

Calibrated Computer Graphics による画像合成の試み ——カメラキャリブレーションに基づく任意フォーカス画像の 生成と検証

馬 場 雅 志[†] 浅 田 尚 紀[†] 天 野 晃[†]

CGで生成した画像とカメラで撮影した実写画像を合成する場合、実写画像と同程度のリアルなCG画像を生成する技術が必要となる。我々は、実写画像の撮影に用いたカメラをキャリブレーションして得られたカメラパラメータを用いて、リアリティの高いCG画像を生成する“Calibrated Computer Graphics”の研究を進めている。本研究では、実写画像では避けることができない有限の被写界深度、すなわちぼけ現象に注目して任意フォーカス画像の生成と実写画像との合成について検討した。論文では、まず逆投影ぼけモデルに基づいてぼけ画像を生成する方法について述べ、Zバッファ法を用いた任意フォーカス画像生成アルゴリズムを示す。次に、距離の異なる2本の糸が重なるシーンを対象に、実写画像と生成画像を比較した実験について述べる。両者の画像はほぼ一致し、ぼけ現象に関しては実写画像並みの画像を生成できることを確認した。最後に、実写画像と縞状の仮想物体を合成した画像を示し、フォーカス変化にともなって物体が徐々にぼけたり、しだいに明瞭に見えてくる現象がリアルに表現できることを示す。

Calibrated Computer Graphics: A New Approach to Image Synthesis Based on Camera Calibration

MASASHI BABA,[†] NAOKI ASADA[†] and AKIRA AMANO[†]

Camera calibration is an important issue not only for real image analysis but also for realistic image synthesis. This paper proposes a new scheme for image synthesis that we call “Calibrated Computer Graphics” and presents a method to produce defocused images based on a camera model and lens parameters obtained by calibrating a real camera. Using the reversed projection image blurring model, we have developed a multiple Z-buffer algorithm to generate images of arbitrary focus settings. Experimental verification demonstrated that the quality of reality of the generated images was as high as that of the real images. Finally, we have shown a series of multi-focus images that include virtual objects embedded in real images.

1. はじめに

マルチメディア通信や仮想現実 (Virtual Reality) では、臨場感のある画像を作成する技術が求められている。従来からコンピュータグラフィックス (CG) では、画像生成の3要素 (物体、光源、カメラ) を高精度にモデル化することによってリアリティの高い画像を生成する研究が行われてきた。しかし、光学現象を厳密にモデル化することには限界があるため、最近では実写画像を利用して写実性の高い画像を合成する方法 (Image-based Rendering) が注目されている^{1)~3)}。

実写画像とCG画像を合成して奥行き感のある自然な画像を作成するには、実カメラでは避けることのできない有限の被写界深度、すなわちぼけ現象を考慮した画像生成を行う必要がある。CGの分野では、Potmesilら⁴⁾の後処理によるぼけ生成法、Cook⁵⁾のレイトレーシングに基づくぼけ生成法、そしてKolbら⁶⁾のレンズ設計データに基づくぼけ生成法が提案されている。しかし、これらの方法はいずれもカメラモデルと実カメラのパラメータの対応 (キャリブレーション) を求めているため、実写画像との合成に適用することはできない。一方、コンピュータビジョン (CV) の分野では、2次元画像から3次元情報を復元する必要性から実カメラのモデル化とキャリブレーションについて多くの研究が行われている⁷⁾。しかし、カメラ

[†] 広島市立大学情報科学部知能情報システム工学科
Department of Intelligent Systems, Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University

キャリブレーションに基づくぼけ画像の生成については議論されていない。

我々は、実写画像と CG 画像を合成してリアリティの高い画像を作成するために、キャリブレーションに基づく CG, すなわち Calibrated Computer Graphics (CCG) の研究を進めている。本論文では、カメラキャリブレーションに基づいて任意のフォーカス設定の CG 画像を生成し、実写画像と合成する方法について述べる。カメラとぼけ現象のモデル化には、レンズによるぼけ現象を精密に記述することができる逆投影ぼけモデル⁸⁾を使用し、Z バッファ法を利用した任意フォーカス画像生成アルゴリズムを示す。そして、作成した CG 画像の品質を実写画像を基準として定量的に評価した結果について述べる。最後に、実写画像と仮想物体を合成したシーンを対象にぼけを忠実に表現した連続フォーカス画像の例を示す。

