

視覚に挑む高画質技術の課題と期待

独立行政法人 情報通信研究機構 (NICT)
ユニバーサルメディアセンター 超臨場感基盤グループ
グループリーダー 栗田泰市郎



1 高画質技術の役割

現在、3D映像が大きな盛り上がりを見せている。また、筆者が所属する組織では、高臨場感をさらに進めた超臨場感メディアの実現を目指してさまざまな研究開発を行っており、各種の報道でも超臨場感という言葉を目にするようになって¹⁾。一方、各家庭には高画質なフルハイビジョン薄型テレビやカメラ、ブルーレイディスクが普及しつつあり、高画質が普通のこととなりつつある。これらの状況を考えると、高画質技術の役割はあるいは低下したと感じられるかもしれない。しかし、そうではない。

筆者は、高臨場感の3大要素は、大画面、高画質、立体であると考えてきた。理想の映像システムはこれら3つの要素をすべて備えている必要がある。中でも高画質は最も基本的な要素であり、低画質では、どのような3Dシステムも、どのような大画面高臨場感システムも魅力を失うであろう。3Dシステムあるいは高/超臨場感システムにとって、高画質は必須の要件である。これらの新たな映像システムを発展させていくためにも、またハイビジョンに代表される現在の映像システムや機器をより充実させるためにも、高画質技術の研究開発はなくてはならないものである。大きく言えば、高画質技術は映像文化の発展に欠かせないものである。本稿では、今後の高画

質技術の課題について考えてみたい。

2 画質の項目と高画質技術

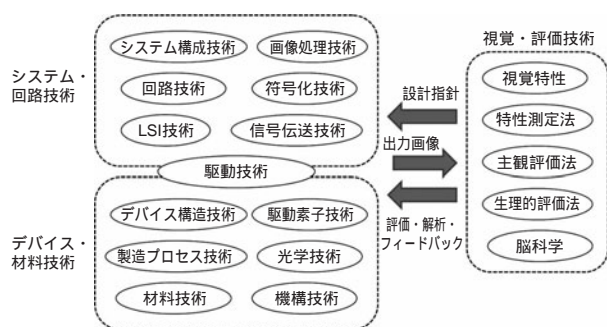
ひとくちに画質と言ってもその内容は多岐にわたる。第1表に、それらを幾つかの項目としてまとめた。これらの画質項目はそれぞれ異なる技術の様相を見せ、それぞれの改善には異なる要素技術が必要になる。逆に、相互にトレードオフを生じて、複数の項目を全体的に改善できる技術の開発が必要になる場合もある。

これらの画質項目のうち無視してよいものはない。残念ながら人間の眼や脳は良いところだけを認識するようにはできておらず、どうしても悪いところが気になってしまうのである。いろいろな画質評価実験をやってみても、総合画質の評価は、画質の悪い項目に引きずられがちである。すべての画質項目にわたって高画質を得ることが必要であり、そのためには多数の要素技術が必要である。

このように高画質技術の取り扱う範囲は広い。第1図のように、デバイス・材料、システム・回路から視覚・評価まで映像にかかわるほとんどすべての技術分野が関連すると言っても過言ではない。そして、これらが一体となって機能しなければ真の高画質技術は生まれない。高

第1表 画質の項目と関連事項

画質項目	関連事項	関連する視覚特性
明るさのダイナミックレンジ	輝度、コントラスト(暗室/明室)、感度、ダイナミックレンジ、ハイライト処理	光覚閾、色覚閾、痛覚、暗所視(杆体視)、明所視(錐体視)、順応
階調再現性	光電変換特性(ガンマ特性)、ガンマ補正、逆ガンマ補正、階調ビット数	明るさの弁別閾、Weber比、Weber則、Stevensの指数則
色再現性	3原色、色再現範囲(色域)、基準白色、色温度、実在する表面色、最明色	3色説、視細胞の分光特性、等色、メタメリズム、表色系、色度図、色空間、記憶色
精細度の再現性	解像度、鮮鋭度、空間周波数特性(MTF)、画素数、画角、視距離	視力、視野、マッハ効果、視覚の空間周波数特性(閾値)、閾上の周波数特性
動画像の再現性	動きぼやけ、動画偽輪郭、色割れ、ストロボ効果、ジャダー、フレーム周波数	眼球の随従運動、追従視、Talbot-Plateau則(点滅光の平均値知覚)、視線追随積分
その他の画質妨害	フリッカ(大面積/ライン/エッジ)、ノイズ(ランダム/固定パターン/ブロック)	CFF(臨界融合周波数)、Ferry-Porter則、Granit-Harper則、パターン認識
その他	視野角特性、上記すべての特性の画面内均一性	観視形態、形状の知覚、パターン認識



