2004－CVIM－145　(4)
2004／9／10

1次元カメラモデルを用いた Multiperspective Imagingによる IBR *

市村 直幸†

あらまし　Image-based rendering(IBR) は，空間中に配置された複数のカメラによって撮像された画像より，新しい視点からの画像を生成するために用いられる．特に 3 次元の plenoptic function に基づく方法は，画像入力が比較的簡便であるため利用しやすい．しかし，生成画像の画質に大きな影響を与える縦方向の歪みを除去するためのスケーリングに関し，特定のカメラ配置に対する考察しかなされていない．本論文では，1 次元カメラの集合として，仮想カメラをモデル化することを提案する．そのモデル化に基づき，任意のカメラ配置に対するスケーリング係数を含むレンダリングアルゴリズムを示す．さらに，そのモデル化により，multiperspective imaging による画像生成が可能なことを述べる．実験により，提案方法の有効性を示す．

Image-Based Rendering by Multiperspective Imaging Using 1D Camera Model

Naoyuki ICHIMURA†

Abstract　Image-based rendering (IBR) has been used to synthesize an image corresponding to a new view point from images captured by arranged cameras. Rendering methods based on a three-dimensional plenoptic function are attractive due to the simplicity of image capture. Only a few discussions on a scaling problem to correct the vertical distortion which heavily affects the visual fidelity of a synthesized image, however, have been done for specific camera arrangements. This paper presents the modeling of a virtual camera using a set of one-dimensional cameras. Using the virtual camera, we develop a rendering algorithm with a scaling scheme for arbitrary camera arrangements. Then we show that the virtual camera can be used to realize new view generation by multiperspective imaging. Experimental results are given to demonstrate the usefulness of the proposed algorithm.

1　まえがき

Image-based rendering(IBR) は，空間中に配置された複数のカメラによって撮像された画像より，新しい視点からの画像を生成するために用いられる．図 1 に IBR の一例を示す．図 1 (a) は ray(光線) database の作成を表している．この例では，直線の camera path 上に複数のカメラを設置し，各カメラでシーンを撮像する．その結果得られた画像を蓄積することは，各カメラに付随する ray を蓄積することと等価である．このことから，撮像した画像を ray database と呼ぶ．新しい視点からの画像生成は，仮想カメラを設置し，それに付随する ray を ray database から抽出することによって行う．図 1 (b) は，camera path の後方に仮想カメラを設置して生成した画像である．撮像した各画像単独では捕えられていないシーン全体を表す画像が得られている．

上の例で示した ray database の作成は，図 2 に示す plenoptic function [1] のサンプリングと解釈できる．Plenoptic function は，任意の位置 $\mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z}$, 方向 θ, ϕ, 波長 λ, 時間 t をもつ空間中の ray 全体を表す 7 次元の関数 $P(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z}, \theta, \phi, \lambda, t)$ である．実際にカメラを配置し，この 7 次元の関数をサンプリングすることは非常に困難である．静止シーンを仮定し, 使用するカメラで得られる範囲のものに波長を限定すると，5 次元の関数となるが，全ての位置と方向に対するサンプリングも困難である．そのため，より低次元の関数を用いた方法が提案されている．このことは，ray database を作成する際のカメラの配置を制約することと等価である．カメラの配置を図 2 の世界座標系の $\boldsymbol{X}_{\mathrm{w}}$–$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{w}}$ 平面内に限定し，4 次元の関数 $P(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \theta, \phi)$ を用いる方法として，光線空間法 [2]，Light field rendering [3]，Lumigraph [4]

*本研究の一部は，JSPS Overseas Research Fellowship の支援の下で行われた．

†産業技術総合研究所 脳神経情報研究部門，Neuroscience Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), nic@ni.aist.go.jp, http://staff.aist.go.jp/naoyuki.ichimura/

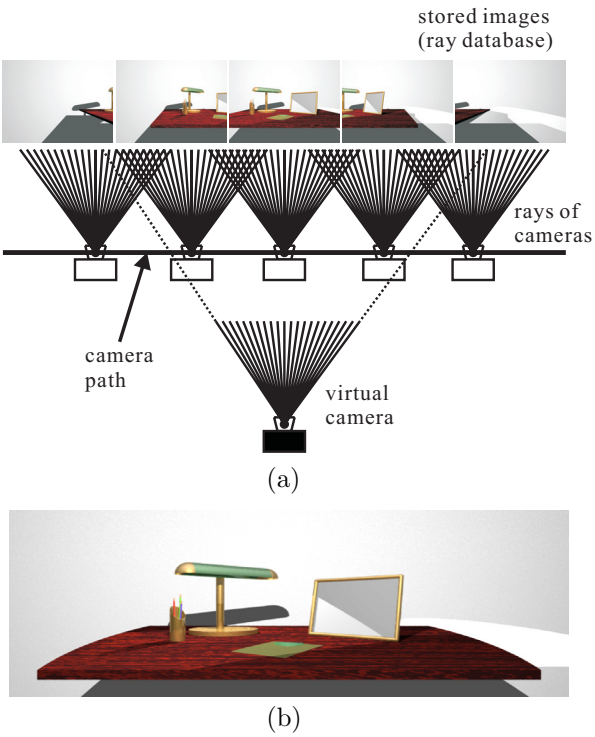

図 1: Image-based rendering の例．(a) Ray database の作成と仮想カメラ．この例では，直線の camera path 上に複数のカメラを設置し，各カメラでシーンを撮像する．得られた画像を蓄積することは，各カメラに付随する ray (光線) を蓄積することと等価である．このことから，撮像した画像を ray database と呼ぶ．新しい視点からの画像生成は，仮想カメラを設置し，それに付随する ray を ray database から抽出することにより行う．(b) 新しい視点からの画像．撮像した各画像単独では捕らえられていないシーン全体を表している点に注意されたい．

