

統合カメラモデルを用いた
実写画像と生成画像の合成に関する研究

(課題番号 08680410)

平成 8 年度～平成 10 年度
科学研究費補助金 基盤研究 (C)(2)
研究成果報告書

平成 11 年 3 月

研究代表者 浅田尚紀
(広島市立大学 情報科学部 教授)

平成 8 年度～平成 10 年度
科学研究費補助金 基盤研究 (C)(2)
研究成果報告書

課題番号

08680410

研究課題

統合カメラモデルを用いた実写画像と生成画像の合成に関する研究

研究組織

研究代表者： 浅田 尚紀 (広島市立大学 情報科学部 教授)
研究分担者： 天野 晃 (広島市立大学 情報科学部 助教授)
研究分担者： 馬場 雅志 (広島市立大学 情報科学部 助手)
研究分担者： 青山 正人 (広島市立大学 情報科学部 助手)

研究経費

| | |
|----------|----------|
| 平成 8 年度 | 1,600 千円 |
| 平成 9 年度 | 400 千円 |
| 平成 10 年度 | 500 千円 |
| 計 | 2,500 千円 |

研究目的および成果の概要

最近注目を集めているマルチメディア情報処理や仮想現実などの研究では、写実的な画像を高速に生成する技術が必要不可欠である。従来からコンピュータグラフィックス (CG) では、物体や照明をモデル化することにより画像を生成する研究が行われてきた。しかし、現実の物理現象を厳密にモデル化することには限界があり、しかも計算コストが高くなるという問題があった。そこで本研究では、写実的な画像を高速に生成する技術として、カメラで撮影した実写画像と CG で生成した画像を合成して高品質な画像を生成する方法について、実用化へ向けた検討を行うことを目的とする。

実写画像と生成画像の合成において注意すべきことは、実写画像には撮影過程において生じるレンズのぼけなどの信号歪みが含まれていることである。したがって自然な合成画像を作成するには、撮像過程をモデル化したカメラモデルを用いて実写画像を補正、あるいはカメラモデルを用いて CG 画像を生成する必要がある。本研究では、実写画像と生成画像の合成のために必要な課題として

1. Calibrated Computer Graphics による画像合成の試み

実写画像を撮影した実カメラのモデル化とそのキャリブレーション結果に基づく CG 画像の生成と高品質画像合成 (Calibrated Computer Graphics) 技術の確立

2. Calibrated Computer Graphics のための高速画像生成アルゴリズム

高精度ぼけ画像生成アルゴリズムである多重 Z バッファアルゴリズムと多重ピンホールアルゴリズムの高速化と画質評価

3. Calibrated Computer Graphics のためのズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデル

ズーム、フォーカス、アイリスを統一的に記述する統合カメラモデルの設計とキャリブレーション手法の確立

4. ズームレンズの光学的歪みの解析と補正

ズームレンズの口径蝕現象の解析と補正ためのカメラモデルの設計とキャリブレーション手法の確立

を行った。これらの研究成果の詳細は後述するが、その概要をまとめると以下のようになる。

第 1 章： Calibrated Computer Graphics による画像合成の試み

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。本章では、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。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。

第 2 章： Calibrated Computer Graphics のための高速画像生成アルゴリズム

本章では、Calibrated Computer Graphics のための画像生成手法の高速化について述べる。レンズのぼけ効果を忠実にモデル化した逆投影ぼけモデルに基づく多重 Z バッファアルゴリズムは高品質なぼけ画像生成が行えるが、生成画像の 1 点につき 1 ~ 2 回の Z バッファ法を適用するため、その計算コストは高いものとなっている。そこで、多

重Zバッファアルゴリズムの高速化について検討し、高速化の効果と画質への影響について評価を行った。さらに、多数のピンホール画像を加算することによって同様のぼけ画像を生成する多重ピンホールアルゴリズムについても検討を加え、多重Zバッファアルゴリズムと比較した結果についても述べる。

第3章： Calibrated Computer Graphics のためのズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデル

高精度の画像解析と高品質の画像生成を行うには、実カメラの忠実なモデル化とキャリブレーションが必要である。本章では、ズーム、フォーカス、アイリスを統一的に記述する統合カメラモデルを構成し、そのキャリブレーション法を提案する。ズームレンズを薄凸レンズカメラモデルを用いてモデル化し、実験により各種モデルパラメータを求めた結果、ズームとフォーカスの連動およびアイリスをほぼ正確に記述できることを確認した。最後に、統合カメラモデルを用いた画像生成の例を示す。

第4章： ズームレンズの光学的歪みの解析と補正

カメラキャリブレーションでは、各種カメラパラメータの決定とともに幾何学的および光学的歪みの補正が重要である。本章では、ズームレンズの光学的歪みである画像周辺部の明度低下現象について解析を行い、その補正法を提案する。まず、単一レンズの画像生成過程で生じる $\cos^4\theta$ 現象による明度低下が主に広角レンズで問題となるのに対して、複数枚のレンズが構成する筒状の光路で生じる口径蝕現象による明度低下が主に望遠レンズで問題となることを明らかにする。次に、口径蝕現象を解析するために単一レンズの前面に可変円筒モデルを付加したカメラモデルを提案する。円筒長、入口半径、出口半径の三つのパラメータを持つ可変円筒モデルを用いることによって、出口半径が大きく(絞りを開き)入口半径が小さいまたは円筒長が長い(ズームを望遠にする)ほど画像周辺部に大きな明度低下を生じるという口径蝕現象を導くことができる。一様白色シーンを撮影した画像から求めたモデルパラメータを用いて実画像の明度低下の補正を行い、本モデルの妥当性と光学的歪み補正の有効性を示す。

研究発表

学術論文

- 天野 晃、浅田尚紀、馬場雅志:
ズームレンズの光学的ひずみの解析と補正: - 可変円筒モデルを用いた口径蝕現象の解析と画像周辺部明度低下の補正 -,
電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-D-II, No.6, pp.1458-1465, 1997.
- N. Asada, H. Fujiwara, T. Matsuyama:
Edge and depth from focus,
International Journal of Computer Vision, Vol.26, No.2, pp.153-163, 1998.

- N. Asada, H. Fujiwara, T. Matsuyama:
Seeing behind the scene: Analysis of photometric properties of occluding edges by the reversed projection blurring model,
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.20, No.2, pp.155-167, 1998.
- 馬場雅志、浅田尚紀、天野 晃:
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 - ,
情報処理学会論文誌, Vol.39, No.7, pp.2180-2188, 1998.

国際会議発表

- N. Asada, A. Amano, M. Baba:
Photometric calibration of zoom lens systems,
Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, Vol.A, pp.186-190, 1996.
- N. Asada, M. Baba, A. Amano:
Calibrated Computer Graphics: A new approach to realistic image synthesis based on camera calibration,
Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, Vol.1, pp.705-707, 1998.

口頭発表

- 天野 晃、浅田尚紀、馬場雅志:
ズームレンズの光学的歪みの解析と補正: - 可変円筒モデルを用いた口径蝕現象の解析と画像周辺明度低下の補正 - ,
画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'96) 論文集, Vol.I, pp.307-312, 1996.
- 馬場雅志、浅田尚紀、天野 晃:
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 - ,
グラフィックスと CAD/Visual Computing 合同シンポジウム'97, pp.123-130, 1997.
- 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 (情報・システム 2), D-12-172, p.371, 1998.
- 馬場雅志、浅田尚紀、迫田 肇、天野 晃、青山正人:
ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを用いた Calibrated Computer Graphics,
グラフィックスと CAD/Visual Computing 合同シンポジウム'98, pp.67-72, 1998.

- 馬場雅志、天野 晃、青山正人、浅田尚紀:
Calibrated Computer Graphics のためのズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデル,
画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'98), Vol.II, pp.47-52, 1998.
- 馬場雅志、天野 晃、青山正人、浅田尚紀:
Calibrated Computer Graphics のための高速画像生成,
情報処理学会研究報告, CVIM-113-7, pp.49-56, 1998.
- 馬場雅志、天野 晃、青山正人、浅田尚紀:
Calibrated Computer Graphics のための高速画像生成アルゴリズム,
知能情報メディアシンポジウム, pp.187-194, 1998.

目次

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Calibrated Computer Graphics による画像合成の試み | 1 |
| 1.1 | はじめに | 2 |
| 1.2 | Calibrated Computer Graphics | 2 |
| 1.3 | 任意フォーカス画像の作成 | 3 |
| 1.3.1 | 逆投影ぼけモデル | 3 |
| 1.3.2 | 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 | 5 |
| 1.4 | 実験と評価 | 7 |
| 1.4.1 | カメラキャリブレーション | 7 |
| 1.4.2 | 連続フォーカス画像の撮影 | 8 |
| 1.4.3 | 実写画像と生成画像の比較 | 10 |
| 1.4.4 | 実写画像と仮想物体の合成例 | 11 |
| 1.5 | まとめ | 11 |
| 2 | Calibrated Computer Graphics のための高速画像生成アルゴリズム | 17 |
| 2.1 | はじめに | 18 |
| 2.2 | Calibrated Computer Graphics | 18 |
| 2.2.1 | カメラキャリブレーション | 19 |
| 2.2.2 | 合成画像の生成例 | 20 |
| 2.3 | 多重Zバッファアルゴリズム | 22 |
| 2.3.1 | 高速化の検討 | 24 |
| 2.4 | 多重ピンホールアルゴリズム | 25 |
| 2.4.1 | 画像のシフト加算による画像生成 | 26 |
| 2.4.2 | ピンホール画像の描画領域 | 27 |
| 2.5 | 計算時間と画質の評価 | 29 |
| 2.5.1 | 多重Zバッファアルゴリズム | 29 |
| 2.5.2 | 多重ピンホールアルゴリズム | 31 |
| 2.5.3 | 考察 | 32 |
| 2.6 | まとめ | 34 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Calibrated Computer Graphics のためのズーム・フォーカス・アイリス統合 カメラモデル | 39 |
| 3.1 | はじめに | 40 |
| 3.2 | 統合カメラモデル | 40 |
| 3.2.1 | 実パラメータの性質 | 40 |
| 3.2.2 | 統合カメラモデルの性質 | 41 |
| 3.2.3 | ズームと有効焦点距離 w の関係 | 42 |
| 3.2.4 | ズームと有効開口径 d の関係 | 43 |
| 3.3 | カメラキャリブレーション | 44 |
| 3.3.1 | 実パラメータとモデルパラメータの関係 | 44 |
| 3.3.2 | 画像中心 | 45 |
| 3.3.3 | 有効焦点距離 w | 45 |
| 3.3.4 | 有効開口径 d | 46 |
| 3.4 | 統合カメラモデルを用いた画像生成 | 47 |
| 3.4.1 | 実写画像と生成画像の比較 | 48 |
| 3.4.2 | 実写画像と仮想物体の合成 | 48 |
| 3.5 | まとめ | 49 |
| 4 | ズームレンズの光学的歪みの解析と補正 | 55 |
| 4.1 | はじめに | 56 |
| 4.2 | ズームレンズの光学的歪み | 57 |
| 4.2.1 | $\cos^4 \theta$ 現象 | 57 |
| 4.2.2 | 口径蝕現象 | 57 |
| 4.3 | 実験 | 59 |
| 4.3.1 | 絞りの変化 | 61 |
| 4.3.2 | ズームの変化 | 61 |
| 4.3.3 | 画像周辺部の明度低下の補正 | 62 |
| 4.4 | おわりに | 65 |

第 1 章

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 –

1.1 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][2][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[4] らの後処理によるぼけ生成法、Cook[5] のレイトレーシングに基づくぼけ生成法、そして Kolb[6] ら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。

1.2 Calibrated Computer Graphics

複数枚の実写画像や実写画像と CG 画像を組み合わせる自然な合成画像を作成するには、合成する画像が幾何学的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づいて、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 1.1)。

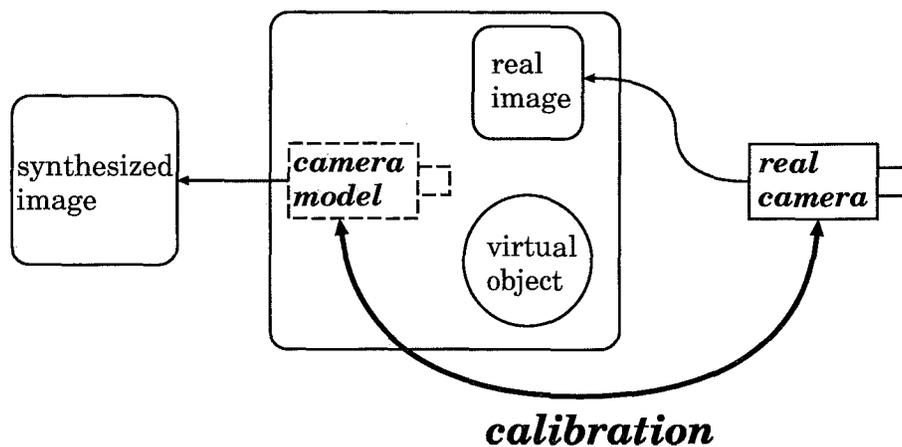


図 1.1: Calibrated Computer Graphics

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。

1.3 任意フォーカス画像の作成

1.3.1 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 が固定の一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1.2)。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

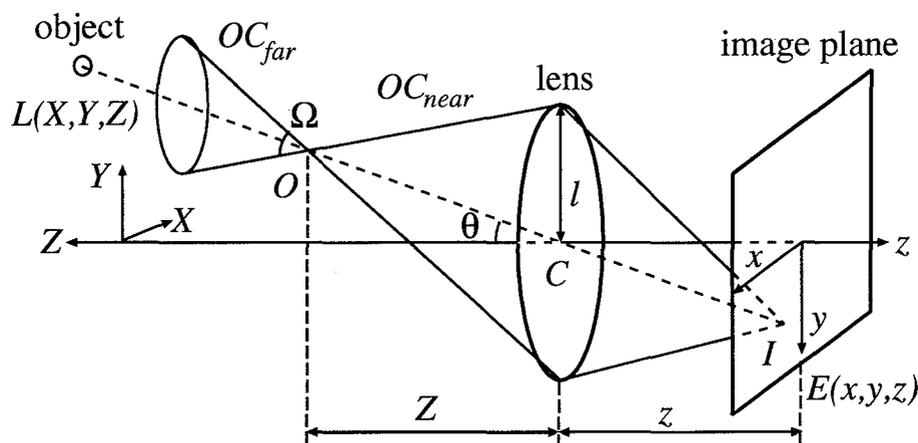


図 1.2: カメラモデルと逆投影ぼけモデル

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.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{z} \quad (1.1)$$

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 1.2).

(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,

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \frac{Z}{z} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

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¹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.

$$E(x, y, z) = \frac{\pi l^2 \cos^4 \theta}{z^2} \int_{\Omega} \frac{L(X, Y, Z)}{\Omega} d\omega \quad (1.3)$$

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.

¹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 $\Omega = \frac{\pi l^2 \cos^3 \theta}{Z^2}$ は十分小さい.

1.3.2 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(1.3)に基づいて画像を生成する手順は以下のようになる(図1.2参照).

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1.3).

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.

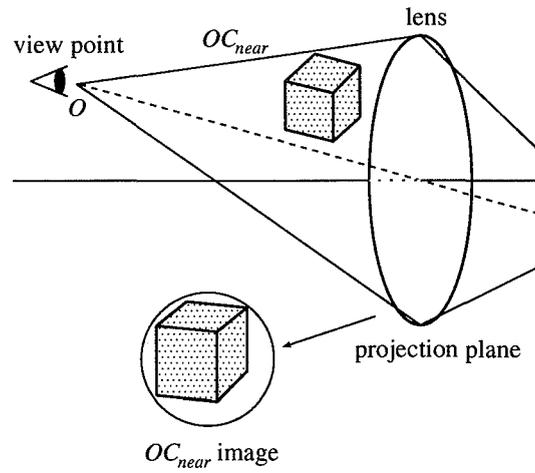
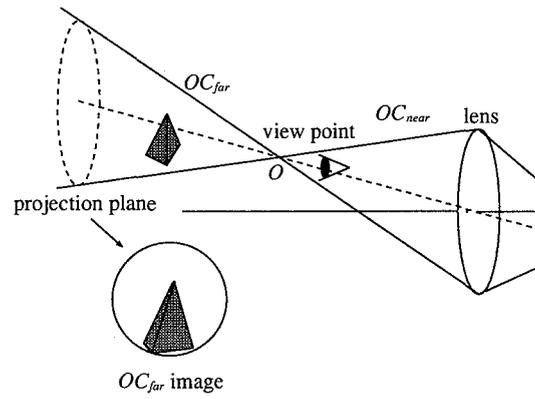
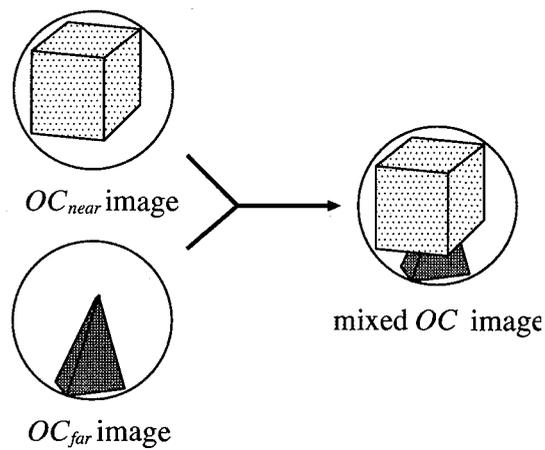
(a) OC_{near} 画像の作成(b) OC_{far} 画像の作成(c) 合成 OC 画像の作成

図 1.3: Zバッファ法を用いた任意フォーカス画像の生成

表 1.1: ズームレンズの光学的特性

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

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 1.3(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 (レンズにもっとも近い物体) 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 1.3(b)).

Step 9 (OC_{near} 画像と OC_{far} 画像の合成): 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 1.3(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めれば終了する. それ以外は, 新たな画素位置 (x, y) を与え, Step 5 に戻る.

1.4 実験と評価

1.4.1 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 1.1 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 100mm 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.

