

# 入力推定型逆問題の色再現への応用

高 木 淳<sup>†,☆</sup>

カラー CRT, カラー・ハードコピー, カラー写真等の色出力機器へ所望の色を再現することを色再現と呼んでいるが, コンピュータ・グラフィクス (CG) の分野でも, この色再現の重要性が日増しに高まっている。最近では CRT に表示された色をさらにカラー・ハードコピー等で紙面に正確に印刷する要望が高まっている。CG 画像の色を CRT に正確に再現する色再現方法はほぼ確立されている。しかし, 紙面への色再現は CRT のそれよりも数段難しい。従来, 紙面への色再現についてはさまざまな研究があるが, いまだ信頼できるアルゴリズムを確立するには至っていない。我々は CRT やカラー・ハードコピー等の色出力機器に関係なく, すべての色出力機器を対象とした色再現が入力推定型逆問題であることに注目した。しかし, 入力推定型逆問題を含む一般の逆問題は数学的には解の存在性や一意性の不明確性および不安定性という, いわゆる不適切性 (ill-posedness) が障害となり, 解が正確に求められない場合が生じる。これがそのまま色再現の問題になっている。本研究では新しく開発した補間逆推定法を用いてこの不適切性を解決し, 入力推定型逆問題を高精度に解いた。色再現問題を入力推定型逆問題に定式化することにより, どんな色出力機器にでも適用可能な色再現方法を確立することができた。この結果, 本方法は従来法よりも格段に精度が良くかつ計算速度も早く, 入力推定型逆問題を色再現に導入することがきわめて有効であることが分かった。

## A Perfect Approach for Color Reproduction by Using Input Estimation Inverse Problem Solution

ATSUSHI TAKAGHI<sup>†,☆</sup>

Color reproduction is to reproduce the desired color on color output equipment, such as color CRT, color hard copier or photograph. These days, the importance of color reproduction is growing, especially in the computergraphics field. While color reproduction method for color CRT has almost been established, there is an increasing demand for accurate color reproduction on paper by using a color hard copier etc. Unfortunately color reproduction on paper is more difficult than color reproduction on color CRT. Although many research on color reproduction on paper has been reported, there is no reliable result. In this research, we focused that color reproduction on any color output equipment belongs to 'Input Estimation Inverse Problem (IEIP)'. But inverse problem generally has so called ill-posedness, such as lack of existence or uniqueness or stability of roots. And also that is a problem of color reproduction as it is. We have found a solution to avoid the ill-posedness mentioned above, by using a newly developed method: 'inverse interpolation method'. With this research, we succeeded in solving the IEIP accurately. As a result, we found that our method is faster and more accurate than conventional methods. A more general color reproduction method which can apply to any type of color output equipment, has been established.

### 1. はじめに

カラー CRT, カラー・ハードコピー, カラー写真等の色出力機器へ所望の色を再現することを色再現と呼んでいる。コンピュータ・グラフィクス (CG) が,

色やレイアウトを決める用途で, 印刷業界やデザイン業界の作業現場に着実に浸透してきた今日では, この色再現の重要性が日増しに高まっている。

CG 画像の色を CRT に正確に再現する色再現方法はほぼ確立されている<sup>14)</sup>。しかし, 最近では CRT に表示された色をさらにカラー・ハードコピー等で紙面に正確に印刷する要望が高まっている<sup>9)</sup>。このため, 従来からさまざまな研究があるが, 紙面への色再現は CRT のそれよりもはるかに難しく, いまだ信頼できるアルゴリズムを確立するには至っていない<sup>14)</sup>。この理由は CRT への色再現は加法混色 (光の混色) と呼ば

<sup>†</sup> トヨタ自動車株式会社 EC 推進室

Electronic Commerce Promotion Department,  
TOYOTA MOTOR CORPORATION

<sup>☆</sup> 現在, 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻

Presently with Department of Precision Machinery Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

れる単純な線形モデルで説明できるのに対し、紙面への色再現は減法混色（絵の具の混色）と呼ばれる複雑な非線形モデルになり、混色のしくみを解明することが困難であるからである（文献 8），pp.177-196 参照）。

ところで、ある入力値に対し何らかの値を出力をする系（以後、単に系）がある場合、逆にある所望の値を出力とするような入力値を推定する問題（以後、入力推定型逆問題）は、理工学分野において頻繁に現れる重要な逆問題のひとつである（文献 3），pp.1-8 参照）。

我々は CRT や紙面等の色出力機器に関係なく、すべての色出力機器を対象とした色再現が入力推定型逆問題であることに注目した。しかし、入力推定型逆問題を含む一般の逆問題は、数学的には解の存在性や一意性の不明確性および不安定性という、いわゆる不適切性（ill-posedness）が障害となっており、これがそのまま色再現の問題を難しくしている。

