



Title	Light Field ボリューム再構成
Author(s)	井手口, 裕太
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61810
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Light Field ボリューム再構成

平成 29 年 3 月

井手口 裕太

Light Field ボリューム再構成

博士（工学）論文提出先
大阪大学大学院基礎工学研究科

平成29年3月

井手口 裕太

Light Field ボリューム再構成

井手口 裕太

内容梗概

三次元形状計測を行う方法には様々な手法があり、多くの手法は非接触で計測するためにカメラが用いられており、これらの手法は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。これらの手法を用いた場合に、三次元計測が困難な対象として煙、霧などの煙霧体やガラスなどの透明物体がある。

本論文では、煙、霧などの煙霧体の三次元空間濃度分布および透明物体の形状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推定手法について述べる。煙霧体の濃度分布推定では、繰り返し計算により三次元濃度分布を推定する。まず、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群により初期濃度分布を決定する。つぎに、初期濃度分布は空間的ボケの影響を含んでいるため、繰り返し計算による最適化に基づいて空間的ボケを除去することで、三次元空間濃度分布を推定する。透明物体の形状推定では、まず、透明物体をライトフィールドカメラにより撮影し、得られたアレイ画像から透明物体の辺縁の形状を推定することで初期値を求める。つぎに、辺縁以外の形状を繰り返し計算により更新することで形状を推定する。シミュレーションおよび実測実験により、煙霧体の三次元空間濃度分布を推定できることおよびボケモデルを実際のボケに基づいて改善することで、推定結果が向上することを確認した。シミュレーションおよび実測実験により、透明物体の辺縁の形状および面の法線方向を推定できることおよび推定形状の最適化により精度が向上することを確認した。

キーワード

Light Field、透明物体、煙霧体、リフォーカス画像、三次元推定、コンピュータビジョン、光学的恒常性

Light Field Volume Reconstruction

Yuta Ideguchi

Abstract

Three-dimensional shape measurement methods using a camera are categorized into a passive measurement method such as a shape from silhouette and a passive stereo vision, and an active measurement method such as a time of flight and an active stereo vision. However, it is difficult to measure spatial density of a cloud-like object and a shape of a transparent object with the conventional methods.

The author is aiming at measuring spatial density of a cloud-like object and the shape of a transparent object. This thesis describes a method using a light field camera that can generate the image with an arbitrary focal point. In the spatial density estimation, initial spatial density is estimated from obtained refocus images with multiple light field cameras. Then, spatial density is updated by iterative calculation. In the shape estimation of transparent objects, the shape of edge of a transparent object is estimated from obtained array images. The shape other than edge is estimated from the estimated shape of edges. By simulation and actual measurement, it was confirmed that it is possible to estimate the spatial density of the cloud-like object and the estimation error was decreased by improving a blur model based on actual measurement. By simulation and actual measurement, it was confirmed that it is possible to estimate shape of the transparent object and accuracy is improved by updating.

Keywords:

Light Field, Transparent Object, Smoke, Refocus Image, 3D Estimation, Computer Vision, Photometric Consistency

目次

1	はじめに	1
2	光学センサと推定対象	9
2.1	カメラ	9
2.2	光学的恒常性を有しない対象	14
3	三次元計測と計算手法	23
3.1	三次元計測手法	23
3.2	計算手法	32
4	ライトフィールドカメラによる画像	35
4.1	Light Field とカメラ	35
4.2	ライトフィールドカメラによる取得画像	37
4.3	カメラアレイ画像間の関係	41
4.4	カメラアレイ画像によるリフォーカス	43
5	空間濃度分布推定手法	45
5.1	煙霧体の光学的モデル	45
5.2	提案手法の概要	47
5.3	濃度分布の投影	48
5.4	初期濃度分布の決定	49
5.5	繰り返し演算による濃度分布の更新	49
6	空間濃度分布推定実験	55
6.1	濃度分布推定	55
6.2	ボケモデルの改善	70
7	透明物体形状推定手法	81
7.1	透明物体の光学的モデル	81

目 次

7.2	提案手法の概要	83
7.3	光線収束性	85
7.4	初期視差の推定	86
7.5	辺縁における面の法線方向推定	88
7.6	視差の更新	91
7.7	距離の計算	92
8	透明物体形状推定実験	93
8.1	形状推定シミュレーション実験	93
8.2	形状推定実測実験	102
9	おわりに	109
	謝辞	111
	参考文献	113
	研究業績	121

図 目 次

1.1	光の観測	1
1.2	Light Field	2
1.3	光学的恒常性	3
1.4	物体の一点を見たとき	5
1.5	透明物体を見たとき	5
1.6	煙霧体を見たとき	5
1.7	トンボの目 [1]	6
1.8	多視点観測	6
1.9	従来手法の比較	7
2.1	ピンホールカメラ	10
2.2	ピンホールカメラにより得られる画像	10
2.3	単レンズカメラ	11
2.4	カメラにより得られる画像	12
2.5	多数のカメラにより構成されるカメラアレイ	12
2.6	ライトフィールドカメラの構造	13
2.7	ライトフィールドカメラにより得られる画像	13
2.8	マイクロレンズを通る光線	13
2.9	煙霧体の例	14
2.10	煙や霧内での光の散乱	15
2.11	炎の発光	15
2.12	濃度分布計測	16
2.13	シート状のレーザ光による濃度分布計測	16
2.14	透明物体の例	17
2.15	透明物体での光の屈折	18
2.16	蛍光発光を利用した透明物体形状計測	18
2.17	偏光を利用した透明物体形状計測	19

図目次

2.18	Light Field を用いた透明物体形状計測	20
2.19	推定対象の観測	21
3.1	TOF 法の撮影環境	24
3.2	TOF 法の光の飛行時間	24
3.3	位相差 TOF 法	24
3.4	三角法の概要	25
3.5	パッシブステレオ法の概要	26
3.6	各点の対応付け	26
3.7	アクティブステレオ法の概要	27
3.8	スリットの投影	27
3.9	対象とカメラの位置関係	28
3.10	シルエット画像の取得	28
3.11	SCM の概要	29
3.12	VIM の概要	30
3.13	対象に入射する光	32
4.1	光線の記録	36
4.2	ライトフィールドカメラによるリフォーカス	37
4.3	ライトフィールドカメラ (Lytro)	38
4.4	ライトフィールドカメラの構造	38
4.5	マイクロレンズを通る光	38
4.6	ライトフィールドカメラによる取得画像	39
4.7	部分開口を通る光	40
4.8	部分開口画像	40
4.9	取得画像と部分開口画像の変換	41
4.10	取得画像と部分開口画像の変換例	41
4.11	カメラと空間中の点の位置関係	42
4.12	カメラアレイ	44
4.13	カメラアレイにより得られる画像	44
4.14	ピントを合わせた場合	44
5.1	煙を通過する光	46
5.2	提案手法のアルゴリズム	47

