

## 投影法の混在を考慮した逆遠近法

長 篤志<sup>†</sup> 原田 哲也<sup>††</sup> 木下 武志<sup>†</sup>

本論文では、3次元コンピュータ・グラフィックスにおける逆遠近法を提案する。逆遠近法とは絵画における描画法の1つであり、通常の透視投影法とは逆に遠くよりも近くの物体の方が画面上で小さく描かれることをいう。提案手法では、移動する視点から見た投影像をまとめることによって3次元コンピュータ・グラフィックスにおける逆遠近法を実現している。また、逆遠近法で描かれた絵画によく見られるように、画面内に異なる投影法によって描かれた物体が混在する場合を想定している。そのため通常の透視投影法によって描画された画面内において、一部の物体のみを逆遠近法によって投影できる。しかも、対象物体に反射、透過・屈折による質感表現と影付けが可能であるという特徴を持つ。また、逆遠近法によって線遠近法による奥行き手がかりが崩れたとしても、投影像において有効な奥行き手がかりである物体の重なり、位置関係、大きさに関して、透視投影時の投影像の状態をほぼ保持することが可能である。

## An Inverted Perspective Considering Mixture of Projective Methods

ATSUSHI OSA,<sup>†</sup> TETSUYA HARADA<sup>††</sup> and TAKESHI KINOSHITA<sup>†</sup>

We propose an algorithm of inverted perspective for 3-dimensional computer graphics. The inverted perspective is a technique for drawings and pictures. Objects near a viewpoint are drawn smaller than far objects. This characteristic is opposite to the ordinary perspective. The proposed algorithm draws 3-dimensional computer graphics using the inverted perspective by patching projected images from multi-viewpoints. The algorithm considers mixture of projective methods in an image plane. The mixture of projective methods is a popular usage of the inverted perspective on ordinary drawings and pictures. Therefore, the algorithm can draw only part of objects by the inverted perspective in an image projected by the ordinary perspective. Moreover, reflection, refraction for material representation, and shadowing can be used. In the inverted perspective, the linear perspective is broken, but the proposed algorithm can maintain three depth cues that are occlusions, positions, and size of objects in an image plane.

### 1. はじめに

従来、3次元コンピュータ・グラフィックス（以下、3次元CG）は、生成画像の写実性が重要視されてきた。その一方で、写実的でない3次元CG生成に関する研究も行われている。たとえば、透視投影と呼ばれる空間描画法が多く用いられているが、自由な映像表現を得るために新しい空間描画法が提案されてきた。Inakageは、通常の透視投影とは異なる非線形遠近投影として、レンズ歪みを表現するCurvilinear遠近法、カメラから遠い物体ほど大きく描写する逆遠近法、空間を歪ませる3次元ワープ法を提案した<sup>1)</sup>。Wyvillら

は、投影面を球面にしたSuper Fish Eye光学モデルや、円筒形や自己交差サイクロイド形に視点を多数配置する多視点光学モデルを提案した<sup>2)</sup>。そのほか、ガイドマップのための多視点描画手法<sup>3),4)</sup>や、人の印象に合わせて3次元形状を誇張したり<sup>5)</sup>、人の印象に合わせて物体の大きさを変えたりする手法<sup>6)</sup>も提案されている。また、光線追跡法を曲がった4次元時空へ拡張してブラック・ホールをCGとして描画する技術も提案されている<sup>7)</sup>。

ここでは、特殊な空間描画法の中でも逆遠近法に注目する。この投影法を用いた絵画は古くから西洋、東洋を問わず数多く存在している。例を図1に示す。絵画において逆遠近法が用いられる可能性はさまざまである。小山は絵画において表現上の逆遠近法が生じる可能性として、A)恒常視と正面性によるもの、B)移動する視点を1枚の絵にまとめたことによるもの、C)物体とその関係によるもの、D)歪像としての逆

<sup>†</sup> 山口大学工学部  
Faculty of Engineering, Yamaguchi University

<sup>††</sup> 山口大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering,  
Yamaguchi University

表 1 各時代で用いられた遠近法<sup>10)</sup>. は典型的に用いられた遠近法. は一部の作品で, あるいは限定的に用いられた遠近法. ×は一般には用いられなかったもの

Table 1 Perspective methods used in each period<sup>10)</sup>. means a typical perspective, means a perspective used with a part of picture, × means a perspective which generally was not used.

時代	相対的 大きさ	対象の 重なり	陰影	高さ	きめの 勾配	大気 遠近法	線 遠近法
先史時代						×	×
エジプト	×				×	×	×
ギリシア			×		×		
ローマ						×	
ルネッサンス							
印象派							
現代							



(a) 下村良之助「鳥鷲(韓国流泊より)」1972. 8)



(b) スペイン派「生誕(部分)」1396. 8)

図 1 逆遠近法を使用した絵画の例

Fig. 1 Paintings using inverted perspective.

遠近法, の 4 つをあげている<sup>9)</sup>. そして, 小山が指摘するには「絵画に表された空間の一部が, 遠大近小に描かれている場合を, 漠然と呼ぶ言葉であって, それはけっして一定の法則によって描くというような『法』ではない<sup>9)</sup>」という. この指摘において重要であるのは, これまでに逆遠近法という描画方法, 技術が定義されているわけではないということと, 空間の一部のみが逆遠近法で描画されることが多い(図 1), ということである.

本論文では, 次の条件を満たす 3 次元 CG における逆遠近法のアルゴリズムを提案する.

(1) 透視投影で描画された空間中の特定の物体のみ

を逆遠近法で投影することができる(投影法が画面内に混在できる).

- (2) 一部の物体が逆遠近法により投影されることにより線遠近法が使用できない状況でも, その他の奥行き手がかりを保持することができる.
- (3) 反射, 透過, 屈折による物体の質感表現と, 陰影が描画できる.

1 つ目の条件は, 絵画において一般に行われることが多い逆遠近法の表現を実現するために必要である. 2 つ目と 3 つ目の条件は, 絵画としての必要性を 3 次元 CG でも要求するものである. 絵画において西洋の各時代に用いられた代表的な遠近法を表 1 に示す<sup>10)</sup>. 時代によって重要視される遠近法が異なっている<sup>10)</sup>が, ルネサンス時代の絵画以外においては, いわゆる線遠近法が必ずしも重要視されていない. たとえば, エジプトでは対象の重なりと高さ関係の方法によって, 印象派では線遠近法以外の方法によって遠近を表し空間を描画していた. ここからいえるのは, 空間を描いている絵画では線遠近法を用いていなくても, その他のなんらかの遠近法によって奥行きの手がかりを示し, 空間を表しているということである. だから, 一部の物体を逆遠近法で描画して線遠近法による遠近法が破綻していたとしても, 絵画内に描かれた物体が同一空間にあるように見えるように, その他の遠近法を使用することが重要になってくる. まず, どの時代においても奥行き手がかりとして基本的に用いられてきた物体間の重なり関係を保持することは, 必要不可欠であると考えられる. また, 多視点や逆遠近法で投影された物体に対して, 表 1 における陰影や, その他, 反射や透過によって他の物体との関係を可視化することは, 同じ空間にあるように見せるための重要な手がかりとなり得る.

