

カメラと眼のキャリブレーションに基づく
高精度立体視画像合成の研究

(課題番号 12680357)

平成 12 年度～平成 14 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 15 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 12 年度～平成 14 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

12680357

研究課題

カメラと眼のキャリブレーションに基づく高精度立体視画像合成の研究

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： 椋木 雅之 (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)
研究分担者： 天野 晃 (京都大学大学院 情報学研究科 助教授)

研究経費

平成 12 年度	2,100 千円
平成 13 年度	600 千円
平成 14 年度	1,000 千円
計	3,700 千円

研究目的および成果の概要

複数枚の実写画像やコンピュータグラフィックス (CG) による生成画像を組み合わせて実シーンに匹敵する臨場感の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。このことは、高品質な画像合成を実現するには、実写画像の撮影に使用するカメラと画像を見る主体である人間の眼のそれぞれのモデル化とキャリブレーションに基づいて、CG 画像の生成や実写画像との合成を行う必要があることを意味している。しかし従来の研究は、ピンホールカメラモデルを用いてカメラの幾何学的キャリブレーションを行ったものがほとんどであり、観測時の眼のキャリブレーションについては十分に考慮されていないのが現状である。そのため、不自然な視差や強調された距離感によって疲労感を生じるなど不完全な立体感の画像しか得られないという問題が生じている。

我々は、実写画像と CG 画像を合成して高品質な画像を作成するには、キャリブレーションに基づく高精度な画像生成と画像合成の技術を確立する必要があると考え、“Calibrated Computer Graphics” の研究を進めている。これまでにレンズのズーム、フォーカス、絞りを統一的に記述する統合カメラモデルの基本設計を終え、フォーカス変化に着目した高精度画像合成法の開発を行ってきた。この研究成果は、文部省科学研究費補助金

基盤研究 (C)(2) 研究成果報告書「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) に報告した。

本研究ではこの研究を発展させ、カメラと眼のモデル化とキャリブレーションに基づく高精度立体視画像合成について以下の検討を行った。

1. 統合カメラモデルとキャリブレーション手法の検証
2. 統合カメラモデルに基づく高精度画像生成アルゴリズムの開発
3. カメラと眼のキャリブレーションに基づく高精度立体視画像合成
4. 高精度立体視画像合成法の眼科手術シミュレータへの応用

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ようになる。

第 1 章：薄凸ズームレンズモデルを用いた多重ズームぼけ画像からの距離計測

従来の Depth from Zoom では、ピンホールカメラモデルを使用しズーム変化によるピンホール位置の前後移動を利用して距離計測を行っていた。本章では、ぼけの変化から距離を計測する Depth from Focus/Iris と同様に、ズーム変化によるぼけ変化から距離を求める方法について述べる。まず、ズームレンズのズーム、フォーカス、アイリスの関係を統一的に記述する薄凸ズームレンズモデルについて述べる。このカメラモデルでは、有効焦点距離と有効開口径がズーム、フォーカス、アイリスの関数となり、これらの関係からぼけモデルを導く。次に、エッジのぼけ幅から距離を計測する方法を述べ、実画像を用いた実験により多重ズームぼけ画像から安定に距離が計測できることを示す。最後に、本手法によって得られた距離情報を画像合成に適用した例を示す。

第 2 章：二種類の高精度ぼけ画像生成アルゴリズムの実装と比較評価

実写画像と CG 画像を合成し、リアリティの高い画像を生成するには、実写画像がぼけを含むことを考慮した画像生成が必要である。現在までにぼけを含んだ画像を生成する様々な手法が提案されているが、いずれも実カメラとカメラモデル間のパラメータの対応づけをしていないため、実写画像との比較や合成は行われていない。我々は、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に基づく多重 Z バッファアルゴリズム、accumulation buffer を用いた多重ピンホールアルゴリズムについて検討を行ってきたが、計算コストが高いという問題点があった。そこで本章では、多重 Z バッファアルゴリズムの高速化について検討し、画像生成アルゴリズム自体の改良と OpenGL を用いた実装方法による高速化について述べる。また多重 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性能を複数の計算機で比較評価した結果を示す。

第 3 章：カメラと眼のキャリブレーションに基づく高精度立体視画像合成

仮想現実や拡張現実では、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた立体視が行われることが多い。しかし従来は、視点間距離や画角などの立体視画像生成パラメータに、

人の平均的な値を使ったり，立体感を強調する値を使うなど，不完全で不正確な立体視が行われていた．本章では，観察者個人の眼のパラメータの決定(アイキャリブレーション)と，それに基づく仮想空間の設定，さらにステレオカメラの設定と統合カメラモデルを用いた高精度立体視画像合成について述べる．

第4章：アイキャリブレーションの眼科手術シミュレータへの応用

アイキャリブレーションによる拡張現実感システムの応用として眼科手術シミュレータの試作を行った．これは，顕微鏡によって拡大された空間でのアイキャリブレーションの適用可能性を確認することを目的としており，実際の手術で用いられる双眼顕微鏡を用いてアイキャリブレーションを実施した結果と，白内障手術シミュレーションにおける立体視画像合成について述べる．

以上のように本研究では，ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルとキャリブレーション手法の検証，統合カメラモデルに基づく高精度画像生成アルゴリズムの実装と評価，立体視のためのアイキャリブレーション手法の開発と眼科手術シミュレータへの応用，について検討を行った．その結果，カメラと眼のキャリブレーションに基づく高精度立体視画像合成のための要素技術を開発するという当初の目的はほぼ達成した．今後は，本研究で開発した技術の実利用化に向けた検討を進めたい．

研究発表

学術論文

- N. Asada, M. Baba:
A Unified Camera Model of Zoom, Focus, and Iris Parameters for Camera-Calibrated Computer Graphics,
Proceedings of IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging, pp.101-106, 2000.
- N. Asada, M. Baba, A. Oda:
Depth from Blur by Zooming,
Proceedings of 14th International Conference on Vision Interface, pp.165-172, 2002.
- M. Baba, N. Asada, A. Oda, T. Migita:
A Thin Lens Based Camera Model for Depth Estimation from Defocus and Translation by Zooming,
Proceeding of 15th International Conference on Vision Interface, pp.274-281, 2002.

- 馬場雅志, 小田 愛, 浅田尚紀, 山下英生:
薄凸ズームレンズモデルを用いた多重ズームぼけ画像からの距離計測,
電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J85-D-II, No.9, pp.1446-1454, 2002.

学術発表

- 馬場雅志, 小田 愛, 浅田尚紀:
ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを用いた多重ズーム画像からの距離計測,
画像の認識・理解シンポジウム論文集, Vol.II, pp.37-42, 2000.
- 小田 愛, 馬場雅志, 浅田尚紀:
統合カメラモデルを用いた多重ズーム画像からの距離計測,
電子情報通信学会総合大会講演論文集, 情報システム 2, p.267, 2000.
- 阿比留友和, 馬場雅志, 浅田尚紀:
二種類の高精度ぼけ画像生成アルゴリズムの実装と比較評価,
IEEE 広島シンポジウム, pp.81-86, 2001.
- 小田 愛, 馬場雅志, 浅田尚紀:
多重ズームぼけ画像からの距離計測,
IEEE 広島シンポジウム, pp.214-218, 2001.
- 成定宏之, 山中洋典, 馬場雅志, 浅田尚紀:
光学シースルーにおける高精度立体視のためのアイキャリブレーションの検討,
電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, No.156, PRMU2002-39, pp.59-66, 2002.
- 馬場雅志, 小田 愛, 浅田尚紀:
多重ズーム画像からの距離計測法の評価,
画像の認識・理解シンポジウム論文集, Vol.II, pp.341-346, 2002.

目次

1	薄凸ズームレンズモデルを用いた多重ズームぼけ画像からの距離計測	1
1.1	はじめに	2
1.2	薄凸ズームレンズモデル	2
1.2.1	ズームレンズの性質	2
1.2.2	薄凸ズームレンズモデルの設計	3
1.2.3	有効焦点距離 w	5
1.2.4	有効開口径 d	5
1.2.5	ぼけモデル	5
1.2.6	ぼけ幅からの距離計測	6
1.3	実験と評価	7
1.3.1	カメラキャリブレーション	7
1.3.2	単一距離物体の距離計測	8
1.3.3	複数距離物体の距離計測	10
1.3.4	連続的に変化する距離の計測	13
1.4	まとめ	13
1.4.1	カメラモデル	15
1.4.2	距離計測	15
2	二種類の高精度ぼけ画像生成アルゴリズムの実装と比較評価	19
2.1	はじめに	20
2.2	多重Zバッファアルゴリズム	20
2.2.1	画像生成アルゴリズム 1(Z_buffer1)	21
2.2.2	アルゴリズムの変更点	22
2.2.3	画像生成アルゴリズム 2(Z_buffer2)	23
2.2.4	レンズ形状の計算	23
2.2.5	プログラムの実装	26
2.3	多重ピンホールアルゴリズム (Pinhole)	28
2.4	理論的比較	28
2.5	生成時間と画質の評価	29
2.5.1	シーン想定	29
2.5.2	考察	30

2.6	まとめ	32
3	カメラと眼のキャリブレーションに基づく高精度立体視画像合成	35
3.1	はじめに	36
3.2	アイキャリブレーション	37
3.2.1	アイモデル	37
3.2.2	立体視のためのアイパラメータ	39
3.2.3	視点間距離の測定	41
3.2.4	3次元ターゲット	41
3.2.5	アイキャリブレーション手順	42
3.3	カメラキャリブレーション	43
3.3.1	統合カメラモデル	43
3.3.2	ステレオカメラ設定	44
3.4	実験	45
3.4.1	実験環境	45
3.4.2	キャリブレーション結果	46
3.4.3	ステレオカメラ設定	47
3.5	CCGによる高精度立体視画像合成	47
3.6	むすび	47
4	アイキャリブレーションの眼科手術シミュレータへの応用	51
4.1	はじめに	52
4.2	眼科手術シミュレータのためのキャリブレーション	53
4.3	おわりに	59

第 1 章

薄凸ズームレンズモデルを用いた多重ズームぼけ画像からの距離計測

1.1 はじめに

コンピュータビジョン (CV) では、奥行き情報がシーンの理解や物体認識を行うための重要な手掛かりとなる。一方、コンピュータグラフィックス (CG) でも、実写画像と仮想物体の合成や実物体のモデル化において、シーンの奥行き情報が重要である。

従来から CV の分野では、フォーカスやアイリス (絞り) の変化にともなう画像のぼけ変化から距離を求める Depth from Focus[1, 2, 3] あるいは Depth from Iris[4, 5, 6, 7] の研究が数多く行われてきた。一方、ズームレンズのズーム変化を利用した Depth from Zoom[8, 9] の研究も行われている。しかし、これはぼけを生じない理想モデルであるピンホールカメラモデルを用いて、ズーム変化によるピンホール位置の前後移動の運動視差を利用したもので、凸レンズモデルを用いたぼけ解析から距離を求める Depth from Focus/Iris とは本質的に異なる手法である。

実際の撮影においてピンホールカメラを用いることはなく、距離の異なる物体が複数存在するシーンをズームレンズで撮影すると、画像中には必ずぼけが観測される。そしてフォーカスやアイリスによってぼけが変化すると同様に、ズームによってもぼけの程度が変化する。このことは、Depth from Focus/Iris と同様に、ズームによるぼけ変化からシーンの奥行き情報が得られることを示唆している。

以下、本章では、まずズーム、フォーカス、アイリスの関係を統一的に記述する薄凸ズームレンズモデルを用いてズーム変化とぼけ変化の関係を解析する。次に、ぼけモデルに基づく距離計測の方法を述べ、任意のズーム、フォーカス、アイリス設定で距離計測が可能であることを示す [10]。さらに、連続的にズームを変化させた多重ズーム画像を利用することによって、距離計測が安定に行えることを実画像を用いて検証する。最後に、多重ズーム画像から求めた距離情報を用いた画像合成の例を示す。

1.2 薄凸ズームレンズモデル

1.2.1 ズームレンズの性質

ズームによるぼけ変化の様子を図 1.1 に示す。(a) のシーンを対象にズームを望遠側に設定して撮影すると (b) が得られる。一方、(a) の画像の中央部を補間処理で拡大すると (c) が得られる。ズームによる拡大と画素補間による拡大ではぼけの程度が異なることから、ズーム変化は単に画像の拡大だけでなくぼけの程度にも影響していることが分かる。

このような現象は、ズームによってレンズの焦点距離が変化し、その結果画像が拡大縮小するという従来のピンホールカメラモデルに基づくズームレンズモデルでは解析不可能であり、ズームを凸レンズモデルのフォーカスやアイリスと関係したパラメータとして記述する新たなカメラモデルの必要性を示している。

そこで本研究では、ズーム、フォーカス、アイリスの関係を統一的に記述するカメラモデルを用いてぼけモデルを導く。このカメラモデルでは、ズームレンズのズーム、フォーカス、アイリスの性質を、有効焦点距離 (レンズ中心と撮像面間の距離) と有効開口径 (レンズの開口径) で表現する。すなわち、ズームの「画角 (倍率) が変化する」「ピントがず

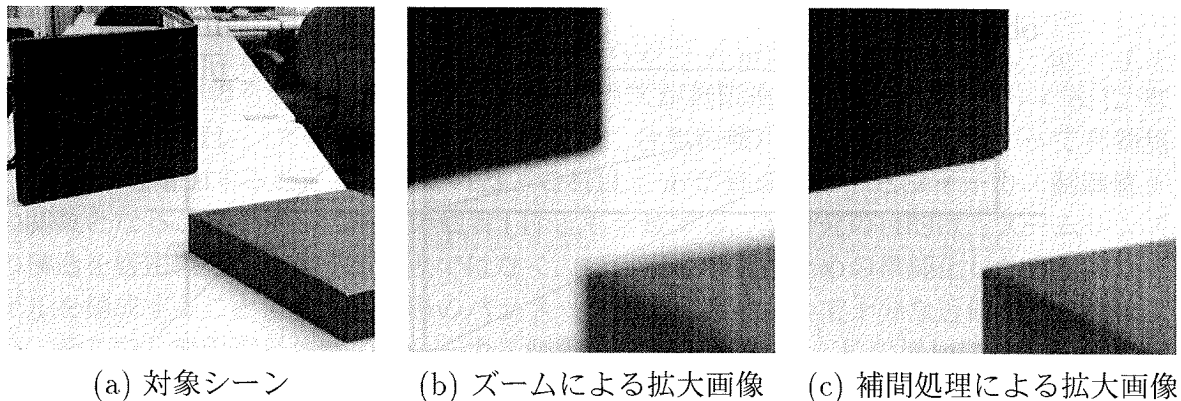


図 1.1: ズームによるぼけ変化

れない」性質と、フォーカスの「ピントが変化する」「画角が変化する」性質を有効焦点距離の変化として記述する。一方、アイリスの「明度が変わる」「被写界深度が変わる」性質と、ズームとフォーカスの「明度が変化しない¹」性質を有効開口径の変化として記述する。

1.2.2 薄凸ズームレンズモデルの設計

一般に、ズームレンズのように複雑な光学的特性を持つレンズのモデル化には厚凸レンズモデルが用いられる [12]。しかし、本研究で注目している画像のぼけは、レンズと撮像面の関係によって生じる現象であり、薄凸レンズモデルの内部パラメータ (上述の有効焦点距離と有効開口径を含む) を用いて記述することができる。カメラモデルは注目する光学現象が記述できれば、画像の解析や合成のためにはできるだけ単純なモデルを選択することが望ましい。そこで、本論文ではズームレンズの位置・姿勢固定という制限を設けることによって外部パラメータ (世界座標に対する位置ベクトルと回転行列) は扱わないこととし、薄凸レンズモデルを用いてズームレンズモデル (以下、薄凸ズームレンズモデルと呼ぶ) を構成する²(図 1.2)。

薄凸ズームレンズモデルでは、ズームレンズを制御する実パラメータ、レンズ固有の光学的特性を表すレンズパラメータ、モデルの特性を記述するモデルパラメータの 3 種類に分類して各種パラメータを記述する。

実パラメータ ズーム制御値 Z 、フォーカス制御値 F 、アイリス制御値 I を用いる。(具

¹ズームレンズでは焦点距離に比例して入射瞳径が変化するが、理論上の入射瞳径が実際のレンズ前玉径より大きくなると明度低下が生じる [11]。本論文では、画像の明度が変化しないズーム範囲をモデル化の対象とする。

²ズームレンズの位置・姿勢を記述するには世界座標に対するレンズ中心 (厚凸レンズモデルの前主点) 位置と光軸方向を表す必要がある。ズームレンズのモデル化における厚凸と薄凸の関係については稿を改めて述べる。

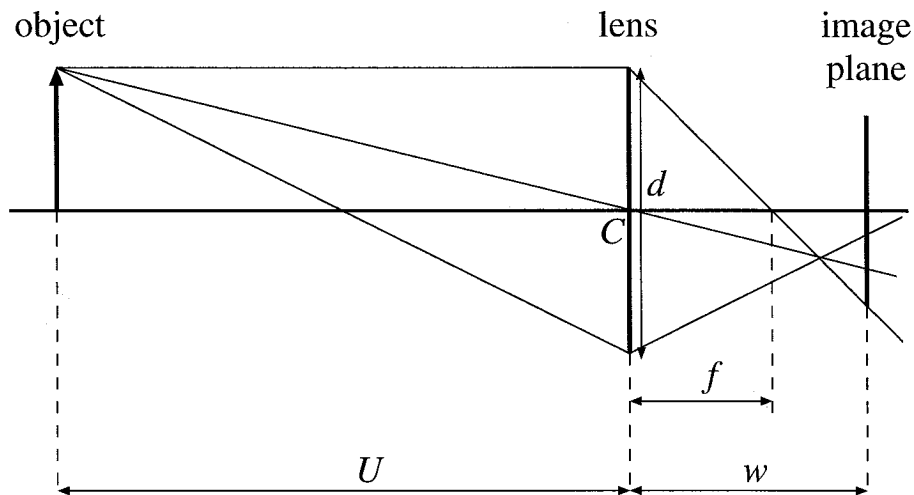


図 1.2: 薄凸ズームレンズモデル

体的な数値は後述する)

レンズパラメータ 焦点距離 f [mm], 合焦距 U [m], 絞り値 A を用いる.

モデルパラメータ 有効焦点距離 (レンズと撮像面間の距離) w [mm], レンズの有効開口径 d [mm], 有効絞り値 $B (= w/d)$ を用いる.

これらのパラメータを用いて, ズームレンズモデルが備えるべき性質を整理すると以下のようになる.

1. ズーム制御値 Z に対して焦点距離 f が変化する.
2. フォーカス制御値 F に対して合焦距 U が変化する.
3. アイリス制御値 I に対して絞り値 A が変化する.
4. ピント調節のため, フォーカス制御値 F に対して有効焦点距離 w が変化する. さらに, 焦点距離 f が変化してもピントがずれないように f の変化に応じて有効焦点距離 w が変化する.
5. 絞り値 A に対して有効開口径 d が変化する. さらに, 有効焦点距離 w が変化しても画像の明度の変動しないように (有効絞り値 B が一定になるように), 有効焦点距離 w の変化に応じて有効開口径 d が変化する.

このように薄凸ズームレンズモデルでは, 有効焦点距離 w によってズームとフォーカスの相互関係を記述し, 有効開口径 d によってズーム, フォーカス, アイリスの相互関係を記述している³. 以下, これら二つのモデルパラメータとぼけモデルについて述べる.

³実際のズームレンズでは, ズーム, フォーカス, アイリスは独立に変更でき連動しているわけではない.

