

チルトレンズのカメラキャリブレーションとCGによる再現

馬場 雅志¹ 中根 智絵¹ 日浦 慎作¹

概要: 近年、ミニチュア風の写真を撮影できるチルトシフトレンズが注目を集めている。通常のレンズで撮影した画像にフィルタ処理を施すことによっても同様なミニチュア風画像を作成することは可能であるが、実シーンと仮想物体の合成といった応用を考えた場合には、チルトレンズの高精度なカメラキャリブレーションが必要となる。本研究では、ぼけと幾何特徴を利用したカメラキャリブレーション手法を拡張し、撮影した平面ターゲットの画像から、チルトレンズのレンズの傾き角を推定する。レンズの傾きを考慮した分散レイトラッキング法を用いることにより、有限な距離で合焦しない点が画面内に含まれる場合にも適切に画像生成が行える。撮影画像を使用した実験では、実写と同等のCG画像を生成できることを示し、本手法の有効性を確認した。

キーワード: チルトレンズ, カメラキャリブレーション, 被写界深度効果, 分散レイトラッキング

Camera Calibration and Rendering of Real Tilted Lens

MASASHI BABA¹ TOMOE NAKANE¹ SHINSAKU HIURA¹

Abstract: In recent years, photographs and videos of actual scenery look like the miniature diorama have been gaining attention. This method of photography involves the use of cameras equipped with a tilt-shift lens. In this study, we proposed the method to estimate the camera parameters of real tilted lenses. After estimating the camera parameters based on the camera calibration method using geometry and blur of feature points, we estimated a tilt angle of a real lens. Also, we proposed a rendering algorithm considering the lens tilt using the distributed ray tracing method. By using our rendering algorithm, we generated images with arbitrary focal plane including the case of infinite focal distance. At the experiments, by comparing generated images with real images, we demonstrated the ability of our proposed methods.

Keywords: tilt lens, camera calibration, depth of field, distributed ray tracing

1. はじめに

近年、ミニチュア風の写真を撮影できるチルトシフトレンズが注目を集めている [1]。同様なミニチュア風画像を作成することは、通常のレンズで撮影した画像にフィルタ処理を施すことによっても可能であるが、実シーンと仮想物体との合成を考えた場合には、チルトレンズの高精度なカメラキャリブレーションが必要となる。

本研究では、チルトレンズのキャリブレーションの方法として、ぼけと幾何特徴を利用したカメラキャリブレーション

手法 [2] を拡張し、撮影した平面ターゲットの画像から、チルトレンズのレンズの傾き角を推定する手法を提案する。次に、チルトレンズのシミュレーション画像を作成する手法として、レンズの傾きを考慮した分散レイトラッキング法 [3] を提案する。チルトレンズ特有の現象として、画像中の一部にどこにも合焦しない点が含まれることがある。提案手法では、このような場合においても適切に画像の生成が行える。撮影画像を使用した実験では、実写画像と生成画像を比較することでチルト効果のレンダリング精度の検証を行う。

¹ 広島市立大学大学院 情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

2. 従来研究

レンズによる有限の被写界深度効果(ぼけ)を表現するために, Potmesilら [4]は, ピンホールカメラモデルで画像を生成し, 後処理でぼけを加える手法を提案した. この手法は, 実際のレンズを持つ被写界深度効果をシミュレーションしているが, 単一視点しか持たないためオクルージョンを考慮することができない. 実際のレンズでは, レンズの開口径のため, ぼけている部分では手前の遮蔽物のため観察できない後ろ側も観測されることになる. Cook[3]は, 1画素に対して複数の光線を追跡することでぼけを生成する分散レイトラシング法を提案した. この手法は, 反射や屈折を計算できる上, レンズによる焦点ぼけやモーションブラーを正確に表現することができる. Haerberliら [5]は, レンズ面上の複数の視点から画像を生成しアキュムレーションバッファを用いて画像を合成することでぼけを生成する手法を提案した(図1(a)参照). Kolbら [6]は, レンズ的设计データに基づいてズームレンズをモデル化し, 分散レイトラシング法によりぼけを生成する手法を提案した. この手法では, カメラキャリブレーションを行わないため, 実際に撮影した画像とCG物体との合成などには適

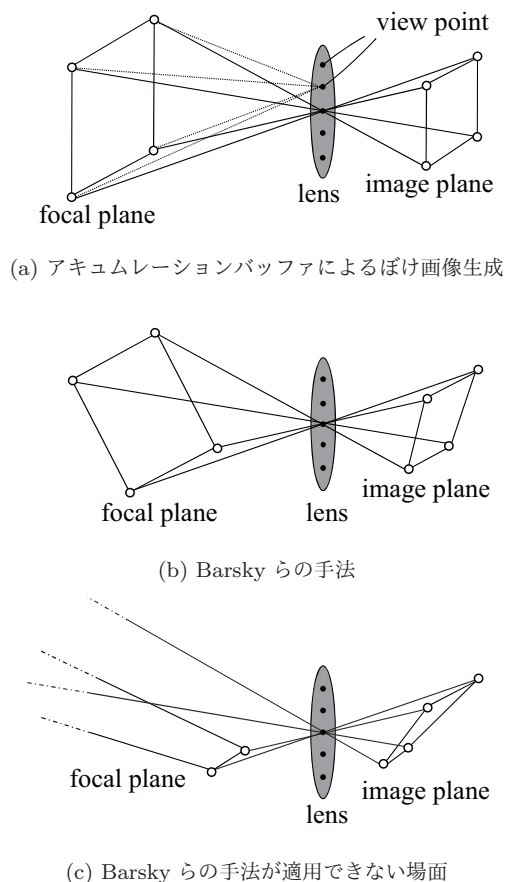


図 1 従来手法

Fig. 1 Previous method.

