《2》
撮像と表示系の連携による高画質化

《2-1》
高フレームレート映像システムの動画質改善効果

〔正会員〕江 本 正 喜[†]

キーワード フレームレート フレーム周波数 動画質 主観評価 スーパーハイビジョン

1 ま え が き

近年、映像情報メディアを支える各種要素技術の長足の進歩により、広視野化、高精細化、立体化された新たな映像システムの試みや一部実用化がなされている。映像システムの広視野化は特に、高い臨場感が得られることから^{1) 2)}、High Definition TV (HDTV) の空間解像度を超越する新たな広視野映像システムの提案もなされ³⁾、その試作や実用にに向けた取組みが進められている^{4) 5)}。

一方、2011年7月の地上デジタル放送への移行に伴い、受像機の買い換え需要から、液晶やプラズマディスプレイパネルを用いたフラットパネル大画面テレビジョンが広範に普及してきている。

これらの動向に伴い、広視野映像システムやフラットパネル大画面テレビジョン特有の動画質低下問題が指摘されるようになってきている。まず、広視野映像システムでは、広視野化に充分見合うだけの空間解像度増加により、空間周波数特性を低下させないよう保つ努力が行われている。その結果、静止画質を低下させることなく、観視者が感じる臨場感の増強などの効果が確認されている。しかし、一方の時間解像度(フレームレート)については、インタレースからプログレッシブへの変更はあるものの、現段階では従来のテレビジョンシステムを踏襲した形となっており、広視野映像システムとしてふさわしいフレームレートであるかどうかは未だ不明である。

一方、地上デジタル放送への移行に伴う買い換え需要の主演となっている大画面フラットパネルディスプレイは、従来のCathode Ray Tube (CRT) と表示原理が異なるため、動画質低下が懸念される。すなわち、CRTではある画素が走査された瞬間に発光し、蛍光材料で決まる減衰特性にしたがって速やかに減衰するため、発光期間は2ms程度の一瞬であり、1フレーム内でのその他の期間は発光していない。このようなディスプレイは、インパルス型とよばれる。

一方、典型的な液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) では、ある画素が走査された瞬間に発光レベルがある応答時間を持って変化し(ここで遅い応答時間は動画質低下の原因となるが、本稿では直接は扱わない)、1フレーム後の次の走査時までその発光レベルを保持するものである。つまり、1フレーム内で走査された瞬間以外の期間も発光し続けている。このようなディスプレイは、ホールド型とよばれる。

ホールド型ディスプレイでは、画面上で動いている被写体を眼球が追従する場合に、動画ばやけが知覚されることがある。特に、スタッフロールなど字幕がスクロールする際に動画ばやけが観察者に容易に知覚される。これは、次のような機序による。いま、レーザポインタのように充分に小さい光点を投影できる、床に固定された装置があるとすると、この装置で、網膜上の一つの視細胞を照らすことを考える。眼球が動いていなければ、網膜上の一つの視細胞を照らすことは容易である。しかし、眼球が動いている場合には、光点が隣の視細胞を照らす前に消灯しなければ、複数の視細胞を照らすこととなる。このとき、観察者は点ではなく線を知覚することになる。投影装置をディスプレイの1画素と考えれば、眼球運動時のホールド型ディスプレイでの動画ばやけが理解できるであろう。

ホールド型に起因する動画質低下は、被写体の動きが速くなるほど顕著になることもあり、特に大画面LCDにおいて、さまざまな動画質改善技術が実用化されている^{6) ~ 8)}。これらの中には時間軸方向で映像補間を行うことにより、擬似的に120Hzや240Hzといった高フレームレートでの提示を行うものがある^{9) 10)}。しかし、時間軸方向の映像補間は、放送局から送られてくる情報には含まれないフレーム間の映像情報を推定しなければならない。したがって、映像が平行移動しているような場合には功を奏するが、複雑な動きを含む絵柄では正しい映像補間は非常に困難である。

さらに、このような高フレームレート化は、映像システム側で行うか、受像機側のみで行えば充分であるかなどの議論は、未だなされていない。映像システムでのフレームレート増加は撮像、記録、伝送帯域の増加に直結し、システム全体に影響が及ぶこととなる。

[†] NHK 放送技術研究所

"Improvement of Image Quality through Cooperation of Imaging and Display; Improvement in Moving Picture Quality by High Frame Rate Imaging Systems " by Masaki Emoto (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo)

従来、映像システムを高フレームレート化したときの動画画質向上の程度も定量化されている例は少ない。黒木らは、1000 frames per second (fps) の高フレームレートカメラで撮像した画像とコンピュータグラフィックスを、480Hz駆動の21インチCRTを用いて提示し、さまざまなフレームレート動画画像がホールド型ディスプレイに表示された状態の模擬を行った。それらの動画画質の主観評価実験より、フレームレートが60fpsから120fpsに倍増すると画質が向上すること、動画画質は240fpsあたりでおおむね飽和するという結果を報告している¹¹⁾。

