

Light Field Consistencyによる 煙霧体濃度推定

2014年3月

井手口 裕太

Light Field Consistency による 煙霧体濃度推定

井手口 裕太

概要

カメラ画像から三次元計測を行う方法には様々な手法があり、受動的手法と能動的手法に分けられる。受動的手法にはパッシブステレオ法や視体積交差法などがあり、能動的手法にはアクティブステレオ法や TOF 法などがあるが、三次元計測が困難な対象として煙、霧、炎などの煙霧体がある。本稿では、煙、霧、炎などの煙霧体の三次元の濃度分布を推定することを目的とし、任意の距離にピントを合わせた画像を生成可能であるライトフィールドカメラを用いた受動的な三次元濃度分布手法について述べる。本手法は、複数台のライトフィールドカメラにより煙霧体が存在する空間を撮影し、得られた画像からピント面の異なるリフォーカス画像群を作成し、そのリフォーカス画像間の関係から、三次元の濃度分布を計測する。シミュレーションにより生成した煙霧体の三次元の濃度分布を推定した結果を示す。その結果、濃度分布が存在している範囲の推定できることを確認した。また、推定した濃度分布の誤差は、真値の最大値の 10% 以下であった。

キーワード

Light Field、逐次近似法、煙霧体、リフォーカス画像、三次元濃度分布推定、コンピュータビジョン

Estimation of Spatial Distribution of Smoke on Light Field Consistency

Yuta Ideguchi

Abstract

Three-dimensional measurement methods using a camera are categorized as a passive measurement method such as a stereo vision and a shape from silhouette, and an active measurement method such as an active stereo and a time of flight. However, it is difficult to measure a spatial distribution of cloud-like objects with the conventional methods due to the fuzzy boundaries. I am aiming at measuring the spatial distribution of the cloud-like objects. This thesis describes a method for spatial distribution using a light field camera that can generate the image with arbitrary focal point. A number of images are reconstructed as varying the focal point from the scene image including the cloud-like object. The planar density at the depth corresponding to the focal point is estimated from the reconstructed image. Then, the spatial density distribution of the object is estimated with a composition of the estimated density planes. This experimental result shows the reconstructed spatial distribution from simulated cloud-like objects. The simulation results show the possibility to measure range of the spatial distribution is present. and the outside of spatial distribution. Error of the estimated spatial distribution was 10% of the maximum value of the true distribution or less.

Keyword

Light Field, Approximation Method, Smoke, Refocus Image, Spatial Distribution, Computer Vision

目 次

| | |
|------------------------|----|
| 第 1 章 はじめに | 1 |
| 第 2 章 煙霧体の濃度分布計測 | 3 |
| 2.1 煙霧体 | 3 |
| 2.2 カメラ | 5 |
| 2.3 三次元計測手法 | 8 |
| 2.4 解法 | 18 |
| 第 3 章 ライトフィールドカメラ | 19 |
| 3.1 ライトフィールドカメラによる取得画像 | 19 |
| 3.2 カメラアレイ画像間の関係 | 24 |
| 3.3 カメラアレイ画像によるリフォーカス | 26 |
| 第 4 章 空間濃度分布計測手法 | 28 |
| 4.1 本研究における濃度 | 28 |
| 4.2 システム概要 | 29 |
| 4.3 濃度分布の投影 | 31 |
| 4.4 初期濃度分布の決定 | 31 |
| 4.5 繰り返し演算による濃度分布の更新 | 32 |
| 第 5 章 濃度分布推定 | 37 |
| 5.1 シミュレーション環境 | 37 |
| 5.2 結果および考察 | 40 |
| 第 6 章 おわりに | 44 |
| 謝辞 | 45 |
| 参考文献 | 46 |
| 業績 | 50 |

図 目 次

| | |
|------------------------------------|----|
| 1.1 煙霧体の空間濃度分布計測 | 2 |
| 2.1 煙霧体の例 | 4 |
| 2.2 濃度分布計測 | 4 |
| 2.3 ピンホールカメラ | 5 |
| 2.4 通常のカメラ | 6 |
| 2.5 ライトフィールドカメラの構造 | 7 |
| 2.6 TOF 法の概要 | 9 |
| 2.7 TOF 法の光の飛行時間 | 9 |
| 2.8 位相差 TOF 法 | 9 |
| 2.9 三角法の概要 | 10 |
| 2.10 パッシブステレオ法の概要 | 11 |
| 2.11 各点の対応付け | 11 |
| 2.12 アクティブステレオ法の概要 | 12 |
| 2.13 スリットの投影 | 12 |
| 2.14 対象とカメラの位置関係 | 13 |
| 2.15 シルエット画像の取得 | 13 |
| 2.16 SCM の概要 | 14 |
| 2.17 VIM の概要 | 15 |
| 2.18 CT の概念図 | 16 |
| 3.1 ライトフィールドカメラによるリフォーカス | 19 |
| 3.2 ライトフィールドカメラの写真 | 21 |
| 3.3 ライトフィールドカメラの構造 | 21 |
| 3.4 取得画像 | 22 |

| | | |
|------|--------------------------------|----|
| 3.5 | 部分開口を通る光路 | 23 |
| 3.6 | 部分開口画像 | 23 |
| 3.7 | カメラと空間中の点の位置関係 | 24 |
| 3.8 | カメラの画角とピクセル幅 | 25 |
| 3.9 | カメラアレイ | 27 |
| 3.10 | カメラアレイにより得られる画像 | 27 |
| 3.11 | ピントを合わせた場合 | 27 |
| 4.1 | 計測する濃度 | 29 |
| 4.2 | ボクセルへ到達する光 | 29 |
| 4.3 | 濃度の違いによる散乱光の強度 | 29 |
| 4.4 | ボクセルからカメラへの光線 | 29 |
| 4.5 | 提案手法 | 30 |
| 4.6 | 計測状況 | 30 |
| 4.7 | リフォーカス画像の投影 | 30 |
| 4.8 | 濃度分布の更新 | 32 |
| 4.9 | ボケ幅とレンズの距離との関係 | 33 |
| 4.10 | 座標変換 | 33 |
| 4.11 | 濃度分布の広がりの範囲 | 34 |
| 4.12 | 濃度分布の更新 | 35 |
| 5.1 | シミュレーション状況 | 37 |
| 5.2 | 真の濃度分布の断面 | 37 |
| 5.3 | 各ライトフィールドカメラにより取得される画像 | 38 |
| 5.4 | ライトフィールドカメラ $j = 1$ により取得される画像 | 38 |
| 5.5 | リフォーカス画像 | 39 |
| 5.6 | 各ライトフィールドカメラにより作成されるリフォーカス画像 | 39 |
| 5.7 | 真の濃度分布 (球形状) | 41 |
| 5.8 | 初期濃度分布 (球形状) | 41 |
| 5.9 | 真値と初期値の差 (球形状) | 41 |
| 5.10 | 真の濃度分布 (球形状) | 41 |

| | |
|--|----|
| 5.11 濃度分布推定結果(球形状) | 41 |
| 5.12 真値と推定結果の差(球形状) | 41 |
| 5.13 真の濃度分布(Stanford Bunny) | 43 |
| 5.14 初期濃度分布(Stanford Bunny) | 43 |
| 5.15 真値と初期値の差(Stanford Bunny) | 43 |
| 5.16 真の濃度分布(Stanford Bunny) | 43 |
| 5.17 濃度分布推定結果(Stanford Bunny) | 43 |
| 5.18 真値と推定結果の差(Stanford Bunny) | 43 |

第1章 はじめに

我々は普段、視覚により物体の色などの光学的情報および、三次元形状や位置といった幾何学的情報を得ている。これらの情報の伝達を担っているのが光である。光の進路に物体が存在すると、光は物体で減衰、散乱および屈折する。我々の感覚器の一つである眼がこの光を捉えることで、物体が存在することを認識できる。一方、撮像装置の一種であるカメラにより得られる画像は、我々が眼で見ている画像と同様の原理に基づいて取得される。従って、カメラ画像は人間の視覚における入力と同様の情報を含むことが期待され、カメラ画像を計算機によって処理することで、我々が普段視覚により得ている情報を計算機により得られると考えられる。

カメラ画像を用いて、視覚的情報の一つである物体の三次元形状を計測するために、様々な手法が開発されてきた。しかし、鏡面反射を伴う表面を有する物体や、ガラスなどの透明な物体の形状を計測することは非常に困難である。これらの対象の三次元形状を計測するための研究として、偏光を利用して屈折率が既知の金属や透明物体の三次元形状を計測する研究などが行われている [1–4]。他にも近年、透明物体を識別するために、ライトフィールドカメラという光線情報を記録することが可能なカメラを用いて、透明物体を通過する光線の屈折から透明物体を識別する研究なども行われている [5]。これらの手法は、明確な界面を有する物体の形状は計測および識別できるものの、境界が明確ではない透明および半透明な対象の形状を計測することは不可能である。透明な対象は、物体中の濃度分布に応じて光を屈折し、半透明な対象はさらに光の散乱を引き起こす。この様な透明な対象としては、通常の空気とは屈折率の異なるガスなどがある。境界が明確ではない透明な対象であるガスの濃度分布を計測するために複数のカメラ画像を用いて、光線の屈折の違いからガスの濃度分布を計測する研究なども行われている [6, 7]。一方で、半透明な対象としては、煙、霧、炎などといったような煙霧体があり、煙霧体を計測することは、様々な事に有用である。例えば、霧や炎の濃度分布を計測することは、エンジン噴

霧火炎内の現象理解に有用である。また、煙や霧の濃度分布を計測することによって、煙や霧を用いた空気の流動の可視化可能になる。空気の流動を可視化することは、航空機、自動車、建築物の設計などに使われており、煙霧体の濃度分布を計測することは、これらの設計に有用である。従って、このような煙霧体の三次元空間濃度分布を計測する手法の確立が望まれる。

煙霧体の濃度分布を計測するために、レーザ光発振素子と受光素子を測定範囲の両端に設置し、両者の間での光強度の減衰から濃度分布を計測する手法が提案されている [8–10]。しかし、この手法はレーザ発光素子と受光素子の間の光路における光の減衰から、2点間の濃度分布を計測する手法であり、三次元空間濃度分布を計測することを目的としていない。現状では、煙、霧、炎のような煙霧体の三次元空間濃度分布を計測する手法は確立されていない。

本研究では、煙、霧、炎などの煙霧体の三次元の空間濃度分布を計測することを目的とし、任意の距離にピントを合わせた画像を生成可能であるライトフィールドカメラ [11–15] を利用し、空間濃度分布の計測手法を提案する。まず、ライトフィールドカメラにより煙霧体が存在する空間を撮影し、アレイ画像を取得する。その後、アレイ画像からピント面の異なるリフォーカス画像群を作成し、そのリフォーカス画像から、三次元空間濃度分布を計測する。

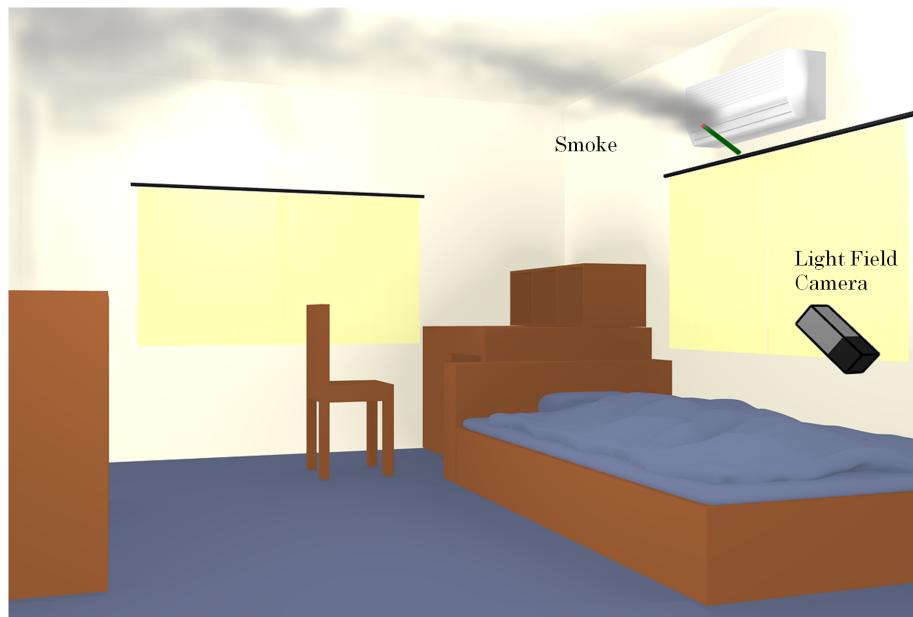


図 1.1: 煙霧体の空間濃度分布計測

第2章 煙霧体の濃度分布計測

本研究では、煙、霧、炎などの煙霧体の三次元濃度分布を推定することを目的としている。以下に、計測対象である煙霧体、カメラ、三次元計測手法、解法について説明する。

2.1 煙霧体

本研究では、煙、霧、炎などの煙霧体の三次元濃度分布を推定することを目的としている。以下に、本研究の測定対象である煙霧体および煙霧体の濃度分布計測手法について説明する。

2.1.1 煙霧体の濃度

本研究では、図 2.1 に示すような、煙、霧、炎などの半透明流体を煙霧体と呼ぶ。煙は、燃焼の際に発生する微粒子を含んだ空気であり、光を吸収、散乱させる光学的特性を持つ。本研究では、単位体積(1ボクセル)当たりに存在している微粒子の数を濃度とする。霧は、微細な水滴が浮遊している空気であり、煙と同様に光を吸収、散乱させる光学的特性を持つ。炎は、気体が燃焼の際に黒体放射による発光と熱を発生している部分であり、その熱により周囲の空気の密度を低くし、上昇気流を発生させる。また、炎は周囲に空気の濃度差を発生させるため、光を屈折させる。これらの煙、霧、炎などの煙霧体は、濃度に応じた透明度を持っており、視覚的に観測できる。これは、煙霧体の濃度が高いときには微小領域内の光の散乱頻度が高く、逆に濃度が低いときには散乱の発生頻度が低いためである。また、煙霧体の濃度分布は一定の状態を保つものではなく、時間的に変動する。従って、これらの煙霧体の三次元濃度分布を計測するためには、一度の観測により得られる情報から三次元濃度分布を求めなければならない。



(a) 煙 [16]

(b) 炎 [17]

図 2.1: 煙霧体の例

2.1.2 濃度分布計測

煙霧体を計測するための手法としては、図 2.2 に示すようにレーザ光発振素子と受光素子を測定範囲の両側に設置して計測する手法がある [8–10]。レーザ光発振素子から直進するレーザ光は測定対象で吸収、散乱、屈折することにより、受光素子に到達する光強度が減衰する。従って、両者の間での光強度の減衰から光路での合計の濃度分布を計測することができる。しかし、この手法ではレーザ発光素子と受光素子の間に存在している煙霧体の濃度の合計を計測するため、光路方向の濃度分布の変化を計測できず、三次元の濃度分布を計測する事はできない。

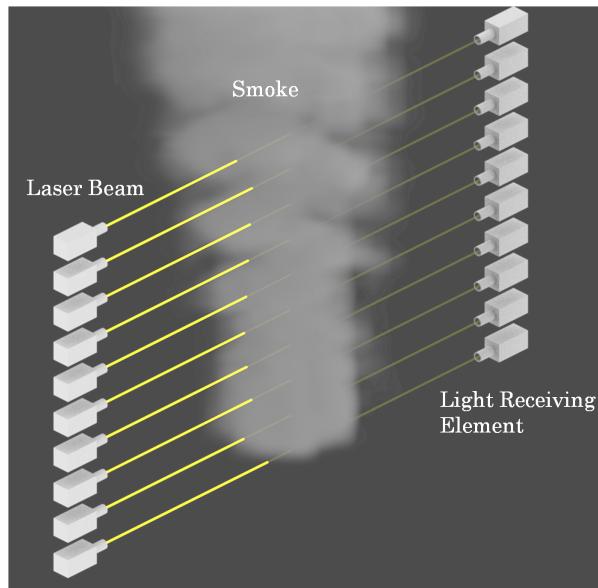


図 2.2: 濃度分布計測

2.2 カメラ

カメラは三次元の対象を二次元平面に投影する装置である。本研究では、煙霧体の推定にライトフィールドカメラを使用している。以下にカメラについて説明する。

2.2.1 ピンホールカメラ

ピンホールカメラは、図 2.3(a) に示すように、撮像面と対象物体の間に小さな穴（ピンホール）が開いている構造になっている。外部からの光は、ピンホールを通り、撮像面に到達する。これにより、対象の画像を取得できる。ピンホールカメラは、図 2.3(b) に示すような簡易的なモデルで表わせる。本論文では、図 2.3(c) に示すように、ピンホールの後ろの撮像面をピンホールの前に反転させて表示する。

