

# デジタルライトプロセッシングの現状と将来展望

帰山 敏之・新地 修

テキサスインスツルメンツ（以下 TI とする）が推進するデジタルライトプロセッシング (DLP™, 以下 DLP とする) はオールデジタル処理を基本として視覚情報を投射ディスプレイする新しい方法である。デジタル入力データが光のデジタル出力に変換されて目に届けられ、高速に変化する光のバーストが目の中でデジタル/アナログ変換されて画像イメージとして認識される。信号処理過程にアナログ処理が介在しないためオリジナルソースを忠実に安定して再現する特徴をもつ。DLP はデジタルマイクロミラーデバイス (DMD™, 以下 DMD とする) に基づいている。DMD は反射型光変調素子であり、1987 年に TI で発明された<sup>1,2)</sup>。投射イメージは明るく高コントラスト、ピクセル間継ぎ目が非常に小さく、フィルム映像並み画質（色再現性、精細度）を実現できる。本稿では DLP 最新技術開発状況を解説し、DLP 技術のディスプレイ分野応用の今後を展望する。

## 1. デジタルライトプロセッシング

デジタル画像メディアの急速な進展に伴いデジタルビデオ技術の重要性がますます高まってきた。デジタルソースをアナログ表示にインターフェースしようとするときデジタル/アナログ変換処理を行う必要があり、ソース映像の品位が劣化することになる。よって、デジタル処理で一貫した映像システムの最終段階には、電氣的ビット入力を受け入れて光学的ビット出力に変換するデジタルディスプレイはデジタルビデオへの自然なインターフェースである。デジタルからアナログ変換は最終的に観察者側で行われる。図 1 にデジタルライトプロセッシング

システムを示す。DLP は DMD として知られるマイクロエレクトロメカニカルシステム (MEMS) 素子に基づいている。DMD は 2 値パルス幅変調 (以下 PWM とする) 技術を用いて正確に光を制御する高速反射型デジタル式光スイッチで、半導体ベースのアレイである。DMD は画像処理、メモリー、光源、光学系とともに DLP システムを構成する。そして DLP システムは高画質のカラーイメージを投射表示することができる<sup>3,4)</sup>。

## 2. DMD 光スイッチ

DMD 光スイッチは、CMOS メモリー上に通常のウェハープロセス (0.8  $\mu\text{m}$  技術) をベースにマイクロマシンの技術を使って形成され、電気/機械/光学機能を 1 個の半導体チップ上に集積した反射型光変調器である (図 2)。半導体チップ上に 16  $\mu\text{m}$  平方角のアルミニウムミラーが 17  $\mu\text{m}$  ピッチで数十万個以上のレベルで形成され、各々のミラーは CMOS SRAM により独立に制御される。ミラーと SRAM メモリー間に作用する静電引力によりミラーは SRAM データに対応して水平位置から +10°, または -10° の方向に回転する。DLP 光学システムでは、光は 20° の角度で DMD に対し入射し、ミラーが on 状態にセットされたときにプロジェクションレンズに向けて反射され、スクリーン上のピクセルは明るく表示され、off 状態にセットされたときには -40° の角度でレンズから外れて反射され、ピクセルは黒く表示されることになる (図 3)。ミラーの回転方向は 5 V 動作の SRAM データにより決定することができる。ミラーは通常水平位置が安定であるが、SRAM 電圧に対しミラーにバイアスをかけると on (または off) の回転位置が安定状態に移り、SRAM データに依存しなくなる。これが DMD に特有の電気機械的ラッチ性能<sup>1,2)</sup> であり、ミラーのラッチ状態時に SRAM に次の画像

テキサスインスツルメンツジャパン (〒107-8641 東京都港区北青山 3-6-12 青山富士ビル 4F)  
E-mail: kaeriyama@ti.com

面データの書き込みを行うことができる。バイアスが除去されるとミラーはラッチ状態から開放され新しいSRAMデータに従って回転し始める。そしてバイアスが再印加されてミラーは次のラッチ状態に移る。DMDピクセルの光

