚者と3色覚者がお互いの色の見え方を理解可能な、新しい色覚支援コミュニケーションツールの提案について概要を説明した。主にツールの特徴やコンセプトなどについて述べた。まず、2色覚者向けに考案した2つの色覚補助法の概要と、オリジナル画像と変換画像を交互に表示することで3色性の感覚を実現させた手法について説明し、つぎに、それらの手法を携帯端末環境での軽量なリアルタイムビデオ処理にて実現可能であること、3色覚者向けの簡易な2色覚シミュレーション手法、およびそれらの動作モードについて述べた。

第5章 90 度色相回転法

5.1 まえがき

本章では, 第4章で述べた2色覚者向けに考案した基本的な手法の90度色相回転法について, その理論と検証実験について詳細を述べる. 2色覚者は, 黄と青は3色覚者と同じ感覚を持つが, 赤と緑を混同しやすいという特徴を持つ. したがって, 色相を90度色相回転することで赤を同じ暖色系の黄へ, 緑を寒色系の青へ変換することで3色覚の感覚へ近づけた. 検証実験では, R-Gカラー分類実験, 混同しやすい色の分類実験, および一般的な環境での使用感の評価実験の3つの実験を行い検証した. 何れの実験結果も既存技術に比べて有意に良好な結果を得ることができた.

5.2 提案手法の理論

3色覚の色の印象は, 90度色相の回転方法[12]で表現できる. 図17に示すように, これは非常に強力なツールであり, 2色覚者が赤と緑の反対色を理解するために, 90度色相回転することで赤から黄へ, 緑から青へ変化する. 2色覚シミュレーションした赤と緑のオブジェクトは, 図17(b)に示すように類似した色を持っているが, 図17(d)に示すように, 色相を90度色相回転した画像では, 赤と緑の色が明確に分離されている.

色相を90度色相回転させた画像だけでは, 赤と緑以外の色も変換されるため混乱

を引き起こす可能性があるが、元の画像と色相回転画像を交互に表示することで解消できる。ここで、原画像と処理画像との表示切替のタイミングを十分に低い周波数（たとえば、約 1/2 Hz 以下、日本の信号機の点滅周波数以下）に設定すれば、光感受性発作（PSE）の恐れはない[37]。したがって、2 色覚者は、注視点を変えることなく、これらの画像に存在する 3 色覚の 2 つの反対色 Y-B と R-G を確認できる。また、画像の切替を自動ではなく手動とすれば任意のタイミングで画像を切り替えることが可能である。

3 色覚者と 2 色覚者間の色の印象に関してスムーズな相互コミュニケーションを実現するためには、両方が同時に相手の状況を理解することが重要である。図 17 (c) に示すように、色相を 90 度色相回転した画像はこの特性を提供している。3 色覚の場合、図 17 (a) に示すように、元の画像にはっきりと存在する赤と緑の反対色とは対照的に、緑がかった色から青みを帯びた色までの類似色のみが回転された画像で知覚される。一方、2 色覚の場合、3 色覚とは対照的に、同じ回転画像で鮮明な黄色と青色のコントラストが知覚される。大まかに言って、原画像が 3 色覚で明確な色のコントラストを有する場合、二色覚で知覚される画像はより明確な色のコントラストをあまり持たず、逆もまた同様である。

前述のように、90 度色相回転法は、色の弁別のみでなく、3 色覚の彩度やコントラストといった色の印象を理解することができ、色知覚による両者のスムーズなコミュニケーションを可能にする。



(a) NC-3C



(b) NC-2C



(c) RC-3C



(d) RC-2C

図 17. オリジナル画像の(a)と、(a)を 90 度色相回転した(b), およびそれらを 2 色覚シミュレートした(b)と(d). 略語は次の通り. NC: オリジナル画像, RC: 変換画像 (90 度色相回転), 3C: 3 色覚, 2C: 2 色覚.

5.3 検証実験

5.3.1 実験装置

(a) 仕様

スマートフォン用のプロトタイプソフトウェアを開発した。1.2 GHz デュアルコアプロセッサ, 1 GB の RAM, 10.8 cm (4.3 インチ) WVGA (800 x 480) Super AMOLED Plus スクリーンディスプレイ, 8 メガピクセルのカメラを搭載した Samsung Galaxy S II を使用した。オペレーティングシステムは, TouchWiz UI 4.0 を搭載した Android 2.3.3 であった。

ビデオ信号は, 標準の Android SDK の「Camera.PreviewCallback」クラス API を用いた。ビデオデータ形式は YCbCr_420_SP (NV21) であった。

(b) ユーザーインターフェース

原画像と 90 度色相回転した画像は, 画面タッチで切り替えられる。また, 正確な調整のために色相回転角度を任意に回転できるようにするシークバーも用意した。

(c) ビデオパフォーマンス

ビデオフレームレートは, 0, 90, 180, および 270 度の色相角で 25~30 fps の範囲であった。他の色相角度では, より複雑な計算のために 15 fps 程度であった。これらのビデオフレームレートは, 色覚補助の目的として十分実用に供する性能である。

5.3.2 実験手順

(a) 一般的な方法

プロトタイプを用いて主観評価実験を実施した。比較項目は, (1) 90 度色相回転 (90HR), (2) 任意の色相回転 (AHR), および第 1 章 1.5.1 で述べた最近の色付きガラス (CG) [5], 補助なし (WH) の 4 条件。90HR 条件の場合, 色相の回転角度は 90 度に固定した。一方, AHR 条件では, 被験者はいつでも手動で色相の回転角度を

調整できる。頻繁に選択されるのは 90 度または 270 (-90) 度であった (つまり, Y-B 色対比は R-G から取得される)。

動作モードは, 90HR および AHR 条件では, 表 7 のモード 1 と 2 の両方が使用された。被験者の半分はモード 1 を使用し, 残りの半分はモード 2 を使用した。また一般的に, 一部の被験者はモード 1 と 2 の間で色の知覚にわずかな違いを感じていた。

実験を開始する前に, 被験者は日常使用する物品を確認して満足するまで, シミュレーターと色付きメガネを使用するように訓練した。5.3.2 (b) に記載されている学習時間を除き, 各試行は 5~15 分続いた。

(b) 90 度色相回転法を使用するための手順

90 度色相回転法を使用する前に, ユーザーは色の取り扱いに関する基本的な情報を学ぶ必要がある。学習する主なポイントは, 2 つの直交する 3 色覚の反対色, つまり R-G と Y-B の存在である。

2 つの直交する反対色の概念は, 2 色覚者にとってそれほど自然ではない。第一に, 彼らは 3 色覚の反対色についてわずかにまたは全く意識していない。第二に, 彼らは非常に類似した色として認識されているにもかかわらず, 緑がかかった色から赤みを帯びた色を区分する必要があるため, 体系的にではなく発見的に色名を学んできた。

したがって, まず Y-B 成分を用いて反対色の使用を指導した。この場合でも, 彼らが黄色がかかった色を理解することは少し困難であった。その理由は, 黄赤みを帯びた色 (オレンジなど) と黄緑がかかった色が同じカテゴリに存在する一方で, 日常生活では区別する必要があるためである。そのため, 被験者に, 「青みがかかった色」, 「白と黒を含む中間色の灰色」, 「その他の色」の 3 つのカテゴリに分けるように指示した。分類の完了後, 「他の色」群は「黄色がかかった色」群を意味することを示した。

次に, カラー処理に関するその他の基本情報を提供した。学習に費やされた合計時間は 30 分から 2 時間で, 被験者のスキルや興味によって異なった。

(c) 被験者

6人の成人男性被験者が実験に参加した。2人の被験者は、2010年の実験に参加したため、90度色相回転法の原理をよく知っていた[10]。他の参加者は繊細であった。被験者は次のように分類された。P型2色覚が1名、D型2色覚が3名、2名は石原式色覚検査表[38]でタイプを区別できなかった不明者である。すべての被験者の視力は正常、またはメガネやコンタクトレンズの矯正により正常であった。

5.3.3 実験1：R-Gカラー分類実験

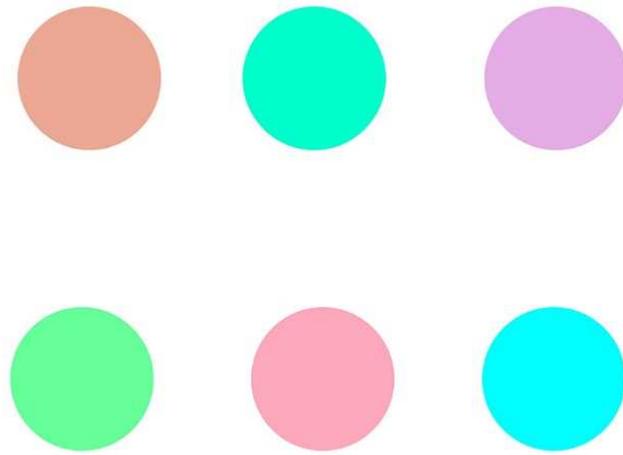
(a) 方法

図18(a)は、R-Gカラー分類実験のテストチャートの例を示している。顔料タイプのインクジェットプリンター(EPSON PX-5550)によってA4サイズのマット紙に印刷されたテストチャートを呈示した。6人の被験者は誰も助けなしに赤みを帯びた色と緑がかった色を区別することができなかった。

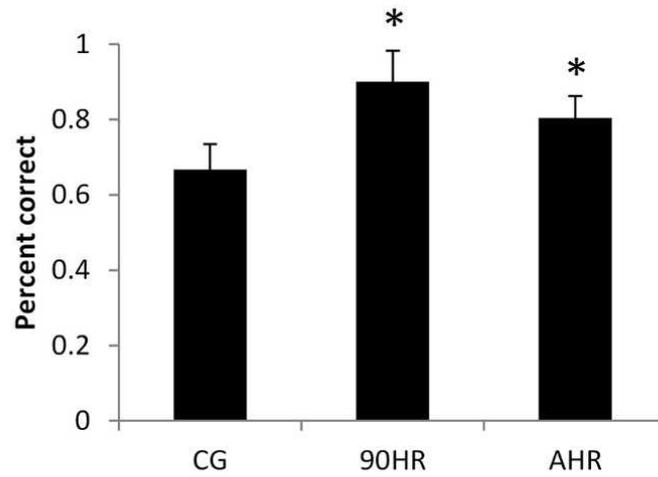
被験者へは、補助ツールを使用して、各色の円を赤、ニュートラルグレー、または緑がかった色に分類するように求めた。各条件で10回の試行を行った。試験順序は、任意角度色相回転(AHR)、色付きメガネ(CG)、および90度色相回転(90HR)であった。

(b) 結果

図18(b)に実験結果を示す。1標本t検定を行った結果、90HR($t(5) = 6.74$, $p < .002$)とAHR($t(5) = 3.56$, $p < .02$)は、チャンスレベルとの間に有意差がみられた。



(a) Example of test images



(b) Result (Error bar shows SE. * $p < .05$)

図 18. R-G カラー分類実験.

5.3.3 実験 2：混同しやすい色の分類実験

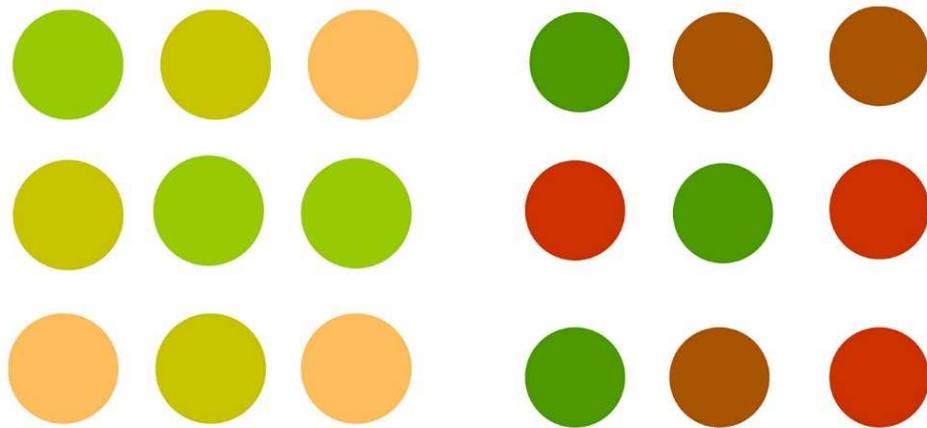
(a) 方法

図 19 (a) は、混同しやすい色の分類実験のテストチャートの例を示している。顔料タイプのインクジェットプリンター (EPSON PX-5550) によって A4 サイズのマット紙に印刷されたテストチャートを呈示した。被験者へは、同じ色の円を選択するように要求した (9 つの円で 3 色を使用している)。各条件下で 6 回の試行を行った。試験順序は、AHR, CG, および 90HR であった。

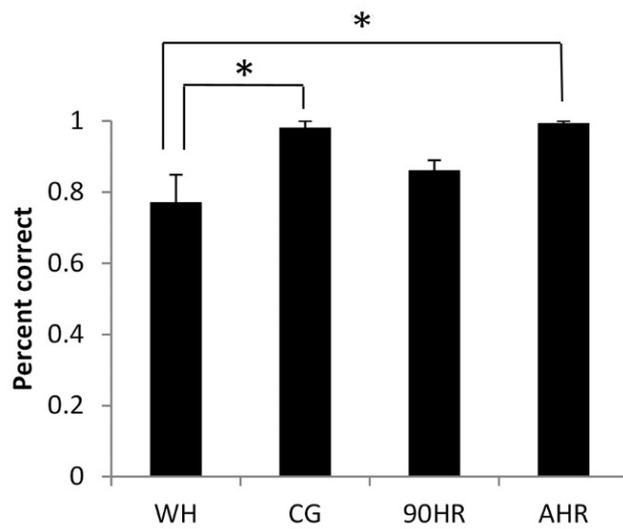
(b) 結果

図 19 (b) は、得られた結果を示している。色付きメガネ (CG) と任意角度調整 (AHR) による色相回転は、この目的に十分な評価を得た。CG と AHR は、補助なしの状態 (WH) とは有意な差 (Tukey の HSD, $p < .01$) を示した。

したがって、基本的な 90 度色相回転 (90HR) には十分な評価が得られず、同等の厳しい色分離条件で色相角の微調整を検討する必要があることが示唆された。



(a) Example of test charts



(b) Subjective test result (Error bar shows SE. * $p < .01$)

図 19. 混同しやすい色の分類実験.

