

# 色彩画像の画質評価

## — 現状と課題 —

Evaluation of Color Image Quality  
- Present State and Problems -

三宅洋一 Yoichi MIYAKE

中口俊哉 Toshiya NAKAGUCHI



**アブストラクト** 画像評価は銀塩写真、印刷、CRTテレビを中心に長い歴史を通して地道な研究が行われ、今日の高い画質を持つ多様なデジタル画像システムへと発展してきた。画質評価の研究は、主観評価と対応の良い物理評価パラメータを見いだす研究として行われてきたが、いまだに完全なる解明はなされていない。本稿では、銀塩写真、印刷、CRTに代表されるアナログ画像から最近のフラットパネルディスプレイやインクジェットプリンタに至る画質の問題を概観する。まず主観評価と客観評価の基礎から解説し、視覚特性と画質、更に高次の表現パラメータである質感について述べる。また画質と深く関連している疲労についての研究成果など、筆者の研究室で行っている研究を中心に概説する。

### 1. はじめに

長い歴史を持つ銀塩写真や印刷、CRT (Cathode Ray Tube) に関して多くの画質評価研究が行われてきた。これら先人たちのため地道な研究がLCD (Liquid Crystal Display) やPDP (Plasma Display Panel) などの大型FPD (Flat Panel Display) やインクジェット、レーザープリンタの画像設計にフィードバックされ、今日のように高い画質を持つデジタル画像システムが開発された。長年画像システムはCRT、銀塩写真、印刷のようにアナログ画像であった。それゆえ、写真から印刷への変換、テレビにおける画像変換や画像の送受信なども一般ユーザとは無関係な世界で行われてきた。しかし、PCの普及、ネットワーク環境整備、多様な画像メディアの開発、携帯電話の多機能化などによって画像処理が容易となりそれぞれ目的に応じた画像設計も行われるようになった。例えば大型FPDはほとんどの場合、家庭でのテレビ画像の観賞に使用される。したがって、家庭における視環境下で好ましい色、階調、鮮鋭性を持つ画像に再現されることが要求される。一方、携帯電話などに使用されるディスプレイは、屋内外のきわめて多様な視環境下で使用される。したがって、大型FPDと異なった画質設計が必要である。また、新聞、雑誌、コピーや家庭用アルバム写真などのハードコピーは、時間固定で長時間の鑑賞を行うためにソフトコピーとは異なった画質が要求される。本稿では、銀塩写真、印刷、CRTに代表されるアナログ画像から最近のインクジェットプリンタやFPDに至る画質の問題を概観し、今後の課題について筆者の研究室で行っている研究<sup>(1)~(4)</sup>を中心に概説する。

### 2. 主観評価と物理評価

図1は被写体の記録表示から評価までの画像プロセスを示している。図に示されるように被写体はセンサによる光電変換から、記録、伝送後表示され最終的には人間によって観測される。いま、時間とともに変化する三次元物体を画像関数  $O(x, y, z, t, \lambda)$  として表そう。ここで、 $(x, y, z)$  は物体の三次元座標、 $t$  は時間、 $\lambda$  は可視光400~700nmの波長を示す。したがって、記録、変調、伝送、復調を通して再現される画像が  $O(x, y, z, t, \lambda)$  と同一であれば完全な画像の記録再現が行われたことになる。しかしながら現在の画像記録再現システムは、理想の画像再現記録とは大きく異なっている。すなわち、

- (1) 画像は三次元ではなく二次元画像として記録される。
- (2) 分光情報(光の波長単位)の記録ではなくRGB (Red, Green, Blue) あるいはCMY (Cyan, Magenta, Yellow) を三原色とした加法混色あるいは減法混色に基づく色再現が行われている。
- (3) 我々が知覚する物体は大部分が反射物体であり、発光物体の観測はまれである。しかし、印刷などハードコピーを除いた画像表示システムCRT, LCD, PDPいずれも発光画像であり、いわゆる見えのモード(色の現れ方による分類、物体色、光源色、開口色がある)が異なる。
- (4) 画像情報は、偏角特性(光の入射角と反射角に依存した反射特性)を考慮することなく、ある一定方向からの照明・記録に基づいている。
- (5) テレビでは毎秒30枚(フィールドで考えると60枚)、映画では毎秒24枚の画像で構成されている。

以上が現在の画像システムの限界を与えている。すなわち、被写体は次のような画像関数として記録される。

三宅洋一 正員 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター  
中口俊哉 正員 千葉大学大学院融合科学研究科  
Yoichi MIYAKE, Member (Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University, Inage-ku, 263-8522 Japan)  
Toshiya NAKAGUCHI, Member (Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University, Inage-ku, 263-8522 Japan)  
Fundamentals Review Vol.2 No.3 pp.29-pp.37 2009年1月

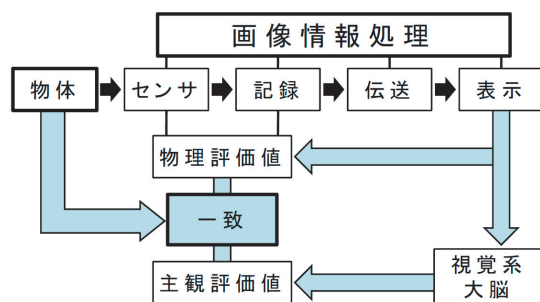


図1 画像の形成システムと画質評価

$$f_i(x, y, t) = \iint W_i(\lambda) f(x, y, z, t, \lambda) d\lambda dz \quad (1)$$

ここで、 $W_i(\lambda)$   $i = R, G, B$ : RGB フィルタ関数である。ここでは示していないが、 $f_i(x, y, t)$  は照明の入射角、センサの角度にも依存する。

したがって、図1に示されるように、被写体と再現画像が物理的に一致することは不可能である。Gaborによって発見されたホログラフィーは理想的には三次元画像記録再現システムであるが、テレビシステムとして応用されるのはかなり遠い将来と思われる。そこで、現状では上記の限定された条件下での再現画像の物理的特性と観測して得られる主観的な判断が画質評価の問題である。しかしながら、上記の限定された条件下で階調、色再現、鮮鋭度などが完全に記録再現されていても、そこに記録されている対象物体が好みでなく興味もない場合には、その画像の評価は低くなるであろう。また、その逆もある。画像評価ではこのような認識や理解など脳機能の高次レベルに依存する問題も含まれるため、この研究はいつまでも古くて新しいテーマを含んでいる。