第1図 高画質技術の要素としての関連技術

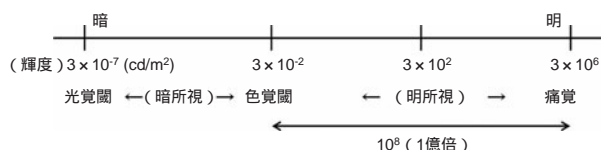
画質技術と呼ぶかどうかは、高画質を目指して要素技術を開発しているかという指向性の問題と考えられる。逆に言えば、高画質を得るためには何でも学び何でもやるという精神も必要になってくる。

とは言っても、それぞれの局面ではねらいを具体的に定めて開発を進めなければ改善技術は生まれない。以下では、例として2つの画質項目について考察する。

3 明るさのダイナミックレンジ

最も基本的な画質項目が輝度やコントラスト、感度やダイナミックレンジに代表される明るさのダイナミックレンジである。これらがある程度以上確保されていないと、画質を言う前に画像そのものを認識することができない。

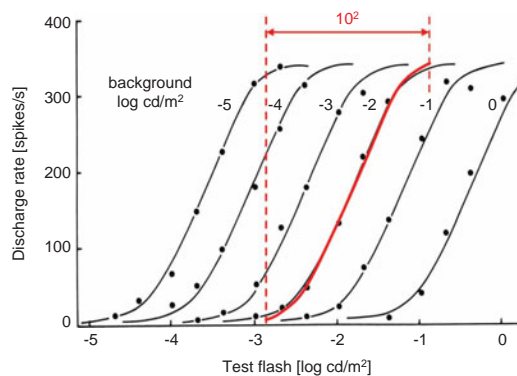
人間が光を知覚できる明るさの範囲、言い換えれば、明るさに関する視覚のダイナミックレンジは、第2図のようである。人の眼は輝度 3×10^{-7} cd/m² の微弱な光でも感じるとされており、この感じるぎりぎりの明るさは光覚閾(こうかくいき)と呼ばれている。一方、明るすぎると明るさの感覚から痛覚に変わるが、これが 3×10^6 cd/m² 当りと言われている。したがって、視覚の明るさのダイナミックレンジは 10^{13} (10兆倍)とも言える。しかし、暗い領域では人間は色を認識することができない。これは、人間の眼の網膜には杆体(かんたい)と錐体(すいたい)という2種類の視細胞があり、色を知覚できるのは明るい領域で動作する錐体であるからである。錐体が動作し始める明るさ、すなわち色を知覚できるようになる明るさは 3×10^{-2}



第2図 視覚における明るさのダイナミックレンジ

cd/m²前後と言われている。この明るさは色覚閾と呼ばれ、それ以下の明るさの領域は暗所視、それ以上の領域は明所視と呼ばれている。明所視のダイナミックレンジは 10^8 (1億倍)ということになる。通常の画像観視はカラー画像が対象であるから、眼の能力から言えば、理想的には1億倍のダイナミックレンジあるいは1億対1のコントラストが映像機器に要求されることになる。

では、常に1億対1のコントラストが要求されるかというそうではない。それは、われわれの眼には順応という機能があり、視感度特性をダイナミックに変化させているためである。網膜で得られた情報を統合して脳に向かって出力する細胞は神経節細胞と呼ばれる。第3図は、猫の神経節細胞の応答である²⁾。神経節細胞の伝送はパルス数伝送になっており、明るい刺激が加わるほど脳に向かって出力されるパルス数が増える。図の縦軸は1秒当りの出力パルス数である。図の横軸は眼に与えた刺激の明るさを対数で表している。図の中に幾つか曲線があるのは、刺激の背景の輝度によって感度特性が図の横方向にシフトして変化することを表している。つまり、これが網膜レベルでの順応である。図の特性を得るには生きている動物の眼に電極を刺して測定しなければならないので、人間の特性を筆者は見たことはないが、人間の特性も大きな違いはないであろうと視覚研究者に教えられた。