5.3.3 実験 3：一般的な環境での使用感の評価実験

(a) 方法

顔料タイプのインクジェットプリンター (EPSON PX-5550) によって A4 サイズのマット紙に印刷された色の印象の注釈付きの 60 枚の写真を呈示した。テスト画像の例を図 20 に示す。テスト画像は 2 つのセットに分け、被験者も 2 つのグループに分けた。順序効果を打ち消すために、最初のグループは、WH, CG, 90HR, および AHR 条件の順序で最初にセット 1 の画像を観察し、次に条件の逆のシーケンスでセット 2 の画像を観察した。2 番目のグループは逆の順序を使用した。

各画像に対して 2 つの設問を実施し、最初の質問は、5 段階のスケールを使用して色の印象の評価を得た (-2: 全く異なる ~ 2: その通り)、2 番目の質問は、5 段階のスケールを使用して使いやすさの評価を得た (1: 役に立たない ~ 5: 役に立つ)。WH 条件については、色の印象の評価のみを実施した。

(b) 結果

図 A4 は、色の印象と使いやすさの評価の結果を示している。これらの結果は、90 度色相回転 (90HR) と任意角度色相回転 (AHR) の両方を含む 90 度色相回転法が、従来のカラーグラスよりも優れた性能を持っていることを明確に示している。図 21 (a) に示すように、色なし印象 (WH) と色付きメガネ (CG) の間、および色の印象評価の CG と (90HR, AHR) の間に有意差 (Tukey の HSD, $p < .01$) が観察された。図 21 (b) に示すように、使いやすさの評価でも同様の有意差が見られた。



(a) Original color images

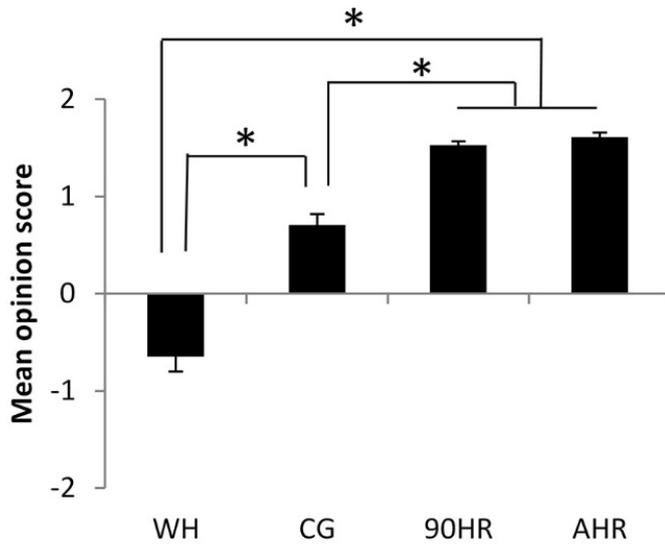


(b) Simulated original views with dichromacy (NC-2C)

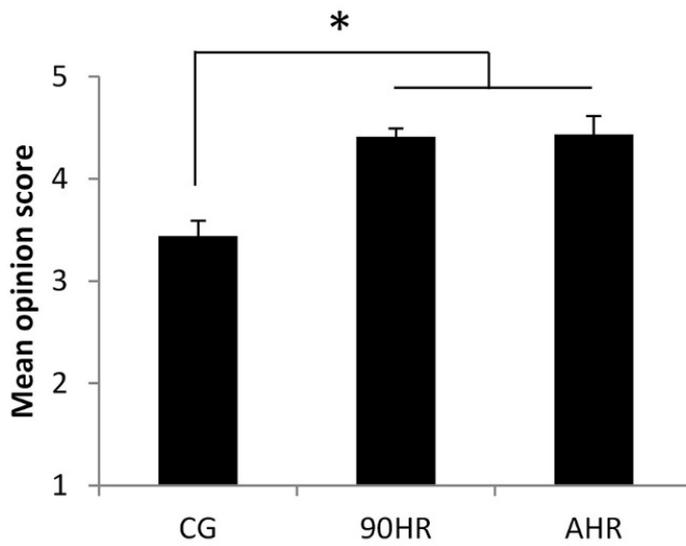


(c) Simulated 90HR views with dichromacy (RC-2C)

図 20. 2 色覚シミュレートされたテスト画像の例.



(a) Color impression evaluation (Error bar shows SE. * $p < .01$)



(b) Usability evaluation (Error bar shows SE. * $p < .01$)

图 21. 結果.

5.3.3 実験 4 : 2 色覚シミュレーションの性能調査

(a) 方法

各被験者は、実験 3 で使用された 60 枚の画像のうち最初の 30 枚のフルカラー画像 (NC-3C) と 2 色覚シミュレーションされた画像 (NC-2C) の間の色知覚の違いを自発的に報告した。

(b) 結果

すべての被験者によって、実験した画像の一部でわずかな違い（暗い部分および彩度が非常に高い部分が指摘された）が報告されたのみであった。したがって、2 色覚シミュレーションの提案は、本稿の目的に十分効果的である。

5.1 むすび

本章では、第 4 章で述べた 2 色覚者向けに考案した基本的な手法の 90 度色相回転法について、その理論と検証実験について詳細を述べた。2 色覚者は、黄と青は 3 色覚者と同じ感覚を持つが、赤と緑を混同しやすいという特徴を持つ。したがって、色相を 90 度色相回転することで赤を同じ暖色系の黄へ、緑を寒色系の青へ変換することで 3 色覚の感覚へ近づけた。また、3 色覚の連続画像を使用して、統一された正しい知覚を生成する一連の検証実験を実施した。実験は、2 色覚者がオリジナル(すなわち、2 色覚者のための正しい黄-青であるが歪んだ赤-緑の情報を含む)と変換画像(すなわち、2 色覚者のための合成された識別可能な赤-緑であるが混同可能な黄-青の情報を含む)のペアから赤 - 緑と黄 - 青の反対色の両方に関連する統一した正しい知覚を生成できることを示した。したがって、この方法は 2 色覚者のサポートに非常に効果的である。彼らは、色のコントラストや色のカテゴリー構造など、3 色覚の色の知覚を理解できると驚いた。また、シンプルで軽量の 2 色覚シミュレーションは、3 色覚者が 2 色覚知覚を理解するのにも効果的である。

これらの結果は、市販のスマートフォンで実行されているプロトタイプソフトウェア

アから得られたことに注意したい。したがって、上記の手法は 2 色覚者と 3 色覚者を支援し、色の知覚が異なる人々の相互コミュニケーションをサポートすることが可能である。

90 度色相回転は、訓練された上級ユーザー（専門家）である 2 色覚者に対して十分な評価を得た。ただし、次の 2 つの問題を解決する必要がある。(1) 一般的な 2 色覚者に対する理想的なサポーターとして、ト原画像における黄と青の領域の変化なしに赤または緑の領域のみを処理する機能を提供すること、および (2) 色相回転法によって提供される 2 色覚に対する R - G 色分割能力にはまだ改善の余地があることを示した。

第6章 色相ブレンド法

6.1 まえがき

本章では, 第5章で述べた90度色相回転法を一般向けに改良した色相ブレンド法について, その理論と検証実験について詳細を述べる. 90度色相回転法では, 2色覚者が混同しやすいR-G以外の色も変換される. よってR-G成分のみを色変換することの有効性について検討し, 色相回転後に色相のブレンドを行い, 色相回転を元に戻すという方法によりR-G成分のみを色変換する色相ブレンド法を考案した. 検証実験では, 90度色相回転法の検証実験と同様のR-Gカラー分類実験, 混同しやすい色の分類実験, および一般的な環境での使用感の評価実験の3つの実験を行い検証した. 何れの実験結果も既存技術に比べて有意に良好な結果を得ることができた.

6.2 提案手法の理論

6.2.1 基本アルゴリズム

図22は, 色相ブレンド法(HB)の概略図を示している. 2色覚者は, 黄色と青の反対色をはっきりと認識できる. したがって, HBは黄色に赤の色成分をブレンドし, 緑に青をブレンドする. Y, C_R, C_B 色空間の C_B と C_R の座標ペアは, 人間の知覚の反対色の座標ペアと一致しないことに注意したい. したがって, 最初に Y, C_R, C_B 色空間内の C_B と C_R の座標ペアを θ だけ回転させて, C_B' と C_R' の新しい座標ペアに変更し,

人間の知覚の反対色システムに一致させる必要がある。次に、 C_B' 成分（青-黄）から C_R' 成分（赤-緑）を差し引いて、黄へ赤を、青へ緑をブレンドする。色相のブレンド後は、座標を回転して元の方向に戻す必要がある。

式（1）～（6）に計算式を示す.. ここで、 θ は回転角、 a は混合係数である。 θ の範囲、約-10～-30度は、観測者の特性に依存する。予備実験により、赤と緑の部分を目立たせるために a の値は 1 ではなく 2 または 3 を使用した。

$$C_R' = -C_B \sin\theta + C_R \cos\theta \quad \text{----- (1)}$$

$$C_B' = C_B \cos\theta + C_R \sin\theta \quad \text{----- (2)}$$

$$C_R'' = C_R'' \quad \text{----- (3)}$$

$$C_B'' = C_B'' - aC_R \quad \text{----- (4)}$$

$$C_R''' = (a \sin 2\theta) C_B - (1 - a \sin\theta \cos\theta) C_R \quad \text{----- (5)}$$

$$C_B''' = (1 + \sin\theta \cos\theta) C_B - (\cos 2\theta) C_R \quad \text{----- (6)}$$

色相ブレンド法の計算の結果として範囲を超えた場合、 C_B''' および C_R''' の値は範囲内に収まるように切り捨てる。

図 23 は、以前の 90 度色相回転法（HR）と提案された色相ブレンド法（HB）によって得られた画像を示している。混合係数 a が 1 より大きいため、HB が HR よりも顕著であることは明らかである。

Hue-blending
($G \rightarrow B$)

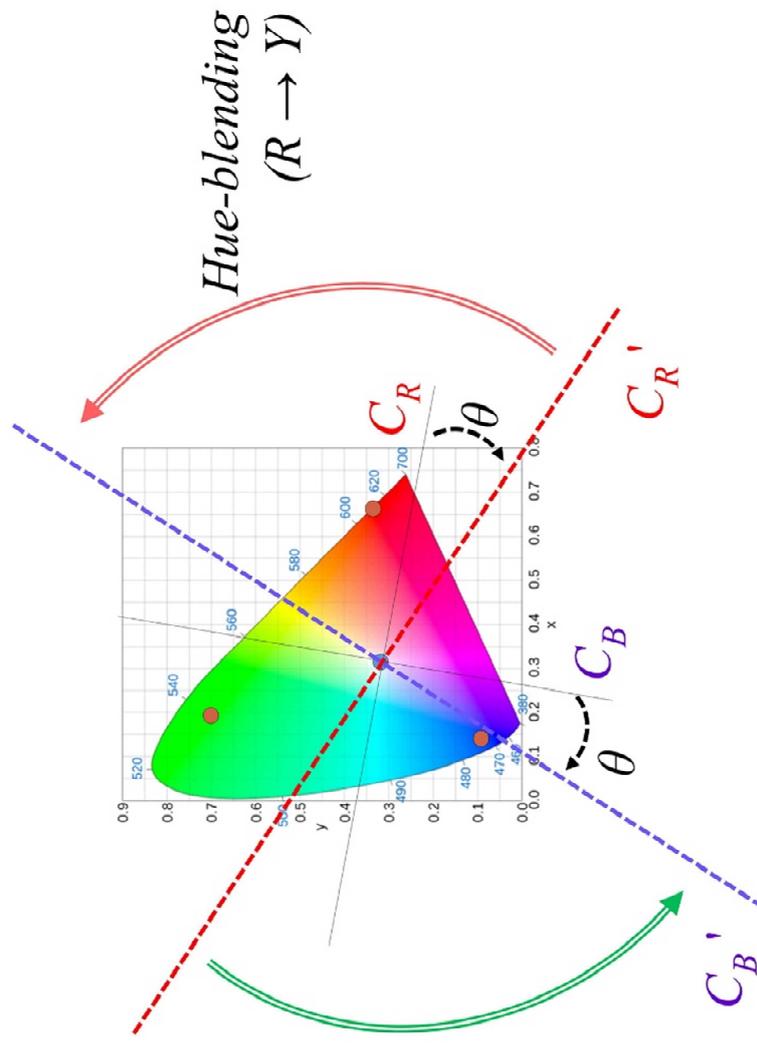


図 22. 色相ブレンド法の概略図.



(a) Original images



(b) Images output by hue-rotation method (HR)



(c) Images output by hue-blending method (HB)

図 23. 色覚補助法の比較. 右は 2 色覚シミュレーションした画像.

