

DLP Cinema™ 技術

— デジタル・シネマが可能になる

梶山 敏之 日本テキサス・インスツルメンツ (株)

映画は、白黒フィルムによる無声映画に始まり、トーキー化、カラー化の革命により発展してきた。そして今、映画の歴史において新たな革命が起きている。それは、映像メディア業界に急速に進むデジタル化への電子技術革新により、映画の撮影から配信、上映に至るまでまったくフィルムを使わない映画が実現してきたことである。デジタルの精確性・安定性という基本的な優位性を特徴とするデジタル・ライト・プロセッシング (DLPT™, 以下DLP) 技術がデジタル・シネマに应用され、DLP Cinema™ (以下、DLPシネマ) 試作プロジェクタにより、テレシネから目までオール・デジタルによる映像体験が世界各地の映画館で盛んに行われるようになった。映画のデジタル化に向けての作業が業界と進められている。

◆ デジタル・シネマの工程

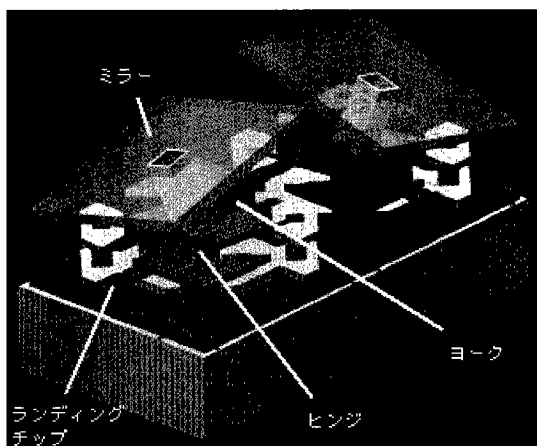
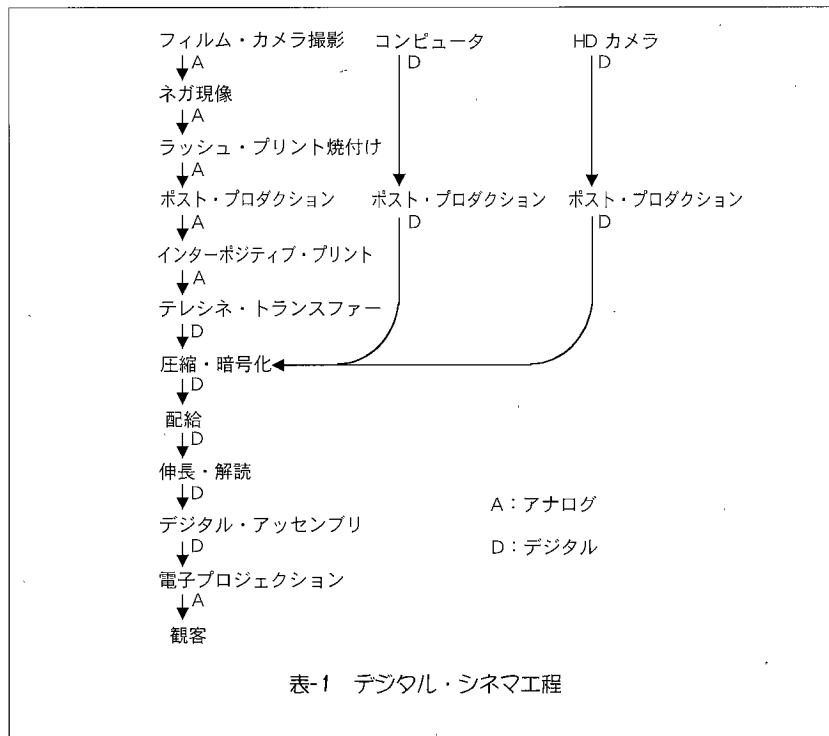
映画は、白黒フィルムによる無声映画に始まり、トーキー化、カラー化の革命により発展してきた。そして今、映画の歴史において新たな革命が起きている。それは、映像メディア業界に急速に進むデジタル化への電子技術革新により、映画の撮影から配信、上映に至るまでまったくフィルムを使わない映画が実現してきたことである。