本研究では新しく開発した補間逆推定法を用いてこの不適切性を解決し、入力推定型逆問題を高精度に解いた。この入力推定型逆問題を利用して、すべての色出力機器に適用可能な色再現方法を確立することができた。その結果、この方法は従来法よりも格段に精度が良く、かつ計算速度も速いことが分かった。

## 2. 本研究の目標と概要

自動車のカラー・デザインや染色のデザイン現場ではカラー・ハードコピー機を単に複写だけではなく、色を評価したり手配するために使おうとしている。このためには所望の色と出力された色の差が、目視で判別できない程度であることが必要である<sup>13)</sup>。これを数値的に表現すると、代表的な色の平均色差  $\Delta E_{ab}^*$  が  $\Delta E_{ab}^* \leq 2$  であることが分かっている<sup>12)</sup>。ここで  $\Delta E_{ab}^*$  とは等色差空間（すべての色を 3 次元空間に配置し、かつ 2 点間の距離が、人間が感じる色の差に等しくなるように設定した空間）における 2 色の空間距離であり、2 つの色の差を定量的に表すものである。ちなみに白と黒の色差  $\Delta E_{ab}^*$  は 100 である。

本稿では 3 章で入力推定型逆問題の定義を明らかにし、この問題を解くことによりなぜ色再現問題が解けるかを述べる。また、不適切性と呼ばれる問題とは何かを述べる。次に 4 章では従来法とその問題点を明らかにする。この章では従来法が現象を数学的に定式化しているために、現象を精度良く近似できないことを示す。次に 5 章では新しく開発した入力推定型逆問題の解法について説明する。最初に基本的な考え方を示し、この方法がどのように従来問題点を解決す

るかを述べる。さらに、具体的な計算方法として新しく開発した補間逆推定法を説明する。次に 6 章では実験結果を示す。

## 3. 入力推定型逆問題

### 3.1 定義

いま、入力  $m$  個の変数を要素として持つベクトル

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$$

をある系に入力すると、これに対する出力が  $n$  個の変数を要素として持つベクトル

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$$

で与えられたとする。

これを、ある関数  $f$  を用いて

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}) \quad (1)$$

と表記する。

入力推定型逆問題とはある出力値  $\mathbf{y}$  から、これを出力するような入力値  $\mathbf{x}$  を逆に推定する問題である。対応する入力値  $\mathbf{x}$  がない場合は解はなしとし、複数あればそれをすべて求める必要がある。

### 3.2 不適切性

入力推定型逆問題を含む一般の逆問題は数学的には解の存在性や一意性の不明確性および不安定性という問題が存在し、このうちのどれか 1 つでも問題となる時問題は不適切性を持つという<sup>3)</sup>。逆問題ではこの不適切性を解決しないかぎり正しい解を得ることはできない<sup>4), 5), 16)</sup>。

色再現問題で生じる上記不適切性を具体的に述べ、解決しなければならない問題を明らかにする。

#### (1) 解の存在性

所望の色が与えられた基本色から再現不可能な場合、解は存在しないといえる。たとえば、黄色は緑、青、黒の 3 つの絵の具（基本色）からはつくれないことは経験的に分かる。では与えられた基本色を使った場合、どのような色が再現可能で、どのような色が再現不可能かを明らかにすることが必要である。

#### (2) 解の一意性

所望の色をつくる基本色の濃度の組合せは、基本色が同じでも、ただ 1 通りではなく、複数通りある場合がある。この場合は、必要に応じてそれらすべての組合せを見だし、それらのうち、最適なものを選ぶことができればならない（ただし、今回は最適なものを 1 つ選ばばよい）。

#### (3) 解の安定性

出力の小さな変化に対し入力（解）が大きく変化する系では、入力値が定まりにくく、不安定になりがちである。実際、従来の大半の色再現方法は、この解の安定性の問題が障害となっているので、一番重要な問題といえる。したがって、どんな系に対しても所望の色が決まればこれに対する正確な解を得ることが必要である。

#### 4. 従来の方法

従来の色再現問題や入力推定型逆問題のほとんどは、ある入力値に対し特定の値を出力する系を数式によって定式化し、この数式を解くことにより出力値に対する入力値を求めるものである。従来用いられてきた定式化の方法を整理すると以下ようになる。

##### (1) 理論式による定式化

これは系を理論的に解明し、定式化する方法である<sup>5)</sup>。Kubelka-Munk は基本色として絵の具を混色した等均質、不透明な媒質中での光の散乱・吸収を考える際、光の変化は表面に対して垂直方向だけで起こるといふ仮説をたて減法混色の色再現のもととなる関係式をたてた<sup>2)</sup>。また、Neugebauer は色を細かなドットで表現したとき、印刷された色は、線形な加法混色によって得られるとした。そして、ドットの重なり状態を確率的に表現した色再現式をたてた<sup>15)</sup>。これらの方法は計算により簡単に処理できて便利であるが、純粋な理論で説明される現象は少なく、また、種々の要因のため実測と必ずしも合わない場合が多いので、使える分野には制限がある。