第3図 猫の網膜における神経節細胞の応答 (Sakmann and Creutzfeldt (1969)²⁾ (10²のコメントは筆者が付加)

おのおのの感度曲線を見ると、そのダイナミックレンジは高々 10^2 である。つまり、視環境が定めれば、画像のコントラストは100対1でもほぼ十分であることになる。以外に低い値であるが、納得できる面もある。例えば、画質評価方法や標準観視条件の国際規格であるITU-R BT.500やBT.709によれば、画質評価に用いるディスプレイのコントラストは50対1以上あればよいとされるが、それもこのような視覚特性に関係していると思われる。

それでは、ディスプレイやカメラなどの映像機器のコントラストあるいはダイナミックレンジは100対1以上あればよいかと言えば、もちろんそうではない。100対1でほぼ十分というのはある視環境において明るさがその視環境に最適化された場合の話である。機器の用途を限定しない場合、いろいろな視環境に対して常にコントラスト100対1以上を確保できなければならない。ディスプレイで言えば、コントラストの測定法に暗室コントラストと明室コントラストがあるが、考慮すべきは后者であり、どのような照明条件でも常に明室コントラスト100対1以上を確保できなければならないということである。そのためには、少なくともディスプレイ単体でのコントラスト、すなわち暗室コントラストとして、一般にきわめて大きい値が要求される。

家庭での視環境の調査はこれまで何度か行われてきたが（例えば³⁾）、夜間の室内照明下でのテレビの画面照度は10倍を超えるばらつきがあるというのが共通の結果のようである。この場合だけ考えても、家庭用ディスプレイには少なくとも1万対1程度以上のコントラストが必要ということになる。昼間の家庭やもっと明るいオフィス、さらには屋外の使用までも含めれば、理想的には、やはり1億対1のコントラストが映像機器に要求されるのではないだろうか。

あまりにも明るい画像は眼に悪いあるいは疲れると思われるかもしれない。もちろん面積の大きい高輝度画像を長時間見ればその通りである。しかしスポット的な小さい光源を短時間見る場合には、相当な高輝度でも臨場感にとってプラスの要因となり得る。例えば、ミュージカルや各種のショーなどのシアター系の視環境では、色の濃い相当な明るさの、少しまぶしいくらいのスポット光源が非日常的な心地良い刺激を与えてくれることがある。これを今のテレビで見るとつまらない白っぽい照明にしか見えない。

現状の映像機器のコントラストあるいはダイナミックレンジが1億対1に達していないのももちろんである。たいていの家庭では昼間にテレビを見ると十分なコントラストは得られない。筆者は、じっくり見たい番組は昼間は見ず、録画しておいて夜に見る。カメラであれば夜景を撮影してみればすぐに特性不足がわかる。高台や飛行機から街の夜景を見るようには決して撮影できず、感度もダイナミックレンジも、暗部での解像度も不足である。今のテレビでは100万ドルの夜景を見る感動は得られないのである。

プラズマパネルや液晶パネル、あるいはCMOS撮像素子などのデバイス単体で1億倍のダイナミックレンジが得られればもちろんよいが、この課題をデバイスだけに押し

付けるのは酷である。システム・回路技術の出番でもある。例えば、今でも行われているサブフィールドやバックライトの適応制御技術をさらに進化させて、人間の眼の順応に匹敵する自然でスムーズかつ広範囲な制御を行う技術の開発が考えられる。このような技術は、現代の機器では必須の要件であるグリーン化すなわち高効率化・省電力化にもプラスなはずである。また、ここでは詳しく述べないが、限られた階調ビット数での階調再現性の向上にもプラスである。明るさのダイナミックレンジを広げるだけでは画質的に十分ではなく、それに見合う階調再現性が必要であることも忘れてはならない。