Inakage は, 3 次元 CG における逆遠近法を提案した<sup>1)</sup>. Inakage のアルゴリズムは, 視軸方向に離れる

ほどあるスケールパラメータに従って物体を大きく描く投影法である。ただし、このアルゴリズムは、空間中の特定の物体のみを逆遠近法で投影することは想定していない。宮澤らの物体強調手法<sup>5)</sup>でも同様である。Wyvillらは描画対象物体を取り囲む円筒状のスクリーンの各画素に多視点を配置し、それらのすべての多視点からある定められた1点へ向かって光線追跡を行った<sup>2)</sup>。Wyvillらはその論文中において指摘していないが、このアルゴリズムで投影された対象物体は、遠くの物体が近くの物体よりも大きく描画される一種の逆遠近法になっていた。それは、小山<sup>9)</sup>の分類する可能性Bに相当するといえる。このように視点の位置を定義し光線追跡法を用いる逆遠近法の定義は、Inakageや宮澤のように投影変換手法としての逆遠近法の定義よりも、描画対象物体の空間表現ならびに質感表現においてより有効である。なぜなら、視点が一意に定義できるため、再帰光線追跡法によって反射や屈折などの質感表現が可能になるからである。提案する逆遠近法では、このWyvillらの方法<sup>2)</sup>を基本におきたい。しかし、Wyvillらは対象物体を取り囲むような円筒表面に多視点を配置したため、描画物体の直線が画面において曲線として投影されていた。また、空間中の特定の物体のみを逆遠近法で投影することも想定されてなかった。しかも、Inakageや宮澤の方法のようには容易に逆遠近法の操作ができないため、これを解決しなければならない。

一方、描画されている空間の一部が逆遠近法で描画されるという場合、それは、逆遠近法で描画されている物体とそれ以外の物体に対しては視点が異なっている一種の多視点投影であるという見方もできる。Takahashiらはガイドマップを作成するための多視点投影による描画方法を提案し<sup>3),4)</sup>、三末らは、図的思考支援を目的とした多視点による遠近画法を提案している<sup>11)</sup>が、これらは空間的に連続した地形地図や平面図を対象にしたものであり、特定の物体だけの視点を変えるものではない。Agrawalaらも多視点投影法を提案している<sup>12)</sup>。Agrawalaらの多視点投影法<sup>12)</sup>は、物体単位で視点位置を操作し多視点投影を実現することができる。また、物体レベルで遮蔽関係を維持したり、物体の投影像の大きさと位置に対して、通常の透視投影における投影像の大きさと位置をほぼ保持したりする制約条件を課している。これらの条件は、本論文で注目する2つ目の条件を満たすことが重要であることを主張している。我々の研究グループにおいても、最終的に投影像を得るビュー平面とは別に、物体ごとに仮スクリーンと呼ぶ仮想的なスクリーンを想定する

ことによって多視点投影を実現する方法を提案している<sup>13)</sup>。ここでは、この方法を多視点レイヤ合成法と呼ぶ。この多視点レイヤ合成法は、仮スクリーンを用いることによって、Agrawalaらとは別の方法で、物体の投影像の大きさと位置に関して、通常の透視投影における投影像の大きさと位置をほぼ保持することができる<sup>13)</sup>。また、その論文中<sup>13)</sup>で触れられており、仮スクリーンへの投影を逆遠近法で行えば、空間の一部が逆遠近法で投影されている画像も生成可能であると予想される。しかも、Agrawalaらの方法とは異なり、多視点レイヤ合成法は光線追跡法を用いるので、Wyvillらの逆遠近法を多視点レイヤ合成法に拡張しやすい。そこで本論文では、逆遠近法の基本アルゴリズムとして、まず2章において、仮想空間中のすべての物体が逆遠近法で描画される場合の投影アルゴリズムを述べる。これは、Wyvillらの方法を、多視点レイヤ合成法に適用しやすいように拡張したものである。また、逆遠近法を操作するパラメータを追加している。3章では、多視点レイヤ合成法を拡張することにより2章で述べたアルゴリズムを融合させ、異なる投影法によって描画される物体が混在する場合の投影アルゴリズムを述べる。ただし、多視点レイヤ合成法の論文<sup>13)</sup>では、具体的なアルゴリズムについては記述されていない。多視点レイヤ合成法を修正、拡張し、逆遠近法だけでなく、透視投影、平行投影の場合も含めたアルゴリズムとして記述する。4章では、提案アルゴリズムによって生成された画像を検証し、逆遠近法を操作するパラメータと得られる画像の関係について調べる。5章では本提案手法についてまとめを述べる。

## 2. 投影法の混在を考慮しない逆遠近法

### 2.1 基本アルゴリズム

ここでは、仮想空間中のすべての物体に同一の逆遠近法による投影が行われる場合の基本アルゴリズムを述べる。基本アルゴリズムは、光線追跡法を用いるWyvillらの方法<sup>2)</sup>がアイデアの元になっている。ただし、逆遠近法を操作するパラメータ(ここでは、逆遠近法パラメータと呼ぶ)によって、逆遠近法によって得られる投影像を操作できるようにする。

ある直角座標系  $\Sigma = (O; e_1, e_2, e_3)$  の原点  $O$  に視点  $s_\Sigma$  があり、スクリーン  $\Pi_\Sigma$  が  $e_1, e_2$  が張る平面と平行に視点から  $e_3$  方向へ  $q_3$  の距離にあるとする(図2(a))。レイの出発点を視点  $s_\Sigma$  とし、レイの方向を視点  $s_\Sigma$  からスクリーン  $\Pi_\Sigma$  上の座標  $q_\Sigma = (q_1, q_2, q_3)$  に向かう方向として再帰光線追跡

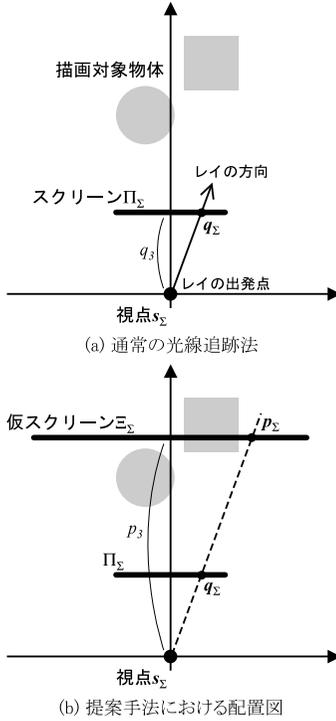


図 2 視点・スクリーンと仮スクリーンの配置図

Fig. 2 Locations of viewpoint, screen, and pseudo-screen.

法を行うことにより、 $\Pi_\Sigma$  上に透視投影像を得ることができる。

提案アルゴリズムでは、 $\Pi_\Sigma$  のほかに、 $e_1, e_2$  が張る平面と平行に視点から  $e_3$  方向へ  $p_3$  の距離に仮スクリーン  $\Xi_\Sigma$  を考える (図 2 (b)). そして、投影を操作する逆遠近法パラメータとしてスカラー量  $\alpha$  を定める。また、 $s_\Sigma$  と  $q_\Sigma$  を結ぶ直線と  $\Xi_\Sigma$  との交点を  $p_\Sigma$  とする。ただし、

$$p_\Sigma = \begin{pmatrix} q_1/q_3 \\ q_2/q_3 \\ 1 \end{pmatrix} p_3 \tag{1}$$

である。提案アルゴリズムでは、 $q_\Sigma$  における像を得るためにレイの出発点  $v_\Sigma$  とレイの方向  $\vec{w}_\Sigma$  を以下のように定めて再帰光線追跡法を行う。

$$v_\Sigma = \alpha \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} p_\Sigma \tag{2}$$