##### (2) 実験式による定式化

理論的に説明することが難しい現象を、実験から得られたデータをもとに、数式を用いて近似する方法である。高岡は基本色として複数のインクを用いたとき、それらを混色してできる色をいくつかの未知数を持つ行列式で表現し、その未知数を最小二乗法により求めた<sup>13)</sup>。この方法は現象ごとに異なる式をつくらなければならないため汎用性がなく手間がかかる。

##### (3) 統計学による定式化

(2)と同様に、理論的に説明することが難しい現象を、いくつかのデータから統計学的な予測式（主成分分析式、回帰分析式、重回帰分析式等における状態方程式）で近似する方法である<sup>7)</sup>。この方法も簡単に計算でき便利であるが、現象が線形に限られるため、複雑な現象は説明できない。

従来の色再現方法を用いて実験した結果、色差が  $\Delta E_{ab}^* \approx 20$  程度であり、我々の要求には達しないことが分かった<sup>13)</sup>。

高木はカラー印刷における減法混色の色再現問題を解くために、ニューラルネットワーク (Neural Network) を用いた。その結果、平均色差を  $\Delta E_{ab}^* = 2.66$  とした<sup>12)</sup>。この方法はアルゴリズムが簡単で、計算速度も速いので便利であるが、ニューラルネットワークの初期設定に必要な多くの係数を試行錯誤で設定する手間を要することが最大の問題となった。また、これ以上の良い結果は得られず、この方法では限界があることが分かった。

結果として、従来の方法では特に非線形な現象を正確に近似することには無理があり、式をさらに複雑にし精度をあげることも可能と思われるが、ユーザにとっては扱いづらいものとなる。このため、今後非線形要素を考えなくてもすみ、ユーザが簡単に予測できる新しい予測式の研究が必要であることが分かった。

#### 5. 新しい方法

##### 5.1 基本的な考え方

ある所望の色はそれ以外の複数の色を混ぜ合わせて再現することができるが、複数の色とはカラー CRT の場合は  $R$  (赤),  $G$  (緑),  $B$  (青) の成分色光であり、カラー・ハードコピーの場合は  $Y$  (黄),  $M$  (マゼンタ),  $C$  (サイアン),  $K$  (黒) 等のインク (または色材) に該当し、これを基本色という。したがって、色再現とは所望の色を出力するためには、基本色をどのような割合で混色すればよいかを問うことに等しい。

色再現では、入力は基本色となる複数の色の濃度、出力はその基本色を混色した結果得られる色である。いま、基本色を 3 色としてそれぞれの濃度を  $\mathbf{x} = (D_1, D_2, D_3)$  とする。また、混色した結果得られる色はまず三刺激値で表す。ただし三刺激値  $X, Y, Z$  は次式のように表される (文献 8), pp.56-71 参照)。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = k \int_{\lambda} R(\lambda) I(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} d\lambda \quad (2)$$

ここで、 $R(\lambda)$  は試料の分光反射率で  $I(\lambda)$  は試料を照らす光源の分光放射輝度であり、 $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  は等色関数と呼ばれるあらかじめ決められた重み関数であり、 $k$  は定数で

$$k = 100 / \int_{\lambda} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

である。

次に、測定した三刺激値  $X, Y, Z$  を、均等色空間と呼ばれる空間のひとつである  $L^*, a^*, b^*$  表色系に変換する（変換式は付録 A.1 に示す）。以後  $\mathbf{y} = (L^*, a^*, b^*)$  とし、これを出力の色として扱う。均等色空間とは空間内の距離が、人間が感じる色差に等しいように意図した色空間である（文献 6）、p.27 参照）。

ここで、通常の色出力機器の基本色の濃度 ( $D_1, D_2, D_3$ ) は、各色 8 ビットのデータ構造を持ち、 $2^8 = 256$  段階の濃度の変化が可能であるので、値の取りうる範囲は次式となる。

$$0 \leq D_1, D_2, D_3 \leq 255. \quad (3)$$

さて、図 1 のように濃度  $\mathbf{x} = (D_1, D_2, D_3)$  のすべての組合せ  $\mathbf{x}_i^f$  ( $i = 1, 2, \dots, 256^3$ ) を考え、この集合を  $\mathbf{A}_x$  とする。

$L^*, a^*, b^*$  は連続した実数値であるが、計算のためにそれぞれ適切に 100 に離散化する。次に 100 ずつに離散化した  $L^*, a^*, b^*$  のすべての組合せ

$$\mathbf{y}_l^o = (L_l^*, a_l^*, b_l^*) \quad (l = 1, 2, \dots, 100^3) \quad (4)$$

を求める。この集合を  $\mathbf{A}_y$  とする。

我々が開発した新しい方法の考え方は、以下の手順による（図 1 参照）。

#### 手順 1 順方向補間の実行

集合  $\mathbf{A}_x$  に属するすべての  $\mathbf{x}_i^f$  に対する出力  $\mathbf{y}_i^f$  ( $i = 1, 2, \dots, 256^3$ ) を求め、 $\mathbf{y}_i^f$  全体の集合を  $\mathbf{A}_y$  とする。これを順方向補間 (forward interpolation) と呼ぶことにする。順方向補間についての具体的な方法は 5.2 節に示す。