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、

$$z = f + \alpha \cdot \phi \quad (1.4)$$

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(1.1)を用いて

$$Z = f + \frac{f^2}{\alpha \cdot \phi} + \gamma \quad (1.5)$$

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。

$$m = \frac{z}{f} = \frac{f + \alpha \cdot \phi}{f} = 1 + \frac{\alpha}{f} \phi \quad (1.6)$$

カメラパラメータ

一辺の長さが 153mm の正方形の頂点と辺の midpoint の合計 8ヶ所に直径 13mm の黒点を配置した平面对象物をカメラから約 4.7m 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離が 503.9mm 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 765.2mm 後方に位置することがわかった²。また、黒点のぼけ幅変化から求めたレンズの開口半径は 38mm であった。

1.4.2 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 1.4)。糸の太さは約 1mm で、レンズ前面から 2 本の糸までの距離はそれぞれ 320cm と 490cm に設定した。カメラは絞りを開放、ズームを 100mm 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 320cm (近くの糸に合焦)、

²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 100mm とモデルパラメータの焦点距離 503.9mm 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。

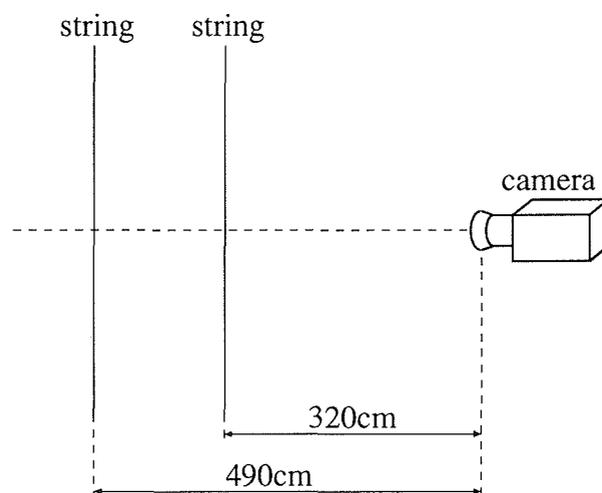


図 1.4: レンズ光軸上に配置した 2 本の糸

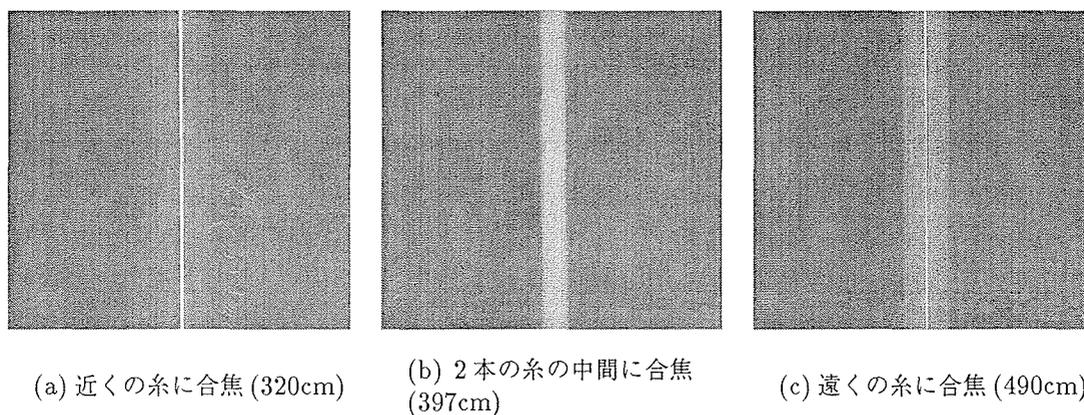


図 1.5: 実写画像 (レンズ光軸上の 2 本の糸の画像)

397cm (2本の糸の中間に合焦), 490cm (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 1.5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え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, レンズが開口面積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.

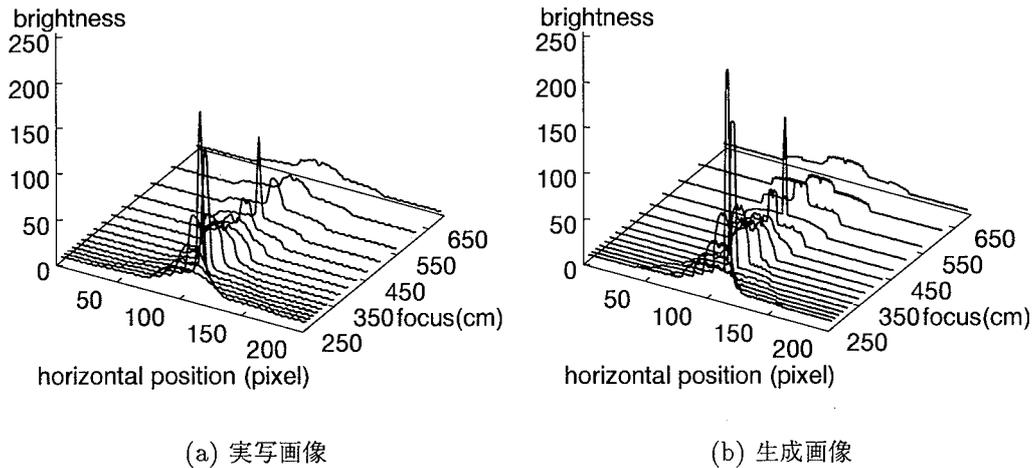


図 1.6: フォーカス変化による画像水平線上の明度変化

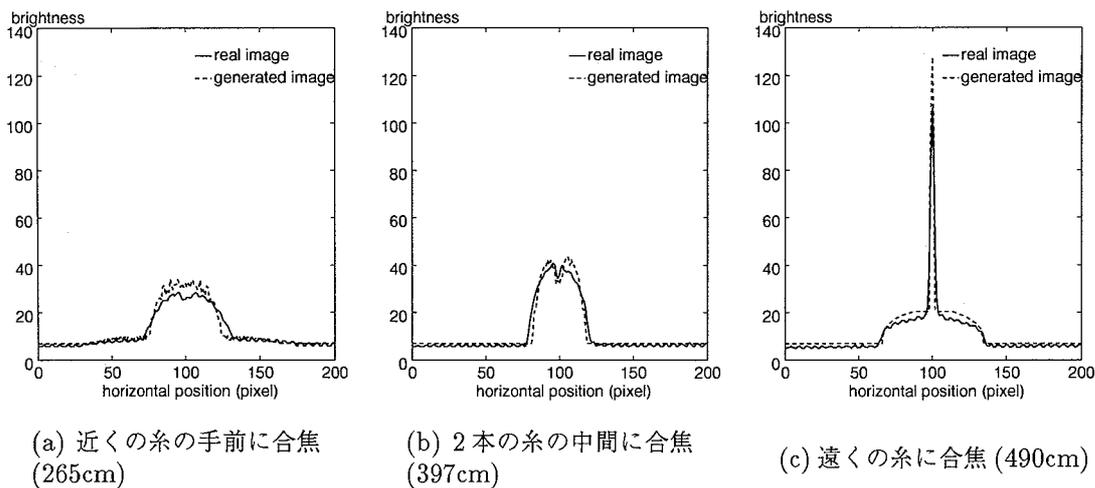


図 1.7: 実写画像と生成画像の明度プロファイルの比較

1.4.3 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 1mm 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 1.6(a) に、

生成画像のプロファイル変化を (b) に示す³。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 1.7は、合焦距離をカメラから 265cm (近くの糸より手前に合焦), 397cm(2本の糸の中間に合焦), 490cm (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 1.7(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わかる。図 1.7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 1.7(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わかった。

1.4.4 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 1.8(b)) と花壇 (図 1.8(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 1.8(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。

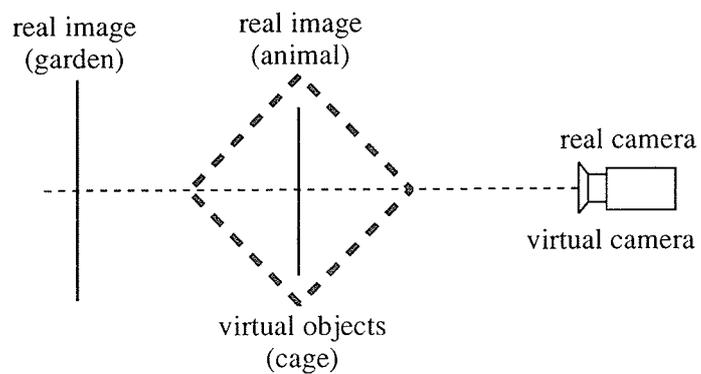
フォーカスを檻の手前から背景まで順に変化させたときの合成画像を図 1.9 に示す。フォーカス変化にともなって手前の檻が徐々にぼけ、動物や花壇がしだいに明瞭に見える現象がリアルに表現できていることがわかる。

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 1.9 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 秒要した。

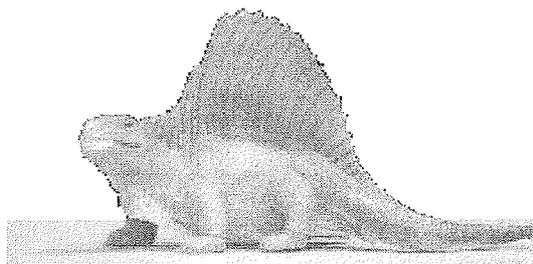
1.5 まとめ

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

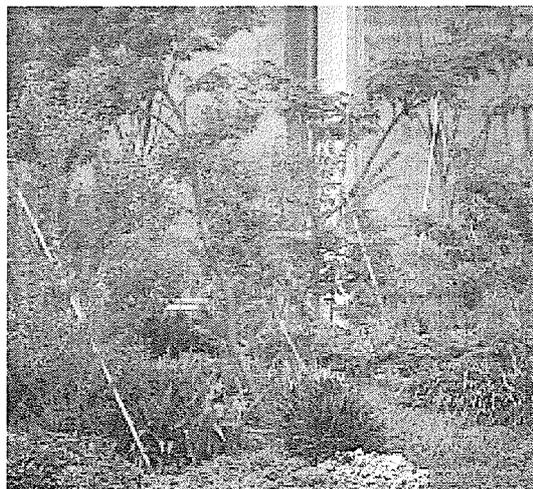
³実写画像と生成画像はいずれもカラー画像であるが、シーンは白い糸のみで構成されているので明度値の比較は 8 ビット (0 から 255) の濃淡画像として行った。



(a) 物体の配置

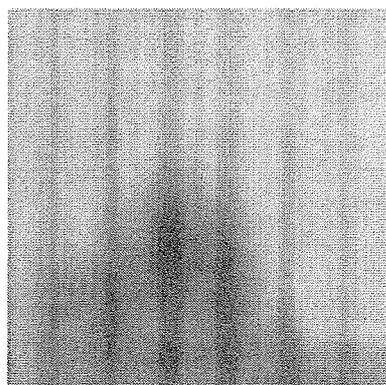


(b) 動物の画像

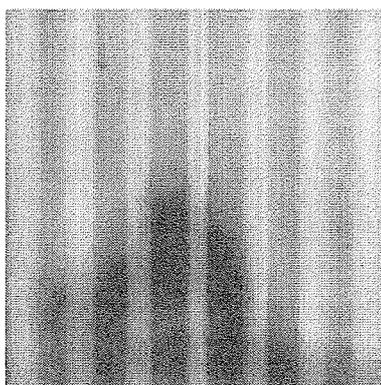


(c) 背景画像

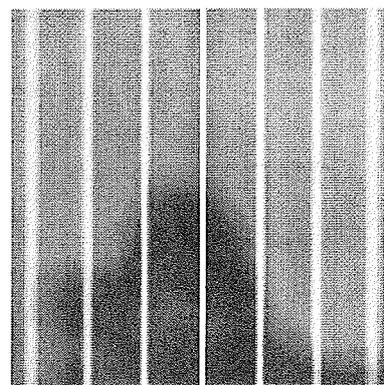
図 1.8: シーン構成と使用した実写画像



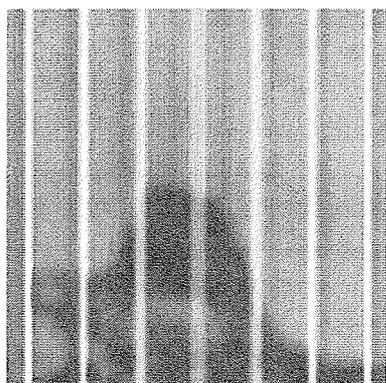
(a) 檻の手前に合焦 (合焦距離 275cm)



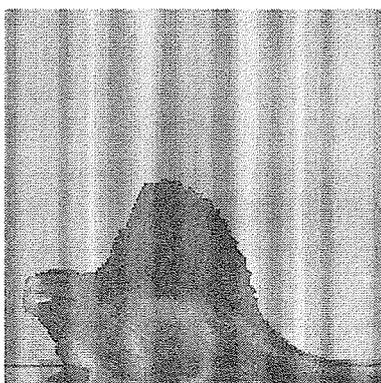
(b) 檻の手前に合焦 (合焦距離 287cm)



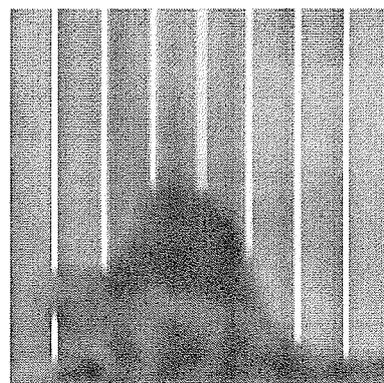
(c) 檻の前面に合焦 (合焦距離 300cm)



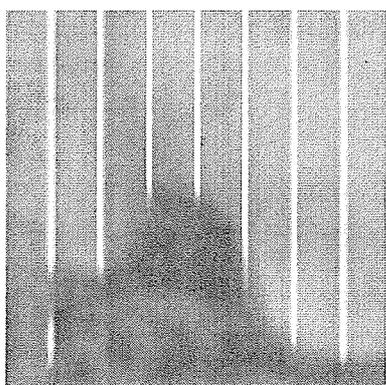
(d) 動物の手前に合焦 (合焦距離 315cm)



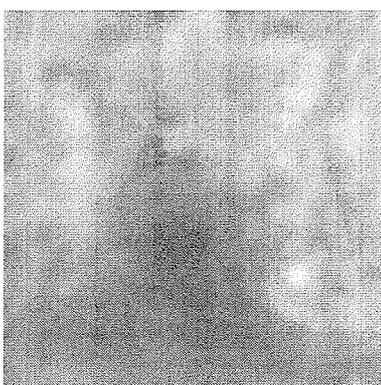
(e) 動物に合焦 (合焦距離 331cm)



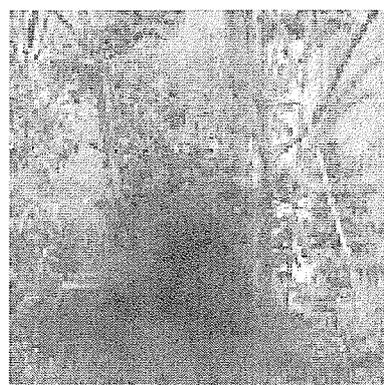
(f) 動物の後に合焦 (合焦距離 350cm)



(g) 檻の後面に合焦 (合焦距離 361cm)



(h) 背景の手前に合焦 (合焦距離 425cm)



(i) 背景に合焦 (合焦距離 500cm)

図 1.9: 実写画像と仮想物体の合成例

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るため、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、従来のレイトラッキ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。

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.

第 2 章

Calibrated Computer Graphics のための高速画像生成アルゴリズム

2.1 はじめに

仮想現実 (Virtual Reality) や拡張現実 (Augmented Reality) では、仮想空間と実空間をシームレスに融合した画像を生成する技術が求められている。仮想空間と実空間を融合する方法として、

- (1) 仮想空間への実写画像の埋め込み
- (2) 実写画像への仮想物体の埋め込み

の2種類の方法が考えられるが、いずれの場合にも実写画像と同等の品質の画像を生成する技術が必要となる。これは、実写画像を撮影した実カメラの特性に基づいて画像を生成し、実写画像と合成する必要があることを意味している。

実カメラの特性を忠実に再現するには、レンズによるぼけの効果を考慮する必要がある。従来のCGでは、ピンホールカメラモデルを用いて作成した画像に距離に応じたぼけを付加する手法 [1]、レンズを通過する複数の光線で画像を生成することによってレンズ効果を表現する Distributed Ray Tracing [2]、レンズの設計データに基づいてズームレンズの効果を表現する手法 [3] などが提案されている。しかし、これらの研究では実カメラとの対応付け、すなわちカメラキャリブレーションを行っていないため、実写画像との比較や合成は行われていない。

これに対して我々は、CVとCGに共通する技術要素であるカメラモデルに着目し、カメラキャリブレーションに基づいてCG画像を生成し、実写画像並みのリアルな合成画像を作成する“Calibrated Computer Graphics”(CCG)の研究を進めている [4, 5, 6]。文献 [4] では、レンズのぼけ効果を忠実にモデル化した逆投影ぼけモデル [7] に基づいて、Zバッファを利用した高品質なぼけ画像生成アルゴリズム (多重Zバッファアルゴリズム) を示した。さらに、文献 [5, 6] では、ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを提案し、実カメラのキャリブレーションに基づいて3種類のレンズパラメータを自由に変更した合成画像を作成する方法を示した。

しかし、多重Zバッファアルゴリズムは、生成画像の1点につき1~2回のZバッファ法を適用する必要があるため、その計算コストは高いものとなっている。したがって、CCGを仮想現実や拡張現実に適用するには、画像生成アルゴリズムを高速化が必要がある。そこで本論文では、多重Zバッファアルゴリズムの高速化について検討し、高速化の効果と画質への影響について評価を行った。さらに、多数のピンホール画像を加算することによって同様のぼけ画像を生成する方法 [8] (以下では、多重ピンホールアルゴリズムと呼ぶ) についても検討を加え、多重Zバッファアルゴリズムと比較した結果についても述べる。

2.2 Calibrated Computer Graphics

CCGの手順を整理すると以下ようになる。

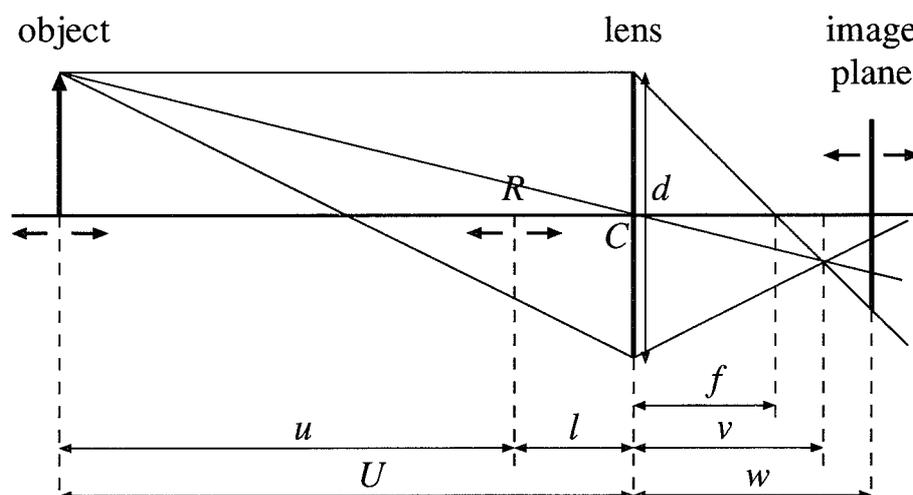


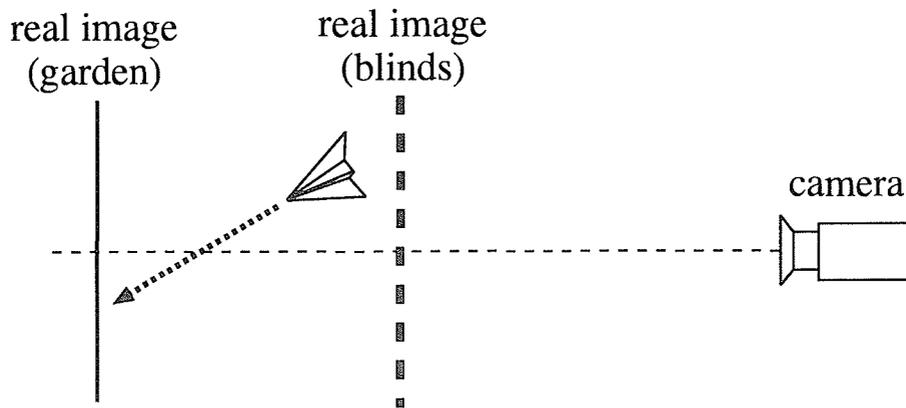
図 2.1: 統合カメラモデル

1. カメラのモデル化： 実写画像と CG 画像の合成に必要なカメラパラメータを記述するカメラモデルを設定する．本論文ではズーム，フォーカス，アイリスの変化を記述する統合カメラモデルを使用する [6]．
2. カメラのキャリブレーション： カメラモデルに基づいてキャリブレーションを行い，実カメラのパラメータとカメラモデルのパラメータを対応付けを求める．
3. 画像生成アルゴリズムの構成： カメラモデルとカメラパラメータを用いて画像を生成するアルゴリズムを構成する [5]．
4. 生成画像と実写画像の比較による検証： 実写画像と同じシーンの CG 画像を生成し，実写画像を基準として生成画像の品質を定量的に評価する．
5. 合成画像の作成： キャリブレーションした実カメラで撮影した実写画像と，カメラキャリブレーションに基づいて作成した CG 画像を合成する．

2.2.1 カメラキャリブレーション

カメラモデルとして，図 2.1 に示すズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを使用する．モデルパラメータとして焦点距離 f [mm]，合焦距離 U [mm]，レンズの開口径 d [mm]，撮像面距離 w [mm]，1 画素のサイズ s [mm] を用いる．

カメラキャリブレーションには，カメラ (SONY XC-007) とズームレンズ (FUJINON A16×9BRM-28) を使用し，モデルパラメータを求めた [6]．



(a) 物体の配置



(b) ブラインド

(c) 背景画像

図 2.2: シーン構成と使用した実写画像

2.2.2 合成画像の生成例

このカメラで撮影した実写画像と仮想物体の合成画像を作成した例を図に示す(図 2.3, 2.4, 2.5). カメラで花壇の画像(図 2.2(b))とブラインドの画像(図 2.2(c))を撮影し, 花壇は平面テクスチャとし, ブラインドはテクスチャマッピングした短冊状物体として扱った. そして仮想物体として紙飛行機が移動するシーンを設定した(図 2.2(a)).

