

プロジェクタ複合表示によるドームディスプレイシステム

緒 方 正 人[†] 和 田 博 之[†]
梶 原 景 範[†] ジェロエン バンバー^{††}

近年、複数のプロジェクタから投影された不連続で歪んだ映像をデジタルカメラと画像認識技術を用いて単一の連続した歪のない映像に合成するプロジェクタモザイク技術が多数提案されている。この技術は、広視野かつ高分解能の映像をコストパフォーマンス良く発生できることから、高い没入感・臨場感が必要とされる訓練用シミュレータや研究用シミュレータなどへの応用が期待されている。しかし、従来の提案では、映像の歪を検出し補正するキャリブレーション段階において設置するカメラ位置が、映像が歪なく見える視点の位置（スイートスポット）と一致していなければならないという強い制約があった。本論文では、表示スクリーンが二次曲面であるとの前提で、二次曲面係数行列を対角化する相似変換行列を用いて、カメラの設置位置及び方向を測定器により計測することなく、指定されたスイートスポットに正確にカメラを仮想的に設置したとして、高精度のキャリブレーションが行える「対角化仮想カメラ法」を開発した。これにより高い表示精度を必要とする訓練用シミュレータ等に適用できる実用的な実時間表示システムを開発した。

A Dome Display System with Projectors Mosaic Technology

MASATO OGATA,[†] HIROYUKI WADA,[†] JEROEN VAN BAAR^{††}
and KAGENORI KAJIHARA[†]

Projector mosaic technology has been under consideration in recent years. This technology allows the generation of a wide field of view and high-resolution images in a cost-effective manner. However the required manual setup for calibration is complicated and difficult. This is because the camera should be placed directly at eye point. For the actual applications, the camera is seldom able to be set up at eye point because of physical constraints such as narrow cockpit with many instruments. To resolve this issue, we have developed a "Diagonalization virtual camera method" that yields high-precision calibration regardless of the camera position. This method is based on a mathematical similarity transformation. Consolidating these element technologies, we developed a practical real-time multi-projector display system for applications such as training simulators that require high-accuracy in geometry and rapid response time.

1. ま え が き

訓練用シミュレータや研究用シミュレータにおいて没入感・臨場感を得るためには、高い解像度と広い視野が要求される。これをコストパフォーマンス良く実現する方法として、平面スクリーンまたはドーム等の曲面スクリーンに多数のプロジェクタから逆歪をかけた映像を投影して連続した画像に統合するプロジェクタモザイクあるいはマルチプロジェクション技術が期待されている。従来から電子回路やレンズを用いて光学的に歪を補正する方法は広く用いられているが、スク

リーンのサイズが固定されたり、プロジェクタ設置時の調整が複雑など多くの問題がある。また、複数配置して大画面を構成するため、境目を緩和する専用回路付きの高価なプロジェクタが必要となり、位置合わせや輝度の調整などに多大な時間と労力を要する。本論文では上記課題を解決するために、カメラによる認識処理を用いて複数のプロジェクタ映像を連続してドーム等の二次曲面スクリーン上に表示する実時間映像発生システムに関して報告する。

2. 従来の研究と相違点

2.1 従来の研究

カメラと画像認識技術を用いて複数の映像を自動的に合成する方法は、パラメトリックな方法と非パラメトリックな方法に分類される。非パラメトリックな方

[†] 三菱プレジジョン（株）
Mitsubishi Precision Co. Ltd.