例えば、画質評価の重要なパラメータである色彩情報を見てもニュートンとゲーテの立場からの研究が今日まで脈々と続いている。すなわち、前者は色彩科学、工学分野、後者は色彩心理学に関連する分野である。『新編 色彩科学ハンドブック [第2版]』(東京大学出版)を見ても、色彩学が生理学、工学、医学、服飾、食品など科学、工学、心理学などのあらゆる分野を統合していることが分かる。テレビ、写真、コピー、印刷など画像産業はニュートンの色彩学に基づいて発展してきた。一方、服飾デザインなどを含めた色彩心理学の分野は後者の学問体系に属する。それゆえ、色彩画像評価の研究も常に両者の溝を埋めるべく行われてきた。特に、前述したようにメディアの融合と画像の多様な応用が進み、質感再現、好ましい画質再現などが要求されるようになり、脳の高次機能を画像設計評価に応用する重要性が指摘され始めている。

工学的な面から画質を考えると、例えば医用診断では正確で高精細なモニタ表示、記録が必要である。e-コマースでは商品の正確な色再現や光沢の再現が、デジタルアーカイブ、例えば美術工芸品の記録ではその物体が消失した場合にも再現可能な三次元分光情報、形状、材質などの記録が必要であ

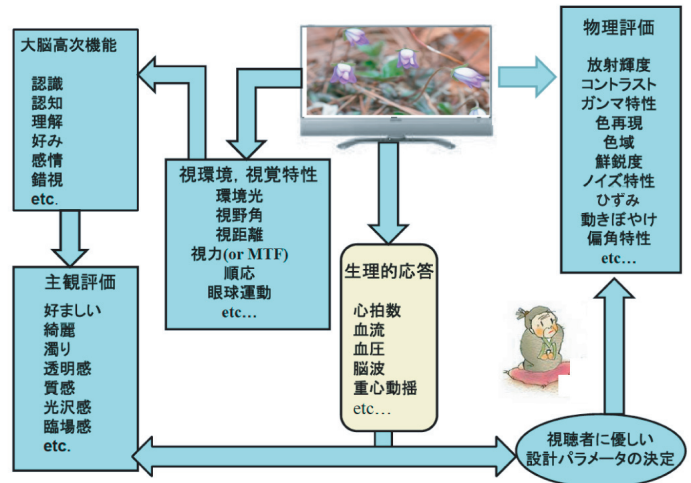


図2 画質評価の因子

り、更に質感など高度な画像再現も要求される。また、CGとの合成画像の記録再現では、リアル画像といかに近似した画像再現を行うかが重要である。

すなわち、図1に示される画像記録再現プロセスにおいて、センサ部では、CCDあるいはCMOSカメラの画素数、ダイナミックレンジ、CCD配列、フィルタの分光透過率、分光感度、フィルタ配列、レンズ分解能、SN比、暗電流などが画質に影響する。また、記録、伝送では記録密度、標本数、量子化レベル、帯域圧縮法、変復調法が、表示においては色域、バックライトの輝度、ダイナミックレンジ、フィルタの分光特性、サブピクセル、蛍光体などの分光特性、階調数、色温度、動画特性、ホワイトバランスなどが、ハードコピーでは紙質が画質に影響する。一方、ディスプレイの観測では、視環境、例えば照明光の照度、色温度、幾何学的条件、観測距離、角度などが画質に密接に関係する。更に、視覚を通して観測される画像の画質は、視覚系の諸特性、例えば順応、眼球運動、視力、時空間周波数特性などと関係する。最終的には、脳における高次機能である認識、理解、認知、記憶、好みなどの情報処理を通して総合的な画質評価が行われる。

図2は、図1に示される画像表示、観測を詳細に示したものである。すなわち、画像鑑賞時における主観評価、視環境、物理評価パラメータ及び生理的応答を示している。従来の画像設計評価では、人体の生理学的特性はほとんど考慮されず、物理評価パラメータ、主観評価、視覚特性を中心として行われてきた。しかし、高齢者人口の増大と大型FPDの普及により、人体の生理学的特性を考慮した、疲労しない・人に優しい画質設計が求められるようになった。以下にこれら四つの画像設計因子に触れ新しい画質評価について考えてみたい。

### 3. 物理評価のパラメータ

画像の物理評価<sup>(5)</sup>は、階調再現、鮮鋭性、色再現特性、ノイズ特性、幾何学的ひずみ、動画特性、偏角特性に分類しての解析が行われてきた。もちろんこれらの特性は相互に複雑に作用し完全には分離できないが画像設計の立場からは通常



図3 画像評価用チャート(三宅研究室)

これらのパラメータごとに分離し、設計指針とすることが多い。これまでの画質研究は静止画、動画とも偏角特性はほとんど考慮されてこなかった。したがって、静止画では図3に示されるような画質評価チャートを用いて上述した階調再現、鮮鋭性、色再現特性、ノイズ特性、幾何学的ひずみの測定を行っている。図は、筆者の研究室で長年ハードコピーを中心とした画像評価に用いているチャート<sup>(1)</sup>であり原画は4×5インチリバーサルカラーフィルム(ポジフィルム)に記録されている。各種チャートから階調再現特性、解像力、MTF (Modulation Transfer Function)、解像力の方向依存性、LSF (Line Spread Function)、RMS (平均二乗平方根) 粒状度、色再現、ひずみなどを測定できる。動画像については1フレーム1/30秒で時間固定すれば静止画として扱えるため本チャートで画像特性を測定することができる。しかし、画像処理の進歩によりソフトが画質に与える影響が飛躍的に増大している。したがって、デバイスの物理的特性を独立して扱うことは困難である。例えば、0.1に制限された出力デバイスの階調再現特性はデジタルハーフトニング(階調変換)のアルゴリズムに大きく依存する。また、超解像や色域拡大、色補正変換、帯域圧縮、HDR (High Dynamic Range) 変換、光沢再現、ひずみ補正など制限されたデバイス特性を画像処理により補遺することも広く行われている。物理評価では多様な評価が行われているが、ページ数の都合で以下には階調再現、鮮鋭度、色再現について述べる。