2. Calibrated Computer Graphics

複数枚の実写画像や実写画像と CG 画像を組み合わせて自然な合成画像を作成するには、合成する画像が幾何学および光学的に整合している必要がある。すなわち、カメラに対するシーンの幾何学的情報（位置や形状など）と光学的情報（明度や色など）がカメラパラメータの変化（レンズパラメータの変化や視点の移動）に対して連続的に変化しないと、現実感が著しく損なわれ視覚的に不自然な画像となってしまう。このことは、画像を組み合わせる合成画像を作成するには、撮影に使用したカメラをキャリブレーションし、そのカメラモデルとパラメータを用いて CG 画像の生成や画像の合成を行う必要があることを意味している。我々はこのような考え方に基いて、キャリブレーションに基づく画像生成 (CCG) の研究を行っている (図 1)。

CCG では、実写画像を撮影するカメラをキャリブレーションし、その結果得られたカメラパラメータを

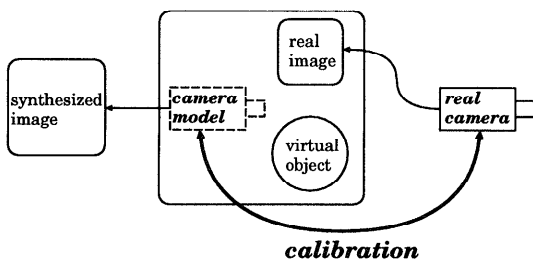


図 1 Calibrated Computer Graphics

Fig. 1 Schematic diagram of Calibrated Computer Graphics.

カメラモデルに適用して CG 画像を生成する。これによって、実写画像並みのリアルな CG 画像を生成することが可能となる。しかも、従来は目視による主観的で定性的な評価を行っていた CG 画像の品質を、実写画像を基準として客観的かつ定量的に評価することができ、カメラモデルおよび画像生成手法の妥当性を検証することが可能となる。

本論文では、フォーカス変化に関する CCG の具体的な手順とその応用例について述べる。

3. 任意フォーカス画像の作成

3.1 逆投影ぼけモデル

一般にカメラのぼけ画像の生成過程は、ぼけのない画像とぼけの点広がり関数の畳込み積分としてモデル化されている⁹⁾。しかし、このぼけモデルは移動に対して不変 (shift-invariant) な点広がり関数を仮定しているため、カメラからの距離が不連続に変化する遮へいエッジ (occluding edge) 付近ではぼけ現象を正確に記述することができない。そこで本研究では、実写画像のぼけを忠実に表現できる逆投影ぼけモデル⁸⁾を使用する。

カメラのレンズを焦点距離 f が固定の 1 枚の理想的な凸レンズと考えてカメラをモデル化する (図 2)。このカメラモデルは、レンズとレンズの光軸に垂直な画像平面で構成し、レンズから画像平面までの距離を調節するフォーカス機構が備わっているものとする。レンズから画像平面までの距離 (以下、フォーカス値と呼ぶ) が z ($\geq f$) のとき、レンズから合焦となる位置までの距離 (以下、合焦距離と呼ぶ) Z は次式で与えられる。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{z} \quad (1)$$

なお、位置関係を記述するために、レンズを挟んで物体側と画像平面側にレンズ中心 C を原点とする X - Y - Z 座標系および x - y - z 座標系を定める (図 2)。

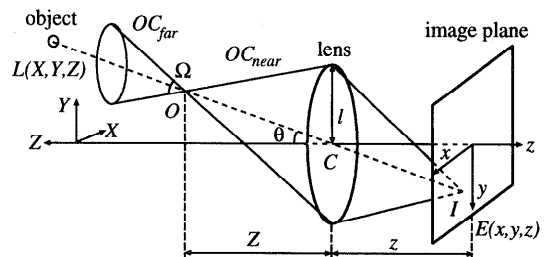


図 2 カメラモデルと逆投影ぼけモデル

Fig. 2 Camera model and the reversed projection image blurring model.

(x, y, z) を中心とする画像平面上の微小領域 I に結像する光束エネルギーは、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \frac{Z}{z} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

で表される (X, Y, Z) を中心とするシーン中の微小領域 O からレンズに入射する光束エネルギーに等しく、これはシーン中から O を通過してレンズに入射する光束エネルギーに等しい。シーン中から O を通過する光束円錐の立体角を Ω とし、この中に存在する点 (X, Y, Z) から O に入射する放射輝度を $L(X, Y, Z)$ とすると、立体角 Ω が十分小さい場合^{*}には、画像平面上の放射照度 $E(x, y, z)$ は以下のように表される。

$$E(x, y, z) = \frac{\pi l^2 \cos^4 \theta}{z^2} \int_{\Omega} \frac{L(X, Y, Z)}{\Omega} d\omega \quad (3)$$

ただし l はレンズの半径、 θ は O とレンズ中心を結ぶ線が光軸となす角度である。

この式は、シーン中の放射輝度分布 $L(X, Y, Z)$ とレンズ半径 l が与えられれば、任意のフォーカス位置 z で撮影したときの放射照度分布 $E(x, y, z)$ 、すなわち画像の明度分布が計算可能であることを示している。