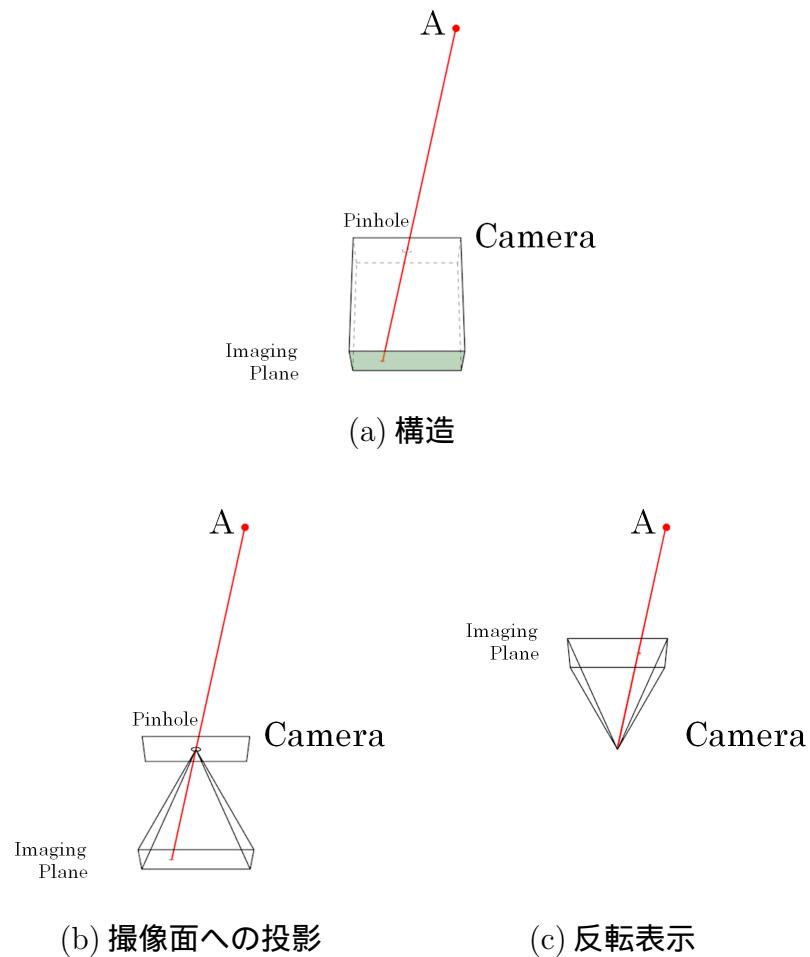


図 2.3: ピンホールカメラ

2.2.2 一般的なカメラ

一般的なカメラは、メインレンズと撮像素子から構成される。図 2.4 に示すように、対象からの光は、レンズを通り撮像素子に到達することで、対象の画像を取得することができる。対象の任意の一点からの光が、撮像面上の一点に収束し、対象がボケることなく撮像面に綺麗に映るとき、レンズの焦点距離 f 、レンズと撮像素子の距離 l_j 、レンズと対象の距離 l_i の関係は以下の様になる。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_j} \quad (2.1)$$

一般的なカメラの場合には、ピンホールカメラの場合とは異なり、式 (2.1) が成り立つ面(ピント面)以外にある対象の任意の一点からの光は、撮像面上の一点に収束せず、異なる位置に到達する。つまり、ピントが合っている対象はボケずに映り、ピントが合っていない対象はボケて映ることになる。このボケは対象の距離に関する情報を含んでいる一方で、物体の輪郭を観測する際の妨げになる恐れがある。

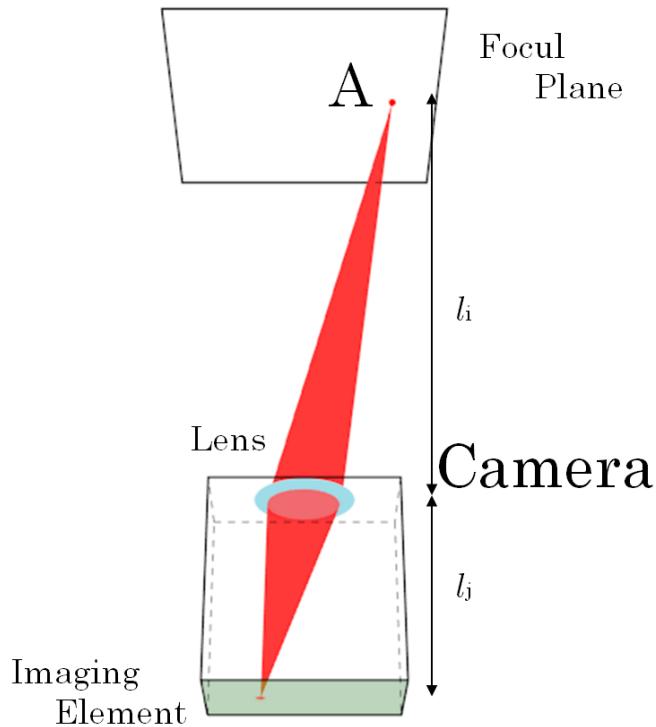


図 2.4: 通常のカメラ

2.2.3 ライトフィールドカメラ

ライトフィールドカメラでは、一度撮影した画像から任意の距離にピントを合わせた画像を作り出すことが可能である。ライトフィールドカメラは、図 2.5 に示すように、メインレンズと撮像素子の間にマイクロレンズアレイが配置されている構造になっている。対象からの光はメインレンズを通り、マイクロレンズアレイに到達する。この時対象からの光は、マイクロレンズアレイに到達した光の角度に応じて撮像素子の異なる位置に到達する。これにより、メインレンズに到達する光線を記録することが可能となる。

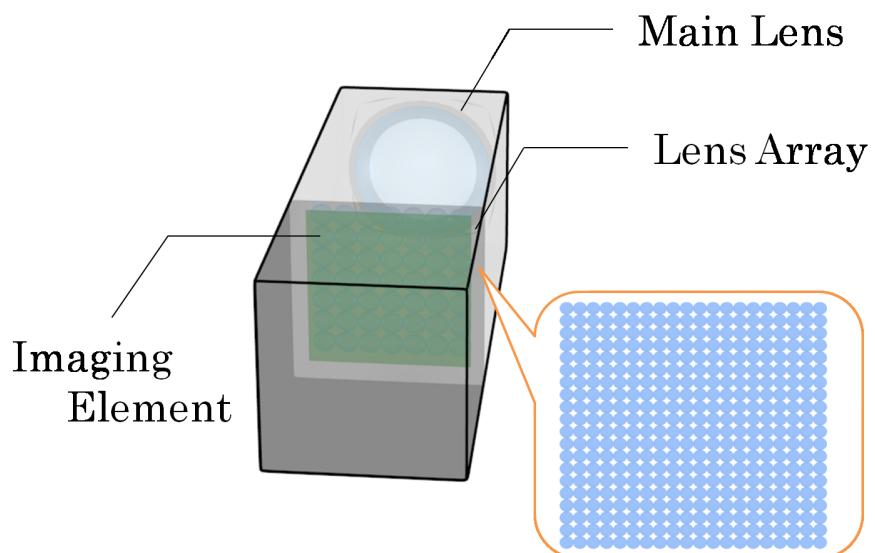


図 2.5: ライトフィールドカメラの構造

本研究では、計測に用いられるカメラはピンホールカメラモデルとして扱う。また、ライトフィールドカメラは、ピンホールカメラによるカメラアレイによって取得される画像と同等の画像を取得することが可能である。従ってライトフィールドカメラは、通常のカメラに比べ多くの情報を取得することが出来る。本研究では、煙霧体の三次元濃度分布推定にライトフィールドカメラを使用する。

2.3 三次元計測手法

本研究では、煙霧体の空間濃度分布を計測することを目的としている。煙霧体における任意の領域の濃度は、光の散乱の強さに相関があると考えられ、散乱光を観測することで空間濃度分布を計測可能であることが期待される。カメラから三次元計測を行う手法として、単眼カメラによる計測手法である TOF(Time of Flight) 法、ステレオカメラによる計測手法であるパッシブステレオ法およびアクティブステレオ法、複数のカメラによる計測手法である視体積交差法および CT(Computed Tomography) がある。以下に、これらの手法について説明する。

2.3.1 Time of Flight 法

TOF 法 [18] とは図 2.6 に示すように、光源から出た光が対象物で反射、散乱し、センサに届くまでの光の飛行時間と光の速度の関係から対象物までの距離を計測する手法である。物体までの距離を d 、光速を c とするとき、図 2.7 に示す光の飛行時間 Δt は式 (2.2) で求められる。光は 3×10^8 m/s の速度で進むため、飛行時間が 1 ns 变化すると、対象物の距離は 150 mm 变化する。従って、高精度の計測を行うためには、サンプリング周波数をきわめて高くする必要がある。この問題を解決する方法として、光の強度を周期 T の正弦波状にして、物体から反射した光との位相差により計測する手法がある。位相差を利用する方法は、図 2.8 に示す位相差を Δt とするとき、式 (2.3) のようになる。しかし、この手法は、距離が短い場合には通常 $n = 0$ であるが、距離が cT より遠くなると、 $n \neq 0$ となるため、 ncT の曖昧性を発生させる。

$$d = \frac{c\Delta t}{2} \quad (2.2)$$

$$d = ncT + \frac{c\Delta t}{2} \quad (2.3)$$

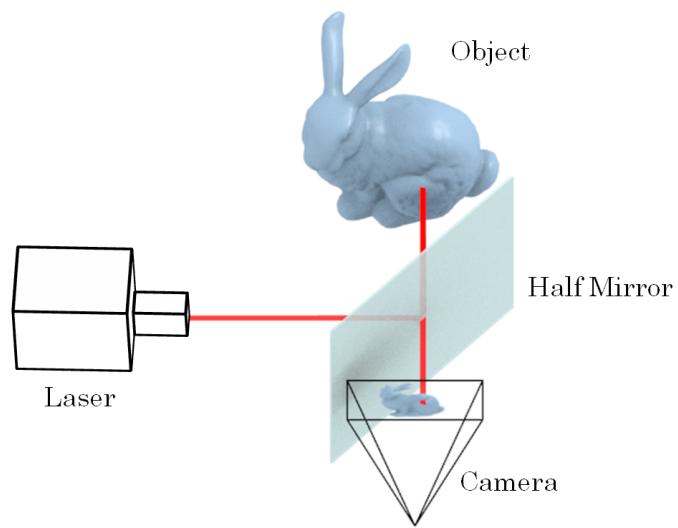


図 2.6: TOF 法の概要

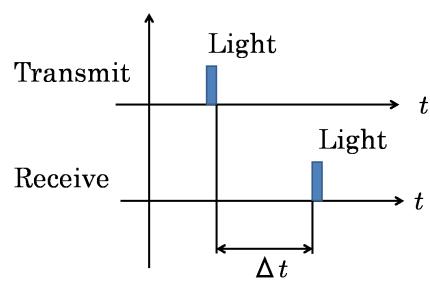


図 2.7: TOF 法の光の飛行時間

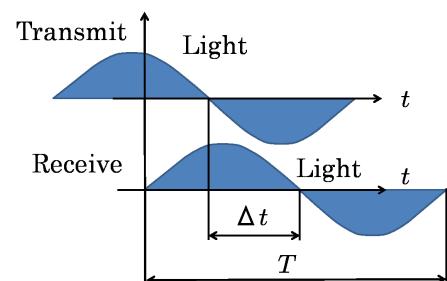


図 2.8: 位相差 TOF 法

2.3.2 パッシブステレオ法

パッシブステレオ法 [19] は、三角法を用いて三次元形状計測を行う。三角法は、距離を測る一般的な手法であり、古来より用いられてきた。対象物を複数の位置から目測し、それぞれの視線の方向から、距離を計算することが可能である。三角法は図 2.9 に示すような位置関係の場合に、2 点間の距離 ($l_1 + l_2$) とそれぞれの角度 (θ_1 , θ_2) から距離を求めることができ、この時の対象までの距離 h は式 (2.4) となる。

$$h = (l_1 + l_2) \frac{\tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (2.4)$$

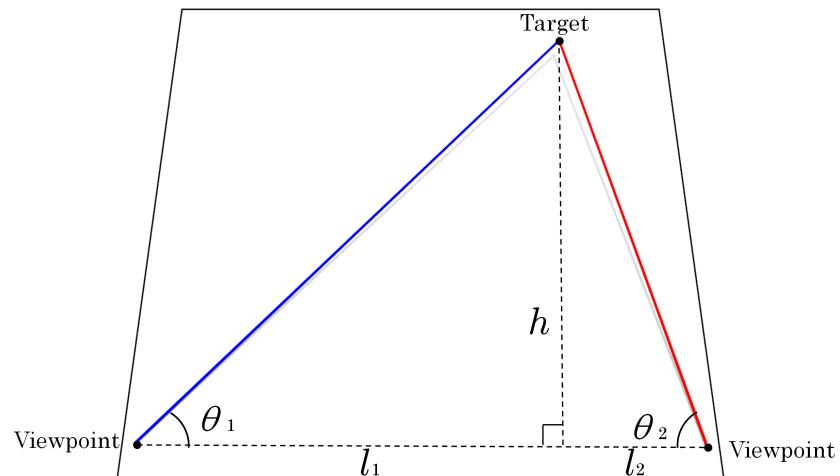


図 2.9: 三角法の概要

カメラを用いたパッシブステレオ法は、図 2.10 に示すように、まず、位置や方向がそれぞれ既知である異なる複数の視点のカメラにより対象物体を撮影する。同図では、ピンホールカメラによる焦点の後ろの撮像面を焦点の前に反転させて表示している。次に、図 2.15 に示すように、一方の画像に見えている点が、もう一方の画像のどこに映るかという対応付けを行う。そして、カメラの位置や方向、対応付けした対象物の各点の位置を用いて、三角法により対象物の各点までの距離を求める。パッシブステレオ法は、画像処理により対象物の各点の対応付けを行うが、表面の色などが一様であり特徴点がない対象では対応付けに誤りが発生する問題がある。

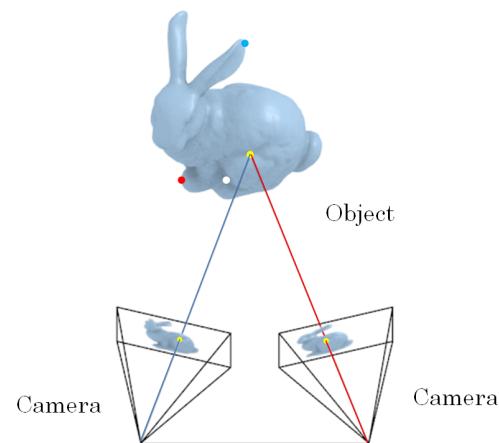


図 2.10: パッシブステレオ法の概要

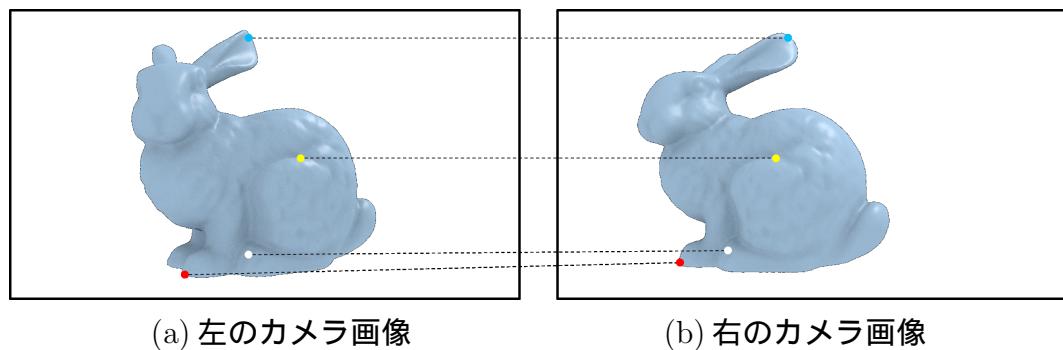


図 2.11: 各点の対応付け

2.3.3 アクティブステレオ法

アクティブステレオ法 [20] [21] [22] は、図 2.12 に示すように、プロジェクタによりスリット光を走査させ物体に光を投影し、投影された位置から三次元形状を計測する手法である。この手法は、パッシブステレオ法の一方のカメラの代わりに、プロジェクタによって投影されたパターンまたは光を走査させ、カメラにより撮影することで、パッシブステレオ法と同じ原理で対象物の三次元形状を計測する。