### 3.1 階調再現評価

例えば、夏の浜辺を被写体とした場合、直射太陽光下での砂浜と木陰などの照度の比は数百万以上に達する。視覚系は、明暗や色に対する順応特性を有するため極めて広いダイナミックレンジを持つ。画像デバイスによりこのような輝度差の大きな被写体を、画像としてどのように記録再現するかが階調再現の問題である。紙媒体では、そのダイナミックレンジは最大8ビット256レベル程度である。また、LCDなどの表示デバイスでは10ビット1024レベル程度である。階調再現は、第1象限に被写体の輝度分布を、第2象限には撮像面へ投影された画像照度、第3象限にカメラ出力、第4象限に

表示画像の特性を表す調子再現図が評価にしばしば使用される。すなわち第4象限の階調再現特性と第1象限における被写体の輝度分布が完全に一致すれば理想的な階調再現が行われたことになる。しかし、画像システムのダイナミックレンジ、ガンマ特性、非線形性により階調再現はひずみを持つ。ガンマ補正(線形化)、ヒストグラム変換などによる階調変換、Retinex (適応的階調補正手法)などの非線形変換によるダイナミックレンジ拡大などの処理が階調再現補正に使われている。

一方、印刷、コピー、デジタルプリントのほか、PDPなどにおいて一つのピクセルが階調を表せないシステムでは、連続階調画像からハーフトーンへの変換が階調再現特性を決定する。例えば、紙へのインク転写では数 $\mu\text{m}$ から10数 $\mu\text{m}$ のドットに階調を持たせることは困難である。そこで、インクはオン、オフの2値として出力し、密度変調あるいは面積変調により階調再現を行う。網点面積率と反射率あるいは濃度との関係は、Murray Davies式、Yule-Nielsen式、Neugebauer式など古典的な式からHerbertモデルまで様々な関係式が提案されている。また、2値変換もDither、濃度パーン、ランダムドット、誤差拡散など様々な手法が提案されている。しかし、紙内部における光散乱により生じるオプティカルドットゲインとインクの物理的な広がり(メカニカルドットゲイン)により面積率と反射率の関係は簡単には求められない。筆者らも紙内部の光散乱をPSF (Point Spread Function)で近似する反射画像モデル<sup>(6)</sup>やメカニカルドットゲインとオプティカルドットゲインを分離し解析する<sup>(7)</sup>新しい画質評価法を提案している。

### 3.2 鮮鋭度評価

画像出力デバイスの性能を示す指標の一つに解像度がある。例えばCCDカメラでは画素数が、印刷やコピー、プリンタでは1インチ当りのドット数dot/inchが光学系や写真画像では1mm当たりの周波数lines/mmがLCD、PDPなどの表示デバイスでは画面の走査線数(NTSCテレビでは480本、フルハイビジョンでは1,080本)などである。しかし解像度が高いデバ

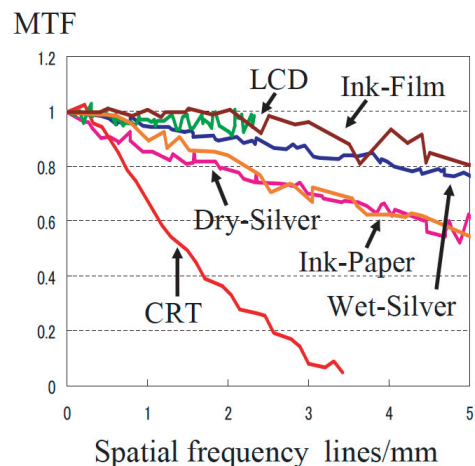


図4 異なる画像システムのMTF比較

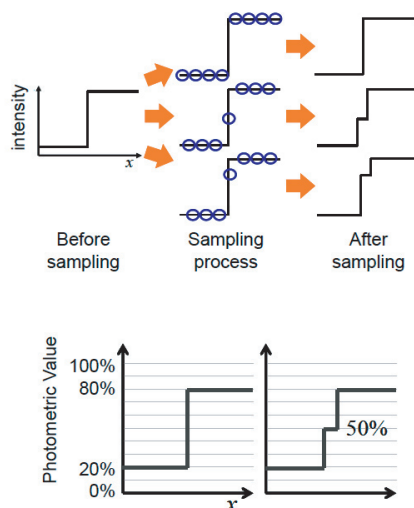


図5 デジタル画像のエッジサンプリング

イスでも周波数応答が低ければ鮮鋭な画像とはいえない。そこで出力信号の周波数応答を計測し、画像システムがどの程度の高周波成分まで記録再現できるかを表す尺度を鮮鋭度と呼ぶ。鮮鋭度の定量的な評価法としてLSFあるいはPSFのフーリエ変換の絶対値であるMTFも広く使用されている。

画像システムのLSFやPSFを測定することは容易でないため、空間周波数の異なる正弦波チャートを記録しその振幅変化やエッジ像の広がりからフーリエ変換からも測定が行われている。ここではMTF測定の詳細は述べないが、Gans methodと呼ばれるナイフエッジ像を用いる手法から医用X線画像で使用されるインクジェットプリンタ(反射、透過フィルム)、銀塩フィルム(Wet, Dry), CRT, LCDのMTFを測定した結果<sup>(8)</sup>を図4に示す。図に示されるようにLCDではナイキスト周波数の限界は2本/mmと低いが、MTFの低下はほとんどない。そのほかのデバイスではMTFはインクジェットプリンタによるフィルム出力、銀塩Wetフィルム、Dryフィルム、インクジェットペーパー、CRTの順に低下している。一方、MTFを求めるためにエッジ像をサンプリングする際、図5に示すように1ピクセルのサンプリング点がエッジのこの配面に位置することがある。したがって、サンプリング点の位置によってMTFは変化する。図6はLCDについて26%、

