

第23回先端技術大賞応募論文 色弁別閾値に基づく個人特徴に対応できる 色弱補正法の提案

中央大学理工学研究科情報工学専攻 修士二年 望月理香

平成21年3月25日

1 はじめに

「他の皆が見ている色を、僕も見たい」という色弱者の方の言葉が本研究のきっかけである。

他者の感覚を知ること、共有することはできないため、色彩知覚以外の全ての感覚において相手がどう感じるかは体感できない。しかし、絵画や風景など、目で見たものの感動を共有できること、相手と同じ視点でものを見ることができれば、役立つだけでなく喜びや他者との共感を与えることができる。色弱者へ一般色覚者が見ている色彩を見せてあげたい、また、色弱者の見る色彩を知ることですら少しでも困っている問題の解決に役立ちたいという思いが原点にある。

最近、従来の大量生産・大量消費に代わって、人間に優しく、消費者個人それぞれの個性と感性を重視する産業技術の新しいパラダイムが注目されるようになって来た。Webや携帯電話を始めとした電子的な情報提供が進展する中で、色彩バリアフリーを考慮したデザインは重要視されている。駅や銀行といった公共機関を利用する際にも、電子表示を始めとする色を用いた案内はありふれており、日々の暮らしの中で色を識別する機会が多い。そんな中、日本国内における先天性の色弱者は男性の二十人に一人、女性の五百人に一人であり、さらに、高齢化の影響などによる後天性の色覚の問題も増加していることから、多くの人に対して色の識別における配慮が必要とされる。

人間の目の網膜で色を感じるのはL,M,S三つの錐体細胞であり、色盲は錐体細胞の一つの欠損によるものとされ、欠損する細胞の種類により一型から三型に分類される。一方、色弱は錐体細胞一つだけとは限らず、様々な遺伝的或いは後天的な原因から色知覚の異常が引き起こされるため、その形態と程度は複雑また多様で、そして人によって大きく異なる。

現在の色弱補正において、メガネやフィルターの利用、ディスプレイ上の補正ソフトの利用や色盲シミュレーションに基づくカラーデザインなど様々な補正法が

知られている。しかし、人間はどの色を見ているか外から観測することはできないため、色弱補正の客観的な基準を定めることは難しく、色弱の厳密な補正は原理的に困難であると思われる。従来の補正法は、色弱の度合いを判断することができないため、文字や記号と背景の間の色コントラストをある程度「過剰に」強調することで、色弱者にそのメッセージを読み取れることを期待するほかない。このような方法では当然一人一人の色弱の程度に合わせた補正は困難で、またTVや絵画などのような自然画像には適用できない。

本研究では以上の問題点に対して、まず人間の色知覚特性を「色弁別閾値」という客観的に観測可能な情報によって表し、それを色弱者ごとに実際に測定する。そして、リーマン幾何学の数学原理に基づき、色弱者に一般色覚者と同様な色知覚を与えることが可能となる色弱補正の新しい原理を提案する。具体的に、「全ての色において色弱者と一般色覚者の色弁別閾値を等しくすること」という新しい補正基準が定め、個人特徴に対応可能な色弱補正を工学的に実現する方式を示す。色弁別閾値によって個人の色空間を表現できるため、色弱者の色空間と一般色覚者の色空間との間の写像から、上記基準に基づく色弱補正法を実現することができる(図1)。最後に、提案手法の補正効果をSD法による主観評価を用いて確認している。

本方式は、色弱補正に客観的且つ厳密な補正基準に基づき、色弱者に一般色覚者と同様な色知覚を提供し、一人一人の色知覚特性に合わせた色弱補正を行って各々が快適に色を識別できる色彩環境が与えられる。また、自然画像や動画などへの適用といった工学的な汎用性も備えている。

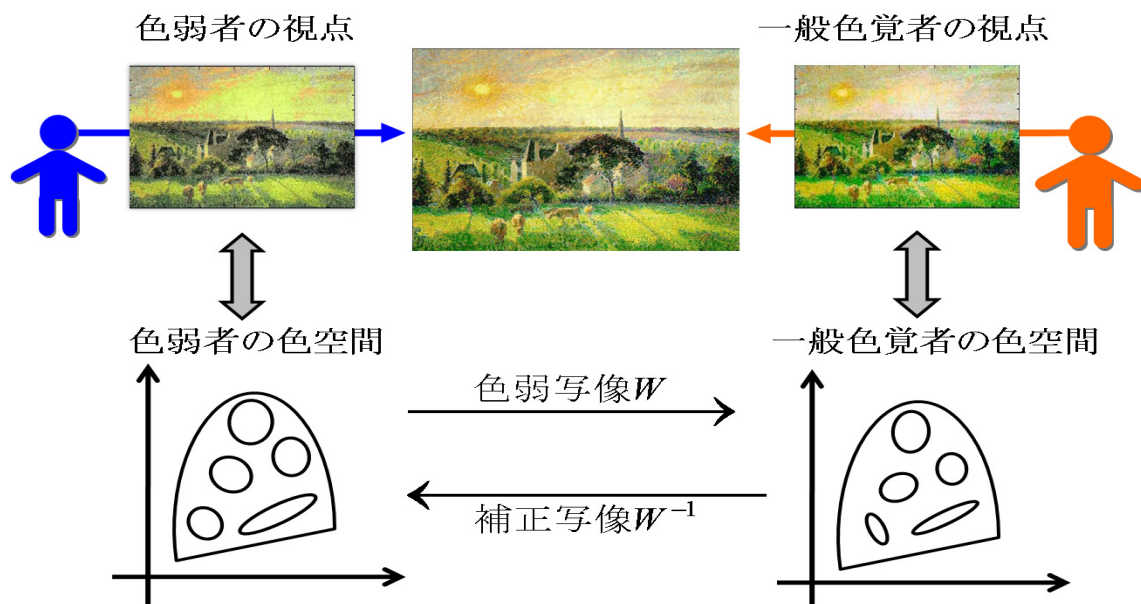


図 1: 色弱補正の流れ

2 色弁別閾値による個人色知覚特性の測定

2.1 色弁別閾値

人間の色の見えは、色分布全体における主観的印象（大色差）によって定められ、それを定量的に扱うことは大変難しいとされる。一方、人間の小色差における色弁別は各色ごとの局所的な閾値（色弁別閾値）によって定義され、客観的に且つ定量的に観測可能である。

