多層神経回路モデルを用いた相互色変換に基づく

Color Gamut 抽出・圧縮法

非会員 今村 昌弘 (豊橋技術科学大学)

非会員 中内 茂樹 (豊橋技術科学大学)

正員 臼井 支朗 (豊橋技術科学大学)

Extraction and Mapping of Destination Color Gamut
based on Mutual Color Space Conversion by Multilayered Neural Networks
Masahiro Imamura, Shigeki Nakauchi, Shiro Usui (Toyohashi University of Technology)

Since the shape of color gamut differs for each color reproduction device, it is necessary to transform the colors in order to fit them into the reproducible colors, called *Gamut Mapping*. However, there have been no practical method for gamut mapping so far because it is difficult to describe the shape of gamut effectively. In this paper, we propose a method of extraction and mapping of destination color gamut based on mutual color space conversion between device-dependent and -independent color spaces performed by two multilayered neural networks. Furthermore, we propose a novel method for gamut mapping which adjusts compression ratio adaptively to the shape of gamut.

キーワード：色管理, デバイスインディペンデントカラー, ガモットマッピング, ニューラルネットワーク

1. まえがき

近年, カラープリンタ, カラースキャナ, デジタルカメラといったフルカラーデバイスが急速に普及し, 各デバイス間でカラー画像を共有する環境が整ってきた。こうした状況に伴い, CRTディスプレイに表示したカラー画像や文章などをコンピュータ上で編集し, プリンタに印刷するといったことが身近になりつつある。しかしながら, こうしたカラーDTPにおいて, それぞれのカラーデバイスが異なる色再現特性を持つために生じる再現色の機種依存性の問題が深刻となっている。これは, まず第1に phosphor の発光強度 (R,G,B) やインク濃度 (C,M,Y) など, デバイスに固有な色表現 (Device Dependent Color : DDC) が用いられていること, 第2に各々のデバイスが扱うことのできる色の範囲, すなわち色再現範囲 (Color Gamut, 以下 Gamut と略記) が機種毎に異なることに原因がある。

こうした問題に対し, デバイス固有の色表現ではなく, CIE-LAB 表色系などの人の視覚特性に基づく色表現, いわゆるデバイスインディペンデントな色表現 (Device Independent Color : DIC) をベースとした色管理が目ざされている。すなわち, DIC を介して各々のデバイスの出力をコントロールし, 異なる周辺機器・機種間の再現色の違いをなくそうとするものである。こうした色管理において必要とされる機能は,

① DDC と DIC の間の色変換, および ② DIC において入力画像のすべての色を出力デバイスの Gamut 内へ Mapping する色再現範囲圧縮 (Gamut Mapping) である。色変換に関しては, これまでにマトリクス演算を用いる方法⁽¹⁾や階層型ニューラルネットワーク (NN), Look Up Table (LUT) を用いる方法⁽¹⁾⁻⁽³⁾などが報告されており, 精度の高い変換が実現されている。

一方, Gamut Mapping を行うには, まず入力として与えられた色が DIC において出力デバイスの Gamut の内側にあるのか外側にあるのかを見極め, また, その色が Gamut の境界からどれだけ離れているかを正確に把握する必要がある。しかしながら, 通常 Gamut の形状は立体的で複雑であり, これまで実用に耐え得る効果的な Gamut 抽出法は提案されていない。このため, Gamut Mapping については結局エキスパートの経験や勘に頼らざるを得ず, その自動化がカラーDTPにおける重要な課題となっていた。

本論文では, こうした問題を解決するために, NN を用いて DIC から DDC, さらに DIC という相互色変換系を構築し, これを利用したデバイスの Gamut 抽出法を提案する。また実際にカラープリンタの Gamut 抽出を試み, その抽出結果を示す。さらに, 抽出した Gamut の形状に合わせ, 適応的に出力色を Gamut 内に Mapping する方法を提案し, この提案法を実際のカラー画像に適用した結果について述べる。

図 1 CRT ディスプレイとカラープリンタの間の色変換
Fig. 1. Color conversion between CRT display and color printer.