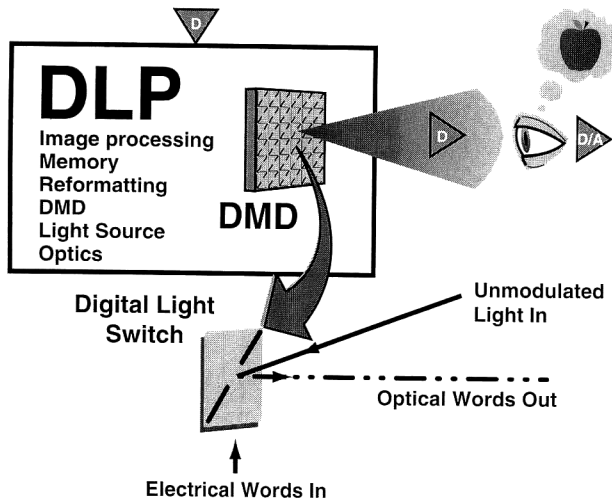


図1 デジタルライトプロセッシングシステム。

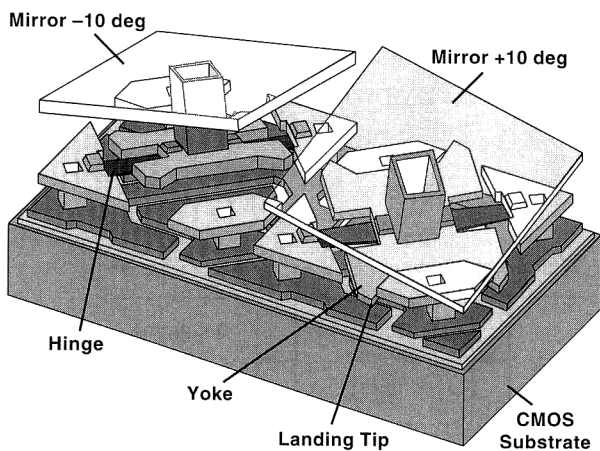


図2 2DMDピクセル（ミラーが透明に表示されている）。

学スイッチ時間（図4）は機械スイッチ時間  $15\mu\text{s}$  より短く  $2\mu\text{s}$  の高速である。光学スイッチ時間は静電界の強さ、ピクセルの慣性、ねじれヒンジの堅さに依存する。ヒンジ材料の改良によりねじれ動作による非弾性変形は許容度以下に制御されている。ヨークが接地面に接地/接触すると接触力が発生する。残存する分子間のファンデルワールス力や表面力は依然としてヒンジの戻り力より大きい。リセット電圧パルスがヨークとミラーに印加されるとヨークの先のスプリングチップ（図5）がしなり、戻るときに反発力が発生し、ヨークスプリングチップは接地面から確実に開放される。ピクセルのリセット動作は  $1\mu\text{s}$  のオーダーで完了する<sup>5)</sup>。