色弁別閾値は、MacAdam の楕円 [18] に示されるように、異なる色を見分けることのできる最小の差であり、小色差の色知覚における最も重要な性質である。完全な色盲者は、混同色線（色度図の中で、色盲者にとって同じに見える色を結んだ線）方向上の色を区別できないため色弁別閾値が無限であると考えられる。一方、色弱者の場合は一般色覚者に比べて色弁別閾値が混同色線方向に伸びているが、無限大ではないため有限でしかも測定可能である。一般的に、色弁別閾値は個人ごとに固有の色知覚特性である。

従って、本研究は、まず色弱者の色知覚に関する個人特性として、色弁別閾値情報に注目した。

2.2 色弁別閾値の測定

まず心理物理学実験を構成して、一般色覚者と色弱者の色弁別閾値を測定した。

2.2.1 実験環境

人間の色弁別閾値は、心理物理学実験によって心理物理量として実測できる。測定の実験環境は以下のように設定した。観察距離は、人間の色感覚を規制する必要があるため 10° 視野に基づき距離と色の表示サイズを構成した。

観察者は 80cm の距離から図 2 に示すディスプレイ上に表示された $14\text{cm} \times 14\text{cm}$ の正方形を観察する。右半分の色を徐々に変化させ、左右の色が異なると感じた時点での $CIEXYZ$ 空間の座標値を記録した。元の色との色差を識別できる最小値として、この変化量の値が色弁別閾値である。被験者は 20 代の学生 45 名（男性 37 名、女性 8 名）であり、うち 1 型 3 色覚者 1 名である。

2.2.2 測定方法

まず、MacAdam の楕円として定義されている 25 色の中でディスプレイの色再現域に含まれる 13 色の色弁別閾値を測定した。比較対象が 1 型 3 色覚者であるため、色の変化方向は xy 色度平面上で 1 型 2 色覚の混同色線方向付近の計 16 方向

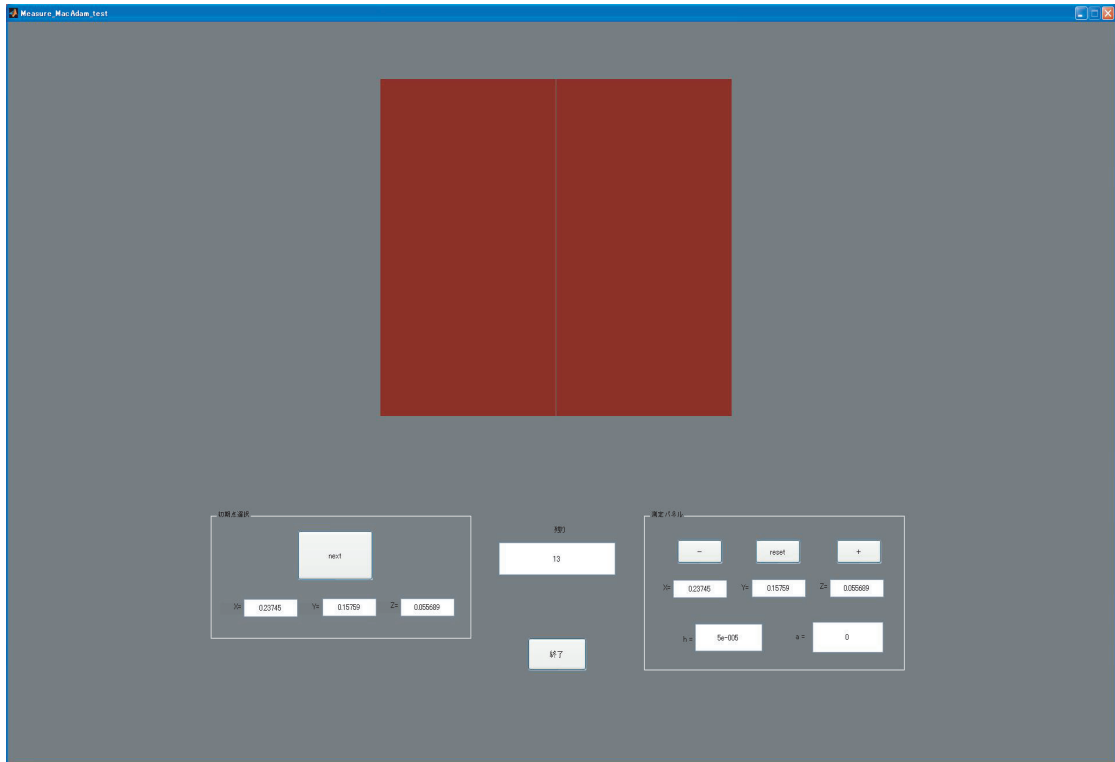


図 2: 実験画面

に関して色を変化させた．測定した色弁別閾値データを用いて，最小二乗法の当てはめにより色弁別楕円面を推定した．

次に，混同色線方向に限定せず， $CIEXYZ$ 空間内で基準とする色の座標から均等な 14 方向に関して色を変化させ，同様に色弁別閾値の測定を行った．基準とする色はディスプレイの色再現域内で均等な間隔に位置する 10 点とした．

