

色覚バリアフリーインタフェースの実現にむけた 個人色覚モデルと再配色手法の提案

Estimation of personal color vision model and image modification for color blindness

2021017



研究代表者	岡山県立大学 情報工学部 情報通信工学科	助教	滝本裕則
共同研究者	慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科	准教授	満倉靖恵

[研究の目的]

これまでに、色覚特性者のための色覚バリアフリーシステムや画像の再配色法がいくつか提案されている。しかし、撮影した画像を計算機に取り込んで再配色処理を行う必要があることや、最適な画像を生成するための複数パラメータを手動で操作する必要があるなど、限られた状況下でのみ有効であった。また、再配色の過程において、弁別しやすい色の組合せにのみ着目しており、正常色覚者の見えを考慮しているものは少ない。また、処理コストが高いことも実用化に向けての課題であった。

本申請課題では、色覚バリアフリーに対応したヒューマンインタフェースの実現に向けて、個人の色覚特性モデルを簡便に取得できるシステムを提案し、さらには、もとの配色情報を考慮しつつ知覚しやすい画像へと色補正を行うユニビタスな技術の開発を目的とする。

[研究の内容, 成果]

1. モバイル端末による色覚特性モデルの推定

各個人の色覚特性に適した色補正を行うため、色覚特性モデル(特性の種類と度合い)を求める必要があり、そのために必要な特性計測は、被験者に対して労力と負担をかけずに行うことが求められる。

そこで我々は、色覚特性の型と度合いを診断する方法である The Farnsworth-Munsell D-15 Test をモバイルタブレット端末上で簡便に行えるシステムを開発した。The Farnsworth D15 Test は、16 個の色票を被験者に提示し、その色票を色相順に並び替えさせる検査法である。本来、The Farnsworth D15 Test では、色票の並びから専門医が色覚異常の有無や、その型と度合いを判定する。我々は、Vingrys らによって提案された The Farnsworth D15 Test の採点法を Android OS が動作するモバイルタブレット端末上で実装するため、Java Development Kit と Android Development Tool 等を用いた。システムでは、並べ替えた色票における隣り合う色票間の色差を合計したトータルエラースコア、異常の型を特定する confusion angle、色損失の程度を定量的に示す confusion index を計算する。本システムを用いることにより、被験者による色票選択も含めて、色覚特性の種類とその度合いを 2 分程度で得ることが可能となった。

2. 高速かつ正常色覚者に違和感を生じさせない再配色手法

色覚特性者にとって弁別しやすい色の組合せを用いてカラー画像を補正する研究がいくつか報告されている。先行研究において、色覚特性者が混同しやすい色の組合せは、xy の 2 次元

平面で色の種類を表現する xy 色度図において求められる混同色線から推測可能であること (混同色線理論) が明らかになっている。しかし、先行研究^[1]で提案された再配色手法を用いた場合、正常色覚者の見えを大きく損なう可能性がある。また、これら既存手法の処理コストが高いことも実用化に向けての課題であった。

そこで我々は、一般色覚者の見え (自然さ) を保ちつつも、色覚特性者にとって視認性の良いカラー画像を作成する手法を提案した。まず、原画像に対して色の量子化を行うことで減色化を行う。次に、Color2Gray 法に基づいて、各色クラスタの明度と彩度修正量を求める。最終的に、得られたクラスタごとに重み付けした明度修正量と彩度修正量を原画像に対して反映させることで、高速かつ一般色覚者と色覚特性者どちらに対しても効果的な画像再配色を実現する。提案手法の処理過程は以下のとおりである。

- 手順 1: 色の量子化 (メディアンカット法)
- 手順 2: 色クラスタ間の符号付き色距離に基づく明度修正量と彩度修正量の計算
- 手順 3: 色域を考慮した補正

以下、これらについて詳しく述べる。なお、画素 i の彩度 C_i^* と色相 H_i^* は刺激値 a_i^* と b_i^* を用いて以下のように定義される。

$$C_i^* = \sqrt{a_i^{*2} + b_i^{*2}} \quad (1)$$

$$H_i^* = \arctan\left(\frac{b_i^*}{a_i^*}\right) \quad (2)$$

従来法^[1]では、各画素間の符号付き色距離を求めるための計算コストが課題であった。我々は、メディアンカット法を用いて色を量子化することにより、原画像の減色化を行う。量子化されたそれぞれの色クラスタ間の符号付き色距離を求めることで計算コストの軽減を図る。

