

## 最適視点計算を用いた絵画における多視点描画の再現

真 塩 海 里<sup>†1</sup> 吉 田 謙 一<sup>†1</sup>  
高 橋 成 雄<sup>†1</sup> 岡 田 真 人<sup>†1,†2</sup>

我々が描く絵は、局所的には全体を投影する視点と異なる視点からの透視投影として描かれており、それらが絵画全体として統一感を損なわないように統合され通常の透視投影とは異なる非透視投影図となる。本研究ではこのような絵画に見られるデフォルメの性質に注目し、3次元シーンから自動的に絵画的な非透視投影図の生成を行う。本手法ではまず視点エントロピーを指標として3次元シーンの個々のオブジェクトの最適視点を計算する。更にこれら個々の視点を表すパラメータをそれぞれのオブジェクトの周囲に場として与える。異なる視点のパラメータ場を滑らかに接続し、全体としての統一感を損なわない3次元シーンの非透視投影を行う。

### Constructing Multi-Projection Images using Automatic Viewpoint Selection

KAIRI MASHIO,<sup>†1</sup> KENICHI YOSHIDA,<sup>†1</sup>  
SHIGEO TAKAHASHI<sup>†1</sup> and MASATO OKADA<sup>†1,†2</sup>

Hand-drawn images usually have some different viewpoints and are locally drawn from these viewpoints. These image segments are naturally integrated into an entire image drawn from the original viewpoint, and then the final image becomes a non-perspective projection that differs from the more natural manner of projection, known as perspective projection. In this research, by using deformation features shown in hand-drawn images, we attempt to generate an aesthetic non-perspective image using a highly automated process. Our application, first, calculates the viewpoint entropy to determine the best view position to properly describe an object in the three-dimensional scene. This calculation should be carried out for each object. These viewpoints are represented as a parameter field. Objects and the space around them have parameters that represents their best view. Parameters between the different objects are discontinuous, so in the final stage, our application smoothes the discontinuous borders of the parameters. Using the parameter field in the projection process, our application makes 3D scene non-perspective multiprojection.

### 1. はじめに

通常コンピュータグラフィックスでは透視投影が用いられるのに対し、我々が描く絵は厳密な透視投影となることは少なく、多くの場合、全体を描く基準となる視点と、それとは異なる複数の視点が混在した非透視投影となる。このような複数の視点の混在は、シーン中に含まれるいくつかの物体を周囲とは異なる視点で描き、かつ、全体を描く視点とは不整合を生じないように描くことで実現される。作者は複数の視点をを用いることで、その物体の特徴を強調したり、誤った認識を与えることを回避するなど様々な効果を得られる。芸術絵画においてはこのような複数の視点を混在させた表現が顕著に見られる。

このような複数の視点を持つ非透視投影図をコンピュータ上の計算手続きとして作成する手法はこれまでもいくつか提案されてきた。入力3次元中のオブジェクト毎に異なるカメラで投影し、奥行きを考慮して2次元の画像へと合成する手法<sup>1)</sup>や、通常直線的に伸びる視線を曲げることで投影図の歪みを操作する手法<sup>2)</sup>、異なる視点からの見えを実現するよう、オブジェクト自体に変形を加える手法<sup>3)</sup>などがある。

いずれの手法も複数の視点を持つ非透視投影を作成することは可能であるが、適切な非透視投影図の設計には3次元空間中のカメラの位置の設定を行い、その結果がどのように反映されるかを確認した後に、再度カメラの位置の調整を行うといった手間のかかる作業を要する。

Colemanらは2次元上から直接的に特徴点の操作を行う方法を提案した<sup>4)</sup>。しかし、変形が局在化しすぎている場合、シーンに含まれる直線の特徴の歪みが目立つために投影図全体としての不自然さを伴う。Yoshidaらは特徴点の操作に複雑な作業を必要とせず、かつ、奥行きへの知覚に重要な役割を果たす直線の特徴を容易に操作できるインターフェースを提案した<sup>5)</sup>。この手法では空間中に配したカメラパラメータ場を直感的に操作するツールを提供することで広範囲にわたる投影図の操作を可能としている。非透視投影図を作成するためのこれらの作業は、我々が試行錯誤を続けるうちに完成する。その際、我々は何らかの評価基