2.3 閾値方程式の推定と測定結果

2.3.1 最小二乗法による方程式の導出

測定データに最小二乗法を適用することで，色弁別閾値を楕円面によって近似することができる．色弁別楕円面の形状を見ることで，色毎に，そして観測者毎に異なる色覚特性を客観的に捉えることができる．まず，色弁別楕円面を推定するにあたり，最小二乗法の近似方程式の導出及び計算法を示す．楕円面の方程式

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + dxy + exz + fyz = 1 \quad (1)$$

を推定するために、楕円面上の n 個の標本点の座標を $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1 \cdots n$ とし、求める係数ベクトル、データ行列を以下と定義すると、

$$\alpha := (a, b, \dots, f)^T \quad \beta := (1, 1, \dots, 1)^T \quad (2)$$

$$A := \begin{pmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & x_1 y_1 & x_1 z_1 & y_1 z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & x_2 y_2 & x_2 z_2 & y_2 z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 & x_n y_n & x_n z_n & y_n z_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

次の方程式が成り立つ。

$$A\alpha = \beta \quad (4)$$

ここで最小二乗法を用いると、係数ベクトルは次のように求めることができる。

$$\alpha = (A^T A)^{-1} A^T \beta \quad (5)$$

2.3.2 測定結果

まず、混同色線付近の標本点の色弁別閾値による楕円面の推定結果を図3、図4に示す。どの色についても色弱者の楕円面は一般色覚者の楕円面よりも広がっており、色に対する鈍感さが確認できる。推定した楕円面の $X + Y + Z = 1$ となる平面、つまり MacAdam の楕円と同じ平面である xy 色度平面上での断面を図5に示す。内側が一般色覚者、外側が色弱者の楕円を示し、色度平面上でも、色弱者の楕円の広がりが確認できる。次に、 xy 色度平面上の均等な標本点の色弁別閾値による楕円面の推定結果を図6、図7に示す。こちらも同様に楕円面は様々な方向へ広がっており、図8に示す色度平面上の断面の楕円も個人と色による差異が確認できる。

xy 色度平面上において、混同色線上の点における色弁別閾値の比較を図9に示す。全ての色で、色弱者の色弁別閾値は一般色覚者と比較して長くなっていることが確認できる。色ごとに両者の長さも、色弁別閾値自体も様々である。

3 色弱補正の新しい原理と判別基準

前節の測定結果より、色弁別閾値は色毎に異なるため、人間の主観色空間は複雑に歪んでいることがわかる。さらに、その歪みは観測者毎に異なることから、個人の色知覚特性が特徴づけられる。

しかしながら、色閾値情報は、あくまでも色が一つの主色から微小に変化したときの特性で、いわゆる主色にも依存する小色差情報である。色知覚、ひいてはの主観的な印象あるいは色の見えは、画像全体の色分布の中で、ある参照点に対するあらゆる色同士の主観色差、つまり大色差の集合によって定められる。色弱

