

カラーマネージメントシステムの開発

Development of Konica Color Management System

洪 博 哲*

Hung, Po-Chieh

We have developed Konica Color Management System, which accurately calculates a color Look-Up-Table (LUT) to convert target device signals to destination device signals. The system uses multi-dimensional LUTs for device models as profile. A color appearance model can be chosen from the latest Hunt and the Nayatani models in addition to the CIELAB and the CIELUV color spaces. A new high-speed algorithm for the LUT calculation is introduced. The calculation time has been reduced to less than 10 seconds for a typical 3-input-3-output conversion using the algorithm. It may allow a user to work on deciding parameters for a gamut mapping in semi-interactive.

1 はじめに

コンピュータを媒介にしてカラー電子画像が一般に利用されるようになり、異なるメディア上で視覚的に同様な色の画像とする要求が高まっている。このための色調整ソフトウェアは、カラーマネージメントシステム(CMS)とよばれ、注目を浴びている。これに対し、われわれはCMSの名称が一般化する以前から同じ目的でソフトウェアシステムを開発してきた¹⁾。

CMSの課題には、画質に関する異種機器間の色再現の問題(色予測、色圧縮、色順応、色変換)に加え、操作性や計算速度の問題がある。我々は、最新の色彩理論に従い、次に示す点を実現するようにCMSを構成した。

- 1) 高精度で汎用性の高いシステムを構築し、画像間の色再現のみでなく、視覚実験のための機器調整ツールとしても利用できること
- 2) 高速にLUTが計算でき、準インターフェイブに使用できること
- 3) 色域マッピングの自由度を高めること
- 4) 最新の色順応モデルの成果を組み込むこと

本報告では今回、これらの点を中心に改良したCMSの特徴について報告する。

2 全体の構成

本CMSは、Fig.1に示すように、目標機器のプロファイル、再現機器のプロファイルを入力し、パラメータを指定するプロシージャファイル(PF)に従って処理する。これにより、目標機器の信号値を再現機器の信号値に変換する多次元LUT(色変換LUT)が算出される。この色変換LUTは、実際の画像変換で利用される色変換エンジンに合うようにデータ形式が変換される。

目標・再現機器のプロファイルは、信号値と三刺激値

の関係をLUT形式でもつ。このプロファイルは、PFに指定された基準白色、色空間の種類等に従い、まず均等色空間座標に変換される。次に、均等色空間において、目標機器・再現機器の色域形状に応じて色域を変形させる。最後に、双方の対応する信号値を求め、色変換LUTを計算する。

