《2》 超臨場感技術の基礎

《2-2》 超高精細映像

[正会員] 西田 幸博[†], [正会員] 山下 誉行[†]

キーワード 超高精細映像, 臨場感, 実物感

1 ま え が き

画面の広視野化・大型化によって高い臨場感を提供しようとする映像システムが出現しつつある。画面の広視野化・大型化は必然的に映像の高精細化を必要とする。本稿では、超高精細映像の映像パラメータと心理物理的效果や要求条件との関係、超高精細映像システムの国際標準化動向、そして、デバイスや機器開発の動向について述べる。

2 映像パラメータ

映像システムを特徴付ける映像パラメータには、空間解像度、時間解像度、階調、色がある。これらのパラメータは、心理物理的效果との関係や要求条件に基づいて最適な値になるようにシステム設計がなされる。

2.1 空間解像度

高臨場感映像システムの空間解像度は、臨場感が得られる視野角(画面を見込む角度)と角解像度(視野角あたりの解像度)に基づいて検討された。

ハイビジョンの画面は、臨場感が視角30°辺りから向上し始め、また、画面アスペクト比5:3~6:3で最大となるという、心理物理実験の結果に基づいて設計された。画面高の3倍の視距離(視角30°)で、視力1.0の人が、走査線構造や画素構造を検知できないという条件を満たす角解像度30cpd(cycles per degree)(60画素/°)という値に基づいて、ハイビジョンの画素数は1,920×1,080とされた。

視野角がさらに大きくなると、臨場感はさらに向上する。臨場感と視野角の関係を主観評価実験(被験者間計画)で求めた結果を図1に示す¹⁾。それぞれの参加者は、いずれか1種類の視野角についてのみ評価し、評点は0(まったく臨場感がない)から10(非常に臨場感がある)のスケールで採点した。この実験により、視野角が大きくなるにしたがって臨場感は増加するが、80°~100°で飽和する傾向が明らかとなった。この他、視野角が異なる映像を提示した時の平衡機能の応答の違いを臨場感の指標とし、視野角と重心動

図1 水平視角と臨場感

図2 解像度と実物感

揺の関係を測定する実験も行った²⁾。表示画像が現実に近いほど姿勢制御が安定し、重心動揺が小さくなると想定される。実験の結果、視野角が広がるにつれて重心動揺が小さくなり、76.9°以上で人間の平衡機能が飽和傾向であることが示された。これらの結果から、超高臨場感映像システムでは視野角80°程度を実現することが目標となる。

空間解像度は臨場感の要因である実物感(被写体映像が実物に近い感じ)とも関係する。実物感と角解像度との関係を主観的に評価した結果を図2に示す³⁾。角解像度の異なる映像と実被写体を提示し、実物に近く見える方を選択させる一対比較法によって評価した。実験では、両眼視差、

[†] NHK 放送技術研究所

"Extremely High Resolution Video" by Yukihiro Nishida and Takayuki Yamashita (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo)

図3 動きぼやけ許容限に対応する動き速度と時間開口

画像の大きさ、輝度、色など、解像度以外の要因が実験結果に影響しないように厳密に実験装置を構成し、必要な信号処理を施した。実験の結果、角解像度が増すにつれて実物感が増加し、約60cpd (120画素/°) 以上の解像度では実物感の増加が緩やかになることがわかった。

臨場感にはさまざまな要素が含まれるが、上記の視野角対臨場感の実験は「その場に居るかのような感じ」を、角解像度対実物感の実験は「そこに物が在るかのような感じ」をそれぞれ評価したものとと言える。超高臨場感映像システムには、これらの要件を満足することが望まれる。

2.2 時間解像度

被写体やカメラの動きが滑らかに再現され、動きに関する不自然さや妨害のないことも臨場感の大切な要素である。すなわち、高臨場感映像システムを実現するためには、大画面映像や超高精細映像に適した時間解像度の検討も必要である。時間解像度に関する動画像の画質劣化として、動きぼやけ、ストロボ効果、フリッカーがある。

