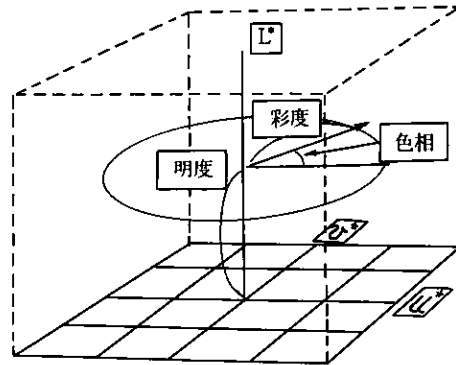


デジタルカラー画像の色再現

Color Reproduction of Digital Color Images

洪 博哲
技術研究所 2部



Abstract:

The accurate handling of the color characteristics of a digital color image presents several problems. One is an accurate modeling of the correspondence between color values (CIELUV or lightness, hue, and saturation) and digital values (BGR or YMC). Another is accurate calculation of the digital value of output from input, allowing the two colors to be equivalent. In this report, we present some solutions to these problems.

For color/digital value modeling, we adopted a 3-dimensional spline function in making calculations. Consequently, the entire gamut is accurately predicted on the basis of measured $5 \times 5 \times 5$ (= 125) YMC-varied color patches and their corresponding signal values. Display of 3-dimensional color ranges was simplified by juxtaposing 2-dimensional projections of the each of three axes.

For accurate output calculation and thus practical color correction, we have developed a simplified circuit using several LUTs and a multiplier/accumulator for processing 8-bit (deep) color data. This circuit also employs 3-dimensional interpolation instead of conventional matrix masking.

As a result, it is now possible to manipulate the color of digital images easily and precisely. These methods have been applied to the Konica Video Printer VP-1000mkII and other printers.

Hung, Po-Chieh
Electronic Imaging Laboratories
Research & Development Center

近年、デジタルカラー画像の研究が盛んであるが、その画質を決める要素のひとつである色再現・補正方法については、デジタルデータを扱っているにもかかわらず、厳密な検討がなされていなかった。

例えば、色再現問題（ある画像データを与えたときにどの明度・色相・彩度になるか、またはその逆を求める問題）に対しては、出力媒体毎に分光反射率や、面積率を用いた手法が提案されてきた。また、色補正問題（与えられた画像データをいかなる計算式で演算し、希望する明度・色相・彩度にするか、また、それをどのようにハードウェア化するかという問題）に対しては、線形や非線形のマトリクスを用いて計算する手法が提案されてきた。

しかしながら、前者においては、各出力媒体についてどちらかと言えばミクロ的な視点から検討されており、それぞれの媒体について別のモデル式をたてる必要があり、さらに、精度の問題からさまざまな補正式を付け加えているという状況であった。また、後者においては、演算の手間の問題からあまり高次の項が使えず、たとえ使用したとしても全ての色に対して精度良く補正できないという欠点があった。

この報告では、これらの問題点を解決する方法として3次（または、4次）の補間を用いた手法を提案する。これによって、デジタルカラー画像のハードコピーの出力媒体にかかわらず統一的な手法で色再現を高精度で計算することができる。また、この計算過程で色の再現範囲（いわゆる色立体）を正確に求めることができ、従来、あいまいであった再現可能・不可能な色を定量的に示すことができる。さらに、補間の手法による、LUT（ルック・アップ・テーブル＝変換表）と乗算累積器を用いたシンプルな色補正回路を示す。