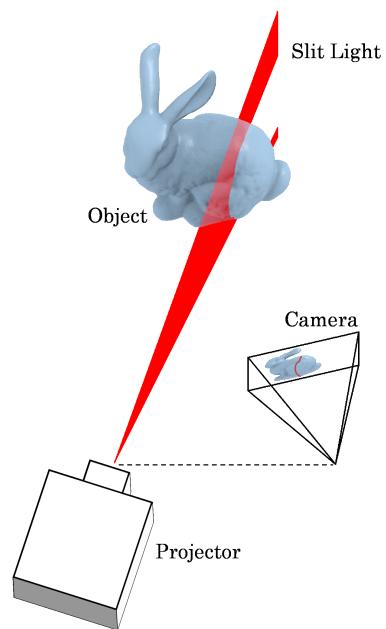
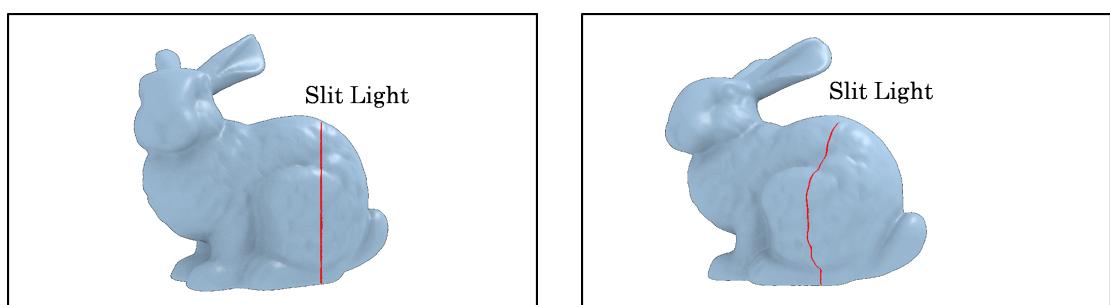


図 2.12: アクティブステレオ法の概要



(a) プロジェクタ視点から見た図

(b) カメラ画像

図 2.13: スリットの投影

2.3.4 視体積交差法

視体積交差法は、対象物の周りに多数のカメラを配置し、各カメラから得られるシルエット画像により三次元モデルを作成する手法である。シルエット画像とは、図 2.14 に示すように、カメラにより取得した画像の対象が存在する範囲を示した画像である。視体積交差法の基本的な概念は 1974 年に Baumgart によって提唱された [23]。視体積交差法は、視体積が小さくなるように物体に対するカメラ同士の角度が広い必要がある。視体積交差法は SCM (Space carving method) [24] [25] と VIM (Volume intersection method) [26] [27] [28] の二種類の手法に分けられる。

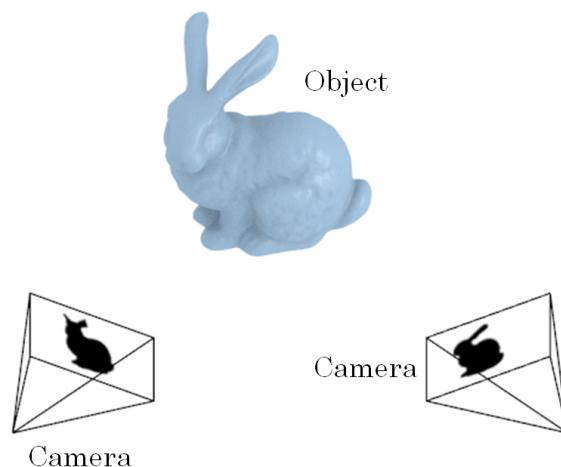
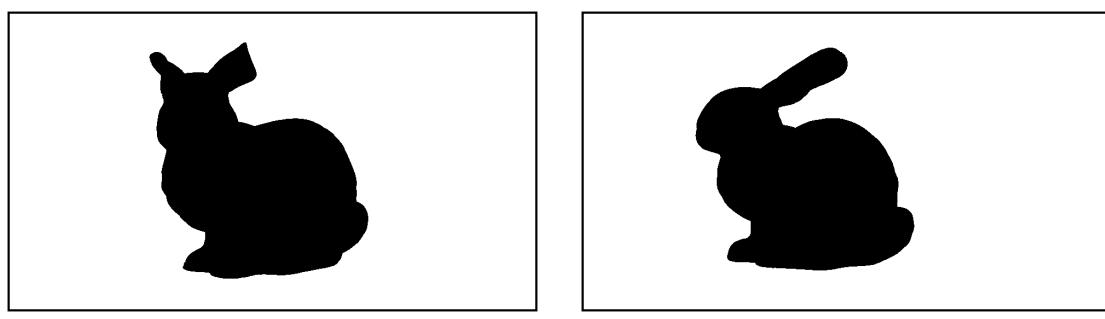


図 2.14: 対象とカメラの位置関係



(a) 左のカメラ画像

(b) 右のカメラ画像

図 2.15: シルエット画像の取得

SCM は、まず図 2.16(a) に示すようなボクセルを使用して、作成する三次元モデルよりも広い範囲を離散化する。次に、カメラから取得した画像からシルエット画像を取得し、各ボクセルに対応するシルエット画像の画素の位置を求め、図 2.16(b) に示すようにシルエットがない部分に対するボクセルを削除する。これを対象の周りを囲んだ全てのカメラで行うことにより、図 2.16(c) のような三次元モデルを作成する。この手法は、単純な方法であり実装が容易であるが、分解能を上げるためにボクセル数を増やすと、計算時間が増加する問題がある。

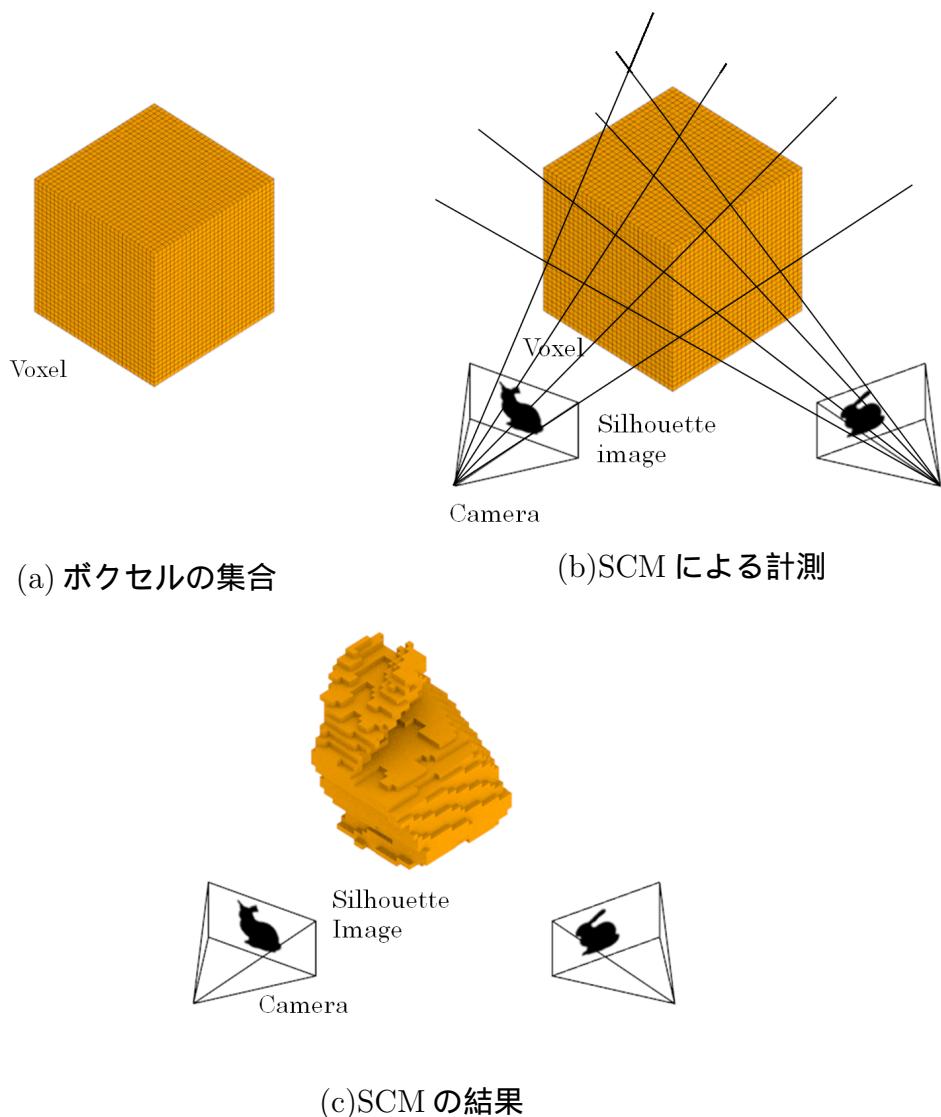
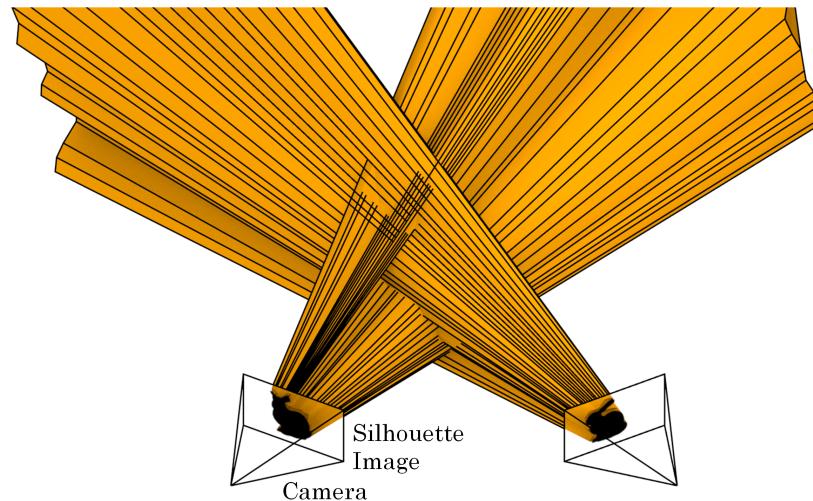
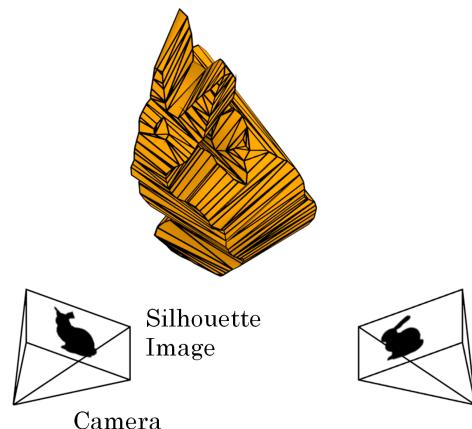


図 2.16: SCM の概要

VIM は、複数のカメラからのシルエットを三次元空間に投影し、それぞれの視体積の共通部分を求め、多面体のポリゴンで三次元モデルを作成する。VIM は、SCM に比べ離散化の際に発生する計測誤差がないという利点を有するが、それぞれのカメラに対する視体積の点の集合を記憶するため、多くのメモリを必要とする。



(a)VIM による計測



(b)VIM の結果

図 2.17: VIM の概要

2.3.5 Computed Tomography

Computed Tomography(CT) は、対象通過する際の光の減衰量から、対象の三次元の光の減衰率を計測する手法である。発光部からの光は、対称を通過する際に減衰しながらカメラに到達する。図 2.18 に示すように、発光部とカメラを対象の周りを 1 周させることで、複数の位置での光線の減衰を計測出来る。取得した画像の輝度値を反転した画像を投影し、加算することで減衰率の高い所は明るく、逆に低い所は暗いといった結果が得られる。これにより、三次元の減衰率を求められる。X 線 CT では、光が対象で吸収され減衰し直進することを前提に減衰率の分布を推定する。しかし、対象で光が発散や屈折する光を用いた場合、それらの影響が現れるため推定精度が低下する。

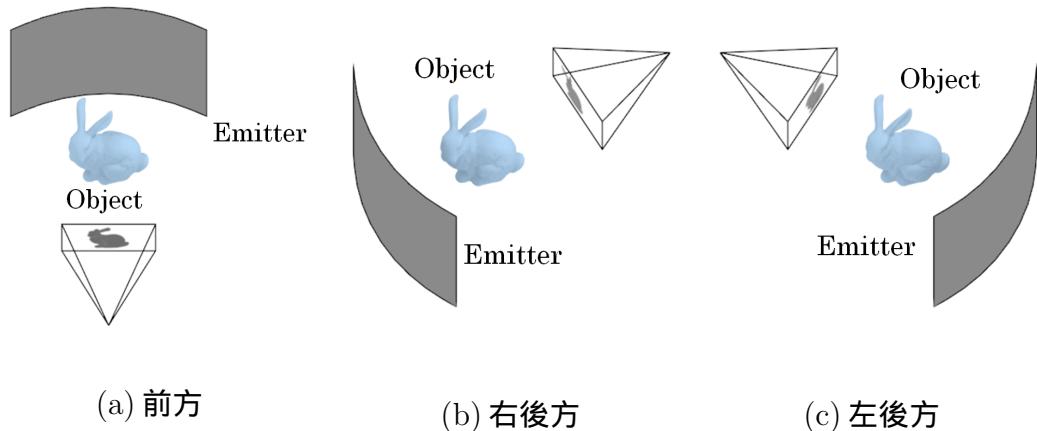


図 2.18: CT の概念図

煙霧体において発生する散乱光の光量は、濃度により変化することが予想される。従って、煙霧体をカメラで撮影した場合、その濃度に応じて撮影した画像の輝度が変化する。つまり、カメラにより煙霧体を観測することで、濃度情報を取得可能であると考えられる。従って、カメラ画像より煙霧体の三次元の濃度分布を計測することが可能であると考えられる。そのため、前述した三次元形状計測手法が、煙霧体の三次元の濃度分布を計測に適応出来ないか考える。TOF法は、光源から出た光は減衰しながらも煙霧体を透過するため、センサに届いた光がどの点から反射した光か判断することが出来ないため、煙霧体の濃度分布を計測することは不可能である。パッシブステレオ法は、測定対象の各点の対応付けを行う必要がある。しかし、煙霧体は半透明であり、光を透過させるため、対応付けを行うことは困難である。従って、パッシブステレオ法は、煙霧体の濃度分布を計測することは不可能である。アクティブステレオ法では、プロジェクタから投影された光は減衰しながらも煙霧体を透過するため、対応付けを行うことが出来ないため、結果として濃度分布を計測することができない。視体積交差法は、撮影画像からシルエット画像を作成することが可能であれば、三次元形状を計測することができる。しかし、シルエット画像を作成する際に濃度分布の情報が欠落する。従って、濃度分布を計測することは不可能である。しかし、煙霧体の画像よりシルエット画像を作成することは可能であるため、視体積交差法は煙霧体の存在範囲の決定には有用であると考えられる。CTは、光の散乱のない対象の減衰率を計測する手法であるため、光の散乱のある煙霧体の濃度分布を計測する場合には、散乱の影響により精度が低下する。この様に、前述した三次元形状計測手法では煙霧体の三次元濃度分布を計測することは不可能である。しかし、視体積交差法のように複数のカメラを用いた手法では、煙霧体の三次元濃度分布を計測できる可能性があることが示される。従って、本研究では、複数台のカメラを使用する。

