

チルトシフトレンズの被写界深度効果の CGによる再現

中根 智絵¹ 馬場 雅志² 日浦 慎作² 浅田 尚紀²

概要: 近年、チルトシフトレンズ付きカメラを使用して撮影することにより、実際の風景をミニチュア風に撮影する技術が注目されている。本研究では、チルトシフトレンズの働きをモデル化し、分散レイトレーシングのプログラムに実装した。提案手法を用いることで、合焦位置以外の物体をぼかすミニチュア風画像を作成したり、ほとんどの物体に焦点を合わせたパンフォーカス画像を作成したりすることが可能となった。

キーワード: ぼけ, 被写界深度, チルトシフトレンズ

Simulating Depth of Field Effects Taken by a Camera with a Tilt-Shift Lens

TOMOE NAKANE¹ MASASHI BABA² SHINSAKU HIURA² NAOKI ASADA²

Abstract: Recently, the technique to take pictures like a miniature scene by using a camera with a tilt-shift lens is getting much attention. We have modeled the function of a tilt-shift lens and implemented it in a program of distributed ray tracing. By using this approach, it is possible to create miniature-like images in which only one plane of the image is in focus, and pan-focals images in which most objects are in focus.

Keywords: blur, depth of field, tilt-shift lens

1. はじめに

CGでのカメラモデルにおいて最も簡単なモデルは、ピンホールレンズを用いたカメラモデルである。このカメラモデルは、すべてのオブジェクトに合焦している世界を表現することができるが、実世界を見たままに再現することはできない。CGが実写へ近づくためには、実際のレンズを基にしたカメラモデルを用いる必要がある。初期のCGが実写とかけ離れている要因として、被写界深度効果、つまりぼけの欠如が考えられる。Potmesilらは、ピンホールカメラモデルで画像を作成し、後処理でぼけを加える手法

を提案しており、これは実際のレンズの持つ被写界深度効果をシミュレーションしている [1]。この手法は単一視点しか持たないためオクルージョンを考慮できないが、Cookは1画素に対して複数の光線を追跡することによりぼけを作る分散レイトレーシング法を提案している [2]。Kolbらは、レンズの設計データに基づいてズームレンズをモデル化し、分散レイトレーシングによってぼけを生成する手法を提案している [3]。

このように、CG上でレンズの効果を再現する研究が行われている中で、まだ再現が行われていないチルトシフトレンズというレンズに注目する。様々なアオリ撮影を可能とするこのレンズは、写真家の本城直季がミニチュア風の写真を撮影したことで広く知られている [4]。チルトシフトレンズは、レンズを傾けることによって被写界深度をコントロールすることができるレンズである。今までのCG

¹ 広島市立大学 情報科学部 知能工学科
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University
² 広島市立大学大学院 情報科学研究科 知能工学専攻
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

上のカメラモデルでは、ぼけの大きさや範囲を変えたいとき、被写界深度を変える必要があったが、チルトシフトレンズを用いれば、被写界深度を変えることなく実現できる。

本研究は、チルトシフトレンズの被写界深度効果をCG上で再現することを目的とする。以下、2章で実際のレンズによってぼけができる仕組みと被写界深度、チルトシフトレンズの仕組みと効果について述べる。3章で、CG上でぼけを作る仕組みと、チルトシフトレンズの被写界深度効果をCG上で再現するための手法を述べ、4章でシミュレーション結果について考察を行う。

2. 実世界のレンズ

写真を何かの目的のために効果的、または魅力的に見せるために、意図的にぼけを作り出す表現のことを、ぼけ表現という。目的に応じてぼけを使いこなすことでより良い写真を撮ることができる。一眼レフカメラは様々なレンズを用いることでぼけをコントロールして撮影することができる。これに対して、今日ではコンパクトデジタルカメラや携帯電話についているカメラも高性能になっており、綺麗な写真を撮影することができるが、思い通りのぼけを作り出すことは難しい。

