

# 色覚異常者と健常者が認識可能なカラー文書画像変換方法の提案

A Proposal for Converting Color Documents into Documents Shareable among the Colorblind and the Normally Sighted

嶋村 謙太\*  
Kenta SHIMAMURA

竹田 真弓\*  
Mayumi TAKEDA

鬼頭 伸一郎\*  
Shin-ichiroh KITO

洪 博哲\*  
Po-chieh HUNG

## 要旨

色覚異常者と健常者のカラー文書を用いた円滑なコミュニケーションの実現を目的とし、カラー文書の識別性を向上させる画像変換方法を提案する。本手法は、色覚異常者が混同する色に対し、元色の平均色をほぼ維持しながら、色度に応じて異なるコントラストと角度のハッチングを重畳する。視覚実験とシミュレーションにより本手法を検証した結果、ハッチングの重畳により識別性が向上し、色覚異常者に識別できない色の組み合わせのうち75%を識別できるようになった。また、ハッチング角度を体系的に変えることで、元の色度との対応をより正確に覚えられることが判明した。これにより、提案手法で変換されたカラー文書を用いて健常者と色覚異常者が容易にコミュニケーションできる可能性が示された。

## Abstract

To facilitate communication between the colorblind and the normally sighted when they work together with color documents, we propose a new method of converting color documents into documents that are fully interpretable by the colorblind. Our method employs an accumulation of hatchings with varied angles and contrast corresponding to those color coordinates indistinguishable by the colorblind while simultaneously adhering closely to the original color. We tested our method via visual experiments and simulations. We found that the accumulation of hatchings in color documents successfully created distinguishability, such that 75% of the patch pairs, which are primarily not distinguishable by the colorblind, were distinguishable to the colorblind. Further, we found that by systematically varying hatching angles, the colorblind can relate such hatchings more precisely to their corresponding color coordinates. Thus, our document conversion method shows great promise in allowing the colorblind and the normally sighted to more easily communicate with color documents that they share.

\* コニカミノルタテクノロジーセンター(株)  
システム技術研究所 イメージシステム開発室

本稿はカラーフォーラムJAPAN2007論文集に発表した原稿を加筆修正した。

## 1 はじめに

色覚異常者は錐体LMSの一部が欠けているため、健常者と異なり、色を3次元の情報として受け取ることができない。そのため、特定の色を混同し、カラー文書を誤認してしまう場合がある。

錐体の一つが欠如する場合、色度図上で同一の色として混同して認識してしまう方向性が現れる。混同する色を色空間上でつなげた線を混同色線と言い、例えばM錐体の欠如した第二色覚異常者の混同色線は、 $u'v'$ 色度図ではFig.1のように示される。ここでは実線で示された線上の色を区別することが困難になることを示している。特に、健常者では明らかに区別されるような赤と緑を混同してしまうことが発生する。

通常観察される、形状と色の相関が高いものについては、一定の範囲で形状から予測することが可能であるが、文書内の抽象的なデザインについては、予測ができなくなる。この場合、色の特定はできず、健常者同士が色名により対象の特定をするようなコミュニケーション（以降、色名コミュニケーションと呼ぶ）を行っている中に参加することが困難である。

これに対し、Wakitaらは、SmartColorと名づけ、混同する色を別の色に置換して同一文書内の使用色が識別できるようにする手法を提案している<sup>1)</sup>。この手法では、元原稿に対して色を大きく変化させてしまうので、元の色との同一性が崩れてしまう問題がある。

大橋らは、画像の構成物を点と線と面の各形状で分類し、色と各形状ごとに他の形状に対応させるLUTを用いて、カラー画像を変換する手法を提案している<sup>2)</sup>。識別はしやすくなるが、変換の対応付けとして示される凡例が複雑になるため、それを記憶することは難しい。

さらにジョーンズらは離散的なLUTを用いて、画像中の色に応じてテキストを付加することを提案している<sup>3)</sup>。しかし、この手法は連続性がなく、テキストの違いが色の違いと対応していないため、識別のしやすさの程度が分からない。そのため、大橋らの手法と同様に、凡例の記憶が難しい。

