

解説

ハードコピーの色再現—最近の話題—

三宅 洋一

千葉大学工学部情報工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(1992年8月13日受理)

Advances in Color Reproduction of Hardcopy

Yoichi MIYAKE

Department of Information and Computer Sciences, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263

1. はじめに

感熱プリンター、レーザープリンター、インクジェットプリンターなど新しいカラーハードコピーシステムが開発されパーソナルコンピュータの出力装置として広く用いられるようになった。一方、長い伝統を持つ写真、印刷、テレビさらには電子コピーもいっそうの技術開発が進みいわゆるマルチメディア時代といわれる社会が形成されつつある。このような画像メディアの多様化に伴ってメディア間の情報変換やこれまで個々のメディアで独立に行われてきた画質評価、色再現の問題が重要な研究テーマとなってきた。

画像システムでは高い画質を持つ画像を安価で、高速にまた簡便に出力できることが要請されている。それには画像の品質を評価しそれをシステム開発にフィードバックすることが必要である。

画像は最終的には視覚を通して観測される。したがって、物理的な評価が高くて必ずしも高い画質を持つ画像とは限らない。画像評価の難しさはこの点にある。特に、主観的な評価では例えば、[あばたもえくぼ]のような情緒、感情など人間の高度な情報処理が大きく関与する。すなわち、画質評価の研究はこのような人間の高度な情報処理機能と対応の良い物理的な尺度を見いだすことと考えるもよい。

画像の評価を情緒、感情、理解、認識など高次のレベルではなく、やや低次のレベルで考えるとき、画質は階調再現、鮮鋭度、粒状(ノイズ)、色再現、幾何学的歪の問題としてとらえることができる。これらの画質要因を

評価する¹⁾ため多くのパラメーターが提案され使用されている。例えば、階調では γ 特性、ダイナミックレンジが、鮮鋭度ではMTF、解像力、粒状ではWienerスペクトル、rms粒状度、色再現では色度値が画質評価に用いられる代表的なパラメーターである。本稿ではこれらの中で著者の研究室で最近行っているハードコピーの色再現とその評価について紹介する。

2. ハードコピーにおける色再現

ハードコピーはシアン(C)、マゼンタ(M)、イエロー(Y)色のインク、染料、色素等の混合によって色画像が形成される。写真はC、M、Y色素を多層にすることができるとほぼ完全に近い減法混色により画像が形成される。これに対して、網点やドットの面積変調、密度変調で階調を表す印刷、プリンターではドットの重なりは確率的であるため減法混色と平均的な加法混色で色再現を論じることが必要である。

良く知られるように Hunt は色再現を(1)分光的、(2)測色的、(3)正確な、(4)等価な、(5)対応的、(6)好ましい色再現の6種に分類しそれぞれの条件について論じている²⁾。分光的な色再現は被写体と画像の分光反射率を同一にする色再現で3原色理論に基づいたカラー画像ではデュープを除いては実現できない。また正確な色再現、等価な色再現、対応的な色再現は測色的な色再現にいくつかの条件を付加したものであり、基本的には測色的色再現の一部と考えることができる。そこで以下では測色的色再現と好ましい色再現について述べる。

2.1 測色的色再現

被写体と画像における観測光源の分光放射率が等しい条件下でそれぞれの3刺激値 (X_0, Y_0, Z_0) , (X_i, Y_i, Z_i) を等しくする色再現を測色的色再現という。測色的色再現は異なったメディア間の色変換に最も広く用いられている。しかし、実際の色再現では3刺激値を完全に一致させることは困難である。そこで、被写体と画像の対応する色票間の色差を最小とする処理が行われる。すなわち、被写体と画像間でルックアップテーブルを作成して変換する方法、ニューラルネットワークを用いて色変換を学習させる手法、変換マトリクスにより解析的に色変換を行う手法等が提案³⁾されている。