これらの手法により、従来手法による色再現・補正に比べ、精度で約一桁の向上を見ることができた。

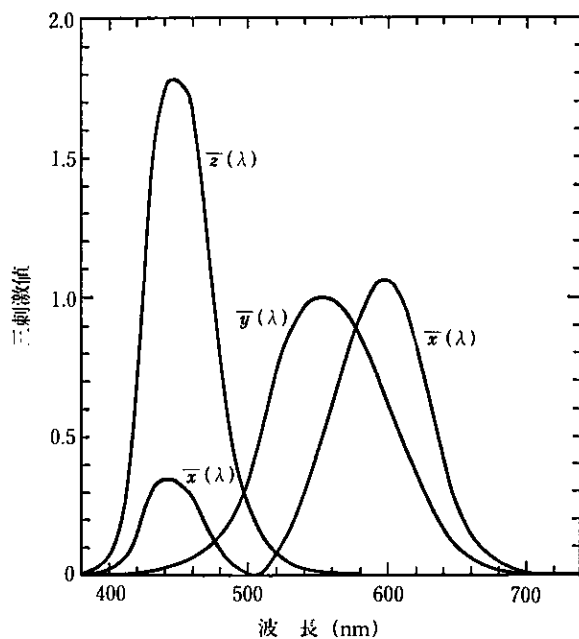


図1 等色関数
Fig.1 Color matching functions

でくる光さえ同じであれば、2つは区別がつかない。

しかし、人間の目は、入力された音声の周波数を全て解析する耳とは違い、わずか3つの、それもブロードなセンサーにより構成されていて光の細かい周波数強度の違いは認識できない。そのセンサーは、図1に示す感度分布（等色関数と言う）であることが多数の被験者（色盲、色弱の人は除いている）のデータから推定された。すなわち、これらのセンサーに対する刺激量が等量であれば同じ色とする、というのが測色学の考え方である。基本的にはこの3つの刺激値（三刺激値と言ひ、XYZの記号で表す）が全く同じであればよいのであるが、人間には明るさに対する順応性があり、また、周囲の環境に対する順応性（蛍光灯の下でも、自熱電球の下でも同じように見える現象）があるため、単に三刺激値で考えるより、より人間の感覚に近づけるべく変換し、均等色空間というものに座標変換して考えるほうが良い。この均等色空間としてはさまざまなものが提案されているが本報告ではLuv空間を採用した。三刺激値からの変換式は次の通りであるが、式の構造自身にはあまり意味はなく、人間の感覚に近づけようとしたらたまたまこのようになってしまった、と解釈すれば良い。

2

同じ色に見るための条件

本題に入る前にこの報告のベースとなっている測色学の理論について簡単に触れたい。

まず、次の問題を考える。

2つの物体（光）が人間の目に同じ色に見えるための条件はなにか。

この答えとして、少なくとも同じ種類の光、であれば良いだろうと想像がつく。すなわち同じ分光分布・強度を持っていれば、たとえ相手が実物であろうが、紙の上の色素の吸収であろうが、ともかく人間の目に飛び込ん

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \quad \dots\dots \text{明度}$$

$$u^* = 13L^* (u' - u_0)$$

$$v^* = 13L^* (v' - v_0)$$

ここで、

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

また、

$$C = (u^{*2} + v^{*2})^{1/2} \quad \dots\dots \text{彩度}$$

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{v^*}{u^*} \right) \quad \dots\dots \text{色相}$$

$$\Delta E = ((L_1 - L_2)^2 + (u_1 + u_2)^2 + (v_1 + v_2)^2)^{1/2} \quad \dots\dots \text{色差}$$

