

ディスプレイの時間応答と動画表示画質

栗田 泰市郎

NHK放送技術研究所

〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

1. はじめに

電子映像ディスプレイは、テレビなど映像メディアはもちろんのこと、視覚刺激提示ツールとして視覚研究者の方々にも重用されている。

中でもCRT（ブラウン管）は、テレビジョンの草創期から数十年にわたり、ほぼ唯一の直視型映像ディスプレイとして多用されてきた。しかし図1に示すように、2002~3年頃からLCD（液晶ディスプレイ）やPDP（プラズマディスプレイ）などのFPD（フラットパネルディスプレイ）の普及がはじまり、その後、CRTからFPDへの交代が急速に進んだ。最近ではCRTは入手困難となり、通常入手できるディスプレイの大多数がFPDとなっている。中でも、LCDがその主流になっている。

LCDは薄型・軽量・高精細など多くの優れた

特徴を有するが、一方で、CRTに比べて画質劣化を生じる場合もある。その代表的な例が、ここで取り上げる動画表示画質である。

少なくとも数年前までのLCDでは、静止画はきれいに表示できて、動画では画像がぼやけてしまい、画質が大きく劣化した。この「動きぼやけ」は、現在では製品によってはかなり改善されている。しかし厳しい目で見れば、CRTと同等というレベルまでには達していない。

LCDなどのホールド型表示（後述）を行うディスプレイで知覚される動きぼやけは、物理特性だけでは説明できず、ディスプレイの時間応答と視覚特性との関連性を考慮することではじめて説明できる。

本稿では、LCDの時間応答と動きぼやけの関連性、動きぼやけ知覚の視覚的メカニズム、動きぼやけによる画質劣化、動画表示画質の改善方法とその実現状況について述べる^{1,2)}。

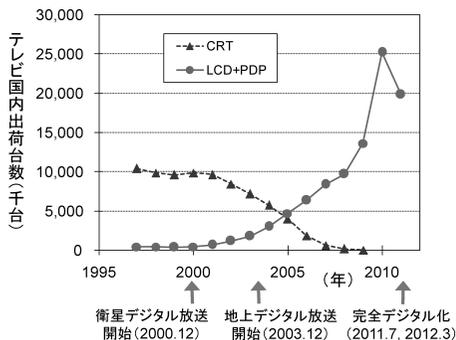


図1 テレビディスプレイ国内出荷台数の推移。
(JEITA (電子情報技術産業協会)「民生用電子機器国内出荷統計」のデータによる)。

2. ディスプレイの動作原理と時間応答

2.1 CRT

まず、比較のため、CRTの動作原理を簡単に振り返る。図2はCRTの構造と動作を示しており、CRTを斜め後方から透視したようなイメージの図である。

CRTはガラスを主体とした材料で包まれており、その内部は真空になっている。CRT後部に突き出た電子銃に画像信号が入力されると、その電圧に応じて電子がCRT内部に放出される。放出された電子は細い電子ビームとなってCRT前面のある一点に到達する。すると、その部分に塗られている蛍光体が発光し、これがCRTの

2012年夏季大会、チュートリアル講演。

表示光となる。これだけでは画面の一点しか発光しないが、画像に同期して電子ビームの向きを左右・上下に振る、すなわち電子ビームを偏向させ、画面を走査することで、一筆書きのようにして画像を描いていく。

以上から明らかなように、CRTはある瞬間には画面の一点しか発光していない。このため、各画素の表示光の時間応答は、図3(a)のようにインパルス的である。実際には蛍光体の残光により、図の点線のように若干尾を引くが、一般的なCRT用蛍光体の残光時間は十分短く、インパルス性を損なうものではない。これらから、CRTの表示をインパルス型表示とも呼ぶ。

