遺伝的アルゴリズムとガウス近似を用いた等色関数の補正法

Correction Method of Color-Matching Functions Using Genetic Algorithm and Gaussian Approximation

学生会員 尾崎 進之介[†], 徳田 裕一郎[†], 正会員 大橋 剛介[†], 正会員 下 平 美 文[†]

Shinnosuke Ozaki[†], Yuichiro Tokuda[†], Gosuke Ohashi[†] and Yoshifumi Shimodaira[†]

Abstract Spectrocolorimeters are widely used to adjust the color of items such as LCDs, CRTs, projectors, and other video equipment. However, the color appearance of one display is sometimes mismatched with that of another display, even though the colorimetric values of the two - which are measured at the same time and under the same illumination - have been matched. It has been reported that the gap between color-matching functions and the human perception of color causes this phenomenon. The purpose of this study was to correct color-matching functions to reduce the gap between colorimetric values and human perception of color. Color-matching functions were approximated by Gaussian functions, which were controlled by ten parameters. The parameters were optimized using genetic algorithm to minimize color differences between the colorimetric values of the supervised data. Results show that the perceptual color matching was improved.

キーワード：遺伝的アルゴリズム，ガウス近似，等色関数，知覚的カラーマッチング

1. ま え が き

現在，液晶ディスプレイ，CRT，プロジェクタなどのさまざまな映像機器が普及し，表示性能は飛躍的に向上している．それに伴い，ユーザの色の表示に関する関心が高まり，より高精度な色表示が求められている．現在の映像機器の色調整には，色を定量的に数値で表現する測色計が用いられている．測色計の中でも精度が高い分光放射輝度計は，図 1 のように，分光分布と呼ばれる可視領域内の各波長のエネルギーを測定し，CIE により 1931 年に提案されている等色関数を介して，(1) 式のように測色値を算出している^{1)~3)}．

図 1 測色値の算出方法
Calculation method of colorimetric values.

$$\left. \begin{aligned} X &= k \int_{vis} C(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \\ Y &= k \int_{vis} C(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \\ Z &= k \int_{vis} C(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで，式 (1) において，積分範囲は可視波長域， k は正規化のための定数， $C(\lambda)$ は分光分布， $\bar{x}(\lambda)$ ， $\bar{y}(\lambda)$ ， $\bar{z}(\lambda)$ はそれぞれ等色関数を表している．

等色関数は，CIE により 1931 年に 2 度視野，1964 年に 10 度視野に対応するものが提案されており，人間の目の分光感度を示すものとして広く一般的に用いられている．

2 度視野等色関数は，CIE 測色標準観測者に完全に一致するような等色関数であり，複数の被験者による 2 度視野での等色実験の結果に基づいて制定された．10 度視野等色関数は，CIE 測色補助標準観測者に完全に一致する等色関数であり，複数の被験者による 10 度視野での等色実験の結果に基づいて制定された．しかし，等色実験は欧米で行われており，日本人の等色関数は現在の等色関数と誤差が生じていること⁴⁾や，標準観測者は実際には存在せず，人それぞれの等色関数は個人差が生じていることが問題とされている⁵⁾．そして，欧米人と日本人の差や，個人差の間

2008 年 12 月 4 日，IDW'08 で発表

2009 年 3 月 4 日受付，2009 年 6 月 24 日再受付，2009 年 7 月 21 日採録

[†] 静岡大学 工学部

(〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1, TEL 053-478-1110)

[†] Faculty of Engineering, Shizuoka University

(3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan)

題のほかに、文献6)では、CRTディスプレイと色票における知覚的カラーマッチング不一致について調査し、等色関数の個人差によりばらつく色もあるが、全被験者において同じ方向へとずれる色もあることから、標準観測者の等色関数に補正が必要であるとしている。また、2台の液晶ディスプレイの測色値が等しいにもかかわらず、2台のディスプレイ間の色の見えが一致しない現象や、同様に、2台のディスプレイ間の色の見えが一致した場合にも、2台のディスプレイの測色値は異なってしまうという現象も起こることがあり、液晶ディスプレイにおいても等色関数と人間の視覚との間のずれにより、知覚的カラーマッチング不一致の現象が生じる場合がある。