フォーカスの変化によって手前のブラインドにピントがあったり, ぼけたりする様子(図 2.3), ズームの変化によって画角が変化しズームアップされる様子(図 2.4), そしてアイリスの変化によって明るさが変化すると同時に被写界深度が変化し, 物体のぼけ具合が変化している様子(図 2.5)がリアルに表現できることを確認した.

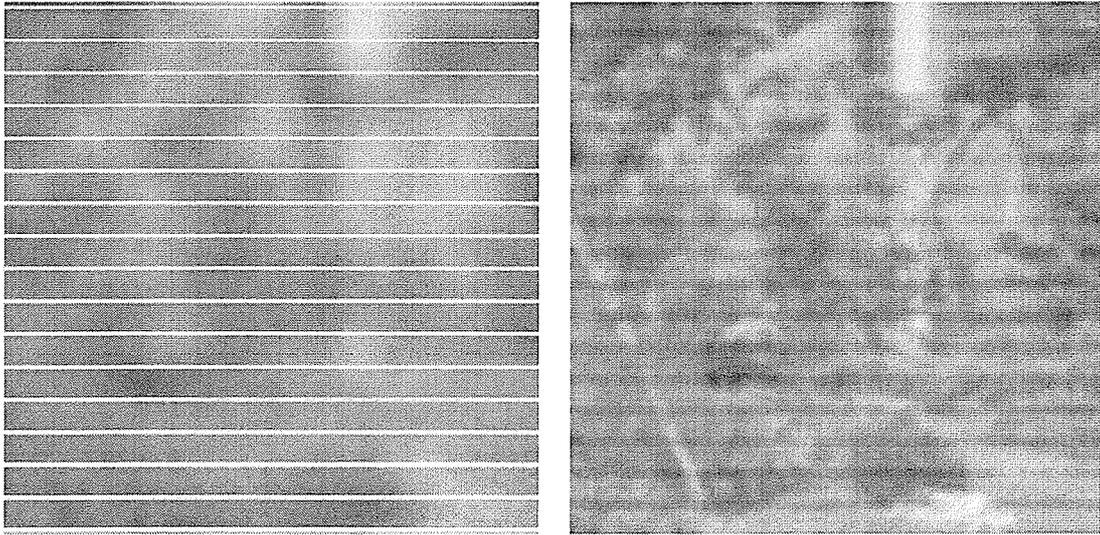


図 2.3: フォーカスの変化時の画像



図 2.4: ズームの変化時の画像

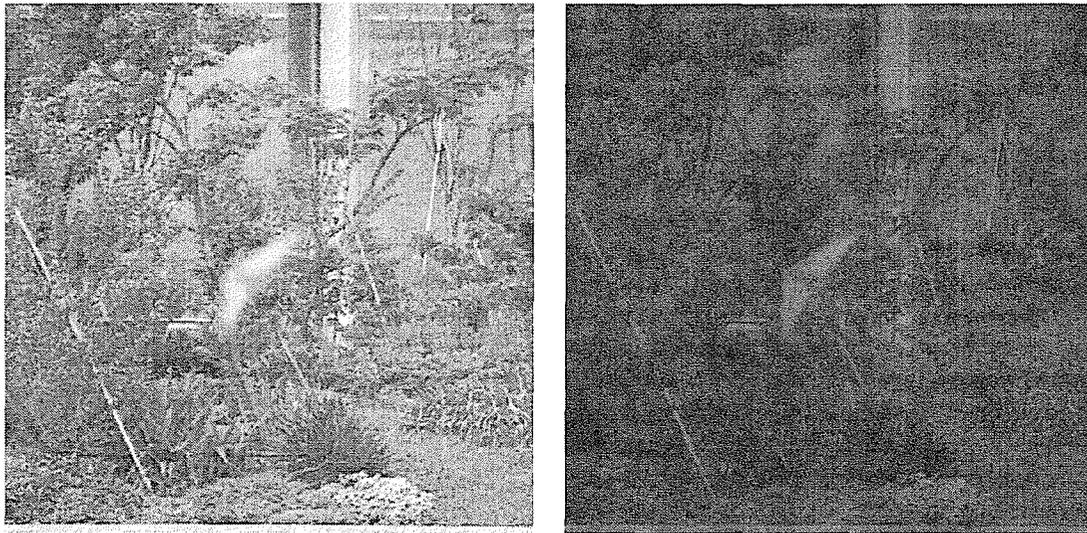


図 2.5: アイリスの変化時の画像

2.3 多重 Z バッファアルゴリズム

多重 Z バッファアルゴリズムは、撮像面上の 1 点に結像する光はシーン中の 1 点 (合焦点 O) を必ず通過するという特徴に着目し、その合焦点からレンズ方向とレンズと反対方向に Z バッファ法¹を用いることにより撮像面上の 1 点の明度を求める方法である。

図 2.6 に多重 Z バッファアルゴリズムの概略を示す。まず、レンズから光束円錐 OC_{near} を見た OC_{near} 画像と、合焦点 O から光束円錐 OC_{far} を見た OC_{far} 画像を作成し、物体の遮へい効果を考慮して $\{OC_{near}$ 画像 $>$ 合焦画像 $>$ OC_{far} 画像 $\}$ の優先順位で合成 OC 画像を作成する。そして、合成 OC 画像の平均明度を最終生成画像上の 1 点の明度とする。 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、それぞれレンズ形状の投影面を設定し Z バッファ法を用いて画像を作成する。

アルゴリズム

画像生成に必要なパラメータとして、焦点距離 f 、撮像面距離 w 、レンズの口径 d 、1 画素の大きさ s を与える。また、最終生成画像の画素数を N 、 OC 画像の画素数を N_{OC} とする。

1. 撮像面距離 w から合焦距離 U を求める。

¹Z 値の判定方法が異なる 3 種類の Z バッファ法を用いる。通常の Z バッファ法で用いられる判定方法は、投影すべき物体の奥行き値がすでに蓄えられているものよりも小さければ、物体を描画し奥行き値を入れ替える方法である。これを「順 Z バッファ法」と呼ぶ。これに対して、奥行き値が大きい物体を描画し奥行き値を入れ替える方法を「逆 Z バッファ法」と呼ぶ。また、奥行き値が等しい時だけ描画する方法を「等値 Z バッファ法」と呼ぶ。

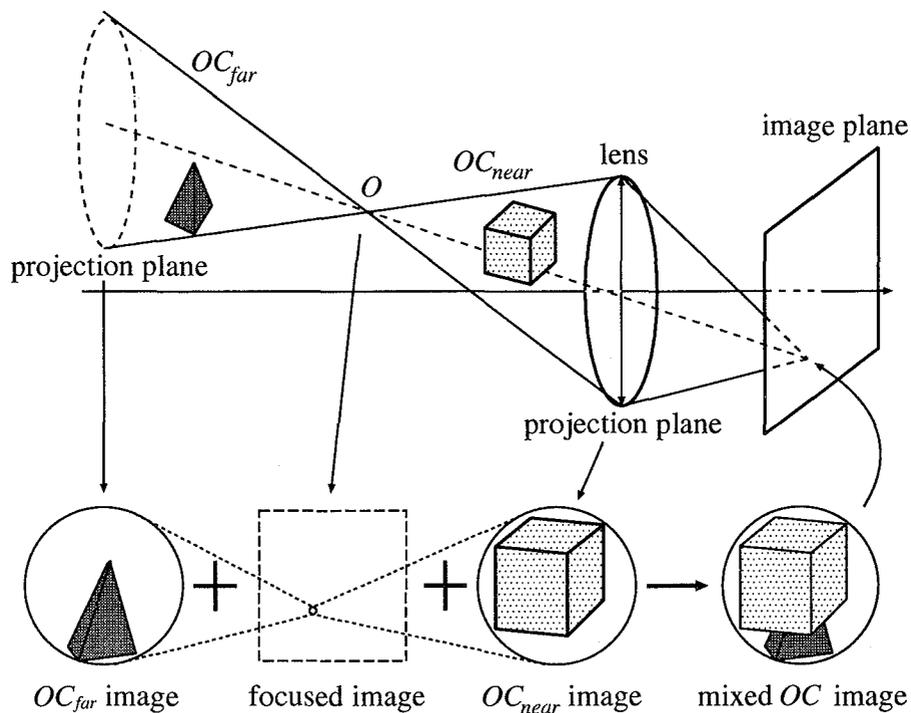


図 2.6: 多重Zバッファアルゴリズム

2. 合焦画像の画角を撮像面距離 w , 画像の1辺の画素数 \sqrt{N} , 1画素の大きさ s から求める.
3. 画素数 N の等値Zバッファ法を用いて, Zバッファの値が合焦距 U に等しい物体の明度で構成した合焦画像を作成する.
4. OC画像の投影面の画角を, 合焦距 U , レンズ口径 d から決定する.
5. 最終生成画像の画素位置 (x, y) を与える.

以下の処理(6から14)を画素数 N だけ繰り返す.

6. 最終生成画像の全画素の明度が求めれば終了.
7. 画素位置 (x, y) と撮像面距離 w から合焦点 O を求める.
8. 画素数 N_{OC} の順Zバッファ法を用いてレンズ形状画像(OCマスク画像)を作成する. 合焦点 O からレンズ中心を投影中心としてレンズ形状の円形物体を投影し, その物体の内部領域をOC画像とする.
9. 画素位置 (x, y) において, 3で作成した合焦画像の値が得られている場合(合焦点 O に物体が存在する場合は, 10を行い11をスキップする. それ以外は10以下を実

行する。

10. 逆 Z バッファ法を用いて画素数 N_{OC} の OC_{near} 画像を作成する。合焦点 O からレンズ中心を投影中心として、 O とレンズ間に存在するすべての物体を投影する。
11. 順 Z バッファ法を用いて画素数 N_{OC} の OC_{far} 画像を作成する。合焦点 O からレンズと合焦点に対して対称な点を投影中心として、 O と投影面間に存在するすべての物体を投影する。
12. OC_{near} 画像と OC_{far} 画像から合成 OC 画像を作成する。レンズに近い OC_{near} 画像を優先し、 OC_{near} 画像の値が得られていない画素については、対応する OC_{far} 画像の画素の値を用いる。
13. 合成 OC 画像の画素値を平均し、最終生成画像の 1 画素 (x, y) の明度とする。
14. 新たな画素位置を (x, y) とし 6 に戻る。

このアルゴリズムにおいて、計算コストが高いのは Z バッファ法を用いるステップ 3, 8, 10, 11 である。ただし、ステップ 11 の実行は、合焦点 O に物体が存在するか否かに依存する。そこで、画素数 N に対して O に物体が存在しない比率を ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) とすると、Z バッファ法を適用する回数は OC 画像に対して $(2 + \varepsilon)N$ 回、最終生成画像に対して 1 回となる。

Z バッファ法の計算時間が生成する画像の画素数に比例すると仮定すると、全体の計算時間 T_{MZ} は次式で表される。

$$T_{MZ} = kk_{OC}(2 + \varepsilon)NN_{OC} + kN + \delta \quad (2.1)$$

ただし、 δ は Z バッファ法以外の処理に要する時間、 k 、 k_{OC} は比例定数とする。

2.3.1 高速化の検討

多重 Z バッファアルゴリズムを高速化する方法として、以下の 2 つの方法を検討した。

OC マスク画像の形状

OC 画像の形状は、レンズ形状の円形物体を投影してできた楕円形の内部領域として求めている (ステップ 8)。この OC マスク画像の形状は、合焦点が光軸から離れるにしたがって楕円形に変形していくが、画角が大きくない場合には、 OC マスク画像の形状はほぼ円形とみなすことができる。

そこで、光軸上の一点で円形の OC マスク画像を求め、合焦点が光軸から離れても同じ OC マスク画像を使用することで高速化を図る。この計算は最終生成画像の画素数 N だけ繰り返されるため、この処理を省くことにより計算時間が短縮し、次式になると期待できる。

$$T_{MZ} = kk_{OC}(1 + \varepsilon)NN_{OC} + kN + \delta \quad (2.2)$$

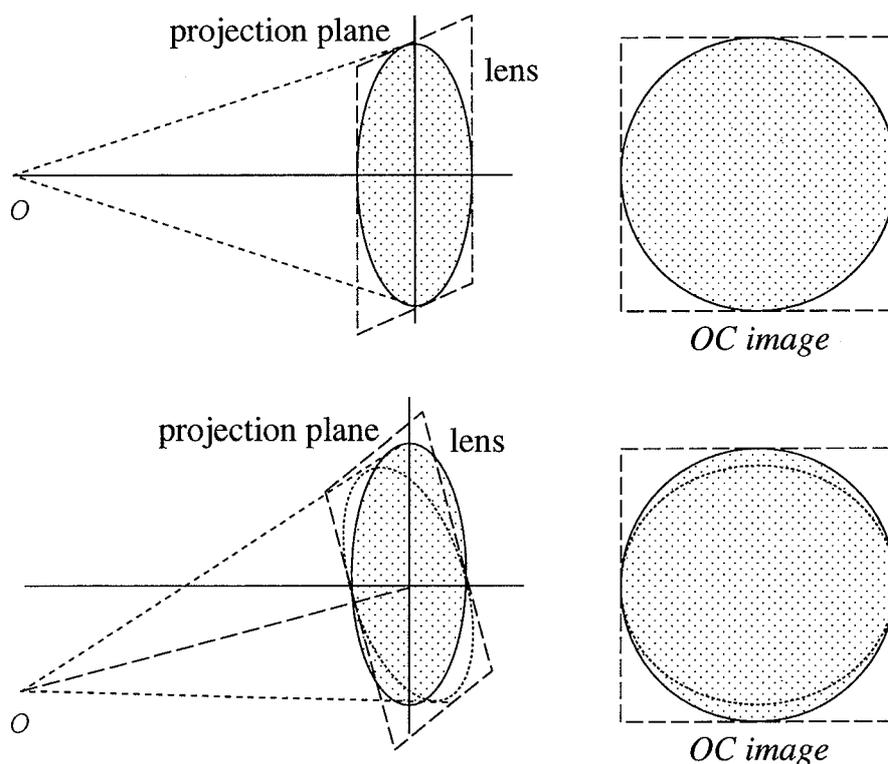


図 2.7: OC マスク画像の作成

OC 画像の画素数 N_{OC}

OC 画像の画素数 N_{OC} を少なくすることにより, 1 回の Z バッファ法の計算時間の短縮が行える. 上記アルゴリズムの処理時間のほとんどは, Z バッファ法による物体の投影に費やされるため, 画素数 N_{OC} を削減することによって OC 画像の作成時間を大幅に短縮することが期待できる. ただし, 画素数を少なくすると, OC 画像においてエアリーシングなどの問題が発生し, 最終生成画像の画質が低下する可能性がある.

2.4 多重ピンホールアルゴリズム

図 2.9 に示すように, 視点位置を少し変えた投影軸が平行なピンホール画像を複数枚作成し加算平均することにより, ぼけを含んだ画像を作成することが可能である. この方法では, 投影面上に物体を投影するときに, 合焦平面での物体が同じ領域に投影される様に, 画像の描画領域を平行移動する. これによって, 合焦平面にある物体はぼけないで, それ以外にある物体はぼける効果を出すことが可能である.

これは, Haeberli が提案した Accumulation Buffer を用いたアンチエアリーシング,

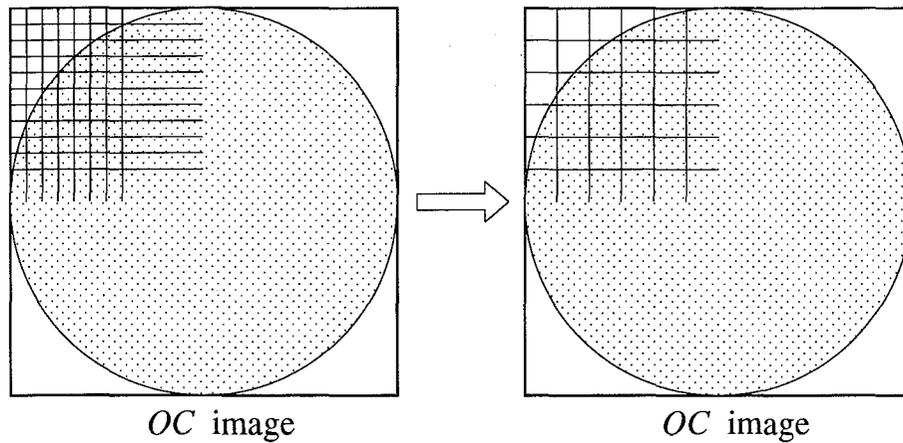


図 2.8: OC 画像の画素数の削減

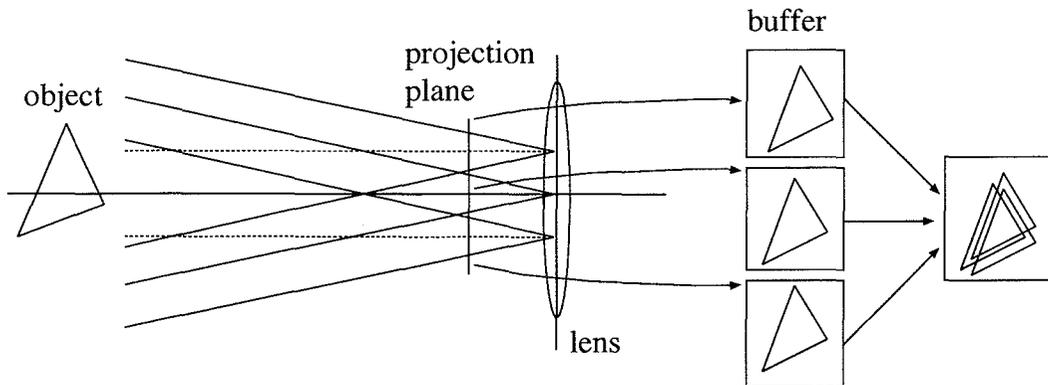


図 2.9: 多重ピンホールアルゴリズム

モーションブラー、被写界深度を表現する方法 [8] の応用として知られるが、実際のカメラモデルとの対比や画像生成時の画角の決定法については議論されていない。以下では、多重ピンホールアルゴリズムによって多重 Z バッファアルゴリズムと等価なぼけ画像が生成できることを示し、画像生成のアルゴリズムについて述べる。

2.4.1 画像のシフト加算による画像生成

図 2.10 に示すように、レンズ中心を原点とし、物体空間を正方向とする光軸上に α 軸、レンズの半径方向に β 軸とする $\alpha - \beta$ 座標を定める。レンズの焦点距離を f とし、 $\alpha = -w$ に撮像面が位置するとする。光軸上の点 $A(a, 0)$ からレンズ上の点 $P(0, d)$ に至る光