2.1 ぼけの仕組み

レンズは、光軸に垂直な平面上の物体を、画像面にできるだけシャープに結像するようにできている [5]。従って、ある被写体に合焦させた時、被写体を通る光軸に垂直な平面が合焦面となり、合焦面上のものは合焦して結像する。そして、合焦面の前後にあるものはぼけて結像するはずである。合焦面上にない被写体が全てぼけてしまうと、画面の大部分がぼけてしまうように考えられが、人間の目はぼけがある程度小さければ、それをぼけとして認めないようになっている。ぼけは円状にできるので、ぼけとして認められない範囲のぼけのことを許容錯乱円という。許容錯乱円内にぼけを収める画像面側の余裕間隔を焦点深度という。画像面側の焦点深度の分、合焦面側にもこれに対応する奥行きがある。これを被写界深度といい、被写界深度内の被写体はぼけにならずに結像する。図1に、レンズにおける被写界深度と焦点深度を示す。被写界深度が深い時、ぼけない奥行きが広がるので、ぼけは小さくなる。被写界深度が浅い時、ぼけない奥行きが狭くなるので、ぼけは大きくなる。

2.2 被写界深度

被写界深度が深くなるか、浅くなるかを決めているのは焦点深度である。焦点深度は、F値と許容錯乱円の直径によって決まる。F値は写真レンズの明るさを表す数値であり、レンズの有効口径 D と焦点距離 f (レンズに平行に入ってきた光線が集まる光軸上の一点からレンズの中心までの

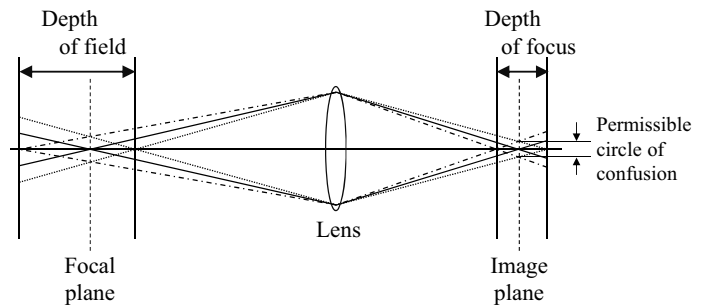


図1 被写界深度と焦点深度

Fig. 1 Depth of field and Depth of focus.

距離) を用いて表される。

$$F_{NO.} = \frac{f}{D} \quad (1)$$

許容錯乱円の直径を ϵ とすると、焦点深度 δ は以下の式で表される。

$$\delta = \pm F_{NO.} \times \epsilon \quad (2)$$

上記の式 (1), (2) より、レンズを絞り込みレンズの口径 D を小さくし、F 値を大きくすると、焦点深度が深くなるのがわかる。被写界深度は焦点深度に対応するので、焦点深度が深くなると、被写界深度も深くなる。従って、レンズの絞りによって被写界深度が変化するということである。

また、被写界深度を深くしたり浅くしたり変化させるのは、絞りだけでなく、レンズの焦点距離、被写体との距離 (倍率) の大小によっても変化する。一般的に、レンズを絞り込むほど、焦点距離が短いほど、被写体との距離が遠いほど、撮影倍率が小さいほど、被写界深度は深くなる。

2.3 チルトシフトレンズ

チルトシフトレンズはカメラレンズの一種であり、レンズを撮像面に対して平行に移動したり、傾けたりすることが可能なレンズである。このレンズを用いることによって、通常のレンズでは出すことのできない効果を出し、様々な撮影が可能となる。

撮像面に対してレンズを傾けることを、チルトという (図2)。通常のレンズでは、合焦面は撮像面に対して平行である。チルトを行うことによってレンズを傾けると、合焦面も撮像面に対して傾く。チルトを行った時のレンズの傾きと合焦面の傾きはシャインフランクの法則 (図3) によって決定される。この法則は、レンズ主面と撮像面と合焦する物面の3つの面が同一線上で交わるという法則である。チルトを利用し、被写界深度を変えることなく、被写体が被写界深度内に入るように合焦面を傾けることで、被写体全体に合焦させて撮影することが可能となる (図4)。

被写体全体に合焦するようにレンズと合焦面を傾けることをチルトというのに対して、合焦する被写体が減るようにレンズを傾けることを逆チルトという (図5)。逆チル

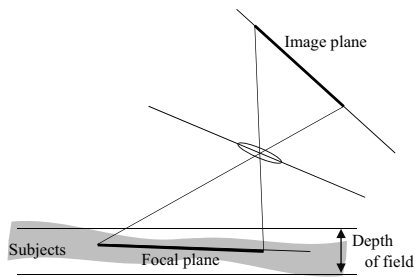


図 2 チルト
Fig. 2 Tilt.