動きぼやけには、カメラの撮像素子で一定時間光を蓄積することにより生じる蓄積ぼやけと、ディスプレイのホールド型表示での追従視と視覚の時間積分効果による動きぼやけがある。いずれも、蓄積時間(時間開口)が空間周波数レスポンス(動的レスポンス)に影響し、動き速度の増加とともにsinc関数にしたがって低下する。カメラとディスプレイのカスケード接続を想定したシステムの動的レスポンスの改善のためには、時間開口を小さくして両者の動的レスポンスの改善が必要である。動きぼやけに関するいくつかの画質評価結果が報告されている。静止画と比較した動画蓄積ぼやけの評価結果⁴⁾から、動きぼやけの許容限を与える時間開口と被写体速度の関係を図3に示す。ハイビジョン番組での被写体速度分布⁵⁾を考慮して30°/sを想定すると、1/200~1/300秒以下の時間開口とする必要がある。

時間開口は、フレーム周波数を高くすることによって短くできるが、カメラ側のシャッターやディスプレイ側の黒挿入などによっても短くできる。しかし、動きが不連続で多

図4 視角と臨界融合周波数 (CFF)

重像のように見えるストロボ効果と呼ばれる画質劣化が生じる。時間開口1/240秒の場合のフレーム周波数とストロボ効果に関する画質評価結果⁶⁾によると、フレーム周波数100~120Hzが許容限である。

フリッカ知覚は周辺視で敏感であるので、大画面化によって視野角が大きくなると、フリッカが検知されやすくなる。また、ホールド型表示のホールド時間を短くすることも、フリッカの知覚に影響する。時間開口率30%における視角30°と100°の臨界融合周波数(Critical Fusion Frequency: CFF)を図4に示す⁷⁾。視野角が大きくなるとCFFが高くなり、広視野表示で50%以下の開口率とする場合は80Hz以上のフレーム周波数が必要である。

これらのほか、広視野映像では追従視できる範囲が広がるため動体視力が向上し、広視野での観視を前提とするシステムでは、より高いフレーム周波数が必要となる可能性がある⁸⁾。

2.3 階調

高臨場感や高実物感の再現のためには、階調の不連続性が視覚的に検知されないことが求められる。デジタルシネマのビット数は、Bartenの輝度弁別閾値⁹⁾に基づく理論検討と評価実験により定められた¹⁰⁾。デジタルシネマの検討では、映画館のような暗環境が想定されたが、テレビジョンでは明環境あるいは薄明環境を想定する必要がある。薄明環境での輝度弁別閾と10~12ビット精度のべき関数の表示伝達関数の関係を図5に示す。表示伝達関数が輝度弁別閾よりも下にあれば階調の不連続性は検知されない。したがって、11ビット以上が必要である。

2.4 色

被写体の色や質感、光沢などを忠実に再現するための研究が進められている。ナチュラルビジョンでは、色をスペクトル情報として扱い、マルチスペクトル画像入力と多原色表示を採用している¹¹⁾。デジタルシネマの配信マスターDCDM (Digital Cinema Distribution Master) では、将来の拡張性を考慮してデバイスに依存しないCIE XYZによる表色系を採用しつつ、現在のディスプレイ技術に基づく基

図5 コントラスト感度とビット数

準ディスプレイを規定している¹²⁾。次世代テレビジョンとして研究開発が進められているスーパーハイビジョンでは、HDTVなど既存の主要映像システムの色域を包含しつつ実在するほぼすべての表面色を表現するために、スペクトル軌跡上にRGB三原色をもつ広色域表色系が提案されている¹³⁾。図6に、ポインタカラーと各種の映像システムの三原色を、CIE xy色度図に示す。

3 国際標準化動向

超高精細映像の国際標準化が、ITU-RやSMPTEで行われている。表1に、ITU-RおよびSMPTEで規定あるいは審議されている超高精細映像の基本パラメータを示す。

ITU-Rでは、HDTVを超える超高精細映像全般をEHRI (Extremely High Resolution Imagery: 超高解像度映像) と称し、そのテレビジョン応用をUHDTV (Ultra High Definition Television) としている。別のカテゴリーとして、LSDI (Large Screen Digital Imagery: 大画面デジタル映像) があり、このうち解像度がHDTVを超えるものを、拡張LSDIと称している。EHRIのITU-R勧告BT.1201-1では、EHRIの解像度にHDTVの解像度 $1,920 \times 1,080$ の整数倍の関係を求めている¹⁴⁾。拡張LSDIのITU-R勧告BT.1769では、 $3,840 \times 2,160$ と $7,680 \times 4,320$ の二つのシステムが規定されて