2.4 解法

観測値から物理的現象に基づいて結果を求める方法として演繹的手法と帰納的手法がある。以下にそれらについて説明する。

2.4.1 演繹的手法

以下の式に示すように観測値 ξ と結果 ψ の関係を表わせると、観測値 ξ より結果 ψ を直接導き出すような手法を演繹的手法という。

$$\psi = a\xi \quad (2.5)$$

演繹的手法は、特定の観測値 ξ から結果を導き出す手法である。また、演繹的手法は、観測値 ξ が一意に決まると、結果 ψ も一意に決まる。例えば、TOF 法の場合には、光の飛行時間 Δt を計測することで式 (2.2) より、距離 d を求める事が出来る。

2.4.2 帰納的手法

以下に示すような式によって、 ξ_n を更新して ξ_{n+1} を求める方法を帰納的手法という。

$$\xi_{n+1} = a\xi_n + b \quad (2.6)$$

帰納的方法は、問題が複雑になり、演繹的に解けない場合や観測値から解が一意に決まらない場合などに用いられる。また、帰納的手法は、複数の観測値から係数 a 、 b を決定し、 ξ_n を最終的な解へ近づけていく。帰納的手法は、初期値により収束する結果が異なる可能性がある。

本研究では、複数のライトフィールドカメラを用いて煙霧体の三次元濃度分布を推定する。煙霧体の濃度とライトフィールドカメラにより得られる画像との関係は非常に複雑であり、帰納的に濃度を求めることは困難である。従って、帰納的な手法により煙霧体の三次元濃度分布を推定する。

第3章 ライトフィールドカメラ

本研究では、煙霧体の三次元の空間濃度分布を計測するために、ライトフィールドカメラを使用する。以下にライトフィールドカメラによる取得画像及び、リフォーカスについて説明する。

3.1 ライトフィールドカメラによる取得画像

ライトフィールドカメラは、一度撮影した画像から図 3.1 に示す画像のように、任意の距離にピントを合わせた画像を作り出すことが可能なカメラである。図 3.1(a) は手前の物体にピントを合わせた画像で、図 3.1(b) は奥の物体にピントを合わせた画像である。



(a) 手前の物体にピントを合わせたとき (b) 奥の物体にピントを合わせたとき

図 3.1: ライトフィールドカメラによるリフォーカス

図 3.2 にライトフィールドカメラの外観を示す。ライトフィールドカメラは、図 3.3 に示すように、メインレンズと撮像素子の間にマイクロレンズアレイが配置されている構造になっている [29]。任意の一点からの光はマイクロレンズアレイの面で一点に集まり、方向成分ごとに光線を分離され、撮像素子の異なる位置に到達する。これにより、プレノプティックカメラ [30] と同様に、カメラレンズに入射する光線であるライトフィールド（光線空間）を記録可能となる。図 3.4 にライトフィールドカメラにより撮影した画像を示す。これは巨視的に見ると、一般的なカメラで撮影した画像と同じであるが、微視的に見ると、各マイクロレンズの画像はメインレンズによって得られる画像の部分画像となっている。図 3.5 に示すように、メインレンズの任意の範囲（部分開口）からの光は、各マイクロレンズアレイを通り、マイクロレンズごとに撮像素子の異なる位置に集光する。逆に、図 3.5 に示す位置の画素を集め一枚の画像を作成することで、メインレンズの任意の範囲を通る光の画像（部分開口画像）を作成することができる。これをメインレンズ全体で行うことでの図 3.6 のような画像を作成できる。これは、複数のピンホールカメラにより構成されるカメラアレイ [31] で撮影した場合の画像と同様である。従って、ライトフィールドカメラによって撮影される画像は、各部分開口にカメラが存在するカメラアレイにより撮影された画像と同じとなる。レンズアレイを構成しているマイクロレンズの横と縦の数をそれぞれ x_{la} 、 y_{la} とし、一つのレンズアレイに対応する撮像素子の横と縦の画素数をそれぞれ w_{la} 、 h_{la} とするとき、ライトフィールドカメラの取得画像 $F(x, y)$ から、カメラアレイ画像 $G(x, y)$ への変換は以下の式により行うことが出来る。式 (3.1) の mod は余り、 $\lfloor \cdot \rfloor$ は切り捨ての整数を意味する。図 3.6において、 x_{la} 、 y_{la} 、 w_{la} 、 h_{la} はそれぞれ $x_{\text{la}} = y_{\text{la}} = 380$ 、 $w_{\text{la}} = h_{\text{la}} = 10$ とした。以降本研究では、ライトフィールドカメラにより得られる取得画像は、図 3.6 に示すようなカメラアレイ画像であるとして取り扱う。

$$G(x, y) = F(w_{\text{la}}(x \bmod x_{\text{la}}) + \left\lfloor \frac{x}{x_{\text{la}}} \right\rfloor, h_{\text{la}}(y \bmod y_{\text{la}}) + \left\lfloor \frac{y}{y_{\text{la}}} \right\rfloor) \quad (3.1)$$



図 3.2: ライトフィールドカメラの写真

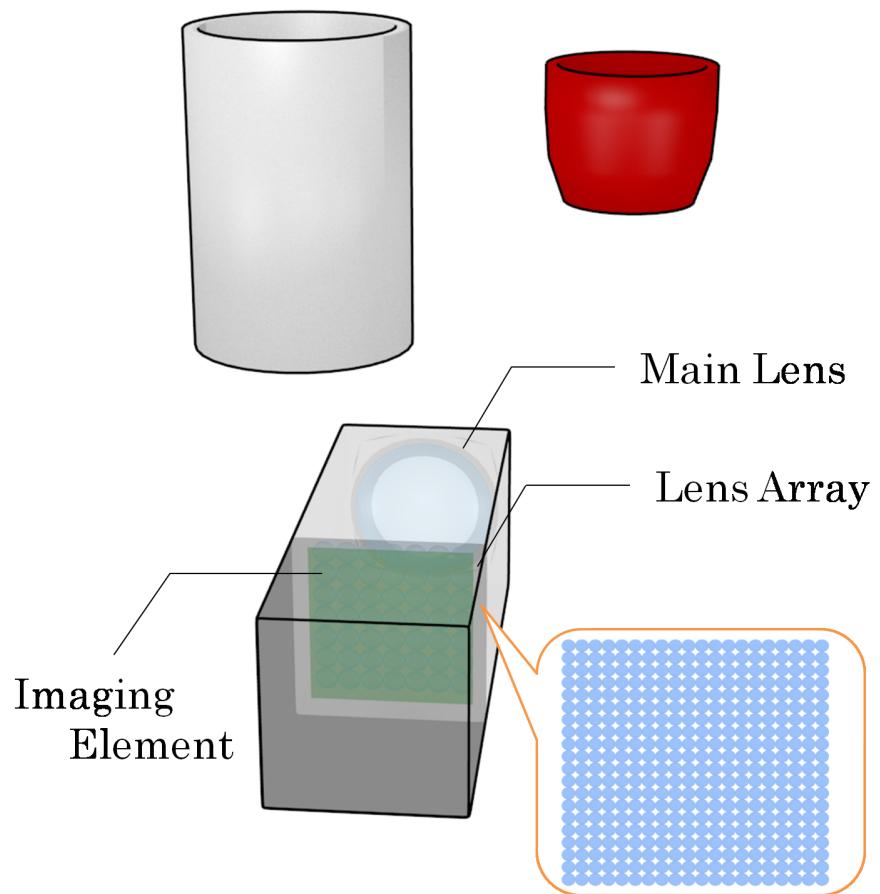
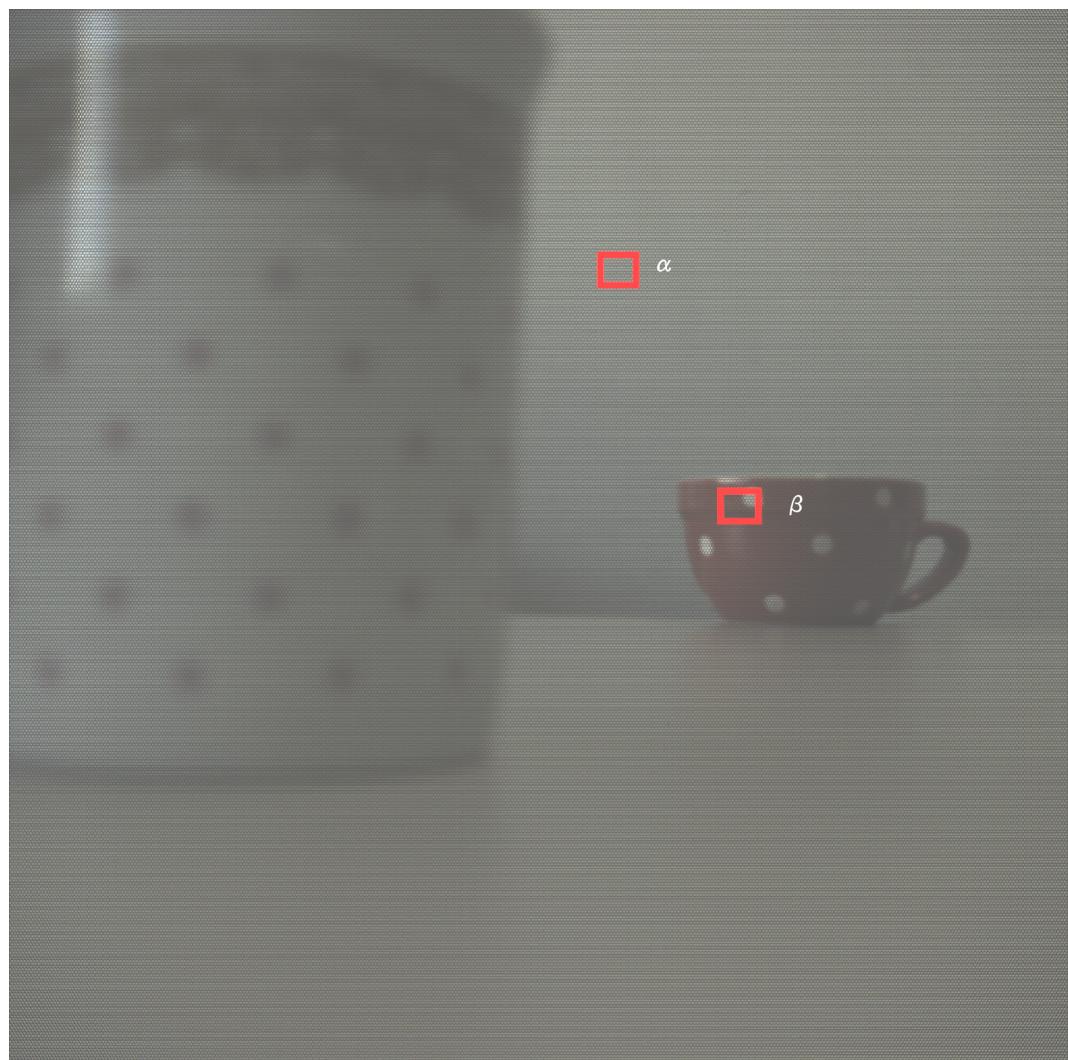
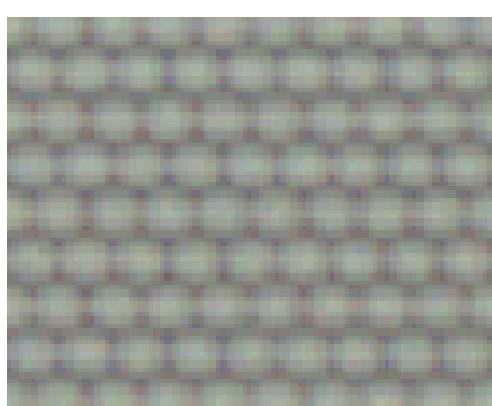


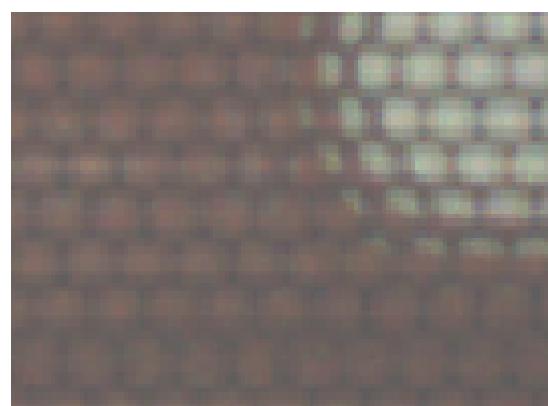
図 3.3: ライトフィールドカメラの構造



(a) 取得画像の全画像



(b) α の拡大画像



(c) β の拡大画像

図 3.4: 取得画像

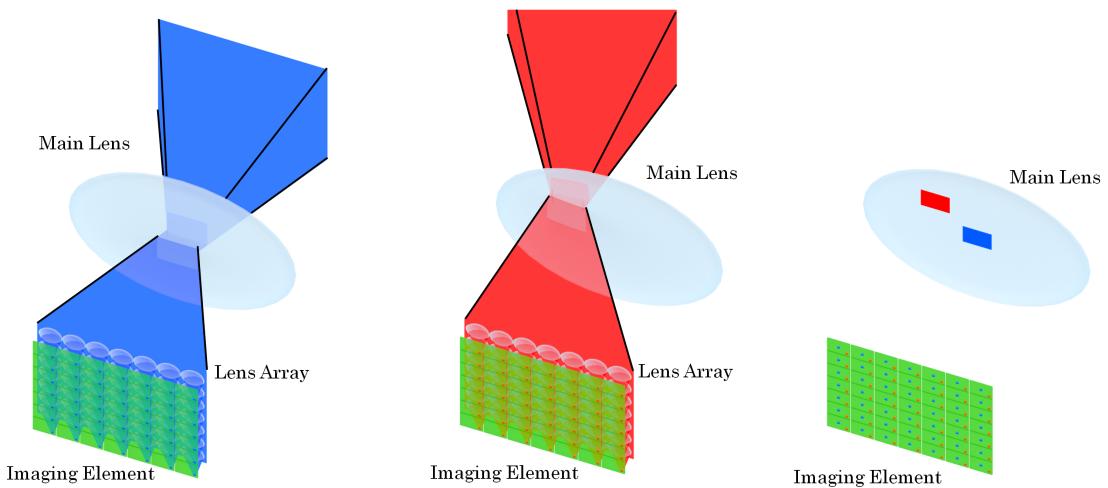


図 3.5: 部分開口を通る光路

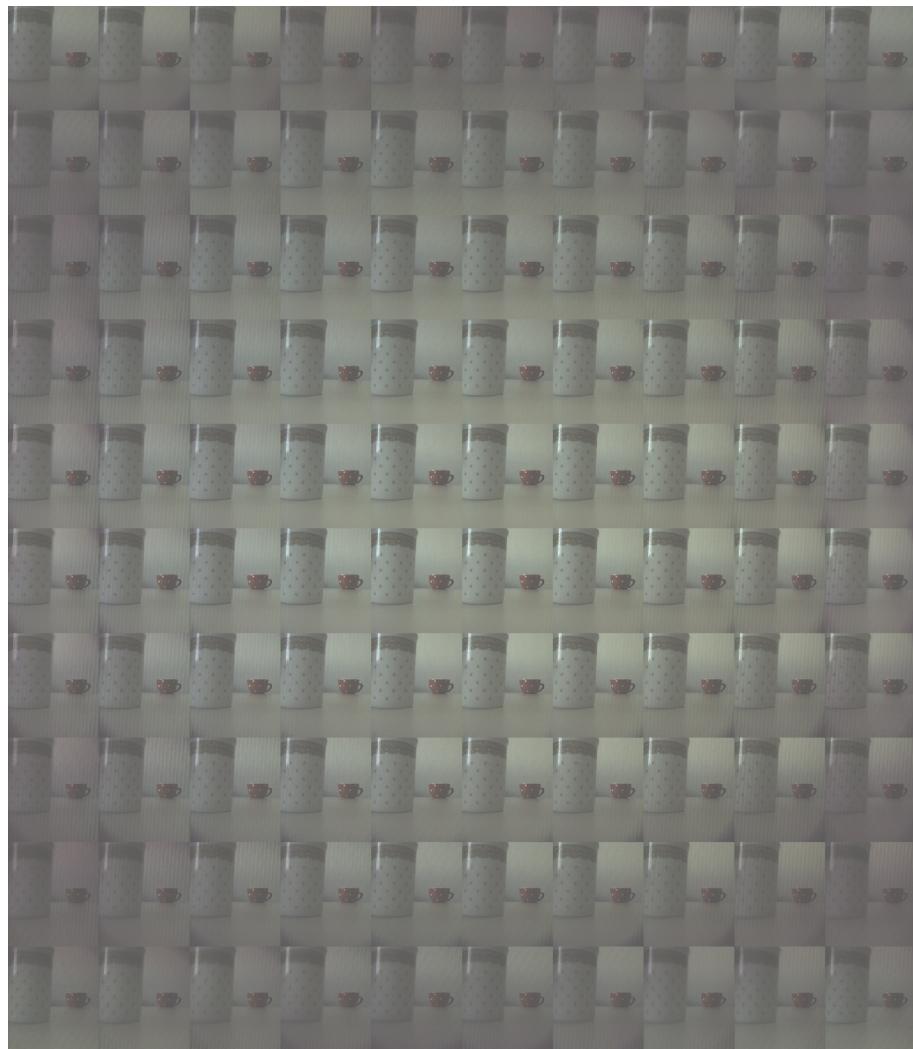


図 3.6: 部分開口画像

3.2 カメラアレイ画像間の関係

図 3.7 に示すように、画角および撮像面の大きさが同じ二つのピンホールカメラを、同じ方向に光軸が平行になるように配置し任意の一点を見たとき、以下の関係が成立する。