デバイス・材料技術の進歩とシステム・回路技術の進歩が連携・協力して、視覚のダイナミックレンジを超えてほしいものである。

4 動画像の再現性

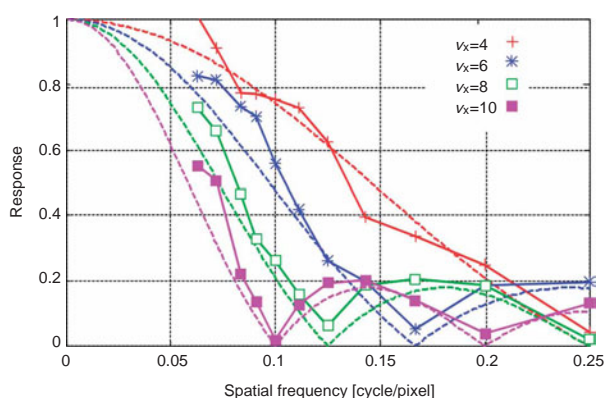
人間の眼は動くものを追うようにできている。人間は角度にして100°以上の広い視野をもっているが、視力の高い視野は限られている。視野の中心である中心窩（ちゅうしんか）から2.5°離れると視力は1/2になるとのことである。文字が読めるのは中心窩近傍の2°~3°の範囲とも言われる。この高い視力をもつ視野が狭いことを補うために、人間や動物には眼球運動という機能が与えられている。つまり、広い視野の中に動くものが侵入したら、すぐさま眼球運動によって視野の中心をそれに合わせ、視力の高い視野中心でそれが敵であるか、あるいは安全であるのかを判断するのである。このように、目の前に現れた動物体を眼が追従するというのは動物的本能である。

眼球は、高速な跳躍運動（サッカード）により動物体をほぼ視野中心でとらえたのち、それを連続的に追うために低速で連続的な随従運動に入る。いわゆる視線が動物体に追従している状況である。この状況を追従視などと呼んでいる。

この追従視という本能的動作があるため、薄型ディスプレイでは動画像を表示すると画質が劣化することが知られるようになり、この10年ほど、その改善技術が盛んに開発されてきた。特に液晶テレビや有機ELテレビにおける動きぼやけ（動画像がぼやけて表示されること）は、それらの動作原理と追従視の関連性により本質的に発生するものである⁴⁾。液晶ディスプレイで動きぼやけを生じる原因は、液晶の応答速度が遅いこと以上に本質的な原因があったのである。

この動きぼやけの発生メカニズムをここで詳細に説明することはしないが、それは追従視と視覚の時間積分作

用に関連して発生する。視覚の時間積分作用とは、視覚の時間分解能は高くなく、通常のテレビの観視状況では1/60秒以内の光の変化は眼の中で積分すなわち平均化されて知覚されることである。この追従視と視覚の時間積分の相互作用を視線追従積分 (eye-tracing integration) と呼んでいる。視線追従積分の働きは意外に完全性があり、筆者らがホールド型ディスプレイで知覚される空間周波数応答 (MTF : Modulation Transfer Function) の劣化状況を評価した結果では、第4図に示すように、いろいろな動き速度に対して評価値が理論値とほぼ一致している⁵⁾。



第4図 ホールド型ディスプレイで表示された動画像において知覚されるMTF⁵⁾
 (点線：理論値、折れ線：評価値、 v_k ：動き速度(画素/フレーム))
 (視線追従積分の結果として、知覚されるMTFは動き速度をパラメータとする sinc関数 ($\sin x/x$) で劣化する)

一方、カメラの方でも動きぼやけは発生する。こちらの方は「蓄積ぼけ」としてテレビ技術の世界では古くから知られてきた。その発生原因は、視線追従積分とは逆に、カメラが動物体に追従しないで入射光を蓄積 (= 時間積分) してしまうことによる。しかし、結果として生じる空間周波数レスポンスの低下は、液晶テレビに対する視線追従積分と同じ数式で表される。