われわれは次式に示されるような非線形変換によりテレビ画像からの新聞印刷⁴⁾ やスチルビデオ画像、CRT画像⁵⁾ の各種ハードコピーへの RGB-CMY の測色的色変換を行っている。

$$H' = M \cdot H \quad (1)$$

$$H' = (C, M, Y)^T \quad (2)$$

$$H = (R, G, B, R^2, G^2, B^2, RG, GB, RB, RGB, 1)^T \quad (3)$$

ここで T は転値、M は 3×11 のマトリクスである。マトリクスの係数はテレビからの新聞印刷では 1000 個の色票を測色し、対応する色票間の色差の和が最小になるように回帰分析から決定した。

R, G, B が各色 8 ビットある場合には再現可能な色は 2^{24} である。したがって、マトリクスの係数を決定する場合にはできるだけ色票の数を増やすことが重要である。しかし、色票数の増加には物理的な限度がある。そこで、色情報を用いて画面の領域分割を行って、領域ごとにマトリクスの係数を求める色変換を行い、それぞれの画像を合成する手法が考えられる。

われわれは、ネガカラーフィルム、テレビ画像の肌色分布を測定し、それらがほぼ確率楕円で近似できる⁶⁾ ことを示した。ここから肌色の抽出、さらに顔領域を抽出してその部分の色を肌色色票から求めたマトリクスを用いて変換する手法を提案し大幅に色再現の改善^{4,5)} を行った。

しかしながら、異なったマトリクスにより得られる画像を合成する際、その境界において偽輪郭を生じることがある。そこで、次式のように重みづけをした変換係数 $w(x, y)$ を導入して偽輪郭の低減を行った。

$$f(x, y) = \sum_i w_i(x, y) \cdot M_i \cdot f(x, y) \quad (4)$$

$$w_i(x, y) = k_i / n^2 \quad (5)$$

ここで、 M_i は変換マトリクスで、 k_i は $n \times n$ の小領域

において領域 i に属する数を表す。例えば、図 1(a) のように R, G, B の 3 個の領域に分割された画像の 3×3 小領域での分布が図 1(b) のような場合には領域の中心 (x, y) 座標での G 画像の重み係数は $3/9$ となる。

2.2 Neugebauer 方程式と色再現

Neugebauer 方程式⁷⁾によると画像の3刺激値は網点 C, M, Y の重なりによって生じる2次色 R, G, B, 3次色 K' (墨) および1次色 C, M, Y, W (記録用紙) 8 個の3刺激値と網点面積率の積の線形和で表される。

一方、C, M, Y に墨 (K) インクを加えた4色の場合には1次色、2次色、3次色、4次色の重なりは図 2 のようになる。なお、ここでは4色の重なりを明確に表すため墨インクの形状を楕円として示した。すなわち、画像の平均的な3刺激値 X, Y, Z は次のように表すことがで

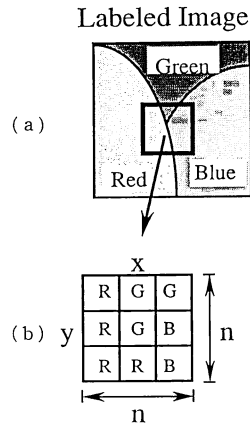


図 1 画像の合成により生じる偽輪郭を低減する処理

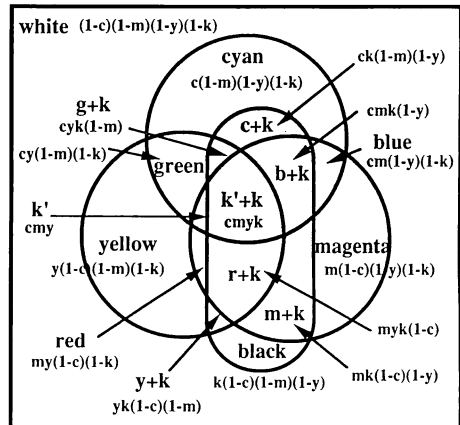


図 2 C, M, Y, K 4 色の網点の重なりにより生じる 1 次、2 次、3 次、4 次色とそれぞれの面積率、K' は C, M, Y の重なりによる 3 次色の墨を示す。

