

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：32607

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500212

研究課題名(和文)色覚シミュレーション，色覚特性測定と色覚画像補正の研究

研究課題名(英文) Study of computer simulation, computer measurement and image correction for color-vision deficiencies

研究代表者

福田 宏 (Fukuda, Hiroshi)

北里大学・一般教育部・准教授

研究者番号：70238484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、あらゆるビデオデバイスに適用できる、デバイスのすべての色を変換可能な2色型色覚者の混同色シミュレーションを考察した。シミュレーションの原理として、変換前後の色が比例則を満たすことを要求した。これは、強度の異なる同じ色が、異なる色に変換されないという自然な要請である。そして、問題を数学的に整理して、定理「比例則を満たすシミュレーションは、LMS空間で混同色方向に垂直な平面へのディスプレイの色域の射影が6面体であれば、ユニークに決まること」を証明した。殆どのディスプレイはこの条件を満たす。特に、標準ディスプレイ、sRGBディスプレイに対して、この定理に基づくシミュレーションを実証した。

研究成果の概要(英文)：We consider a computer simulation of color confusion for dichromats for any colors on any video device, which transforms color in each pixel into a representative color among the set of its confusion colors. As a guiding principle of the simulation we adopt the proportionality law between the pre-transformed and post-transformed colors, which ensures that the same colors are not transformed to two or more different colors apart from intensity. We show that such a simulation algorithm with the proportionality law is unique for the video displays whose projected gamut onto the plane perpendicular to the color confusion axis in the LMS space is hexagon. Almost all video display including sRGB satisfy this condition and we demonstrate this unique simulation in sRGB video display.

研究分野：情報数理学

キーワード：色覚シミュレーション 2色型色覚 混同色 比例則

1. 研究開始当初の背景

1600 万色 (True Color) の発色が可能な個人用コンピュータシステムが急速に普及し、これを用いた色覚に関する研究が英国・ケンブリッジ大学の Mollon 等により 20 世紀末に始まった。

まず 1994 年に、Mollon 等は従来の分光機器に代わりコンピュータ・ディスプレイを用いて色弁別閾を測定するケンブリッジ・カラーテストを開発した。[1] 色弁別閾とは、ある色 C と区別のできない色 D(C) の集合である。

続く 1995 年、彼らは、片目 2 色型 (片目は正常色覚、片目は 2 色型) 者のデータを利用してディスプレイ画面上で P, D, T 型二色型色覚者の見る色を正常色覚者に示すシミュレータを発表した。彼らの研究成果は、NATURE 誌[2] にも掲載され、コンピュータによる色覚研究の定番となっている。さらに、前者の研究はケンブリッジ・カラーテストとして市販され、心理学研究などに利用されている。後者の研究は、カラーユニバーサルデザインのためのツールとして現在広く利用されている色覚シミュレータ、スタンフォード大学の Vischeck などに使われている。

[1] B. C. Regan, J. P. Reffin, J. D. Mollon, Luminance Noise and the Rapid Determination of Discrimination Ellipses in Colour Deficiency Vision Res. 34 pp.1279-1299 (1994).

[2] F. Vi'not, H. Brettel, L. Ott, A. B. M'Barek and J. D. Mollon, What do colour-blind people see?, NATURE 376, 127-128 (1995).

2. 研究の目的

普及型コンピュータ (パソコン) で用いられるディスプレイの規格は 1999 年に sRGB として策定された。以後、現在では sRGB 規格およびカラープロファイルデータによって 1600 万色以上のフルカラーが、パーソナルコンピュータやタブレット、スマートフォンでほぼ正確に表示できるようになった。本研究では、このことで可能になる、主に色覚異常者を支援する次の 3 種類のソフトウェアを、色彩工学理論を利用して開発する。(I) 色覚シミュレーション(II) 色覚特性測定(III) 色覚特性に応じた画像補正。なお、(II) の色覚特性測定は色覚正常者の疲労度や薬物作用検出への応用も念頭に置く。

3. 研究の方法

本研究は、情報数理科学を専門とする研究代表者の福田が、色彩工学に基づいて理論とシステムを構築する。しかし、研究代表者は、ヒトの感覚の測定に対しては経験がないため、医療工学分野で数多くの業績をあげてきた同じ大学の医療衛生学部医療工学科に所属する野城名誉教授を分担研究者に迎え、色