^{††} 三菱電機米國研究所
MITubishi Electric Research Laboratories

法ではスクリーンの形状は任意であり、パラメトリックな方法では、スクリーンは何らかの関数で規定される。通常この関数として、球面、放物面などを表す二次曲面が多く用いられている。実用上、製作が容易であることから多くの曲面スクリーンは後者である。パラメトリックな方法には^{1),2)}の方法などがあり、非パラメトリックな方式には³⁾などが提案されている。非パラメトリック方式の特徴としてはスクリーンの形状は任意であるが、この場合歪をとるためには画素単位の歪補正が必要であり通常このためのハードウェアを持つ。パラメトリックな方法は、像が歪なく見える位置 (Sweet Spot) の実時間での変換が容易といった特徴がある。

2.2 相違点

従来の何れの提案も、歪のない映像を高精度で投影するためには、歪を検出するキャリブレーション段階において設置するカメラ位置と視点位置 (Sweet Spot) が一致しなければならないという強い制約がある。即ちカメラを設置した位置に視点があるときは歪がない連続した映像を発生できるが、この条件が成立しない場合は映像に歪が生じる。フライトシミュレータなどの精度を必要とする表示システムでは、コックピット及びスクリーンに対する視点の位置及び正面の方向は正確に規定されている。したがって、この位置・方向を計測し、その位置にカメラを設置してキャリブレーションを行う必要がある。しかし、カメラを設置位置に座席などの障害物があったりして物理的に設置し難しかったり、設置位置方向の正確な計測が煩雑であるため誤差を生じやすい。

筆者らの方法は、表示するスクリーンが二次曲面であるとの前提で、二次曲面を規定する係数行列の主軸変換 (対角化) が原点の移動に対応することから、この問題を解決した。これにより、カメラ設置位置を計測することなく、適当な位置にカメラを配置した後、設置位置でキャリブレーションを行うことによって、視点位置にカメラを正確に設置してキャリブレーションを行ったと等価的な処理結果を得ることが可能となった。

また、視点位置からの正確な視野及び映像が計算できるようになったため、全視野 (ビュー・フラスタム) を正確に自動分割可能となり、分割した視野で個々に映像発生が可能となる。従来は、視野の分割が困難なため、同一視野角によるレンダリングであった。さらに、従来の実装は3次元の座標に対して逆歪みを与えるため、シーンの複雑さに応じて歪補正の遅れ時間が増大するといった欠点があった。本論文の寄与は、従

来のパラメトリックな方式での歪補正^{1),2)}における、上記の欠点を改善する手法を開発し実用に耐える表示の位置精度および高速性を持つ実時間表示システムを開発したことにある。

3. 歪補正の原理

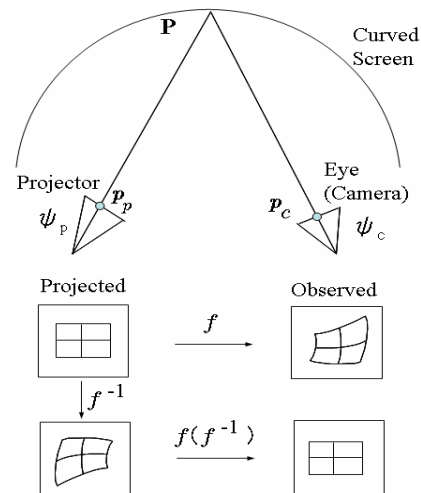


図1 映像に逆歪をかけて歪をなくす原理

視点と投影中心が一致する場合、映像歪は生じない。しかし、一般的には視点と投影中心は一致しないため歪が発生する。この歪を補正するには、視点から見て歪が無くなるように、予め、投影する原画像に対して逆の歪をかけて投影すれば良い。

図1に逆歪による歪補正の模式図を示す。図では、プロジェクタの投影により発生する歪 f を映像発生時 f^{-1} で逆歪をかけて投影すると $f(f^{-1})$ で歪が相殺されることを示している。また、図ではカメラの位置及び方向が視点及び視線方向と同じであると想定している。

スクリーンを二次曲面としたときの歪補正の関係式は、論文¹⁾⁴⁾⁵⁾で示されているが、明示的に導出が示されていない。本論分の主題を明確にするにはこの関係式が必要であることから、次節において幾何的な導出を示す。