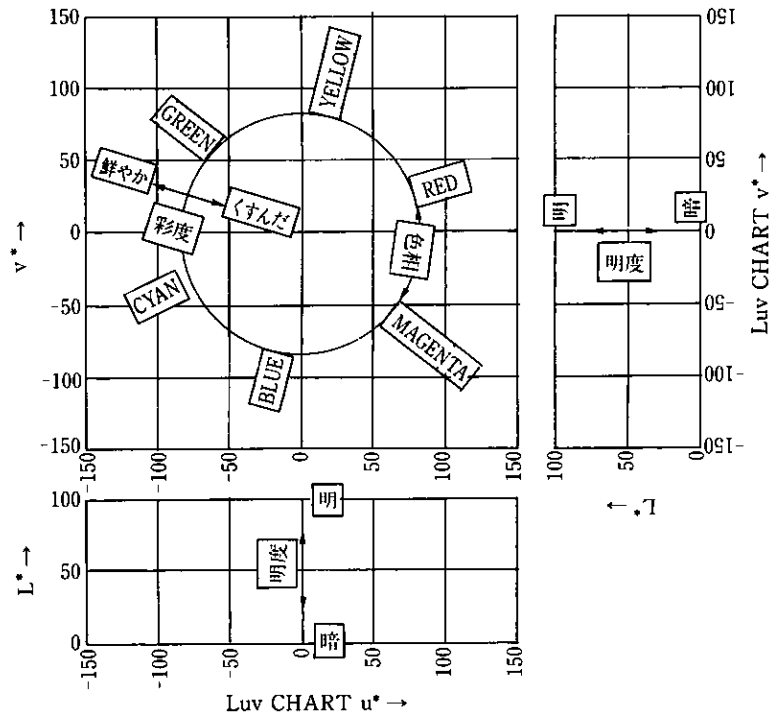


図2 均等色空間の座標
Fig.2 Axes of a uniform color space

注) ・この後に示す図では、円筒座標であるLCHと直交座標であるLuvのどちらかを用いている。

・色差は、0.5程度が、2色を厳密に比較したときの区別され得る限界と言われる。

この均等色空間は、明度（目に見えている最も明るい白色が100で、暗黒が0）、彩度（色の鮮やかさを示す）、色相（赤、青、緑といった色の種類を示す）の3つの座標から成り立っており、これらの座標が同じに計算されれば同じ色である、と考える。この考え方はこれ以降の解析の基本となるものである（図2参照）

この空間上に色の再現範囲（色立体）が計算される訳であるが、従来のxy色度図上に示されるものと違い、感覚にかなり近いものとなる。蛇足であるが、カラー印画紙の色素やTVの発光する蛍光体は、等色関数、すなわち目の3つのセンサーの感度分布の1つ1つになるべく支配的な、換言すれば、残り2つの分光感度に対して吸収や強度がなるべく低い3種類の色素や蛍光体を選ばれるが、現実には理想的な物がなく、どれだけ理想に近いかで色の再現範囲の広さが決まる。理想的な発光体や吸収体だとしても色の再現範囲は生じ、錐体をひっくり返した形状になる。この理由は、3つの等色関数に対して、それぞれを独立に操作できる分光分布が存在しないためであると数学的には解釈できる。

3

色再現範囲

この均等色空間にさまざまなハードコピー用出力媒体の色再現範囲を実測し三面図にして示したのが図3である。それぞれの特徴は次の通りである。

(a) カラー印画紙

他の媒体と比べ、高い濃度を持つため、明度方向に広い。しかし、明度・彩度とも高い色は存在しない。これは、色素の分光吸収がブロードなためである。

(b) カラー印刷

この図ではスミ版を抜いて示してある。スミ版を加えた場合は矢印で示した点（印刷による最高濃度部分）に向かって収束するかのよう移動する。高い明度・彩度のイエローが存在し、これと組み合わせることができるグリーンやレッドの明度・彩度も高い。