1.2.3 有効焦点距離 w

図 1.2において、合焦時にはレンズの公式から $U^{-1} + w^{-1} = f^{-1}$ が成立し、 $w = f + f^2(U - f)^{-1}$ が得られる。この式は、フォーカスが無限遠に合焦した時 ($U \rightarrow \infty$)、有効焦点距離 w はレンズの焦点距離 f と一致し、合焦距離が近くなるにしたがって有効焦点距離 w は増加することを表している。これは、 w が焦点距離 f とフォーカス制御値 F の関数となることを示し、上記の性質 (4) とも合致する。本研究の目的は、ズームレンズの構造を厳密にモデル化することではなく、ぼけ現象解析のための単純化した実用的なモデルを構成することであり、実際のパラメータ変化範囲において十分な近似ができればよい。そこで、無限遠合焦時のフォーカス制御値を $F = 0$ とし、 F の増加に対する w の増分を F の多項式で近似することを考える。

$$w(f, F) = f + \sum_{n=1}^N \alpha_n(f) F^n \quad (1.1)$$

ここで $\alpha_n(f)$ は焦点距離 f の多項式を表し、これによってズームが変化 (焦点距離 f が変化) しても、ピントがずれないように w を調節する機能を記述する。

1.2.4 有効開口径 d

放射輝度 L の物体表面の微小領域からの光がレンズにより撮像面上の微小領域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、

$$E = L \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{w} \right)^2 \cos^4 \theta \quad (1.2)$$

と表される [13]。ここで、 w/d は有効絞り値 B を表す。

この式において、ズーム、フォーカスの変化で有効焦点距離 w が変化しても明度が変化しないという性質を満たすには、有効絞り値 B が一定になるように d が w に比例しなければならないことが分かる (上述の性質 (5))。

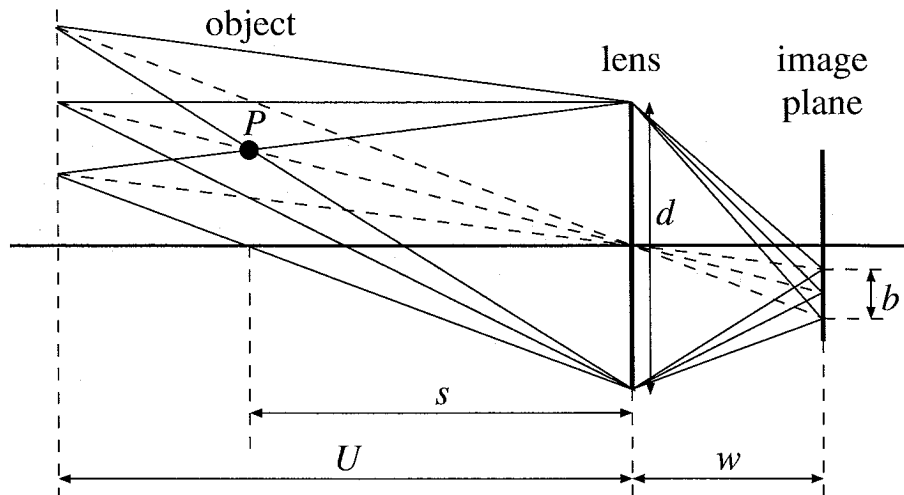
1.2.5 ぼけモデル

フォーカスによるピントのずれ、ズームによる画像の拡大率の変化、そしてアイリスによる被写界深度の変化によって画像上のぼけが変化する。このような複数のパラメータによって変化するぼけの性質を、薄凸ズームレンズモデルでは次のように表す。

図 1.3において、レンズから距離 s の位置にある非合焦点 P の像の画像上のぼけ幅 b は次式で与えられる。

$$b = wd \left| \frac{1}{s} - \frac{1}{U} \right| = \frac{w^2}{B} \left| \frac{1}{s} - \frac{1}{U} \right| \quad (1.3)$$

しかし、薄凸ズームレンズモデルでは、ズームレンズの光学的性質を簡潔に記述するために、ズーム、フォーカス、アイリスの相互関係 (連動) として有効焦点距離と有効開口径を表現している。

図 1.3: 非合焦点 P のぼけ幅 b

アイリス制御値 I を固定したとき絞り値 A ，そして有効絞り値 B は一定となり，フォーカス制御値 F を固定したとき合焦距離 U は一定となる．したがって，この式は，ぼけ幅 b の変化がズーム制御値 Z によって変化する有効焦点距離 w の 2 乗に比例することを示している．

1.2.6 ぼけ幅からの距離計測

(1.3) 式を距離 s について解くと次式が得られる．

$$s = \begin{cases} \frac{wdU}{wd + Ub} & (s < U) \\ \frac{wdU}{wd - Ub} & (s > U) \end{cases} \quad (1.4)$$

ここで合焦距離 U はフォーカス制御値 F によって決まり，有効焦点距離 w はズーム制御値 Z とフォーカス制御値 F によって決まる．そして，有効開口径 d はアイリス制御値 I と有効焦点距離 w によって決まるので，この式は 1 枚の画像から検出したぼけ幅 b から距離 s が算出可能であることを示している．

一方，ズームを連続的に変化した多重ズーム画像のぼけ幅変化から距離計測を行う方法は次のようになる．まず，(1.3) 式からぼけ幅 b が有効焦点距離 w の 2 乗に比例するので，その傾き g を求める．

$$g = \frac{1}{B} \left| \frac{1}{s} - \frac{1}{U} \right| \quad (1.5)$$

この g を用いて距離 s を求めると次式のようになる.

$$s = \begin{cases} \frac{U}{1 + gBU} & (s < U) \\ \frac{U}{1 - gBU} & (s > U) \end{cases} \quad (1.6)$$

ここで、合焦距離 U と有効絞り値 B はフォーカス制御値 F とアイリス制御値 I によって決まるので、 F と I を固定してズーム制御値 Z を変化しながら撮影した多重ズーム画像から g を求めると、距離 s が得られることが分かる.

1.3 実験と評価

1.3.1 カメラキャリブレーション

CCD カメラ SONY XC-007(有効画素数 768×493) と電動ズームレンズ CANON J16×9.5 B4RAS を用いて薄凸ズームレンズモデルのキャリブレーションを行った. ズームレンズの光学特性は、焦点距離 = 9.5–152[mm], 合焦距離 = 1.0–∞[m], 開放絞り値 (F ナンバー) = 1.8 である. ズーム, フォーカス, アイリスの制御値には, ズームレンズの制御電圧を換算した整数値を用いた. 具体的には, $Z=25$ (広角時)– 75 (望遠時), $F=0$ (無限遠合焦時)– 50 (最近端合焦点時), $I=25$ (開放時)– 75 (閉鎖時) とした. また, カメラからの出力は NEXUS 600 で A/D 変換を行い, 画像サイズ 512 × 480, RGB それぞれ濃度値 256 段階の画像を得た.

カメラキャリブレーションは以下の手順で行った.

1. 規則的なパターンを Z , F を変化させて撮影し画像中心座標を決定する.
2. 撮影画像およびレンズの規格から実パラメータとレンズパラメータの関係 ($f(Z)$, $U(F)$, $A(I)$) を求める.
3. フォーカスが無限遠合焦時 ($w = f$) を基準とした F に対する画像拡大率 (フォーカス拡大率 $M_{focus} = w/f$) を求め, (1.1) 式を用いて曲線あてはめを行う (図 1.4). これによって w の F と f の次数を 2 と決定した.
4. F および Z を変化させた時のステップエッジのぼけ幅⁴の変化から, w と d の関係を求める.

得られたキャリブレーション結果を表 1.1 に示す.

⁴画像からのぼけ幅計測は, まずおおよそのエッジ位置を手手で与え, 次にエッジに直交する方向の明度プロファイルを求め, 最後にステップエッジのぼけの理論式 (ステップエッジと錯乱円のたたみ込みによって得られる明度変化関数) をあてはめることによってぼけ幅とエッジ位置を決定した. 以下の実験においても同様の方法でぼけ幅を求めた.

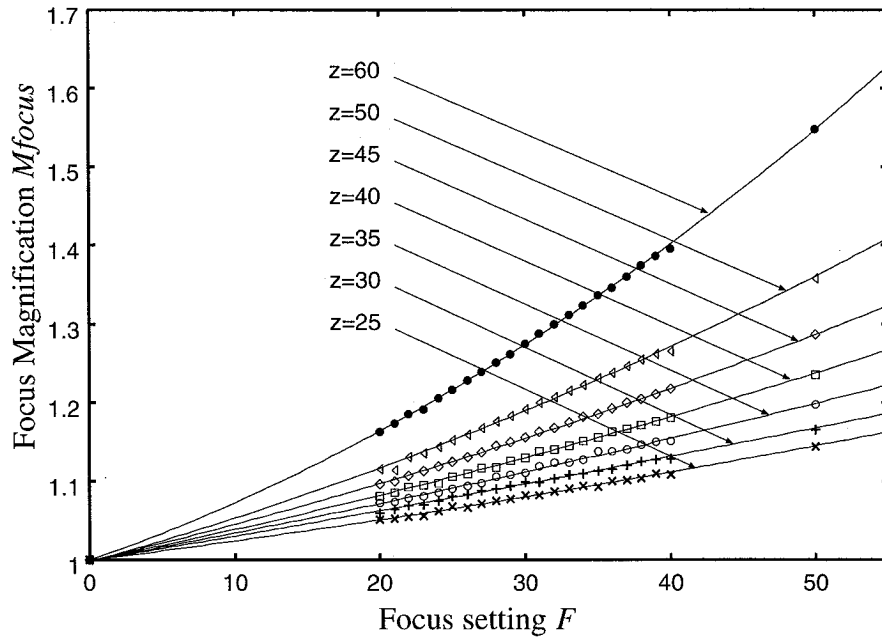


図 1.4: フォーカス拡大率

表 1.1: カメラキャリブレーション結果

焦点距離	$f(Z) = 4.73 \times 10^{-2} Z^2 - 2.37Z + 4.27 \times 10$
合焦距離	$U(F) = 4.25 \times 10 F^{-1} + 5.25 \times 10^{-2}$
絞り値	$A(I) = 1.8\sqrt{2}^{(1.75 \times 10^{-1} I - 4.39)}$
有効焦点距離	$w(f, F) = f + (5.88 \times 10^{-5} f^2 + 2.38 \times 10^{-3} f)F + (1.48 \times 10^{-6} f^2 - 1.62 \times 10^{-5} f)F^2$
有効開口径	$d(w, A) = 6.66 \times 10^{-1} w A^{-1}$

1.3.2 単一距離物体の距離計測

ズームによるぼけ変化から距離計測が可能であること、そして多重ズーム画像を用いた距離計測の安定性を評価するための基礎実験を行った。左半分が黒、右半分が白の直線ステップエッジを描いた平面ターゲットをカメラ前面から 1250mm の距離に配置し、アイリス 4 段階、フォーカス 8 段階、ズーム 6 段階の計 192 枚の画像からぼけ幅を計測した。

ぼけ幅が最も安定に計測できた $I = 35$ の時の有効焦点距離 w の 2 乗 (横軸) とぼけ幅 b (縦軸) の関係を図 1.5 に示す。実線は、フォーカスを固定した時のズーム変化によるぼけ幅 b を表し、この場合の b が w^2 に比例するという (1.3) 式の性質を確認することができた。一方、グラフの破線は、ズームを固定した時のフォーカス変化によるぼけ幅 b を表している。この変化は Depth from Focus で用いられる “V” 型となり、V の谷のフォー

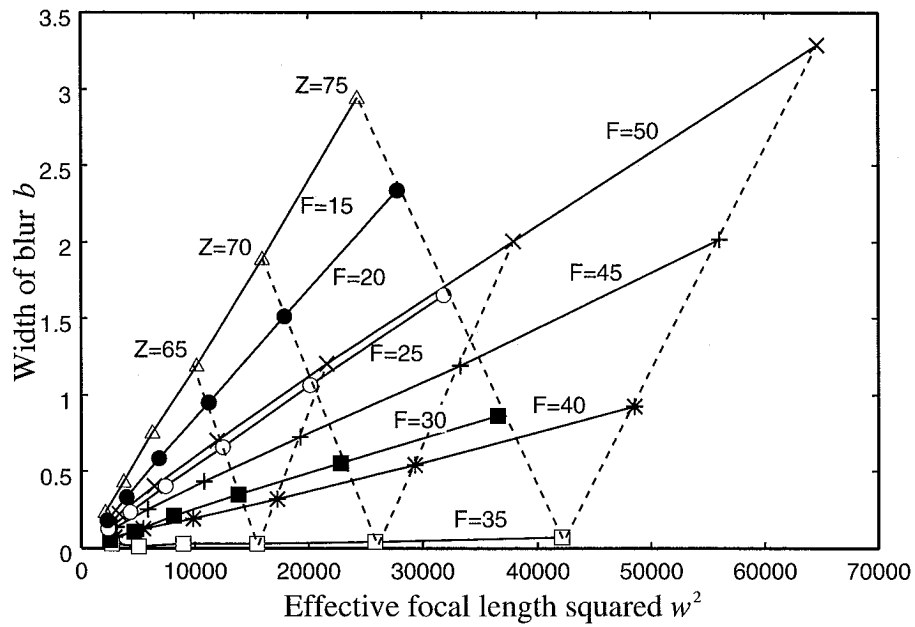


図 1.5: 有効焦点距離の 2 乗 w^2 とぼけ幅 b の関係

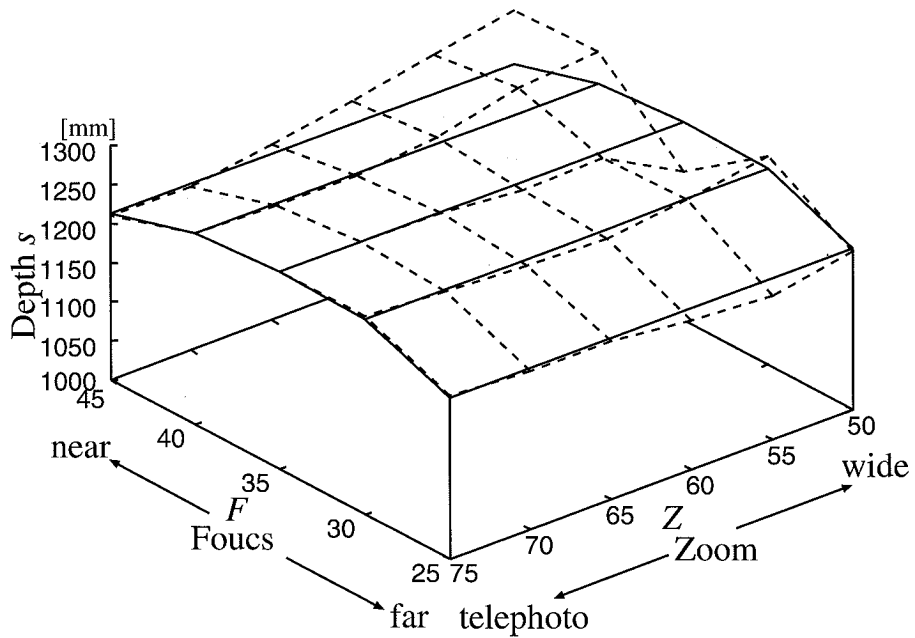


図 1.6: 単一および多重ズーム画像からの距離計測結果

カス値 $F = 35$ からターゲットまでの距離 $U(35) = 1260\text{mm}$ が得られる。

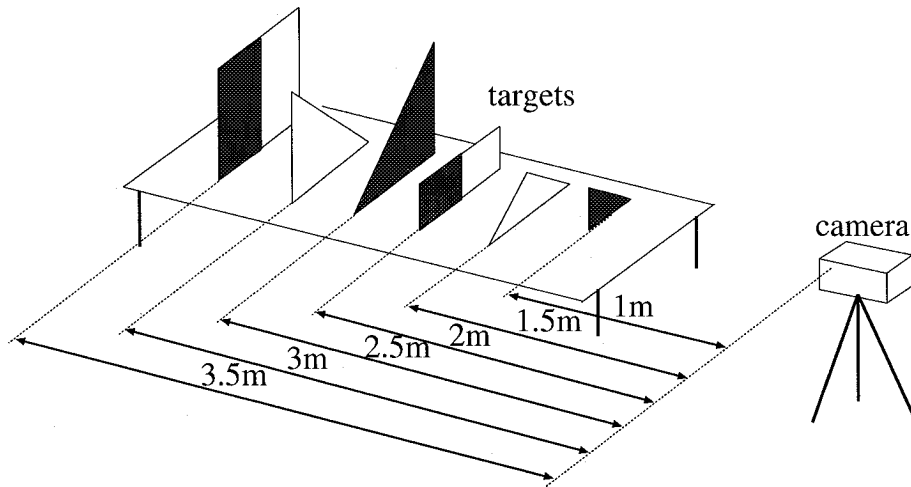


図 1.7: 複数距離物体の配置

各画像でぼけ幅から (1.4) 式を用いて距離計測を行った結果を図 1.6 に破線で示し、多重ズーム画像のぼけ変化 (図 1.5 の実線の傾き) から (1.6) 式を用いて距離計測を行った結果を実線で示す。単一画像からの距離計測の結果は平均距離 1236mm, 標準偏差 27.4mm であり、多重ズーム画像を用いた場合の平均距離は 1233mm, 標準偏差 19.8mm であった。単一画像も多重ズーム画像も全体の平均距離は真値 (1250mm) に対して約 1% の誤差しかなく十分高い精度が得られているが、標準偏差は単一画像の方が大きく不安定であることが分かる。また、単一画像の望遠側は安定しているが、広角側では不安定になる傾向がある。これは、広角側で撮影した画像の空間分解能が低下するためぼけ幅計測の精度が低下するためと考えられる。これらの結果をまとめると以下のようなになる。

- ズームとフォーカスによるぼけ変化の実験結果 (図 1.5) は、薄凸ズームレンズモデルとぼけモデルから導いた (1.3) 式とよく合致し、モデルの妥当性と同時に、ズームによるぼけ変化からの距離計測が可能であることを確認した。
- 単一画像より多重ズーム画像を用いた方が距離計測結果が安定する傾向がある。このことは多重画像解析 [14] の有効性を示している。

1.3.3 複数距離物体の距離計測

距離の異なる複数の物体が同時に存在するシーンとして、図 1.7 のように 6 枚の平面ターゲットを 1000mm から 3500mm の距離に配置した。アイリス制御値は $I = 35$ に固定し、フォーカス制御値は $F = 15, 20, 25$ の 3 段階、ズーム制御値は $Z = 50, 55, 60, 65$ の 4 段階で撮影を行った。 $F = 20$ の時の多重ズーム画像を図 1.8 に、エッジ番号を図 1.9 に示す。

各画像の拡大率に基づいて画素の対応づけを行い、それぞれのエッジに対して多重ズー

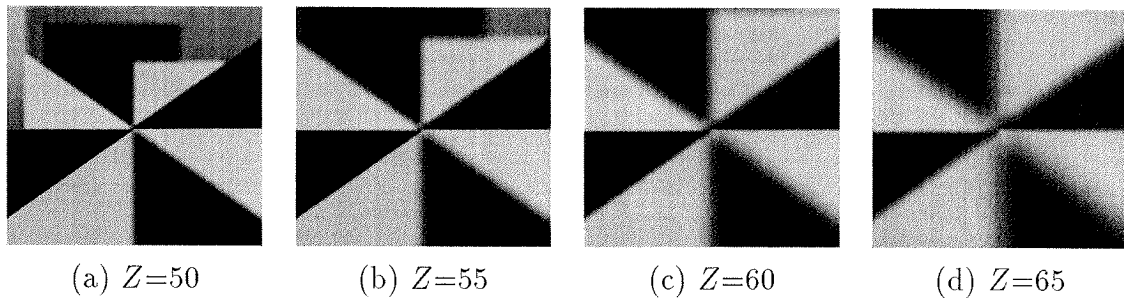


図 1.8: 複数距離物体を撮影した多重ズーム画像系列

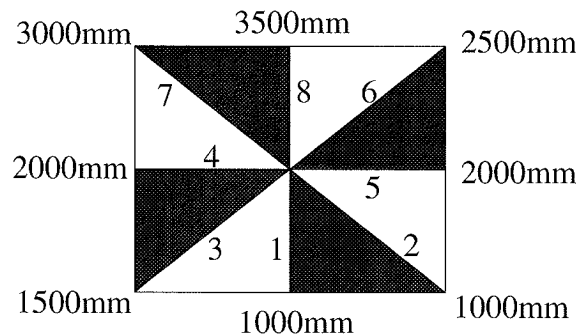


図 1.9: 複数距離物体のエッジ番号

ム画像から距離計測を行った結果を図 1.10 に示す⁵。図の横軸はカメラから各エッジまでの距離 (真値) であり、縦軸はぼけから求めた各エッジまでの推定距離と真値との差 (誤差) を示している。図中の矢印が指す黒点は、3 種類のズーム画像系列の各フォーカス制御値 $F = 15, 20, 25$ が表す合焦距離とその時の誤差を示している。表 1.2 には、 $F = 20$ の時の各エッジの推定距離の平均値、誤差、標準偏差を示す。図 1.10 と表 1.2 から分かることを整理すると以下ようになる。

