

名古屋市立大学 博士学位論文

2 色覚のためのコントラスト改善の
客観評価手法に関する研究

Study on Objective Evaluation Index of
Contrast Improvement for Dichromats

2023 年

程 溪

名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科

要旨

色は視覚情報において重要な要素である。色覚異常者は特定の色の違いを見分けにくく、画像の情報を十分に読み取れないことがある。本研究では、色覚異常の内、2色覚を扱う。近年、画像の色を変換することで2色覚での見えを改善する手法が研究されている。多くの研究では、色変換結果の評価に主観評価が用いられている。主観評価値を得るにはコストがかかるので、有効な客観評価指標があることが望ましい。本研究では2色覚での見えにおけるコントラストの改善度をはかる新規な客観評価指標を提案する。

従来指標として Tanaka らの指標 V_K 、閻らの指標 V_{K,L^*} 、Lu らの指標 \tilde{V}_K がある。Tanaka らの指標 V_K では CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差を用いて評価値を求めている。 V_K と主観評価値 (Thurstone の一対比較法で得られる値 \bar{R}) には二つの違いがある。第一として、 V_K では明度差が重視されない。第二として、色変換結果のコントラストが高すぎる場合に \bar{R} と合わないことがある。閻らの指標 V_{K,L^*} は明度差によりコントラストを評価するものであり、 V_K の第一の問題の解決に寄与する。Lu らの指標 \tilde{V}_K は、一つのパラメータを用いて V_K と V_{K,L^*} を統合したものであり、 V_K よりも \bar{R} に近い値となるが、第二の問題が解決されていない。

本研究では新規な指標 \hat{V}_K を提案する。この指標は二つのパラメータを用いることで、 V_K の二つの問題を解決し、 \tilde{V}_K に比べて \bar{R} に近い値となる。 \hat{V}_K では、 \tilde{V}_K とは異なる方法で明度差の重視を実現している。なお、これまで提案されているコントラスト改善度の客観評価指標には、いずれも計算量が大きいという問題点があった。提案指標 \hat{V}_K では、ランダムサンプリングを用いることで計算量を劇的に低減した。また、ランダムサンプリングの使用 (計算量の低減) により、指標の評価能力が劣らないことを実験で示した。

Abstract

Color is an important factor in visual information. People with color vision deficiency feel difficulty in distinguishing specific colors and are unable to receive color information sufficiently. In this study, we focus on deficiency. Many methods for improving the contrast for dichromats by changing the color in an input image to show the information of the original image have been studied in recent years. In many studies, subjective evaluation is used to evaluate color transformation results. Since obtaining subjective evaluation values is costly, it is desirable to have an effective objective evaluation index. In this paper, we propose an improved objective index to which two parameters are added so that the evaluation result of the index resembles the evaluation of contrast by humans.

There are three objective indices: V_K by Tanaka et al., V_{K,L^*} by Yan et al., and \tilde{V}_K by Lu et al. Tanaka et al.'s index V_K uses CIE 1976 $L^*a^*b^*$ color differences to obtain evaluation values. There are two differences between V_K and the subjective evaluation value (\bar{R} obtained by Thurstone's pairwise comparison method). First, V_K does not emphasize the difference in lightness. Second, it may not match \bar{R} if the contrast of a color transformation result is too high. The index V_{K,L^*} of Yan et al. evaluates contrast by lightness difference and could contribute to solving the first problem of V_K . The index \tilde{V}_K of Lu et al. integrates V_K and V_{K,L^*} with one parameter. \tilde{V}_K will be closer to \bar{R} than to V_K , but the second problem has not been solved.

In this study, we propose a new index \hat{V}_K . This index solves two problems of V_K by using two parameters, and its value is closer to \bar{R} than \tilde{V}_K . In \hat{V}_K , the emphasis on the lightness difference is achieved in a different way than in \tilde{V}_K . The objective evaluation indices of contrast improvement proposed so far have the problem that they are computationally expensive. The proposed index \hat{V}_K dramatically reduces the computational cost by using random sampling. Experiments showed that the use of random sampling does not reduce the evaluation performance of the index.

目次

要旨

第 1 章	序論	1
第 2 章	色覚と色空間	5
2.1	色覚の基礎	5
2.2	色空間	7
2.2.1	RGB 色空間	7
2.2.2	XYZ 色空間	8
2.2.3	CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間	8
2.2.4	HSL 色空間	9
2.3	Viénot らのモデル	12
第 3 章	従来指標	15
3.1	Tanaka らの指標 V_K	15
3.2	閻らの指標 V_{K,L^*}	17
3.3	Lu らの指標 \tilde{V}_K	17
3.4	主観評価実験	18
3.5	従来指標の問題点	20
第 4 章	提案指標	23
4.1	提案指標 \hat{V}_K	23
4.2	提案指標 \hat{V}_K の計算量	24
第 5 章	実験	27
5.1	比較指標 \tilde{V}'_K	27
5.2	比較手法及び提案手法のパラメータ設定	27
5.2.1	評価対象範囲 ρ の設定	27
5.2.2	しきい値 τ , $\hat{\tau}$ の設定	29
5.2.3	選択回数 η の設定	31

5.2.4	$\tilde{\lambda}$ と $\hat{\lambda}_E$ 及び $\hat{\lambda}_{L^*}$ の設定	34
5.3	\tilde{V}'_P と \hat{V}_P の評価性能の比較	39
第 6 章	結論	41
	謝辞	43
	引用文献	45
付録 A	実験に用いた画像の色分布	51
付録 B	一対比較法	53
B.1	欠測値がない場合	53
B.2	欠測値がある場合	56
付録 C	CIE DE2000 色差式	59
	関連発表論文一覧	63
	関連学会発表一覧	65
	解説	67
	用語集	69

目次

1.1	L 錐体, M 錐体, S 錐体の応答曲線	1
1.2	色の見えの例	2
2.1	可視光	5
2.2	ヒトの目の構造	5
2.3	各色空間の関係	7
2.4	RGB 色空間	7
2.5	CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間	9
2.6	HSL 色空間	9
2.7	RGB 色空間から HSL 色空間への変形	10
2.8	Viénot らのモデルの色変換の過程	12
2.9	2 色覚での HS 平面の見え	13
3.1	V_P の計算	16
3.2	実験に用いた画像	18
3.3	P 型色覚での図 3.2 の見え	18
3.4	Chart 5b に対する色変換例	19
3.5	色変換例と評価用画像の提示	19
3.6	色相変化量と \bar{R} の関係	21
3.7	Chart 5b における \bar{R} と V_P の関係	22
3.8	Chart 5b の色変換結果の P 型色覚での見え	22
3.9	Chart 5b における \bar{R} と \tilde{V}_P の関係	22
4.1	\hat{V}_P の計算	24
5.1	6 枚の実験画像に対する \tilde{V}_P と \tilde{V}'_P の関係	28
5.2	Chart 5b における \bar{R} と \tilde{V}'_P の相関係数 r の計算方法	29
5.3	\bar{R} と \tilde{V}'_P の平均相関係数 $\langle r \rangle$	29
5.4	Chart 5b の \tilde{S}'_P	30
5.5	Chart 5b の \hat{S}'_P	30
5.6	\tilde{S}'_P と \hat{S}'_P の要素の比較	31

5.7	Chart 5b における η と $\langle d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P) \rangle$ の関係	33
5.8	Chart 5b における $\langle d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P) \rangle$ と $\langle \sigma(\hat{V}_P) \rangle$ の関係	33
5.9	Chart 5b における $\langle \hat{V}_P \rangle$ の値	33
5.10	Chart 45 の \hat{S}'_P	36
5.11	\hat{V}_P における λ_E の効果	37
5.12	Chart 5b における \bar{R} と \hat{V}_P^\dagger の散布図 (\hat{V}_P における λ_E の効果)	37
5.13	\hat{V}_P における λ_{L^*} の効果	38
5.14	Chart 5b における \bar{R} と \hat{V}_P^\dagger の散布図 (\hat{V}_P における λ_{L^*} の効果)	38
5.15	Chart 5b における \bar{R} と評価指標 (\tilde{V}'_P 及び \hat{V}_P)	39
5.16	6 枚の実験画像に対する \bar{R} と \hat{V}_P の散布図	40
A.1	6 枚の実験画像に含まれる色	51
A.2	6 枚の実験画像の a^*b^* 成分	51
B.1	対象 (刺激) j 及び k に対する比較判断	54
C.1	色差・色識別域の違い (文献 [53] より引用)	59

表目次

5.1	6枚の実験画像に対する \bar{R} と \tilde{V}'_P の相関係数 r	29
5.2	実験環境	32
5.3	\hat{V}_P の計算時間	32
5.4	6枚の実験画像に対する \bar{R} と \tilde{V}'_P の r	34
5.5	6枚の実験画像に対する \bar{R} と \hat{V}_P の $\langle r \rangle$	34
5.6	Chart 5b における \bar{R} と \hat{V}_P の r	35
5.7	Chart 45 における \bar{R} と \hat{V}_P の r	35
5.8	各画像に対する $\hat{\lambda}_E$ と $\hat{\lambda}_{L^*}$ の最適値	36
5.9	\bar{R} と平均的な最適パラメータ値での評価指標 (\tilde{V}'_P 及び \hat{V}_P) の r	39

第 1 章

序論

画像，ビデオ，3D バーチャル技術などのマルチメディア・プレゼンテーションの発達により，視覚情報は私たちの生活に豊かな体験を提供する．視覚情報は網膜上の視細胞を介してヒトの脳に伝達される．視細胞は，人間の視力（物体の細かい部分を分解して検出する目の能力）と色の識別を担っている．視細胞には，杆体細胞と錐体細胞がある．錐体細胞が光刺激に反応し，その刺激による信号が脳に伝わることでヒトは色を知覚する．錐体細胞には感受性の異なる 3 種類の細胞があり，それぞれ L 錐体，M 錐体，S 錐体と呼ばれている．これらの錐体細胞はそれぞれ長波長，中波長，短波長に感応し，その反応の比率によって色が知覚される．L 錐体，M 錐体，S 錐体の応答曲線を図 1.1 に示す．

錐体細胞の状態が一般的な色覚を正常色覚と呼び，そうでない場合を色覚異常と呼ぶ．錐体細胞の状態によって，色覚異常は異常 3 色覚，2 色覚，1 色覚に分類することができる．日本人男性の約 5% は色覚異常であり，約 2% は 2 色覚である [1]．2 色覚には L 錐体が機能しない 1 型 2 色覚 (protanopia, P 型色覚)，M 錐体が機能しない 2 型 2 色覚 (deuteranopia, D 型色覚)，S 錐体が機能しない 3 型 2 色覚 (tritanopia, T 型色覚) がある [1]．本論文では，場合により P 型，D 型，T 型をまとめて K 型と呼ぶ．また，正常色覚を N 型色覚 (normal color vision) と呼ぶ．

色覚異常者は正常色覚者と同じようには色弁別ができず，日常生活の中で不便を感じることもある．2 色覚では特定の組み合わせの色の弁別が難しく，そのような色（の組み合わせ）を弁別困難

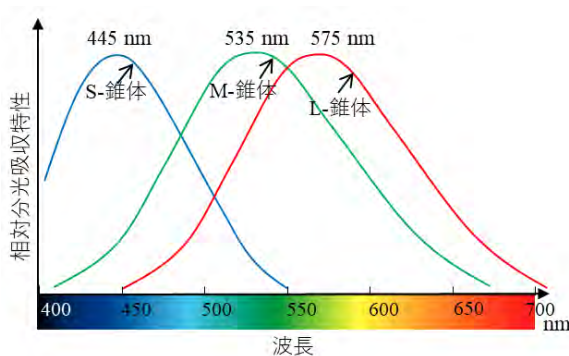


図 1.1 L 錐体，M 錐体，S 錐体の応答曲線



図 1.2 色の見えの例 (a) 原画像, (b) (a) の色覚異常 (2 色覚) の見え

色と呼ぶ。例えば、P 型色覚では、図 1.2(a) のような緑～黄～赤の領域の色を識別することが困難である。図 1.2(b) は、Viénot らが提案したモデル [2] を用いて、P 型色覚における色の見え方をシミュレーションしたものであり、図 1.2(a) 中の色は P 型色覚での弁別が困難であることが分かる。このような色を用いた情報は正しく伝わらない可能性がある。色の違いにより表現された情報が正しく伝わる必要がある。色の違いにより表現された情報を色覚異常者に正しく伝えられるようにすることを色覚バリアフリー化と呼ぶ。

色覚バリアフリー化には、色覚異常者が経験する困難を理解し、その状況を改善することが必要である。この問題を解決するために、近年、画像の色を調整する様々な手法が提案されている [3–41]。例えば、Tanaka らの色覚異常者ための明度の調整手法 [11] は、弁別困難色の明度を調整する変換である。Kang らの色覚異常者ための色の調整手法 [35] は、画像の局所情報と全域情報を用いた色相の変換である*1

また、変換後の画像の評価も重要である。多くの研究では、画像の評価に主観評価を用いているが、主観評価値を得るには、多大な労力と時間を要し、手間がかかる。有効な客観評価指標があることが望ましい。変換後の画像の客観的な評価は、変換後の画像のコントラストと変換前の画像のコントラストとを比べることで行うことが可能である。画像の変換前後のコントラストの変化を計算し、コントラスト改善度として評価する。既存のコントラスト改善度として、Tanaka らの指標 V_K [11]、及び Tanaka らの指標を改良したいくつかの指標 [29, 34, 42–46] がある。

Tanaka らのコントラスト改善度の指標 V_K では、原画像の正常色覚でのコントラストと色変換画像の K 型色覚でのコントラストの差を CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差 [47] を用いて評価している。この指標 V_K を主観評価で得られる値（一対比較法 [48, 49] の結果） \bar{R} と比べた場合に*2 二つの問題がある。一つ目は、明度が重視されないことである。二つ目は、色変換後の画像のコントラストが高すぎる場合に、画像によっては主観評価値とずれが生じることである。閻らの V_{K,L^*} [42] は明度差によりコントラストを評価するものであり、 V_K の一つ目の問題に大きく寄与しうる。Lu らの \tilde{V}_K [43] は、主観評価値 \bar{R} に合うように、一つのパラメータを用いて V_K と V_{K,L^*} を統合した指標である。 \tilde{V}_K は V_K に比べれば \bar{R} に近い評価値となるが、コントラストの高い部分で主観評価値と不一致な場合がある。すなわち、二つ目の問題の解決が不十分である。

*1 明度変換は、変換前後で色相が保持されるので、3 色覚者と 2 色覚者の両者が変換後の画像を見るような場合に特に適している。例えば、映画館のように、共通の画面上で変換後の画像を 3 色覚者と 2 色覚者が同時に見るような場合である。一方、色相変換では、変換の程度や画像の種類によっては変換後の画像が 3 色覚者にとっては違和感を感じるものになるが、変換後の画像を 2 色覚者のみが見るような場合は問題にならない。例えば、2 色覚者個人のスマートフォン上で弁別可能にするために画像の色を変換するような場合である。また、着色されたグラフのように、画像内のオブジェクトが識別できればよい画像であれば色相が変化しても問題ないといえる。

*2 主観評価の実施方法により \bar{R} は異なる。「本研究における主観評価で得られる \bar{R} と比べた場合に」という意味である。

本研究では、カラー画像の2色覚での見えにおけるコントラストの評価において、主観評価とよく一致する定量的評価指標を提案することを目的とする。そのような指標として \hat{V}_K [46] を提案する。この指標では二つのパラメータを用いて V_K の二つの問題を解決する。 \tilde{V}_K [43] とは異なる方法で明度差を重視し、 \tilde{V}_K よりも、 \bar{R} に近い値となるようにする。

また、これまで提案されているコントラスト改善度の定量評価指標には計算量が大きいという問題があった。従来指標 \tilde{V}_K では、計算量を減らすために画像の全域ではなく、注目画素 i に対して評価対象範囲 ρ を定めて、チェス盤距離 [47] が ρ 以下の画素 j の全ての画素対を計算対象としている。しかし、指標 \tilde{V}_K においても近傍範囲が大きくなると計算量も大きくなるという問題がある。提案指標 \hat{V}_K では、注目画素 i に対し、ランダムサンプリングを用い、チェス盤距離が ρ 以下の範囲にありランダムに選択された η 画素を評価対象とする。本論文では、従来指標 \tilde{V}_K において画素のサンプリング条件を提案指標と同様にするため、ランダムサンプリングを用いて \tilde{V}_K の計算量を減らした指標 \tilde{V}'_K を比較指標として定義する。この比較指標 \tilde{V}'_K と提案指標 \hat{V}_K を比較し、提案指標の有効性及び妥当性を示す。

提案指標を用いることで、色覚異常での見えの判断の自動化が容易となる。提案指標は、バリアフリーな画像作成の一助になり、色覚バリアフリー化に貢献する。

本論文は、六つの章から構成される。第1章は序論である。第2章では、本研究に関係する色覚と色空間の基礎知識について述べる。第3章では、従来指標及び従来指標の問題点について述べる。第4章では、提案指標について述べる。第5章では、比較指標と提案指標のパラメータ設定を述べたのち、比較指標と提案指標との比較実験の結果を示し、提案指標の妥当性及び有効性について述べる。第6章は結論であり、本研究の成果を総括する。更に今後の課題について述べる。

第 2 章

色覚と色空間

2.1 色覚の基礎

ヒトの目は光を複数の波長域に分割して検知する。360 nm から 830 nm の範囲の波長の電磁波が可視光（図 2.1）であり，これらの波長の電磁波をヒトは光として認識し，色として知覚する。

ヒトの目の構造を図 2.2(a) に示す。瞳孔から入った光は，水晶体を経て硝子体を通り，網膜に投影される。網膜は，厚さが約 0.25 mm の薄い膜状の組織である。図 2.2(b) で示すように，網膜には，視細胞，水平細胞，双極細胞，アマクリン細胞，遠心性繊維，神経節細胞などの細胞が存在する。網膜に投影された光は，視細胞内で電気的な信号に基づき像に変換され，視神経を経て脳に送られる。

視細胞はその形態から杆体と錐体の 2 種類に分類される。杆体細胞は明るさを知覚する細胞であり，錐体細胞は色の知覚に関係する細胞である。錐体細胞はその機能によって 3 種類に分類され

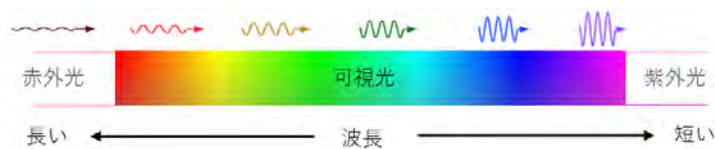


図 2.1 可視光

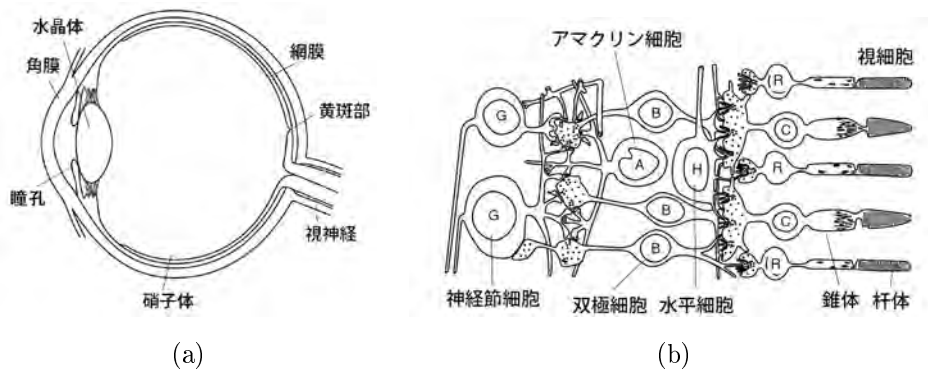


図 2.2 ヒトの目の構造（文献 [50] より引用）(a) 眼球の構造，(b) 網膜の構造

る。それぞれの錐体細胞の分光吸収特性は異なり、その違いはそれらの細胞が持つ視物質の性質に依存している。3種類の錐体細胞は、それぞれ長波長、中波長、短波長域の光を感受するL錐体、M錐体、S錐体である。各錐体の基本感度関数を図1.1に示す。図1.1より、L錐体とM錐体が感受する範囲は非常に近いことが分かる。L、M、S錐体が全て正常な場合を正常色覚または正常3色覚と呼ぶ。

3種類の錐体のいずれかが機能しない場合あるいはいずれかに異常がある場合を色覚異常という。3種類の錐体細胞のうち一つの錐体に異常がある場合は異常3色覚である。異常3色覚のうち、L錐体に異常がある場合は1型3色覚、M錐体に異常がある場合は2型3色覚であり、S錐体に異常がある場合は3型3色覚である。3種類の錐体細胞のうち、いずれか一つが機能しない場合は2色覚である。機能しない錐体がL錐体の場合は1型2色覚、M錐体が機能しない場合は2型2色覚であり、S錐体が機能しない場合は3型2色覚である。図1.2に示すように、L錐体とM錐体が感受する波長の範囲は近い。そのため、1型2色覚と2型2色覚の色の見えとは似ている。L錐体が感受する波長の範囲はM錐体より少し長波長側にある。1型2色覚者の場合、L錐体が機能していないので、特に長波長域の色（赤色）に対し、知覚する色の見えが2型2色覚者が知覚する色の見えより暗い。なお、二つの錐体が機能しない場合は1色覚となる。

視細胞の興奮に参与するのは視物質であり、視物質は、オプシンと呼ばれる視物質タンパク質とビタミンA誘導体である。杆体にはロドプシンが存在し、L、M、S錐体にはそれぞれ赤オプシン、緑オプシン、青オプシンが存在する。ロドプシンは第3染色体に存在し、青オプシンは第7染色体に存在する。一方、赤オプシンと緑オプシンをコードする遺伝子はどちらもX染色体に存在する。赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の構造は似ており、コードするアミノ酸の違いが赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の分光吸収特性の違いに係る [50]。

男性と女性のどちらも、ロドプシン遺伝子を含む染色体と青オプシン遺伝子を含む染色体をそれぞれ二つ持っている。例え一つの染色体に異常があっても、もう一つが正常であれば、正常色覚であり、青オプシン遺伝子を含む染色体が二つとも異常な場合に3型2色覚になる。一方、赤オプシンと緑オプシンの遺伝子はX染色体に存在する [50]。女性はX染色体を二つ持っているが、男性は一つしか持っていない。男性は一つしか持っていないそのX染色体が異常であれば、色覚異常になる。これらの理由により、3型2色覚は非常にまれな型であり、2色覚のほとんどは1型及び2型2色覚である。また、男性の色覚異常の割合は女性より高い。大規模な無作為集団調査によると、ヨーロッパ系白人における色覚異常は男性で約8%、女性で約0.4%であり、中国系および日系の男性では4%~6.5%である [51]。また、日本では小学4年生の児童32958名を調査しており、1型2色覚、1型3色覚、2型2色覚、2型3色覚がそれぞれ0.4%、0.7%、1.4%、3.2%で、色覚異常の合計は5.7%であったという報告がある [50]。

