

PC クラスタによるドーム投映のための画像変形補正法

谷 寿人[†] 大野和彦[†] 中島 浩[†]

我々はプラネタリウムなどのドーム空間を対象とする、複数台の汎用プロジェクタとPCクラスタからなる新たな投映システムの研究開発を行っている。このシステムではプロジェクタが球殻(あるいはその外部)に設置されているため、ドーム中心からの投映を想定して作成された画像を投映すると、画像の辺縁部にかなりの歪みが生じる。本報告ではこの歪みを補正するために、ドーム空間の構造などをパラメータ化した上で、投映画像と原画像の間の座標変換を行う解析式を導出する。またこの解析式に基づき、実際の変形補正をテーブル参照によって行う方式を提案すること、より高い解像度の画像や複雑な補正処理の場合でもオフライン補正については実用的な性能が得られることが明らかになった。

Distorted Image Correction for A PC-Cluster Based Dome Projection System

HISATO TANI,[†] KAZUHIKO OHNO,[†] HIROSHI NAKASHIMA[†] and

We are now pursuing a research and development project of a new projection system for *dome* theaters such as planetaria. The system consists of a set of general purpose LCD projectors and a PC-cluster. Since a projector is located on the spherical surface of the dome, its projection image is distorted because the image is assumed to be projected from the center of the dome sphere. In this paper, we show a set of analytical equations with dome structure parameters for the coordinate transformation between projected and original images. Based on the equations, we also show a table look-up algorithm for the distorted image correction methods with various complexity. The implementation and evaluation of the algorithm proved that a simple correction method is applicable to real-time VGA image correction. As for finer images and/or more complicated correction methods, the practicality for off-line correction of the algorithm is also proved.

1. はじめに

プラネタリウムなどの大規模なドーム空間は、全天周をカバーする大きな画像表示空間として注目されており、星空や全天周映画など従来の映像に加えて、CGで作成された画像など新たな映像素材を用いた応用が期待されている。その際問題となるのは投映機器の特殊性であり、ドーム半球(または欠球)の中心から投映する通常のプラネタリウムの方式は、特殊な機器を要求するだけでなく映像素材も専用化する必要がある。したがって投映システムや映像素材のコストが高く、汎用性の乏しいものとなっている。

このような状況を改善する試みの一つとして、ドーム球殻上に配置した複数台のプロジェクタによって全天周をカバーする映像を投映するバーチャリウム¹⁾がある。バーチャリウムで用いられているプロジェクタ

は基本的に汎用品と同等であるため比較的成本は低く、任意のデジタル画像を投映できるという利点がある。しかし画像生成のために用いる高性能グラフィック・ワークステーションの導入/保守コストの他、投映画像の歪みを補正するハードウェア機構が必要であるため、コストの低下は必ずしも十分ではない。

そこで我々は、図1に示すように、複数台の汎用プロジェクタとPC(またはローエンドSMP)のクラスタからなるドーム投映システムの構築を目的とした研究を行っている。各プロジェクタには1台ないし複数台のPCが対応し、並列に画像生成や画像処理を行うが、その中でも重要な処理の一つが画像変形補正処理である。一般にドーム投映される画像は、ドームの中心から投映することを前提として作成されているため、球殻(あるいはドーム外部)に設置されたプロジェクタから投映すると、図2に示すように歪みが生じてしまう。そこで投映画像と原画像の座標変換を行い、投映画像の各ピクセルについて原画像の対応するピクセル値を求める画像変形補正処理を行う必要がある。