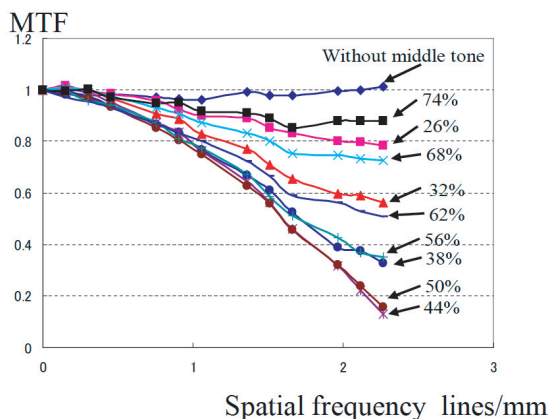


図6 サンプリング位置に伴うMTFの変動

32%, 38%, 44%, 50%, 56%, 62%, 68%, 78%の位置でサンプリング点がある場合のMTFの例である。50%位置での交錯がMTFを最も低下させることが分かる。画像表示システムのMTFは一律に決まるのではなく、このような測定・解析により変化することに注意が必要である。一方、デジタル画像システムは空間的に非等方的な特性を持つ。したがって、デジタル画像システムのMTFは、銀塩写真や光学レンズとは異なり水平方向だけでなく全方向での測定が必要である。

### 3.3 色再現評価

筆者は、長年色彩工学の立場から色彩画像の解析、評価の研究を行ってきた。色彩工学の基礎は、ヤング、マックスウェル、ヘルムホルツらによって築かれた「どのような色もR, G, B三原色の混合によって表すことが可能である」との三原色理論に基づいている。1931年には、CIE(国際照明委員会)が三原色理論に基づいて、標準観測者の等色関数を定義しCIE-XYZ表色系が完成した。その後、均等色空間といわれるLUV, LABなどの表色系、色の差異を表す色差などが次々と提案されてきた。カラー写真、印刷、テレビ、コピーなどは、すべて三原色理論に基づいて画像設計評価が行われている。このような、長年慣れ親しんできたアナログ画像は、1990年代から始まった画像システムのデジタル革命によって、急速な変化を遂げている。すなわち、多様な画像システムの開発により、完成されたと思われる色再現について多くの問題が指摘されるようになった。例えば、銀塩写真とCCDカメラによる色再現を考えてみよう。銀塩写真では、例えばリバーサルフィルムではセンサ、記録、表示が一体化しており再現色を決定するフィルムのRGB分光感度、CMY色素の分光特性、現像処理はメーカーにより決定され色再現は撮影時にほぼ決定される。ネガフィルムにおいても印画紙への焼付け制御はメーカーにより決定され、ユーザがコントロールできる余地は少ない。しかしながら、デジタルカメラでは、撮影後の画像はPCを用いて階調変換、色補正などの画像処理が容易にできる。また、それらの画像の送受信も容易である。この簡易性のゆえ、長年慣れ親しまれてきた銀塩フィルムや光学カメラがアマチュアの世界ではほとんど使用されなくなった。

デジタルカメラ、画像システム等では、ユーザによる画質制御の自由度は大幅に増したが、その反面新たな問題が生じるようになった。例えば、印刷では、長年銀塩写真を原版としてきたため常に写真を基準として画質を考えればよかった。しかし、デジタルカメラでは元の画像データは同じであっても画像処理、表示システムによって再現される色は常に異なり、基準となる色が一義的に決定できない。そこで、画像データが同じであれば再現デバイスによらず常に再現される色が一定となるような「デバイスインデペンデント色再現」に関する研究が活発となった。このような色再現では一般に、デバイスごとの三刺激値を一致させるいわゆる測色的色再現が行われている。一方、色は観測環境によっても見え