3.1 マッピング関数の導出

3.1.1 マッピング関数 $f_{cp}()$ の導出

二次曲面上の1点 \tilde{P} を、異なる視点すなわちプロジェクタおよびカメラから見たときの像 p_p および p_c の関係を示すマッピング関数 f_{cp} を求める。以下、図2をもとに議論をする。

今、プロジェクタ射影空間 (Projective Space) p^2

プロジェクタ複合表示によるドームディスプレイシステム

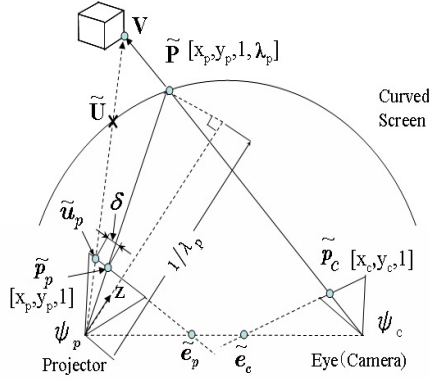


図 2 スクリーン上の点を異なる視点 (プロジェクタも視点として) からみたときイメージ平面間における位置関係: ずれ δ が歪みを生じさせる。

における点を \tilde{p}_p , 射影空間 p^3 における対応する点を \tilde{P}_p とすれば,

$$\begin{aligned} \tilde{p}_p &= [x_p, y_p, 1]^t \\ \tilde{P}_p &= [x_p, y_p, 1, \lambda_p]^t \end{aligned} \quad (1)$$

の対応がある。

また, p^3 の点 \tilde{P} をプロジェクタの座標系 Ψ_p からみた p^2 の点を \tilde{p}_p , カメラ座標系 Ψ_c からみた点を \tilde{p}_c とすれば,

$$\begin{aligned} \tilde{p}_c &= [H_{cp} | \tilde{e}_c] \tilde{P}_p \\ &= [H_{cp} | \tilde{e}_c] [\tilde{p}_p^t, \lambda_p]^t \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, \tilde{e}_c は Ψ_c におけるエピポールであり, H_{cp} はプロジェクタからカメラへの変換を示す 3 行 3 列のホモグラフィック行列である。

今, \tilde{P}_p が二次曲面上にあるとの制約を課すと, 4 行 4 列の二次曲面係数行列 Q_p を用いた,

$$\tilde{P}_p^t Q_p \tilde{P}_p = 0 \quad (3)$$

より

$$\begin{bmatrix} \tilde{p}_p \\ \lambda_p \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} Q_{33p} & q_p \\ q_p^t & q_{44p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_p \\ \lambda_p \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

これを展開して, 次の λ_p に関する二次方程式を得る。

$$\lambda_p^2 q_{44p} + 2\lambda_p q_p^t \tilde{p}_p + \tilde{p}_p^t Q_{33p} \tilde{p}_p = 0 \quad (5)$$

$q_{44p} = 1$ として良いので, これを解き, λ_p を求めると,

$$\lambda_p = -q_p^t \tilde{p}_p \pm \sqrt{(q_p^t \tilde{p}_p)^2 - \tilde{p}_p^t Q_{33p} \tilde{p}_p} \quad (6)$$

式 (2) に, この λ_p を代入して整理すれば,

$$\tilde{p}_c = H_{cp} \tilde{p}_p - (q_p^t \tilde{p}_p \mp \sqrt{(q_p^t \tilde{p}_p)^2 - \tilde{p}_p^t Q_{33p} \tilde{p}_p}) \tilde{e}_c \quad (7)$$

となる。この関係式 (7) は論文^{4),5)}に記載されている。右辺は \tilde{p}_p でまとめられ, 次式を得る。

$$\tilde{p}_c = (H_{cp} - \tilde{e}_c q_p^t) \tilde{p}_p \pm (\sqrt{\tilde{p}_p^t (q_p q_p^t - Q_{33p}) \tilde{p}_p}) \tilde{e}_c \quad (8)$$