6.2.2 R-G カラー領域の選択

単純なしきい値処理により，次のように色を選択できる．式（7）は赤みがかった領域のみを変換し，式（8）は緑がかった領域のみを変換し，両方もしくはどちらか一方を選択できる．

$$a' = \begin{cases} a & (C_R' > 0) \\ 0 & (C_R' \leq 0) \end{cases} \text{----- (7)}$$

$$a' = \begin{cases} 0 & (C_R' \geq 0) \\ a & (C_R' < 0) \end{cases} \text{----- (8)}$$

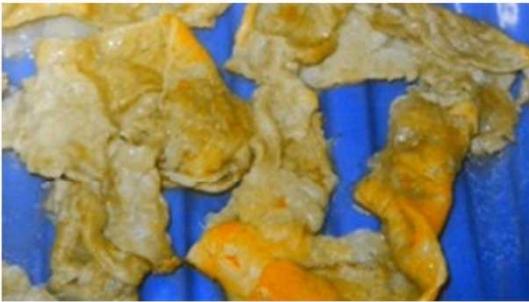
6.2.3 正方向および逆方向の色相ブレンド

これまでの説明では，2色覚者に3色覚の見えに近い感覚をもたらすために， a の正の値を使用した．具体的には寒色系の緑を同様の青へ変換し，暖色系の赤を同様の黄へ変換する．一方，負の値の a を使用すると，焼肉の焼け具合を観察するなど，特定の状況で非常に有用な画像を得ることができる．この手法は「逆方向色相ブレンド法（rHB）」と呼ぶ．

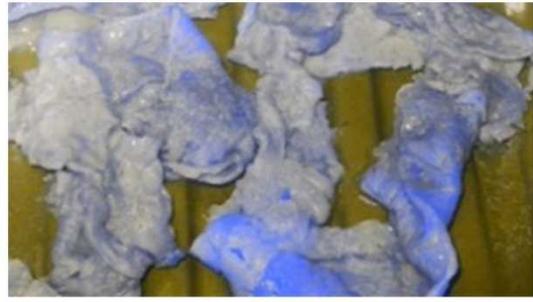
図 24 は，逆色相ブレンド法の効果を示している．この場合，処理された画像で青で表示されている新鮮な赤い領域は，灰色がかった領域から明確に分離できる．



(a) Original images



(b) Images output by normal hue-blending (HB)



(c) Images output by reverse hue-blending (rHB)

図 24. 正方向と逆方向の色相ブレンドの例. 左が 3 色覚, 右側が 2 色覚シミュレートした例. 焼肉の場合, 逆方向の方が分類しやすい.

6.3 検証実験

6.3.1 実験手順

(a) 一般的な方法

プロトタイプを用いて主観評価実験を実施した。比較項目は、(1) 最新の色付きメガネ (CG) [5], (2) 90 度色相回転法 (HR), (3) 提案した色相ブレンド法 (HB), および補助なし (WH)。第 5 章の実験では、一般的に、CG は優れた色識別性能を持ち、HR は優れた色印象性能を持つことを示した。そのため、今回の実験では比較項目を一部省略した。

被験者に合わせて調整する必要がある回転角 θ を除く、ブレンド係数およびその他のパラメータは、予備実験から得られた典型的な値を設定した。

(b) 被験者

2 人の成人男性被験者が実験に参加した。両被験者は、第 5 章の実験に参加したため、すでに HR の原理をよく知っていた。両被験者の視力は矯正により正常であった。

被験者 1 (S1) は P 型 2 色覚で、カラーの研究者であることから、極端な色弁別能力を有する上級 (専門家) ユーザーであり、被験者 2 (S2) は D 型 2 色覚で、典型的な色弁別能力を有する一般ユーザーであった。

(c) 色相ブレンド法の使用手順

実験前の学習とトレーニングに費やした合計時間は 1 時間から 2 時間で、被験者のスキルと興味に依存した。

(d) 装置

すべてのテストチャートは、顔料タイプのインクジェットプリンター (EPSON PX-5550) によって A4 サイズのフォトマット紙に印刷された。照明条件は、自然光

または蛍光灯（白）のいずれかとした．その理由は，複合光による照明ではスマートフォンの自動ホワイトバランス補正機能が誤動作するためである．

6.3.2 実験 5：R-G カラー分類実験

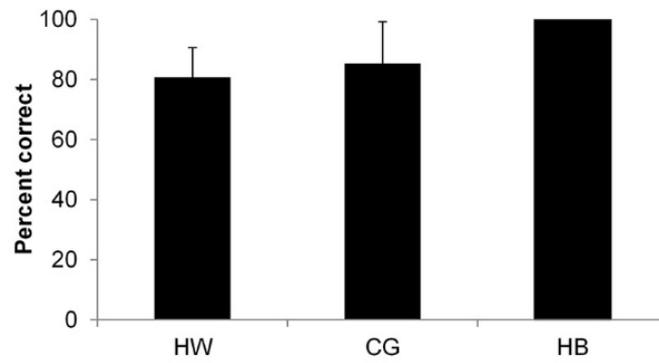
(a) 方法

90 度色相回転法の実験 1 と同じ方法で実験した．典型的な 2 色覚者にとって，補助なしに赤みを帯びた色から分類することは困難である（図 18 (a) 参照）．

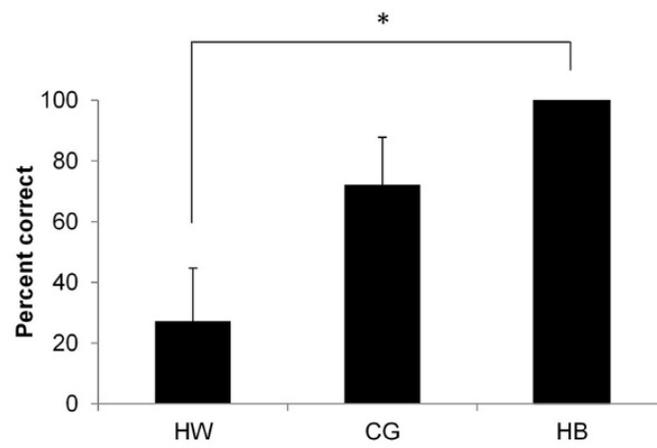
被験者へは，各色の円を，補助なしで，または補助ツールを使用して，赤，ニュートラルグレー，または緑がかかった色に分類するように求めた．各 6 色のパッチについて，S1 では 13 または 26 の試行がランダムに実行され，S2 では 15 または 30 の試行を実行した．試験順序は，半分が WH, CG, および HB で，残りの半分を逆順にした．

(b) 結果

図 25 に結果を示す．まず，S1 と S2 の両方が，HB を使用した状態での 130 回または 150 回の試行で完璧な答えを達成した．S2 は WH 条件で有意なレベルの差 ($p < 0.5$) で評価が不十分であったのに対し，提案された方法は赤・緑の分類で非常に高い評価を得られることが示唆された．次に，S1 が強い色弁別能力を持っていたとしても，HB 以外の条件では完全な分類を達成できなかった．



(a) S1



(b) S2

図 25. R-G カラー分類実験の結果. Error bar shows SE. * $p < .05$.

6.3.4 実験6：混同しやすい色の分類実験

(a) 方法

図 26 は、実験に使用した色票ペアの例を示している。各ペアは、混同線上またはその付近の色で構成されている。混同線の sRGB カラーデータは、日本色彩研究所[39]が発行した「混同カラーチャート」を参考に使用した。

各被験者は、32 試行（16 ペア × 2 回）で R-G 色差を 5 段階評価で判断するように求められた（左が赤：-2～右が赤：+2）。S1 と S2 は混同色が異なる（つまり P 型と D 型である）のために、各刺激セットを S1 と S2 で個別に作成した。16 ペアのセットは、色の違いが小さい 7 ペア、色の違いが中程度の 5 ペア、色の違いが大きい 4 ペアで構成され、Small, Mid, Large と定義した。

(b) 結果

図 27 (a) および (b) は、各被験者の結果を示している。補助手段 (SD: WH, CG, HR, HB) と色票ペアの色の違いの種類 (CD: Small, Mid, Large) を 2 要因として反復測定 2 元配置分散分析 (two-way repeated measures analysis of variance: ANOVA) により分析した。被験者 1 については、CD ($F(2, 116) = 13.79, p < .001$) と SC ($F(3, 116) = 6.53, p < .001$) の両方に主効果が認められた。また、CD と SC の間に交互作用は認められなかった ($F(6, 116) = 0.71, p > .64$)。CD の主効果の事後分析 (Tukey の HSD, $p < .05$) によって、Mid と Large の間を除いた、Small と Mid の間および Small と Large の間に CD の主効果が認められた。SC の主効果の事後分析 (Tukey の HSD, $p < .05$) により、WH とそれ以外の補助手段との間に SC の主効果が認められた。被験者 2 については、こちらも CD ($F(2, 116) = 31.34, p < .001$) と SC ($F(3, 116) = 21.79, p < .001$) の両方に主効果が認められた。また、CD と SC の間に交互作用は認められなかった ($F(6, 116) = 0.56, p > .76$)。CD の主効果の事後分析 (Tukey の HSD, $p < .05$) により、すべての条件の間に主効果が認められた。SC の主効果の事後分析 (Tukey の HSD, $p < .05$) では、WH とそれ以外の補助

手段との間，および HR と HB の間に主効果が認められた．

上記の結果を要約すると，提案された HB は，他のすべての補助手段（WH，CG，HR）の評価と一致するか，またはそれを超えるため，テストされた手法の中で最も有望であると考えられる．

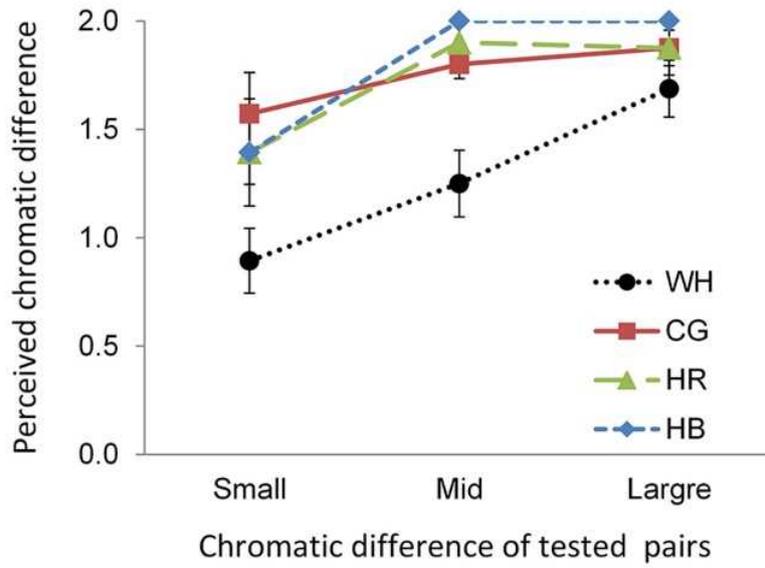


(a) Example of small chromatic difference pair

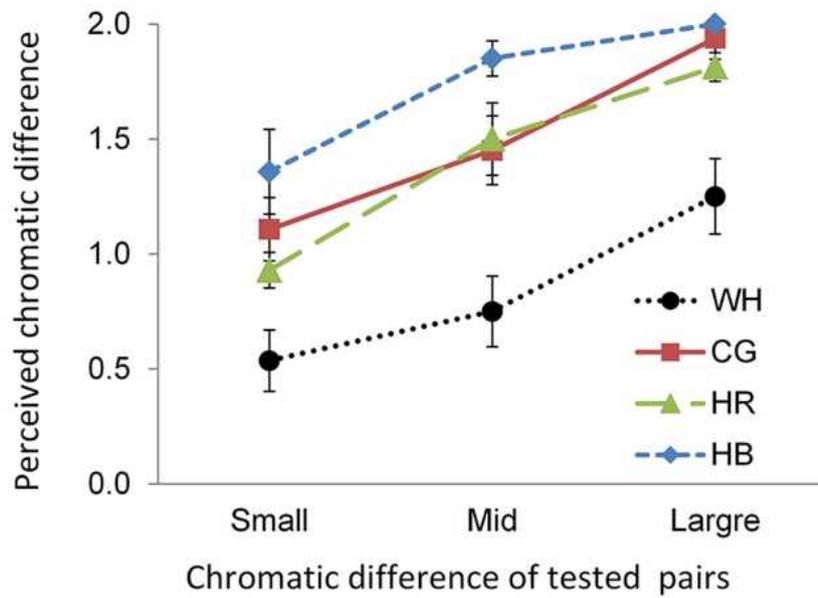


(b) Example of large chromatic difference pair

図 26. 実験で使用した混同しやすい色の例（D 型用）．



(a) S1



(b) S2

図 27. 混同しやすい色の分類実験の結果. Error bar shows SE.

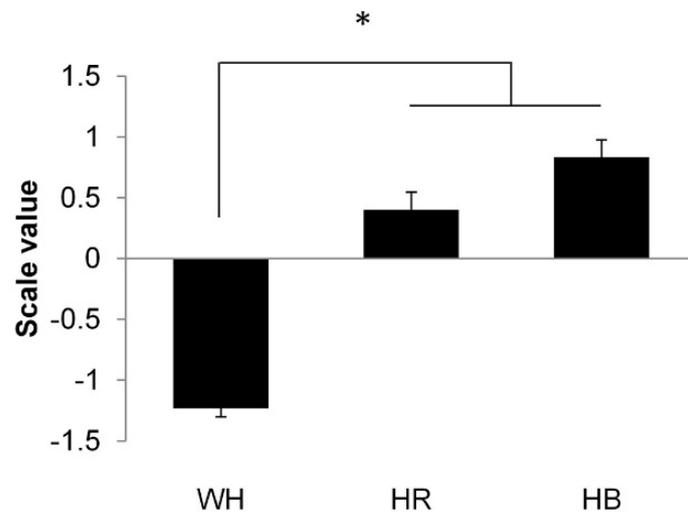
5.3.5 実験7：一般的な環境での使用感の評価実験

(a) 方法

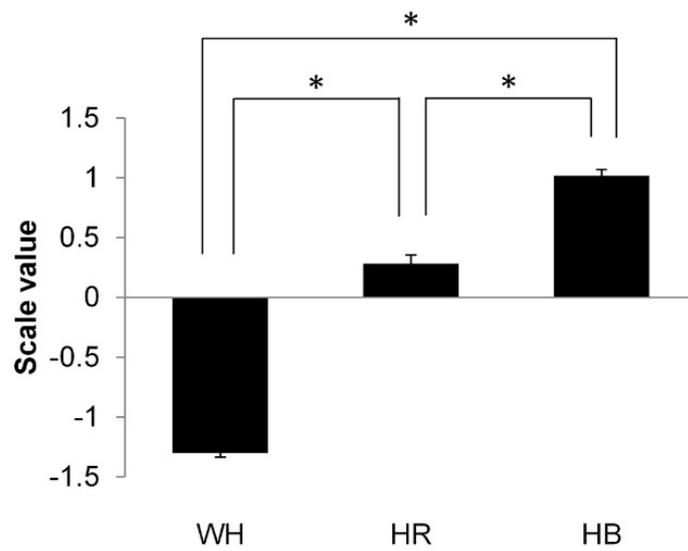
この方法は、実験に使用した画像の数を除いて、一般に実験3と同じであった。実験3で使用した60枚の画像から、色の印象の注釈が付いた20枚の写真を任意に選択した。一対比較には Scheffe の一対比較法（中屋の変法 [40]）を用いた。比較項目は、WH, HR, および HB の補助手段とし、使用感を評価した。

(b) 結果

図28に結果を示す。ヤードスティックは S1 で 0.51, S2 で 0.19 であり、5%水準で有意差があった。これらの結果は、HB の使用感の評価が、実験3で最高の評価を示した HR と少なくとも同等であることを明確に示唆している（図21(a)参照）。



(a) S1



(b) S2

図 28. 一般的な環境での使用感の評価実験の結果. Error bar shows SE, * $p < .05$.