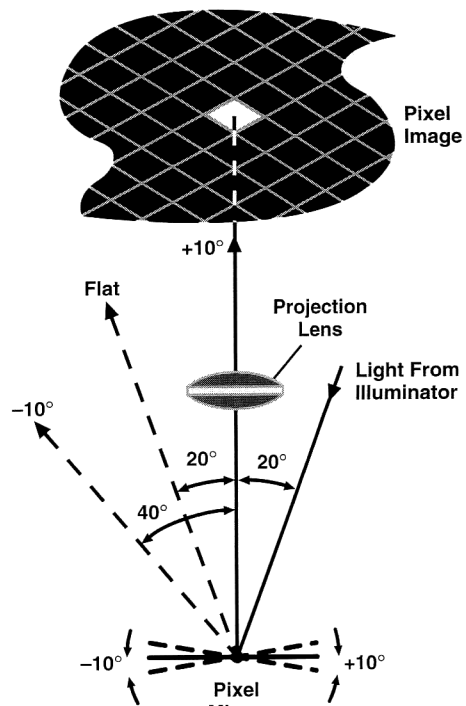


図3 DMD光スイッチングの原理。

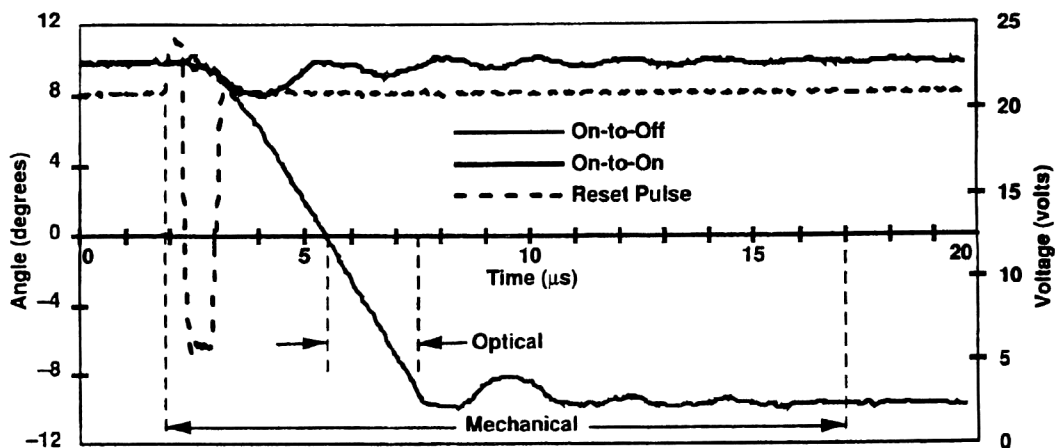
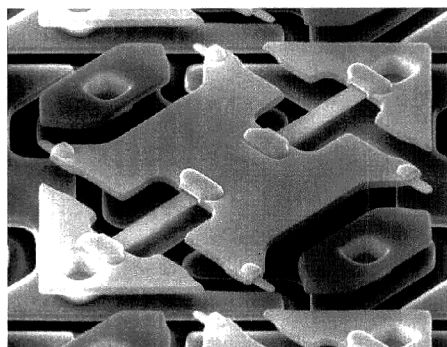


図4 DMDピクセルの光学スイッチ時間。

DMDは実際の使用動作を想定した種々の環境条件下(熱ショック, 温度サイクル, 湿度, 機械ショック, 振動, 加速度試験)で安定に動作する<sup>6,7)</sup>。ミラーサイクル試験ではヒンジ疲労とランディングチップの接触力増加によるリセット不良を評価し, 7,650億サイクル以上の寿命を確認している。これは10ビット/カラーの3チップDLP投射システムで76,000時間以上の寿命に相当する。

### 3. DLP システム

3チップDLPシステムダイアグラムを図6に示す<sup>4)</sup>。ビデオフロントエンドはさまざまなビデオソースに対応し, ソースの種類に応じて圧縮画の復調, A/D変換を行う。ソースがインターレーススキャンの場合にプログレッシブス



Spring Tip

図5 スプリングチップとヨークのSEM写真(ミラーは外されている)。

キャン変換される。スケーリング処理でビデオデータは再サンプリングされDMDピクセルアレイに適合し正方形のDMDピクセルフォーマットに対し正しいアスペクト比が維持されるように大きさが調節される。DMDがCRTと異なり線形特性の表示素子であるため, ガンマ補正されたR, G, B信号を元に戻す処理, デガンマ補正が必要である。この補正で暗いレベルで輪郭が生じるが誤差拡散法で低減させられる。最後にR, G, B信号はデジタルフォーマッターに入力される。走査線形式データはR, G, Bビット面形式データに変換されてシンクロナスDRAMフレームバッファに蓄積/読み出されてPWMビット分割シーケンスでDMDに出力される。DMDチップはCMOS動作周波数とビデオデータレートに適應するため, 16のマルチデータ入力に設計されている。

DLP投射ディスプレイ光学系が各種のシステムについて設計されている<sup>8-10)</sup>。DMDチップを1個(または2個)使用した1(または2)チップDLPシステムはカラーホイールを用い色を時分割しカラーイメージを得る。DMDのスイッチングが速いので1(または2)チップの構成がとれる。1チップシステムでは16.7ms(1/60秒)のNTSC TVフィールドが3分割され, 各色は5.6ms以内に表示される。DMDの20 $\mu$ s以下のスイッチング性能により各色8ビットグレイスケール(256階調)を可能としている。図7に3チップDLP光学システムを示す。DMD