図6 ポインタカラーと各種映像システムの三原色 (口絵カラー参照)

いる¹⁵⁾。UHDTVについては、ITU-R勧告作成に向けた審議が行われており、勧告化に向けた作業文書が作成されている。2010年10月会合では、空間解像度 $3,840 \times 2,160$ および $7,680 \times 4,320$ 、フレーム周波数24, 25, 30, 50, 60Hz (24, 30, 60Hzはその1000/1001倍を含む) が記載され、より高いフレーム周波数については、研究中の旨が付記されている。カラリメトリについては、単波長光源630nm, 532nm, 467nmに相当する三原色色度点と、基準白色D65が記載されている。

SMPTEでは、デジタルシネマの配信マスタであるDCDMとUHDTVの映像フォーマットが規格化されている。DCDMの映像信号は、空間解像度が $4,096 \times 2,160$ と $2,048 \times 1,080$ が規定されている^{16) 17)}。UHDTVについては、SMPTE 2036-1にUHDTV1 ($3,840 \times 2,160$) とUHDTV2 ($7,680 \times 4,320$) が規定されている¹⁸⁾。

4 デバイス・機器開発の動向

4.1 撮 像

(1) 4K ($3,840 \times 2,160$ 含む) までの撮像

ハイビジョンを超える解像度の撮影機材の開発について

表1 超高精細映像の基本パラメータ

標準化機関	ITU-R		SMPTE	
勧告・規格	BT.1769	審議中	2036-1	428-1, 428-11
名 称	拡張LSDI	UHDTV	UHDTV	DCDM
空間解像度 (水平×垂直)	$3,840 \times 2,160$ $7,680 \times 4,320$		UHDTV1: $3,840 \times 2,160$ UHDTV2: $7,680 \times 4,320$	$4,096 \times 2,160$ *1
フレーム周波数 (Hz)	24#, 25, 30#, 50, 60#*2		24#, 25, 30#, 50, 60#	24, 25, 30

*1: $2,048 \times 1,080$ のフォーマットも規定されている。

*2: UHDTVの高フレーム周波数は研究中の旨が付記されている。

1000/1001倍を含む。

図7 画素ずらし技術による高解像度化の仕組み（口絵カラー参照）

は、1996年に、200万画素級撮像素子を用いて、画素ずらし技術によって構成した走査線2,000本級撮像装置の試作¹⁹⁾から始まったと考えられる。その後、200万画素を超える撮像素子の試作が行われるようになり、1999年には、800万画素CCD²⁰⁾が試作され、いわゆる「4K」の画素数に匹敵する画像を、1枚の素子で撮像できるようになった。これら800万画素級のセンサを用いた、4K×2K相当の3板式カラーカメラも開発された^{21) 22)}。

その後、画素内増幅型構造を持ったCMOSイメージセンサの低ノイズ化が進み、多画素化が急速に進展した。多画素動画センサの開発において、CMOSが有利な点として、A/Dコンバータのオンチップ化や、カラム並列出力構造が容易なことなどがあげられる。この利点を活かして2001年に、400万²³⁾、2003年に800万と多画素化が一気に進捗した。安価な4K CMOSカメラが発表²⁴⁾され、記録、編集環境の充実が進んだことで、各社から実用的な4Kカメラの開発が報告されている^{25) 26)}。

民生機においても、60フレーム/sでの撮影が可能な600万画素級デジタルカメラが開発²⁷⁾されている。

また、2/3インチ光学系の4K CMOS撮像素子²⁸⁾や、1.2億画素CMOS撮像素子²⁹⁾が試作されるなど、撮像における高精細化は留まるところがない。

(2) スーパーハイビジョン (SHV: Super Hi-Vision)

SHVシステムの開発当初、3,300万画素の映像を撮影するため、前述の800万画素級撮像素子を4枚用いて、画素ずらし技術により撮像装置を試作した^{30) 31)}。画素ずらし技術による高解像度化の仕組みを図7に示す。撮像素子4枚のうち、緑(G)に2枚を、青(B)と赤(R)にそれぞれ1枚を割当てる。入射光学像に対して、互いの撮像素子の画素位置がベイヤー配列に準ずるよう、水平・垂直に半画素ずつずらして配置する。G信号に注目すると、もとの撮像素子が有するサンプリング位置の間に、もう一方の撮像素子のサンプリング位置ができるため、垂直および水平のサンプリング点が2倍となり、高解像度映像が得られる。