$$\vec{w}_\Sigma = p_\Sigma - v_\Sigma \tag{3}$$

画素に対応するすべての  $q_\Sigma$  に対してこの光線追跡法を行うことにより  $\Pi_\Sigma$  上に画像を得る。

### 2.2 基本アルゴリズムで得られる画像

本アルゴリズムによって得られる画像を解説する。ある物体 A 上のある点が位置  $a_\Sigma = (a_1, a_2, a_3)$  にあり、その点が  $\Pi_\Sigma$  上の  $q_\Sigma$  に投影されたとする。図 2 の幾何学的関係より  $q_\Sigma$  は次式で計算することができる ( $q_3$  は一定)。

$$q_1 = \frac{a_1 q_3}{\alpha (p_3 - a_3) + a_3} \tag{4}$$

$$q_2 = \frac{a_2 q_3}{\alpha (p_3 - a_3) + a_3} \tag{5}$$

$\Xi_\Sigma$  を固定した状態で、物体 A を視点から奥行き方向へ移動させる (すなわち  $a_1$  と  $a_2$  は一定に保つ) と、 $q_\Sigma$  の位置は  $\alpha$  と  $a_3$  に依存することになる。

逆遠近法パラメータ  $\alpha = 0$  のとき、 $q_\Sigma$  は式 (4), (5) より、

$$q_1 = \frac{a_1 q_3}{a_3} \tag{6}$$

$$q_2 = \frac{a_2 q_3}{a_3} \tag{7}$$

である。つまり、物体 A が視点から離れて  $a_3$  が大きくなるほど、 $a_\Sigma$  は  $\Pi_\Sigma$  上の中央に近づいて投影される (図 3 (a)). 遠くにあるほど小さく投影される遠小近大の透視投影の像が得られることになる。しかも、図 3 (a) に示すように  $v_\Sigma$  は  $s_\Sigma$  と一致する。また、 $\Xi_\Sigma$  にも依存しなくなる。すなわち得られる像は同視点、同スクリーンの透視投影像と同一である。

$0 < \alpha < 1$  のときにおいても、式 (4), (5) から遠小近大の透視投影の像が得られるのが分かる (図 3 (b)). ただし、 $e_1, e_2$  が張る平面において  $v_\Sigma$  は  $s_\Sigma$  から離れるため、同視点、同スクリーンの透視投影像とは異なった像が得られる。

$\alpha = 1$  のとき、 $\vec{w}_\Sigma$  は視線に平行になる (図 3 (c)). そして、 $q_\Sigma$  は

$$q_1 = \frac{a_1 q_3}{p_3} \tag{8}$$

$$q_2 = \frac{a_2 q_3}{p_3} \tag{9}$$

となり、 $a_3$  には依存しなくなる。すなわち  $\alpha = 1$  のときは  $\Pi_\Sigma$  上には平行投影の像が得られることになる。

$\alpha$  が 1 を超える値になると、この仮想空間中の物体を周りから見回すような  $v_\Sigma$  と  $\vec{w}_\Sigma$  になる (図 3 (d)). そのとき、式 (4), (5) が示すように、物体 A が視点から離れて  $a_3$  が大きくなるほど  $a_\Sigma$  は  $\Pi_\Sigma$  上の中央から離れて投影される (図 3 (d) 右)。つまり、遠くにあるほど大きく投影される遠大近小の逆遠近法による像が得られることになる。

ところで、 $a_3 = p_3$  のとき、すなわち投影する点が仮スクリーン上にある場合、 $q_\Sigma$  は、

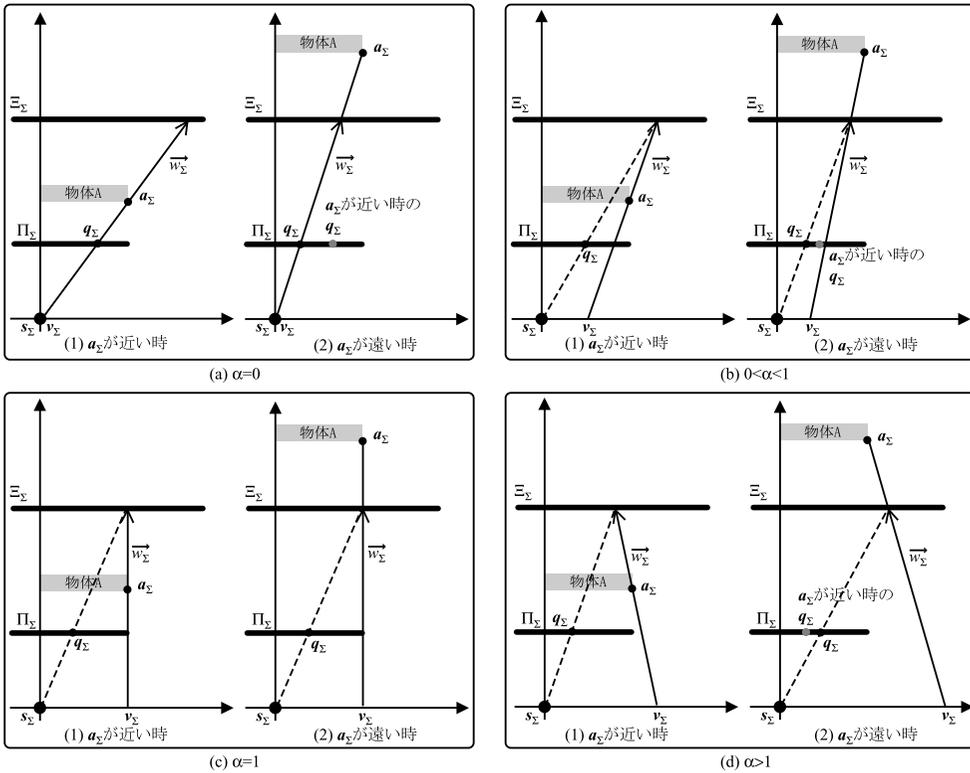


図 3 レイの発生源  $v_{\Sigma}$  とレイの方向  $\vec{w}_{\Sigma}$ 、そして物体 A の投影位置  $q_{\Sigma}$

Fig. 3 Start points ( $v_{\Sigma}$ ) and directions ( $\vec{w}_{\Sigma}$ ) for ray tracing and projected point ( $q_{\Sigma}$ ) of object A.

$$q_1 = \frac{a_1 q_3}{p_3} \quad (10)$$

$$q_2 = \frac{a_2 q_3}{p_3} \quad (11)$$

となる。式 (10), (11) は  $q_{\Sigma}$  が  $\alpha$  に依存しないことを示している。つまり  $a_3 = p_3$  のとき、仮スクリーン上の平面は逆遠近法パラメータを変化させても投影像の位置は変化せず、投影像の位置や大きさが変わらないことを示している。また、 $a_3 = p_3$  でなくても、 $a_3$  が  $p_3$  に近ければ近いほど投影像の位置の  $\alpha$  依存性が小さいことが式 (4), (5) から分かる。

### 3. 投影法の混在を考慮した逆遠近法

#### 3.1 概要

多視点レイヤ合成法<sup>13)</sup>は、描画する各物体に対して仮スクリーンを設定し 3 次元 CG の仮想空間に仮スクリーンによるレイヤ構造を持たせる。空間中の一部の物体が逆遠近投影されている画像を生成する場合、一部のレイヤが逆遠近法で投影されることを考慮することになる。ここでは多視点レイヤ合成法に従いつつ投影法の混在を考慮した逆遠近法の投影アルゴリズムを定義する。