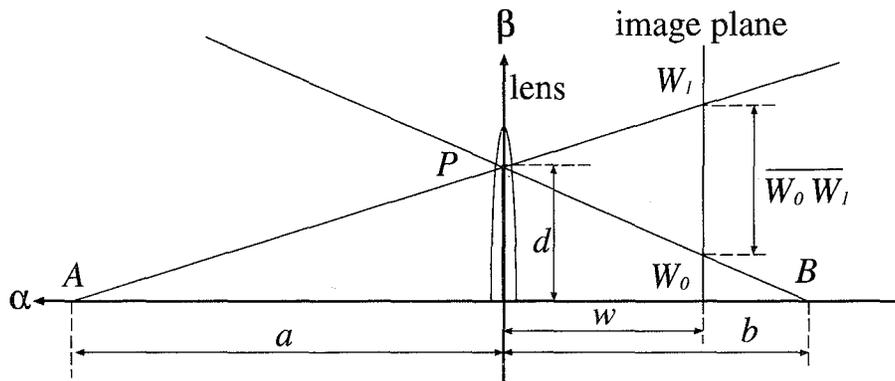


図 2.10: ピンホール画像のシフト加算によるぼけ画像生成

線は，レンズによって屈折し，

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (2.3)$$

を満たす光軸上の点 $B(-b, 0)$ を通過する．この光線は，撮像面上の点 $W_0(-w, -\frac{d}{b}w + d)$ に像を結ぶ．ここで，点 P の位置にピンホールを置き，撮像面上にピンホール画像を生成することを考える．点 A から点 P に入射した光線は直進し，撮像面上の点 $W_1(-w, \frac{d}{a}w + d)$ に像を結ぶ．

したがって， W_0W_1 間の距離は

$$\overline{W_0W_1} = dw \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = \frac{dw}{f} \quad (2.4)$$

となり，ピンホール位置 d と撮像面距離 w ，そして焦点距離 f のみで決まり，点 A の位置に依存しないことが分かる．このことは，シーン中の任意の点からピンホール P に入射する光線が撮像面上に結ぶ像は，一定距離 $\overline{W_0W_1}$ シフトすることによって，レンズによって屈折した光線が撮像面上に結像する位置に一致することを示している．

2.4.2 ピンホール画像の描画領域

多重ピンホールアルゴリズムにおける各ピンホール画像の描画領域は，レンズの中心での画角 (図 2.11 の θ) で表される領域ではなく，図 2.11 の φ で表される描画領域を使用する必要がある．そのため，合焦距離における合焦画像がピンホール位置を変えても，たえず同じ画像となるように Z バッファ法の描画領域を決定する．こうすることにより，合焦点とレンズから作られる円錐の内部を通過する光線すべてが，レンズに入射し撮像面上で結像するようになり，多重 Z バッファアルゴリズムと等価な画像が得られる．

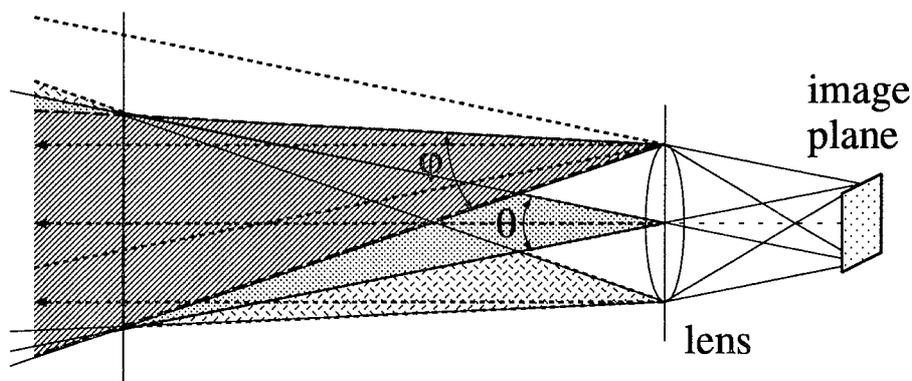


図 2.11: ピンホール画像の描画領域

アルゴリズム

画像生成に必要なパラメータとして、焦点距離 f 、撮像面距離 w 、レンズの口径 d 、1画素の大きさ s を与える。また、最終生成画像の画素数を N 、ピンホール画像の画素数を N_z 、レンズ面のサンプル数を L とする。

1. 最終生成画像の1辺の画素数 \sqrt{N} 、1画素の大きさ s 、撮像面距離 w から合焦距離でのピンホール画像の描画領域を求める。
2. 中間生成画像の数 L_z を 0 に初期化する。
3. レンズ面上のピンホール位置を (ξ, η) とする。

以下の処理をレンズ面のサンプル数 L だけ繰り返す。

4. ピンホール位置 (ξ, η) がレンズ内なら以下の処理を行う。そうでなければ、7 にスキップする。
5. 順Zバッファ法を用いてピンホール位置 (ξ, η) から合焦画像方向を見た画素数 N_z の中間生成画像を作成する。
6. ピンホール画像を加算し、中間生成画像数 L_z を 1 増やす。
7. 新たな画素位置 (ξ, η) を与え 4 に戻る。
8. 加算した画像を中間生成画像の数 L_z で割り、最終生成画像を得る。

この手法において、Zバッファ法を適用する回数は L_z 回となる。ここで、中間生成画像の数 L_z は、

$$L_z = \frac{\pi}{4} L \quad (2.5)$$

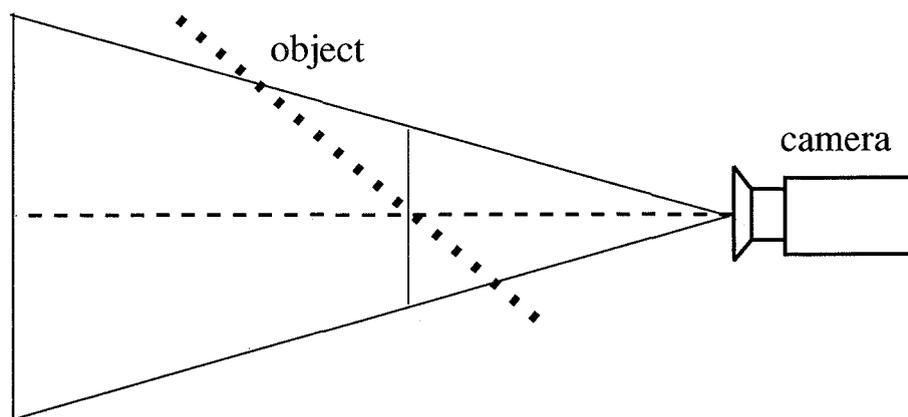


図 2.12: シーン設定

となる．これに，Zバッファ法の計算時間が生成する画像の画素数 N_z に比例すると仮定すると，全体の計算時間 T_{MP} は次式で表される．

$$T_{MP} = k_z L_z N_z + \delta \quad (2.6)$$

2.5 計算時間と画質の評価

画像生成には，完全拡散面で構成された短冊状の物体を左から右に順番に距離が遠くなるように配置したシーンを設定した．物体数は20個とし，生成する画像の解像度は 200^2 画素とした．ズーム，絞りは固定とし，フォーカスを段階的に変化させた画像を作成した(図 2.13)．画像生成には，SGI社 O2 (CPU R10000, クロック 250MHZ, メモリ 256MB, OS IRIX 6.3) を使用した．

2.5.1 多重 Z バッファアルゴリズム

OC マスク画像の形状

OC マスク画像の形状を円形に固定し作成した画像は，1点ごとに OC マスク画像の形状を求める手法と比較して，画像の輝度値のレベルでは全く変化がなかった．これは，作成した画像の画角が小さいため，合焦点が比較的光軸に近く歪みが小さかったことが考えられる．OC マスク画像を円形に固定することによって最終画像の生成時間は，投影面の画素が $N_{OC} = 80^2$ のとき 156 秒から 119 秒に短縮した．

OC 画像の画素数 N_{OC}

OC 画像の画素数 $N_{OC} = 100^2$ の時の画像を基準とし， N_{OC} を変えたときの画像との差分をとった例を図 2.14 に示す．ここでは，画像で差を確認するため差分画像のコント

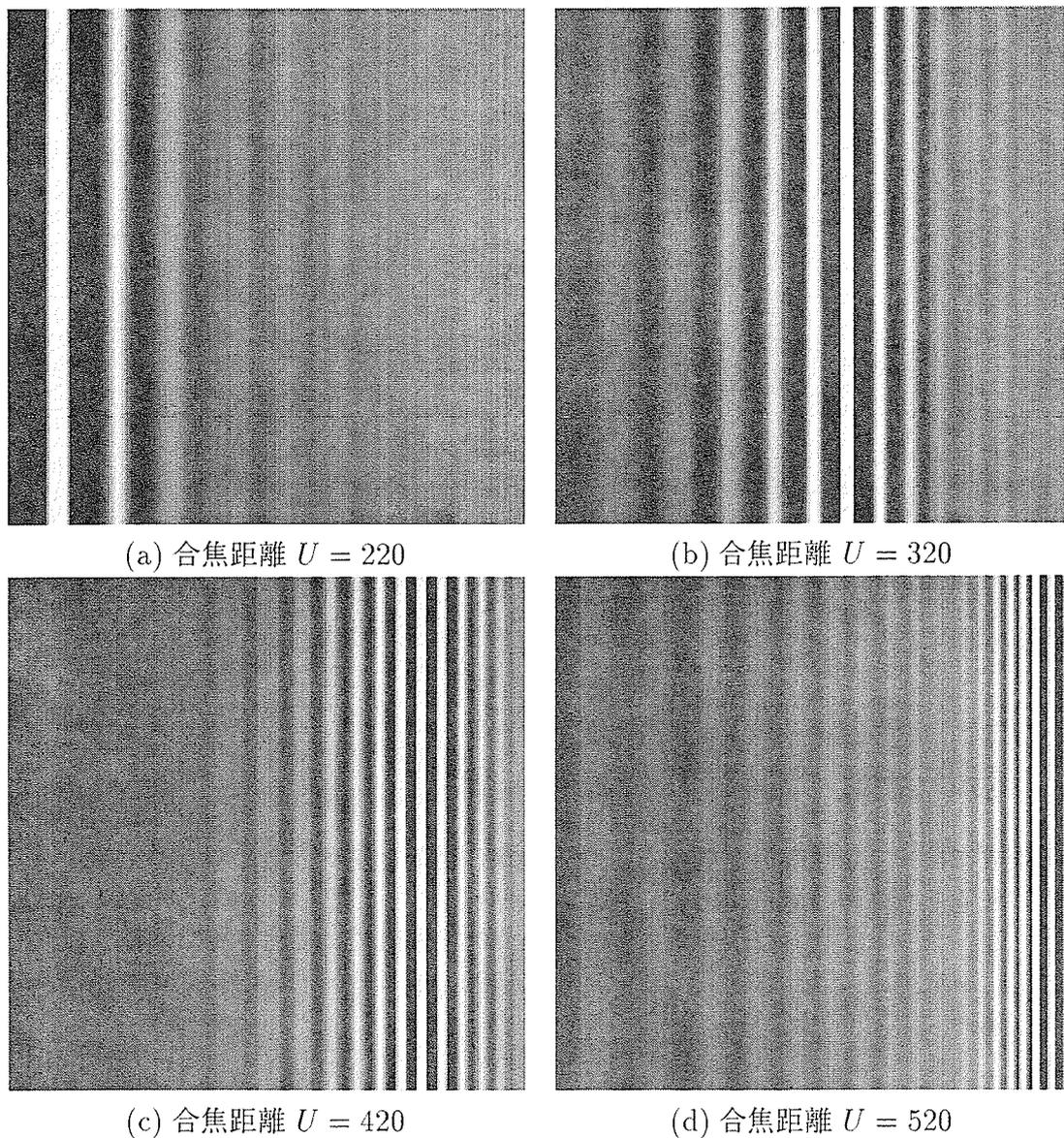
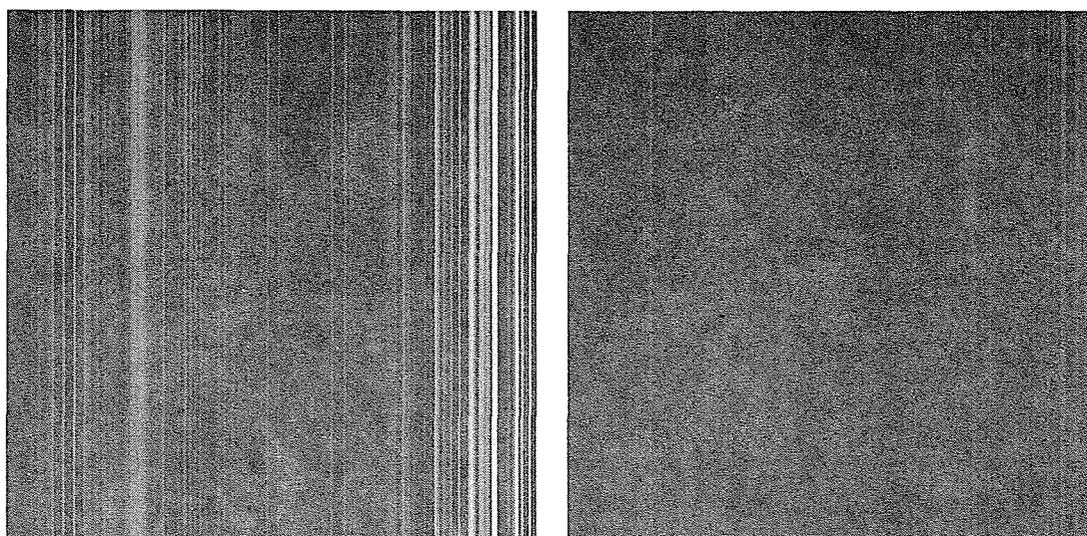
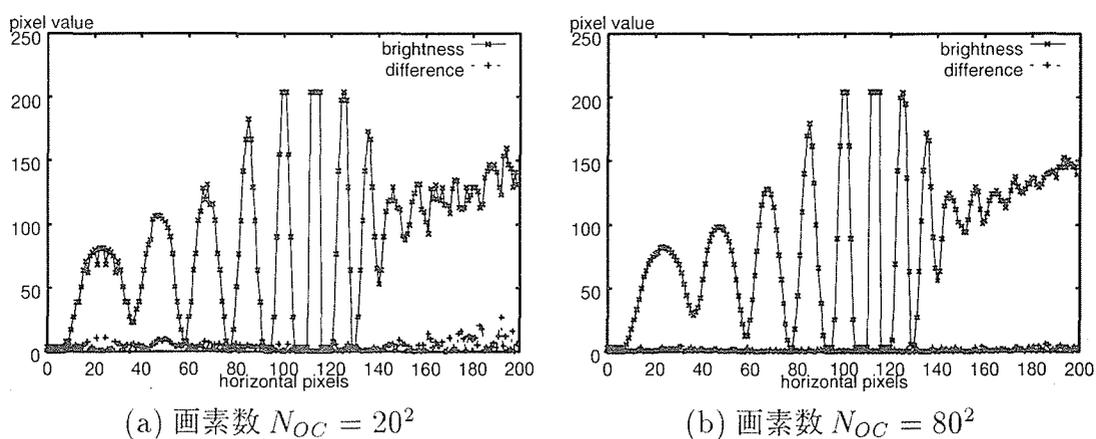


図 2.13: 生成画像の例

ラストは10倍にあげている．また，画像の横方向での明度プロファイルと $N_{OC} = 100^2$ の時の画像との差のプロファイルを図 2.15 に示す．ここで，横軸は画像の水平画素位置を表す．画質に関しては， N_{OC} を少なくすると，生成画像上では縦の縞のようなものが見える．これを明度プロファイルで見ると， N_{OC} が多い時は明度はなだらかに変化しているが， N_{OC} を少なくすると凹凸が目立つようになり明度差も大きくなっている．

N_{OC} を少なくすると計算時間は短くなるが，最終生成画像の画質が低下する． N_{OC} を変えた時の計算時間の変化と差の平均値を図 2.16 に示す．ただし，縦軸は左側が明度値の差の平均値，右側が計算時間を表し，横軸は N_{OC} を表す．計算時間は， N_{OC} に対し

(a) 画素数 $N_{OC} = 20^2$ (b) 画素数 $N_{OC} = 80^2$ 図 2.14: 画素数 $N_{OC} = 100^2$ の画像との差分(a) 画素数 $N_{OC} = 20^2$ (b) 画素数 $N_{OC} = 80^2$ 図 2.15: $U = 320$ の時の N_{OC} の変化による画質の変化

てほぼ線形に増加しているが、差の平均値は $N_{OC} = 50^2$ までは急激に減少し、その後なだらかに変化してほぼ1に収束している。

2.5.2 多重ピンホールアルゴリズム

多重Zバッファアルゴリズムと同じシーン設定で、多重ピンホールアルゴリズムでもフォーカスを変化させて複数の画像を作成し、同様な画像が作成できることを確認した。

多重ピンホールアルゴリズムでもレンズ面のサンプル数 L を少なくすると画像作成に

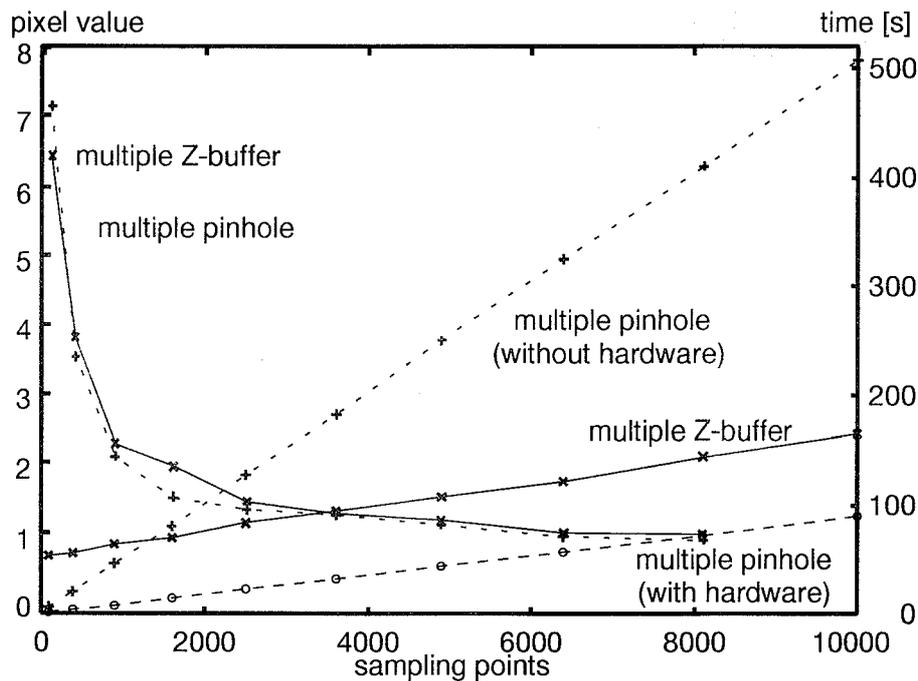


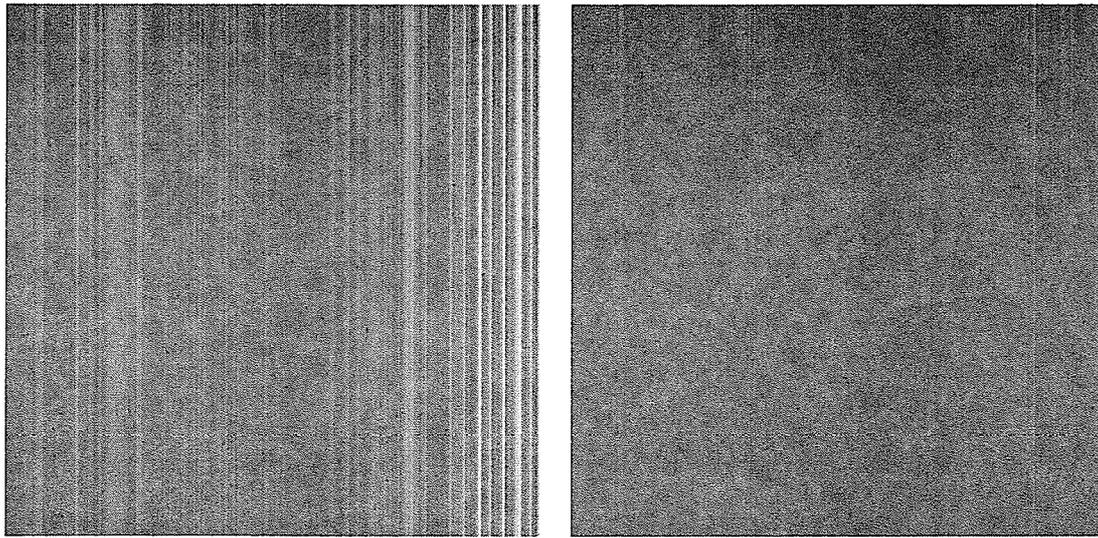
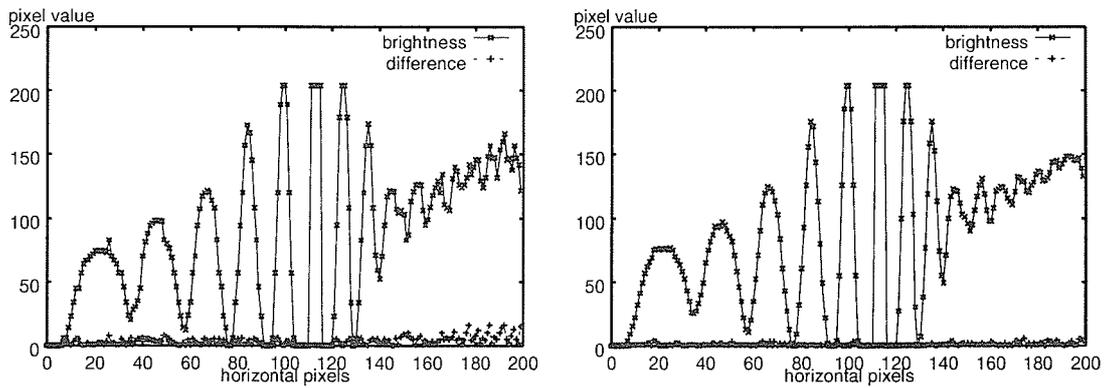
図 2.16: 計算時間と誤差の変化