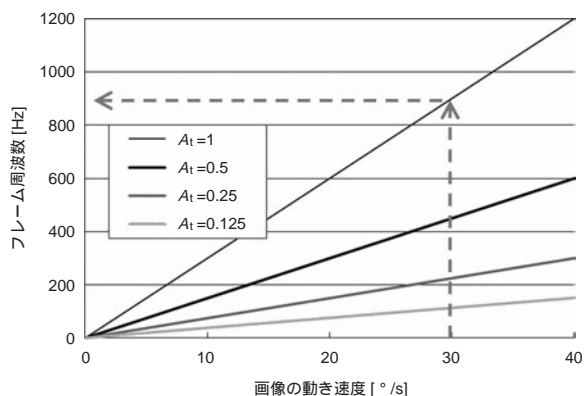
蓄積ぼけがテレビの世界で長らく見過ごされてきたことには幾つか原因が考えられるが、その1つが、従来のブラウン管テレビでは動きぼやけをまったく生じなかったことである。つまり、カメラの動きぼやけだけであれば動画像の画質劣化が許容限 (画質劣化がわかるが許容できる程度) 以内になるように、カメラワークを工夫してきたのである。しかし、薄型テレビの動きぼやけが蓄積ぼけに加わるとカバーしきれず、画質が許容限を割ってしまう。現在では、薄型テレビの普及と他の画質項目の性能が向上したことにより、これらの動きぼやけが重要な画質改善の対象になっている。

動きぼやけを改善する基本的な方法は、視覚での時間積分を間欠的にする方法と、映像機器のフレーム周波数を上げる方法の2つである。前者は、具体的に言えば、カメラでは蓄積時間が1/60秒より短くなるようシャッターを入れることである。ディスプレイでは表示光の持続時間を1/60秒よりも短くすることであり、1フレームごとに黒画像を挿入表示すること、あるいはバックライトを点滅または走査することで実現されている。

しかし、間欠的な手法はそのトレードオフとして、ストロボ効果やジャダー、大面積フリッカと言った別の画質妨害を生じやすく、それだけに頼ることはできない。フレーム周波数を上げることについてはこのような画質的な副作用はないので、総合的に高画質化を図るためにはどうしてもフレーム周波数をある程度上げる必要がある。このため、最近、表示フレーム周波数が120 Hz、240 Hzといった高速表示の液晶テレビが製品化されている。

ではどのくらいフレーム周波数を上げれば十分であるのか、第5図は、「ハイビジョンにおいて、そのシステム限界である解像度1080本まで有効な空間周波数レスポンスをもつこと (レスポンスがゼロにならないこと、1080本でちょうどゼロ)」という条件に対して、求められるフレーム周波数を試算したものである⁶⁾。図の縦軸が所要フレーム数であり、横軸は画像の動き速度を観視者から見た動きの画角として ($^{\circ}/s$) の単位で表したものである。図内のパラメータ A_t は時間開口率、つまり前記の間欠的な手法により減じられた有効な蓄積時間もしくは表示光持続時間の1フレーム周期に対する割合である。

図において、ひとつの目安は、動き速度 $30^{\circ}/s$ に対する値である。これは、眼球の随従運動の限界が $30^{\circ}/s$ とされていることによる⁷⁾。つまり、究極の高画質をねらうのであれば、少なくとも動き速度 $30^{\circ}/s$ までを対象に含めな



第5図 所要フレーム周波数の例⁶⁾
 (A_t : 時間開口率)
 (条件 : ハイビジョンにおいて解像度1080本まで有効なレスポンスをもつこと)

ければならないと考えられる。

図から、動き速度 $30^\circ/s$ に対する値を読むと、間欠的な手法を使用しない場合 ($A_t = 1$) では、なんと900 Hzという極めて高いフレーム周波数が必要になる。現行の60 Hzの15倍である。映像システムや機器の設計にかかわったことがある方なら、その大変さを理解していただけるはずである。フレーム周波数はデバイスや回路におけるほとんどすべての動作周波数の基本数であり、これを2倍、4倍と上げていくことはかなりの困難を伴う。一般に動作周波数が増えるほど消費電力も増加するから、これは高効率化・省電力化にとってもマイナスである。間欠的な手法を併用すれば所要フレーム周波数を下げられるが、前記のように、間欠的な手法だけに頼るわけにはいかない。また、カメラでは、電子的に（機械シャッターではなく）間欠的な手法を用いることはフレーム周波数を上げることとほとんど同等の技術的困難性があると聞いている。