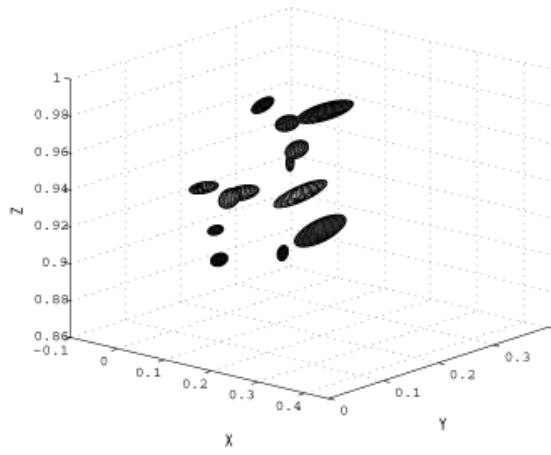


図 3: 一般色覚者の楕円面 -1-

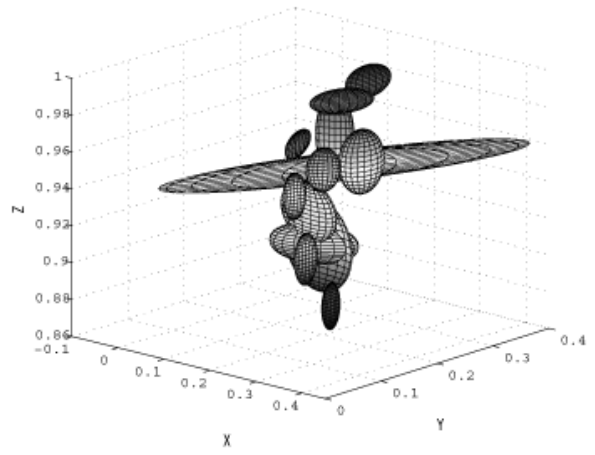


図 4: 色弱者の楕円面 -1-

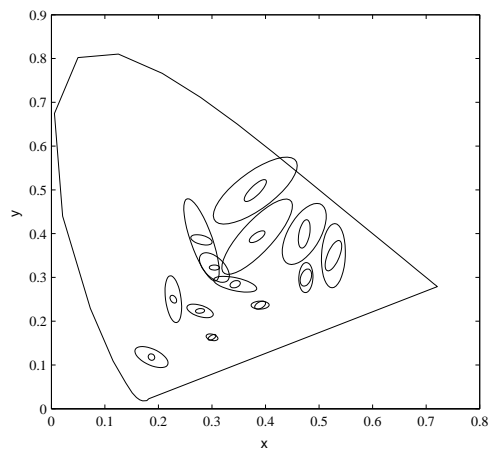


図 5: 色弱者と一般色覚者の色弁別楕円面の断面の比較 -1-

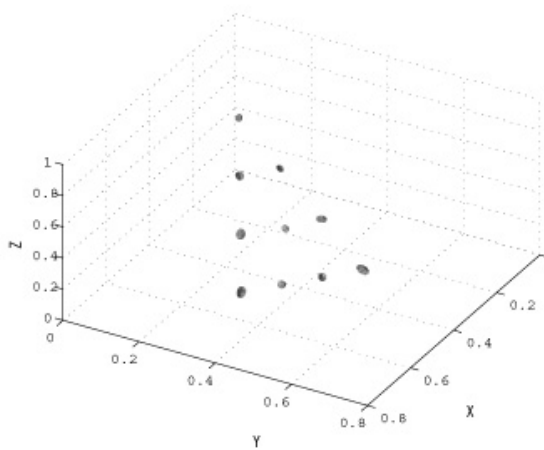


図 6: 一般色覚者の楕円面 -2-

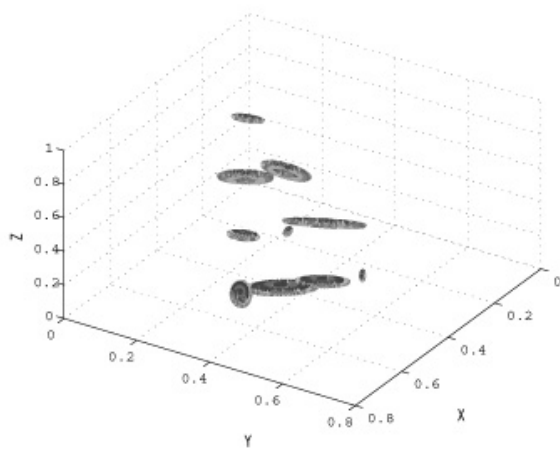


図 7: 色弱者の楕円面 -2-

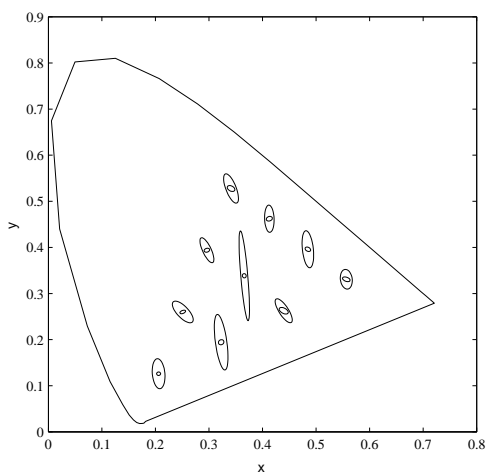


図 8: 色弱者と一般色覚者の色弁別楕円面の断面の比較 -2-

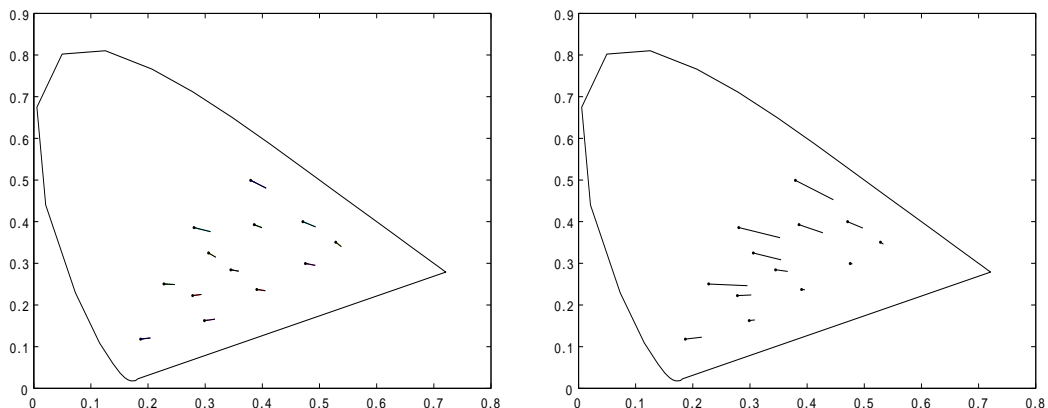


図 9: 混同色線方向の色弁別閾値 (左:一般色覚者, 右:色弱者)

者には一般色覚者と同様な色知覚さらに主観的印象を与えるためには、以上のように同様な大色差を持つ色分布を見せなければならない。一方、この大色差については、主観など多数の要因に影響されるため、定量的に扱うことが大変困難とされてきた。

そこで、色空間のような歪んだ空間を扱う強力な数学の手法として、リーマン幾何学を用いることとした。特に、リーマン幾何学の手法を用いることで、各色の色弁別閾値と色分布全体の主観的色差とを強く結びつけることができる。その結果、以下の新しい補正原理が得られた。

3.1 色弁別閾値とリーマン幾何学に基づく補正原理

色空間の各点における色弁別閾値は、その色の近辺の長さ或いは距離の尺度を与えている。例えば、点 x の近くに偏移 dx が引き起こす色差は局所距離

$$\| dx \|^2 = dx^T R(x) dx \quad (6)$$

によって表される。色ベクトル x 近辺の色弁別閾値楕円(球)は、 x から単位距離の色差を与えている。このように各点毎に異なる距離の尺度を持つ空間のことをリーマン空間という。行列 $R(x)$ は x におけるリーマン計量という。今、異なるリーマン計量(即ち色弁別閾値)が $R(x), R(y)$ で表される二つの色空間 S_1, S_2 を考える。 S_1 から S_2 への写像

$$f : S_1 \longrightarrow S_2$$

に対して、 S_1 のある点 x に対して写像 $y = f(x)$ が定義され、 x と y における局所距離が等しいとき、二つの空間は x で局所等長であるという。 S_1, S_2 が任意の x において局所等長であれば、二つの空間は局所等長であると定義される。局所等長

である両色空間の間では，対応点における小色差が写像 f によって保存される．また，リーマン空間において任意の二点 x_1, x_2 間の距離は，二点を結ぶ測地線（二点間の最短曲線）の長さで測ることができる．リーマン空間 S_1 と S_2 の間に写像 f が定義され，

$$x_1, x_2 \in S_1, \quad y_1 = f(x_1), y_2 = f(x_2) \in S_2 \quad (7)$$

としたとき任意の x_1, x_2 間の距離と y_1, y_2 間の距離が等しければ，二つの空間は大域等長であると定義される [16]．大域等長である両色空間の間では，大色差が写像 f によって保存される．

