

4 E-6-5

高臨場感ディスプレイのための デジタル映像制作環境の構築

守屋俊夫 紅山史子 山崎眞見 武田晴夫
 (株) 日立製作所システム開発研究所

1. はじめに

従来のテレビや映画のような限られた矩形平面による映像表現に比べ、さらなる没入感、リアリティーを見る者に与える高臨場感ディスプレイが注目されている。視覚的臨場感を決定する要素の1つに視野角がある[2]。これが20度を超えると臨場感は次第に上昇し、約80~100度に達すると満足できる程度になるとと言われている[1]。このような原理に基づき IPT (Immersive Projection Technology) と呼ばれる技術が発展してきた。大画面によってユーザの周りをとり囲むことで映像への没入感を高め、高度な臨場感を実現しようとするものである。IPT の1つの具体例が多面ディスプレイである[3][5]。スクリーンを各側面に持つ立方体を作り、ユーザはその中に入ることで没入感のある映像空間を体験することができる。もう1つの形態は、半球あるいはそれに近い形でスクリーンを構成し、視野を球状にとり囲む効果で高視野角による臨場感を発生させようとするものである。IPT に基づく高臨場感表示環境は、いわゆる HMD (Head Mounted Display) タイプの表示システムに比べ、高解像度の映像を表示できる、頭の回転に対して映像の更新が必要無い、などの特徴を持つ。

筆者らは特に、(1) 正面、左右、床面の背面投射による4スクリーンからなる多面ディスプレイ、(2) 水平方向視野角約120° 垂直方向視野角約30° の球面スクリーン、の2つのタイプの表示環境の開発をすすめてきた。このようなシステムでは、映写環境と制作環境の両者において特殊な仕組みと相互間の密接な連携が必要となる。

筆者らのグループでは、映写環境を構築してい

く上でのコア技術として、プロジェクタアレイシステムの開発を行っている。上記の特殊な環境では、高解像度かつ高輝度の映像をいかに映写するかがまず問題になる。例えばある映写システムでは、70mm 15 パーフォレーションのフィルムを、特殊なレンズを装備した巨大な映写機によって投影することでこの問題を解決させている。我々はこれをデジタルシステム上で実現させるため、複数のプロジェクタをアレイ状に並べそれをシームレスに接続させる技術を開発し、原理的には無制限な高精細映像表示を可能にした。

一方、デジタル映像処理技術の発達により、映像制作・編集環境に目覚しい進展がみられてきた。CG (Computer Graphics) による仮想映像の生成、SFX (Special Effects) による撮影不能な迫力ある特殊効果の付与、ノンリニア編集の導入による編集作業の効率化等、数多くの新しい技術が、多様化・高度化・増大化する映像表現ニーズに応えうるようになってきた。

これら技術の開発やその運用は主に、テレビ・ビデオおよび映画の分野で展開されている[8]。デジタル映像制作に関わる優れたソフトウェアやシステムが数多く出現し普及してきたが、その大多数がビデオ映像あるいは映画用フィルム映像の制作を前提にしている。よって、本稿が対象とするような特殊ディスプレイ用の映像をこれらのシステムで制作しようとすると、多くの困難に直面する。これらは本映写環境が持つ特徴のうち、主に超高解像度と高視野角に起因している。解像度については既存システムの規模拡大によって原理的には対応可能である。しかし視野角に関する対策はそれほど単純ではなく、解像度の問題にも影響を及ぼす。

本稿では球面スクリーンにプロジェクタアレイによって映像を表示することを前提に、映像の

持つ特殊性を明らかにした上で、その対応を考慮した映像制作・編集環境について述べる。

2. 映写方式

2.1 プロジェクタアレイシステム[9]

大画面、高視野角、高精細、高輝度の映像表示を実現するため、我々のグループではプロジェクタアレイシステムを開発した。図1に示すように複数のプロジェクタをアレイ状に並べ、分割した映像をそれぞれのプロジェクタから映写することで目的となる映像表示を可能にする。本システムには、理想位置から映し出される映像をあらかじめ作成し供給する。しかしながら実際には、設置位置の誤差、プロジェクタの固体差等の影響で各プロジェクタの映像は厳密にはつながらない(図2 a)。そこで我々は事前にその映写環境でのキャリブレーションを行い、その結果に基づきプロジェクタへの入力映像をリアルタイムに幾何・色調変換する専用ハードウェアを開発した。これにより、各プロジェクタ間の幾何的および色調的連続性が保証される(図2 b)。