提案するアルゴリズムでは多視点レイヤ合成法の処理手順<sup>13)</sup>を修正し拡張する。修正した多視点レイヤ合成法の処理手順を以下に示す。

- 手順 1 主視点、主スクリーンと、物体ごとに多視点パラメータ群と逆遠近法パラメータを設定する。
- 手順 2 各仮スクリーンの優先順位を決定する。
- 手順 3 物体の仮スクリーンへの投影像を主スクリーン上に書き込んで描画する(仮スクリーンの優先順位の低いものから順に行う)。

多視点レイヤ合成法の修正箇所を説明する。多視点レイヤ合成法と提案アルゴリズムでは、手順 1 は等しい。しかし、多視点レイヤ合成法では、まず物体の仮スクリーンへの投影像を算出した後に、提案アルゴリズムの手順 2 と同様に優先順位を決めている。その後、多視点レイヤ合成法では、優先順位の低い仮スクリーンから順に主スクリーンへ書き込んでいる。提案アルゴリズムでは、まず手順 2 で仮スクリーンの優先順位を決めた後に、手順 3 として物体の投影像を求める処理をまとめて行っている。この修正によって得られる画像に差はない。しかし、提案アルゴリズムでは、多視点レイヤ合成法が必要であった仮スクリーン上の画

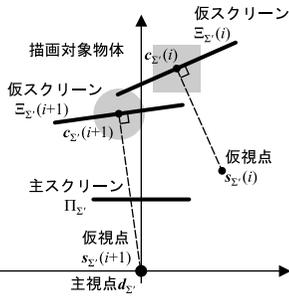


図4 主視点、主スクリーンの配置と多視点パラメータ群設定例  
Fig. 4 Locations of viewpoint and screen, and examples of parameters.

像を一度保存する処理が必要でなくなる。

以下の節において各手順の説明を行う。

3.2 手順 1

手順 1 では、多視点レイヤ合成法に従い主視点、主スクリーンと、多視点パラメータ群を設定する。また、投影を操作するための逆遠近法パラメータを設定する。ある直交座標系  $\Sigma' = (O'; e'_1, e'_2, e'_3)$  の原点  $O'$  に主視点  $d_{\Sigma'}$  があり、主スクリーン  $\Pi_{\Sigma'}$  が  $e'_1, e'_2$  が張る平面と平行に視点から  $e'_3$  方向へ  $q'_3$  の距離にあるとする(図 4)。そして、多視点レイヤ合成法に従い多視点パラメータ群(仮スクリーン、仮スクリーン移動ベクトル・拡大率、仮視点、仮視点中心座標系)を設定する。いま仮想空間内に  $n$  個の物体があり、物体  $i$  の仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  の中心を  $c_{\Sigma'}(i)$ 、仮スクリーンの移動ベクトル  $\vec{f}_{\Sigma'}(i)$ 、仮スクリーンの拡大率  $m(i)$  とする。そして、仮視点は位置  $s_{\Sigma'}(i)$  にあり、その仮視点中心の直交座標系  $\Sigma(i) = (O(i); e_1(i), e_2(i), e_3(i))$  を持つとする。ただし、仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  は  $e_1(i), e_2(i)$  が張る平面と平行に視点から  $e_3(i)$  方向にあるものとする。すなわち、 $s_{\Sigma'}(i)$  から  $c_{\Sigma'}(i)$  へ向かうベクトルの方向と  $e_3(i)$  の方向が一致し、 $e_1(i), e_2(i)$  が、仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  の右方向と上方向を規定することになる。さらに、物体  $i$  の逆遠近法パラメータ  $\alpha(i)$  を設定する。以上に説明した全パラメータを表 2 にまとめる。

ここでは、 $n$  個の物体があるものとしたが、ここでいう物体の区切りについて特に定義はしない。たとえば仮想空間中に、球と立方体と三角錐が 1 つずつあったとする。この場合、それぞれの立体ごとに物体として判断し、 $n = 3$  としてパラメータの設定をしてもよいし、球と立方体を 1 つの物体であるように考えて  $n = 2$  としてもよい。また、1 つの立方体であっても、左半分と右半部分を別の物体として扱うようなことも可能であろう。ただし、逆遠近法によって描画したい物

表 2 パラメータ一覧

Table 2 Parameters in the proposed algorithm for inverted perspective.

パラメータ名	記号
主視点	$d_{\Sigma'}$
主スクリーン	$\Pi_{\Sigma'}$
仮スクリーンの中心	$c_{\Sigma'}(i)$
仮スクリーン移動ベクトル	$\vec{f}_{\Sigma'}(i)$
仮スクリーン拡大率	$m(i)$
仮視点	$s_{\Sigma'}(i)$
仮視点中心座標系	$\Sigma(i)$
逆遠近法パラメータ	$\alpha(i)$

体は、他の投影が行われる物体とまとめて 1 つのようにしてはならない。3 次元 CG 制作者が得たい画像になるように仮想空間中の物体を区別し、区別した物体ごとに多視点パラメータ群、逆遠近法パラメータを定義する。

3.3 手順 2

この手順は 3 次元 CG レイヤ合成法と同様に各仮スクリーンの優先順位を決定する。初期状態の各物体の優先順位は、主視点  $d_{\Sigma'}$  から各物体の仮スクリーンの中央  $c_{\Sigma'}(i)$  までの距離の近い順に高くする。ただし、優先順位は任意に変更することができる。

3.4 手順 3 の概略

手順 3 では、多視点レイヤ合成法に従い、仮視点から対象物体を見たときの仮スクリーンへの投影像を、主スクリーン上に描画する作業を行う。ただし、多視点レイヤ合成法とは異なり、仮視点から見た仮スクリーンへの投影には通常の透視投影だけでなく逆遠近法を考慮したアルゴリズムになる。次節においてその詳細を述べるが、ここでは手順 3 における工程の概略と基本的なアイデアについて述べる。

手順 3 の工程を以下に示す。

それぞれの仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  について(手順 2 で設定した優先順位の低い仮スクリーン順に)

{ 主スクリーン  $\Pi_{\Sigma'}$  上のそれぞれの画素  $q_{\Sigma'}$  について

{ 仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  上の位置  $p_{\Sigma'}(i)$  を算出する;

レイの出発点  $v_{\Sigma'}(i)$  と方向  $\vec{w}_{\Sigma'}(i)$  を算出する;

$v_{\Sigma'}(i)$  と  $\vec{w}_{\Sigma'}(i)$  を用いて再帰光線追跡法を行い、 $q_{\Sigma'}$  に物体  $i$  の色を書き込む; ただし、物体  $i$  と交差しない場合には、なにも書き込まない;

}

}

この工程では、 $v_{\Sigma'}(i)$  と  $w_{\Sigma'}(i)$  を用いて再帰光線追跡法により物体  $i$  を主スクリーン  $\Pi_{\Sigma'}$  上に描画する。ただし、多視点レイヤ合成法に従い、物体  $i$  に対する光線追跡を行う場合は、 $i$  以外の物体に対して再帰光線追跡法の1回目の交差判定は行わない。そして、影付けに必要なシャドウレイの交差判定や、反射・屈折の表現に使用する反射光線、屈折光線の交差判定には  $i$  以外の物体も考慮する。また、1回目の交差判定で交点がなかった主スクリーン上の画素には、なにも書き込まないこととする。

仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  上の位置  $p_{\Sigma'}(i)$  と、レイの出发点  $v_{\Sigma'}(i)$  と方向  $w_{\Sigma'}(i)$  の算出方法は次節で詳細を述べるが、その基本的なアイデアをここでは述べる。図4に示されたように、パラメータが設定されたとする。多視点レイヤ合成法に従って、 $i$  番目の仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  に注目し、物体  $i$  の仮視点  $s_{\Sigma'}(i)$  から注目する物体  $i$  の投影像を主スクリーン  $\Pi_{\Sigma'}$  上に描画することを考える。このとき、仮視点  $s_{\Sigma'}(i)$  が逆遠近法による投影を行わない場合、すなわち逆遠近法パラメータ  $\alpha(i)$  が0である場合、レイの出发点  $v_{\Sigma'}(i)$  は仮視点  $s_{\Sigma'}(i)$  に等しい。多視点レイヤ合成法では、この仮視点  $s_{\Sigma'}(i)$  から見た注目する物体  $i$  を、仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  に透視投影する。そして、仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  上の投影像を保持したまま、主スクリーン  $\Pi_{\Sigma'}$  と平行になるように中心  $c_{\Sigma'}(i)$  を固定して仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  を回転させる。そして、仮スクリーンの移動ベクトル  $f_{\Sigma'}(i)$ 、仮スクリーンの拡大率  $m(i)$  に従って、中心  $c_{\Sigma'}(i)$  の移動と、中心  $c_{\Sigma'}(i)$  を固定した仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  の拡大を行った後の仮スクリーン  $\Xi'_{\Sigma'}(i)$  (図5(a))を考える。最後に、この  $\Xi'_{\Sigma'}(i)$  を、主視点  $d_{\Sigma'}$  から見た像を主スクリーン  $\Pi_{\Sigma'}$  に投影する。これを、優先順位の低い仮スクリーンから順に行うのが、多視点レイヤ合成法の基本アイデアである。

この基本アイデアのままでは、仮スクリーンに投影した像を再び主スクリーンに投影する必要があり、コンピュータ上で光線追跡法を用いて空間的に離散的な投影を行う場合、仮スクリーン上での解像度と主スクリーン上での解像度の不一致が問題になってくる。そこであらかじめ、主スクリーン上で注目する画素  $q_{\Sigma'}$  に投影される色を計算する際には、 $q_{\Sigma'}$  に投影される「移動後の仮スクリーン  $\Xi'_{\Sigma'}(i)$ 」上の位置を算出し、そこから逆に仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  上の位置  $p_{\Sigma'}(i)$  を算出する。そして、仮視点  $s_{\Sigma'}(i)$  から発生させるレイを、仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  上の位置  $p_{\Sigma'}(i)$  に向かって光線追跡をした結果を  $q_{\Sigma'}$  に投影される

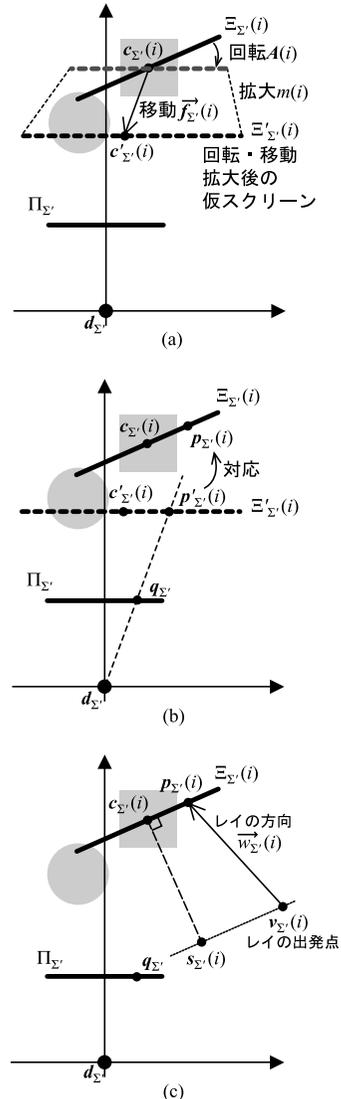


図5 投影法の混在を考慮した逆遠近法におけるレイの発生点とレイの方向

Fig. 5 Start points and directions for ray tracing considering mixture of projective methods.

色とすれば解像度の問題は解決される。ここでは、仮スクリーンごとに主スクリーンへ投影される像をそれぞれレイヤと呼ぶことにする。

以上は、逆遠近法パラメータ  $\alpha(i)$  が0である通常多視点レイヤ合成法である。物体  $i$  が逆遠近法で投影される場合、本提案手法では2章で述べた逆遠近法の基本アルゴリズムにおける視点、多視点レイヤ合成法における仮視点に対応するものとする。そして、2章における仮スクリーンは、そのまま多視点レイヤ合成法の仮スクリーンに対応するものとする。そのように考えれば、上述した多視点レイヤ合成法の基本アイディ

アのように、仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  へ仮視点  $s_{\Sigma'}(i)$  から逆遠近法によって投影し、仮スクリーンを移動、拡大した像を主スクリーン  $\Pi_{\Sigma'}$  に投影することが、空間上の物体  $i$  を逆遠近法によって投影することになる。ただし、多視点レイヤ合成法と同様に、仮スクリーンと主スクリーンの解像度の問題があるので、あらかじめ主スクリーン上の注目する画素ごとに、レイの出発点  $v_{\Sigma'}(i)$  と方向  $\vec{w}_{\Sigma'}(i)$  を算出することになる。

3.5 手順3の詳細

本アルゴリズムでは再帰光線追跡法を用いる。レイの発射点  $v_{\Sigma'}(i)$  とその方向  $\vec{w}_{\Sigma'}(i)$  を算出する。物体  $i$  とその多視点パラメータ群、逆遠近法パラメータに注目する(図4)。物体  $i$  の仮スクリーン  $\Xi_{\Sigma'}(i)$  は、仮スクリーン移動ベクトル  $\vec{f}_{\Sigma'}(i)$  と仮スクリーン拡大率  $m(i)$  に従った場合、図5(a)の位置  $\Xi'_{\Sigma'}(i)$  に射影されるものとする。そして、主視点  $d_{\Sigma'}$  と主スクリーン  $\Pi_{\Sigma'}$  上の座標  $q_{\Sigma'} = (q'_1, q'_2, q'_3)$  を結ぶ直線と、移動・拡大後の仮スクリーン  $\Xi'_{\Sigma'}(i)$  との交点を  $p'_{\Sigma'}(i)$  とする(図5(b))。このとき、

$$p'_{\Sigma'}(i) = \begin{pmatrix} q'_1/q'_3 \\ q'_2/q'_3 \\ 1 \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}^T [c_{\Sigma'}(i) + \vec{f}_{\Sigma'}(i)] \right\} \quad (12)$$

である。

この  $p'_{\Sigma'}(i)$  が、 $\Xi_{\Sigma'}(i)$  から  $\Xi'_{\Sigma'}(i)$  への射影前に、 $\Xi_{\Sigma'}(i)$  上の  $p_{\Sigma'}(i)$  の位置にあったとき、 $q_{\Sigma'}(i)$  と  $p_{\Sigma'}(i)$  の関係は式(13)、(14)で記述することができる(図5(b))。

$$r = p'_{\Sigma'}(i) - \vec{f}_{\Sigma'}(i) - c_{\Sigma'}(i) \quad (13)$$

$$p_{\Sigma'}(i) = A^{-1}(i) \begin{pmatrix} 1/m & 0 & 0 \\ 0 & 1/m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} r + c_{\Sigma'}(i) \quad (14)$$