<sup>†1</sup> 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
Graduate School of Frontier Sciences  
The University of Tokyo

<sup>†2</sup> 独立行政法人理化学研究所 脳科学総合研究センター  
RIKEN Brain Science Institute

準を持ち、完成される投影図の評価値が改善されるよう作業進めていると考えられる。

本研究の目的は、投影図の評価をユーザーが適宜行い補正していくのではなく、複数の物体の3次元情報だけから最適視点の位置を自動で決定し、これらの視点を連続的に統合した非透視投影図を作成するアルゴリズムを提案することである。具体的なアルゴリズムは以下の通りである。始めに、投影に用いるオブジェクトの最適視点をオブジェクトの表面形状から自動的に選択する。次に、投影する3次元シーン中に選択された視点をオブジェクトとその周囲の領域に反映したパラメータ場を用意する。ここでのパラメータは最適視点からの見えを実現するためにオブジェクトを変形する際の、オブジェクトを構成する頂点の変位量である。このようなパラメータ場を用いて投影が行われた場合、オブジェクトとその周囲の領域には最適視点をを用いた投影が行われ、それ以外の領域には基準視点をを用いた投影が行われる。この時、オブジェクトの周囲とそれ以外の領域、あるいは近接した異なるオブジェクトの境界では、パラメータ場が不連続に変化し、投影図に不自然さを生じる。本研究では、この不自然さを取り除くために、パラメータ場にスムージングを施す。ただし、スムージングの最適値は全てのパラメータが等しい値となる透視投影であるため、適切な滑らかさでスムージングを終える必要がある。本研究ではこのような適切なパラメータ場を得るため、パラメータ場の評価関数に相当するエネルギーを導入する。ここで定義するエネルギーは、前述の意味で対象としているシーンの投影に適切であるほど低い値を与える。エネルギーの最小値を与えるパラメータ場を用いて、非透視投影図の作成をおこなう。

## 2. アルゴリズム

ここでは本研究で想定している基本的な状況を説明する。本研究では現実的な3次元シーンをユーザーの指定する一つの任意の視点を基準とし、更にいくつかの視点をを用いて3次元シーンの各領域を投影することで非透視投影図を作成することを想定している。ユーザーはまず、3次元シーン中で一つの基準視点を定める。これは画家が絵を描く際にどの位置からどの方向を向いてシーンを描くかを定めたことに相当する。その後ユーザーは投影図上で強調したいいくつかのオブジェクトを指定する。ここで指定されたオブジェクトは結果としての投影図上で、それ自身の持つ形態的な特徴を強調される。

提案するアルゴリズムは、最適視点の選択、最適視点を反映したパラメータ場の設定、パラメータ場のスムージングという3つのステップからなる。以下ではその詳細について述べる。

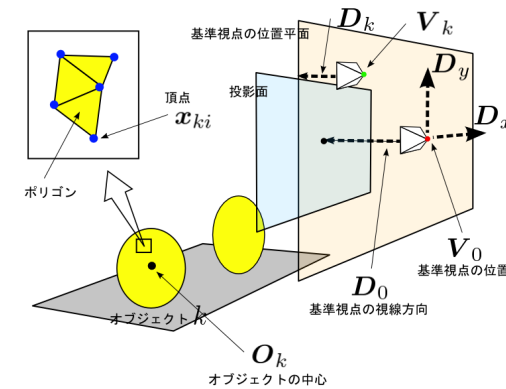


図1 3次元シーンと視点

Fig. 1 Three dimensional scene and viewpoints

### 2.1 3次元シーンと視点

3次元シーンはそれを構成する複数のオブジェクトからなり、図1に示したように各オブジェクトはポリゴンによって表現される。オブジェクトの中心は各頂点を等価に扱ったときの重心で定義する。すなわち、複数存在するオブジェクトのうち、 $k$ 番目のオブジェクトの中心  $O_k$  はオブジェクト  $k$  を構成する  $i$  番目の頂点の座標  $x_{ki}$  を用いて、 $O_k = \sum_{i=0}^n x_{ki}$  と表される。ここで  $n$  はオブジェクト  $k$  を構成する頂点の総数である。