以上の各手法とも、混同してしまう2色の領域の識別をしやすいことは実現できているが、色覚異常者と健常者と同じ認識を得て色名コミュニケーションできる

には至らない。

そこで本研究では、色覚異常者と健常者が同じ認識を得て支障なく色名コミュニケーションできるように、カラー文書画像に体系的にテクスチャを加えて表示する画像変換方法を提案する。ここでは第二色覚異常者を対象にし、健常者とのコミュニケーションが円滑に取れるようにすることを目指す。

## 2 提案手法

### 2.1 色名コミュニケーションの要件

色覚異常者と健常者が同じ認識で色名コミュニケーションできるための要件を検討した。その結果、下記の(a)~(c)を満たすことが必要と考えた。

(a)色覚異常者が本来識別できない色領域を識別可能にすること

識別可否の基準値としては、「色名レベルの色の管理の基準」<sup>4)</sup>とされる色差20を利用する。すなわち、識別のためには、2領域の識別度合いがそれ以上の色差に相当する必要がある。

(b)記憶しやすい凡例を用いること

凡例を見ること無しに認識するためには、記憶しやすく、簡単なルールで構築されている必要がある。

(c)元のカラー文書と色がおおむね変わらないこと

変換前後の平均色の変化は(a)同様に色差20以下とし、色名が大きく変わらないようにする必要がある。

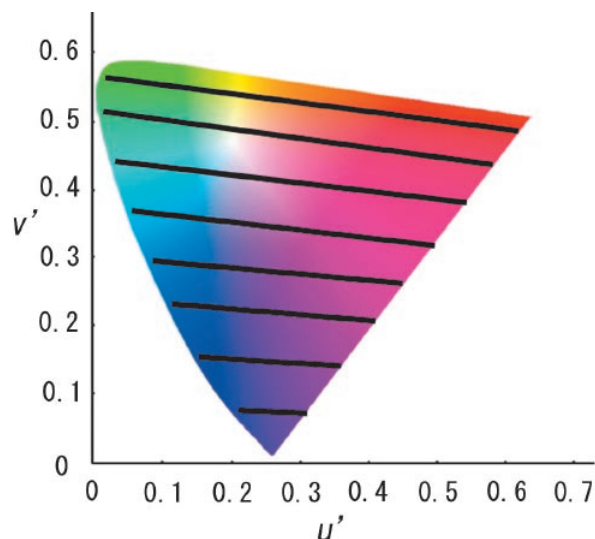


Fig.1 Confusion lines of deuteranope in a  $u'v'$  chromaticity diagram <sup>5)</sup>

### 2.2 提案する画像変換手法

これらの要件を満たすべく、我々は、欠如したM錐体で失われた一次元に対してテクスチャで代替することを考えた。すなわち、カラー文書画像に対し、色度に応じて異なるハッチングを重畳させる。

ハッチングの要素をFig.2に示す。ハッチングのパラメータとしては、コントラスト、平均色、角度、空間周波数がある。

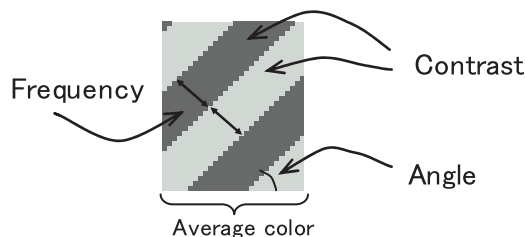


Fig.2 Elements of hatching

ハッチングの重畳は、 $u'v'$ 色度図の均等性を仮定し、混同色線上での位置に応じて、健常者が色度変化を知覚するのとなるべく等価になるコントラスト、および色度の識別を助けるために角度を変化させて生成する。ハッチングは元の色と色度が同じになるようにし、主として視覚の空間周波数応答が高い明度方向の変化を持たせることでコントラストをつける。なお、ここでのハッチングのパターンは、単純に線幅を変えたものとした。

