HDTV 用ディスプレイの現状と将来

High Definition Television Display Research

—Present and Future—

William E. Glenn[†]

(訳) 正会員 大 沢 通 孝^{**}, 江 渡 正 容^{**}

HDTV と標準方式テレビの観視条件, すなわち画面サイズ, 解像度, 周囲光も考慮したコントラストを, 人間の目の分解能や感度などにに基づき評価している。また, HDTV 用の表示素子として必要な条件を提示し, 現在研究されている多くの表示素子について, いろいろな角度から評価している。特に, 近い将来を考えたとき最も有望と考えられるライトバルブ方式プロジェクトについては, 液晶パネルを用いたものを中心に詳細に論じている。

1. ま え が き

商業用および民生用の HDTV は, 市場に受け入れられる価格で生産可能な新しいディスプレイの技術開発の進展に大きく依存している。新しい HD ディスプレイには劇場や航空機シミュレータ用として大きな必要がある。これらの用途には光出力が3000~10000 lm に及ぶ低価格・高解像度・投写型ディスプレイが必要である。この投写型ディスプレイの中でも技術的要求に最も近いものは, 現時点ではライトバルブ方式のプロジェクトのみであるが, 価格が非常に高いのが実情である。

民生用 HDTV の普及に必要な主要部品は, 今やすべて入手できるが, 満足のいくディスプレイ部のみが入手できない。民生用 HDTV 装置の価格は, ティスプレイが大画面かつ高解像度であるために, 大部分がディスプレイ部で占められる。

2. 要 求 仕 様

まず最初に, 民生用 HDTV のディスプレイとして必要な仕様について考える。HDTV は, もともと映画館と同じ観視状態(例えば, 鮮鋭度, コントラスト, 視野角など)になるようにシステム設計がなされたも

のである¹⁾。これらの要求仕様は, 現状の標準方式テレビ仕様と比較すると非常に高い。動画像を見ているとき, その人の網膜上では最適解像度が存在する。網膜上で刺激に敏感なところ(中心窩)は, 立体角でおよそ1°の大変狭い領域である。視覚を司る大脳皮質神経細胞の大部分が, 中心窩(錐体のみが存在する部分)での情報処理に使われる。近くで見ている場合, 中心窩で検知されるのは像の非常に小さな領域(<1%)のみとなる²⁾。そのため, 観察者はこの小さな立体角の中に入る像を少しでもふやそうとし, 画面から遠ざかる(視距離を長くする)。観察者は, ティスプレイ上の解像度が人間の目の解像度を越え始めたとき, 遠ざかるのをやめる。観察者の網膜上で1°あたり22サイクルになる時がティスプレイの限界解像度であり, 1°あたり4~6サイクル程度の解像度を持つ視覚感度の最も高い領域の約1/3の限界コントラスト感度で, この空間周波数が検出される³⁾。したがって, HDTV, 標準テレビ, あるいは映画などにおけるそれぞれのシステムの限界解像度があり, 最適視距離では, いずれも観察者の網膜上で1°あたり約22サイクルとなる。

インタレース方式テレビシステムでは, 垂直方向の解像度は走査線間隔により決まる。図1に示すように, 所定の観視距離では mm 単位の走査線間隔は全く同じようになってしまう。HDTV での像は走査線数が増加するので, 単純に大きくなったと思えばよい。

[†] SAIT Communication Systems

^{**} 株式会社日立製作所 映像メティア研究所

^{**} Image & Media Lab Hitachi, Ltd, Kanagawa

(ここで重要な要因はテストチャートの限界解像度である。順次走査では必要な走査線数はインタレース走査に比べて多少、少なくともよいことが知られている)。HDTV は視野角が広がっても、観視者の網膜上ではまさに同じ解像度の像を提供する。これより次のことがいえる。図2で示すが、代表的な9ft(約2.7m)の視距離において、走査線525本のテレビ方式では画面对角24インチのディスプレイが最適であり、HDTVでは63インチが最適となる。現状のシャドウマスクCRTは、サイズ、重量、コストなどの点で、大画面を前提とした用途には適さない。HDTV用としては、より高性能な投写型ディスプレイや直視型の壁掛けパネルの開発が必要不可欠となる。