一方、視点は3次元の位置と視線方向を持つ。実装上、シーンの投影に用いる投影面は視点の視点方向に垂直な平面である。ここでは図1に示したようにオブジェクト  $k$  の最適視点の位置を  $V_k$ 、視線方向を  $D_k$  とする。ただし  $k=0$  についてはユーザーによって決定される基準視点を表すものとする。また、基準視点の位置  $V_0$  を通る投影面に平行な平面を基準視点の位置平面と呼ぶことにする。この位置平面上において、水平な方向ベクトルを  $D_x$ 、鉛直な方向ベクトルを  $D_y$  とする。

### 2.2 最適視点の選択

我々のアルゴリズムでは始めにユーザーの指定した強調したいオブジェクトの最適視点を選択する。ここでは最適視点を選択するための視点の評価値として、Vázquezらによって提案された視点エントロピーを用いる<sup>6)</sup>。ポリゴンによって表現されたオブジェクトの視点エントロピーは式(1)のように表される、

$$I = - \sum_{j=0}^N \frac{A_j}{S} \log_2 \frac{A_j}{S}. \quad (1)$$

ここで  $N$  はオブジェクトを構成するポリゴンの総数である。  $A_0$  は背景の面積を表し、  $A_j$  はオブジェクトの表面を形成する  $j$  番目のポリゴンがスクリーンに投影されたときの面積を表す。スクリーンの全面積  $S$  は  $S = \sum_{j=0}^N A_j$  を満たす。この式は、各ポリゴンを投影したときの面積分布を確率分布と対応付けることで、Shannon の情報エントロピーと等価となり<sup>7)</sup>、より多くのポリゴンが等しい面積で見えるような視点を選択したとき、エントロピーの値はより大きくなる。

実装上での最適視点の選択は以下のように行う (図 2)。特徴付けたいオブジェクト  $k$  を投影するための視点を用意し、まずはその視点の位置  $V_k$  をユーザーによって指定された基準視点と同じ位置  $V_0$  にセットする。ここからは実際に投影に用いる視点と区別するため、探索時に移動する視点の位置は  $U_k$  と表記する。このときの視線方向  $D_k$  は位置  $U_k$  からオブジェクトの中心  $O_k$  へ向かうベクトルとする。最適視点を選択するため、  $U_k$  は  $V_0$  からオブジェクト  $k$  を中心とした球面上をモンテカルロ的に移動し、図に示したような赤い軌跡を描きながら視点エントロピーの上昇する方へと移動する。周囲に現在の位置よりも視点エントロピーの高い値をとる視点がなくなったとき、  $U_k$  は移動を終了する。

### 2.3 最適視点を反映したパラメータ場の設定

次にオブジェクトを最適視点を反映して投影するための方法について解説する。選択された最適視点からの見えをオブジェクトの基準視点に対する深度を変化させずに実現するためには、図 3 のように投影に用いる最適視点  $V_k$  が基準視点の位置平面上になくはない。そこで、投影に用いるオブジェクト  $k$  の最適視点の位置は、この平面と、球面上の最適視点の位置  $U_k$  とオブジェクトの中心の位置  $O_k$  を結ぶ直線との交点と定める (図 3)。これにより、最適視点探索により選択された視点の方位を反映させつつ、その方位からオブジェクトを投影することが可能となる。投影に用いる最適視点の位置  $V_k$  は、

$$V_k = \frac{a_k}{a'_k} (U_k - O_k) + O_k \quad (2)$$

と表される。ただし、  $a_k$ 、  $a'_k$  はそれぞれ  $a_k = (O_k - V_0) \cdot D_0$  及び、  $a'_k = (O_k - U_k) \cdot D_0$  である。一方、投影に用いる最適視点の視線方向は、基準となる視点と同一であれば良く  $D_k = D_0$  である。