### 2.3 ハッチングのパラメータの設定

ハッチングを重畳させるにあたり、以下の方法でパラメータを決めた。

#### (1) コントラスト強度

コントラスト強度は、ハッチングのコントラスト定量化と計算時の利用のため、単純に、黒からの距離の差の絶対値と定義した。すなわち無彩色のときには輝度差と一致する。今回は、上記条件を満たす強度の計算式として、簡略化のため、sRGB色空間上で色 $(r,g,b)$ を0から1で正規化した値の強度換算値を用いてコントラスト強度 $Pc$ を(1)式で定義した。

$$Pc = \left| \sqrt{0.24r_1^2 + 0.66g_1^2 + 0.1b_1^2} - \sqrt{0.24r_2^2 + 0.66g_2^2 + 0.1b_2^2} \right| \quad (1)$$

ここで、 $(r_1, g_1, b_1)$ 、 $(r_2, g_2, b_2)$ はハッチング濃淡部のそれぞれの強度換算値を示す。

コントラストによって与えられる識別度合いは、色域内に引かれた混同色線上の位置に応じて右端( $u'$ が大)が0、左端( $u'$ が小)が最大で、 $u'v'$ 色度図で線形変化するように設定した。これにより、色差に概比例するコントラストが与えられる。

#### (2) 元の色との平均色の一致

元の色とハッチング重畳後の平均色は、平均色を一致させることを基本とした。しかし、コントラストを重畳させるためには元の色の色度付近で強度変調するため、

色域の余裕が必要になる。色域境界付近の場合、コントラストを確保するとハッチングの平均色が変わってしまう。このため、誤認しないと考えられる無彩色の色域境界付近、および高彩度色でコントラストを減少させた。

### (3) 角度の設定

コントラストだけでは元の色を判断することが難しい。そこで、コントラストの変化とともに、ハッチングの角度と混同色線上の位置を関連付けた。色相に絶対的な感覚があるように、角度にも絶対的な感覚があるため、角度情報と色度情報を関連付ければ、色覚異常者は容易に色度を特定できると考えた。

角度は $u'v'$ 色度図での混同色線の色域境界右端 ( $u'$ が大) を45度、左端 ( $u'$ が小) を135度として、混同色線上の位置に応じて線形変化させた。すなわち、コントラスト同様、角度変化は色差に概比例する。

### (4) 空間周波数

観察する距離に応じて、ハッチングの見易さは変わるが、ドキュメントの視角に応じて観察の距離はおおよそ固定されることに注目し、ハッチング空間周波数は実験的にハッチングを認識しやすい値を抽出して固定値とした。

## 3 本手法のパラメータ導出

### 3.1 ハッチングパラメータと識別度合いの関係

ハッチングパラメータであるコントラスト強度や空間周波数と、識別度合いの関係を以下のように求めた。

#### (1) コントラスト強度と色差の対応

被験者に、平均色が一致するハッチングとベタのパッチペア (以下、パッチペアAと呼ぶ) と、単純なベタで作られた異なる明度のパッチペア (以下、パッチペアBと呼ぶ) を複数並べて提示し、その識別度合いを比較判断、パッチペアAをパッチペアBの色差に対応づけてもらう。

#### (2) 実験手順

測色的にsRGB規格に調整した<sup>6)</sup> 21インチの液晶ディスプレイ (iiyama ProLite H2130) を用い、Fig.3 に示すレイアウトで実施した。

ハッチングの色は、単純化のため無彩色とした。コントラスト強度として0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0の5種、空間周波数(cycle/deg)としては0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 12の7種の組合せで作られる合計35種のハッチングを対象とした。パッチペアAとパッチペアBの平均輝度は0.5で一致させ、背景はN5のグレーに設定した。

被験者は、観察距離は、60cmで、提示されたパッチ

ペアAを左右に動かし、下部に固定されたパッチペアBの11セットと比較し、識別度合いがもっとも近いと感じる位置に置く。これにより、パッチペアAの識別度合いと色差を対応づけさせた<sup>7)</sup> (以後、相当色差と呼ぶ)。