ただし行列  $A(i)$  は、直交座標系  $\Sigma(i)$  におけるある位置  $x_{\Sigma}$  が直交座標系  $\Sigma'$  において位置  $x_{\Sigma'}$  に対応する場合、以下の式で記述される回転行列である。

$$x_{\Sigma'} = A(i)x_{\Sigma} + t_{\Sigma'}(i) \quad (15)$$

そして、 $A^{-1}(i)$  は  $A(i)$  の逆行列である。

この  $p_{\Sigma'}(i)$  を直交座標系  $\Sigma(i)$  で表すと、

$$p_{\Sigma}(i) = A^{-1}(i) [p_{\Sigma'}(i) - t_{\Sigma'}(i)] \quad (16)$$

である。2章で述べた投影法の混在を考慮しない逆遠近法における視点  $s_{\Sigma}$  と仮スクリーン上の位置  $p_{\Sigma}$  が、本節における仮視点  $s_{\Sigma}(i)$  と仮スクリーン上の位置  $p_{\Sigma}(i)$  に対応するとしてレイの出発点と方向を規定す

る。直交座標系  $\Sigma(i)$  において、レイの出発点  $v_{\Sigma}(i)$  とレイの方向  $\vec{w}_{\Sigma}(i)$  は、式(2)、(3)より

$$v_{\Sigma}(i) = \alpha(i) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} p_{\Sigma}(i) \quad (17)$$

$$\vec{w}_{\Sigma}(i) = p_{\Sigma}(i) - v_{\Sigma}(i) \quad (18)$$

であるから、これらを直交座標系  $\Sigma'$  に座標変換した  $v_{\Sigma'}(i)$  と  $\vec{w}_{\Sigma'}(i)$ :

$$v_{\Sigma'}(i) = A(i)v_{\Sigma}(i) + t_{\Sigma'}(i) \quad (19)$$

$$\vec{w}_{\Sigma'}(i) = A(i)\vec{w}_{\Sigma}(i) \quad (20)$$

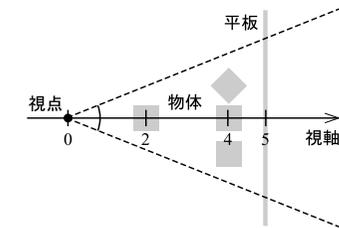
が、物体  $i$  に対して  $q_{\Sigma'}$  における像を得るためのレイの出発点とレイの方向である(図5(c))。

4. 画像生成と評価

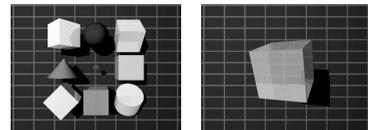
4.1 投影法が混在しない場合

投影法の混在を考慮しない逆遠近法(2章)を使用して画像を生成した。アルゴリズムの実装には、光線追跡法によるレンダリング・ソフトウェア POV-RAY 3.1 (POV-Ray Team, <http://www.povray.org/>)の改良版である MegaPOV 0.7 (MegaPOV Team, <http://megapov.inetart.net/>)のソースコードを使用した。また、通常の再帰光線追跡法による画像生成には、同ソフトウェアを使用した。

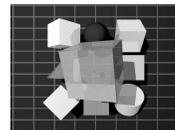
図6(a)に示すように視点を原点(0.0, 0.0, 0.0)に配置し、まず視軸方向へ距離5.0の位置に模様のある不透明な平板を1つ配置した。次に、視軸方向へ距



(a) 視点と対象物体の設定



(b) 奥にある9つの物体 (c) 手前にある立方体



(d) 透視投影法による描画(再帰光線追跡法)

図6 視点と物体の配置

Fig.6 Locations of viewpoint and objects.

表 3 投影法が混在を考慮した逆遠近法による画像のためのパラメータ

Table 3 Parameters for the proposed inverted perspective considering mixture of projective methods.

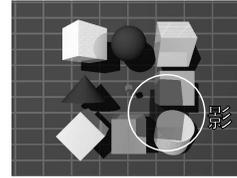
多視点パラメータ	記号	物体 1	物体 2
仮スクリーンの中心	$c_{\Sigma'}(i)$	(0.0, 0.0, 4.0)	(0.0, 0.0, 2.0)
仮スクリーン移動ベクトル	$\vec{f}_{\Sigma'}(i)$	(0.0, 0.0, 0.0)	(0.0, 0.0, 0.0)
仮スクリーン拡大率	$m(i)$	1	1
仮視点	$s_{\Sigma'}(i)$	(0.0, 0.0, 0.0)	(0.0, 0.0, 0.0)

離 4.0 の位置にさまざまな反射や透過の特性を持つ物体を 8 つ (1 辺 0.8 の立方体が 5 つ, 縦・横・高さが 0.8 の球, 円錐, 円筒がそれぞれ 1 つずつ), そして 1 辺 0.12 の立方体を中央に配置した (図 6(b)). また, 視点から視軸方向へ距離 2.0 の地点に 1 辺 0.8 の半透明な立方体を配置した (図 6(c)). これらを通常の再帰光線追跡法によって描画した結果が図 6(d) である. 中央にある立方体は手前にあるため, 同じ大きさの遠くにある立方体と比較して, 大きく描画されていたのが分かる. また, それぞれの物体においても手前の面よりも奥にある面のほうが小さく描画されていた. これは, 通常の透視投影によって遠小近大に描かれている.

次に, 図 6(a) と同様に視点と物体を配置したうえで, 視点から視軸方向へ距離 4 の位置に仮スクリーン  $\Sigma$  を配置した. そして, 逆遠近投影パラメータ  $\alpha$  を 0 から 2 まで変化させたときの提案アルゴリズムによる描画画像を図 7(a)~(d) に示す. 2 章において解説したように,  $\alpha = 0.0$  のとき図 6(d) の透視投影と等しい画像が得られた (図 7(a)). また  $\alpha = 1.0$  のときは, 視軸方向の平行投影像が得られた (図 7(b)). このとき, 手前にあった中央の立方体が, 他の 1 辺 0.8 の立方体 5 つと同じ大きさに描画されていたのが分かる. 2 章において解説したように,  $\alpha$  が 1.0 を超える値のとき, 手前にある中央の立方体よりも遠くにあった物体の方が大きく描かれており, それぞれの物体でも手前の面よりも奥にある面の方が大きく描かれていた (図 7(c), (d)). また,  $\alpha$  の値が大きくなるほど, 手前の物体はより小さく, 奥の物体はより大きく描画されていた. より遠大近小を強調したければ,  $\alpha$  を大きくすればよい. このように提案アルゴリズムにより遠大近小の画像が得られ, 小山の分類する可能性 B による逆遠近法の 3 次元 CG が得られたことが分かる. また, 各々の物体には別の物体の影が落ちていたり, 反射や透過・屈折によって互いの像を写り込ませたりすることができていた.

4.2 投影法が混在する場合

投影法の混在を考慮した逆遠近法 (3 章) を使用して画像を生成した. アルゴリズムの実装には MegaPOV



(a) レイヤ 1



(b) レイヤ 2

図 8 物体 1 と物体 2 を描画する 2 つのレイヤ

Fig. 8 Two layers depicting objects.

0.7 (MegaPOV Team, <http://megapov.inetart.net/>) のソースコードを使用した. また, 通常の再帰光線追跡法による画像生成には, 同ソフトウェアを使用した.