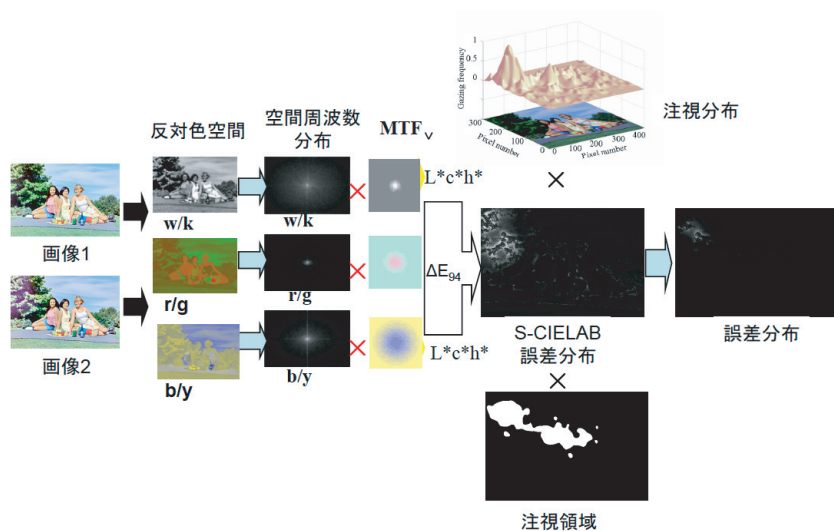


図7 S-CIELABと注視領域による画質評価

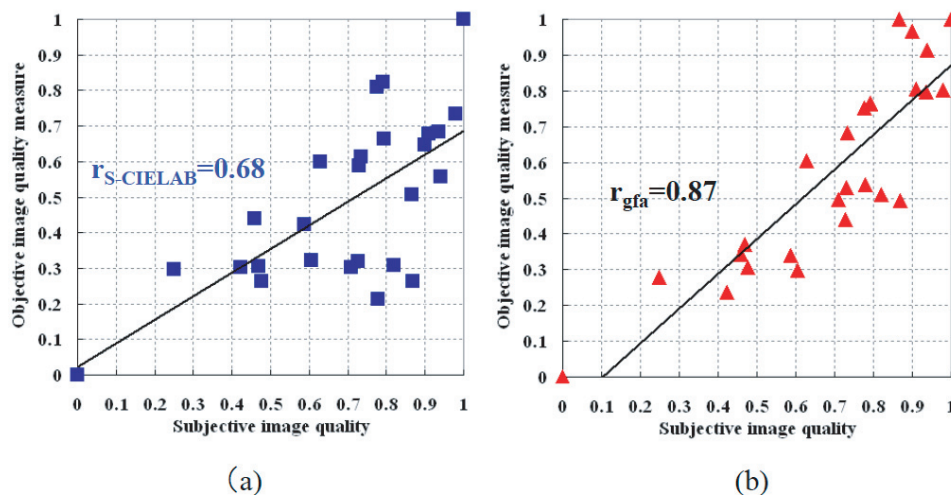


図8 S-CIELABによる画質評価値と主観的評価値の相関 $r$  場合

(a) 注視領域を考慮しない, (b) 注視領域を考慮した場合

が大きく異なることが知られている。そこで、von Kriss 以来照明環境による色の見えを予測する研究も行われている。例えば、太陽光の下からタングステン光（通常の白熱電球類）で照明された室内に入ると、物体はすべて赤みが強く見える。しかし、しばらくすると目が順応し白い物体は白く見えるようになる。このような現象は、色順応と呼ばれているが、明るさに対しても同様な現象、例えば明暗順応もよく知られている。もちろん、色順応は、完全に生じるのではなく照度、背景など様々な要因が関係する。特に、最近のカメラ付携帯電話などでは、様々な環境下で画像が観測される。したがって、正確に色再現を行うにはこのような視覚の順応特性も考慮することが必要である。色再現の評価は、被写体あるいは原画像と再現画像の色差 ( $L^*a^*b^*$ ,  $L^*u^*v^*$  など均等色空間の三次元距離)、色再現範囲 (色域) などで評価される。色再現については極めて多くの文献 (9) があるので詳細はそれらを参照されたい。

#### 4. 視覚特性と画質

画像は視覚を通して観測される。したがって、視覚の諸特性を画質評価に導入することが重要である。特に最近広く用いられている大型FPDでは、視覚特性を十分考慮した画質設計が必要である。しかしながら、人間の視覚系は極めて複雑で、その初期過程から高次機能まで様々な特性<sup>(10)</sup>を有する。例えば、初期過程では

1. 視力 (空間周波数特性, 時間周波数特性)
2. 順応 (明暗順応, 色順応)
3. 色覚 (色の見え, 分光視感効率, LMS 錐体 (色を識別する感覚器) の分光感度, 明所視, 薄明視, 暗所視など)
4. 眼球運動 (注視点, 注視領域)
5. 空間知覚 (奥行き, 距離, 影)
6. 対比 (明暗対比, 色対比, 大きさ, マッハ効果)
7. 運動視 (動き視力, ちらつき感)

などが考えられる。

一方、図2に示したような用語で表される画質は、画像認識、

認知、理解、記憶、好み、感性、感情、錯視など脳の極めて高次の機能で評価されている。しかしながら、このような大脳中枢で行われる高次機能を画質設計に応用する研究は緒についたばかりである。よく知られるように視覚は輝度に対してバンドパス特性、色に対してはローパス特性を有する。また、輝度と色とでは周波数特性に差異があることが知られている。これらは、テレビ画像のRGB-YIQ変換などにも応用されている。

すい体LMSからの物体のRGB情報は、段階説によると反対色空間へ変換後に各種情報処理される。S-CIELABモデルでは、入力画像のR、G、B分解画像を反対色r/g、b/y、w/kに変換しその空間周波数分布を計算し、視覚系の周波数特性で変調後フーリエ逆変換し、RGB分解画像を求め、更にRGBからXYZ、L\*a\*b\*を各画素について計算する。A、B2種類の画像を比較する場合にはそれぞれ対応する画素の色差を求め、例えばその平均色差が画質評価の一つの尺度となる。また、色差を濃淡分布で表示したDistortion mapを用いて、視覚系の周波数を考慮した二つの画像の差異を直感的に比較できる。更に図7に示すようにS-CIELABに眼球運動で測定されたGazing Area (注視領域)をフィルタとして用いることで、主観評価と対応の良い画質評価が可能であることも報告<sup>(11)</sup>されている。図8はRetinexにより色及びトーン補正した画像を注視領域を考慮しない図8(a)と注視頻度をフィルタとして用いた場合図8(b)の評価結果である。注視領域を考慮することで主観評価との相関係数rが高くなっていることが分かる。

#### 4. 1 視覚の周波数特性

視覚系の空間周波数特性は、これまで多くの研究者により測定されDooley、Bartenらによりその数式モデルも提案されている。これらはいずれも視覚系MTFの等方性を仮定しているが、経験的にも視覚の周波数特性は水平、垂直方向に比較し斜め方向では低いことが知られている。銀塩写真のように画像システムが等方性を有する場合には、このような視覚の特性は画質評価、画像設計の大きな問題ではなかった。しかし、デジタルシステムでは例えばCCDの画素形状からも明らかのように非等方性を有する。そこで、筆者らの研究室では、高精細液晶ディスプレイを任意の回転が行えるようにして、空間周波数の異なる正弦波を表示して上下法から視覚系MTFの方向依存性を輝度、RGB空間、反対色空間について測定<sup>(12)</sup>した。その結果、いずれにおいても45度方向のMTFは、水平垂直方向に比べ低いことが明らかとなった。また、視覚系の方向依存性を考慮したMTF、 $MTF_{\text{visual}}(u,v)$ が次式でモデル化できることも明らかにした。

$$MTF_{\text{visual}}(u,v) = M_0(\omega)[1 - \{1 - \gamma(\omega)\}|\sin^b(2\phi)|] \quad (2)$$

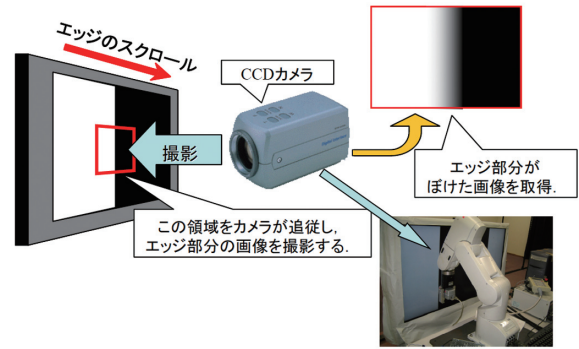


図9 MPRTの測定法

ここで、

$$\omega = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}(u/v)$$

$$M_{45}(\omega_{45}) = \gamma(\omega)M_0(u)$$

ここで、 $u$ 、 $v$ は水平、垂直方向の空間周波数、 $M_0(u)$ は水平方向のMTFでBartenがモデル化したようにガウス分布を基本として定めている。また、 $M_{45}(\omega_{45})$ は45度方向のMTFで $\gamma(\omega)$ は水平方向及び45度方向のMTFの比を表す。 $b$ は定数である。S-CIELABにこのような視覚系の二次元モデルを組み込むと、S-CIELABを主観的な評価と対応の良い評価関数に近づけることができる。