3.2 Z バッファ法を用いた任意フォーカス画像生成アルゴリズム

式 (3) に基づいて画像を生成する手順は以下のようになる (図 2 参照)。

- (1) 生成する画像 (以下、最終生成画像と呼ぶ) の画素位置 (x, y) とフォーカス位置 z から合焦となる位置 O (以下、合焦位置と呼ぶ) を求める。
- (2) シーン中にレンズと点 O によって構成される光束円錐 OC_{near} と点 O に関して対称の光束円錐 OC_{far} を求める。
- (3) これらの光束円錐内および合焦位置に存在する物体がレンズに向かって放射する光束エネルギーの総和を求め、この値を最終生成画像の (x, y) の明度とする。

レンズの近くに存在する物体は遠くの物体からの光をさえぎることに注意すると、最終生成画像上の 1 点 (x, y) の明度は、

- OC_{near} 内に存在する物体の平均明度
- OC_{near} 内に物体が存在しない部分については合焦位置に存在する物体の明度
- OC_{near} 内にも合焦位置にも物体が存在しない部分については OC_{far} 内に存在する物体の平均

明度

の和として求めることができる。合焦位置に存在する物体については、ぼけを生じないのでピンホールカメラモデルを用いて明度を求めることができる。一方、 OC_{near} 内および OC_{far} 内に存在する物体の平均明度については、レンズから OC_{near} を見た OC_{near} 画像と、合焦位置 O から OC_{far} を見た OC_{far} 画像を作成することによって、それらの画像の平均明度として求めることができる。ただし、 OC_{near} 画像はレンズ位置に、 OC_{far} 画像は点 O に関してレンズと対称の位置に、それぞれ円形の投影面を設定し Z バッファ法を用いて画像を作成する (図 3)。

以上の考え方に基づいて構成した任意フォーカス画像の生成アルゴリズムを以下に示す。ただし、シーン中に存在する物体の属性 (形状、位置、表面輝度など) は CG モデルとして与えられており、計算に必要なカメラパラメータ (レンズ半径や画角など) はキャリブレーションによって得られているものとする。

Step 1: フォーカス値 z を与える。

Step 2: レンズの焦点距離 f とフォーカス値 z から合焦距離 Z を求める。

Step 3 (合焦物体画像の作成): ピンホールカメラモデルを用いて、Z バッファの値が合焦距離 Z に等しい物体の明度で構成した合焦物体画像を作成する。

Step 4: 最終生成画像の画素位置 (x, y) を与える。

Step 5: 画素位置 (x, y) とフォーカス値 z から合焦位置 (X, Y, Z) を求める。FLAG:=0 に初期化する。

Step 6: 合焦物体画像の画素 (X, Y) の明度が得られている場合は FLAG:=1 とする。

Step 7 (OC_{near} 画像の作成): OC_{near} 画像は、光束円錐 OC_{near} 内に含まれる物体を対象に、合焦位置 O を視点位置として Z バッファ法を用いて作成する (図 3(a))。ただし、通常の Z バッファ法の判定とは異なり、Z バッファの値が最大の物体 (レンズに最も近い物体) の明度で画像を構成する。なお、FLAG=1 の場合は、光束円錐 OC_{near} 内に物体が存在しない (背景) 画素に合焦位置画像の画素 (X, Y) の明度を与えた合成 OC 画像を作成し、Step 10 へ進む。

Step 8 (OC_{far} 画像の作成): OC_{far} 画像は、光束円錐 OC_{far} の中に含まれる物体を対象に、合焦位置 O を視点位置として通常の Z バッファ法を用いて作成する (図 3(b))。

Step 9 (OC_{near} 画像と OC_{far} 画像の合成):

^{*} 通常の撮影では、レンズの半径 l に対してレンズから物体までの距離 Z は十分大きいので、立体角 $\Omega = \frac{\pi l^2 \cos^2 \theta}{z^2}$ は十分小さい。

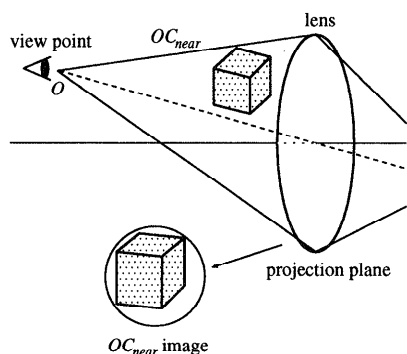
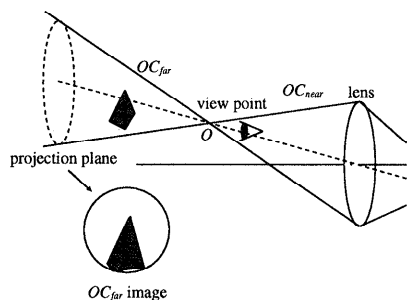
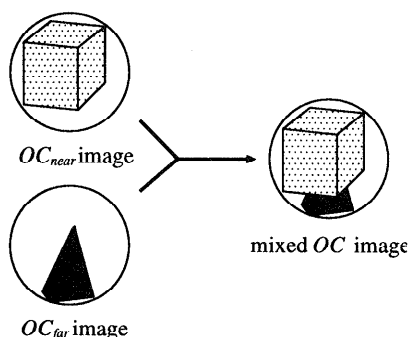
(a) OC_{near} 画像の作成(b) OC_{far} 画像の作成(c) 合成 OC 画像の作成