2.2 LCD

LCDは液晶の偏光作用を利用して画像を表示

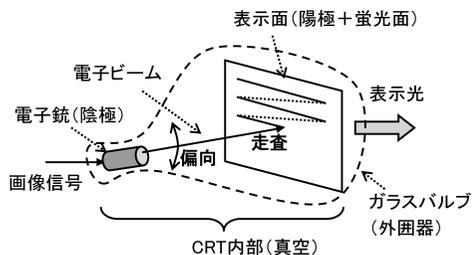


図2 CRTの構造と動作原理。

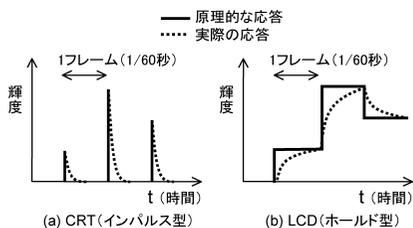


図3 ディスプレイ表示光の時間応答。

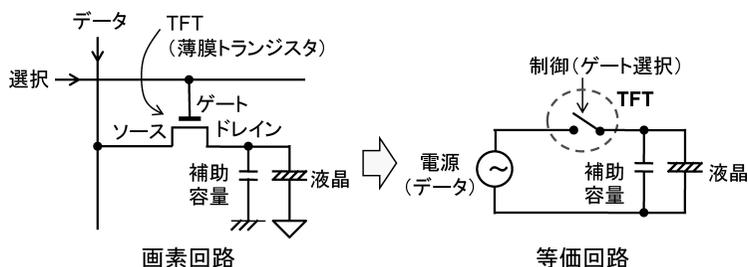


図4 アクティブマトリクス駆動LCDの画素回路と等価回路。

している。透明な電極を這わせた2枚のガラス板(前面板、背面板)の間を液晶材料で満たし、電極間に電圧を印加すると液晶分子の並び方(配向)が変化する。このとき、配向の変化と同時に、液晶層を通過する光の偏光方向も変化する。そこで、前面板、背面板の外側におおの適当な向きに偏光板を貼ることで、光が液晶層+偏光板を透過する量を制御できる。これにより、バックライトからの透過光すなわちLCD表示光の輝度を制御できる。

このとき、液晶に電圧を加える方法、すなわち駆動方法には2種類がある。単純なLCDは、例えば前面板に横方向の電極群を、背面板に縦方向の電極群を這わせる。縦横の交点に電圧を加え、そこを一つの画素として表示する。このような駆動方法をパッシブマトリクス(PM)駆動と呼ぶ。PM駆動のLCD(PM-LCD)は、構造が単純でよいが、画素数の増加とともにコントラストが低下するという致命的欠点があり、画像ディスプレイとしては実用的でない。

そこで考案されたのが、図4のように、各画素の内部に薄膜トランジスタ(TFT)を作りこみ、TFTにより画素の動作を制御する方法である。このような駆動方法をアクティブマトリクス(AM)駆動と呼び、AM駆動のLCDをAM-LCDと呼ぶ。

図4の左側はAM-LCD内部の1つの画素を表す回路、右側がその等価回路である。図において、液晶は電気的には電荷を蓄える容量(コンデンサ)で表される。TFTは単なるスイッチとして動作し、TFTのゲートに選択信号が加わると、TFTのソース・ドレイン間が導通状態(オ

ン) となって、画像データが液晶に導かれ、電荷として蓄えられる。そして、その電荷量に応じて表示光の輝度が変化する。選択信号が消えると、TFT がオフとなって液晶は回路から遮断される。このため、液晶に蓄積された電荷は次に TFT が選択されるときまで保持され、したがって表示光の輝度もそのときまで保持される。各画素の TFT を画像信号の 1 フレームに一回ずつ順次選択し、各画素に該当する画像データを液晶に蓄えることで画像を表示する。

PM-LCD において画素数の増加とともにコントラストが低下する原因は、データ線が縦方向に同じ列の画素に共通であるため、各画素に必要な画像データを加えられる時間が、垂直画素数に反比例して減少することにある。しかし AM-LCD では、前記の通り、画素数にかかわらず画像データは 1 フレーム間保持される。すなわち、AM 駆動により画素数とコントラストの間のトレードオフが解消され、これにより、高精細な画像ディスプレイの実用化が可能となった。以下では、AM-LCD を単に LCD と呼ぶ。

以上の結果、LCD 表示光の時間応答は CRT のそれとは大きく異なり、図 3(b) のように、各画素は原理的には 1 フレーム間同じ輝度で表示される状況となった。このような表示をホールド型表示、ホールド型表示を行うディスプレイをホールド型ディスプレイと呼んでいる。実際には、液晶の応答時間が遅いことにより、ホールド型表示による矩形の時間応答の角が丸められた形となる。