$A_{cp} = H_{cp} - \tilde{e}_c q_p^t$, $E_p = q_p q_p^t - Q_{33p}$ と置けば次式となる。

$$\tilde{p}_c = A_{cp} \tilde{p}_p \pm (\sqrt{\tilde{p}_p^t E_p \tilde{p}_p}) \tilde{e}_c \equiv f(\tilde{p}_p) \quad (9)$$

この関係式 (9) は, 論文¹⁾ が用いた関係式である。

4. 対角化仮想カメラ法

パラメトリックな歪補正においては, カメラ設置位置と視点が一様でない場合でも, スクリーンの形状情報を用いて, 視点にカメラを仮想的に移してキャリブレーションが行えることを以下に示す。

4.1 原理

訓練装置等の精度を要求される表示システムにおいては, 視点位置は基準点からの変位により規定されるのが普通である。例えば, ドームスクリーンの場合ドーム中心を通る基線の後方 1 m などと基準点からの変位で規定される。図 3 に, 基準点, カメラ設置位置及び姿勢, 並びに視点及び視線方向すなわち仮想カメラの位置及び姿勢の関係を表す。

設置位置・姿勢が不確かなカメラから, 指定された視点位置・姿勢に直接移す回転・平行移動量を求めると考えず, 一旦基準点に正確に移し, この点からの変位を用いて最終的に指定された視点位置・姿勢に移動すると二段階で考える。この考えに立てば, スクリーンが二次曲面の場合, 一般的に基準点はスクリーンの中心であるので, カメラを任意の位置・姿勢から基準点の位置・姿勢へ移動することは, 二次曲面係数行列の対角化に対応する。この対応を用いればカメラの位置姿勢を実際に計測することなく, 曖昧な位置姿勢から基準点への移動量が正確に求まり, 最終的に指定された視点の位置姿勢へ移動ができる。これは, カメラを仮想的に指定の視点位置姿勢に配置してキャリブレーションを行なったことに対応する。

4.2 対角化による中心へのカメラの移動

カメラ座標系で求めた二次曲面係数行列を Q_c , 視点を原点とする視点座標系における二次曲面係数行列を Q_v とする。両者の関係は, M_{cv} を視点座標系から

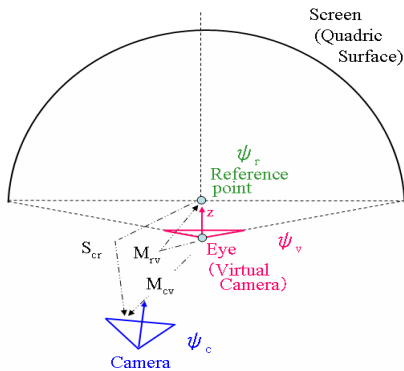


図3 カメラ設置位置から基準点を経て視点位置への移動

カメラ座標系への変換（移動，回転）行列として次式で与えられる．

$$Q_v = M_{cv}^t Q_c M_{cv} \quad (10)$$

Q_c は対称行列であり次式のように分解できる．

$$Q_c = \begin{bmatrix} Q_{33c} & \mathbf{q}_c \\ \mathbf{q}_c^t & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

二次曲面の中心を原点とする基準座標系からカメラ座標系への変換行列を S_{cr} とし，視点座標系から基準座標系への変換行列を M_{rv} とする二段階の変換を考えれば，視点座標系からカメラ座標系への変換 M_{cv} は次式で表される．

$$M_{cv} = S_{cr} M_{rv} \quad (12)$$

基準座標系からみた二次曲面係数行列は対角成分のみであるので，基準座標系からカメラ座標系への変換 S_{cr} は，式 (13) のように Q_c を対角化しなければならない．

$$S_{cr}^t Q_c S_{cr} = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 \end{bmatrix} = D_r \quad (13)$$

上の条件から S_{cr} が式 (14) のように求まる．

$$S_{cr} = \begin{bmatrix} R_{33} & -Q_{33c}^{-1} \mathbf{q}_c \\ \mathbf{O}^t & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