(c) 昇華性感熱転写

印刷と同様にイエローに明度・彩度ともに高い色が存在するが、最高濃度が低いため、明度方向が狭い。

(d) 一体型インスタントフィルム

他の媒体に比べ白地の濃度が高く、彩度の高い色あまり存在しない。しかし、その中でブルーの彩度が高いのが特徴的である。

(e) カラーCRT

上の4例と違い加色法のため、色立体の歪みが少なく彩度・明度ともに高い色の範囲がきわめて広い。特にグリーンの広さは注目に値する。

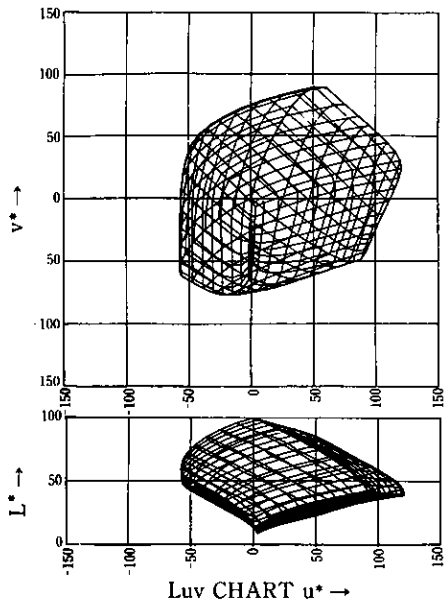


図3 各種出力媒体の色再現範囲
(a)カラー印画紙の例

Fig.3 Color ranges of output media
(a) Photographic paper

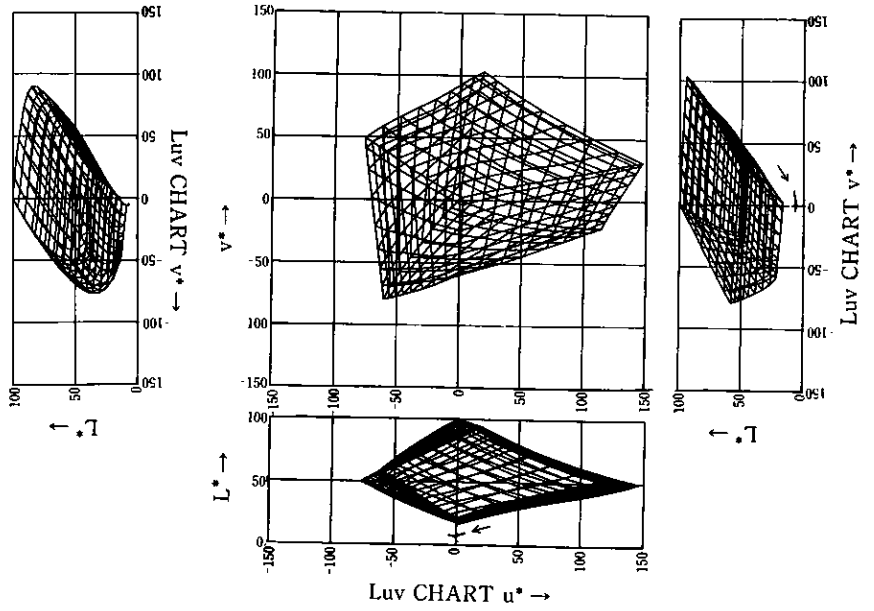


図3 (b)カラー印刷の例
Fig.3 (b)Color printing

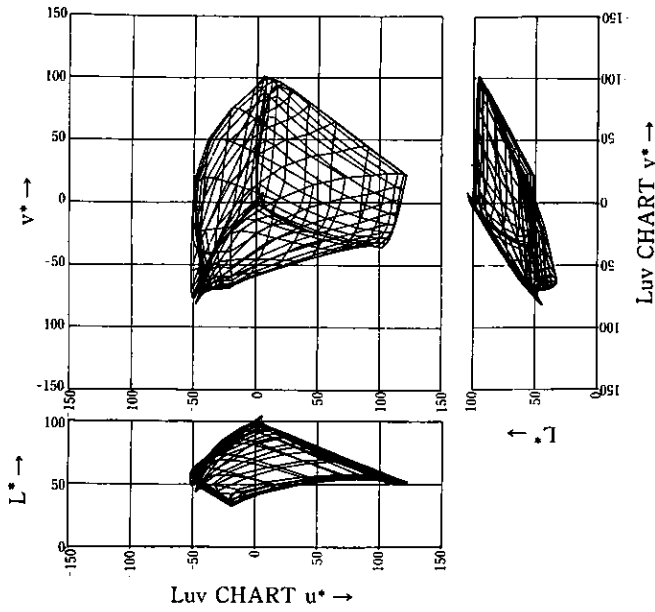


図3 (c)昇華性感熱転写の例
Fig.3 (c)Thermal dye transfer

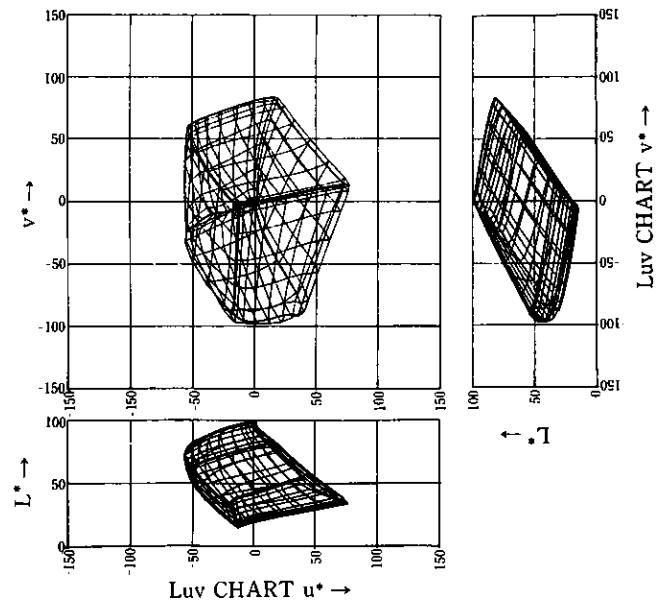


図3 (d)一体型インスタントフィルムの例
Fig.3 (d)Instant film

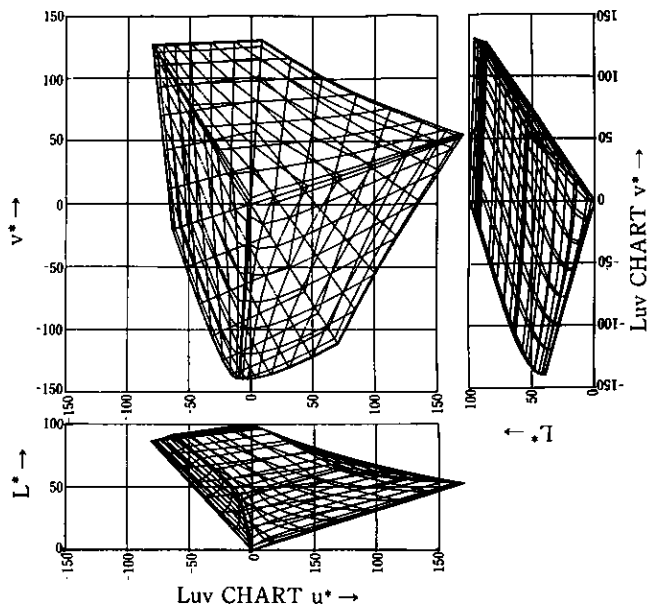


図3 (e)カラーCRTの例
Fig.3 (e) CRT