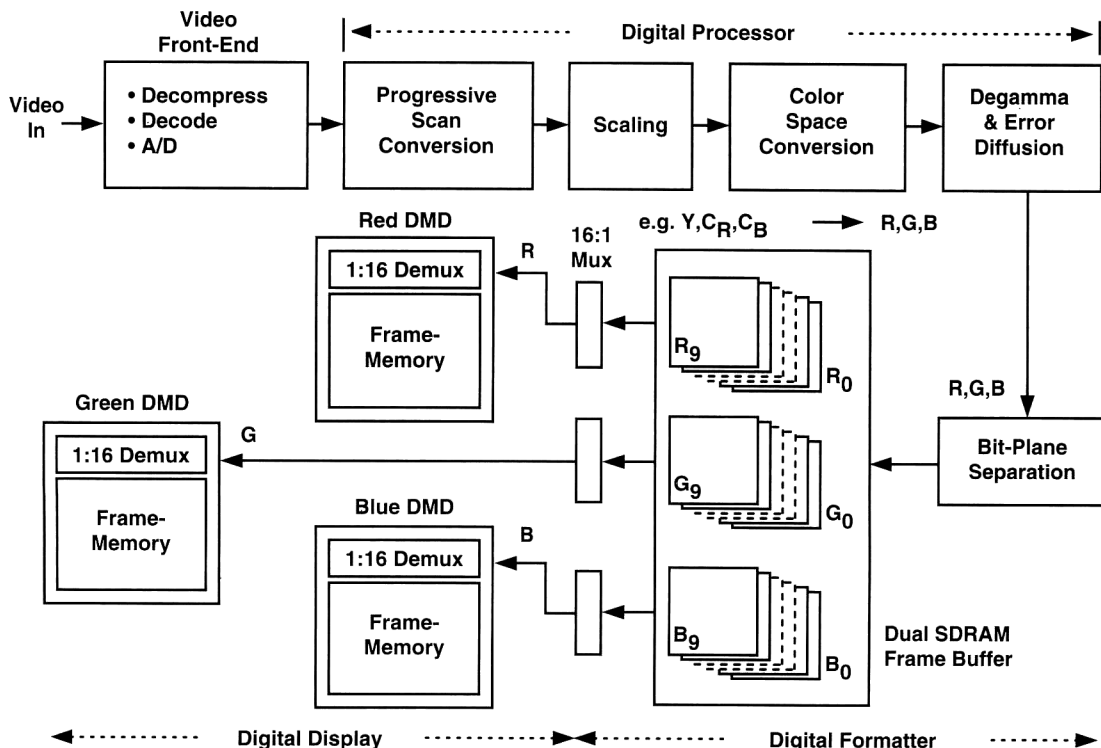


図6 3チップDLPシステムダイアグラム。

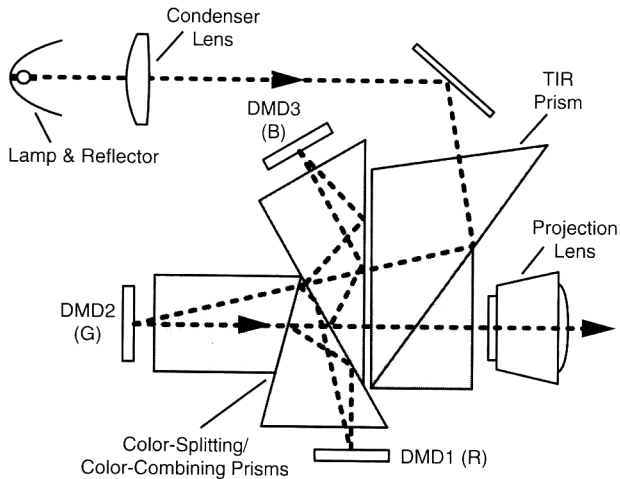


図7 3チップDLP光学システム。

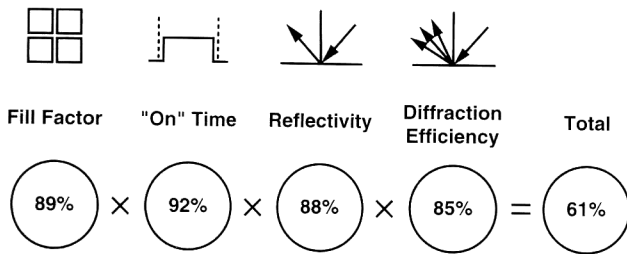


図8 DMD ピクセルの光効率。

は単純な反射型光スイッチで偏向板を必要としない。光は光源からコンデンサーレンズにより集光され、全反射プリズム、色分離結合プリズムを通過し DMD に対して 20° の角度で入射する。光はダイクロイックミラーにより赤色、青色、緑色に分離され、各 DMD から反射されてきた光は再び結合されて投射レンズを通過してスクリーン上に投射される。