ここで， R_{33} は式 (11) に示す Q_{33c} を対角化する 3 行 3 列の回転行列である．

4.3 マッピング関数 f_{vp}

M_{rv} は設計時に指定される既知の変換行列であるので式 (12) から M_{cv} が決まる．これを用いて，3.1

章での議論をカメラ座標から視点座標への変換に置きかえて次のマッピング関数 $\tilde{\mathbf{p}}_v = f_{vc}(\mathbf{p}_c)$ が得られる．

$$\tilde{\mathbf{p}}_v = A_{vc} \tilde{\mathbf{p}}_c \pm (\sqrt{\tilde{\mathbf{p}}_c^t E_c \tilde{\mathbf{p}}_c}) \tilde{\mathbf{e}}_v \quad ,$$

但し， $A_{vc} = C M_{cv}^{-1} - \tilde{\mathbf{e}}_v \mathbf{q}_c^t$ ，

$$E_c = \mathbf{q}_c \mathbf{q}_c^t - Q_{33c} \quad , \quad (15)$$

C は 3 行 3 列の仮想カメラの内部パラメータ行列 ．

最終的なマッピング関数 $f_{vp}()$ が，

$$\tilde{\mathbf{p}}_v = f_{vc}(f_{cp}(\tilde{\mathbf{p}}_p)) \quad (16)$$

となる．筆者らは，この方法を「対角化仮想カメラ法」と呼ぶ．

5. 試作システム

上述の技術を確認するために試作を行った．試作前の段階では，実時間での歪補正処理が専用ハードウェアなしで実現可能であるか確信が持てなかった．結果的には期待以上の高速性が得られ，特殊なハードウェアなしで実時間化が達成できた．試作システムは，スクリーンを除いて全て COTS (Commercially available parts) である．

5.1 構成

図 4 にシステムの構成図を示す．図 5 に研究試作の外観を示す．本システムは PC クラスタ，カメラアレイ，ドームスクリーンおよび 4 台のプロジェクタから構成される．表 1 にシステムの性能諸元を示す．

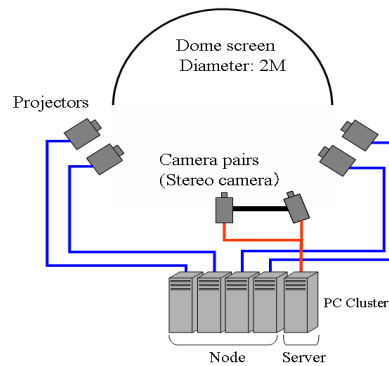


図4 試作した表示システムの構成

試作システムで稼動するプログラムは，(1) 認識プログラム (2) API (3) API を用いて映像表示を行なうユーザプログラムからなる．表 2 に機能を示す．

5.2 実装法

図 6 に PC クラスタに実装した 2 パスレンダリン

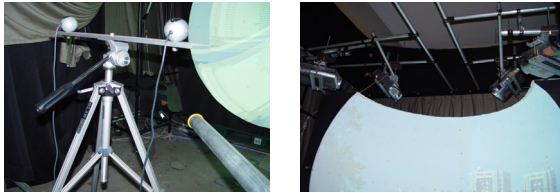
プロジェクト複合表示によるドームディスプレイシステム

表 1 システムの性能諸元

CPU	Pentium4 3.2GHz (5PC)
Memory	1GB
Network	Gigabit Ethernet
OS	WindowsXP (Linux も可)
Camera	640x480 Pixels
Projector	1024x768 Pixels
Graphics Board	NVIDIA GeForceFX 5950 256MB

表 2 試作システムを構成するプログラム

番号	プログラム	機能
(1)	認識処理	(a) ステレオカメラで Q を検出する。 (b) 対角化仮想カメラ法による、視点位置へのカメラ移動後の A, E, e の計算
(2)	API	(a) QTInit(): 歪補正処理の準備 (b) setFrustum(): 分割視野の設定 (c) QTWarp(): 歪補正の実行
(3)	レンダリング	通常の OpenGL コードであるが API を呼び出し歪補正を実現。