#### 手順 2 $\mathbf{y}_i^o$ と $\mathbf{y}_i^f$ の距離の最小値の算出

式 (4) で示したある  $\mathbf{y}_l^o$  に対し、 $\mathbf{y}_l^o$  と手順 1 で求めたすべての  $\mathbf{y}_i^f$  との空間距離の最小値

$$d_l = \min_i |\mathbf{y}_l^o - \mathbf{y}_i^f| \quad (l = 1, 2, \dots, 100^3) \quad (5)$$

を求め、このときの  $\mathbf{y}_i^f$  を  $\mathbf{y}_{i_l}^f$  とする。ただし、ここで  $|\mathbf{y}_l^o - \mathbf{y}_i^f|$  は各座標値の差の 2 乗の和

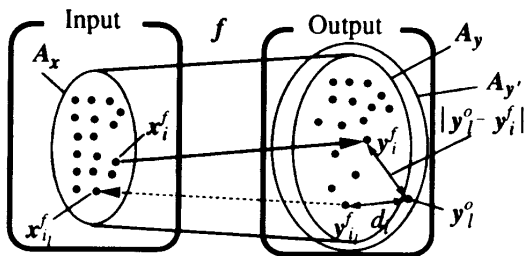


図 1 入力と出力の対応関係

Fig. 1 Relation between input data and output data.

の平方根  $\sqrt{\sum_{k=x,y,z} (y_{i_k}^o - y_{i_k}^f)^2}$  を表す。また、 $(\mathbf{y}_i^o, d_l, \mathbf{y}_{i_l}^f)$  を記憶する。

#### 手順 3 解の判別

あらかじめ決められた小さな数（許容誤差） $e$  に対し、手順 2 で記憶した  $(\mathbf{y}_i^o, d_l, \mathbf{y}_{i_l}^f)$  を参照して、 $\mathbf{y}_i^o$  が

$$d_l \leq e \quad (6)$$

を満たすとき、 $\mathbf{y}_i^o$  に対する解は存在し、満たさないときは、解は存在しないとする。許容誤差  $e$  は目標とする色差 2 とおく。

##### (1) 解が存在する場合

式 (6) を満たすようなすべての  $\mathbf{y}_i^o$  に対する  $\mathbf{y}_{i_l}^f$  を求め、手順 1 からこの  $\mathbf{y}_{i_l}^f$  に対応する入力値  $\mathbf{x}_{i_l}^f$  を求める。さらに  $\mathbf{y}_i^o$  とそれに対する解  $\mathbf{x}_{i_l}^f$ 、および‘解あり’の 3 つの情報、

$$(\text{解あり}, \mathbf{y}_i^o, \mathbf{x}_{i_l}^f)$$

をテーブルに格納する。

##### (2) 解が存在しない場合

式 (6) を満たさないとき、出力  $\mathbf{y}_i^o$  に対する解（入力）はなく、このことは目的の色  $\mathbf{y}_i^o$  は、与えられた基本色では再現できない印刷不可能な色であることを示す。

この場合は‘解なし’という情報と、 $\mathbf{y}_i^o$  に一番近い  $\mathbf{y}_{i_l}^f$  の解  $\mathbf{x}_{i_l}^f$  のおよび‘解なし’の 3 つの情報、

$$(\text{解なし}, \mathbf{y}_i^o, \mathbf{x}_{i_l}^f)$$

を上記テーブルに格納する。

すなわち、この場合はユーザが印刷不可能な色を印刷しないか、一番近い色  $\mathbf{x}_{i_l}^f$  で代用して印刷するかの選択ができるようにしておく。

#### 手順 4 所望の色 $\mathbf{y}$ に対する解の算出

所望の色  $\mathbf{y}$  が与えられた場合、手順 3 でテーブル化した  $\mathbf{y}_i^o$  との空間距離  $|\mathbf{y} - \mathbf{y}_i^o|$  が最も小さい  $\mathbf{y}_i^o$  を求め、これに対する色材の濃度  $\mathbf{x}_{i_l}^f$  を解とする（このときの誤差については付録 A.2 参照）。

ただし、手順 1~3 までは‘事前計算’として必要であるので、最初にただ 1 回実行しておけばよい。以上が本研究の基本的な考え方である。

#### 5.2 補間逆推定法と順方向補間

補間逆推定法に用いる順方向補間の具体的な方法について述べる。

順方向補間とは一般的に、入力値とそれに対する出力値のいくつかの有限の既知関係

$$y_j = f(x_j) \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

により、任意の  $x_i (\in \mathbf{A}_x)$  に対する出力  $y_i^f$  を補間によって求める方法である<sup>11)</sup>。