前節と同様に図 6(a) に示すように物体を配置した. ただし, 手前の立方体だけを逆遠近法で投影し, 他の物体を通常の透視投影で投影することを試みるために, 奥に配置した 9 つの物体ならびに 1 枚の平板と (これらを物体 1 と呼ぶ), 手前の透明な立方体 (これを物体 2 と呼ぶ) の 2 つに物体を分けることにした. 奥に配置した物体 1 には, 視点から視軸方向へ距離 4.0 の位置に仮スクリーンの中央  $c_{\Sigma'}(1)$  を配置した. また, 物体 2 には, 視点から視軸方向へ距離 2.0 の位置に仮スクリーンの中央  $c_{\Sigma'}(2)$  を配置した. この位置  $c_{\Sigma'}(2)$  は, 物体 2 の重心に等しい. これらの多視点パラメータ群の設定を表 3 に示す. 仮視点  $s_{\Sigma'}(1), s_{\Sigma'}(2)$  は, どちらも主視点  $d_{\Sigma'}$  と同じ位置に設定した. また, いずれの仮スクリーン移動ベクトルも (0.0,0.0,0.0) (移動なし) にし, いずれの仮スクリーン拡大率も 1 (拡大なし) に設定した. ただし, 物体 2 の仮スクリーンの中央  $c_{\Sigma'}(2)$  が物体 1 の  $c_{\Sigma'}(1)$  よりも主視点  $d_{\Sigma'}$  に近いので, 手順 2 で設定される仮スクリーンの優先順位は, 物体 2 の仮スクリーンが高い. すなわち物体 2 の投影像が手前のレイヤとして主スクリーンへ投影される.

まず, 手前の立方体の逆遠近法パラメータ  $\alpha(2)$  を

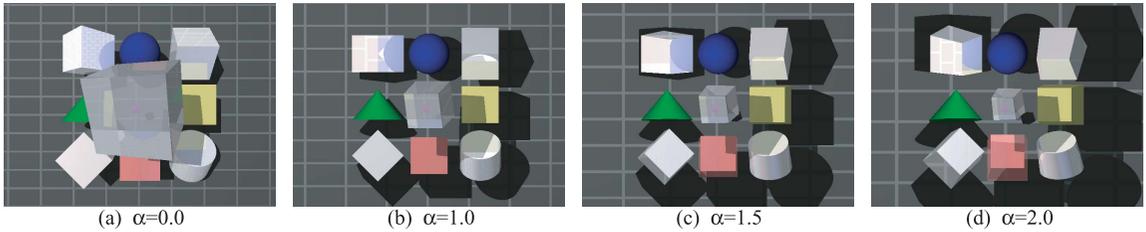


図 7 投影法の混在を考慮しないアルゴリズムを用いた逆遠近法パラメータ  $\alpha$  による生成画像の変化  
 Fig. 7 Changing image depend on  $\alpha$  using the proposed basic algorithm for inverted perspective.

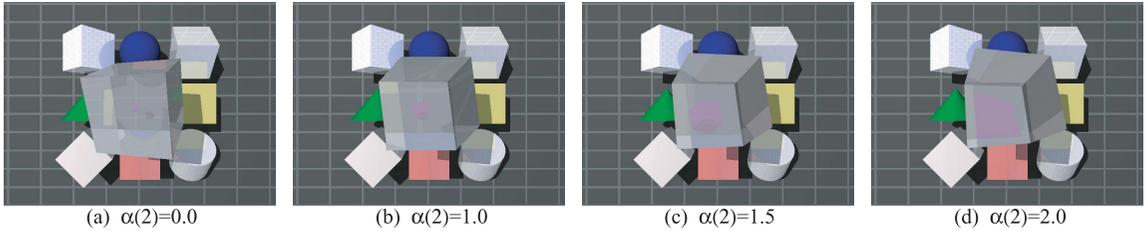


図 9 投影法の混在を考慮したアルゴリズムを用いた逆遠近法パラメータ  $\alpha(2)$  による生成画像の変化  
 Fig. 9 Changing image depend on  $\alpha(2)$  using the proposed basic algorithm for inverted perspective.

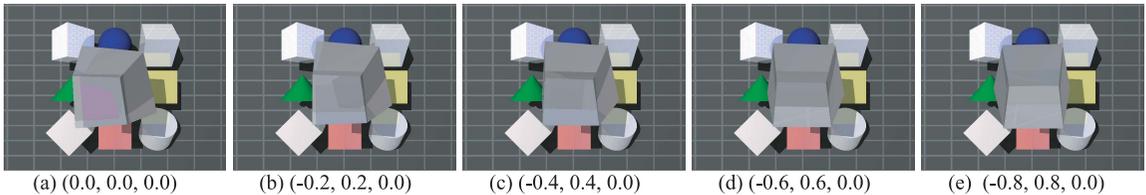


図 10 投影法の混在を考慮したアルゴリズムを用いた仮視点  $s_{\Sigma'}(2)$  による生成画像の変化  
 Fig. 10 Changing image depend on  $s_{\Sigma'}(2)$  using the proposed algorithm considering mixture of projective methods.

2.0 としたときの、2 つのレイヤの像をそれぞれ図 8 に示す。図 8 (a) に示すレイヤ 1 は、奥にある仮スクリーン  $\Sigma_{\Sigma'}(1)$  への投影像を主スクリーンへ投影したものである。物体 2 以外がすべて投影されている。仮視点の位置  $s_{\Sigma'}(1)$  が主視点と等しく、逆遠近法パラメータが  $\alpha(1) = 0.0$  なので、物体 2 以外を透視投影した画像にほぼ等しい。ただし、物体 2 の影が再帰光線追跡法によって奥にある物体 1 へ投影されている点において異なる。一方、図 8 (b) に示すレイヤ 2 は、仮視点  $s_{\Sigma'}(2)$  から逆遠近法で物体 2 のみを仮スクリーンへ投影した像を、主スクリーンへ投影したものである。レイヤ 2 には、物体 2 以外は投影されていない。しかも、逆遠近法パラメータ  $\alpha(2) = 2.0$  であるため、逆遠近法によって投影されている。これらのレイヤ 1 の上にレイヤ 2 を重ね合わせた画像が最終的な生成画像になる。

手前の立方体の逆遠近法パラメータ  $\alpha(2)$  を 0.0 から 2.0 まで変化させたときの生成画像を図 9 に示す。

投影法の混在を考慮していない図 7 の結果と比較すると、両者は大きく異なっていた。 $\alpha(2)$  を変化させてもレイヤ 1 には影響がないため、物体 1 は透視投影のまま保たれている。一方、物体 2 は、 $\alpha(2)$  の増加ともない逆遠近法による投影が行われた。しかし物体 2 の画面内における見かけ上の大きさは、図 7 ほどは変化しなかった。これは、物体 2 の重心に仮スクリーン  $\Sigma_{\Sigma'}(2)$  の中央  $c_{\Sigma'}(2)$  を配置しているため、物体 2 の画面上における位置が重心において変化しないこと、そして、逆遠近法の基本アルゴリズム (2 章) によって仮スクリーンに近いほど投影像の大きさが逆遠近法パラメータの値に依存しにくい (2.2 節参照) という特徴による。Agrawala ら<sup>12)</sup> の多視点画像生成手法においても、物体の投影像の大きさを保持する拘束条件や、物体の位置を拘束する条件をつけている。提案手法では、逆遠近法によって特定の物体を投影する場合においても、透視投影時における物体の画面上の位置や見かけの大きさを、仮スクリーンを用いてほぼ