2.2 色空間

色空間とは色の幾何学的な表示に用いる空間のことである。色空間の形状はその種類に応じ、円柱や円錐、多角錐、球などの幾何形体として表現でき、多様である。本節では、様々な色空間のうち、本論文に關係する RGB 色空間、XYZ 色空間、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間、HSL 色空間について紹介する。各色空間の關係を図 2.3 に示す。

2.2.1 RGB 色空間

RGB 色空間の概念図を図 2.4 に示す。RGB とは、赤 (Red) 緑 (Green) 青 (Blue) の略称であり、この三色の色は光の三原色である。通常のディスプレイでは、この RGB の成分を加法混合し、色を表示する。三つの成分が 0 の場合には、混合した色は黒となり、数値が増えると白に近づく。

一般的なディスプレイ、プリンタ、デジタルカメラなどの色表現のための色空間として、sRGB (standard RGB) 色空間がある。sRGB 色空間は 1998 年に国際電気標準会議 International Electrotechnical Commission (IEC) にて策定されている。デジタル画像の RGB の値は、ディスプレイ上で適切な明るさとなるようにガンマ補正が施されている。ガンマ補正した RGB の値をノンリニア RGB 信号と呼び、補正前の RGB の値をリニア RGB 信号と呼ぶ。ノンリニア RGB 信号 ($R'_{8bit}, G'_{8bit}, B'_{8bit}$) からリニア RGB 信号 (R, G, B) を求める計算について R 成分を例に示す。

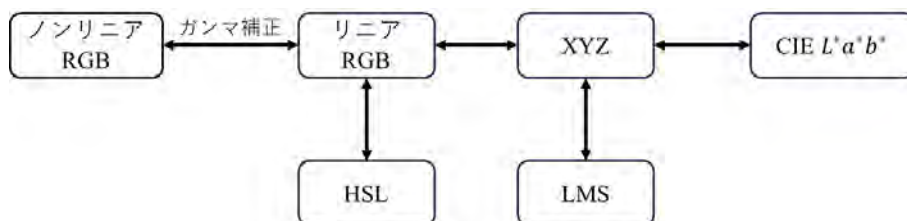


図 2.3 各色空間の關係

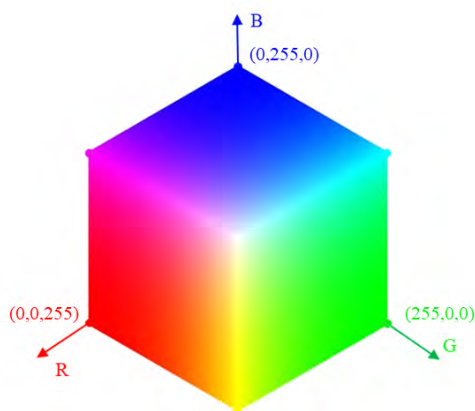


図 2.4 RGB 色空間

リニア RGB 信号の R 成分は,

$$R = \begin{cases} \frac{R'_{sRGB}}{12.92}, & R'_{sRGB} \leq 0.03928, \\ \left(\frac{R'_{sRGB} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$R'_{sRGB} = \frac{R'_{8bit}}{255} \quad (2.2)$$

で得られる. 逆に, リニア RGB 信号の R 成分からノンリニア RGB 信号の R'_{8bit} 成分を求める式は以下の通りである [47].

$$R'_{8bit} = 255R'_{sRGB}, \quad (2.3)$$

$$R'_{sRGB} = \begin{cases} 1292R, & R \leq 0.00304, \\ 1.055R^{1.0/2.4}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2.2 XYZ 色空間

XYZ 色空間は, Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) が策定した色を定量的に表示する CIE 1931 XYZ 標準表色系による色空間である. この色空間では, 等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ を用いて三刺激値 X , Y , Z を求め, それらで色を表現する. XYZ 色空間は, RGB 色空間を 1 次変換することでも得られる. sRGB 値から XYZ 値への変換式は以下の通りである.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

2.2.3 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間

CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間 [47] (単に $L^*a^*b^*$ 色空間と記す) はヒトの視覚特性に対応するように定められた色空間である. $L^*a^*b^*$ 色空間を図 2.5 に示す $L^*a^*b^*$ 色空間には三つの座標があり, L^* は明度 ($L^* = 0$ は黒, $L^* = 100$ は白), a^* は赤-緑成分, b^* は黄-青成分に対応している. XYZ 色空間から $L^*a^*b^*$ 色空間への変換式は以下の通りである.

$$L^* = 116g(Y/Y_0) - 16, \quad (2.6)$$

$$a^* = 500(g(X/X_0) - g(Y/Y_0)), \quad (2.7)$$

$$b^* = 200(g(Y/Y_0) - g(Z/Z_0)), \quad (2.8)$$

$$g(x) = \begin{cases} x^{1/3}, & x > 0.008856, \\ 7.78x + 16/116, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.9)$$

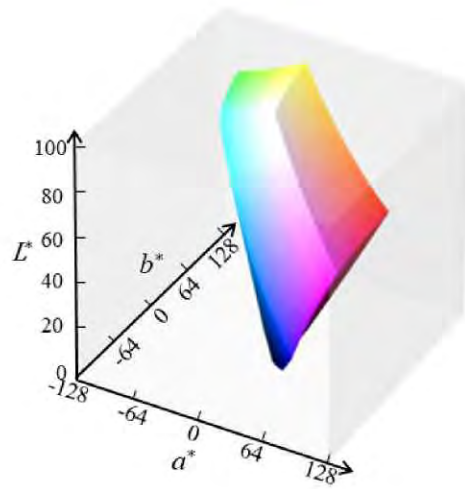


図 2.5 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間

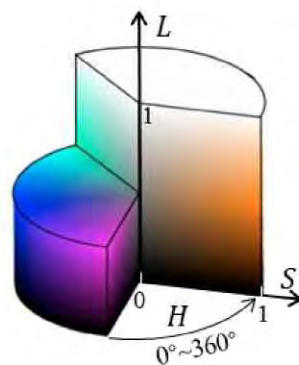


図 2.6 HSI 色空間の例 (HSL 色空間)

ここで、 X_0 , Y_0 , Z_0 はそれぞれ、標準白色の X , Y , Z の値である。[0, 1] に規格化された sRGB を XYZ 色空間を経て $L^*a^*b^*$ に変換する場合、 $X_0 = 0.9505$, $Y_0 = 1.000$, $Z_0 = 1.089$ である [47].

CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差式 ΔE_{ij} は

$$\Delta E_{ij} = \sqrt{(L_i^* - L_j^*)^2 + (a_i^* - a_j^*)^2 + (b_i^* - b_j^*)^2} \quad (2.10)$$

で定義される。 i と j は画像における画素 i と j である。 ΔE_{ij} は、ヒトが感じる色の差との対応がよく、ヒトが感じる色の違い、色がどれだけ似ているか違っているかを、数量的に表している。

2.2.4 HSL 色空間

RGB 色空間で三原色の濃淡レベルを変化させて合成色の色調をコントロールするのは容易ではない。感覚的にはマンセル表色系などで使われる色相 (hue : H)、彩度 (saturation : S)、明度 (intensity : I) で扱う方が分かりやすい (図 2.6)。画像処理では、RGB 値で記録された原画像の

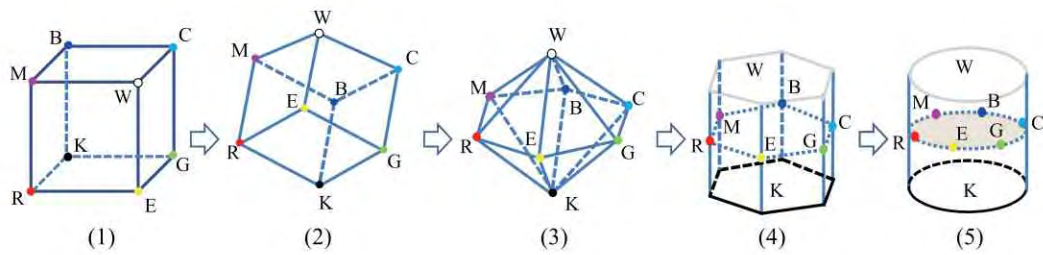


図 2.7 RGB 色空間から HSL 色空間への変形

色情報を色相・彩度・明度からなる HSI 色空間上の値に変換し、そこで画素値を調整し、逆変換によって再び RGB 色空間上の値に戻してカラー画像とすることがよく行われる。^{*1}

HSI 色空間の定義にはさまざまなものがあるが、本論文では、Joblove らによって提案された双六角錐モデル (HSL 色空間) [47, 52] を用いる。HSL 色空間では、色相 H 、飽和度 (saturation : S)、明度 (lightness : L) が独立に定義される。 H は弧度法により $[0, 2\pi)$ 、 S と L は $[0, 1]$ の値をとる。RGB 色空間を HSL 色空間に変換する模式図を図 2.7 に示す。HSL 色空間は図 2.7 の (5) に示すように円筒形の形をしているが、概念的には図 2.7 の (3) に表されているように、二つの六角錐を合わせた形となっている。RGB 空間における頂点の色は白 (White)、黒 (Black)、赤 (Red)、黄色 (Yellow)、緑 (Green)、シアン (Cyan)、青 (Blue)、マゼンタ (Magenta) の 8 色であり、括弧内の大文字により略記した。

HSL 変換 : RGB 値を HSL 値に変換する具体的な方法を述べる。ここでは、RGB 値は $[0, 1]$ に規格化されているとする。まず、明度 L を

$$L = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} \quad (2.11)$$

で定義する。ここで、

$$L_{\max} = \max\{R, G, B\}, \quad (2.12)$$

$$L_{\min} = \min\{R, G, B\} \quad (2.13)$$

である。max は最大値、min は最小値をとる演算である。

- ・ $L_{\max} = L_{\min}$ のとき : $S = 0$ とし、 H は不定と定める。
- ・ $L_{\max} \neq L_{\min}$ のとき : S を

$$S = \begin{cases} \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, & L \leq 0.5, \\ \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2 - L_{\max} - L_{\min}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.14)$$

^{*1} $L^*a^*b^*$ 色空間でも (a^* , b^* を C^* , h に変換することで) 明度・彩度・色相の値を扱うことができるが、色域 [47] の問題がある。すなわち、変換後の色がディスプレイに表示可能なものであるかの判断が煩雑であるという問題がある。

で定義する．次に r を

$$r = \frac{L_{\max} - R}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (2.15)$$

で定義する．同様にして G , B から g , b を定義する．最後に H を以下のように定める．

$$H = \begin{cases} \frac{\pi}{3}(b - g), & R = L_{\max}, \\ \frac{\pi}{3}(2 + r - b), & G = L_{\max}, \\ \frac{\pi}{3}(4 + g - r), & B = L_{\max}. \end{cases} \quad (2.16)$$

ここでは $L_{\max} \neq L_{\min}$ の場合を考えているので， $R = G = B = L_{\max}$ となることはないが，2成分が最大値となる可能性はある．例えば $R = G = L_{\max}$ のとき，式 (2.16) の第1行目と第2行目が共に条件を満たすことになるが，どちらを使って計算しても同じ H が得られる．具体的には以下のようなになる．まず，式 (2.15) から分かるように $r = g = 0$ である．また，必然的に $B = L_{\min}$ であり， $b = 1$ である．したがって，第1行目と第2行目のどちらで計算しても $H = \pi/3$ となる．

HSL 逆変換：HSL 値を RGB 値に変換する方法を以下に述べる．まず， M_1 , M_2 を以下のように求める．

$$M_1 = 2L - M_2, \quad (2.17)$$

$$M_2 = \begin{cases} L(1 + S), & L \leq 0.5, \\ L + S - LS, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.18)$$

- ・ $S = 0$ のとき： $R = G = B = L$ とする．
- ・ $S \neq 0$ のとき：

[処理 1] 以下のようにして RGB 値を得る．

- (a) $h^\dagger = H + 2\pi/3$ として処理 2 を行い，得られた X を R の値とする．
- (b) $h^\dagger = H$ として処理 2 を行い，得られた X を G の値とする．
- (c) $h^\dagger = H - 2\pi/3$ として処理 2 を行い，得られた X を B の値とする．

[処理 2] まず， h' を

$$h' = \begin{cases} h^\dagger + 2\pi, & h^\dagger < 0, \\ h^\dagger - 2\pi, & h^\dagger > 2\pi, \\ h^\dagger, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.19)$$

で求める。次に、 X を以下のように求める。

$$X = \begin{cases} M_1 + (M_2 - M_1)h'/\frac{\pi}{3}, & h' < \frac{\pi}{3} \\ M_2, & \frac{\pi}{3} \leq h' < \pi, \\ M_1 + (M_2 - M_1)\left(\frac{4}{3}\pi - h'\right)/\frac{\pi}{3}, & \pi \leq h' < \frac{4}{3}\pi, \\ M_1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.20)$$

2.3 Viénot らのモデル

本論文では、Viénot らのモデル [2] を使用して P 型及び D 型色覚の見えをシミュレーションする。^{*2} このモデルの色変換の過程を図 2.8 に示す。

このモデルでは、シミュレーションした色をディスプレイに表示可能な範囲（色域 [47]）内に収めるために、まずシミュレーション対象画像のリニア RGB 値 (R, G, B) を以下の通り調整する。

$$R_2 = 0.992052R + 0.003974, \quad (2.21)$$

$$G_2 = 0.992052G + 0.003974, \quad (2.22)$$

$$B_2 = 0.992052B + 0.003974. \quad (2.23)$$

ここで、 R_2, G_2, B_2 は色域調整した RGB 信号である。正常色覚の錐体信号 (L, M, S) と色域調整した RGB 信号 (R_2, G_2, B_2) の関係は以下の通りである。

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.11935 \\ 3.45565 & 27.1554 & 3.86714 \\ 0.0299566 & 0.184309 & 1.46709 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

正常色覚の錐体信号と P 型色覚の錐体信号 (L_P, M_P, S_P) の関係は

$$\begin{pmatrix} L_P \\ M_P \\ S_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2.202344 & -2.52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

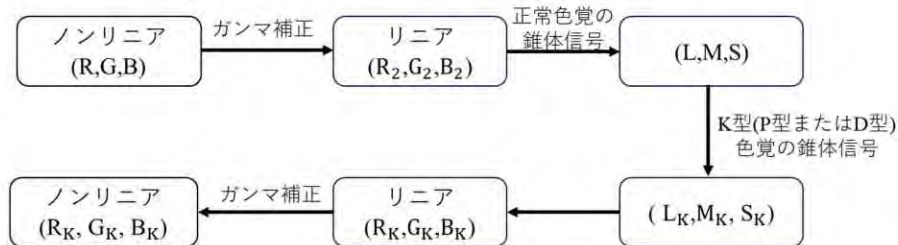


図 2.8 Viénot らのモデルの色変換の過程

^{*2} Viénot らのモデルは P 型及び D 型色覚の見えのためのモデルであり、T 型色覚のシミュレーションはできない。

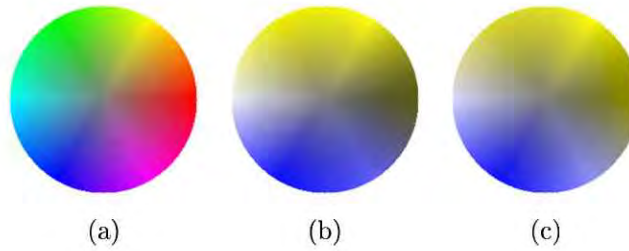


図 2.9 HS 平面 (a) 原画像, (b) P 型色覚での見え, (c) D 型色覚での見え

である. 式 (2.24) の逆行列を利用して, 錐体信号 (L_P, M_P, S_P) をリニア RGB 信号に変換する. 変換式は以下の通りである.

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.080944 & -0.130504 & 0.116721 \\ -0.0102485 & 0.054194 & -0.113615 \\ -0.000365294 & -0.00412163 & 0.693513 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_P \\ M_P \\ S_P \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

式 (2.21)~(2.26) を用いて, 図 2.9(a) は図 2.9(b) に変換される.

また, D 型色覚の場合の色域調整は以下の通りである.

$$R_2 = 0.957237R + 0.0213814, \quad (2.27)$$

$$G_2 = 0.957237G + 0.0213814, \quad (2.28)$$

$$B_2 = 0.957237B + 0.0213814. \quad (2.29)$$

色域調整した RGB 信号 (R_2, G_2, B_2) を式 (2.24) を用いて正常色覚の錐体信号 (L, M, S) に変換する. D 型色覚の錐体信号 (L_D, M_D, S_D) と正常色覚の錐体信号との関係は

$$\begin{pmatrix} L_D \\ M_D \\ S_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.494207 & 0 & 1.24827 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

である. P 型色覚の場合と同様に式 (2.24) の逆行列を用いて, 式 (2.30) で得られた錐体信号をリニア RGB 信号に変換する. 式 (2.24), (2.27)~(2.30) を用いて, 図 2.9(a) は図 2.9(c) に変換される.

図 2.9 から分かるように, Viénot らのモデルにおいて, P 型及び D 型色覚では赤~黄色~緑色が黄色, シアン~青~紫色が青にシミュレートされる.

第 3 章

従来指標

本章では、カラー画像の 2 色覚 (K 型色覚) での見えにおけるコントラストを定量的に評価する従来指標を説明する。Tanaka らは、色変換結果の 2 色覚でのコントラストを評価するために、弁別困難色に対するコントラスト改善度 V_K を定義している [11]。文献 [11] では対象画像における全ての画素対についてコントラストを評価しているが、文献 [29] では近傍画素対のみについて評価を行っている。また、文献 [42] では V_{K,L^*} が定義されている。これは、 $L^*a^*b^*$ 色差の代わりに、明度 L^* の差を用いて K 型色覚でのコントラストを評価するものである。文献 [43] で提案された \tilde{V}_K は、 V_K と V_{K,L^*} を統合したものである。統合のためのパラメータ λ は、 \tilde{V}_K が主観評価値 \bar{R} とよく一致するように定める。以下、3.1 節、3.2 節、3.3 節でそれぞれ V_K 、 V_{K,L^*} 、 \tilde{V}_K を説明し、 \bar{R} の求め方及び実験について 3.4 節で説明する。本章の最後に、 \tilde{V}_K の問題点を 3.5 節で説明する。

3.1 Tanaka らの指標 V_K

V_K は、色差によるコントラスト改善度の評価指標である。遠く離れた画素の弁別の困難さは問題とならないことが多いので、本論文では文献 [29] と同様、 V_K は近傍画素対のみを考慮するものとする。

弁別困難色に対するコントラスト改善度 V_K は

$$V_K = U_K^{\text{out}} / U_K^{\text{in}} \quad (3.1)$$

で定義される。ここで、

$$U_K^{\text{out}} = \frac{1}{|S_K|} \sum_{(i,j) \in S_K} |\Delta E_{K,ij}^{\text{out}} - \Delta E_{N,ij}^{\text{in}}|, \quad (3.2)$$

$$U_K^{\text{in}} = \frac{1}{|S_K|} \sum_{(i,j) \in S_K} |\Delta E_{K,ij}^{\text{in}} - \Delta E_{N,ij}^{\text{in}}| \quad (3.3)$$

である。 $\Delta E_{K,ij}^{\text{out}}$ は出力画像における画素 i と j の K 型色覚での $L^*a^*b^*$ 色差であり、

$$\Delta E_{K,ij}^{\text{out}} = \sqrt{(L_{K,i}^{\text{out}} - L_{K,j}^{\text{out}})^2 + (a_{K,i}^{\text{out}} - a_{K,j}^{\text{out}})^2 + (b_{K,i}^{\text{out}} - b_{K,j}^{\text{out}})^2} \quad (3.4)$$

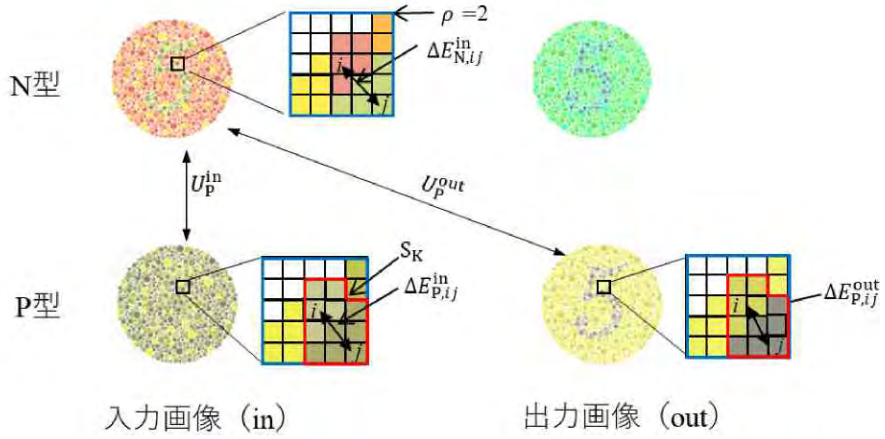


図 3.1 V_P の計算

で定義される。

$\Delta E_{N,ij}^{\text{in}}$ と $\Delta E_{K,ij}^{\text{in}}$ は入力画像における画素 i と j の $L^*a^*b^*$ 色差である。前者は正常色覚 (N 型色覚)、後者は K 型色覚のものであり、それぞれ

$$\Delta E_{N,ij}^{\text{in}} = \sqrt{(L_{N,i}^{\text{in}} - L_{N,j}^{\text{in}})^2 + (a_{N,i}^{\text{in}} - a_{N,j}^{\text{in}})^2 + (b_{N,i}^{\text{in}} - b_{N,j}^{\text{in}})^2}, \quad (3.5)$$

$$\Delta E_{K,ij}^{\text{in}} = \sqrt{(L_{K,i}^{\text{in}} - L_{K,j}^{\text{in}})^2 + (a_{K,i}^{\text{in}} - a_{K,j}^{\text{in}})^2 + (b_{K,i}^{\text{in}} - b_{K,j}^{\text{in}})^2} \quad (3.6)$$

で定義される。 $L_{K,i}^{\text{out}}$, $a_{K,i}^{\text{out}}$, $b_{K,i}^{\text{out}}$ は画素 i の画素値を $L^*a^*b^*$ 色空間上の値にしたものである。

式 (3.2), (3.3) における S_K は, $d(i, j) \leq \rho$, $T_{K,ij} \leq \tau$, $\Delta E_{N,ij}^{\text{in}} > 0$ の三つの条件を満たす画素対 (i, j) の集合である。 $|S_K|$ は, S_K の要素数である。 $d(i, j)$ は, 画素 i と j のチェス盤距離 [47] を意味する。また, $T_{K,ij}$ の定義は以下の通りである。

$$T_{K,ij} = \Delta E_{K,ij}^{\text{in}} / \Delta E_{N,ij}^{\text{in}}. \quad (3.7)$$

$T_{K,ij}$ は, 入力画像の画素 i と j における N 型色覚と K 型色覚での色差の比である。P 型色覚での V_K , すなわち V_P の計算の様子 ($\rho = 2$ とした例) を図 3.1 に示す。画素 i に対し, $d(i, j) \leq 2$ の画素 (青線で囲まれた画素) が検討対象であり, その内で $T_{K,ij} \leq \tau$ 及び $\Delta E_{N,ij}^{\text{in}} > 0$ を満たす画素 (赤線で囲まれた画素) が評価対象, すなわち V_P の値に寄与する画素となる。