以上より、われわれは、撮像から表示までの放送システム全体を高フレームレート化する効果を検証するため、高フレームレート映像システムでの動画画質改善効果を定量化することを試みた。その際、将来の広視野映像システムが家庭に導入される際には、100インチ程度の大画面となることを想定した。ただし、本来ならば想定される広視野映像システムでの実験が望ましいが、実験装置の制約から、今回はHDTV空間解像度で60fps、120fps、240fpsの映像提示を行った。

2 実験方法

実験映像の撮像には、Nac社製高フレームレートカメラHD-HS300Pを用い、運動競技と遊園地の動画画像シーケンス12種類をそれぞれ60fps、120fps、240fpsでシャッタなしで撮像した。

映像記録にはアストロデザイン社製ディスクレコーダHR-7401を用い、非圧縮で記録した。

映像再生には計測技術研究所社製ビデオディスクレコーダUDR20Sを用い、非圧縮、240fpsで再生した。

映像表示にはソニー社製4kプロジェクタSRX-S110の改造品を用い、240fps、HDTV空間解像度で表示した。このときのピーク輝度は一般家庭での画面輝度を想定して 270cd/m^2 に設定した。60fps表示では60fps撮像した映像を4フレーム連続で提示、120fps表示では120fps撮像した映像を2フレーム連続で提示、240fps表示では240fps撮像した映像を毎フレーム提示した。スクリーンは100インチの背面投射スクリーンを用いた。

動画画像の提示は、ITU-R勧告^{12) 13)}にしたがって次のように行った。まず、最初に何番目の評価かを示す番号を3秒間画面中央に提示した。次に、10～15秒程度の評価動画画像を、3秒間のグレーを挟んで繰り返して提示した。4秒間のグレーを提示した後、次の評価番号を提示し、次の評価映像へ移行した。提示の順序効果を相殺するため、動画画像の提示順は、実験参加者毎にランダム化した。

12種類の提示画像の内、60fpsの一例「ランナー」を図1に示す。また、撮像時の蓄積ばけの違いを表すため、図2に「ランナー」の60fps、120fps、240fpsの1フレームに含まれる標識の部分を示す。

図1 提示画像の例「ランナー」

図2 蓄積ばけの違い

実験参加者はインフォームドコンセントの得られた男性14名、女性55名の合計69名で、平均年齢は37.6歳、範囲は24歳から49歳であった。平均視力は1.38であった。

観視条件はHDTV標準観視条件に準拠した^{12) 13)}。観視距離は約370cmであった。また、観視姿勢は画面中心が実験参加者の目の高さに近くなるように立位とした。実験参加者へは、動いている部分の画質を5段階の評価語で評価するよう教示した。5段階の評価語は「非常によい」、「よい」、「普通」、「悪い」、「非常に悪い」であった。

得られたデータは順序尺度であり、そのままでは平均を取るなどの計算ができないので、分散分析を行うため、間隔尺度へ変換した¹⁴⁾。次に、フレームレートの差による評価画質の差があるかどうかを検討するため、実験参加者内要因をフレームレート3水準(60fps、120fps、240fps)とした重複測定分散分析を行った。さらに、どのフレームレート間に差があるかを検討するため、Helmert対比によってフレームレート3水準間の有意差を検出した。

3 結果

図3に動画画質の主観評価結果を示す。縦軸は間隔尺度に変換した評価値を12種類の動画画像で平均した評価値を、横軸はフレームレートを示す。エラーバーは±標準偏差を、**は有意差があることを示す。間隔尺度への変換の結果、評価カテゴリー「非常によい」、「よい」、「普通」、「悪い」、「非常に悪い」はそれぞれ間隔尺度5.28、4.18、3.16、2.11、1.0に相当した。また、間隔尺度変換された評価値は、60fpsと120fps間で0.46ランク、120fpsと240fps間で0.23ランクの差

図3 主観評価結果

であった。これより、フレームレートが高くなるにつれて、動画質の評価も上昇することがわかる。

次に、間隔尺度に変換した評価値を用いて、実験参加者内要因をフレームレート3水準 (60, 120, 240fps) とした重複測定分散分析を行った。球面性の仮定が成り立たなかったため、Huynh-Feldtの ϵ ($\epsilon = 0.65$) による自由度の補正を行い、フレームレートに有意な差が認められた ($F(1, 29) = 88.345, p < 0.0001$)。さらに、Helmert対比によって60fpsと120, 240fps間 ($F(1, 29) = 100.17, p < 0.0001$)、120fpsと240fps間 ($F(1, 29) = 35.572, p < 0.0001$) とともに有意差が認められた。