- いずれのズーム画像系列においても、合焦距離付近では誤差が少なく高精度な距離推定が行える。
- 推定した距離は、合焦距離より手前では実際の距離より小さく、合焦距離より遠くでは実際の距離より大きく算出される傾向がある。
- 距離の誤差は、合焦距離より手前では相対的に小さく、距離が遠くなると急速に増大する。標準偏差も距離が遠くなると増加する傾向がある。

⁵この実験では、エッジ 8 が平面エッジ、それ以外は遮蔽エッジである。この実験環境では、遮蔽エッジのぼけは近距離側の平面エッジのぼけと同じ性質になる [15] ので、ぼけから求めた距離は近距離側の平面までの距離を求めていることになる。

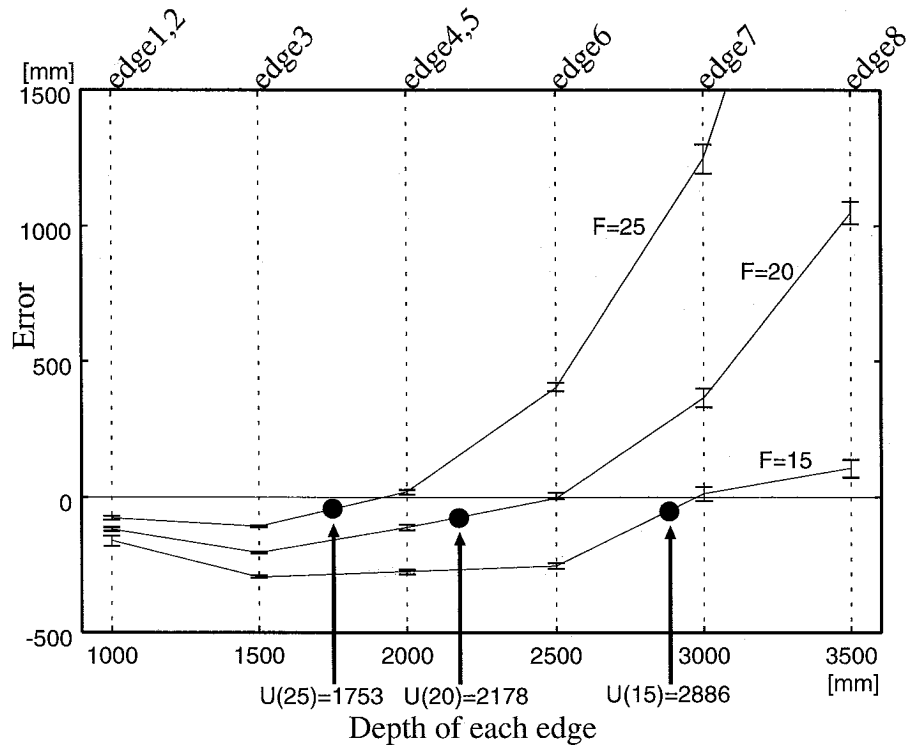


図 1.10: 複数距離の計測結果

表 1.2: 複数距離計測の精度評価 (単位 mm)

エッジ	真値	平均値	誤差	標準偏差
1,2	1000	881.4	-118.6	6.7
3	1500	1294.5	-205.5	3.4
4,5	2000	1887.0	-113.0	10.1
6	2500	2496.4	-3.6	12.1
7	3000	3364.4	364.4	33.6
8	3500	4545.9	1045.9	42.4

合焦距離から大きく離れたり遠距離になると精度や安定性が低下する傾向は、画像のぼけから距離を求める手法 (Depth from Focus/Iris) に共通に見られる現象である。これは、ぼけすぎたエッジや空間分解能の低い画像からは信頼できるぼけ情報が得られないためである。これらの性質を考慮すると、多重ズーム画像からの距離計測手法は、合焦距離前後の距離推定に適していることが分かる。

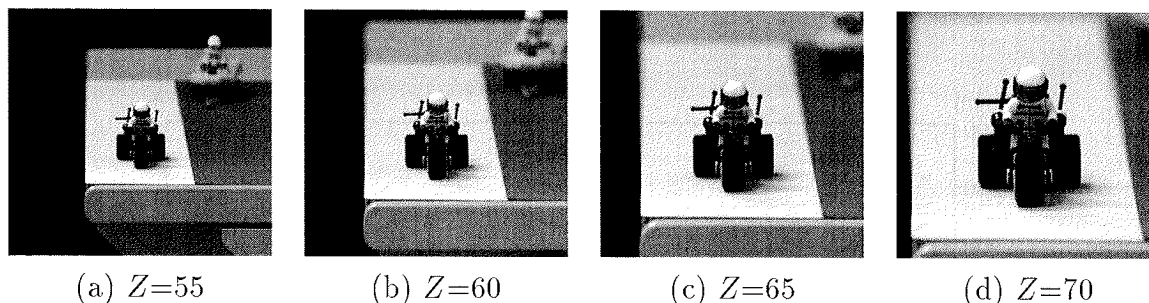


図 1.11: 距離が連続的に変化するシーンの多重ズーム画像

1.3.4 連続的に変化する距離の計測

より現実的な状況での本手法の適用可能性を調べるため以下の実験を行った。机の上に模型の三輪車を置き、オートフォーカス、オートアイリスのカメラを想定して、画像中央の物体にピントが合うようにフォーカスを設定し、適正明度にアイリスを固定して、ズームを広角から望遠に変化させた画像系列を得た。この時の実パラメータは、 $I = 35$, $F = 24$, $Z = 55, 60, 65, 70$ であり、得られた多重ズーム画像を図 1.11 に示す。フォーカスは三輪車の前輪に合焦し、フォーカス制御値から求めた合焦距離は $U(24) = 1823\text{mm}$ である。模型の下の矩形平面の左右の辺は、カメラからの距離が連続的に変化するエッジであり、ぼけも連続的に変化している。そこで、このエッジに沿ったぼけ変化に本手法を適用して距離計測を行った。

図 1.12 に多重ズーム画像から左右のエッジの距離を求めた結果とそれらの回帰直線を示す。横軸が画像の y 座標 (画像の左上が原点, 下向きが正方向), 縦軸がカメラからの距離を表す。エッジに沿った距離が直線状に変化するという結果はシーン構成と一致し、回帰直線の相関係数が左右とも 0.99 以上であることから、ぼけが連続的に変化する場合にも本手法が有効であり、高精度の距離計測が可能であることが確認できた。

左右エッジの距離情報からカメラと平面の 3 次元位置関係を復元した結果を図 1.13 に示す。実画像中に含まれる物体の位置姿勢をカメラ中心座標系で記述することができれば、シーン構成に幾何学的に整合した仮想物体を合成することが可能である。実画像 (図 1.11) 中の平面の周囲に煉瓦ブロックを仮想的に配置した合成画像を図 1.14 に示す。なお、カメラモデルと平面の 3 次元情報に基づいて実画像に仮想物体を埋め込んでいるので、煉瓦ブロックには実画像と同等のぼけが付加されている。

1.4 まとめ

本章は、フォーカスやアイリスと同様にズームにも画像のぼけを制御する効果があることに着目し、ズームによるぼけ変化から距離計測が可能であることを理論的および実験的に示した。本研究の特徴と今後の課題を整理すると以下ようになる。

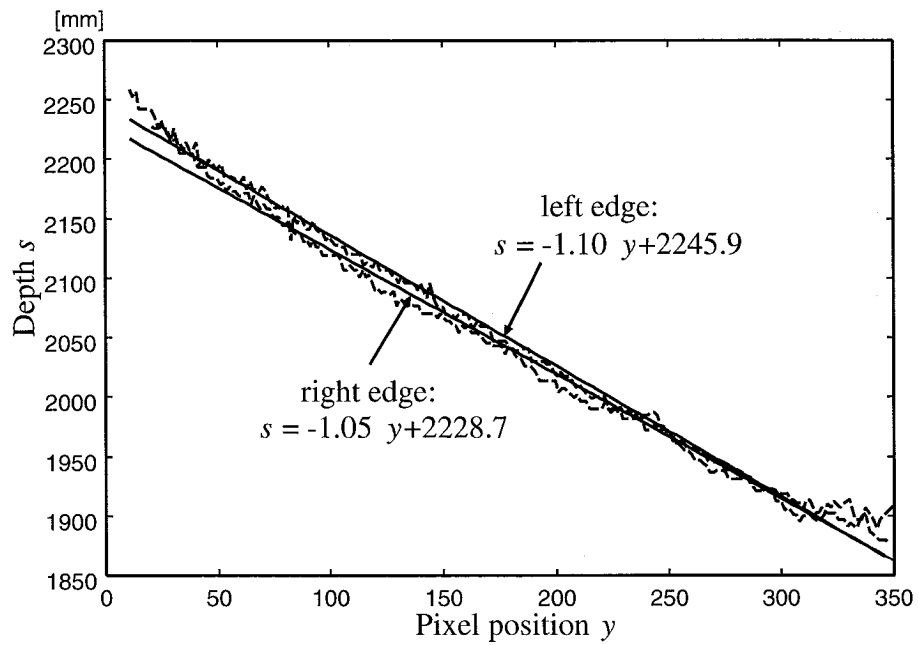


図 1.12: 距離が連続的に変化するエッジの距離計測結果

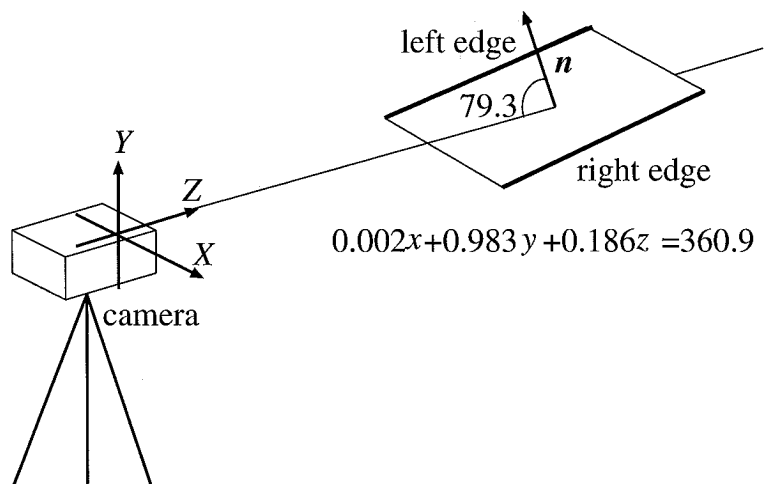


図 1.13: 距離情報から求めたカメラと平面の位置関係

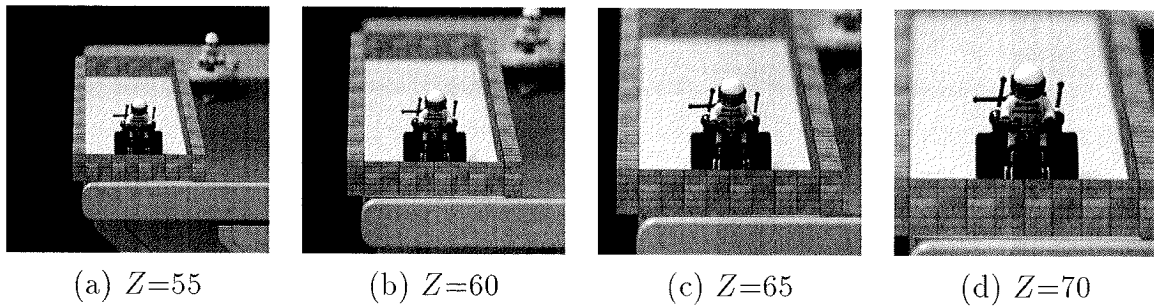


図 1.14: 実画像に仮想煉瓦ブロックを埋め込んだ多重ズーム合成画像

1.4.1 カメラモデル

ズームレンズの性質を整理し、ズーム、フォーカス、アイリスの変化を有効焦点距離と有効開口径の変化として記述する薄凸ズームレンズモデルを構成した。これによって、従来のピンホールカメラモデルでは扱えなかったズームレンズのぼけ現象を解析することが可能となり、距離計測方法を導出することができた。さらに、実画像を用いた距離計測と画像合成の実験によって、カメラモデルの検証と評価を行った。その結果、薄凸ズームレンズモデルは位置・姿勢が固定という制約があるものの、ズーム、フォーカス、アイリスによるぼけ変化について画像の解析と生成に十分な記述能力があることが分かった。今後の課題としては、厚凸レンズモデルの適用を検討し、位置・姿勢の記述、距離精度の向上、多様な場面での距離計測の可能性などについて調べる必要がある。

1.4.2 距離計測

本手法は、複数距離物体の実験で述べたように、フォーカスによって定まる合焦距離前後の距離計測において高い精度が得られるという性質がある。そのため、合焦となる物体までの距離はフォーカス設定から求め、その前後の物体の距離情報に本手法を適用することが期待される。このような状況は、ズームレンズを用いた撮影でしばしば生じる。すなわち、ズームの広角側でシーンを広く観察し、注目する物体を発見した後に、その物体を画像中央に捉えて位置姿勢固定の状態ズームアップすると、図 1.11 のような多重ズーム画像を得ることができる。一方、距離計測の精度評価については、基礎実験による定量評価と実シーンをを用いた応用実験を行った。特に、連続的に距離が変化するエッジに対しても本手法が問題なく機能することが分かり、実環境への適用可能性を確認することができた。また、距離計測の精度評価と本手法の応用の観点から画像合成を試みた。その結果、実画像中の物体に対して幾何学的かつ光学的に整合した仮想物体を埋め込んだ高品質な画像が合成可能であることが分かった。今後の課題としては、本手法の実用性をさらに高めるためにエッジの検出とぼけ幅の計測を高速かつ高精度に行う方法を開発する必要がある。

参考文献

- [1] E. Krotkov, "Focusing," IJCV, vol.1, no.3, pp.223-237, 1987.
- [2] M. Subbrarao, "Parallel depth recovery by changing camera parameters," Proc. ICCV, pp.149-155, 1988.
- [3] 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, 1994.
- [4] J. Ens and P. Lawrence, "An investigation of methods for determining depth from focus," IEEE Trans. PAMI, vol.15, no.2, pp97-108, 1993.
- [5] A. Pentland, "A new sense for depth of field," IEEE Trans. PAMI, vol.9, no.4, pp.523-531, 1987.
- [6] G. Surya and M. Subbarao, "Depth from defocus by changing camera aperture: A spatial domain approach," Proc. CVPR, pp.61-67, 1993.
- [7] 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.1338-1347, 1991.
- [8] J. Ma and S. Olsen, "Depth from zooming," J. Opt. Soc. Am. A, vol.7, no.10, pp.1883-1890, 1990.
- [9] J.M. Lavest, G. Rives, and M. Dhome, "Three-dimensional reconstruction by zooming," IEEE Trans. RA, vol.9, no.2, pp.196-207, 1993.
- [10] 馬場雅志, 小田 愛, 浅田尚紀, "ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを用いた多重ズーム画像からの距離計測," 画像の認識・理解シンポジウム, vol.II, pp.37-42, 2000.
- [11] 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," 信学論 (D-II), vol.J80-D-II, no.6, pp.1458-1465, 1997.
- [12] R. Kingslake, "Optical System Design," Academic Press, 1983.

- [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] 松山隆司, 浅田尚紀, “多重画像の統合による多機能高精度画像計測,” 松山隆司, 久野義徳, 井宮 淳編, コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, pp.25-36, 1998.
- [15] 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,” 信学論 (D-II), vol.J78-D-II, no.2, pp.248-262, 1995.

第 2 章

二種類の高精度ぼけ画像生成アルゴリズムの実装と比較評価

2.1 はじめに

実写画像とCG画像を合成しリアリティの高い画像を生成するには、実写画像がぼけを含むことを考慮した画像生成が必要である。CGにおけるぼけ画像生成法としては、ピンホールカメラモデルで作成したぼけのない画像に後処理でぼけを付加する方法 [1]、生成画像の1画素に対してレンズ面を通過する複数の光線追跡を行う Distributed Ray Tracing 法 [2, 3]、そして Accumulation Buffer を用いて複数のピンホール画像を移動加算してぼけ画像を生成する方法 [4] 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づけ、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、ぼけ画像の精度評価やぼけを含む実写画像合成は行われていなかった。

これに対して我々は、実カメラのモデル化とキャリブレーションに基づく高精度な画像生成と実写画像合成を行う Calibrated Computer Graphics の研究を進めている。この研究では、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 [5] に基づいてぼけ画像を生成する多重Zバッファアルゴリズム [6, 7] を提案した。このアルゴリズムは、Zバッファの使用によって Distributed Ray Tracing より効率的ではあるものの、生成画像の1画素につき1回または2回のZバッファ法を適用する必要があるため、計算コストが高いという問題があった。

そこで本章では、多重Zバッファアルゴリズムの特徴と問題点を整理し、その高速化とOpenGLを用いた実装について述べる。次に、Accumulation Buffer を使用する多重ピンホールアルゴリズムとの理論的、実験的比較を行い、両者の精度と効率の比較評価を行う。

2.2 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とは撮像面上の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 O 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。

図2.1に示すように、まず最終生成画像の画素位置 (x, y) と合焦距離から合焦点 O を求め、レンズと合焦点 O から光束円錐 OC_{near} 、合焦点 O に関して対称な光束円錐 OC_{far} を求める。そして合焦点 O 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} 画像を作成する。レンズ近くの物体により遠くの物体は隠蔽されるということに注意して $\{OC_{near}$ 画像 $>$ 合焦画像 $>$ OC_{far} 画像 $\}$ の優先順位で合成 OC 画像を生成する。そして生成した合成 OC 画像の平均明度を最終生成画像の画素位置 (x, y) の明度にするという方法である。なお OC_{near} 画像、 OC_{far} 画像、合焦画像はZバッファ法を用いて画像を生成する。 OC_{near} 画像は通常とは逆に視点位置 O から遠い物体を表示する逆Zバッファ法を用いて画像を生成する。合焦画像は合焦距離にある物体のみを表示する。

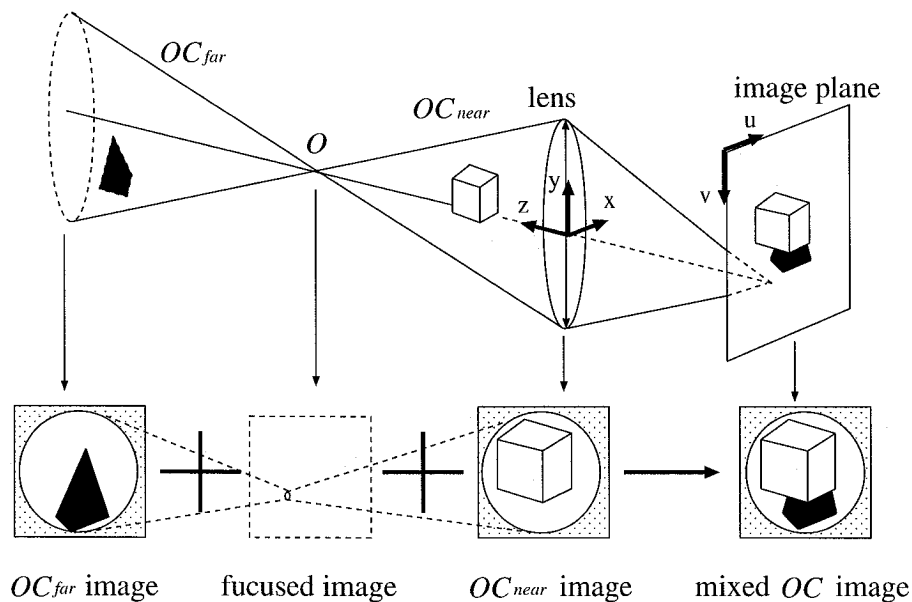


図 2.1: 多重 Z バッファアルゴリズム

2.2.1 画像生成アルゴリズム 1 (Z_buffer1)

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．画像生成アルゴリズムを以下に示す．

1. 撮像面距離 w から合焦距離 U を求める．
2. 合焦画像の画角を撮像面距離 w ，最終生成画像の 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 の合焦画像を作成し，ピクセルデータをメモリに保存する．
4. OC 画像の画角を合焦距離 U ，レンズ口径 d から求める．
5. 最終生成画像の画素位置 (x, y) を与える．

以下の処理を画素数 N だけ繰り返す．

6. 画素位置 (x, y) と撮像面距離 w から合焦点 O を求める．
7. OC_{near} 画像，レンズ形状画像を作成し，それぞれのピクセルデータをメモリに保存する．
8. 合焦画像の画素位置 (x, y) の値が存在する場合は 9 を，存在しない場合は 10，11 を実行する．以後 12 以下を実行する．

9. OC_{near} 画像, 合焦画像から合成 OC 画像を作成する. レンズに近い OC_{near} 画像を優先し, OC_{near} 画像の値が存在しない画素については, 合焦画像の画素位置 (x, y) の値を用いる.
10. OC_{far} 画像を作成し, ピクセルデータをメモリに保存する.
11. OC_{near} 画像, 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} 画像の値が存在し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.
12. レンズ形状画像から OC 画像の内部領域であるかを判定し, 合成 OC 画像の内部領域の平均明度を最終生成画像の画素位置 (x, y) の明度とする.
13. 新たな画素位置 (x, y) を与える.