リーマン幾何の理論によると，局所等長な二つの単連結なリーマン空間は必ず大域的にも等長である．その逆も成り立つ．つまり，変換前後の点の近傍での局所色差が常に等しければ，変換前後の任意の二点間の大域色差も常に等しいことが保証される [17]．

従って，二つの空間 S_1, S_2 を一般色覚者及び色弱者の色空間と考え，色弁別閾値が全ての点において等しくなるように局所補正を行えば，一般色覚者と色弱者の大域色差を一致させることも可能である．これらの事実を踏まえて「全ての色において色弱者と一般色覚者の色弁別閾値が同様である」という色弱の補正基準を提案する．

3.2 色弱写像と補正法

まず，色弱者の色空間 C_w から一般色覚者の色空間 C_n への色弱写像 w を以下のように定義する．

$$w : C_w \longrightarrow C_n : \quad y = w(x)$$

D_w を w のヤコビアンとするととき，

$$dy = D_w dx \quad (8)$$

提案基準としては，色弱者と一般色知覚者の色弁別閾値を一致させるためには，

$$R_n(y) = D_w^T R_w(x) D_w \quad (9)$$

を各色で満たさなければならない．

色弱写像 w を推定するためには，各色において前節で測定された補正すべき色弱者と一般色知覚者の色弁別閾値に基づき，補正基準 (9) を満たすように色弱写像 w のヤコビアン D_w を推定すればよい．ある色の色弱写像による像は，一般色知覚者から見た補正すべき色弱者が見える色のシミュレーションとなる．

一方，補正写像を色弱写像 w の逆写像 w^{-1} と定義することができる．具体的には，その局所線形近似が $(D_w)^{-1}$ によって定められる．この補正写像が施された色刺激 $z = w^{-1}(x)$ を色弱者に提示することで，一般色知覚者と同様な色弁別閾値を実現することができる．

4 色弱補正の実現

本研究で提案する補正方式と得られた閾値データは，一般的な色空間と色知覚モデルに適用することが可能であるが，ここでは，まず Brettel らの色盲モデルを利用して色盲者の色知覚の連続変形による色弱モデルを構築し，色弱写像の線形近似を推定し，補正を行う．さらに，この方式を発展し，混同色線上の厳密な色弱写像と補正方式を示す．

4.1 色盲モデルに基づく色弱の近似モデル

L, M, S 錐体の欠損などによる色盲は， LMS 空間におけるそれぞれの錐体の感度を表す座標軸方向に，ある 2 次元の平面領域へ射影されることと理解されている．ここでは，座標軸との平行線が，それぞれ色盲における混同色線に相当する．しかし，色盲者の色知覚は混同色線上のどの位置に射影されるか，推測することは簡単ではなかった．最近，Brettel らにより確立された色盲モデル [13] が，その答えを与えている．このモデルでは色盲者と一般色覚者との間にある不変色相 (invariant hue) と呼ばれる共通な色刺激を拘束条件として仮定することで，色盲者の色知覚域を求めている．カラーディスプレイにおいて $LMS3$ 刺激値が同エネルギーとなるような値を E とし，原点 O から E へのベクトル上では一般色覚者と色盲者の色知覚が等しいと仮定し，不変色相 A を 475nm もしくは 575nm とする．Brettel らのモデルでは，与えられた色刺激をそれらのベクトル OE と不変色相 A によって張られる二平面 (図 10) へ投影する．その方向は各欠損錐体の軸と平行な方向であり，例えば 1 型 2 色覚では L 軸方向，2 型 2 色覚では M 軸方向となる．(図 10)

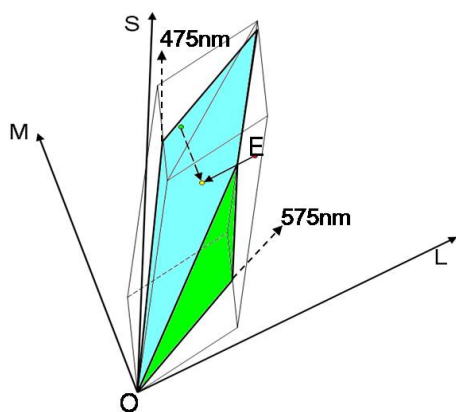


図 10: 色刺激の射影法

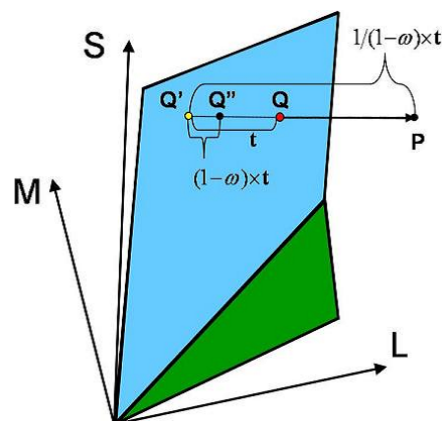


図 11: 色弱の近似モデルと補正の原理

以下では，まず色弱の近似モデルを用いて，線形近似としての色弱写像と補正方式を示す．

図 11 に色弱者の知覚する色刺激を表す． Q は一般色覚者が知覚する色刺激， Q' は色盲者が知覚する色刺激とする．前節の色盲の写像により， Q' は Q を混同色線方向に沿って，色盲者の色知覚平面へ投影したものである．

ここで，任意の色刺激 Q について色盲知覚 Q' とこれらをつなぐ混同色線 $\overline{QQ'}$ が一意に定まるため，すべての処理はみなこの混同色線上の 1 次元部分空間に限定することができる．そこで，色弱者の色知覚は色盲者と一般色覚者中間に連続分布している [15] という事実を利用して，色弱者の色知覚を色盲の写像の連続変形であると考えられる．具体的には，色弱者が知覚する色を Q'' とすると，それは色盲写像の投影線上の中間点にあると仮定できる．それを Q が色弱写像 w によって移された結果とする．