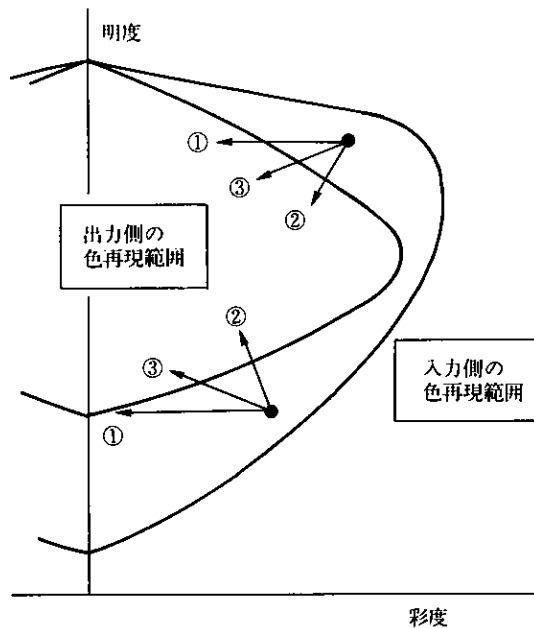


図4 色の圧縮
Fig.4 Compression of color

4

色の圧縮

一般にはこれら色立体のサイズはまちまちで、表現しようとするものと色が出力媒体側がない場合（出力側の方が小さい）は色の圧縮という問題が出てくる。この概念は、「明暗の激しい風景をどのように階調圧縮して白黒印画紙の上に表すか」というような問題の拡張で考えられる。現在までの結論としては、色相は変えず、彩度・明度を高彩度部でより強く圧縮する、言わばS字カーブにするのが妥当と考えられるが、絵がらにより評価が変わってしまう問題点は階調圧縮と同じである。

それを模式的に示したのが図4である。

出力側の色再現範囲外の色を圧縮する条件には上述の外には次の4つが考えられる。

- ① 明度を一定にしておく。
- ② 最も色差の近いところに移す。
- ③ ①と②の中間。
- ④ 基準白色面として適当な濃度を持った灰色を設定しそれで計算した色再現範囲に移す。

特に、④の方法はカラー印画紙のように明度・彩度共に高い色が存在せず、明度の低い色（換言すれば、高濃度の色）が存在する系や、透過物、自己発光体に対して有効である。例として、基準色色面に濃度0.15の灰色を設定したときの印画紙の色再現範囲を図5に示す。色再現範囲が見掛け上、拡大することが分かる。このようにすると、本来ないはずの明度・彩度共に高い色が存在することになり、印刷にある明度・彩度の高いイエローなどが表現できることになる。一見、だまされたように感