用できない.

このように, CG上でぼけを再現する研究が数多く行われているが, チルトレンズを対象としたものではなく, 対象とするレンズは通常のレンズである. しかし, チルトシフトレンズに注目した研究もいくつかある. チルトシフトレンズによるぼけを持つ画像の知覚的效果について Heldらが研究を行っている [7]. また, Barskyら [8]は OpenGLのアキュムレーションバッファを用いてチルトシフトレンズの効果を持つ画像を生成する手法を提案している(図1(b)参照). しかし, この手法では Haerberliらのアキュムレーションバッファを用いてぼけ画像を生成する手法を基にしているため, 有限の距離で合焦しない画素を含む画像の生成を行うことができない. 図1(a)に示すように, アキュムレーションバッファでは, カメラの画角と合焦距離から合焦面上の4点を決定し, その4点とレンズ面上の視点位置からなる四角錐を求める必要がある. そのため, 図1(c)のように有限の合焦距離を持たないような場合には適用できない. また, チルトシフトレンズを用いて撮影した実写画像とチルトシフトレンズの効果を用いて生成したCG画像との比較は行われていない.

3. 実レンズのチルト効果のCG再現

3.1 レンズ面の傾き

通常の凸レンズモデルでは, 撮像面, レンズ主面, 合焦面はすべて平行である. それに対して, チルトレンズのようにレンズが傾くときは, 撮像面, レンズ主面, 合焦面が一直線上に交わる. これをシャインフルークの法則といい, この法則より, レンズの傾き角 θ_L は図2に示す焦点距離

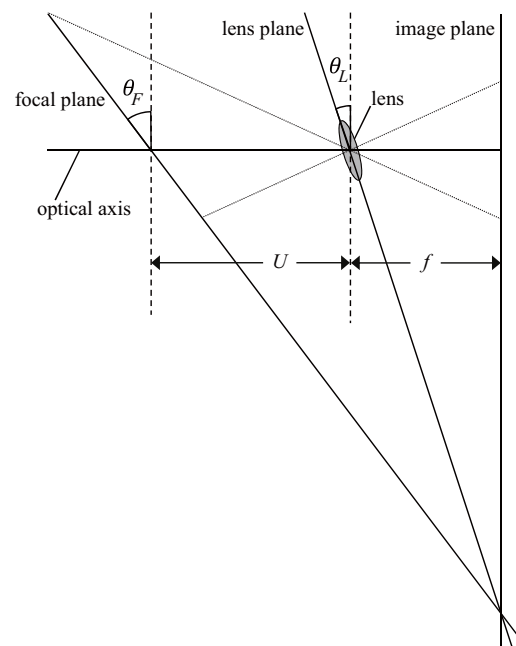


図 2 チルトレンズのカメラモデル

Fig. 2 Camera model for tilt lens.

f , レンズ中心から合焦点までの距離 U , 合焦点の傾き角 θ_F を用いて式 (1) より求めることができる.

$$\theta_L = \tan^{-1} \left\{ \frac{f \tan \theta_F}{U + f} \right\} \quad (1)$$

3.2 チルトレンズのカメラキャリブレーション

CG 上で実写画像と同様のぼけを再現するためには, ぼけの度合いと位置を決定するレンズの有効開口径と傾き角が必要となる. また, レンズの焦点距離などの内部パラメータとカメラの位置姿勢を表す外部パラメータも求めなければならない. これらのパラメータの値を 1 回のキャリブレーションで全て求めることは困難なので, レンズの傾きなしの画像とレンズの傾きありの画像を対象とした 2 回のキャリブレーションによって求める. まず, レンズを傾けていない状態で撮影した実写画像に対して, ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラキャリブレーション [2] を行い, 図 3 の有効焦点距離 w , 合焦点距離 U , 有効開口径 d を求める. これらのパラメータを用いて, レンズを傾けて撮影した実写画像に対しキャリブレーションを行う. 実際の画像から得られるぼけ幅と計算によって得られるぼけ幅との差が最小となるよう最適化を行うことでレンズの傾き角 θ_L を取得する.

3.2.1 統合カメラキャリブレーション

まず, 傾き角以外のレンズパラメータを取得するため, レンズが傾いていない撮影画像を使用する. 使用するキャリブレーションターゲットを図 4 に示す. キャリブレーションに必要なぼけ幅は, ターゲットの格子の辺から算出し, 特徴点の座標は辺と辺の交点から検出する. 図 3 中の w はレンズ中心 O から撮像面までの距離である有効焦点距離, c はレンズ前面 R からレンズ中心 O までのレンズの移動距離を表す. ただし, この手法では, c をカメラの平行移動の要素と考え推定は行わない. 非合焦点位置にあるオブジェクトのぼけ幅 b は式 (2) で表される.

$$b = wd \left| \frac{1}{U} - \frac{1}{z} \right| \quad (2)$$

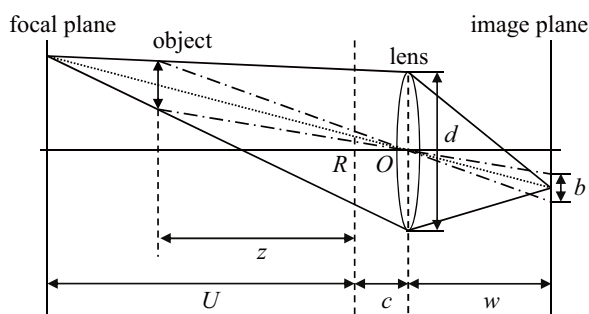


図 3 統合カメラモデル

Fig. 3 Unified camera model.