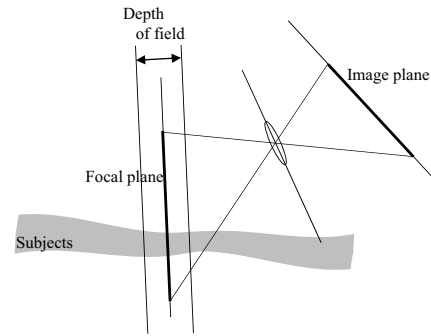


図 5 逆チルト
Fig. 5 Reverse tilt.

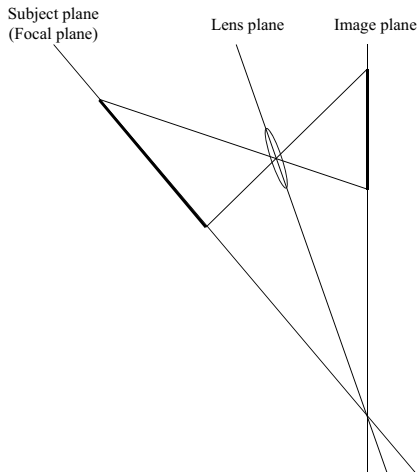
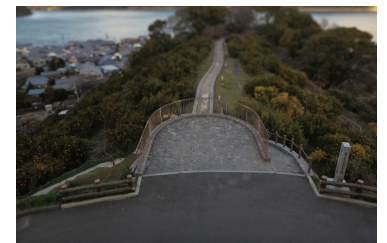


図 3 シャインフルークの法則
Fig. 3 Scheimpflug principle.



(a) (b)

図 6 ミニチュア風写真
Fig. 6 Pictures like a miniature scene.



(a) (b)
図 4 (a)チルト効果なし (b)チルト効果あり
Fig. 4 (a)Before tilt. (b)After tilt.

トを利用すると、現実の風景をまるでミニチュア模型を撮影したかのように撮影することができる(図6)。普通、ミニチュア模型を撮影する時は被写体に近づいて撮影するので、被写体との距離は近い。従って、被写界深度が浅くなり、ぼけの大きい写真になる。風景を撮影する時は被写体との距離が遠いので、被写界深度が深くなり、ぼけは小さくなる。逆チルトを用い、風景を撮影しているのにも関わらずぼけの大きな写真を撮影すると、実際の風景がミニチュアのように見えるという表現ができる。

3. CGによるレンズのシミュレーション

CGでは、実際のレンズよりも自由にぼけをコントロールすることが可能である。実際のレンズをシミュレーションしレンズの効果を確認することも、実際ではありえないぼけを作り出すこともできる。

CGでレンズの効果をシミュレーションするには、レイトレーシング法が用いられる。レイトレーシング法は、CGの描画方法の一つであり、仮想的な光線を視線からシーンの中のオブジェクトまで追跡する計算手法である[6]。まず、投影中心である視点とウィンドウを任意のビュー平面上で選択する。ウィンドウは規則的なグリッドに分かれており、グリッド要素は希望する解像度のピクセルに対応する。次に、ウィンドウのピクセルごとに視点からの光線(レイ)を、投影中心からピクセル中心を通してシーンの中に向けて飛ばす。ピクセルの色は、飛ばしたレイがオブジェクトと交わる最も近い点におけるオブジェクトの色である。レイトレーシングでは、シャドウ、屈折、反射も計算することができる。

3.1 分散レイトレーシング

単にレイトレーシング法でレンダリングするだけでは、ピンホールカメラで撮影するのと同じこととなり、ぼけの

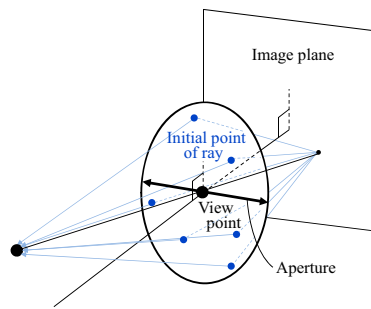


図 7 CG 上でのレンズ
Fig. 7 Lens on CG.