ある．また，カメラの配置を $\boldsymbol{X}_{\mathrm{w}}$–$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}}$ 平面内に限定し，3 次元の関数 $P(\mathrm{x}, \mathrm{z}, \phi)$ を用いる方法として，Concentric mosaics [5] がある．最近，新しい視点からの画像生成が non-perspective imaging に基づくことが指摘され，Bi-centric camera [6, 7] や Cross-slits projection [8] として定式化された方法もある．これらも 3 次元の関数に基づく方法である．

先に説明した図 1 は，camera path が直線の場合の，3 次元の関数に基づく IBR の例になっている．3 次元の関数を用いる方法の利点は，この例に示すように縦方向にカメラを配置する必要がないことから，画像入力が比較的簡便になることである．また，ray の縦方向の角度 (図 2 の θ) を変数としないため，ray database の画像から画素列を抽出し，それを並べるという容易な処理 (mosaicing) により画像生成が行えることも利点である [5, 6, 7, 8]．

一方，顕著な問題点もある．Ray の縦方向の角度を変数としないため，ray database の作成に使用したカメラにおけるシーンの縦方向の可視範囲と，

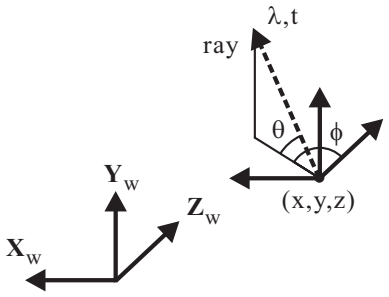

図 2: Plenoptic function．$\boldsymbol{X}_{\mathrm{w}}$,$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{w}}$ および $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}}$ 軸によって定義される世界座標系をもつ空間中の ray 全体は，任意の位置 $(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z})$，方向 (θ, ϕ)，波長 λ，時間 t をもつ 7 次元の関数 $P(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z}, \theta, \phi, \lambda, t)$ で表現される．

仮想カメラにおける可視範囲が一致しない場合，生成画像に縦方向の歪み (vertical distortion) [5] が生じる．この歪みは，生成画像内の物体のアスペクトレシオを変化させ，観測者に大きな違和感を与える．歪みを除去するためには，可視範囲の違いを吸収する適切なスケーリング係数を用い，画像生成のために抽出した画素列を拡大もしくは縮小すれば良い．そのスケーリング係数の算出について，camera path が直線もしくは円の場合についての検討はなされているが，その他の場合に対する考察はなされていない [5, 6, 7, 8]．

本論文では，1 次元カメラの集合として，仮想カメラをモデル化することを提案する．そのモデル化に基づき，任意の camera path に対するスケーリング係数を含むレンダリングアルゴリズムを示す．さらに，そのモデル化により，全ての ray が一点で交わる perspective imaging のみならず，複数の視点を用いた multiperspective imaging に基づく画像生成が行えることを述べる．CG によって作成した画像および実画像を用いた実験により，提案方法の有効性を示す．

2 仮想カメラのモデル化

本節では，1 次元カメラの view plane を用いた，仮想カメラに付随する ray の表現について述べる．そして，1 次元カメラの view plane の式を導出する．

2.1 仮想カメラの ray の表現

3 次元の plenoptic function を用いた IBR では，ray database の画像から仮想カメラの ray に対応する画素列を抽出することにより，新しい視点からの画像生成を行う [5, 6, 7, 8]．よって，仮想カメラの ray は，生成画像の画素列毎にまとめて取り扱える．このことから，図 3 に示すように，仮想カメラを各画素列に対応する 1 次元カメラの集合として

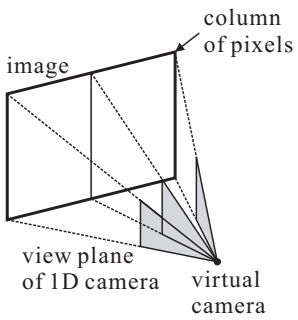

図 3: 仮想カメラ．仮想カメラを，生成画像の各画素列に対応する 1 次元カメラの集合と考える．このカメラでは全ての ray が 1 点で交わることから，perspective imaging を模倣した画像生成に使用できる．

表現する．

1 次元カメラに付随する ray は平面を構成する．これを view plane と呼ぶ．この view plane の位置と向きが，画像生成のために ray database のどの画像からどの画素列を抽出すれば良いかを決定する．次節では，view plane の位置と向きを表す式を導出する．

2.2 View plane の式の導出

図 4 に 1 次元カメラの撮像系を示す．世界座標系を $\boldsymbol{X}_{\mathrm{w}}$,$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{w}}$ および $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}}$ 軸によって表す．カメラの位置のインデックスを k とする．k 番目のカメラの世界座標系に対する運動は，回転行列 $\boldsymbol{R}_k$ と並進ベクトル $\boldsymbol{t}_k$ で与えられる．この運動により，$\boldsymbol{X}_k$,$\boldsymbol{Y}_k$ および $\boldsymbol{Z}_k$ 軸で表されるカメラ座標系が定まる．1 次元の撮像素子は $\boldsymbol{Y}_k$–$\boldsymbol{Z}_k$ 平面にあり，それを通じてシーンが撮像されると仮定する．