#### 4. ディスプレイ性能

17 μm ピッチで 16 μm 正方形のミラーアレイにより構成される DMD ピクセルの開口率は 90% であり、DMD チップの 90% のミラー領域で光を反射し画像表示に利用できる。DMD の光効率は入射光に対する出力光の割合であり (図 8)、実質 “on” 時間、表面の反射率、開口率、回折効率の 4 要素の積で定義され、60% 以上の能力を示す<sup>9)</sup>。

より多くのミラーをチップ上に集積すれば、より高い解像度が得られる。これまでに、種々の画素数 (とアスペクト比)、例えば VGA (640×480), SVGA (800×600), SXGA (1,280×1,024), HDTV (1,920×1,080) が開発されてきた<sup>11-13)</sup>。DMD チップファミリーには共通のピクセルデザインが採用されており、画素数の増加に伴いチップサイズは大きくなる (図 9)。

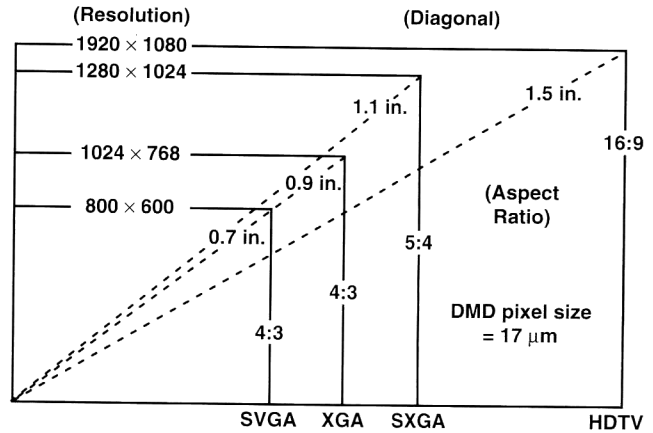


図9 DMD 解像度とチップサイズ。

表1 標準ピクセルと改良ピクセルのコントラスト比。

	Original design	New design
Full on/full off	255 : 1	370 : 1
Checkerboard (4×4)	142 : 1	177 : 1

Note: All data for  $f/3.0$  projection lens.

DMD のコントラスト比はミラー端、下層基板、ミラーをヨークに支持するための穴 (図 2 参照) からの回折光により制限される。回折効果を考慮した設計でコントラスト比の向上が図れる。表 1 にヨーク上のミラーを支えるポストの開口サイズを減らし、かつポスト辺をミラー辺に平行に配置したピクセル構造によってコントラスト比の改善された結果を示す<sup>14)</sup>。システムコントラスト比は ANSI 規格に従って 4×4 チェッカーボードの明暗間の光束比を測定して決定され、レンズによる光散乱や反射が考慮される。フル on/フル off コントラスト比は夜景等の低輝度画像中の黒レベルを決定し、チェッカーボードコントラスト比は全輝度レベルを含む画像中の対象物のコントラストの尺度となる。

高光束密度照射時には光吸収により DMD チップの温度が上昇する。過度の温度上昇は DMD の長期信頼性に影響を及ぼし、ミラーを 1 方向に偏って動作させる条件で起こるヒンジ変形 (メタルクリープ) を加速し DMD の長期信頼性に影響を及ぼす。この変形を極力抑え確かな動作を保証するために特殊なヒンジ合金が開発された<sup>5)</sup>。例えば、95/5 動作はミラーは 95% の時間 1 方向に回転 (例、+10°) し、残り 5% の時間は他方向に回転 (例、-10°) する場合である。このような状況は実際上起こりにくい<sup>6)</sup>が 65°C での 95/5 動作をヒンジ変形を評価する最悪の信頼性試験条件として採用している。高輝度応用時にはミラーの光吸収による温度上昇を避けるため熱電冷却器が DMD パッケージの裏に取り付けられる。