2.2 スクリーン形状とプロジェクタ配置

プロトタイプとして開発した球面スクリーンによる表示環境は次のとおりである。スクリーンは半径約 2100mm の半球面で、有効な映写範囲は横方向 120.0° 高さ方向 32.0° である。なお角度は地平座標であらわす。すなわち横方向は方位 (Azimuth) で、高さ方向は高度 (Altitude) で表現する。プロジェクタは図3に示すように水平方向に5台並べる。

2.3 射影モデルの決定

スクリーンの形状が決まると、映写する映像の射影方式の決定が必要になる。具体的方式は各種考えられるが、図4に示されるとおり、理想視点から見たときに実世界の3次元構造が正しく投影されるように、すなわち視点と被写体を結ぶ直線とスクリーンとが交わる点に、その点の映像が投影されるような射影方法を用いるのが物理的に最も自然と言える。ここでは仮にこの方式を理想射影と呼ぶことにする。しかしながらこの理想射影が、リアリティ、臨場感等を実際の映写環境で実現する上で最適であるかどうかは明

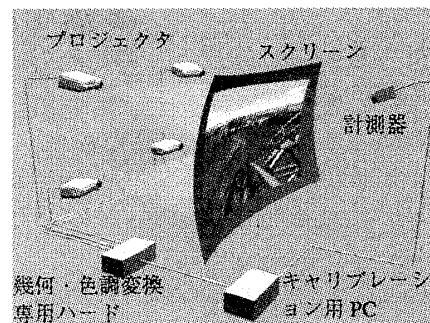


図1 プロジェクタアレイシステム

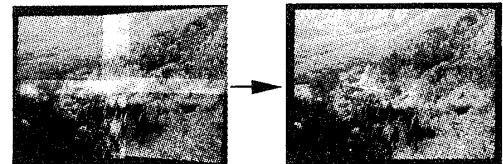


図2 プロジェクタアレイによる表示例

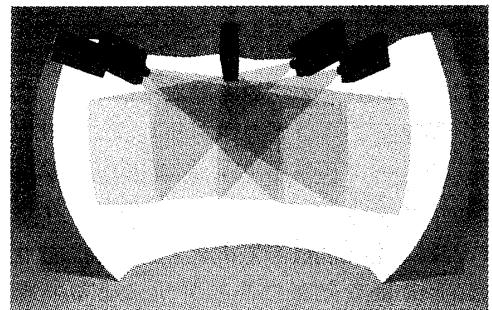


図3 球面スクリーンとプロジェクタの配置

らかではない。理想視点位置を少しでも外れてしまうと歪みが顕著になる、ホロプロト曲線に代表されるように人間の心理的な認識は必ずしも実際の空間配置と一致しない、など多くの要素を考慮に入れなければならないからである。筆者らの実験によれば、透視投影映像の等間隔領域がスクリーン上の等立体角領域に射影されるような射影方法が映像によっては非常に有効であることが認識されているが、これらの評価はまだ研究途中でありここでは詳しく触れない。本稿では理想射影を前提に議論をすすめる。

3. 制作環境の概要

3.1 機能の概要

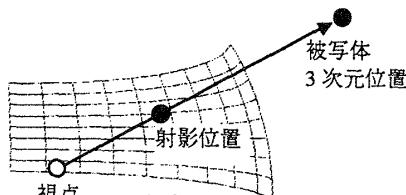


図4 理想射影

本制作環境が一般のシステムと異なり特別に考慮すべき項目は、

- (1) 高視野角、高解像度映像の取り扱いが可能のこと
- (2) プロジェクタアレイシステムのための適当な形式に、映像を変換し出力する機能（射影変換機能）を備えていること
- (3) 外部映像制作システムとのデータおよびパラメータの適切な受け渡し機能を有し、またそれらの制御手段を備えていること