覚情報処理の医療工学的部分を担当してもらった。また、本研究に不可欠な色覚測定には、眼科医の協力も欠かせない。ここでも、同じ大学の医療衛生学部視覚機能療法学専攻の眼科医、石川教授を研究分担者に迎え、色覚の診断、視覚検査、また視覚メカニズム全般の専門知識提供をおこなってもらった。

被験者としての 2 色型色覚者、異常 3 色型色覚者は、大学内、大学近隣で探すと共に、CUDO (カラーユニバーサルデザイン機構) に登録している、色覚異常者に被験を依頼した。

ディスプレイについては、コニカミノルタ CA-210 測色器を用いて精度の精密測定を行う。ディスプレイは電源投入後 1 時間程度は輝度に変化し、その後発色は安定するが、絶対的な色は数 10% 程度の誤差がある。

ディスプレイキャリブレーションは、上述の測定データを利用して、精密な暗室内実験に耐える独自のモデル式を使って、絶対的な色精度を数 1% 以内に抑えるように行った。

4. 研究成果

本研究では、2 に掲げた 3 つの目的のうち最初の 1 つ「色覚シミュレーション」について、以下に述べる数学的成果を挙げる事ができた。

(1) 混同色シミュレーション
CIE1931XYZ 表色系を用い、

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix},$$

$$U = \begin{pmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03286 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0 & 0 & 0.01608 \end{pmatrix}.$$

とすると、L, M, S は L 錐体, M 錐体, S 錐体の感じる色感覚強度である。P 型, D 型, T 型の 2 色型色覚者は、それぞれ、この L, M, S の変化を感じる事ができないとしてモデル化される。すなわち、このモデルでは、2 色型色覚者は、LMS 空間で Q を通り L, M, S 軸に平行な直線上の色、混同色

$$l_a(Q) = \{Q + \hat{a}t | t = \text{real}\}$$

を区別することができない。

混同色シミュレーションとは、画像を構成するピクセルの色 Q を、その混同色 $l_a(Q)$ の代表色 $s(Q)$ $l_a(Q)$ に変換して画像を構成することである。 $s(Q)$ をシミュレーション関数と呼ぶ。

(2) 比例則

混同色シミュレーションにおいて、色 Q とその色と、色は同じで明るさの違う色 Q を考える。シミュレーションが無矛盾であるた

めには、 Q と Q は同じ色に変換されなければならぬ。すなわち、

$$s(Q) = s(Q)$$

ここで、直線 $l_a(Q)$ と $l_a(Q)$ は平行で直線 $Q-(Q)$ と交わるので幾何学的に $=$ が導かれる。ゆえに、シミュレーション関数 $s(Q)$ は比例則

$$s(Q) = s(Q)$$

を満たさなければならない。
(3) シミュレーション曲面
曲面

$$= \{s(Q)\}$$

をシミュレーション曲面とよぶ。逆に Q が決まればシミュレーション関数は

$$s(Q) = \{l_a(Q)\}$$

である。よって、 $s(Q)$ を決めることと Q を決めることは同じことである。なお、 $s(Q)$ が比例則を満たすことは、 Q が錐(Cone)であることと同値である。

(4) 色覚シミュレーション

色覚シミュレーションでは、 Q として、片目 2 色型 色覚(片目は正常色覚、片目は 2 色型) 者の見る色が用いられる。図 1 は P 型と D 型に対する Q である。

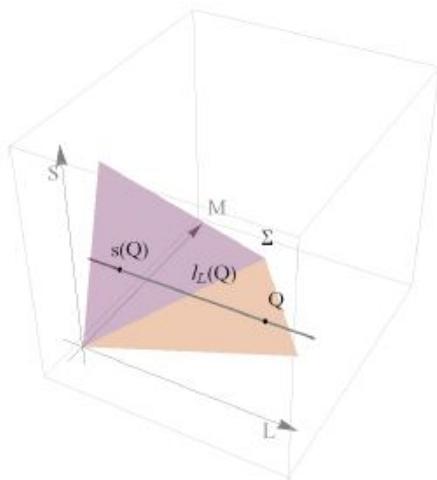


図 1

この Q を用い、標準ディスプレイ (sRGB ディスプレイ) でシミュレーションをおこなうと、sRGB の色域 D に対して $s(Q) \notin D$ とならない $Q \in D$ 、すなわちシミュレーションできない色 Q が存在する。その色の割合は、sRGB の全 1600 万色に対して P 型で 27.8%、D 型で 15.6% にのぼる。