DLP 投射光学系において、DMD からの on 光を基板や

ミラー端からの散乱光より分離しコントラストの良い投射像を投射レンズから得るには、2.8以上の $f$ 値が必要とされる。十分なコントラストを保持するためにレンズの $f$ 値は3に固定されている。光源のアーチ長は投射システムの全光束量に影響する重要な因子であり<sup>15)</sup>、光源/反射鏡効率はアーチ長が減少すると増加する。このため、DLPへの応用には2mm以下のアーチ長が採用されている。SVGAの解像度で全光束5,000ルーメンの明るさが、2kWパワー短アーチ長キセノンランプを使用した3チップDLP投射システムで達成されている。

## 5. 今後の展望

HDTV デジタル放送、デジタルビデオディスク等メディアのオールデジタル化の進展につれ、映像システムの最終段階のデジタル化要求が高まってくる。DLP技術はデジタル投射された高画質の画像を作り出しデジタルソースの恩恵を最大限に引き出せる、また、高輝度、高解像度、大画面投射ディスプレイに好適であり民生から業務用途への幅広い製品応用に展開できる。半導体製造のノウハウと能力を基にDMDユニットのさらなる歩留まり向上とローコスト化を推進し量産体制が整備増強されていく。投射ディスプレイに的を絞って開発してきたDMD技術の他分野への可能性は高く、応用面での活動を重視していく必要がある。

## 文 献

- 1) L. J. Hornbeck and W. E. Nelson: "Bistable deformable mirror device," *OSA Technical Digest Series, Vol. 8, Spatial Light Modulator and Applications* (1988) p. 107.
- 2) L. J. Hornbeck: "Deformable-mirror spatial light modulators (invited paper)," *Spatial Light Modulators and Applications III, SPIE Circuit Rev.*, **1150** (1989) 86-102.
- 3) L. J. Hornbeck: "Digital Light Processing™ for high-brightness, high-resolution application," *Proc. SPIE*, **3013**, Projection Displays III (1997) 27-40.
- 4) V. Markandey, T. Clatanoff and G. Pettitt: "Video processing for DLP display systems," *SPIE Photonics West '96*, San Jose, CA (1996).
- 5) R. L. Knipe: "Challenge of a Digital Micromirror Device: modeling and design," *SPIE Europto Proceedings*, **2783** (1996) 135-145.
- 6) M. R. Douglass and D. M. Kozuch: "DMD reliability assessment for large-area displays," *Society for Information Display (SID) International Symposium Digest of Technical Papers, Vol. 26* (Applications Session A3) (1995) pp. 49-52.
- 7) M. R. Douglass and C. Malemes: "Reliability of displays using Digital Light Processing," *SID '96*, San Diego, CA (1996) pp. 774-777.
- 8) J. Florence and L. Yoder: "Display system architectures for Digital Micromirror Device (DMD™) based projectors," *Proc. SPIE*, **2650**, Projection Displays II (1996) 193-208.
- 9) G. Pettitt, A. DeLong and A. Harriman: "Colorimetric performance analysis for a sequential color DLP™ projection system," *SID '96 Digest*, CA (1996) pp. 510-513.
- 10) R. G. Fielding, M. L. Burton and T. A. Bartlett: "Colorimetry performance of a high-brightness DMD™-based optical system," *SID '96 Digest*, CA (1996) pp. 767-770.
- 11) G. Sextro, T. Ballow and J. Iwai: "High-definition projection system using DMD display technology," *SID '95 Digest* (1995) pp.70-73.
- 12) J. M. Younse: "Projection display systems based on the Digital Micromirror Device (DMD)," *SPIE Conference on Microelectronic Structures and Microelectromechanical Devices for Optical Processing and Multimedia Applications, Austin, TX*, SPIE Proceedings, **2641** (1995) 64-75.
- 13) Digital Light Processing World Wide Web site: <http://www.ti.com/dlp>
- 14) J. F. Florence, R. Miller and T. A. Bartlett: "Contrast ratio in DMD-based projection systems," *SID '97 Digest*, Boston, MA (1997) pp. 920-922.
- 15) M. S. Brennsholtz: "Light collection efficiency for light valve projection systems," *Proc. SPIE*, **2650**, Projection Displays II (1996) 71-79.

(1997年11月28日受理)