が加えて重要となる。

3.2 システム構成

前述の要求を満たすようにシステムを構築した。図5に全体構成の概要を示す。本システムは、基本的に映画用デジタル編集・合成ソフト Cineon 上にプラグインの形で構築した。プラグ

イン開発環境が整っている、高解像度・大量データの対応可能、優れたユーザインターフェース・画像処理機能を多く備えておりそれらに関する新規開発の必要がない、Flowgraph によるワークフロー管理機能を備える、などがその採用の理由である。本システムを中心に、入出力システム、汎用CG制作・編集ソフト、および我々が別途開発した各種ソフトウェアが有機的に接続される。

4. 各機能の考察

4.1 射影変換機能

4.1.1 射影変換処理

本システムの基本機能となる射影変換機能について説明する。

最終的にプロジェクタに表示する映像は前述のとおり理想射影に従う。この射影変換を考える際には、映像の各点を単位球面に射影したときの3次元位置として表現するのが計算上都合がよい。すなわち、焦点距離 f の透視投影としてある画像が与えられたときに、画像上の位置 (x , y) に対応する球面射影位置は $\mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z)^t$ の形の3次元ベクトルで表現され

$$\mathbf{m} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。映像制作・編集における内部処理では、この \mathbf{m} を用い、映像データをスクリーンの位置

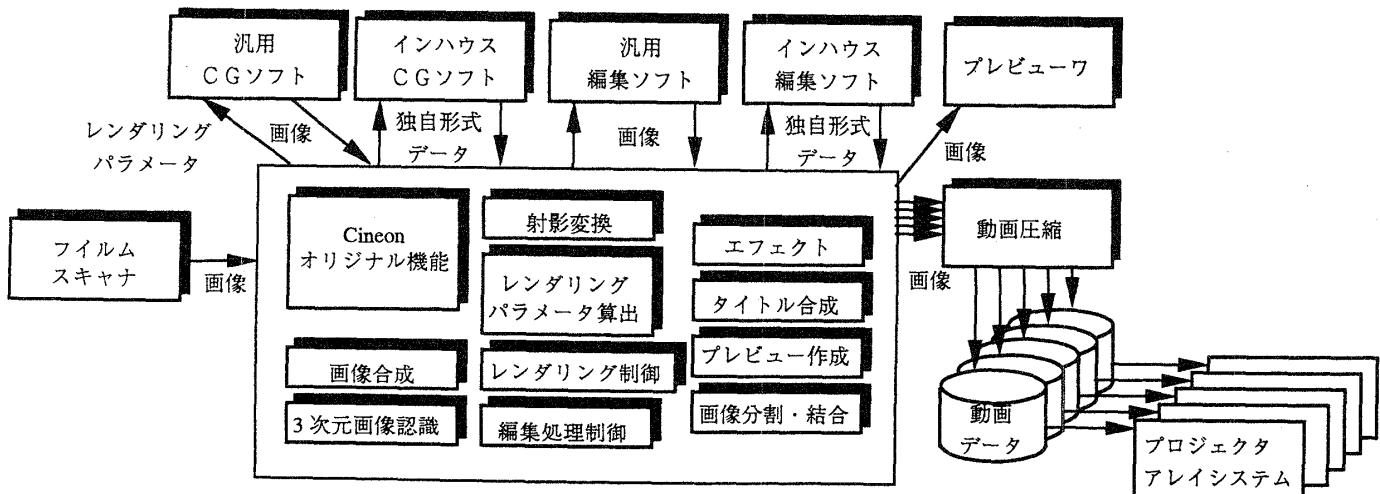


図5 システムの構成

と時刻に関する関数 $F = F(m, t)$ として扱うことができる。

説明を簡単にするため、時刻に関するパラメータ t を一定にし、ある瞬間のフレーム映像を考える。プロジェクタへの入力映像を $P(x)$ とする。ここで $x = (x_x \ x_y \ n)^t$ であり、 $x_x \ x_y$ は映像上の位置、 n はプロジェクタの番号である。スクリーン上の点を前述の m であらわす。プロジェクタの理想配置が決まると x と m との関係