図3 Zバッファ法を用いた任意フォーカス画像の生成

Fig. 3 Defocused image generation using the Z-buffer algorithm.

OC_{near} 画像において、光束円錐 OC_{near} 内に物体が存在しない（背景）画素に OC_{far} 画像の対応する画素の明度を与えた合成 OC 画像を作成する（図3(c)）。

Step 10: 合成 OC 画像の平均明度を求め、最終生成画像の画素 (x, y) の明度とする。

Step 11: 最終生成画像の全画素の明度が求まれば終了する。それ以外は、新たな画素位置 (x, y) を与え、Step 5に戻る。

表1 ズームレンズの光学的特性

Table 1 Optical characteristics of a zoom lens.

zoom	9 mm - 144 mm
focus	0.9 m - ∞
iris	1.8 - close (9 mm - 116 mm)
	2.3 - close (144 mm)

4. 実験と評価

4.1 カメラキャリブレーション

実験には、RGB 3 板式 CCD ビデオカメラ (SONY XC-007) およびズームレンズ (FUJINON A16×9BRM-28) を使用した。このレンズの光学的特性を表1に示す。カメラからの出力は、画像処理装置 nexus 600 で A/D 変換し、RGB 成分が各 8 ビット、画像サイズが 512×480 のデジタル画像を得た。実験は室内で行い、照明は天井の蛍光灯を使用した。レンズのズーム目盛を 100 mm に固定してフォーカスに関するカメラキャリブレーション¹⁰⁾を行った。

4.1.1 フォーカス機構のモデル化

距離無限遠の時のフォーカス位置を基準として測ったフォーカスリングの回転角度 ϕ を用いて、画像平面の位置 z を表す。実験に使用したレンズでは、 $\phi = 0$ の時は $z = f$ であり、 ϕ に対して z の増加分 $(z - f)$ が線形に変化するように設計されているので、

$$z = f + \alpha \cdot \phi \quad (4)$$

とおくことができる。ただし α は比例定数を表す。物体からレンズ前面までの距離 Z は、式 (1) を用いて

$$Z = f + \frac{f^2}{\alpha \cdot \phi} + \gamma \quad (5)$$

と表すことができる。ただし γ は、カメラモデルのレンズ中心から実際のカメラレンズの前面までのオフセット距離（定数）を表す。

一方、フォーカスの変化にともなって像の大きさが変化するが、その拡大率 m は次式で与えられる。

$$m = \frac{z}{f} = \frac{f + \alpha \cdot \phi}{f} = 1 + \frac{\alpha}{f} \phi \quad (6)$$

4.1.2 カメラパラメータ

一辺の長さが 153 mm の正方形の頂点と辺の中点の合計 8 か所に直径 13 mm の黒点を配置した平面对象物をカメラから約 4.7 m の距離に置き、フォーカスを変化させて 11 枚の画像を撮影した。

8 個の黒点のそれぞれについて重心座標の変化を直線にあてはめた結果、レンズの光軸座標として (260, 258) を得た。さらに、フォーカスリングの回転角度 ϕ と黒点の位置変化の関係、および ϕ とレンズの距離目盛 Z との関係から、実験に使用したレンズは焦点距

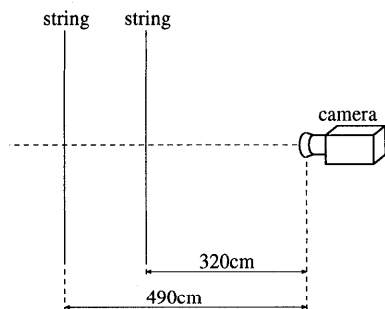


図4 レンズ光軸上に配置した2本の糸

Fig. 4 Two strings aligned on the optical axis of the lens.