ここでは色再現で用いた実際の例を使って説明する。いま、式(3)の範囲で  $D_1, D_2, D_3$  の濃度を離散化することを考える。分割を細かくしたり、等分割でなく変化の大きい区間で間隔を細かくすることも可能であるが、以下、同じ議論が可能であるので、ここでは0, 63, 127, 191, 255 とほぼ5段階に等分割して説明する。

いま、集合  $A = \{0, 63, 127, 191, 255\}$  と集合  $B = \{0, 1, 2, \dots, 255\}$ 、集合  $A$  と  $B$  よりできる  $(D_1, D_2, D_3)$  のすべての組合せ

$$\mathbf{x}_A = \{(D_1, D_2, D_3) | D_1, D_2, D_3 \in A\} \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_B = \{(D_1, D_2, D_3) | D_1, D_2, D_3 \in B\} \quad (9)$$

を考える。

ここでは任意の  $(D'_1, D'_2, D'_3) (\in \mathbf{x}_B)$  から、 $L^*, a^*, b^*$  のうちの  $L^*$  を求める方法を示す。

いま、 $D_1, D_2, D_3$  から  $L^*$  への写像を

$$L_{D_1 D_2 D_3}^* = f_L \cdot (D_1, D_2, D_3) \quad (D_1, D_2, D_3 \in B) \quad (10)$$

と表記する。

ここで、事前の測定により

$$L_{ijk}^* = f_L \cdot (i, j, k) \quad (i, j, k \in A) \quad (11)$$

の関係が分かっている (図2の黒丸点)。いま、 $j, k$  を固定し  $j_0, k_0$  とする。すると図2のように

$$L_{ij_0 k_0}^* = f_L \cdot (i, j_0, k_0) \quad (i \in A) \quad (12)$$

の関係より、すべての  $D_1 (\in B)$  について

$$L_{D_1 j_0 k_0}^* = f_L \cdot (D_1, j_0, k_0) \quad (D_1 \in B) \quad (13)$$

の関係が近似的に判明する。なぜなら式(12)により  $D_1 - L^*$  上で5つの測定点  $(i, L_{ij_0 k_0}^*)$  ( $i \in A$ ) をちょうど通るなめらかな曲線  $C$  を描けば、任意の  $D_1$  に対する  $L^*$  を求めることができるからである。ここでは曲線  $C$  として B-spline 曲線を用い、両端点の方向ベクトルは隣接する2点を通る2次曲線より求めた。

さらに、測定点  $(i, L_{ij_0 k_0}^*)$  は精度を上げるために、各5回ずつ測定し、その相加平均をとった。

これにより、まず所望の  $D'_1 (\in B)$  に対する

$$L_{D'_1 j_0 k_0}^* = f_L \cdot (D'_1, j_0, k_0) \quad (D_1 \in B) \quad (14)$$

が、固定された  $j_0, k_0$  に対し求められる (図2の白丸点)。

次に、式(14)において  $j_0 \in A$  として  $j_0$  を動かす。

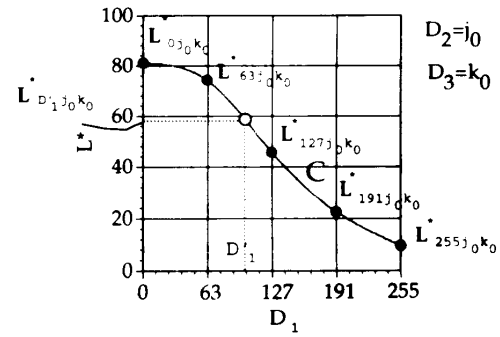


図2  $L_{ij_0 k_0}^* (i \in A)$  から  $L_{D'_1 j_0 k_0}^*$  の算出  
Fig. 2 Calculation of  $L_{D'_1 j_0 k_0}^*$  from  $L_{ij_0 k_0}^* (i \in A)$ .

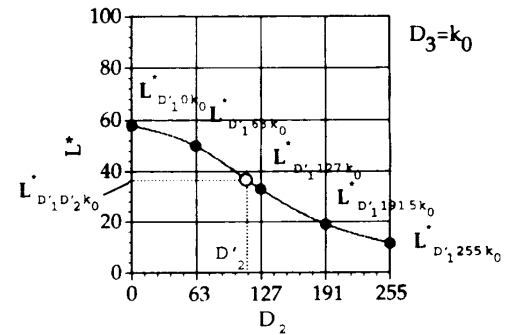


図3  $L_{D'_1 j k_0}^* (j \in A)$  から  $L_{D'_1 D'_2 k_0}^*$  の算出  
Fig. 3 Calculation of  $L_{D'_1 D'_2 k_0}^*$  from  $L_{D'_1 j k_0}^* (j \in A)$ .