撮影画像から 5 点以上の特徴点のデータセット (ぼけ幅 b , 画像座標 (X, Y) , 世界座標 (X_w, Y_w, Z_w)) を算出し, 式 (3) に与え, E が最小となるよう非線形最適化を行う. ぼけ幅 b と画像座標 (X, Y) に関して, データセットの値とパラメータによって算出される値との差が最小となるパラメータが, このときの外部パラメータ (3×3 の回転行列 R , 3次元の並進ベクトル T) と内部パラメータ (合焦点距離 U , 有効焦点距離 w , 有効開口径 d) となる.

$$E = \sum_{i=1}^n \left\{ \left(b_i - wd \left| \frac{1}{U} - \frac{1}{z} \right| \right)^2 + \left(X_i - w \frac{x}{z} \right)^2 + \left(Y_i - w \frac{y}{z} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$x = r_1 X_{wi} + r_2 Y_{wi} + r_3 Z_{wi} + T_x$$

$$y = r_4 X_{wi} + r_5 Y_{wi} + r_6 Z_{wi} + T_y$$

$$z = r_7 X_{wi} + r_8 Y_{wi} + r_9 Z_{wi} + T_z$$

3.2.2 レンズの傾き角の取得

前項で求めたパラメータを用いて, レンズを傾けて撮影した画像に対してキャリブレーションを行い, レンズの傾き角を取得する. このとき, 撮影画像は, レンズの回転を行わないものとし, レンズの傾き角以外のパラメータはすべて前項のキャリブレーションで用いた撮影画像と同じ値と同じキャリブレーションターゲット (図 4) を撮影する. 前項と同様に撮影画像から特徴点のデータセットを算

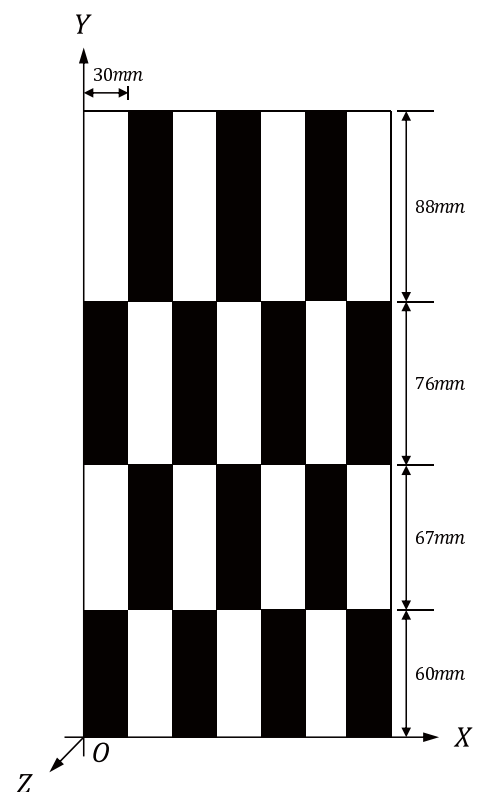


図 4 キャリブレーションターゲット

Fig. 4 Calibration target.

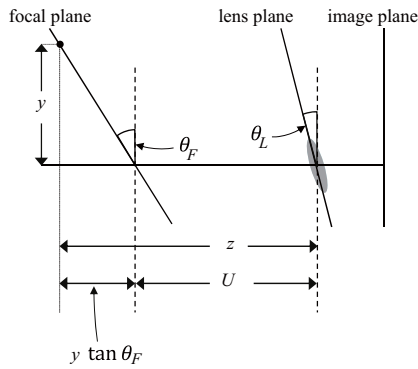


図 5 合焦位置

Fig. 5 Distance of the focal point.

出し、前項で求めた内部パラメータと共に式 (4) に与え、 E_L が最小となるよう最適化を行い $\tan \theta_F$ を求める。

$$E_L = \sum_{i=1}^n \left(b_i - wd \left| \frac{1}{U + y \tan \theta_F} - \frac{1}{z} \right| \right)^2 \quad (4)$$

式 (4) はぼけ幅に関してのみデータセットの値とパラメータによって算出される値との差が最小となることを考える。式 (3) に対し、式 (4) はぼけ幅をパラメータによって算出するとき合焦面の傾き角による影響を考慮している。レンズの傾きがない場合、撮像面と合焦面が平行なので合焦距離 U は一定の値となる。特徴点が合焦面上にあるとき、 $z = U$ となるのでぼけ幅は 0 となる。一方、レンズの傾きがある場合は図 5 に示すように合焦距離は一定ではなく、 $U + y \tan \theta_F$ と表される。式 (1) にキャリブレーションによって求めた有効焦点距離 w 、合焦距離 U 、 $\tan \theta_F$ を代入しレンズの傾き角 θ_L を取得する。