このようにして定められた最適視点  $V_k$  を用いてオブジェクトの投影を行う。具体的に

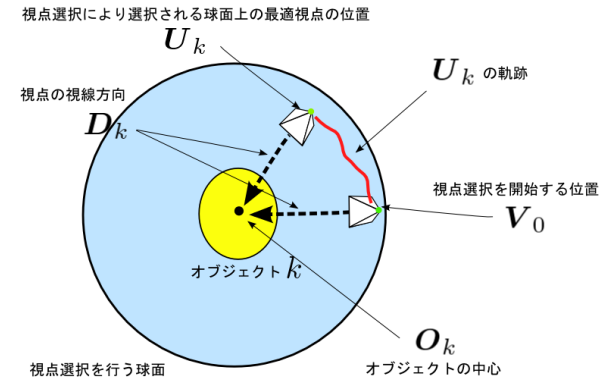


図 2 視点選択  
Fig.2 Viewpoint selection

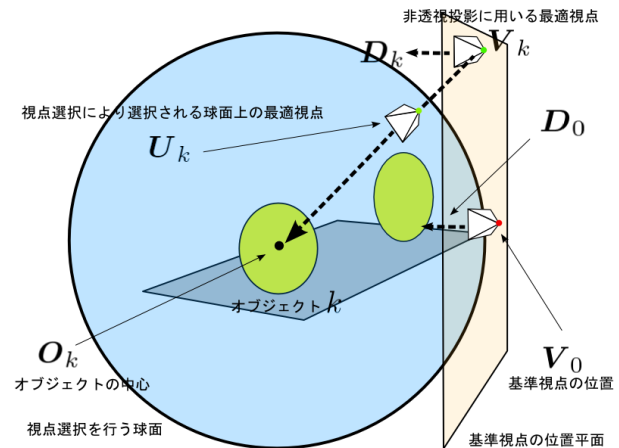


図 3 最適視点の位置  
Fig.3 Position of the best viewpoint

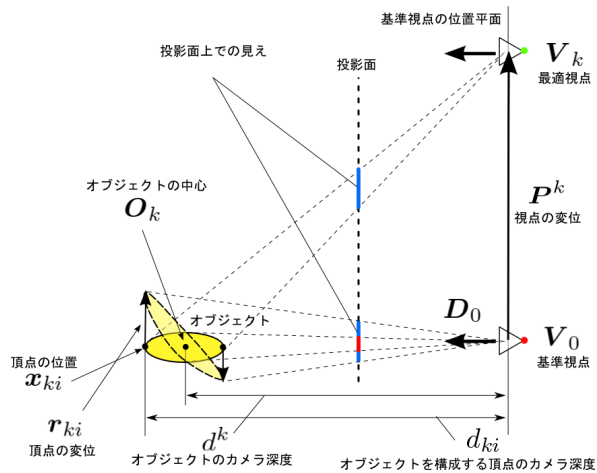


図 4 オブジェクトの変形  
Fig. 4 Deformation of an object

は図 4 のようにオブジェクトを構成する頂点を移動させ、投影面上での見えが最適視点からの見えに一致するようにオブジェクト自体を変形する。ここで、変形に伴う頂点の変位は基準視点の投影面に平行な変位であり、基準視点の視線方向には移動しないものとする。オブジェクトを構成する頂点毎に最適視点からの見えを再現するよう移動して基準視点  $V_0$  から投影することは、オブジェクトを構成する各頂点を異なる視点を用いて投影することと等価である。

オブジェクト  $k$  を構成する  $i$  番目の頂点の変位  $r_{ki}$  は、図 4 に示されているオブジェクト  $k$  の中心  $O_k$  のカメラ深度  $d_k$  と頂点自身のカメラ深度  $d_{ki}$ 、そして、図 5 に示したような最適視点の位置平面上での変位  $P_k$  から以下のように決定される。

$$r_{ki} = \left( \frac{d_{ki}}{d_k} - 1 \right) P_k \quad (3)$$

ここで図 5 に示されている変位  $P_k = \{P_{kx}, P_{ky}\}$  は、次のように計算される。

$$P_{kx} = (V_k - V_0) \cdot D_x, \quad P_{ky} = (V_k - V_0) \cdot D_y. \quad (4)$$