きる。

$$\begin{aligned} X &= \sum_i A_i \cdot X_i \\ Y &= \sum_i A_i \cdot Y_i \\ Z &= \sum_i A_i \cdot Z_i \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $i = w, c, m, y, k, r, g, b, k', k+c, k+m, k+y, k+r, k+g, k+b, k'+k,$

ここで、 A_i は C, M, Y, K 網点の単位面積での面積率を c, m, y, k で表した場合の1次色, 2次色, 3次色, 4次色の面積率で、これらの値は Demichel の関係から図2に示すようになる。

すなわち、(6)式において画像の3刺激値を与え網点面積率を求めれば網点印刷における色再現を解析的に論じることができる。しかし、(6)式は方程式の数よりも未知数が多い問題である。したがって、解を求めるためにはある種の仮定を置くことが必要である。そこで、ここでは墨版を除いた3色の場合について感熱プリンターで行った簡単な実験例を示す。

オンデマンド型のプリンターではディザ法によって階調を表すことが行われる。したがって、 $M \times M$ ディザマトリクス内で ON となるドット数が m 個ある場合その理論的な面積率 A は $A = m / (M \times M)$ となる。1次, 2次, 3次色の3刺激値およびディザ法により形成されたマクロ画像の3刺激値を測定し、ここから Neugebauer 方程式の有効性を実験的に確かめることができる。

実際の感熱プリンターのドット形状は図3に示されるようにドットゲインがありまた等方性も成立しない。そこで測色的色再現を実現するためには Neugebauer 方程式から求めた面積率の補正が必要⁸⁾である。

ここでは、補正法の詳細は述べないが、図4に1次色であるマゼンタと2次色であるレッドについて面積率補正の効果を示す。図から補正を行うことによってほぼ実

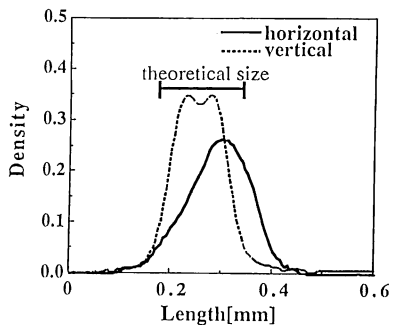


図3 昇華型感熱プリンターの1ドットXおよびY方向の広がり関数

測値に対応する色度が得られることがわかる。なお、ここで Neugebauer 方程式はニュートン法を用いて解いた。

2.3 好ましい色再現に向けて

画像設計においては観測者にとって好ましい画質、特に色再現を実現することが重要である。しかしながら、好ましい色は被写体により異なり、また主要被写体のサイズ、背景色などきわめて多くの要因に依存することから一義的に決定できる問題ではない。好ましい色再現に関するわれわれのアプローチについて説明する。

一般の画像においては肌、青空、芝生、樹木、海などの色再現が重要²⁾である。この中で、顔色は最も身近な色であることからその再現は特に重要視されている。そこで、ポートレート画像から肌色領域を抽出、さらにここから2値画像処理、領域分割の手法を用いて顔パターンを抽出する。われわれは、この領域の色を変化させ被験者実験を通して好みの色を推定することを試み⁸⁾ている。

今、 $L^*a^*b^*$ 色空間におけるメトリックヒュー h_{ab} 、メトリッククロマ C^*_{ab} は次のように定義⁹⁾されている。

$$h_{ab}(i, j) = \tan^{-1} \{a^*(i, j)/b^*(i, j)\} \quad (7)$$

$$C^*_{ab}(i, j) = [\{a^*(i, j)\}^2 + \{b^*(i, j)\}^2]^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$