フィルム映画製作における技術工程は、撮影、ネガ現像、ラッシュ・プリント焼付け、そしてポスト・プロダクション工程に移る。ポスト・プロダクションはポジ編集、セリフなど映写しながら録音するアフレコ、ダビング、タイトルなど合成処理には画像処理を含むオーバーラッ

プやワイプの処理も行うネガ編集、光学録音の音合せ、焼付けの光量や焼付け光源の色温度等を決定しパンチカードなどに記憶させるタイミンクからなる。そしてクリーニング、プリント、現像、試写へと続く。フィルムが完成すると興行フィルムの焼増し、運搬、映画館での上映、上映終了後の回収・廃棄により終了する¹⁾。

デジタル・シネマ工程はフィルムのポスト・プロダクション、インターポジティブ・プリントを経てテレシネ変換することによって、アナログ・フィルムをデジタル・テープに変換する。また、ハイ・ディフィニション (HD) カメラによる撮影では光が電気に変換される光電変換素子の直後からはアナログ・デジタル

変換によりデータはデジタル化される。さらに、コンピュータ・アニメーション映画ではデータは最初からデジタルで処理される。デジタル・データは圧縮、暗号化され衛星通信、光ファイバー・リンク、光ディスクを通じて配信 (配給) される。配信先ではデジタル・データの伸長・解読を行い、映画、プロモーション、予告編、言語等がデジタルにアクセスされる。デジタル・データは電子プロジェクション装置に送られる。ここで、CRTや液晶ライト・バルブ方式による通常の電子プロジェクション装置は、デジタルの電気入力データをアナログの光出力に変換し、映像をスクリーンに映写する。そして、観客は映画を鑑賞する (表-1)。



(ミラーは透明に示されている)
図-1 2DMDピクセル

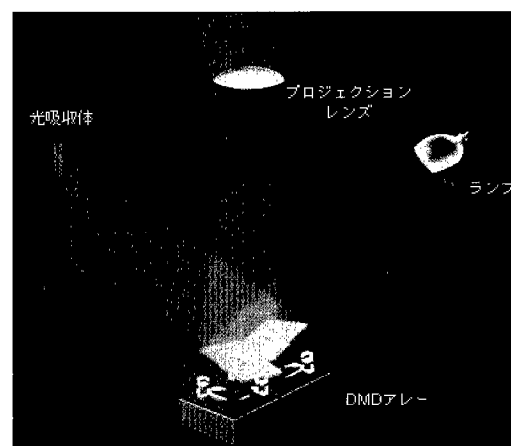


図-2 DMD光スイッチングの原理

◆ デジタル・シネマの利点

シネマをデジタル化することの利点を製作者側、興行者側、観客側それぞれの立場からまとめる。

製作者側からは、複製プリント品質がロットごとに変化し、一貫した品質が維持できないという問題に対し解が得られる。デジタル・データは通信衛星等を介して世界各地に同時に配信され、コンピュータのハード・ディスク・ドライブに記録され、電子プロジェクタから映写される。世界同時封きりが容易に可能となる。これまでフィルムの複製、配給にかかっていた費用が大幅に削減

できる。配信されるデータはデジタルによる暗号化、かつ電子透かし化がほどこされ安全性が向上、そして海賊版防止に効果が期待できる。

興行者側からは、上映スケジュールが柔軟に組め、かつフィルムの巻き戻しをする必要がなくなるため上映回数をより多くとることができる。劇場でのアセンブリ・コストが低減できる。多国言語、タイトル、提供への対応、予告編・プロモーションの編集が容易、宣伝プロモーションに柔軟性、宣伝売上げに結びつく。営業効率がよい。音・映像品質がいつまでも安定で信頼できる。

観客側からは、いつ見ても封きり初日の映像品質が楽しめる。フィルムで体験するようなゴミ、スクラッチ、焼けた孔、色あせ、ジャンプ、波うち、トラベル・ゴースト、焦点ボケ、ジャダ^{☆1}も見られない。スポーツ、コンサートなどの実況が映画品質で見られる。