5.1 考察

ここでは、正式な主観評価結果の代わりに、実際に本ツールを使用したユーザーからの非公式のコメントをいくつか紹介する。その理由は、プライバシーを保護する必要があるため、十分な数の2色覚被験者を収集することは困難であり、通常のスケールで調整された主観評価実験を実行することは非常に難しいからである。まず、2色覚者の最も驚くべき効果の1つは、被験者が、数か月間訓練した後、本稿で提案した補助ツールを使用しなくても3色覚の色の印象を想像できるようになったということである。これは、本稿の仮説、つまり2色覚者が、トレーニングの後、元の画像と変換された画像のペアから赤-緑と黄-青の反対色の正しい知覚を生成できることを示唆している。2つ目に、色相ブレンド法を初めて使用した全ての2色覚者（10名）は、R-Gの反対色を知覚することの明確な効果についてとても驚いていた。色相ブレンド法は一般的な2色覚者に使いやすく、その効果は顕著であることが示唆された。また、異常3色覚である40代の絵を描くことが趣味の被験者は、「もともと赤と緑は区別することはできるが、このツールを使うことで家族と私の色の知覚における長年の違い（反対色の第1軸が異なること）を初めて理解することができた」とコメントした。異常3色覚でも、Y-B軸が第1軸の反対色を持つ場合は本ツールが有効であることが示唆された。最後に、簡易2色覚シミュレーションの結果は、使用の最初の段階では2色覚者のいずれも原画像とシミュレーション画像を識別できなかったため、この手法が効果的だったことを示している。

さらに、3色覚者と2色覚者間の相互通信に関して、本提案ツールは赤緑色覚異常の子供を持つ母親にとっても非常に効果的である。1人の母親からは、「まれに子供の応答に違和感を感じていたが、このツールを使用すると、その理由を明確に理解できるようになった」とコメントをいただいた。

プロトタイプは、iPad (iOS8.1)、iPad mini (iOS8.0.2)、iPhone5 (iOS8.1.2)、iPhone6 (iOS10.2.1) および Android OS で製品を確認した（図 29 参照）。研究ではなく開発に関係する主要な課題は、スマートフォンの互換性の問題である。本プロト

タイプを開発した当時、カメラやディスプレイの周辺 API はまだ完全に標準化されておらず、OS がバージョンアップされる度に本ソフトウェアが動作しなくなることも多々あった。そのため、本ツールを多くの種類のスマートフォンに移行するには労力が必要である。



図 29. 提案する支援ツールのプロトタイプ
(この写真は掲載誌の表紙に採用された[41]) .

5.1 むすび

近年，色を用いた情報伝達の機会は飛躍的に増えたため，3色覚者と2色覚者の相互理解は今や必要不可欠である．2色覚者用の既存の補助ツールは色の区別のみを提供するため，色の印象（彩度，コントラストなど）をサポートできていない．提案手法は，彩度を維持しながら，3色覚の反対色（ここでは赤・緑と黄・青）を理解するのに役立つ．

本章では，第5章で述べた90度色相回転法を一般向けに改良した色相ブレンド法について，その理論と検証実験について詳細を述べた．90度色相回転法では，2色覚者が混同しやすいR-G以外の色も変換される．よってR-G成分のみを色変換することの有効性について検討し，色相回転後に色相のブレンドを行い，色相回転を元に戻すという方法によりR-G成分のみを色変換する色相ブレンド法を考案した．プロトタイプソフトウェアは，ビデオレートが15fps以上の複数のオペレーティングシステムでスムーズに実行され，色相ブレンド法と2色覚シミュレーションを同時に操作できる．主観評価実験では，HRとHBの2つのアルゴリズムが3色覚者と2色覚者の相互理解に大いに役立つことを示唆した．

第7章

結論

視覚は人間にとって非常に重要な感覚である。視覚情報には「百聞は一見に如かず」という諺にもあるように言語化できない情報が数多く含まれており、色彩感覚はその最たるものである。近年の色関連デバイス技術、カラーマネジメント技術、そして、情報通信技術の革新に伴い、色彩情報をいとも簡単に交換可能なスマートフォンやタブレットなどのモバイル端末が個人間に急速に普及した。このように、色を用いた情報伝達機会が飛躍的に増えているのは色彩情報の重要性の証である。色を用いた情報伝達機会の増加は、とりもなおさず、従来は目立たなかった「色覚の個人差の影響」が、人々の中の情報相互理解に重大な悪影響を与える可能性があること示唆する。

したがって、色知覚の違いについての正しい認識と適切な配慮が必要である。まず、前者については、色知覚の個人差の研究には長い歴史があるが、最近の遺伝子レベルの研究によると、2色覚や3色覚といった従来の色覚の明確な区別とは異なり、変化が連続的であるとの見方が有力である。また、後者については、反対色の第1軸がR-Gである3色覚と、反対色の第1軸がY-Bである2色覚では見え方が明確に異なることに留意する必要がある。従来から2色覚への色覚補助法は数多く検討されているが、色弁別を目的としたものが多く、3色覚のR-G反対色の感覚を2色覚が理解でき

るような補助機能は見当たらなかった。

そこで、本論文は、まず、色覚の個人差について多次元尺度構成法（MDS）を用いて調査し、色覚の個人差が遺伝子レベルのみならず知覚的にも連続であること示した。つぎに、色覚の異なる人々がお互いの色の見え方を理解するための2種類の新しい色覚支援コミュニケーション手法（色相回転法および色相ブレンド法と命名）を提案し、複数の携帯端末に対して実用的な実装が可能であることを示した。

本稿は7章で構成されており、第1章では、まず、色を用いたコミュニケーションの重要性が増大している事実と、色覚の多様性について色覚の仕組みや分類などを含めた基本的な事柄を説明し、色覚の異なる人同士（主に2色覚者と3色覚者）による色を使用したコミュニケーションが難しいという現状を述べた。つぎに、それらをサポートする既存の技術を紹介し、現状の問題点や課題を議論した。そして、その問題点や課題を解決し、色覚の異なる人々がお互いの色の見え方を理解することのできる、新しい色覚支援コミュニケーションツールについて検討した内容を述べた。

第2章では、第1章で述べた色覚の多様性について、多次元尺度構成法（MDS）を用いて個人の色空間とその個人差を調査した内容を述べた。色覚の個人差の研究には長い歴史があるが、最近の遺伝子レベルの研究によると、2色覚や3色覚といった従来の色覚の明確な区別とは異なり、変化が連続的であるとの見方が有力である。そこで、色覚の個人差が遺伝子レベルのみならず知覚的にも連続であるのではないかとの仮説を立て調査を実施した。調査の結果、(1) 色名（言語）による色空間の配置は色覚とは無関係に概ね色相環状の円形の結果が得られたが、一方で、(2) 色票に基づく色空間の配置は、2色覚者では凹形状になり、その形状から3色覚者の楕円形へと滑らかに変化した結果を得た。また、仮説として色覚の進化と出生後の発達の類似性について考察した。

第3章では、第2章で調査した結果と仮説検証により、3色覚者は2色性を内在しているという新たな仮説を立て検証した内容を述べた。その結果、3色覚者に(1) R-G成分を除去した呈示刺激を使用した場合の色空間の配置は、2色覚者と同様の凹形状

となり仮説を裏付ける結果が得られ、(2) Y-B 成分を除去した呈示刺激を使用した場合の色空間の配置は、第 2 軸が輝度と解釈可能な楕円形状の結果が得られた。

第 4 章では、第 1 章で検討した色覚の異なる 2 色覚者と 3 色覚者がお互いの色の見え方を理解可能な、新しい色覚支援コミュニケーションツールの提案について概要を説明した。主にツールの特徴やコンセプトなどについて述べた。まず、2 色覚者向けに考案した 2 つの色覚補助法（90 度色相回転法、色相ブレンド法と命名）の概要と、オリジナル画像と変換画像を交互に表示することで 3 色性の感覚を実現させた手法について説明し、つぎに、それらの手法を携帯端末環境での軽量なリアルタイムビデオ処理にて実現可能であること、3 色覚者向けの簡易な 2 色覚シミュレーション手法、およびそれらの動作モードについて述べた。

第 5 章では、第 4 章で述べた 2 色覚者向けに考案した基本的な手法の 90 度色相回転法について、その理論と検証実験について詳細を述べた。2 色覚者は、黄と青は 3 色覚者と同じ感覚を持つが、赤と緑を混同しやすいという特徴を持つ。したがって、色相を 90 度色相回転することで赤を同じ暖色系の黄へ、緑を寒色系の青へ変換することで 3 色覚の感覚へ近づけた。検証実験では、R-G カラー分類実験、混同しやすい色の分類実験、および一般的な環境での使用感の評価実験の 3 つの実験を行い検証した。何れの実験結果も既存技術に比べて有意に良好な結果を得ることができた。

第 6 章では、第 5 章で述べた 90 度色相回転法を一般向けに改良した色相ブレンド法について、その理論と検証実験について詳細を述べた。90 度色相回転法では、2 色覚者が混同しやすい R-G 以外の色も変換される。よって R-G 成分のみを色変換することの有効性について検討し、色相回転後に色相のブレンドを行い、色相回転を元に戻すという方法により R-G 成分のみを色変換する色相ブレンド法を考案した。検証実験では、90 度色相回転法の検証実験と同様の R-G カラー分類実験、混同しやすい色の分類実験、および一般的な環境での使用感の評価実験の 3 つの実験を行い検証した。何れの実験結果も既存技術に比べて有意に良好な結果を得ることができた。

謝辞

本研究を進めるにあたり，貴重な研究の環境と機会を与え頂き，また親身な対応と熱心なご指導を頂いた，大塚作一教授に深く感謝の意を表します．また，実験やデータ解析を始めとして様々な場面でご助言をいただいた産業技術総合研究所 主任研究員 木原健博士および，本論文をまとめるにあたり，ご指導やご審査，および適切なご助言をいただきました淵田孝康准教授と小野智司准教授に心から感謝いたします．さらに，研究の機会を与えていただいた元理工学研究科技術部長（元理工学研究科長）福井泰好名誉教授，共同研究でご助言をいただいた宇都宮大学大学院工学研究科長 阿山みよし教授，提案手法についてご助言をいただいた NPO 法人カラーユニバーサルデザイン機構 伊賀公一副理事長，実験装置の作成にご協力していただいた鹿児島大学大学院理工学研究科技術部 松元明子技術班長に深くお礼を申し上げます．また，個人情報保護の観点から匿名になりますが，実験を進めるに当たって長時間にもわたり実験にご協力していただいた被験者の皆様に心から感謝いたします．

最後に，同じ研究室の仲間として切磋琢磨した鹿児島工業高等専門学校一般教育科 アニス・ウル・レーマン講師，卒業生の中道真奈様，唐鎌雄貴様，宇都龍介様，迫あすか様を始めとした大塚研究室の皆様，共同研究でお世話になった宇都宮大学工学研究科 石川智治准教授，大古場稔様，金成宏太様，福田輝様，および研究だけではなく様々な面で支えていただいた，前理工学研究科技術部長（前理工学研究科長）近藤英二教授，現技術部長（現研究科長）本間俊雄教授，ならびに技術部の皆様に心から感謝いたします．本当にありがとうございました．

参考文献

- [1] 公益財団法人日本眼科学会, “先天性色覚異常,” http://www.nichigan.or.jp/public/disease/hoka_senten.jsp (2018年11月閲覧).
- [2] N. Ohta and A. R. Robertson, “Colorimetry: Fundamentals and applications,” John Wiley & Sons Inc., Chichester, England (2005).
- [3] カラーユニバーサルデザイン機構 (CUDO), “カラーユニバーサルデザイン,” ハート出版 (2009).
- [4] S. Hira et al., “Individual differences in chromatic perception: continuous variation from dichromacy to trichromacy,” Proceedings of the International Display Workshops 24, 992-995 (2017).
- [5] <http://www.variantor.com/eaga/>, (2018年11月閲覧).
- [6] <http://asada.tukusi.ne.jp/chromaticglass/e/index.html>, (2018年11月閲覧).
- [7] 浅田一憲, “色覚異常者の QOL(Quality of Life)を向上させる色覚ツール,” 慶應義塾大学メディアデザイン研究科, 博士論文 (2011). (http://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002010-3436&ml_lang=en, 2018年11月閲覧).
- [8] <http://www.daltonize.org/>, retrieved September 11, 2018.
- [9] H. Kotera, “Optimal daltonization by spectral shift for dichromatic vision,” Color and Imaging Conference 20, 8-13 (2012).
- [10] S. Ohtsuka et al., “Artificial hue adaptation: Novel technique to help easy color discrimination for dichromatic vision preserving color saturation,” Proceedings of the International Display Workshops 17, 359-362 (2010).
- [11] P. Hung and N. Hiramatsu, “A colour conversion method which allows colourblind and normal-vision people share documents with colour content,” 27th Session of the CIE, 229-239 (2011).