実際、図 2 に示すランダムに選んだ 25 色の色覚シミュレーションをおこなうと、図 3 のような結果になる。上の図は P 型、下の図

は D 型に対するシミュレーションである。黒いセルはシミュレーションできない色である。

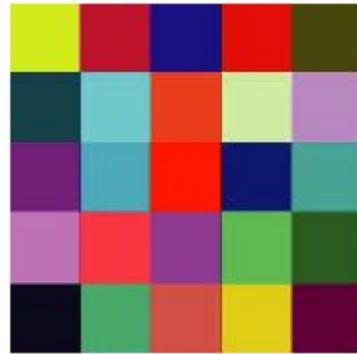


図 2

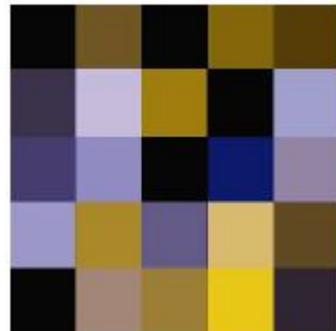
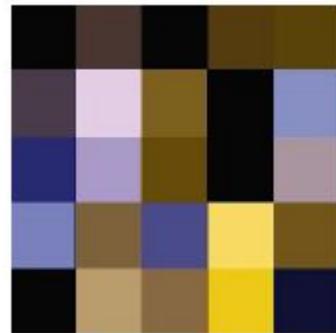


図 3

(5) 全色混同色シミュレーション

ディスプレイは R, G, B 3 色の発光体からなる。この 3 色の色ベクトルで作られる LMS 空間の平行 6 面体がディスプレイの色域 D である。我々は以下の定理を証明した。

定理 1: ディスプレイの色域 D に対応する平行 6 面体の a 軸に垂直な平面への射影が六角形になる時、 $s(Q) = s(Q)$ を満たし、すべての $Q \in D$ に対して $s(Q) \in D$ であるシミュレーション関数 $s(Q)$ は唯一存在し、以下のシミュレーション曲面 ⁽⁹⁾

$$\Sigma^{(9)} = \Sigma_1 \cup \Sigma_2 \cup \Sigma_3 \cup \Sigma_4,$$

$$\Sigma_1 = \{pE_1 + q(E_1 + E_2) | p, q \geq 0, p + q \leq 1\},$$

$$\Sigma_2 = \{p(E_1 + E_2) + q(E_1 + E_2 + E_3) | p, q \geq 0, p + q \leq 1\},$$

$$\Sigma_3 = \{p(E_1 + E_2 + E_3) + q(E_2 + E_3) | p, q \geq 0, p + q \leq 1\},$$

$$\Sigma_4 = \{p(E_2 + E_3) + qE_3 | p, q \geq 0, p + q \leq 1\}.$$

で与えられる。ここで、 a は D 型, P 型, T 型シミュレーションに応じて L, M, S のいずれか、 E_1, E_2, E_3 は発光体の色を表すベクトルを、平面に射影した時の傾きが大きい順に並べかえたものである。

定理 1 によって、(i) ディスプレイの全ての色 Q に対して混同色シミュレーションを行なおうとすると、この定理のやり方が唯一であること、(ii) 従って、一般にディスプレイの全ての色をシミュレーションできる「色覚」シミュレーションは存在しないことが証明された。