$$\tan \theta = \frac{x}{f} \quad (3.2)$$

$$\tan \theta = \frac{d}{l} \quad (3.3)$$

$$\frac{x}{f} = \frac{d}{l} \quad (3.4)$$

このとき、 l は任意の点までの距離、 f はカメラの撮像面までの距離、 x は撮像面に映った点と光軸との距離、 θ は光軸と任意の点の角度、 d はカメラ間距離である。

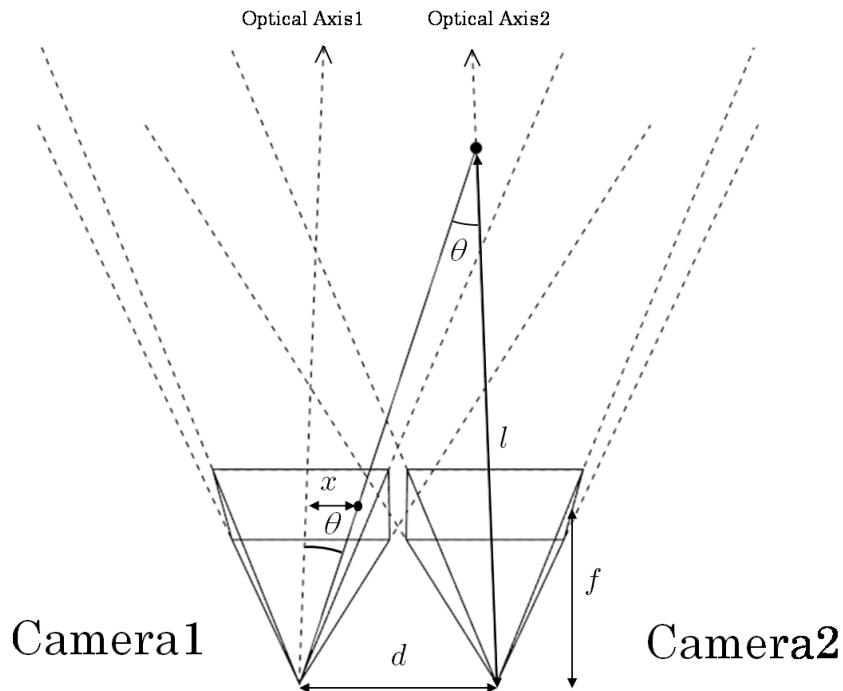


図 3.7: カメラと空間中の点の位置関係

図 3.8 に示すように、カメラから取得する画像のピクセル幅を w とし、 x の点での中心からのピクセル幅を u とし、カメラの画角を φ とすると、それぞれの関係は以下のようになる。

$$\frac{u}{w} = \frac{x}{f \tan \frac{\varphi}{2}} \quad (3.5)$$

$$u = \frac{wd}{2l \tan \frac{\varphi}{2}} \quad (3.6)$$

つまり、カメラの画角が φ のとき、カメラから距離 l に存在する点は左のカメラでは中心から u ピクセル右に映ることになる。

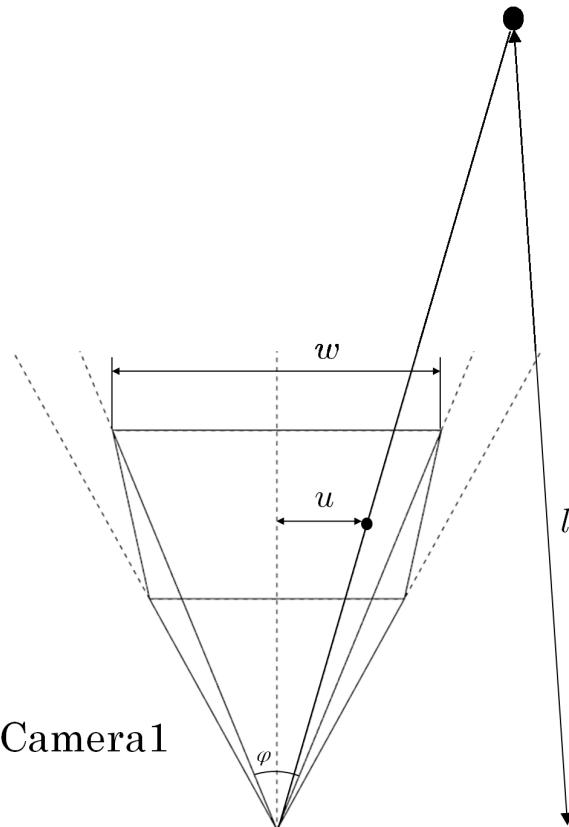


図 3.8: カメラの画角とピクセル幅

3.3 カメラアレイ画像によるリフォーカス

ライトフィールドカメラは、図 3.3 に示すように、メインレンズと撮像素子の間にレンズアレイが配置されているカメラである。このレンズアレイと撮像素子は複数のピンホールカメラによるカメラアレイと等価であり、ライトフィールドカメラを用いることで多数のカメラアレイにより撮影した画像と同様の画像を得ることが可能となる。以下に、三つのカメラアレイにより対象物体を撮影した場合を例に、リフォーカスの原理について説明する。

図 3.9 に示すように球体の対象物 A、B を三つのカメラによって撮影する事を考えるとき、それぞれのカメラから取得できる画像は図 3.10 に示すようになる。例えば、得られた図 3.10(a) の画像は図 3.9 に示す矢印の方向といったように、それぞれのカメラの位置に対応する方向に得られた画像を平行移動させて加算することで、任意の距離にピントがあった画像を作ることが可能である(図 3.11)。移動距離が 0 の時、無限遠にピントが合った画像となり、移動距離が大きくなるに連れて対象物 B にピントが合った画像、対象物 A にピントが合った画像というように、遠くから手前側にピントが合った画像となる。カメラアレイの横と縦の数をそれぞれ x_{ca} 、 y_{ca} とし、一つのカメラアレイの横と縦の画素数をそれぞれ w_{ca} 、 h_{ca} とするとき、カメラアレイ画像 $G(x, y)$ から、リフォーカス画像群 $I(x, y, z)$ への変換は以下の式により行う。今回は、 $x_{\text{ca}} = y_{\text{ca}} = 10$ 、 $w_{\text{ca}} = h_{\text{ca}} = 380$ としている。 $\langle \rangle$ は平均値を返す関数である。

$$\begin{aligned}
 I(x, y, z) &= \langle G(w_{\text{ca}}u + x + \lfloor x_{\text{mv}}(z) \rfloor, h_{\text{ca}}v + y + \lfloor y_{\text{mv}}(z) \rfloor) \rangle \\
 u &= 0, 1, \dots, x_{\text{ca}} - 1, v = 0, 1, \dots, y_{\text{ca}} - 1 \\
 x_{\text{mv}}(z) &= \frac{wd}{2z \tan \frac{\varphi}{2}} \frac{u - \frac{x_{\text{ca}}}{2}}{\frac{x_{\text{ca}}}{2}} \\
 y_{\text{mv}}(z) &= \frac{wd}{2z \tan \frac{\varphi}{2}} \frac{v - \frac{y_{\text{ca}}}{2}}{\frac{y_{\text{ca}}}{2}}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

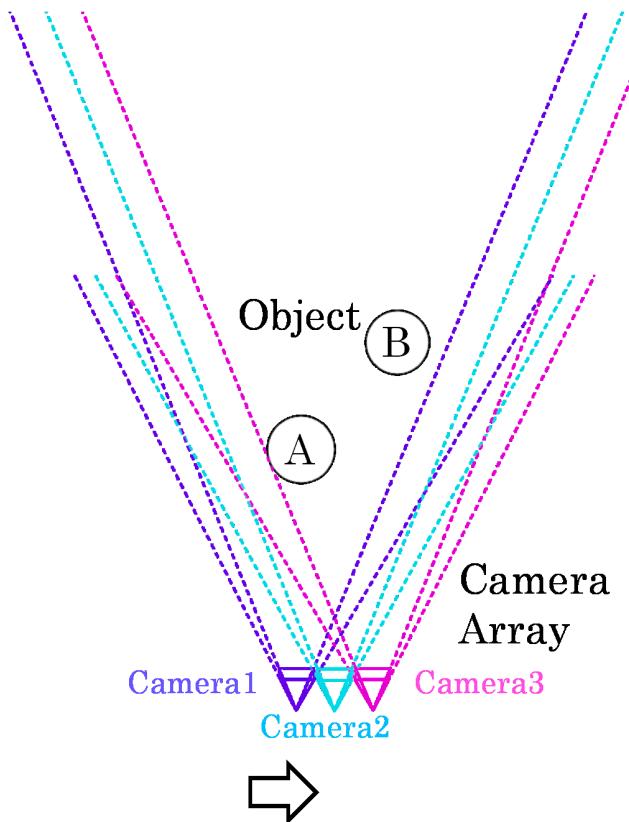
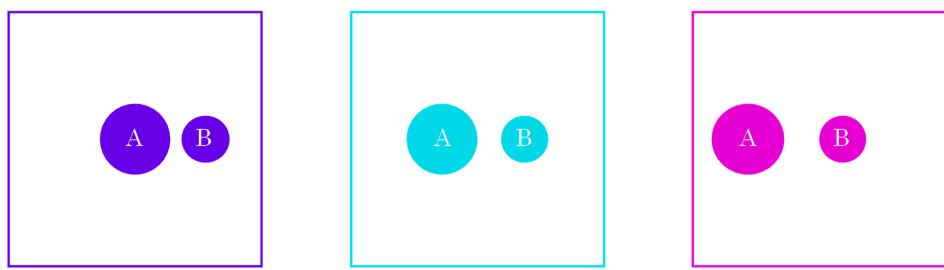


図 3.9: カメラアレイ



(a) カメラ 1 の映像 (b) カメラ 2 の映像 (c) カメラ 3 の映像

図 3.10: カメラアレイにより得られる画像

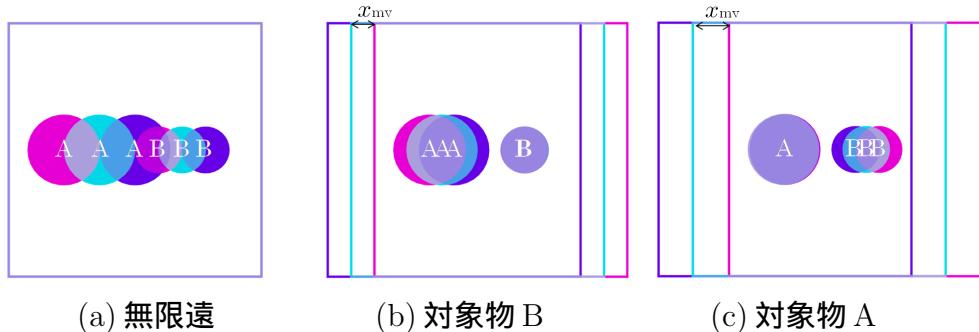


図 3.11: ピントを合わせた場合

第4章 空間濃度分布計測手法

本研究では、任意の距離にピントを合わせた画像を生成可能であるライトフィールドカメラを用いて、煙、霧、炎などの煙霧体の三次元の空間濃度分布を計測することを目的とする。以下に提案手法を示す。

4.1 本研究における濃度

本研究では、図 4.1 に示すように、煙霧体に外部光源からの光が当たることによる散乱光をライトフィールドカメラによって撮影して濃度分布を計測する。このときの濃度とは、微小体積あたり（1 ボクセル）に存在する煙霧体を構成している粒子数のことである。また、この際、ボクセルに到達する光の光源は図 4.2 に示すように平行光源であり、光源からの光は減衰せずボクセルに到達するとする。また、ボクセルに到達した光源からの光は等方散乱すると考える。このときこの散乱光は、図 4.3 に示すように、この光量は濃度に比例すると仮定する。図 4.3 は、濃度の濃さをボクセルの色で示している。また、図 4.4 に示すように、ボクセルで散乱した散乱光は、減衰せずにカメラに到達する。また、この際にボクセル間での光の相互反射を起こさないものとして本研究では濃度分布計測を行う。

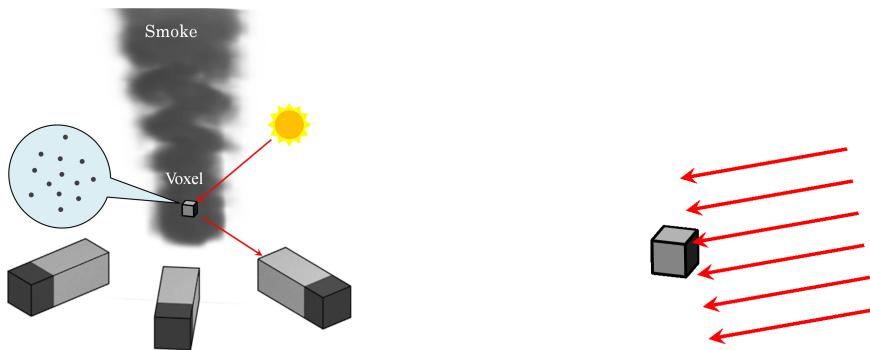


図 4.1: 計測する濃度

図 4.2: ボクセルへ到達する光

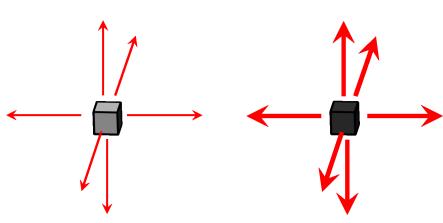


図 4.3: 濃度の違いによる散乱光の強度

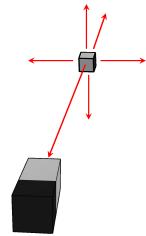


図 4.4: ボクセルからカメラへの光線

4.2 システム概要

図 4.5 に提案するシステムのアルゴリズムの概要を示す。まず、図 4.6 に示すように、複数台のライトフィールドカメラにより煙霧が存在する空間を撮影し、得られた画像から各ライトフィールドカメラごとにリフォーカス画像群を作成する。次に、リフォーカス画像を、その距離に対応する位置の濃度分布として、各ライトフィールドカメラごとに濃度分布の投影を行う。その後、各ライトフィールドカメラで投影した濃度分布の最小値をその位置での濃度として初期濃度値を決定する。リフォーカス画像は、対象物が半透明な場合には、ピント面の濃度分布の影響は大きく、それ以外の濃度分布の影響は小さく現れる画像となる。従って、リフォーカス画像を、その距離に対応する位置の濃度分布とした場合、ピント面以外の距離の濃度分布も含まれている濃度分布となる。そのため、濃度分布の広がりのモデルを仮定し、濃度分布の最適化を行うことで濃度分布の広がりを除去する。これにより、煙霧体の三次元の濃度分布を計測する。