[†] 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology

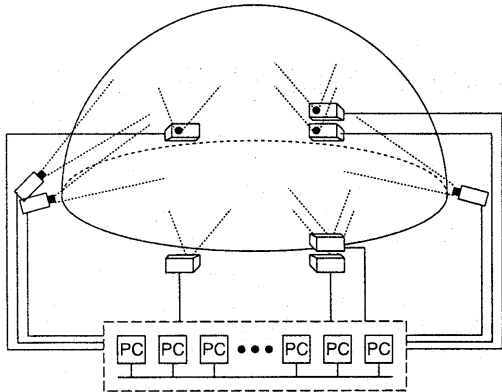


図1 ドーム映写システム

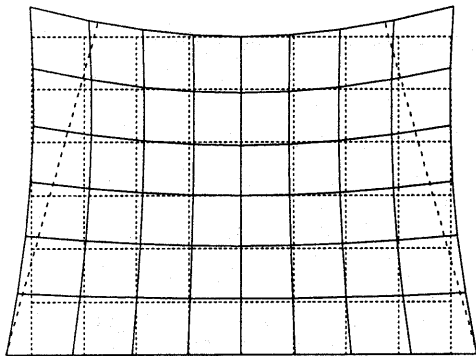


図2 底部プロジェクタの映写画像
 $(\alpha = \gamma = 0, a = 1, \omega = \pi/60, X^*/Y^* = 4/3, s = 0)$

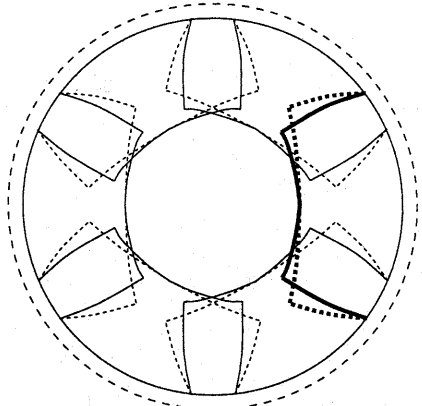
以下本報告では、この画像変形補正処理の方式と、簡単な性能評価について述べる。

2. ドーム空間の構造

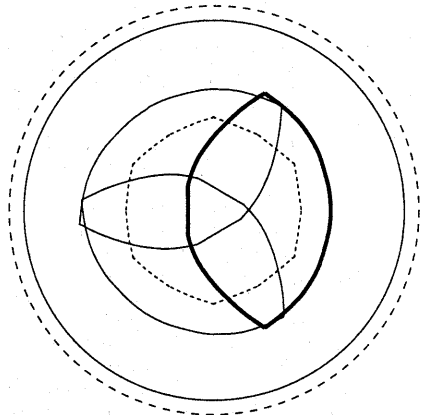
2.1 プロジェクタの配置

図1に示したように、本報告では9台のプロジェクタによってドーム空間を被覆することを想定している。すなわち正六角形の頂点上に配置された6台のプロジェクタによりドーム底部を(図3(a))、また正三角形の頂点上に配置された残りの3台のプロジェクタにより天頂部を(図3(b))、それぞれ被覆する。なお図3(a)の実線で囲まれた領域は一つの底部プロジェクタの映写領域であり、破線で囲まれた領域はドーム中心から投射した場合の対応する映写領域である。また同図(b)の実線で囲まれた領域は一つの天頂部プロジェクタの映写領域であり、破線は底部プロジェクタの映写領域の上端である。

一つの底部プロジェクタのドーム空間内での位置 O^* は、図4に示すように定められる。側面図(a)の角 α



(a)



(b)

図3 プロジェクタによるドーム空間の被覆

はドーム中の映写領域の下端の緯度であり、映写領域は $\alpha = 0$ ならば半球、 $\alpha > 0$ ならば欠球となる。 O^* はこの α で定まる平面上またはその下部にあり、かつドーム球殻上またはその外部に設置される。したがって、ドーム半径を単位とするドーム中心 O からの距離 a と(以下、全ての距離はドーム半径を単位とする)、直線 OO^* とドーム底面が成す角 γ について；

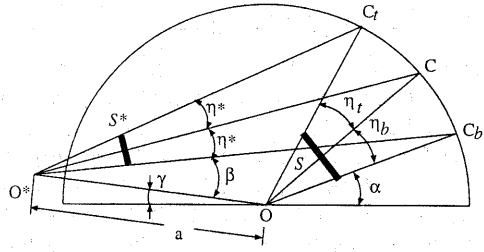
$$a \geq 1 \quad a \sin \gamma \leq \sin \alpha \quad (1)$$