図 4 上図は sRGB デバイスに対して、P 型と T 型、図 4 下図は D 型の、定理 1 が与えるシミュレーション曲面である。

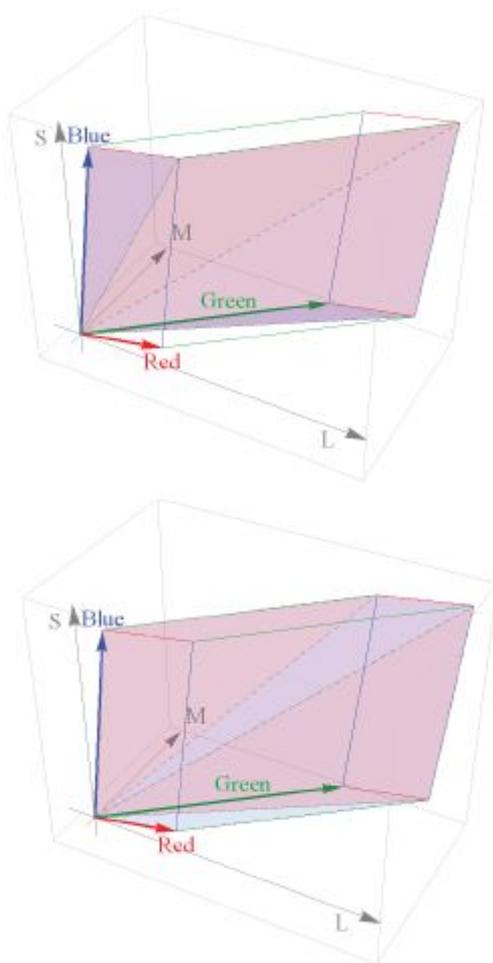


図 4

このシミュレーション曲面からシミュレーション関数をつくり、図 2 の 25 色に対して全色混同色シミュレーションを行うと図 5 のようになる。図 5 上図は P 型、図 6 下図は D 型に対するシミュレーション画像である。

図 5 のように、全色混同色シミュレーションでは、全て色をシミュレーションすることができるが、シミュレーション結果は、色覚シミュレーション図 3 はかなり異なる。従っ

て、我々はこの新しいシミュレーションを「色覚」シミュレーションと誤解されないように「混同色」シミュレーションと呼んだのである。なお、この色は定理 1 によってデバイスごとにユニークである。

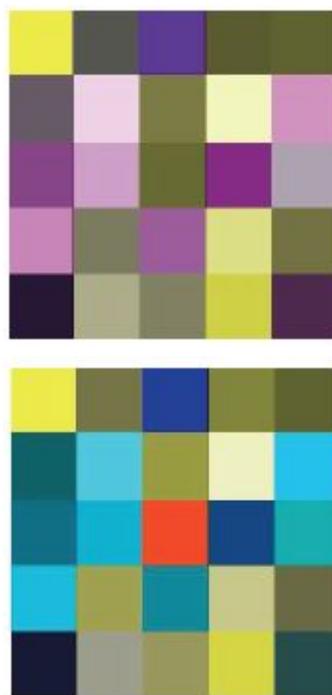


図 5

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Computer Simulation of Color Confusion for Dichromats in Video Device Gamut under Proportionality Law, Hiroshi Fukuda, Shintaro Hara, Ken Asakawa, Hitoshi Ishikawa, Makoto Noshiro, Mituaki Katuya, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 査読有, 7 41-49 (2015). doi:10.2197/ipsjtcva.7.41

〔学会発表〕(計 1 件)

12th International AIC Colour Congress "Bringing Colour to Life" (Newcastle Upon Tyne, England), 8-12 JULY 2013. Poster session 2a (Jul 11 14:00-16:00) and 2b (Jul 12 13:30-15:30), *Consistent Presentation of Confusion Color for Dichromats on Video Device under Proportionality or Additive Rule*, Hiroshi Fukuda, Shintaro Hara, Ken Asakawa, Hitoshi Ishikawa, Makoto Noshiro and Mituaki Katsuya.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 宏 (FUKUDA, Hiroshi)

北里大学・一般教育部・准教授
研究者番号：70238484

(2)研究分担者

石川 均 (ISHIKAWA, Hitoshi)
北里大学・医療衛生学部・教授
研究者番号：80265701

浅川 賢 (ASAKAWA, Ken)
北里大学・医療衛生学部・助教
研究者番号：60582749

野城 真理 (NOSHIRO, Makoto)
北里大学・医療衛生学部・名誉教授
研究者番号：80014231
(2013年10月2日削除)