$T_{K,ij} \ll 1$ のとき, 画素 i と j の色は, N 型色覚では弁別できるが K 型色覚で弁別しにくいといえる。したがって, パラメータ τ が小さいとき, S_K は弁別困難色の画素対の集合となる。 S_K は S_K の要素数である。 U_K^{in} は入力画像における弁別困難色対 (i, j) に対する N 型色覚と K 型色覚での色差の差の平均である。N 型色覚と K 型色覚でのコントラストが同程度であれば U_K^{in} は小さな値となる。すなわち, 値が小さいほど K 型色覚におけるコントラストが適切であるということである。同様に, U_K^{out} は出力画像に対するコントラストである。 U の定義上, V の値が小さいほど K 型色覚におけるコントラストが良好であることを意味する。基本的に, V の値がとる範囲は $[0, 1]$

であるが，出力画像のコントラストが入力画像よりも低い ($\Delta E_{K,ij}^{\text{in}}$ よりも $\Delta E_{K,ij}^{\text{out}}$ が小さい) 場合や出力画像のコントラストが高すぎる ($\Delta E_{K,ij}^{\text{out}}$ が大きすぎる) 場合に 1 を超えることがある。

3.2 閾らの指標 V_{K,L^*}

P 型及び D 型色覚では， $L^*a^*b^*$ 色空間における a^* 方向の色の違いが弁別しにくくなるが， L^* 及び b^* 方向の色の違いは弁別できる．文献 [42] では， L^* 及び b^* を用いて，コントラスト改善度 V_{K,L^*} 及び V_{K,b^*} が提案されている．これらは V_K を修正することで定義され， V_K と同様，値が小さい方が高評価となる．本節では V_{K,L^*} について以下に説明する．

まず，式 (3.2) を以下のように修正する．

$$U_{K,L^*}^{\text{out}} = \frac{1}{|S_K|} \sum_{(i,j) \in S_K} |\Delta L_{K,ij}^{\text{out}} - \Delta E_{N,ij}^{\text{in}}|. \quad (3.8)$$

ここで， $\Delta L_{K,ij}^{\text{out}}$ は，出力画像における画素 i と j の K 型色覚での L^* 成分の差であり，

$$\Delta L_{K,ij}^{\text{out}} = |L_{K,i}^{\text{out}} - L_{K,j}^{\text{out}}| \quad (3.9)$$

で定義される． U_{K,L^*}^{out} を用いて， V_{K,L^*} を

$$V_{K,L^*} = U_{K,L^*}^{\text{out}} / U_K^{\text{in}} \quad (3.10)$$

で定義する．その他の量の定義は V_K と同じである． V_{K,L^*} は，出力画像における色の違いのうち， L^* 成分のみを用いて K 型色覚におけるコントラストを評価するものである．

3.3 Lu らの指標 \tilde{V}_K

\tilde{V}_K の定義は以下の通りである．

$$\tilde{V}_K(\tilde{\lambda}) = V_K + \tilde{\lambda} V_{K,L^*}. \quad (3.11)$$

統合のためのパラメータ $\tilde{\lambda}$ は， \tilde{V}_K が主観評価値 \bar{R} と合うように定める． \tilde{V}_K は小さい方が良く， \bar{R} は値が大きくな方が良く， V の値がとる範囲は基本的に $[0, 1]$ であるので，

$$\tilde{V}_K^\dagger = \tilde{a}_1(1 - V_K) + \tilde{a}_2(1 - V_{K,L^*}) + \tilde{a}_3 \quad (3.12)$$

とし， \tilde{V}_K^\dagger と \bar{R} の差が最も小さくなるように $\tilde{a}_1 \sim \tilde{a}_3$ を最小二乗法により求める．*1 式 (3.11) の $\tilde{\lambda}$ は， $\tilde{\lambda} = \tilde{a}_2 / \tilde{a}_1$ とする．

*1 本論文では，5.2.4 節で述べるように相関係数を用いて決定する．

3.4 主観評価実験

実験に使用した画像は図 3.2 に示す画像（石原式色覚検査表）である。^{*2} 画像の大きさはいずれも 281×276 画素である。本論文では、P 型色覚における色の見えは、Viénot らのモデル [2] を用いてシミュレーションした。図 3.2 の P 型での見えを図 3.3 に示す。

主観評価値 \bar{R} の取得には、Thurstone の方法による一対比較法（付録 B）を用いた。この評価値を得るために、原画像における全画素の色相を一様に変換した系統的な画像群を用意した。具体的には、原画像の色相を HSL 色空間で色相 H のみ 15° 間隔で変換した 24 枚の画像を P 型色覚における色の見えへ変換し、評価対象画像とした。

色相変換例を図 3.4 に示す。Chart 5b（図 3.2(b)）に対し、24 種の色変換を行った結果が図 3.4(a) であり、その P 型色覚における色の見えが図 3.4(b) である。色相変換は特に 2 色覚でのコントラスト改善を意図したものではないが、変換量によっては結果的に良好な変換結果となることがある。例えば、図 3.4(b) における変換量 45° の結果では数字「5」がはっきりと分かる。また、Chart 5b の色相変化後の L^* 成分を図 3.4(c) に示す。HSL 色空間における明度である L 成分は $L^*a^*b^*$ 色空間における明度 L^* と等しい値ではなく、色相変化により L^* が変化することが分かる。^{*3}

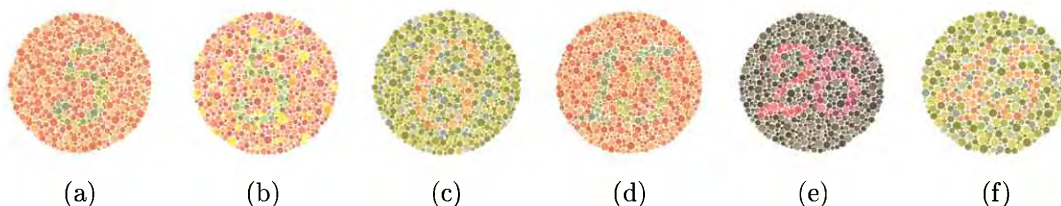


図 3.2 実験に用いた画像 (a) Chart 5a, (b) Chart 5b, (c) Chart 6, (d) Chart 15, (e) Chart 26, (f) Chart 45

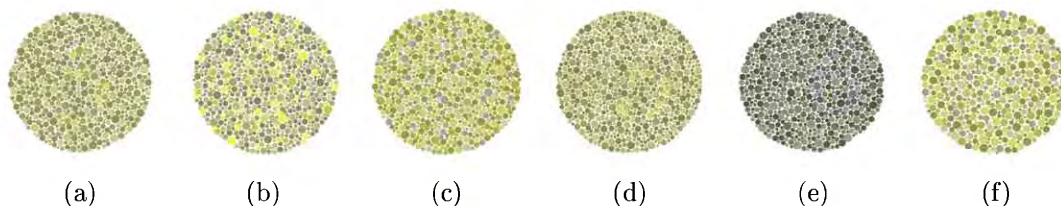


図 3.3 P 型色覚での図 3.2 の見え (a) Chart 5a, (b) Chart 5b, (c) Chart 6, (d) Chart 15, (e) Chart 26, (f) Chart 45

^{*2} 主観評価実験において石原式検査表を用いるのは、弁別困難色を含む画像でかつ、画像の複雑さが適当であると考えられるからである。まず、石原式検査表は「数字が読み取れるかどうか」という注目ポイントがはっきりしているという意味で単純である。もし自然画像のような内容が複雑な画像を用いると、被検者ごとに注目ポイントが異なる可能性がある。一方で、画像が単純過ぎても良くないと考えられる。例えば、弁別困難色の 2 色のみを含む画像が最も単純なものであるが、その画像を用いた実験では、パラメータ設定がその 2 色に特化（オーバーフィット）したのになってしまうであろう。色覚検査表も大まかにいえば 2 色、例えば Chart 5a では緑の「5」と背景の赤のコントラストが見えるかどうかだけが問題のように思えるかもしれないが、実際には 32 色から構成されており、 $(\rho$ を大きくして全画素対を考慮する場合は) ${}_{32}C_2 = 496$ 種類の色の組み合わせがある。すなわち、一つの画像の中にさまざまな色差の色対を含んでおり、適度に複雑な画像である。参考に、実験に用いた画像の色分布を付録 A に示す。

^{*3} HSL 色空間で色相 H のみを変化させた場合でも、 $L^*a^*b^*$ 色空間では一般に L^* , a^* , b^* の全成分が変化する。したがって、式 (3.4)~(3.6), (3.9) の (各成分の) 値がさまざまに変化し、十分なバリエーションを含んだ画像群となる。 $L^*a^*b^*$ 色空間でそれぞれの色成分を変化させることもできるが、HSL 色空間の H を変化させるだけであれば 1 パラメータで制御できるので扱いやすい。

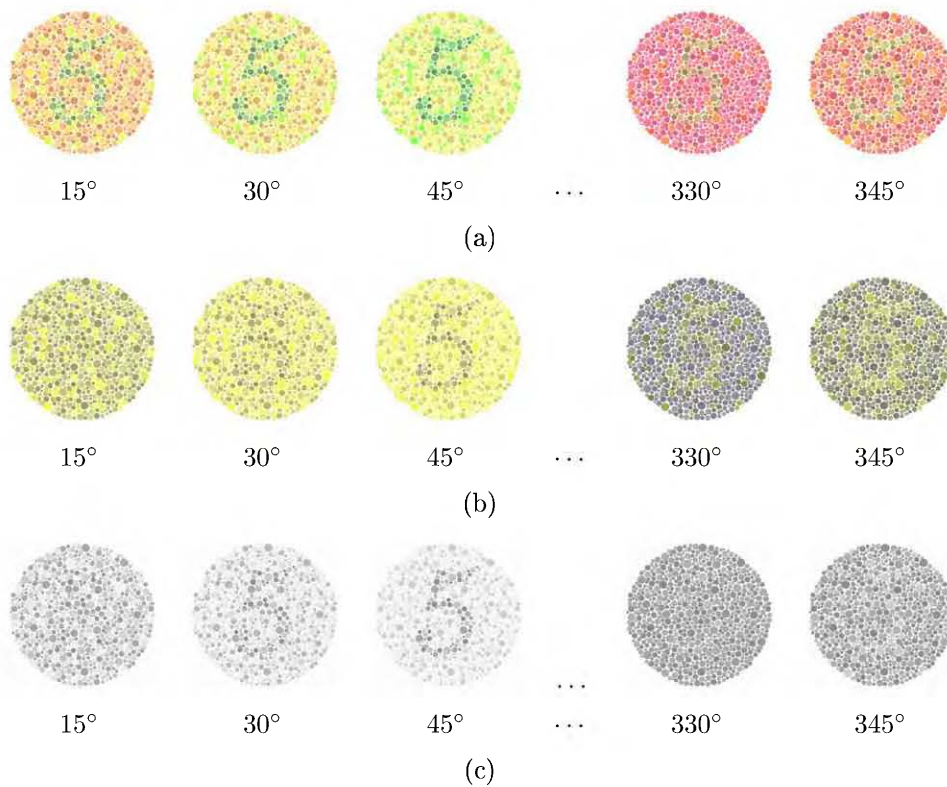


図 3.4 Chart 5b に対する色変換例（画像の下の数字は HSL 色空間における色相の変換量を表す．変換量は度数法で表した．また 0° は原画像に等しい．）(a) N 型色覚での見え，(b) P 型色覚での見え，(c) (a) の L^* 成分

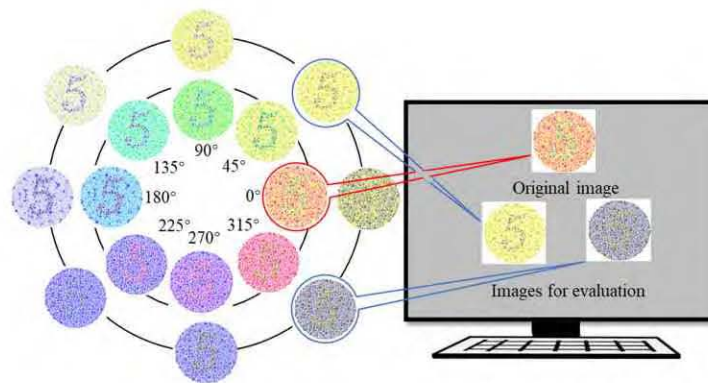


図 3.5 Chart 5b の色変換例（左）と評価用画像の提示（右）．左：Chart 5b の色相変換結果（内丸の画像）と P 型色覚での色の見え方（外丸の画像）．数値は色相の変化量（単位は度）．右：元の入力画像と評価用の画像 2 枚を画面上に表示

図 3.5 に示すように，被検者は，原画像を参照しつつ，提示される 2 枚の色相変換画像（を P 型色覚での見えにしたもの）について，よりコントラストが高いと感じる画像を強制選択する．ここで，色相変換画像に加えて原画像も表示するのは，被験者に正解を伝えるためである．図 3.5 の例では，数字「5」が見えることが正解（ディスプレイ上では左の画像が高コントラスト）である．被検者

は、男女 10 名であり、10 名とも N 型色覚であることを石原式色覚検査表により確認した。^{*4} 各被験者は、一つの原画像につき ${}_{24}C_2 = 276$ 回の評価を行った。^{*5} すなわち、色相変換画像について、全ての組み合わせの評価を行った。なお、本実験の実施にあたり、名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科（現・理学研究科）倫理審査委員会の承認を得た（承認番号：2019-NCU-NS-54）。得られた評価については、各被験者の回答について矛盾がないことを一意性の検定 [48, 49] により確認し、被験者間の回答が一致することを一致性の検定 [48] により確認した。評価対象画像の差が甚だしい場合があるので、欠測値のある場合の Thurstone の方法（付録 B.2）により評価の間隔尺度化を行った。各画像についての間隔尺度 \bar{R} は、 χ^2 検定によりその適合性を確認した。図 3.2 に示す 6 枚の各画像について実験を行い、それぞれの \bar{R} を取得した。その結果を図 3.6 に示す。今回採用した色覚検査表は弁別困難色を含んでいるので、色相変換量が 0° 付近では評価値が悪い。色相変換量が正でも負でも、変換の度合が大きくなるにつれて弁別困難色が解消され、評価値が良くなる。色相変換量が $210^\circ (= -150^\circ)$ あたりで（図 2.9 及び図 3.5 から分かるように P 型色覚での見えでは黄色と青色を入れ替える形になり）数字が弁別困難になる。結果として、評価値のグラフは $[0^\circ, 210^\circ]$ と $[225^\circ, 345^\circ]$ で二つの山をもつ。ただし、その形状や評価値のとり範囲（色変換結果のコントラストの大小）は画像ごとにいくらかの違いがある。

3.5 従来指標の問題点

Lu らの指標 \tilde{V}_K の問題点を示すにあたり、まず、 V_K と主観評価値 \bar{R} との違い述べる。^{*6} 例として、Chart 5b に対する P 型色覚での \bar{R} と V_P の値を図 3.7 に示す。また、色変換結果の P 型色覚での見えの例を図 3.8 に示す。 \bar{R} と V_P のグラフの形には二つの違いがある。まず、 90° や 270° 周辺において \bar{R} と V_P が「逆行」している（ \bar{R} では山頂となる部分が、 V_K では折り返されている）ことが挙げられる。例えば、 \bar{R} による評価では、色相の変換量が 240° のときよりも 285° のときの方が良好な画像であるが、 V_P では逆の評価になっている。^{*7} これは出力画像のコントラストが高すぎる（ $\Delta E_{P,ij}^{\text{out}}$ が大きすぎる）ことが原因である。 V_K は、 $\Delta E_K^{\text{out}} = \Delta E_N^{\text{in}}$ のときに最小であり、 ΔE_K^{out} が ΔE_N^{in} を超えて大きくなるにつれて悪化する。もう一つの違いは「山の高さの違い」である。 \bar{R} による評価では $[0^\circ, 210^\circ]$ と $[225^\circ, 345^\circ]$ に二つの山があり、 $[0^\circ, 210^\circ]$ の方が高く（全般的に良い評価と）なっている。一方で、 V_P では山の高さに差がない。^{*8} H を 45° 変換した場合と $315^\circ (= -45^\circ)$ 変換した場合の色変化量は HSL 色空間では同等であり、特に HSL 色空間における明度 L は変化

^{*4} 被験者が N 型色覚である（2 色覚者としてしない）のは、色覚モデルの正確性に関する問題を避けるためである。現状の実験条件は、被験者が見る画像と評価指標の計算に用いる画像が同じである。被験者が 2 色覚者の場合は、2 色覚者は色変換結果を観察する一方で、評価指標では色覚モデルを用いたシミュレーション画像の画素値に基づいて評価値を計算する。その状況で \bar{R} と V にずれがある場合、その原因が「評価指標内で採用している色覚モデルの正確性」と「評価指標の計算式」のどちら（あるいは両方）にあるのかが判然としない。また、 \bar{R} と V が一致している場合も、評価指標内で採用している色覚モデルの正確性と評価指標の計算式の正確性が相殺して一致している可能性がある。

^{*5} 実験画像は図 3.2 の 6 枚であり、一人の被験者は $276 \times 6 = 1656$ 回の評価を行うことになる。1 回の評価を 3 秒で行うとすると、 $3 \times 1656 = 4968$ 秒（約 80 分）を要する。被験者の疲労を考慮し、同日中に行う実験としては画像は 6 枚とするのが妥当と考えた。

^{*6} 本論文における主観評価実験は、文献 [43] での主観評価実験とは異なることを注意しておく。

^{*7} 図 3.8(b), (c) では、(c) の方が高コントラストであり、 \bar{R} の方が妥当であるといえる。

^{*8} V_P は逆行がある（山頂付近が折り返されている）ことを考えた上で、二つの山とその山頂を考えている。

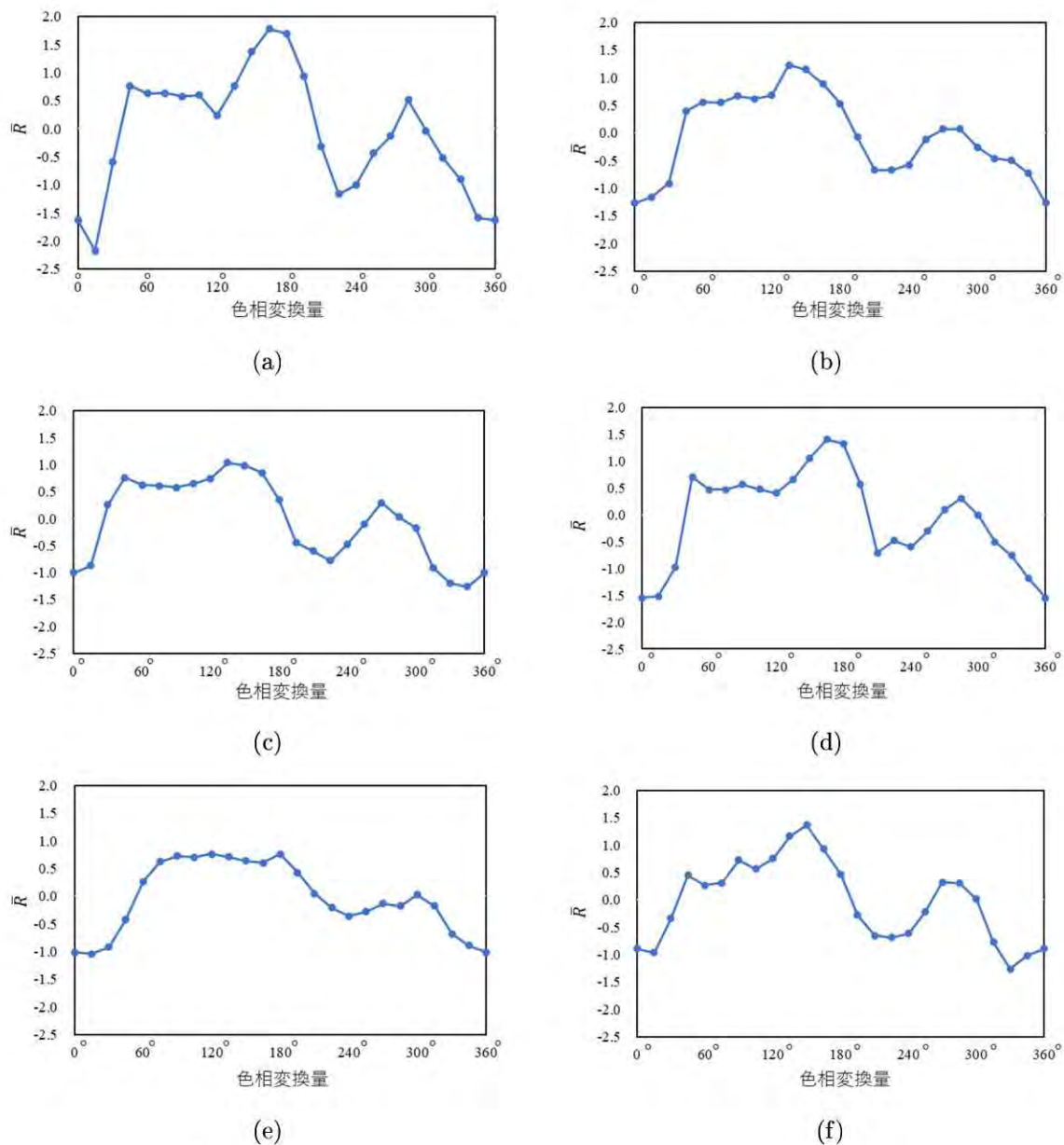


図 3.6 色相変化量と \bar{R} の関係 (a) Chart 5a, (b) Chart 5b, (c) Chart 6, (d) Chart 15, (e) Chart 26, (f) Chart 45

していないが、図 3.8(e), (f) に示したように、ヒトが感じる明度 L^* の変化は同じではない。ヒトは色の違いよりも明度の違いに敏感であり、 L^* の変化が大きい $[0^\circ, 210^\circ]$ の区間の方が高コントラストに感じることを \bar{R} に表れていると考えられる。一方で、 V_P ではそのような傾向は見られない。これは、 V_P では式 (3.4)~(3.6) にあるように、特に L^* 成分を重視して評価するわけではないからである。図 3.8(a), (d) は、この山の高さの問題の実例である。両者の V_P の値は同程度 ((d) の方が高評価) であるが、視覚的には「5」と背景の間に明度差がある (a) の方が高コントラストである。逆行の問題と同様、当然であるが \bar{R} の方が妥当な値となっている。