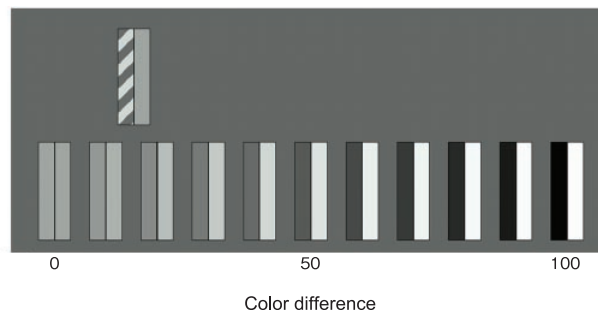


Fig.3 Displayed image used in the visual experiment to obtain the relationship between hatching parameters and distinguishability (corresponding color difference)

### (3) 実験結果と考察

#### a) 空間周波数

空間周波数と識別度合い(相当色差)の関係をFig.4 に示す。その関係は2cycle/degを境に空間周波数が高いほど識別度合いが下がる特性となった。

視覚の空間周波数特性のピークは2cycle/deg付近<sup>8)</sup> であり、パッチペアAの識別度合いはこれとほぼ合った結果になった。

この実験結果および、ハッチング重畳時にハッチングが低周波になるほど文書中で見づらくなる問題があることを考慮し、2cycle/degを本手法で用いる空間周波数として選択した。

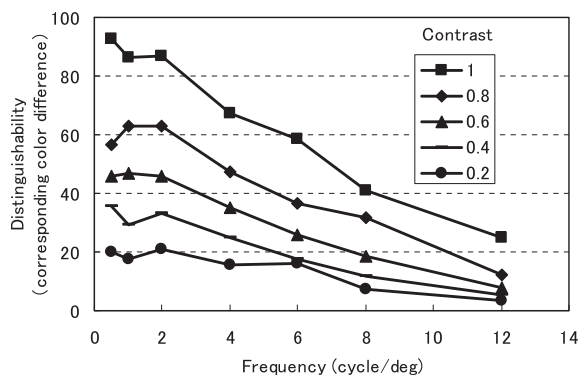


Fig.4 Relation between distinguishability and hatching frequency

#### b) コントラスト強度

ハッチングのコントラスト強度と識別度合い (相当色差) の関係をFig.5 に示す。ここで、この関係がほぼ線形になる理由は明確ではないが、決定係数0.97で線形に近似できた。

空間周波数2cycle/degの場合を抽出した結果、ハッ

チングの強度差であるコントラスト強度 $P_c$ とハッチングによる識別度合い $\Delta E_c$ の関係式は、(2)式で近似され、これを後述の評価に用いた。