ない画像が生成される。レイはオブジェクトと交差するまで進み続けてオブジェクトの色を返すので、同一色のオブジェクトは距離に関わらず同一色になる。

ぼけを作り出すためには、分散レイトレーシング法を用いる。分散レイトレーシング法を用いれば、被写界深度の効果を生むことができる。他にも、モーションブラー、拡張光源、粗いサーフェイスからの鏡面反射などの効果も表現できる技法である。この技法における「分散」とは、レイを確率的に分散して、これらの効果を生み出す量をサンプリングするということを指している。

3.1.1 スーパーサンプリング

それぞれのピクセル値を決定する最も簡単な方法は、それぞれのピクセルごとに1つのサンプリング点を選択し、この1点を通るレイ1本を飛ばしてサンプリングする、ポイントサンプリングという方法である。しかし、1本のレイによってピクセル値を決定すると、情報量の少なさから重要な特徴を失ってしまう危険性がある。このような問題を解消するために、スーパーサンプリングという手法を用いる。この手法では、サンプル数を増やし、いくつかの近接したサンプルを、平均をとるなどして結合してピクセル値を決定する。つまり、1ピクセルに対して複数本のレイを飛ばすことで、情報を増やすということである。この手法は、計算量を増加させるが、簡単で良い結果をもたらすことができる。

3.1.2 サンプリング点の決定

単純にサンプル数を増やせば増やすほど、情報の信頼性も増し重要な特徴を失う危険性も減るように思えるが、サンプル数を増やすことは計算量の増加につながってしまう。そこで、サンプリング点の位置を規則的なものから、ある小さなランダム距離だけ変異させたものにして、サンプル数を増やし過ぎることなく、より良い結果を得る。これはジッタリングという技法で、レイの始点をずらすことによってサンプリング点をずらし、分散レイトレーシングを行っている。レイの始点が、視点を中心に撮像面に平行な面上で、指定した半径内でずらされる。このばらついたレイの始点の集まりをCG上でのレンズとして考えること

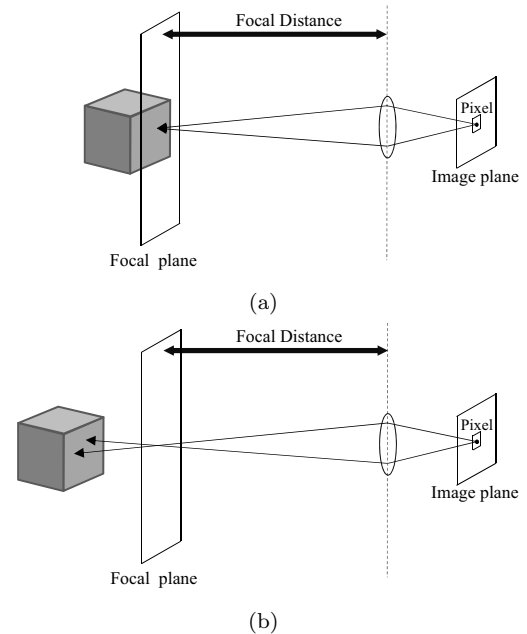


図 8 (a) 合焦面上にあるオブジェクトと交差した場合
(b) 合焦面上にないオブジェクトと交差した場合

Fig. 8 (a) Rays intersect an object that is on focal plane.
(b) Rays intersect an object that is not on focal plane.

ができる (図 7)。

3.1.3 被写界深度効果

分散レイトレーシング法を用いてぼけを作るためには、視点から合焦面までの距離が必要である。これを合焦距離という。1つのピクセルに対応する複数のレイは、合焦距離をもとに、合焦面上の一点に集まるように方向を決められる。

図 8 (a) のように、合焦面上にあるオブジェクトとレイが交差した場合は、複数のレイがオブジェクト上の同じ一点に集まる。従って、そのピクセル値はその集まったオブジェクト上の1点の値になる。図 8 (b) のように、合焦面上にないオブジェクトとレイが交差した場合は、複数のレイが同じ一点に集まることはなく、それぞれ違う点と交差する。従って、そのピクセル値はそれぞれの交点の平均をとった値になる。レイが交差した点が合焦面から遠ければ遠いほど、複数のレイはそれぞれ距離が離れた点と交差するようになる。交点が遠いと、異なる値との平均をとるので、画像にぼけができる。

実際のレンズでは、絞り、焦点距離、被写体との距離 (倍率) が被写界深度の深さを決定していた。CG 上では、レンズの口径の大きさが被写界深度の深さを決定する。レンズの口径が大きいということは、レイの始点のばらつきが大きくなるということである。それによって、合焦面から遠いオブジェクトは複数のレイがより離れた点の平均をとってピクセル値にするので、ぼけが大きくなる。つまり、CG 上での被写界深度は、レンズの口径が大きいほど浅くなり、小さいほど深くなる。

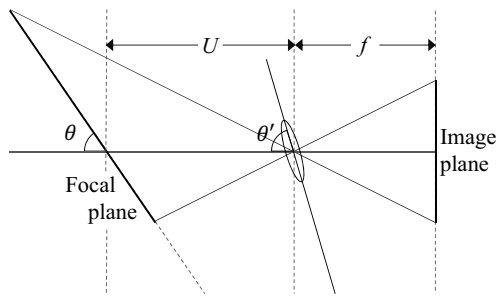


図 9 合焦点の傾き θ とレンズの傾き θ'

Fig. 9 The slope of focal plane θ and the slope of lens θ' .