要する時間は短くなるが、最終生成画像の画質が低下する。 L を変えた時の計算時間の变化と誤差の平均値の変化を図 2.16 に示す。ただし、縦軸は左側が明度値の差の平均値、右側が計算時間を表し、横軸は加算画像の数 L を表す。画像生成に要する時間は、 L に対してほぼ線形に増加している。差の平均値は $L = 50^2$ までは急激に減少し、その後なだらかに変化してほぼ 1 に収束している。

また、accumulation buffer の効果を確認するために、加算枚数を変化させたときの計算時間の变化を調べた。使用した計算機では、126 枚の加算までハードウェアで行うことが可能であり、それ以上の加算はソフトウェアで実行している。図 2.19 の横軸はハードウェアによる加算枚数を表し、縦軸は計算時間を表している。グラフから画像の加算枚数が 16 枚以上になれば、4 倍以上の高速化が可能であることが分かる。

2.5.3 考察

多重 Z バッファアルゴリズムは、最終生成画像の 1 点ごとにシーンからその点に至るすべての光線のエネルギーを加算するのに対して、多重ピンホールアルゴリズムでは、レンズ面に設定したピンホール点ごとにシーンから到達する光線を求め、最後に最終生成画像の 1 点に至る光線エネルギーの加算を行っている。したがって、シーンから見たレンズ面を円形に近似できる場合 (望遠レンズの場合) には、両者の結果は一致するはずである。

(a) サンプル数 $L = 20^2$ (b) サンプル数 $L = 80^2$ 図 2.17: 加算画像数 $L = 100^2$ の画像との差分(a) サンプル数 $L = 20^2$ (b) サンプル数 $L = 80^2$ 図 2.18: $U = 320$ の時の L の変化による画質の変化

しかし、今回行った実験では、計算上の誤差のために同じ画質と判断できる画像が得られなかった。そこで、多重ZバッファアルゴリズムのOC画像の画素数 N_{OC} と多重ピンホールアルゴリズムのレンズ面のピンホール数 L は、いずれもレンズ面のサンプル数に相当するため、 N_{OC} と L をパラメータとして両者の比較を行った。その結果、 N_{OC} と L を増加させた時の誤差の減少はほぼ同じ傾向を示し、誤差を少なくし 200^2 画素の最終生成画像でなめらかな輝度変化の画像を得るには、両手法とも 50^2 以上の N_{OC} や L を用いなければならないことが分った。なお、 $N_{OC} = L = 50^2$ のときの計算時間は、多重

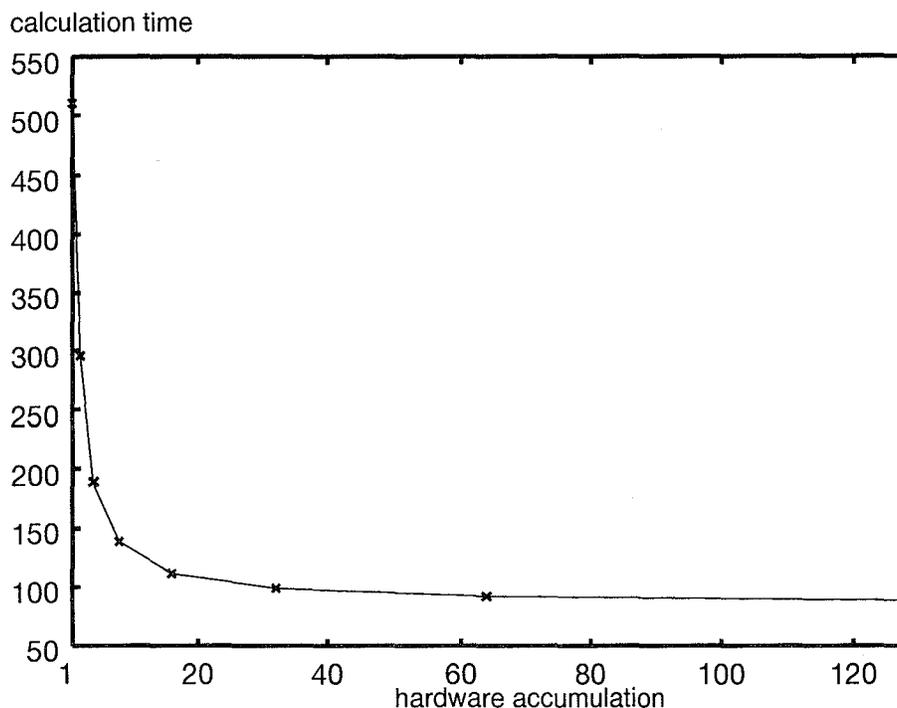


図 2.19: Accumulation Buffer の効果

Zバッファアルゴリズムが84秒， accumulation buffer を使用しない多重ピンホールアルゴリズムが128秒， accumulation buffer を使用した多重ピンホールアルゴリズムが23秒であった。

このように今回の実験では，多重Zバッファアルゴリズムの N_{OC} と多重ピンホールアルゴリズムの L が同じ値の場合には， accumulation buffer を使用した多重ピンホールアルゴリズムの方が高速であることが分かった。しかし，これは accumulation buffer によるハードウェア加算の効果が大いと思われる。さらに，今回の実験ではレンズの望遠側の設定を使用したことも，シーンから見たレンズ面を円形に固定している多重ピンホールアルゴリズムに有利な結果が得られたと考えられる。また，計算時間に影響するその他の要因としては，最終生成画像の画素数，仮想物体の物体数，テクスチャの有無などが考えられ，今後これらの要因も含めて総合的な比較を行うことが必要である。

2.6 まとめ

本論文では， Calibrated Computer Graphics のための画像生成手法の高速化について述べた。まず，多重Zバッファアルゴリズムの高速化に関する検討を行い， OC マスク画像の形状の固定と， OC 画像の画素数 N_{OC} を変化させる効果について述べた。また，多重ピンホールアルゴリズムを用いることに関して，その妥当性を検討し，画像作成の時

間に関する加算画像数に関する検討を行った。

今後は、両手法を比較する画質の評価基準について検討を加え、多様なシーン設定(表示する仮想物体数やテクスチャの有無)における性能比較を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Potmesil, I. Chakravaty: “A lens and aperture camera model for sythetic image generation”, Proceedings of SIGGRAPH '81, pp.297–305, 1981.
- [2] R.L.Cook: “Distributed ray tracing”, Proceedings of SIGGRAPH '84, pp.137–145, 1984.
- [3] C. Kolb, D. Mitchell, P. Hanrahan: “A realistic camera model for computer graphics”, Proceedings of SIGGRAPH '95, pp.317–324, 1995.
- [4] 馬場 雅志, 浅田 尚紀, 天野 晃: “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 –”, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.7, pp.2180–2188, 1998.
- [5] 馬場 雅志, 浅田 尚紀, 迫田 肇, 天野 晃, 青山 正人: “ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを用いた Calibrated Computer Graphics”, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム, pp.67–72, 1998.
- [6] 馬場 雅志, 天野 晃, 青山 正人, 浅田 尚紀: “Calibrated Computer Graphics のためのズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデル”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU '98) 論文集, pp.II47–II52, 1998.
- [7] 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.
- [8] P. Haeberli, K. Akeley: “The Accumulation Buffer: Hardware Support for High-Quality Rendering”, Proceedings of SIGGRAPH '90, pp.309–318, 1990.

第 3 章

Calibrated Computer Graphics のためのズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデル

3.1 はじめに

計算機性能の飛躍的な向上と高速通信技術の発展によって画像メディアの応用範囲が急速に広がり、コンピュータビジョン (CV) とコンピュータグラフィックス (CG) を融合した新たな画像メディア研究への期待が高まっている [1]。我々は、CV と CG に共通する技術要素であるカメラモデルに着目し、カメラキャリブレーションに基づいて高品質な画像の生成・合成を行う Calibrated Computer Graphics (CCG) の研究を進めている [2]。

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、実写画像を撮影したシーンの状況 (照明と物体の幾何学および光学的特性) と実カメラの特性に基づいて CG 画像を生成し、実写画像と合成する必要がある。照明のキャリブレーションに基づく画像合成については佐藤ら [3] の報告があるが、任意のシーンにおいて照明や物体のキャリブレーションを事前実施することは必ずしも容易なことではない。これに対して、カメラは画像生成に必要な特性をモデル化しキャリブレーションを事前に行うことが可能である。そこで本論文では、高品質な画像の生成と合成を行うためのカメラモデルとキャリブレーションについて述べる。

文献 [2] では、フォーカスカメラモデル [11] を用いて実カメラのキャリブレーションを行い、実写画像と CG 画像を合成して任意のフォーカス設定の画像を作成する方法について述べた。しかし、一般にはオートフォーカスやオートアイリスによってシーンの変化に応じて複数のカメラパラメータが変化し、また必要に応じてズームを変化するなど、ズーム、フォーカス、アイリスを協調的、適応的に変化しながら撮影することが多い。したがって、これらのパラメータを自由に操作した実写画像を利用したり CG 画像を生成するには、3 種類のカメラパラメータを統一的に記述するカメラモデルが必要となる。

従来から CV では、画像解析のためのカメラモデルとキャリブレーションについては盛んに議論されてきた [4][5] が、その多くは単一のパラメータ変化を記述するものであった。一方、CG では画像生成の観点からズーム、フォーカス、アイリスのカメラモデルが議論されている [6] が、カメラキャリブレーションに基づく画像生成とカメラモデルの検証は行われていない。本論文では、実カメラの特性に基づいてズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを構成し、そのキャリブレーション、統合カメラモデルを用いた画像生成、実写画像との比較によるカメラモデルの検証、そして実写画像との合成について述べる。

3.2 統合カメラモデル

3.2.1 実パラメータの性質

カメラパラメータとしてレンズのズーム、フォーカス、アイリスを考える。これらの実パラメータの性質を整理すると以下ようになる。

ズーム：(性質ア) 画角が変化し、広角から望遠まで任意の倍率の画像を撮影することができる。

(性質イ) 画像の明るさは変化しない。

(性質ウ) ピントがずれない。

フォーカス：(性質エ) ピントを調節することができ、任意の距離の合焦画像を得ることができる。

(性質オ) 画角が変化し、ぼけの変化と同時に画像の倍率が変化する。

アイリス：(性質カ) 入射光量に変化し、画像の明度を調節することができる。

(性質キ) 被写界深度が変化する。

3.2.2 統合カメラモデルの性質

上記の性質を考慮して、薄凸レンズモデルを用いて統合カメラモデルを構成する(図 3.1)。実パラメータは、最も広角時を基準としたズームリングの回転角 $Z[\text{rad}]$ をズーム値、無限遠合焦時を基準としたフォーカスリングの回転角 $F[\text{rad}]$ をフォーカス値、絞り開放時を基準としたアイリスリングの回転ステップ数 $I[\text{step}]$ をアイリス値とする。一方、レンズパラメータとして焦点距離 $f[\text{mm}]$ 、合焦距離 $u[\text{mm}]$ 、絞り値(F ナンバー) A を使用し、モデルパラメータとしてレンズの有効開口径 $d[\text{mm}]$ 、有効焦点距離(レンズと撮像面間の距離) $w[\text{mm}]$ 、有効 F ナンバー $B (= w/d)$ を用いる。

(性質 1) 合焦時にはレンズの公式が成立する(性質エ)。

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

ただし、 u は距離基準位置 R から物体までの距離、 v はレンズ中心 C から撮像面までの距離を表す。 R については後述する。

(性質 2) フォーカス値 F に対してレンズと撮像面間の距離 w が変化する(性質オ)。(3.1)

式から無限遠に合焦した時($F = 0$)には $v = f$ となるので、 F に対して w の増分 $w - f$ が線形に変化するレンズでは、 α を比例定数として

$$w = f + \alpha F \quad (3.2)$$

と表すことができる [11]。

(性質 3) ズーム値 Z に対して焦点距離 f が変化する(性質ア)。

(性質 4) ズーム値 Z に対して有効 F ナンバー B が一定となるように有効開口径 d が変化する(性質イ)。

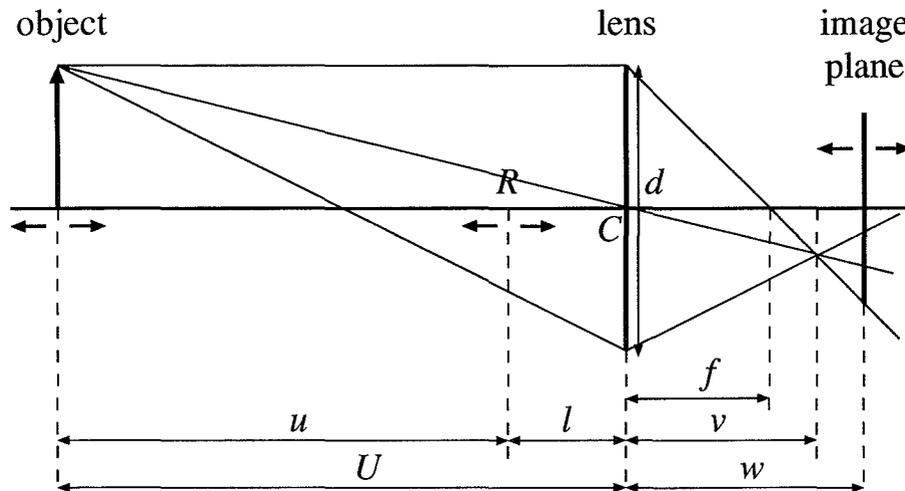


図 3.1: 統合カメラモデル

(性質5) ズーム値 Z , すなわち焦点距離 f を変化させてもピントがずれないように, f の変化に対してレンズの公式を満たすように有効焦点距離 w が連動する (性質ウ).

(性質6) アイリス値 I に対して有効開口径 d が変化する (性質カ) (性質キ).

従来のピンホールカメラモデル [7] は (性質1) において常に $v = f$ が成立すると考え, ズームカメラモデル [8] はその焦点距離 f が変化すると考えたものであり, いずれも常に合焦画像が得られるとしたカメラモデルである. 一方, レンズのぼけ効果を考慮したアイリスカメラモデル [9][10] は (性質1)(性質6) を満たし, フォーカスカメラモデル [11] は (性質1)(性質2)(性質6) を満たしている. これに対して統合カメラモデルは, フォーカス (性質1), ズーム (性質3), アイリス (性質6) の基本的性質に加えて, フォーカスによる画角変化 (性質2), ズームと有効開口径の関係 (性質4), ズームと有効焦点距離の関係 (性質5) のすべての性質を記述することができる.

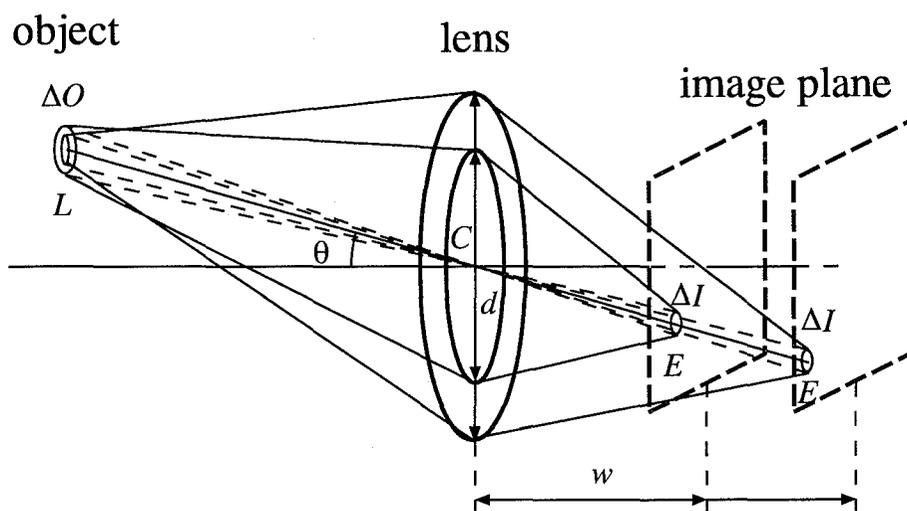
3.2.3 ズームと有効焦点距離 w の関係

合焦画像が得られている時, (3.1) 式から

$$v = f + \frac{f^2}{u - f} \quad (3.3)$$

が成立する. $\frac{1}{u - f}$ は u と f の変化範囲を考慮して f の多項式 $\alpha(f)$ で近似すると,

$$v = f + f^2\alpha(f) \quad (3.4)$$

図 3.2: ズームと有効開口径 d の関係

となり, (3.2) 式を考慮して有効焦点距離 w を

$$w = f + f^2 \alpha(f) F \quad (3.5)$$

と表す. 合焦時には

$$u = f + \frac{1}{\alpha(f) F} \quad (3.6)$$

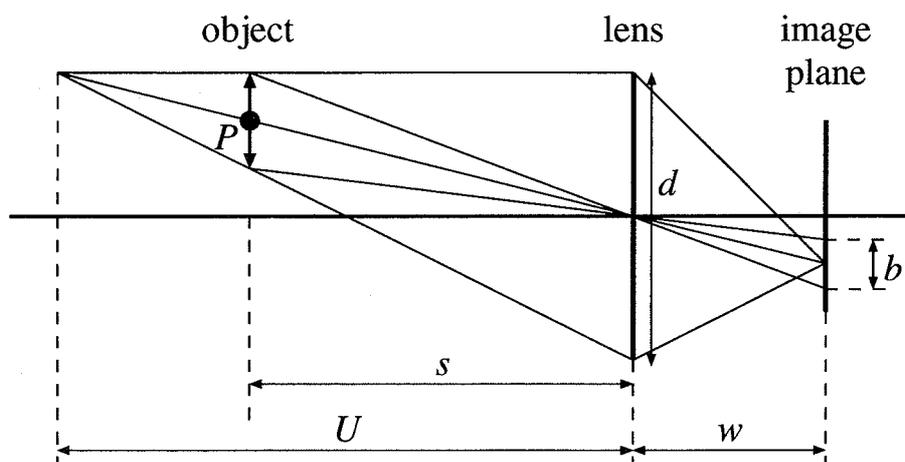
が成立し, レンズの公式における合焦距離 u はフォーカス値 F だけでなく焦点距離 f によっても変化する. しかし(性質5)を満足するには, 合焦距離は焦点距離の影響を受けないようにする必要がある. そこで, カメラモデルの基準位置をレンズ中心 C とし, レンズから物体側に距離 l だけ離れた点を距離基準位置 R とする. そして $U (= u + l)$ がカメラモデルから物体までの合焦距離を表すと考える (図 3.1).