以上より、フレームレートが60fpsから120fpsに倍増すると、動画質は有意に0.46ランク改善すること、120fpsから240fpsに倍増すると、動画質は有意に0.23ランク改善することが明らかとなった。これより、フレームレートを60fpsから120fpsに倍増する動画質改善効果は、120fpsから240fpsに倍増するときよりも大きいことが明らかとなった。この結果は、黒木らの結果¹¹⁾と同様の傾向を示している。

4 む す び

本検討の結果、高フレームレート映像システムの動画質改善効果を定量化することができた。これは撮像時にシャッターなしの条件での検討であり、一般的には、速い動きの被写体の撮像ではシャッターが用いられる。30°/s程度までの被写体角速度を想定すると、シャッターを入れ、撮像の時間開口を1/200~1/300sec以下に制限することによって、動画質の向上が得られることが報告されている¹⁵⁾。この時、速い動きの被写体が不連続多重像に知覚されるストロボ効果が生じることもある。このストロボ効果に関する検討も行われており、フレームレート100Hz以上が必要であることが報告されている¹⁶⁾。

また、従来の映像システムにおける時間解像度決定の際には、観視条件にある前提を設け、フリッカ知覚を避けるために、光の点滅の周波数を高くしていった時に点滅を知

覚できなくなる限界の周波数である臨界融合周波数Critical Fusion Frequency, または、Critical Flicker Frequency (CFF) 特性が重要視された。NTSC方式に関しては、EIA (Electronic Industry Alliance) RS-170規格の前段階として行われた検討の一つにおいて、照度20Foot Candles程度まで、3:4アスペクトレシオのCRTを映像表示装置 (視角約13°) と想定した映像パラメータに関する検討が行われている¹⁷⁾。その結果、テレビジョンの場合、映画で用いられている24fpsではフリッカが避けられず、48fpsではflicker-freeが実現できるが、電源周波数と差があると、当時の技術では、電源脈流成分に起因する走査像の不安定性が懸念されたため、フィールド周波数は電源同期とすることが推奨された。HDTV方式の場合、標準観視条件では、3Hの視距離で約30°の視角となる。表示装置の輝度を150~200cd/m²程度と想定すると、視角±15°の範囲でフリッカが知覚されないためには、50Hzでは不十分であり、60Hzあれば充分であるとされている^{18) 19)}。

将来の大画面ディスプレイでは、視角が100°を超える可能性もあり、従来の値では、フリッカに敏感な周辺視野でフリッカが知覚される可能性がある。周辺視野での敏感さを示す例として、薬剤投与の特殊な状況下ではあるが、網膜偏心度約40°の最も敏感な視野部位では、100Hzを超えるフリッカでさえも知覚可能であることが示されている²⁰⁾。

また、従来に比較して、最近のフラットパネルディスプレイは輝度が上昇している。視距離が画面高の3倍、画面照度180 lxの時、好まれる輝度は240cd/m²程度であるとされる²¹⁾、近年のLCDでは、450cd/m²程度での表示が可能である。このような高輝度ではフリッカが知覚されやすいと考えられるので、高輝度でのフリッカ知覚特性を検討する必要がある。同時に、これら性能向上した大画面ディスプレイによる強い映像刺激強度は、観視者に光過敏反応を引き起こす危険性を増大させるので、フリッカを防止することは以前よりも重要性を増していると考えられる。

これらを受けて、スーパーハイビジョンを想定したフリッカ特性が検討されており、大画面でフリッカ知覚を避けるためには、約80Hzを超える周波数が必要であることが示されている^{22) 23)}。

近年の大画面フラットパネルディスプレイの広範な普及により、この他にも、ぶれ映像に対して映像酔いが生じる可能性も高くなっているなど、さまざまな変化が生じている中で、フリッカに関しては表だった問題となっていない。これは、市販受像機のインパルス型からホールド型デバイスへの移行により、従来は明滅するメディアであったテレビシステムは、明滅しないメディアに変化し、フリッカ問題が潜在化したことが原因である。しかし、動画質向上対策によるインパルス型ディスプレイへの回帰や、インパルス型またはそれに近い特性を有する他のディスプレイ方式の採用により、フリッカ問題が顕在化する可能性が残れ

ている。

大画面ディスプレイに適した、また、新たな映像システムの時間解像度(フレームレート)決定に際しては、他にも考慮すべき多くの要因がある。それらは、被写体の(角)速度と眼球運動特性、画面を見込む視角、環境照明条件、画面輝度、技術的実現可能性、上位互換性、異なる方式間での変換の容易さなどである。