3 次元空間中の点 P の世界座標を $\boldsymbol{p}_w = (\mathrm{x_w}, \mathrm{y_w}, \mathrm{z_w})^t$，カメラ座標を $\boldsymbol{p}_k = (\mathrm{x}_k, \mathrm{y}_k, \mathrm{z}_k)^t$ とする．この両者には，次式の関係がある．

$$\boldsymbol{p}_k = \left(\boldsymbol{R}_k^t \mid -\boldsymbol{R}_k^t \boldsymbol{t}_k\right) \begin{pmatrix} \boldsymbol{p}_w \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{R}_k^t = (\boldsymbol{i}_k, \boldsymbol{j}_k, \boldsymbol{k}_k)^t, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{t}_k = (t_{xk}, t_{yk}, t_{zk})^t. \tag{3}$$

回転行列の各行，$\boldsymbol{i}_k$,$\boldsymbol{j}_k$ および $\boldsymbol{k}_k$ は，カメラ座標系の各軸 $\boldsymbol{X}_k$,$\boldsymbol{Y}_k$,$\boldsymbol{Z}_k$ の方向を表している．

式 (1) を展開することにより，次式のカメラ座標 x_k を得る．

$$\mathrm{x}_k = \boldsymbol{i}_k \cdot \boldsymbol{p}_w - \boldsymbol{i}_k \cdot \boldsymbol{t}_k. \tag{4}$$

1 次元の撮像素子は $\boldsymbol{Y}_k$–$\boldsymbol{Z}_k$ 平面にあることから，1 次元カメラによってシーンが観測可能な条件は

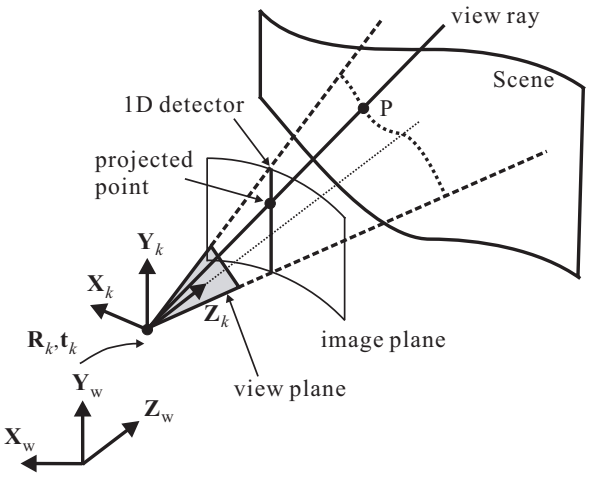

図 4: 1 次元カメラの撮像系．世界座標系を $\boldsymbol{X}_{\mathrm{w}}$,$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{w}}$ および $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}}$ 軸によって定義する．また，k 番目のカメラ座標系を $\boldsymbol{X}_k$,$\boldsymbol{Y}_k$ および $\boldsymbol{Z}_k$ 軸によって定義する．世界座標系とカメラ座標系の間の関係は，回転行列 $\boldsymbol{R}_k$ と並進ベクトル $\boldsymbol{t}_k$ によって表される．点 P の世界座標を $\boldsymbol{p}_w = (\mathrm{x_w}, \mathrm{y_w}, \mathrm{z_w})^t$，カメラ座標を $\boldsymbol{p}_k = (\mathrm{x}_k, \mathrm{y}_k, \mathrm{z}_k)^t$ とする．1 次元の撮像素子 (つまり，view plane) は，$\boldsymbol{Y}_k$–$\boldsymbol{Z}_k$ 平面上にあるとする．

$\mathrm{x}_k = 0$ である．よって，次式を得る．

$$\boldsymbol{i}_k \cdot \boldsymbol{p}_w = \boldsymbol{i}_k \cdot \boldsymbol{t}_k. \tag{5}$$

上式は，位置 $\boldsymbol{t}_k$，向き $\boldsymbol{R}_k$ の 1 次元カメラが，世界座標 $\boldsymbol{p}_w$ をもつ 3 次元空間中の点を観測する場合の view plane を表している．

3 次元の plenoptic function を用いた IBR では，カメラの回転は横方向，つまり，$\boldsymbol{Y}_k$ 軸周りのみである．また，カメラは $\boldsymbol{X}_{\mathrm{w}}$–$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}}$ 平面上に配置されるため，カメラ運動は次式で表現される．

$$\boldsymbol{R}_k^t = \begin{pmatrix} \cos\phi_k & 0 & -\sin\phi_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi_k & 0 & \cos\phi_k \end{pmatrix}, \tag{6}$$

$$\boldsymbol{t}_k = (t_{xk}, 0, t_{zk})^t. \tag{7}$$

ここで ϕ_k は，k 番目のカメラの $\boldsymbol{Y}_k$ 軸周りの回転角を表す．このカメラ運動を用いて式 (1) を展開すると，次式を得る．

$$\begin{aligned} \mathrm{x}_k &= \mathrm{x_w}\cos\phi_k - \mathrm{z_w}\sin\phi_k \\ &\quad -t_{xk}\cos\phi_k + t_{zk}\sin\phi_k, \end{aligned} \tag{8}$$

$$\mathrm{y}_k = \mathrm{y_w}, \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{z}_k &= \mathrm{x_w}\sin\phi_k + \mathrm{z_w}\cos\phi_k \\ &\quad -t_{xk}\sin\phi_k - t_{zk}\cos\phi_k. \end{aligned} \tag{10}$$