$$m = g(x) \quad (2)$$

が定まる。一方、本編集システムへのある入力映像を $I(u)$ とする。ここで $u = (u_x \ u_y \ k)^t$ である。 k は入力映像を特定する番号である。入力映像の射影モデルおよびカメラパラメータから、 u と m との関係

$$m = h(u) \quad (3)$$

が定まる。式(2)と式(3)より出力映像と入力映像の関係は

$$P(x) = I(h^{-1}(g(x))) \quad (4)$$

により求まる。

4.1.2 射影変換時の問題点

前節の式(4)からわかるように、本変換では最終的に出力画像のパラメータ x についての関数により、すべての出力データを記述できる。すなわちこれは、内部的な処理過程で映像を2次元データとして定義する必要がないことを示している。本変換に限らず、本システムで行う内部処理操作をすべて x あるいは m についての連続的な関数で表現できれば、その過程における情報の欠落、すなわち画像の劣化は起こらない。しかしながら一般に次の各段階においては、映像を関数ではなく、あくまで2次元平面上に射影したデータとして扱う必要があり、ここにおける標準化の操作により画像が劣化[4]する可能性がある。

(1) 実写映像の入力

(2) 一般のCGソフトウェア、デジタル映像編集システムとの間の映像入出力

(3) 制作・編集時の確認作業

(4) 最終的な出力映像の作成

このなかで特に(1)(2)(4)の各段階では、扱われる平面射影後のデータが次のプロセスに渡される映像情報のすべてとなるので、画像解像度の観点から特にその射影方法の選択が重要となる。

さて、映像制作・編集時における映像データの、平面投影画像形式としての扱い方として大きく次の2つおりの考え方がある。1つは最終的な出力映像すなわちプロジェクタシステムに入力するデータ形式で取り扱う方法で、具体的には分割した複数の透視画像の組として扱う方法である。これに対してもう1つの考え方とは、何らかの射影方法によってスクリーンに映す映像を1枚の画像として扱う方法である。前者は、基本的に各画像のすべての領域が最終的にスクリーンに投影されるため、解像度とデータ量に関して無駄がない。また、この画像を直接プロジェクタシステムに入力できるので、処理途中の射影変換操作が必要ない。さらに、各画像の解像度がビデオ解像度に対応しているため既存の編集システムが直接利用できる、などの長所がある。しかし一方、画像が分割されているため作業時に全体のイメージがつかみにくい、各分割画像間にまたがる加工編集処理が困難である、また後に述べるCG作成時の分割レンダリングの問題が起こる、などの短所がある。

そこでまず、最終的なスクリーン映像を1枚の画像として扱う方法を考察する。この場合最も問題になるのがデータサイズと解像度の問題である。この点に注目し、各射影方法を比較検討する。

4.1.3 射影方式とスクリーン上の解像度

まず参考のため、5つに分割されたプロジェクタへ直接入力される映像を考える(図6a)。これは基本的に24°ずつ水平方向に回転させた透視画像である。ここでブロックで示される各領域は、スクリーン上で等間隔、等面積となるような領域に対応している。

次にスクリーン全体をカバーする透視投影を考える。透視投影と前述の単位球面射影位置 m との関係は、式(1)であらわしたとおりである。

この関係を用いて、スクリーンの領域を透視投影映像上に表示したのが図6bである。図からわかるように投影されない部分が多く存在し特に中央付近では顕著になる。さらに解像度は中央付近ほど粗くなる。これは大型ディスプレイについて一般に言われる中央部分の映像ほど重要、という要求に反する。中央付近で目的の解像度を得ようとすると、全体のサイズが膨大になり、切り取られる領域が大きくなるのみならず、周辺付近では必要以上の解像度が得られることになってしまう。以上のように本方式は多くの短所が存在するため、以下に述べる射影方式が利用できない場合にのみ、その使用が制限されるべきである。