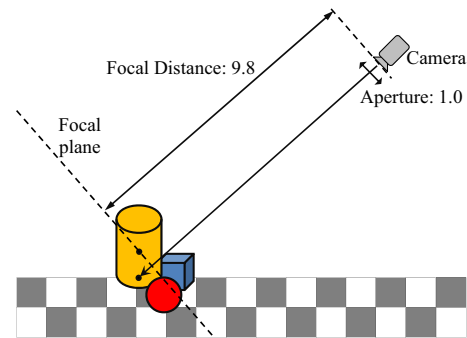


図 10 単純なシーン

Fig. 10 Simple scene.

3.2 チルトシフトレンズによる被写界深度効果のシミュレーション

CG 上でのレンズは、前節で述べたように、ある一定の範囲内でずらされた複数のレイの始点の集まりである。撮像面に平行であり、視点から合焦距離のところに合焦点が存在する。レンズ、合焦点を変更することによって、チルトシフトレンズの被写界深度効果のシミュレーションを行う。

実際のカメラに使用されるチルトシフトレンズは、撮像面に対してレンズを傾けることによって合焦点を傾ける。そこで、光軸と合焦点とのなす角を θ とし、これを指定することとする (図 9)。レンズの中心から光軸上の合焦点までの距離を合焦距離 U 、視点から光軸上の撮像面まで距離、つまりレンズの焦点距離を f とする。シャインフルークの法則より、レンズ平面、合焦点、撮像面が同一線上で交わるので、式 (3) からレンズの傾き θ' を求める。

$$\theta' = \tan^{-1} \left\{ \frac{(U + f) \times \tan \theta}{f} \right\} \quad (3)$$

4. シミュレーション結果と考察

チルトシフトレンズのチルト効果を、オープンソースの 3D レンダラである POV-Ray のソースコードを拡張することによって CG 上で再現し、どのような被写界深度効果が得られるかシミュレーションを行った。POV-Ray は Persistence of Vision Raytracer の略であり、レイトレーシングソフトウェアである。

4.1 単純なシーン

単純なシーンとして、図 10 のシーンを用いて、シミュレーションを行う。生成画像が図 11 であり、これはぼけが全くない状態である。図 11 に通常のレンズによりぼけを加えたものが図 12 である。図 12 の被写界深度を基本とし、このときのレンズの口径を 1 とした。

4.1.1 チルト

床と合焦点が平行になるように合焦点の傾き θ を設定し、レンズの傾き θ' を式 (3) より求めた。

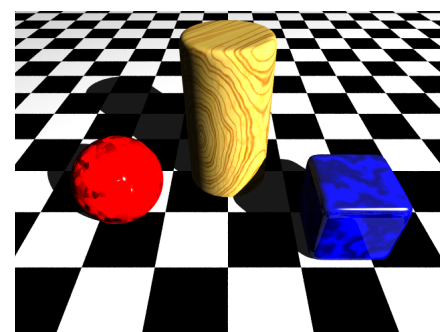


図 11 単純なシーンの生成画像

Fig. 11 Rendered image of simple scene.

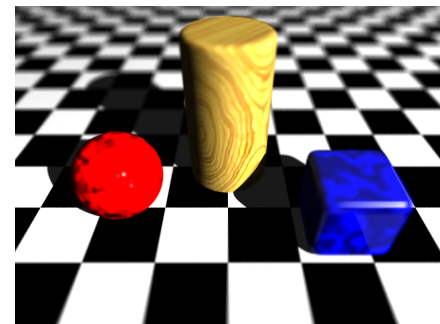


図 12 単純なシーンにぼけを加えた画像

Fig. 12 Blurred image of simple scene.