よって，以下の view plane の式を得る．

$$\mathrm{x_w}\cos\phi_k - \mathrm{z_w}\sin\phi_k = t_{xk}\cos\phi_k - t_{zk}\sin\phi_k. \tag{11}$$

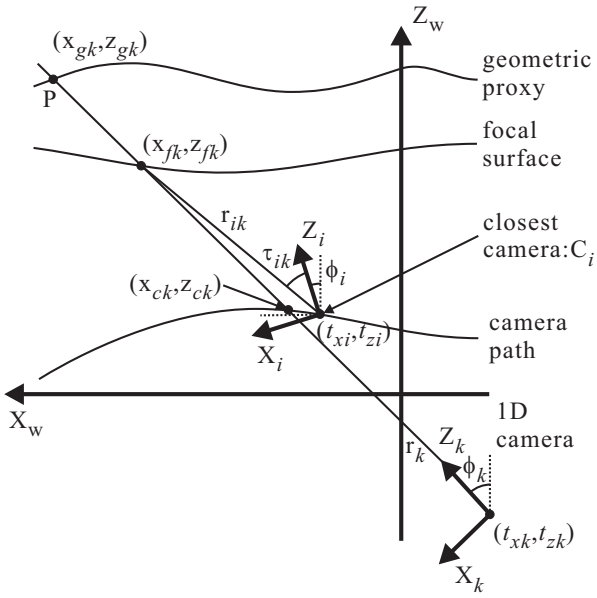

図 5: IBR アルゴリズムの概要．位置 (t_{xk}, t_{zk})，向き ϕ_k をもつ 1 次元カメラに付随する ray を r_k とする．まず，r_k と camera path の交点 $(\mathrm{x}_{ck}, \mathrm{z}_{ck})$ に最も近いカメラ (closest camera) C_i を ray database より探し，その位置 (t_{xi}, t_{zi}) と向き ϕ_i を得る．次に，r_k と focal surface の交点 $(\mathrm{x}_{fk}, \mathrm{z}_{fk})$ を求め，その交点と C_i の位置より，ray r_{ik} の角度 τ_{ik} を求める．r_{ik} に対応する画素列の位置を求め，C_i により撮像された画像より画素列を抽出する．抽出された画素列を，r_k と geometric proxy の交点 $(\mathrm{x}_{gk}, \mathrm{z}_{gk})$ までの仮想カメラからの距離および C_i からの距離を用いてスケーリングする．

次節で，式 (8)，(9)，(10) および (11) を用いた IBR のアルゴリズムを示す．

3 提案する仮想カメラを用いた IBR

本節では，まず，任意の camera path に対するスケーリング係数を含む IBR アルゴリズムを示す．その後に，スケーリング係数の導出を示す．

3.1 IBR アルゴリズム

図 5 に提案するアルゴリズムの概要を示す．図には，camera path, focal surface, geometric proxy の 3 つの曲線がある．Camera path 上に，ray database を作成するためのカメラを配置する．Focal surface は，仮想カメラがフォーカスを合せる位置を表す [9]．Geometric proxy はシーンの近似形状を表し，スケーリング係数の算出に用いる．全ての曲線は，ポリゴンを用いて離散的に表現される．3 つの曲線を表すポリゴンを，各頂点に付随するベクトルの集合 $\{\boldsymbol{c}_l\}_{l=1}^{L}, \{\boldsymbol{f}_m\}_{m=1}^{M}, \{\boldsymbol{g}_n\}_{n=1}^{N}$ により表す．各ベクトルは頂点の位置と共に，カメラの向き等の付加的な情報を有する．

提案する IBR アルゴリズムを以下に示す．

[Step 1: 視点の設定] 新しい視点に対応する 1 次元カメラの位置 (t_{xk}, t_{zk}) と向き ϕ_k を与える．このカメラに付随する ray を r_k とする．

[Step 2: closest camera の探索] Ray r_k と camera path の交点を求める．交点の計算は，r_k の view plane，つまり式 (11) と，ポリゴン $\{\boldsymbol{c}_l\}_{l=1}^{L}$ の交差判定により行う．交点座標 $(\mathrm{x}_{ck}, \mathrm{z}_{ck})$ に最も近い頂点 $\boldsymbol{c}_i$ を探し，その位置にあるカメラを closest camera C_i とする．頂点 $\boldsymbol{c}_i$ は，C_i の位置と向きを有し，$\boldsymbol{c}_i = (t_{xi}, t_{zi}, \phi_i)$ と表す．

[Step 3: focal surface との交点の計算] Ray r_k と focal surface の交点を求める．交点の計算は，r_k の view plane と，ポリゴン $\{\boldsymbol{f}_m\}_{m=1}^{M}$ の交差判定により行う．交点座標を $(\mathrm{x}_{fk}, \mathrm{z}_{fk})$ とする．

[Step 4: ray の角度の計算] 式 (11) より，座標 $(\mathrm{x}_{fk}, \mathrm{z}_{fk})$ を通過する C_i の ray r_{ik} の view plane は，以下のように表される．

$$\begin{aligned} &\mathrm{x}_{fk}\cos(\phi_i + \tau_{ik}) - \mathrm{z}_{fk}\sin(\phi_i + \tau_{ik}) \\ &\quad = t_{xi}\cos(\phi_i + \tau_{ik}) - t_{zi}\sin(\phi_i + \tau_{ik}) \,. \end{aligned} \tag{12}$$