闇らは、明度成分に注目した評価指標である V_{K,L^*} を提案した。Lu らは、 V_K と V_{K,L^*} を統合し

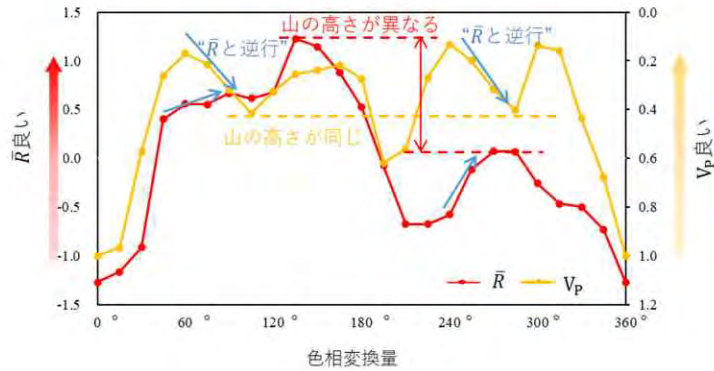


図 3.7 Chart 5b における \bar{R} と V_P の関係 ($(\rho, \tau) = (10, 0.4)$)

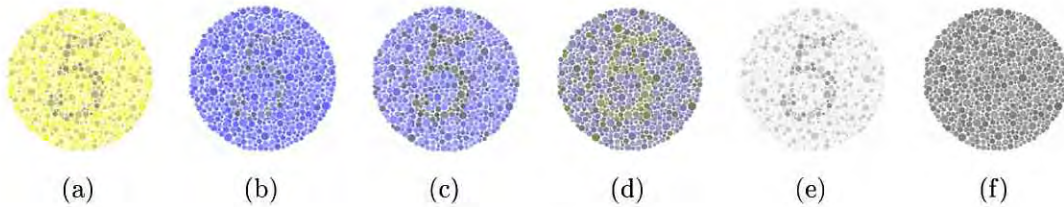


図 3.8 Chart 5b の色変換結果の P 型色覚での見え (a) 変換量 45° ($V_P = 0.261$), (b) 変換量 240° ($V_P = 0.108$), (c) 変換量 285° ($V_P = 0.427$), (d) 変換量 315° ($V_P = 0.158$), (e) (a) の L^* 成分, (f) (d) の L^* 成分

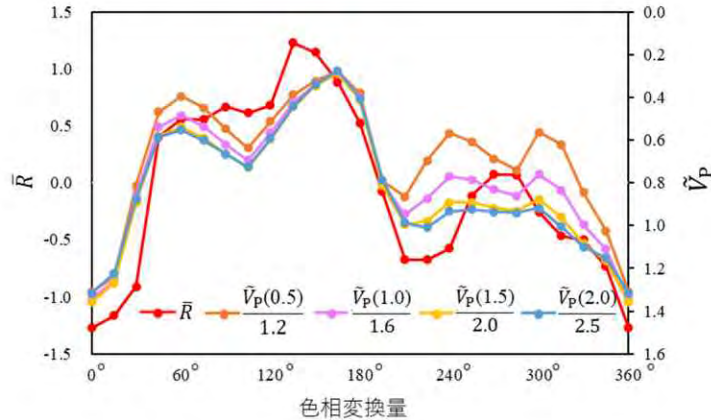


図 3.9 Chart 5b における \bar{R} と \tilde{V}_P の関係 (パラメータは $(\rho, \tau) = (10, 0.4)$ とした。また、 $\tilde{\lambda}$ の値によって \tilde{V}_P の値のとり範囲が変わるので、ここでは凡例に示したように、 $\tilde{\lambda}$ の値に応じて定数で割ったものを示している)

た指標 \tilde{V}_K を提案した。Chart 5b に対する P 型色覚での \bar{R} と \tilde{V}_P の値の例を図 3.9 に示す。 $\tilde{\lambda}$ を大きくするにつれて、左の山に比べて右の山が低くなっている。このように、 \tilde{V}_K では、 V_{K,L^*} を取り込むことで山の高さの違いを改善できているが、逆行の問題は解決されていない。図 3.9 において、右の山では λ_{L^*} を大きくするにつれて逆行が解消していくようにも見えるが、左の山では明らかに逆行が未解決である。本論文では、従来指標の主観評価値との二つの違い（問題点）を、同時に解決する指標を提案する。

第 4 章

提案指標

本章では、カラー画像の K 型色覚での見えにおけるコントラストを定量的に評価する新規な指標 \hat{V}_K [46] を提案する。 \hat{V}_K は、 V_K に二つのパラメータを追加したものである。二つのパラメータは、3.5 節で述べた問題点を解決するために導入したものであり、その値は \hat{V}_K が主観評価（一対比較法の評価値 R ）とよく一致するように定める。以下、4.1 節でコントラスト改善度の評価指標 \hat{V}_K を定義する。4.2 節では \hat{V}_K の計算量について述べる。

4.1 提案指標 \hat{V}_K

\hat{V}_K の定義は、

$$\hat{V}_K(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) = \hat{U}_K^{\text{out}}(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) / \hat{U}_K^{\text{in}}(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) \quad (4.1)$$

である。ここで、

$$\hat{U}_K^{\text{out}}(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) = \frac{1}{|\hat{S}'_K|} \sum_{(i,j) \in \hat{S}'_K} |\hat{\lambda}_E \Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{out}} - \Delta \hat{E}_{N,ij}^{\text{in}}|, \quad (4.2)$$

$$\hat{U}_K^{\text{in}}(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) = \frac{1}{|\hat{S}'_K|} \sum_{(i,j) \in \hat{S}'_K} |\hat{\lambda}_E \Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{in}} - \Delta \hat{E}_{N,ij}^{\text{in}}| \quad (4.3)$$

である。 $\Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{out}}$, $\Delta \hat{E}_{N,ij}^{\text{in}}$, $\Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{in}}$ の定義は

$$\Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{out}} = \sqrt{\hat{\lambda}_{L^*} (L_{K,i}^{\text{out}} - L_{K,j}^{\text{out}})^2 + (a_{K,i}^{\text{out}} - a_{K,j}^{\text{out}})^2 + (b_{K,i}^{\text{out}} - b_{K,j}^{\text{out}})^2}, \quad (4.4)$$

$$\Delta \hat{E}_{N,ij}^{\text{in}} = \sqrt{\hat{\lambda}_{L^*} (L_{N,i}^{\text{in}} - L_{N,j}^{\text{in}})^2 + (a_{N,i}^{\text{in}} - a_{N,j}^{\text{in}})^2 + (b_{N,i}^{\text{in}} - b_{N,j}^{\text{in}})^2}, \quad (4.5)$$

$$\Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{in}} = \sqrt{\hat{\lambda}_{L^*} (L_{K,i}^{\text{in}} - L_{K,j}^{\text{in}})^2 + (a_{K,i}^{\text{in}} - a_{K,j}^{\text{in}})^2 + (b_{K,i}^{\text{in}} - b_{K,j}^{\text{in}})^2} \quad (4.6)$$

である。 $\hat{\lambda}_E$ と $\hat{\lambda}_{L^*}$ はパラメータであり、非負の実数である。 $\hat{\lambda}_E$ は、1 より小さい値にすることで、 $\Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{out}}$ が大きすぎることで悪い評価となることを防止する（逆行の問題を解決する）効果がある。 $\hat{\lambda}_{L^*}$ は、色差の計算において明度差を重視する（ $\hat{\lambda}_{L^*} > 1$ とする）ことで、山の高さの問題を解決

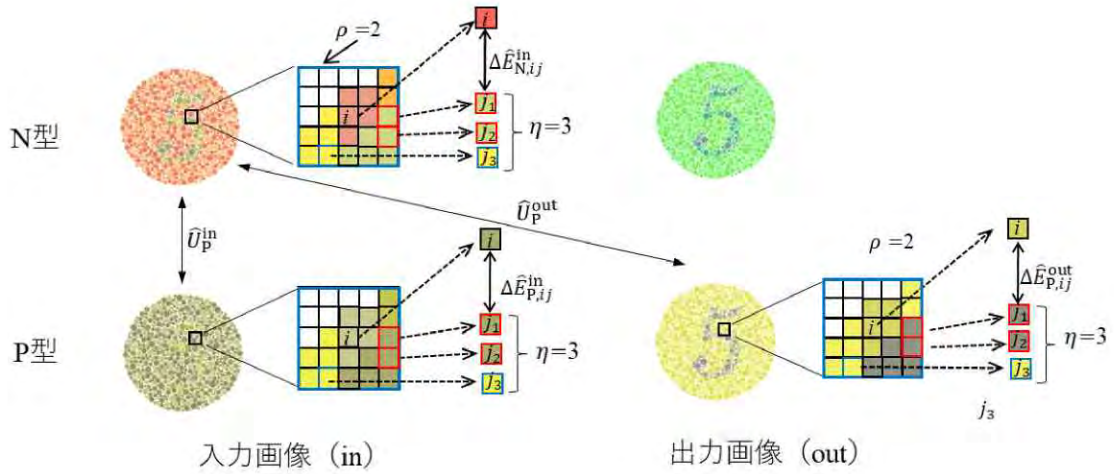


図 4.1 \hat{V}_P の計算

する効果がある.*1

提案指標ではまず、注目画素 i に対し、 $d(i, j) \leq \rho$ である画素のうちで、ランダムに選択した η 個の画素 j を検討対象とする.*2 このうち、K 型色覚で弁別困難な画素対 (i, j) が評価対象となる。弁別困難な画素対条件の定義は

$$\hat{T}_{K,ij} \leq \hat{\tau} \quad (4.7)$$

である。ここで、

$$\hat{T}_{K,ij} = \Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{in}} / \Delta \hat{E}_{N,ij}^{\text{in}} \quad (4.8)$$

である。なお、 $\Delta E_{N,ij}^{\text{in}} = 0$ である場合、その j は評価対象としない。 $\hat{\tau}$ は、 τ と同じ意味のしきい値であり、非負の実数である。式 (4.2) 及び (4.3) における \hat{S}'_K は評価対象画素対の集合であり、 $|\hat{S}'_K|$ はその要素数を表す。 \hat{V}_P の計算の様子 ($\rho = 2, \eta = 3$ とした例) を図 4.1 に示す。画素 i に対し、 $d(i, j) \leq 2$ である画素 j から検討対象となる 3 画素をランダムに選択し、その内で式 (4.7) 及び $\Delta E_{N,ij}^{\text{in}} > 0$ を満たす画素 (赤線で囲まれた画素) が評価対象、すなわち \hat{V}_P の値に寄与する画素となる。

4.2 提案指標 \hat{V}_K の計算量

従来指標 \hat{V}_K では、注目画素 i に対し、 $d(i, j) \leq \rho$ である画素 j の全てが検討対象であり、また評価対象となりうる。そして、近傍範囲が大きくなると計算量も大きくなるという問題がある。図

*1 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差の修正方法として、例えばそれを精緻化した色差である CIE DE2000 [54] を採用することが考えられるが、計算式が複雑である (付録 C)。 \hat{V}_K では式 (4.4)~(4.6) による修正とした。また、 \hat{V}_K は (後で 5 章で示すように) 主観評価結果との対応が良く、上記方針の妥当性を示している。

*2 同じ画素が複数回選択される可能性がある。

3.1 に示したように，青い線の内側の全ての画素が評価対象となる可能性がある．

\tilde{V}_K における検討対象画素対の数 N は（正確には $|\tilde{S}_K|$ であるが）おおよそ

$$N = (2\rho + 1)^2 \times W \times H \quad (4.9)$$

である．*3 ここで， W は画像の幅， H は画像の高さである．提案指標 \hat{V}_K における検討対象画素対の数は

$$|\hat{S}'_K| = \eta \times W \times H \quad (4.10)$$

であり， \tilde{V}_P に比べて約 $\eta/(2\rho + 1)^2$ 倍である． $\eta < (2\rho + 1)^2$ とすれば， \hat{V}_K の計算量を \tilde{V}_K よりも理論的に小さくできる．

*3 注目画素 i が画像の端にある場合， $d(i, j) \leq \rho$ である画素 j の数は $(2\rho + 1)^2$ よりも少なくなる．

第 5 章

実験

実験を通して提案指標の有効性を示すにあたり、まず比較指標を 5.1 節で定義する。次に、比較指標と提案指標のパラメータ設定を 5.2 節で行う。その後、比較指標と提案指標の性能（一対比較法の評価値 \bar{R} との一致度）の比較を 5.3 節で行う。

5.1 比較指標 \tilde{V}'_K

提案指標では検討対象画素（画素 i の対となる画素 j ）はランダムに選ぶが、従来指標 \tilde{V}_K では近傍範囲内にある全ての画素が検討対象画素になるという違いがある。従来指標 \tilde{V}_K における検討対象画素の選択方法を提案手法に合わせたものを「'」をつけて表すこととする。 \tilde{V}_K において、条件 $d(i, j) \leq \rho$ の代わりにランダムサンプリングを適用した画素対集合を S'_K で表し、そのときの評価値を \tilde{V}'_K で表す。

以下では、 \tilde{V}'_K を比較手法と呼ぶ。

Chart 5b に対する色相変化量と評価値 (\tilde{V}_P 及び \tilde{V}'_P) の関係を図 5.1 に示す。ここで、パラメータ設定は $(\rho, \tau, \lambda, \eta) = (10, 0.4, 1.8, 20)$ としている。^{*1} また、図 5.1 中では、 $|\tilde{V}_P - \tilde{V}'_P|/\tilde{V}_P$ として計算される誤差比 (error ratio : ER) も示している。図 5.1 に示すように、 \tilde{V}_P と \tilde{V}'_P の評価値 (グラフ形状) はほぼ同じである。つまり、 \tilde{V}_P と \tilde{V}'_P は同等の性能を持つ。

5.2 比較手法及び提案手法のパラメータ設定

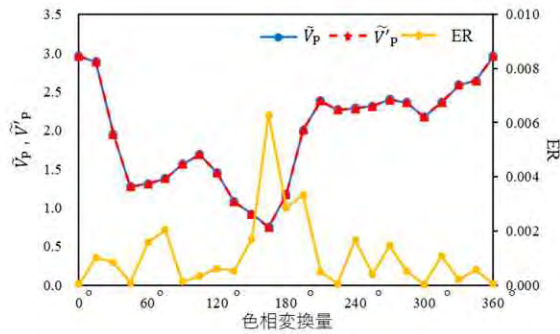
実験には図 3.2 に示した 6 枚の画像を用いた。

5.2.1 評価対象範囲 ρ の設定

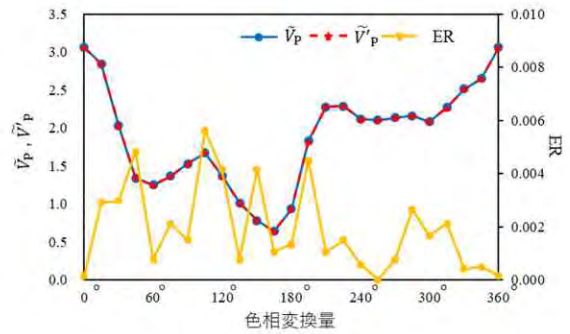
比較指標と提案指標に共通のパラメータとして、評価対象範囲 ρ (と選択回数 η) がある。本節では ρ の値について、 $\tau = 0.4$ 、 $\eta = 20$ と設定した \tilde{V}'_P を用いて検討する。^{*2}

^{*1} この設定の妥当性については 5.2 節で述べる。

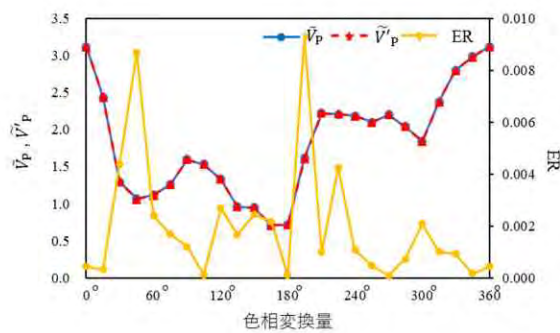
^{*2} 提案指標の場合、(値を仮定する) パラメータ数が多いので議論が難しい。 τ と η の影響 (ここでの設定が妥当であること) については、それぞれ 5.2.2 節と 5.2.3 節で述べる。



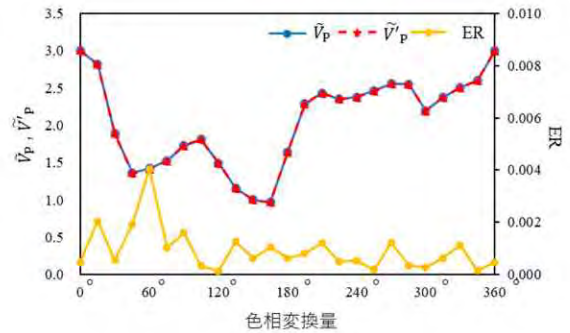
(a)



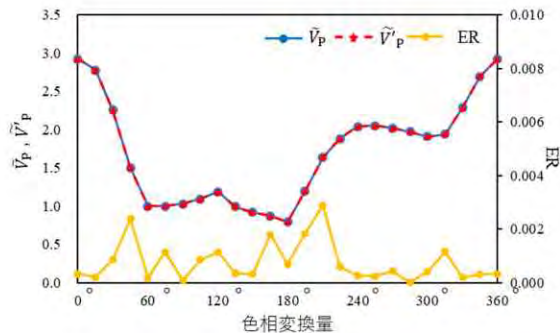
(b)



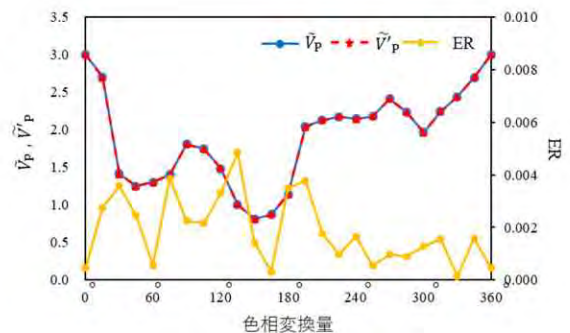
(c)



(d)



(e)



(f)

図 5.1 6 枚の実験画像に対する \bar{V}_p と \bar{V}'_p の関係 ($(\rho, \tau, \tilde{\lambda}, \eta) = (10, 0.4, 1.8, 20)$) (a) Chart 5a, (b) Chart 5b, (c) Chart 6, (d) Chart 15, (e) Chart 26, (f) Chart 45

まず、6 枚の実験画像に対する \bar{R} と \bar{V}'_p の相関係数 r の平均値 $\langle r \rangle$ を計算する方法を説明する。ある 1 枚の画像に対する \bar{R} と \bar{V}'_p の相関係数 r の計算方法を図 5.2 に示す。6 枚の画像に対する r の平均値が平均相関係数 $\langle r \rangle$ である (表 5.1)。

$\rho = 5, 10, 15, 20$ としたときの \bar{R} と \bar{V}'_p の平均相関係数 $\langle r \rangle$ を図 5.3 に示す。 $\tilde{\lambda}$ の値に関わらず、 ρ が大きくなるにしたがって、 $\langle r \rangle$ が小さくなる (絶対値が大きくなる) ことが分かる。 $\rho \geq 10$ では $\langle r \rangle$ の変化が小さいので、今回の 6 枚の実験画像については、計算量を考慮して $\rho = 10$ を採用する。

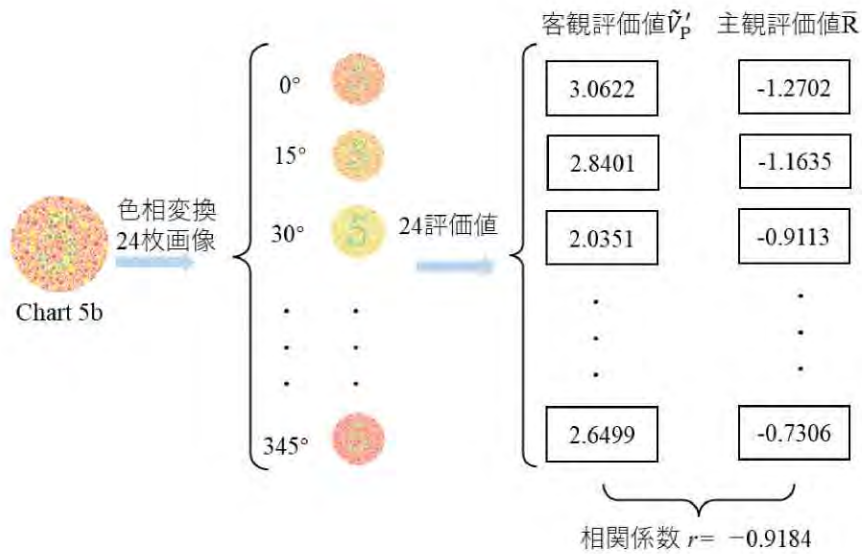
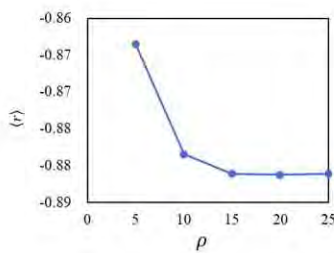


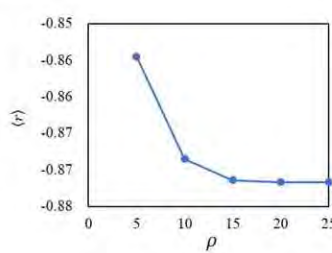
図 5.2 Chart 5b における \bar{R} と \tilde{V}_p の相関係数 r の計算方法 ($(\rho, \tau, \bar{\lambda}, \eta) = (10, 0.4, 1.8, 20)$)

表 5.1 6 枚の実験画像に対する \bar{R} と \tilde{V}_p の相関係数 r ($(\rho, \tau, \bar{\lambda}, \eta) = (10, 0.4, 1.8, 20)$)

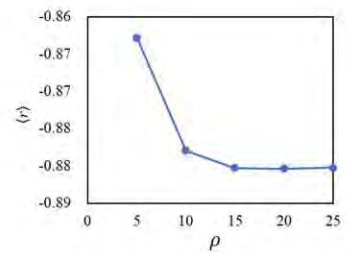
画像	r
Chart5a	-0.8792
Chart5b	-0.9184
Chart6	-0.8951
Chart15	-0.8151
Chart26	-0.9460
Chart45	-0.8204
平均相関係数 $\langle r \rangle$	-0.8790



(a)



(b)



(c)

図 5.3 \bar{R} と \tilde{V}_p の平均相関係数 $\langle r \rangle$ ($\tau = 0.4, \eta = 20$) (a) $\bar{\lambda} = 1.2$, (b) $\bar{\lambda} = 1.8$, (c) $\bar{\lambda} = 2.4$

5.2.2 しきい値 $\tau, \hat{\tau}$ の設定

τ と $\hat{\tau}$ は、対象としている画素対が弁別困難色であるかどうかを判定するしきい値である。本節では $\rho = 10, \eta = 1$ と設定し、^{*3} τ と $\hat{\tau}$ の設定が \tilde{S}_p と \hat{S}_p に与える影響を検討する。

^{*3} $\rho = 10$ は 5.2.1 節で定めた値である。 $\eta = 1$ とするのは、図 5.4~図 5.6 を作成するためである。

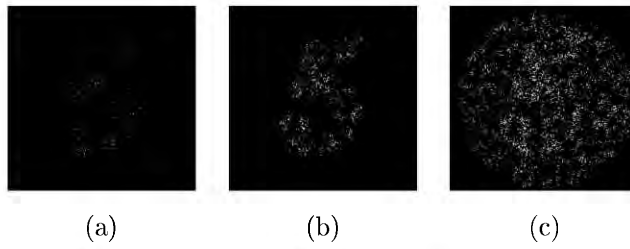


図 5.4 Chart 5b の \tilde{S}'_P ($\rho = 10$, $\eta = 1$, $\bar{\lambda} = 1.8$) (a) $\tau = 0.2$, (b) $\tau = 0.4$, (c) $\tau = 0.6$