(a) カメラアレイ (b) プロジェクタ取り付け

図 5 システムの概観

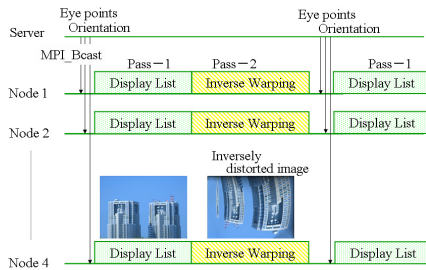


図 6 OpenGL を用いて PC クラスタに実装した 2 パスレンダリングによる映像発生

グによる映像発生を示す。以下、図に従い説明する。サーバから各ノードへ視点および姿勢がブロードキャストされる。この情報を各ノードが受け、パス 1 として OpenGL のディスプレイリスト (Display list) を実行してフレームバッファに描画する。次に、パス 2 として、このフレームバッファの内容をマッピングテーブルとして格納されている f_{vp}^{-1} が示すオフセッ

ト値 ($\delta p, \delta q$) だけ画素位置を移動させてフレームメモリ 2 に書き込むことにより歪をかけた映像が発生される。この歪映像を投影した場合、歪がない複合した大画面が得られる。これをフレーム毎に繰り返す。パス 2 は API である QTWarp() を呼び出すことにより行なわれる。図では、初期化の処理を示していないが、変換テーブル f_{vp}^{-1} を読み込むための API である QTInit() が、起動時に一度呼ばれる必要がある。また、各視野の設定として SetFrustum() が呼び出されている。

5.3 歪補正処理を行う API

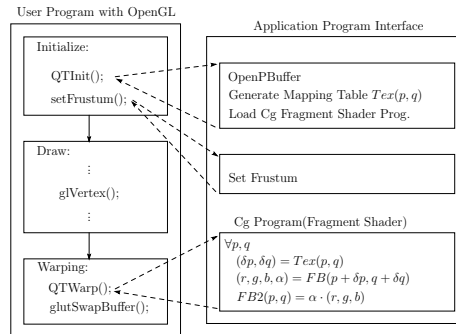


図 7 Cg を用いた API の実装

歪補正処理は API(Application Program Interface) を介して行われる。図 7 はユーザプログラムと API の関係を示した図である。OpenGL で記述された初期化部から QTInit() を呼び出すことにより f_{vp}^{-1} を計算してテーブル化して GPU にロードする。また、表示のための Pbuffer を開く。また、描画が終了した時点で、API である QTWarp() を呼び出すことにより、Cg フラグメントシェーダに起動がかかり歪をかけた映像が発生される。API は表 3 に示す 3 種類を持つ。

表 3 API の種類と機能の一覧

番号	API 名	機能
(1)	QTInit()	(a) Quadric 変換を行なうパラメータ等をファイルから読み込む。 (b) f^{-1} を計算し、値をテーブルとして保持 (c) Pbuffer のオープン
(2)	SetFrustum()	オーバラップした視野を指定する。
(3)	QTWarp()	ピクセル単位にフレームメモリの内容に歪をかける。

6. 評価実験

試作システムと歪補正 API を使用した描画プログラムにより、機能および精度の評価を行った。図 8 は幾何補正機能と輝度補正機能の評価を示す。図 8(a) は

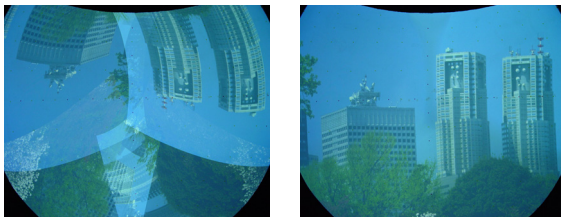
表 4 カメラとプロジェクタ間の位置合わせ誤差

Proj. No.	Registration error on the screen	
	Error in Pixels	Error in length [mm]
1	0.649	3.5
2	0.881	3.0
3	0.881	3.0
3	0.674	3.0