ここで τ_{ik} は，図 5 に示す r_{ik} の角度である．上式より，τ_{ik} は次式で求められる．

$$\tau_{ik} = \mathrm{Tan}^{-1}\left(\frac{a - \tan\phi_i}{1 + a\tan\phi_i}\right), \tag{13}$$

$$a = \frac{x_{fk} - t_{xi}}{z_{fk} - t_{zi}} \,. \tag{14}$$

[Step 5: 画素列の位置の計算] 次式より，画素列の位置 d_{ik} を得る．

$$d_{ik} = f_i \tan\tau_{ik} \,. \tag{15}$$

ここで，f_i は C_i の焦点距離である．

[Step 6: geometric proxy との交点の計算] Ray r_k と geometric proxy の交点 P を求める．交点の計算は，r_k の view plane と，ポリゴン $\{\boldsymbol{g}_n\}_{n=1}^{N}$ の交差判定により行う．交点座標を $(\mathrm{x}_{gk}, \mathrm{z}_{gk})$ とする．

[Step 7: 画素列のスケーリング] 次式のスケーリング係数 s_k を用いて，位置 d_{ik} にある画素列のスケーリングを行う．

$$s_k = \frac{f_k}{f_i}\frac{z_{ik}}{z_k} \,. \tag{16}$$

ここで，

$$\begin{aligned} \mathrm{z}_{ik} &= \mathrm{x}_{gk}\sin\phi_i^{'} + \mathrm{z}_{gk}\cos\phi_i^{'} \\ &\quad -t_{xi}\sin\phi_i^{'} - t_{zi}\cos\phi_i^{'} \,, \end{aligned} \tag{17}$$

$$\phi_i^{'} = \phi_i + \tau_{ik}^{'} \,, \tag{18}$$

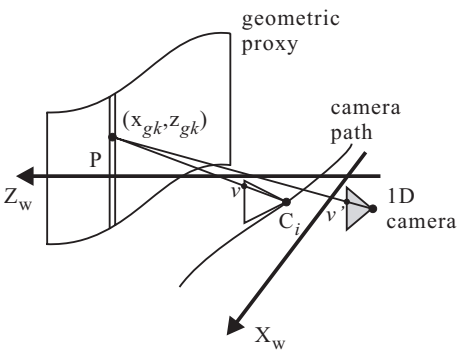

図 6: スケーリング係数．1 次元カメラおよび camera path 上のカメラ C_i から見た，geometric proxy 上の点 P の投影点を v,$v^{'}$ とする．その比が，画像生成のために抽出した画素列のスケーリング係数となる．

$$\tau_{ik}^{'} = \mathrm{Tan}^{-1}\left(\frac{a^{'} - \tan\phi_i}{1 + a^{'}\tan\phi_i}\right), \quad (19)$$

$$a^{'} = \frac{x_{gk} - t_{xi}}{z_{gk} - t_{zi}}, \quad (20)$$

$$\mathrm{z}_k = \mathrm{x}_{gk}\sin\phi_k + \mathrm{z}_{gk}\cos\phi_k - t_{xk}\sin\phi_k - t_{zk}\cos\phi_k, \quad (21)$$

であり，f_k は 1 次元カメラの焦点距離である．また，$\tau_{ik}^{'}$ は，C_i から ray r_k と geometric proxy の交点 P を見た場合の ray の角度である‡．

[Step 8: 画像列の平均化] Step1 から 7 を，C_i のみでなく，camera path 上の交点座標 $(\mathrm{x}_{ck}, \mathrm{z}_{ck})$ に近い複数のカメラに対して行う．得られたスケーリング済みの画素列の重み付け平均を求める§．

[Step 9: 画像の構成] Step1 から 8 を，仮想カメラを構成する全ての 1 次元カメラに対し行う．得られた画素列を並べ，新しい視点の画像を構成する．

3.2 スケーリング係数の導出

本節では，図 6 を用いてスケーリング係数 s_k の導出を説明する．1 次元カメラおよび closest camera C_i から見た，座標 (x_{gk}, z_{gk}) をもつ geometric proxy 上の点 P の投影点を v，$v^{'}$ とする．その比，つまりスケーリング係数は，次式で与えられる．

$$\frac{v}{v^{'}} = \frac{f_k \mathrm{y}_k}{\mathrm{z}_k}\frac{\mathrm{z}_{ik}}{f_i \mathrm{y}_{ik}}. \quad (22)$$

ここで，y_k,z_k および y_{ik},z_{ik} は，それぞれ 1 次元カメラおよび C_i での点 P のカメラ座標である．

‡この角度の使用は，フォーカスを合せる位置とは無関係に，シーンの位置のみでスケールを決定することを意味する．

§重みは，例えば，交点座標を中心とするガウス分布を用いて決定する．また，平均化に用いるカメラの台数は，仮想カメラの絞りの大きさに対応する [9]．本論文では，ガウス分布 $N(0,4)$ および C_i を含む 2 台のカメラを用いた．