2. 色変換系の構築

ここでは、CRT ディスプレイ (SONY 製, GDM-2000TC)、及びカラープリンタ (Tektronix 製, Phaser540J) から成る色管理系 (図 1) について述べる。ここで、DIC には CIE-LAB 表色系を採用した。この表色系では L^* が明度を、 a^* , b^* が概ね赤-緑、青-黄の変化を表しており、 $a^* = b^* = 0$ の軸が無彩色軸となる。さらに、この色空間のユークリッド距離は色の感覚的な差異と比例し、また無彩色軸が順応白色に応じて変化するなど、ヒトの視覚特性を考慮した色空間となっている。以下、CRT ディスプレイの RGB 値と $L^*a^*b^*$ 値、カラープリンタの CMY 値と $L^*a^*b^*$ 値の間の色変換法について述べる。

(2.1) CRT ディスプレイ CRT ディスプレイで再現される色は 3 種の phosphor の加法混色となることから、RGB 値と $L^*a^*b^*$ 値の間の色変換 (図 1 (a)) を、マトリクス演算と γ 補正⁽¹⁾、および CIE-LAB 表色系の定義式⁽⁶⁾に基づいて構築した。ここで、CRT ディスプレイの白色点の色温度は 5000[K] に設定し、Red, Green, Blue の各 phosphor の色度点、および γ 特性は、色彩色差計 (MINOLTA 製, CS-100) により測定した。得られた色度値、および算出した γ 値を表 1 に示す。なお、 L^* は CRT ディスプレイ上での white ($R=255, G=255, B=255$) と black ($R=0, G=0, B=0$) がそれぞれ $L^* = 100, 0$ となるように正規化した。

(2.2) カラープリンタ 印刷物の場合、用いる色材の色とそれらの重ね合わせとしてつくられる色との関係は非線形であり、十分な精度で記述できる物理モデルは未だ提案されていない。そこで、非線形関数を学習により獲得する 3 層の階層型 NN を用いて $L^*a^*b^*$ 値からカラープリンタの CMY 値への変換: NN_1 (図 1 (b))、および CMY 値から $L^*a^*b^*$ 値への変換: NN_2 (図 1 (c)) を以下に述べる方法により実現した。

まず、Cyan, Magenta, Yellow それぞれのインク濃度を 0~100% まで等間隔に 11 点変化させ、計 1331 枚のカラーパッチを印刷・測色し、このうちの 216 色の CMY 値と $L^*a^*b^*$ 値の組を学習データ対として用いた。すなわち、 NN_1 の学習には $L^*a^*b^*$ 値を入力データ、CMY 値を教師データとして、

表 1 GDM-2000TC の VDT 特性
Table 1. VDT parameters for GDM-2000TC

	x	y	γ
Red	0.615	0.349	2.717
Green	0.280	0.607	2.630
Blue	0.142	0.060	2.672

NN_2 はその逆の組合せで学習を行なった。学習則には Back Propagation 法の学習停滞の問題を解決した高速学習アルゴリズムである Kick-Out 法⁽⁵⁾ を適用し、どちらの NN も 50000 回の学習を行なった。

なお、中間層のユニット数は数種のネットワークを学習させ、テストデータによる認識誤差が最小となったものを選んだ。具体的には、 NN_1 を 3-13-3、 NN_2 を 3-12-3 の構造とした。また、それぞれの NN の出力特性は、 NN_1 が linear-sigmoid-sigmoid、 NN_2 は linear-sigmoid-linear とした。ここで NN_1 の出力層を sigmoid ユニットとしたことが、3 章で述べるように Gamut 抽出において重要なポイントとなる。

学習に用いなかった残りの 1115 枚のサンプルをテストデータとして用いて色変換精度を評価した結果、 NN_1 の平均誤差は 9.5% (CMY 色空間)、 NN_2 の平均色差は 4.6 ($L^*a^*b^*$ 色空間) であった。また、 $L^*a^*b^* \rightarrow CMY \rightarrow L^*a^*b^*$ となるように NN_1 と NN_2 をカスケード状に接続した相互色変換における変換精度を評価した結果、平均色差は 4.9 であった。これらの結果は従来の LUT 法に比べ比較的少ないカラーパッチ数で色変換系を構築したにも関わらず、上に示した NN_1, NN_2 による色変換が十分に高い精度を持つことを示している。