がそれぞれ成り立つ。

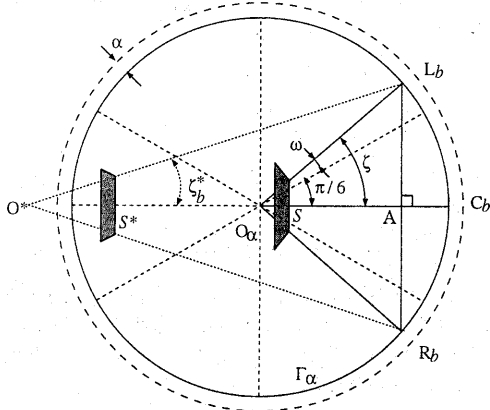
なお天頂部プロジェクタの位置も同様に定められ、変形補正のための解析式や必要なパラメータも底部プロジェクタと同様に求めることができる。したがって以下では、底部プロジェクタのみを対象として議論を進める。

2.2 映写画像と映写領域

底部プロジェクタが映写する画像の座標空間 S^* を、図5(a)に示すように $[-X^*, X^*] \times [-Y^*, Y^*]$ とし、



(a)



(b)

図4 底部プロジェクタの位置と投影領域

S^* 上の直線 $x^* = -X^*$, $x^* = 0$, $x^* = X^*$ のドーム球殻への投影像と緯度 α の緯線 Γ_α との交点をそれぞれ L_b , C_b , R_b とする。これらの点と O^* および Γ_α の中心 O_α の位置関係は、図4の上面図(b)に示すものとなる。ここで O_α , L_b , C_b , R_b は同一平面上にあり、また O^* , L_b , R_b も同一平面上にあるが、この二つの平面は一般には異なる。

6 台の底部プロジェクタの投影領域でドーム底部を被覆するためには、図4(b)に示す $\angle C_b O_\alpha L_b = \zeta$ が、

$$\zeta = \frac{\pi}{6} + \omega > \frac{\pi}{6} \quad (2)$$

を満たす必要がある。ここで ω は隣接する投影領域の重複度を定め、 a , α , γ とともにドーム設計パラメータの一つとして与えられる。これらのパラメータから、図4(b)および図5に示す $\angle L_b O^* A = \zeta_b^*$ (A は L_b と R_b の中点) は、以下の初等幾何の関係式に基づき算出される。

$$\begin{aligned} \overline{O^* L_b}^2 &= (\cos \zeta \cos \alpha + a \cos \gamma)^2 + \\ &\quad (\sin \zeta \cos \alpha)^2 + (\sin \alpha - a \sin \gamma)^2 \\ \sin \zeta_b^* &= \frac{\cos \alpha \sin \zeta}{\overline{O^* L_b}} \end{aligned} \quad (3)$$

一方、図5(a)および図6に示す $\angle C_b O^* A = \delta$ は、以

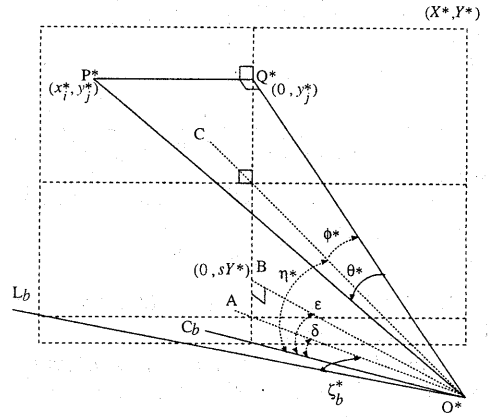
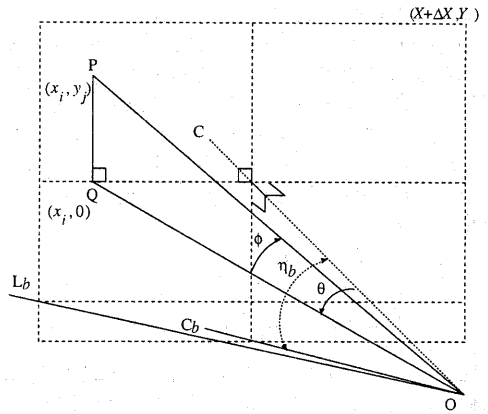
(a) S^* (b) S