すなわち、抽出された顔領域の全ピクセル $m \times n$ の色度を Δh_{ab} 、 ΔC^*_{ab} 、 ΔL^* だけ変化させ異なった顔色を持つ画像を作成する。

$$h'_{ab}(i, j) = h_{ab}(i, j) + \Delta h_{ab} \quad (9)$$

$$C'^*_{ab}(i, j) = C^*_{ab}(i, j) + \Delta C^*_{ab} \quad (10)$$

$$L'^*(i, j) = L^*(i, j) + \Delta L^* \quad (11)$$

図5(巻頭口絵参照)に顔領域のライトネスを(a)を基準として $\Delta L^* = \pm 5, \pm 10, \pm 15$ 変化させた画像の例

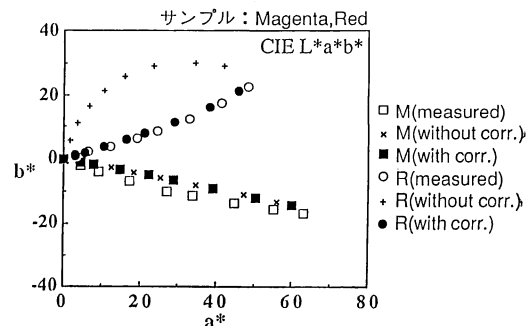


図4 1次色マゼンタ(M)、2次色レッド(R)の色度値(測定値および面積率の補正前後の色度値)

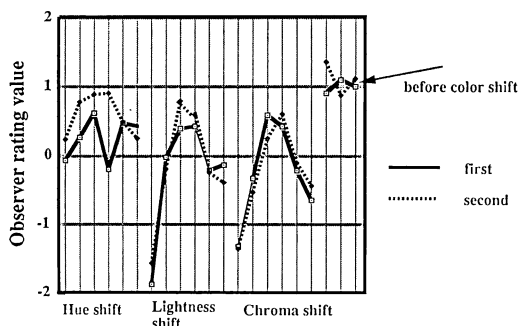


図 6 異なった色再現を持つポートレートの好ましい色再現についての評価

を示す。ヒュー、クロマについても(9)式、(10)式を用いて色変換を行って合計 18 枚の異なった色再現を持つ画像を感熱プリンターを用いて出力し、10 人の研究室学生によって 5 段階系列範疇法による評価を行った。

結果を図 6 に示す。定量的な解析は十分に行っていないが時期を変えて行った 2 回の評価について同様な傾向が見られ顔領域の色についてある好みが存在することがわかる。

一方、われわれは内視鏡画像の色再現を向上させるため内視鏡分光器の開発や色再現モデルの構築など多くの実験を行ってきた¹⁰⁾。内視鏡画像ではその評価は医師によってなされねばならない。顔領域の色変換と同様な手法により電子内視鏡により撮影された胃粘膜像の色を変化させ内視鏡の専門医 7 名と一般の被験者 14 名によって CRT に表示された画像の好ましい色について評価を行った。その結果医師の評価では明らかなピークが存在するが一般被験者では好みの分布に広がりがあり、両者の間には好ましい色について明らかに差異が認められた。このように画像の評価は対象とするパターン、評価を行うパネラーにより異なることに十分注意する必要がある。

なお、この問題についてはトランスペーラを用いた高速色変換によりさらに詳しい実験を行っており、別の機会に報告の予定である。

3. 色再現の評価とチャート

画像は最終的には視覚を通して観測されることから上述したように主観的な評価がきわめて重要である。しかし画像設計の立場からは物理的な解析および心理物理的な評価が必要となる。

画像の色再現を物理的に解析するためその分光反射率あるいは分光透過率、カラー濃度の測定が行われる。濃

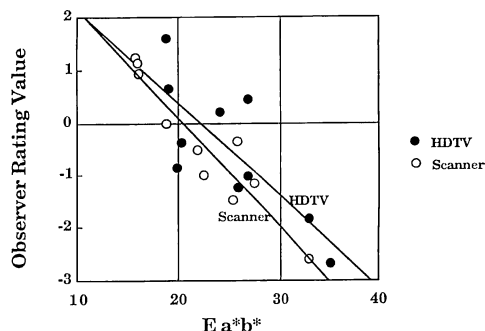


図 7 HDTV とメカニカルスキャナーから入力した同一画像を 10 種のハードコピーシステムにより出力し評価を行った結果 (色差と主観評価値の関係)