☆1 映画はダブル・シャッターリングで同じ絵を2回表示し、1秒あたり計48枚表示している。一瞬画面が飛ぶ不自然さで24Hzのジャダが発生する。また、特に明るいシーンになるとフリッカーが見える。

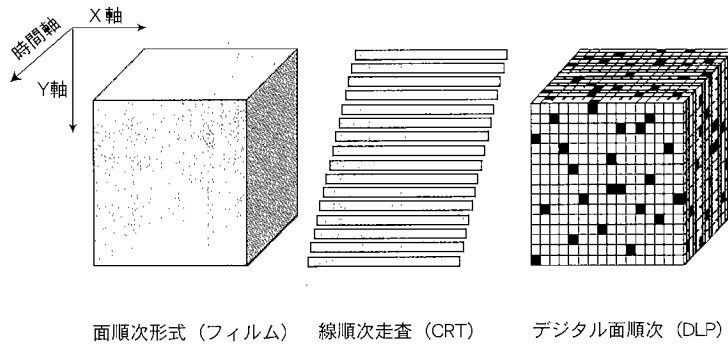


図-3 視覚情報表現の比較

◆ デジタル・シネマにおけるデジタル・ライト・プロセッシング技術

DMD/DLPの基本

テキサス・インスツルメンツ(TI)が開発したデジタル・マイクロミラー・デバイス(DMD™, 以下DMD)は、マイクロ・マシン技術により半導体アドレス回路チップ上にモノリシックに集積化された、高速に動作するデジタル光スイッチの反射型アレーである(図-1)。SRAMデバイス上に並べられた極微細の正方形ミラーを使用して、光のデジタル変調を行っていく。このミラーは16ミクロン角の大きさで、各ミラーは、対角軸を中心とし±10度の傾斜を可能にするヒンジにより支持されている。DMDを基にしてデジタル入力データを直接光のデジタル出力に変換し、パルス幅変調(以下PWM)すなわち高速に変化する光のバーストを生成する。そしてそのバーストが目の中でデジタル/アナログ(D/A)変換されて画像イメージとして知覚される。これがDLPである。そのデジタルの特性は、精確な階調と色再生雑音のない一貫した高画像品質を提供することができる²⁾。

DMDを適当な光源と投射光学系に組み合わせると各ミラーはメモリ出力データに対応して光を投射レンズに向けて、または、レンズから外れて反射する。すなわち、ミラーは

水平位置から+10度(または-10度)基板側に回転し、反射光ビームを2方向のうちいずれか1方向に偏向する。よってミラーはスクリーン上の投射映像でピクセル(絵素)となる(図-2)。

DLPシステムはさまざまな映像ソースに対応し、画像をデジタル表示することができる。ソースはその種類に応じ、圧縮画の復調、アナログ/デジタル(A/D)変換、メモリ・チップ、ビデオ・プロセッサ、そしてデジタル・シグナル・プロセッサ(DSP)を経て、時間軸上の画像データは純粋なデジタル・ビットからなる面データ流に変換され、DMD表示が可能となる。データはDMDに入力され、各ミラー表面より光が反射されデジタル画像が形成される。たとえばSXGAの場合、130万個以上の微小ミラーが1秒あたり数千回以上のオン・オフをスイッチングすることになる。このオン・オフのパルス幅の割合を変化させるPWM技術により中間調を表示し、光路にカラー・フィルタを配置することで画像をカラー化する。また、DLP光学システムに適合した色分離・合成プロセスが選択される。光源からの光をDMDのミラー表面に照射し、その表面より反射してくるデジタル画像を投射レンズにより拡大し、スクリーン上に投射する。このようにして、DLPの画像は連続する光ビット面により形成されることになる。DLPによる画像

表示ではデジタル・フレームからフレームへの時間のずれやにじみが起きず、静止画像のみならず動画像においても高画質表示が実現できる。DLP技術によるデジタル・ディスプレイはデジタル処理で一貫した映像システムの最終段階に適応する。