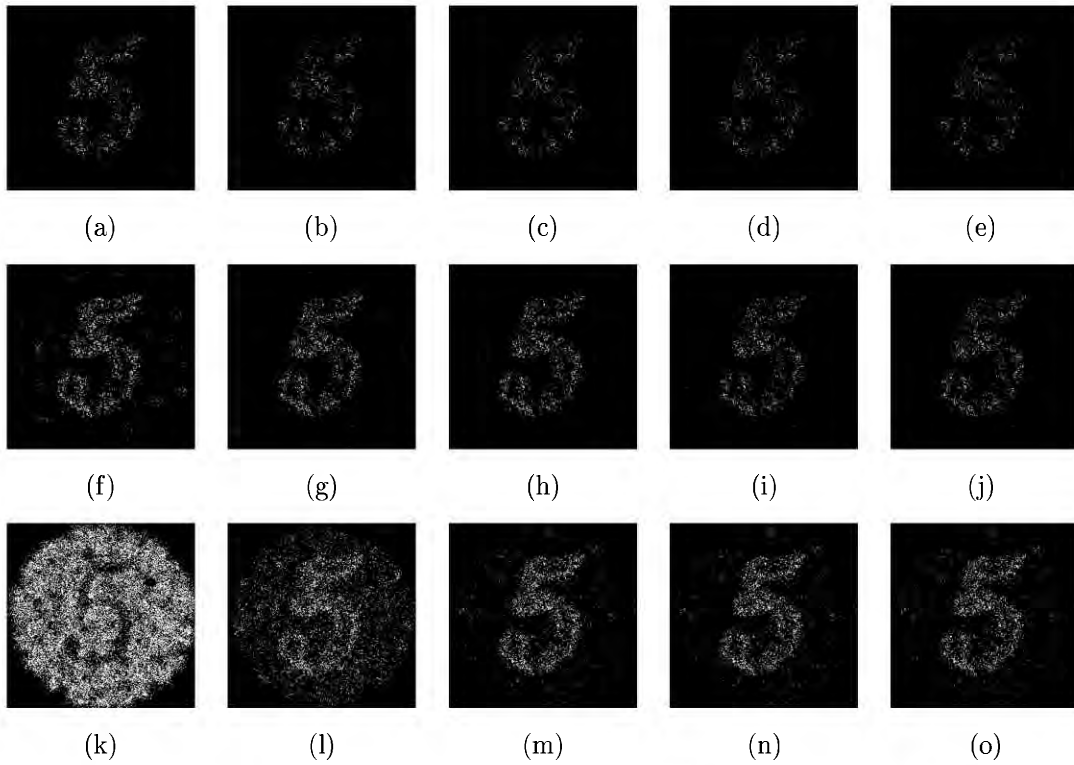


図 5.5 Chart 5b の \tilde{S}'_P ($\rho = 10$, $\eta = 1$) (a) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.5, 2)$, (b) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.5, 4)$, (c) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.5, 6)$, (d) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.5, 8)$, (e) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.5, 10)$, (f) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.7, 2)$, (g) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.7, 4)$, (h) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.7, 6)$, (i) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.7, 8)$, (j) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.7, 10)$, (k) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.9, 2)$, (l) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.9, 4)$, (m) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.9, 6)$, (n) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.9, 8)$, (o) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.9, 10)$

図 5.4 は、Chart 5b に対し、比較指標で弁別困難色と判定される画素の分布を示したものである。この図では、画素対 (i, j) が \tilde{S}'_P にあるときに画素 i を白にしている。図 5.4(a) では、弁別困難色の未検出が多い。一方、図 5.4(c) では、弁別困難色の誤検出がある。図 5.4(b) は弁別識別色を適切に検出しているといえる。すなわち、 τ は 0.4 とするのが妥当である。

図 5.4 と同様、提案指標で弁別困難色と判定される画素の分布を示したのが図 5.5 である。 \hat{T}_K の計算 (式 (4.8)) では、 λ_{L^*} を含む $\Delta \hat{E}_{K,ij}^{\text{in}}$ と $\Delta \hat{E}_{N,ij}^{\text{in}}$ が使用される。図 5.5 に示すように、 $\hat{\lambda}_{L^*}$ の影響は ($\hat{\lambda}_{L^*} = 6$ のあたりでは) $\hat{\tau}$ の影響より小さい。例えば、図 5.5(g)~(i) の弁別困難色の分布は似ており、 $\hat{\lambda}_{L^*}$ の影響が小さいことが分かる。以下の (5.2.3 節までの) 実験では $\hat{\lambda}_{L^*}$ を 6 とした。

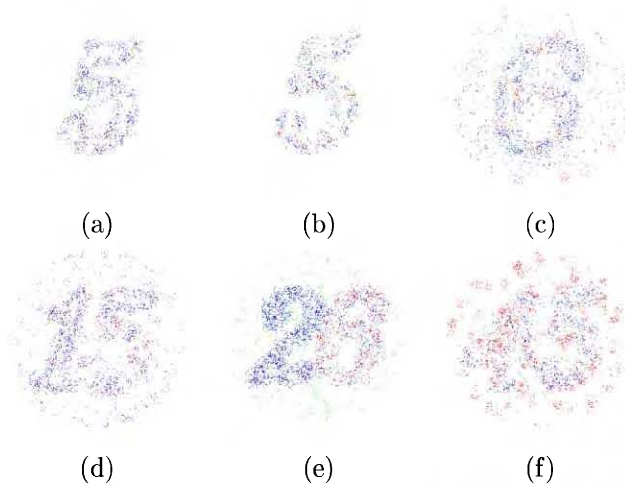


図 5.6 \tilde{S}_p と \hat{S}_p の要素の比較（青，緑，赤の画素は，それぞれ $\tilde{S}_p \cap \hat{S}_p$ ， $\tilde{S}_p \cap \overline{\hat{S}_p}$ ， $\overline{\tilde{S}_p} \cap \hat{S}_p$ に対応する）(a) Chart 5a, (b) Chart 5b, (c) Chart 6, (d) Chart 15, (e) Chart 26, (f) Chart 45

また，図 5.5(c), (h), (m) から， $\hat{\tau}$ は 0.7 が適当といえる。

図 5.6 は， \tilde{S}_p と \hat{S}_p に含まれる画素対の違いを可視化したものである．ここでは，便宜的に図 5.4 と図 5.5 における白画素をそれぞれ \tilde{S}_p と \hat{S}_p の要素と考えた上で， $\tilde{S}_p \cap \hat{S}_p$ ， $\tilde{S}_p \cap \overline{\hat{S}_p}$ ， $\overline{\tilde{S}_p} \cap \hat{S}_p$ を色分けして表示している．パラメータ値は $\rho = 10$ ， $\tau = 0.4$ ， $\hat{\tau} = 0.7$ ， $\lambda_{L^*} = 6$ ， $\eta = 1$ とした． \tilde{S}_p と \hat{S}_p の違いは，Chart 26 と Chart 45 で特に明瞭である．Chart 26 の“6”という文字は \hat{S}_p ではよく検出されているが， \tilde{S}_p では未検出画素が多い．この例では \tilde{S}_p より \hat{S}_p の方が優れているといえる．一方，Chart 45 の文字以外の領域には，赤色画素が存在する．これは \hat{S}_p に過剰な検出があるということであり， \hat{V}_p の計算に悪影響を及ぼす可能性がある．つまり， \hat{S}_p の方が良い場合と悪い場合があり，その意味において \hat{S}_p と \tilde{S}_p の弁別困難色の検出能力は同等であるといえる。

5.2.3 選択回数 η の設定

提案指標を通じて η の設定について検討する．*4 実験環境の概要を表 5.2 に示す．Chart 5b に対し，24 種類の色相変換を行ったときの \hat{V}_p の計算時間を表 5.3 に示す．比較のために，ランダムサンプリングが採用されていない画素対集合 \hat{S}_K を

$$\hat{S}_K = \{(i, j) | d(i, j) \leq \rho, T_{K,ij} \leq \hat{\tau}\} \quad (5.1)$$

で定義する．本節では， \hat{S}_p と \hat{S}'_p の共通パラメータは $\rho = 10$ ， $\hat{\tau} = 0.7$ ， $\hat{\lambda}_{L^*} = 6$ とする．この場合，（画像端付近を除いた）ある i に対して j として $21 \times 21 = 441$ 個の画素が存在する．表 5.3 に示したように， $\eta = 220$ とした \hat{S}'_p を用いた場合の計算時間は，ランダムサンプリングが採用されていない \hat{S}_p を用いたときとおおよそ同じである．これは， \hat{S}'_p では乱数生成の時間が必要だからである．以下の実験では，ランダムサンプリングの効果がある $\eta \leq 220$ の場合を示す．

*4 従来指標 \bar{V}_K には η がなく，提案指標との比較のために η を導入したのが比較指標 \bar{V}_K^{η} なので， η の検討は提案指標を用いて行う．

表 5.2 実験環境

中央処理装置	Intel® Core™ i7-8700 (3.2 GHz)
Main memory	8 GB
Operating system	Windows 10 Pro 64bit
Programming language	C

表 5.3 Chart 5 の 24 の色相変換結果に対する \hat{V}_P の計算時間

η	1	2	5	10	20	50	110	220	440	サンプリングなし ($\rho = 10$)
時間 (s)	2.3	2.5	3.1	4.3	7.0	13.3	27.3	52.5	100.8	53.2

図 5.7 は、 \hat{S}'_P と \hat{S}_P の要素の正規化ヒストグラム間の Hellinger 距離 (Hellinger distance : HD) を示したもので、 \hat{S}'_P と \hat{S}_P の要素の正規化ヒストグラムを比較したものである。距離は $d_H(\hat{S}'_P, \hat{S}_P)$ で表される。なお、図 5.7 は平均 HD $\langle d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P) \rangle$ を示しており、その定義は

$$\langle d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P) \rangle = \frac{1}{15} \sum_{t=1}^{15} d_H(\hat{S}_P^{(t)}, \hat{S}'_P) \quad (5.2)$$

である。^{*5} ここで、 $d_H(\hat{S}_P^{(t)}, \hat{S}'_P)$ は t 番目に計算された $d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P)$ である。図 5.7 に示すように、HD の変化は η が大きくなるにつれて小さくなる。Chart 5b について、 $\langle d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P) \rangle$ と \hat{V}_P の平均標準偏差 (average standard deviation : ASTD) の関係を示したのが図 5.8 である。 \hat{V}_K の ASTD $\langle \sigma(\hat{V}_K) \rangle$ の定義は

$$\langle \sigma(\hat{V}_K) \rangle = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{m=1}^{24} v(\hat{V}_{K,m})} \quad (5.3)$$

である。ここで、

$$v(\hat{V}_{K,m}) = \frac{1}{15} \sum_{t=1}^{15} (\hat{V}_{K,m}^{(t)} - \langle \hat{V}_{K,m} \rangle)^2, \quad (5.4)$$

$$\langle \hat{V}_{K,m} \rangle = \frac{1}{15} \sum_{t=1}^{15} \hat{V}_{K,m}^{(t)} \quad (5.5)$$

である。ここで、 $\hat{V}_{K,m}^{(t)}$ は t 番目に計算された $\hat{V}_{K,m}$ である。本論文では、Chart 5b の変換結果は 24 個ある。 $\hat{V}_{K,m}$ は m 個目の変換結果で、その色相変化量は $15^\circ \times (m - 1)$ である。^{*6} 図 5.7 と図 5.8 を見ると、 η が 20 のとき、HD は約 0.01、ASTD は約 0.001 である。この場合、 \hat{V}_P は小数第 3 位まで十分な精度であるといえる。Chart 5b の $\langle \hat{V}_{P,m} \rangle$ の値を図 5.9 に示す。 $\langle \hat{V}_{P,m} \rangle$ のとる値 (約

^{*5} ランダムサンプリングの影響を軽減するために、本実験では $d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P)$ を 15 回計算した。

^{*6} $m = 1$ のとき、色相変化量は 0° であり、この場合、出力画像は原画像と同一である。

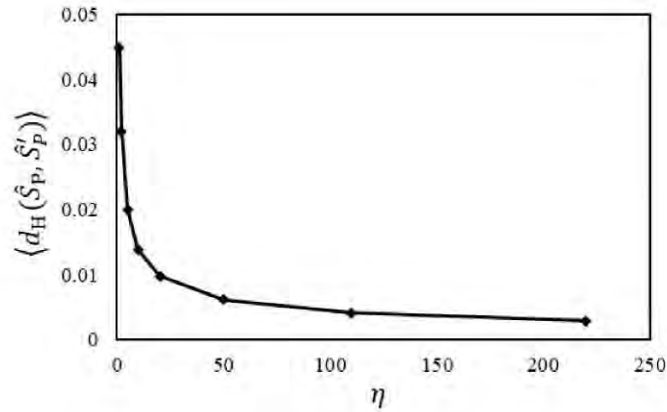


図 5.7 Chart 5b における η と $\langle d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P) \rangle$ の関係

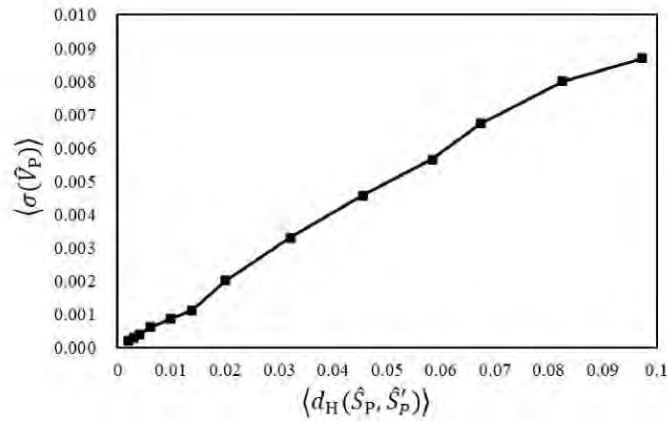


図 5.8 Chart 5b における $\langle d_H(\hat{S}_P, \hat{S}'_P) \rangle$ と $\langle \sigma(\hat{V}_P) \rangle$ の関係

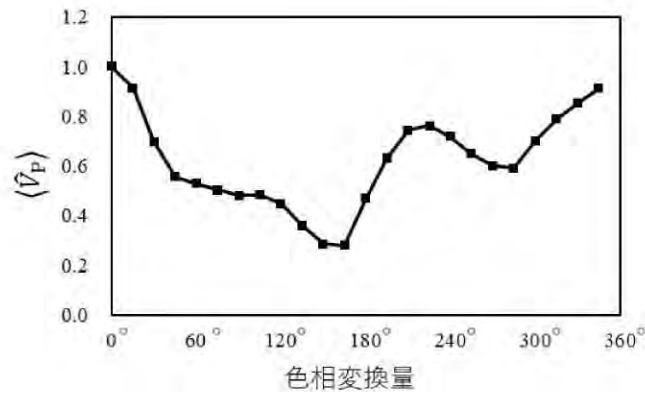


図 5.9 Chart 5b における $\langle \hat{V}_P \rangle$ の値

0.2~1.0) と比較して, η が 20 のときの ASTD が十分小さい値であることが分かる. この場合の計算時間は約 7 秒で, \hat{S}_P を採用した場合の約 7 分の 1 である. ランダムサンプリングは, 計算時間の大幅な短縮と \hat{V}_K の十分な精度を両立する. 以下の実験では, η を 20 とする.

5.2.4 $\tilde{\lambda}$ と $\hat{\lambda}_E$ 及び $\hat{\lambda}_{L^*}$ の設定

以下では、 \tilde{V}'_P と \hat{V}_P は、式 (5.5) のようにして求めた 15 回の平均値を意味する。表 5.4 に 6 枚の実験画像に対する \bar{R} と \tilde{V}'_P の相関係数 r を示す。 $\langle r \rangle$ は、6 枚の実験画像の r の平均値である。表 5.4 中の下線は r の最適値を意味し、小数第 3 位までで区別がつかないときは小数第 4 位により最適値を判断している。図 3.9 に示したように、 V_K では適度な $\tilde{\lambda}$ とすることで山の高さの問題が改善される。 $\langle r \rangle$ より、 $\tilde{\lambda}$ の平均的な最適値は 1.8 であるといえる。^{*7} Chart 5a, Chart 5b, Chart 15 では、 $\tilde{\lambda}$ について平均的な最適値と画像ごとの最適値が一致している。Chart 26 では $\tilde{\lambda}$ の最適値が 1.4 であり、平均的な最適値から少しずれている。それに比べると、Chart 6 と Chart 45 では、画像ごとの $\tilde{\lambda}$ の最適値が 1.8 から大きく異なる。ただし、 r の値はそれほど大きくは変わらない。本実験で用いた画像については、比較手法の $\tilde{\lambda}$ は画像によらず 1.8 としてよいといえる。(現状では画像ごとに自動でパラメータを調整する方法が存在せず) 実際の場面では共通のパラメータを用いるしかないので、^{*8} その意味でも平均的な最適値を用いて検討するのは妥当である。

表 5.5 に 6 枚の実験画像に対する \bar{R} と \hat{V}_P の $\langle r \rangle$ を示す。平均的に適切な $\hat{\lambda}_{L^*}$ は 6 であることが理解できる。 $\hat{\lambda}_E$ については、(小数第 3 位まででは一意に最適値が決まらないが、小数第 4 位に

表 5.4 6 枚の実験画像に対する \bar{R} と \tilde{V}'_P の r

画像 $\tilde{\lambda}$	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	...	4.0	5.0	6.0
Chart 5a	-0.873	-0.877	-0.879	<u>-0.879</u>	-0.878	-0.877	...	-0.861	-0.855	-0.849
Chart 5b	-0.918	-0.918	-0.918	<u>-0.918</u>	-0.915	-0.913	...	-0.893	-0.885	-0.879
Chart 6	-0.873	-0.884	-0.891	-0.895	-0.899	-0.901	...	-0.908	<u>-0.909</u>	-0.909
Chart 15	-0.811	-0.814	-0.814	<u>-0.815</u>	-0.813	-0.811	...	-0.792	-0.785	-0.779
Chart 26	-0.946	<u>-0.948</u>	-0.947	-0.946	-0.943	-0.941	...	-0.918	-0.910	-0.903
Chart 45	-0.791	-0.804	-0.813	-0.820	-0.822	-0.826	...	-0.836	<u>-0.837</u>	-0.837
$\langle r \rangle$	-0.869	-0.874	-0.877	<u>-0.879</u>	-0.878	-0.878	...	-0.868	-0.863	-0.859

表 5.5 6 枚の実験画像に対する \bar{R} と \hat{V}_P の $\langle r \rangle$

$\hat{\lambda}_E \setminus \hat{\lambda}_{L^*}$	2	4	6	8	10
0.2	-0.760	-0.919	-0.936	-0.930	-0.926
0.3	-0.761	-0.919	-0.936	-0.931	-0.926
0.4	-0.761	-0.919	<u>-0.936</u>	-0.931	-0.926
0.5	-0.761	-0.915	-0.923	-0.887	-0.841
0.6	-0.755	-0.872	-0.830	-0.716	-0.578

^{*7} 3.3 節で説明したように、従来指標の $\tilde{\lambda}$ は、 \bar{R} とスケール調整した \tilde{V}'_P の誤差が最小になるように決めていた。本論文では、(この後述べる) 提案手法と同様、 \bar{R} と \tilde{V}'_P の相関係数 r で決める。

^{*8} 本実験において画像ごとに最適な $\tilde{\lambda}$ を求めることができるのは、 \bar{R} との比較ができるからである。

表 5.6 Chart 5b における \bar{R} と \hat{V}_P の r

$\hat{\lambda}_E \setminus \hat{\lambda}_{L^*}$	2	4	6	8	10
0.2	-0.855	-0.952	-0.951	-0.935	-0.925
0.3	-0.856	-0.951	-0.952	-0.935	-0.926
0.4	-0.856	-0.950	-0.952	-0.939	-0.935
0.5	-0.856	-0.951	<u>-0.956</u>	-0.905	-0.847
0.6	-0.855	-0.930	-0.857	-0.661	-0.483

表 5.7 Chart 45 における \bar{R} と \hat{V}_P の r

$\hat{\lambda}_E \setminus \hat{\lambda}_{L^*}$	4	6	8	10	12	14
0.1	-0.911	-0.929	-0.932	-0.927	-0.932	-0.925
0.2	-0.911	-0.928	-0.931	-0.927	<u>-0.932</u>	-0.925
0.3	-0.910	-0.928	-0.932	-0.927	-0.932	-0.927
0.4	-0.911	-0.928	-0.930	-0.918	-0.916	-0.885
0.5	-0.904	-0.889	-0.834	-0.772	-0.709	-0.628

基づいて) 今回は $(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.4, 6)$ を平均的な最適値と設定した. 個別の例として, Chart 5b と Chart 45 に対する \bar{R} と \hat{V}_P の r をそれぞれ表 5.6, 表 5.7 に示す. Chart 5b の最適パラメータ値は $(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.5, 6)$ であり, 平均的な最適値に近い. 一方で, Chart 45 の最適パラメータ値は $(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.2, 12)$ であり, 平均的な最適値から少し離れている. ただし, これは r の小数第 4 位までみて最適値を判断したからであり, 小数第 3 位までであれば $(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.3, 8)$ としても r の値は変わらない. 提案指標で λ_{L^*} を大きな値にした場合, 式 (4.4)~(4.6) から分かるように, $\Delta \hat{E}$ の値が大きくなる. 特に, 本実験では $\Delta \hat{E}^{\text{out}}$ が大きくなり, 逆行の問題が顕著になる. その際, $\hat{\lambda}_E$ を小さな値にすれば逆行の問題が解決する. すなわち, λ_{L^*} を大きくするにつれて $\hat{\lambda}_E$ を小さくするのが良い設定となる. 実際, 表 5.7 でもその傾向が見られる. 表 5.5 で見たように, $\hat{\lambda}_{L^*}$ は平均的には 6 とするのが良いが, Chart 45 で $\hat{\lambda}_{L^*} = 12$ が最適になるのは, 弁別困難色の判定の正確性に原因があると考えられる. 提案指標において, 弁別困難色の判定には λ_{L^*} が影響する. 図 5.6(f) に示したように, $\rho = 10$, $\hat{\tau} = 0.7$, $\hat{\lambda}_{L^*} = 6$ とした場合は Chart 45 の背景部分も評価対象画素となる. Chart 45 の \hat{S}'_P の例を図 5.10 に示す. $\hat{\lambda}_{L^*}$ が 6 よりも 12 のときの方が, 背景部分の評価対象画素対が減少している. すなわち, 主観評価時に注目している画素対に近く, \bar{R} と \hat{V}_P の r が良い値になると考えられる.