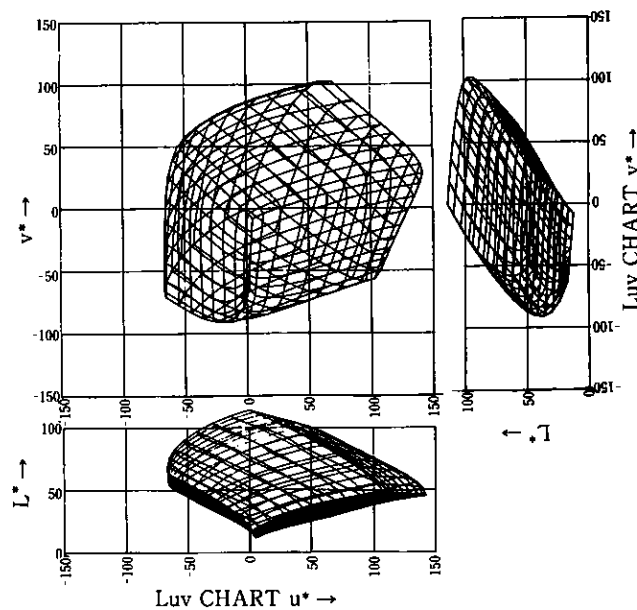


図5 色再現範囲の拡大
Fig.5 Expansion of the color gamut

じるかもしれないが、これは人間の目の感覚の特性として明るい部分に基準をおいて順応することと、暗い部分の濃さの識別能力が落ちるといふ非線形な特性に起因している。もちろんこの方法にも欠点があり、基準白色面を暗くしすぎたり、本来の白地が存在すると不自然になってしまうという問題点がある。ただこの方法は経験的に使われているようで、例えばカラーリバーサルフィル

ムを用いた撮影の際、少し露出をアンダー気味にしたほうが鮮やかに見えるということがあるが、その理由の一つとしてはこのことがあると思われる。

その他の項に関しては傍証はなく、経験的には③の方法が良いと思われる。

5 補間法を用いた色再現

色再現問題は前述のように、出力データ値とそのときの色座標の対応をとることである。従来は出力に用いた色素の分光吸収を測定し、濃度加法則が成立するとの仮定の下に計算したり面積率から計算したりするものがほとんどであるが、現実には濃度加法則は近似則に過ぎず、また、逆に、色座標が指定されたときにそれを示すデータ値を求める手法は確立していなかった。

そこで、ここでは色をいわばマクロ的に見て、出力データ値と色の座標の対応を125点測定し、その隙間は補間演算により求めた。また、逆の演算はその応用で、分割法を用いて演算する手法を確立した。すなわち、出力データ値の空間（以後、YMC空間と呼ぶ）と色の座標値の空間（以後、Luv空間と呼ぶ）の対応を得るために、YMCの信号値をそれぞれ4等分して組み合わせた $5 \times 5 \times 5$ のカラーパッチを実際に出力して測定し、その隙間は滑らかに変化するものとして、周囲からの重み平均により補間する。（前掲の色再現範囲はこの手法による）

この関係を模式的に2次元で表したものが図6である ●印は実際に出力・測定した点で、○印は3次曲線等の滑らかな曲線で補間した点である。（以後、これをサン

ル点と呼ぶ）さらに、この隙間は、周囲の8点（2次元では4点）の重み係数として重み平均により求める。

このようにして対応づけができたので、逆にある指定された色座標を示すYMCの信号値を求めることができる。すなわち、ある色座標が与えられたときに、その色座標が8つのサンプル点で囲まれるどの6面体に入るかを検索し、その6面体（=サンプル点）のデータを元に立体の分割・検索を繰り返すことで、逐次近似を行なう（図6、×印1）。