図5 投影画像と原画像の座標空間

下の関係式から定まる。

$$\begin{aligned} \overline{O^* C_b} &= \sqrt{a^2 + 1 + 2a \cos(\alpha + \gamma)} \\ \overline{O^* A} &= \overline{O^* L_b} \cos \zeta_b^* \\ \overline{C_b A} &= \cos \alpha (1 - \cos \zeta) \\ \cos \delta &= \frac{\overline{O^* C_b}^2 + \overline{O^* A}^2 - \overline{C_b A}^2}{2 \overline{O^* C_b} \cdot \overline{O^* A}} \end{aligned} \quad (4)$$

したがって上記の ζ_b^* , δ と投影画像のアスペクト比 X^*/Y^* , およびプロジェクタの光軸の S^* 上の座標点 $B = (0, sY^*)$ ($-1 \leq s \leq 1$) より、図4(a)および図5(a)に示す $\angle CO^* C_b = \eta^*$ は、以下の関係式から定まる。ただし C は S^* の原点のドーム球殻への投影点であり、 $\epsilon = \angle BO^* C_b$ である。

$$\begin{aligned} \frac{X^*}{(s+1)Y^*} &= \frac{\tan \zeta_b^*}{\cos(\epsilon - \delta) \tan \epsilon} \\ \tan(\eta^* - \epsilon) &= -\frac{s}{s+1} \tan \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

なお上式より、たとえば $\cos \epsilon$ は4次方程式の解の一

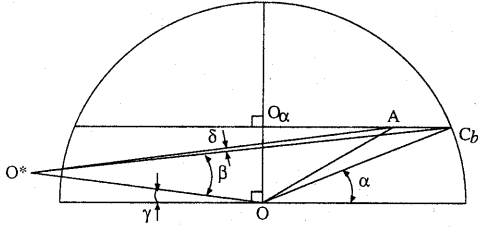


図6 投映画像の下端

つとして定まるが、これを解析的に求める必要はなく、近似解を求めればよい。

また $2\eta^*$ はプロジェクタの垂直方向の最大視野角に一致することが望ましく、悪くともそれより小さい必要がある。 $\tan \eta^*$ は a と γ に対して減少し ω に対して増加するので、 ω を固定したときの最大値は $a = 1$ 、 $\gamma = \alpha$ により求められる。ここで $\omega = \pi/60$ として $\tan \eta^*$ の最大値を求めると約 0.228 となり、ズーム機能を持った短焦点レンズの許容範囲（たとえば三洋 LNS-W02³⁾ では 0.204 ~ 0.266) に収まっている。

さて、投映画像の解像度を $m \times n$ ($m/n = X^*/Y^*$) とし、左下隅のピクセル座標を $(0, 0)$ とすると、ピクセル (i^*, j^*) ($0 \leq i^* < m$, $0 \leq j^* < n$) の S^* 上の座標 (x_i^*, y_j^*) は；

$$\begin{aligned} x_i^* &= \frac{2X^*}{m} \left(i^* - \frac{m-1}{2} \right) \\ y_j^* &= \frac{2Y^*}{n} \left(j^* - \frac{n-1}{2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