3.2.4 ズームと有効開口径 d の関係

図 3.2において, 放射輝度 L の物体の微小領域 ΔO からの光がレンズによって撮像面上の微小領域 ΔI に結像したときの放射照度 E は, 入射光が光軸となす角を θ とすると

$$E = L \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{w} \right)^2 \cos^4 \theta \quad (3.7)$$

と表される [13]. この式は有効開口径 d が $\sqrt{2}$ 倍になると入射光量が2倍になり, 画像の明度が2倍になることを示している. 一方, ズームの変化によって焦点距離 f が変化し (3.5) 式から w が変化するので, (性質イ)を満たすには有効 F ナンバー $B (= w/d)$ が一定となるように有効焦点距離 w に対して有効開口径 d が変化する必要がある (性質4).

図 3.3: ズームとぼけ幅 b の関係

ズームに連動して有効開口径が変化するという性質は、同時に被写界深度が変化すること意味している。すなわち、画像上ではズームによる倍率変化と被写界深度のぼけ変化の両方の効果が観測されることになる。図 3.3においてレンズから距離 s の位置にある非焦点の点 P の像の画像上のぼけ幅 b は

$$b = wd \left| \frac{1}{s} - \frac{1}{U} \right| \quad (3.8)$$

と表される。この式は、ズームの変化に対してぼけ幅 b が有効焦点距離の 2 乗 w^2 に比例することを示している。

3.3 カメラキャリブレーション

3 板式 CCD カメラ SONY XC-007 および ズームレンズ FUJINON A16×9BRM-28 を用いて統合カメラモデルのキャリブレーションを行った。レンズの光学的特性を表 3.1 に示す。実験にはズーム変化に対して有効 F ナンバーが一定となる焦点距離 $f = 100\text{mm}$ 以下を使用した。カメラからの画像出力は、nexus600 で A/D 変換し、RGB 成分が各 8 ビット、画像サイズが 512×480 、正画素のデジタル画像を得た。

3.3.1 実パラメータとモデルパラメータの関係

ズーム値 Z とレンズの焦点距離目盛 f の関係

$$f = 6.0e^{2.0Z} \quad (0.0 \leq Z \leq 1.6) \quad (3.9)$$

表 3.1: レンズの光学的特性

| | |
|------|--|
| 焦点距離 | 9mm - 144mm |
| 合焦距離 | 0.9m - ∞ |
| 絞り | 1.8 - close (焦点距離 9mm - 116mm) 2.3 - close (焦点距離 144mm) |

フォーカス値 F とレンズの合焦距離目盛 U の関係

$$U = 6.84 + \frac{2.13 \times 10^3}{F} \quad (0.0 \leq F \leq 2.5) \quad (3.10)$$

アイリス値 I とレンズの絞り値目盛 A の関係

$$A = \sqrt{2}^{(0.233I+1)} \quad (0 \leq I \leq 30) \quad (3.11)$$

3.3.2 画像中心

一辺が 153mm の正方形の頂点と辺の中央の合計 8 個所に直径 13mm の黒点を配置した平面对象物をレンズの光軸に対してほぼ垂直になるように置き、ズーム値 Z (焦点距離 $f=9, 18, 27, 35, 50, 70, 86\text{mm}$) のそれぞれに対しフォーカス値 F (合焦距離 $U=\infty, 10000, 5000, 3333, 3000, 2501, 2000\text{mm}$) のキャリブレーション画像を合計 49 枚を撮影した。なお、絞り値は $A = 2.8$ とした。これらのズームおよびフォーカスを変化させた画像系列における黒点の軌跡から光軸座標を求めた結果 (239,243) が得られた。

3.3.3 有効焦点距離 w

無限遠に合焦した時の像の大きさを基準として、フォーカス値 F とフォーカス拡大率 M_{focus} の関係を求めると、(3.5) 式から

$$M_{focus} = 1 + f\alpha(f)F \quad (3.12)$$

が得られる。したがって、フォーカス拡大率は F に対して線形に変化し、その傾きは焦点距離 f によって変化する。一方、焦点距離 f とズーム拡大率 M_{zoom} の関係は、 f_0 における像を基準として

$$M_{zoom} = \frac{f + f^2\alpha(f)F}{f_0 + f_0^2\alpha(f_0)F} \quad (3.13)$$

と表される。

キャリブレーション画像から F と M_{focus} の関係を求めた結果、図 3.4 に示すようにほぼ線形に変化することが分かり、(3.12) 式の関係を確認することができた。さらに、フォー

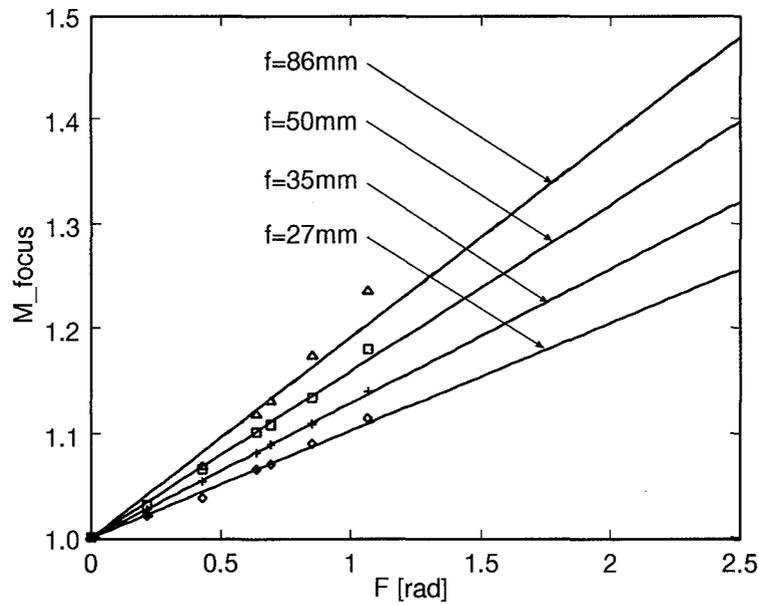


図 3.4: フォーカス値 F と拡大率 M_{focus} の関係

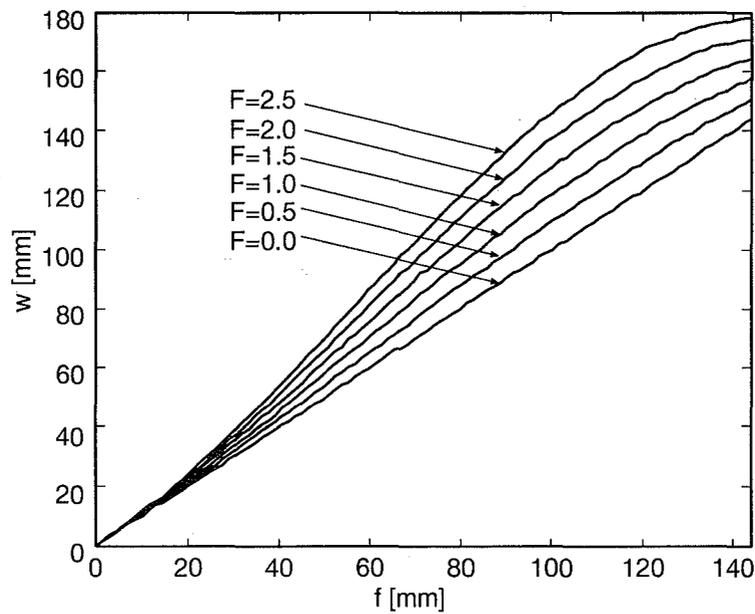
カス拡大率の変化率 $f\alpha(f)$ から f と $\alpha(f)$ の関係を求めた結果、 $\alpha(f)$ は f の 1 次式で近似できることが分かった。以上のことから、有効焦点距離 w として

$$w = f + f^2(4.55 \times 10^{-3} - 2.70 \times 10^{-5} f)F \quad (3.14)$$

が得られた。この式は、焦点距離 $f = 86\text{mm}$ を基準とするズーム拡大率 M_{zoom} の実験結果とよく一致し、(3.14) 式がズーム・フォーカスと有効焦点距離の関係をほぼ正確に記述していることを確認した。図 3.5 に焦点距離 f と有効焦点距離 w の関係を示す。この図から、 w はフォーカスの合焦距離を近距離に設定するほど値が増加するが、 $f=100\text{mm}$ 以下の範囲ではほぼ線形に変化していることが分かる。なお、画像の拡大率から求めた 1 画素のサイズ β は $1.32 \times 10^{-2}[\text{mm}]$ であった。これはカメラおよび A/D 変換の仕様から求めた画素サイズ ($1.34 \times 10^{-2}[\text{mm}]$) とほぼ一致する値であった。

3.3.4 有効開口径 d

レンズ前面に白色アクリル板を置いて一様白色シーンを設定し、ズーム、フォーカス、アイリスを変化させて撮影した画像の中央部の明度変化を調べた。ズーム、フォーカスの変化に対して明度変化はほとんどなく、アイリスについては明度が絞り値 A の 2 乗に反比例することを確認した。このことは、(3.7) 式の有効 F ナンバー $B (= w/d)$ が絞り値 (F ナンバー) A に比例し ($A \propto B$)、さらに有効開口径 d が絞り値 A に反比例する ($d \propto A^{-1}$) ことを示している。

図 3.5: 焦点距離 f と有効焦点距離 w の関係

次に、1本の糸をレンズから距離 $s=0.7\text{m}$ の位置に配置し、絞り値を $A=2.8$ に固定して異なるフォーカス設定 (合焦点距離 $U=0.9\text{m}, 1.5\text{m}$) でズームを変化して画像を撮影した。糸の幅を h 、画像上の糸のぼけ像の画素数を H とし、(3.8) 式を用いると w と d の関係は次式で表される。

$$d = \left(\frac{\beta H}{w} - \frac{h}{s} \right) \left| \frac{1}{s} - \frac{1}{U} \right|^{-1} \quad (3.15)$$

この式に基づいて糸の像のぼけ幅から w と d の関係を調べた結果、図 3.6 が得られた。異なるフォーカス設定から求めた有効開口径 d はほぼ一致し、最小 2 乗法によって

$$d = 1.88 \times 10^{-1} w \quad (3.16)$$

が得られた (図中の破線)。これは、有効 F ナンバーは $B = 5.32$ であり、レンズの F ナンバー (絞り値) $A = 2.8$ との比は $B/A = 1.9$ であることを示している。以上の結果から、有効開口径 d は絞り値 A と有効焦点距離 w を用いて

$$d = 5.26 \times 10^{-1} w A^{-1} \quad (3.17)$$

と表されることが分った。

3.4 統合カメラモデルを用いた画像生成

画像の生成には、逆投影ぼけモデル [14] に基づく多重 Z バッファアルゴリズム [12] を統合カメラモデルに適用した。これは、撮像面上の 1 点に結像する光はシーン中の 1 点

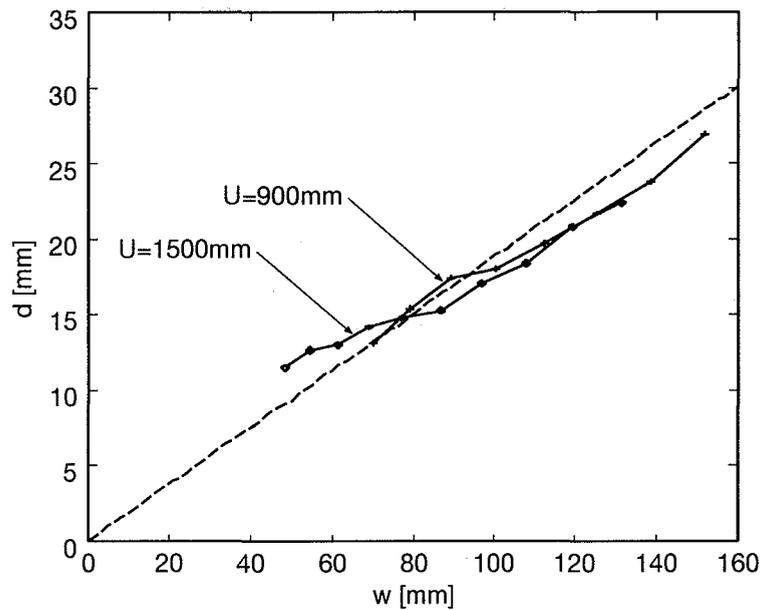


図 3.6: 有効焦点距離 w と有効開口径 d の関係

(合焦点) を必ず通過するという特徴に着目し, その合焦点からレンズ方向とレンズと反対方向に Z バッファ法を用いることにより撮像面上の 1 点の明度を求める方法である.

3.4.1 実写画像と生成画像の比較

暗幕を背景とする 1 本の鉛直の糸 (白色) のシーンを設定し, 実写画像と生成画像の比較を行った. ズーム, フォーカス, アイリスの相互関係が現れるように, 糸の像がぼけを含むようにして実写画像を撮影した. 撮影時の実パラメータの値と上記のキャリブレーション結果を用いて同一シーンの CG 画像を生成し, 両者の明度プロファイルと比較した. ズーム変化による糸の像のぼけ変化を比較した明度プロファイルを図 3.7 に示す. このシーンでは, ズーム変化による (ズーム → 有効焦点距離 → 拡大率) の変化と (ズーム → 有効焦点距離 → 有効開口径 → 被写界深度) の変化の相乗効果が生じているが, 両者のプロファイルはほぼ一致することが分かった. 他のパラメータについても同様の結果が得られ, 統合カメラモデルの妥当性とキャリブレーションの精度を確認することができた.

3.4.2 実写画像と仮想物体の合成

統合カメラモデルを用いて実写画像と仮想物体の合成画像を作成した. キャリブレーションしたカメラで撮影した動物と花壇の 2 枚の実写画像を用意し, それらを撮影時のカメラパラメータに基づいて仮想空間内に平面テクスチャとして配置した. そして, 動物

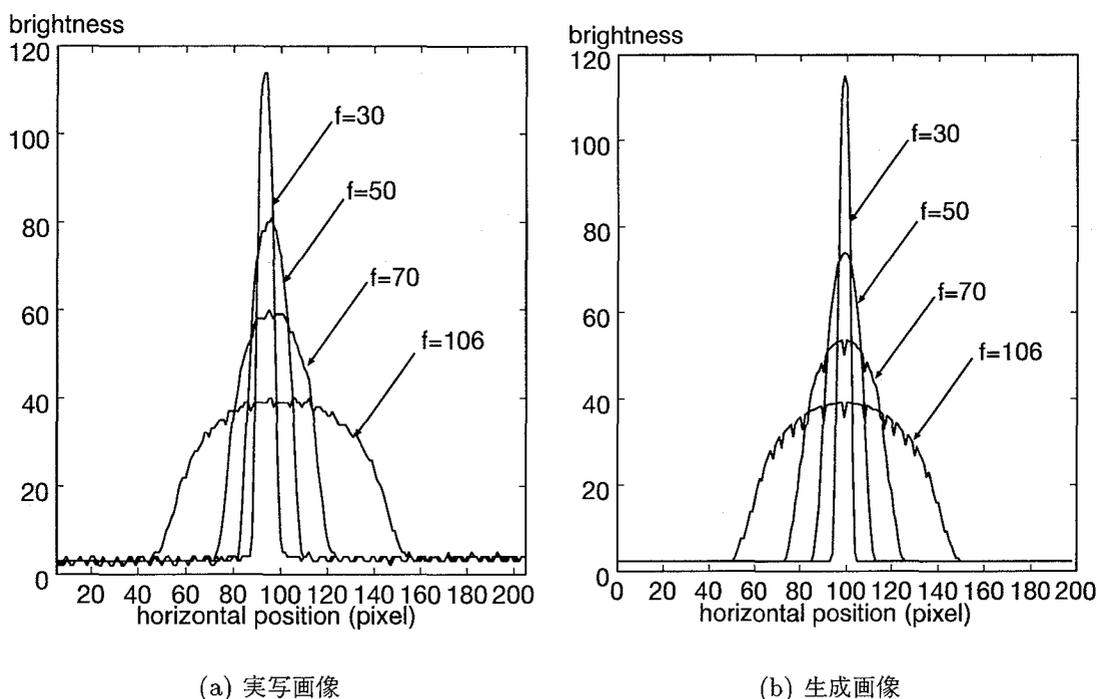


図 3.7: 糸の明度プロファイル (ズームの変化)

の回りに仮想的な檻 (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。

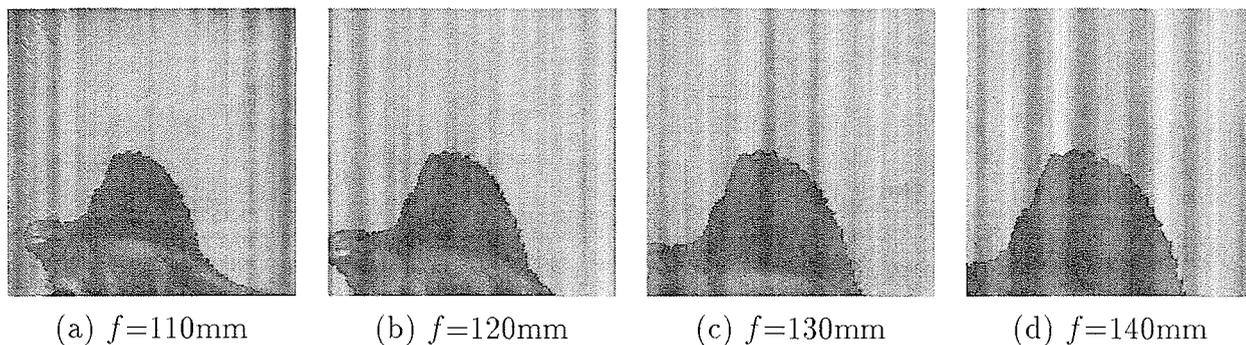
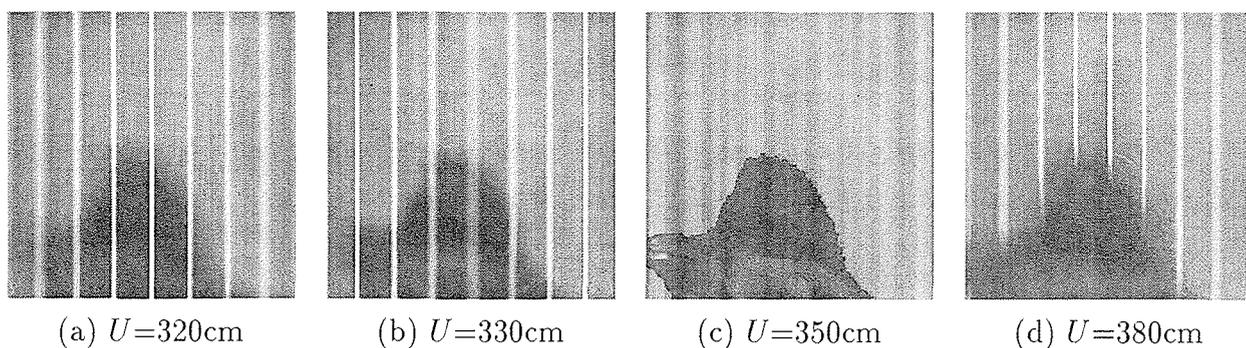
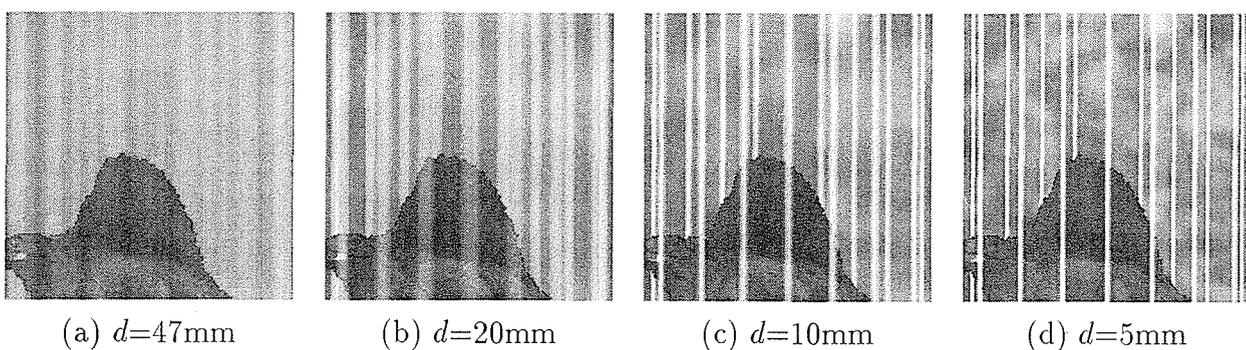
図 3.8, 3.9, 3.10 にズーム, フォーカス, アイリスを変化して作成した画像の一部を示す。図 3.8 は動物が合焦するように設定し, 図 3.9(a) はフォーカスを手前の檻が合焦するように設定したものである。図 3.10(d) はアイリスによって被写界深度が変化し, 動物の手前の檻から後ろの檻までが合焦している状態を表している。なお, 実カメラではアイリスを変化すると画像の明度と被写界深度が同時に変化するが, 統合カメラモデルでは明度と被写界深度を連動させることも別々に変化することも可能である。図 3.10 は, 明度を変化させずに被写界深度のみを変化した例である。