また、指定された色が系の色再現範囲外にある場合はその点と色再現範囲内にあるL軸上の点とを結ぶ直線を想定し、これが貫く色再現範囲の境界の点を探することができる。すなわち、前と同様にして、圧縮線が貫く境界面にある4つのサンプル点で構成される面を検索し、その4頂点のデータを元に選択された面の分割・検索を繰り返すことで、逐次近似を近似を行なう。これにより、色再現範囲の境界が正確に求めたので、境界に圧縮・対応させるのならばこの色座標を、また、さらに内側に対応させるのならば適当なカーブで圧縮し、その色座標から再び上記の手法で計算して求めることができる（図6、☆印2、△印3、…線4）。ただし、カラーCRTのような加色法の場合はマトリクス演算と前式から求めた方が簡単である。

なお、この計算方法によって、YMCの信号値と、そのとき出力される色座標の誤差は、印画紙の色再現に最も近いとされるモデル式を用いてシミュレーションした結果、サンプル点を、 $5 \times 5 \times 5$ の測定点から $17 \times 17 \times 17$ に増やしたときその誤差は $\Delta E_{max} \sim 0.3$ 程度であった。

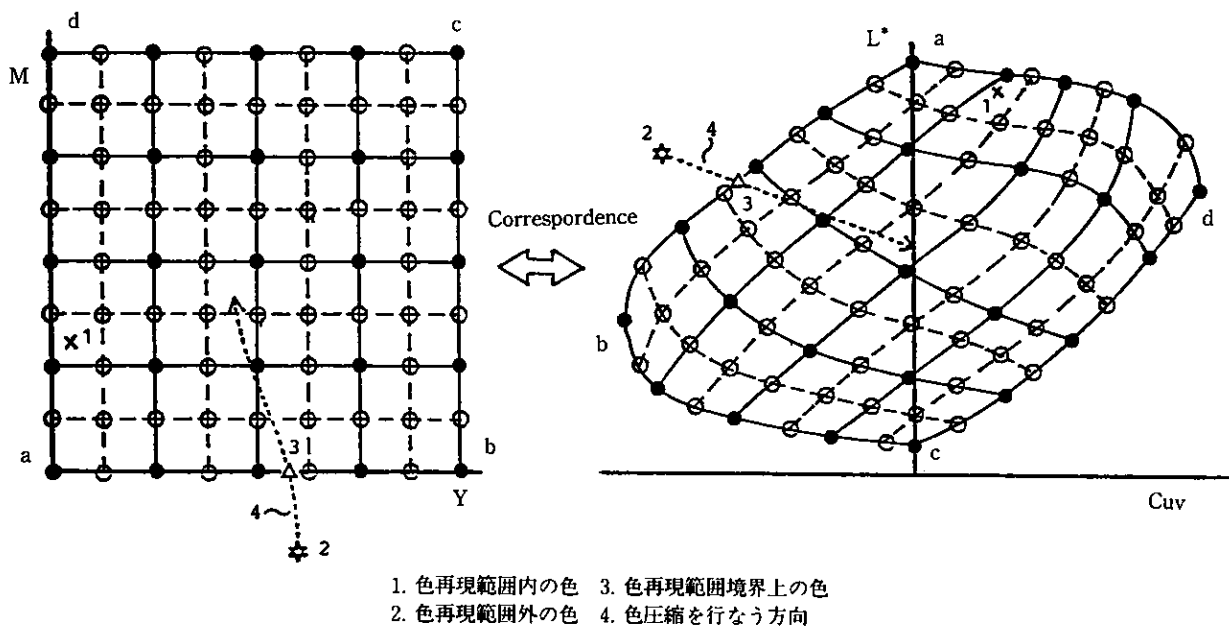


図6 データ値と色座標の対応
Fig.6 Correspondence between digital values and color values

6

補間法を用いた色補正方法

実際の機器で色補正を行うときは、入力側の画像のデータ値を、出力したとき指定した色（色再現範囲内であれば同じ色座標）となるようなデータ値に変換することが必要になる。一般的には、マトリクスを用いてこの変換の関数を近似・演算していたが、入出力とも加色法の場合を除けば線形とはならず、また、非線形項を含んだとしても、理論的には無数の項がないと望んだ関数に一致しない。そのため、演算の手間の問題で高々10項程度に限定されたマトリクス演算では誤差が大きかった。さらに電子素子技術が進歩した現在ではメモリの大規模化が実現し、これを用いて入出力の対応を全てLUT化してしまう手法もあるが、一般によく使われる1色当たり8ビットを持つ系では50Mバイトもの巨大なメモリを必要とするため、事実上、実現不可能であった。