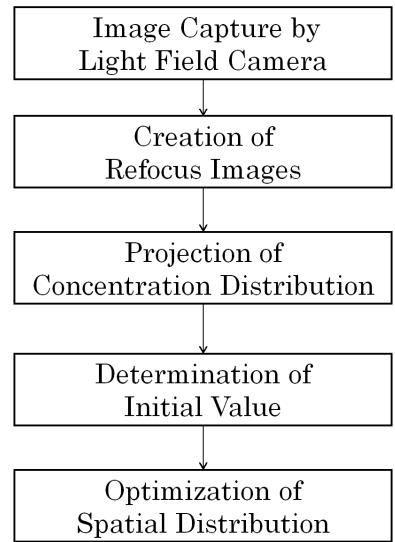


図 4.5: 提案手法

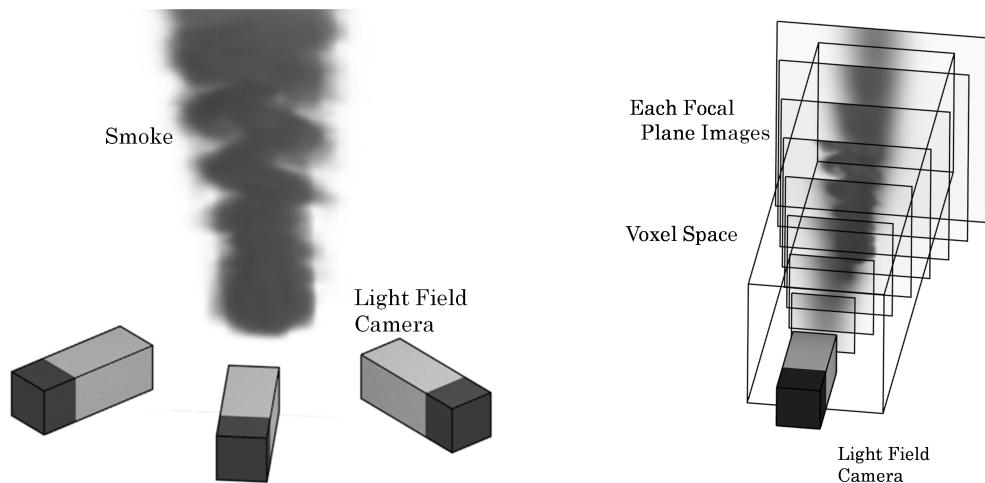


図 4.7: リフォーカス画像の投影

4.3 濃度分布の投影

はじめに投影する空間に濃度値を記録するためのボクセルを用意する。各リフォーカス画像は、ピント面の濃度分布の影響を最も受けている画像であるので、図4.7に示すように一台のライトフィールドカメラによるリフォーカス画像をその焦点距離の位置に投影し、各ピクセルの値を、その位置に対応するボクセルに代入する。このとき、投影される各リフォーカス画像は、式(4.1)に示すように、ピント面のカメラからの距離 l に比例して拡大縮小して投影する。 κ は任意の係数である。これをすべてのボクセルに対して行うことで濃度分布をボクセル空間に投影する。

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \frac{l}{\kappa} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

4.4 初期濃度分布の決定

すべてのライトフィールドカメラによるリフォーカス画像をボクセル空間に投影して初期濃度分布を決定する。各リフォーカス画像は、ピント面の濃度分布の影響を最も受けている一方で、カメラに対してその前後の濃度分布の影響も受けている画像である。つまり、各リフォーカス画像は、ピント面での濃度分布に前後の濃度分布を加えた画像であるため、ピント面での真の濃度分布は、各リフォーカス画像の輝度値より必ず小さくなる。従って、ライトフィールドカメラ j による任意の奥行きでのリフォーカス画像を存在範囲内に投影した時の輝度値を $I_j(x, y, z)$ とするとき、濃度値 $D_{\text{init}}(x, y, z)$ は式(4.2)で求められる。この処理を存在範囲内のすべてのボクセルに対して行うことで、初期濃度分布を決定する。式(4.2)の \min は $\{ \}$ 内の最小値を返す関数である。

$$D_{\text{init}}(x, y, z) = \min\{I_j(x, y, z)\}, j = 1, 2, \dots, m \quad (4.2)$$

4.5 繰り返し演算による濃度分布の更新

図 4.8 に、これまで求めた初期濃度分布から繰り返し演算により濃度分布の更新を行う概念図を示す。観測値から投影される濃度分布は、真の濃度分布をライトフィールドカメラにより観測することで得られる。つまり、観測値から投影される濃度分布は、真の濃度分布に関数 $P(x, y, z)$ を作用させることで得られることになる。一方、推定値から投影される濃度分布は、推定した濃度分布に関数 $P(x, y, z)$ を作用させたものである。推定値から投影される濃度分布と観測値から投影される濃度分布が等しいとき、推定した濃度分布は真の濃度分布となる。従って、推定値から投影される濃度分布と観測値から投影される濃度分布を比較し、推定した濃度分布を更新することで、真の濃度分布を推定する。

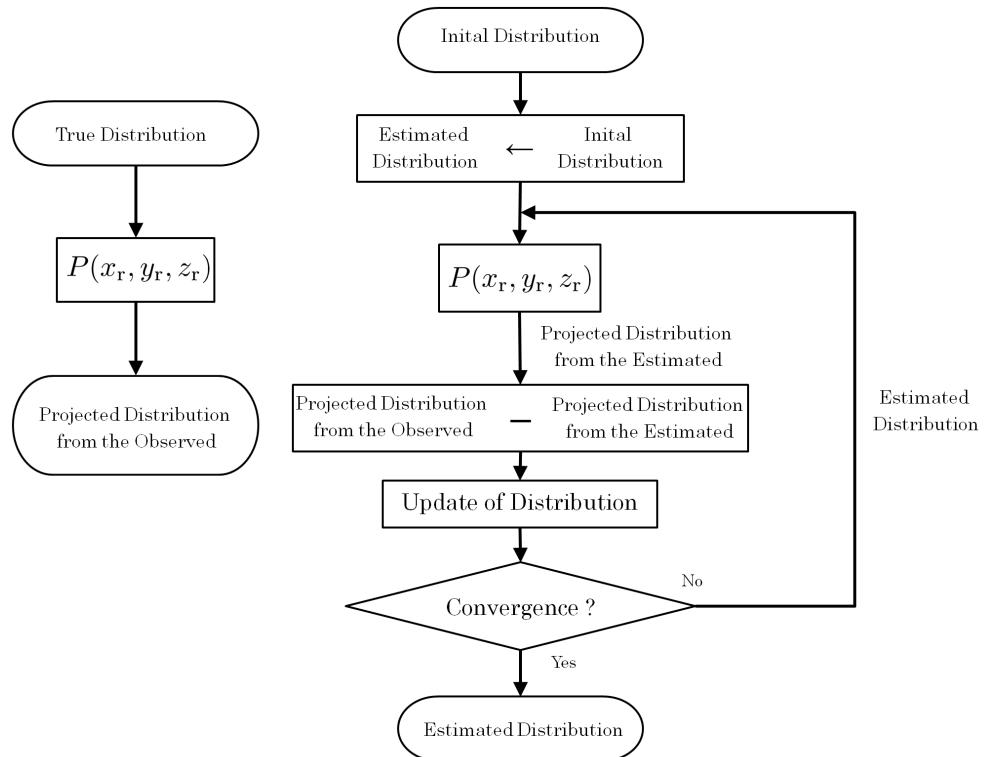


図 4.8: 濃度分布の更新

4.5.1 濃度分布の広がりのモデル化

繰り返し演算による濃度分布の更新を行うため、リフォーカス画像群での濃度分布の広がりのモデル化を行う。図 4.9 に示すように、点 Q からの光線はレンズの開口部を通り、撮像素子の一点ではなくボケ幅 b の間に等間隔に到達する。薄凸ズームレンズモデル [32] を用いるとこのボケ幅 b は式 (4.3) の様に表わすことが出来る。また、到達する光線の光量は位置によらず一定であり、ボケ幅内の光線の光量の合計はボケ幅によらず一定である。また、光線は開口を通るため、ボケの形状は開口の形状に依存する。このボケ幅 b は焦点面でのボケ幅 β と等価であり、またボケ幅 β は式 (4.4) の様に表わすことが出来る。図 4.10 に示すように、リフォーカス画像群を並べた座標系 (x_r, y_r, z_r) を考える。このとき、実空間での座標系 (x, y, z) との関係は式 (4.5) ~ (4.7) で示すようになる。このリフォーカス画像群を並べた座標系 (x_r, y_r, z_r) では、点 Q から焦点面までの距離 m_r は式 (4.8) の様に表わすことができ、ボケ幅 β_r は式 (4.9) に示すように距離 m_r に比例することになる。これらのことから、 $d/z_{r0} = 2$ とすることでライトフィールドカメラによる濃度分布の広がりを式 (4.10) に示す関数で表現することが可能となる。分布の広がりを図 4.11 に示す。

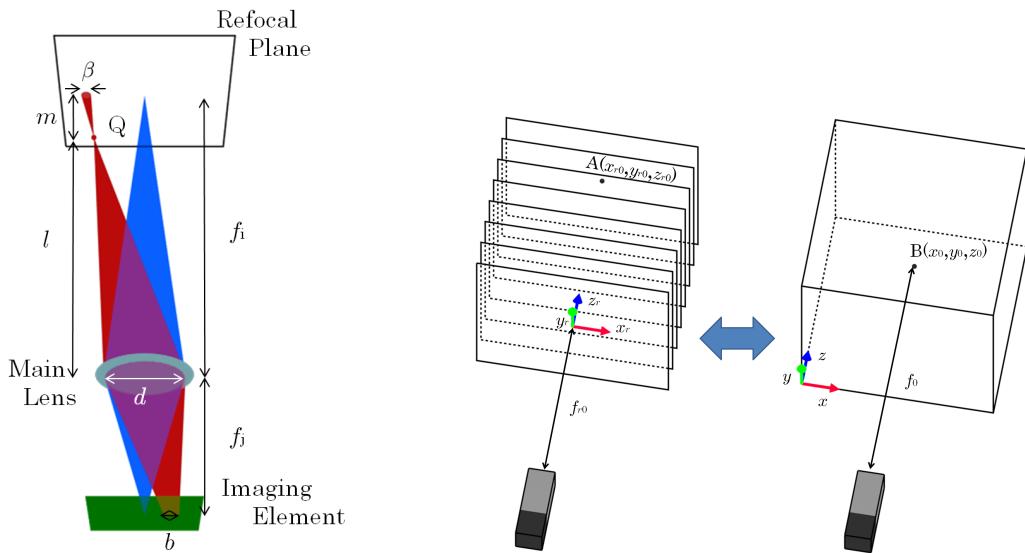


図 4.9: ボケ幅とレンズの距離と
の関係

図 4.10: 座標変換

$$b = f_j d \left| \frac{1}{f_i} - \frac{1}{l} \right| \quad (4.3)$$

$$\beta = \frac{m}{l} d \quad (4.4)$$

$$x_r = \frac{f_{r0}}{z - z_0 + f_0} (x - x_0) \quad (4.5)$$

$$y_r = \frac{f_{r0}}{z - z_0 + f_0} (y - y_0) \quad (4.6)$$

$$z_r = z_{r0} \left(1 - \frac{f_{r0}}{z - z_0 + f_0} \right) \quad (4.7)$$

$$m_r = z_{r0} \left(\frac{f_{r0}}{l - z_0 + f_0} - \frac{f_{r0}}{l + m - z_0 + f_0} \right) \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \beta_r &= \frac{f_{r0} m}{(l + m - z_0 + f_0)(l - z_0 + f_0)} d \\ &= \frac{d}{z_{r0}} m_r \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$P(x_r, y_r, z_r) = \begin{cases} \frac{1}{4z_r^2} & (|x_r| \leq |z_r|, |y_r| \leq |z_r|) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.10)$$

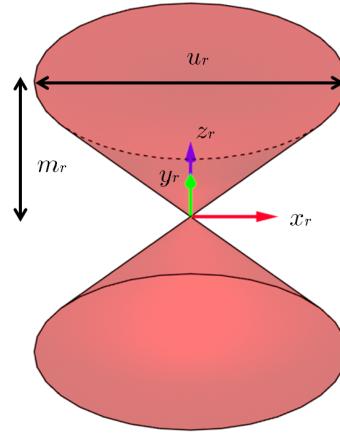


図 4.11: 濃度分布の広がりの範囲

4.5.2 濃度分布の更新

まず、濃度分布の広がりを任意の関数 $P(x_r, y_r, z_r)$ の畳み込みで表現するため、式 (4.11) に示すように、 $D_{\text{ref}}(x, y, z)$ を $D_{\text{ref}}(x_r, y_r, z_r)$ に写像する。投影された濃度分布 $D_{\text{ref}}(x_r, y_r, z_r)$ は、式 (4.12) に示すように、本来の濃度分布 $D_{\text{true}}(x_r, y_r, z_r)$ に濃度分布の広がりの関数 $P(x_r, y_r, z_r)$ を畳み込み積分したものである。濃度分布の更新の概念図を図 4.12 に示す。仮の濃度分布 $D_{\text{est}}(x_r, y_r, z_r)$ を式 (4.13) に示すように関数 $P(x_r, y_r, z_r)$ で畳み込み積分した濃度分布 $D_{\text{blur}}(x_r, y_r, z_r)$ が投影された濃度分布 $D_{\text{ref}}(x_r, y_r, z_r)$ と等しいとき、仮の濃度分布 $D_{\text{est}}(x_r, y_r, z_r)$ は本来の濃度分布 $D_{\text{true}}(x_r, y_r, z_r)$ と等しくなる。式 (4.14) に示すエネルギー E を最小化することで、 $D_{\text{est}}(x_r, y_r, z_r)$ を最適化する。これを式 (4.15) により $D_{\text{est}}(x_r, y_r, z_r)$ を更新し、式 (4.14) のエネルギー E が任意の値以下になるまで繰り返す。この時の k は任意の係数とし、これまで求めた初期濃度分布 $D_{\text{init}}(x_r, y_r, z_r)$ を $D_{\text{est}}(x_r, y_r, z_r)$ の初期値とする。 $*$ は畳み込みを意味する。