また、画像システムのMTFを $MTF_s(u,v)$ 、視覚系のMTFを $MTF_v(u,v)$ とすれば方向依存性を考慮した評価関数SQを次のように定義することもできる。

$$SQ = \sum_{i=R,G,B} \iint W_i MTF_{vi}(u,v) MTF_{si}(u,v) du dv \quad (3)$$

ここで $W_i$ はR、G、Bにおける重み係数である。

このような視覚系空間周波数特性の方向依存性はCCDカメラにおけるハニカムCCDなど画素配置の解析にも応用されている。また、動画像に対しては視覚の時空間周波数特性を $MTF_V(u,v,t)$ 、画像システムの時空間周波数特性を $MTF_{ST}(u,v,t)$ とすれば、次のような評価式が考えられる。

$$QT = \iiint MTF_{ST}(u,v,t) MTF_V(u,v,t) du dv dt \quad (4)$$

$MTF_{ST}(u,v,t)$ と密接に関係するLCD、PDPなどの動きぼやけの物理測定値として広く用いられているMPRT (Moving Picture Response Time) は、図9に示されるようなエッジ像の動きと同期したロボットアームに装着したシステムで測定できる。すなわち、図のように計測されたエッジ部分のぼやけ幅をピクセル数として測定し、(5)式から画面上のぼやけ幅を計算する。このぼやけ幅を(6)式に示すようにカメラ(あるいはエッジ)の移動速度で除した値がMPRTである

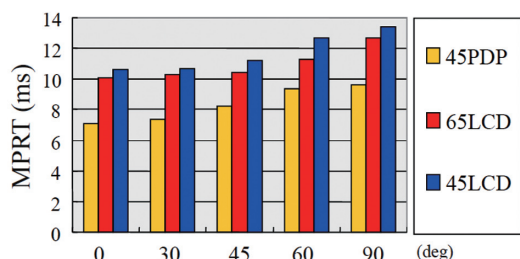


図10 65インチLCD、45インチLCD及び45インチPDPの6方向MPRT

ぼやけ幅 (mm) = (領域幅のピクセル数 pixels) × (1ピクセル当たりの長さ mm/pixels) (5)

MPRT (s) = (ぼやけ幅 mm) / (カメラとエッジの移動速度 mm/s) (6)

例えば、図10はLCDとPDPで測定したMPRT値である。図からPDPのMPRTがLCDより優れていることが分かる。また、LCDなどぼやけ幅の方向依存性について図11のようにエッジを斜め方向に走査してMPRT測定を行った結果<sup>(13)</sup>、図10に示すように水平方向に比べ90度方向のぼやけ幅が大きいことが明らかにされた。今後、動画像特性についても方向依存性などの研究がより必要になろう。

## 4.2 色順応と画質

太陽光とタングステン光で照明された物体から視覚へ入射される分光エネルギーは、全く異なるにもかかわらずその光源に順応した後は二つの光源下での物体色はほぼ同じように観測される。このような現象は色順応と呼ばれる。また、映画館など暗い部屋に入った直後は、視力は低下するがしばらくすると視力が回復する暗順応と呼ばれる現象やこの逆である明順応もしばしば経験する。色順応は、LMS錐体の分光感度分布の形状は、色順応の過程で変化がなくその相対感度が照明光の刺激値に反比例するとの仮定に基づいた von Kriss モデルを基礎として、Hunt, Nayatani, Fairchild, Luo など

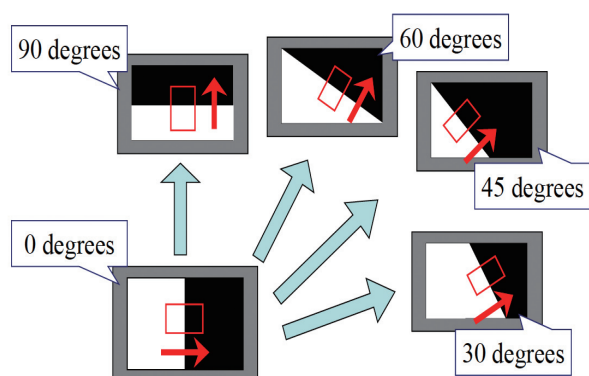


図11 斜方向のMPRT測定

様々なモデルが提案されている。また、最近ではCIECAM97、CIECAM02などのモデルも提案され、ある限定された条件下では正確に色の見えを予測することができるようになった。しかしながら、これらのモデルは極めて自由度が低く実際の画像への応用は極めて限定される。また、これらのモデルは動画像を対象としたものではない。

一方、モニタへの順応はモニタの白色点ばかりでなく観測照明光にも依存する。マルチメディアの時代には紙媒体ばかりでなくCRT、液晶、反射型液晶、プラズマディスプレイ、有機ELや電子ペーパーなど多様な出力装置で異なる視環境下で画像の観測<sup>(14)</sup>が行われる。今後、これらの画像デバイスやプリンタにより表示される静止画ばかりでなく動画像についても異なる視環境下での色予測<sup>(15)</sup>を行い、それぞれの環境下で最適な色再現設計を行うことが重要な研究となろう。

## 5. 好ましい画質

画像再現では、それぞれの目的に応じた好ましい階調、鮮鋭度、色を持つ画像が要求される。すなわち、計測やデジタルアーカイブなど正確な記録を目的とする画像を除いては好ましい色再現、階調再現、シャープネス(鮮鋭度)再現が望まれる。好ましい色は記憶色と密接に関係する。そこで記憶色として重要な、木々の緑、青空、顔色などを好ましい色に変換する試みがなされている。筆者らも顔色の再現については、これまで顔パターンを抽出して顔領域を任意に色変換して好ましい色を推定すること、CRT画像からハードコピーへの変換において肌色マトリクスの作成、更には領域分割したパターン別に色変換マトリクスを計算するなどの手法を試みてきた。また、ある画素の濃度を周辺画素の情報から決定するRetinex理論の色変換に応用することも試みている。

一方、肌色がヘモグロビンとメラニン色素の量で決定されることから、独立成分分析を用いてメラニン色素とヘモグロビン色素を分離する<sup>(16)</sup>ことも可能である。したがって、ヘモグロビン、メラニンの量を変化させることで肌色変換を行うことができる。例えば、メラニン色素は日焼けなどともに増大するのに対しヘモグロビンはアルコールの摂取などで増大する。すなわち、このような手法は、従来の色変換をより進めて皮膚の生理的な現象を色再現に応用するものでありハードコピーの色再現向上ばかりでなく、化粧品開発、皮膚疾患の診断などへの応用が期待されている。