と定まる。また図 5(a) に示すように、この座標点を P^* 、座標点 $(0, y_j^*)$ を Q^* とすると、 P^* は $\angle CO^*Q^* = \phi^*$ と $\angle Q^*O^*P^* = \theta^*$ を用いて表現でき、以下の関係式が定まる。

$$\begin{aligned} \frac{\tan \phi'}{\tan(\eta^* - \epsilon) + \tan \epsilon} &= \frac{y_j^*}{Y^*} - s \\ \frac{\tan \theta^*}{(\tan(\eta^* - \epsilon) + \tan \epsilon) \cos \phi'} &= -\frac{x_i^*}{Y^*} \\ \phi^* &= \phi' - \eta^* + \epsilon \end{aligned} \quad (7)$$

なお P^* の (θ^*, ϕ^*) による表現は、解析を容易にするために通常の極座標形式とは異なっている。

2.3 原画像とドーム中心からの投映像

原画像の座標空間 S を、図 5(b) に示すように $[-(X + \Delta X), (X + \Delta X)] \times [-Y, Y]$ とし、 S 上の点 $(0, 0)$ と $(0, -Y)$ をドーム中心から球殻へ投射した点を、 S^* に関する対応する投映点 C と C_b に一致させる。この結果、図 4(a) および図 5(b) に示す $\angle COC_b = \eta_b$ は、以下の関係式により定まる。

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \frac{\sin(\alpha + \gamma)}{O^*C_b} \\ O^*C &= a \cos(\beta + \eta^*) + \\ &\quad \sqrt{a^2(\cos^2(\beta + \eta^*) - 1) + 1} \end{aligned}$$

$$\sin(\eta_b + \alpha + \gamma) = \frac{\sin(\beta + \eta^*)}{O^*C} \quad (8)$$

ただし図 4(a) に示すように $\beta = \angle C_b O^* O$ である。

また原画像の基準アスペクト比 X/Y は投映画像のアスペクト比 X^*/Y^* に等しいものとし、 ΔX は S 上の直線 $x = \pm(X + \Delta X)$ のドーム中心からの投映像と Γ_α との交点が L_b, R_b となるように定める。さらに $[-X, X] \times [-Y, Y]$ の領域の解像度も、投映画像の解像度 $m \times n$ に等しいとし、この領域の左下隅のピクセル座標を $(0, 0)$ とする。この結果、原画像のピクセル (i, j) の S 上の座標 (x_i, y_j) は、投映画像と同様に；

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{2X}{m} \left(i - \frac{m-1}{2} \right) \\ y_j &= \frac{2Y}{n} \left(j - \frac{n-1}{2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

と定まる。ただし j の範囲は $0 \leq j < n$ であるが、 i の範囲は；

$$-\left\lceil \frac{m\Delta X}{X} \right\rceil \leq i < m + \left\lceil \frac{m\Delta X}{X} \right\rceil \quad (10)$$

となる。また図 5(b) に示すように、座標点 (x_i, y_j) を P 、座標点 $(x_i, 0)$ を Q とすると、通常の極座標形式により P は $\angle COQ = \theta$ と $\angle QOP = \phi$ を用いて表現でき、以下の関係式が定まる。

$$\frac{\tan \theta}{\tan \eta_b} = -\frac{x_i}{Y} \quad \frac{\tan \phi}{\cos \theta \tan \eta_b} = \frac{y_j}{Y} \quad (11)$$

3. 投映画像の変形補正

3.1 S^* から S への座標変換

投映画像の変形補正処理は、投映画像のピクセル (i^*, j^*) が投映されるドーム球殻上の点を求め、その点からドーム中心へ逆投射して得られる原画像のピクセル (\tilde{i}, \tilde{j}) を求めることに他ならない。すなわち；

$$\begin{aligned} (i^*, j^*) &\rightarrow (x_i^*, y_j^*) \rightarrow (\theta^*, \phi^*) \rightarrow (\theta, \phi) \rightarrow \\ (x, y) &\rightarrow (\tilde{i}, \tilde{j}) \end{aligned}$$