3.5 まとめ

本論文では, カメラキャリブレーションに基づく画像生成のためのカメラモデルとして, ズーム, フォーカス, アイリスを統一的に記述する統合カメラモデルを提案し, そのキャリブレーションについて述べた。まず, 制御可能な実パラメータとしてズーム値 Z , フォーカス値 F , アイリス値 I を用いてレンズパラメータである焦点距離 f , 合焦距離 U , 絞り値 A の関係を求め, 次にこれらを用いてモデルパラメータである有効焦点距離 w , 有効開口径 d を記述した。これらの各種パラメータの依存関係を整理すると表 3.2 のようになる。

表 3.2: 各種パラメータの依存関係

| 実パラメータ | ズーム値 Z | フォーカス値 F | アイリス値 I |
|----------|---|------------------------------|----------------------------|
| レンズパラメータ | 焦点距離 $f(Z) \cdots (3.9)$ 式 | 合焦点距離 $U(F) \cdots (3.10)$ 式 | 絞り値 $A(I) \cdots (3.11)$ 式 |
| モデルパラメータ | 有効焦点距離 $w(f, F) \cdots (3.14)$ 式 | | |
| | 有効開口径 $d(w, A) \cdots (3.17)$ 式 | | |
| | 有効 F ナンバー B , 画素サイズ β , 光軸座標 (x, y) | | |

図 3.8: ズームの変化 ($U=350\text{cm}$, $d=47\text{mm}$)図 3.9: フォーカスの変化 ($f=120\text{mm}$, $d=47\text{mm}$)図 3.10: アイリスの変化 ($U=350\text{cm}$, $f=120\text{mm}$)

統合カメラモデルは実カメラの性質に基づいて構成したものであり、ズームレンズの特徴であるズームとフォーカスおよびズームとアイリスの関係を記述することができる。このため、3つのパラメータを協調的に変化した画像の生成が可能となり、実写画像を撮影した実カメラのパラメータを用いて実写画像と整合性の高い合成画像の作成が可能となった。

今後は、統合カメラモデルの外部パラメータ(レンズ位置と光軸方向)のキャリブレーションを行い、ズーム・フォーカス・アイリスの変化に加えてカメラが自由に移動するシーンを対象にして実写画像とCG画像の合成を行う予定である。

参考文献

- [1] 大田友一: “3次元画像メディアとコンピュータビジョン – ロボット技術としてのCVからメディア技術としてのCVへ–”, 情報処理, Vol.37, No.11, pp.981–986, 1996.
- [2] 馬場雅志, 浅田尚紀, 天野 晃: “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 –”, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム, pp.123–130, 1997.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 浅田尚紀: “CVCV-WG 特別報告 (XI): カメラモデルとキャリブレーション手法”, 情報処理学会研究会報告, 96-CVIM-102-9, pp.65–74, 1996.
- [6] C. Kolb, D. Mitchell, P. Hanrahan: “A realistic camera model for computer graphics”, SIGGRAPH’95, pp.317–324, 1995.
- [7] R.Y. Tsai: “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses”, IEEE J-RA, Vol.3, pp.323–344, 1987.
- [8] 沼尾利夫, 奥富正敏: “ズームレンズのキャリブレーションにおけるターゲットと精度に関する検討”, 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.12, pp.170–176, 1997.
- [9] A.P. Pentland: “A new sense for depth of field”, IEEE T-PAMI, Vol.9, pp. 523–531, 1988.
- [10] 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊: “多重絞りカラー画像の解析”, 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.10, pp.1338–1348, 1991.
- [11] 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.

- [12] 馬場雅志, 浅田尚紀, 迫田 肇, 天野 晃, 青山正人: “ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを用いた Calibrated Computer Graphics”, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム, 1998.
- [13] 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.
- [14] 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.

第 4 章

ズームレンズの光学的歪みの解析と補正

– 可変円筒モデルを用いた口径蝕現象の解析と画像
周辺部明度低下の補正 –

4.1 はじめに

広角から望遠まで自由に視野範囲(画角)を設定することができるズームレンズは、シーンの状況や解析目的に応じて柔軟に動作するビジョンシステムを実現するための重要な構成要素である。例えば、「ズームレンズを広角側に設定して広視野の画像を撮影し、シーン中に存在する対象物のおおよその位置を検出する。次に、ズームレンズを望遠側に設定して高分解能の画像を撮影し、対象物の詳細な解析を行う。」といった利用が考えられる。また、ズームレンズはズームとともに絞りとフォーカスを制御することができるので、レンズパラメータを連続的に変化させて撮影した複数枚の画像からシーンの多様な情報を高精度に獲得する多重画像解析 [1][2][3] を一つのビジョンシステムで実現することが可能である。

このように柔軟性に富み利用価値の高いズームレンズであるが、さまざまなレンズパラメータ設定で撮影した画像からシーンの情報を復元するには、ズームレンズのキャリブレーションを行う必要がある。従来からコンピュータビジョンの分野、特に physics-based vision では、画像生成過程のモデル化とセンサの歪み補正の観点からカメラモデルとキャリブレーションに関する議論が数多くなされてきた [4][5][6]。しかし、ズームレンズは多数枚のレンズを組合わせて複雑な光学系を構成しているため、そのモデル化やキャリブレーションは容易ではないと考えられている。確かに、固定焦点距離のレンズに比べてズームレンズは光学的に複雑な歪み特性を持つことが知られているが、ズームレンズの特徴を生かした柔軟なビジョンシステムを実現するには、解析目的に応じたモデル化とキャリブレーション手法を確立することが重要である。

従来のカメラキャリブレーションの研究では、世界座標に対するカメラの位置(平行移動ベクトル)と向き(回転行列)、そして各種のカメラパラメータ(中心座標、焦点距離、幾何学的歪み係数)を高精度に求めることが主に議論されてきた [7]。最近報告されたズームレンズのキャリブレーションにおいても、同様の観点から hand-eye calibration が議論されている [8]。しかし、多くの画像解析アルゴリズムが画像に含まれる幾何学的情報と光学的情報に基づいて処理を行うことを考えると、幾何学的歪みの補正と同時に光学的歪みの補正もキャリブレーションの重要な課題である。

レンズを用いた撮像系では、輝度が一樣なシーンを撮影しても画像中心から離れるに従って明度が低下することが知られている。この原因として、単一レンズの画像生成過程で生じる $\cos^4\theta$ 現象と、複数枚のレンズが筒状の光路を構成することで生じる口径蝕現象がある [9]。このような現象によって生じる画像周辺部の明度低下は、しきい値処理はもちろん shape from shading など明度分布に基づいて解析を行う場合に大きな誤差を生じる原因となる。現実のレンズでは、主に広角レンズで問題となる $\cos^4\theta$ 現象を光学的に補正する工夫がなされている [10] が、主に望遠レンズで問題となる口径蝕現象はそのような補正がなされていないため、画像中央に比べて周辺部では 20% 以上の明度低下が生じることがある。このように口径蝕による画像周辺部の明度低下はズームレンズ特有の光学的歪みであるにも関わらず、ズームレンズのモデル化 [11] や特性解析 [12] の研究においてもほとんど議論されていないのが現状である。

本論文では、このような口径蝕現象を可変円筒モデルを用いて解析し、画像周辺部の明

度低下特性を明らかにしてその歪みの補正法を提案する。このモデルは、撮像面と1枚の凸レンズで構成されるカメラモデルのレンズ前面に、筒の長さおよび入口半径と出口半径をパラメータとする可変円筒を付加したもので、レンズの絞りとズームの変化によってどの程度の口径蝕明度低下が生じるかを推定することができる。論文の後半では、一様白色シーンをズームレンズで撮影した画像を用いて本モデルのパラメータ推定を行った後、実画像の明度低下の補正を行い、本モデルの妥当性と光学的歪み補正の有効性を示す。

4.2 ズームレンズの光学的歪み

4.2.1 $\cos^4 \theta$ 現象

レンズの光軸に垂直な一様放射輝度の平面を撮影しても、光軸に対する入射光の角度 θ が大きくなると、撮像面上の光量が低下する現象が知られている。この明度低下は、凸レンズと撮像面で構成されるカメラモデルの画像生成過程から幾何光学的に導くことができ、レンズの半径を l 、入射光線がレンズの光軸となす角度を θ 、レンズから撮像面までの距離を z 、物体表面の放射輝度を L とすると、撮像面上の放射照度 E は以下のように表される [13]。

$$E = \frac{L\pi l^2 \cos^4 \theta}{z^2} \quad (4.1)$$

式(4.1)は、放射輝度 L が一様のシーンを撮影した画像では、レンズ径(絞り)の値に関わらず画像周辺部に行くにしたがって $\cos^4 \theta$ の率で明度が低下することを表している。 $\cos^4 \theta$ は θ が大きくなるに従って急激に値が低下する関数であることから、画角の大きい広角レンズでは画像周辺部で大きな明度低下を生じることになる。

後述の実験に使用したズームレンズの有効水平画角は広角時(ズーム 9mm)が 36.1° 、望遠時(ズーム 144mm)が 2.64° であるので、式(4.1)による明度低下は広角時には 18.3% 、望遠時には 0.11% と計算される。このことから $\cos^4 \theta$ 現象による画像周辺部の明度低下は、望遠時にはほとんど無視できることが分かる¹。

4.2.2 口径蝕現象

口径蝕現象は、複数枚のレンズが円筒状の光路を構成する場合に、光軸に対して傾きを持って入射した光が前面のレンズを通過した後、後面のレンズの縁によって遮られることによって生じる。主に望遠レンズで生じるこの口径蝕現象を解析するために、凸レンズの前面に可変円筒を付加したカメラモデル(図 4.1)を考える。この可変円筒モデルは入口半径 R 、出口半径 $r (< R)$ 、円筒長 H の3つのパラメータによって記述する。なお、円筒長 H に対してレンズから物体までの距離 Z は十分大きいと考えることができるので、可変円筒内を通過する光線は平行光として以下の議論を行う。

¹実験に使用したズームレンズでは θ が大きくなると開口効率が 100% を越えるように設計されているので、 $\cos^4 \theta$ 現象による明度低下は広角時でさえ無視できる程度であった。

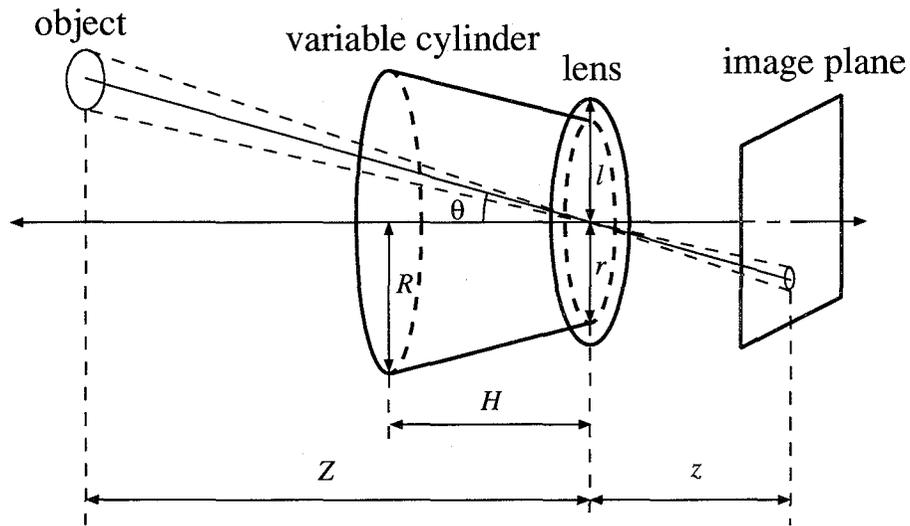


図 4.1: 可変円筒モデルを付加したカメラモデル

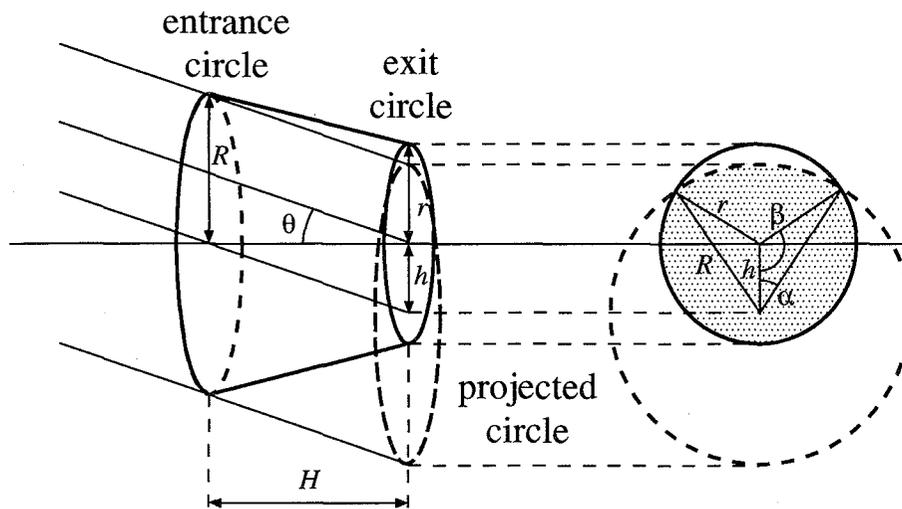


図 4.2: 可変円筒モデルによる口径蝕現象の解析

入射光線がレンズの光軸となす角度が θ の時、入口円を光線方向に沿って出口円に投影した投影円と出口円との重なり部分の面積を A とする(図4.2の斜線部分)。この面積 A を求めることによって、入口円を通過した光のうち出口円を通過する光量を計算することができる。図中で定義した角度 α と β ,

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{R^2 - r^2 + h^2}{2Rh}$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{r^2 - R^2 + h^2}{2rh}$$

を用いて面積 A は次のように表される。

$$A = R^2(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) + r^2(\beta - \sin \beta \cos \beta) \quad (4.2)$$

但し、 $h = H \tan \theta$ であり、 A は θ の関数である。 A をレンズの最大開口面積 πl^2 で正規化することによって、口径蝕現象による明度低下関数 B が得られる。

$$B = \frac{A}{\pi l^2} \quad (4.3)$$

図 4.2 において投影円が出口円全体を含む θ の範囲内では口径蝕現象は生じない。このような θ の範囲は

$$|\theta| \leq \tan^{-1} \frac{R-r}{H} \quad (4.4)$$

と表され、式 (4.3) において明度低下を生じない入射角度範囲 (画像中央部の明度平坦部分) に相当する。式 (4.4) から、円筒長 H が長くなると明度が平坦となる θ の範囲は狭くなることが分かる。口径蝕現象による明度低下が生じる最小の θ は、レンズの中心から見た有効画角 ($2 \tan^{-1} R/H$) と r の関係によって決まるので、円筒長 H の代わりに入口半径 R を変化させても同様の口径蝕現象が生じる。すなわち、 R を小さくするほど口径蝕現象が強く現われることになる。これらの H および R の変化はズームレンズのズームの変化に相当すると考えられ、画角が小さくなる (ズームを望遠にする) ほど口径蝕現象が強く現われることになる。一方、絞りの効果を持つ出口半径 r については、式 (4.4) から r が大きく図 4.3 に示すようになるほど口径蝕現象が強く現れることが分かる。なお、 $r \rightarrow 0$ としたピンホールカメラモデルでは口径蝕現象は生じない。以上のことから、ズームレンズではズームを望遠にするほど、そして絞りを開くほど口径蝕現象が顕著に現れることが分かる。なお、可変円筒モデルの三つのパラメータ (R, H, r) の幾何学的な関係から明らかのように、 $R : H : r$ の比の値が同じパラメータの組は同一の口径蝕現象を表す。

以上、ズームと絞りの変化に対する口径蝕現象と $\cos^4 \theta$ 現象の関係を整理すると、 $\cos^4 \theta$ 現象は絞りに関係なくズームが広角になるほど明度低下が顕著になり、口径蝕現象は絞りが開くほどそしてズームが望遠になるほど明度低下が顕著になる (図 4.3)。

4.3 実験

可変円筒モデルの妥当性を検証するために実験を行った。実験は室内環境下で、CCD カメラ (SONY XC-007) とズームレンズ (FUJINON A16×9BRM-28) を使用した。レンズの光学的特性を表 4.1 に示す。実験では、開放 F 値がズームによって変化しない、ズーム 116mm 以下の範囲を使用した。

放射輝度一様の白色シーンを撮影した画像を得るために、ズームレンズの前面に白色アクリル板を置き、拡散光がレンズに入射するようにして画像を取得した。入射光が十分に

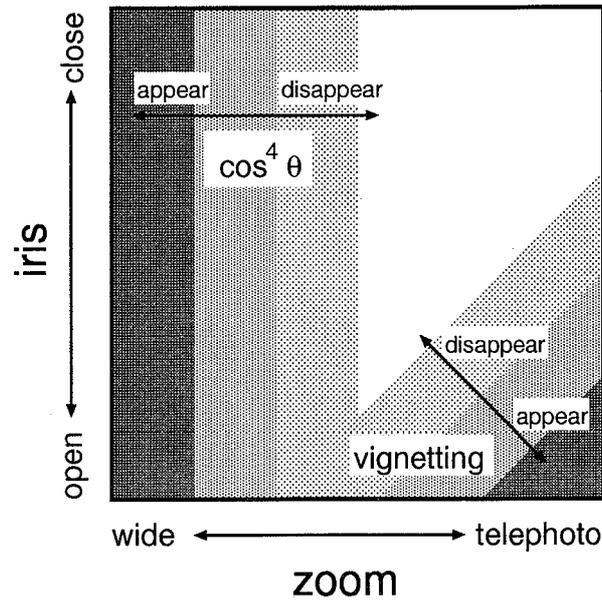


図 4.3: ズームと絞りの変化に対する口径蝕現象と $\cos^4 \theta$ 現象の変化

表 4.1: 実験に使用したズームレンズの光学的特性

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

拡散されていることを確認するために、フォーカスを変化させて撮影した複数枚の画像を比較した。いずれの画像も画像中心部の明度分布が平坦になり、入射光が白色アクリル板によって十分に拡散されていることを確認した。なお、以下のモデルパラメータを求めるための実験ではフォーカスによる画角変化の影響を避けるため、フォーカスは無限大に固定して撮影を行った。