次に魚眼投影を考える。魚眼投影にはその方式の違いにより、等距離射影方式、正射影方式、立体角射影方式、等立体角射影方式など多くの形式が存在するが、ここでは最も一般に使われる等距離射影方式（Equi-Distance Projection Model）を取り上げる[10]。本方式による投影位置と単位球面射影位置との関係は、

$$N \begin{pmatrix} x \tan(c\sqrt{x^2 + y^2}) \\ y \tan(c\sqrt{x^2 + y^2}) \\ \sqrt{x^2 + y^2} \end{pmatrix} = m \quad (5)$$

である。N はベクトルのノルムが 1 になるような正規化操作をあらわす。c はレンズ固有の比例定数である。この関係を用いてスクリーンの領域を魚眼映像上にあらわしたのが図6c,d である。透視投影に比べると、特に対角線魚眼において効率の点で著しい優位性が見られる。

次に円柱射影を考える。この方式は一般にパノラマ映像と呼ばれるもので、円柱上に映像をマッピングし、それを平面に展開する方式である。この方式の関係式は

$$N \begin{pmatrix} f \sin(cx) \\ y \\ f \cos(cx) \end{pmatrix} = m \quad (6)$$

である。図6e にこの方式による映像とスクリーン領域の関係を示す。円柱射影では矩形画像を

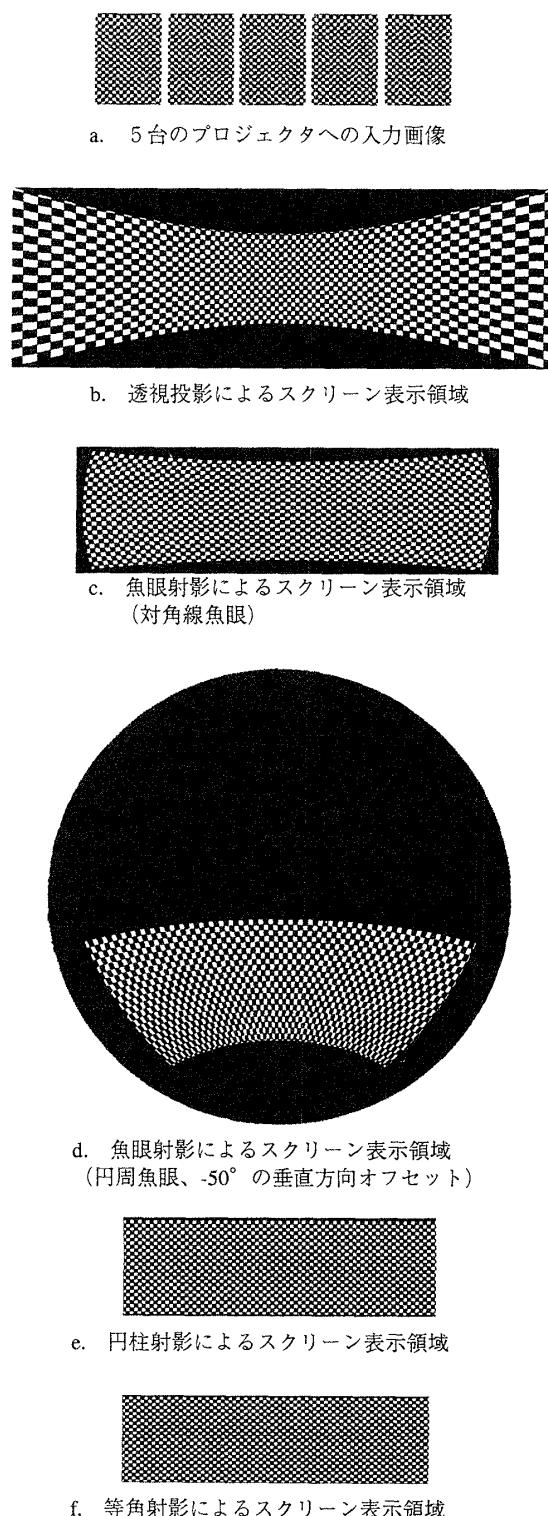


図6 射影方式の違いによるスクリーン表示領域の比較

仮定した場合無駄の無い映像が作成されるが、y 方向について投影画像上の等間隔領域に対して、スクリーン上で等間隔にならないという短所がある。この問題は垂直方向の視野角が大きくなる