2010年に、さらに小型化した画素ずらし方式SHVカメラを開発した³²⁾ (図8)。従来40kgあったカメラヘッドを、内部の回路構成を見直すことにより20kgまで軽量化し、機動

図8 小型化した画素ずらし方式SHVカメラ（口絵カラー参照）

図9 フル解像度SHVカラーカメラ（口絵カラー参照）

的でより実用的なものとなった。

これに対し同年、画素ずらし技術を用いることなく、R、G、BともにSHV規格の画素数を撮影できるフル解像度カラーカメラを開発した³³⁾ (図9)。本カメラには、2005年から開発を進めていた3,300万画素CMOS撮像素子³⁴⁾を使用した。画素のサイズは $3.8\mu\text{m}$ 、画素構造は3トランジスタとした。素子出力の総データレートは24Gbpsに及ぶが、LVDS 16並列で出力し、1出力あたりの出力周波数を148.5MHzまで抑制した。ナイキスト周波数でのMTFは20%以上のレスポンスが得られることを確認した。

このカメラは光学フォーマットが2.5インチと大型で、かつ3板式であるため、フランジバック長が長くなり、相対的にレンズ胴長も長く、カメラも大型化する。

制作現場からは、さらに小型で低消費電力のSHVカメラを要求されている。これに応じるべく、3,300万画素CMOS撮像素子にカラーフィルタを付け、1枚の撮像素子でカラー映像が撮影できる、単板式撮像装置の試作³⁵⁾を開始した。単板式により35mmスチル用レンズを使用することも可能となり、小型化と併せて、レンズバリエーションの拡張も可能である。

4.2 表示

(1) 4K (3,840×2,160含む) までの表示

4Kまでの画素数を持つ表示装置の動向について直視型と投射型に分けて紹介する。

直視型装置では、2000年に東芝が20.8型QUXGA (3,200×2,400画素)、2001年にIBMが22.2型QUXGA-W (3,840×2,400画素)のLCDを発表した。いずれも当初PCモニタを主な対象としたものであり、動特性はよくなかったものの、デジタルシネマやスーパーハイビジョンの番組制作が進む中、これに応じてフレームレートの向上が図られ、48Hz動作に対応する製品が商品化された。その後、2008年にはSamsungから4K解像度にて120Hz駆動対応の82型LCDの試作が発表されている。

PDPではパナソニックが2008年に150型、2009年に105型の4K画素のディスプレイを開発した。2010年にはパナソニックとNHKの共同開発により58型4K PDPを発表した。

投射型では、2000年にJVCが786万画素(3,840×2,048画素)のLCOS (Liquid Crystal on Silicon) デバイスを使用したプロジェクタを発表し、2009年にはEPSONからHTPS (High Temperature Poly-Silicon) を用いたプロジェクタの開発が報告されている。

(2) SHV

2002年の開発当初、SHV解像度対応の表示装置は撮像と同様、画素ずらしを用いて開発された。800万画素級のLCOS素子を4枚用いて、等価的にSHVの解像度を得るものである。撮像装置と異なる点として、G2チャンネル出力とRおよびBチャンネル出力の2台のプロジェクタユニットを用いて表示システムを構成した³⁶⁾。スクリーン上で2台のユニットの光出力が位置ずれなく重ねあわされるように、コンバーゼンス補正装置も開発された³⁷⁾。2008年にJVCが3,300万画素に対応した1.75型LCOS素子を開発し³⁸⁾、同素子を用いてNHKは、SHVフル解像度プロジェクタを開発した。このプロジェクタは、1台のユニットで構成され、さらに投射レンズなどの光学系素子を改善することで、高輝度化(光出力10,000 lumen)と広ダイナミックレンジ化(5,500:1)を実現した。

3,300万画素の表示素子1枚と800万画素級の表示素子3枚を組合せることで、SHVフル解像度表示を実現するプロジェクタも開発された。図10にブロック図を示す。これは、4Kプロジェクタのカラー出力に対して、3,300万画素素子によりさらに変調をかける2重変調方式と呼ばれるもので、ダイナミックレンジ110万:1が実現された³⁹⁾。