5.3	提案手法の概要	47
5.4	リフォーカス画像の投影	48
5.5	観測される Light Field	50
5.6	濃度分布の更新アルゴリズムの概要	50
5.7	濃度分布の更新	50
5.8	ボケ幅とレンズとの距離	51
5.9	座標変換	52
5.10	ボケの広がり範囲	52
5.11	濃度分布の更新アルゴリズム	53
5.12	濃度分布の更新による変化	54
6.1	シミュレーション実験環境	56
6.2	推定対象：球状	58
6.3	推定結果：球状	59
6.4	D_{est} のレンダリング結果：球状	59
6.5	$y = z = 0$ における推定結果：球状	60
6.6	球状の分布一致度	60
6.7	推定対象：Bunny 状	61
6.8	推定結果：Bunny 状	61
6.9	D_{est} のレンダリング結果：Bunny 状	62
6.10	$y = z = 0$ における推定結果：Bunny 状	62
6.11	Bunny 状の分布一致度	62
6.12	推定対象：立方体状	63
6.13	推定結果：立方体状	63
6.14	D_{est} のレンダリング結果：立方体状	64
6.15	$y = z = 0$ における推定結果：立方体状	64
6.16	立方体状の分布一致度	64
6.17	実験環境	67
6.18	リフォーカス画像	67
6.19	レンダリング結果	68
6.20	リフォーカス画像とぼかした画像	72
6.21	ボケとフーリエ変換	73
6.22	求めたフィルタ画像	73

図目次

6.23 フェーズ関数	74
6.24 煙のレンダリング結果	76
6.25 カラーマップによるレンダリング画像	77
6.26 各領域内のヒストグラムより得られた相関図	77
6.27 相関図のヒストグラム	78
7.1 透明物体での光の屈折	82
7.2 辺縁付近での光の屈折	83
7.3 提案手法の撮影環境	84
7.4 提案手法のアルゴリズム	84
7.5 取得されるカメラアレイ画像	85
7.6 透明物体を通過する光線	87
7.7 カメラアレイ画像での視差	87
7.8 視線の移動	88
7.9 点 A における光線収束性マップ	89
7.10 視差の回転	89
7.11 光線収束性マップの θ_s 依存性	90
7.12 光線収束性マップへの屈折の影響	91
7.13 取得されるカメラアレイ画像	92
8.1 実験状況	94
8.2 推定対象	95
8.3 球状の透明物体のカメラアレイ画像の一部	96
8.4 球状の透明物体の推定結果	96
8.5 トーラス状の透明物体のカメラアレイ画像の一部	97
8.6 トーラス状の透明物体の推定結果	97
8.7 円盤状の透明物体のカメラアレイ画像の一部	98
8.8 円盤状の透明物体の推定結果	98
8.9 Bunny 状の透明物体のカメラアレイ画像の一部	99
8.10 Bunny 状の透明物体の推定結果	99
8.11 Dragon 状の透明物体のカメラアレイ画像の一部	100
8.12 Dragon 状の透明物体の推定結果	100
8.13 透明物体計測の実測環境	102

8.14 林檎状の透明物体	103
8.15 龍状の透明物体	103
8.16 虎状の透明物体	103
8.17 林檎状の透明物体のカメラレイ画像の一部	104
8.18 林檎状の透明物体の推定結果	104
8.19 龍状の透明物体のカメラレイ画像の一部	105
8.20 龍状の透明物体の推定結果	105
8.21 虎状の透明物体のカメラレイ画像の一部	106
8.22 虎状の透明物体の推定結果	106
9.1 従来手法と提案手法の比較	110

表 目 次

3.1	単レンズカメラを用いた三次元計測手法の長所と短所	32
6.1	真の濃度分布と推定値との平均誤差	65
6.2	真の濃度分布と推定値との濃度分布の相関	65
6.3	ヒストグラムの相関の平均値	79
8.1	推定結果の平均誤差	94

第1章

はじめに

朝、太陽の光が眩しくて目覚める。空に昇る太陽は世界を明るく照らす光源である。その光は物体の表面で拡散反射し、その光が我々の感覚器の一つである眼に届くことで、我々は図 1.1 のような物体がそこに存在していることを認識できる。太陽光は、様々な波長の光を持っており、我々は光の波長を色として認識する。物体によって、拡散反射した光の強度が波長により異なるため、我々は物体の色の違いを認識できる。時が経ち、夜になると空には月が見える。我々は、光から時を知ることにもできる。また、月は自身が発光しているわけではなく、太陽光が表面で拡散反射することで月を見ることができる。雨の日には、太陽光は雨雲で散乱し、光が弱まるため、部屋は暗くなる。空気中の水分は、太陽光を散乱させる。これを我々は、雲として認識しており、そこに何か塊が存在しているわけではない。雨が上がると、空には色鮮やかな虹が見えることがある。虹は、空気中の水分で散乱する光の波長の強度が見る角度によって異なるため、色鮮やかに見える。しかし、そこにその色の物質が存在するわけではない。光は我々の身の回りに当たり前のように存在し、我々は光から様々な情報を取得している。

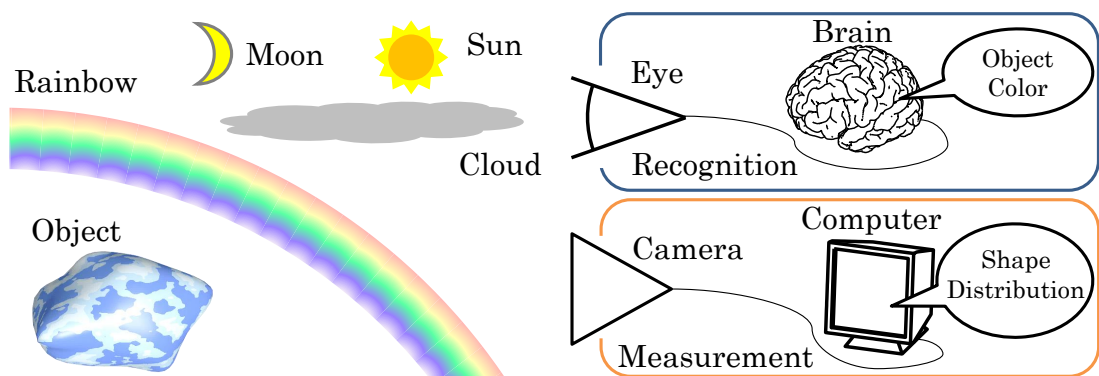


図 1.1 光の観測

第1章 はじめに

我々は撮像装置の一種であるカメラを用いることで、眼で見ているときと同様の原理で光を記録することができる。したがって、カメラにより得られる画像は、我々が普段視覚により得ている情報を持っていることになる。我々は、光から取得した情報を脳で処理することで物体などを認識することができる。一方コンピュータビジョンでは、カメラにより取得した画像を計算機で処理することで、物体の認識や形状の計測を可能としている。図 1.2 に示すように、光源から発せられた光は、直線的に進み、物体に到達すると物体表面で反射、屈折および散乱し、再び直線的に進む。このような、光を光線と呼ぶ。光線は、位置 (x, y, z) を方向 (θ, φ) に通過する光の色 λ と時刻 t の七つのパラメータ $(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ により表現される。この七つのパラメータ $(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ で定義される光線の集合を Light Field と呼ぶ。本稿では、Light Field を幾何学的な成分のみに着目し、位置 (x, y, z) での方向 (θ, φ) の光の強さを表現するものとして扱う。