以上により、色管理で必要とされる DIC $\leftrightarrow$ DDC 間の色変換系が構築できた。以下、3 章では構築した NN_1, NN_2 を用いたカラープリンタの Gamut 抽出の原理を説明し、Phaser540J の Gamut を抽出した結果を示す。また 4 章では Gamut 形状に対し圧縮率を適応的に変化させることが可能な新しい Gamut Mapping 法を提案し、図 1 に示す色管理系を用いて実際のカラー画像の色管理過程を実現することで、従来法と提案法による Gamut Mapping 結果を比較する。

図 2 相互色変換を用いた Gamut 抽出の原理
Fig. 2. Principle of gamut extraction based on mutual color space conversion

3. 相互色変換を用いた Gamut 抽出法

〈3.1〉 Gamut 抽出の原理 ここで提案する Gamut 抽出法は、〈2.2〉節で構築した NN による相互色変換 ($L^*a^*b^* \rightarrow CMY \rightarrow L^*a^*b^*$) に着目したものであり、その原理を以下に述べる。

2つの色変換系: NN_1 , NN_2 が十分に学習されていると仮定すれば、図 2 (a) に示すように、学習データとして用いた Gamut 内部の $L^*a^*b^*$ 値であれば、 $L^*a^*b^* \rightarrow CMY \rightarrow L^*a^*b^*$ と変換した後の $L^*a^*b^*$ 値は変換前とほぼ同じ値が得られ、恒等写像が成立する。これに対し、Gamut の外側の $L^*a^*b^*$ 値は、変換後に同じ値にはならない。なぜならば、図 2 (b) に示すように、 $L^*a^*b^*$ 色空間において Gamut から遠く離れた値、すなわち学習データの範囲外の値は、 NN_1 による色変換の出力特性が sigmoid 型であるため、必ず CMY 色空間 $(0, 100)^3$ の範囲内に押し込められ、さらに NN_2 による色変換で学習点の近傍に写像され、変換前と変換後で大きな誤差が生じるためである。

そこで、相互色変換の誤差量を基準とすれば、CIE-LAB 色空間の各点で Gamut の内側にあるか外側にあるかを見極めることが可能となる。すなわち相互色変換の誤差を、

$$M(\mathbf{r}) \stackrel{\text{def}}{=} \|\mathbf{r} - \mathbf{F}_{NN_2}(\mathbf{F}_{NN_1}(\mathbf{r}))\|$$

$\mathbf{r}$: $L^*a^*b^*$ 値
 $\mathbf{F}_{NN_1}$: NN_1 による $L^*a^*b^* \rightarrow CMY$ 変換
 $\mathbf{F}_{NN_2}$: NN_2 による $CMY \rightarrow L^*a^*b^*$ 変換

と定義すれば、

$$\text{if } M(\mathbf{r}) < \text{threshold} \text{ then } \mathbf{r} \in \text{Gamut} \\ \text{else } \mathbf{r} \notin \text{Gamut}$$

として Gamut 内外の判別ができる。

〈3.2〉 Gamut 抽出結果 図 3 は、等輝度平面 ($L^*=55$) 上の数点について、相互色変換前と変換後の点を

図 3 等輝度平面 ($L^*=55$) の相互色変換誤差と Gamut
Fig. 3. Error of mutual color space conversion and gamut boundary on isoluminant plane ($L^*=55$)

プロットしたものである。図中、●が変換前、○が変換後の点であり、これらを結んだ実線の長さが●の点における $M(\mathbf{r})$ に対応する。これを見れば、変換前と変換後でほとんど値が変わらない点と大きく値が変化する点を確認することができる。また、図中のグレースケールはこの等輝度平面上の 31×31 の格子点上の各点の $M(\mathbf{r})$ を示し、濃度が高い程 $M(\mathbf{r})$ が大きい。ここで、図中の実線で示した閉曲線は、 $M(\mathbf{r}) = 12.0$ の等値線であり、これより内は Gamut 内、外は Gamut 外となる。さらに、閉曲線から離れるほど $M(\mathbf{r})$ は大きな値を示しており、 $M(\mathbf{r})$ が近似的に Gamut からの距離に関する情報を有していることもわかる。