そこで本論文では、等色関数と人間の視覚との間のずれを軽減するように等色関数を補正し、液晶ディスプレイにおける知覚的カラーマッチング不一致の現象を軽減することを目的とする。ただし、等色実験の結果から制定されている等色関数は、数式で表現されておらず、各波長の値が規定されているのみであり、可視波長域内のすべての値を補正することは困難である。そこで本手法では、ガウス関数を用いて等色関数をガウス近似することにより、等色関数を数個のパラメータで制御する。そして、ガウス近似した等色関数のパラメータを適切に最適化することにより、等色関数の補正を行う。パラメータの最適化においては、大域的探索に優れ、最適化問題に対して有効な解法であるとされている遺伝的アルゴリズムを用いる。

2. 等色関数の補正方法

2.1 概要

本手法では、2台のディスプレイのXYZ三刺激値が等しいとき、知覚的カラーマッチングが実現するように等色関数を補正する。このとき、2台のディスプレイは、同一環境のもと、同時に観察されているものとする。本手法では、図2に示すように、ディスプレイ1とディスプレイ2における、色の見えが一致しているがXYZ三刺激値が不一致である分光分布の組を学習データとして用い、学習データ内の複数のディスプレイ間の色差が小さくなるように、等色関数を補正する。本手法では、等色関数の補正の際、等色関数をパラメータで制御するため、ガウス関数で近似し、ガウス関数のパラメータを、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化することで、等色関数の補正を行う。

2.2 ガウス関数による等色関数の近似

文献7)では、撮像装置の分光感度をガウス関数で近似し、分光感度を推定している。ガウス関数は、3個のパラメータで簡単に制御できるため、一つのピークを持つ関数はガウス近似することがある。そこで本手法では、等色関数をパラメータで制御するため、ガウス関数で近似し、補正を行う。現行の等色関数は、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ の三種類の曲線であり、それぞれについてピークが2個、1個、1個存在しているため、合計で4個のピークが存在する。そこで本

図2 本手法の概観
Overview of the proposed method.

図3 ガウス近似された等色関数
Color-matching functions approximated by Gaussian functions.

手法では、図3に示すように、等色関数を4個のガウス関数で近似する。図3において、横軸は波長、縦軸は相対感度を示している。ピークが2個存在している等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ を2個のガウス関数 $\bar{x}_1(\lambda)$ と $\bar{x}_2(\lambda)$ の和で表現し、ピークが1個存在している等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ と等色関数 $\bar{z}(\lambda)$ はそれぞれ $\bar{y}(\lambda)$ と $\bar{z}(\lambda)$ でガウス近似している。

ガウス関数のパラメータについて、図4にそれぞれのガウス近似した等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を制御するパラメータを示す。ここで、図4における横軸は波長、縦軸は相対感度を示している。1個のガウス関数に対して3個のパラメータで制御するため、4個のガウス関数では合計12個のパラメータが必要であるが、本手法では、パラメータの軽減を実現し、4個のガウス関数を合計10個のパラメータで制御している。

ガウス関数のパラメータは、中心波長の値、相対感度の

(a) Color-matching function $\bar{x}(\lambda)$

(b) Color-matching function $\bar{y}(\lambda)$

(c) Color-matching function $\bar{z}(\lambda)$

図 4 ガウス近似された等色関数のパラメータ

Parameters of color-matching functions approximated by Gaussian functions.

大きさ、半値幅の 3 個が一般的であるが、本手法では、効率的に等色関数を制御するため、ガウス関数の 3 個のパラメータは、相対感度の大きさであるパラメータ、および相対感度がほぼ 0 となる $e^{-5} \approx 0$ のときの波長の値である 2 個のパラメータとしている。

等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ は、2 個のガウス関数 $\bar{x}_1(\lambda)$ と $\bar{x}_2(\lambda)$ の和で表現しており、図 4(a) のように、相対感度の大きさを表すパラメータをそれぞれ Ax_1 、 Ax_2 とし、 $x_1(\lambda)$ と $x_2(\lambda)$ が重なることを 1 個のパラメータ λx_2 で表現することにより、波長の値を表すパラメータは、 λx_1 、 λx_2 、 λx_3 で表現する。以上より、等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ は、合計 5 個のパラメータで制御することができる。

表 1 10 個のパラメータの定義域
Domain of ten parameters.