画像ごとの最適な $\hat{\lambda}_E$, $\hat{\lambda}_{L^*}$ の値を表 5.8 に示す. 表 5.8 において, 「 r の差」は, 「平均的な最適値を用いたとき」と「画像ごとの最適値を用いたとき」の r の差である. 例えば Chart 5b では, 表 5.6 より, 平均的な最適値を用いたときの r は -0.952 , 画像ごとの最適値を用いたときの r は -0.956 であり, その差は 0.004 である. 他の画像についても, 平均的な最適値を用いたときと画像ごとの最適値を用いたときで r の値に大きな差はない.

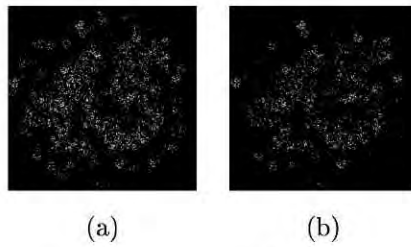


図 5.10 Chart 45 の \hat{S}_P^t ($\rho = 10, \eta = 1$) (a) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.7, 6)$, (b) $(\hat{\tau}, \hat{\lambda}_{L^*}) = (0.7, 12)$

表 5.8 各画像に対する $\hat{\lambda}_E$ と $\hat{\lambda}_{L^*}$ の最適値

画像	$\hat{\lambda}_E$	$\hat{\lambda}_{L^*}$	r の差
Chart 5a	0.4	6	0
Chart 5b	0.5	6	0.004
Chart 6	0.4	8	0.005
Chart 15	0.3	10	0.003
Chart 26	0.3	4	0.002
Chart 45	0.2	12	0.004

Chart 5b を例に, $\hat{\lambda}_E$ と $\hat{\lambda}_{L^*}$ の効果を示す. まず, λ_E の効果を図 5.11 に示す. 図 5.11 は, $\lambda_{L^*} = 6$ とし, λ_E を変化させた場合の \hat{V}_P^\dagger を示している. \hat{V}_K^\dagger は \hat{V}_K をスケール調整した値であり, その定義は

$$\hat{V}_{K,m}^\dagger(\hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_{L^*}) = \frac{\hat{V}_{K,m} - \langle \hat{V}_K \rangle}{\max(\hat{V}_K) - \min(\hat{V}_K)}, \quad (5.6)$$

$$\langle \hat{V}_K \rangle = \frac{1}{24} \sum_{m=1}^{24} \hat{V}_{K,m} \quad (5.7)$$

である. $\max(\hat{V}_K)$ と $\min(\hat{V}_K)$ はそれぞれ $\hat{V}_{K,m}$ の最大値と最小値である. スケール調整は, 一つの図の中で \bar{R} と $\hat{\lambda}$ をさまざまに変更した \hat{V}_P を比較するために行っているだけであり, グラフの形状 (や後で示す回帰直線からのばらつき) には影響を与えない. 図 5.11 より, $\hat{\lambda}_E$ の値によって, \hat{V}_P^\dagger のグラフの形状が変化することが分かる. 特に $[120^\circ, 180^\circ]$ のあたりにおいて, $\hat{\lambda}_E$ が小さくなるにつれて \bar{R} との逆行が解消されていることが分かる. 図 5.11 に対応して, \bar{R} と \hat{V}_P^\dagger の散布図を図 5.12 に示す. 図 5.12 には回帰直線と決定係数 R^2 も示している. 図 5.12 から分かるように, $\hat{\lambda}_E = 0.5$ とした場合 (図 5.12(b)) に回帰直線からのばらつきが小さく, (r から分かっていたことではあるが) \hat{V}_P^\dagger のグラフの形状が \bar{R} に最も近い.*9

図 5.13 は, Chart 5b について, $\hat{\lambda}_E = 0.5$ として $\hat{\lambda}_{L^*}$ を変化させたときの \hat{V}_P^\dagger を示したものである. 図 5.11 の場合と異なり, 図 5.13 では $\hat{\lambda}_L$ の値によって評価対象画素対 (弁別困難色と判定され

*9 図 5.11 で $\hat{\lambda}_E = 0.4$ の場合を掲載しなかったのは, $\hat{\lambda}_E = 0.5$ の場合とグラフがほぼ一致して見にくいからである. 表 5.6 に示されているように, 両者は r が 0.004 しか変わらず, 差を目視することが難しい.

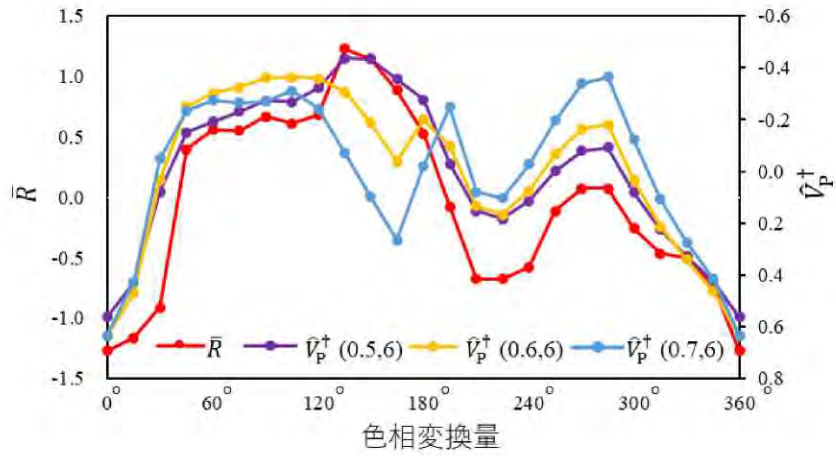


図 5.11 \hat{V}_P における λ_E の効果 (実験画像は Chart 5b)

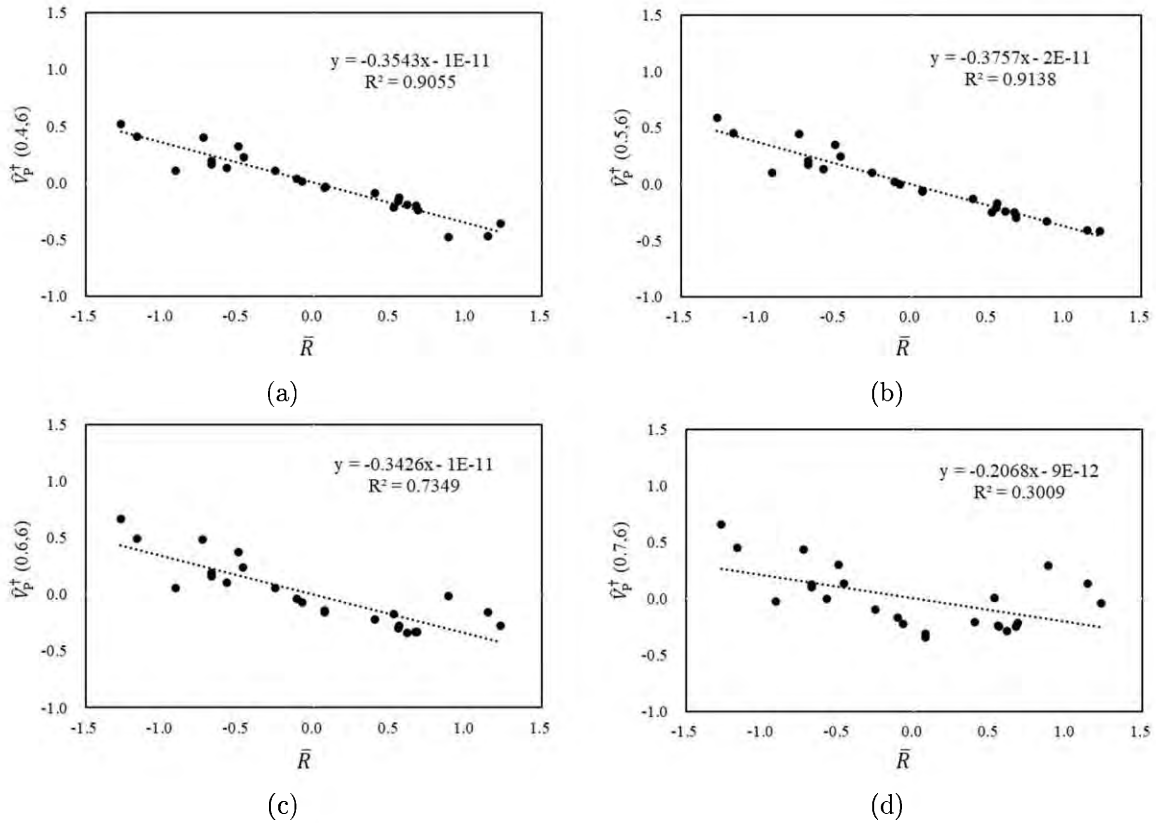


図 5.12 Chart 5b における \bar{R} と \hat{V}_P の散布図 (a) $\hat{V}_P^+(0.4, 6)$, (b) $\hat{V}_P^+(0.5, 6)$, (c) $\hat{V}_P^+(0.6, 6)$, (d) $\hat{V}_P^+(0.7, 6)$

る画素対) が変化することに注意が必要である。しかし図 5.5 にしたように、 $\hat{\lambda}_{L^*} = 4, 6, 8$ のとき、 $\hat{\lambda}_{L^*}$ の影響は $\hat{\tau}$ より小さい。図 5.5(g)~(i) はほぼ同じである。すなわち、 $\hat{\lambda}_{L^*}$ の変化が評価対象画素対に与える影響は小さい。図 5.13 では、 $\hat{\lambda}_{L^*}$ の値が大きくなるにつれて、 $[15^\circ, 75^\circ]$ では山が高くなり、 $[240^\circ, 345^\circ]$ では山が低くなっている。すなわち、二つの山の高さがの差が広がることが分

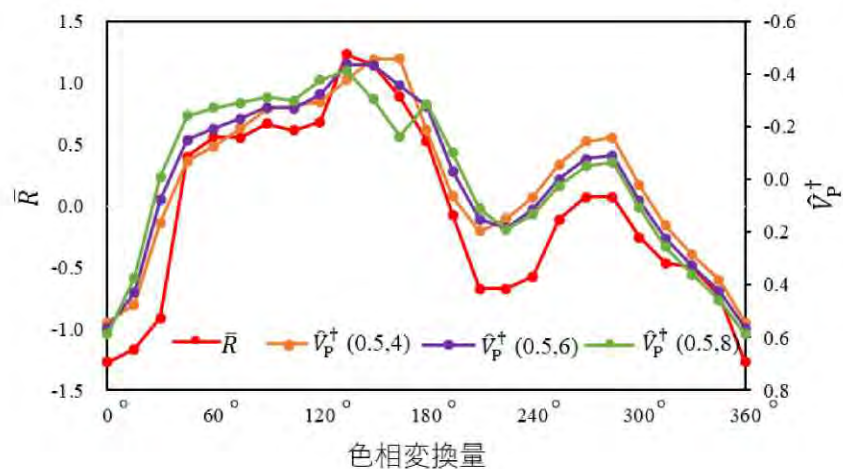


図 5.13 \hat{V}_P における λ_L^* の効果 (実験画像は Chart 5b)

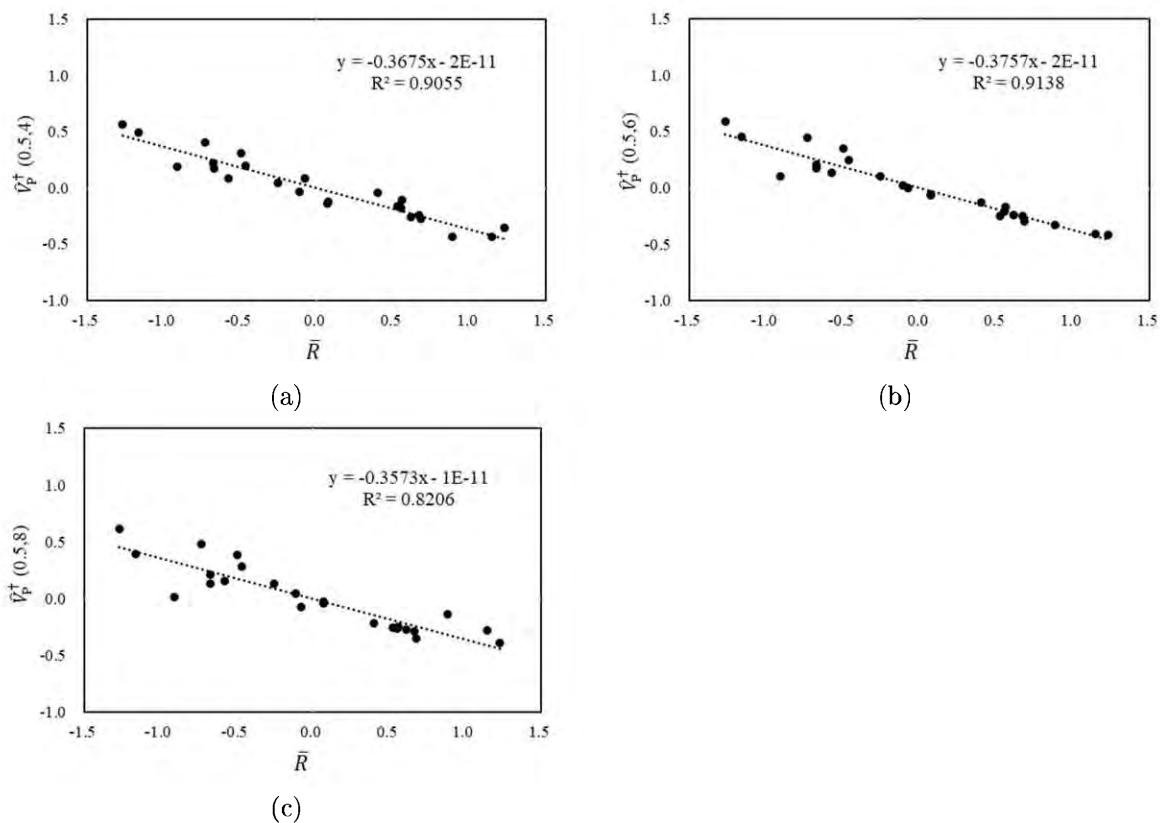


図 5.14 Chart 5b における \bar{R} と \hat{V}_P の散布図 (a) $\hat{V}_P^+(0.5,4)$, (b) $\hat{V}_P^+(0.5,6)$, (c) $\hat{V}_P^+(0.5,8)$

かる。図 5.13 に対応して、 \bar{R} と \hat{V}_P の散布図を図 5.14 に示す。図 5.14 から分かるように、 $\hat{\lambda}_L = 6$ とした場合に回帰直線からのばらつきが小さく、 \hat{V}_P のグラフの形状が最も \bar{R} に近い。

5.3 \tilde{V}'_P と \hat{V}_P の評価性能の比較

本論文の実験では、 \tilde{V}'_P と \hat{V}_P を比較するため、 \tilde{V}'_P に η を導入し、 \tilde{V}'_P とした。5.2 節で述べたように、各手法の平均的な最適パラメータは $(\rho, \tau, \tilde{\lambda}, \eta) = (10, 0.4, 1.8, 20)$ 及び $(\rho, \hat{\tau}, \hat{\lambda}_E, \hat{\lambda}_L^*, \eta) = (10, 0.7, 0.4, 6, 20)$ と決定した。各画像の \bar{R} と評価指標 (\tilde{V}'_P 及び \hat{V}_P) の r を表 5.9 に示す。一例として、Chart 5b について、色相の変換量と評価値の関係 (グラフの形状) を図 5.15 に示す。 \hat{V}_P は、 \tilde{V}'_P に見られる 90° や 270° 周辺における \bar{R} との逆行がない。また、 $[0^\circ, 210^\circ]$ と $[225^\circ, 345^\circ]$ における二つの山の高さが (\tilde{V}'_P よりも) それぞれ \bar{R} に沿ったものとなっており、良好な結果であるといえる。6 枚の実験画像における \bar{R} と \hat{V}_P の散布図を図 5.16 に示す。^{*10} 表 5.9 及び図 5.16 より、 \hat{V}_P の評価性能は全体として \tilde{V}'_P よりも良いといえる。一例として、Chart 5b について述べる。図 5.16(b) から分かるように、回帰直線からのばらつきは \hat{V}_P の方が小さい。他の画像についても同

表 5.9 \bar{R} と平均的な最適パラメータ値での評価指標 (\tilde{V}'_P 及び \hat{V}_P) の r (*は、画像ごとの最適パラメータ値を用いた場合)

図	\tilde{V}'_P	\hat{V}_P
Chart 5a	-0.879	-0.923
Chart 5b	-0.918	-0.952
Chart 6	-0.895	-0.909*
Chart 15	-0.815	-0.871
Chart 26	-0.946	-0.948*
Chart 45	-0.820	-0.837*
$\langle r \rangle$	-0.879	-0.937

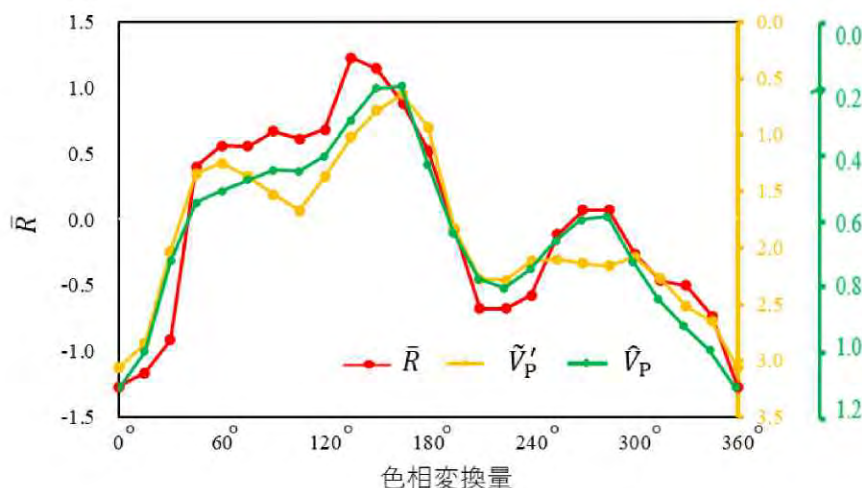
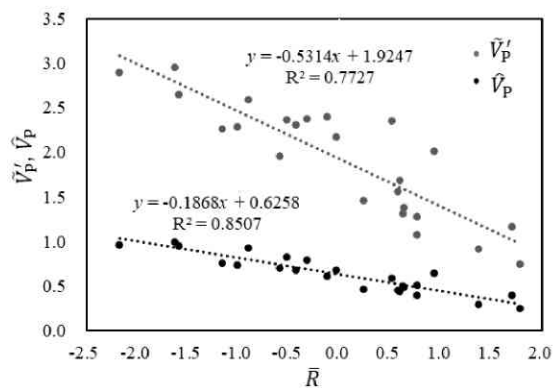
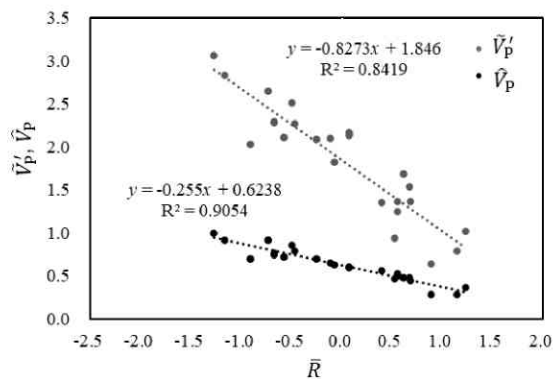


図 5.15 Chart 5b における \bar{R} と評価指標 (\tilde{V}'_P 及び \hat{V}_P)

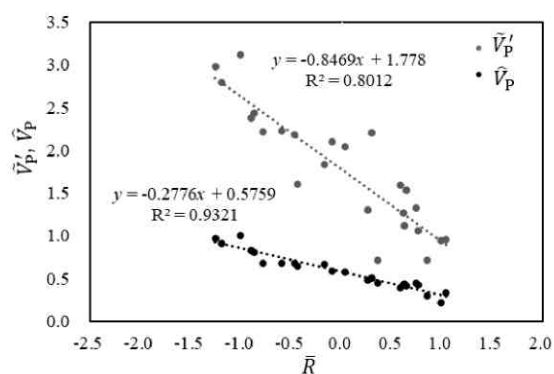
^{*10} 図 5.15 のデータから図 5.16(b) が作成される。



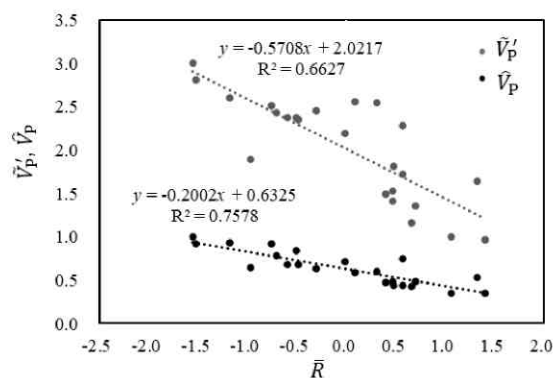
(a)



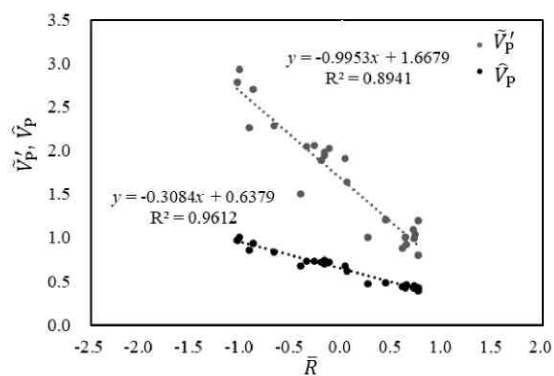
(b)



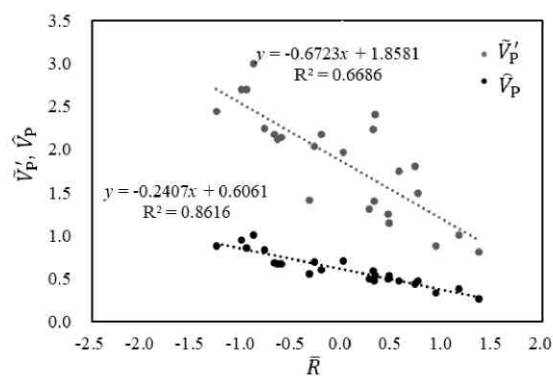
(c)



(d)



(e)



(f)

図 5.16 6 枚の実験画像に対する \bar{R} と \hat{V}_P の散布図 (a) Chart 5a, (b) Chart 5b, (c) Chart 6, (d) Chart 15, (e) Chart 26, (f) Chart 45

様である。なお、表 5.9 には参考として \tilde{V}'_P において画像ごとの最適パラメータ値を用いた場合の r も掲載したが、この場合でも平均的な最適パラメータを用いた提案指標の方が明らかに優れている。すなわち、提案指標の方が枠組みとして優れている。

第 6 章

結論

本論文では、2色覚での見えにおけるコントラストの改善度に対する新規な客観評価指標を提案した。

第 2 章では、色覚と色空間の基礎知識並びに 2 色覚での色の見えのシミュレーション方法について述べた。

第 3 章では、従来指標である Tanaka らの指標 V_K と閻らの指標 V_{K,L^*} 及び Lu らの指標 \tilde{V}_K について述べた。 V_K を主観評価（一対比較法）で得られる値 \bar{R} と比べた場合に二つの問題があった。