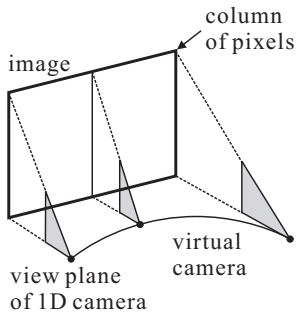

図 7: Ray が 1 点で交わらない仮想カメラ．複数の視点を用いて 1 枚の画像を生成する multiperspective imaging に対応する．

式 (9) より，$\mathrm{y}_k = \mathrm{y}_{ik} = \mathrm{y}_\mathrm{w}$ なので，式 (22) は式 (16) と一致する．また，z_{ik} と z_k は，式 (10) を用いて式 (17)，(21) として与えられる．よって，式 (16) のスケーリング係数を得る．

回転するカメラによって ray database を作成する IBR [5, 7] では，極座標を用いたスケーリング係数の表現が有用である．その導出は付録 A に示す．

上記のスケーリング係数の導出において，camera path の形状に対する仮定は何ら使用していない．よって，導出した係数は，任意の camera path に対して使用することが出来る．

4 Multiperspective Imaging による IBR

本節では，提案した仮想カメラのモデル化により，multiperspective imaging による画像生成が可能になることを述べる．図 3 では，全ての ray が 1 点に集まる仮想カメラを示した．これに対し，図 7 のように ray が 1 点に集まらないカメラのモデル化も可能である．このようなカメラを用いると，1 枚の画像を複数の視点を用いて生成する multiperspective imaging が可能になる．これにより，perspective imaging とは異なったシーンの表現を得ることができる [10, 11]．次節の実験により，その効果の一例を示す．

5 実験

3 節で示したアルゴリズムを用いた実験結果を示す．以下の全ての実験において，focal surface と geometric proxy は平面とし，両者を一致させた．

5.1 スケーリングの効果

まず，提案したスケーリング係数の効果を確認する．図 8 に，CG による ray database の作成を示す．Camera path はサインカーブとし，図に示す 3 フレームを含む 900 フレームを作成した．仮想

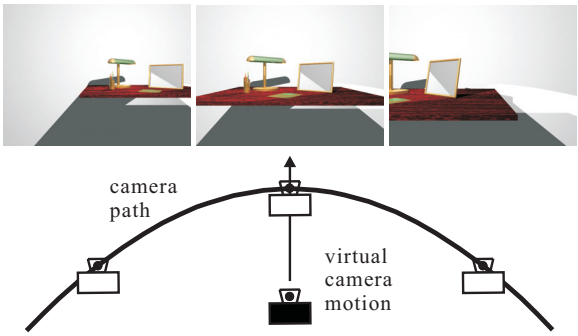

図 8: 実験に用いた CG による画像．Camera path はサインカーブとし，上に示す 3 フレームを含む 900 フレームを作成した．仮想カメラは図 3 に示す perspective imaging を模倣するものとし，正面から等速で前進させた．

カメラは，図 3 に示す perspective imaging を模倣するものとした．提案したスケーリング係数の有効性を示すには，仮想カメラとシーン間の距離が大きく変化する状況が望ましいため，仮想カメラを正面から等速で前進させた．Ray database を作成したカメラおよび仮想カメラの焦点距離は，それぞれ $f_i = 480$，$f_k = 960$[pixel] とした．

図 9 に生成画像を示す．図 9 (a) はスケーリングを施さない場合であり，図 9 (b) はスケーリングを施した場合である．また，両図において，上はシーン全体をカバーする位置に，下は物体の直前に，仮想カメラを配置した場合である．スケーリングを施さない場合，カメラの移動に伴い，物体のアスペクトレシオが大きく変化している．一方，スケーリングを施した場合には，そのような変化は表われていない．図 9 (b) の上の画像に生じている変形は，図 8 に示す camera path とシーン間の距離に応じて，抽出した画素列をスケーリング (縮小) した結果を反映したものである．

次に，遺跡を撮影した実画像を用いた ray database の作成を図 10 に示す．Camera path は直線とし，図に示す 3 フレームを含む 330 フレームを使用した．仮想カメラは，図 3 に示す perspective imaging を模倣するものとし，シーン全体をカバーする位置からやや下に向かって等速で前進させた．焦点距離は，$f_i = 260$，$f_k = 582$[pixel] である．

図 11 に生成画像を示す．スケーリングを施さなかった図 11 (a) では，仮想カメラの前進により広がるべき遺跡の門の幅に変化が生じていない．提案したスケーリング係数を使用した図 11 (b) では，アスペクトレシオが補正され，門の幅が徐々に広がっている．