さらに、人の目が、色の変化に比べ明るさの変化に敏感であることから、明度と彩度修正に基づく再配色手法を提案した。なお、色の量子化による減色後の色数を K とする。修正後の

各色クラスタの輝度成分 $\bar{\mathbf{L}}^* = (\bar{L}_1^*, \bar{L}_2^*, \dots, \bar{L}_K^*)$ と彩度成分 $\bar{\mathbf{C}}^* = (\bar{C}_1^*, \bar{C}_2^*, \dots, \bar{C}_K^*)$ は以下の最小化問題を解くことによって得られる。

$$E(\bar{L}_1^*, \bar{L}_2^*, \dots, \bar{L}_K^*) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K ((\bar{L}_i^* - \bar{L}_j^*) - \delta_{ij}^L)^2$$

subject to $\sum_{i=1}^K L_i^* = \sum_{i=1}^K \bar{L}_i^*$ (3)

$$E(\bar{C}_1^*, \bar{C}_2^*, \dots, \bar{C}_K^*) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K ((\bar{C}_i^* - \bar{C}_j^*) - \delta_{ij}^C)^2$$

subject to $\sum_{i=1}^K C_i^* = \sum_{i=1}^K \bar{C}_i^*$ (4)

ここで、 L_i^* と C_i^* はそれぞれ i 番目クラスタの修正前の輝度と彩度である。

符号付き色距離 δ_{ij}^L と δ_{ij}^C は i 番目と j 番目の画素の色差を考慮し、以下の式で定義される。

$$\delta_{ij}^L = \Delta L_{ij}^* + \text{sign}^L(\Delta a_{ij}^*) w_{ij} \Delta BM_{ij} \quad (5)$$

$$\delta_{ij}^C = \Delta C_{ij}^* + \text{sign}^C\left(\frac{C_i^*}{C_j^*}\right) w_{ij} \Delta BM_{ij} \quad (6)$$

ここで

$$w_{ij} = \alpha e^{-\left(\frac{\bar{d}_{ij}}{\beta}\right)^2} \quad (7)$$

$$\bar{d}_{ij} = \min(d_{ij}, d_{ji}) \quad (8)$$

$$\Delta BM_{ij} = \sqrt{(a_i^* - a_j^*)^2 + (b_i^* - b_j^*)^2} \quad (9)$$

なお、 ΔL_{ij}^* は $L_i - L_j$ 、 Δa_{ij}^* は $a_i - a_j$ 、 ΔC_{ij}^* は $C_i - C_j$ 、 \bar{d}_{ij} は混同色線理論に基づいて計算される 2 色の混同度合い、 α と β は修正度合を決定するパラメータであり正の実数である。符号付き色距離の符号を決定する関数は以下のように定義される。

$$\text{sign}^L = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{sign}^C = \begin{cases} +1, & x > 1 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

我々は、式 (3) (4) で定義した最小化問題を解くために共役勾配法を用いる。最小化問題を解くことで、色クラスタごとに修正された輝度

\hat{L}_m^* と彩度 \hat{C}_m^* が得られる。したがって、クラスタ m に属する画素 i の輝度と彩度の修正量は以下の様に定義される。

$$\Delta L_i^* = L_m^* - \hat{L}_m^* \quad (12)$$

$$\Delta C_i^* = C_m^* - \hat{C}_m^* \quad (13)$$

しかし、人はその視知覚特性より明暗の変化に敏感である。加えて、 a^*b^* 色空間では、D型とP型色覚者の混同色線は a^* 軸とほぼ平行である。したがって、混同色である2色の b^* 値の絶対値が a^* 値の絶対値より小さくなる場合、弁別困難色を改善するために彩度成分を修正してもあまり効果が得られない。そこで我々は、各画素に適した明度と彩度の修正量を求めるため、以下の式に基づいて画素 i の明度と彩度を修正する。

$$\hat{L}_i^* = L_i^* + \Delta L_i^* \frac{|H_i^*|}{90.0} \quad (14)$$

$$\hat{C}_i^* = C_i^* + \Delta C_i^* \left(1 - \frac{|H_i^*|}{90.0}\right) \quad (15)$$