画像方式の一貫性

X軸-Y軸、時間、明るさの要素からなる、連続する視覚体験の分割方式を決定することは重要である。フィルム・カメラは視覚の流れを時間で切り取る。時間幅はカメラのシャッター速度によって決まり、露出時間内に積分された視覚情報は現像工程を経てフィルム面上に記録・保存される。面のすべての空間部分が同じ時間内に一致するので、この方式は面順次である。これとは対照的に、線順次走査は上から下まで時間的に少しずつ遅れて走査される走査線の集まりとして連続を概念化する。現在、映像ソースはフィルム・カメラ、CCDカメラ、アニメーション、コンピュータ・グラフィクス等から製作されており、これらには面順次方式が採用されている。画像工程を通じ方式を一貫することにより、方式の不一致から発生する擬似パターン問題を回避できる。CCDカメラで撮影した画像を走査型CRTで表示するとき、方式の不一致により、動体は傾斜して歪む。これは視覚空間の時間方向を斜めに見ることにより生じている。また、線順次走査、

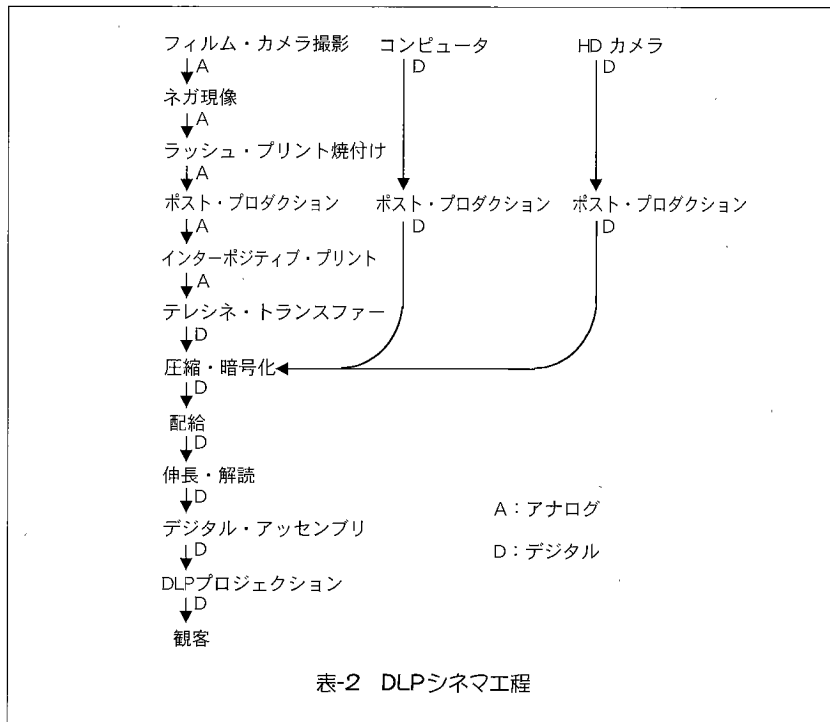


表-2 DLPシネマ工程

飛び越し走査により、面順次のデータを表示する場合、水平に動く境界がギザギザになる。これは信号がフィールドに分解されることによる。よって、デジタル・シネマ応用では視覚空間は独立したピクセルにより面順次でサンプリングされる。DLPによる画像は、フィルムと同様な連続する面発光により形成される³⁾。面発光を時間でスライスすると、その面は光の1, 0によるビット面により構成されていることが理解できる。ビット面は非常に高速にスイッチングし、光のデジタル情報は目の中でアナログ量に変換され、階調を持った画像として知覚される。DMDはデジタル・データを面順次に表示する(図-3)。

他のパラメータは面(フレーム)レートである。動きのジャダは3:2変換プロセスを行ったビデオに生ずる。映画は、リフレッシュ・レートは48で1秒あたり24枚の表示を行い、NTSCビデオは60Hzの飛び越し走査を行う。テレシネ工程で24Hzのデータを3枚、または2枚の飛び越しビデオとして表現する変換を行う。これは3:2変換といわれ、その変換により時間方向に3枚2枚3枚2枚と続くパターン歪みが