の変換を行えば良い。ここで (\tilde{i}, \tilde{j}) を実数座標とすれば、 $(\theta^*, \phi^*) \rightarrow (\theta, \phi)$ 以外の変換は前節の式 (6), (7), (9), (11) により行うことができる。そこで本節では $(\theta^*, \phi^*) \rightarrow (\theta, \phi)$ の変換を導く。

図 7 に示すように、 S^* 上の点 P の投映像 P' は小円 Γ_λ 上に存在する。図 4(a) の点 Q の投映像を Q' とすると、 Γ_λ は Q' を通り O^*CO で定まる平面 Σ に垂直である。また $\angle O^*Q'O = \lambda$ とすれば、 Γ_λ の半径は $\cos \lambda$ である。 Γ_λ の中心を O_λ 、 Σ 上の OC の垂線と球殻の交点を Z 、 $\angle O_\lambda OZ = \mu > 0$ とすると、 Γ_λ は直線 OZ 上に中心を持ち Σ に垂直な半径 $\cos \lambda$ の小円を、 Σ と平行に $-\mu$ だけ回転させたものである。したがって図 7(b) に示す $\angle Q'O_i P' = \theta'$ を用いると、以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \sin \theta \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \mu & 0 & \sin \mu \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \mu & 0 & \cos \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta' \cos \lambda \\ \sin \theta' \cos \lambda \\ \sin \lambda \end{pmatrix} \quad (12)$$

したがって、 λ, μ, θ' を θ^* と ϕ^* より求めれば、 θ と ϕ が求まる。

まず λ については、図 7(a) より以下の関係式が成り立つ。

$$\sin \lambda = a \sin(\beta + \eta^* + \phi^*) \quad (13)$$

また $\angle COQ' = \phi' = \lambda - \mu$ であり、 ϕ' について以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \overline{O^*Q'} &= a \cos(\beta + \eta^* + \phi^*) + \\ &\quad \frac{\sqrt{a^2(\cos^2(\beta + \eta^* + \phi^*) - 1) + 1}}{2} \\ \overline{CQ'}^2 &= \overline{O^*C}^2 + \overline{O^*Q'}^2 - 2\overline{O^*C} \cdot \overline{O^*Q'} \cdot \cos \phi^* \\ \cos \phi' &= 1 - \frac{\overline{CQ'}^2}{2} \quad (14) \end{aligned}$$

最後に θ' については、図 7(b) より以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \overline{O^*O_\lambda} &= \overline{O^*Q'} - \cos \lambda \\ \overline{O^*P'} &= \overline{O^*O_\lambda} \cos \theta^* + \\ &\quad \frac{\sqrt{\overline{O^*O_\lambda}^2 (\cos^2 \theta^* - 1) + \cos^2 \lambda}}{2} \\ \overline{Q'P'}^2 &= \overline{O^*P'}^2 + \overline{O^*Q'}^2 - 2\overline{O^*P'} \cdot \overline{O^*Q'} \cdot \cos \theta^* \\ \cos \phi' &= 1 - \frac{\overline{Q'P'}^2}{2 \cos^2 \lambda} \quad (15) \end{aligned}$$

3.2 ピクセル値の補間とガンマ補正

前節で求めた (\tilde{i}, \tilde{j}) は実数座標であるので、 (i^*, j^*) のピクセル値 $d(i^*, j^*)$ を直ちに求めることはできない。まず単純な方法として (\tilde{i}, \tilde{j}) の最近傍のピクセル値を用いる最近接点割当法、すなわち；

$$d(i^*, j^*) = d([\tilde{i} + 1/2], [\tilde{j} + 1/2]) \quad (16)$$

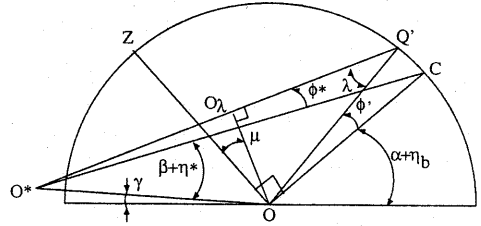
が挙げられる。図 2 に示したように、投映画像と原画像の不一致は辺縁部で顕著であるが、そのような領域は隣接プロジェクタがカバーするためクリッピングされ、全体としての不一致は小さい。したがってこの方法でも画像の劣化は小さいと考えられる。なお原画像とプロジェクタのガンマ値 γ と γ^* が相補関係にない場合 ($\gamma\gamma^* \neq 1$)、ガンマ補正；