離が 503.9 mm の単一凸レンズとしてモデル化でき、レンズ中心は実レンズの前面から 765.2 mm 後方に位置することが分かった[☆]。また、黒点のぼけ幅変化から求めたレンズの開口径は 38 mm であった。

4.2 連続フォーカス画像の撮影

近距離物体による遮へい効果とぼけ効果が最も特徴的に現れる物体配置として、鉛直に垂らした2本の糸がそれぞれレンズの光軸と交差するシーンを準備した(図4)。糸の太さは約1 mm で、レンズ前面から2本の糸までの距離はそれぞれ 320 cm と 490 cm に設定した。カメラは絞りを開放、ズームを 100 mm に固定し、フォーカスを段階的に変化させて30枚の画像を撮影した。合焦となる物体位置がレンズから 320 cm (近くの糸に合焦)、397 cm (2本の糸の中間に合焦)、490 cm (遠くの糸に合焦)のときの実写画像(光軸座標を中心とした 200×200 画素)を図5に示す。

この図は2本の糸がいずれも鮮明な合焦画像として得られることを示している。レンズ光軸上では遠くの糸からの光が近くの糸にさざぎられるにもかかわらず、このような合焦画像が得られるのは以下の理由による。すなわち、レンズが開口径を持っているために、近くの物体の遮へい面積が十分小さい場合には、レンズの周辺部を通過する光によって画像平面上には遠くの糸の像が結像するからである。

4.3 実写画像と生成画像の比較

カメラキャリブレーションに基づく任意フォーカス画像の生成手法を検証するために、実写画像と生成画像の比較を行った。糸は幅 1 mm の帯状の完全拡散面

としてモデル化し、表面輝度は実写画像の明度から決定した。そして2本の糸モデルを撮影時と同じ位置に配置し、キャリブレーションによって得られたモデルパラメータと逆投影ぼけモデルを用いて実写画像と同じフォーカス位置におけるCG画像30枚を生成した。

フォーカス変化に対する実写画像の水平線上の明度プロファイル変化を図6(a)に、生成画像のプロファイル変化を(b)に示す^{☆☆}。両者のぼけの変化はほぼ一致し、2本の糸が合焦となるフォーカス位置で明度のピークが得られている。

図7は、合焦距離をカメラから 265 cm (近くの糸より手前に合焦)、397 cm (2本の糸の中間に合焦)、490 cm (遠くの糸に合焦)に設定したときの実写画像および生成画像明度プロファイルの比較を示す。図7(b)では、近くの糸の遮へいによって遠くの糸のぼけ画像の明度がグラフの中央付近で低下している。このような微妙なぼけ変化も、本手法では忠実に再現できていることが分かる。図7に示した明度プロファイルの誤差の平均値は左から順に 1.4, 1.1, 1.8 であり、誤差の最大値は 7.1, 6.6, 21.5 であった。糸に合焦した画像(図7(c))では、明度プロファイルが鋭いピークを形成しているため誤差の最大値が大きくなっているが、フォーカスを変化させて作成した30枚の画像の平均誤差は糸の最大明度値 187 に対して1%以下の値であり、全体としてはよく一致した画像が得られている。

以上の結果から、カメラキャリブレーションに基づいて生成した任意フォーカス画像は、実写画像とほぼ同等のぼけ画像が得られることが分かった。

4.4 実写画像と仮想物体の合成例

本手法を用いて実写画像と仮想物体を合成した例を示す。まず、キャリブレーションしたカメラで撮影した動物の置物(図8(b))と花壇(図8(c))の2枚の実写画像を用意した。そして、動物のまわりに仮想的な檻(縦縞の一樣輝度の仮想物体)を置き、花壇を背景とするシーンを設定した(図8(a))。ただし、動物と花壇は合焦画像をテクスチャとする平面として与え、それぞれ撮影時の距離に配置した。

フォーカスを檻の手前から背景まで順に変化させたときの合成画像を図9に示す。フォーカス変化にともなって手前の檻が徐々にぼけ、動物や花壇がしだいに明瞭に見えてくる現象がリアルに表現できていることが分かる。

[☆] 複数のレンズで構成された実レンズを1枚の凸レンズでモデル化し、フォーカスに関するキャリブレーションを行ったため、実レンズのズーム値 100 mm とモデルパラメータの焦点距離 503.9 mm は大きく異なっている。しかし、後述するようにこれらの値を用いて作成した生成画像と実写画像はよく一致し、キャリブレーションによって求めたモデルパラメータが妥当な値であることを確認している。