ここで、 H_i^* はクラスタ i の色相であり、その範囲は -90.0 から $+90.0$ までをとる。

その後、式(14)(15)によって修正された色 (\hat{L}_i^* , \hat{C}_i^* , H_i^*) がディスプレイにおける表示可能範囲 (色域) 外となる場合があるため、 \hat{L}_i^* と \hat{C}_i^* が色域内におさまるように補正を行う。

提案手法の有効性を検証するため評価実験を行った。本実験では、2色型色覚において大半を占めているP型とD型の色覚特性に対して評価を行う。

評価指標として、一般色覚者の見え (自然さ) を保ちつつも、色覚特性者にとって視認性の良い画像再配色を行うため、色覚特性者のための評価指標 E_{cont} と、正常色覚者のための評価指標 E_{natu} を用いる。それぞれの評価指標を以下に示す。

$$E_{\text{natu}} = \sum_{i=1}^n \Delta E(I_i, T(I_i)) \quad (16)$$

$$E_{\text{cont}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(|I_i - I_j| - \left| \text{SIM}(T(I_i)) - \text{SIM}(T(I_j)) \right| \right)^2 \quad (17)$$

ここで、 I_i は原画像 I の i 番目の画素値を、 $T(\cdot)$ は提案する色変換関数を、 $\text{SIM}(\cdot)$ は Brettel モデルによる色覚特性者の見えをシミュレートする関数を、 n は原画像の画素数をそれぞれ示している。なお、これら評価指標の値は小さいほど良いことを意味している。実験条件として、Intel Core i7 CPU 870 2.93 GHz, 8 GB メモリー搭載器上にて実装した。実験に用いた画像は、 360×355 画素の 24-bit RGB カラーであり、図1(a)に示す。

実験結果として、D型の色覚特性者に対する再配色結果を図1(b)~(d)に、評価指標による結果を表1に示す。パラメータとして、色クラスタ数 K は 1000、図1(b)~(d)での再配色パラメータ α と β はどちらも 0.5 としている。また、図2に2つの評価指標 E_{cont} と E_{natu} の値をプロットしたものを示す。また、 $K=1000$ の場合の処理時間は 1.25 秒であった。結果より、高速かつ一般色覚者と色覚特性者どちらに対しても効果的なカラー画像の再配色を実現した。

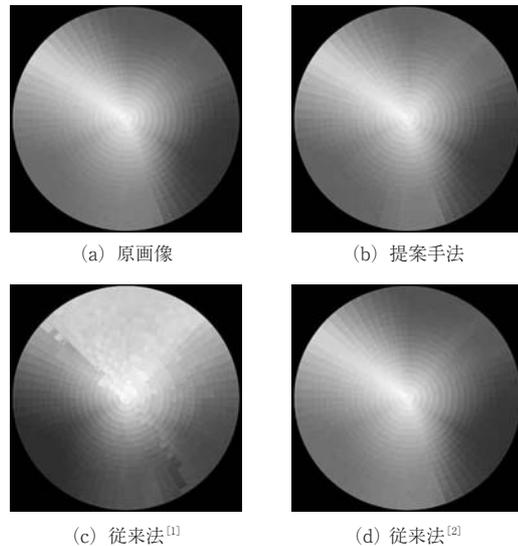


図1 D型色覚特性者に対する再配色結果

表1 各再配色結果に対する再配色パラメータと評価指標（自然性・識別性）

α	β	提案手法		従来法 [1]		従来法 [2]	
		E_{natu}	E_{cont}	E_{natu}	E_{cont}	E_{natu}	E_{cont}
0.1	0.1	2.207	22.200	2.520	23.783	2.770	23.431
0.1	0.3	2.696	21.772	3.259	23.343	3.834	22.901
0.1	0.5	2.946	21.431	3.842	23.009	4.326	22.485
0.3	0.1	2.807	21.254	4.132	22.735	4.202	22.202
0.3	0.3	4.271	21.158	8.873	22.673	7.018	22.074
0.3	0.5	5.200	21.162	11.254	22.171	8.197	21.788
0.5	0.1	3.239	21.119	6.505	21.846	5.492	21.679
0.5	0.3	6.763	21.079	14.792	21.644	9.635	21.622
0.5	0.5	8.480	21.047	18.750	21.642	11.569	21.574