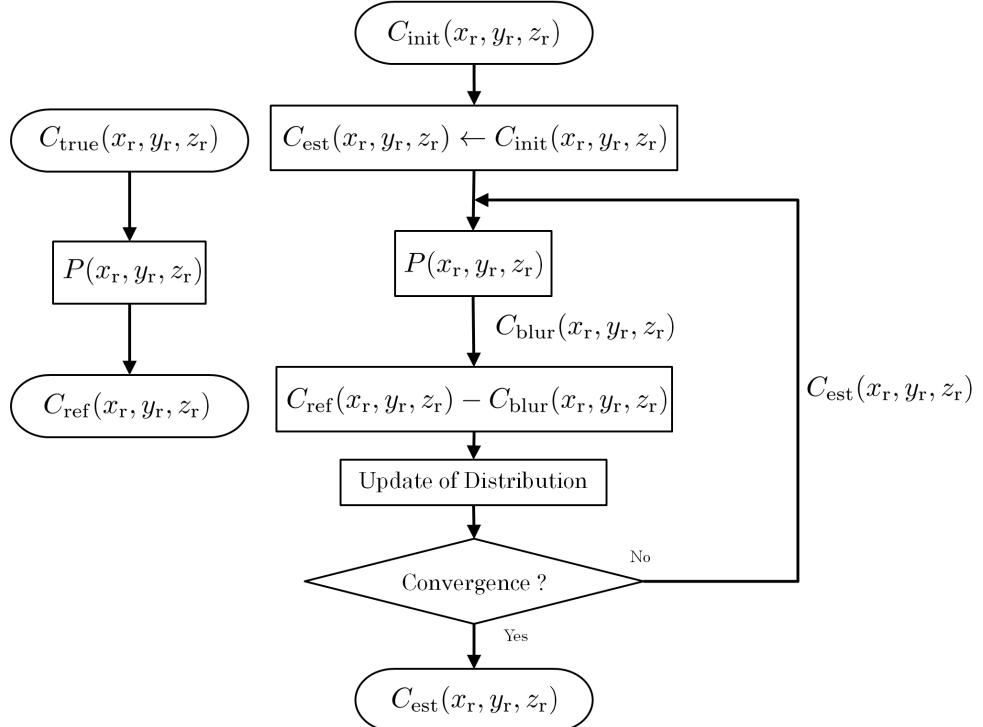


図 4.12: 濃度分布の更新

$$D(x, y, z) \xrightarrow{f} D(x_r, y_r, z_r) \quad (4.11)$$

$$D_{\text{ref}}(x_r, y_r, z_r) = D_{\text{true}}(x_r, y_r, z_r) * P(x_r, y_r, z_r) \quad (4.12)$$

$$D_{\text{blur},n}(x_r, y_r, z_r) = D_{\text{est},n}(x_r, y_r, z_r) * P(x_r, y_r, z_r) \quad (4.13)$$

$$E_n = \sum_{x_r} \sum_{y_r} \sum_{z_r} \{D_{\text{ref}}(x_r, y_r, z_r) - D_{\text{blur},n}(x_r, y_r, z_r)\}^2 \quad (4.14)$$

$$D_{\text{est},n+1}(x_r, y_r, z_r) = D_{\text{est},n}(x_r, y_r, z_r) - k \frac{\partial E_n}{\partial D_{\text{est},n}(x_r, y_r, z_r)} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_n}{\partial D_{\text{est},n}(x_r, y_r, z_r)} &= -2k \sum_{x'_r} \sum_{y'_r} \sum_{z'_r} \left\{ (D_{\text{ref}}(x'_r, y'_r, z'_r) \right. \\ &\quad \left. - D_{\text{blur},n}(x'_r, y'_r, z'_r)) \left(\frac{\partial D_{\text{blur},n}(x'_r, y'_r, z'_r)}{\partial D_{\text{est},n}(x_r, y_r, z_r)} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$D_{\text{ref}}(x_r, y_r, z_r)$: 投影された濃度分布

$D_{\text{true}}(x_r, y_r, z_r)$: 真の濃度分布

$D_{\text{blur}}(x_r, y_r, z_r)$: 求める濃度分布にボケを考慮したもの

$D_{\text{est}}(x_r, y_r, z_r)$: 求める濃度分布

$D_{\text{init}}(x_r, y_r, z_r)$: 初期濃度分布

第5章 濃度分布推定

提案手法は、ライトフィールドカメラを用いて煙、霧、炎などの煙霧体が存在する空間を撮影し、得られたリリフォーカス画像を利用して三次元の濃度分布を推定する。本章では提案手法の有用性を示すため、シミュレーションにより生成した煙霧体の三次元の濃度分布の推定実験を行った結果を示す。

5.1 シミュレーション環境

煙霧体が存在する空間を、ライトフィールドカメラにより撮影した場合の画像をシミュレーションにより作成し、その画像からリリフォーカス画像群を作成し、三次元の濃度分布を推定する。撮影状況は図 5.1 に示すように、煙霧体の周りに、対象から 100 mm 離れて 8 台のライトフィールドカメラが円周上を等角度間隔に配置されている。煙霧体の存在範囲は Stanford Bunny 形状をしており、濃度分布は半径 35 mm と 12.5 mm の二重球状の異なる分布になっている。図 5.2 に真の濃度分布の断面図を示す。

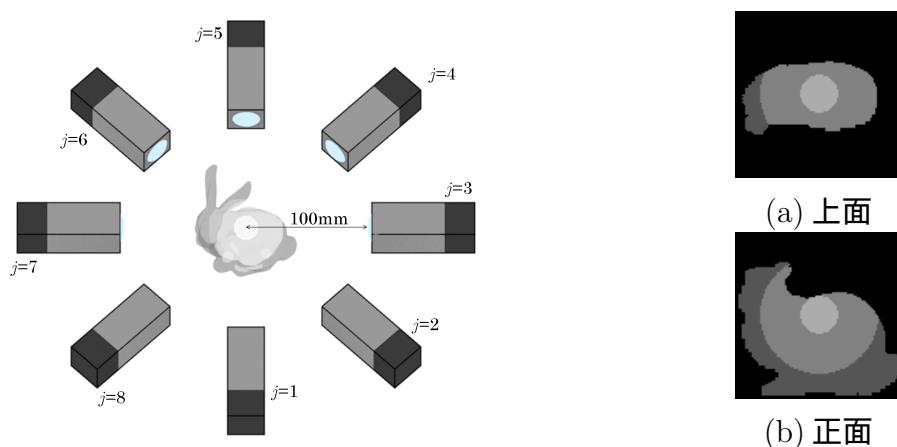


図 5.1: シミュレーション状況

図 5.2: 真の濃度分布の断面

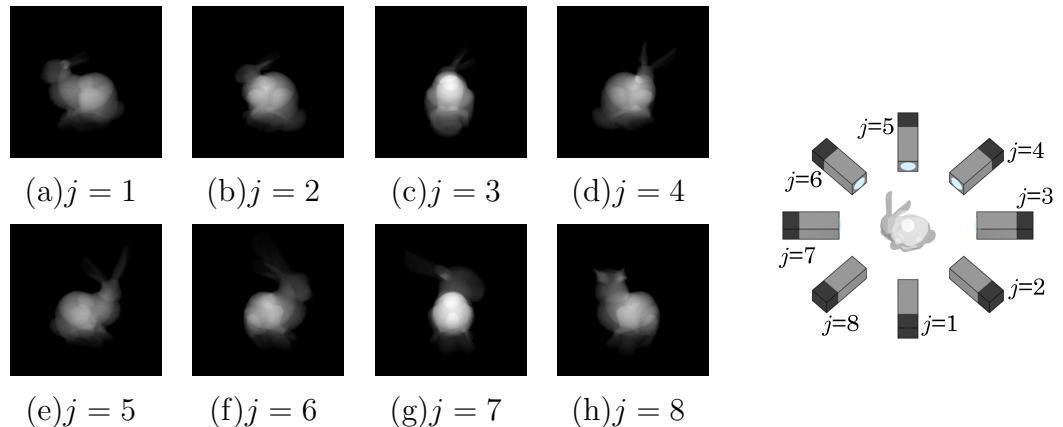


図 5.3: 各ライトフィールドカメラにより取得される画像

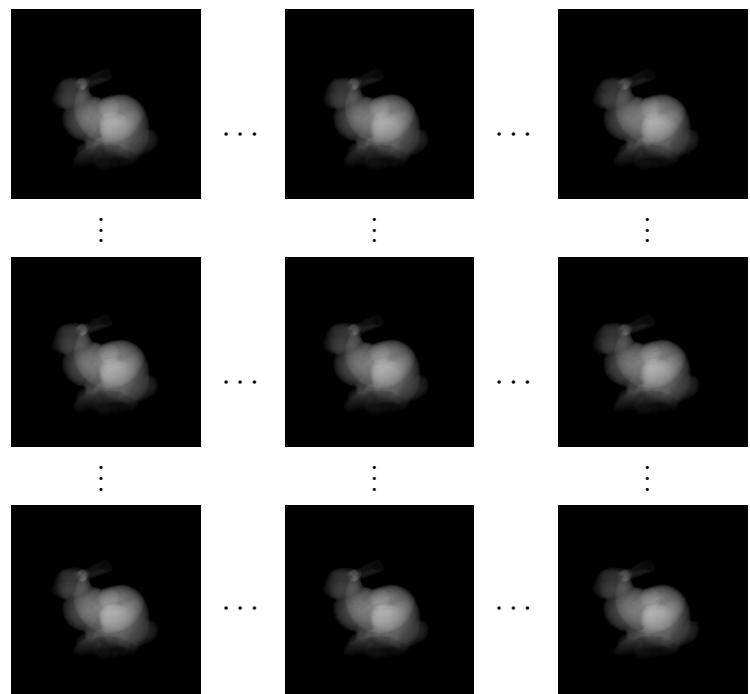


図 5.4: ライトフィールドカメラ $j = 1$ により取得される画像

取得画像は、縦 10 個、横 10 個の計 100 個のカメラがそれぞれ 0.6 mm 間隔で配置されているカメラアレイによる取得画像と同等の画像であり、それぞれの位置に合わせてその一部を並べたものである。シミュレーションにより作成した一台のライトフィールドカメラの取得画像の一部を図 5.4 に示す。また、各ライトフィールドカメラの取得画像の一部を図 5.3 に示す。



(a) 焦点距離 300 mm

(b) 焦点距離 100 mm

(c) 焦点距離 50 mm

図 5.5: リフォーカス画像

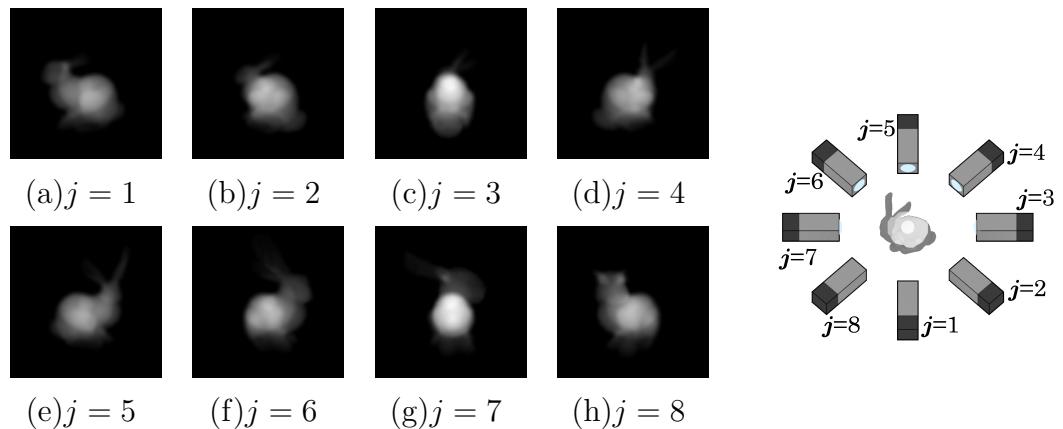


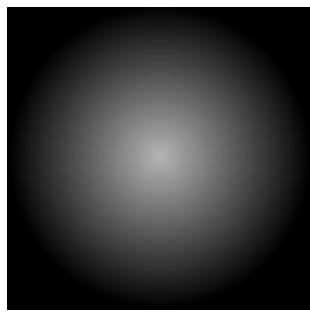
図 5.6: 各ライトフィールドカメラにより作成されるリフォーカス画像
(焦点距離 50 mm)

図 5.5 に、一台のライトフィールドカメラの取得画像より作成したリフォーカス画像の一部を示す。また、図 5.6 に各ライトフィールドカメラによるリフォーカス画像の一部を示す。これらの画像をもとに、三次元の濃度分布を提案手法により推定した。

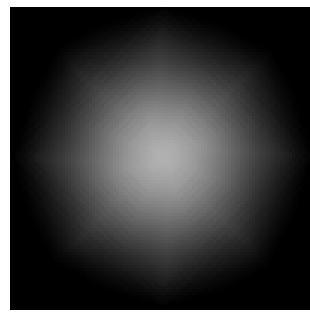
5.2 結果および考察

図 5.7 に示すような、中心からの距離により濃度分布が線形に減少する球形状の対象において濃度分布推定を行った。図 5.7、中央の断面を上から見た濃度分布を (a) に正面から見た濃度分布を (b) に示している。推定した初期濃度分布を図 5.8 に示す。また、初期濃度分布と本来の濃度分布との差を図 5.9 に示す。図 5.9 は、初期濃度分布の値が大きい場合は青で、真値が大きい場合は赤で、等しい場合は白で示している。 $j = 1$ のライトフィールドカメラによる再構成濃度分布を用いて、初期濃度分布より濃度分布の最適化を行った結果を図 5.11 に、図 5.12 に本来の濃度分布との差を示す。この結果から、境界が曖昧な対象においても濃度分布推定可能であることが確認できる。初期濃度分布と推定結果を比較すると、上面から見た断面図では真値との平均誤差は、真値の最大値を 1 とするとき、0.03 から 0.036 になり、正面から見た断面図では 0.029 から 0.019 となった。これは最適化によりライトフィールドカメラに対して上下左右方向の濃度分布が改善され、遠近方向に対しては悪化していることを示している。ライトフィールドカメラにより得られるリフォーカス画像群により最適化を行っており、リフォーカス画像群はカメラの上下左右方向に比べ遠近方向の解像度が低いため、このような結果が得られたと考えられる。

次に、図 5.13 に示すような Stanford Bunny 形状の対象において、濃度分布推定を行った。推定した初期濃度分布を図 5.14 に示す。また、初期濃度分布と本来の濃度分布との差を図 5.15 に示す。図 5.15 は、初期濃度分布の値が大きい場合は青で、真値が大きい場合は赤で、等しい場合は白で示している。 $j = 1$ のライトフィールドカメラによる再構成濃度分布を用いて、初期濃度分布より濃度分布の最適化を行った結果を図 5.17 に、図 5.18 に本来の濃度分布との差を示す。初期濃度分布と推定結果を比較すると、上面から見た断面図では真値との平均誤差は、真値の最大値を 1 とするとき、0.065 から 0.049 になり、正面から見た断面図では 0.11 から 0.074 に減少しているため、濃度分布の最適化によって推定結果がより真値に近づいたことが確認できる。また、初期濃度分布に比べ推定結果は、濃度が一定であるべき場所がより一定となっている事が確認できる。推定結果は、およそその濃度分布が存在する範囲を推定できていることが確認できる。しかし、濃度の存在範囲が凹形状になっている領域も濃度が存在する推定結果となっている。また推定結果は、濃度分



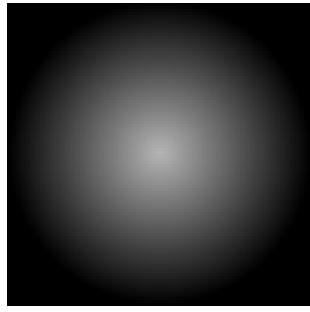
(a) 上面



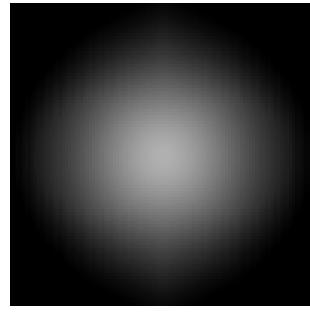
(a) 正面



(a) 上面



(a) 正面



(a) 正面



(a) 正面

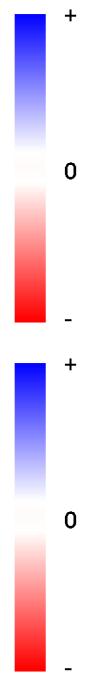
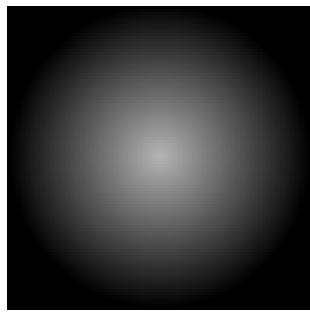


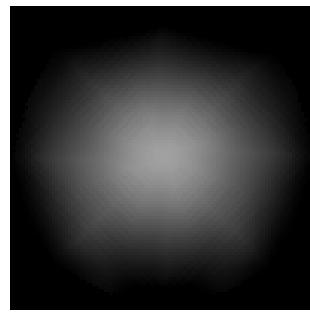
図 5.7: 真の濃度分布 (球
形状)