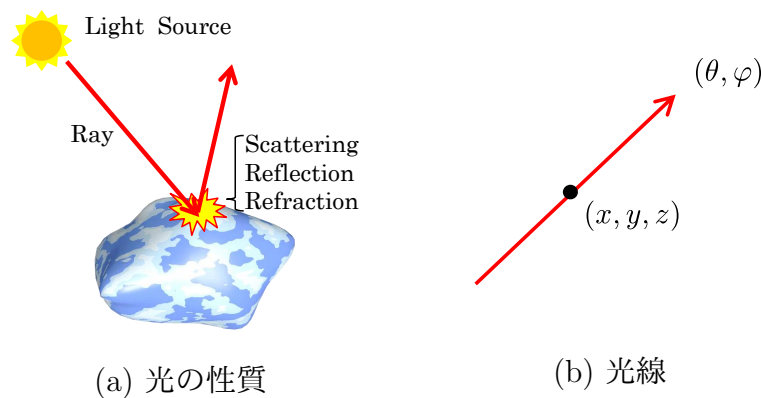
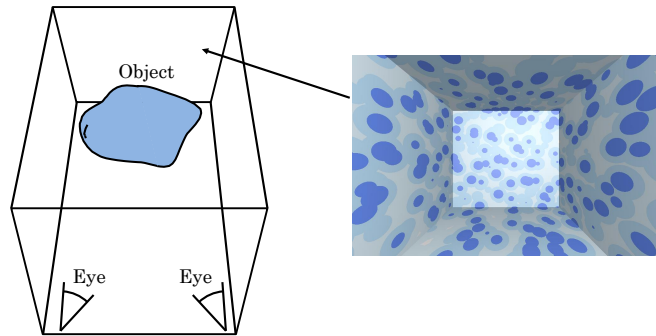
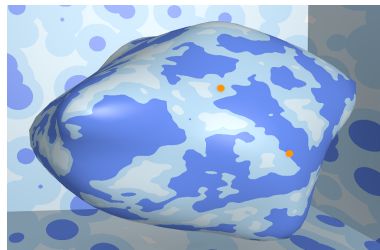


図 1.2 Light Field

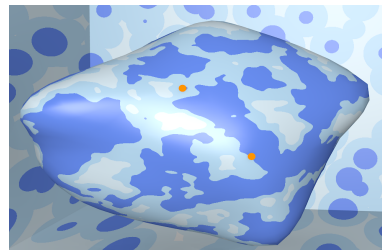
図 1.3(a) に示すような模様のある物体を異なる位置から観測する場合を考える。図 1.3(b)(c) に示すように、任意の点を見たときに同じ光を観測可能な場合は光学的恒常性 [2] が保たれると言う。例えば、不透明物体表面で完全拡散反射 [3,4] が生じる場合等である。それに対して、図 1.3(d) - (i) に示すように、異なる位置から一つの点を見たときに異なる光が観察される場合は、光学的恒常性は保たれない。これまでカメラ画像を用いて、三次元情報（ボリューム）の一つである物体の形状を計測するために様々な手法 [5-7] が開発されており、多くの手法は、この光学的恒常性を利用することで表面形状を計測している。したがって、金属などの鏡面反射を伴う表面を有する物体や、プラスチックなどの半透明な物体、ガラスなどの透明な物体など、光学的恒常性を有しない物体の形状を計測することは困難である。



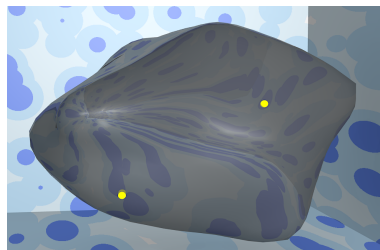
(a) 物体を異なる視点で見たとき



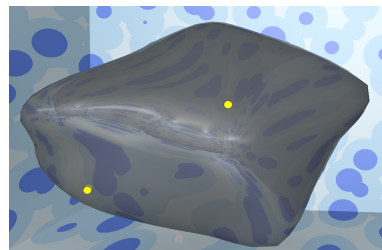
(b) 不透明物体：左目



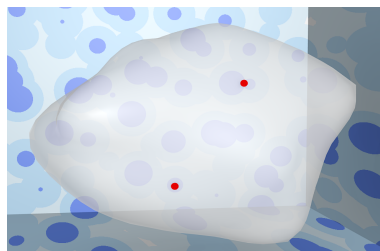
(c) 不透明物体：右目



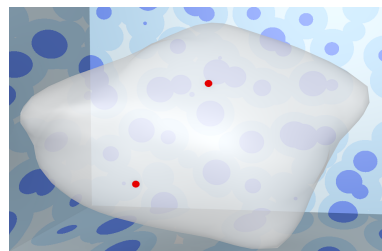
(d) 金属：左目



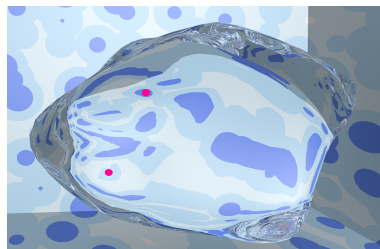
(e) 金属：右目



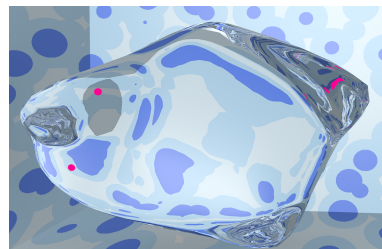
(f) 半透明物体：左目



(g) 半透明物体：右目



(h) 透明物体：左目



(i) 透明物体：右目

図 1.3 光学的恒常性

光学的恒常性を有しない物体の三次元形状を計測する研究として、偏光を利用して金属の形状を計測する研究 [8] や、単一散乱光を利用して半透明な物体の形状を計測する研究 [9] がある。透明物体の三次元形状を計測する研究としては、偏光を利用する手法 [10, 11] や蛍光発光液に浸す手法 [12] がある。しかしこれらの手法は、透明物体の周囲を光源で覆う必要や、透明物体を蛍光発光液に浸す必要がある。他にも近年、Light Field から透明物体を識別 [13] や計測 [14, 15] する手法など様々な手法 [16, 17] が提案されているが、これらの手法は屈折率が既知である必要がある。透明物体を計測することは、様々な事に有用である。例えば、ガラスやプラスチックを計測することは製品の精度の確認やロボットアームなどで把持する際の物体形状の認識などに有用である。ガラスや氷を計測することはガラス工芸品や氷の彫刻などのデジタルアーカイブなどに有用である。しかし、透明物体の形状を簡便かつ詳細に計測する手法は未だ確立していない。

また、他にも光学的恒常性を有しないため視覚的情報の計測が困難な対象として、境界が明確ではない対象がある。境界が明確ではない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。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る。透明な対象であるガスの空間濃度分布を計測するために複数のカメラ画像を用いて、光線の屈折の違いを利用する研究 [18, 19] などもある。煙霧体の濃度分布を計測する手法としては、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を計測する手法 [20–22] がある。煙霧体の三次元空間濃度分布を計測する手法として、レーザ光を走査させ、散乱光をカメラで撮影することで煙霧体の三次元空間濃度分布を計測する [23]。しかし、この手法はレーザ光を走査しながら複数回の撮影を必要とし、一回の撮影で三次元空間濃度分布を計測することができないため、時間変動の大きな煙霧体には適していない。煙霧体を計測することは、様々な分野において有用である。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、空調装置の機能試験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。したがって、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。本研究では、対象として特に煙霧体の空間濃度分布および透明物体の表面形状であるボリュームを再構成することを目的とする。