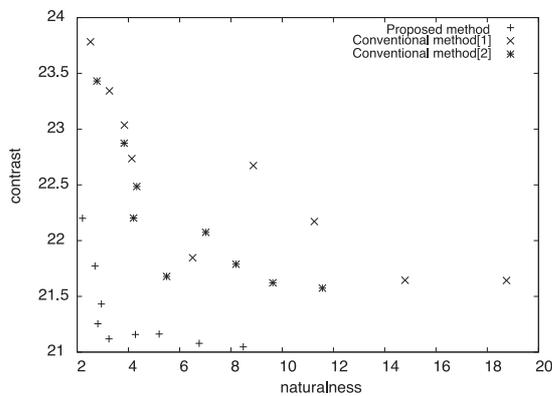


図2 従来法との比較

3. 視覚的顕著性に基づく注視誘導

これまでに、色覚特性者のための色覚バリアフリーシステムや画像の再配色法が複数提案されている。しかし、色覚特性者に関する無意識的な視覚的注意の引かれやすさである誘目性についての研究はほとんどない。

我々は、人の注視を遮ることなく、より自然に視線を誘導する視線インタフェースの実現を目指して、視覚的顕著性に基づく違和感のない画像修正法を提案した。見る対象の様子によって注視のしやすさは変わるという発想に基づき、注視の引き込みやすさを示す指標として、L. Ittiらによって提案された視覚的顕著性マップの計算モデルを利用する。そして、画像中で指定した領域の視覚的顕著性が最も高くなるように輝度と色相を画素ごとに調整した。本年度は、その第一歩として、正常色覚者を対象とし、提案手法の有効性を検証するため、視線計測装置を用いて意図した領域に視線を誘導できている

か検証した。また、提案手法を用いて修正した画像が、従来法よりも被験者に違和感を与えないことを確かめるため、主観評価実験を行った。

[今後の研究の方向性、課題]

色覚特性者に対して自然かつ効果的な注視誘導を行うため、視覚的顕著性に基づき、誘目性に影響を及ぼす画像の特徴を明らかにし、様々な色覚特性の型に応じた誘目性モデルの構築が今後必要である。我々は、誘目性モデルによる色覚特性者に対する注視誘導技術を確立し、新しい概念のカラーユニバーサルデザイン基盤技術を提案する予定である。

一方、人がある単色の色刺激を受けると、この刺激に応じた感性情報を受けるが、この感性情報には、様々な要因により個人差が生じる。したがって、より被験者に対して違和感を与えない再配色を実現するために、色と感性に関する個人モデルを求める必要がある。そして、その計測には、被験者に対して労力と負担をかけずに行うことが求められる。我々は、この問題に対して、香川大学工学部佐藤敬子助教との共同研究を行っており、今後も継続して取り組む予定である。

参考文献

- 1: 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, (2010)
- 2: H. Takimoto, S. Kamio, H. Yamauchi and M. Jindai :
“Modification of Indistinguishable Colors for Color Defective Vision”, Proc. of NCSP 2012, pp. 337-340, (2012)
- [成果の発表, 論文等]
1. H. Takimoto, H. Yamauchi, M. Jindai, and A. Kanagawa: “Modification of Indistinguishable Colors for People with Color Vision Deficiency”, Journal of Signal Processing, Vol. 16, No. 6, pp. 587-592, (2012)
2. 滝本, 山内, 神代, 金川: “色覚特性者に対する彩度修正に基づく再配色手法”, 平成 24 年電気学会電子・情報・システム部門大会 講演論文集, pp. 1040-1045, (2012)
3. 国井, 滝本, 満倉, 山内, 神代, “視覚的顕著性に基づく視線誘導のための画像変換”, 動的画像処理実利用化ワークショップ DIA2013, pp.72-76, (2013)