取り込まれ、動きにゆらぎによるジッターを生じることになる。

映画の歴史において、動きを感じる最低のフレーム・レートは16枚/秒であることから、そのレートは16枚/秒から始まった。トーキーの導入時にそれは光学式録音品質を改善する意味で24枚/秒に上げられた。人間の目は50Hz以下でフリッカーを知覚し始める。よって、映画フィルムは24フレーム/秒(以下fps)であるが、実際には1フレームはダブル・シャッターリングにより1/96秒の映写、暗黒、映写、暗黒と構成され1秒あたり48枚の絵を間欠的に映写している。走査線形式のCRTではフリッカーの問題があり、フレーム・レートは24fpsに減らせない。DMDは強いフリッカー耐性を備える。DMDの表示方式に従来のフレームの定義を適用すると1デジタル・ビット面表示に対応し、その表示時間は20usのレベルである。よって、DMDの真のフレーム・レートは50000Hzで、人間がフリッカーを感じる限界を超えている。実際の画像表示において、PWMにおける長ビットは細かく分割して1/24秒のフィールド内に均一に分散させるビット分割の技術²⁾

を用い、どんなフリッカーも視覚的に除去している。デジタル・シネマでは、DLPのフレーム・レートは24fpsに設定され、フリッカーを生じることなく映画フィルムの24fpsに適応する。

DLPシネマ

DLPシネマは、デジタル・シネマ工程においてDLPプロジェクタをプロジェクション装置として採用し、その工程はテレシネ変換(またはHDカメラ、コンピュータ)から目まで一貫してオール・デジタル化される。色と階調は時間を精確に刻むことにより決定される。アナログ光バルブに見られる遅れや動きのにじみは生じることなく、写真に見られる退色・劣化、熱・エイジング効果もない。システムは素早く立ち上がり、保守・維持は簡単である。DLPシネマはデジタルの忠実性・安定性を提供し、ソース・データの品位を目まで保持する(表-2)。

◆ DLPシネマ試作機

1997年5月に、1280×1024解像度のSXGA DMDを基にして、DLPシネマ技術を実証するプロジェクタ開発が始まった。ゴールは現



図-4 TI DLPシネマ試作プロジェクタ

有のプロジェクタをアップ・グレードし、シネマ応用に向けて高画質、高輝度の映像を作り出すことにあった。映画業界の技術・創作集団がこの評価プロセスに参加した。このプロジェクタ開発からの経験・知識・フィードバックを基に、4Q97にDLPシネマ試作プロジェクタ、すなわち、オール・デジタルの次世代シネマへのシステム・レベルのアプローチが始まった。

試作プロジェクタ(図-4)の主な能力を列記する⁴⁾、⁵⁾。

1. 映画館への設置において財政負担を軽減するため、a) 反射鏡を赤外線吸収特性を持つ2色フィルター鏡に改造した標準フィルム映写用ランプ・ハウスの使用、b) 高出力の汎用キセノン・ランプの使用、c) フィルム映写用ヘッドと同じ光軸を維持するDLPプロジェクション・ヘッドの設計(図-5)。
2. フィルム・プロジェクタより高い光効率を持つDLPプロジェクタにより映写室の過熱・電力を削減できる(図-6)。DLPは、フィルム映写において次のフレームが送り込まれるときにシャッターにより表示を暗黒とする必要がない。
3. 1280×1024DMD (5:4アス