そこで、色補正演算にも補間法を用いて、入力と出力の対応のある間隔で求めてメモリに記憶させておき、その隙間は重み係数のLUTと乗算累積器を用いて、補間演算することとした。

具体化した回路例を図7に示した。この回路例では、入力に応じた出力データを $32 \times 32 \times 32 \times 3$ バイト分、予め計算してLUTに持たせ、中間値は、1画素1色につきLUTのデータを8回読みだして重み平均を取る。

なお、LUTに最適な値が入っていた場合、量子化誤差を考慮した色補正演算の誤差は、モデルとした系では $\Delta E_{max} \sim 0.5$ 程度であった。

7

むすび

デジタルカラー画像の色再現について述べた。実測による各出力媒体の色立体を解析し、見掛け上色再現範囲を広げることができることを示した。また、汎用かつ高精度な色再現特性測定・計算方法を提案し、同時に精度・自由度共に高い色補正方法を提案した。

以上の解析及び手法により（少なくとも測色学的には）かなり厳密に色を扱えるようになった。これらの手法は、既に当社のビデオ・プリンタに適用されており、CRT→印画紙、印刷→印画紙の系で用いられている。その他にも、デジタル・カラー・コピーやCRT上でのカラーブールプなど、様々な色再現系に用いることができよう。

今回の研究において、さまざまな知見や応用が得られたが限られた紙面のためその全てを記述できなかったことが残念である。最後に、この研究に当たり、有形・無形の援助を与えてくれた各研究室の方々に深く感謝致します。

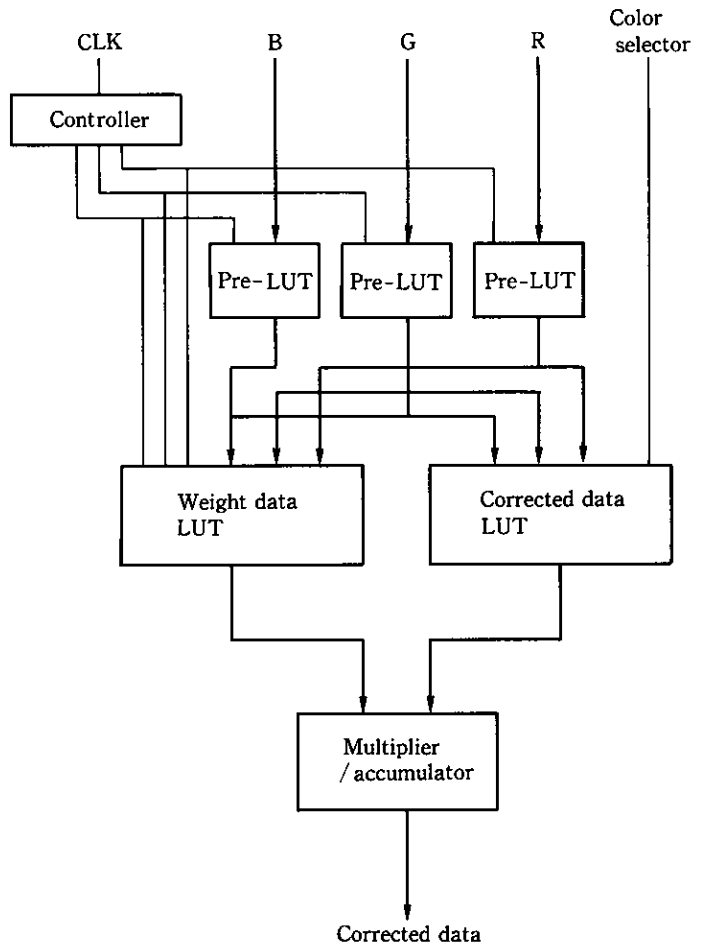


図7 補間法による色補正回路の例
Fig.7 A color correction circuit by interpolation

参考文献

- (1)「色再現における画像処理と実例」：小寺 宏暉、日本印刷学会論文集、23-1、P.111、(1986)
- (2)「色彩工学の基礎」、池田 光男、浅倉書店
- (3)「デジタルプリンタ用色補正方法」、洪 博哲、昭和62年年次大会要旨、日本写真学会、(1987)