^{☆☆} 実写画像と生成画像はいずれもカラー画像であるが、シーンは白い糸のみで構成されているので明度値の比較は8ビット(0から255)の濃淡画像として行った。

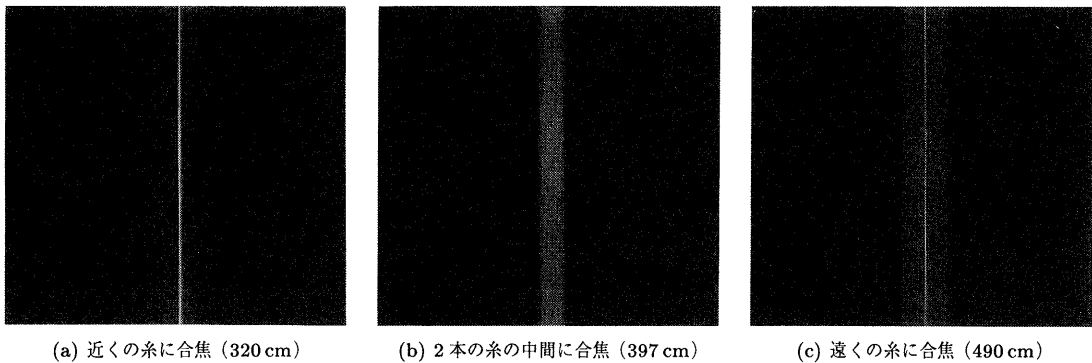


図5 実写画像 (レンズ光軸上の2本の糸の画像)

Fig. 5 Real images of two strings.

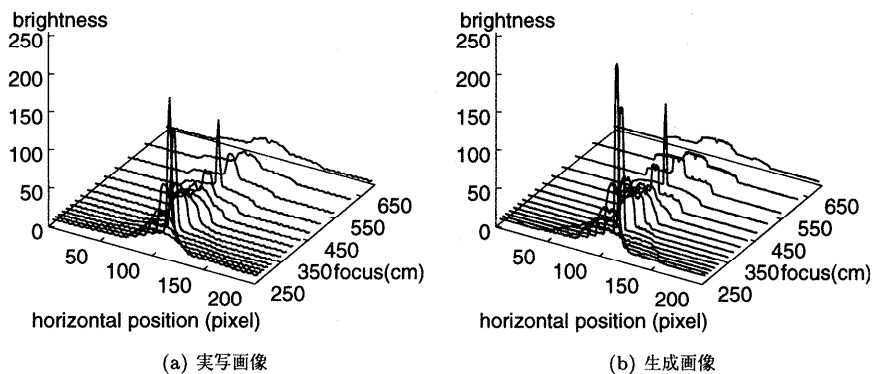


図6 フォーカス変化による画像水平線上の明度変化

Fig. 6 Brightness variation of the real and generated images by focusing.

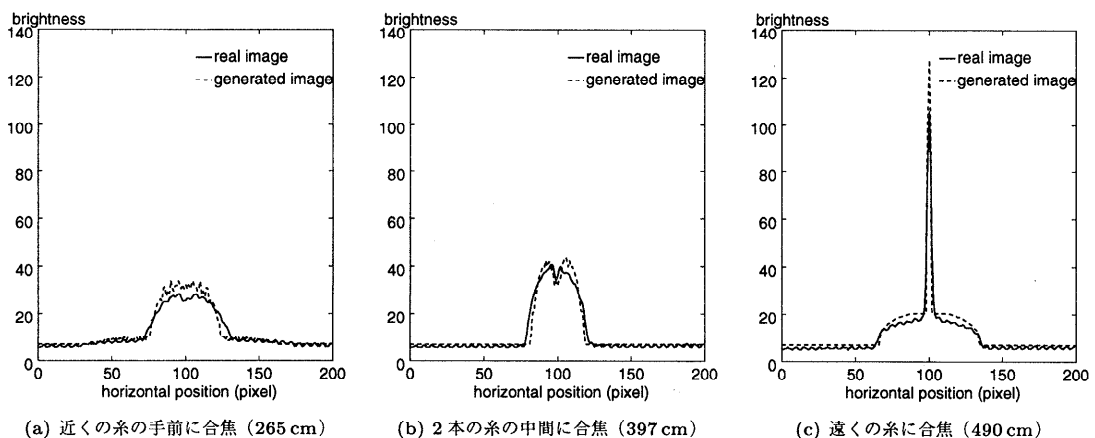


図7 実写画像と生成画像の明度プロファイルの比較

Fig. 7 Comparison of brightness profiles between the real and generated images.