4.1.1 色弱写像の線形近似と線形補正

まず，色弱写像の線形近似法を示す．色弱写像 w が線形写像であると仮定して，色弱者の知覚される刺激を以下とする．

$$Q'' = w(Q) = \omega Q' + (1 - \omega)Q \quad (0 \leq \omega < 1) \quad (10)$$

Q と Q' の間の割合を表す ω は錐体の欠損度，或いは色弱の程度を表すパラメータとして「色弱度」と定義する．色弱度は 0 から 1 の範囲で定義され，0 は一般色覚者を，1 は色盲者を意味する．色弱写像 (10) を Q を基準に考えると，色弱者が感じる色刺激 Q'' は色刺激 Q から Q' への射影の途中に位置し， $(Q' - Q)$ の長さ (図 11 中では t と示す) の ω 倍縮小されたところで停止したと考えることができる．即ち，

$$Q'' = w(Q) = Q + \omega(Q' - Q) \quad (11)$$

また，色弱モデルは，原点 Q' を基準に考えると Q' から一般色覚者の知覚までの $(Q - Q')$ の長さを $1 - \omega$ 倍に縮小した移動を色弱者の色知覚としてモデリングできる．

$$Q'' = w(Q) = Q' + (1 - \omega)(Q - Q') \quad (12)$$

色弱補正のために，色弱写像 w の式 (12) のような解釈は特に便利である．その逆写像として今度は $(Q - Q')$ の長さをあらかじめ $1/(1 - \omega)$ 倍してから色弱者に見せる (図 11) ことで，一般色覚者と同様な色彩情報を与えることが可能である．補正後の色刺激を P として式で表すと以下のようなになる．

$$P = w^{-1}(Q) = Q' + \frac{1}{(1 - \omega)}(Q - Q') \quad (13)$$

この P を色弱写像 (10) に代入すると $w(P) = Q$ ，つまり色弱者は P を Q として知覚できることが確認される．

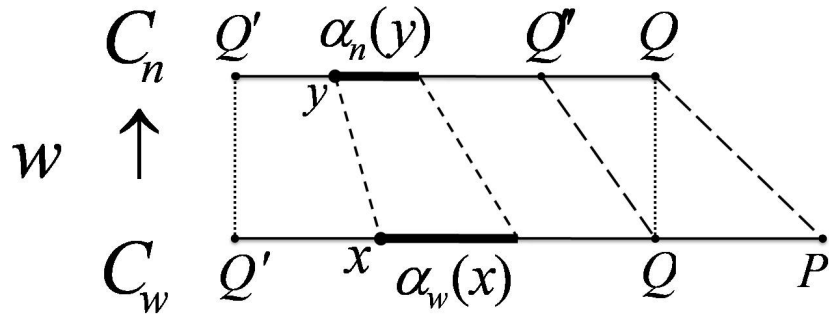


図 12: 色弱写像と補正写像の厳密な定義

4.1.2 色弱度の推定

以上に定義された色弱度によって，3.2 節の補正基準を満たす色弱写像 w のヤコビアンは

$$D_w = 1 - \omega \quad (14)$$

として定めることができる．一般色覚者の色弁別閾値を α_n ，色弱者の色弁別閾値を α_w とする．これらは，前節で測定した色弁別楕円面の定義方程式を用いて，色弁別楕円面と色度平面との交わり，さらに混同色線との交わりから求めることができる (例：図 9)．補正基準 (9) によれば，

$$\alpha_n = (1 - \omega)\alpha_w \quad (15)$$

を満たさなければならない．従って，色弱写像の中で，

$$D_w = 1 - \omega := \frac{\alpha_n}{\alpha_w} \quad (16)$$

としてヤコビアンそして色弱度を定めることができる．この閾値の比率は色弱者と一般色覚者の閾値の違いを表し，色弱者の閾値を一般色覚者の閾値へ補正するためには，その逆数倍，つまり色弱者の色弁別閾値を $1/(1 - \omega)$ 倍拡大すればよい．

4.2 色弱写像と補正写像の厳密な定義

一般的には，色弱度は人により異なるだけではなく，図 9 に示されるように与えられる色によっても異なるため，一般的に色弱写像は線形写像ではない．本節ではその厳密な定義と補正方式を述べる．まず，一般色覚者と色弱者の混同色線上の 1 次元色空間 C_n, C_w と色弱写像 w は図 12 に示される．特に， C_n の点 x とし， C_w の点を y とする．また， $\alpha_w(x), \alpha_n(y)$ は x, y における色弱者と一般色覚者の色

弁別閾値とする．3.2節の補正基準により，色弱写像のヤコビアンは次式を満たさないといけない．

$$D_w(Q) = \frac{\alpha_n(Q'')}{\alpha_w(Q)} =: 1 - \omega(Q) \quad (17)$$

$\omega(Q)$ は Q における色弱度と定義する．

色弱写像は，そのヤコビアンの C_w 内の積分によって一意に定められる．

$$Q'' = w(Q) = Q' + \int_{Q'}^Q (1 - \omega(x)) dx \quad (18)$$

この色弱写像の定義は，式 (12) の拡張であることが明らかである．一方，補正写像は， C_n 内の積分

$$P = w^{-1}(Q) = Q' + \int_{Q'}^Q \frac{1}{1 - \omega(y)} dy \quad (19)$$

によって与えられる．この補正写像も，式 (13) の拡張となっている．色弁別閾値の観測値から，色弱度，色弱写像と補正写像を求めるためには，以下の方法が考えられる．