3.3 レンダリング

本研究では、オープンソースの 3D レンダラ POV-Ray のソースコードを拡張することで、分散レイトレーシング法を用いてチルト効果の再現を行った。拡張したのは、設定したい合焦面の傾き角からレンズの傾き角を算出する部分と追跡するレイの方向を決定する部分である。

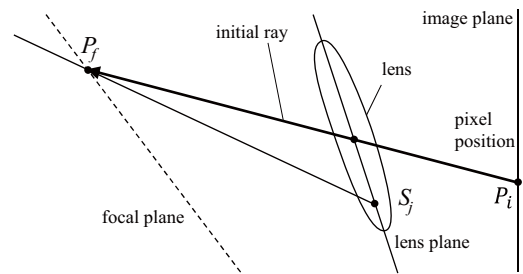
分散レイトレーシングにおける各レイの計算手順を以下に示す (図 6 参照)。

- (1) 画素位置 P_i を設定
- (2) レンズ中心を通る初期レイと合焦面の交点 P_f を計算
- (3) レンズの傾き角を考慮し、レイの始点 S_j を設定
- (4) P_f と S_j を用いてレイの方向を計算

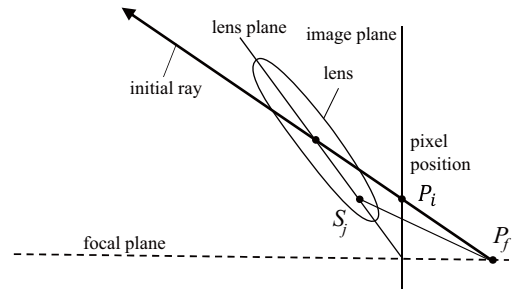
ここで、レイの方向の計算は、撮像面と合焦面の関係によって 2 種類に分けられる。合焦面と撮像面とのなす角が小さいとき P_f はレンズ前方に存在するため、レイの方向 R_d は式 (5) より求める (図 6(a) 参照)。

$$R_d = P_f - S_j \quad (5)$$

撮像面と合焦面とのなす角が大きくなると P_f はレンズ後



(a) P_f がレンズ前方



(b) P_f がレンズ後方

図 6 レイの計算方法

Fig. 6 Calculation process of tracing ray.

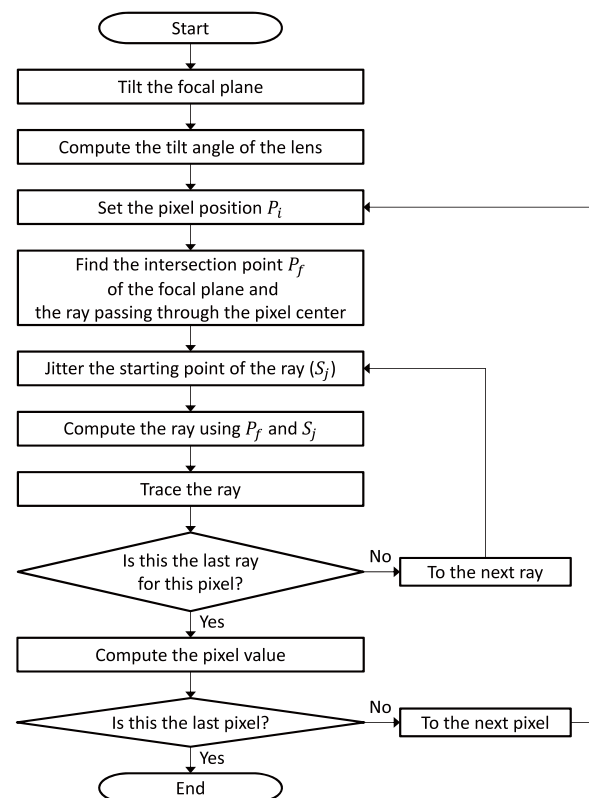


図 7 提案手法のフローチャート

Fig. 7 Flow chart of proposed rendering algorithm.

方に存在する場合があります、このときレイの方向 R_d は式 (6) より求める (図 6(b) 参照)。

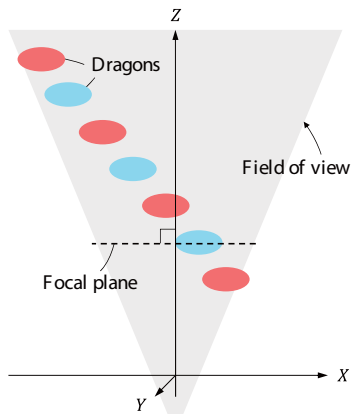
$$R_d = S_j - P_f \quad (6)$$

提案手法の処理の流れを図 7 に示す。

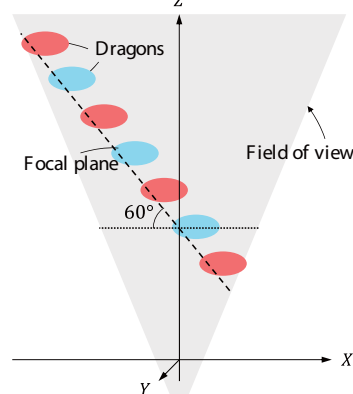
4. 実験

4.1 任意の面に合焦する画像の生成

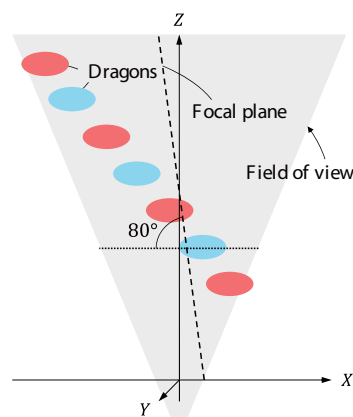
図8に示すように合焦面を設定したシーンをレンダリングした結果画像を図9に示す. 図8(a)は合焦面の傾きがないため, 図9(a)は通常のレンズを用いてレンダリングした結果となる. 中央の青いドラゴンのみ合焦していること