つまり、ホールド型表示とは、LCD の特徴というよりも AM 駆動の特徴である。AM 駆動は LCD に限ったものではなく、他のディスプレイでもしばしば必要となる。例えば、次世代の FPD として期待され、普及が始まりつつある有機 EL ディスプレイも、大多数は AM 駆動である。そして、このホールド型表示が、ディスプレイの動画表示画質に大きな影響を与える。

3. ホールド型表示による動きぼやけの視覚的メカニズムと画質劣化

3.1 ホールド型表示と動きぼやけ

LCD で動きぼやけを生じて画質が劣化することは古くから知られていたが、その原因は主に液晶の配向が変化するのに必要な時間、すなわち液晶の応答時間が遅いことにあると考えられていた。そして、応答時間の改善が進められ、1990 年代後半になると、比較的応答の速い液晶も開発された。しかし、動きぼやけは期待したほどには減らなかった。そこで、動きぼやけのもう一つの原因として、ホールド型表示が注目されはじめた。

図 5 は、後述するメカニズムにより、液晶応答時間がゼロの場合に知覚される動画像を、シミュレーションにより作成したものである。図 5(a) を原画像として、それを横方向にスクロール（等速移動）させた場合に知覚される画像が図 5(b) である。スクロール速度は 8 ppf (ppf: 1 フレームあたりの移動画素数, pixel per frame) とした。図から、液晶応答時間がゼロという理想的な状況であっても、かなりの動きぼやけを生じて画質が劣化することがわかる。

ホールド型表示により動きぼやけを生じること、すでに 1970 年代後半に宮原によって発見されていた³⁾。その後 1980 年代には、下平ら



(a) 原画像



(b) ホールド型表示で知覚される動画像 (シミュレーション)

図 5 ホールド型表示による動きぼやけの例.

によってその視覚的効果がより詳細に検討された⁴⁾。しかし、視覚的メカニズムの検証や表示画質に対する影響の解明が進み、今日の動きぼやけ改善技術の発展に結びついてきたのは、1996~8年頃からと言えよう⁵⁻⁸⁾。

3.2 動きぼやけ知覚の視覚的メカニズム

ホールド型表示で動きぼやけが知覚されるメカニズムは図6のようであると考えられる。

この図は、横方向を画面の水平方向、縦方向を時間軸として表示光を表した図である。原画像として、4画素1周期の縦縞模様の画像が、映像信号の1フレーム期間すなわち1/60秒あたり4画素の速度で右方向に移動する場合を想定し、これをホールド型ディスプレイに表示したときの状況を示している。図の斜めの長い矢印は画像の動き方向を示している。

このとき、視覚の性質として、次の2つを仮定する。1) 観視者の視点は、眼球運動により画像の動きにおおむね一致する。2) 視覚の時間分解能に関して、1/60秒以内の光刺激は視覚系でほぼ積分される。これらは、通常のディスプレイ観視条件ではほぼ成り立つと考えられる。

各画素の表示光は、ホールド型表示により1/60秒間ホールドされているので、これら2つ

の視覚系の作用により、図において、視点の動きを表す矢印軌跡上の4種の画素の表示光が、観視者の視覚系で積分される。

その結果、この場合、観視者に知覚されるのは4種の画素の平均の明るさのみとなり、4種の画素で表現されるはずの白黒の縦縞模様は完全に見えなくなってしまう。つまり、原画像の高精細成分が消失してしまっており、これが動きぼやけとして知覚される。

図から明らかのように、動き軌跡上の時間積分は、横長の楕円で示した水平方向の画素の積分と等価である。つまり、ホールド型ディスプレイで動画を観視した場合、ホールド型の表示光が視覚系において空間的な積分を引き起こし、動きぼやけを生じる。

このように、ホールド形表示における動きぼやけは、ホールド型の表示光と視覚系の眼球運動・時間分解能の相互作用により生じている。このメカニズムを筆者は視線追隨積分 (eye-tracing integration) と呼んでいる。