また、画像撮影時の絞りの値は画像中心の明度値の比率から決定した。すなわち、絞り開放 (1.8) 時の画像中心明度値に対して、ある絞りで撮影した画像中心明度値の比率が ρ である時、撮影時の絞りは $1.8/\sqrt{\rho}$ として求めた。一方、画像撮影時のズームの値は水平画角から決定した。すなわち、あるズーム値に設定した時の水平画角が θ である時、ズームを望遠端 (144mm) に設定した時の水平画角 2.64° を用いて、ズーム値は $144 \tan(1.32^\circ) / \tan(\theta/2)$ として求めた。

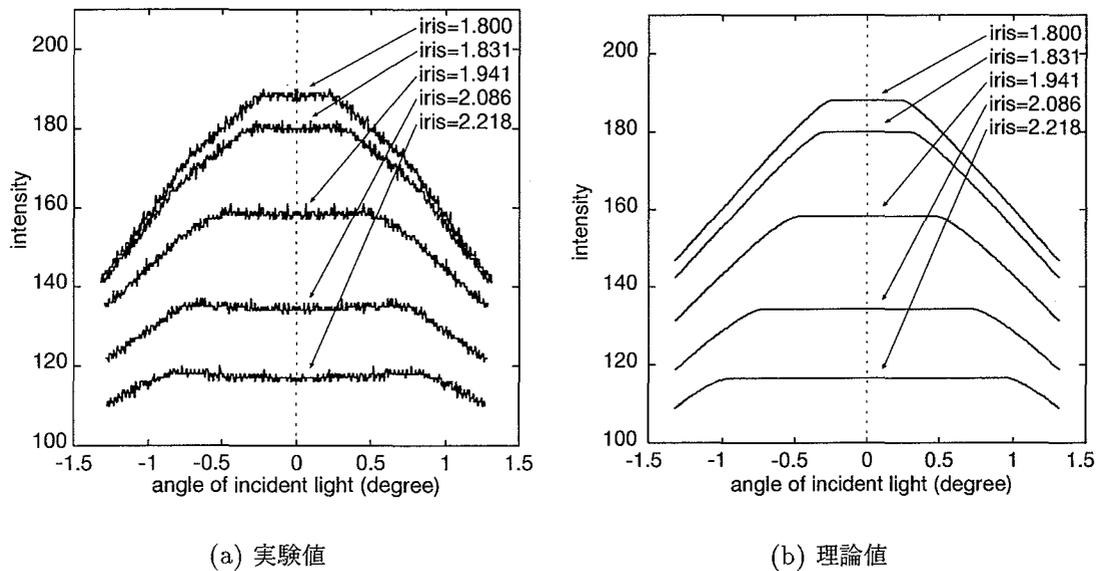


図 4.4: 絞りの変化による画像周辺部明度低下現象

4.3.1 絞りの変化

ズームを 116mm, フォーカスを ∞ として絞りを 1.8 から 2.2 の間で変化させて白色シーンを撮影した画像中央水平線上の明度プロファイルを図 4.4(a) に示す. 式 (4.3) を用いて二乗誤差が最小になる出口半径 r を求めて描いた明度プロファイルを図 (b) に示す. なお, 入口半径は $R=1.0$ とし円筒長 H_{iris} は二乗誤差が最小になる値 14.9 を使用した. この図から, 絞りの変化に対する画像周辺部の明度低下は本モデルの出口半径の変化として記述できることが分かる.

図 4.6 に絞り ($iris$) と出口半径 r の関係を示す. 図から, 絞りの変化に対して出口半径は線形に変化していることが分かる. 最小 2 乗法によって得られた直線 (図中の実線) の式は

$$r(iris) = -0.540iris + 1.891 \quad (4.5)$$

と表され, 相関係数は -0.995 であった. ズームを 92.9mm に設定して同様の実験をした結果, 絞り と出口半径の関係は式 (4.5) とほぼ平行な直線 (図 4.6 の点線) で表せることが分かった.

4.3.2 ズームの変化

絞りを 1.831, フォーカスを ∞ として, ズームを 73mm から 116mm の間で変化させて撮影した画像中央水平線上の明度プロファイルを図 4.5(a) に示す. 式 (4.3) を用いて二乗誤差が最小になる入口半径 R を求めて描いた明度プロファイルを図 (b) に示す. な

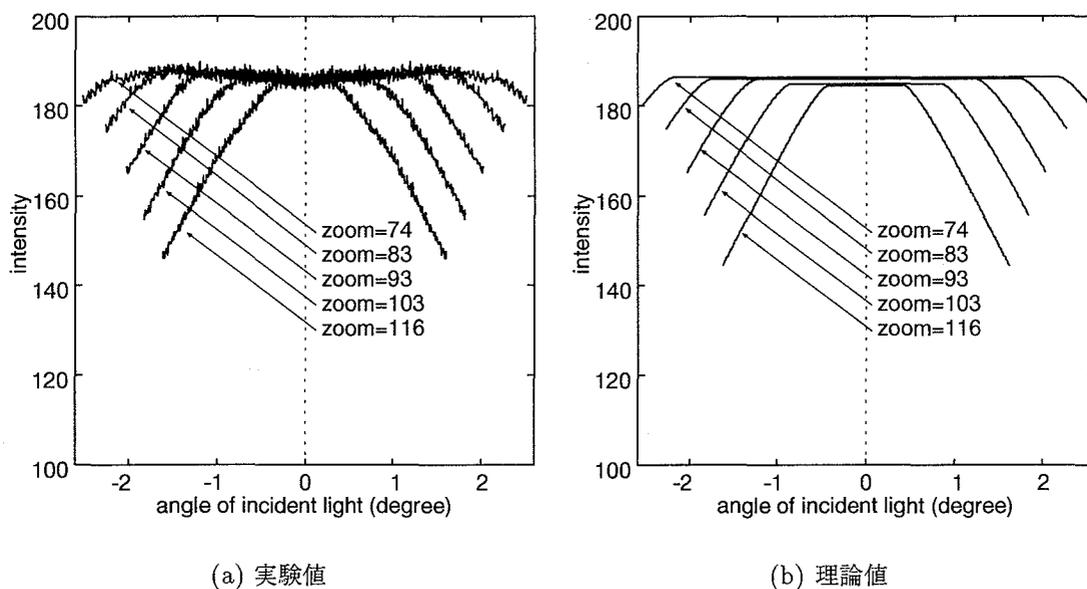


図 4.5: ズームの変化による画像周辺部明度低下現象

お、出口半径は $r=1.0$ とし円筒長 H_{zoom} は二乗誤差が最小になる値 16.56 を使用した。この図から、ズームの変化に対する画像周辺部の明度低下は本モデルの入口半径の変化として記述できることが分かる。

図 4.7 にズーム ($zoom$) と入口半径 R の関係を示す。図から、ズームの変化に対して入口半径は線形に変化していることが分かる。最小二乗法によって得られた直線 (図中の実線) の式は

$$R(zoom) = -0.0123zoom + 2.522 \quad (4.6)$$

と表され、相関係数は -0.994 であった。絞りを 2.086 に設定して同様の実験した結果、ズームと入口半径の関係は式 (4.6) とほぼ平行な直線 (図 4.7 の破線) で表せることが分かった。

4.3.3 画像周辺部の明度低下の補正

以上のことから、絞りの変化に対する出口半径の変化は $(R, H, r) = (1.0, H_{iris}, r(iris))$ と記述でき、ズームの変化に対する入口半径の変化は $(R(zoom), H_{zoom}, 1.0)$ と記述できることが分かった。先に述べたように、本モデルでは 3 つのパラメータ (R, H, r) を定数倍しても同一の明度低下曲線が得られる。そこで、円筒長を $H=1.0$ に正規化して R と r の変化を記述すると、

$$(R, H, r) = \left(\frac{R(zoom)}{H_{zoom}}, 1.0, \frac{r(iris)}{H_{iris}} \right) \quad (4.7)$$

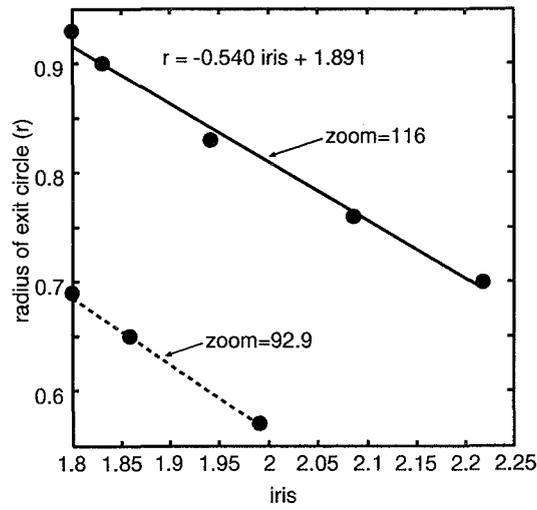


図 4.6: 絞りの変化に対する出口径の変化

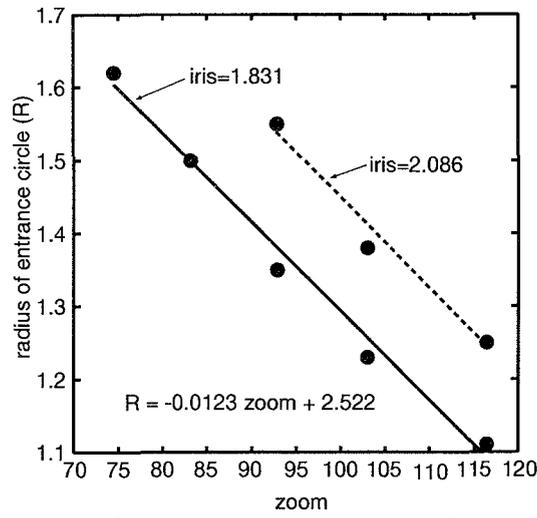


図 4.7: ズームの変化に対する入口径の変化

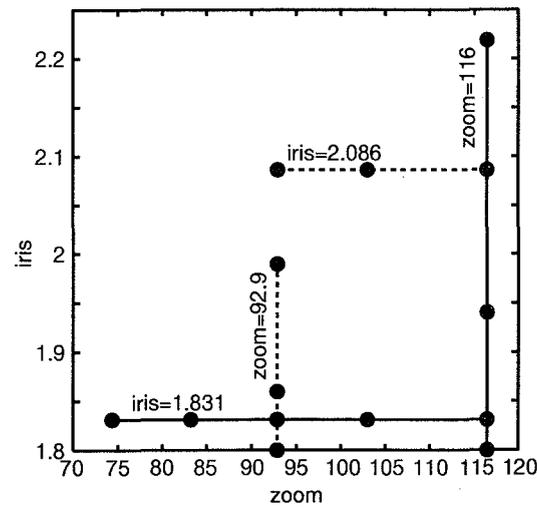
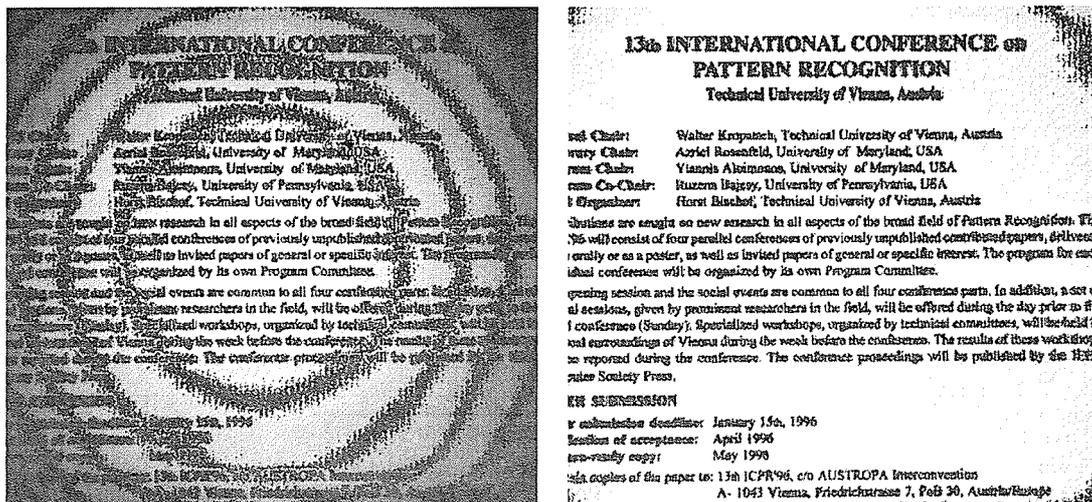


図 4.8: 絞りとズームの設定



(a) 口径蝕現象による明度低下が生じた画像

(b) 明度低下を補正した画像

図 4.9: 明度等高線画像 (ポスター)

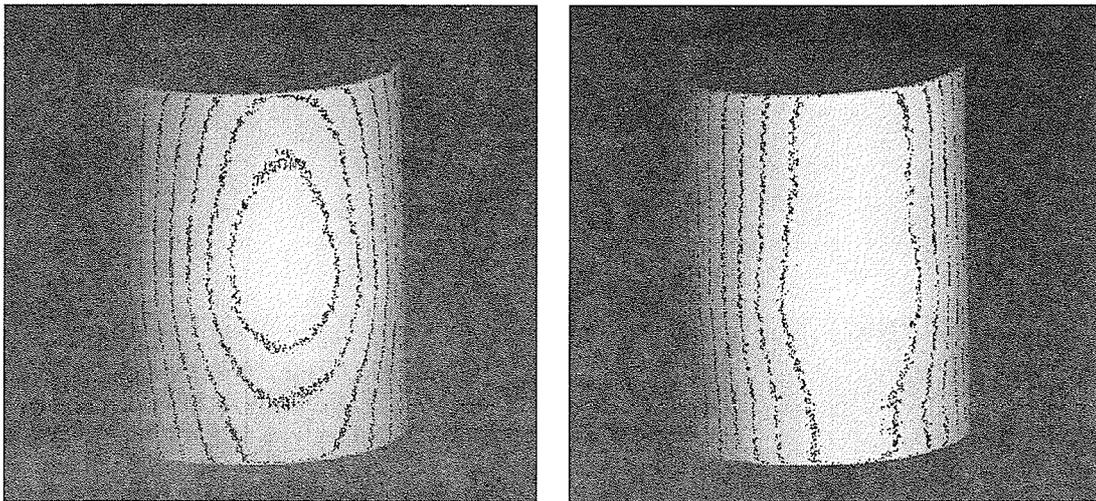
が得られる。 R と r の変化が式(4.7)で表せることを、実験で設定した絞りとズームの各種組合せ(図4.8)において確認した。

ここで、口径蝕によって生じる画像周辺部の明度低下の補正法を整理すると以下のようになる。

1. 式(4.7)を用いて、ズームレンズの絞り $iris$ とズーム $zoom$ の値から可変円筒モデルのパラメータ (R, H, r) を求める。
2. (R, H, r) を式(4.3)に代入して明度低下プロファイルを求める。
3. 2で求めた明度低下プロファイルを用いて画像の明度歪みを補正する。

本モデルの妥当性と明度補正の有効性を検証するために実画像を用いて実験を行った。ほぼ均一輝度となるように照明したポスターをズーム116mm、絞り1.83、被写体までの距離約3.5mの条件で撮影した。図4.9(a)に撮影した画像の明度等高線を示す。明度等高線が年輪状の同心円となって現われ、口径蝕現象による明度低下が明度中心を中心として放射状に広がっていることが分かる。撮影時のレンズパラメータから求めた可変円筒モデルのパラメータ $(R, H, r) = (0.0661, 1.0, 0.0606)$ を用いて明度補正をした画像の明度等高線を同図(b)に示す。本手法により口径蝕現象による明度歪みがほぼ解消できていることが分かる。この画像に対して文字領域を抽出するしきい値処理を考えると、図4.9(a)では画像周辺部の明度低下に応じてしきい値を段階的に変化させる必要があるが、同図(b)では画像全体に対して単一のしきい値を設定することが可能である。

次に同じ設定のズームレンズで円柱物体を撮影した。図4.10(a)に撮影した画像の明度等高線を示す。円柱側面に年輪状の明度等高線が生じ、この明度分布に基づいて三次元形



(a) 口径蝕現象による明度低下が生じた画像

(b) 明度低下を補正した画像

図 4.10: 明度等高線画像 (円柱)

状を復元すると中央部が凸状に歪んだ円柱が得られることになる。口径蝕現象による明度低下を補正した画像の明度等高線を図 4.10(b) に示す。円柱側面の明度分布がほぼ補正された明度等高線が得られている。なお、補正後の画像においても円柱側面の明度等高線に多少の歪みがあるが、これは照明が理想的な平行光線ではないことによる明度分布の不均一さが原因であることを確認している。

このようにセンサの歪みが原因でシーンの情報が誤って観測され、そのために画像処理や画像解析が困難になることを考えると、適切なカメラモデルを設定してキャリブレーションを行うことの意義は大きいと言える。

4.4 おわりに

しきい値処理や Shape from Shading のように大域的な明度分布に基づいて画像解析を行う場合には、センサによって生じる光学的歪みを可能な限り排除する必要がある。本論文では、ズームレンズで生じる口径蝕現象を解析するために可変円筒モデルを提案し、画像周辺部の明度低下を補正する手法を示した。そして、実験により本モデルの妥当性と明度補正の有効性を確認した。本手法では、レンズパラメータ (絞りとズーム) と可変円筒モデルのモデルパラメータ (出口半径と入口半径) の関係を求めているので、撮影時のレンズパラメータ設定値から口径蝕現象を推定し画像周辺部の明度低下を補正することが可能となっている。単一の画像を用いた画像解析はもちろん、絞り、フォーカス、ズームを変化して得られる多重画像を解析する場合には、本手法を適用して得られる明度歪みの

ない画像を解析することにより、従来よりもさらに高精度な結果が得られることが期待できる。今後は、ズームレンズの広角側を含めたモデル化とキャリブレーション法について検討を加える予定である。

参考文献

- [1] 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊, “多重絞りカラー画像の解析,” 情処学論, vol. 32, no. 10, pp.1338-1348, Oct, 1991.
- [2] 浅田尚紀, 藤原久永, 松山隆司, “多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測,” 信学論 (D-II), vol. J77-D-II, no. 6, pp.1048-1058, Jun, 1994.
- [3] J. Ma, S. I. Olsen, “Depth from zooming,” Journal of Optical Society of America, vol.7, no.10, pp.1883-1890, 1990.
- [4] R. Y. Tsai, “An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision,” Comput. Vision and Pattern Recog., pp.364-374, 1986.
- [5] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, “Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation,” IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell., vol.14, no.10 pp.965-980, 1992.
- [6] G. Q. Wei, S. D. Ma, “Implicit and explicit camera calibration: Theory and experiments,” IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell., vol.16, no.5, pp.469-480, 1994.
- [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 CV, 82-1, pp.1-8, 1993.
- [8] K. Tarabanis, R. Y. Tsai, D. S. Goodman, “Calibration of a computer controlled robotic vision sensor with a zoom lens,” Comput. Vision, Graphics and Image Processing: Image Understanding, vol. 59, no. 2, pp.226-241, 1994.
- [9] R. Kingslake, “Optical system design,” Academic Press, 1983.
- [10] 高野栄一, “レンズデザインガイド,” 写真工業出版社, 1993.
- [11] C. Kolb, D. Mitchell, P. Hanrahan, “A realistic camera model for computer graphics,” SIGGRAPH'95, pp.317-324, 1995.
- [12] R. G. Willson, S. A. Shafer, “What is the center of the image?,” CMU Technical Report, CMU-CS-93-122, 1993.

[13] B. K. P. Horn, "Robot Vision," Mit Press, 1986.