(a) 合焦面の傾きなし



(b) 合焦面の傾きあり (1)

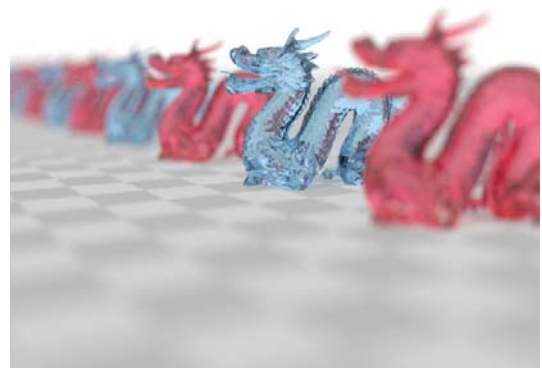


(c) 合焦面の傾きあり (2)

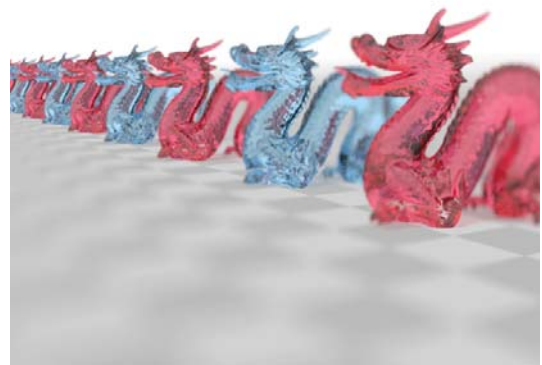
図8 合焦面の設定

Fig. 8 Focal plane settings for image generation.

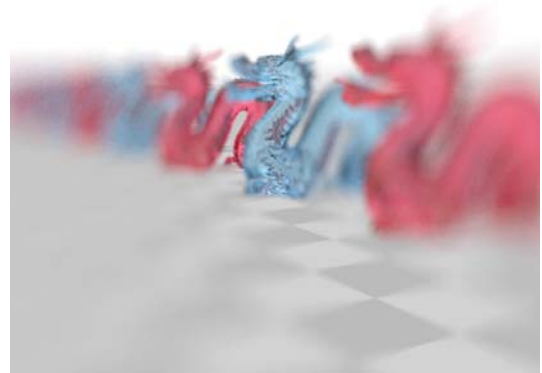
がわかる. このように合焦面の傾きがない場合, 合焦面の位置を変えることで合焦するドラゴンを変更することはできるが, 被写界深度を変えることなくすべてのドラゴンに合焦させることはできない. 図8(b)は, チルト効果を用いてすべてのドラゴンの頭部に重なるよう合焦面を傾けている. そのため, 図9(b)では, すべてのドラゴンの頭部に合焦している. このとき, レンズの口径は変更していないので, 被写界深度は変わっていない. 図8(c)は, 撮像面に対して合焦面を極端に傾け, 有限の合焦距離を持たない画素が存在するようなシーンを再現している. カメラの画角内の範囲を示す灰色の三角形の左側の辺と合焦面との交点が



(a) 合焦面の傾きなし



(b) 合焦面の傾きあり (1)



(c) 合焦面の傾きあり (2)

図9 図8のレンダリング結果

Fig. 9 Rendering results of Fig. 8

レンズ後方にある．そのため，画像の左側の画素に対するレイを計算するとき，レイと合焦点との交点はレンズ後方に存在する．図9(c)の画像の左側の領域では，有限の合焦距離を持たず，大きくぼけている．このときも，レンズの口径は変更していないので，被写界深度は変わっていない．

以上の結果より，CG上でチルト効果を再現し合焦点を任意の面に設定できたことがわかる．更に，提案手法では，従来のチルト効果再現手法では表現できなかった無限遠に合焦する画素を含むような画像の生成も行えたことが確認できる．

4.2 実写画像とCG画像の比較

次に，実際チルトシフトレンズを用いて撮影した実写画像のシーンをCG上で再現し，実写と同様のぼけを生成することができるのか検証を行った．

4.2.1 対象シーンの撮影

撮影に用いたカメラはCanon EOS 6D，チルトシフトレンズはCanon TS-E 45mmである．図10に示すように，レンズの状態を変え撮影した3枚の実写画像が図11である．絞り値は $f/2.8$ ，焦点距離は45mmで実写画像3枚すべてで共通である． θ_L はレンズの傾き角， θ_F は合焦点の傾き角を表す．図10(a)は，レンズを傾けず撮影したため $\theta_L = 0$ ， $\theta_F = 0$ である．図10(b)では， $\theta_L = 5$ とすることで，図11(b)はボックス上部のぼけが小さく，下部のぼけが大きくなるよう合焦点が傾いていることがわかる．図10(c)では， $\theta_L = -5$ とすることで，図11(c)は床と垂直なカメラに最も近いボックスの辺付近でぼけが小さく，離れるとぼけが大きくなるよう合焦点が傾いていることがわかる．