また、カメラ深度はそれぞれ以下のように計算される、

$$d_k = (O_k - V_0) \cdot D_0 \quad (5)$$

$$d_{ki} = (x_{ki} - V_0) \cdot D_0 \quad (6)$$

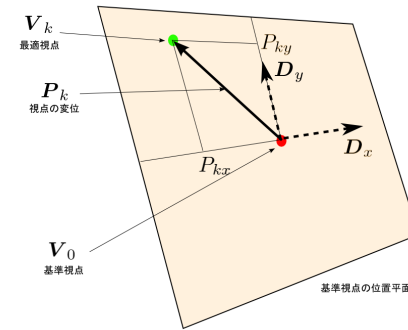


図 5 最適視点の平面上での変位  
Fig. 5 Displacement of the best viewpoint

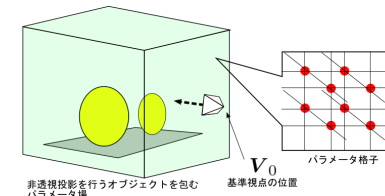


図 6 パラメータ場と格子  
Fig. 6 Projection parameter field and lattices

ここで注意したいのは、オブジェクト  $k$  の最適視点を再現するための頂点の変位  $r_{ki}$  が最適視点の位置平面上での変位  $P_k$  と同じ、2次元のベクトル量であることである。

Yoshida らの提案したカメラパラメータ場では、カメラを特徴付けるカメラパラメータを場として空間中に保持することで、カメラパラメータを空間的に伝播させることが可能である。例えば、直線的な特徴に沿ってカメラパラメータの値を減衰させることで、奥行き知覚に重要な直線の特徴を保ちつつ非透視投影を行うことが可能である。本研究では (3) 式の頂点の変位をパラメータ場として空間中に保持し、シーンのあらゆる点に頂点の変位量を割り当てる。まず、図 6 のように非透視投影を行うシーン中に頂点の変位量を保持するパラメータ場を用意する。このパラメータ場は空間中を分割する格子として表現する。ここでは  $i$  番目の格子の位置を  $l_i$  とし、 $i$  番目の格子が持つパラメータを  $s_i$  とする。

以下ではオブジェクト毎に選択された最適視点をパラメータ場に反映させる方法について

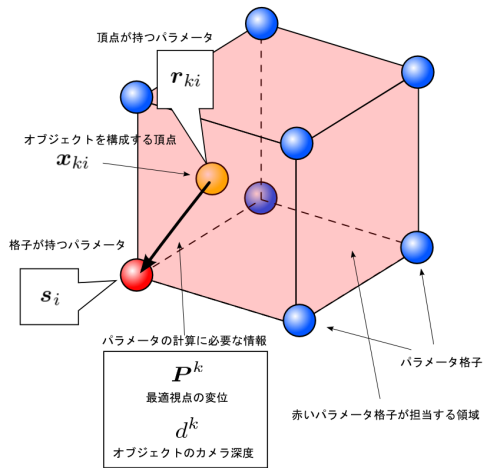


図 7 パラメータ格子とオブジェクトの頂点  
Fig. 7 Projection parameter lattices and a vertex of an object

述べる．各パラメータ格子には図 7 に示したような領域を割り当てる．この領域の内部に頂点があるとき，パラメータ格子はその頂点構成するオブジェクトの最適視点の変位  $P_k$  及びそのオブジェクトの中心のカメラ深度  $d_k$  を用いて自身が保持するべきパラメータを計算する． $i$  番目の格子が担当する領域にオブジェクト  $k$  の頂点が含まれていたとき，その領域は最適視点によって投影されるべきであり，格子のパラメータ  $s_i$  は，

$$s_i = \left( \frac{d_i}{d_k} - 1 \right) P_k \quad (7)$$

と計算される．ただし  $d_i$  は  $i$  番目の格子のカメラ深度であり， $d_i = (l_i - V_0) \cdot D_0$  である．また，頂点がパラメータ格子の領域内に含まれない時，あるいは領域内にある頂点がユーザーによって選択されていないオブジェクトのものである時，その領域は基準視点によって投影されるべきであり， $s_i = \{0, 0\}$  である．これをすべてのパラメータ格子に対して行うことで，3次元シーン中のあらゆる領域に投影を行うためのパラメータが設定される．