2.2.2 アルゴリズムの変更点

● 合成 OC 画像の内部領域判定

従来はレンズ形状画像を作成し, ピクセルデータをメモリに保存し, 値の有無により OC 画像の内部領域であるかの判定を行っている. これに対してレンズ形状の計算式に基づいてレンズ内部 / 外部の判定を行えば, 「レンズ形状画像の作成, ピクセルデータのメモリへの保存」という処理を省くことができる.

● OC_{near} 画像の重ね描き

1. 合焦画像の値が存在する場合

従来は合成 OC 画像を作成する時に合焦画像の値が存在する場合, OC_{near} 画像の値が存在しない部分は合焦画像の値を利用している. 従って合焦画像の値を背景の色にし, OC_{near} 画像を重ね描きすれば, 「合成 OC 画像 = OC_{near} 画像」という OC_{near} 画像が生成でき, 合成 OC 画像を作成する必要がなくなる.

2. 合焦画像の値が存在しない場合

従来は合成 OC 画像を作成する時に合焦画像の値が存在しない場合, OC_{far} 画像を作成し, そのピクセルデータをメモリに保存している. これは OC_{near} 画像の値と合焦画像の値の両方が存在しない画素については対応する OC_{far} 画像の画素値を用いて合成 OC 画像を作成する. 従ってまず OC_{far} 画像を作成しその上に OC_{near} 画像を重ね描きすれば, OC_{far} 画像を背景とする OC_{near} 画像を作成することができる. すると「合成 OC 画像 = OC_{near} 画像」という OC_{near} 画像が生成でき, 合成 OC 画像を作成する必要がなくなる.

2.2.3 画像生成アルゴリズム 2(Z_buffer2)

最終生成画像, 合焦画像の x 方向の画素数を $xsize$, y 方向の画素数を $ysize$, 合成 OC 画像の内部領域であるスキャンラインの上限を $yhigh$, 下限を $ylow$, スキャンラインにおいて合成 OC 画像の内部領域である右端を $xright$, 左端を $xleft$ とする. $yhigh$, $ylow$, $xright$, $xleft$ については次節で説明するレンズ形状の計算により求める. 従来の画像生成アルゴリズムの 7 以下が変更した部分であり, 以下に示す.

7. 合焦画像の画素位置 (x, y) の値が存在する場合は 8 を, 存在しない場合は 9 を実行する. 以後 10 以下を実行する.
8. 合焦画像の画素位置 (x, y) の値を OC_{near} 画像の背景の色にする.
9. OC_{far} 画像を作成し, それを OC_{near} 画像の背景にする.
10. 8 又は 9 で作成した背景の上に OC_{near} 画像を重ね描きし, ピクセルデータをメモリに保存する.
11. 合成 OC 画像の内部領域 ($yhigh$, $ylow$, $xright$, $xleft$) を計算により求める.
12. 合成 OC 画像の内部領域の平均明度を最終生成画像の画素位置 (x, y) の明度とする.
13. 新たな画素位置 (x, y) を与える.

2.2.4 レンズ形状の計算

円形領域の平均明度の求め方

従来のアルゴリズムではレンズ内部 / 外部の判定のためにレンズを白で描画し, ピクセルデータをメモリに保存し, その画像の色を判定することでレンズ内部 / 外部を判定している. 円形領域の平均明度を求める時, 次のアルゴリズムで求めることができる. 円の半径を r , 座標 (x, y) における明度を $Intensity(x, y)$ とする.

```
t = 0; n = 0;
for(y = -r; y ≤ r; y++)
  for(x = -√(r² - y²); x ≤ √(r² - y²); x++) (1)
    t += Intensity(x, y); n++;
t / = n;
```

多重 Z バッファアルゴリズムの場合, 真円にはならないので (1) を関数 f_1, f_2 を用いて次のように表す.

```
for(x = f1; x ≤ f2; x++) (1)
```

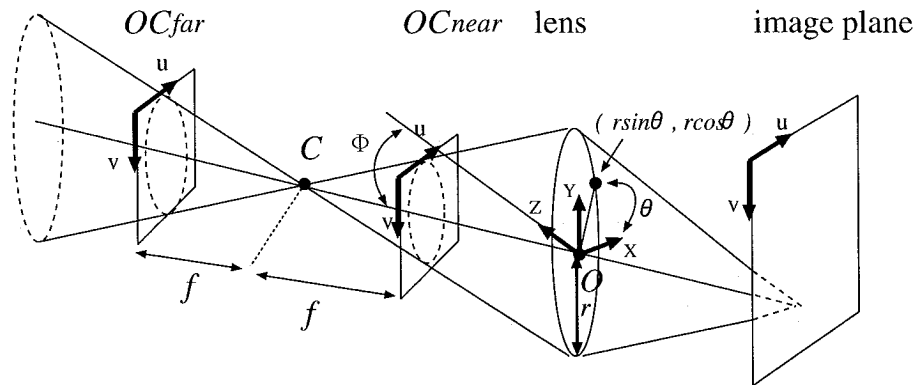


図 2.2: 多重 Z バッファアルゴリズムへの適用

多重 Z バッファアルゴリズムへの適用

原点 O をレンズ中心, 合焦点 C の座標を (ξ, η, Z) , レンズ半径を r , OC_{near}, OC_{far} の焦点距離を f とする (図 2.2 参照).

まず ρ, ϕ, γ を以下のように定める.

$$\begin{cases} \sqrt{\xi^2 + \eta^2} = \rho \\ \rho \cos \phi = \eta \\ \rho \sin \phi = \xi \\ \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + Z^2} = \gamma \end{cases}$$

OC_{near}, OC_{far} の投影のための行列 R を次のようにする.

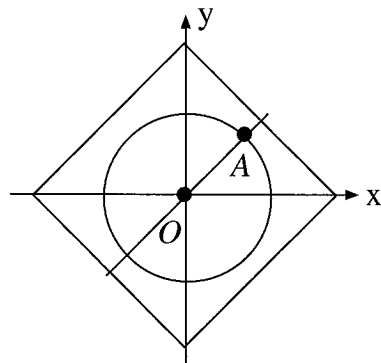
$$R = \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ -\frac{\xi}{\gamma} & -\frac{\eta}{\gamma} & -\frac{Z}{\gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\xi \\ 0 & 1 & 0 & -\eta \\ 0 & 0 & 1 & -Z \end{pmatrix}$$

後の便宜上第 1 行を $(\xi, \eta, *)$ 方向にとる. 即ち図 2.3 の点 A と原点 O を結ぶ直線と平行方向に第 1 の軸を持つ. これは OC の縦方向でレンズと点 C 間の奥行きを一定にするための処置である. 回転行列を正規直交となるように選ぶと次のようになる.

$$R = \begin{pmatrix} \frac{\xi Z}{\rho \gamma} & \frac{\eta Z}{\rho \gamma} & -\frac{\rho}{\gamma} \\ \frac{\eta}{\gamma} & -\frac{\xi}{\gamma} & 0 \\ -\frac{\xi}{\gamma} & -\frac{\eta}{\gamma} & -\frac{Z}{\gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\xi \\ 0 & 1 & 0 & -\eta \\ 0 & 0 & 1 & -Z \end{pmatrix}$$

但し $\xi = \eta = 0$ のときは

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z \end{pmatrix}$$



OC image

図 2.3: 軸の決め方

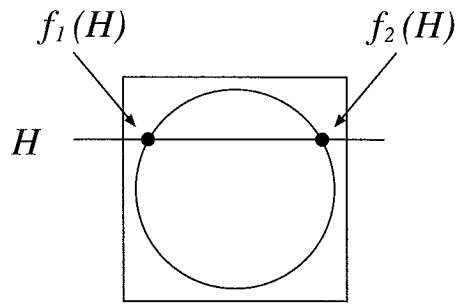


図 2.4: $f_1(H)$ と $f_2(H)$

レンズ外縁の計算

レンズ外縁は $\begin{pmatrix} r \cos \theta \\ r \sin \theta \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ なる点集合である。この点を R で変換させると次のようになる。ここで $\theta' = \phi - \theta$ である。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} r \cos \theta \\ r \sin \theta \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Z}{\gamma} r \cos \theta' \\ r \sin \theta' \\ \gamma - \frac{\rho}{\gamma} r \cos \theta' \end{pmatrix}$$

OC 画像内でのこれらの点の像は以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \Xi \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{fx}{Z} \\ \frac{fy}{Z} \end{pmatrix}$$

(1) の f_1, f_2 は図 2.4 のように $\Xi = f_1(H), \Xi = f_2(H)$ を満たすように選ぶ。

- $\xi = \eta = 0$ のとき

この時は真円となりその半径は $\frac{fr}{Z}$ であり Ξ は以下ようになる。

$$\Xi = \pm \sqrt{\frac{f^2 r^2}{Z^2} - H^2}$$

- 一般の場合

$$\begin{cases} (\frac{\gamma}{Z}x)^2 + y^2 = r^2 \\ z = \gamma - \frac{\rho}{Z}x \end{cases} \begin{cases} \Xi = \frac{fx}{Z} \\ H = \frac{fy}{Z} \end{cases}$$

これらの関係より

$$\left(\frac{\gamma}{Z}\Xi\right)^2 + H^2 = \frac{f^2 r^2}{\left(\gamma - \frac{\rho x}{Z}\right)^2}, \Xi = \frac{fx}{\gamma - \frac{\rho x}{Z}}$$

代入すると

$$\left(\frac{\gamma fx}{\gamma Z - \rho x}\right)^2 + H^2 = \frac{f^2 r^2}{\left(\gamma - \frac{\rho x}{Z}\right)}$$

$$\frac{\gamma^2 f^2 x^2 - Z^2 f^2 r^2}{(\gamma Z - \rho x)^2} + H^2 = 0$$

$$\gamma^2 f^2 x^2 - Z^2 f^2 r^2 + H^2(\gamma Z - \rho x)^2 = 0$$

$$x^2(\gamma^2 f^2 + H^2 \rho^2) - 2x(H^2 \gamma Z \rho) + H^2 \gamma^2 Z^2 - Z^2 f^2 r^2 = 0$$

x の 2 次方程式であるから

$$x = \frac{H^2 Z \gamma \rho \pm \sqrt{D}}{\gamma^2 f^2 + H^2 \rho^2} \quad (2)$$

$$D = H^4 Z^2 \gamma^2 \rho^2 - (\gamma^2 f^2 + H^2 \rho^2)(H^2 \gamma^2 Z^2 - f^2 r^2) Z^2$$

これを使って $\Xi = \frac{fx}{\gamma - \frac{\rho x}{Z}}$ を求める。この時 (2) の ± の負側が $f_1(H)$ 、正側が $f_2(H)$ となる。また (2) の根号の中身 $D < 0$ のとき実数解は持たない。この時、 H はレンズ外部ということになる。

2.2.5 プログラムの実装

OC_{near} 画像の重ね描き

OC_{near} 画像を重ね描きするためには合焦画像のピクセルデータがメモリに保存されてなければならない。ここでは既に array0 という配列に保存されていると仮定する。OpenGL では何かを描画する場合にはカラーバッファに対して書き込みを実行する。つまりカラーバッファが画面に表示されるカラー情報を持っている。従って描画する前に `glClearColor(R, G, B, alpha)` 関数でカラーバッファの消去値を指定し、`glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT)` 関数でカラーバッファを消去する。消去せずに新たな描画を行うと 1 回前に描画した画像が残ったまま新しい画像が描画される。これを利用し、 OC_{near} 画像の重ね描きを行う。

- 合焦画像の値が存在する場合

`glClearColor` 関数で指定するカラーバッファの消去値に合焦画像の値を用いる。array0 から R 値、G 値、B 値を取り出し、正規化した値をそれぞれ F_R, F_G, F_B とする。そして `glClearColor(F_R, F_G, F_B, 0.0)` により合焦画像の値でカラーバッファを消去する。その後で OC_{near} 画像を描画する。これにより合焦画像を背景とする OC_{near} 画像を作成できる。

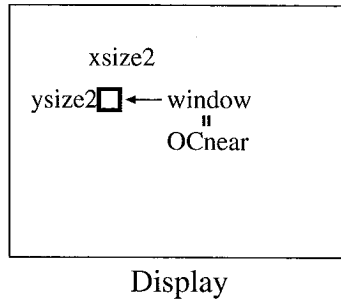


図 2.5: 変更前

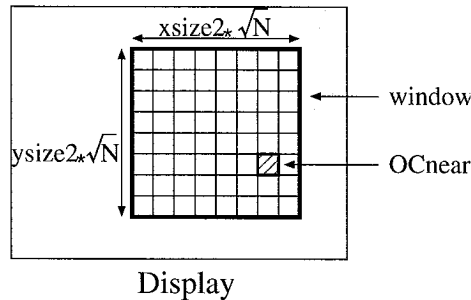


図 2.6: 変更後

● 合焦画像の値が存在しない場合

まず最初に `glClearColor(0.0,0.0,0.0,0.0)` (黒) でカラーバッファを消去し, OC_{far} 画像を描画する. その後カラーバッファを消去せずに OC_{near} 画像を描画する. すると OC_{far} 画像を背景とする OC_{near} 画像を作成できる.

ピクセルデータの保存 (Z_buffer3)

フレームバッファのピクセルデータをメモリに保存するという作業を Z_buffer2 では OC_{near} 画像を一枚作成する度に行っていた. そこで一回の作業で複数枚の OC_{near} 画像のピクセルデータをメモリに保存できるように変更する. OC_{near} 画像の x 方向の画素数を $xsize2$, y 方向の画素数を $ysize2$, 一回にメモリに保存できる OC_{near} 画像の枚数を N , 最終生成画像を作成するのに必要な OC_{near} 画像の枚数を N_f とする. ただし N は \sqrt{N} が自然数になるような自然数である. 以下の方法でピクセルデータをメモリに保存する. なお前もって $(xsize2 * \sqrt{N}) \times (ysize2 * \sqrt{N})$ の window が開かれているとする.

1. `for(j=0;j<ysize2;j++){for(i=0;i<xsize2;i++){`
2. `glViewport(i*xsize2, j*ysize2, xsize2, ysize2)`
3. OC_{near} 画像を作成する
4. `}`
5. ピクセルデータをメモリに保存する

まず一番左下隅からスタートし, 横方向に \sqrt{N} 枚 OC_{near} 画像を描画する. (図 2.7 の左の図) 一番下の段全てに描画したら一つ上の段の左端から同様に横方向に \sqrt{N} 枚 OC_{near} 画像を描画する. (図 2.7 の中央の図) この動作を繰り返し, 右上隅まで描画したら (図 2.7 の右の図) 今表示されているフレームバッファのピクセルデータをメモリに保存する. この一連の動作を $\frac{N_f}{N}$ 回繰り返し, 最終生成画像を作成する.