4.2.2 レンズパラメータの取得結果

図4のキャリブレーション用ターゲットを撮影し，カメラキャリブレーションを行った．撮影に用いたカメラ，チルトシフトレンズ，絞り値，焦点距離は図11の撮影時と同様である．

第一段階として，レンズの傾き角以外のパラメータを取得するために，レンズを傾けずに撮影した画像から特徴点のデータセットを算出した．このデータセットを用いて式(3)を最適化しレンズのパラメータを取得した．

- 有効開口径：18.81 [mm]
- 有効焦点距離：55.39 [mm]
- 合焦距離：618.4 [mm]

第二段階として，レンズの傾き角を取得するために，レンズを傾けて撮影した画像から，それぞれデータセットを算出した．これらのデータセットと第一段階で取得した有効焦点距離と合焦距離を用いて式(4)を最適化し，レンズの傾き角を取得した．その結果と真値を表1に示す．図10(b)のカメラ設定での取得結果は，真値に対し0.848[deg]の誤差が出た．一方，図10(c)のカメラ設定での取得結果

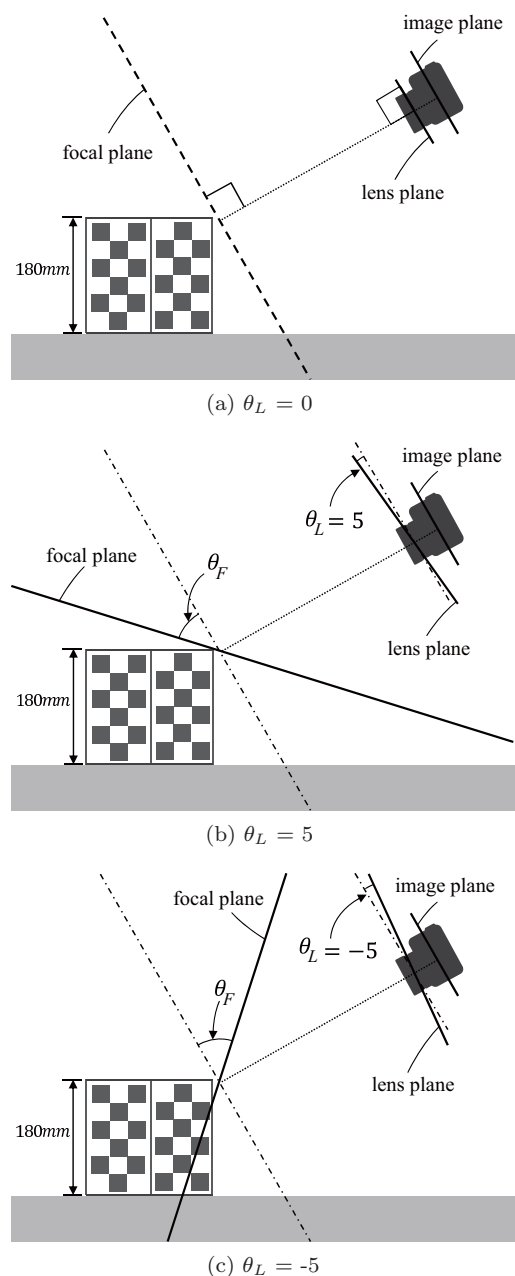


図10 撮影状況

Fig. 10 Scene setting for capturing and rendering.

は，0.030[deg]というごく小さな誤差しか出なかった．

表1 レンズの傾き角

Table 1 Tilted angle.

	真値 [deg]	取得結果 [deg]
図10 (b)	5.000	4.152
図10 (c)	-5.000	-5.030

4.2.3 画像の明度変化による比較

次に，取得したレンズの有効開口径と傾き角を用いて，チルトシフトレンズで撮影した実写画像のシーンを再現した．生成したCG画像を図12に示す．実写画像(図11)とCG画像(図12)の計6枚について，図13に示す赤線と緑線上の明度変化をそれぞれ取得した．それぞれ対応する



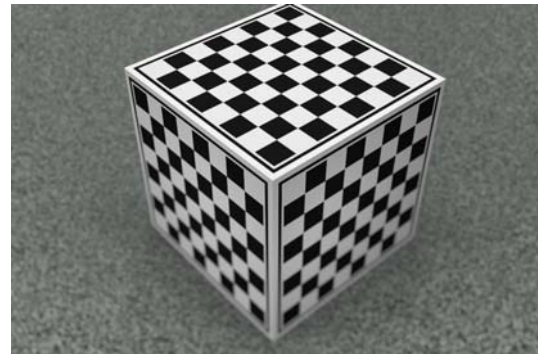
(a) $\theta_L = 0$



(a) $\theta_L = 0.000$



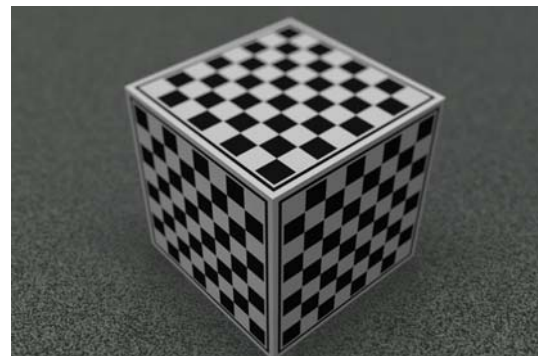
(b) $\theta_L = 5$



(b) $\theta_L = 4.152$



(c) $\theta_L = -5$



(c) $\theta_L = -5.030$

図 11 撮影した実写画像

Fig. 11 Captured images.