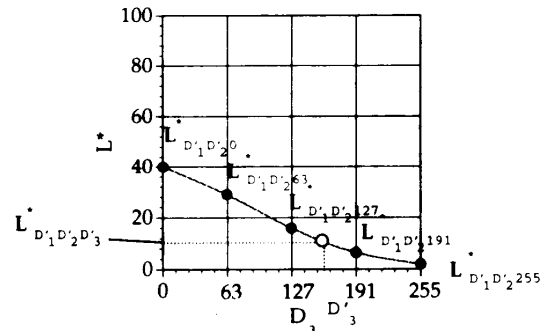


図4  $L_{D'_1 D'_2 k}^* (k \in A)$  から  $L_{D'_1 D'_2 D'_3}^*$  の算出  
Fig. 4 Calculation of  $L_{D'_1 D'_2 D'_3}^*$  from  $L_{D'_1 D'_2 k}^* (k \in A)$ .

$$L_{D'_1 j k_0}^* = f_L \cdot (D'_1, j, k_0) \quad (j \in A). \quad (15)$$

同様の議論により、図3のように所望の  $D'_2 (\in B)$  に対する

$$L_{D'_1 D'_2 k_0}^* = f_L \cdot (D'_1, D'_2, k_0) \quad (D'_2 \in B) \quad (16)$$

が、固定された  $k_0$  に対し求められる。

最後に式(16)において、 $k_0 \in A$  として  $k_0$  を動かす、同様の議論をすれば、図4のように所望の  $D'_3 (\in B)$

に対する

$$L_{D'_1 D'_2 D'_3}^* = f_L \cdot (D'_1, D'_2, D'_3) \quad (D'_3 \in B) \quad (17)$$

が求められる。

以上より、所望の  $(D'_1, D'_2, D'_3)$  に対する  $L^*$ ,  $L_{D'_1, D'_2, D'_3}^*$  が求められた。  $a^*$ ,  $b^*$  についても同様の議論ができ、結局すべての  $(D_1, D_2, D_3)$  ( $D_1, D_2, D_3 \in B$ ) に対する三刺激値  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  を求めることができる。また、以上の議論では  $D_1, D_2, D_3$  の順番に処理したが、順番を変えてもまったく同じ結果を得る。さらに以上の議論によれば、入力と出力の要素の数は上にあげた例のように3つに限られることなく、それぞれ  $m, n$  個に一般化できる。これが補間逆推定法に用いる順方向補間である<sup>11)</sup>。

### 5.3 補間逆推定法の特徴

この方法は入力と出力の関係を数式で近似する従来の方とは異なり、系は数式では単純に近似できないとした新しい発想によるもので、次の特徴を持つ。

#### (1) 現象を数式で表す必要がない

入力値  $\mathbf{x}$  から出力値  $\mathbf{y}$  の関数系を数式で近似するのではなく、入力と出力の関係だけを知ることができる中の見えない箱、すなわちブラックボックスとして扱う。この結果、現象を数式で表す必要がなくなる。

#### (2) 不適切性が回避できる

##### (a) 解の安定性を保証

従来法は出力値から入力値を求めるため、逆関数を求めたり、方程式を解こうとする、いわゆる逆解析をするため、この時点で誤差を生ずる。しかし、本方法は手順1において、順方向補間を用いるのみで、上記逆解析をしない。この結果、逆解析によって生じる誤差をなくすことができ、解の安定性が保証できる。

##### (b) 解の存在性を保証

手順3により解の存在性が解決できる。

##### (c) 解の一意性を保証

今回、手順2によって、解を1つしか求めなかったが、所望の出力値に対し、許容誤差内にはいる  $\mathbf{y}_i^f$  をすべて解とすることにより、解をいくつ持つかが容易に判明する。

#### (3) アルゴリズムが簡単で計算速度が速い

難しい方程式を解いたり、複雑な計算をする必要がないのでアルゴリズムが簡単で、簡単に計算機にプログラムすることができる。また、いっ

たん事前計算をしておけば、個々の入力値に対する出力値の推定は計算の必要がないので計算速度が速い。

#### (4) 少数のデータ数で実現可能

本アルゴリズムは少数の測定データから補間によって無数のデータをつくるので、全体で100から200程度の少数のデータ数で系の予測が十分実現可能であり、アルゴリズムを簡単に実行できる。

## 6. 実験結果

図5は本色再現方法を用いて出力された代表色の色再現結果である。白丸が出そうとした目的の色であり、使用頻度の高い重要な色を50色選んだ。黒丸が本色再現手法によって計算され、印刷して測定した色である。具体的には、目的の色より、本色再現手法によってインク濃度の混合比率を計算し、その比率に基づいて印刷し、測定により、三刺激値を求めた。そして、両者の三刺激値を均等色差空間に変換し、均等色差空間上で比較した。図では2次元的に分かりやすいように、CIE(国際照明委員会)の $xy$ 色度座標で色を表示した( $xy$ 色度座標については付録A.3参照)。その結果上記50色の平均色差は $\Delta E_{ab}^* = 1.80$ となり、目標を達成することができた。