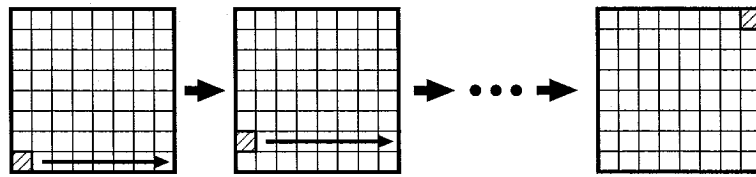


図 2.7: メモリへの保存の流れ

2.3 多重ピンホールアルゴリズム (Pinhole)

多重ピンホールアルゴリズムとは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方法である。この方法では投影面上に物体を投影する時に、合焦平面での物体が同じ領域に投影されるように、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くて、それ以外にある物体はぼける効果を出すことができる。この方法は Haerberli が提案した accumulation buffer を用いたアンチエイリアシング、モーションブラー、被写界深度を表現する方法 [4] の応用である。

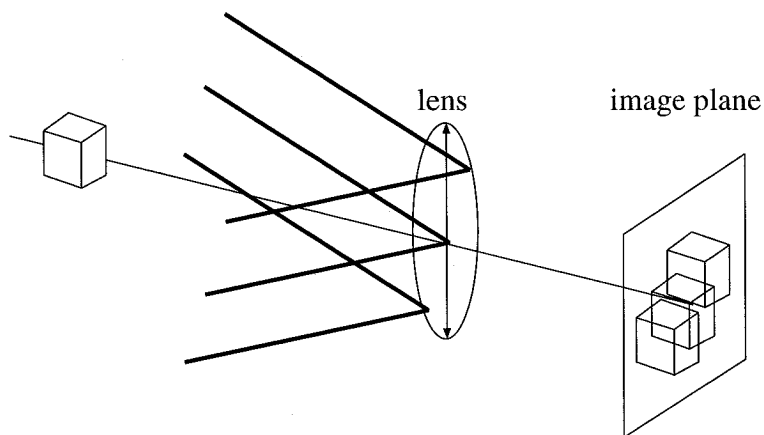


図 2.8: 多重ピンホールアルゴリズム

2.4 理論的比較

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で大きく違うのはレンズ面のサンプルのとり方の違いである。合焦点を O 、レンズ中心を C 、合焦点 O とレンズ中心 C を結んだ直線を OC とする。

多重 Z バッファアルゴリズムは OC と垂直になるような合焦点 O からレンズを見た光束円錐内の平面をレンズ形状画像の投影面とし、この平面を等分割してレンズ面のサンプ

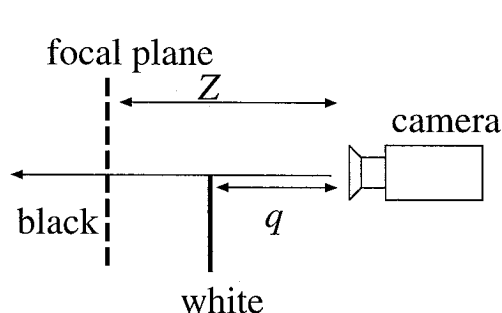


図 2.9: 想定したシーン

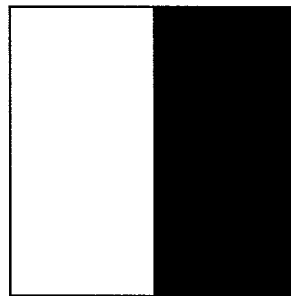


図 2.10: 生成画像

ルとしている。これに対して多重ピンホールアルゴリズムは直接レンズ平面を等分割してレンズ面のサンプルとしている。このように2つのアルゴリズムではレンズ面のサンプル位置が違っている。

- 合焦距離が近い時

多重 Z バッファアルゴリズムにおけるサンプル点と O を結んだ直線とレンズ平面との交点を求め、隣り合う交点間の距離を求めると上にある交点間ほど長く、下にある交点間ほど短くなる。ところが多重ピンホールアルゴリズムにおける実際のサンプルの取り方はレンズ面を等間隔に分割している。ここで大きな違いが生じる。

- 合焦距離が遠い時

多重 Z バッファアルゴリズムで等分割されている間隔と多重ピンホールアルゴリズムで等分割されている間隔には合焦距離が近い時ほど大きな違いは生じない。

画像生成のモデルを以下のように仮定すると多重ピンホールアルゴリズムは $\cos^4 \theta$ を無視しているが、多重 Z バッファアルゴリズムは $\cos^2 \theta$ を考えたものとなっている。

$$I(x, y) = \int \int_{\Omega} L(x, y; \xi, \eta) \cos \rho \cos^2 \theta \cos^2 \theta d\theta$$

また、多重ピンホールアルゴリズムのサンプル点の取り方をジッタ処理すると、画像をアンチエイリアシングでき、人間の目には自然な画像に見えるという違いがある。

2.5 生成時間と画質の評価

2.5.1 シーン想定

図 2.9 のようなシーンを想定し、図 2.10 のように生成画像 (400×400) の左半分が白、右半分が黒になるようにした。 q がカメラから白色物体までの距離、 Z が合焦距離である。

表 2.1: 生成時間 (O2) 単位: 秒

	最高時間	最低時間	平均時間
Z_buffer1	194.95	206.78	200.18
Z_buffer2	96.33	106.44	101.39
Z_buffer3	212.34	224.14	217.04
Pinhole	38.12	39.82	38.84

表 2.2: 生成時間 (OCTANE) 単位: 秒

	最高時間	最低時間	平均時間
Z_buffer1	143.20	146.29	144.56
Z_buffer2	46.91	48.94	47.41
Z_buffer3	35.27	38.09	36.05
Pinhole	99.93	109.08	101.31

表 2.3: 生成時間 (ONYX2) 単位: 秒

	最高時間	最低時間	平均時間
Z_buffer1	187.29	188.54	187.57
Z_buffer2	76.63	76.75	76.69
Z_buffer3	36.91	37.05	36.99
Pinhole	3.64	3.77	3.74

まず生成時間の比較を行った。 q を 350(cm), Z を 450(cm) に固定させ, Z_buffer1, Z_buffer2, Z_buffer3, Pinhole でぼけ画像を生成した。また画像生成には SGI 社の O2(CPU R10000, クロック 250MHZ, メモリ 256Mbyte), OCTANE(CPU R10000, クロック 195MHZ, メモリ 384Mbyte), ONYX2(CPU R10-000, クロック 180MHZ, メモリ 256Mbyte) を使用し, 各プログラムで 10 回ずつ画像生成を行った。

次に生成画像の画質の比較を行った。 q を 350(cm) に固定し, Z を 150 ~ 550(cm) まで変化させ, Z_buffer1, Z_buffer2, Z_buffer3, Pinhole でぼけ画像を生成した。生成画像の 200 行目の明度と, ぼけ画像の明度の理論値のプロファイルを図 2.11, 2.12 に示す。なお Z_buffer2 と Z_buffer3 のデータが全く同じであったため Z_buffer3 のデータは省略している。ここで縦軸は明度値, 横軸は画像の横方向ピクセルである。そして, ぼけ画像の明度の理論値と生成画像の明度値との差の平均値を表 2.4 に示す。

2.5.2 考察

生成時間

O2, OCTANE, ONYX2 全てのマシンにおいて Z_buffer1 より Z_buffer2 の方が速いことから多重 Z バッファアルゴリズムの高速化の効果を確認することができる。しかし Z_buffer2 と Z_buffer3 についてはビューポート変換にかかるコストが高く, CPU の性能

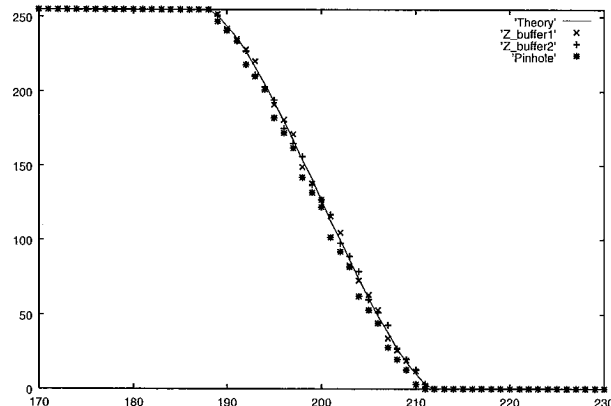


図 2.11: Z=250 の時の明度プロファイル

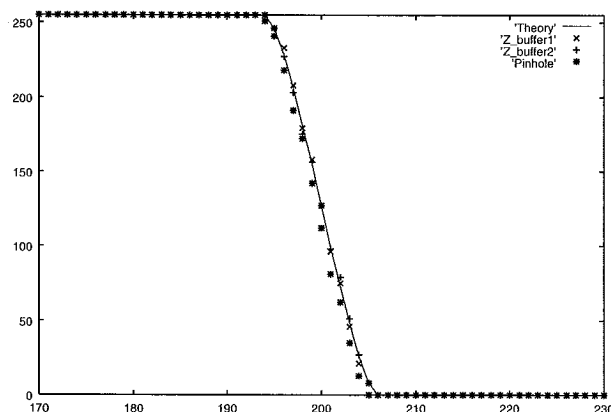


図 2.12: Z=450 の時の明度プロファイル

に依存しているため、O2 では CPU の性能が良い OCTANE, ONYX2 のような良い結果は得られなかった。Pinhole については O2, ONYX2 では一番早いですが、OCTANE では Z_buffer よりも遅くなってしまっている。これは OCTANE は CPU から accumulation buffer へのメモリアクセスが遅いためである。また ONYX2 の Pinhole は 3.74 秒と一番速い結果になっている。これは O2, OCTANE ではアキュムレーションバッファをソフトウェアとして使っているのに対し、ONYX2 ではハードウェア化されており、速くなったと考えられる。

画質の比較

Z_buffer1 と Z_buffer2 を比較し、アルゴリズムの高速化に伴い、生成されるぼけ画像に画質の劣化が生じるのかどうかの検証を行った。明度差の平均値には大きな差は見られず、グラフからも理論値に近く、高速化に伴う画質の劣化は生じてないことが分かる。次に Z_buffer2 と Pinhole を比較し、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画質の比較を行った。明度差の平均値に大きな差は見られず、またグラフからも

表 2.4: 明度差の平均値

	Z=150	Z=250	Z=450	Z=550
Z.buffer1	2.83	2.55	3.00	3.00
Z.buffer2	2.90	4.89	2.75	2.88
Pinhole	2.51	4.23	2.73	5.94

理論値に近く、どちらの手法を用いても高精度なぼけ画像が生成できることが分かる。

2.6 まとめ

本章では、まず多重Zバッファアルゴリズム自体の高速化とOpenGLを用いた実装による高速化について述べた。次に多重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理論的比較について述べた。そして3種類の計算機を使用し、計算時間の計測と生成ぼけ画像と理論ぼけ画像との明度差による評価を行った。

その結果、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画質にはそれほど差がなく、レンズ効果を忠実にシミュレーションする場合には多重Zバッファアルゴリズム、動画のように高速に画像を生成する場合には多重ピンホールアルゴリズムを用いればよいことが分かった。

参考文献

- [1] M.Potmesil,I.Chakravaty: “A lens and aperture camera model for systhetic 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] P.Haeberli,K.Akeley: “The Accumulation Buffer:Hardware Support for High-Quality Rendering”, Proceedings of SIGGRAPH ’90, pp.309-318, 1990.
- [5] 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.
- [6] 馬場 雅志, 天野 晃, 浅田 尚紀: “Calibrated Computer Graphics による画像生成の試み —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, pp.2180-2188, 1998.
- [7] 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”, 第4回 知能情報メディアシンポジウム論文集, pp.187-194, 1998.
- [8] 川田 寿英: “高精度ぼけ画像生成アルゴリズムの高速化とその評価”, 広島市立大学 情報科学部 知能情報システム工学科 卒業論文, 1999.
- [9] Jackie Neide,Tom Davis,Mason Woo: “*OpenGLTM* programming Guide (日本語版) The Official Reference Document for OpenGL,Release1”, 1993.

第 3 章

カメラと眼のキャリブレーションに基づく高精度立体視画像合成

3.1 はじめに

コンピュータの飛躍的な性能向上を背景にして、仮想現実 (Virtual Reality) や拡張現実 (Augmented Reality), そして複合現実 (Mixed Reality)[1] と呼ばれる技術が急速に発展し、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) を融合した画像メディア研究への関心が高まっている。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、実カメラのモデル化とキャリブレーションに基づく実写画像と CG 画像の高精度な合成の研究を行ってきた [2]。この研究では、実カメラのズーム、フォーカス、アイリスの諸特性を忠実にモデル化することによって、実写画像と同じ拡大率 (ズーム)、ぼけ (フォーカス)、明度 (アイリス) の CG 画像を生成し、実写画像と合成することが可能となった [3]。しかし、コンピュータを人間の視覚能力を補助・強化する画像メディアとしてより高度に利用することを考えると、立体感や距離感を表現する立体視画像合成の技術が不可欠となる。

従来からトレイグジスタンスや人工現実感の研究では、両眼に異なる画像を呈示できるヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた立体視が行われてきた。人間が立体感を得る要因として輻輳、視差 (両眼, 運動), 水晶体の焦点調節が知られている [4] が、HMD では主に輻輳と視差を利用した立体視が行われている。しかし、従来の立体視では、平均的な眼の特性 (視点間距離と画角) に基づいて画像が生成されているため

- 正確な距離感が得られず精密な作業には適さない
- 強い疲労感を生じるため長時間の作業に向かない

などの問題が生じている [5]。これは、個人の眼の特性の違いを考慮していないため、立体視によって呈示される仮想世界と実世界の間に幾何学的不整合が生じていることが原因と考えられる。

そこで本研究では、

1. **アイキャリブレーション**: 眼のモデル (アイモデル) に基づいて個人の立体視のパラメータ (アイパラメータ) を求めるアイキャリブレーションを行う。
2. **カメラキャリブレーション**: ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを用いて実カメラのキャリブレーションを行う。
3. **高精度立体視画像合成**: 統合カメラモデルを用いてアイパラメータに基づく正確な実写ステレオ画像の撮影および CG 画像との合成を行う。

という手順によって、物体の大きさや距離感を正確に表現することが可能な立体視画像を作成する。すなわち、カメラキャリブレーションに基づく画像合成 (Camera-Calibrated CG)[2] と、両眼のキャリブレーションに基づく立体視画像生成 (Eye-Calibrated CG)[6] によって高精度立体視画像合成のための Calibrated Computer Graphics を構成する (図 3.1)。

なお、立体視によって得られる立体感や距離感は主観的なものであり、その定量化や個人間の比較は一般に困難である。そこで本研究では、

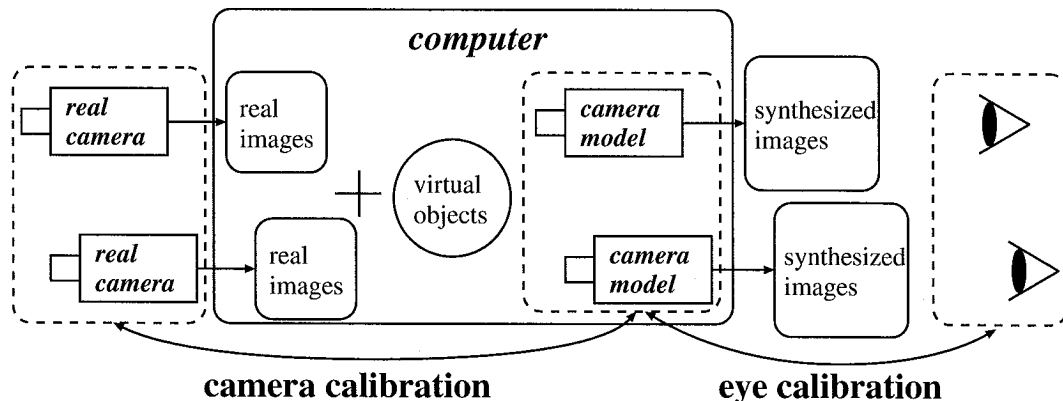


図 3.1: カメラと眼のキャリブレーションによる Calibrated Computer Graphics

実空間から眼に入射する光線と、仮想空間 (HMD に表示された立体視画像) から眼に入射する光線が一致すれば、仮想空間は実空間と同じ立体解釈を与える

という原理に基づいてアイキャリブレーションを行う。同様の考え方をを用いて、立体視のためのパラメータを求める方法が大石らによって提案されている [7, 8] が、HMD の製作時のパラメータと装着時のパラメータを別々に扱い、漸近的に誤差を減少させる手続きを構成するなど複雑なものとなっている。これに対して本論文では、実空間と仮想空間の幾何学的整合に必要なパラメータを 3 個に整理し、それらを簡単なキャリブレーションターゲットを用いて決定する方法を示す。

以下、本章では、個人の眼の特性を計測するアイキャリブレーションと得られたアイパラメータに基づくステレオカメラ設定の原理と手順を述べる。次に、統合カメラモデルを用いたアイパラメータに基づく実写ステレオ画像の撮影と合成の例を示す。

3.2 アイキャリブレーション

3.2.1 アイモデル

本研究では、眼のモデルとして実際の眼の構造 (図 3.2(a)) [9] を簡略化したアイモデル (図 3.2(b)) を用いる。すなわち、視軸と光軸が一致し、節点と回転中心が一致していると考え、節点と回転中心の一致した点を視点位置と呼ぶ。なお、水晶体の焦点調節も距離感を与える重要な要素であるが、HMD 装着時には眼から一定距離に置かれたスクリーンに焦点を合わせるので、アイモデルではピンホールカメラモデルを用いる。以下では、2 個のアイモデルを左右に配置して立体視を考える。

立体視では輻輳、両眼視差、運動視差、水晶体の焦点調節によって立体感が得られているが [4]、HMD では主に輻輳と両眼視差が利用されている [10, 11]。輻輳は、両眼で空間中のある 1 点を注視するために、注視する方向に左右の眼球を回転させる運動のことであり、両眼が無窮遠を見た時には左右の視軸は平行となる。本論文では、この時の視軸を

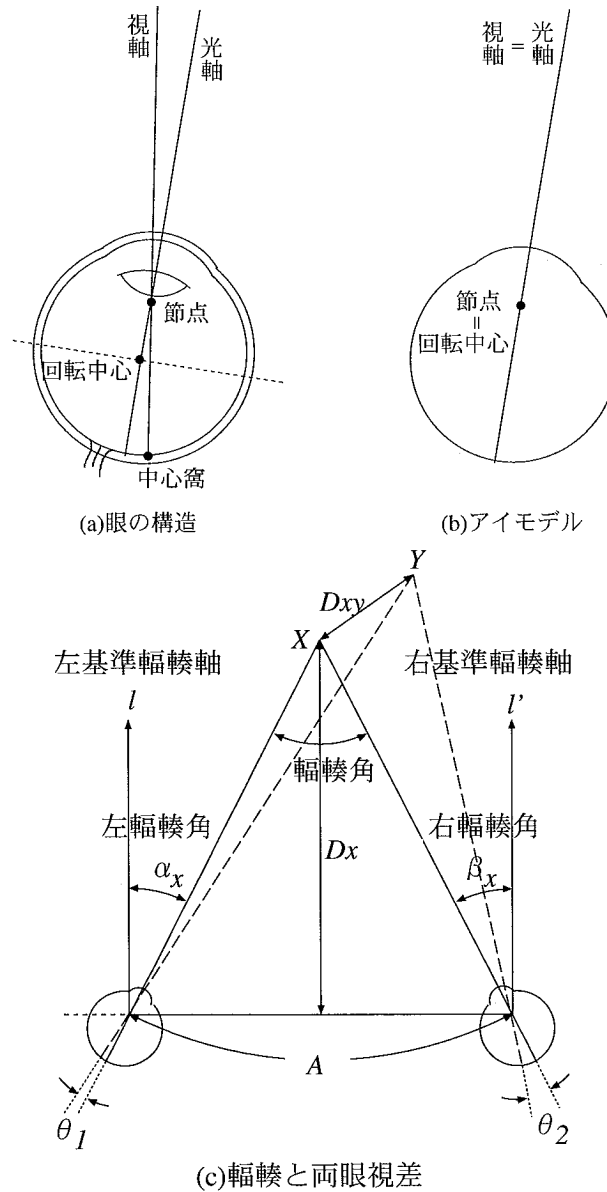


図 3.2: アイモデルと両眼視差

基準輻輳軸と呼ぶ。そして、左右の視軸がそれぞれの基準輻輳軸から両眼の中心に向かう回転を正方向とする回転角で左右の眼の輻輳角¹を表す(図 3.2(c))。そして、両眼視差は注視点 X を見た場合の左右の眼の視軸からの角度 θ_1, θ_2 の差として表される。

¹一般には左右の視軸の交わる角度を輻輳角と呼ぶ。本論文の右輻輳角と左輻輳角の和が通常の輻輳角に相当する。

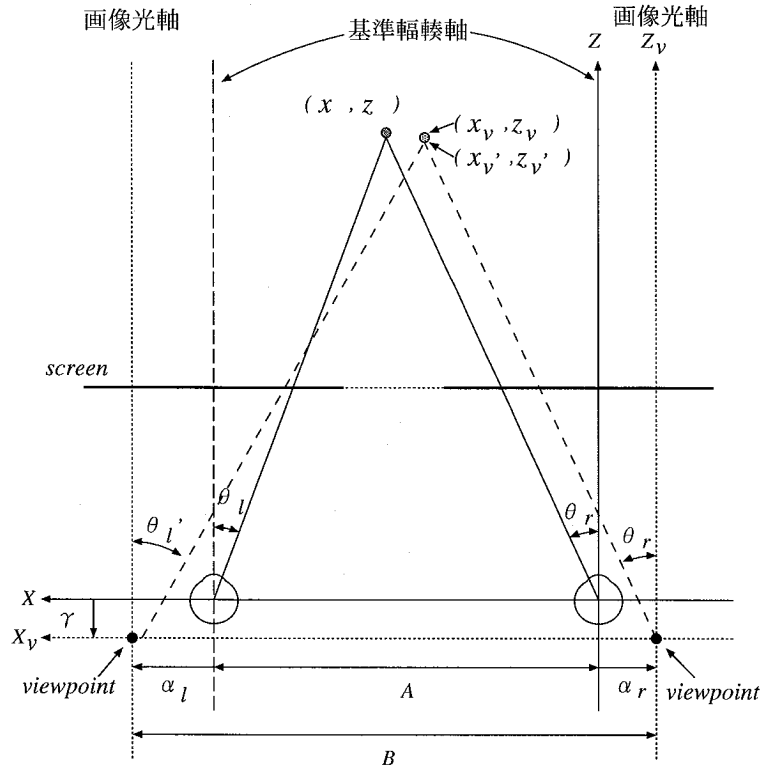


図 3.3: 実空間座標系と仮想空間座標系

3.2.2 立体視のためのアイパラメータ

観察者の両眼によって定まる実空間座標系と、2個のアイモデルによって構成される仮想空間座標系の関係を整理し、両者を一致させるためのアイパラメータについて述べる。実空間座標系は、右眼を原点、右眼から左眼向きに X 軸，頭部上向きに Y 軸，眼の正面方向に Z 軸 (基準幅軸) とし，仮想空間座標系は実空間座標系に対応して X_v - Y_v - Z_v (画像光軸) を定める。 Y 軸の正方向から見た両座標系の関係を図 3.3 に示す。