図 12 CG 画像

Fig. 12 Generated images.

レンズの状態同士の明度変化をグラフ化し比較を行った。赤線上の明度変化のグラフを図 14 に示し、緑線上の明度変化のグラフを図 15 に示す。これらのグラフでは、実写画像と CG 画像の両方とも、ぼけが小さい部分では明度変化がはっきりしており、ぼけが大きい部分では明度変化が滑らかな部分がある。明度変化がはっきりしている部分と滑らかな部分があるがどのグラフにおいても同じように出ているため、それぞれの箇所におけるぼけの度合いは似ているといえる。それぞれのレンズの状態における赤線・緑線上の明度の平均誤差を表 2 に示す。キャリブレーション結果を用いた (b) と (c) は真値を用いた (a) 以下の値となっている。

実写画像からレンズの傾き角を取得した結果について、図 10(b) の撮影状況でのキャリブレーション結果は真値との差があるが、この取得結果を用いて生成した CG 画像と

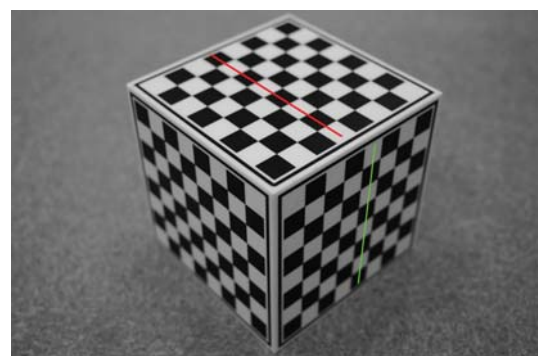


図 13 明度変化の取得位置

Fig. 13 Lines for brightness profiles.

実写画像の明度の平均誤差は、真値を用いた (a) の平均誤差以下の値となっている。したがって、これは CG 画像の生成時には目立たない程度の誤差であるといえる。図 14

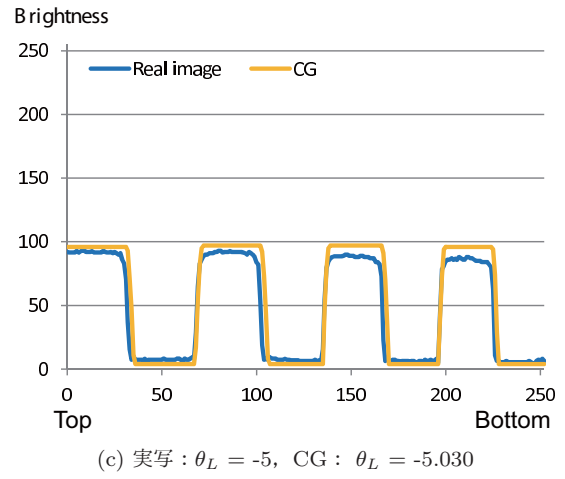
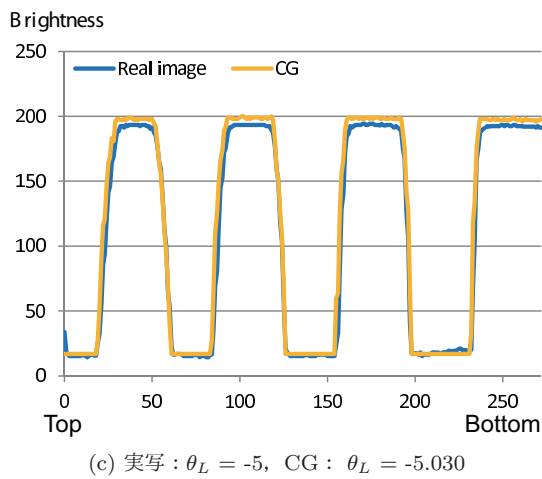
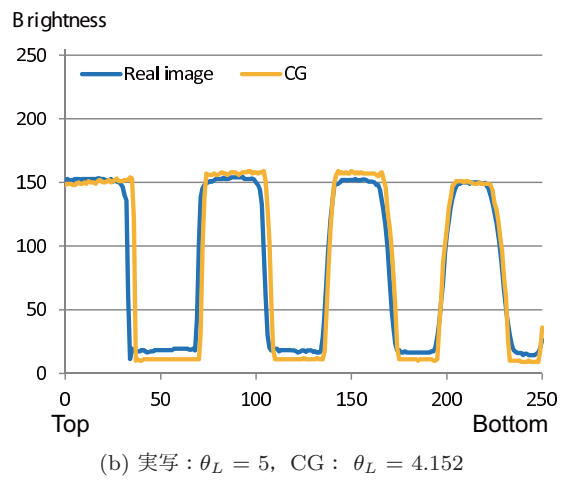
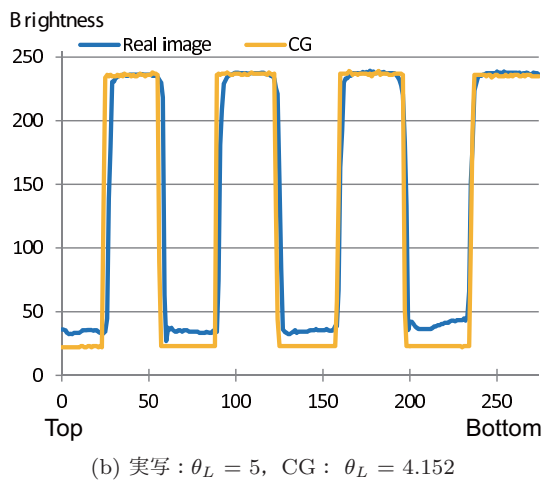
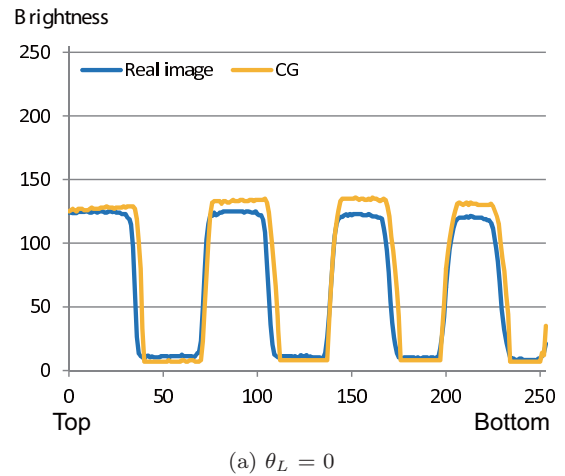
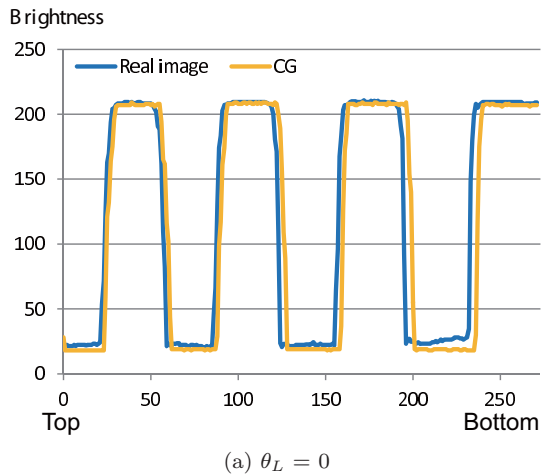