図 4 は、CIE-LAB 色空間内の $31 \times 31 \times 31$ 点について $M(\mathbf{r})$ を算出し、その結果得られた Phaser 540J の Gamut を立体表示したものである。図中の曲面が $M(\mathbf{r}) = 12.0$ における Gamut の境界面を表している。なお、図 3, 4 で threshold を 12.0 と設定したが、これは、Gamut 内のテストデータに対する相互色変換の最大誤差値である。

これらの結果より、相互色変換の誤差を用いることで目的とするプリンタの Gamut をうまく抽出できることがわかる。

4. 圧縮率可変型 Gamut Mapping 法

Gamut Mapping とは、先に述べたように、DIC において入力画像のすべての色が出力デバイスの Gamut 内に入るような変換を施すことである。この変換はオリジナルの画像と色の見えが保たれるように、心理物理学的に望ましい色再現の原理を満たしていることが重要である。グラフィックアートの分野で認められている心理物理学的に望ましい色再現の原理として、以下の項目が報告されている⁽⁷⁾。

図 4 抽出された Phaser 540J の Gamut
Fig. 4. 3D view of extracted gamut of Phaser 540J in CIE-LAB color space

- 画像の無彩色軸は保存すべきである。
- 輝度コントラストは最大にとることが望ましい。
- Gamut 外にはほとんど色がないようにすべきである。
- 色相と飽和度の変化は最小とすべきである。
- 飽和度は大きくすべきである。

実際には、NN₁を用いれば、たとえ Gamut 外の L*a*b*値であっても sigmoid 特性により CMY は出力可能な 0 ~ 100% の値として変換されてしまう。しかしながら、この方法では上記の項目にあるような色相差などの条件が満たされる保障はない。図 3 中の ●—○ で示したように、必ずしも色相の変化が最小であるとは限らず、上記の原理に反し、全く別の色相に変換されてしまう場合がある。

本章ではこうした問題を踏まえて、算出した $M(r)$ を有効に用いた Gamut Mapping 法を提案する。また、従来法として単純な線形圧縮を用いた方法と比較・検討する。

〈4.1〉 明度レンジの調節 CRT ディスプレイに表示した画像をカラープリンタに印刷する場合、CRT ディスプレイ側の明度 (L^*) レンジと、カラープリンタのそれをあらかじめ調節する必要がある。

CRT ディスプレイの明度レンジを $[DL_{min}^*, DL_{max}^*]$ 、カラープリンタの明度レンジを $[PL_{min}^*, PL_{max}^*]$ 、調節前の L^* 値を L^* 、調節後の出力を L'^* としたとき、ここでは次式により明度レンジを調節した。

$$\alpha = (PL_{max}^* - PL_{min}^*) / (DL_{max}^* - DL_{min}^*)$$

$$\beta = PL_{min}^* - \alpha \cdot DL_{min}^*$$

$$L'^* = \alpha \cdot L^* + \beta$$

なお、〈2.2〉節で述べたように、CRT ディスプレイの明度レンジは $[0, 100]$ の範囲にあらかじめ正規化している。また、カラープリンタの明度レンジは、カラーパッチを測色した結果、 $PL_{min}^* = 9.025, PL_{max}^* = 93.04$ であった。したがって、調節後 CRT 上の $L^* = 0$ の色はカラープリンタ上では $L^* = 9.025$ の色として再現される。

図 5 従来法と提案法の Gamut Mapping の概念図
Fig. 5. Schematic diagram of Gamut Mapping by conventional and proposed methods

〈4.2〉 Gamut Mapping 明度レンジ調節後、全ての pixel がカラープリンタの Gamut 内に入るように Gamut Mapping を行う。これには、原画像の全ての pixel を単純に線形圧縮する方法が一般には用いられている。具体的な手法を以下に示す。

$L^*a^*b^*$ 色空間における飽和度は、 $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ で定義される⁽⁴⁾。圧縮後の明度および飽和度を L'^*, C'^* 、カラープリンタの明度レンジの中央値を $L_m^* = (9.025 + 93.04)/2 = 51.03$ として、次式により全 pixel を圧縮する。

$$L'^* = k \cdot (L^* - L_m^*) + L_m^*$$

$$C'^* = k \cdot C^*$$

k : constant value in $[0.0, 1.0]$

しかしながら、この方法では Gamut の形状とは無関係に全ての色が同じ圧縮率 k で圧縮されるため、過圧縮となってしまう場合が生じ、また、Gamut 内の色まで圧縮してしまう(図 5 (a))といった問題が指摘されていた。さらに、圧縮率 k の具体的な指標がなく、Gamut の内、外を見極めるまで何度も印刷した上で圧縮率を決定するという、経験的な作業に頼らざるを得なかった。