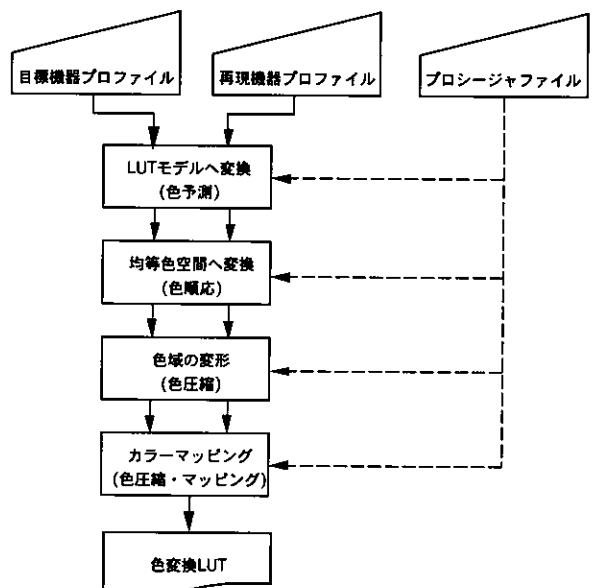


Fig.1 本 CMS の計算の流れ

3 各要素技術の特徴

CMSには主として4つの問題点があり、これらに対する本CMSの特徴を述べる。

3.1 色予測と色調整

信号値と三刺激値を関係づけることは、カラーマネージメントシステムでもっとも重要で、高い精度が要求される。開発したカラーマネージメントシステムでは、全

* 技術研究所

て色予測は、多次元の LUT を用いて信号値と測色値の関係をモデリングする (LUT モデル)²⁾。この LUT モデルを作るために、信号値空間に格子状に配置されたカラー パッチを測定する。必要な測定点数は 3 色系で 125 点、4 色系で 312 点を標準としている。これをラグランジュ補間で 33³ ないしは 17⁴ の格子点に補間し、これを LUT モデルとしてその後の計算に用いる。この補間方法の非線形性への追従性の誤差は、解析モデルを用いたシミュレーションにより、平均色差 1~2 度程度に収まると推定される。また、オプションとして、解析式から LUT モデルを作成する事もできる。

LUT モデルの場合、信号値から色彩値の計算は一般に容易だが、この逆の色彩値から信号値を求める方法は難しく、従来収束演算を用いていた。我々は、まず逆演算を行うために、LUT モデルの格子を利用して色域を多数の三角錐に分割し、この三角錐を検索することで収束演算を避け、計算量を収束演算時に約 1/6 に減少させた。さらに検索の方法として、目標色を順序よく設定し、三角錐の検索を前回発見した場所から行うことにより、検索時間を単純全検索時の約 1/10 と大幅に短縮することができた。

入力スキャナーの色予測には、測色済みのプリンタの色予測に使用したカラーパッチをそのまま流用する。一般には、入力スキャナはルータ条件を満たしていないので、原稿のメディア毎に別の色予測が必要である。この色予測には、一般的な 1~3 次の多項式近似と、出力系で用いたラグランジュ補間にによる推定を拡張した手法⁵⁾が利用できる。前者は、ルータ条件に近い系の場合に有効で、後者は、ルータ条件から離れている場合の非線形性への追従に優れているが、信号ノイズにより影響されやすい。この計算により、信号値から色彩値に変換する LUT モデルを作成し、出力系と同様に扱われる。

4 色プリンタの色予測には、3 色プリンタ同様に、マトリクス状に配置されたカラーパッチを測色して用いる。この種のプリンタの場合、ある再現したい色を示す信号値の組み合わせは無数に存在する。このため、色調整方法として、従来の手法では不可能であった全色域を利用できる独自の手法を開発した^{4~6)}。従来の UCA, UCR, GCR 等の手法では、測色的に不正確なばかりでなく、YMCK の組み合わせでできる全ての色域を利用できなかつた。我々は、全ての色域を利用する場合で、ブラックの使用が最大 (Maximum Black) と最小 (Minimum Black) になる条件を見いだし、この条件を境界とし、さらに各原色が滑らかに変化し、プリンタの特性変動による擬似輪郭の生じにくい Smoothest Black を開発した。

これらの手法を用いた時の CIELUV 色空間でのブラック量変化の様子を Fig. 2 に示した。Maximum Black では、 L^* 軸付近で尾根状のピークを持ち、また、Minimum Black では、色域境界付近でブラック量が急

激に増加する。Smoothest Black では、これらの中間的ななだらかな変化を見せている。ブラックが急激に変化する部分では、プリンタ特性が変動すると擬似輪郭を発生し画質劣化につながるが、今回開発した Smoothest Black では、これが最小限に押さえられた。これらは、ユーザーの指定により選択できる。