- [12] Shoko Hira, Akiko Matsumoto, Ken Kihara, Sakuichi Ohtsuka and Koichi Iga: “Hue-Blending Method: Improved Red-Green Color Segregation Capability for Dichromacy Support”, SID Symposium Digest of Technical Papers, 44, 1, pp.1089-1092 (May 2013).
- [13] Yi-Chun Chen, Yunge Guan, Tomoharu Ishikawa, Hiroaki Eto, Takehiro Nakatsue, Jinhui Chao and Miyoshi Ayama: “Preference for Color-Enhanced Images Assessed by Color Deficiencies”, COLOR research and application, 39, 3, pp.234-251 (2014).
- [14] Roger N. Shepard and Lynn A. Cooper: “Representation of Colors in the Blind, Color-Blind, and Normally Sighted”, Psychological Science, 3, 2, pp.97-104 (1992).
- [15] Myron Wish and J. Douglas Carroll: “Applications of individual differences scaling to studies of human perception and judgment”, In E. C. Carterette & M. P. Friedman (Eds.), Handbook of Perception 2, Chapter 13, pp.449-491, Academic Press (1974).
- [16] 奥寺沙, 佐川賢: “全盲視覚障害者の色彩心理構造: 全盲視覚障害者に衣服の色を伝えるために”, 日本女子大学紀要 家政学部, 61, 81, pp.81-90 (2014)
- [17] Saori Okudera, Ken Sagawa, Yuko Nakajima, Natsumi Ohba and Shoko Ashizawa: “Psychological Hue Circle of Blind People and Development of a Tactile Color Tag for Clothes”, Midterm Meeting of the International Colour Association (Proceedings of AIC2015), PS1-64, p.761-766 (May 2015).
- [18] Shoko Hira, Mana Nakamichi, Kota Kanari, Yuki Karakama, Hikaru Fukuda, Miyoshi Ayama and Sakuichi Ohtsuka: “Individual differences in chromatic perception: continuous variation from dichromacy to trichromacy”, Proceedings of the International Display Workshops, 24, pp.992-995 (2017).
- [19] Alison K. Surridge, Daniel Osorio and Nicholas I. Mundy: “(Review)

- Evolution and selection of trichromatic vision in primates”, *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 4, pp.198-205 (2003).
- [20] Livia S. Carvalho, Daniel M. A. Pessoa, Jessica K. Mountford, Wayne I. L. Davies and David M. Hunt: “(Review) The Genetic and Evolutionary Drives behind Primate Color Vision”, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 34, pp.1-12 (2017)
- [21] Richard L. Gregory: “Eye and Brain, 5th Edition”, Oxford University Press Inc., New York, US (1998).
- [22] Susan Nolen-Hoeksema, Barbara L. Fredrickson, Geoffrey R. Loftus and Christel Lutz: “Atkinson & Hilgard's introduction to psychology, 16th Edition”, Cengage Learning EMEA, Hampshire, UK (2014).
- [23] Atsuko Saito, Akichika Mikami, Shoji Kawamura, Yoshikazu Ueno, Chihiro Hiramatsu, Kanthi A. Widayati, Bambang Suryobroto, Migaku Teramoto, Yusuke Mori, Kunitoshi Nagano, Kazuo Fujita, Hika Kuroshima and Toshikazu Hasegawa: “Advantage of Dichromats over Trichromats in Discrimination of Color-camouflaged Stimuli in Nonhuman Primates”, *American Journal of Primatology*, 67, 4, pp.425-436 (2005).
- [24] Atsuko Saito, Akichika Mikami, Takayuki Hosokawa and Toshikazu Hasegawa: “Advantage of Dichromats over Trichromats in Discrimination of Color-camouflaged Stimuli in Humans”, *Perceptual and Motor Skills*, 102, 1, pp.3-12 (2006).
- [25] Russell D. Hamer, Kenneth R. Alexander and Davida Y. Teller: “Rayleigh Discriminations in Young Human Infants”, *Vision Research*, 22, 5, pp.575-587 (1982).
- [26] Angela M. Brown, Davida Y. Teller: “Chromatic Opponency in 3-month-old Human Infants”, *Vision Research*, 29, 1, pp.37-45 (1989).

- [27] Michele E. Mercer, Mary L. Courage and Russell J. Adams: “Contrast/color Card Procedure: A New Test of Young Infants’ Color Vision”, *Optometry & Vision Science*, 68, 7, pp.522-532 (1991).
- [28] Michele E. Mercer, Suzanne C. Drodge, Mary L. Courage and Russell J. Adams: “A Pseudoisochromatic Test of Color Vision for Human Infants”, *Vision Research*, 100, pp.72-77 (2014).
- [29] Hirohisa Yaguchi, Atsuo Kawada, Satoshi Shioiri and Yoichi Miyake: “Individual Differences of the Contribution of Chromatic Channels to Brightness”, *Journal of the Optical Society of America A*, 10, 6, pp.1373-1379 (1993).
- [30] Kruskal’s Non-metric Multidimensional Scaling: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf>, p.2081, retrieved September 14, 2018.
- [31] <https://www.vector.co.jp/soft/win95/art/se355617.html>, CCConv カラーコード・コンバーター (2018年12月閲覧).
- [32] S. Ohtsuka et al., “Novel Real-Time and Bi-directional Color Simulator for Dichromacy and Trichromacy on Smartphones,” *SID Symposium Digest* 43, No. 1, 729-732 (2012).
- [33] S. Hira et al., “Hue-Blending Method: Improved Red-Green Color Segregation Capability for Dichromacy Support,” *SID Symposium Digest* 44, No. 1, 1089-1092 (2013).
- [34] R. W. G. Hunt, “The reproduction of color, sixth edition,” John Wiley & Sons Inc., Chichester, England (2004).
- [35] ITU 2011, Recommendation ITU-R BT.601-7: Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide screen 16:9 aspect ratios. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!

- !PDF-E.pdf, retrieved November 17, 2018.
- [36] https://www.eizoglobal.com/products/coloredge/unicolor_pro/index.html,
retrieved September 11, 2018.
- [37] A. M. da Silva et al., “Photosensitivity and epilepsy: Current concepts and perspectives - A narrative review,” *Seizure*, 50, 209–218 (2017).
- [38] S. Ishihara, “Ishihara test chart book,” Handaya, Tokyo, Japan (2005).
- [39] <http://www.jcri.jp/JCRI/seihin/IROMIHON/confused-color/cfsc-1.htm>, (2018
年 11 月 閲覧).
- [40] 中屋澄子: “Scheffé の一対比較法の一変法,” 第 11 回日本科学技術連盟官能検査大会報文集, pp. 1-12 (1970) .
- [41] Shoko Hira, Akiko Matsumoto, Ken Kihara, Sakuichi Ohtsuka, Hue rotation (HR) and hue blending (HB): Real - time image enhancement methods for digital component video signals to support red - green color - defective observers, *The Journal of the Society for Information Display (JSID)*, Vol. 27, Issue 7, pp. 409-426(2019) DOI: 10.1002/jsid.758.

研究業績

論文誌

- [1] Shoko Hira, Akiko Matsumoto, Ken Kihara, Sakuichi Ohtsuka, Hue rotation (HR) and hue blending (HB): Real - time image enhancement methods for digital component video signals to support red - green color - defective observers, The Journal of the Society for Information Display (JSID), Vol. 27, Issue 7, pp. 409-426(2019) DOI: 10.1002/jsid.758.

国際会議（査読付き）

- [1] Shyoko Hira, Akiko Matsumoto, Ken Kihara, Sakuichi Ohtsuka, Koichi Iga, Hue-Blending Method: Improved Red-Green Color Segregation Capability for Dichromacy Support, The Proceedings of the Society for Information Display (SID) International Symposium Digest of Technical Papers, pp.1089-1092 (2013) DOI: 10.1002/j.2168-0159.2013.tb06414.x.
- [2] Shoko Hira, Mana Nakamichi, Kota Kanari, Yuki Karakama, Hikaru Fukuda, Miyoshi Ayama, Sakuichi Ohtsuka, Individual Differences in Chromatic Perception: Continuous Variation from Dichromacy to Trichromacy, The Proceedings of the International Display Workshops, Vol. 24 (VHF3-3), pp. 992-995(2017).
- [3] Shoko Hira, Asuka Sako, Ryusuke Uto, Kota Kanari, Minoru Ohkoba, Tomoharu Ishikawa, Miyoshi Ayama, Sakuichi Ohtsuka, Immanent Dichromatic in Trichromatic Observer: Based on MDS Analyses of R-G Neutral- and Y-B Only Changed-Stimuli Observation Results, The Proceedings of the International Display Workshops, Vol. 26 (VHF5-3) , pp. 1155-1158(2019).

国内研究会

- [1] 比良祥子, 木原健, 大塚作一, 携帯型 2 色覚・3 色覚双方向リアルタイム色覚シミュレータ, 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, 第 4 部門 [テーマ講演] 携帯情報端末・スマートフォン応用, 4-3(2012).
- [2] 比良 祥子, 中道 真奈, 金成 宏太, 唐鎌 雄貴, 福田 輝, 阿山 みよし, 大塚作一, MDS に基づく色対比知覚の個人差の検討: 2 色覚から 3 色覚への連続的变化, 映像情報メディア学会技術報告 ITE technical report, 2018, 42(34), 27-31(2018).

科学研究費助成

- [1] 平成 26 年度科学研究費補助金 (奨励研究), 2 色覚者補助を目的とした環境に依存する色知覚変動に関する補正手法の研究, 26919013.
- [2] 平成 28 年度科学研究費補助金 (奨励研究), 2 色覚者補助を目的としたスマートグラス向け色覚補助ソフトウェアの開発, 16H00390.
- [3] 平成 31 年度科学研究費補助金 (奨励研究), 個人の色空間把握を目的とした多次元尺度構成法を用いた色知覚分析ツールの開発, 19H00501.

その他

- [1] Shoko Hira, Akiko Matsumoto, Ken Kihara, Sakuichi Ohtsuka, Cover Image, The Journal of the Society for Information Display (JSID), Vol. 27, Issue 7 (2019) DOI: 10.1002/jsid.830.

付録 A

表 A1. 第 2 章における全被験者（24 名）の結果

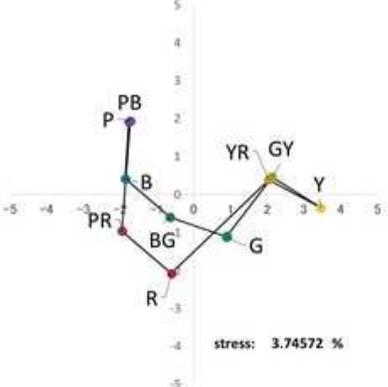
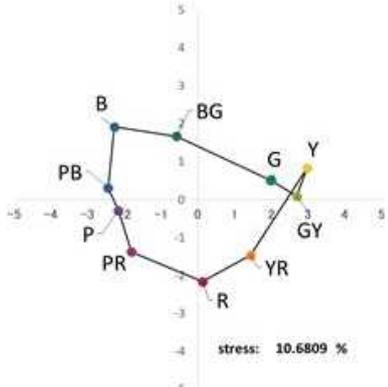
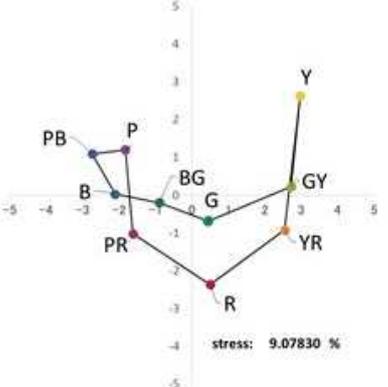
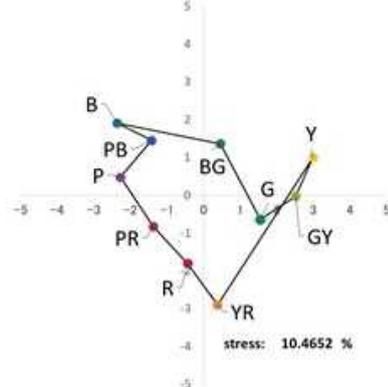
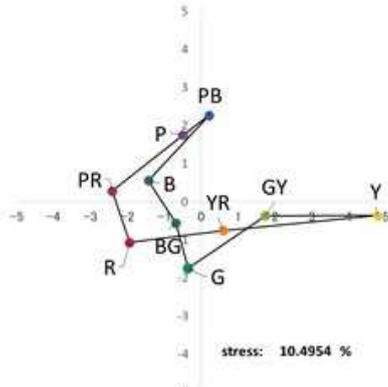
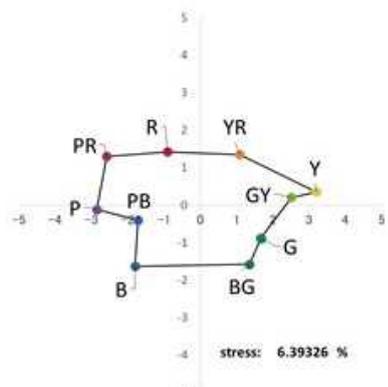
被験者	色票	色名
<p style="text-align: center;">S1 (P型2色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 3.74572 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 10.6809 %</p>
<p style="text-align: center;">S2 (P型2色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 9.07830 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 10.4652 %</p>
<p style="text-align: center;">S3 (P型2色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 10.4954 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.39326 %</p>

表 A1. 第 2 章における全被験者 (24 名) の結果 (続き)