サイズに加えて考慮すべきほかの要素もいくつか存在する。表1はディスプレイとして当然備えなければならない特性を示している。光出力に対する要求は、通常の室内程度か、あるいはわずかに明るい照明のもとでも、スクリーン上でのコントラスト比が90:1であるための必要性からきている。もし映像の黒の部分でスクリーンで反射される周囲光が、表示素子のコン

図1 標準方式とHDTVの映像を同じ最適視距離から見たときの相対画面サイズ

図2 9フィートの距離から525本と1125本のテレビセットを見たときの相対画面サイズ

トラスト限界で決まる黒のレベルと同程度であれば、ディスプレイ上で白ピーク輝度と黒レベルとのコントラスト比は180:1でなければならない。

コントラストに対する要求性能は、空間周波数の関数で表せる。微小領域のコントラストは大面積におけるコントラストほどは必要ない。図3は、必要なコントラストを空間周波数の関数として示している。この実験は⁴⁾、測定に白と黒の格子縞のパターンを使い、コントラスト変化が検知限に至るまで黒レベルを増加する方法で行った。前述の90:1という数字は、低い空間周波数(大面積)領域で必要な値である。

動体を描写する際に10msという応答時間の制限を設けないと、動体の影に容易に検知できるレベルのスマアが生じてしまう。応答時間の最大値は、高い光学効率を得るために、少なくとも1フィールド期間表示する必要のあるライトバルブ方式プロジェクタにのみ適用される。このプロジェクタでは、動画は1フィールド間隔で表示されるが、当然のことながら、応答時間はこの時間に比べて短くなければならない。

微小領域での均一性は、マトリックス型ディスプレイでは考慮すべき項目である。大きな領域での均一性は、多少悪くても良い(中央から端部では25%の輝度変化が許容されている)が、反対に、網膜上で1°あた

表1 民生用と商業用のHDTVディスプレイに対する性能要求項目

	民生用ディスプレイ	劇場用ディスプレイ
解像度	>750 TV 本	>750 TV 本
光出力	1000 lm	10,000 lm
価格	\$2,000	\$50,000
応答時間	<10 ms	<10 ms
消費電力	<300 W	<3,000 W
輝度均一性(微小領域)	±0.25%	±0.25%
コントラスト比	>90:1	>90:1
フリッカ	検知限以下	検知限以下

図3 矩形波状に輝度変化する格子パターンに対する空間周波数対コントラストの検知感度

り5サイクル程度の微小領域に相当するところでの輝度変化に対して、目は大変敏感であり³⁾、この空間周波数では±0.25%の輝度変化ですら検知される。

フリッカはHDTVにとって充分考慮すべき項目である。フリッカは輝度の増加や視野の中心からずれるに従い感じやすくなる。CRTやレーザを走査するタイプのディスプレイでは、走査するフィールド速度によっては、輝度の変化幅が非常に大きくなる場合がある。また、見る角度を15°偏芯させただけで、フリッカの検知限周波数は、軸上の場合よりも約10%高くなる⁵⁾。HDTVの視野角は広いので、通常の周囲光のもとでも充分なコントラストが得られるほどディスプレイの輝度が高ければ、フリッカは60 Hzでも不快になると思われる。反面、映画館での48 Hzのフリッカは、部屋全体が暗くスクリーン輝度も低いので、なんとか許容されている。

幸いなことに、マトリックス駆動のライトバルブ方式ディスプレイ、例えばアクティブマトリックス方式液晶プロジェクタ(AMLCD)は、フィールド周期で見ると輝度変化が非常に小さい。したがって、そのようなディスプレイでは、輝度が高く視野角が広い場合でもフリッカは検知できない。

しかしながら、ライトバルブ方式プロジェクタでは効率の向上と自然な動画を再現するために、50 Hz以上の周波数で順次駆動しなければならない。もしも、画素が1/30 s変化せずに表示されていれば、目が対象物を追っているため動画像にはスミアが生じる。自然な動画像を得るには、表示時間は1/50 s以下にする必要がある(映画ではスミアを防ぐために、24 FPSフィルムでは露出時間を約1/48 sとしている)。もしもインタレース方式ディスプレイで、1/30 sごとに1/60 s間しか画素を表示しなければ、輝度は1/2となる。すなわち、ライトバルブ方式ディスプレイで動作効率を上げ、自然な動画を映すには、50 FPS以上で順次走査する必要がある。