まず， C_w において，混同色線上に標本値 $\{x_0, x_1, x_2, \dots\}$ を以下のように定める．

$$x_0 = Q', \quad x_{i+1} = x_i + \alpha_w^{(i)}$$

ここでは $\alpha_w^{(i)} := \alpha_w(x_i)$, $i = 1, 2, \dots$ は標本値 $\{x_i\}$ における色弁別閾値である．

同様に， C_n の混同色線上に，標本値 $\{y_0, y_1, y_2, \dots\}$ における色弁別閾値 $\alpha_n^{(j)} := \alpha_n(y_j)$, $j = 1, 2, \dots$ を観測し，標本値 $\{y_j\}$ を以下のように定める．

$$y_0 = Q', \quad y_{j+1} = y_j + \alpha_n^{(j)}$$

従って， $y_k = w(x_k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$

k 番目の区間の色弱度 ω_k を，一般色覚者と色弱者の色弁別閾値 $\alpha_n^{(k)}$, $\alpha_w^{(k)}$ を用いて定義する．

$$\omega_k := 1 - \frac{\alpha_n^{(k)}}{\alpha_w^{(k)}} \quad (20)$$

また， C_w においては $x_I \leq Q < x_{I+1}$ として， C_n においては $y_J \leq Q < y_{J+1}$ とする． C_w の k 番目区間に色弁別閾値が $\alpha_w^{(k)}$, C_n の k 番目区間に色弁別閾値が $\alpha_n^{(k)}$ に等しいと仮定すると，色弱写像と補正写像は以下のように混同色線上の有限和に置き換えて実現できる．

$$Q'' = \sum_{i=0}^I (1 - \omega_i)(x_{i+1} - x_i) = \sum_{i=0}^I \alpha_n^{(i)} \quad (21)$$

$$P = \sum_{j=0}^J \frac{1}{1 - \omega_j}(y_{j+1} - y_j) = \sum_{j=0}^J \alpha_w^{(j)} \quad (22)$$

本方式は，混同色線という色空間の一次元部分空間上に定義されたが，さらに2次元色度平面や，3次元色空間における補正方式へ拡張することができる [1][2] ．

5 自然画像への適用結果

自然画像に対して提案手法を適用した場合の色弱視 simulation 画像，及び補正画像を以下に示す．全ての色について，対象となる色弱者の色弱度によって simulation を行い，補正を施している．

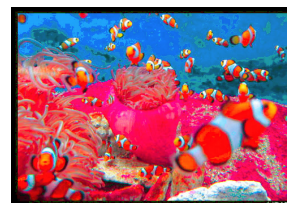
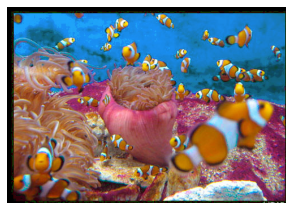


図 13: 色弱視 simulation 画像

図 14: 元画像

図 15: 補正画像

カラープレート参照

6 補正の評価

以下では，2.2 章で色弁別閾値を測定した色弱者に対応するように画像の補正を行い，その効果を評価した．

6.1 色弁別閾値補正の確認

図 16 は一般色覚者の色弁別閾値に等しい色差で作成され，一般色覚者には文字が判別可能であるが比較対象である色弱者には判別出来ない画像に，提案手法である補正を施したのは図 17 である．色弱者へ提示した結果，今回測定した全ての色について図 17 の色差は色弱者が文字が判別可能最小色差であることが確認できた．

まず，各色における色弱者の色弁別閾値が一般色覚者のものと同様になったことを確認するために，一般色覚者には文字が判別可能であるが比較対象である色弱者には判別出来ない画像に，提案手法である補正を施した．図 16 は一般色覚者の色弁別閾値に等しい色差で作成され，一般色覚者には文字が判別可能であるが比較対象である色弱者には判別出来ない画像である．その画像に，提案手法である補正を施したものが図 17 である．両者を色弱者へ提示した結果，今回測定した全ての色について図 17 の色差は色弱者に判別可能となったことが確認できた．以下にテスト画像のうち一色の例を示す．

カラープレート参照



図 16: 補正前



図 17: 補正後

6.2 SD 法による主観評価

提案手法の効果を確認するためには，補正画像を被験者に提示して主観評価を行うことが必要である．SD 法は，色彩など感覚的刺激が与える印象の測定にも広く使われており，心理学における感情的意味の測定法の一つでもある．今回，SD 法を用いることで一般色覚者と色弱者それぞれの自然画像に対する印象を定量的に表現し，比較を行った．各画像に対する印象の質問用紙を図 18 に示す．一般色覚者に元画像を，色弱者には元画像と補正画像を提示した．

その結果，図 19 において，一般色覚者が元画像を見た印象（実線）と色弱者が元画像を見た印象（点線）には差があるといえる．図 20 における補正後の評価では，一般色覚者が元画像を見た印象（実線）と色弱者が補正画像を見た印象（点線）が近づいたことがわかる．従って，自然画像の補正後は，補正前と比較すると一般色覚者と色弱者にほぼ同様な印象を与えられたことが確認できる．

7 むすび

本研究では，色弱者に一般色覚者と同様な色知覚を与えるという目標に基づき，個人特徴に対応できる色弱補正法を提案した．

まず，どこまで補正すれば良いのかという従来定まらなかった補正の問題点に対し，色弱者の色弁別閾値を一般色覚者と等しくなるようにするという補正基準を提案し，色覚異常の補正に関する一般的な理論方式を示した．また，心理物理学

	非常に	かなり	やや	どちらで もない	やや	かなり	非常に	
明るい								暗い
温かい								寒い
重い								軽い
新しい								古い
柔らかい								硬い
激しい								静か
甘い								辛い
嬉しい								悲しい