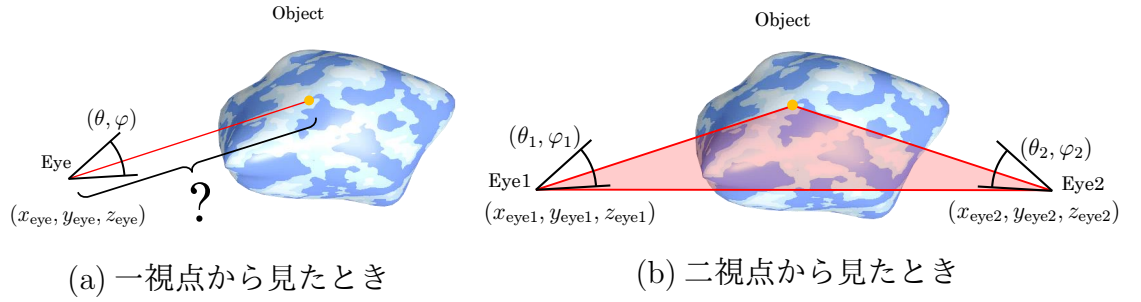


図 1.4 物体の一点を見たとき

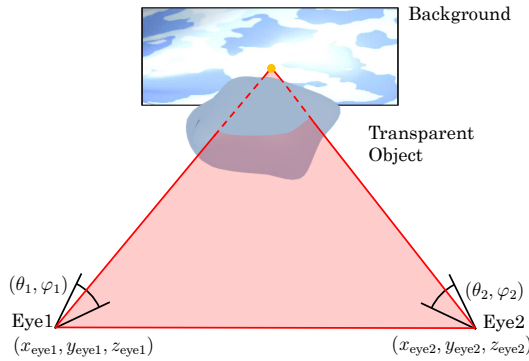


図 1.5 透明物体を見たとき

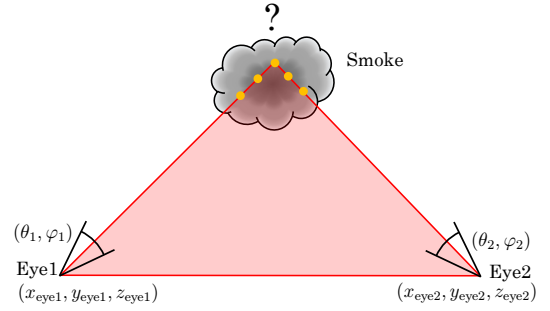


図 1.6 煙霧体を見たとき

図 1.4 (a) に示すように、一つの光線から、一つの点の三次元位置を推定することは不可能である。光学的恒常性が保たれる場合は、図 1.4 (b) に示すように、二つの光線から一つの三角形が描け（三角測量 [24,25] に基づいて）、三次元位置を同定することができる。しかし、光学的恒常性が保たれない場合で描ける三角形が少数の場合には、透明物体では図 1.5 のように背景の三次元位置を推定してしまい、煙霧体の場合には図 1.6 のように空間的に存在する分布を推定することはできない。したがって、煙霧体の空間濃度分布、透明物体の表面形状を求めるためには、数多の三角形を描けることが必要である。そのためには図 1.7 に示すトンボの目のような複眼によって Light Field を記録することが必要となる。このような仕組みにより Light Field を記録可能なカメラとしてライトフィールドカメラがある。ライトフィールドカメラは、図 1.8 に示すような多視点から観測したような光線を取得することが可能である。



図 1.7 トンボの目 [1]

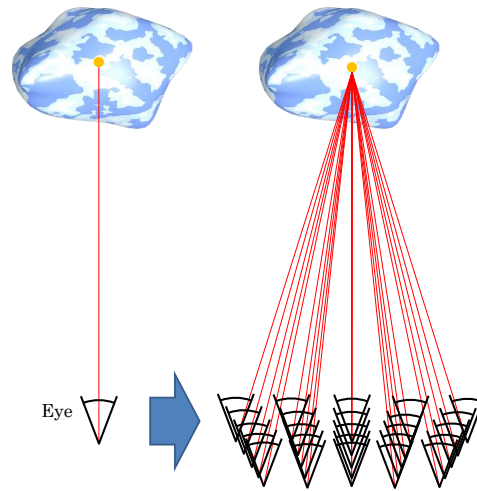


図 1.8 多視点観測

本研究では、光学的恒常性を有しない対象の視覚的情報を一回の撮影で得られた画像から三次元のボリュームを再構成する手法を提案する。特に対象としては、煙霧体と透明物体を考え、煙霧体の空間濃度分布および透明物体の表面形状を推定する。一回の撮影でより多方向の光学的情報を取得するため、カメラに到達した光線の情報である Light Field を取得可能なライトフィールドカメラ [26–34] を利用する。光学的恒常性を有しない対象は、光学的に複雑であるため、Light Field の光線の相互関係を利用することで、三次元情報を取得する。

透明物体の表面形状を計測する従来手法は、その多くが暗室で計測する手法であり、透明物体の屈折率を仮定する必要や物体形状の制限などがあり、図 1.9 に示すように、不透明体の計測手法に比べ実環境性が低い。また、手法によっては複数回の撮影を必要とする手法もある。また、煙霧体の濃度分布を計測する従来手法は、レーザ光を用いて複数回の撮影を必要とするため、図 1.9 に示すように、不透明体の計測手法に比べ実環境性・実時間性が低い。したがって、光学的恒常性を有しない対象のための手法でありながら、実環境性・実時間性の高い手法が望まれる。一方、人は光学的恒常性を有しない対象に対しても実環境性・実時間性の高い認識ができるが、計測しているわけではない。

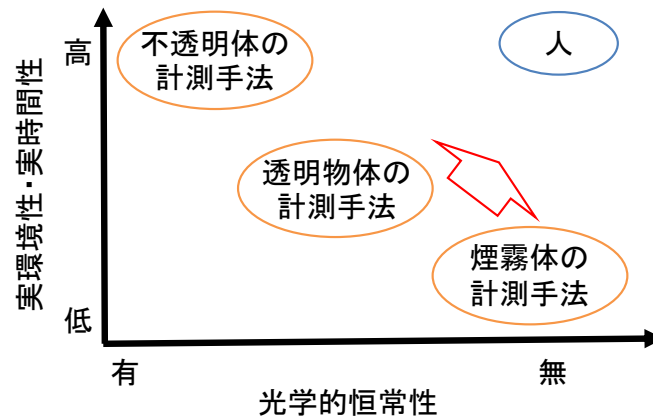


図 1.9 従来手法の比較

近年、ライトフィールドカメラが提案されて以来、ライトフィールドカメラを用いた研究が行われ始め、ライトフィールドカメラの画像を高解像度化する研究 [35,36] やデモザイクの研究 [37,38] など、画質向上のための研究が行われている。また、ライトフィールドカメラを計測機器として用いて、三次元形状を計測する手法 [39–44] も提案され始めている。しかし、これらは対象表面の拡散反射により光学的恒常性が保たれる対象の表面形状を計測するための手法であり、現在はこれらの対象の計測精度の向上に研究の指針が向いており、計測の対象としては光学的恒常性を有する対象にとどまっている。近年のコンピュータビジョンの研究は、光学的恒常性を有しない対象へと対象が移り変わってきている。これにより、地球上の全ての対象はコンピュータ内部で再構成されようとしている。本研究は、その中でもより計測の困難な対象である光学的恒常性を有しない対象の表面形状や空間濃度分布をライトフィールドカメラを用いて推定する手法である。また、ライトフィールドカメラの計測機器としての可能性を広げる研究である。今後、ライトフィールドカメラを計測機器として用いる研究が行われていく中で、本研究はこれらの先駆けとなる研究である。