$$\Delta E_c = 83 \times P_c \quad (2)$$

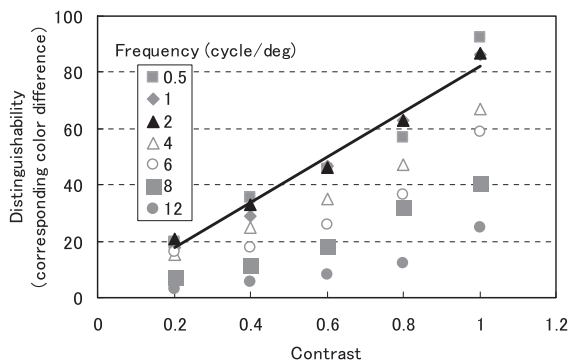


Fig.5 Relation between distinguishability and hatching contrast

## 4 本手法の実装

以上の実験により、空間周波数および色度に対応するコントラスト強度を設定し、実画像に適用した。

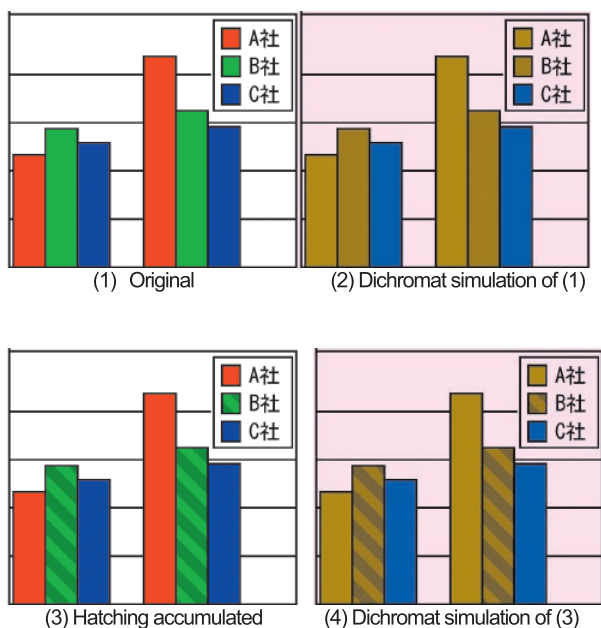


Fig.6 Examples of proposed method

本手法による画像変換結果をFig.6に示す。Brettelらの方法に基づき<sup>9), 10)</sup>, 元画像(1)を色覚異常者の見えに模擬的に示したものを(2)に、また、本手法によりハッチングを重ねさせた画像(3)の色覚異常者の見えを(4)に示す。そのままでは区別のつかなかったA社とB社の棒グラフが識別できるようになっていることが分かる。また、

平均色も元の色に近似されており、健常者の見えも保存されていることが分かる。

## 5 有効性の評価

2.1節に示した3つの要件について、以下の検討を行った。

### 5.1 識別度合いの向上 (要件(a))

#### (1) 評価方法

sRGB色空間全体から格子状に $9 \times 9 \times 9$ の色を選出し、それらすべての色の組合せのうち、 $L^*a^*b^*$ 色差が20以上の組合せに対し、色覚異常者の見えを模擬的に計算し、元の半分以下の色差になり、かつ、要件(a)に示した識別不可条件(相当色差20以下)になった組合せについて、識別度合い改善の程度を調査した。

識別度合いは、ハッチングの違いと色の違いをユークリッドノルムで合成して(3)式のように計算した。ここでは仮に、無彩色で求めた(2)式を全色に用いた。

$$\Delta E_{total} = \sqrt{\Delta E_c^2 + \Delta E_{ab}^{*2}} \quad (3)$$

#### (2) 結果

本手法の適用により、(1)の条件で示した色空間全体で色覚異常者が識別できない色のうち、75%が識別可能になった。

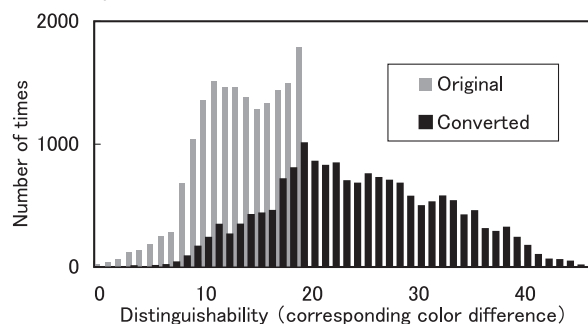


Fig.7 Change in distinguishability between original and converted documents

### 5.2 角度情報による精度向上 (要件(b))

#### (1) 評価方法

単純化のため、色全体でなく一つの混同色線の識別について実験した。赤から緑への混同色線に対し、 $u^*v^*$ 色度図上で均等間隔に19色を取得し、それに角度変化あり/なしのハッチングをかけたパッチを作成して凡例とした。

実験では、Fig.8に示す凡例の色覚異常シミュレート結果にラベル付けをし、健常者4名にこの19個のパッチ



を見せてパッチとラベルの対応付けを記憶してもらった。一定時間後に同じパッチを一つずつランダムに提示し、対応するラベルを回答させ、パッチの1間隔を1単位として、正答値との差をRMSEで計算した。

経過時間は3つのユースケースを考え、①凡例が同一ページにある場合、②異なるページにありそれを探しながら見比べる場合、③完全に記憶に頼る場合を想定し、それぞれ、0秒後、20秒後、数日後(被験者により1~4日)とした。

	Low	←	Contrast	→	High
Fixed angle		..		..	
Varied angle		..		..	