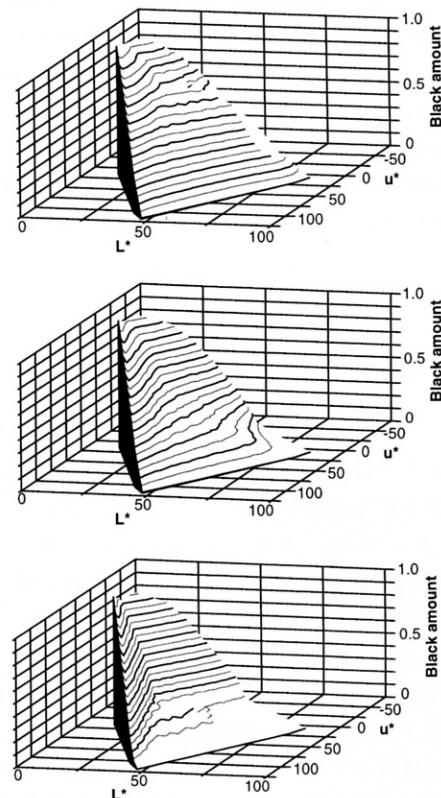


Fig. 2 Maximum Black (上)、Smoothest Black (中)、Minimum Black (下) の各ブラック量の変化

3.2 色順応モデル

CMS で必要とする色順応モデルの用件には 2 つある。ひとつは色順応を近似して、いかなる光源下でも人間の感覚量である明度・彩度・色相に変換すること、もうひとつは、変換された後の色空間の色相線が線形であることである。一般にこのような色空間は、上述に加え、計算が容易であること、色空間内の幾何学的距離が色差に相当することを満たそうとしているが、コンピュータの進んだ現代では決して必要条件ではなく、また、CMS 自身は色差評価を行わないので、等色差である必要もない。むしろ前者の 2 条件の性能が良好な色空間が望ましい。

これらに目的に利用できる計算式として、CIELAB、CIELUV、Hunt モデル⁷⁾、Nayatani モデル⁸⁾を選択できる。ただし CIELAB、CIELUV は色順応が適切に考慮されていないため、別途 von Kries タイプの色順応を組み合わせることも可能とした。これらの選択はユーザーに依存されているが、標準空間として利用されている CIELAB は色相線が曲がっており、CIELUV もその性能

が十分でないため、これらを使用すると、特に空の青色が紫に変わることなど、画質に悪影響を及ぼす場合がある⁹⁾。色空間に関する研究は今後も発展に応じ、さらに新たなモデルを選択し組み込むことができるよう配慮してある。

3.3 色圧縮

色圧縮方法には無数のバリエーションが考えられ、対象画像ごとに最適解は変わる¹⁰⁾。ここでは、さまざまな要求に合うように、彩度を変化させる方法を主として、さまざまな色域マッピングができるようにした。このために、あらかじめ色域変更のパラメータにより色域形状を変化させておき、その後、無彩色軸に向かう直線と、前述の色域を構成する三角錐との相互関係を算出し、対応色を算出し、マッピングする。

色圧縮の基本方針は、なるべく色相を保ち、また、明度の変化を押さえることと言わされている¹¹⁾。さらにこれに加え、全体の階調性が保たれるように、複数の色が同一色に置換される「クリッピング」を発生させないことも重要である。色域圧縮の概念は古く、これら基本的なアイデアは、1964年の特許に見ることができる¹²⁾。しかし、色域形状は複雑な形をしており、この基本方針を保つことは容易ではない。例えば、CRTを写真印画紙に再現する場合にはイエロー付近の彩度が大きく変わり、単純にCRTのイエローの明度を保ち圧縮すると、彩度が大きく低下する問題がある。これを避けるため、彩度を保つように色圧縮することも提案されているが、階調の連続性がなくなり、また、暗部が明るくなるなどの問題点が指摘されている¹³⁾。

そこで本CMSでは、Fig.3(a)に示すように目標・再現機器のもっとも高い彩度点（通常は、原色が相当する）を彩度を変えず連続的に色相を変化させ、それぞれの原色を対応づけるマッピングも可能にした。この対応をユーザーは百分率で指定する。すなわち、100%では原色同士が完全に一致し、0%では視覚的色相が一致する。同じくFig.3(b)に示されるように明度方向にも目標・再現機器の原色点にずれがあるので、これも可変できるようにした。