以降では、半透明な対象である煙霧体、透明な対象である透明物体の順で説明する。2章ではカメラと推定対象である煙霧体および透明物体、3章ではカメラによる三次元計測、4章ではライトフィールドカメラに関して詳説する。さらに、5、6章では煙霧体、7、8章では透明物体の推定手法および結果に関して記述する。最後に、9章で本論文をまとめる。

第2章

光学センサと推定対象

本研究では、煙、霧などの煙霧体の三次元空間濃度分布および透明物体の表面形状を光学的に推定する。本章では、光学センサであるカメラおよび推定対象である煙霧体および透明物体について説明する。

2.1 カメラ

カメラは、周囲の光の情報を二次元平面に投影する装置である。本節では、カメラについて説明する。

2.1.1 ピンホールカメラ

ピンホールカメラは、図 2.1(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。対象 A 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、対象の像を取得できる。また、ピンホールカメラは対象 A の距離が変化しても、光が撮像面に到達する位置は変化しない。ピンホールカメラは、図 2.1(b) に示すような簡易的なモデルで表せる。本論文では、図 2.1(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。また、撮像面に到達することのできる光の範囲を角度で表したものを画角と呼ぶ。しかし、ピンホールカメラにより得られる画像は、ピンホールからの光のみが撮像面に到達するため光量が少なく、十分な光量を得るためには長時間の露光を必要とする。また実際には、ピンホールは有限の大きさを持つため、得られる画像は、図 2.2 に示すような、暗く、鮮明でない画像となる。

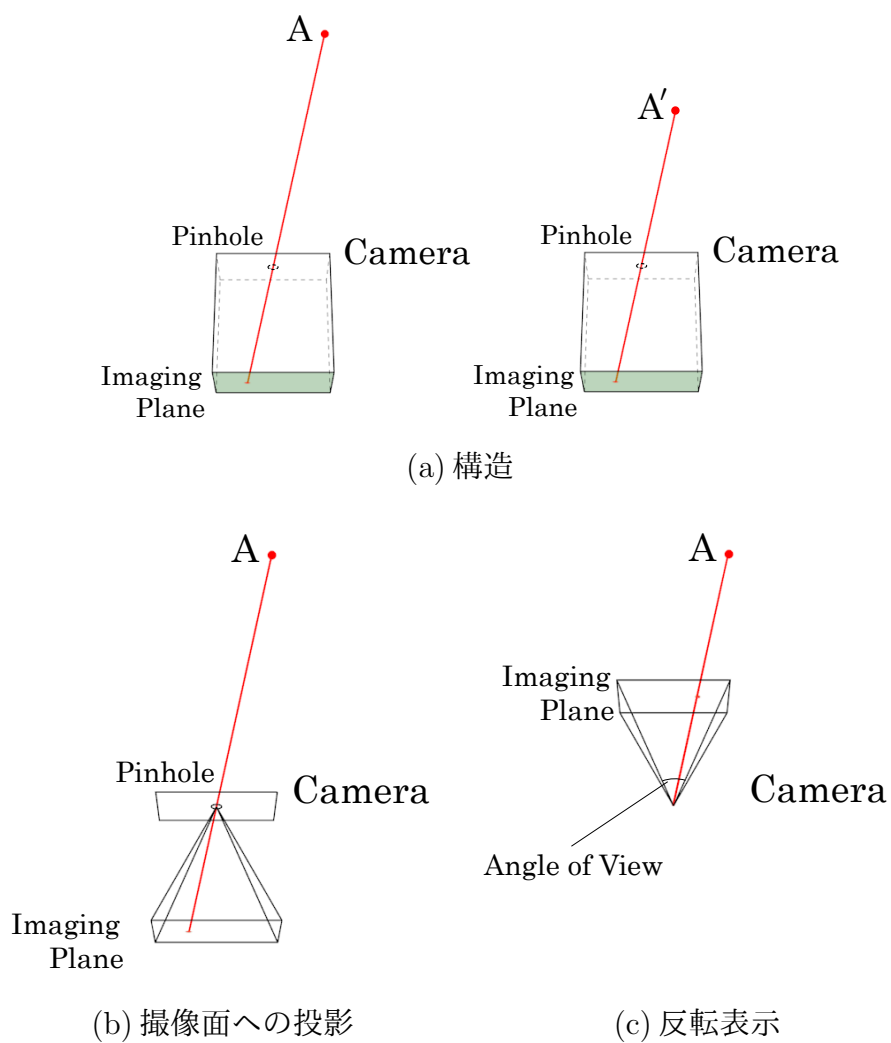


図 2.1 ピンホールカメラ



図 2.2 ピンホールカメラにより得られる画像

2.1.2 単レンズカメラ

単レンズカメラは、レンズと撮像素子から構成される。図 2.3 に示すように、対象からの光が、レンズを通り撮像素子に到達することで、対象の画像を取得できる。図 2.4 に、取得画像の例を示す。レンズを用いることで、撮像素子に到達する光の量はピンホールカメラに比べて多くなる。このメインレンズの光が通ることのできる領域を開口と呼ぶ。対象の任意の一点 A 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写るとき、レンズの焦点距離 d_f 、レンズと対象の距離 d_{tar} 、レンズと撮像素子の距離 d_{img} の関係は以下のようになる。

$$\frac{1}{d_f} = \frac{1}{d_{tar}} + \frac{1}{d_{img}} \quad (2.1)$$

単レンズカメラの場合には、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写り、ピントが合っていない対象はボケて写ることになる。このボケはカメラと対象の距離に関する情報を含んでいる一方で、物体の表面の模様などを観測する際の妨げになる恐れがある。

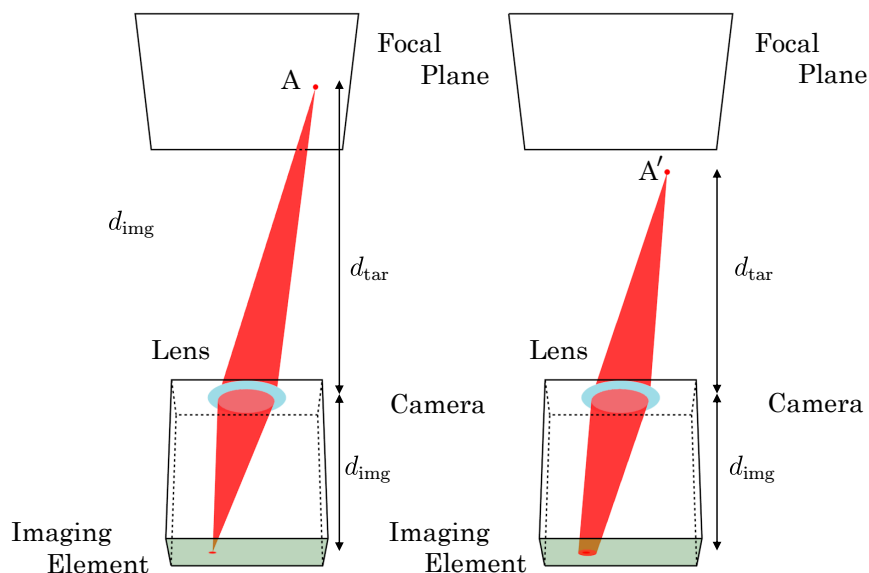


図 2.3 単レンズカメラ



図 2.4 カメラにより得られる画像

2.1.3 ライトフィールドカメラ

Light Field を記録するためには多視点による観測が必要であり、そのためには図 2.5 に示すような、カメラを並べることにより構成されるカメラアレイが必要である。しかし、カメラアレイは数多くのカメラを配置する必要があるため、装置が巨大化するなどの問題がある。この問題を解決し、カメラアレイにより得られる光線と同等の光線を別の構造により取得可能なカメラとしてライトフィールドカメラが開発された。ライトフィールドカメラは、図 2.6 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おり、図 2.7 に示すような画像を取得できる。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、図 2.8 に示すように、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、光線がメインレンズのどの位置にどの方向から来たかを記録することが可能となる。したがってライトフィールドカメラは、一度の撮影でより多方向の光線を記録できる利点を有する。詳細は 4 章で説明する。