表 5 システムの処理時間

番号	項目	性能
(1)	キャリブレーション時間	35.0 分
(2)	遅れ時間 (1024x768 画素の歪補正時間)	0.343 ミリ秒
(3)	レジストレーション誤差 (最大)	0.881 画素

幾何補正および輝度補正前, 図 8(b) は幾何補正および輝度補正後の画像である。歪んだ投影画像が補正され 1 つの映像として合成されていることが分かる。また, 投影が重複して明るくなる部分が輝度補正により低減されているのが分かる。表 4 に各プロジェクタの



(a) 歪補正前

(b) 歪補正後

図 8 複雑なモデルによる幾何補正および輝度補正の評価実験

レジストレーション誤差を示す。最大誤差が 1 画素以内であることが分かる。また, スクリーンでの最大誤差は, プロジェクタ 3 で発生しておりスクリーン上の距離で約 2.6mm である。表 5 にシステムの基本的な性能を示す。歪補正を行う API である QTWarp() の処理が 1ms 以内であることは特筆すべきことである。

比較的解像度の低いプロジェクタを多数用いて部分画像を投影し, 高解像度の大きな画面をドームを含む二次曲面スクリーン上に表示する実時間映像発生システムに関して報告した。

従来は, 歪を検出するキャリブレーション段階において設置するカメラ位置と映像歪がゼロとなるスイートスポットが一致しなければならないという強い制約があった。筆者らの方法は, 表示するスクリーンが二

次曲面であるとの前提で, 二次曲面を規定する係数行列の相似変換を用いた対角化によりこの問題を解決した。これにより, 視点位置にカメラを正確に設置することなく, 適当な位置にカメラを配置した後, 数値入力として所望の視点位置を与えてキャリブレーションを行うことによって, 視点位置にカメラを正確に設置してキャリブレーションを行ったと等価的な処理結果を得ることが可能となった。

また, 視点位置の正確な移動が処理の中で行えるようになったため, 全視野 (ビュー・フラスタム) を正確に自動分割可能となり, 分割した視野角で個々に映像発生が可能となる。このため, シミュレータなどで複雑な映像を表示する場合に必要な負荷分散が可能となる。

さらに歪補正の実装を Cg のフラグメントシェーダで行ったのでシーンの複雑さにより歪補正の遅れ時間が急激に増大する従来の欠点がなく, 分解能にのみ依存するようになった。

これらの技術を複合して実用に耐える表示の位置精度および高速性を持つ価格性能比の良い実時間表示システムを開発した。なお, 本開発システムは, 円柱などのドーム以外の二次曲面スクリーンに関してもそのまま適用可能である。

参考文献

- 1) Ramesh Raskar, Jeroen Van Baar, Paul Beardseley, “iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectores”, ACM SIGGRAPH, vol.22(3), pp. 806-818, 2004.
- 2) Ramesh Raskar, Jeroen Van Baar, Thomas Willwacher, Srinivas Rao, “Quadric Transfer for Immersive Curved Screen Displays”, EUROGRAPHICS, 2004.
- 3) M. Yamasaki, T Minakawa, H. Takeda, S. Hasegawa, M. Sato ”Technology for Seamless Multi-Projection onto a Hybrid Screen Composed Differently Shaped Surface Elements”, Sixth International Immersive Projection Technology Symposium, Orland, Florida, pp. 1-8, 2002.
- 4) Amnon Shashua, Sebastian Toelg, “The Quadric Reference Surface: Theory and Applications”, In IJCV, vol.23(2), pp. 185-189,1999.
- 5) Geoffrey Cross, Andrew Zisserman, “Quadric Reconstruction from Dual-Space Geometry”, In Proc. International Conference on Computer Vision (Bombay,India), pp. 25-31, 1998.