三刺激値  $X, Y, Z$  は、村上色彩技術研究所製の積分球型分光光度計を用いて正反射光を除いた試料の分光反射率  $R(\lambda)$  を測定し、式(2)から求めた。照射条件は45度入射拡散受光(45|d)である。光源  $I(\lambda)$  としては、印刷結果を昼光で見る環境にできるだけ近くするため、 $D_{65}$ の分光分布を用いて計算した(文献6), pp.299, 300参照)。

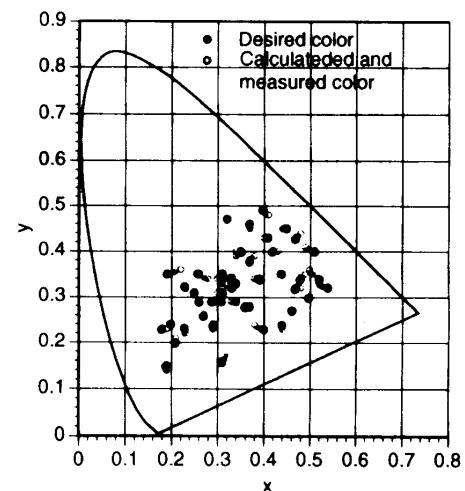


図5 色再現結果

Fig. 5 Result of color reproduction.



図6 出力例

Fig. 6 Example of output.

サンプリング間隔や点数、曲線の種類はプリンタやインクの種類によって異なり、一意的には決定できないと思われる。したがって、プリンタとインクが決まってから、実験によって最適な設定を決めるのが望ましいと思われる。

サンプル点は増やせば増やすほど精度は向上すると考えられるが、逆に試料の測定数や計算時間がサンプル点数の3乗に比例して増加する。本実験では、サンプル点は5つとし、サンプリング間隔には加重サンプリング法を用い、濃度の変化の激しい部分でサンプリングの間隔を小さくする工夫をした。また、図2~4における曲線の種類をいろいろ変えて実験して、一番良い結果が得られたB-spline曲線を使った。その結果、十分な成果が得られることが分かった。

なお、所望の色を再現するためには、理論的には3色以上の基本色によっても再現できるが、本実験では、コスト的、時間的な有利さ、および基本色が少ない方が一般的に濁りのないきれいな色が作れるため、3色の基本色を用いた。

また、インク  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  の化学的性質（インクどうしの化学反応等）から、インクの濃度が同じでも紙面に印刷する順番によって色は違ってくるため、実験では  $D_1 \rightarrow D_2 \rightarrow D_3$  のようにあらかじめ決めておいた順番でいつも印刷をした。印刷には重要な赤と青領域の高彩度の色も再現できるように9色の基本色を

用いる多色印刷法を用い、出力できる色数を従来よりも約35%広げている（文献12）、pp.132-135参照）。

また、各画素の色を再現するためには、この9色から最適な3色を選択する方法を用いている（文献12）、pp.138-139参照）。具体的には、基本色としてRed, Orange, Yellow, Green, Blue, Purple, Magenta, Black(K), Gray( $G_r$ )の9色のインクからGYK, YOK, ORK, RMK, MPK, PBK, BGK, YYG<sub>r</sub>, YOG<sub>r</sub>, ORG<sub>r</sub>, RMG<sub>r</sub>, MPG<sub>r</sub>, PBG<sub>r</sub>, BGG<sub>r</sub>の14通りの組合せについて事前計算を行っておき、再現する色に応じて、この中の1つを選んだ。事前計算に要した時間は、上記並列計算機を使って約1時間であったので、全体では

$$1(\text{時間}) \times 14(\text{通り}) = 14(\text{時間})$$

の計算時間を要した。しかし、この事前計算は最初の1回だけ必要であり、この結果をテーブルに格納して用いたので、毎回の印刷時には影響しない。使用したテーブルは100×100×100のサイズであり、各々に9色ずつの色の情報を要するので、およそ10 Mbyteの容量を要した。

図6は文献10)による画像出力の一例を紙面に昇華型熱転写方式のトヨタ自社開発のカラー・プリンティング・システムを用い、本色再現手法を用いて印刷した結果である。画像の着色計算に使用した計算機は英国MEIKO社製の並列計算機Computing Surfaceで、

これはプロセッサ (i860) を 64 個搭載している。画像は 1280 × 1024 ピクセルである。形状データはトヨタ製のトヨタ・スタイリング CAD システムで作成したものであり、3 次の Bézier 曲面である。CRT に表示するための計算時間は 1 画像につき約 20 分であった。ジャギー処理はしていない。印刷サイズは A3 である。印刷時間はおおよそ 1 画像につき約 30 分であったが、これは、カラー・プリンティング・システムの性能のみに依存するもので、本アルゴリズムには依存しない。

## 7. まとめと今後の課題

本研究では非線形な色再現方法を確立するために、入力推定型逆問題を用いた、新しく開発した補間逆推定法を用いて不適切性を解決することにより、入力推定型逆問題を高精度に解いた。その結果、この方法は従来法よりも格段に精度が良く、かつ計算速度も速いことが分かった。これにより、どんな色出力機器にでも適用可能な色再現方法を確立することができた。