以上の実験結果から，仮想カメラと物体までの距離が大きく変化してスケーリングが重要となる状況下において，提案したアルゴリズムにより適切な画像生成が可能と言える．

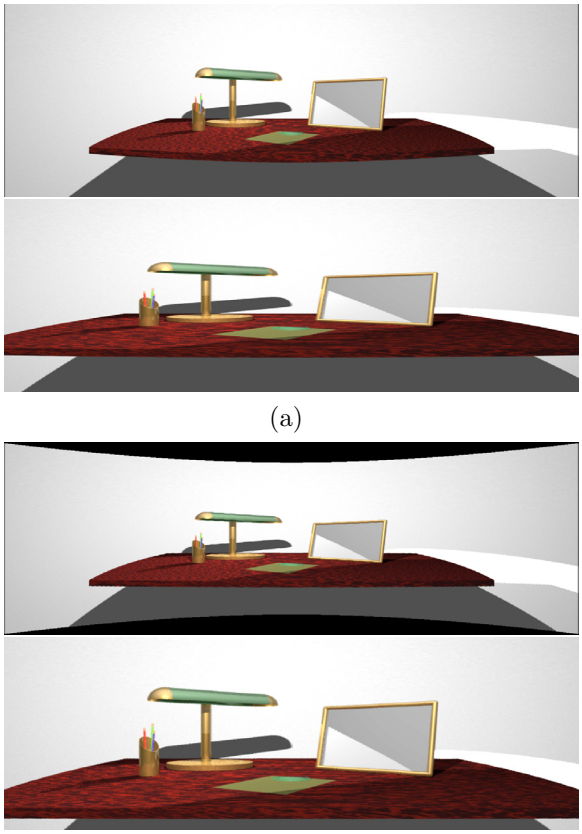

図 9: 図 8 の仮想カメラ運動に対する画像生成結果．(a) スケーリングを施さない場合．(b) 提案したスケーリング係数を用いた場合．上：シーン全体をカバーする位置に仮想カメラを配置した場合．下：物体の直前に仮想カメラを配置した場合．スケーリングを施さない場合，カメラの移動に伴い，物体のアスペクトレシオが大きく変化していることに注意されたい．(b) の上の画像の変形は，図 8 に示す camera path の奥行き変化を補正した結果を表している．

5.2 Multiperspective imaging による結果

次に，multiperspective imaging による画像生成の結果を示す．図 12 に，石像の実画像を用いた ray database の作成を示す．Camera path は直線とし，図に示す 3 フレームを含む 390 フレームを使用した．仮想カメラは一次元カメラを放物線上に配置して構成し，石像全体をカバーする位置に配置した．生成画像の画素列毎にシーンまでの距離が変化するため，画素列毎に適切なスケーリングが必要となる．しかし，スケーリングが出来れば，石像全体を示しつつ，放物線の頂点付近に対応する部分を強調した画像生成が可能となる．焦点距離は，$f_i = 285$,

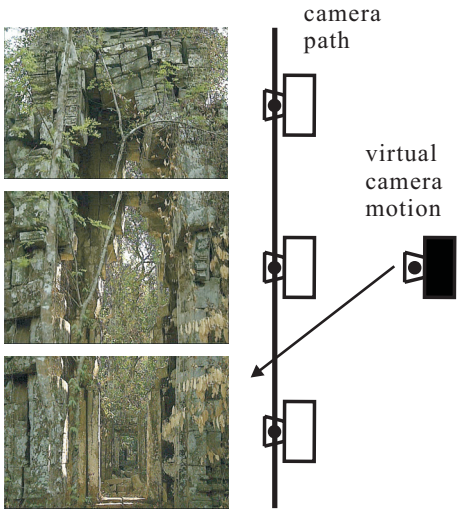

図 10: 実験に用いた遺跡の実画像．上に示す 3 フレームを含む 330 フレームを使用した．Camera path は直線である．仮想カメラは，図 3 に示す perspective imaging を模倣するものとし，正面からやや下に向かって等速で前進させた．

$f_k = 674$[pixel] である．

図 13 (a) に生成画像を示す．Perspective imaging による生成画像である図 13 (b) と比較して，像の肩の部分を中心に強調が行われている．このように，multiperspective imaging の使用により，perspective imaging とは異なった表現が可能となる．これは，ここで示した強調等の特殊効果に有効であると考えられる．

6 むすび

1 次元カメラを用いた仮想カメラのモデル化を提案し，任意の camera path に対するスケーリング係数を含む IBR アルゴリズムを示した．また，提案した仮想カメラのモデル化により，multiperspective imaging による画像生成が可能なことを述べた．実験を通じ，アルゴリズムの有効性を確認した．

今後の課題として，シーンの近似的な形状を表す geometric proxy の自動的な取得が挙げられる．IBR では画像入力に複数のカメラを用いることから，ステレオによるシーンの形状計測が有効と考えている [12]．

A 極座標系のスケーリング係数

式 (17)，(21) のカメラ座標 z_{ik},z_k は，次式によっても表現できる．

$$\begin{aligned} z_{ik} &= d_k\sqrt{1-\left\{\frac{R_i}{d_k}\sin\left(\xi_i-\phi_i'\right)\right\}^2} \\ &- R_i\cos\left(\xi_i-\phi_i'\right), \end{aligned} \tag{23}$$

(a) (b)

図 11: 図 10 の仮想カメラ運動に対する画像生成結果．(a) スケーリングを施さない場合．(b) 提案したスケーリング係数を用いた場合．スケーリングを施さない場合，仮想カメラの前進により広がるべき遺跡の門の幅に変化が生じていない．

$$\begin{aligned} z_k &= d_k\sqrt{1-\left\{\frac{R_k}{d_k}\sin\left(\beta_k-\phi_k\right)\right\}^2} \\ &- R_k\cos\left(\beta_k-\phi_k\right), \end{aligned} \tag{24}$$