保持することが可能であったといえる。また、レイヤ構造により、物体の前後関係を保持することも可能であった。このような特徴により、透視投影のときと対象の重なり、高さ（位置）、相対的な大きさが保持されることによって、線遠近法による奥行き手がかりがなくても、逆遠近法による投影時にこれらの奥行き手がかりが保持できることになる。

図 8 のレイヤ 1 に示したように、逆遠近法による投影を用いたとしても物体 2 の影が物体 1 上に保持された。また、図 9 における手前の物体を見ると、物体 2 の奥に配置した小さな立方体（大きさ 0.12）が、逆遠近法であっても透過されて描画されていたのが分かる。このように、提案手法は物体の質感表現として透過・屈折が可能であった。この透過・屈折されて見えている小さな立方体の像は、逆遠近法パラメータ  $\alpha(2)$  が大きくなるほど大きく描画されていた。これは、透過・屈折されて見えている物体が手前の立方体よりも遠方にあるので、逆遠近法によって大きく描かれていることにほかならない。このように、提案手法は、投影法を画面内で混在させても、影付けが可能であったし、また透過・屈折による質感表現も可能であった。また、物体 1 と物体 2 には反射の特性を持つ立方体などが含まれており、逆遠近法による投影を用いたときにおいても、反射が描画されていた。これらの陰影や、反射、透過・屈折の表現も、奥行き手がかりの 1 つとなりうる。このように、空間中の一部の物体を逆遠近法で投影したい場合、その逆遠近法対象物体の中央に、仮スクリーンの中央を配置し、逆遠近法パラメータを 1.0 より大きな値にすればよい。透視投影のときの奥行き手がかりと比較して、線遠近法による奥行き手がかり以外はほぼそのまま保持したまま、逆遠近法による画像が得られる。ただし、投影法の異なる物体が接しているとき、影や鏡像において不都合が生じる可能性がある。この不都合は本手法では解決できない問題である。

図 9 (d) の状態から、仮視点  $s_{\Sigma}(2)$  を主視点の位置 (0.0,0.0,0.0) から (-0.8,0.8,0.0) に移動させた。結果を図 10 に示す。逆遠近法対象物体の仮視点を移動させることにより、逆遠近法で得られる像の見えている角度を変化させることができた。ただし、物体 1 へ投影された物体 2 の影など、透視投影されている物体 1 への影響はなかった。これは、あくまで物体 2 の仮視点のパラメータを変化させているだけであるので、物体 1 の仮視点からの投影像には関係がないからである。すなわち、物体 1 と物体 2 の位置関係は仮想空間内において変化しないが、視点だけが変化している

という多視点の特徴を表しているといえる。

## 5. ま と め

本論文は 3 次元 CG における逆遠近法を提案した。提案手法は移動する視点を 1 枚の絵にまとめたことによる逆遠近法と多視点レイヤ合成法を組み合わせている。提案手法には以下の特徴がある。

- 描画対象空間をすべて逆遠近法によって投影するだけでなく、透視投影法と逆遠近法を混在させることが可能である。
- 物体の重なり、位置関係、大きさに関して、通常の透視投影時の投影像の状態をほぼ保持することが可能である。
- 反射、透過・屈折による質感表現と陰影付けが可能である。

1 つ目の特長により、逆遠近法が使われた絵画において一般に見られるように、画面中の一部の物体のみに逆遠近法が使用されている画像が 3 次元 CG により制作可能になる。2 つ目の特徴により、逆遠近法によって線遠近法の奥行き手がかりがくずれたとしても、投影像において有効な奥行き手がかりが保持されることになる。しかも 3 つ目の特徴により、逆遠近法による投影像と透視投影法による像は単なる重ね合わせによって同一画面中に存在するわけではなく、仮想空間中の各物体間ならびに光源との相互的な光学的影響を表現できる。

## 参 考 文 献

- 1) Inakage, M.: Non-linear perspective projections, *Modeling in Computer Graphics*, Kunii, T.L., (Ed.), pp.203–215, Springer-Verlag (1991).
- 2) Wyvill, G. and McNaughton, C.: Optical models, *CG International '90: Computer graphics around the world*, Chua, T.S. and Kunii, T.L., (Eds.), pp.83–93 (1990).
- 3) Takahashi, S. and Kunii, T.L.: Manifold-based multiple-viewpoint CAD: A case study of mountain guide-map generation, *Computer-Aided Design*, Vol.26, No.8, pp.622–631 (1994).
- 4) Takahashi, S., Ohta, N., Nakamura, H., Takeshima, Y. and Fujishiro, I.: Modeling Surperspective Projection of Landscapes for Geographical Guide-Map Generation, *Computer Graphics Forum*, Vol.21, No.3, pp.259–268 (2002).
- 5) 宮澤貴之, 望月義典, 近藤邦雄, 佐藤 尚, 島田 静雄: 3次元形状を誇張するための投影変換法, テレビジョン学会誌, Vol.50, No.10, pp.1543–1548

(1996).

- 6) Osa, A., Nagata, K., Tsukamoto, S., Kinoshita, T., Ichikawa, M. and Miike, H.: A human-oriented rendering based on perception of visual angle and viewing distance, *Proc. 2nd IASTED International Conference, VISUALIZATION, IMAGING AND IMAGE PROCESSING*, pp.545-550 (2002).
- 7) 山下義行：ブラック・ホールのコンピュータ・グラフィックス：光線追跡法の曲がった4次元時空への拡張，情報処理学会論文誌，Vol.30, No.5, pp.642-651 (1989).
- 8) 黒田正巳：空間を描く遠近法，彰国社，東京 (1992).
- 9) 小山清男：幻影としての空間—図学からみた東西の絵画，東信堂，東京 (1996).
- 10) ロバート・L・ソルソ：脳は絵をどのように理解するか，鈴木光太郎ほか (訳)，p.223, 新曜社，東京 (1997).
- 11) 三末和男，杉山公造：図的思考支援を目的とした図の多視点遠近画法について，情報処理学会論文誌，Vol.32, No.8, pp.997-1005 (1991).
- 12) Agrawala, M., Zorin, D. and Munzner, T.: Artistic Multiprojection Rendering, *Eurographics Rendering Workshop 2000*, pp.125-136 (2000).
- 13) 長 篤志，原田哲也，木下武志：視点が混在する3次元コンピュータ・グラフィックス生成手法，芸術科学会論文誌，Vol.1, No.2, pp.85-88 (2002).

(平成 15 年 10 月 14 日受付)

(平成 16 年 11 月 1 日採録)



長 篤志 (正会員)

昭和 47 年生。平成 9 年山口大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程修了。博士 (工学)。平成 9 年山口大学工学部助手。主として動画像処理，デザイン工学，コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。日本映像学会，芸術科学会各会員。



原田 哲也

昭和 53 年生。平成 15 年山口大学大学院理工学研究科感性デザイン工学専攻博士前期課程修了。修士 (工学)。同年 (株) エイチアイに入社。



木下 武志

昭和 37 年生。昭和 62 年武蔵野美術大学造形学部芸術デザイン学科卒業。芸術工学博士 (神戸芸術工科大学)。昭和 62 年映像制作会社 (株) 白組に入社。平成 4 年山口県立大学助手。平成 12 年山口大学工学部講師。主として映像デザイン手法，デザイン教育に関する研究に従事。日本デザイン学会，映像情報メディア学会，日本映像学会各会員。