Parameters of amplitude	Ax_1	1.02~1.17
	Ax_2	0.22~0.37
	Az	1.72~1.87
Parameters of wavelength	λx_1	692~707
	λx_2	497~512
	λx_3	382~397
	λy_1	682~697
	λy_2	412~427
	λz_1	552~567
	λz_2	372~387

そして、等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ について、図 4(b) のようなパラメータで制御する。等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ は最大値が 1.0 に正規化されているため、本手法では、等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ の相対感度の大きさは常に 1.0 としている。そのため、等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ は、波長を表す 2 個のパラメータ λy_1 、 λy_2 で制御している。

等色関数 $\bar{z}(\lambda)$ は、図 4(c) に示すように、パラメータ Az 、パラメータ λz_1 、 λz_2 の 3 個のパラメータで制御する。以上より、4 個のガウス関数は 10 個のパラメータにより表現可能であり、これらのパラメータを適切に最適化することによって等色関数を補正することができる。

2.3 遺伝的アルゴリズムを用いた等色関数のパラメータの最適化

本手法では、10 個のパラメータを学習データに基づいて最適化するため、大域的探索に優れた遺伝的アルゴリズムを用いる。遺伝的アルゴリズムは他の最適化問題の解法で必要とされる可微分性、単峰性などの制約条件を必要としないという性質をもち、最適化問題に対して有効な解法であるとされている。遺伝的アルゴリズムは、生物進化の原理に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索の一手法である⁸⁾。遺伝的アルゴリズムでは、各探索点を個体と呼び、その個体は一般的に 0 と 1 のビット列からなる染色体をもっている。また、各個体は適応度と呼ばれる評価値により評価され、適応度に基づき選択される。選択された個体に対して交叉・突然変異の処理が行われ、新たな個体が生成される。選択されなかった個体は淘汰される。適応度が大きい個体ほど次世代に残りやすくなり、逆に小さいほど淘汰されやすくなる。進化の過程のようにその処理を重ねていくことで効率よく解を探索することができる。

本手法では、ガウス関数を制御する 10 個のパラメータについての最適化問題を遺伝的アルゴリズムに導入するため、10 個のパラメータをそれぞれ 4 ビット、計 40 ビットの染色体に遺伝子コーディングしている。10 個のパラメータの定義域は、現行の等色関数の形状の変化を最低限にすることを考慮し、予備実験の結果より表 1 のように決定した。

遺伝的アルゴリズムを用いた本手法のフローチャートを図 5 に示す。本手法では、まず「個体集合の初期化」を行う。個体集合の初期化では、収束精度、収束時間を考慮し 50 個の個体を生成する。一般に、遺伝的アルゴリズムの初

図 5 本手法のフローチャート
Flowchart of the proposed method.

表 2 本手法の遺伝的アルゴリズムパラメータ
Genetic Algorithm parameters of this technique.

Process	Method	Probability
Selection	Roulette wheel selection	Elitist preserve strategy; 2%
Crossover	Uniform crossover	93%
Mutation	Reversal	5%

期化では、解空間は分割しないが、本手法では、局所的最適解に陥らないようにするため、10 個のパラメータにより表現される解空間を等分割し、それぞれの領域内で個体をランダムに生成し、生成した個体に対応する等色関数を作成する。次に、生成した個体を「評価」する。各個体に対応する等色関数を用いて、学習データの分光分布から XYZ 三刺激値を算出し、 $L^*a^*b^*$ 色空間へ変換した後、色差を計算し、その平均色差を適応度として用いる。ただし、本手法において、色差の算出に人間の視覚による色の見えによる色差の評価と近いものとして提案されている CIE2000 色差式⁹⁾を用いている。また、CIE2000 色差式の算出の際、パラメトリック係数 k_L , k_C , k_H については、本実験は、標準環境であるので、 $k_L=k_C=k_H=1.0$ としている。色差が小さくなった個体に相当する等色関数は適応度が高くなり、優秀な個体と評価する。「終了判定」では、世代数が閾値を超えているか否かで判定を行う。閾値は、予備実験の結果より、収束精度を考慮し、1000 世代とする。閾値を超えた場合には終了し、超えていない場合には、次の処理に移る。そして、適応度に応じて各個体を「選択」する。選択方法は、遺伝的アルゴリズムで最も一般的に用いられているルーレット選択を用いる。その後、遺伝的アルゴリズムオペレータにより処理を行う。「選択」にて選択した個体に対応した染色体を一定の確率で「交叉」または「突然変異」し、次世代の個体を生成する。本手法では、交叉は一樣交叉、突然変異は反転を用いている。遺伝的アルゴリズムのパラメータは収束時間の短縮、収束精度の向上を考慮して、予備実験の結果により表 2 のように決定した。

表 3 本手法による等色関数と CIE1931 の等色関数の記号
Symbols of color-matching functions of this technique and CIE1931 Color-matching functions.