ここで，

$$d_k = \sqrt{x_{gk}^2+z_{gk}^2}, \tag{25}$$

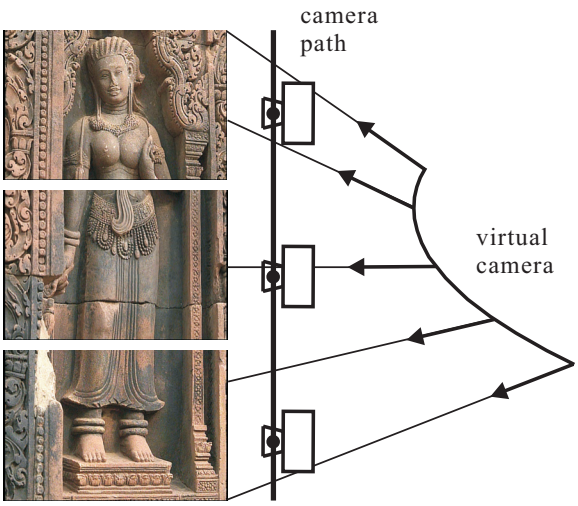

図 12: Multiperspective imaging のための仮想カメラ．放物線上に 1 次元カメラを配置している．石像全体をカバーしつつ，その上部の強調を行うカメラとなっている．1 次元カメラとシーンまでの距離が大きく変化するため，画像生成には適切なスケーリングが重要となる．

(a) (b)

図 13: Multiperspective imaging による画像生成結果．(a) 図 12 に示す仮想カメラによる生成画像．(b) Perspective imaging による生成画像．(b) と比較すると，(a) では石像全体を示しつつ，肩の部分を中心に強調が行われている．

$$R_i = \sqrt{t_{xi}^2 + t_{zi}^2},\ \ \tan\xi_i = t_{xi}/t_{zi}\,, \tag{26}$$

$$R_k = \sqrt{t_{xk}^2 + t_{zk}^2},\ \ \tan\beta_k = t_{xk}/t_{zk}\,. \tag{27}$$

この表現より，式 (16) のスケーリング係数が求められる．そのスケーリング係数は，カメラの回転を表すために極座標を用いる IBR [5, 7] において有用である．例えば，camera path が円の場合，式 (26) の R_i は円の半径を，ξ_i はカメラ C_i の回転角を表す．

以下に式 (23) の導出を示す．式 (17) は，次式のように表現できる．

$$\begin{aligned} z_{ik} &= d_k\left(\sin\alpha_k \sin\phi_i^{'} + \cos\alpha_k \cos\phi_i^{'}\right) \\ &\quad - R_i\left(\sin\xi_i \sin\phi_i^{'} + \cos\xi_i \cos\phi_i^{'}\right)\ , \\ &= d_k\sqrt{1-\sin\left(\alpha_k-\phi_i^{'}\right)^2} - R_i\cos\left(\xi_i-\phi_i^{'}\right). \end{aligned} \tag{28}$$

ここで，$\phi_i^{'}$,d_k,R_i は，式 (18),(25),(26) により与えられ，$\tan\alpha_k = x_{gk}/z_{gk}$ である．座標 (x_{gk}, z_{gk}) を通過するカメラ C_i の ray は，式 (11) より次式の view plane をもつ．

$$x_{gk}\cos\phi_i^{'} - z_{gk}\sin\phi_i^{'} = t_{xi}\cos\phi_i^{'} - t_{zi}\sin\phi_i^{'}\,. \tag{29}$$

上式より，次式を得る．

$$\sin\left(\alpha_k-\phi_i^{'}\right) = \frac{R_i}{d_k}\sin\left(\xi_i-\phi_i^{'}\right). \tag{30}$$

この式 (30) を式 (28) に代入し，式 (23) を得る．

カメラ座標 z_k についても同様に式 (21) を変形し，式 (24) を得ることができる．

参考文献

[1] E. H. Adelson and J. R. Bergen:“The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision,” Computational Models of Visual Processing, pp.3-20, 1991

[2] 藤井 俊彰，原島 博:“構造抽出に基づく三次元画像符号化,” PCSJ, pp.23-24, 1994

[3] M. Levoy and P. Hanrahan:“Light Field Rendering,” Proc. AMC SIGGRAPH, pp.31-42, 1996

[4] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski and M. F. Cohen:“The Lumigraph,” Proc. AMC SIGGRAPH, pp.43-54, 1996

[5] H. Y. Shum and L. W. He:“Rendering with Concentric Mosaics,” Proc. AMC SIGGRAPH, pp.299-306, 1999

[6] D. Weinshall, M. S. Lee, T. Brodsky and M. Trajkovic:“New View Generation with a Bi-centric Camera,” Proc. ECCV2002, pp.614-628, 2002

[7] H. B. Bakstein, T. Pajdla and D. Vecerka:“Rendering Almost Perspective Views from a Sparse Set of Omnidirectional Images,” Proc. BMVC, pp.241-250, 2003

[8] A. Zomet, D. Feldman, S. Peleg and D. Weinshall:“Mosaicing New Views: The Cross-Slits Projection,” IEEE Trans. PAMI, Vol.25, No.6, pp.741-753, 2003

[9] A. Isaksen, L. McMillan and S. J. Gortler:“Dynamically Reparameterized Light Fields,” Proc. AMC SIGGRAPH, pp.297-306, 2000

[10] D. N. Wood, A. Finkelstein, J. F. Hughes, C. E. Thayer and D. H. Salesin:“Multiperspective Panoramas for Cel Animation,” Proc. ACM SIGGRAPH, pp.243-250, 1997

[11] P. Rademacher and G. Bishop:“Multiple-Center-of-Projection Images,” Proc. ACM SIGGRAPH, pp.199-206, 1998

[12] 市村 直幸:“6 自由度カメラ運動の下での Multiperspective Imaging によるステレオ,” 情処研報, CVIM-144, pp.251-258, 2004