投影を行う際には，シーンを構成する各頂点が周辺の格子のパラメータを参照して移動する．頂点の実際の変位量は，周辺 8 近傍の格子のパラメータを 3 重線形補完して決定する．

#### 2.4 スムージング

2.3 節で設定されたパラメータ場はオブジェクトの周囲の領域で不連続な境界を持つ．そ

のためこのパラメータ場を用いて投影を行うと，各オブジェクトは相互の位置関係を無視して独立に投影が行われる．互いに隣接したオブジェクトの周辺がまったく異なる視点を用いて投影された場合，結果の投影図には不自然に視点が混在する．そこで，パラメータ場の不連続な境界を滑らかにすることで，空間的に互いに近接した領域が似たように投影されるようにする．ただし，滑らかさの極限である一様なパラメータ場は単一の視点を用いた透視投影に対応する．パラメータ場はオブジェクト周辺の領域で最適視点を反映しつつ，不自然さを伴わないような滑らかさを持つ必要がある．本研究ではこのような適切なパラメータ場を得るため，以下のようなパラメータ場の評価値であるエネルギーを定義する．

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N (s_i - s_i^0)^2 + \frac{\gamma}{2} \sum_{(i,j)} (s_i - s_j)^2 \quad (8)$$

ここで  $s_i^0$  は 2.3 節の終わりで設定したパラメータの値であり， $N$  はパラメータ格子の総数である．また， $\gamma$  は場の滑らかさを規定するパラメータであり，ユーザーによって指定される．和  $\sum_{(i,j)}^N$  は全ての隣接するペアに対して計算を行うということを表す．式 (8) の右辺第一項は各オブジェクトの最適視点を反映したパラメータ場との差を評価し，第二項がパラメータ場の滑らかさを評価する．オブジェクトの最適視点を適度に反映させつつ，隣接する格子のパラメータが滑らかに変化するようなパラメータ場は低いエネルギーの値をもつ．

実装では各パラメータ格子についてのエネルギーの微分が 0 になるよう，パラメータ場を更新する．

$$s_i = \frac{s_i^0 + \gamma \sum_{j \in \text{nearest}} s_j}{1 + 6\gamma} \quad (9)$$

ここで  $\sum_{j \in \text{nearest}}$  は隣接する格子に関する和を表す．これを全ての格子に対して行い，更新されたパラメータ場のエネルギーを計算する．更新前と更新後の場のエネルギーを比較し，最小値と判定されるまでパラメータ場の更新を繰り返す．

### 3. 結 果

我々のアルゴリズムを実際に適用して作成した投影図を図 8 に示す．左が通常の透視投影図であり，右が複数の視点を用いた非透視投影図である．対象としたシーンは一般的な静物を含むシーンである．このシーンにおいて強調するオブジェクトは，図 8 中に A ~ E で示した 5 つのオブジェクトである．図 8 では滑らかさのパラメータを  $\gamma = 3.0$  としてスムージングを行い，決定されたパラメータ場を用いて投影を行った．非透視投影図では机の淵がオ

プロジェクト A, B の最適視点の影響を受けているが, パラメータのスムージングによりその歪みは空間的に緩やかな変化として抑えられ, 不自然さを除去できていることがわかる。

図 9 は同じシーンに対して異なる滑らかさ  $\gamma$  でスムージングを行い, 投影を行ったものである。滑らかさの値が低いとオブジェクト毎の投影する視点の違いが顕著に現れ, 投影図の不自然さが除去できない (図 9(a))。一方, 滑らかさの値が高いとき, 一様なパラメータ場に近づき, 単一の視点を用いた透視投影図となってしまう。(図 9(c))。適切な滑らかさでスムージングを行ったパラメータ場により, 最適視点を反映し, かつ, 不自然さを伴わない投影図を得ることが出来る (図 9(b))。