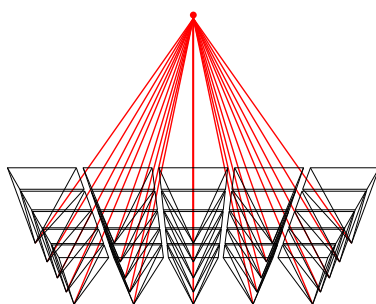


図 2.5 多数のカメラにより構成されるカメラアレイ

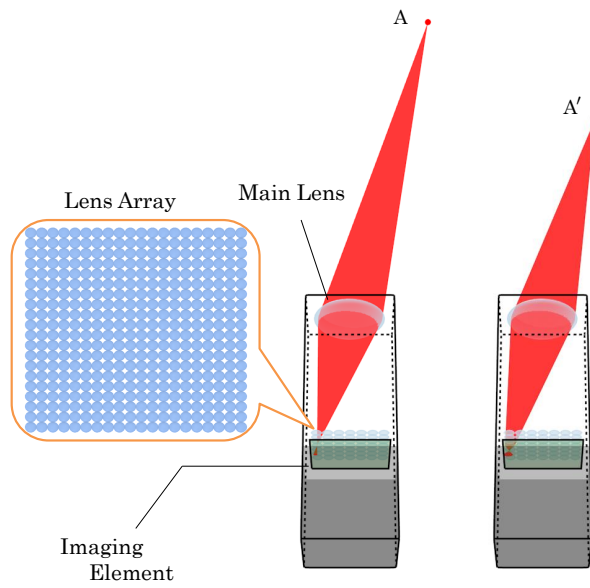


図 2.6 ライトフィールドカメラの構造

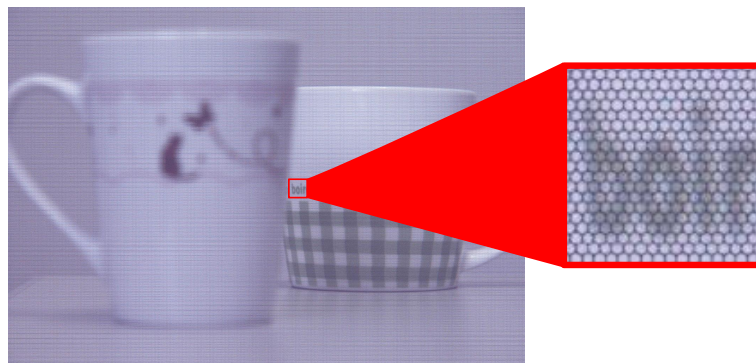


図 2.7 ライトフィールドカメラにより得られる画像

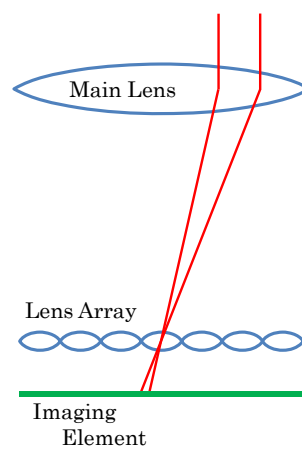


図 2.8 マイクロレンズを通る光線

2.2 光学的恒常性を有しない対象

光学的恒常性を有しない対象である煙霧体および透明物体の空間濃度分布や表面形状を推定するために、いくつかの手法が提案されている。以降に、推定対象である煙霧体、透明物体および従来手法について説明する。

2.2.1 煙霧体

本項では、推定対象である煙霧体の光学特性、および濃度分布推定手法について説明する。

煙霧体の濃度

本論文では、図 2.9 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、固気混相流である。図 2.10 に示すように、煙は、光を吸収、散乱させる光学的特性を持つ。煙に入射した光は、微粒子によって散乱し（一次散乱）、さらに散乱した光は他の微粒子でも散乱を繰り返し（多重散乱）、減衰して外部に放出する。本論文では、単位体積あ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、気液混相流である。霧は、煙と同様に光を吸収、散乱させる光学的特性を持ち、この散乱には指向性があり粒子径により振る舞いが異なる。図 2.11 に示すように、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。本研究では屈折を



(a) 煙 [45]



(b) 霧 [46]



(c) 炎 [47]

図 2.9 煙霧体の例

発生させない対象である煙および霧を対象とし、濃度は背景が見えるほど低いものとする。これらの煙、霧などの煙霧体は、濃度に応じた透明度を持っており、視覚的に観測できる。煙霧体の濃度が高いときには微小領域内で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。したがって、これらの煙霧体の三次元空間濃度分布を推定するためには、一瞬の観測により得られる情報から三次元空間濃度分布を求める必要がある。

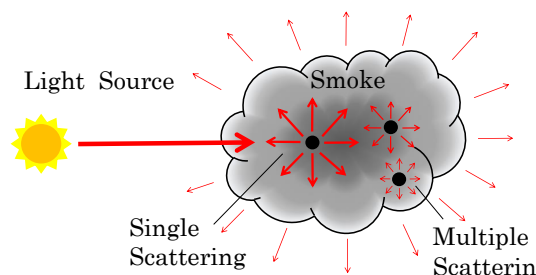


図 2.10 煙や霧内での光の散乱

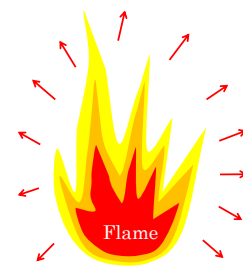


図 2.11 炎の発光

濃度分布計測

煙霧体の濃度分布を計測するための手法としては、図 2.12 に示すようにレーザー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 [20,21]。レーザー光発振素子から直進するレーザー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。したがって、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ー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、一度の計測では光路方向の濃度分布の変化を計測できない。

煙霧体の濃度分布を計測する他の手法としては、図 2.13 に示すようにシート状のレーザー光を煙に照射し、その散乱光をカメラで観測する手法がある [22,23]。散乱光は、煙霧体の濃度に比例するため、投影した面の濃度を計測することができる。したがって、このレーザーを走査することで、三次元の空間濃度分布を計測することが可能である。しかし、時間的変動の大きな煙霧体では、レーザーを走査中に濃度が変動する。そのため、時間的変動の大きな煙霧体の濃度分布を計測することはできない。