## 6. 質感の再現と画質評価

物体(人物、風景、絵画、工芸、建築物など)の画像情報は、視覚を通して観測される。先に述べたように視覚の初期過程では、LMS錐体の分光感度、時空間周波数特性、網膜照度、順応、視力、眼球運動などが、大脳中枢では認識、認知、理解、記憶、好みなどが総合されて画像情報に対する総合的な印象が決定される。画像情報の記録、伝送、再現の研究は鮮鋭度、色再現、階調再現の向上、ノイズ低減に向けてなされてきた。



図12 65インチLCDによる評価実験

しかしながら、これらの画像システムでは質感<sup>(17)</sup>といわれる高次元画像再現は十分に行われていない。質感を定義することは一義的にはできないが、例えば図2に示されるような主観的評価でしばしば使用される用語をすべて統合再現した画像とでも言えよう。

画質評価に用いられてきた物理パラメータの多くは0-45度、積分球による拡散光反射あるいは平行光透過に基づく分光反射率、濃度を用いて計測計算されたものである。しかしながら、質感のような画質を表すためには色再現、階調再現、鮮鋭度等のほか光沢やテクスチャ、陰影なども考えねばならない。これらの情報は物体のBRDF（双方向反射特性、Bi-directional Reflectance Distribution Function）を測定することである側面は表すことができる。BRDFは照明光源から入射光が視線方向（観測方向）へ反射する比率を示す関数として光源、視線方向の天頂角、方位角から定義され、偏角分光光度計を用いて測定できる。偏角特性を表すため、CGの分野では二色性反射モデルであるPhongモデルのほかTS（Torrance-Sparrow）モデル、ON（Oren-Nayer）モデル、Wardモデルなど多くのモデルが提案されている。これらのモデルを実画像の質感再現に応用する試みが活発に行われるようになった。例えば、二色性反射モデルによれば、物体の反射光は物体表面と空気層の間の境界で反射する表面反射光成分と物体表面を通過して色素などの粒子により散乱された後反射する内部反射光の線形和と仮定できる。Phongモデルでは表面反射光強度 $k_s(\omega)$ 、内部反射光強度 $k_d(\omega)$ は(7)式で示される。

$$\begin{aligned} k_s(\omega) &= A_1 \cos^4(\omega - A_2) \\ k_d(\omega) &= B_1 \cos(\omega - B_2) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで $\omega$ は角度情報を表す。また $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ はモデルパラメータであり、これらのパラメータによって反射光強度の偏角特性を表すことが可能である。パラメータ $A_1$ 、 $B_1$ は各成分の強さ、 $A_3$ は表面反射成分の広がりを表すと考えられることから $A_1$ は物体の表面反射強度と光沢評価のパラメータとして用いられている。

## 7. 人体の生理的計測と疲労

FPDの大型化や高齢者人口の大幅な増加に伴い、従来の画質研究とは全く別の観点から画像設計を考えることが要請されるようになった。すなわち、画像観測時の疲労を定量的に計測し、画質だけでなく疲労の少ない人に優しい画像設計を考慮することが重要である。そこで、我々は図12に示するような大型FPD観測時の疲労について定量的に測定し、人に優しいFPD設計へフィードバックすることを目的に研究を開始している。図12は実験の様子を示しており、65インチLCDに野球（興奮的刺激）及び世界遺産（安静的刺激）のデジタル記録映像を各15分間、計30分間提示し、高齢者19名（平均年齢64歳）を対象として映像鑑賞後の医師による問診、鑑賞前後の重心動揺測定及び鑑賞時の眼球運動、血圧、心拍、瞳孔直径の測定を行った。それぞれの詳細は割愛し、簡単に結果を述べる。

図13は上から64歳女性、69歳男性、74歳男性、59歳女性についての900秒間の血圧収縮・拡張と平均血圧及び血圧差の変化を示している。本実験ではテレビ鑑賞前後での血圧変動及び興奮的シーンにおいて血圧変動があることを予想したが、明白な変動は観測されなかった。テレビ鑑賞時には目の疲れが疲労感の大きな要因と考えられる。そこで、アイカメラを用いて被験者のテレビ鑑賞時における瞳孔径変化の測定・解析を行ったが、疲労に伴う瞳孔径の追従に変化は認められなかった。一方、問診の結果は目まい感を訴える被験者が60%近く存在した。このことは、テレビ鑑賞後に測定した重心動揺軌跡の変動と対応していた。また、30%が疲労感を訴えたが重心動揺軌跡以外、血圧、心拍、瞳孔直径については明確な変化が認められなかった。今後は、唾液アミラーゼ測定などの疲労、ストレスの新しい評価法の導入が必要である。

## 8. まとめ

色彩画像を中心に画像評価の現状課題について筆者らの研究を中心に概説した。画像評価は、銀塩写真、印刷、CRTテレビを中心に長い歴史を通して地道な研究が行われ今日の高

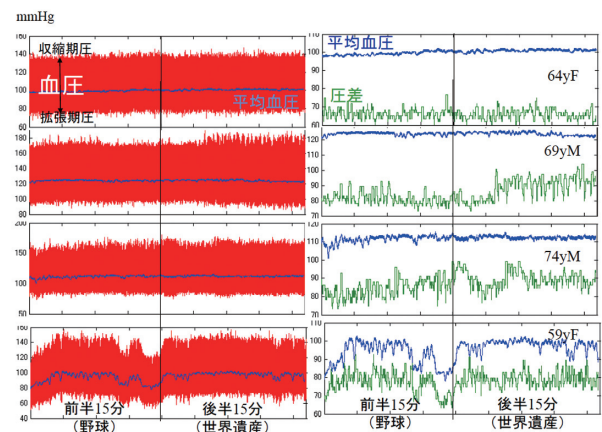


図13 30分テレビ鑑賞中の4名の血圧変動

い画質を持つ多様なデジタル画像システムへと発展してきた。すなわち主観評価と対応の良い物理評価パラメータを見いだす研究として行われてきており、階調再現、鮮鋭度、色再現、ノイズ特性を中心に多くの評価パラメータが用いられてきた。近年、これらの評価に視覚特性を導入し、更に高次レベルの特性を導入する試みがなされている。特に、質感、光沢感などは物体のBRDF、偏角分光特性の測定、分光情報に基づく評価<sup>(18)</sup>が必要であり今後更なる研究が必要である。一方、大型FPDの開発により画像鑑賞時の生理的疲労についての測定も要求されている。本文では、51歳から76歳の高齢者を対象に心拍、血圧、重心動揺、瞳孔径測定と医師による問診による疲労測定について述べた。問診では疲労を訴える被験者が30%ほどは存在したが、血圧や心拍数、瞳孔径からは有意のある差異は見られなかった。また、テレビ鑑賞時の脳波測定も試みているが疲労と対応する明確な結果は得られていない。今後、光トポグラフィーなども併用して疲労の定量的計測法を明らかにし大型FPDの画質設計に活用したいと考えている。