なお、実写画像のサイズは 307×202 画素であり、檻は40個の仮想物体で構成した。また、 OC_{near} 画像と OC_{far} 画像は直径が80画素の円形画像として計算し、最終的に作成した合成画像のサイズは 200×200 画素

とした。このような条件で図9を作成したところSGI社のOCTANE (CPU R10000, 195 MHz, 128 MB)を用いて1枚あたり1分58秒を要した。

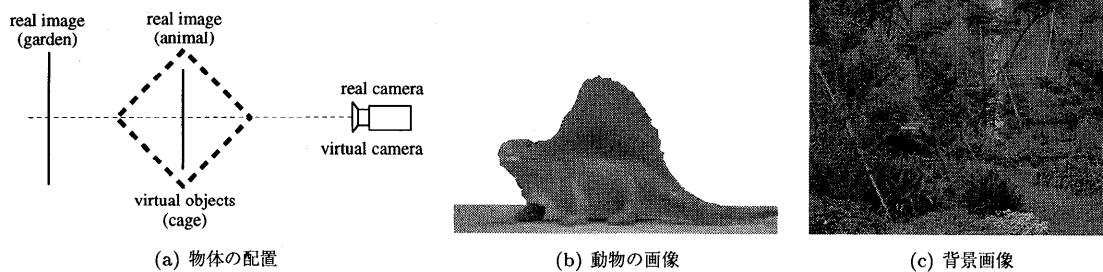


図8 シーン構成と使用した実写画像
Fig. 8 Scene configuration and real images.

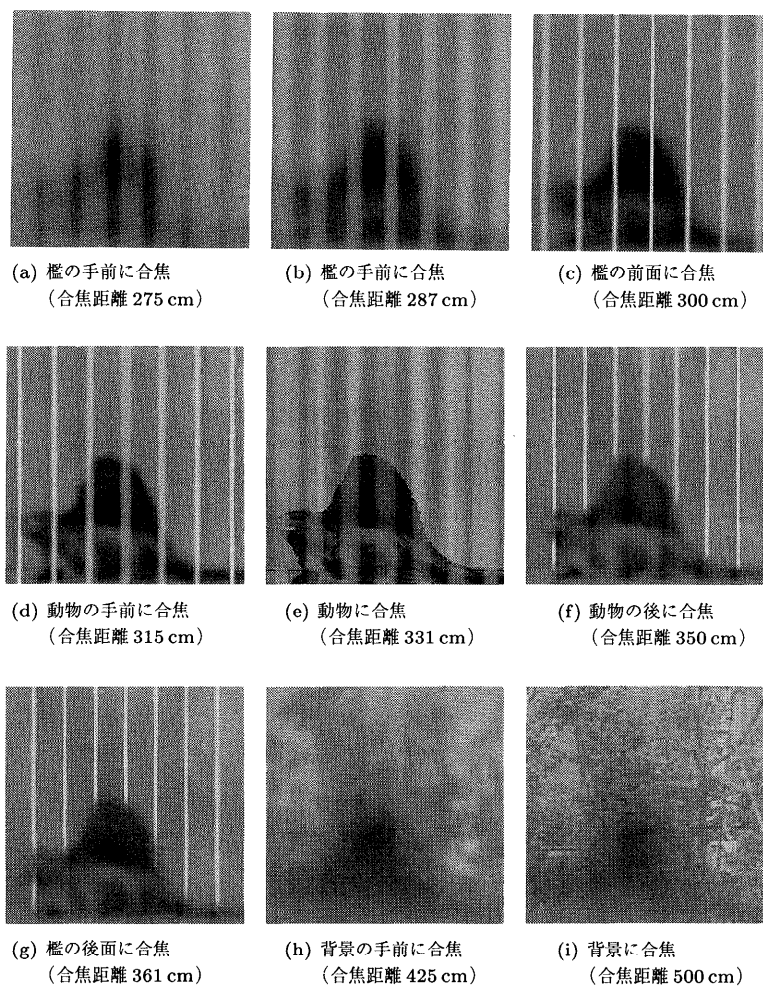


図9 実写画像と仮想物体の合成例
Fig. 9 Synthesized images with real images and virtual cage.

5. ま と め

本論文では、キャリブレーションして得られたカメラパラメータに基づいて任意のフォーカス画像を生成し、実カメラで撮影した画像と合成する方法について述べた。まず、任意フォーカス画像を生成するための逆投影ぼけモデルについて述べ、Zバッファ法を用いた画像生成アルゴリズムを示した。そして、キャリブレーションしたカメラで撮影した実写画像とカメラパラメータを用いて生成したCG画像を比較した結果、実写画像とはほぼ同等のぼけ画像が生成可能であることを確認した。最後に、実写画像と仮想物体を組み合わせたシーンを設定し、フォーカス変化に対して連続的にぼけが変化する合成画像の例を示した。以下では、本手法の特徴と問題点を整理し、今後の課題について述べる。

画像生成アルゴリズム：

本論文で提案したぼけ画像生成アルゴリズムは、実カメラで生じるぼけ現象を忠実に表現できるという特徴を持つ。しかし、最終生成画像の1画素の明度を計算するために複数枚の中間画像を生成する必要があり、その計算負荷は高いものとなっている。しかし、本アルゴリズムではZバッファ法を用いているため、従来のレイトレーシングに基づくぼけ画像生成法⁵⁾に比べて短時間で画像を生成することが可能となっている。今後は、Zバッファの内容の類似性に着目して画像生成の高速化を検討する予定である。