左右の基準幅軸と画像光軸の X 軸方向のずれを α_r, α_l ， Y 軸方向のずれを β_r, β_l とし， X 軸と X_v 軸の Z 軸方向のずれを γ とする。そして，両眼の視点間距離を A ，投影中心間距離を B とし，実空間に対する仮想空間のスケール係数を s とすると，ある点の実空間座標 (x, y, z) と仮想空間座標 (x'_v, y'_v, z'_v) の関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} x'_v \\ y'_v \\ z'_v \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & -\alpha_r \\ 0 & s & 0 & -\beta_r \\ 0 & 0 & s & -\gamma \\ 0 & 0 & 0 & \frac{A+\alpha_r+\alpha_l}{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

この式から，

1. 視点間距離と投影中心間距離の一致 ($A = B$)

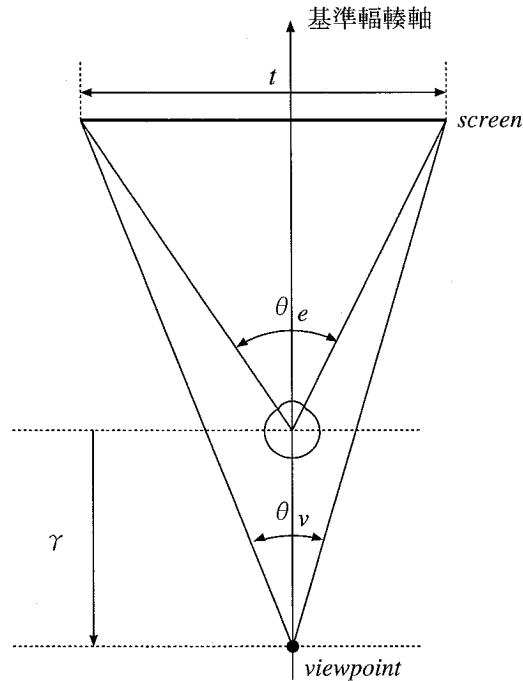


図 3.4: γ と画角の関係

実空間の視点間距離 A_{cm} と仮想空間の投影中心間距離 B_{unit} を一致させることによって、実空間に対する仮想空間のスケール係数を $s = 1$ にする。

2. 基準輻軸と画像光軸の一致 ($\alpha_l = \beta_l = \alpha_r = \beta_r = 0$)

X - Y 方向の位置のずれを補正し、実空間中の左右の基準輻軸と仮想空間中の対応する画像光軸を一致させる。

3. Z 軸方向の視点位置と投影中心位置の一致 ($\gamma = 0$)

仮想空間の X_v 軸の Z 方向の位置のずれを補正し、実空間中の X 軸に一致させる。なお γ は、図 3.4 に示すようにスクリーン幅 t を用いて

$$\gamma = (\cot \theta_e - \cot \theta_v)t \quad (3.2)$$

と表せるので、 $\gamma = 0$ は実空間中の画角と仮想空間中の画角の一致 $\theta_e = \theta_v$ として表す。

の3つの条件を満足すれば仮想空間が実空間に一致し、仮想空間と実空間は幾何学的に整合することが分かる。以下では、視点間距離 A_{cm} と X - Y - Z 方向の位置のずれをアイパラメータと呼び、これらを求めて上記の3条件を満足することをアイキャリブレーションと呼ぶ。

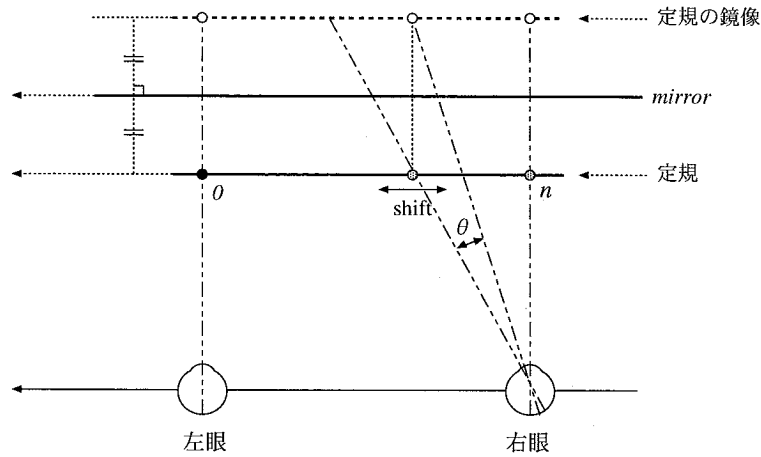


図 3.5: 鏡を利用した視点間距離の測定

3.2.3 視点間距離の測定

視点間距離を安定に計測するために、平面鏡を使用する。鏡の面と平行に定規を設置し、測定者は鏡に対して両眼を結んだ直線が平行になるようにする。測定者は、左眼で定規の基準点 O を見たとき、 O と O の鏡像が重なって見える位置 (左眼の正面) に O を置く。次に、右眼に対して移動点 n と n の鏡像が重なって見える位置 (右眼の正面) に n を移動する (図 3.5)。これによって、左右の眼の視点間距離を求めることができる。

3.2.4 3次元ターゲット

視点の3次元位置を決定するために、3次元ターゲット (図 3.6) を使用する。このターゲットは、正面前方 1m の位置から見た時、上下左右に張られた前 3 本と後 3 本の糸がちょうど重なるように設計されている。この3次元ターゲットを用いることによって、実空間中の基準輻輳軸と視点位置からターゲットまでの距離を決定することができる。

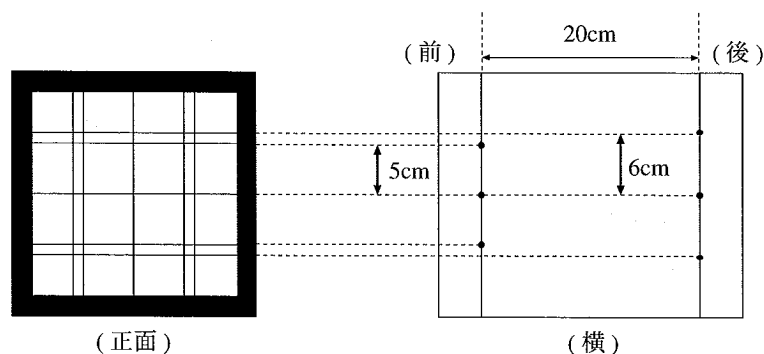


図 3.6: 3次元ターゲット

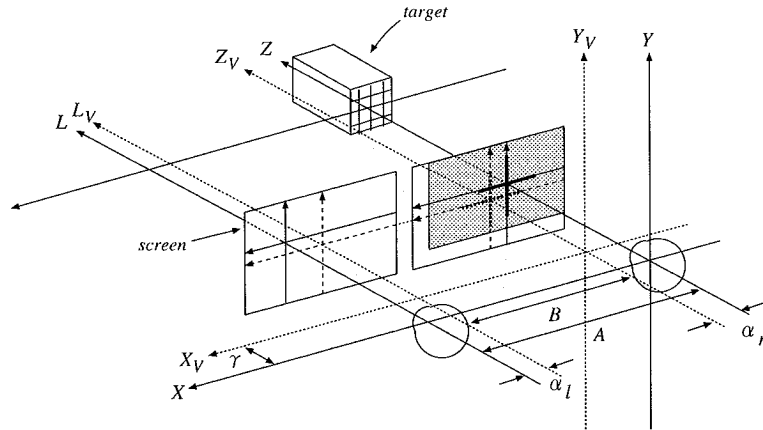


図 3.7: 基準輻軸と画像光軸の一致

3.2.5 アイキャリブレーション手順

実空間と幾何学的に整合した仮想空間を生成するためのアイキャリブレーションの手順について述べる。

まず、被験者固有のアイパラメータである視点間距離 A を事前に測定し、 $A = B$ とすることによって実空間と仮想空間のスケールを一致させる。次に、被験者が HMD を装着した状態で、基準輻軸と画像光軸の一致 (X - Y 軸方向の調整)、表示画角の一致 (Z 軸方向の調整) を左右両眼それぞれに対して行う。

基準輻軸と画像光軸の一致は、図 3.7 のように 3 次元ターゲットを用いて基準輻軸を決定し、ターゲットの糸のパターンを用いて画像光軸を一致させる。画角の調節は、図 3.8 のようにターゲットの位置 (視点位置から前方 1m の位置) に対応させて、仮想空間中の同じ位置に同じ大きさの仮想ターゲットを表示し表示画角を変化させ実ターゲットと仮想ターゲットが一致する画角を求める。以上のアイキャリブレーション手順を整理すると以下ようになる。

1. 視点間距離の測定 :

視点間距離を求め、実空間と仮想空間のスケールを一致させる ($A = B$)。

2. 右基準輻軸の決定 :

ターゲットを上下左右に平行移動させ、右眼で見たとき前後の糸が一致する位置を求める。

3. 右側光軸と右基準輻軸の一致 :

右眼画像を生成し、画像光軸で交わる十字の線を表示し、画像を平行移動させて右基準輻軸と一致させる ($Z = Z_V$)。

4. 右側表示画角の一致 :

ターゲットの糸と対応する仮想物体を表示し、糸と仮想物体が一致するように画角を決定する。

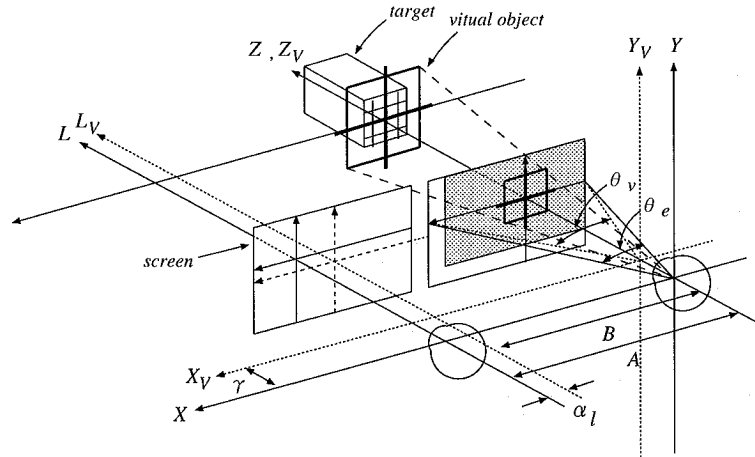


図 3.8: 画角の決定

5. 左基準輻輳軸の決定 :

2. と同様に, 左眼に対して左基準輻輳軸を求める.

6. 左側光軸と左基準輻輳軸の一致 :

3. と同様に, 左画像の光軸と左基準輻輳軸を一致させる ($L = L_V$).

7. 左側表示画角の一致 :

4. と同様に, 左眼に対して画角を決定する.

3.3 カメラキャリブレーション

立体視画像の撮影や合成にステレオ実写画像と利用することを考えると, 実カメラのレンズ特性を考慮する必要がある. 本研究では, 実カメラのズーム, フォーカス, アイリスの特性を忠実にモデル化した統合カメラモデルを使用する [3]. そして, アイキャリブレーションによって求めたパラメータでステレオカメラを設定する方法について述べる.

3.3.1 統合カメラモデル

実カメラを用いて撮影した実写画像を使用する場合には, 合焦位置ではピントが合うがそのほかのところではピントの合わないというレンズによるぼけ現象と, 任意の場所に焦点を合わせるためのフォーカス変化による拡大率変化の影響を考慮する必要がある.

ぼけの効果とフォーカス変化による拡大率の変化の両者をモデル化できるカメラモデルとして統合カメラモデルを使用する. このモデルを用いることによって, ズームとフォーカスによる撮像面位置の変化と, ズーム, フォーカス, アイリスによるレンズ開口径の変化を記述することが可能になる. したがって, 実写画像において生じる, ズーム, フォーカス, アイリスによるぼけ変化と, ズーム, フォーカスによる拡大率変化を扱うことができる.

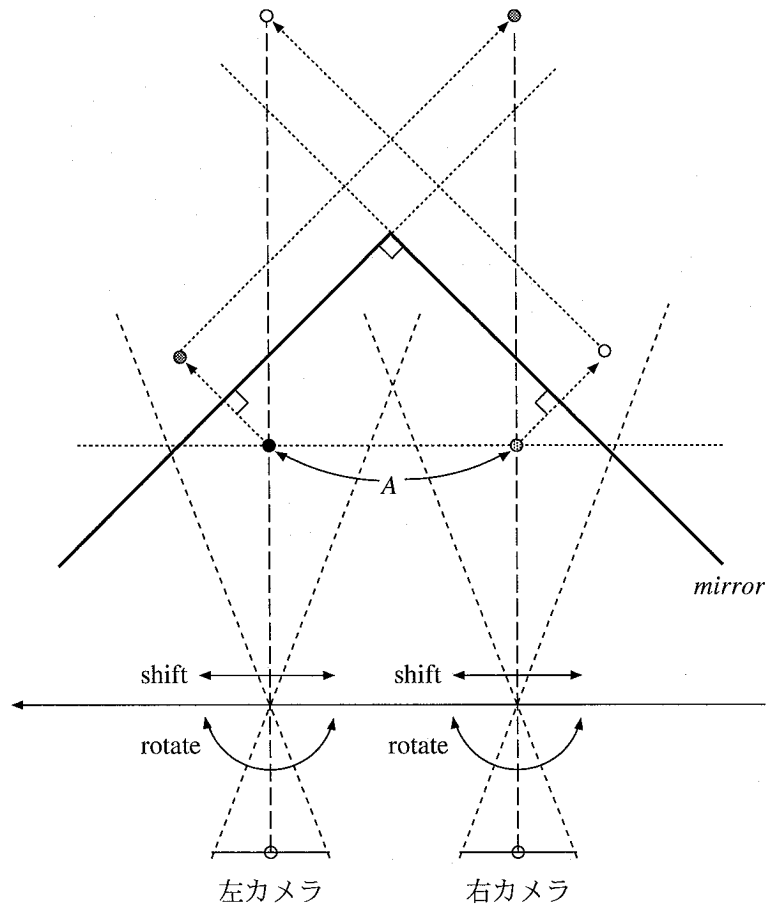


図 3.9: 2 枚の鏡を利用したステレオカメラの設定

3.3.2 ステレオカメラ設定

アイキャリブレーションに基づき、2台のカメラを設定することにより人の眼の代わりにカメラを用いた遠隔視覚を実現することができる。図 3.9に示すように、直交する位置に配置した2枚の平面鏡を使用することで、2台のカメラ光軸を平行かつ光軸間距離を視点間距離に一致させることができる。その手順を以下に示す。

1. 2枚の鏡を90度に設置する。
2. 2つの十字パターンを視点間距離 A に一致するように配置する。
3. 右側の十字パターンと左側の十字パターンの鏡像が一致するように右カメラの光軸を合わせる。
4. 右カメラと同様に左カメラの光軸を合わせる。

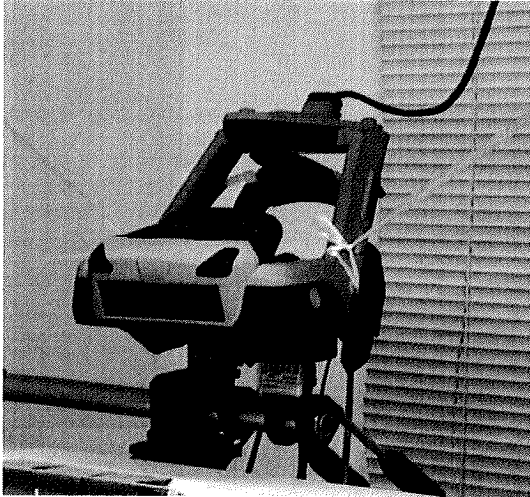


図 3.10: HMD

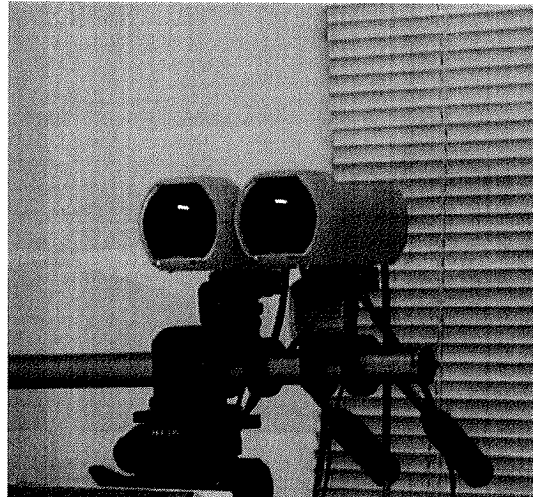
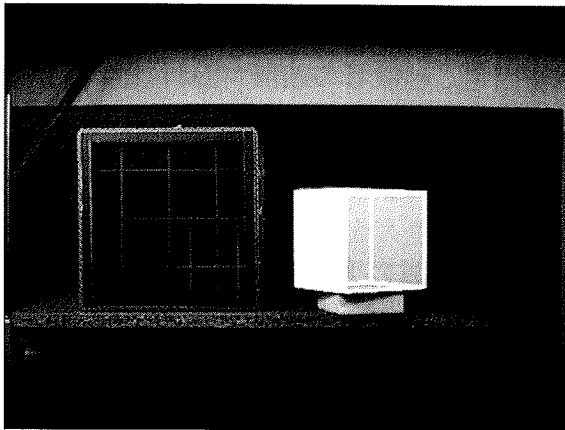
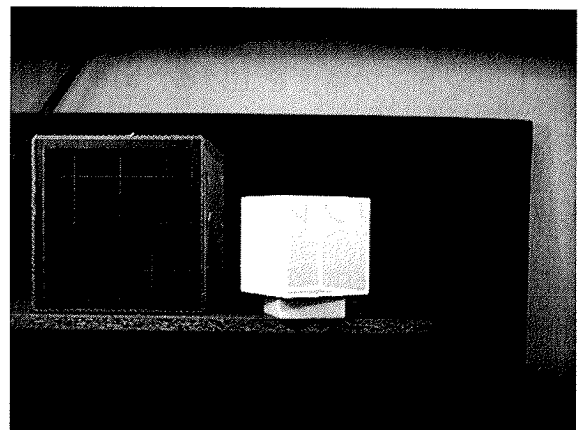


図 3.11: 両眼用カメラ



(a) 左眼用画像



(b) 右眼用画像

図 3.12: 合成画像例

3.4 実験

3.4.1 実験環境

左眼用・右眼用の画像生成を行うために計算機 (SGI O2) を 2 台使用し、互いに同期をとって画像を表示する。O2 により生成した左眼用、右眼用の画像は HMD (OLYMPUS MediaMask MW601) の左右の液晶ディスプレイに表示する。この HMD はシースルー機能により、表示した画像と実空間の物体を重ね合わせて見ることが可能である。今回実験に使用した HMD の外観を図 3.10 に示す。また、アイキャリブレーションの手法の検証と手順の各段階の画像を撮影するために、眼の代わりに 2 台のカメラ (SONY EVI-G20) (図 3.11) に対してアイキャリブレーションを行った結果も示す。