度測定では測定系の分光的、幾何光学的条件に十分な配慮が必要である。また、分光反射率の測定においても積分球の直径、開口部の面積など厳密さが要求される。

分光反射率からは CIE-XYZ 表色系に基づいて色度値が計算され、ここから $L^*a^*b^*$ あるいは $L^*u^*v^*$ 空間での色度も簡単に計算することができる。また、 $L^*a^*b^*$ 空間での 2 点間の色差は

$$\Delta E = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$$

で与えられる。ここで Δa^* 、 Δb^* 、 ΔL^* は被写体と再現画像の色度差である。

図 7 はカラーリバーサルフィルムに記録されたマクベスカラーチャートを含むポートレート画像を HDTV およびスキャナーによりデジタル化し印刷、感熱プリンター、レーザープリンター、インクジェットプリンターなどでハードコピーとした評価結果¹¹⁾である。ここで色差はマクベスカラーチャート 18 色の平均値である。図のように色差は主観的な評価値とほぼ線形の関係にあることがわかる。このような評価を行うためには画像中に常にカラーチャートを記録しておくことが必要である。

カラーチャートを含む画像評価用の標準画像が画像電子学会、電子写真学会、日本印刷学会、テレビジョン学会から販売されている。画像評価の目的に応じたチャートの使用¹²⁾をお勧めする。

4. ま と め

ハードコピーの色再現について著者らの行っている最近の研究を中心に概説した。すなわち、はじめに非線形方程式を用いた測色的な色再現、Neugebauer 方程式による平均的な加法混色について説明した。また、パターン認識技術を導入したローカルな色変換や色補正についても触れ、好ましい色再現に向けたわれわれのアプロー

チを紹介した。ページ数の都合で十分な記述はなされていないがハードコピーの色再現について少しでも参考になれば幸いである。なお詳細は下記の文献を参考にしていただきたい。

文 献

- 1) 三宅洋一: “デジタル画像のハードコピーと画質”, 光学, **17** (1988) 68-73.
- 2) W. G. Hunt: *The Reproduction of Colour*, 4th ed. (Fountain Press, 1987) pp. 175-197.
- 3) 三宅洋一: “ハードコピーにおける色再現理論の展開”, 電子写真学会誌, **29** (1990) 284-292.
- 4) Y. Miyake, H. Saitoh, H. Yaguchi and N. Tsukada: “Facial pattern detection from television pictures for newspaper printing,” *J. Imag. Technol.*, **16** (1990) 165-170.
- 5) 宮田公佳, 羽石秀昭, 矢口博久, 三宅洋一: “ハードコピーの色再現改善—注目色の重みづけ—”, 第22回画像工学コンファレンス論文集 (1991) pp. 169-172.
- 6) Y. Satoh, Y. Miyake, H. Yaguchi and S. Shinohara: “Facial pattern detection and color correction from negative color film,” *J. Imag. Technol.*, **16** (1990) 80-84.
- 7) K. Sayanagi, ed.: “Neugebauer memorial seminar on color reproduction,” *Proc. SPIE*, **1184** (1989) 50-63, 194-202.
- 8) Y. Miyake, H. Haneishi, H. Yaguchi and K. Miyata: “Improvement of color reproduction in hardcopy,” 3rd East-West Symposium IS & T and SPSTJ (to be published).
- 9) G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science*, 2nd ed. (J. Wiley & Sons, 1982) pp. 164-167.
- 10) 関谷尊臣, 原 忠義, 三宅洋一: “胃粘膜分光反射率の測定と内視鏡画像の色再現シミュレーション”, 京都大学数理解析研究所考究録, No. 736 (1990) 100-130.
- 11) M. Sadakuni, K. Miyata, H. Haneishi and Y. Miyake: “An evaluation of image quality for HDTV printings,” *IS&T Proc. Electronic Photography* (1991) pp. 49-54.
- 12) 三宅洋一, 畑田豊彦, ほか: “カラー画像とチャート”, JOEMテクニカルノート 7, 8 (日本オプトメカトロニクス協会, 1992).