フレーム周波数900 Hzが実用的に実現困難であるとするれば、何らかの現実的な妥協を図る必要があるが、筆者は、妥協点を「動画質の劣化を許容限以内にとどめる」という条件にすれば、所要フレーム周波数は、第5図の4割程度になることも求めた⁶⁾。

一方、厳しい利用者の観点から言えば、第5図はまだ生ぬるい。そもそも、図を求めた（1080本でちょうどレスポンスゼロ）などという条件は、プロのユーザーに物足りないと言われても仕方のない面もある。また、人間は眼球運動だけで動物体を追従しているわけではない。速い動きに対しては頭部や体の回転も動員して動きに追従している。眼球運動に頭部運動や体の運動が加わったら、対象としなければならない動き速度と所要フレーム周波数はどこまでになるのか、筆者はまだ試算したことがない。

例えばドライブやスキーを楽しんでいるときのように、眼の前や横を動きばやけのない物体が高速で通り過ぎていく爽快感は一体いくらのフレーム周波数があれば十分に得られるのか、そしてそれはいつ実現できるのか、今後の高画質技術の進展に期待したい。

5 むすび

よりきれいな映像を見たいというのは人間の基本的欲求であり、より高画質な映像機器が利用者に求められ、選択されていくのは今後も変わらないと考えられる。高画質技術はいつの時代にも必要な映像の基本技術である。現在、日本の高画質技術が世界トップレベルにあることは疑いがないが、今後も日本のテレビは世界で一番高画質と誇り続けられるよう、高画質技術の研究開発をぜひ積極的に進めていってほしい。

また、本稿でも述べたように、今のテレビは従来よりも高画質になっただけであって、われわれの眼の能力レベルにはまだ達していない。Televisionがその言葉通り「遠くを見る」ものであるとすれば、われわれはテレビを通してまだまだ真の意味で遠くを見られていないのである。高画質技術が今後さらに進歩し、家庭のテレビで本当に遠く離れた場所や時間の光景をありのままに見られる日が来ることを期待してやまない。

参考文献

- 1) 超臨場感コミュニケーション産学官フォーラム (URCF) パンフレット <http://www.scats.or.jp/urcf/img/brochure-j.pdf> (参照2010.12.5).
- 2) L. Spillman, et al. : Visual Perception (Academic Press) p.89 (1990).
- 3) 窪田悟 他 : 家庭におけるテレビの観視条件 映像情報メディア学会誌 60, No.4, pp.597-603 (2006).
- 4) T. Kurita : Moving picture quality improvement for hold-type AM-LCDs. SID '01, 35.1, pp.986-989 (2001).
- 5) T. Kurita, et al. : Consideration on perceived MTF of hold type display for moving images. IDW '98, 3D3-4, pp.823-826 (1998).
- 6) 栗田泰市郎 : ホールド型ディスプレイを用いる映像システムの動画質改善に関する一検討 映像情報メディア学会誌 64, No.7, pp.1054-1061 (2010).
- 7) 大串健吾 他 : 画質と音質の評価技術 (テレビジョン学会編) (昭晃堂) p.103 (1991).

《プロフィール》

栗田 泰市郎 (くりた たいいちろう)

1978 慶應義塾大学 工学部卒業

1980 慶應義塾大学大学院 修士課程修了,
日本放送協会入局

1984-2000 日本放送協会 放送技術研究所
テレビ方式研究部 研究員 / 主任研究員

1991 慶應義塾大学 工学博士

1993-2000 電気通信大学大学院
情報システム学研究科 客員助教授

2000-2006 日本放送協会 放送技術研究所 (表示・光デバイス) 副部長 / 主任研究員

2006-2009 日本放送協会 放送技術研究所 (材料・デバイス) 部長

2009-現在 現職

専門技術分野:

テレビシステムおよび薄型ディスプレイの画質関連技術

主な著書:

情報メディアへのディスプレイの応用 (共編著)
(共立出版, 2001)

映像情報メディア工学大事典 技術編 第2部門情報ディスプレイ (部門主任) (オーム社, 2010)