$$d(i^*, j^*) = d([\tilde{i} + 1/2], [\tilde{j} + 1/2])^{1/\gamma\gamma^*} \quad (17)$$

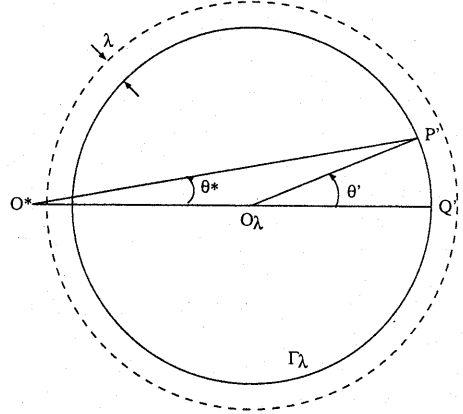
が必要である。

最近接点割当法での画像劣化が許容できない場合、以下の線形補間によって劣化を防止することができる。

$$i = [\tilde{i}] \quad j = [\tilde{j}]$$



(a)



(b)

図 7 (θ^*, ϕ^*) から (θ, ϕ) への変換

$$\begin{aligned} \Delta i &= i - \tilde{i} & \Delta j &= j - \tilde{j} \\ d(i^*, j^*) &= d(i, j)(1 - \Delta i)(1 - \Delta j) + \\ &\quad d(i + 1, j)\Delta i(1 - \Delta j) + \\ &\quad d(i, j + 1)(1 - \Delta i)\Delta j + \\ &\quad d(i + 1, j + 1)\Delta i\Delta j \quad (18) \end{aligned}$$

なお $\gamma\gamma^* = 1$ であっても $\gamma \neq 1$ であれば、上式の線形性を保つためにガンマ補正が必要であり；

$$\begin{aligned} d(i^*, j^*) &= \{d(i, j)^{1/\gamma}(1 - \Delta i)(1 - \Delta j) + \\ &\quad d(i + 1, j)^{1/\gamma}\Delta i(1 - \Delta j) + \\ &\quad d(i, j + 1)^{1/\gamma}(1 - \Delta i)\Delta j + \\ &\quad d(i + 1, j + 1)^{1/\gamma}\Delta i\Delta j\}^{1/\gamma^*} \quad (19) \end{aligned}$$

となる。

3.3 テーブル参照による変換

前 2 節による変形補正処理のほとんどの部分は投映画像に依存しないため、あらかじめ用意していた変換テーブルの参照に置き換えることができる。たとえば式 (16) は、 $(i^*, j^*) \rightarrow ([\tilde{i} + 1/2], [\tilde{j} + 1/2])$ のテーブル T を用意することにより；

$$d(i^*, j^*) = d(T[i^*, j^*], i, T[i^*, j^*], j) \quad (20)$$

と置き換えることができる。また最も複雑な式 (19) についてもガンマ補正用テーブル T_γ と T_{γ^*} を用いて；

$$\begin{aligned} i &= T[i^*, j^*].i & j &= T[i^*, j^*].j \\ \Delta i &= T[i^*, j^*].\Delta i & \Delta j &= T[i^*, j^*].\Delta j \end{aligned}$$