3.3 視線追隨積分の検証

しかし、図6のメカニズムは本当であろうか。その検証を行った。まず、応答時間がゼロのLCDをシミュレートするため、フレーム周波数

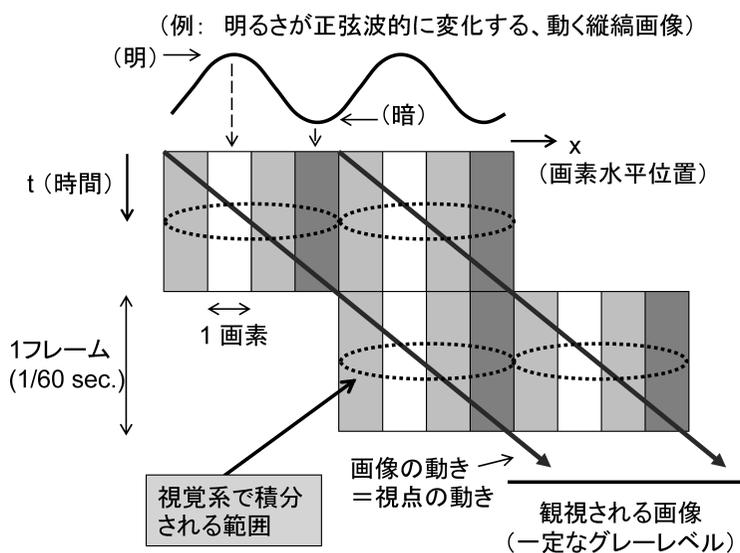


図6 動きぼやけ知覚の視覚的メカニズム (視線追隨積分)。

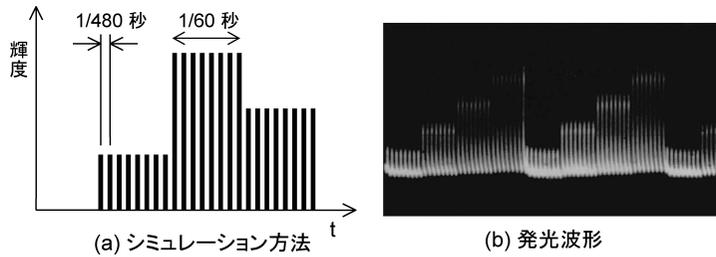


図7 480Hz CRTによるホールド型ディスプレイのシミュレーション。

480 Hzで動作する特殊な CRTを試作し，図7(a)に示すように，それに8回ずつ同じ画像を表示することで，ホールド型ディスプレイの表示光をシミュレートした。

この方法でシミュレートすることの根拠は，筆者が所属するNHK技研のある視覚研究者から，次の示唆をいただいたことによる。すなわち，ネコの網膜神経節細胞の応答は1秒あたり高々300数十パルス以下であり⁹⁾，人間も同様であると考えられるので，フレーム周波数300数十Hz以上であれば，インパルスの繰返し発光と，ホールド型のような連続発光の差は知覚できないと考えられる。実験では，余裕を見て，また，別の目的もあり，フレーム周波数480HzのCRTとした。その発光波形を図7(b)に示す。白ピーク輝度は約100 cd/m²である。

このディスプレイに，横スクロールする正弦波の縦縞画像を表示し，観視される縦縞の白ピーク輝度と黒ピーク輝度を調整法により主観評価した。そして，白黒のp-p値として知覚される縦縞の振幅(MTF)を求めた。結果を図8に示す^{6,7)}。

図8において，実線が評価値，点線が理論値である。ホールド型表示のインパルス応答は図3(b)のように矩形波であるから，そのMTFの理論値はsinc関数 $((\sin x)/x)$ である。そして，その広がり，視線追従積分のために動き速度によって変化する。図において，動き速度はパラメータ V_x であり，実験の観視条件においては， $V_x=8$ ppfは，評定者から見て約22度/秒の速度に相当する。