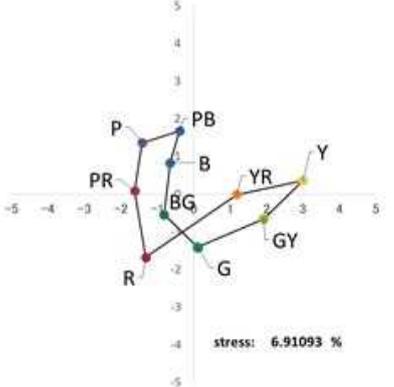
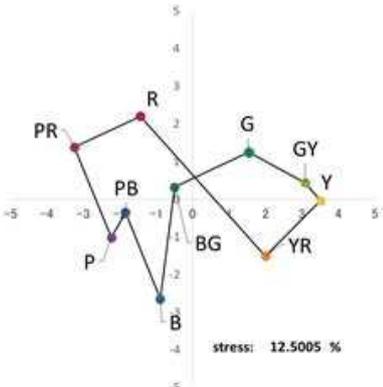
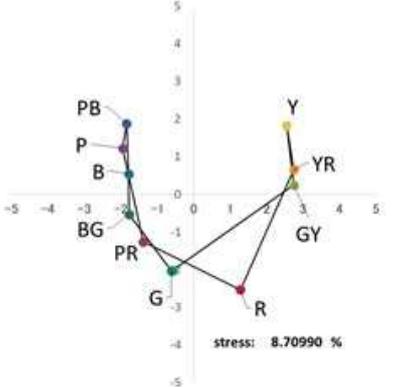
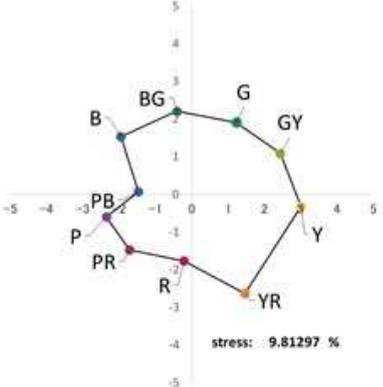
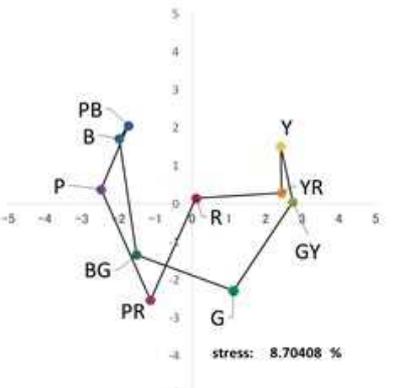
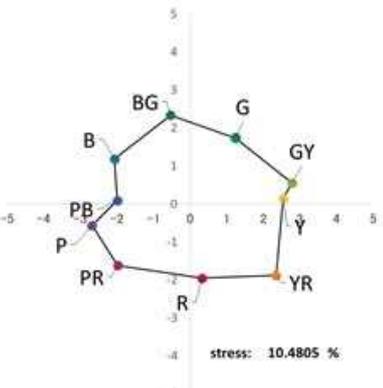
被験者	色票	色名
<p style="text-align: center;">S4 (P型2色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.91093 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 12.5005 %</p>
<p style="text-align: center;">S5 (D型2色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 8.70990 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 9.81297 %</p>
<p style="text-align: center;">S6 (D型2色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 8.70408 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 10.4805 %</p>

表 A1. 第 2 章における全被験者 (24 名) の結果 (続き)

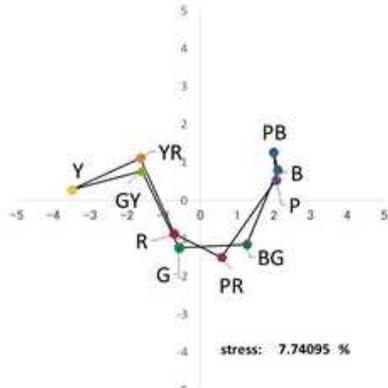
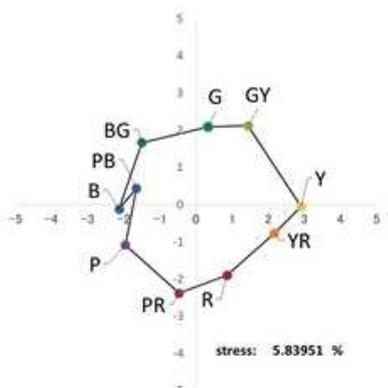
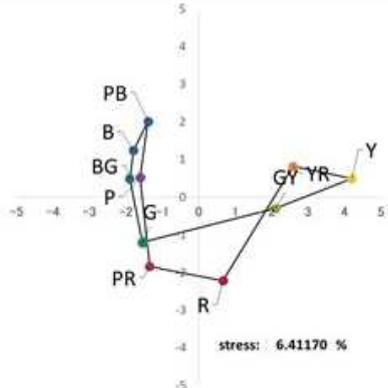
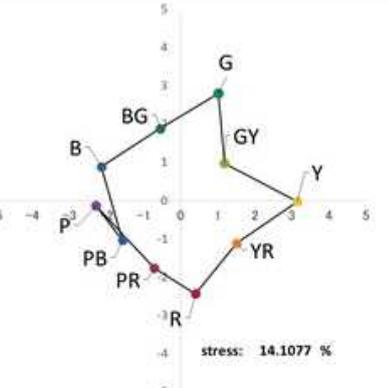
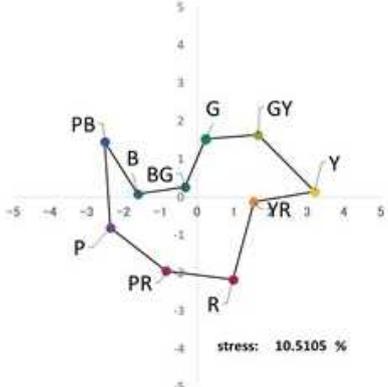
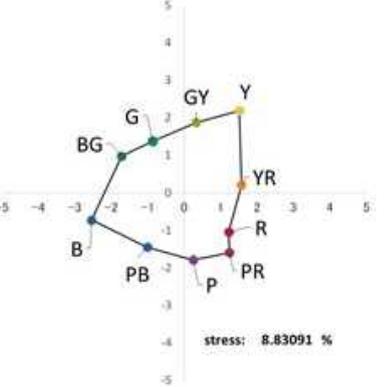
被験者	色票	色名
<p style="text-align: center;">S7 (D型2色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 7.74095 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 5.83951 %</p>
<p style="text-align: center;">S8 (D型2色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.41170 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 14.1077 %</p>
<p style="text-align: center;">S9 (P型3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 10.5105 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 8.83091 %</p>

表 A1. 第 2 章における全被験者 (24 名) の結果 (続き)

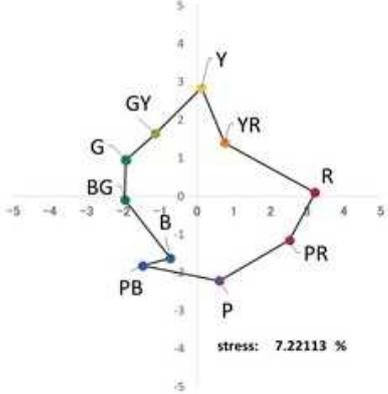
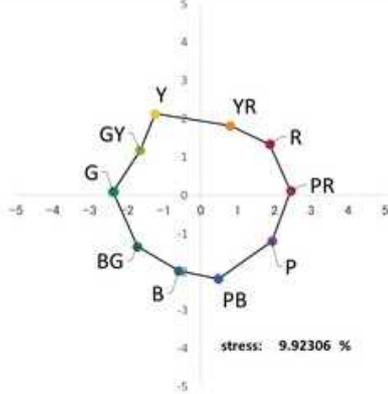
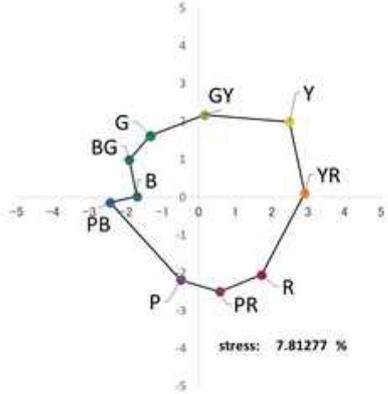
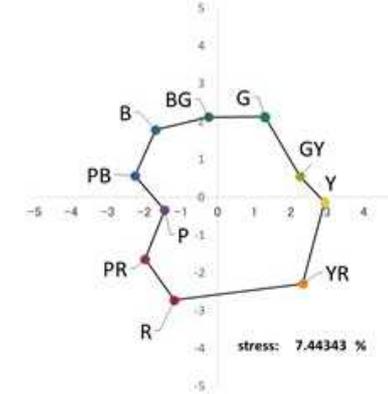
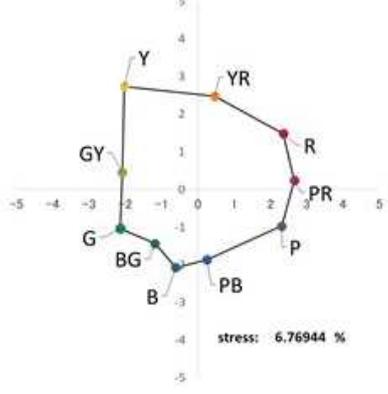
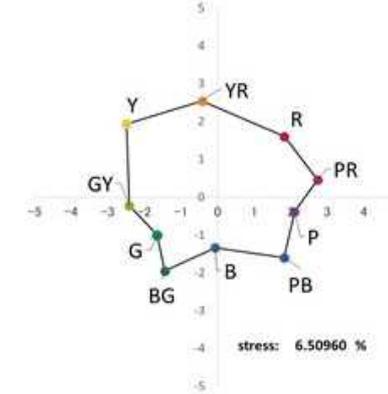
被験者	色票	色名
<p style="text-align: center;">S10 (D型3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 7.22113 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 9.92306 %</p>
<p style="text-align: center;">S11 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 7.81277 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 7.44343 %</p>
<p style="text-align: center;">S12 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.76944 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.50960 %</p>

表 A1. 第 2 章における全被験者（24 名）の結果（続き）

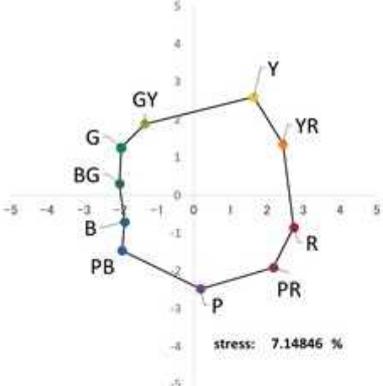
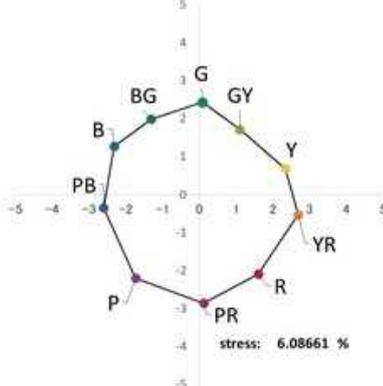
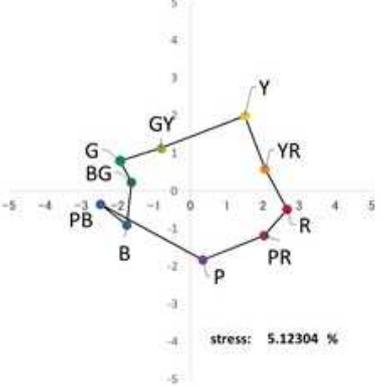
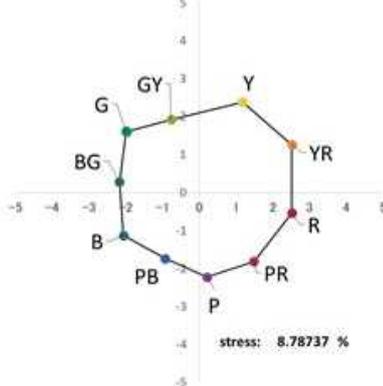
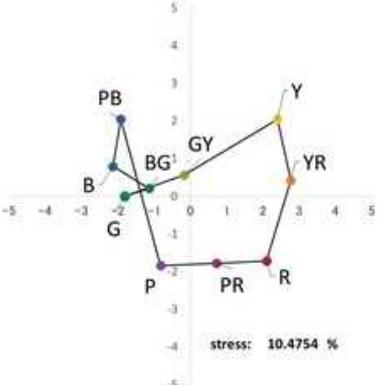
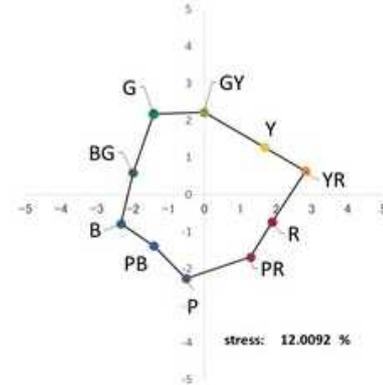
被験者	色票	色名
<p style="text-align: center;">S13 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 7.14846 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.08661 %</p>
<p style="text-align: center;">S14 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 5.12304 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 8.78737 %</p>
<p style="text-align: center;">S15 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 10.4754 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 12.0092 %</p>

表 A1. 第 2 章における全被験者 (24 名) の結果 (続き)