3 次元ターゲットを任意の位置に設置するためにステージを使用した。ステージは XYZ

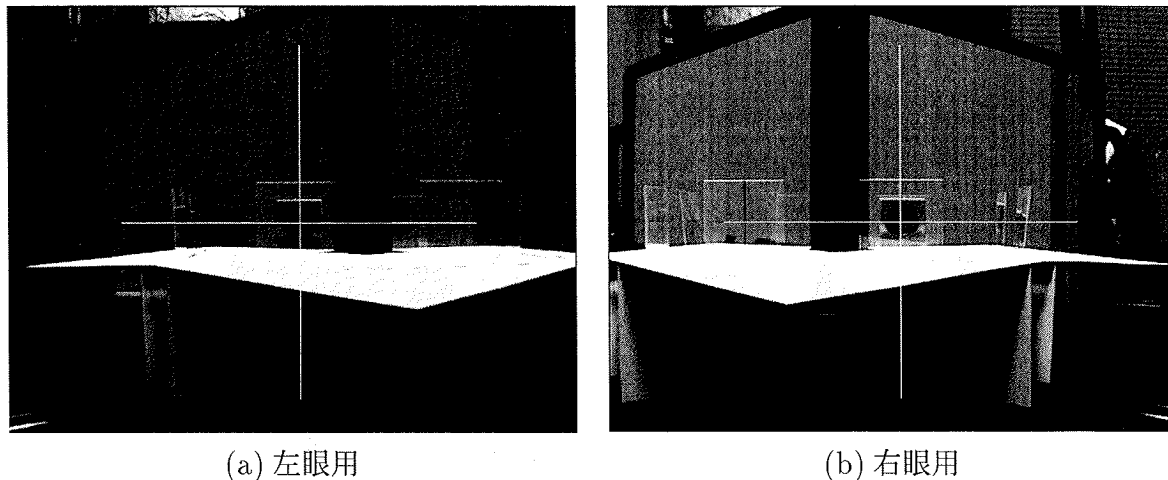


図 3.13: ステレオカメラ設定

の3つの軸があり、三次元空間中で対象物を精密に移動させることができる。なお、ステージの3軸と実空間座標系の3軸がそれぞれ平行になるようにする。また、アイキャリブレーションの精度を上げるために、HMDを固定し被験者の頭部(視点位置)の変動を最小限にしている。

3.4.2 キャリブレーション結果

アイキャリブレーションの手順を用いて、2人の被験者のアイパラメータを求めた結果を表3.1に示す。このように、立体視のためのアイパラメータは人によりかなり異なることが分かる。

表 3.1: 人の眼に対するキャリブレーション結果

	被験者 1		被験者 2	
視点間距離 (cm)	7.6		6.5	
表示画角 (°)	左眼	右眼	左眼	右眼
	40.0	38.8	41.7	38.6

次に、人の眼の代わりとして2台のカメラに対してアイキャリブレーションを行った。その結果を表3.2に示す。

表 3.2: カメラに対するキャリブレーション結果

視点 (レンズ中心) 間距離 (cm)	6.9
表示画角 (°)	41.9

得られたパラメータを用いて一辺 10cm の立方体の仮想物体を表示した結果を図 3.12 に示す。図 3.12 の画像は、HMD のスクリーン上にワイヤフレームで物体を表示し、シー

スルー機能により実立方体を見ている状態である。この時の実立方体の頂点の画像上での位置と仮想物体の頂点の位置を比較すると、平均 3.8 画素のずれがあった。しかし、両カメラとも実物体と仮想物体はほぼ一致し、視覚的には十分正確な立体視画像が生成できることが確認できた。

3.4.3 ステレオカメラ設定

被験者 1 に対して行ったキャリブレーション結果を用いてステレオカメラの設定を行った。画像の中心位置に基準となる軸を表示し、レンズの光軸と一致していることを示した画像が図 3.13 である。

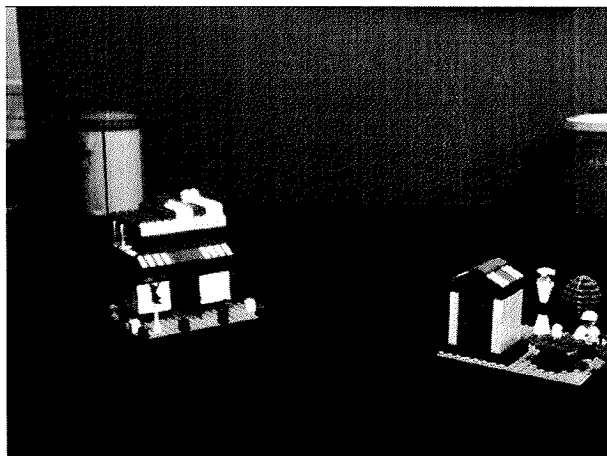
3.5 CCG による高精度立体視画像合成

観察者のアイパラメータに基づいてステレオカメラを設定することにより、その人が見る実世界と幾何学的に整合した実写画像を撮影することができる。実カメラで撮影した立体視画像の例を図 3.14(a) ~ (d) に示す。このように、実カメラでフォーカスを変化させた時には、フォーカスによるぼけの変化が起こるだけでなく、画像の大きさも同時に変化する。これは、撮像面の位置が変化するために起こる現象である。これに対して、人の眼の場合にはレンズである水晶体と撮像面である網膜の距離は一定であり、フォーカス変化による像の拡大縮小は起こらない。そこで本研究では、統合カメラモデルを用いることによって、実カメラのフォーカス変化時の像の拡大を補正する。

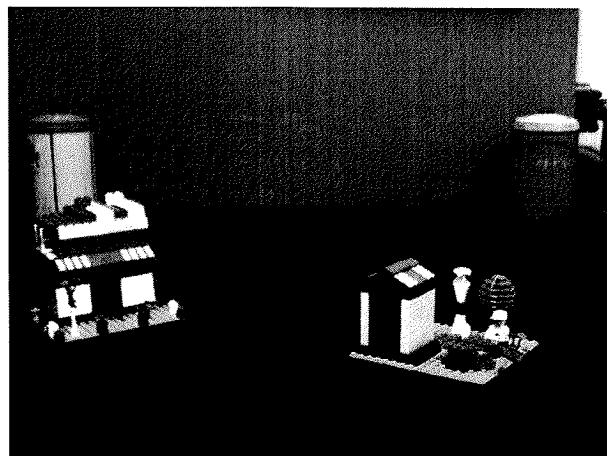
統合カメラモデルを使用して作成した立体視画像合成の例を図 3.15(a),(b) に示す。フォーカス変化による画像の拡大率の変化をズーム変化により補正し、遠景時のフォーカス位置で近景時の拡大率の画像を得ている。そして、統合カメラモデルを用いて遠景時のフォーカスに対するぼけを仮想物体(ティーポット)に与えた合成画像を作成した。このように立体視画像において拡大率の補正とぼけの効果を加えることで、実写画像との整合性と実際の眼で見たときの整合性の高い立体視画像の作成が可能となった。

3.6 むすび

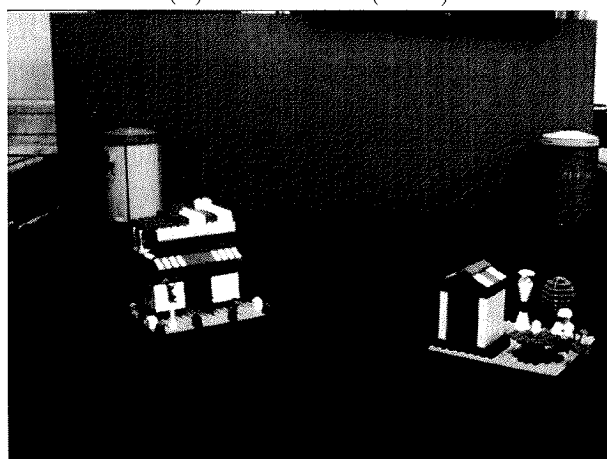
個人の立体視パラメータの測定とそのパラメータに基づく立体視画像の生成について述べた。アイキャリブレーションの実験によって、個人のアイパラメータの測定と実シーンと幾何学的に整合した立体視画像が生成できることを示した。また、Calibrated Computer Graphics を、カメラのキャリブレーションに基づく Camera-Calibrated Computer Graphics と人の眼のキャリブレーションに基づく Eye-Calibrated Computer Graphics として構成し、アイキャリブレーションとカメラキャリブレーションに基づく高精度な立体視画像合成について述べた。



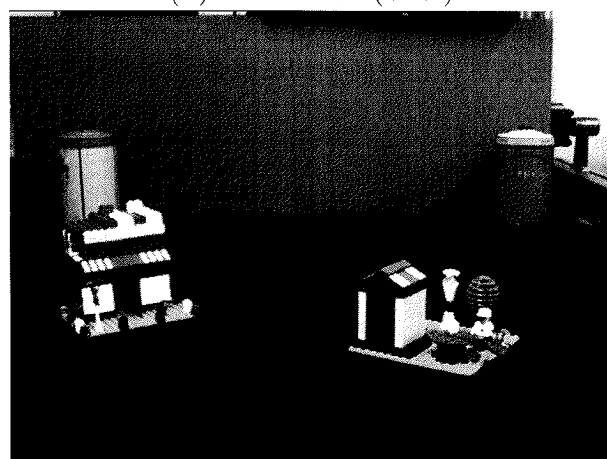
(a) 近景に合焦 (左眼)



(b) 近景に合焦 (右眼)

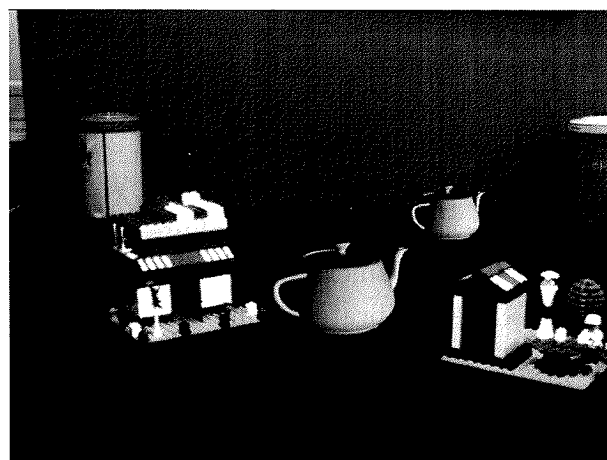


(c) 遠景に合焦 (左眼)

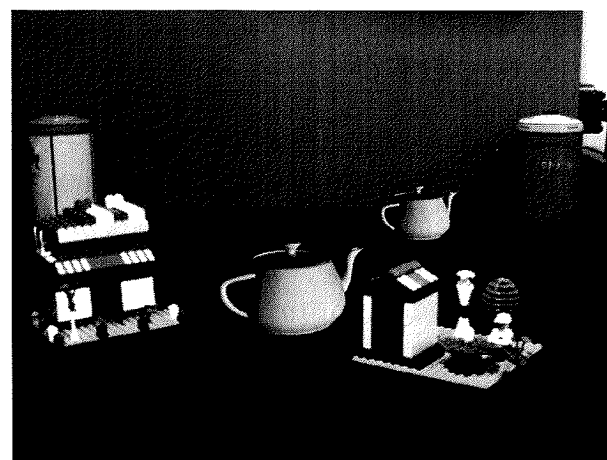


(d) 遠景に合焦 (右眼)

図 3.14: ステレオカメラによる実写画像



(a) 合成画像 (左眼)



(b) 合成画像 (右眼)

図 3.15: 高精度立体視画像 (フォーカス拡大率補正とぼけを含む仮想物体合成)

参考文献

- [1] 田村秀行: “複合現実感システムの課題と可能性”, 画像センシングシンポジウム論文集, pp.169–178, 1999.
- [2] 馬場雅志 他: “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.
- [3] 馬場雅志 他: “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), pp.II47–II52, 1998.
- [4] 田崎京二 他: “視覚情報処理”, 朝倉書店,1992.
- [5] 河合隆史 他: “ヘッド・マウント・ディスプレイの視機能に与える影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.275–280, 1999.
- [6] 叶良樹 他: “アイキャリブレーションに基づく高精度立体視画像の生成”, 電気・情報関連学会中国支部連合大会, p.416, 1999.
- [7] 大石峰士 他: “シースルー型 HMD における視覚パラメータの較正法”, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.911–918, 1994.
- [8] 大倉典子 他: “シースルー型 HMD における視覚パラメータの距離に関する較正法”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.4, pp.580–582, 1995.
- [9] 鶴田匡夫: “立体視と双眼鏡および実体顕微鏡”, O plus E, vol.20, no.9, pp.1050–1057, 1998.
- [10] 宮沢篤 他: “3次元映像テクノロジー”, 情報処理, Vol.38, No.3, 1997.
- [11] 高野英彦: “見やすさと距離認識誤差を考慮した仮想物体表示法の評価について”, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.5, pp.347–352, 1998.

第 4 章

アイキャリブレーションの眼科手術シミュレータへの応用

4.1 はじめに

人間は様々な機能を用いて外界の空間を知覚することができる。この空間知覚のために様々な感覚を用いる事になるが、その感覚の中でも、空間知覚を最も良く与えることのできる手段は、眼を用いた視覚であるといわれる。この視覚を用いて空間を知覚する仕組みには、眼の生理的機能・心理的作用・外界の物理現象などの要因が影響している。人間は2つの眼球を持っており、それぞれの眼球に映される映像の差異である両眼視差、眼球の回転により生じる輻輳視差、眼球の構成要素である水晶体レンズの厚さ調節の3つは、立体視知覚を与える最も重要な要因であることが確認されている。

この立体視知覚を何らかの装置を用いて人間に与えるために、これらすべての要因を作用させるとは限らない。一般的には、左右の眼球にそれぞれ異なる映像を映すことで立体視を知覚させる方法が取られている。この両眼視差を用いた立体視知覚を与える装置として、HMD (Head Mounted Display) がある。HMDとは、左右独立の光学系を持った表示デバイスで、左右のスクリーンにそれぞれ独立に映像を描画することができる。このHMDスクリーンの映像の差異を利用することにより、立体視知覚を与えることができる。

HMDの応用例のひとつとして、複合現実感 (Mixed Reality:MR) システムがある。複合現実感とは、計算機で生成されるCG (Computer Graphics) などの仮想的に作り出される画像や映像と、実際に撮影した映像などにより表現される現実世界とを、リアルタイムで継ぎ目無く (シームレスに) 融合させる技術の総称である [1]。この複合現実感技術は、高度のリアリティと臨場感を与え、人と人が豊かなコミュニケーションの場を設けられる未来の基盤技術を提案することを目的に研究開発が進められている。この複合現実感とは、大きく拡張仮想感 (Augmented Virtuality:AV) と拡張現実感 (Augmented Reality:AR) の2つに分類される。

拡張仮想感とは、計算機で創造される仮想世界 (仮想環境) に現実世界から取り込んだ情報 (現実世界で撮影されたオブジェクトなど) を融合させる方法で、現実と仮想の間に生じる違和感を軽減させるために、現実世界の物体形状や光学的特性などを仮想世界で反映させる。そのため、これらの特性を計算機にデータ化する技術が重要となる。

一方、拡張現実感とは、この拡張仮想感とは逆に、計算機で生成される仮想の情報 (CGなどの仮想オブジェクト) をシースルー型のHMDに表示することにより、HMD越しに透過して見える現実世界に仮想世界を融合させることで、現実世界をより豊かにすることを目的とした方法で、現実世界と仮想世界とを融合させる際に生じる様々なずれ (空間・時間・光学に関するずれなど) を解消することが重要となる。また、拡張現実感を実現する方法には、HMDのスクリーン越しに見える周囲の実世界環境を眺め、そこにプリズムやハーフミラーなどの光学系を用いることで、仮想物体を表示したディスプレイの映像を重ねる、すなわち、網膜上で現実世界と仮想世界を重ね合わせる「光学シースルー方式」と、カメラから取り込まれた実世界映像と仮想物体とを計算機内で融合させ、その映像を遮蔽型HMDに表示する「ビデオシースルー方式」とがある。

拡張現実感とは、その性質からエンターテインメントの分野 [7] や医療福祉の分野 [8]、また情報提示手法などの分野 [9] での実用化に向け研究が進められており、実際に応用され

ている例もある。特に、医療の分野では、「バーチャルリアリティ技術の発展」、「計算機の画像処理能力の飛躍的向上」とともに、それを応用した手術シミュレータ [10] が現れ、本格的に利用されはじめている。この手術シミュレータの目的は、

- 手技習得のための練習
- 実手術の術前計画

に大きく分けられ、手術の対象となる部位によって仕様は様々である。

特に、眼球手術では対象となる眼球が小さく顕微鏡を用いて手術を行う必要があるため、非常に細かな熟練作業が必要であり、手術シミュレータに高い期待が持たれている。これは、動物の眼を用いたトレーニングでは、手術対象となる眼球が必要であることや、網膜剥離などの人間特有の病気を対象とした訓練ができないことが原因となっている。

本研究では、光学シースルー方式による拡張現実感システムの構築を目指す。このシステムを実現するには、仮想世界と現実世界の幾何学的整合性問題を解消する必要がある [2]。この幾何学的整合性問題には、これまでも様々な取り組みが行われてきた [3]。基本的には映像に写る 3 次元空間内における特徴（オブジェクトの位置姿勢情報など）からカメラ・視点の位置姿勢を推定する問題に置き換えることができる。例えば、正方形マーカーを用いた方法 [4] や、3 次元センサを用いた方法 [5][6] が提案されている。

本章では、アイキャリブレーションによる拡張現実感システムの例として眼科手術シミュレータへの応用について述べる。これは、双眼顕微鏡によって拡大された世界でのアイキャリブレーションの可能性を確認することを目的としており、実際の手術で用いられる顕微鏡の映像を再現することで、実際の手術のミュレーションを試みる。この時重要となるのが、手術対象を立体的に感じることで、すなわち顕微鏡を通した立体視知覚である。肉眼での立体視知覚ではなく、顕微鏡を通したときの対象物体を立体的に感じるように、左右の映像を生成する必要がある。装置を用いた立体視知覚については、視距離・倍率などの影響で両眼視差・輻輳角視差が肉眼の場合と異なることに注意してアイキャリブレーションを適用する必要がある。

4.2 眼科手術シミュレータのためのキャリブレーション

前章で述べたアイキャリブレーションは人間の眼の特性に基づくキャリブレーションであり、人間の肉眼を対象としていた。しかし、人間は何らかの光学系を通した時にも立体視知覚を感じることができることから、顕微鏡などのスケールが変化した空間に対してもアイキャリブレーションが適用できると考えられる。

そこで、文献 [11] の眼科手術シミュレータにアイキャリブレーションを適用し、スケールの変化にも対応できることを確認する。顕微鏡などの光学装置を用いて立体視知覚を与える場合にも、両眼視差・輻輳角視差の変化が利用されている。このことから、実際の手術で用いられる双眼実体顕微鏡から見た映像を基にしたキャリブレーションを行うことで、スケールの変化に対応した画像を生成するための視点パラメータを推定できる。

実験手順

実際の手術で用いられる双眼顕微鏡を用い、その映像とキャリブレーションターゲットからの3次元情報からアイキャリブレーション（双眼顕微鏡を対象としたキャリブレーション）を行う。このキャリブレーションにより推定された視点パラメータを用い、左右の映像を正しく描画できることを確認する。

実験環境・使用機器

実験環境は図4.1に示す通りで、双眼顕微鏡を用いて、パラメータ推定のためのターゲットを覗くような環境を作り出している。このとき、顕微鏡の左右の接眼レンズに入ってくる映像と、ターゲットの3次元位置を用い、顕微鏡の視点パラメータの推定を行う。