そこで、 $M(r)$ が Gamut からの距離情報を与える点に着目し、上記の問題を解決する新しい Gamut Mapping 法を提案する。〈4.1〉節に述べた明度レンジの調節後、以下のアルゴリズムに従って Gamut Mapping を行う。

- 1: 入力画像の全 pixel について、 $M(r)$ を算出する。
- 2: $M(r)$ が最大となる pixel に関して、以下の処理を繰り返す。
 - 2.1: $l = 1.0$
 - 2.2: $l = l - \Delta l$ (ここでは $\Delta l = 0.01$ とした)
 - 2.3: $L'^* = l \cdot (L^* - L_m^*) + L_m^*$
 $C'^* = l \cdot C^*$
 - 2.4: if $M(r) < \text{threshold}$ then 2.5; else 2.2
 - 2.5: exit to 3
- 3: 全ての pixel に対し、

$$L'^* = L^* - [(1.0 - l) \cdot \{M(r)/M(r)_{max}\}] \cdot (L^* - L_m^*)$$

$$C'^* = C^* - [(1.0 - l) \cdot \{M(r)/M(r)_{max}\}] \cdot C^*$$
 (ただし $M(r)_{max}$ は全 pixel 中の最大値)

この圧縮法のポイントは、圧縮係数に比例して $M(r)$ を変化させる点である。これにより、Gamut から最遠点となる

(a) original

(b) gamut alarm

(c) conventional (60% reduced)

(d) $\Delta E : (a)-(c)$

(e) proposed

(f) $\Delta E : (a)-(e)$

図 6 従来法と提案法による Gamut Mapping の結果

Fig. 6. Comparison of reproduced images compressed by conventional (60% reduced) and proposed Gamut Mapping method

pixel が最も圧縮率が高く、Gamut 外郭に近づくほど圧縮率が小さくなり、Gamut 内に関してはほとんど圧縮されない (図 5 (b))。したがって、同じ飽和度であっても Gamut 外郭に近いものは圧縮率を小さくすることが可能であり、Gamut の形状に応じた Gamut Mapping を実現できる。こうした特

徴は Gamut 形状に関する情報を持たない従来の線形圧縮法には見られない点である。また、Gamut 外の色を Gamut の外郭に clip する方法として、これまで Umbrella 法⁽⁷⁾が提案されているが、この方法では Gamut 外の判別を pixel 毎に膨大な繰り返し計算により行なうため、実用面で問題となって

いた。この点においても提案法は Gamut 形状に関する情報を $M(r)$ として内部に持つため、比較的計算量も少なく、実用上のメリットもある。

(4.3) 結果と考察 CRT ディスプレイに表示した画像をカラープリンタに出力するために、RGB $\rightarrow$ L*a*b*と色変換を施したデータに対して従来法(c)と提案法(e)により Gamut Mapping を行った結果を図6に示す。従来法では提案法と同様に明度レンジを調節した後、全 pixel を Gamut 内に入れるために圧縮率を 60%とした。原画像(a)は CRT ディスプレイに表示した画像サイズ 256 × 204 [pixels by pixels] のフルカラー画像である。なお印刷の都合上、全てのカラー画像をグレースケールに変換して表示してある。(b)は Gamut 外と判別した pixel を白く塗りつぶして表示した Gamut Alarm 画像である。(d),(f)はオリジナル画像と従来法・提案法による Gamut Mapping 後の画像との色差(ΔE)をグレースケールで示したものである。なお、濃度が高い程度差が大きいことを表している。