$$\begin{cases} \theta = 41.2^\circ \\ \theta' = 7.62^\circ \end{cases}$$

これによって、チルト効果を与えることができる。生成した画像が図 13 である。レンズの口径は 1 であり、被写界深度は図 12 と同じである。

4.1.2 逆チルト

床と合焦点が垂直になるように合焦点の傾き θ を設定し、レンズの傾き θ' を式 (3) より求めた。

$$\begin{cases} \theta = -48.8^\circ \\ \theta' = -5.09^\circ \end{cases}$$

これによって、逆チルト効果を与えることができる。生成した画像が図 14 である。レンズの口径は 1 であり、被写界深度は図 12 と同じである。

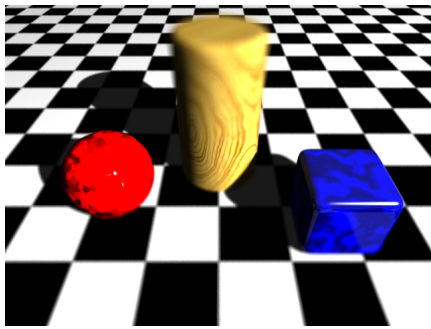


図 13 単純なシーンにチルト効果を加えた画像
Fig. 13 Tilt effect to simple scene.

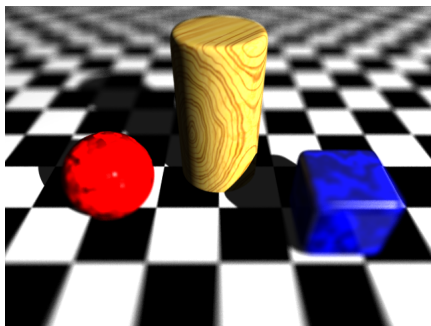


図 14 単純なシーンに逆チルト効果を与えた画像
Fig. 14 Reverse tilt effect to simple scene.

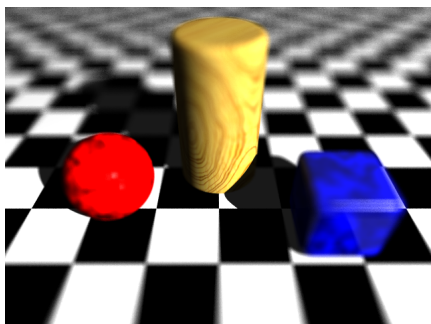


図 15 図 12 の口径を 2 倍にした画像
Fig. 15 Having twice aperture of Fig.12.

合焦点を傾けずに、レンズの口径を大きくすることで、ぼけを大きくすることもできる。ぼけを大きくするよう合焦点を傾けたとき、レンズの口径を大きくしたときのぼけの違いを比較するための画像を生成した。生成した画像が図 15 である。レンズの口径は 2 であり、図 12 のときの 2 倍の大きさに設定した。

4.1.3 単純なシーンにおける考察

図 13 について、チルト効果の考察を行う。合焦点を床と平行で、床に近い位置になるよう設定したことで、床のぼけは図 12 より小さくなっている。赤い球体と青いキューブは被写界深度内に入っている部分が多いので、図 12 よりも合焦している部分が多い。円柱は、下部が被写界深度内に入っており、上部が入っていないので、下部は合焦していて、上部はぼけている。図 4 のようなチルト効果を出

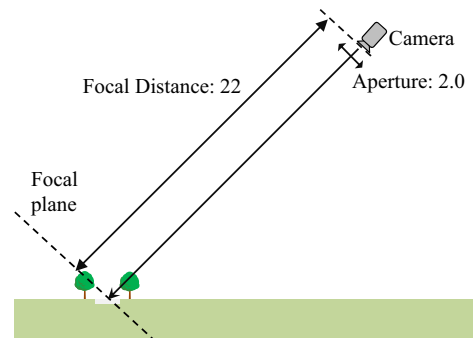


図 16 風景風のシーン
Fig. 16 Landscape scene.

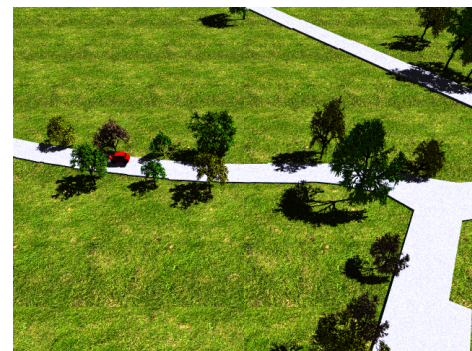


図 17 風景風のシーンの生成画像
Fig. 17 Rendered image of landscape scene.