さらに、装置の小型化と低廉化を目指し、3枚の4K LCOS素子と画素シフトデバイスを組合せたプロジェクタを2011年に開発した。R、G、B各色とも60Hz単位で斜め方向に0.5画素位置をずらして表示することで、水平および垂直のサンプリング点が2倍に増すため、等価的にSHV解像度の表示が可能になる。従来の4Kプロジェクタに画素シフ

図10 SHV広ダイナミックレンジプロジェクタブロック図

トデバイスを加えただけのシンプルな構造を取るため、装置寸法は同等のまま、高解像度映像の表示が可能である。

5 む す び

高臨場感・高質感を目指した超高精細映像システムの映像パラメータと、その国際標準化およびデバイス・機器開発の動向を概観した。

映像パラメータを決定するためには、臨場感、実物感、質感などを高めるためのパラメータ選定と、これらを阻害する動きぼやけ、ストロボ効果、フリッカー、偽輪郭などの画質劣化を低減するためのパラメータ選定がある。さらに、実現性や運用性なども考慮する必要がある。

超高精細化によって、扱う情報量は格段に増加する。すでに3,300万画素・60フレーム/sのカメラやディスプレイが開発され、今後は、その小型化、高感度化、高フレームレート化などが課題である。超高精細映像を撮像、記録・伝送、表示するための一層の技術開発が期待される。

(2011年2月7日受付)

〔文 献〕

- 1) K. Masaoka, et al.: "Contrast Effect in Evaluating the Sense of Presence for Wide Displays", Journal of the SID, 14, pp.785-791 (2006)
- 2) M. Emoto, et al.: "Viewing Angle Effects from Wide Field Video Projection Images on the Human Equilibrium", Displays, 26, 1, pp.9-14 (2005)
- 3) 正岡ほか: "実物との比較による高解像度映像の実物感", 映情学技報, 35, 16, pp.133-135 (Mar. 2011)
- 4) 大村ほか: "静止画との比較による動画蓄積ぼやけの評価", 2008年信学総全大, DS-3-3 (2008)
- 5) T. Fujine, et al.: "Real-Life In-Home Viewing Conditions for Flat Panel Displays and Statistical Characteristics of Broadcast Video Signal", Jpn. J. Appl. Phys., 46, 3B, pp.1358-1362 (2007)
- 6) 大村ほか: "撮像のフレーム周波数・開口率をパラメータとしたジャーキネスの主観評価", 信学技報, HI2009-3, pp.7-11 (2009)
- 7) M. Emoto, et al.: "Flicker Perception for Wide-Field-of-View and Hold-Type Image Presentations", IDW'09, VHF6-3L, pp.1233-1234 (2009)
- 8) 江本ほか: "広視野映像システムに必要なフレーム周波数に関する検