に従い顕著になる。

そこで我々は次の射影方式が解像度という観点で最も適当であると考える。

$$N \begin{pmatrix} \sin(cx) \\ \tan(cy) \\ \cos(cx) \end{pmatrix} = m \quad (7)$$

これは、円柱射影を改良し、画像上の x 方向がスクリーン上の方位に、y 方向がスクリーン上の高度に比例するようにしたものである。図 6f に示されるように、画像上の等間隔の領域がスクリーン上の等間隔の領域に対応する。本方式では画像上で投影されない部分が無く、また粒度が全体に一様なので、最も効率的な射影方法と考えられる。よって 2 次元画像によるデータの受け渡しは、可能な限りこの方法で行われるべきである。

4.2 実写映像の入力機能

本稿が対象とするような特殊映像の制作では、映像ソースをいかに準備するかが問題になる。

まず実写映像であるが、一般的ビデオ入力装置を用いるのでは解像度的に全く不十分である。そこで我々は、基本的に実写映像として映画フィルムの使用を前提にした。

一般的 35mm フィルム映像は、4000×3000 ピクセル以上の空間解像度、各ピクセル 14 bit 以上の色解像度の情報量を持っていると言われる[6]。これを映画用フィルムスキャナでデジタル化することで要求を満たす映像ソースが得られる。なお、この際の射影方式であるが、前述の円柱あるいは等角投影を採用するには、撮影時にそのための特殊光学系を準備する必要がある。現実的にこれは容易で無いため、現在は魚眼レンズによる撮影を仮定するのが最も現実的と考える。

4.3 CG 映像の入力機能

4.3.1 問題点

一方 CG 映像であるが、現在一般に用いられるハイエンド CG ソフトウェアでは 4000 ピクセル角程度の解像度に対応可能であり、原理的には目的の映像作成は十分可能である。しかしこの場合膨大なレンダリング時間とデータ量の問題が発生するためデータ形式の選択が重要となる。

前述のように CG 作成の方法として、1 枚の大きな映像を作成する方法と、分割した複数の映像を作成する方法がある。

前者の方法ではその射影方式の選択が問題となるが、一般的 CG ソフトウェアで対応可能なのは基本的に透視投影であり、一部のソフトのみが魚眼をサポートしている。透視投影を仮定すると、各プロジェクトにその分解能以上の解像度を供給するためには約 3900×1300 以上の解像度が必要で、しかも図 6b に示したとおり周囲の黒部分は表示されない。この領域は画像全体の約 31% にあたり、それだけレンダリング時間とデータ量の無駄となる。

一方、後者の方法では図 6a に示すように目的の映像が前者に比べ非常に小さい解像度で得られる。具体的にはデータサイズとして約 1/3.3 である。しかしながら本方式では次に述べる 2 つの問題が明らかになった。

1 つはカメラパラメータ指定の問題である。透視投影を仮定した場合、一般にカメラパラメータはカメラ位置および方向、焦点距離によって決まる。しかし、スクリーンの形状や配置によってはこれだけでは十分とは言え無い。一例を上げると、理想視点位置が変更した場合、射影中心の設定が必要になる。しかしながら、一般的 CG ソフトではこの指定ができない。このため目的の映像を得るためにには必要以上の広い範囲をレンダリングして目的の領域をのみを切り出し、残りの部分を捨てる必要が生じる。

もう 1 つは分割レンダリングの整合性の問題である。カメラパラメータを正しく指定してやれば、原理的には隣り合う画像は適当な射影変換により接続可能である。しかしながら実際には CG ソフトの特性によりこれが保証されない場合がある。考えられる現象の例として以下が上げられる。

- (1) テクスチャの連続性
- (2) 影の連続性
- (3) パーティクルの連続性
- (4) 発光効果（グロー 等）の連続性

我々がある CG ソフトで実験した結果、(1), (2) については条件を代えてもすべて整合性は保たれた。(3)については整合性が保たれる場合とそうでない場合があった。(4)については整合性が