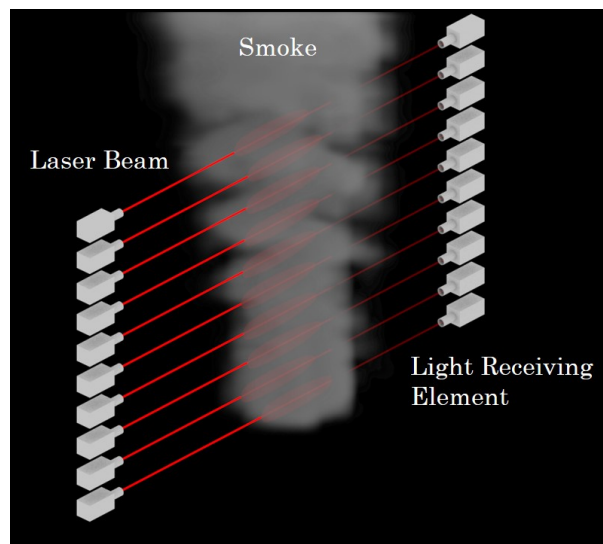


図 2.12 濃度分布計測

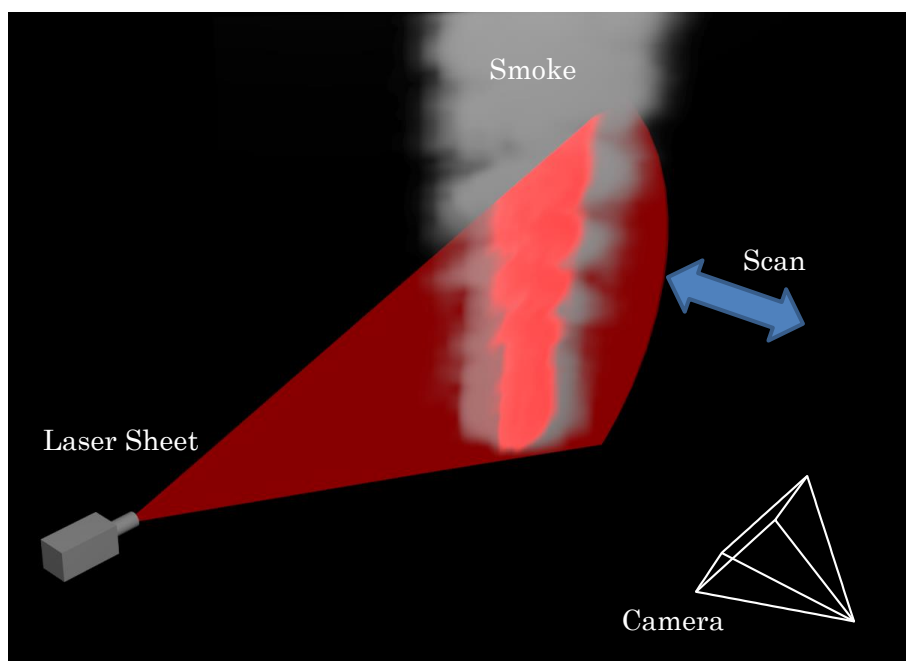


図 2.13 シート状のレーザー光による濃度分布計測

2.2.2 透明物体

本項では、計測対象である透明物体の光学特性、および形状計測手法について説明する。

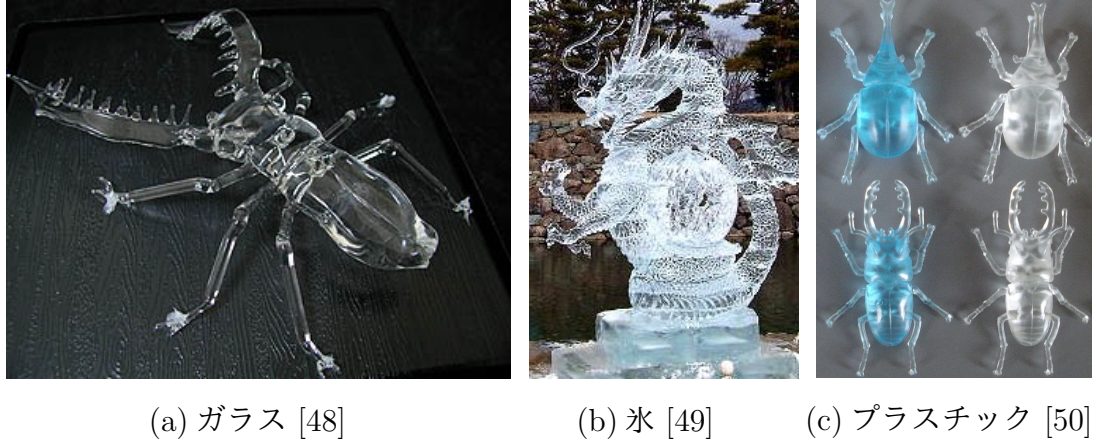


図 2.14 透明物体の例

透明物体の表面

図 2.14 に示すような、ガラス、氷、プラスチックなどの透明物体は、外部からの光線が物体内部に透過して進入する性質を持つ。また、空気中と物体内部では屈折率が異なるため、空気中と物体内部の境界で入射光は屈折する。さらに、入射光の一部は物体表面で反射する。本研究では、物体内部の屈折率が一定で、物体内部で光を散乱または屈折させない透明物体を対象とする。また、図 2.14 (c) に示すような、物体の全領域において、特定の波長が表面または内部で散乱および減衰することなく透過する物体も透明物体として扱う。図 2.15 に示すように、入射角を θ_{inc} 、屈折角を θ_{rac} 、反射角を θ_{lec} 、空気の屈折率を n_{air} 、透明物体の屈折率 n_{tra} とするとき、これらの関係はスネルの法則 [51] にしたがって以下の様になる。

$$n_{\text{air}} \sin \theta_{\text{inc}} = n_{\text{tra}} \sin \theta_{\text{rac}} \quad (2.2)$$

$$\theta_{\text{inc}} = \theta_{\text{lec}} \quad (2.3)$$

図 2.14 で示されるように、人はこれらの透明物体の形状を視覚的に認識できる。一方で、不透明物体を対象とした三次元形状計測手法の多くは、光学的恒常性を

利用することで表面形状を計測している。したがって、透明物体などの光学的恒常性を有しない物体の形状を計測することは困難である。

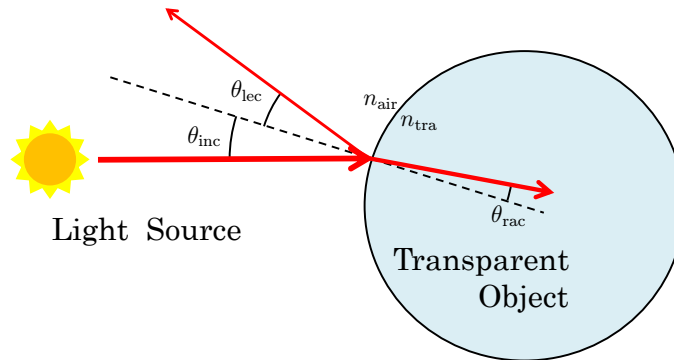


図 2.15 透明物体での光の屈折

透明物体形状計測

図 2.16 に示すような、透明物体を蛍光液に浸し、シート状のレーザ光を照射することで透明物体の形状を計測する手法が提案されている [12]。レーザ光は蛍光液部分では蛍光による発光を引き起こす。一方、透明物体の内部では発光しないため、側面からカメラで観測することでレーザ光を照射した断面の形状を計測できる。しかし、この手法では形状を計測するために透明物体を蛍光液に浸す必要があり、計測後に透明物体の洗浄などの手間を要する。さらに、氷の場合では計測中に相転移により表面形状が変化する問題も発生する。