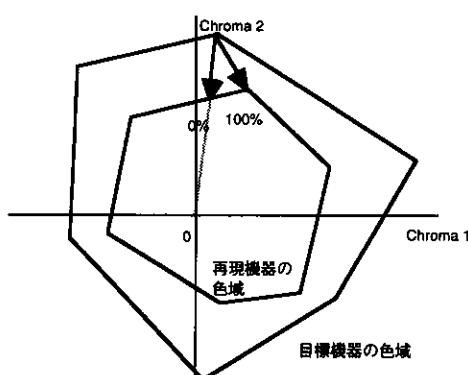


Fig. 3 (a) 色相変化による原色のマッピング

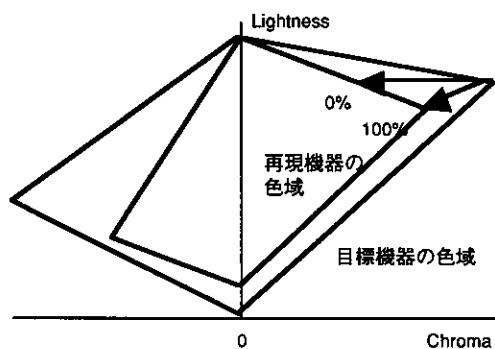


Fig. 3 (b) 明度変化による原色のマッピング

このマッピング法により、極端な彩度低下はなくなり、階調性も自然に保たれるようになった。ただし、色相や明度が変化してしまうため、この手法の使用はユーザーの指定にまかされている。

また、色再現の用途によっては、ユーザーが原画像よりも「好ましく」見える色変換を必要とする場合もある。そこで明度軸の対応をガンマカーブで変化させること、また、彩度の対応を色域の形状とは無関係に拡大、縮小させることを可能とした。

3.4 色変換

色変換には、Fig.4に示すように1ステップで行う方法（目標機器→再現機器）と、2ステップで行う方法（目標機器→機器独立色空間→再現機器）がある。一般に目標機器の特性がN個、再現機器の特性がM個存在する場合、前者では $N \times M$ 個の色変換LUTを算出する必要があるのに対し、後者では、 $N+M$ 個の色変換LUTで済む。

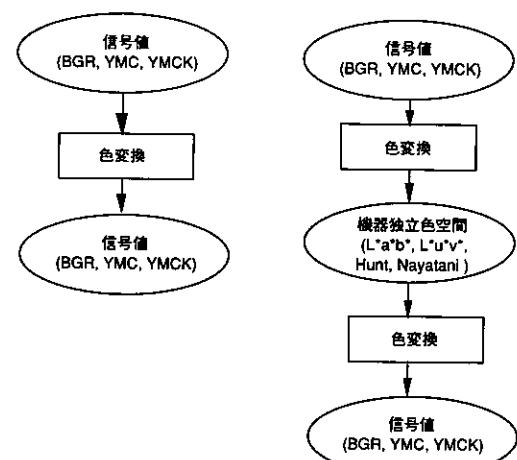


Fig. 4 1ステップ変換(左)と2ステップ変換(右)

目標・再現機器の種類が増えるに従い、1ステップで行う方法が必要とするLUTの数は急激に増えるが、色圧縮のパラメータ等もあらかじめ色変換LUTに含ませるた

め、高精度である。2ステップの場合、必要とするLUTの数は減り、色圧縮方法を画像変換時に指定できるなどの特長があるが、機器独立色空間から再現機器信号値への変換時に演算誤差が生じやすい。本CMSでは、精度を重視しているため、基本的には1ステップとし、オプションで2ステップの変換を可能としている。

この実変換には、 33^3 ないしは 17^4 のLUTに補間演算を組み合わせて行う。この変換エンジンはソフトウェアとしてはワークステーション、PC、Photoshop(Adobe社製)のプラグインモジュールなどに、また専用ハードウェアに移植されている。