Fig.8 Hatched patches with fixed and varied angles used in experimenting with accuracy of judgment

## (2) 結果

実験結果をFig.9に示す。経過時間が長くなると、角度変化を加えた場合、角度変化なしに比べて倍近い精度で判断できること分かる。角度変化なしでは経過時間に対し誤差が増える傾向にあり、角度変化ありではほぼ一定であることから、記憶しやすくなったと考えられる。

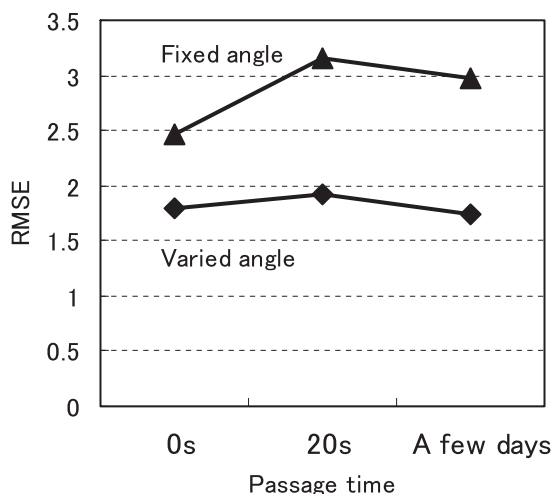


Fig.9 Judgment error for hatched patches with fixed and varied angles

## 5.3 元の色との近似 (要件(c))

### (1) 評価方法

5.1節と同様に729色にハッチングを重畳し、それによる平均色の変化を色差で評価した。

### (2) 結果

729色中、緑から青の高彩度色8色を除き、色差20未満になった。

## 6 まとめ

色覚異常者と健常者が同時にコミュニケーションできることを目指し、認識できない情報を体系的に対応付けられたハッチングに置き換える方法を提案し、視覚実験により検証した。コントラスト強度と角度に関係付けることで、色覚異常者により多くの色を判別可能にし、かつ元の色をほぼ保存することで健常者に対しても同様な色名を利用できる方法を提案した。さらに、角度との対応付けにより、凡例と見比べる必要がなくなる可能性を示した。これらから色覚異常者/健常者間での色名コミュニケーションの可能性を実験的に示すことができた。

この手法を最大限生かすためには、ハッチングの重畳ルール、特に角度を一つに定めて標準化することが望まれる。これにより色覚異常者は色と角度の対応づけルールを記憶しさえすれば、凡例を参照することなしに健常者との色名コミュニケーションが容易に行えるようになると思われる。

### ●参考文献

- 1) K. Wakita and K. Shimamura, "SmartColor: disambiguation framework for the colorblind", In Assets '05: Proc. of the 7th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility, 158-165 (2005).
- 2) 特開2004-178513号公報.
- 3) 特表2007-512915号公報.
- 4) 日本色彩学会編, "新編色彩科学ハンドブック[第2版]", p.290.
- 5) 池田光男, "色彩工学の基礎", 朝倉書房, P.205.
- 6) Po-Chieh Hung, Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations, J. of Electronic Imaging, 2(1), 53- 61 (1993).
- 7) ISO20462-3: 2004 Quality Ruler Method.
- 8) 日本視覚学会編, "視覚情報処理ハンドブック", p.194.
- 9) H. Brettel, F. Vi'enot, and J. D. Mollon, "Computerized simulation of color appearance for dichromats", Optical Society of America (Series A), 14(10), 2647-2655 (1997).
- 10) 嶋村謙太, "配色意図に基づいた色盲の人のための配色システムとその応用", 東京工業大学大学院 平成17年度修士論文 (2006).