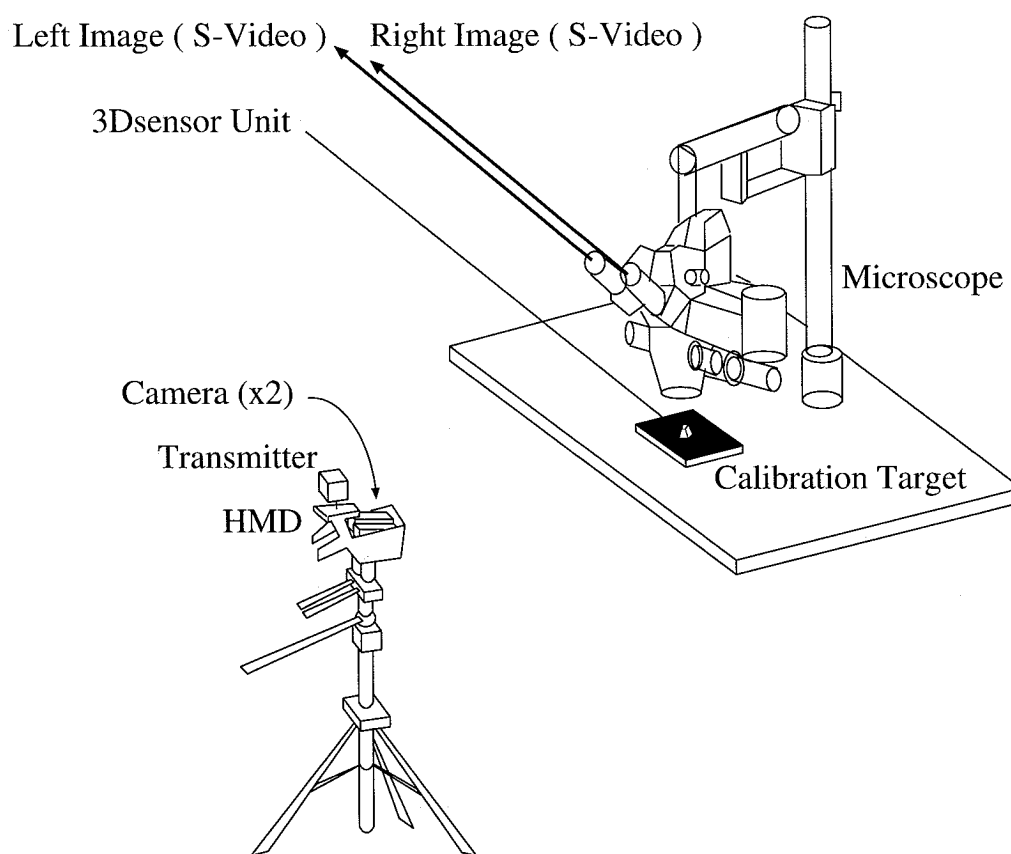


図 4.1: 双眼顕微鏡を用いたキャリブレーションのための実験環境

以下に、この実験で用いた機器を示す。

- 計算機 - SGI Octane, Octane2 (2台)
- カメラ - SONY VIDEO CAMERA EVI-310 (2台)

- HMD – OLYMPUS Head Mounted Displays - MW601
- 3次元磁気式センサ – 3SPACE FASTRAK
- 単対物双眼顕微鏡 – Leica M651

これは、実際に眼科手術で用いられている、対物レンズが1つに対して接眼レンズが2つの、単対物双眼顕微鏡である（図4.2参照）。この顕微鏡の接眼レンズの部分に撮影用のカメラを取り付けることが可能で、そのカメラから撮影される映像を基にキャリブレーションを行う。

この双眼顕微鏡の仕様を以下の表4.1に示す。



図 4.2: 単対物双眼顕微鏡 Leica M651

表 4.1: 単対物双眼顕微鏡 Leica M651 の仕様

名称	Leica M651
対物レンズ	100, 200, 250, 300, 400mm
有効照明視野径	24, 48, 60, 72, 96mm
倍率	6x, 10x, 16x, 25x, 40x

双眼顕微鏡のキャリブレーション結果

双眼顕微鏡の接眼レンズに入ってくる映像を基にキャリブレーションを行い、得られたパラメータ（表 4.2）を用いて仮想物体を重畳させた結果を以下の図 4.3, 4.4に示す。仮想物体を重畳させたときの、実物体と仮想物体の各サンプル点の間に生じる誤差の平均値を以下の表 4.3に示す。

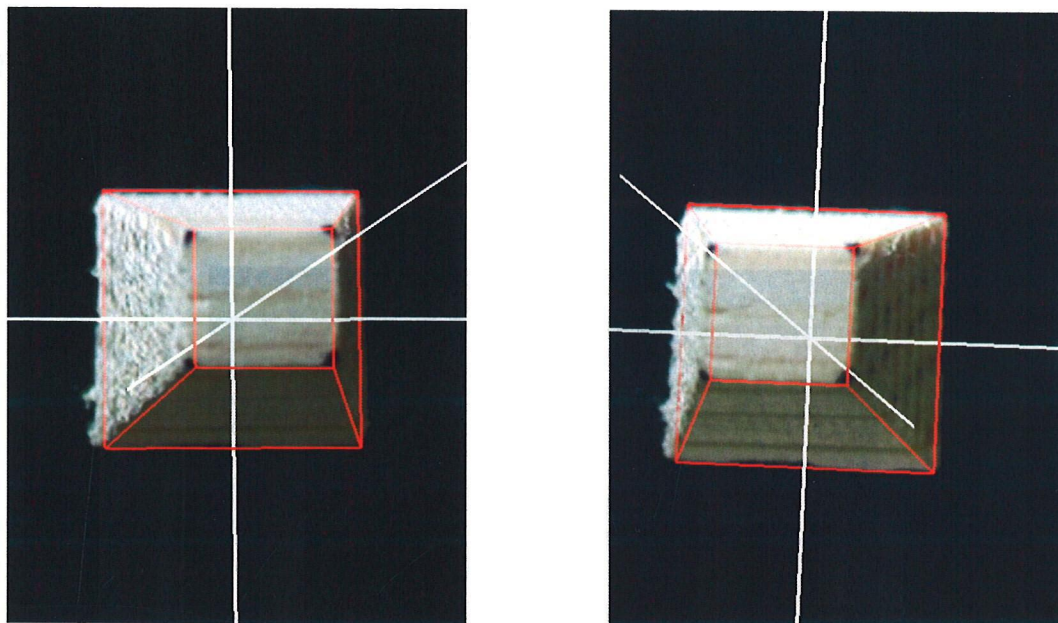


図 4.3: 双眼顕微鏡のキャリブレーション (左) 図 4.4: 双眼顕微鏡のキャリブレーション (右)

表 4.2: 双眼顕微鏡のキャリブレーションによる視点パラメータ

	x	y	z	yaw	pitch	roll	焦点距離
左視点パラメータ	1.71	4.99	58.76	90.31	99.82	-27.94	3448.46
右視点パラメータ	3.50	9.71	59.24	-77.44	99.17	165.13	4482.37

表 4.3: 双眼顕微鏡のキャリブレーション結果

	実物体と仮想物体の間に生じる誤差 [pixel]
左眼画像	3.67
右眼画像	2.78

この仮想物体描画結果として、それぞれの図 4.3, 4.4を比べてみると実スケールでのアイキャリブレーション（肉眼によるアイキャリブレーション）の時と同様に、実物体と

仮想物体の間に大きな誤差は見られないことが確認できる。更に、双眼顕微鏡で見た映像について調べたところ、顕微鏡の映像における1pixelあたりの実スケールにおける大きさは約0.04mmであり、実験結果から得られた誤差に適用すると、実世界で生じる誤差は左0.15mm/右0.11mmと、手術対象となる眼球の大きさに比べても、誤差は非常に小さいものであると考えられる。

以上のキャリブレーション結果(表4.2)から、焦点距離及び視点間距離を計算したところ、視点間距離は5.07cm、焦点距離は肉眼でのキャリブレーションの際に比べ4~5倍に誇張されていることが分かった。従って、レンズ系などの特殊な光学系を考慮することなく、肉眼でのアイキャリブレーションと同様の原理によるキャリブレーションが行えることを示すことができた。

眼球手術シミュレータ

双眼顕微鏡のキャリブレーションにより得られた顕微鏡の視点パラメータを、白内障手術シミュレータシステム[11]に適用した。

手術シミュレータシステムでは、主に眼科手術のためのCG描画機能を持っており、水晶体の破削・吸引、眼球テクスチャの描画などを行う。このシミュレータシステムにHMDを用いた拡張現実感システムを組み込むことで、実際に手術を行う際に感じる立体視を再現することが可能となる。

このシミュレータは、図4.5に示すように、観測者はHMDを装着することで、3次元センサのレーザを取りつけた平板上に描画された仮想眼球オブジェクトを見る。この眼球オブジェクトの患部(水晶体)をペン型のレーザ(仮想吸引用ハンドピースが重畳する)で触れることで水晶体の破削・吸引を行うことができる。

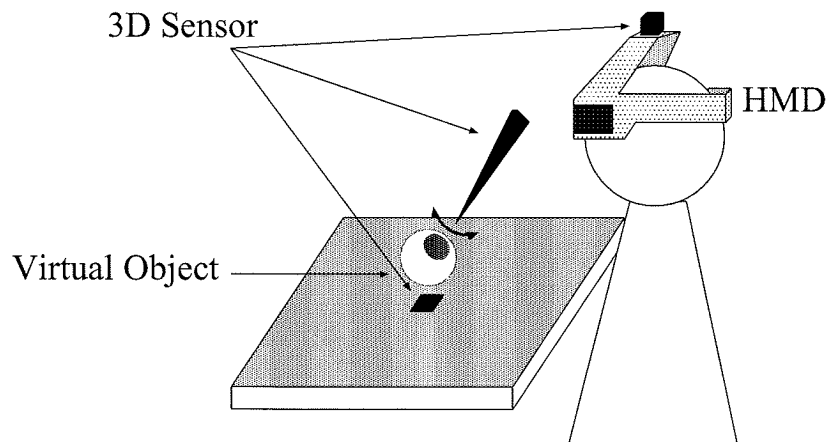


図 4.5: 眼球手術シミュレータ環境

以下の図4.6に、水晶体の仮想物体を描画した結果を示す。

双眼顕微鏡の視点パラメータを、拡張現実感システムに適用することで、仮想オブジェクトの描画結果も拡大されていることが確認できる。この水晶体の描画結果から、双眼顕

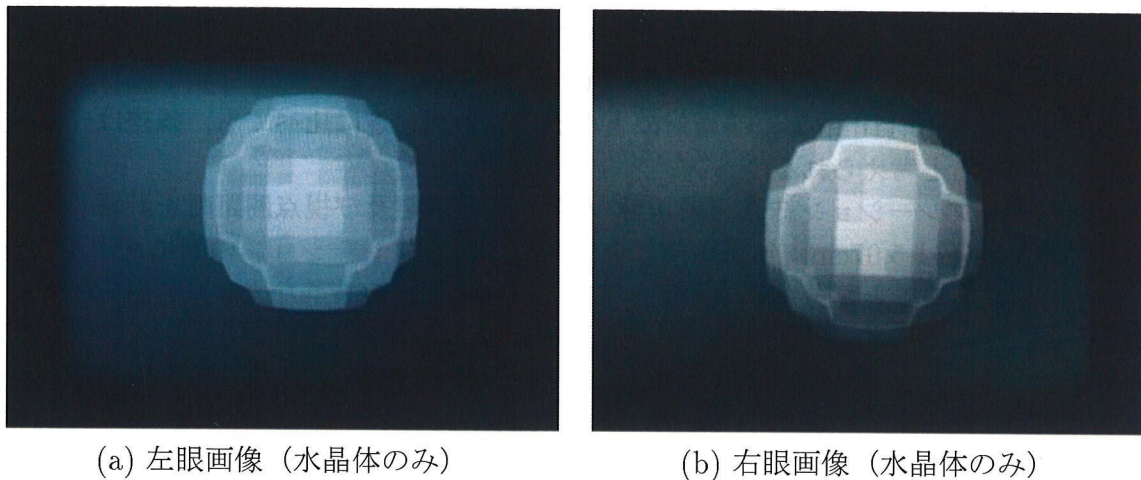


図 4.6: 水晶体描画結果

微鏡を用いたキャリブレーションは、スケールの変化に対応したキャリブレーションであることが確認できる。

この双眼顕微鏡を用いたキャリブレーションの結果から、アイキャリブレーションは、その用途によって手順を考慮することでスケールの変化に対応することが可能であると言える。対象を拡大する方法としては、レンズなどの光学系を再現するのではなく、両眼視差や輻輳角視差を誇張させる（焦点距離や視点間距離の調整）ことによって行われている。

次に、白内障手術の過程である「白濁した水晶体の破削・吸引を行う」を再現した映像を、以下の図 4.7に示す。

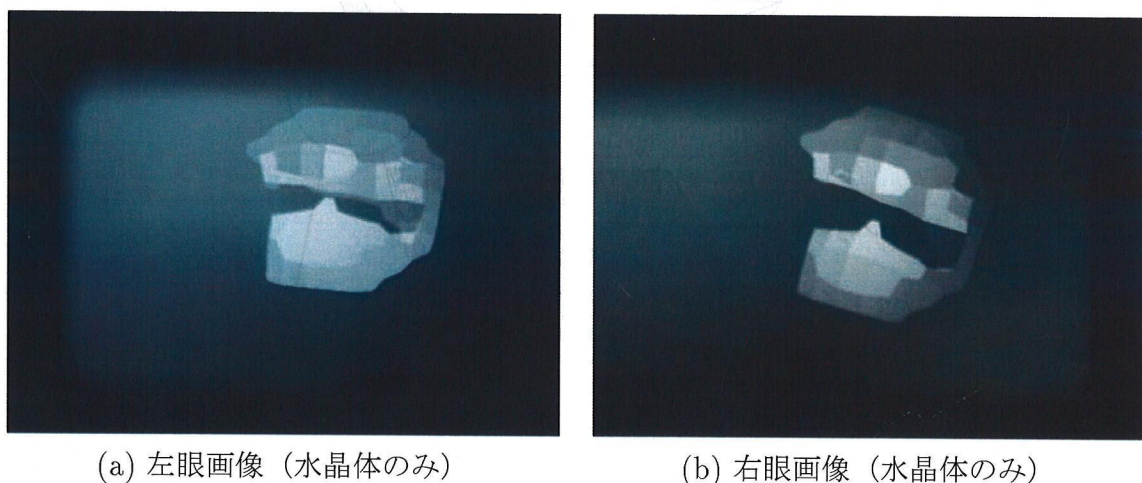


図 4.7: 水晶体破削結果

水晶体の破削には吸引用ハンドピース（ペン型3次元センサ）を、眼球の仮想物体に

接触させることで行われる。システムはハンドピースが水晶体に触れた時に破削を行うと判断するので、ペンと眼球の仮想物体との接触判定が重要となる。双眼顕微鏡のアイキャリブレーションにより接触判定を正確に実現できる。

現在、眼科手術シミュレータは水晶体の破削・吸引のみを行うことができる。しかし、水晶体前嚢部のワイヤーフレームの描画と、眼球のテクスチャ画像の貼り付けが未完成となっている。この作業には、水晶体前嚢部のワイヤーフレームを表示すべき位置とその大きさ、そして、このワイヤーフレームに貼り付けるテクスチャのサイズを正確に再現し、描画すべき位置を正確に求められなければならない。また、テクスチャ画像のサイズについても同様に再現する必要があるが、貼り付ける対象（水晶体前嚢部のワイヤーフレーム）のサイズや位置が不明であるため、正確な描画はできていない。

4.3 おわりに

本章では、アイキャリブレーションの眼科手術シミュレータへの応用について述べた。このシミュレータは、実際の手術時と同等の立体感を与えることができるものである。しかし、現在は、このシミュレータによる水晶体の破削・吸引は可能であるが、より現実に近い状況を再現するための、水晶体前嚢部分のワイヤーフレームおよびテクスチャ貼り付けなどの、未完成部分が含まれている。

今後の課題としては、スケール変化に対応したことで、拡大映像だけでなく縮小画像に対しても有効であるか調べることも含め、縮小映像に対するアイキャリブレーションの検討を行うことで、より広範囲のスケール可変アイキャリブレーションを実現することが挙げられる。また、手術シミュレータでは、水晶体前嚢部分のワイヤーフレームおよびテクスチャ貼り付けを行い、より完成度を高める必要がある。

参考文献

- [1] “Mixed Reality Systems Laboratory Inc.”, <http://www.mr-system.co.jp/index-j.shtml>
- [2] 大田 友一: “画像を手がかりとした実世界と仮想世界の幾何学的整合”, 信学技報 PRMU98-251, pp.73-79, 1999.
- [3] R.Azuma, “A Survey of Augmented Reality”, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol.6, No.4, pp.355-385, 1997.
- [4] 加藤博一, Mark Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎: “マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.607-616, 1999.
- [5] 佐藤 清秀, 山本 裕之, 田村 秀行: “カメラと3次元センサの組み合わせによる現実空間と仮想空間の位置合わせ手法”, TVRSJ, Vol.4, No.1, pp295-302, 1999.
- [6] 成定 宏之, 山中 洋典, 馬場 雅志, 浅田 尚紀: “光学シースルーにおける高精度立体視のためのアイキャリブレーションの検討”, 信学技報 PRMU2002-39, pp.59-66, 2002.
- [7] “SIGGRAPH2002”, <http://www.siggraph.org/s2002/>
- [8] 田中 博: “ますます広がる仮想現実医学の新たな展開”, 第17回 医療情報学連合大会 17th JCMI, 1997.
- [9] S.Feiner, B.MacIntyre, M.Haupt, E.Solomon: “Windows on the world: 2D windows for 3D augmented reality”, Proc. of the ACM UIST93, pp145-155, 1993.
- [10] 向井 信彦, 原田 雅之, 室井 克信, 寺田 尚史: “眼科手術シミュレータシステム”, 三菱電機技報 Vol.73, No.11, 1999.
- [11] 田中 純, 仁井谷 智恵, 児島 彰, 古川 亮, 藤野 清次, 中村 泰明, “白内障手術シミュレーションシステム”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2000), pp.II-319-324, 2000.
- [12] 井上 弘: “立体視の不思議を探る”, オプトロニクス社, 1999.

- [13] 「光学のすすめ」編集委員会：“光学のすすめ”，オプトロニクス社, 1997.
- [14] “白内障と眼内レンズ手術”，<http://www.asahi-net.or.jp/~pd2k-nim/>
- [15] 情報処理学会：“医療と人工現実感”，IPSJ Magazine 情報処理 2002 Vol.43 No.5 , pp.493-498 , 2002.
- [16] 情報処理学会：“手術シミュレーションシステム”，IPSJ Magazine 情報処理 2002 Vol.43 No.5 , pp.513-518 , 2002.
- [17] 山本裕之：“複合現実感 - 仮想と現実の境界から見える世界”，情報処理 , Vol.43 , No.3 , pp.213-216 , 2002.
- [18] 遠藤, 田村：“複合現実感～仮想と現実の融合はどこまで進んだか”，オプトロニクス誌 , no.2 , pp.137-141 , 2002.
- [19] H. Tamura, H. Yamamoto, and A. Katayama：“Role of vision and graphics in building a mixed reality space,” Proc. Int. Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding for Visual Information Media, pp. 1 - 8, 2002.
- [20] 田村：“複合現実感～MRプロジェクトが目指したもの／達成したもの”，電子情報通信学会マルチメディア・仮想環境基礎研究会／日本バーチャルリアリティ学会複合現実感研究会, 愛媛大学, 2001.
- [21] 佐藤, 田村：“複合現実感における位置合わせ手法”，画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2002) 論文集 I, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, vol.2002, no.11, pp.I.61-I.68, July 2002.