図から，動き速度にかかわらず評価値と理論

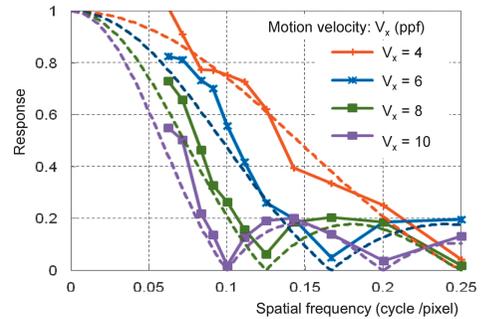


図8 ホールド型ディスプレイの動画表示で知覚されるMTF^{6,7)} (p-p値で定義)。

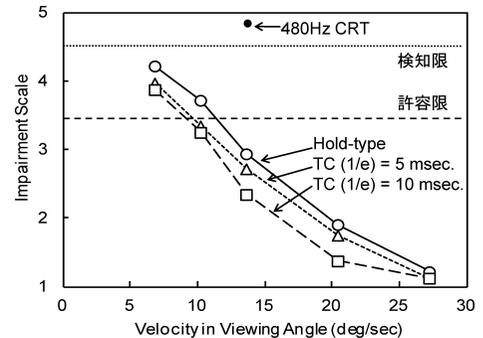


図9 ホールド型表示による動画質劣化^{5,8)}。

値はよく一致しており，図6の視線追従積分はほぼ成り立っていると考えられる。

3.4 ホールド型表示による動画質の劣化

次に，同じ480Hz CRTに一般画像を横スクロール表示し，その動画質(動画表示画質)を主観評価した。結果を図9に示す^{5,8)}。縦軸の評価尺度は，テレビの分野でよく用いられる5段階画質劣化尺度である。横軸は画像の速度であり，この実験の観視条件では，約13.6度/秒の

速度が 8 ppf に相当する。評価に用いた画像は図 5(a)である。

図 9 において，“Hold-type” と示されたデータがホールド型表示の画質である。“TC(1/e)=5(10) msec” のデータは、ホールド型表示に加えて、液晶の応答を時定数 5(10) msec の指数関数でシミュレートした場合の画質である。また，“480 Hz CRT” のデータは、真の 480 Hz 表示 (1/480 秒ごとに画像が移動) の画質であり、評価の上位アンカーとして評価に加えている。

5 段階劣化尺度においては、一般に評価値 4.5 を画質劣化の検知限、3.5 を許容限と解釈する。図から、液晶応答時間がゼロの理想的なホールド型表示であっても簡単に許容限を割り、何らかの画質改善策が必須であることがわかる。また、動画質劣化の原因として、液晶の応答時間よりホールド型表示の方が支配的であることもわかる。

4. 動画表示画質の改善

4.1 間欠表示法

以上から、ホールド型表示による動きぼやけを減少させ、LCD や有機 EL などのホールド型ディスプレイの動画質を改善するには、表示光のホールド時間を短縮することが必要である。

ホールド時間を短縮する方法は基本的に 2 つある。1 つは、ディスプレイの表示光を画像のフレームごとに間欠的な光とする方法、すなわち間欠表示法である。疑似インパルス駆動などとも呼ばれている。その実現方法として、バックライトを点滅または走査する方法や、表示画像のフレームとフレームの間に黒画像を挿入する方法 (黒挿入表示) がある。

図 10 は、間欠表示法における視線追従積分の状況を示している。図の表記法は先の図 6 と同様である。バックライト点滅/走査または黒挿入表示により、画像が表示されない時間帯を設け、表示光のホールド時間を短縮する。図は例として、ホールド時間の 1 フレーム期間に対する割合すなわち時間開口率が 50 % の場合を示している。このときの表示光の時間応答は、図 11(a) の実線のようになる。

図 10 から、ホールド時間の短縮により、視線追従積分により視覚系で積分される画素範囲が減少し、動きぼやけを改善できることがわかる。図 6 では縦縞模様が完全に消失していたのに対し、図 10 では、正弦波の振幅すなわち画像のコントラストは減少するものの、縦縞模様を一応観視できる。