本稿では、画質評価研究の現状と課題について筆者らの研究室で行ってきた研究を中心に概観した。ページ数の都合で割愛した部分も多い。詳細は参考文献を参照頂きたい。

## 謝 辞

人体の生理学的特性計測、脳機能計測などに関し御指導頂いているフロンティアメディカル工学研究開発センター脳機能計測解析研究部門下山一郎教授、また資料提供等で協力頂いた千葉大学大学院自然科学研究科博士後期課程中川慎司氏に感謝致します。

## 文 献

- (1) 三宅洋一, デジタルカラー画像の解析・評価, 東京大学出版会, 2000.
- (2) 三宅洋一, 富永昌治, 羽石秀昭, 山口雅浩, 津村徳道, 分光画像処理入門, 三宅洋一(編), 東京大学出版会, 2006.
- (3) 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一, “画質解析・評価のための色彩工学,” 信学誌, vol.91, no.4, pp. 280-286, April 2008.
- (4) 三宅洋一, 中川慎司, “視覚特性に基づく画質評価,” 信学論(A), vol.J89-A, no.11, pp.858-865, Nov. 2006.
- (5) Y. Miyake, S. Inoue, M. Inui and S. Kubo, “An Evaluation of Image Quality for Quantized Continuous Tone Image,” J. Imaging Technol., vol. 12, no.1, pp.25-34, 1986.
- (6) 三宅洋一, 画像解析・評価の基礎と応用, 応用技術出版, 1989.
- (7) 山下 潤, 関根寿人, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一, “インクジェットプリント画像におけるドットゲインの分光的解析とそのモデル化,” 日本写真学会誌, vol.66, no.5, pp.458-263, 2003.
- (8) 浮島正之, 中口俊哉, 加藤勝志, 福知芳和, 津村徳道, 松本和正, 柳川範幸, 小倉 隆, 木川隆司, 三宅洋一, “異なる医用画像出力システムの鮮鋭度比較法,” 信学論(A), vol. J89-A, no.11, pp.914-921, Nov. 2006.
- (9) 大田 登, 色再現工学の基礎, コロナ社, 1997.
- (10) B. Wandell, Foundation of Vision, Sinauer, 1995.
- (11) J. Bai, T. Nakaguchi, N. Tsumura, and Y. Miyake, “Evaluation of image corrected by retinex method based on S-CIELAB and gazing information,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E89-A, no.11, pp.2955-2961, Nov. 2006.

- (12) 石原徹弥, 大石慶太郎, 津村徳道, 三宅洋一, “視覚系空間周波数応答の方向依存性,” 日本写真学会誌, vol.65, no.2, pp.121-133, 2002.
  - (13) 中川慎司, 佐野真一, 津村徳道, 中口俊哉, 三宅洋一, “ホール表示ディスプレイの非等方動画像表示性能の評価,” 信学論(A), vol.J91-A, no.6, pp.622-629, June 2008.
  - (14) 山本昇志, 植田久美子, 津村徳道, 中口俊哉, 三宅洋一, “分光推定法に基づく画像投影型カラーシミュレータの精度向上,” 映情学誌, vol.61, no.10, pp.1486-1495, 2007.
  - (15) 平井経太, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一, “視覚モデルに基づいた高ダイナミックレンジ動画像の見え再現,” 信学論(A), vol.J89-A, no.11, pp.922-931, Nov. 2006.
  - (16) 植月啓次, 津村徳道, 小島伸俊, 三宅洋一, “独立成分分析による顔色変化予測に基づく顔画像の評価,” 日本写真学会誌, vol.64, no.4, pp.255-263, 2001.
  - (17) I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan, and E.H. Adelson, “Image statistics and the perception of surface qualities,” Nature, vol.447, pp.206-209, 2007.
  - (18) S. Yamamoto, N. Tsumura, T. Nakaguchi, and Y. Miyake, “Development of a multispectral scanner using an LED array for digital color proof,” J. Imaging Sci. Technol., vol.51, no.1, pp.61-69, 2007.
- (平成20年10月7日受付 平成20年11月10日最終受付)



三宅 洋一(正員)

昭43千葉大学大学院修士課程了, 昭53工博(東工大). 京都工繊大助手, 助教授, 昭57千葉大助教授, 平元教授, 平15千葉大フロンティアメディカル工学研究開発センター長. 昭53-54 スイス連邦工科大文部省在外研究員. 平9米国ロチェスター大客員教授. 平9タイ国チュラロンコン大客員教授. デジタル画像処理, 色彩工学, 画像解析・評価, 医用画像処理に関する研究に従事. 米国画像科学学会(IS&T) Vice President, 日本鑑識科学技術学会理事長, 日本写真学会理事長を歴任. 日本光学会, 画像電子学会, 日本色彩学会など各会員. 著書に「色彩科学ハンドブック」(共著), 「デジタルカラー画像の解析・評価」, 「分光画像処理入門」など.



中口 俊哉(正員)

平10上智大・理工・電気電子卒. 平15同大学院博士課程了, 博士(工学). 同年千葉大・工・助手. 平19同大学院融合科学研究科・助教. 平13~15日本学術振興会特別研究員. 平18~19デンマークオールボー大客員研究員. 医療支援システム, 医療訓練システム, 画像解析・評価, 色彩画像処理, コンピュータビジョンに関する研究に従事. IEEE, 米国画像科学学会(IS&T), 日本写真学会, 各会員. 電子情報通信学会イメージメディアクウォリティ研究専門委員会 幹事.