3.5 計算速度

計算の格子数に応じて計算速度が変化する。高速化のため、3.1節の逆演算に用いる格子点数を減らして演算するモードを用意した。

本CMSの計算速度を、SUN社 Sparc Station 20 を用い、標準的なプロファイルの組み合わせを用いたときの実測値をTable 1に示した。もっとも一般的な3入力3出力では低精度の場合、約9秒で計算される。若干待つものの、一義的な決定の難しい色域圧縮のパラメータ変更による効果を確認しながら決定することも可能である。現在ではより高速なコンピュータが使用可能となりつつあり、計算時間の問題は意識されなくなると思われる。

また、実際の画像の色変換時間は、同コンピュータを用いたソフトウェアでは、 2048×3072 画素の画像に対し、各色数の組み合わせについて30~55秒となった。

Table 1 標準的な色変換 LUT の計算時間(単位:秒)

計算格子数	入出力の色数			
	3→3	3→4	4→3	4→4
9(低精度)	9	14	26	34
17(中精度)	17	33	143	270
33(高精度)	89	99	178	-

4 おわりに

最新の色彩理論に従い設計したCMSを開発した。高精度な変換のため、1ステップによる色変換を基準とし、 33^3 ないしは 17^4 の格子点を持つ色変換LUTを作成する。高速なLUTの計算のため、検索方法を改良し、低精度の場合、9秒で計算できるようになった。また、色域マッピングの自由度を高めるため、色域変形の自由度を高めた。また最新の視覚実験の成果として、Huntや、Nayataniモデルを組み込み、利用可能にした。

CMSの開発は各社で行われているが、現実には機器の安定性の問題がもっとも問題となっている。すなわち、

色予測時に使用した特性と、実際の使用時の特性が変化する。安定性は、個々の機器毎に解決されなくてはならない。しかし、機器の混色特性はほぼ固定しており、それに比べ階調特性が大きく変わることが多いため、機器の安定性を各色毎の階調テーブルで吸収させる方法が妥当であろう。

色順応、色圧縮については、元々主観的に評価される部分であり、人間の許容範囲(または、判断基準の変化量)は広いため、現状提案されている色順応モデルの評価は難しい。色圧縮については、最適化するためには画像種類に応じて圧縮方法を切り替えるなどのことが必要になる。

現在各社とも独自のCMSを作っているが、このような状態はユーザーにとって望ましくない。このため、アメリカを中心にプロファイルに関して標準化を進める動きがある。現状、本CMSでは独自のプロファイルを用いているが、他のプロファイルとの相互変換は難しくない。これについては、標準化の流れに合わせ、適宜対応する予定である。

●参考文献

- 1) 洪博哲、ワークショップ・エレクトロニックフォトグラフィー'91論文集 T-1、33(1991).
- 2) Po-Chieh Hung, Journal of Electronic Imaging, 2-1, 53 (1993).
- 3) Po-Chieh Hung, Colorimetric calibration for scanners and media, SPIE Vol. 144164 (1991).
- 4) P. Hung, SPIE Proceedings Vol. 2171, Color Hard Copy and Graphic Arts III, 275 (1994).
- 5) 洪博哲、日本写真学会誌、56-2、112 (1993).
- 6) 洪博哲、YMCKプリントの測色的色再現と色域、ディスプレイアンドイメージング、2、9 (1993).
- 7) R. W. G. Hunt, Color Research and Application, 16-3、146 (1991).
- 8) TC 1-06, CIE Research Note、CIE journal, 5-1、16(1986).
- 9) 洪博哲、第8回色彩工学カンファレンス予稿集、10-1、159 (1991).
- 10) Toru Hoshino and Roy S. Berns, SPIE Vol. 1909, 152 (1993).
- 11) R. W. G. Hunt: The Reproduction of Colour, Fourth Edition, Second Impression 43 (1988).
- 12) U. S. Patent 3,144,510 (1964).
- 13) M. C. Stone, W. B. Cowan and J. C. Beatty, ACM Transaction on Graphics, 7-4, 249 (1988).