図 14 赤線上の明度変化

Fig. 14 Brightness profiles along the red line.

図 15 緑線上の明度変化

Fig. 15 Brightness profiles along the green line.

表 2 平均誤差

Table 2 Average error.

	赤線	緑線
(a)	16.49	11.49
(b)	16.42	11.16
(c)	6.474	7.851

と図 15 の各グラフにおいて誤差が見られるが、これは CG 上でシーンを完璧に再現できていないこと（位置誤差や照

明再現の不完全さ等）が原因として考えられる。ぼけの度合いについては、明度変化がはっきりしている部分と滑らかな部分がどのグラフにおいても同じように出ているといえる。これらのことから、チルトシフトレンズを用いて撮影した実写画像と非常に近い CG 画像を生成できたことが確認できる。

5. おわりに

本研究では、チルトレンズのカメラキャリブレーション手法と分散レイトレーシング法を用いたチルト効果のレンダリング手法を提案した。カメラキャリブレーションに関しては、ぼけと幾何特徴を利用したカメラキャリブレーションにより、レンズを傾けていない状態でのカメラパラメータを求め、その後レンズを傾けた状態でのキャリブレーションによりレンズの傾き角を推定する手法を提案した。レンダリングにおいては、分散レイトレーシングを用い合焦位置をレンズ後方の場合も考慮することにより、有限の距離で合焦しないような画素を含むような画像に対しても、画像生成が可能となった。再現実験においては、実レンズを用いて撮影した実写画像に対しキャリブレーションを行うことで、CG再現に必要なパラメータを取得し、実写画像と同様のぼけを持つCG画像を生成できることを確認した。

参考文献

- [1] 本城直季: “本城直季写真集 small planet,” リトルモア, 2006.
- [2] M. Baba, M. Mukunoki, and N. ASADA: “A unified camera calibration using geometry and blur of feature points,” Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition, Volume 01, pp.816-819, 2006.
- [3] R.L. Cook: “Distributed ray tracing,” *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH’84)*, Vol.18, No.3, pp.137-145, 1984.
- [4] M. Potmesil, 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.
- [5] P. Haeberli, K. Akeley: “The accumulation buffer: hardware support for high-quality rendering,” *Proc. SIGGRAPH’90* pp.309-318, 1990.
- [6] C. Kolb, D. Mitchell, and P. Hanrahan: “A realistic camera model for computer graphics,” *Proc. SIGGRAPH’95*, pp.317-324, 1995.
- [7] R. Held, E. Cooper, J. O’Brien, and M. Banks: “Using blur to affect perceived distance and size,” *ACM Trans. Graph.*, page 19, 2010.
- [8] B. Barsky, E. Pasztor: “Rendering skewed plane of sharp focus and associated depth of field,” *ACM SIGGRAPH 2004 Sketches*, page 92, 2004.