Color-matching functions	This technique				Current
	F_{A-B}	F_{B-C}	F_{C-A}	F_{A-B-C}	
Supervised data	A-B	B-C	C-A	A-B-C	-

3. 実験

3.1 等色関数の補正

実験は暗室にて、3 台のディスプレイ A, B, C を用いて行った。視野角は 2 度となるように、ディスプレイにカバーをかけて視野角を調節した。まず学習データの取得を行った。基準とするディスプレイ A に、マクベスカラーチャートの 1 番の色を全画面表示させ、ディスプレイ B およびディスプレイ C の表示色がディスプレイ A の色の見えと等しくなるように、ディスプレイ B とディスプレイ C の RGB 階調値を調整した。その後、分光放射輝度計を用いて学習データであるディスプレイ A, B, C の表示色の分光分布を取得した。同様に、マクベスカラーチャート 2 番から 24 番においても、学習データであるディスプレイ A, B, C の色の見えが等しい色の分光分布を取得した。

次に、ディスプレイ A-B 間、B-C 間、C-A 間、A-B-C 間それぞれの学習データを用いて、本手法による等色関数 F_{A-B} , F_{B-C} , F_{C-A} , F_{A-B-C} を導出した。本手法による等色関数と CIE1931 の等色関数の記号を表 3 に示す。

3.2 検証実験方法

図 6 に示すように、まず、被験者はディスプレイ A を基準とし、ディスプレイ B の色の見えが一致するように、RGB 階調値を調整する。そして、このときディスプレイ A, B の分光分布に対し、本手法による等色関数 F_{A-B} , F_{B-C} , F_{C-A} , F_{A-B-C} および CIE1931 の等色関数 $F_{CIE1931}$ を用いて、XYZ 三刺激値を算出し、 $L^*a^*b^*$ 色空間へ変換した後、CIE2000 色差式を用いて色差を算出し、比較する。色差が小さくなった等色関数は、知覚的カラーマッチング不一致の現象が軽減しているということになる。被験者 5 名に対し、マクベスカラーチャートの 1 番から 24 番の色を対象とした。ディスプレイはディスプレイ A, B, C の 3 種類を用い、ディスプレイ A-B 間、B-C 間、C-A 間に対して実験を行った。

3.3 検証実験結果

図 7 にそれぞれの等色関数を用いて算出した 24 色の平均色差を示す。図 7 はそれぞれのディスプレイ間における平均色差を示しており、横軸は比較したディスプレイ、縦軸は平均色差を示している。図 7 より、ディスプレイ A-B 間、B-C 間、C-A 間すべてにおいて、CIE1931 の等色関数 $F_{CIE1931}$ に比べ、本手法による等色関数 F_{A-B} , F_{B-C} , F_{C-A} , F_{A-B-C} は平均色差が小さくなっており、CIE1931 の等色関数よりも、本手法による等色関数を用いた方が、知

図 6 検証実験の概観
Overview of the verification experiments.

図 7 各ディスプレイ間の平均色差の比較
Comparison with average color differences between displays.

覚的カラーマッチング不一致の現象が軽減することがわかる。

次に、図 8 にマクベスカラーチャートの色ごとの色差の比較を示す。ここで、図 8 の横軸は色差、縦軸の数値はマクベスカラーチャートにおける色番号に対応しており、Avg. は 24 色の平均を示している。本手法は、24 色の平均色差を下げるように等色関数を最適化しているため、CIE1931 の等色関数で色差が大きかった 17 番から 24 番 (Magenta, Cyan, White, Neutral 8, Neutral 6.5, Neutral 5, Neutral 3.5, Black) において、色差が大きく減少し、CIE1931 の等色関数で色差の小さかった 2 番、8 番、10 番 (Light Skin, Purplish Blue, Purple) は、色差が増加した。平均

図 8 各色の色差の比較
Comparison with color differences of colors.

色差に関しては、CIE1931 の等色関数よりも本手法による等色関数の方が小さくなっており、本手法による等色関数を用いると、知覚的カラーマッチング不一致の現象が軽減していることが確認できる。

3.4 考 察

等色関数をガウス関数で近似することに対して考察する。現行の等色関数は、等色実験の結果に基づいて制定されており、等色関数をガウス関数で近似してもよいということ は確立されていない。本研究では、色差を評価関数として、遺伝的アルゴリズムを用いて等色関数を補正するため、ガウス近似を用いて等色関数をパラメータで表現した。図 9 に、それぞれディスプレイ A-B 間、B-C 間、C-A 間、A-B-C 間における、CIE1931 の等色関数、CIE1931 の等色関数をガウス近似したもの、本手法において補正を行った等色関数を用いて算出した 24 色の学習データの平均色差を示

図9 それぞれの等色関数における学習データの平均色差
Average color differences of supervised data of each color-matching functions.