図 5.8: 初期濃度分布 (球
形状)

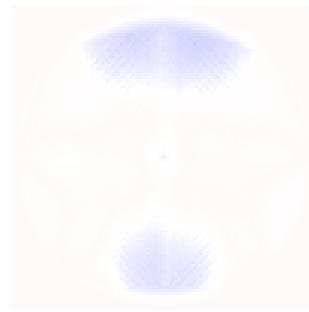
図 5.9: 真値と初期値の差
(球形状)



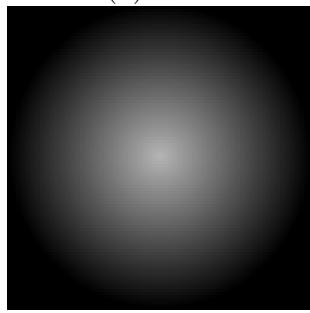
(a) 上面



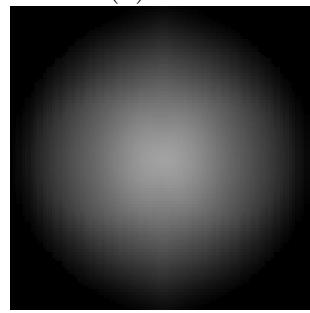
(a) 上面



(a) 上面



(a) 正面



(b) 正面



(b) 正面



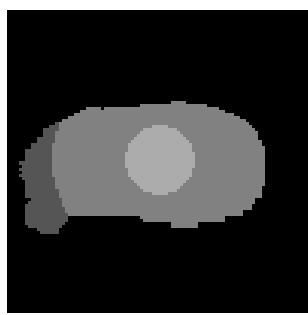
図 5.10: 真の濃度分布 (球
形状)

図 5.11: 濃度分布推定結
果 (球形状)

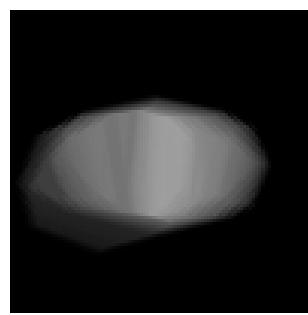
図 5.12: 真値と推定結果
の差 (球形状)

布の外形と二重球の外側の濃度の違いを推定することが出来ていることが確認できる。しかし、二重球の外側と内側の濃度の違いは非常に少なく、濃度分布の変化を十分に推定できていない。これは、濃度分布の最適化に最急降下法を用いているため、局所最適解に収束している事が原因だと考えられる。従って、より最適解に収束する遺伝的アルゴリズムや焼きなまし法を最適化手法に用いることで、より正確に濃度分布を推定することが可能になると考えられる。

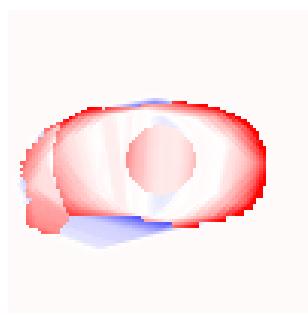
この様な結果から本手法は、濃度分布の存在範囲を決定することができ、煙霧の外側はより正確に濃度分布を推定することが可能であることが分かった。また、境界が曖昧な対象においても濃度分布推定可能であることを確認した。最適化によりライトフィールドカメラに対して上下左右方向の濃度分布の改善が見られた。本手法は、煙霧がカメラに対して対称であるとき、より正確に濃度分布を推定することが可能であると考えられる。また、濃度分布の推定にリフォーカス画像群を用いているため、ライトフィールドカメラに近い方が正確な濃度分布を推定することが可能であると考えられる。



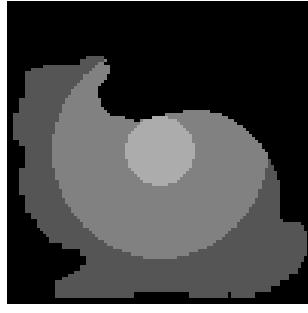
(a) 上面



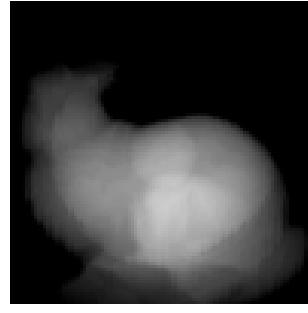
(a) 正面



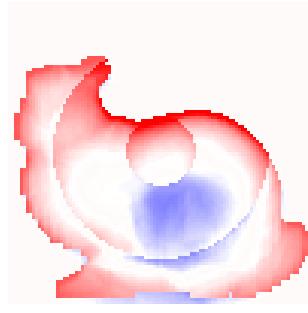
(a) 上面



(a) 正面



(a) 正面

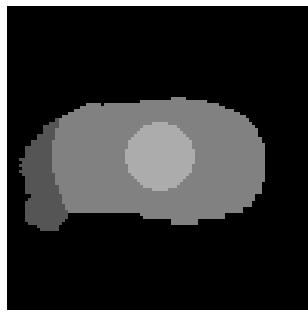


(a) 正面

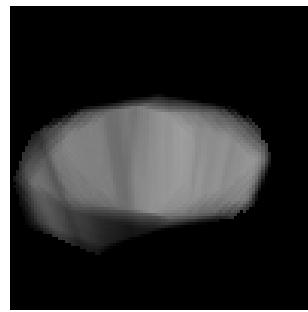
図 5.13: 真の濃度分布
(Stanford Bunny)

図 5.14: 初期濃度分布
(Stanford Bunny)

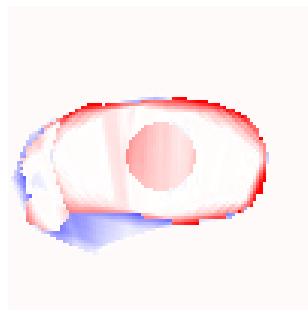
図 5.15: 真値と初期値の
差 (Stanford Bunny)



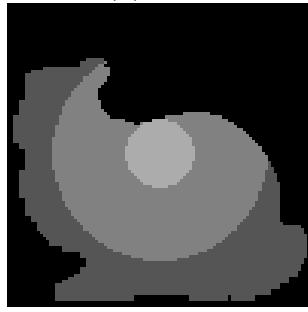
(a) 上面



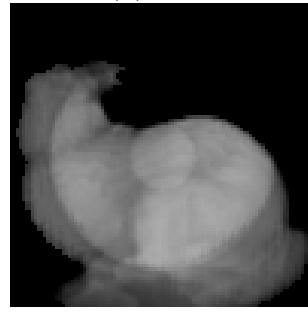
(a) 上面



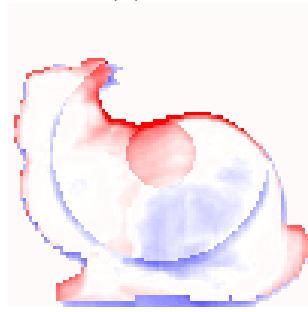
(a) 上面



(a) 正面



(b) 正面



(b) 正面

図 5.16: 真の濃度分布
(Stanford Bunny)

図 5.17: 濃度分布推定結
果 (Stanford Bunny)

図 5.18: 真値と推定結果
の差 (Stanford Bunny)

第6章 おわりに

本研究では、複数台のライトフィールドカメラを用いて煙、霧、炎などの煙霧体が存在する空間を撮影し、得られたリフォーカス画像を利用して三次元の濃度分布を推定する手法を提案した。今回は、煙霧体が存在する空間を8台のライトフィールドカメラで撮影した場合の画像をシミュレーションにより作成し、その画像をもとに三次元の濃度分布の推定を行った。その結果、濃度分布が存在している範囲の推定、および外側の濃度分布は推定することが出きることが確認できた。しかし、内側の濃度分布は十分に推定できていないという結果が得られた。また、境界が曖昧な対象においても濃度分布推定が可能であることが確認できた。

煙、霧、炎などの煙霧体の三次元空間濃度分布を計測する手法は未だに確立されていないため、本システムが実用化されれば煙霧体の三次元空間濃度分布計測の一般的な手法となるだろう。また、本システムが実用化されれば、エンジン噴霧の計測、火事の際の煙および炎の計測、空気の流れの計測などの際に三次元空間濃度分布を計測し可視化することが可能となる。これにより、エンジンの高効率化、火災報知機への応用、空調設備の最適化などが期待される。

謝 辞

本研究は大阪大学 大学院基礎工学研究科で行ったものである。

本研究において、研究の機会を与えて頂くと共に、研究についてご意見、ご指導頂きました大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城理教授に深く感謝致します。本稿の副査を引き受けて頂いた大阪大学 大学院基礎工学研究科 和田成生教授に感謝致します。

研究のご相談に乗って頂いた大阪大学 大学院基礎工学研究科 井村誠孝准教授、またプログラムのご指導をして頂いた大阪大学 サイバーメディアセンター 黒田嘉宏准教授、定期的なミーティング等で研究についてご相談に乗って頂き、本稿の執筆に関してもご指導して頂いた大阪大学 大学院基礎工学研究科 浦西友樹助教、また進路等の相談に乗っていただいた大阪大学 大学院基礎工学研究科 吉元俊輔助教に感謝の意を表します。

お会いする機会は少なかったものの、学会などのイベントの際には気軽に話して頂いた大城研究室の先輩の三宅正夫氏、高畠裕美氏に感謝致します。また、共に励ましあってきた大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城研究室の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] K. Koshikawa. A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects. *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 493–495, 1979.
- [2] M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi, and H. Kashiwagi. 偏光と放物的曲線の解析による透明物体の表面形状計測. *JOSA A*, Vol. 16, No. 9, pp. 2286–2293, 1999.
- [3] 宮崎大輔, 池内克史. 偏光と放物的曲線の解析による透明物体の表面形状計測. 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 44, pp. 86–93, 2003.
- [4] M. B. Hullin, M. Fuchs, I. Ihrke, H. P. Seidel, and H. Lensch. Fluorescent immersion range scanning. *ACM Trans. Graphics*, Vol. 27, No. 3, 2008.
- [5] K. Maeno, H. Nagahara, A. Shimada, and R. I. Taniguchi. Light field distortion feature for transparent object recognition. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on*. IEEE, pp. 2786–2793, 2013.
- [6] Atcheson B., Ihrke I., Heidrich W., Tevs A., Bradley D., Magnor M., and Seidel H. P. Time-resolved 3d capture of non-stationary gas flows. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 27, No. 5, p. 132, 2008.
- [7] Ji Yu, Jinwei Ye, and Jingyi Yu. Reconstructing gas flows using light-path approximation. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on*. IEEE, pp. 2507–2514, 2013.

- [8] 菊本智樹, 川端信義, 丸山大輔, 山田眞久. 乗用車専用小型道路トンネルにおける火災時の煙挙動に関する模型実験. 土木学会論文集 F , Vol. 63, No. 3, pp. 361–373, 2007.
- [9] 張玉銀, 伊藤友昭, 西田恵哉. レーザ吸收・散乱法による直噴ディーゼル噴霧内の蒸気相・液相濃度分布の同時計測. 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol. 2, pp. 473–474, 2001.
- [10] 赤松史光. 噴霧燃焼場の光学計測. 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, Vol. 3, No. 21, 2007.
- [11] R. Ng, M. Levoy, M. Brdif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. *Stanford University Computer Science Tech Report CSTR*, 2005.
- [12] R. Ng. Fourier slice photography. In *ACM Transactions on Graphics*, 2005.
- [13] A. Veeraraghavan, R. Raskr, A. Agrawal, A. Mohana, and J. Tumblin. Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing. *ACM Trans, Graphics*, Vol. 26, No. 3, 2007.
- [14] A. Levin, S. W. Hasinoff, P. Green, F. Durand, and W. T. Freeman. 4d frequency analysis of computational cameras for depth of field extension. *ACM Trans, Graphics*, Vol. 28, No. 3, 2009.
- [15] V. Vaish, B. Wilburn, N. Joshi, and M. Levoy. Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004.
- [16] <http://www.sound-pro.jp/cn6/pg24.html>(参照 2013-12-12).
- [17] <http://www.kanshin.com/keyword/1307264>(参照 2013-12-12).
- [18] 井口征士, 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 東京, 1990.

- [19] 小川新矢, 宇野公裕, 三池秀敏. 両眼映像の干渉処理による rds からの曲面の再構築. 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 97, No. 10, pp. 1–8, 1997.
- [20] A. Yamashita, H. Higuchi, T. Kaneko, and Y. Kawata. Three dimensional measurement of object 's surface in water using the light stripe projection method. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004.
- [21] 川崎洋, 大沢裕, 古川亮, 中村泰明. 空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる密な3次元形状復元. 情報処理学会論文誌, Vol. 47, No. 1, pp. 59–71, 2006.
- [22] J. Salvi, J. Batlle, and E. M. Mouaddib. A robust-coded pattern projection for dynamic 3d scene measurement. *Pattern Recognition*, Vol. 19, No. 11, pp. 1055–1065, 1998.
- [23] B. G. Baumgart. Geometric modeling for computer vision. *PhD dissertation, aIM-249, STAN-CS-74-463, Computer Science Dept.,Stanford Univ.*, 1974.
- [24] C. H. Chien and J. K. Aggarwal. Volume/surface octress for the representation of three-dimensional objects. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 36, No. 1, pp. 100–113, 1986.
- [25] R. Szeliski. Rapid octree construction from image sequences. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 58, No. 1, pp. 23–32, 1993.
- [26] S. Lazebnik, Y. Furukawa, and J. Ponce. Projective visual hulls. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 74, No. 2, pp. 137–165, 2007.
- [27] J. S. Franco and E. Boyer. Efficient polyhedral modeling from silhouettes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 31, No. 3, pp. 414–427, 2009.

- [28] A. Bottino and A. Laurentini. The visual hull of smooth curved objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, No. 12, pp. 1622–1632, 2007.
- [29] 日浦慎作. コンピュータビジョン最先端ガイド 4. アドコム・メディア株式会社, 東京, 2011.
- [30] E. H. Adelson and J. Y. A. Wang. Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 14, No. 2, pp. 99–106, 1992.
- [31] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, Eino-Ville Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy. High performance imaging using large camera arrays. *ACM Trans. Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 765–776, 2005.
- [32] 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, 情報・システム, II-パターン処理, Vol. 85, No. 9, 2002.

業績

- 国内発表

1. 横畠 亮輔, 井手口 裕太, 松崎 成敏, 和田 章宏, 長坂 信吾, “Puppet-Tone”, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会, VRSJ pp.342-343, 2012 年 9 月
2. 井手口 裕太, 浦西 友樹, 黒田 嘉宏, 井村 誠孝, 大城 理, “リフォーカス画像群からの煙の空間濃度分布推定”, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, pp.77-80, 2013 年 1 月
3. 井手口 裕太, 浦西 友樹, 黒田 嘉宏, 井村 誠孝, 大城 理, “ライトフィールドカメラを用いた煙の空間濃度分布推定”, システム制御情報学会研究発表会, iSCIE 57:336-1, 2013 年 5 月
4. 井手口 裕太, 横畠 亮輔, 井村 誠孝, 浦西 友樹, 黒田 嘉宏, 大城 理, “聴覚フィードバックを用いた歌唱時の音程操作”, エンタテインメントコンピューティング研究発表会, 10, 2013 年 5 月
5. 井手口 裕太, 浦西 友樹, 黒田 嘉宏, 井村 誠孝, 大城 理, “視体積とリフォーカス画像群を併用した煙霧の空間濃度分布推定”, 第 16 回画像の認識・理解シンポジウム MIRU2013, SS3-36, 2013 年 7 月
6. 井手口 裕太, 浦西 友樹, 黒田 嘉宏, 井村 誠孝, 大城 理, “リフォーカス画像におけるボケを用いた煙霧の空間濃度分布推定”, パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2013-120, 2014 年 1 月

- その他

1. 井手口 裕太, “シルエットとリフォーカス画像による煙霧の空間分布推定”, 生体工学領域交流会, 2013 年 6 月
2. 井手口 裕太, “ライトフィールドからの煙霧の空間濃度推定”, ジョイント研究会, 2013 年 11 月