HDTVディスプレイとしての要求を満足させる際に、達成可能な光学効率と大量生産時に実現できる量産コストについて考慮しておく必要がある。表2は、いろいろな開発段階におけるいくつかの候補を示している。表3に、購入可能か、あるいは試作レベル(動作可能)のライトバルブ方式プロジェクタとフラットパネルディスプレイの例を示す。表1に示した目標値が実現されるためには、ディスプレイの光学効率は3 lm/Wが必要となる。表3にリストアップされたディスプレイのいずれもが、マトリックス駆動で蛍光体を直接励起する方式を除いて目標に至っていない。

表2 代表的な民生用と商業用ディスプレイに使われる技術の違いによるディスプレイの相対光学効率と消費電力

ディスプレイの形態	効 率 (lm/W)	消費電力 (W)	
		民生用 (1000 lm)	劇場用 (10000 lm)
ガスレーザスキャナ	0.03	30000	300000
ガスプラズマ	0.5	2000	……
CRT 直視	0.5	2000	……
CRT プロジェクタ	0.5	2000	20000
エレクトルミネセンス (黄橙色単色)	1	1000	……
ライトバルブ	1	1000	10000
ライトバルブ	4	250	2500
固体レーザ (3%)	10	100	1000
電界放射, ジャンボトロン	30	33	

表3 実用可能なライトバルブ方式およびフラットパネルディスプレイの光出力, 解像度, 効率
ライトバルブ方式プロジェクタ

ディスプレイ	メーカ	光出力 (lm)	解像度 (TV本/画面像高)	効 率 (lm/W)
アイドホール (525本)	Gretag A. G.	7000	375	0.44
アイドホール (1125本)	Gretag A. G.	4200	800	0.26
タラリア	General Electric	1350	325	0.77
2 LV タラリア	General Electric	2300	800	0.92
3 LV タラリア	General Electric	3600	800	1
アクティブマトリックス LCD (AMLCD)	シャープ 三 菱 セイコーエプソン フィリップス, 他	~200	325~800	1

フラットパネルディスプレイ

プラズマ	Photonic Imaging 富士通, NHK	……	325~800	0.25~1
AMLCD	多数のメーカ	……	325~800	0.2
アストロビジョン	松 下	183,000	200	0.2
ダイヤモンドビジョン	三 菱	80,000	200	0.4
ジャンボトロン	ソニー	32,000,000	200	32

3. フラットパネルディスプレイ

蛍光体を直接励起するマトリックス駆動方式は、効率の点でCRTに比べ非常に有利である。CRTは構造上シャドウマスクが電子ビームをさえぎり、この部分とアノードでエネルギーの大部分を消費する。投写

型 CRT はシャドウマスクによる損失はないが、投写レンズで集光する際に効率低下する。一方、CRT の仲間である電界放射型および熱電子源型のマトリックス駆動方式についてみると、表示の均一性が大きな問題である。微小領域での輝度変化 $\pm 0.25\%$ という均一性を、これらのシステムで実現することは困難であり、現在も実現されていない。また、駆動回路を含んだシステムコストも問題である。

プラズマディスプレイはかなりの進歩が見られる。プラズマディスプレイの効率は、目標値からするとまだまだ低い、ここ数年の間に効率、コントラスト、輝度などの点でかなり改善されてきている。微小領域での均一性は、まだまだ問題として残っているが、今後2～3年でかなり有望なものとなろう。

プラズマディスプレイは厚膜(印刷)技術パターンニングできる点でコスト的に優位である。また、アクティブマトリックス方式ディスプレイの高温プロセスも必要ないことも特長といえる。輝度、効率、色純度、それにグレイスケール(階調表現)などの問題は、順調に解決に向かっている。

直視型のアクティブマトリックス方式液晶ディスプレイの性能は非常に良い。しかしながら、視野角も考慮した光学効率や、63 インチという画面サイズを考慮したときの量産コストなどは深刻な問題である。量産コストの低減を狙い、最近行われている印刷技術を応用した大画面パネルの生産技術の開発は、いくつかの成果が出ている。大画面ディスプレイを経済的に作るその他の技術も探究されている。大面積パネルにとって本当に魅力的で可能性のあるもうひとつの技術は、エレクトロルミネランスである。自発光型のこのタイプのものは、直視型でパッシブ駆動を行った時、良好なコントラストを得るのに必要な非線形性を有している。視角特性は非常に良好であり、パターンニングに厚膜製造技術が使えことや、基板が比較的安いことも大きな魅力となっている。