間欠表示法とはつまり、ホールド型ディスブ

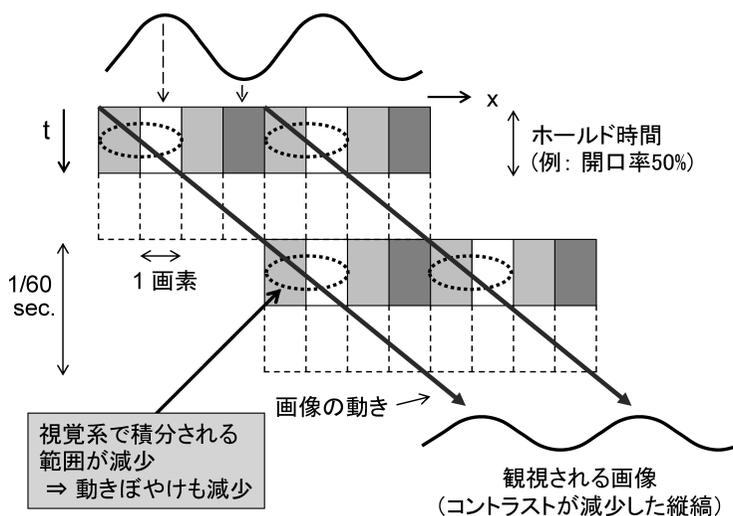


図 10 間欠表示による動きぼやけの改善。

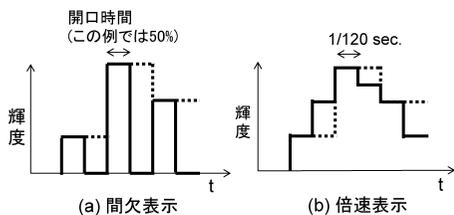


図 11 動きぼやけ改善法による表示光の応答.

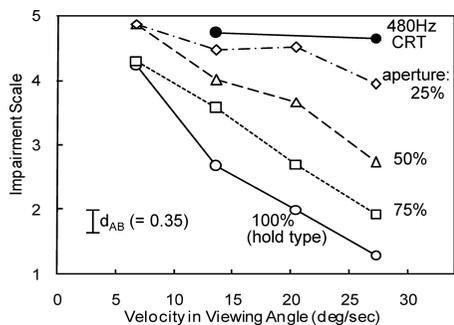


図 12 間欠表示法の動画質改善効果^{5,8)}.

レイの表示光をインパルス表示に近づけようとする方法である。開口率を無限小にする間欠表示の究極の姿がインパルス表示である。

間欠表示法による動画質改善の効果を主観評価した。結果を図 12 に示す^{5,8)}。評価した画像や実験方法・表記法は、図 9 と同様である。

図 12 の“aperture”は表示光の時間開口率である。図のデータに関して、動き速度を要因 A、開口率を要因 B として分散分析を行うと、相互作用 $A \times B$ は有意となった。図の d_{AB} は、水準 $A_i B_j$ 間の信頼度 95% の有意差の尺度であり、5 段階尺度に対して 0.35 ランクであった。

図から、開口率を下げると画質が大きく改善される様子が明らかである。この画像の場合、開口率すなわちホールド時間が 50% 以下であれば中速度以下の動きに対してほぼ許容限以上の動画質が得られ、25% 程度であればほぼ検知限度程度の動画質が得られる。

図 13 に、ホールド時間 50% のときに知覚される動画像のシミュレーション結果を示す。画像の移動速度は図 5(b) と同じく 8ppf とした。両者を比較されたい。



図 13 ホールド時間 50% の場合の画像の例.

4.2 高速表示法

ホールド時間を短縮するもう 1 つの方法として、高フレームレート表示、または高速表示法と呼ぶ方法がある。この方法は、画像のフレームとフレームの間の時間のフレームをディスプレイ内で生成して内挿することで、表示する映像信号のフレーム周波数を 60Hz の 2 倍の 120 Hz や、4 倍の 240Hz などに変換してから表示する方法である。画像の動き位置を補償した内挿フレームを生成しなければならないため、動き補償信号処理技術が必要となる。

図 14 に、高速表示法の例として、倍速 (120 Hz) 表示における視線追従積分の状況を示す。このときの表示光の時間応答は図 11(b) の実線ようになる。

図 14 から、動きぼやけの改善に関して、高速表示法により、図 10 の間欠表示法と全く同様な効果が得られることがわかる。

高速表示法とはつまり、ホールド型ディスプレイの表示光を本来の物体の光に近づけようとする方法である。フレーム周波数を無限大に上げれば、実物の動物体と同様な光になる。

高速表示法による動画質改善の効果も主観評価した。結果を図 15 に示す^{5,8)}。評価した画像や実験方法・表記法も図 12 と同様である。この実験では、倍速表示 (図 15 の“120Hz”) とともに、開口率 50% の間欠表示の画質も評価した。

図から、倍速表示によりホールド型表示 (“100%”) の画質を大きく改善できることが明らかである。また、改善の度合いは、ホールド時間が等しい開口率 50% の間欠表示と同様であることもわかる。