以上、大画面でフリッカ知覚を避けるためにも、動画質の改善のためにも、大画面映像システムの時間解像度は、現在よりも高くすることが望ましい。具体的な数値については、上に述べた他の要因も含め、総合的な検討が必要である。

(2011年6月29日受付)

〔文 献〕

- 1) T. Hatada, H. Sakata and H. Kusaka: "Psychophysical analysis of the "sensation of reality" induced by a visual wide-field display", SMPTE J. **89**8l, pp.560-569 (1980)
- 2) 江本, 正岡, 菅原, 野尻: "広視野静止画像による臨場感の提示視角依存性と評価指標間の関係", 映情学誌, **60**, 8, pp.1288-1295 (2006)
- 3) M. Sugawara, M. Kanazawa, K. Mitani, H. Shimamoto, T. Yamashita and F. Okano: "Ultrahigh-definition video system with 4000 scanning lines", SMPTE Motion Imaging Journal, **112**, pp.339-346 (2003)
- 4) E. Nakasu et al.: "Technical development toward implementation of ultra high-definition TV system", SMPTE Motion Imaging Journal, **116**, pp.279-286 (2007)
- 5) M. Sugawara et al.: "Research on Human Factors in Ultrahigh-Definition Television television (UHDTV) to Determine Its Specifications", SMPTE Motion Imaging Journal, **117**, pp.23-29 (2008)
- 6) Y. Shimodaira: "Fundamental phenomena underlying artifacts induced by image motion and the solutions for decreasing the artifacts on FPDs", SID International Symposium, pp.1034-1037 (2003)
- 7) K. Sueoka, H. Nakamura and T. Taira: "Improving Moving-image Quality of TFT-LCDs", Digest IDRC, pp.203-207 (1997)
- 8) J.H. Jongseo and Lee Souk: "Recent picture quality enhancement technology based on human visual perception in LCD TVs", Journal of Display Technology, **3**, 4, pp.371-376 (2007)
- 9) 杉山, 青木, 半谷: "フレームレート変換によるLCD受像画質の総合改善", 映情学技報, **29**, pp.1-4 (2005)

- 10) Y. Yoshida et al.: "A Development of Large-Screen Full HD LCD TV with Frame-Rate-Conversion Technology", SID Symposium Digest of Technical Papers, **38**, 1, pp.1721-1721 (2007)
- 11) Y. Kuroki, T. Nishi, S. Kobayashi, H. Oyaizu and S. Yoshimura: "Improvement of motion image quality by high frame rate", SID '06, **37**, 1, pp.14-17 (2006)
- 12) ITU-R: "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures", Recommendation ITU-R BT.500-10 (2000)
- 13) ITU-R: "Subjective assessment methods for image quality in high-definition television", Recommendation ITU-R BT.710-4 (1998)
- 14) M. Saffir: "A Comparative Study of Scales Constructed by Three Psychophysical Methods", Psychometrika, **2**, pp.179-198 (1937)
- 15) 大村, 菅原, 野尻: "静止画との比較による動画蓄積ばやけの評価", 信学総大, pp.S5-6 (2008)
- 16) 大村, 菅原, 野尻: "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", 映情学技報, **33**, 6, pp.7-11 (2009)
- 17) E. W. Engstrom: "A study of television image characteristics, Part II: Determination of frame frequency for television in terms of flicker characteristics", Proc. IRE, **23**, 4, pp.295-310 (1935)
- 18) 三橋: "方式と規格", テレビジョン学会講習会「HDTV (ハイビジョン)」テキスト, pp.11-19 (1989)
- 19) 福田: "CFFで示される中心視と周辺視の感度差", テレビ誌, **32**, 3, pp.210-216 (1978)
- 20) C.W. Tyler: "Analysis of visual modulation sensitivity. III. Meridional variations in peripheral flicker sensitivity", J. Opt. Soc. Am. A, **4**, 8, pp.1612-1619 (1987)
- 21) 藤根, 吉田, 杉野: "画面の好ましい輝度とテレビ画面サイズの関係", 信学論A, **J91-A**, 6, pp.630-638 (2008)
- 22) M. Ogawa and T. Shiga: "Flicker Visibility Dependence on Viewing Distance and Light-emission Duty Ratio in a TV Field", IDW '09, VHF6-1, pp.1225-1228 (2009)
- 23) M. Emoto and M. Sugawara: "Flicker Perceptions for Wide-Field-of-View and Hold-type Image Presentations", IDW '09, VHF6-3L, pp.1233-1234 (2009)

江本 正喜 1988年、京都大学大学院工学研究科修士課程電気工学修了。同年、NHK入局、岡山放送局を経て、1991年より、同放送技術研究所に勤務。現在、同研究所(人間・情報)にて、広視野映像の効果に関する研究に従事。人間・環境学博士。正会員。