反面、エレクトロルミネランスは光学効率とピーク輝度が低いという問題が解決されずに来た(特に青色発光)。このために、他のディスプレイ素子では一般的な、フィルタによる青と赤の基本発光色の飽和度改善という手段が使えなかった。しかしながら、これらの欠点に対して最近注目すべき進歩があった。もしこれらの問題が解決されれば、エレクトロルミネセント HDTV パネルは有力なデバイス候補になろう。

4. プロジェクタ

近い将来に限れば、プロジェクタは安価な大画面デ

ィスプレイとして最も魅力的な候補であることにほぼ間違いない。CRT プロジェクタはどちらかという小さい光出力に向いている。反面、ライトバルブ方式プロジェクタ(例えば G. E. のタラリア[®])は、商業用として十分な光出力を持っているが、あまりにも高価である。

プロジェクタはスクリーン性能と一体で考える必要がある。前面投写型のスクリーンは、特に投写部が軽く、天井に簡単に設置できる場合は、物理的に非常に興味がそそられる。しかしながら、強い周囲光の中で良好なコントラストを得ようとすると、スクリーン輝度を非常に高くしなければならない。コントラストは、指向性を鋭くしたり、スクリーンゲインを高くすることで改善されるが、反対に、スクリーンゲインが高ければ、視野角は非常に狭くなる。低レベルの周囲光が許容できるなら、前面投写型はたいへん魅力的な候補といえる。

背面投写型のスクリーンでは、レンチキュラ構造、フィールドレンズ、ブラックマトリックスを使うので、明るい周囲光の下でも非常に良好なコントラストが実現できる。このスクリーンはその後に投写空間を必要とする。背面投写システムは1つの箱に収めることができ、投写光学系を鏡で折り返すことによりキャビネットの奥行きを小さくできる。広角偏向 CRT や画角の大きな投写レンズなどを使えば、奥行きをさらに小さくできる。また、スクリーンの後ろにあるフィールドレンズ(スクリーン輝度の均一性を良くするために使われ、一般にはフレネルレンズで構成される)の焦点距離を充分小さくできるならば、キャビネットは非常に薄くできる。限度はあるが、もしも投写レンズが 60° の対頂角を持っていれば、キャビネットの奥行きは63 インチ対角の HDTV スクリーンに対して、たった13.5 インチにでき、背面投写システムは、同じレベルの CRT 直視方式に比べはるかに軽くできる。

アクティブマトリックス方式の液晶プロジェクタが、近いうちにライトバルブ方式の最有力候補になると予想される。この技術を使った現行の HDTV プロジェクタは、約1 lm/W の効率を実現している。近い将来、この効率はさらに4 倍程度増加するものと思われる。実現すれば妥当な消費電力で非常に魅力的な光出力が得られる。また、直視パネル1枚分の面積から約100 枚の投写用パネルが得られれば、たとえ1 台のプロジェクタで3 枚のパネルを使っても、製造コストは非常に魅力的なものとなる。

光学的な駆動方式(光伝導型、あるいは光書込み型

など)も液晶プロジェクトでは使われている^{9)~12)}。このシステムは、基本的には光増幅器であり、光変調器となる反射型液晶の印加電圧を変化させる光導伝膜上に光学像が形成される。反射型システムは、透過型アクティブマトリックス方式駆動に見られるような駆動用電極部分での損失がないため、ここでの光学効率低下しないという利点がある。レンチキュラレンズを使うことで、ここでの損失を補えるようになったものの¹³⁾、代表的な例としては、透過部のわずか30~40%の領域しか透明にならないのが実情である。