4 倍速すなわち 240 Hz 表示の場合のホールド

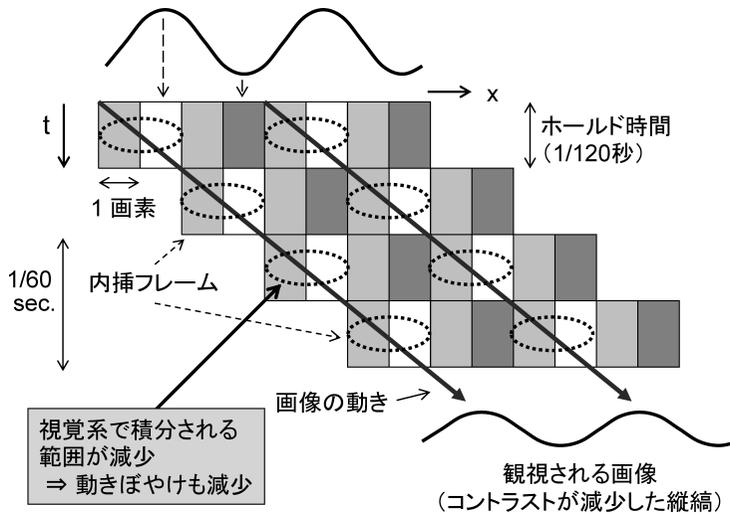


図 14 倍速表示による動きぼやけの改善.

表 1 ホールド動きぼやけ改善型ディスプレイの初めての製品化

技術	メーカー	製品化年月	技術のメーカー名称	画面サイズ (型)	画素数
黒挿入表示	日立	2002年12月	スーパーインパルス表示	20	1280×768
バックライト点滅/走査	(日立)	(2005年8月)	(バックライトブリンク)	(37, 32, 26)	(1366×768)
倍速 (120 Hz) 表示	ビクター	2005年10月	高速液晶ドライバー	37	1366×768
4倍速 (240 Hz) 表示	ソニー	2008年11月	モーションフロー 240 Hz	46, 40	1920×1080
(有機 EL) 黒挿入表示	ソニー	2007年12月	(命名なし)	11	960×540

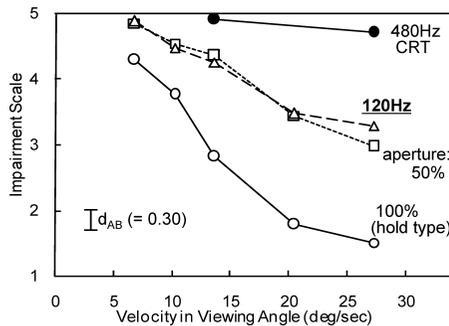


図 15 倍速表示法の動画質改善効果^{5,8)}.

時間は開口率 25% の間欠表示と等しいので、240 Hz 表示の画質も図 12 の 25% の画質と同様であると考えられる。

4.3 動きぼやけ改善ディスプレイの実現状況

以上のホールド型表示に起因する動きぼやけ改善に関して、2001 年ころより改善法を採用した LCD 開発に関する発表が学会で目立つように

なってきた。

2つの改善法の実現性に関して、高速表示法は、LCD パネルの高速駆動という難しい技術と、動き補償信号処理という高度かつ高コストな信号処理を必要とする。一方、間欠表示法は比較的簡単かつ低コストで実現できる。このため、間欠表示法による製品化が先行した。

しかし、間欠表示法を用いると、画面の輝度が低下しやすいことに加え、大画面・高輝度のディスプレイではフリッカが気になる場合がある。また、速い動きの画像において、ジャーキネスまたはジャダー、ストロボ効果などと呼ばれる、動きが不連続で不自然に見える現象が観視される場合もある。これに対し、高速表示法は、輝度の低下やフリッカ、ジャーキネスを生じにくく、動き補償信号処理の完成度が高ければ、総合画質の点では有利である。このため、次第に高速表示法が主流となってきた。これら

各技術の製品化の状況を表1にまとめた。

2002年に、世界初のホールド動きぼやけ改善型ディスプレイとして、日立から黒挿入表示を採用したLCDが製品化された。その後、バックライト点滅または走査を採用したLCDも製品化されてきた。表1では、この欄については括弧付きで記入したが、おそらく2005年の製品化が初めてではないかと思われる。

一方、高速表示に関しては、倍速(120Hz)表示のLCDが、2005年に日本ビクターから初めて製品化された。その後、2007年には有力メーカー各社が倍速表示を製品に採用し始めた。