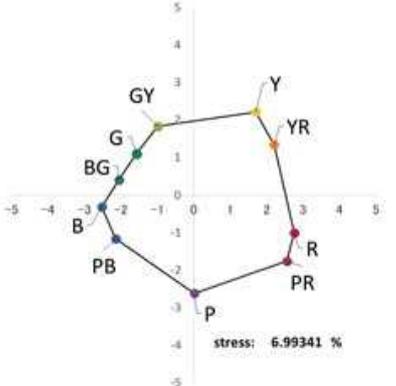
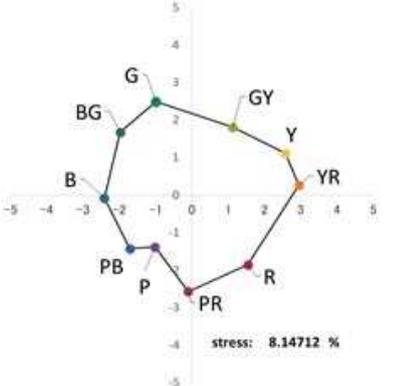
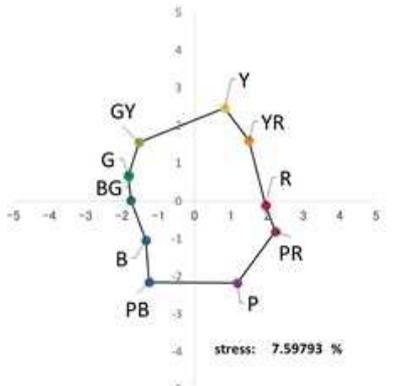
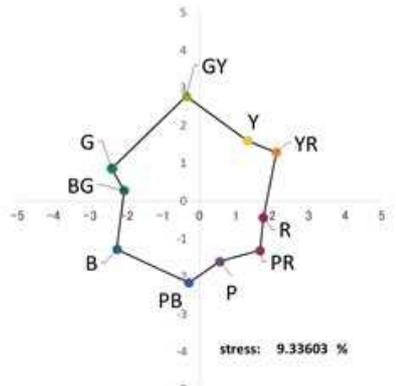
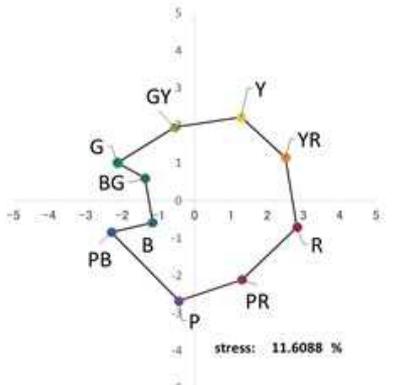
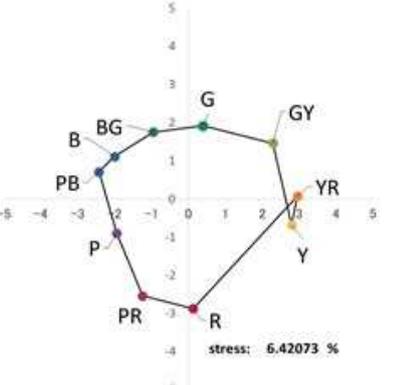
被験者	色票	色名
<p style="text-align: center;">S16 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.99341 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 8.14712 %</p>
<p style="text-align: center;">S17 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 7.59793 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 9.33603 %</p>
<p style="text-align: center;">S18 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 11.6088 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.42073 %</p>

表 A1. 第 2 章における全被験者 (24 名) の結果 (続き)

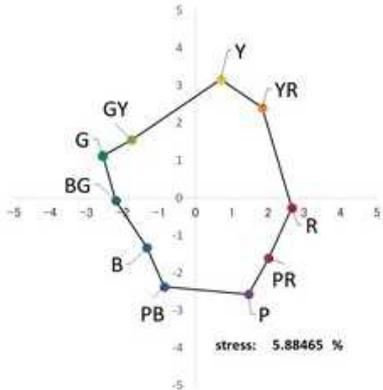
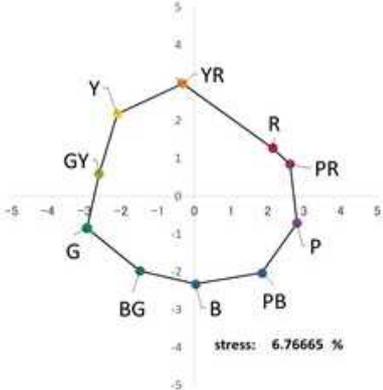
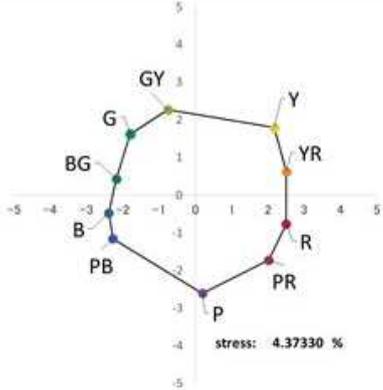
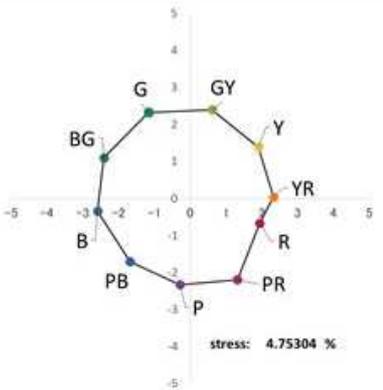
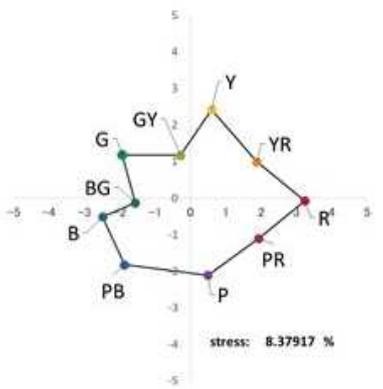
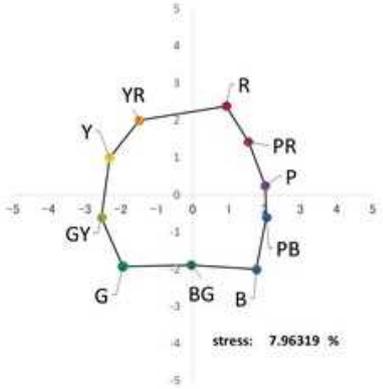
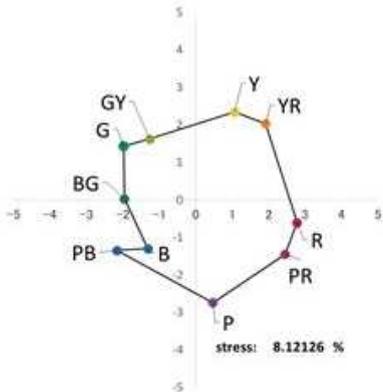
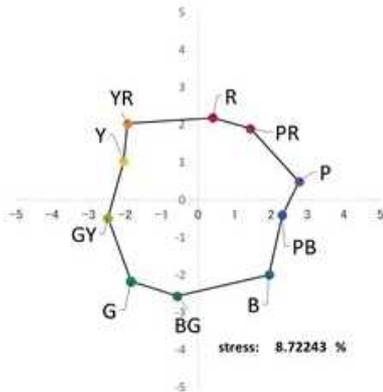
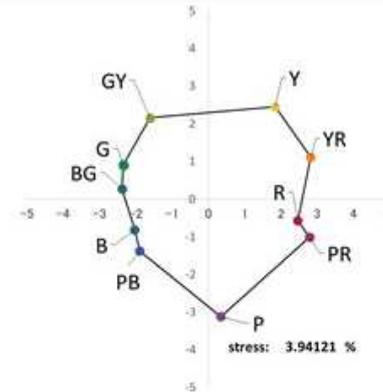
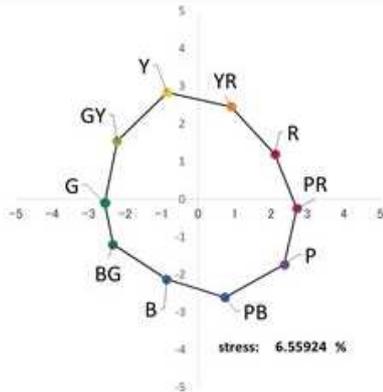
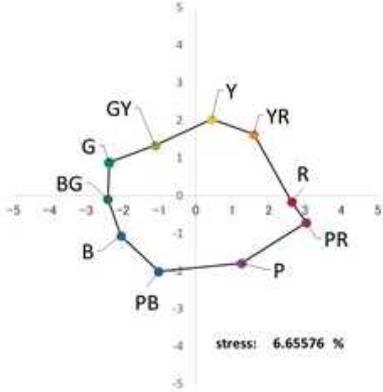
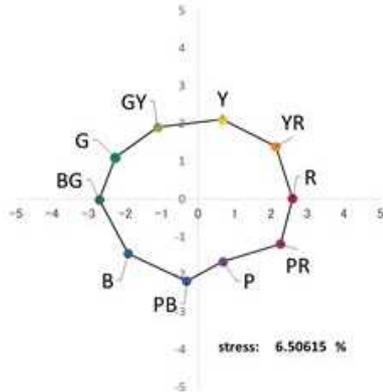
被験者	色票	色名
<p style="text-align: center;">S19 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 5.88465 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.76665 %</p>
<p style="text-align: center;">S20 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 4.37330 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 4.75304 %</p>
<p style="text-align: center;">S21 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 8.37917 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 7.96319 %</p>

表 A1. 第 2 章における全被験者 (24 名) の結果 (続き)

被験者	色票	色名
<p style="text-align: center;">S22 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 8.12126 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 8.72243 %</p>
<p style="text-align: center;">S23 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 3.94121 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.55924 %</p>
<p style="text-align: center;">S24 (3色覚)</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.65576 %</p>	 <p style="text-align: center;">stress: 6.50615 %</p>

付録 B

表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果

被験者: S1 色覚: 3色覚

色票	高彩度	中彩度
ディスプレイ	R-G成分除去(10色)	Y-B成分除去(10色)
	R-G成分除去(14色)	Y-B成分除去(14色)

表 B1. 第 3 章における全被験者 (12 名) の結果 (続き)