第 4 章では、提案指標 \hat{V}_K について述べた。 \hat{V}_K では、二つのパラメータを導入することで V_K の二つの問題を解決した。 \hat{V}_K は、 $L^*a^*b^*$ 色差と明度差を調整することで V_K の二つの問題を解決し、 \tilde{V}_K よりも \bar{R} に近い値とすることができた。なお \hat{V}_K では、 \tilde{V}_K とは異なる方法で明度差を重視した。また、 \tilde{V}_K では注目画素に対しチェス盤距離が ρ 以下の画素の全ての画素対を検討対象としていたが、 \hat{V}_K では、チェス盤距離が ρ 以下の範囲にある画素の内、ランダムに選択された画素を検討対象とした。

第 5 章では、 \tilde{V} の計算量を提案指標と同様に減らした比較指標 \tilde{V}' と提案指標 \hat{V} との比較実験について述べた。まず、検討対象範囲 ρ について実験を行った。 ρ は、主観評価値 \bar{R} と \tilde{V}' の相関係数 r に基づいて定めた。次に、 \tilde{V}' と \hat{V} それぞれのしきい値 τ と $\hat{\tau}$ （及び λ_{L^*} ）の弁別困難色の検出能力を比較した。提案指標の方が良い場合と悪い場合があり、比較指標と提案指標の弁別困難色の検出能力は同等であるといえることを確認した。次に、選択回数 η の影響を調べた。 η と $\langle\sigma(\hat{V}^\dagger)\rangle$ の関係を示し、本研究では \hat{V} が小数第 3 位まで十分な精度となる η を設定した。その結果、 $\rho = 10$ の状況下では、ランダムサンプリングを採用しない場合に対して計算時間を約 7 分の 1 に短縮することができた。続いて、 \bar{R} と各指標の r が良くなるように $\tilde{\lambda}$, $\hat{\lambda}_E$, $\hat{\lambda}_{L^*}$ の値を定め、その上で \bar{R} と \tilde{V}' と \hat{V} の対応を比較した。全体的に \tilde{V}' よりも \hat{V} の方が良い結果であり、提案指標 \hat{V} の有効性を示すことができた。

提案指標 \hat{V} において評価する画素対は、正常色覚では見分けることができ、2 色覚での見分けることができないものである。原画像で 2 色覚で弁別できていた色の組み合わせが変換後の画像では弁別できなくなっているにもかかわらず提案指標では評価できない。また、ヒトが自然さを重視するような画像の場合において、提案手法では高評価となっても色変換結果が自然ではないことがある。このよう

な場合に対応できるように提案指標を改良する余地があるが、これらは今後の課題とした。

以上のように、本論文では、カラー画像の2色覚での見えにおける貢献を目指し、コントラストを客観評価する方法を述べた。提案指標を用いることで、色覚異常での見えの判断の自動化が容易になると考えられ、提案指標は、バリアフリーな画像作成の一助になり、色覚バリアフリー化に貢献するといえる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科（現・理学研究科）准教授，田中豪先生に丁寧な全力を注いだご指導を頂きまして，心の底から厚くお礼を申し上げます。研究課題の検討から論文の作成まで，先生から辛抱強いご指導をいただき，誠に感謝いたしません。また，研究員の安井明代さん，石宝さんに大変お世話になりました。本当に心から感謝いたします。最後に，共に研究・勉強に励んだ孟夢さん，張思ブンさん，姜ゲツさんに深く感謝の気持ちを表し，皆様の輝かしい未来と幸せな人生をお祈りいたします。

引用文献

- [1] 岡部正隆, 伊藤 啓, “色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション (全3回) 第1回色覚の原理と色盲のメカニズム,” 細胞工学, vol.21, no.7, pp.733–745, 2002.
- [2] F. Viénot, H. Brettel, J.D. Mollon, “Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats,” Color Research and Application, vol.24, no.4, pp.243–252, June 1999.
- [3] M. Ichikawa, K. Tanaka, S. Kondo, K. Hiroshima, K. Ichikawa, S. Tanabe, and K. Fukami, “Preliminary study on color modification for still images to realize barrier-free color vision,” Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, vol.1, pp.36–41, The Hague, Netherlands, Oct. 2004.
- [4] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, “Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats,” IEEE Computer Graphics and Applications Magazine, vol.25, no.3, pp.22–30, June 2005.
- [5] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, “Re-coloring image for gamuts of lower dimension,” Computer Graphics Forum, vol.24, no.3, pp.423–432, Oct. 2005.
- [6] K. Wakita and K. Shimamura, “SmartColor: Disambiguation framework for the colorblind,” Proceedings of 7th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, pp.158–165, Baltimore, MD, USA, Oct. 2005.
- [7] J.B. Huang, Y.C. Tseng, S.I. Wu, and S.J. Wang, “Information preserving color transformation for protanopia and deuteranopia,” IEEE Signal Processing Letters, vol.14, no.10, pp.711–714, Oct. 2007.
- [8] L. Jefferson and R. Harvey, “An interface to support color blind computer users,” Proceedings of ACM SIGCHI, pp.1535–1538, New York, USA, 2007.
- [9] G.R. Kuhn, M.M. Oliveira, and L.A.F. Fernandes, “An efficient naturalness-preserving image-recoloring method for dichromats,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.14, no.6, pp.1747–1754, Dec. 2008.
- [10] J.B. Huang, C.S. Chen, T.C. Jen, and S.J. Wang, “Image recolorization for the colorblind,” Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.1161–1164, Taipei, Taiwan, April 2009.
- [11] G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, “Lightness modification of color image for protanopia

- and deuteranopia,” *Optical Review*, vol.17, no.1, pp.14–23, Feb. 2010.
- [12] G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, “Yellow-blue component modification of color image for protanopia or deuteranopia,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E94-A, no.2, pp.884–888, Feb. 2011.
- [13] H. Chun-Rong, C. Kuo-Chuan, and C. Chu-Song, “Temporal color consistency-based video reproduction for dichromats,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol.13, pp.950–960, April 2011.
- [14] J.Y. Jeong, H.J. Kim, Y.H. Kim, T.S. Wang, and S.J. Ko, “Enhanced re-coloring method with an information preserving property for color-blind person,” *Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics*, pp.600–601, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2012.
- [15] N. Suetake, G. Tanaka, H. Hashii, and E. Uchino, “Simple lightness modification for color vision impaired based on Craik-O’Brien effect,” *J. Franklin Institute*, vol.349, no.6, pp.2093–2107, Aug. 2012.
- [16] A. Mereuta, S. Aupetit, and M. Slimane, “Improving web accessibility for dichromat users through contrast preservation,” *International Conference on Computers for Handicapped Persons*, pp.363–370, Linz, Austria, July 2012.
- [17] H. Dongil, Y.S. Joon, and K. Byungwhan, “A novel confusion-line separation algorithm based on color segmentation for color vision deficiency,” *Journal of Imaging Science and Technology*, vol.56, no.3, pp.30501-1-30501-17(17), May 2012.
- [18] G.M. Culp, “Increasing accessibility for map readers with acquired and inherited colour vision deficiencies: a re-colouring algorithm for maps,” *The Cartographic Journal*, vol.49, pp.302–311, Aug. 2012.
- [19] H. Takimono, H. Yamauchi, M. Jindai, and A. Kanagawa, “Modification of indistinguishable colors for people with color vision deficiency,” *J. Signal Processing*, vol.16, no.6, pp.587–592, Nov. 2012.
- [20] D.R. Flatla, K. Reinecke, C. Gutwin, and K.Z. Gajos, “SPRWeb: Preserving subjective responses to website colour schemes through automatic recolouring,” *Proceedings of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2069–2078, Paris, France, April/May 2013.
- [21] M.G. Ribeiro and A.J.P. Gomes, “A skillet-based recoloring algorithm for dichromats,” *Proceedings of 2013 IEEE 15th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services*, pp.702–706, Lisbon, Portugal, Oct. 2013.
- [22] H. Orii, H. Kawano, H. Maeda, and T. Kouda, “Color conversion algorithm for color blindness using self-organizing map,” *Proceedings of Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intel-*

- ligent Systems, pp.910–913, Kitakyushu, Japan, Dec. 2014.
- [23] N. Milić, M. Hoffmann, T. Tómacs, D. Novaković, and B. Milosavljević, “A content-dependent naturalness-preserving daltonization method for dichromatic and anomalous trichromatic color vision deficiencies,” *Journal of Imaging Science and Technology*, vol.59, no.1, pp.10504-1–10504-10, Jan. 2015.
- [24] A.K. Kvitle, P. Green, and P. Nussbaum, “Adaptive color rendering of maps for users with color vision deficiencies,” *SPIE/IS&T Electronic Imaging*, 2015, vol.9395, San Francisco, California, USA, Feb. 2015.
- [25] N. Milić, F. Belhadj, and N. Dragoljub, “The customized daltonization method using discernible colour bins,” *Proceedings of 2015 Colour and Visual Computing Symposium*, pp.112–117, Gjøvik, Norway, Aug. 2015.
- [26] C. Keuyhong, L. Jusun, S. Sanghoon, and H. Dongil, “Construction of confusion lines for color vision deficiency and verification by ishihara chart,” *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*, vol.4, no.4, pp.272–280, Aug. 2015.
- [27] J.T. Simon-Liedtke and I. Farup, “Evaluating color vision deficiency daltonization methods using a behavioral visual-search method,” *J. Visual Communication and Image Representation*, vol.35, pp.236–247, Feb. 2016.
- [28] H. Orii, H. Kawano, N. Suetake, and H. Maeda, “Color conversion for color blindness employing multilayer neural network with perceptual model,” *Image and Video Technology, PSIVT 2015, LNCS 9431*, pp.3–14, March 2016.
- [29] M. Meng and G. Tanaka, “Proposal of minimization problem based lightness modification for protanopia and deuteranopia,” *Proceedings of 2016 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pp.215–220, Phuket, Thailand, Oct. 2016.
- [30] G. Tennenholtz and I. Zachevsky, “Natural contrast enhancement for dichromats using similarity maps,” *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering*, pp.1–5, Eilat, Israel, Nov. 2016.
- [31] S. Bao, G. Tanaka, H. Tamukoh, and N. Suetake, “Lightness modification method considering Craik-O’Brien effect for protanopia and deuteranopia,” *IEICE Transactions on Fundamentals*, vol.E99-A, no.11, pp.2008–2011, Nov. 2016.
- [32] S.S. Hwang, “Automatic information loss detection and color compensation for the color blind,” *Proceedings of International Conference on Design, User Experience, and Usability*, pp.248–257, Vancouver, BC, Canada, July 2017.
- [33] Z. Zhenyang, M. Toyoura, K. Go, I. Fujishiro, K. Kashiwagi and X. Mao, “Naturalness- and information-preserving image recoloring for red–green dichromats,” *Signal Process: Image communication*, vol.76, pp.68–80, Aug. 2019.
- [34] M. Meng and G. Tanaka, “Proposal of minimization problem based lightness modification

- method considering visual characteristics of protanopia and deuteranopia,” Proceedings of Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference on 2019, pp.1417–1422, Lanzhou, China, Nov. 2019.
- [35] S.-K. Kang, C. Lee, and C.-S. Kim, “Optimized color contrast enhancement for dichromats using local and global contrast,” 2020 IEEE International Conference on Image Processing, pp.1048–1052, Ministry of Education, UAE, Oct. 2020.
- [36] X. Wang, Z. Zhu, X. Chen, K. Go, M. Toyoura, and X. Mao, “Fast contrast and naturalness preserving image recolouring for dichromats,” *Computers & Graphics*, vol.98, pp.19–28, Aug. 2021.
- [37] X. Shen, J. Feng, and X. Zhang, “A content-dependent daltonization algorithm for colour vision deficiencies based on lightness and chroma information,” *IET Image Processing*, vol.15, no.4, pp.983–996 Sep. 2021.
- [38] M. Ribeiro and A. Gomes, “RGBeat: A recoloring algorithm for deutan and protan dichromats,” *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, vol.8, no.2, pp.47–59, Jan. 2022.
- [39] D. Miyazaki and H. Morimoto, “Color exaggeration for dichromats using weighted edge,” *International Workshop on Frontiers of Computer Vision*, vol.1578, pp.18–33, June 2022.
- [40] 大槻諭汰, 田中 豪, “変換量を多重化した色相変換による 2 色覚のためのコントラスト改善手法に関する検討,” *電子情報通信学会技術研究報告 SIS2022-26*, vol.122, no.293, pp.15-20, Dec. 2022.
- [41] 藤田采花, 向田眞志保, 畔津忠博, 末竹規哲, “1 型及び 2 型 2 色覚のための RGB 色空間内明度修正法の一提案,” *電子情報通信学会技術研究報告 SIS2023-14*, vol.123, no.77, pp.73–78, June 2023.
- [42] 閻 錦韜, 田中 豪, “色相変換による 2 色覚のためのコントラスト改善とその定量評価の検討,” *電子情報通信学会技術研究報告 SIS2016-36*, vol.116, no.344, pp.45–48, Dec. 2016.
- [43] Yanbing Lu, 安井明代, 石 宝, 田中 豪, “2 色覚のためのコントラスト改善の定量評価手法の一提案,” 2019 年電子情報通信学会総合大会, no.A-15-12, p.152, March 2019.
- [44] X. Cheng and G. Tanaka, “A novel quantitative evaluation index of contrast improvement for dichromats,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E103-A, no.12, pp.1618–1620, Dec. 2020.
- [45] X. Cheng and G. Tanaka, “Computational cost reduction of quantitative evaluation indices of contrast improvement for dichromats,” *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, vol.12, no.7, pp.611–617, July 2021.
- [46] X. Cheng and G. Tanaka, “Examination of quantitative evaluation index of contrast improvement for dichromats,” *IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E106-A, no.6, pp.916–923, June 2023.

- [47] 高木幹雄, 下田陽久 (監修), 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2004.
- [48] 佐藤 信, 統計的官能検査法, 日科技連出版社, 東京, 1985.
- [49] 日科技連官能検査委員会, 新版 官能検査ハンドブック, 日科技連出版社, 東京, 1973.
- [50] 岡部正隆. 色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション (全3回) 第2回色覚が変化すると, どのように色が見えるのか. 細胞工学. (2002) vol.21, no.8, p.909–930, Aug. 2002.
- [51] J. Birch, “Worldwide prevalence of red-green color deficiency,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol.29, no.3, pp.313–320, March 2012.
- [52] G.H. Joblove and D. Greenberg, “Color spaces for computer graphics,” *Computer Graphics*, vol.12, pp.20–27, 1978.
- [53] KONIKA MINOLTA, “新しい色差式 (CIE DE2000) について,” <https://konicaminolta.jp/instruments/knowledger/color/section2/06.html>. (Accessed 26 June 2023)
- [54] M. R. Luo, G. Gui, and B. Rigg, “The development of the CIE2000 colour-difference formula: CIEDE2000,” *Color Research and Application*, vol.26, no.5, pp.340–350, Oct. 2001.

付録 A

実験に用いた画像の色分布

図 A.1 は、実験に用いた 6 枚の画像（図 3.2）に含まれる色を取り出し、横一列に並べたものである。いずれの画像も 32 色を含んでいる。また、図 A.2 は、図 A.1 の 32 色の a^*b^* 成分をプロットしたものである。Chart 5a と Chart 15, Chart 6 と Chart 45 はそれぞれ似た色であるが、 a^*b^* 成分はそれなりに異なることが分かる。

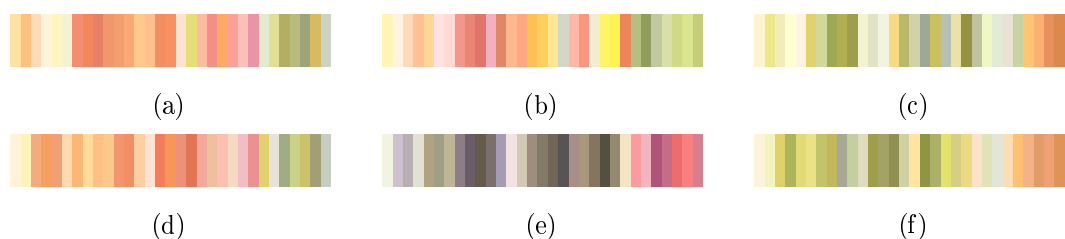


図 A.1 6 枚の実験画像に含まれる色 (a) Chart 5a, (b) Chart 5b, (c) Chart 6, (d) Chart 15, (e) Chart 26, (f) Chart 45

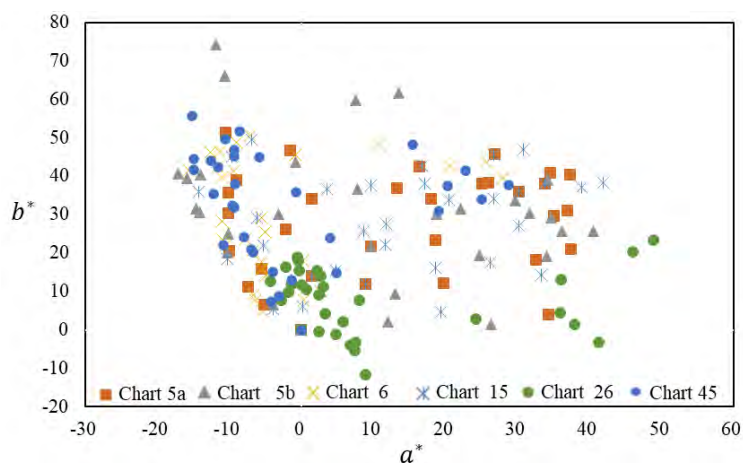


図 A.2 6 枚の実験画像の a^*b^* 成分

付録 B

一対比較法

一対比較法 [48, 49] は，心理的な評価を測定するための一般的な方法であり，多数の評価対象を一度に評価することが難しい場合に用いられる．一対比較法では， n 個の評価対象 ($n \geq 3$) の中から 2 個ずつの一組（対）を示して何らかの属性について判断者に比較させ，その判断データを分析することで対象の尺度値を求める．本論文では，判断者のことを被検者と呼ぶ．一対比較法による主観評価の尺度化にはいくつかの方法がある．本研究では，被験者の違いによる差が生じにくい Thurstone の方法 [48, 49] を用いた.*¹

Thurstone の方法では，評価対象群の中から取り出した 2 個の評価対象について両者間に順位をつけることで，評価対象間の差の程度を数量化することができる．この数量化を間隔尺度化と呼ぶ．Thurstone の方法には，一対比較の対象となるデータが全て揃っている場合の計算方法と，一部のデータがない場合の計算方法がある．本論文では，前者を「欠測値がない場合」と呼び，後者を「欠測値がある場合」と呼ぶ．B.1 節で欠測値がない場合について説明し，B.2 節で欠測値がある場合について説明する．

B.1 欠測値がない場合

n 個の対象や刺激があり，それらの一対を以下 (j, k) と書くことにする ($j, k = 1, 2, \dots, n$)．各対 (j, k) について， N 回の独立な比較判断を求める． j の方が美しい，強いなど， j を k より上位とする判断を $j \succ k$ で表すことにする． N 回中における実測相対頻度 p_{jk} を基礎に，比較判断の心理的過程について次のようなモデルを仮定することで j ($= 1, 2, \dots, n$) に対する間隔尺度上の尺度値 R_j を計算する．

相互に独立に N 回反復される比較判断は，1 人 1 回ずつ判断を行う N 人の被検者から集めても，1 人の被検者 N 回の反復であっても，その混合型であってもよい． j が繰り返し与えられると，それに対してその都度尺度 R 上の 1 点 s_j によって表現される心理過程が生起するものとする． s_j

*¹ 一対比較法による尺度化の方法として，Thurstone の方法以外によく用いられるものとして Scheffé の方法およびその変法がある．これらの方法は，いずれも一対の差の程度を被検者が相対的に判断する．そのため，被検者間で差の程度の判断に違いが生じやすい．

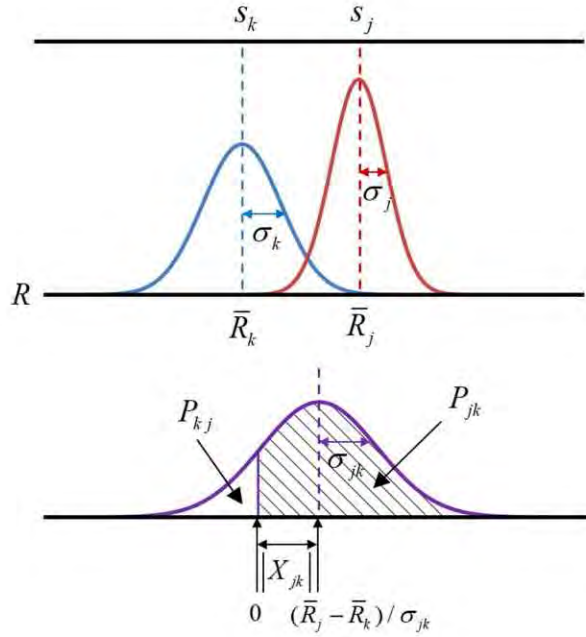


図 B.1 対象（刺激） j 及び k に対する比較判断

は，平均 \bar{R}_j ，標準偏差 σ_j の正規分布に従う確率変数と仮定する．すなわち，

$$s_j : N[\bar{R}_j, \sigma_j^2] \quad (\text{B.1})$$

である．図 B.1 に示すように，一対の (j, k) に対する比較判断は， s_j と s_k のいずれが尺度上において上位にあるかによって定まるものとする．すなわち， $s_{jk} = s_j - s_k$ とすれば，

$$s_{jk} > 0 \text{ であれば } j \succ k,$$

$$s_{jk} < 0 \text{ であれば } k \succ j$$

である． s_{jk} もまた確率変数であり，その分布は式 (B.1) から

$$s_{jk} : N[(\bar{R}_j - \bar{R}_k), \sigma_{jk}^2], \quad (\text{B.2})$$

$$\sigma_{jk}^2 = \sigma_j^2 + \sigma_k^2 - 2\rho_{jk}\sigma_j\sigma_k \quad (\text{B.3})$$

である．ただし， ρ_{jk} は σ_j と σ_k の相関係数である．したがって，判断 $j \succ k$ の生起する確率を P_{jk} とすれば，

$$P_{jk} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{jk}} \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{y - (\bar{R}_j - \bar{R}_k)^2}{2\sigma_{jk}^2}\right\} dy \quad (\text{B.4})$$

である．

一方，標準正規分布 $N(0, 1)$ を考え，

$$P_{jk} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (\text{B.5})$$

とおけば,

$$\bar{R}_k - \bar{R}_j = X_{jk}\sigma_{jk} = X_{jk}(\sigma_j^2 + \sigma_k^2 - 2\rho_{jk}\sigma_j\sigma_k)^{1/2} \quad (\text{B.6})$$

と書ける. ここで,

$$X_{jk} = -\frac{\bar{R}_j - \bar{R}_k}{\sigma_{jk}} \quad (\text{B.7})$$

である.