さらに、図12、15からもわかることであるが、120Hz表示ではまだ画質的に不十分であり、240Hz表示にすれば良好な画質が得られるとの評価結果が、Kurokiら¹⁰⁾によって報告された。そして、4倍速(240Hz)表示のLCDが2008年にソニーから製品化された。その後、数社が4倍速表示のLCDを製品化している。現在では、倍速表示や4倍速表示に加えて間欠表示を併用し、さらに動画質を高めたLCDも製品化されている。

一方、過去の画質評価データの分析からは、画像によっては240Hz表示でも画質的に不十分な場合が考えられ、できればさらに高速な表示が望まれる¹¹⁾。このためか、480Hz表示のLCDがサムソンにより試作されている。

有機ELディスプレイに関しては、その開発時期がホールド動きぼやけ改善技術の開発時期と同時代となったことから、一部では最初から改善技術の採用が検討された。世界初の有機ELテレビが2007年にソニーから製品化されたが、そこではすでに黒挿入表示が採用されている。

5. おわりに

LCDや有機ELなどのFPDの動画表示画質は、表示デバイスの物理特性とそれを観視する人間の視覚特性の両者に深く関わる興味深い現象である。この10年ほどで動画質改善の指針が定まり、改善されたディスプレイが次々と製

品化されてきたことは大変喜ばしい。

また、FPDの動画質に関する議論がテレビの方式議論にも影響を与え、NHKが中心となって開発中の次世代の超高精細テレビ方式「スーパーハイビジョン」の標準化においては、テレビ方式パラメータとしてはかかってない、フレーム周波数120Hzを含む方式が標準化された¹²⁾。これも大変喜ばしいことである。

しかし一方で、現在のFPDの動画表示画質はまだCRTに達していない部分もあり、放送局のスタジオ技術者など、厳しい目を持つ一部のユーザーからはまだ十分な満足を得られない場合もある。今後さらに動画質を改善したディスプレイが登場してくることが望まれる。

最後に、今後、CRTに代えてFPDを視覚刺激提示ツールとして利用されていく視覚研究者の方々には、ご自身で予定されている実験の視覚刺激において、CRT並みの動画解像度が要求されるのか、間欠表示の場合はフリッカやジャダーの影響は無視できるか、高速表示の場合は動き補償信号処理の誤りの影響はないか、などにご注意されながらFPDを活用していただければと考える。

文 献

- 1) 栗田泰市郎：ディスプレイの時間特性と動画表示画質，日本視覚学会2012年夏季大会，チュートリアル講演，2012。
- 2) 栗田泰市郎：動画表示画質とその改善．映像情報メディア学会（編）：映像情報メディア工学総合大事典，オーム社，技術編139-143，2010。
- 3) 宮原 誠：低コマ数ディスプレイ方式の動画画質．電子通信学会論文誌B，62，644-651，1979。
- 4) 下平美文，平野哲夫，福家俊郎：ホールド型画像表示における動きぼやけ妨害．電子通信学会論文誌B，68，1397-1404，1985。
- 5) 石黒秀一，栗田泰市郎：8倍速CRTによるホールド発光型ディスプレイの動画質に関する検討．電子情報通信学会技術研究報告，EID96-4，19-26，1996。

- 6) 斎藤麻子, 栗田泰市郎: ホールド型ディスプレイの動画表示における観視メカニズムの検討. 映像情報メディア学会技術報告, **HIR98-33**, 19–24, 1998.
- 7) T. Kurita, A. Saito and I. Yuyama: Consideration on Perceived MTF of Hold Type Display for Moving Images. IDW '98, 3D3-4, 823–826, 1998.
- 8) T. Kurita: Moving Picture Quality Improvement for Hold-type AM-LCD. SID International Symposium '01, 35.1, 986–989, 2001.
- 9) Sakmann and Creutzfeldt: Stimulus-response curves from a cat on-center cell obtained against various steady background. *L. Spillmann and J. S. Werner (eds): Visual Perception*. Academic Press, 89, 1990,
- 10) Y. Kuroki, T. Nishi, S. Kobayashi, H. Oyaizu and S. Yoshimura.: A psychophysical study of improvements in motion-image quality by using high frame rates. *Journal of the Society for Information Display*, **15**, 61–68, 2007.
- 11) T. Kurita: A consideration on motion-image-quality improvement of LCDs and video systems. *Journal of the Society for Information Display*, **18**, 1044–1050, 2010.
- 12) ITU-R: Recommendation BT.2020, Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange, 2012.