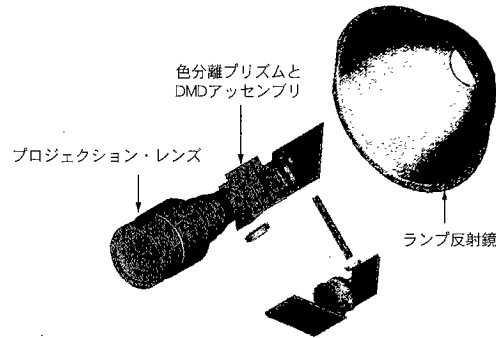


図-5 DLPシネマ技術—照射光学系⁵⁾

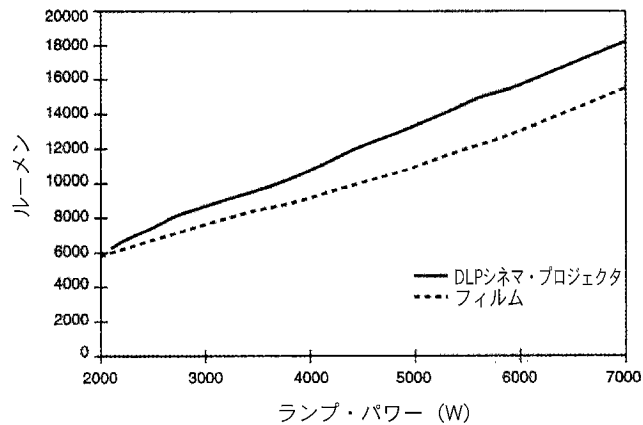


図-6 フィルム対DLP効率⁵⁾

ペクト比)と各々1.5×と1.9×の2種の歪像レンズによる組合せによりフラット・フォーマット(1.85:1)とシネマ・スコープ・フォーマット(2.35:1)の映写が可能である(図-7)。

4. フレーム・レートは24fpsを採用し、映画のフレーム・レートと一貫性をとる。通常、ハイ・ディフィニション(HD)の記録・再生機器は60フィールド/秒で動作する。HDソースは、24fpsフィルム・レートから3:2変換処理により時間分解能を増やし、60フィールド/秒ビデオ・レートに変換して製作されている。HDソースをテレシネ変換する時、今度は逆3:2変換処理によって24fpsに戻す。この処理により映画のような映像体験が得られ、また、3:2変換処理により発生した擬似パターンは除去される(図-8)。PWMにおいてビット分割シーケンスによりどんなフリッカーも知覚的に除

去、さらにミラーの20us以下という高速スイッチング性能により画像遅延のない表示を可能とする。

5. 15m幅の映画館に適應するプロジェクタの出力と高輝度化。5kWキセノン・ランプを使いフラット・フォーマットの15m幅スクリーン上で14fLの輝度を得る。
6. >1000:1のシステム・コントラストを達成し、通常映画館の封きりプリントのフル・オン/フル・オフのコントラスト比を満足、ないしは凌駕する。
7. 色変換処理においてビット解像度を増やしプロジェクタの色処理能力を向上。非線形ビット分解能は8ビット/色より10ビット/色に、線形ビット分解能は10ビット/色より14ビット/色に増やしている。マルチ・タップFIRフィルタにより副サンプル色差データを4:2:2から4:4:4に広帯域変換、YCrCbコンポー

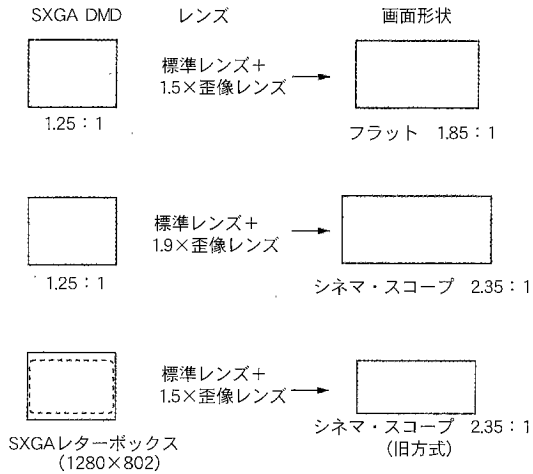


図-7 歪像レンズの使用による画像フォーマット⁵⁾

フィルム (24フレーム/秒) ビデオ (60フィールド/秒) DLP (24フレーム/秒)