す。ただし、図9の横軸は比較したそれぞれのディスプレイ、縦軸は平均色差を示している。図9より、ディスプレイA-B間では、ガウス近似により色差が小さくなっているが、その他ではCIE1931の等色関数をガウス近似することにより、色差が大きくなっている。しかし、本手法による補正の効果により、色差が小さくなっていることがわかる。したがって、補正した等色関数を用いることにより、液晶ディスプレイの知覚的カラーマッチング不一致の現象を軽減していると考えられる。

4. む す び

本論文では、ガウス近似と遺伝的アルゴリズムを用いて、知覚的カラーマッチング不一致の現象が生じないような等色関数を導出した。本手法では、等色関数をパラメータで制御するため、4個のガウス関数で近似し、合計10個のパラメータで等色関数を制御した。そして、色の見えが等しい分光分布を学習データとして用い、遺伝的アルゴリズムを用いて10個のパラメータを最適化することで、等色関数の補正を行った。本手法の有効性を確認するため、色の見えの等しい色の色差について比較したところ、本手法による等色関数を用いた場合、CIE1931の等色関数を用いた場合よりも色差が小さくなり、知覚的カラーマッチング不一致の現象が軽減した。また、パラメータ表現を検討することにより、さらなる高精度な等色関数の補正の可能性を示唆した。

〔文 献〕

- 1) T.Smith, J.Guild: "The C.I.E. colorimetric standards and their use", Transactions of the Optical Society, 33 (3), 73-134 (1931)
- 2) W.D.Wright: "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours", Transactions of the Optical Society, 30 141-164 (1929)
- 3) J.Guild: "The Colorimetric Properties of the Spectrum", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, seriesA, 230, pp.149-187 (1931)
- 4) K.Katori and M.Fuwa: "Color-matching functions of ten Japanese observers", Journal of light and visual environment, 4, 1, pp.9-16

(1980)

- 5) C.Oleari, "Inter-Observer comparison of Color-matching functions", Color research and application, 24, 3, pp.177-184 (1999)
- 6) 羽左間歩, 岡嶋克典, 横井健司, 内川恵二, 山口雅浩, 喜多絃一: "CRTディスプレイと色票の知覚, 測色カラーマッチング不一致と等色関数による分析", 日本視覚学誌, 15, 2, pp.97-100 (2003)
- 7) 森本宏明, 中野靖久, 末原憲一郎, 矢野卓雄: "液晶チューナブルフィルタと白黒 CCD カメラを用いた画像色彩計の開発", 映像学技報, 25, 48, pp.1-5 HIR2001-75 (2001)
- 8) J.H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, MI (1975)
- 9) M.R.luo, G.Cui and B.Rigg: "The Development of the CIE 2000 colour-Difference Formula: CIEDE2000", Color research and application, 26, 5, pp.340-350 (2001)

おざきしんのすけ
尾崎進之介 2008年, 静岡大学工学部卒業。現在, 同大学院修士課程在学中。視覚情報処理に関する研究に従事。学生会員。

とくだゆういちろう
徳田裕一郎 2007年, 静岡大学工学部卒業。2009年, 同大学院修士課程修了。同年, 株式会社日立製作所に入社。在学中, 対話型進化計算を用いた高画質化支援システムに関する研究に従事。

おおはし ごうすけ
大橋 剛介 1992年, 慶応義塾大学理工学部卒業。1997年, 同大学院博士課程修了。同年, 静岡大学工学部助手。2004年, 同助教授。2007年, 同准教授。現在に至る。2003年~2004年, 米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員。主として, 画像処理, 視覚情報処理に関する研究に従事。博士(工学)。正会員。

しもだいら よしふみ
下平 美文 1972年, 静岡大学大学院工学研究科修士課程修了。1988年, 博士学位取得(東京大学大学院)。1990年, 静岡大学工学部助教授。1997年, 同大学教授。2006年, 創造科学技術大学院教授。主として, 視覚情報処理, 画像品質評価, 広色域画像システムに関する研究に従事。正会員。