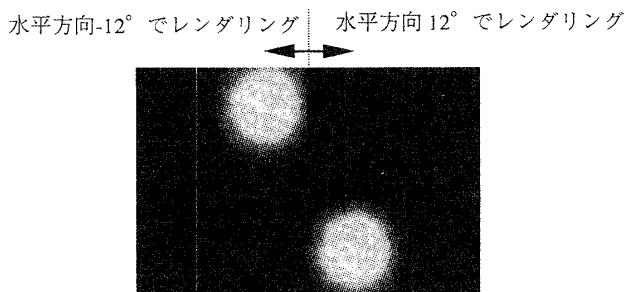


図7 分割レンダリングで作成した画像を幾何変換後接続した例。接続部において発光体の不連続性が見られる。

保証されなかった（図7）。

4.3.2 CGソフトに要求される機能

以上述べてきた諸条件を考慮すると、効率的にCG映像を作成するためには、本システムに接続されるCGソフトに以下の機能が備わっていることが要求される。

- (1) 射影位置 m に関する画素値の関数としてデータの受け渡しが可能であること
- (2) 任意の射影モデルが定義可能（設定できるパラメータの制限が無い）であること
- (3) 出力画像の形状が矩形に限定されないこと
- (4) 分割レンダリングの際に、各画像間の整合性が保証されること

そこで、本システムに接続されるCGソフトで我々が独自に開発したものについては以上の条件を指針とした。一方汎用ソフトでこの条件に合致しないものとの連携については、透視投影を前提にし、映像の性質に応じ、問題が生じ無いものについては分割レンダリングで、またそうでないものは、解像度やデータ量、レンダリング時間のいずれかを犠牲することで対応できるようにした。

4.4 映像編集機能

ポストプロセス時に行われる処理についても、高視野角および分割画像を取り扱うために特別な機能が必要となる。本システムで実現した主な機能について述べる。

[1] エフェクト機能

ワイプ、カーテン等のエフェクトを画像全体に付加する処理は、射影モデルを考慮して行う必要

がある。よって、本システムではまずエフェクトを前述の単位球面座標 m の関数として定義した後、各プロジェクタの射影映像に変換する。

[2] タイトル・テロップ合成機能

タイトルの文字など、実世界に3次元として存在し得ないものの画像を重畳する場合、これを出力映像に直接合成すると、スクリーン上で歪んで見える場合がある。合成時には、射影モデルを考慮した変換機能が必要となる。

[3] プレビュー機能

エラーの検出、最終映像の印象の確認などの目的で、プロジェクタアレイに対して出力される直前の映像をチェックする機能が求められる。よって、すべての映像を同期して单一画面上で見る機能が必要になる。但しこの場合平面ディスプレイによる表示となるため、各画像間の連続性は保証されない。

[4] ノンリニア編集機能・圧縮データ作成機能

カット点の修正等のノンリニア編集処理は、すべてのプロジェクタ映像に対して全く同じ処理が繰り返される。よって、ユーザの指定により、異なる映像に対して同じ処理が行える機能が必要になる。また最終的な圧縮データ作成時も同様の機能が必要になる。

[5] 合成機能[9]

実写あるいはCG映像のある領域をマスク情報を使って切り出し、別の映像に合成する機能は、多くの映像制作において利用される。一般に、合成される映像と合成する映像のカメラパラメータを一致させることで、幾何的に違和感の無い合成が実現される。しかし撮影時の誤差の混入などにより、厳密な意味でのパラメータの一致は困難であり、合成処理時の微調整は不可欠である。その代表的な例がスタビライズである。一般的な撮影映像では、撮影時のカメラの微妙な揺れが混入していることがあり、この場合、直接撮影画像にオブジェクトを合成すると、これが不要に振動をして見えてしまう現象が発生する。このため、あらかじめ画像の揺れを検知し、これを適切に止めるような画像補正が必要になる。一般映像用の合成システムでは、この問題を画像の2次元補正により解決させている。しかし本システムが対象とする広角映像では、2次元補正を行うと無視できない歪みを生じる部位が現れてしまう。そ