従来法による Gamut Mapping では、Gamut 全体を圧縮するため、(c)に示したように全体的にコントラストの低下した白んだ画像になってしまう。特に背景は、Gamut Alarm によればカラープリンタの Gamut 内であるにもかかわらず圧縮されてしまっている。これに対し提案法では、カラープリンタの Gamut の内外を見極めたうえで、Gamut 内の pixel についてはほとんど圧縮しないため、Gamut Alarm されていない部分についてはオリジナル画像との色差がなく、色の見えが忠実に再現されている。Gamut 外の pixel については、この場合、フルーツの領域はほとんど全てがカラープリンタの Gamut 外の pixel であるが、ここで色差画像(d)に着目すると、従来法では圧縮率が固定であるため、どの色相であっても一様に圧縮されている。これに対し提案法では、 $M(r)$ により圧縮率が適応的に変化していることが(f)からもわかる。例えばりんごの周りのフルーツなど、もともと Gamut に近い pixel については圧縮率を小さくし、Gamut の形状に応じ圧縮されていることが確認できる。

5. むすび

以上、相互色変換 NN を用い、目的とするカラーデバイスの Gamut を抽出する方法を提案した。また、実際にカラープリンタの Gamut を抽出し、目的とする Gamut をうまく抽出できることを確認した。さらに、相互色変換の精度情報を利用した新しい Gamut Mapping 法を提案した。従来法と比較した結果、提案法によりオリジナル画像の色の見えをより忠実に再現できることがわかった。

現在、心理物理実験(一対比較法)により、画像の種類(自然画像、ポートレート、CG など)と提案法の効果の関係を調べており、今後、その結果の解析を進める予定である。また、こうした pixel 単位の Gamut Mapping では、画像の Gamut 外と Gamut 内となる pixel が隣接している領域で不連続を生じたり、飽和度を高くすることで輪郭が失われたり、コントラストが低下するといった点で課題が残されている。今後、知覚される色の見えの差がさらに低減されるように、コントラスト感度特性といった視覚特性を考慮した Gamut Mapping

について検討する必要がある。

謝辞

本研究で用いたカラーパッチの印刷・測色に際して、東洋インキ製造(株)より多大なる御援助を頂いたことをここに記し、心から感謝いたします。

(平成 8 年 4 月 25 日受付, 平成 8 年 10 月 21 日再受付)

文 献

- (1) D.Travis : "Effective Color Displays", Academic Press (1991)
- (2) 荒井佳文, 中野仁貴, 伊賀哲雄, 臼井支朗 : 「3 層ニューラルネットによる CIE L*a*b* $\rightarrow$ CMY 変換法」, 電子情報通信学会論文誌, **J76-D-II**, 5, pp.967-975 (1993)
- (3) 金森克洋, 小寺宏暉 : 「4 点補間方式によるカラーハードコピーの色修正」, 画像電子学会誌, **18**, 5, pp.319-328 (1989)
- (4) 日本色彩学会編 : 「色彩科学ハンドブック」, 東京大学出版会 (1980)
- (5) K.Ochiai, N.Toda, S.Usui, : "Kick-Out learning algorithm to reduce the oscillation of weights", Neural Networks, **7**, 5, pp.797-807 (1994)
- (6) G.Wyszecki and W.S.Stiles : "Color Science : Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae", John Wiley & Sons, New York (1982)
- (7) M.C.Stone, W.B.Cowan and J.C.Betty : "Color gamut mapping and the printing of digital color images", ACM Transactions on Graphics, **7**, 4, pp.249-292 (1988)

今村 昌弘

(非会員) 1972 年 10 月 22 日生。1995 年豊橋技術科学大学情報工学課程卒業。同年豊橋技科大学大学院修士課程に入学、在籍中。カラーメディアの色再現、Gamut Mapping 技術に関する研究に従事。

中内 茂樹

(非会員) 1966 年 2 月 8 日生。1993 年豊橋技術科学大学大学院博士後期課程修了。同年同大学情報工学系助手。色覚の計算理論と神経機構、カラーメディアにおける色再現に関する研究に従事。電子情報通信学会、日本神経回路学会、日本神経科学学会会員。工博。

臼井 支朗

(正員) 1943 年 10 月 22 日生。1974 年カリフォルニア大学大学院博士課程修了。同年、名古屋大学工学部助手、1979 年豊橋技術科学大学情報工学系講師、助教授を経て、1986 年教授。生体情報工学、生理工学などの研究に従事。計測自動制御学会、電子情報通信学会、情報処理学会、日本 ME 学会、日本生理学会、日本神経回路学会、日本神経科学学会、IEEE (Fellow)、INNS 等各会員。Ph.D.