実測相対頻度 p_{jk} と $N(0, 1)$ の数値表から式 (B.4) の X_{jk} に相当する実測値 x_{jk} を求めれば, これをもとに式 (B.6) より, \bar{R}_j , σ_j , ρ_{jk} などを求めることができると考えられる. そのためには尺度 \bar{R}_j に目盛りが必要であるので, 便宜上ある特定の対象 a の \bar{R}_a の位置を原点, その σ_a を単位に定め, すなわち,

$$\bar{R}_a = 0, \sigma_a = 1 \quad (\text{B.8})$$

として相対的に他の \bar{R}_j , σ_j などの数値を定めることにする. しかし, 既知数 x_{jk} の数は, 全ての組み合わせについて与えられていても $n(n-1)/2$ 個であるが, 未知数は \bar{R}_j , σ_j が, それぞれ $n(n-1)$ 個, ρ_{jk} が $n(n-1)/2$ 個となり, 既知数よりも未知数の方が多く, このままでは解くことができない. そこで, 更に仮定を設ける.

ρ_{jk} は, 組み合わせ (j, k) によらない常数 ρ とし, 便宜上 $\rho = 0$ する. 次に標準偏差 σ_j は, どの j においても一律の値 σ を持つものとする. すなわち,

$$\rho_{jk} = \rho = 0, \sigma_j = \sigma \quad (\text{B.9})$$

とすれば, 未知数は \bar{R}_j だけで, その数は $(n-1)$ である. 原点は \bar{R}_a ではなく, n 個の \bar{R}_j の平均値に置くと,

$$\sum_{j=1}^n \bar{R}_j = 0 \quad (\text{B.10})$$

である. 式 (B.6) は,

$$\bar{R}_k - \bar{R}_j = X_{jk}\sigma\sqrt{2} \quad (\text{B.11})$$

と書くことができるから, s_{jk} の標準偏差 $\sigma\sqrt{2}$ を単位に, すなわち, これを 1 として \bar{R} の尺度値を表すと,

$$X_{jk} = \bar{R}_k - \bar{R}_j \quad (\text{B.12})$$

である. したがって, 実測値 x_{jk} から \bar{R}_k を求めるには, 最小二乗法により,

$$Q = \sum_{(j,k)} (x_{jk} - \bar{R}_k + \bar{R}_j)^2 \quad (\text{B.13})$$

を最小にするように \bar{R}_k を定めればよい。

$$\frac{\partial Q}{\partial \bar{R}_k} = -2 \sum_{j=1}^n (x_{jk} - \bar{R}_k + \bar{R}_j) \quad (\text{B.14})$$

を 0 にするために、

$$\sum_{j=1}^n (x_{jk} - \bar{R}_k + \bar{R}_j) = 0 \quad (\text{B.15})$$

とする。式 (B.10) を用いると、 \bar{R}_k は次式で与えられる。

$$\bar{R}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jk} \quad (\text{B.16})$$

式 (B.16) を用いて、 \bar{R}_k の平均値を原点とし、 $\sigma\sqrt{2}$ を単位として、各 \bar{R}_j の尺度上の位置を計算する。

実際の手順は以下の通りである。

- 比較対象の対を提示して、被検者に設問に従ってどちらか一方を必ず選択させる（強制選択）。
- 選択結果を集計し、評価対象の比較対象対に関する選択頻度行列 X をつくる。
- X から選択確率の標本値としての相対頻度行列 P を求める。
- P_{jk} から正規分布の分位関数値、すなわち分布関数の逆関数 x_{jk} を求める。
- 各評価対象について平均値を求め、間隔尺度 \bar{R}_j とする。

求めた間隔尺度 \bar{R} について、モデルに従って \bar{R}_j 及び \bar{R}_k から $j \succ k$ の確率 P_{jk} を求め、その値と実測相対頻度 p_{jk} の値が誤差の範囲内で一致しているか否かを χ^2 検定にて評価する。

B.2 欠測値がある場合

B.1 節の Thurstone の方法では、 n 個の j 全ての組み合わせについて比較が行われ、その全てについて、 x_{jk} として有限の値が得られることを前提としている。一対比較法では評価対象の n が増加すると一対比較の組み合わせの数 $n(n-1)/2$ が著しく増加する。たとえば、評価対象が 5 個の場合は 10 組の比較、10 個の場合は 45 組の比較であるが、20 個の場合は 190 組の比較となる。そこで、組み合わせによっては比較判断を行わないといった工夫がなされることがある。また、全ての組み合わせについて比較を行ったとしても、組み合わせの中には、 j と k' の優劣が明瞭で、比較するまでもない組み合わせが多く含まれる場合がある。このような場合は、 P_{jk} が 1 あるいは 0 になり、 x_{jk} の値は $+\infty$ あるいは $-\infty$ となる。これらにより、 X に欠測値が生ずる。不完全な行列 X について Thurstone の方法が適用できるようにするために尺度化の計算方法を拡張する。

一対比較によるデータからなる選択頻度行列 X が不完備でその中に数値の存在しない空欄を含

んでいる場合は，式 (B.15) が次の形に変わる．

$$\sum_j^{n_k} (x_{jk} - \bar{R}_k + \bar{R}_j) = 0. \quad (\text{B.17})$$

ここで， n_k は X の k 列に存在する x_{jk} の数であるが， x_{jj} すなわち，対角線上の x_{jk} は数に加えない．したがって，

$$\sum_j^{n_k} x_{jk} = n_k \bar{R}_k - \sum_j^{n_k} \bar{R}_j \quad (\text{B.18})$$

は

$$\mathbf{Z} = \mathbf{M}\mathbf{R} \quad (\text{B.19})$$

と表現できる．ただし，

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \sum_j^{n_1} x_{j1} \\ \sum_j^{n_2} x_{j2} \\ \vdots \\ \sum_j^{n_n} x_{jn} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \bar{R}_1 \\ \bar{R}_2 \\ \vdots \\ \bar{R}_n \end{bmatrix} \quad (\text{B.20})$$

であり， M はその主対角線上に n_i を入れ，それ以外の欄には x_{jk} が存在するときは -1 ，欠測値になっているときには 0 を入れた $n \times n$ の対称行列である． M の逆行列 M^{-1} が存在すれば，式 (B.19) から

$$\mathbf{R} = M^{-1}\mathbf{Z} \quad (\text{B.21})$$

とできる．ここで，尺度の原点を例えば $\bar{R}_i = 0$ と定義する．いま， \mathbf{R} 及び \mathbf{Z} から第 1 行の要素を除いたものを \mathbf{R}_1 及び \mathbf{Z}_1 と書き，行列 M から第 1 行と第 1 列を除いた行列を M_{11} と書くと，

$$\mathbf{R}_1 = M_{11}^{-1}\mathbf{Z}_1 \quad (\text{B.22})$$

となり，一般に M_{11}^{-1} は存在するので \bar{R}_i を求めることができる．

求めた間隔尺度 \bar{R} について，B.1 節と同様の検定を行う．

付録 C

CIE DE2000 色差式

一般的に用いられている CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差 ΔE_{ij} は、色に対するヒトによる評価を元に定義されているが、色によっては、 ΔE_{ij} とヒトによる評価とが異なることがある。これを解決するために色差式「CIE DE2000」が定義されている。

ΔE_{ij} は、図 C.1 の○で示しているように、どの彩度、色相においても同様に真円で示される。また、クロマネティクス指数差 Δa^*b^* は図 C.1 の□で示されるように方形状をしており、ヒトによる色識別域の形状（白い楕円形状）と大きく異なっていることが分かる。

色差式 CIE DE2000 は、 $L^*a^*b^*$ 色空間の弱点である測定結果と視感評価との相違を補正した色差式である。明度差 $\Delta L'$ 、彩度差 $\Delta C'$ 、色相差 $\Delta H'$ をもとに、重係数 (S_L, S_C, S_H) やパラメトリック係数と呼ばれる定数 (k_L, k_C, k_H) などの補正を加え、以下のように算出する [54]。

$$\Delta E_{00,ij} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'_{ij}}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ij}}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ij}}{k_H \cdot S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ij}}{k_C \cdot S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'_{ij}}{k_H \cdot S_H}\right)} \quad (C.1)$$

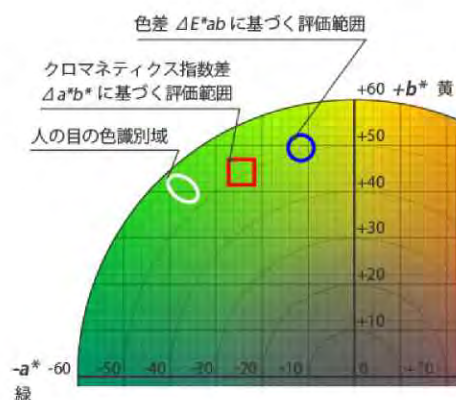


図 C.1 色差・色識別域の違い (文献 [53] より引用)

ここで,

$$\Delta L'_{ij} = L'_j - L'_i, \quad (\text{C.2})$$

$$\Delta C'_{ij} = C'_j - C'_i, \quad (\text{C.3})$$

$$\Delta H'_{ij} = 2\sqrt{C'_i C'_j} \sin \frac{\Delta h'}{2} \quad (\text{C.4})$$

であり, 更に,

$$\Delta h' = \begin{cases} 0 & C'_i C'_j = 0; \\ h'_j - h'_i & C'_i C'_j \neq 0, |h'_j - h'_i| \leq 180^\circ; \\ (h'_j - h'_i) - 360^\circ & C'_i C'_j \neq 0, |h'_j - h'_i| > 180^\circ; \\ h'_j - h'_i + 360^\circ & C'_i C'_j \neq 0, |h'_j - h'_i| < -180^\circ. \end{cases} \quad (\text{C.5})$$

$$C'_i = \sqrt{(a'_i)^2 + (b_i^*)^2}, \quad (\text{C.6})$$

$$a'_i = (1 + G)a_i^*, \quad (\text{C.7})$$

$$G = 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}} \right), \quad (\text{C.8})$$

$$\bar{C}_{ab}^* = \frac{(C_{i,ab}^* - C_{j,ab}^*)}{2}, \quad (\text{C.9})$$

$$C_{i,ab}^* = \sqrt{(a_i^*)^2 + (b_i^*)^2}, \quad (\text{C.10})$$

$$h'_i = \begin{cases} 0, & b_i^* = a_i^* = 0, \\ \tan^{-1} \left(\frac{b_i^*}{a_i^*} \right), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (\text{C.11})$$

である. 重係数の値は, 以下の式で定義する.

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}, \quad (\text{C.12})$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}', \quad (\text{C.13})$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T, \quad (\text{C.14})$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}') + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ). \quad (\text{C.15})$$

ここで,

$$\bar{L}' = \frac{L_i^* + L_j^*}{2}, \quad (\text{C.16})$$

$$\bar{C}' = \frac{C'_i + C'_j}{2}, \quad (\text{C.17})$$

$$\bar{h}' = \begin{cases} \frac{h'_i + h'_j}{2}, & |h'_j - h'_i| \leq 180^\circ, C'_i C'_j \neq 0; \\ \frac{h'_i + h'_j + 360^\circ}{2}, & |h'_j - h'_i| > 180^\circ, h'_i + h'_j < 360^\circ, C'_i C'_j \neq 0; \\ \frac{h'_i + h'_j - 360^\circ}{2}, & |h'_j - h'_i| > 180^\circ, h'_i + h'_j \geq 360^\circ, C'_i C'_j \neq 0; \\ h'_i + h'_j, & C'_i C'_j = 0. \end{cases} \quad (\text{C.18})$$

R_T , R_C (ローテーション関数) の値は, 以下の式で定義される.

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C, \quad (\text{C.19})$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}, \quad (\text{C.20})$$

$$\Delta\theta = 30^\circ \exp\left[-\left(\frac{\bar{h}' - 275^\circ}{25}\right)^2\right]. \quad (\text{C.21})$$

パラメトリック係数 (k_L , k_C , k_H) は試験条件によって異なる. 標準条件下では, 全て 1 に設定する.

関連発表論文一覧

1. Xi Cheng and Go Tanaka, “A novel quantitative evaluation index of contrast improvement for dichromats,” IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E103-A, no.12, pp.1618–1620, Dec. 2020.
2. Xi Cheng and Go Tanaka, “Computational cost reduction of quantitative evaluation indices of contrast improvement for dichromats,” ICIC Express Letters, Part B: Applications, vol.12, no.7, pp.611–617, July 2021.
3. Xi Cheng and Go Tanaka, “Examination of quantitative evaluation index of contrast improvement for dichromats,” IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E106-A, no.6, pp.916–923, June 2023.

関連学会発表一覧

1. 程 溪, 田中 豪, “2色覚のためのコントラスト改善の定量評価手法の改良,” 電子情報通信学会技術研究報告 SIS2019-35, vol.119, no.335, pp.61–64, Dec. 2019.
2. 程 溪, 田中 豪, “1型及び2型2色覚のためのコントラスト改善の定量評価手法,” 2020年電子情報通信学会総合大会論文集, no.A-15-10, p.132, March 2020.
3. 程 溪, 田中 豪, “2色覚のためのコントラスト改善の定量評価手法の計算量低減に関する一検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 SIS2020-10, vol.120, no.176, pp.1–4, Oct. 2020.
4. Xi Cheng and Go Tanaka, “Examination on computational cost reduction of quantitative evaluation method of contrast improvement for dichromats,” Proceedings of 2020 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2020), ONLINE, Dec. 2020.

解説

ヒトの目（網膜）には色の知覚に関与する3種類の錐体（L・M・S錐体）細胞がある。錐体細胞が正常に機能しない場合に色覚異常となる。いずれか1種類の錐体が機能しない場合は2色覚になる。2色覚の多くはL錐体が機能しない1型2色覚（protanopia, P型）、または、M錐体が機能しない2型2色覚（deutanopia, D型）である。S錐体が機能しない3型2色覚（tritanopia, T型）は稀である。1型2色覚と2型2色覚の色の見えは似ているが、3型2色覚の見えはこれらとは異なる。

色は視覚情報において重要な要素である。色覚異常では特定の色の違いを見分けにくく、画像の情報を十分に読み取れないことがある。本研究では、色覚異常のうち、2色覚を扱う。近年、画像の色を変換することで2色覚での見えを改善する手法（色覚バリアフリー化色変換）が研究されている。多くの研究では、色変換結果の評価に主観評価が用いられている。主観評価値を得るには手間や時間がかかるので、有効な客観評価指標があることが望ましい。本研究では2色覚での見えにおけるコントラストの改善度を客観的に評価する新規な手法を提案する。

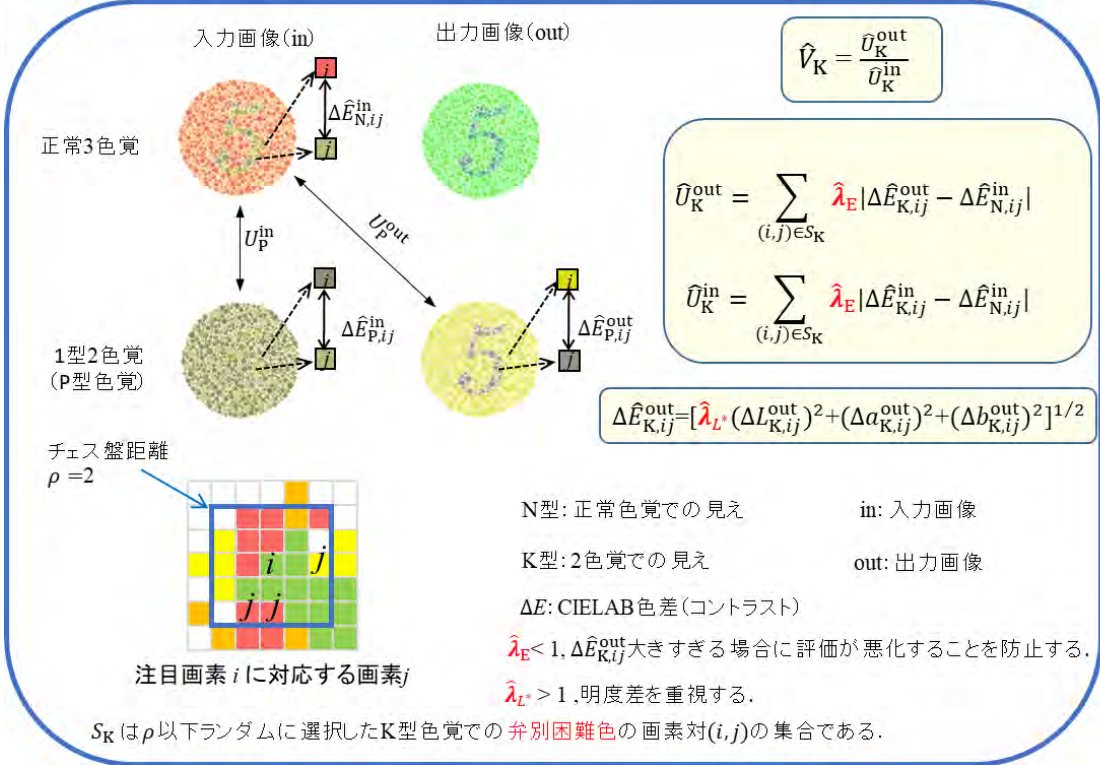
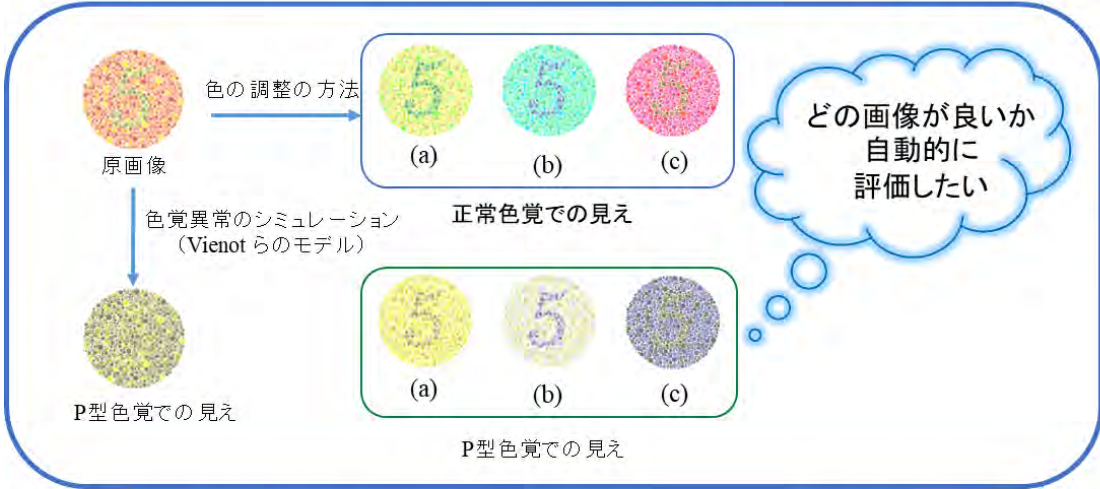
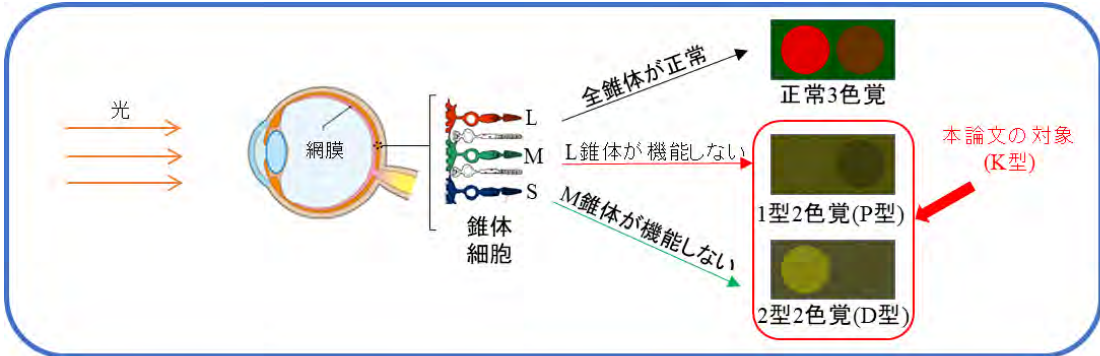
従来手法として Tanaka らの指標 V_K 、閻らの指標 V_{K,L^*} 、Lu らの指標 \tilde{V}_K がある。Tanaka らの指標 V_K では CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差より評価値を求めている。 V_K と主観評価値 \bar{R} との違いを調べたところ、 V_K と \bar{R} には以下の二つの違いがあった。

- 第一として、 V_K では明度差が重視されない。
- 第二として、色変換結果のコントラストが高すぎる場合に \bar{R} と合わないことがある。

なお、 \bar{R} の取得には Thurstone の一対比較法を用いた。閻らの指標 V_{K,L^*} は明度差によりコントラストを評価するものであり、 V_K の第一の問題の解決に寄与しうる。Lu らの指標 \tilde{V}_K は一つのパラメータを用いて V_K と V_{K,L^*} を統合し、第一の問題に対応したものである。 V_K よりも \bar{R} に近い値となるが、 V_K と同様に第二の問題があった。

本研究では指標 \hat{V}_K を提案する。この指標は二つのパラメータを用いることで、 V_K の二つの問題を解決し、 \tilde{V}_K に比べて \bar{R} に近い値となる。 \hat{V}_K が優れていることを比較実験により示した。なお、 \hat{V}_K では、Lu らとは異なる方法で明度差の重視を実現している。また、これまでに提案されたコントラスト改善度に関する客観評価指標には、いずれも計算量が大きいという問題点があった。提案指標では、ランダムサンプリングを用いることで計算量を劇的に低減した。ランダムサンプリングの使用（計算量の低減）により、指標の評価能力が劣らないことを実験で示した。

提案指標を用いることで、色覚バリアフリー化を目的とした色変換結果の評価が容易となる。



用語集

1. 正常色覚：L, M, S 錐体が正常な機能を持つ色覚のことをいう。正常3色覚ともいう。
2. 色覚異常：L, M, S 錐体のうち、1種類以上の錐体が異常あるいは機能しない色覚のことをいう。L, M, S 錐体において、1種類（以上）の錐体に異常がある場合を異常3色覚という。異常3色覚において、L 錐体が異常の場合、1型3色覚という。同様に M 錐体が異常の場合 2型3色覚と呼び、S 錐体が異常の場合 3型3色覚と呼ぶ。3種類の錐体の中で、いずれかが機能がしない場合を2色覚という。機能がしない錐体が L, M, S 錐体の場合、それぞれ 1型2色覚, 2型2色覚, 3型2色覚という。
3. 色空間：色の幾何学的な表示に用いる空間のことである。色空間の形状は円柱, 円錐, 多角錐, 球など多様である。
4. CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間：Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) が 1976 年に策定した色空間であり、ヒトの視覚特性をよく表現したものである。 $L^*a^*b^*$ 色空間には三つの座標があり、 L^* は明度、 a^* は赤-緑成分、 b^* は黄-青成分に対応している。
5. 弁別困難色：色覚異常者が弁別に困難を感じる色の組み合わせのこと。
6. コントラスト：コントラストとは対比のことである。画像の場合、明度・彩度・色相の差のことを表す。