画像合成：

最後に示した画像合成例では、2枚の実写画像と多数の棒状仮想物体を組み合わせたシーンを構成し、連続的なぼけ変化を表現できることを示した。本手法では、実写画像をテクスチャとする平面をCGモデルとして与えているため、原理上は実写画像の枚数や与える仮想物体に制限はない。ただし、画像の合成段階ではぼけを生成しているため、実写画像そのものにはぼけが含まれていないことを前提としている点に注意する必要がある。

Calibrated Computer Graphics：

本論文では、フォーカス変化に関するCCGの実現を目的としたため、カメラの位置と方向、そしてフォーカス以外のレンズパラメータ（ズームや絞り）の変化は扱わなかった。今後は、ズーム、フォーカス、絞りの変化を統一的に記述する統合カメラモデル¹²⁾を構成し、レンズの中心位置や光軸方向の変化も含めたCCGを行う予定である。また、カメラキャリブレーションに加えて物体キャ

リブレーションや光源キャリブレーション¹¹⁾を含めた総合的なCCGについても検討を行う予定である。

謝辞 貴重な意見をいただいた査読者の方々に謝意を表す。本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究(C)(08680410)および広島市立大学特定研究費(9706)の援助を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) Chen, S.E.: QuickTime VR - An image-based approach to virtual environment navigation, *Proc. SIGGRAPH '95*, pp.29-38 (1995).
- 2) McMillan, L. and Bishop, G.: Plenoptic modeling: An image-based rendering system, *Proc. SIGGRAPH '95*, pp.39-46 (1995).
- 3) Debevec, P.E., Taylor, C.J. and Malik, J.: Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach, *Proc. SIGGRAPH '96*, pp.11-20 (1996).
- 4) Potmesil, M. and Chakravaty, I.: A lens and aperture camera model for synthetic image generation, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '81)*, Vol.15, No.3, pp.297-305 (1981).
- 5) Cook, R.L.: Distributed ray tracing, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '84)*, Vol.18, No.3, pp.137-145 (1984).
- 6) Kolb, C., Mitchell, D. and Hanrahan, P.: A realistic camera model for computer graphics, *Proc. SIGGRAPH '95*, pp.317-324 (1995).
- 7) 出口光一郎：カメラキャリブレーション手法の最近の動向，情報処理学会研究会報告，93-CV-82-1，pp.1-8 (1993).
- 8) 浅田尚紀，藤原久永，松山隆司：逆投影ぼけモデルを用いた遮へいエッジの光学的性質の解析，電子情報通信学会論文誌(D-II)，Vol.J78-D-II，No.2，pp.248-262 (1995).
- 9) Horn (著)，NTTヒューマンインターフェース研究所 (訳)：ロボットビジョン，朝倉書店(1993).
- 10) 浅田尚紀，松山隆司：多重フォーカスカラー画像の解析，画像の認識・理解シンポジウム(MIRU'92)，pp.II45-II52 (1992).
- 11) 佐藤いまり，佐藤洋一，池内克史：光学的整合性を考慮した実画像への仮想物体の重ね込み，知能情報メディアシンポジウム，pp.23-32 (1997).
- 12) 迫田 肇，浅田尚紀：ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデル，電子情報通信学会総合大会論文集，D-12-172，p.371 (1998).

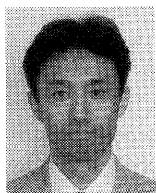
(平成 9 年 9 月 24 日受付)

(平成 10 年 4 月 3 日採録)

**馬場 雅志（正会員）**

1990年広島大学工学部第二類（電気系）卒業。1992年同大学院修士課程修了。同年トヨタ自動車（株）入社。1995年より広島市立大学助手。コンピュータグラフィクス，コ

ンピュータビジョンの研究に従事。

**浅田 尚紀（正会員）**

1979年京都大学工学部電気工学科卒業。同大学院博士課程，福井医科大学助手，京都大学工学部助手，岡山大学工学部助教授を経て1995年

から広島市立大学情報科学部教授，現在に至る。1989年シカゴ大学客員研究員。工学博士。コンピュータビジョン，コンピュータグラフィクス，人工知能，医用画像理解の研究に従事。1993年情報処理学会論文賞。IEEE CS，ACM，電子情報通信学会，人工知能学会，医用画像工学会各会員。

**天野 晃（正会員）**

1988年京都大学工学部電気工学科卒業。1990年同大学院修士課程修了。1993年同博士課程単位取得退学。同年同大学工学部助手。1995年より広島市立大学助教授。工学博

士。コンピュータビジョン，人工知能の研究に従事。電子情報通信学会会員。