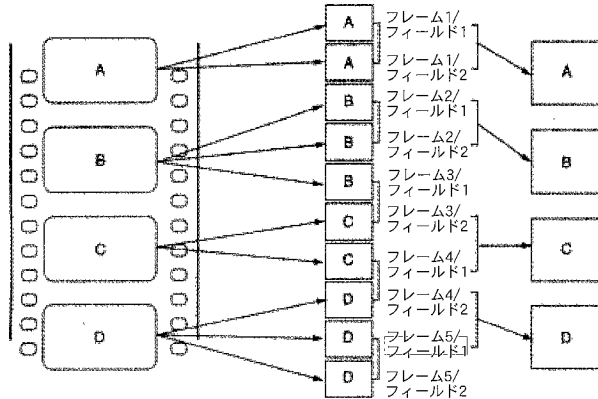


図-8 フィルムからビデオへの3:2変換処理、およびビデオからDLPへの逆3:2変換処理⁵⁾

解像度	1280×1024離散ピクセル
光束	13,000+ルーメン (5,000ワット キセノン・ランプ)
輝度	18fL in scope (15m幅スクリーン) (SMPTE 196M: 16±2fL)
コントラスト	>1000:1フル・オン/フル・オフ
輝度均一性	15% (SMPTE 196M: <25%)
色温度	5800 to 6500 K (SMPTE 196M: 5400±400K)
有効ビット深さ	14ビット/色-線形空間
表示レート	24fps

(fL:輝度の単位でフートランペルト footlambert 1fL=3.426cd/m²)
表-3 DLP Cinema試作プロジェクタの総合性能

ネット信号をRGB信号に変換する3×3マトリクス色変換は8ビット/色より12ビット/色に増やし、14ビット/色能力を持つ第2の3×3マトリクス色変換を追加し、線形空間での色補正制御を行う。

8. デジタル信号処理アルゴリズムを用いて、線形空間での有効ビット深さを14ビット/色に増加。

より深いビット分解能は暗いシーンでの十分な階調を与える。

DLPシネマ試作プロジェクタの総合性能パラメータをまとめた(表-3)。

◆ デジタル・シネマの現状と将来

1999年6月より、DLPシネマ試作機によるデジタル・シネマの実験

興行が北米の主要地域において始まり、2000年に入り、欧州、アジアを含む日本にもその興行地域は拡大してきた。世界各地でオール・デジタルによる映像体験が実現し、まさに、デジタル・シネマ時代の到来を実感させている。映画をデジタルの形で電子配給することは映画業界に膨大なコスト削減をもたらすと同時に、そこに至るには映画業界が新しいインフラに投資し、映画館を整備する必要がある。

デジタル・シネマ工程を構築していくためには、業界との作業により、配信時の圧縮・暗号化・記録・配信媒体について合意し、最終DLPプロジェクトに要求される仕様を確立し、主要地域でデジタル・シネマ工程を検証していく必要がある。業界がアナログからデジタルへの移行を考えると、工程の端から端まで一貫したデジタル情報処理を体系化し、市場の求める高品質を保証していくことが求められる。この配給システムがいったん構築されると、デジタル・プロジェクトにより数百のスクリーンで上映が可能になる。システムが成熟するにつれて、より多くのスクリーンがデジタルに変えられ、過去100年に渡って事実上変わることのなかった機械式のフィルム・プロジェクトを電子プロジェクトに置き換えていくと予想される。

参考文献

- 1) 白井 茂, 山本豊孝, 八木信忠, 広沢文則: 映画撮影技術ハンドブック, 写真工業出版社 (1999).
- 2) Van Kessel, P. F., Hornbeck, L. A., Meier, R. E. and Douglass, M. R.: Proceedings of the IEEE, Vol.86, No.8, pp.1687-1704 (1998).
- 3) Hewlett, G. and Werner, W. B.: Proceedings of the 137th SMPTE Tech. Conf., pp.435-445 (1995).
- 4) Hornbeck, L. A.: International Display Workshop '98, pp.713-716, Kobe (Dec. 7-9, 1998).
- 5) Werner, W. B. and Dewald, D. S.: Proceedings of the Annual 140th SMPTE Tech. Conf. and Exhibit, pp.406-412 (Oct. 1998).

(平成12年3月9日受付)