図 18: SD 法の質問用紙

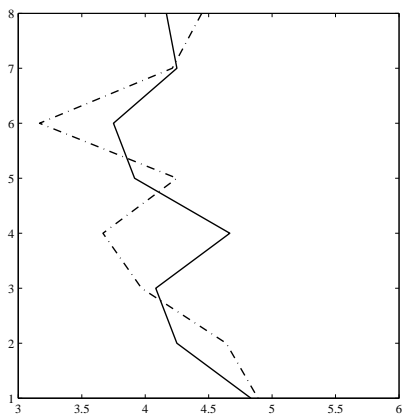


図 19: 補正前

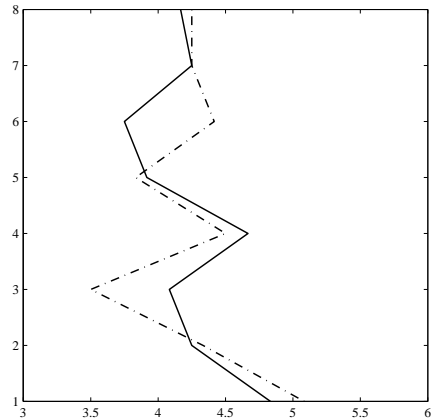


図 20: 補正後

実験により色弁別閾値を実測し，従来観測できなかった色弱者の色知覚特性と色弱写像を求めた．特に色弁別閾値の比較によって個人の色弱度を定義することで，個人の色知覚特性を視覚的にわかりやすく表現し，厳密に個人特徴に対応した色弱シミュレーションを行った．さらに，各色に対応する補正率を適用することで，個人差だけでなく各色刺激で異なる色弱度にも合わせた補正を行った．そして，提案手法を自然画像へ適用し，SD法を用いた主観評価により補正効果を確認した．

実用化へ向けての課題としては，補正の高速化による動画像への適用，そしてリアルタイム補正や閾値測定の簡易化が挙げられる．

多くの人々が電子機器を所有する時代の中で，PCやテレビなどの個人向けカスタマイズという利用者一人一人への配慮は大きな課題である．中でも色彩の利用においては，美しさやデザイン性だけではなく，認識の容易さへも配慮することは大変重要である．個人の特徴に合った補正を施すことで，個人差という問題を気にすることなく，各自にとって快適な色彩環境が与えられる．そして，色弱者に一般色覚者と同じ色を見せられることは美しさや感動の共感に加えて，同様に情報を認識できるという利便性もある．

今後も人に優しい色彩工学をテーマとして，人と機械とのコミュニケーション支援の発展を願い研究に力を注いでいきたいと思う．

参考文献

- [1] Rika Mochizuki, Tatsuya Nakamura, Jinhui Chao, Reiner Lenz, "Color-weak correction by discrimination threshold matching", Proceedings of CGIV2008, 4th European Conference on Color in Graphics, Imaging, and Vision, pp.208-213, Barcelona, Spain, Jun.9-13, 2008.
- [2] Satoshi Oshima, Rika Mochizuki, Jinhui Chao, Reiner Lenz, "Color reproduction using Riemann normal coordinates", Proceeding of The 2009 Computational Color Imaging Workshop (CCIW2009), Springer Lecture Notes on Computer Science, St.Etienne, France, 2009.
- [3] 中村竜也，望月理香，趙 晋輝，"色弱視のモデリングとその補正法に関する一考察"，電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集，p206，2006．
- [4] 望月理香，中村竜也，趙 晋輝，"二色型色弱視の補正原理とその実現法に関する考察"，第21回信号処理シンポジウム，電子情報通信学会，2006．
- [5] 望月理香，中村竜也，趙 晋輝，"色弱視の補正原理とその実現法に関する考察"，電子情報通信学会総合大会講演論文集，p310，2007．

- [6] 望月理香, 中村竜也, 趙 晋輝, ”色弁別閾値を基準とした色弱の補正法に関する考察”, ヒューマンコミュニケーショングループシンポジウム, Vol.106, No.610, pp.1-6, HIP2006-128, 2007.
- [7] 望月理香, 中村竜也, 趙 晋輝, ”色弁別閾値を基準とした色弱の補正法に関する考察 -その2-”, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.9, No.2, pp.137-142, 2007.
- [8] 望月理香, 中村竜也, 趙 晋輝, ”色弁別閾値に基づく色弱写像の推定と色弱補正法”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, p225, 2007.
- [9] 望月理香, 中村竜也, 趙 晋輝, ”局所色弁別閾値を用いた大域色弱写像の推定と色弱補正への応用”, 第22回信号処理シンポジウム, 電子情報通信学会, 2007.
- [10] 望月理香, 趙 晋輝, ”On color-reproduction and color-perception-correction for polychromatics”, 第23回信号処理シンポジウム, 電子情報通信学会, 2008.
- [11] 望月理香, 趙 晋輝, ”混同色線方向における色弱写像の推定と厳密な補正方式の提案”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p236, 2009.
- [12] 望月理香, 趙 晋輝, 阿山みよし, ”複数色知覚の判別閾値測定に基づく色覚補正法に関する考察”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p249, 2009.
- [13] Hans Brettel, Françoise Vienot, John D. Mollon, ”Computerized simulation of color appearance for dichromats”, *Journal of Optical Society of America*, Vol.14, No.10, pp.2647-2655, 1997.
- [14] 大田 登, ”色再現工学の基礎”, コロナ社, 1997.
- [15] 大山 正 他 (編), ”新編 感覚・知覚心理学ハンドブック”, 誠信書房, 1994.
- [16] Manfredo P. do Carmo, ”Riemannian Geometry”, Birkhauser, 1992.
- [17] Jinhui Chao, Ikue Osugi, Masaki Suzuki, ”On definitions and construction of uniform color space”, Proceedings of CGIV2004, The Second European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision, pp.55-60, Aachen, Germany, April 5-8, 2004.
- [18] MacAdam, David Lewis, ”Visual sensitivities to color differences in daylight”, *Journal of Optical Society of America*, Vol.32, No.5, pp.247-274, 1942.