表1 テーブル参照による変換処理時間

解像度	処理時間 (ms)			
	式(16)	式(17)	式(18)	式(19)
640 × 480 (VGA)	16.4	21.1	43.0	50.8
800 × 600 (SVGA)	23.4	32.8	65.6	82.0
1024 × 768 (XGA)	41.4	53.1	106.3	135.2
1280 × 960 (SXGA)	62.5	84.4	164.8	210.9

$$d(i^*, j^*) = T_\gamma [(T_\gamma [d(i, j)])(1 - \Delta i)(1 - \Delta j) + T_\gamma [d(i + 1, j)]\Delta i(1 - \Delta j) + T_\gamma [d(i, j + 1)](1 - \Delta i)\Delta j + T_\gamma [d(i + 1, j + 1)]\Delta i\Delta j] \quad (21)$$

とすることができます。

上記の式(20)や(21)のように、式(16)、(17)、(18)、(19)に基づく変形補正処理をテーブル参照を用いて実装した。各々の方法について、PC (Pentium III, 1 GHz) を用いて実測した画像あたりの処理時間を表1に示す。なおドームやプロジェクタのパラメータは、 $\alpha = \gamma = 0, a = 1, \omega = \pi/60, X^*/Y^* = 4/3, s = 0$ である。

この結果から、最近接点割当て法でガンマ補正が不要な場合(式(16))、VGA 画像であればリアルタイム変換が可能であることがわかる。また SVGA 以上の画像や、ガンマ補正/線形補間を行った場合でも、投映画像をあらかじめ変換しておくオフライン変換であれば実用的処理時間であるといえる。しかし大規模ドームで要求される SXGA などの高解像度の場合、リアルタイム変換(1/60 sec) の上限に対して約 4 ~ 13 倍の時間を要しており、以下のような改善が必要である。

- 画像の中心付近では；

$$(T[i^* + 1, j^*].i, T[i^* + 1, j^*].j) = (T[i^*, j^*].i + 1, T[i^*, j^*].j)$$

などの関係があることを利用し、変換テーブルを圧縮することが可能である。このことにより、メモリ参照回数を削減できるだけでなく、原画像のピクセル参照のためのアドレス計算とメモリ参照のパイプラインが円滑に動作することも期待できる。

- 線形補間やガンマ補正の際に、原画像の空間的局所性を利用する。たとえば隣接した4ピクセル値が全て等しければ線形補間は不要であるし、隣接ピクセルの値を使ってガンマ補正も省略できる。
- ピクセルごとの処理は独立性が高いため、投映画像や原画像を空間分割して並列処理を行うことが容易である。特に SMP の利用は有効であると考えられる。
- 原画像が MPEG2 などでエンコードされている場合、デコード結果を変換するのではなく、画像の差分情報を利用して変化点のみを対象とした変換を行う。

4. おわりに

本報告では、複数台の汎用プロジェクタと PC クラスタからなるドーム投映システムにおける重要な処理である画像変形補正処理について、以下の研究成果を述べた。第1には、ドーム空間の構造などをパラメータ化した上で、一般化された変形補正の解析式を導いた。第2には、実際の変形補正をテーブル参照で行う方法を提案するとともに、その実装と評価に基づいて性能改善方法を考察した。

今後の課題としては、前述の性能改善方法の実装と評価の他、プロジェクタの設置位置や投映パラメータに静的/動的な誤差が生じた際の補正が挙げられる。

謝辞 ドーム空間の構造について貴重な助言を頂いた(株)五藤光学研究所の各位に感謝する。本研究はマッチング・ファンド方式による産学連携研究開発事業「分散並列処理によるドーム投映技術の研究開発」(日本学術振興会)による。

参考文献

- 1) 五藤光学研究所, バーチャリウム製品情報, <http://www.goto.co.jp/product/virtuarium-j.html>.
- 2) 矢野健太郎, 立体解析幾何学. 基礎数学選書 4, 裳書房, 1970.
- 3) 三洋電機, サンヨー液晶プロジェクターオプションカタログ, <http://www.sanyo.co.jp/AV/LDCP/option/OP.pdf>, 2001.
- 4) Charles A. Poynton, A Technical Introduction to Digital Video, John Wiley & Sons, Inc., 1996.