今後は今回開発したアルゴリズムの高速化と CAE 等他の分野への適応に取り組みたい。高速化についてはソフトウェアの最適化、ハードウェア化を考えている。

**謝辞** 本研究を進めるにあたり、多くの貴重な技術的なアドバイスを賜った中京大学情報科学部の湊幸衛教授と、東京大学大学院工学研究科の木村文彦教授に深く感謝する。

## 参考文献

- 1) 電子写真学会編、小寺宏嘩：色再現のための画像処理、写真工業別冊イメージング、写真工業出版社、pp.44-55 (1988)。
- 2) Kubelka, P. and Munk, F.: *Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche*, Zeitschr. F. techn. Physik, Nr. iia, pp.593-601 (1931)。
- 3) 久保司朗：逆問題—計算力学と CAE シリーズ 10—、培風館 (1992)。
- 4) 武者利光、岡本良夫：逆問題とその解き方、オーム社 (1992)。
- 5) 日本機械学会編：逆問題のコンピュータアナリシス、コロナ社 (1991)。
- 6) 日本規格協会：JIS ハンドブック色彩 (1990)。
- 7) 奥野忠一、久米 均、芳賀敏郎、吉澤 正：多変量解析法、日科技連 (1986)。
- 8) 応用物理学会、工学懇談会編：色の性質と技術、朝倉書店 (1993)。
- 9) 杉山久仁彦：デスクトップデザインにおける色管理の現状、カラーフォーラム JAPAN '94 論文集、光学四学会幹事会、pp.71-74 (1994)。

- 10) Takagi, A., et al.: Accurate Rendering Technique Based on Colorimetric Conception, *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH '90)*, Vol.24, No.24, pp.263-272 (1990)。
- 11) 高木 淳：特開平 7-50760 「色再現方法」 (1995)。
- 12) Takaghi, A., et al.: A Color Printing System Enabling Reproduction of the Desired Colour: Widened Colour Gamut Realized by a Multiple Ink Method with the Aid of an Inverse Problem Solution, *Computer Graphics - Development In Virtual Environment*, Academic Press, pp.131-157 (1995)。
- 13) 高岡 仁、湊 幸衛：熱転写型カラーハードコピーの色について、第 20 回日本色彩学会全国大会 (1989)。
- 14) Takaoka, H., et al.: New Input Modulation Method for Generating Expected Colors on a CRT Monitor, *SID '91*, pp.57-60 (1991)。
- 15) 田宗道弘：Neugebauer 方程式を用いた色再現理論、第 9 回色彩工学コンファレンス論文集、光学 4 学会、pp.47-50 (1992)。
- 16) 田中 博、岡部政之、鈴木 貴：逆問題、岩波講座応用数学 3、岩波書店 (1993)。
- 17) 山本昌宏、友枝謙二、磯 祐介：第 2 回国際研究集会数理工学における逆問題 (IPES-94) 開催趣旨、1994 年 7 月 27 日～30 日、大阪工業大学記念館 (1994)。

## 付 録

### A.1 $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ の求め方

$L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  は三刺激値  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  より、次式で求められる。

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (Y/Y_n > 0.008856)$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \\ (X/X_n > 0.008856)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \\ (Z/Z_n > 0.008856)$$

ただし、 $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$  は特定の白色面 (完全拡散反射面) の三刺激値である (文献 6), p.27 参照)。

### A.2 計算誤差

$$d_i = \min_l |y - y_l^o|$$

は誤差であるが、この誤差がユーザが設定した許容値を超える場合には、式 (4) で示した離散化の間隔をさらに細かくすることが必要になる。今回は式 (4) の間隔で十分であった。



### A.3 $xy$ 色度座標

色度座標  $(x, y)$  は三刺激値  $X, Y, Z$  に対し,

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

によって求めたもので, 3次元の座標系  $(X, Y, Z)$  を簡易的に2次元の座標系  $(x, y)$  に射影して表したものである. 色度座標  $(x, y)$  を平面上に表した図を色度図という (文献 6), p.21 参照).

(平成7年8月11日受付)

(平成7年12月8日採録)



高木 淳 (正会員)

1959年生. 1983年三重大学工学部電気工学科卒業. 1985年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修了. 1985年トヨタ自動車(株)入社, 同社デザイン部にてカラーCADシステムの研究開発に従事. 第1システム部, EC推進室にてCAD関連業務に従事. 1991年米国カリフォルニア工科大学大学院留学. 1995年東京大学工学部精密機械工学科研究員として現在に至る. プロダクトモデルの研究開発に従事. IEEE会員. 専門は色彩科学を積極的に利用した正確なコンピュータ・グラフィクスのレンダリング技術. その他, 色再現, 逆問題に興味を持つ. 共著「設計とCAD」(朝倉書店)