- 討－横方向動体視力の視角依存性－”，2008年映情学年次大，22-6 (2008)
- 9) P.G.J. Barten: "Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality", SPIE Optical Engineering Press, Washington, USA (1999)
- 10) M. Cowan, et al.: "Contrast Sensitivity Experiment to Determine the Bit Depth for Digital Cinema", SMPTE Motion Imaging J., 113, pp.281-292 (2004)
- 11) M. Yamaguchi, et al.: "Natural Vision: Visual Telecommunication Based on Multispectral Technology", IDW '00, 3D2-1, pp.1115-1118 (2000)
- 12) SMPTE EG 432-1-2007: "Digital Source Processing -Color Processing for D-Cinema" (2007)
- 13) K. Masaoka, et al.: "Design of Primaries for a Wide-Gamut Television Colorimetry", IEEE Trans. Broadcast., 56, 4, pp.452-457 (2010)
- 14) ITU-R, Recommendation BT.1201-1: "Extremely High Resolution Imagery" (2004)
- 15) ITU-R, Recommendation BT.1769: "Parameter Values for an Expanded Hierarchy of LSDI Image Formats for Production and International Programme Exchange" (2006)
- 16) SMPTE 428-1-2006: "D-Cinema Distribution Master - Image Characteristics" (2006)
- 17) SMPTE 428-11-2009: "Additional Frame Rates for D-Cinema" (2009)
- 18) SMPTE 2036-1-2009: "Ultra High Definition Television - Image Parameter Values for Program Production" (2009)
- 19) 三谷ほか： “4板撮像方式を用いた2000ライン動画撮像実験装置”，テレビ誌，50，2，295-301 (Feb. 1996)
- 20) C. Smith, et al. : “An 8MCCD for an Ultra High Definition TV Camera”, IEEE Workshop on CCD and Advanced Image Sensors (1999)
- 21) K. Mitani, et al. : “Experimental Ultrahigh-Definition Color Camera System with Three 8M-pixel CCDs”, SMPTE J. 111, pp.148-153 (2002)
- 22) 田中ほか： “3板式4k*2k CMOSカラーカメラの開発”，2001年信学総大，D-11-69 (2001)
- 23) A. Krymski, et al.: "A high-speed, 240 frames per second, 4 megapixel CMOS sensor", Proc. 2001 IEEE Workshop on CCDs and Advanced Image Sensors (2001)
- 24) <http://www.red.com/products/red-one>
- 25) <http://www.jvc-victor.co.jp/pro/video/ky-f4000/index.html>
- 26) <http://www.viewplus.co.jp/product/07/03.html>
- 27) 小関ほか： “1/1.8型640万画素60fps CMOSイメージセンサ”，映情学技報，30，25，pp.21-24 (2006)
- 28) 石井ほか： “2.2/3インチ単板カラー4K2K CMOSイメージセンサ:画素数・フレーム速度のRGB適応読出しによる高感度化”，映情学技報，34，16，pp.39-42 (2010)
- 29) <http://web.canon.jp/pressrelease/2010/p2010aug24j.html>
- 30) 山下ほか： “走査線4000本級4板式超高精細動画カメラ”，映情学誌，58，3，pp.383-391 (Mar. 2004)
- 31) H. Shimamoto, et al.: "An 8k x 4k Ultrahigh-Definition Color Video Camera with 8M-Pixel CMOS Imager", SMPTE J. 114 7/8, pp.260-268 (June 2005)
- 32) M. Abe, et al.: "Development of Super Hi-Vision Compact Camera and Recording System", SMPTE 2010: Annual Technical Conference (2010)
- 33) T. Yamashita, et al.: "Experimental color video capturing equipment with three 33-megapixel CMOS image sensors", IS&T/SPIE 21st Annual Symposium, 72490H (Jan. 2009)
- 34) S. Huang, et al.: "A 2.5 inch, 33Mpixel, 60 fps CMOS Image Sensor for UHDTV Application", IISW 2009, Session 10-6 (2009)
- 35) 船津ほか： “3,300万画素CMOS撮像素子を用いたスーパーハイビジョン単板カラー撮像実験”，映情学技報，34，16，pp.43-46 (Mar. 2010)
- 36) M. Kanazawa, et al.: "An ultrahigh-definition display Using the pixel-offset method", J. Int. SID 12, 1, pp.93-104 (Jan. 2004)
- 37) 日下部ほか： “超高精細映像表示システムのコンバーゼンス誤差と素子位置調整の自動化”，映情学誌，60，2，pp.234-241 (Feb. 2006)
- 38) T. Nagoya, et al.: "The D-ILA Device for the World's Highest Definition (8K4K) Projection System", LAD2-4, IDW2008 (2008)
- 39) Y. Kusakabe, et al.: "A high-dynamic-range and high-resolution projector with dual modulation", IS&T/SPIE 21st Annual Symposium, 72410Q (Jan. 2009)

にしだ ゆきひろ
西田 幸博 1985年，慶應義塾大学大学院工学研究科修士課程修了。同年，NHK入局。甲府放送局，放送技術研究所，技術局を経て，現在，放送技術研究所テレビ方式研究部主任研究員。超高精細映像システムの研究開発，国内外の標準化活動に従事。ITU-R SG6副議長，同WP6B議長。正会員。

やました たかゆき
山下 誉行 1995年，京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科博士前期課程修了。同年，NHK入局。京都放送局を経て，現在，放送技術研究所テレビ方式研究部主任研究員。超高精細映像システム，立体映像撮像システムの研究開発に従事。正会員。