したいとき、このように床と平行になるよう合焦点を傾ければよいことがわかる。

次に図 14 について、逆チルト効果の考察を行う。合焦点を床と垂直にし、被写界深度内に入る床の面積を小さくしたことで、床のぼけは図 12 より大きくなっている。赤い球体と青いキューブも、被写界深度内に入る部分が減っているため、図 12 より若干ぼけが大きくなっている。円柱は全体のほとんどが被写界深度内に入っているため、全体に合焦している。図 12 と比べ、円柱の上部にぼけがなくなっていることが確認できる。レンズの口径を大きくした図 15 と比較することで、ぼけの大きさの変わり方によるぼけの違いを考察する。遠くの方と手前の床のぼけの度合いはよく似ている。明らかに違うのは、図 14 は円柱全体に合焦しているのに対し、図 15 は円柱の上部がぼけている点である。図 6 のようにミニチュア風の効果を出すためにぼけを大きくするには、床と垂直になるよう合焦点を傾ければよいことがわかる。

4.2 風景風のシーン

前節のシーンより複雑な、図 16 の風景風のシーンを用いてシミュレーションを行う。生成画像が図 17 である。これはぼけが全くない状態である。図 17 に通常のレンズによりぼけを加えた画像が図 18 である。図 18 の被写界深度を基本とし、このときのレンズの大きさを 2 とした。

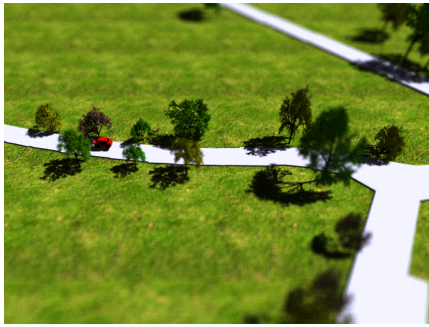


図 18 風景風のシーンにぼけを加えた画像
Fig. 18 Blurred image of landscape scene.

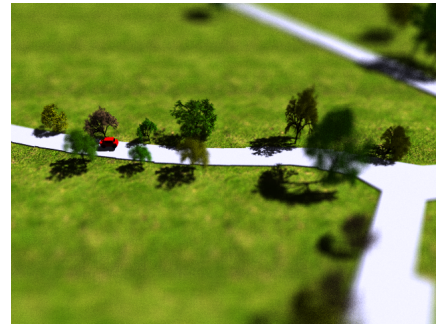


図 20 図 18 の口径を 2 倍にした画像
Fig. 20 Having twice aperture of Fig.18.

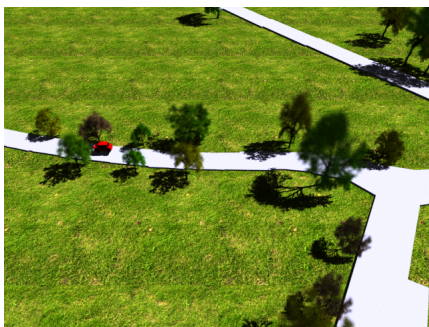


図 19 風景風シーンのパンフォーカス画像
Fig. 19 Pan-focus image of landscape scene.

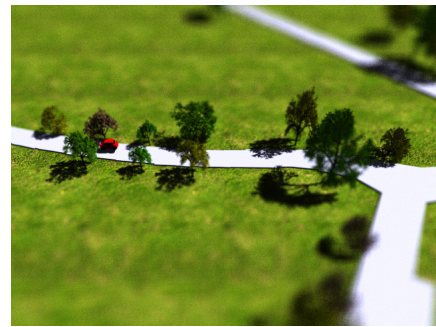


図 21 風景風シーンに逆チルト効果を加えた画像
Fig. 21 Reverse tilt effect to landscape scene.

4.2.1 パンフォーカス画像の生成

パンフォーカスとは、近距離から遠距離まで合焦させる手法である。合焦部分が大きくなるよう合焦面を傾けることで、パンフォーカス画像の生成を試みた。合焦面が、地面と平行になるよう合焦面の傾き θ を設定し、レンズの傾き θ' は、式 (3) より求めた。

$$\begin{cases} \theta = 45.0^\circ \\ \theta' = 2.58^\circ \end{cases}$$

生成した画像が、図 19 である。レンズの口径は 2 であり、被写界深度は図 18 と同じである。

4.2.2 ミニチュア風画像の生成

風景を撮影しているのに関わらずぼけが大きいとき、ミニチュア模型を撮影したかのように見せることができる。2 章で述べた。合焦する部分を小さくしてぼけを大きくすることで、ミニチュア風画像の生成を試みた。

ぼけを大きくする方法が 2 つある。まずレンズの口径を大きくする方法である。レンズの口径を図 18 の 2 倍である 4 にすることで、被写界深度を浅くする。生成した画像が図 20 である。