#### 4. おわりに

本報告ではユーザーが選択した複数のオブジェクトの最適視点を選択し, これらの視点を用いた非透視投影図を自動で生成する枠組みを提案した。その結果としてユーザーは, 少数の設定を行うだけで自動的に非透視投影図を作成することが可能となった。

今後の課題としては, 強調するオブジェクト以外のオブジェクトに関する不自然さを除去することが考えられる。また, ユーザーによって定められているパラメータ場の滑らかさ  $\gamma$  を汎用的に定める手法の確立も挙げられる。

#### 参 考 文 献

- 1) M.Agrawala, D.Zorin and T.Munzner: Artistic Multiprojection Rendering, *Proc. EG Symposium on Rendering'00*, pp.125-136(2000).
- 2) Y.Kurzion and R.Yagel: Interactive Space Deformation with Hardware-Assisted Rendering, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 17, No. 5, pp. 66-77(1997).
- 3) P. Rademacher: View-Dependent Geometry, *Proc.SIGGRAPH 99*, pp. 439-446(1999).
- 4) P. Coleman et al.: 3D screen-space widgets for non-linear projection, *Proc. GRAPHITE '05*, pp. 221-228(2005).
- 5) 吉田謙一, 高橋成雄, 藤代一成, 岡田真人: 2次元投影図上の見えの操作に基づいた非透視投影の設計, *画像電子学会誌*, Vol.37, No.4, pp.412-418, 2008.
- 6) P.P. Vázquez, M. Feixas, M.Sbert, and W. Heidrich. Viewpoint selection using view entropy. In *Proc. of Vision Modeling and Visualization Conference (VMV01)*, pages 273.280, 2001.
- 7) Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication, *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp.379-423, 623-656(1948).

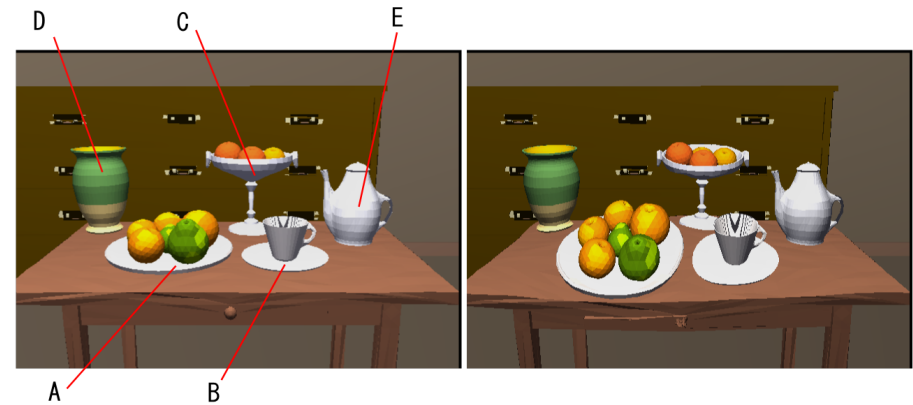


図 8 提案手法を一般的な静物を含むシーンへ適用したもの。  
左が通常の透視投影, 右が複数の視点を用いた非透視投影。  
Fig. 8 Result of our application applied for the three-dimensional scene.  
LEFT: Perspective projection, RIGHT: Multi-projection.

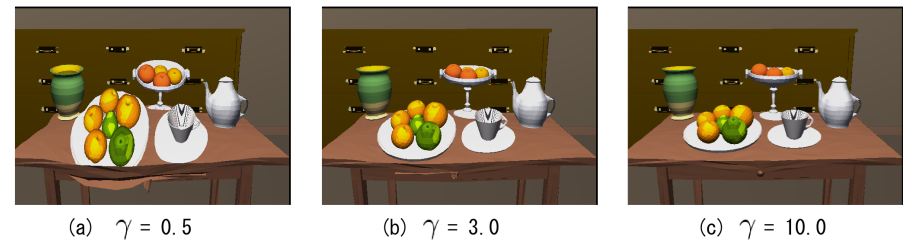


図 9 異なる  $\gamma$  による違い  
Fig. 9 Results for different values of  $\gamma$ .