被験者: S2 色覚: 3色覚

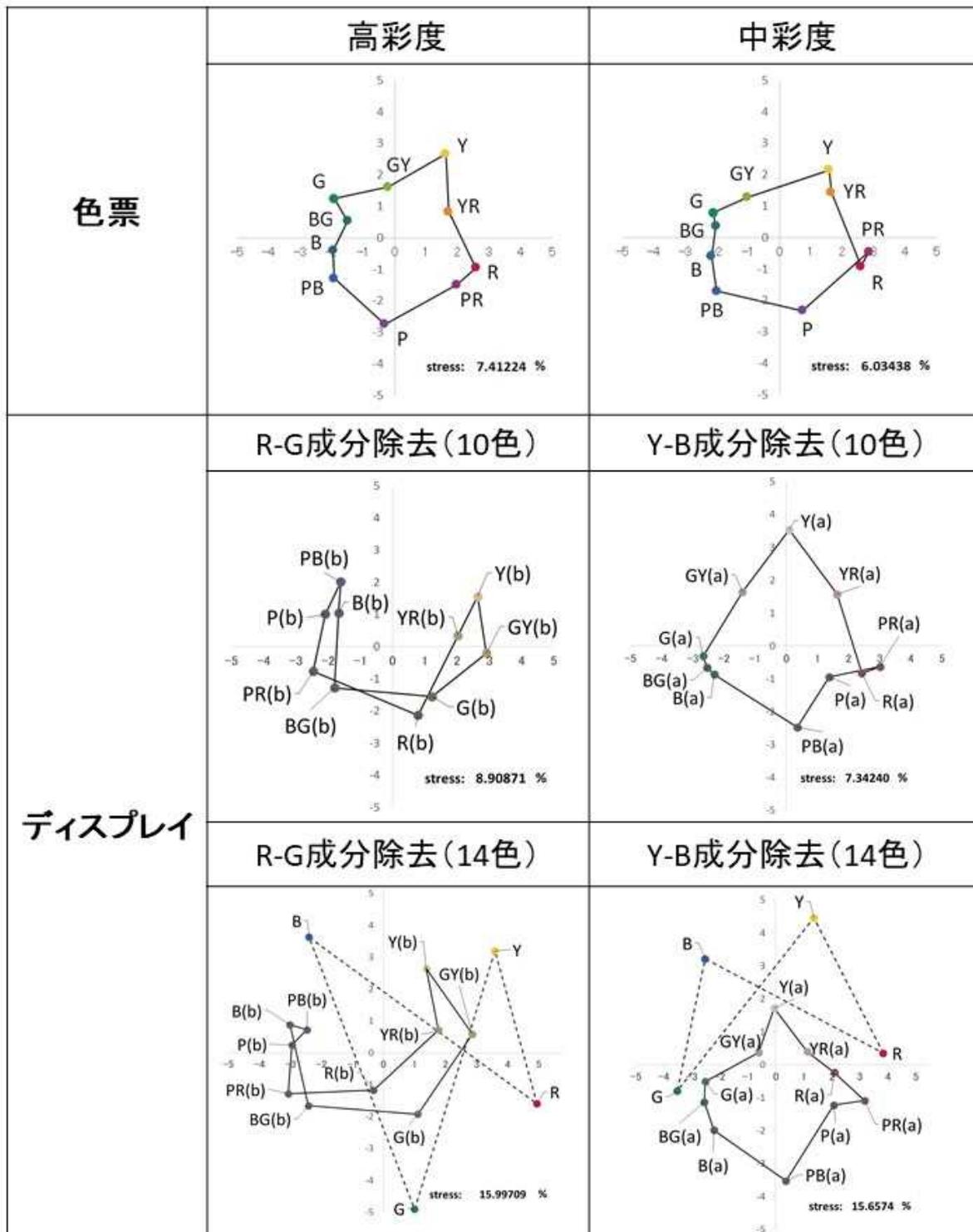


表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S3 色覚: 3色覚

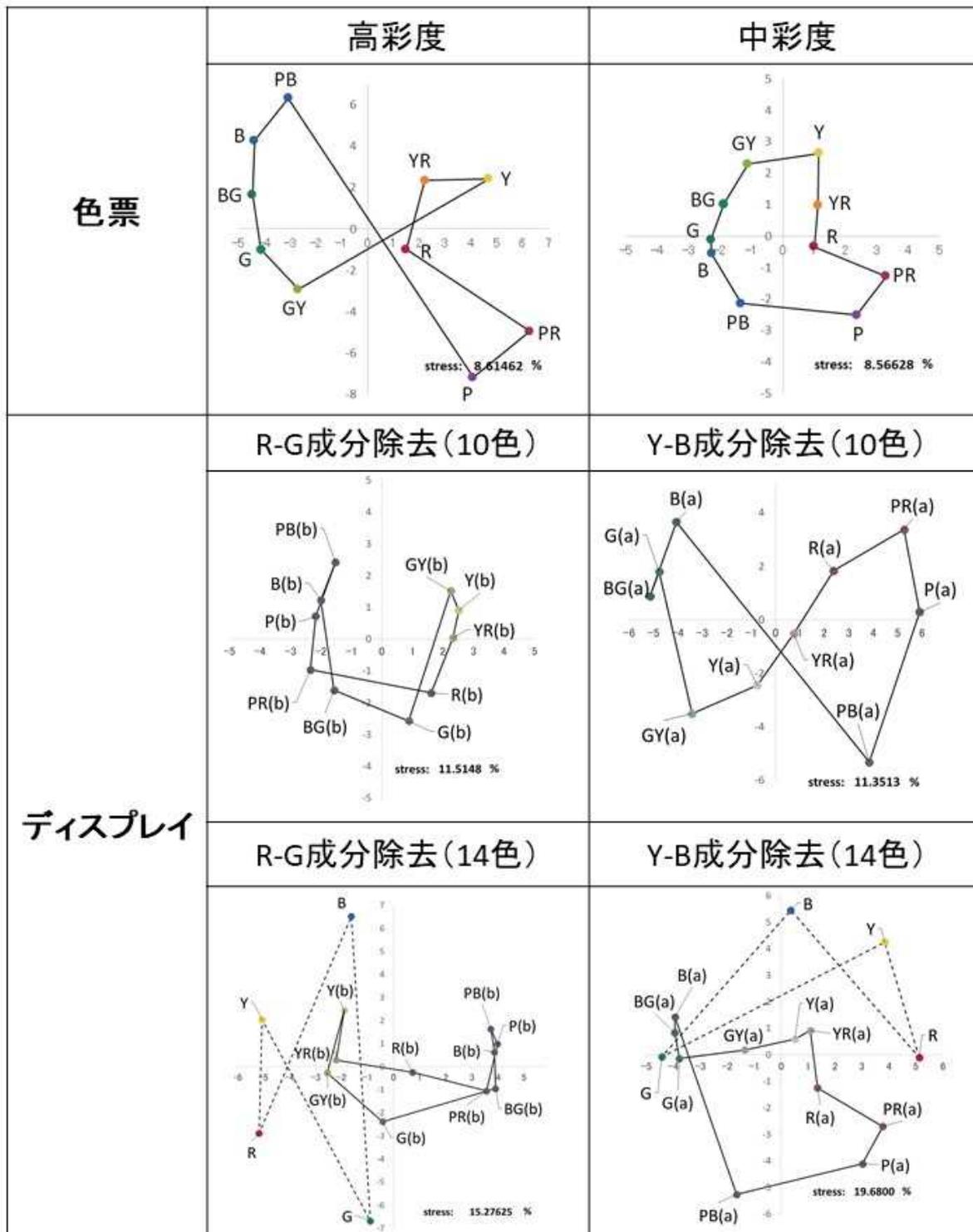


表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S4 色覚: 3色覚

色票	高彩度	中彩度
ディスプレイ	R-G成分除去(10色)	Y-B成分除去(10色)
	R-G成分除去(14色)	Y-B成分除去(14色)

表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S5 色覚: 3色覚

色票	高彩度	<p>stress: 7.54557 %</p>	中彩度	<p>stress: 4.06337 %</p>
	ディスプレイ	R-G成分除去(10色)	<p>stress: 5.38971 %</p>	Y-B成分除去(10色)
R-G成分除去(14色)		<p>stress: 11.83841 %</p>	Y-B成分除去(14色)	<p>stress: 12.5154 %</p>

表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S6 色覚: 3色覚

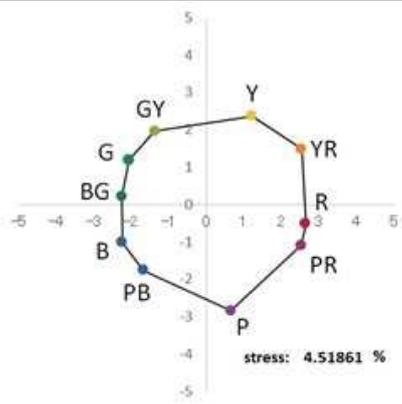
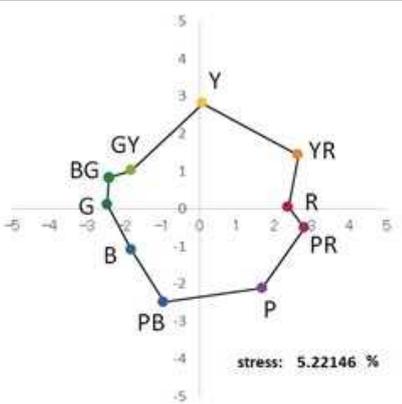
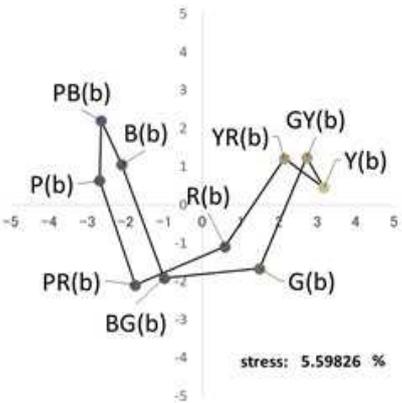
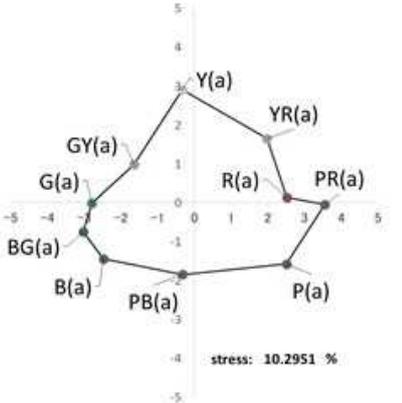
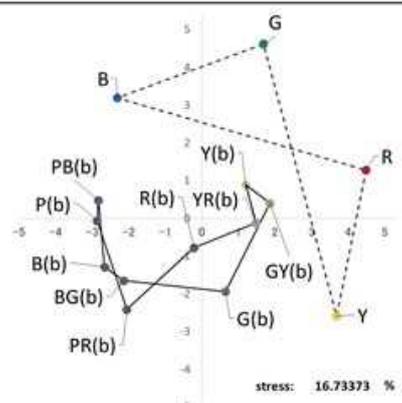
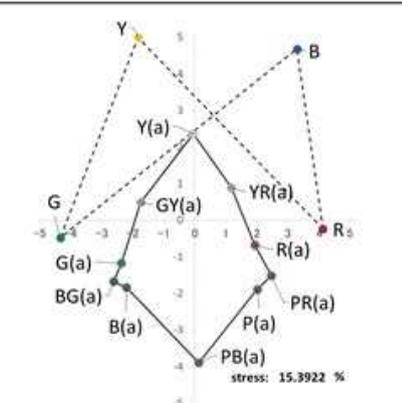
色票	高彩度	中彩度
		
ディスプレイ	R-G成分除去(10色)	Y-B成分除去(10色)
		
	R-G成分除去(14色)	Y-B成分除去(14色)
		

表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S7 色覚: 3色覚

色票	高彩度		中彩度		
	ディスプレイ	R-G成分除去(10色)		Y-B成分除去(10色)	
		R-G成分除去(14色)		Y-B成分除去(14色)	

表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S8 色覚: 3色覚

色票	高彩度	中彩度
ディスプレイ	R-G成分除去(10色)	Y-B成分除去(10色)
	R-G成分除去(14色)	Y-B成分除去(14色)

表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S9 色覚: 3色覚

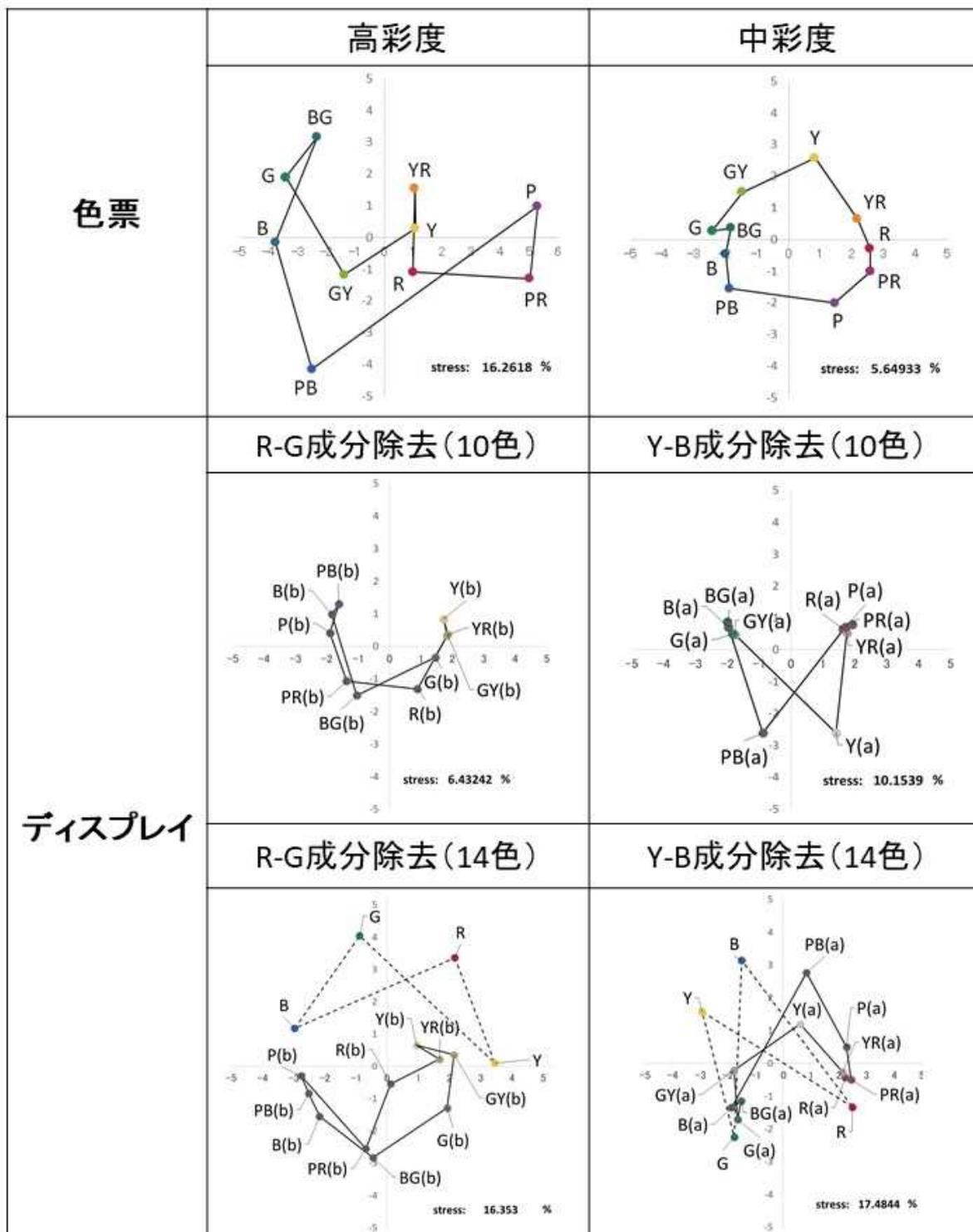


表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S10 色覚: 3色覚

色票	高彩度	中彩度
ディスプレイ	R-G成分除去(10色)	Y-B成分除去(10色)
	R-G成分除去(14色)	Y-B成分除去(14色)

表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S11 色覚: 3色覚

色票	高彩度	中彩度
	<p style="text-align: right;">stress: 7.21443 %</p>	<p style="text-align: right;">stress: 5.19827 %</p>
ディスプレイ	R-G成分除去(10色)	Y-B成分除去(10色)
	<p style="text-align: right;">stress: 6.20111 %</p>	<p style="text-align: right;">stress: 6.90835 %</p>
	R-G成分除去(14色)	Y-B成分除去(14色)
	<p style="text-align: right;">stress: 13.3143 %</p>	<p style="text-align: right;">stress: 13.1200 %</p>

表 B1. 第 3 章における全被験者（12 名）の結果（続き）

被験者: S12 色覚: 3色覚

色票	高彩度		中彩度		
	ディスプレイ	R-G成分除去(10色)		Y-B成分除去(10色)	
		R-G成分除去(14色)		Y-B成分除去(14色)	

表 B2. 第 3 章における色票 (RGB 値)

オリジナル(中彩度)

	R	G	B
赤	127	85	86
橙	189	149	124
黄	211	191	141
黄緑	154	162	112
緑	79	117	95
青緑	68	103	99
青	72	102	109
青紫	86	100	124
紫	111	90	102
赤紫	120	87	104

b*成分のみ

	R	G	B
赤	100	96	87
橙	167	156	121
黄	208	192	141
黄緑	170	157	113
緑	113	109	95
青緑	95	96	99
青	91	96	109
青紫	88	99	123
紫	87	95	112
赤紫	94	97	103

a*成分のみ

	R	G	B
赤	124	85	97
橙	180	151	159
黄	198	193	194
黄緑	140	163	158
緑	73	118	108
青緑	69	103	96
青	77	101	95
青紫	98	100	99
紫	108	90	95
赤紫	121	87	97