次は、合焦面を傾け、被写界深度内に入るオブジェクトを減らすことによってぼけを大きくする方法である。つまり、逆チルトを行った。合焦面が、地面と垂直になるよう合焦面の傾き θ を設定し、レンズの傾き θ' は、式 (3) より求めた。

$$\begin{cases} \theta = -45.0^\circ \\ \theta' = -2.58^\circ \end{cases}$$

生成した画像が図 21 である。レンズの口径は 2 であり、被写界深度は図 18 と同じである。

4.2.3 風景風シーンにおける考察

地面と平行になるよう合焦面を傾けると、地面に近いオブジェクトは被写界深度内に入り、合焦する。背の高い木は、上部が被写界深度内に入っていないものもある。図 19 の生成画像を見てみると、地面全体と地面に近い部分は合焦しており、背の高い木の上部はぼけている部分もある。完全なパンフォーカス画像はできなかったが、チルトを利用しそれに近い画像を得ることができた。

合焦面は傾けずに被写界深度を浅くすると、合焦するオブジェクトが減り、ぼけが大きくなる。図 20 の生成画像を見ると、口径を大きくする前の図 17 よりぼけが大きくなっている。地面と垂直になるよう合焦面を傾けると、被写界深度内に入るオブジェクトが減り、こちらもぼけが大きくなる。中央の道上に地面と垂直に合焦面があるので、道とその両脇の木にはぼけがない、あるいは小さくなる。図 21 の生成画像を見ると、合焦面のある道と両脇の木に合焦しており、合焦面から遠い所はぼけが大きくなっている。

2 つの方法でぼけを大きくし、ミニチュア風の画像を生成しようと試みた。2 つの生成画像は、同じような程度でぼけを大きくできた点では同じだが、合焦している部分が違っている。一番わかりやすいのは、中央の道の手前側に

ある木の部分である。レンズの口径を大きくした方は、木の特に上部の方がぼけているが、合焦面を傾けた方は、木の上部も合焦面に近く被写界深度内に入っているため、合焦している。

実際のレンズでは口径を任意に大きくすることは不可能である。口径を大きくする方法は、現実にはありえない効果を作り出せるCGの特徴を示している。一方、合焦面を傾ける方法は、実際のチルトシフトレンズを忠実にCGで再現したものとなっている。

5. おわりに

本論文では、3D レンダラである POV-Ray のソースコードを拡張し、チルトシフトレンズの被写界深度効果をCGによって再現した。レンズと合焦面の傾いていない普通の状態でのぼけと、多くのオブジェクトが被写界深度内に入るよう合焦面を傾けた場合のぼけ、被写界深度内に入るオブジェクトが少なくなるよう合焦面を傾けた場合のぼけを比較した。合焦面を傾けた場合と、レンズの口径を変えた場合でのぼけの違いも比較した。更に、より複雑な風景風のシーンに、実際のチルトシフトレンズで得られる被写界深度効果を与えてシミュレーションを行った。これらの結果から、チルトシフトレンズのチルトの仕組みを再現し、多くのオブジェクトが被写界深度内に入るように合焦面を傾けたり、被写界深度内に入るオブジェクトを減らすように合焦面を傾けたりすることができた。これによって、被写界深度を変更することなく、ぼけの大きさや範囲を変えることができた。

今後の課題として、現在は撮像面に対して光軸を上下に動かすチルト方向にしか合焦面とレンズを傾けられないので、光軸を左右に動かすスイング方向にも傾けられるようにすること、シフトの効果を再現すること、チルトとシフトを合わせた効果を再現することなどが挙げられる。

参考文献

- [1] M. Potmesil and I. Cakravaty: "A lens and aperture camera model for synthetic image generation," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'81)*, Vol.15, No.3, pp.297-305, 1981.
- [2] R.L. Cook: "Distributed ray tracing," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'84)*, Vol.18, No.3, pp.137-145, 1984.
- [3] C. Kolb, D. Mitchell, and P. Hanrahan: "A realistic camera model for computer graphics," *Proc. SIGGRAPH'95*, pp.317-324, 1995.
- [4] 本城直季: "本城直季写真集 small planet," リトルモア, 2006.
- [5] 小倉敏布: "写真レンズの基礎と発展," 朝日ソノラマ, 1995.
- [6] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, John F. Hughes: "コンピュータグラフィックス 理論と実践," オーム社, 2001.