主に TN 液晶が液晶プロジェクトに使われている一方で、ポリマー分散型液晶は偏光が不要であるというメリットがあるため真剣に検討されてきた。ポリマー分散型液晶を使うには、高いコントラスト比を得るために、アパーチャの非常に小さな(F 値の大きな)投写レンズが必要となる。実際、光源(メタルハライドアーク)の輝度で制限されるプロジェクトで高い光出力を得るには、このような小さなアパーチャでたくさんの光を取り込むために、表示領域はかなり大きくなければならない。これは viewgraph プロジェクトのような大面積光変調器の場合にはうまく行く。しかし、安くて小さなパネルを用いる場合には、光出力に限界が生じてしまう。

膜変形による(油膜タイプが代表的)反射型ライトバルブは、技術的な面について見ると他と同様に有力な候補である^{14)~17)}。マトリックス駆動方式の反射型ライトバルブは、光変調領域がマトリックス電極部で遮断されない利点を有する。膜変形タイプやポリマー分散型液晶は偏光を必要としない。また、それらは十分に冷却可能なヒートシンクにマウントできるため、これが非常に大きな利点となっている。

透過型アクティブマトリックス方式液晶プロジェクトは、その技術が主にラップトップコンピュータや小型テレビ用直視タイプのアクティブマトリックス方式液晶ディスプレイの市場に支えられている強味がある。このようなレベルの高い技術的サポートは、そのほかの点では他の方式のライトバルブと同じであるため、アクティブマトリックス方式投写型液晶プロジェクトにとって非常に有利な点である。

将来、プロジェクトの魅力的な光源として、固体レーザーの可能性を考えておかなければならない。コヒーレントで単一スペクトルの高純度光を高い効率で発生できるのは、光源として非常に有利である。近年、3 原色すべてにおいて良好な効率向上が図られた。固体レーザーを光源として実用化するには、まだまだなすべきことは沢山あるが、たいへん有望であると思える。

固体レーザーは現時点では非常に高価であるが、量産された場合でも低コスト化が図れないという本質的な理由はない。

レーザーは機械的なものと Bragg 回折による走査の組合せを使ったレーザスキャナで使われる。それらはアクティブマトリックス方式液晶プロジェクトや膜変形タイプのライトバルブ用の光源としても使える。コヒーレントで高効率な単一スペクトルの光源は、液晶プロジェクトの性能とコストの改善に大きく寄与するものと期待されている。

5. む す び

ここしばらくは、効率向上が図られスクリーンが改善されたアクティブマトリックス方式液晶を用いたライトバルブ方式のプロジェクトが、民生用と商業用の HDTV ディスプレイの最有力候補と目されている。

長期のレンジで見ると、プラズマパネルやエレクトロルミネセントパネルが長い間求めてきた壁掛けテレビの候補のように思える。

さらに長いレンジで見えた場合、もしもこのままの勢いでコストパフォーマンスの改善が続くならば、光源として固体レーザーを使ったプロジェクトが魅力的な候補となるであろうと考えられる。

(1993 年 1 月 13 日受付)

William E. Glenn 1960 年、ジョージア工科大学から“最優秀卒業生”賞を贈られ卒業。カリフォルニア大学バークレイ校で修士、博士の学位を取得。G. E. の Research Lab., CBS 研究所、ニューヨーク工科大学の科学技術研究センターなどでライトバルブプロジェクト(タラリア)、熱可塑性樹脂、電子ビームによる記録システム、デジタル処理における視覚の心理的計測方法などの研究に従事。現在、フロリダアトラティック大学映像システム研究所の教授兼理事として、デジタル信号処理を含む電子画像全般の研究に従事。1989 年の SMPTE のデビットサノフ金メダル、1988 年の ICCE 最優秀論文賞をはじめ多数の賞を受賞。1989 年ビジネスウィーク誌の米国科学者トップ 10 人に選出。SMPTE 会員。

大沢 通孝 昭和 50 年、山形大学工学部電子工学科修士課程修了。同年、(株)日立製作所に入社。映像メディア研究所に勤務し、CRT 方式の超高精細ディスプレイ、ハイビジョンディスプレイ、家庭用投写型テレビの研究開発に従事。正会員。

江渡 正容 昭和 53 年、東北大理学部物理学科卒業。昭和 56 年、千葉大学大学院理学修士課程修了。同年、(株)日立製作所に入社。インデックス方式テレビ用 IC 開発を始め、 $a\text{-Si/p-Si-TFT}$ 液晶用駆動回路およびパネル設計、PDP 用テレビ駆動回路設計等の研究開発業務に従事。