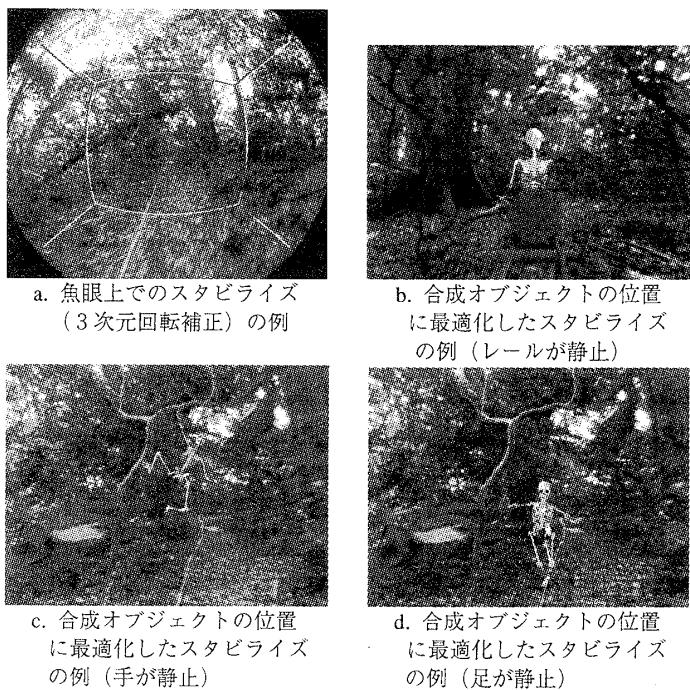


図8 合成時のスタビライズ処理の例
(b, c, d は透視投影にて表示)

ここで我々はこれを画像の3次元回転により実現する方法を開発した。特に合成品質に強く関わる位置に重みを持たせることで、最適なスタビライズを行う(図8[7])。画像の3次元情報抽出機能が必要になるが、独自に開発した3次元認識プログラムによりこれを実現している。

5. おわりに

高臨場感を実現する高視野角・大型スクリーンのための映像制作・編集環境について述べた。映像の持つ特殊性から、解像度とデータ量、および一般システムとの連携について特別な対策が必要となる。本稿ではこれら諸問題を明らかにした上で、映像の3次元的な投影位置を考慮した各種画像処理機能、射影変換機能、分割映像の処理機能などをインプリメントしたシステムの構築について述べた。映写環境、作成するコンテンツの性質、外部制作システムの特性などに応じ、映像を最も適切な画像形式として柔軟に取り扱うことができるので、効率的な映像制作が可能となった。

さらなる機能拡張と、インタラクティブコンテンツへの対応が今後の課題である。

参考文献

- [1] 畑田豊彦, "広視野動画像による臨場感の客観的測定," テレビジョン学会技術報告, Vol. 5, No.29, 1981.
 - [2] 廣瀬通孝, 中垣好之, 谷口雅昭, 小森信也, 遠藤隆明, "はいれるテレビの開発," 情処研技, 94-69-1, 1994.
 - [3] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎, "多面型全天周ディスプレイ(CABIN)の開発とその特性評価," 信学論(D-II), Vol.J81-D-II, No.5, 1998.
 - [4] 光と画像の基礎工学, 電気学会, 1984.
 - [5] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, Thomas A. Defanti, "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE," Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1993.
 - [6] Glenn Kennel, "Grayscale Transformations of Digital Film Data for Display, Conversion, and Film Recording," Journal SMPTE, December, 1993.
 - [7] Toshio Moriya, Fumiko Shiojiri and Haruo Takeda, "Dynamic 3D Stabilization for Video CG Composite," IEEE Proceedings of Workshop on Applications of Computer Vision, 1998.
 - [8] Thomas A. Ohanian, Michael E. Philips, Digital Film Making, Focal Press, 1996.
 - [9] Haruo Takeda, Masami Yamasaki, Toshio Moriya, Tsuyoshi Minakawa, Fumiko Beniyama and Takafumi Koike, "A Video-based Virtual Reality System," Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST99, 1999.
 - [10] Yalin Xiong, Ken Turkowski, "Creating Image-Based VR Using a Self-Calibrating Fisheye Lens," IEEE Proceedings on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997.
- (Cineon は米国イーストマン・コダック社の登録商標です。)