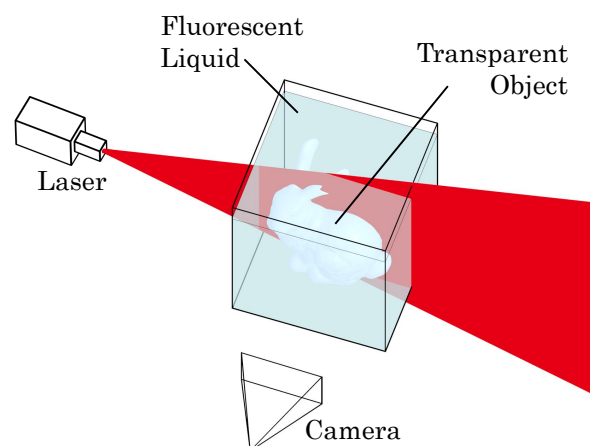


図 2.16 蛍光発光を利用した透明物体形状計測

透明物体の表面形状を計測するための他の手法としては、図 2.17 に示すような、偏光を利用した計測手法がある [10, 52]。これらの手法では、透明物体の表面で反射した光源からの光を、偏光板を通してカメラで観測する。入射光の入射角と同じ角度で反射する反射光は、反射角に応じて偏光強度が変化する。偏光板は、図に示すように特定の偏光を通過させるため、偏光板を回転しながら観測することで、透明物体の表面の各点における角度を計測でき、各点における角度から透明物体の表面形状を求めることができる。しかし、この手法は透明物体を囲うように光源を配置しなければならず、装置が大型化したり、透明物体の背面の形状が平面に限られるといった問題がある。

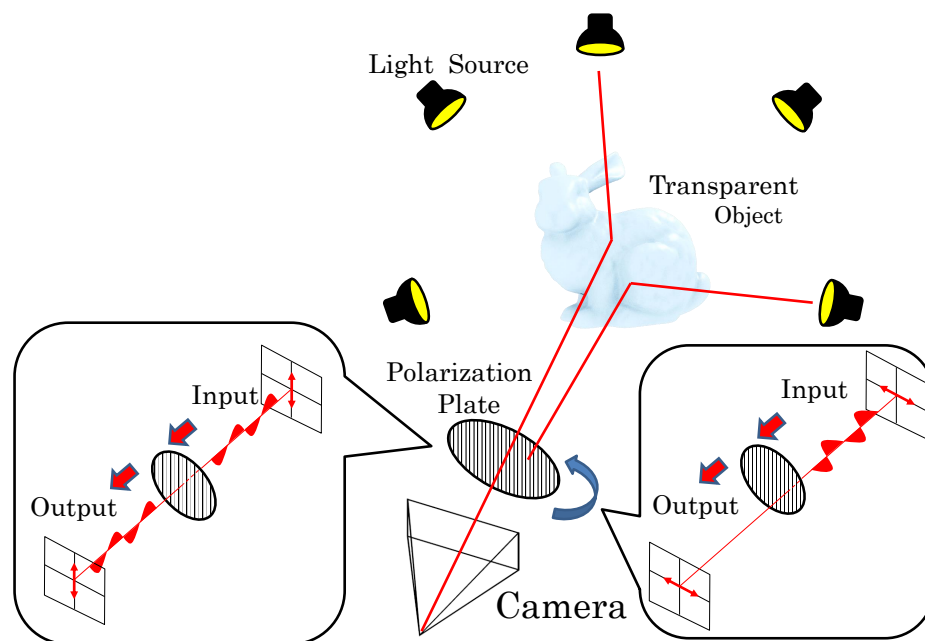


図 2.17 偏光を利用した透明物体形状計測

また、他の手法として、図 2.18 に示すような符号化したディスプレイを用いて、Light Field から計測する手法がある [14,15]。ディスプレイの光源を色の付いた透明フィルムで符号化し、その前にレンズアレイを配置することで、ディスプレイの光線が位置と角度により異なることになる。したがって、透明物体を通過した光をカメラで観測することで、ディスプレイの光線の位置と角度を求めることができる。これらの関係から、透明物体の表面形状を計測できる。しかし、この手法は透明物体を薄レンズと仮定し、ディスプレイからカメラで観測される光線は一度しか屈折しないことを前提に表面形状を計測する。したがって、複数回の屈折を引き起こす厚みのある透明物体の表面形状を計測することはできない。この手法は、ディスプレイとカメラの単一の光線の組を計算することで、屈折が一度の透明物体の表面形状を推定できるため、複数の光線の組を計算できれば、厚みを持つ透明物体の表面形状を推定できる可能性がある。

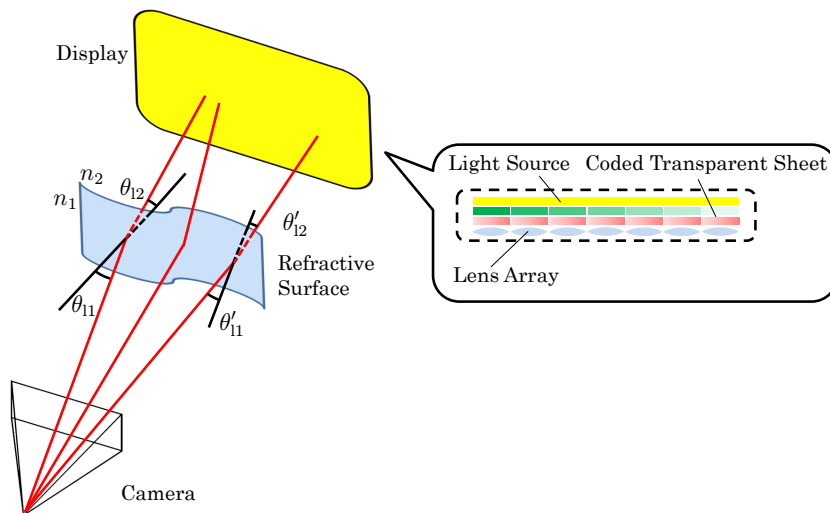


図 2.18 Light Field を用いた透明物体形状計測

2.2.3 推定に利用する光学特性

煙霧体および透明物体は、拡散反射せず光を透過する性質を持つ。さらに、煙霧体では、透過光は内部で散乱および減衰し、透明物体では、表面で光を屈折および反射させる。これらの対象は、表面で拡散反射しないため計測が困難であり計測手法が確立していない原因となっている。煙霧体の濃度分布を計測する従来手法では、光の減衰を利用し、透明物体の表面形状を計測する従来手法では、光の屈折や反射を用いて形状を計測している。光の減衰を利用する場合は、光源と観測装置を移動させながら複数回観測する必要がある。また、光の反射を利用する場合は、対象全体を光源で被うため大規模なシステムとなる。本研究では、図 2.19(b)(d) に示すように多視点から観察することを考え、一度の計測で煙霧体の濃度分布を推定するために光の散乱を利用し、厚みを持つ透明物体の表面形状を推定する小型のシステムを構築するために光の屈折を利用する。

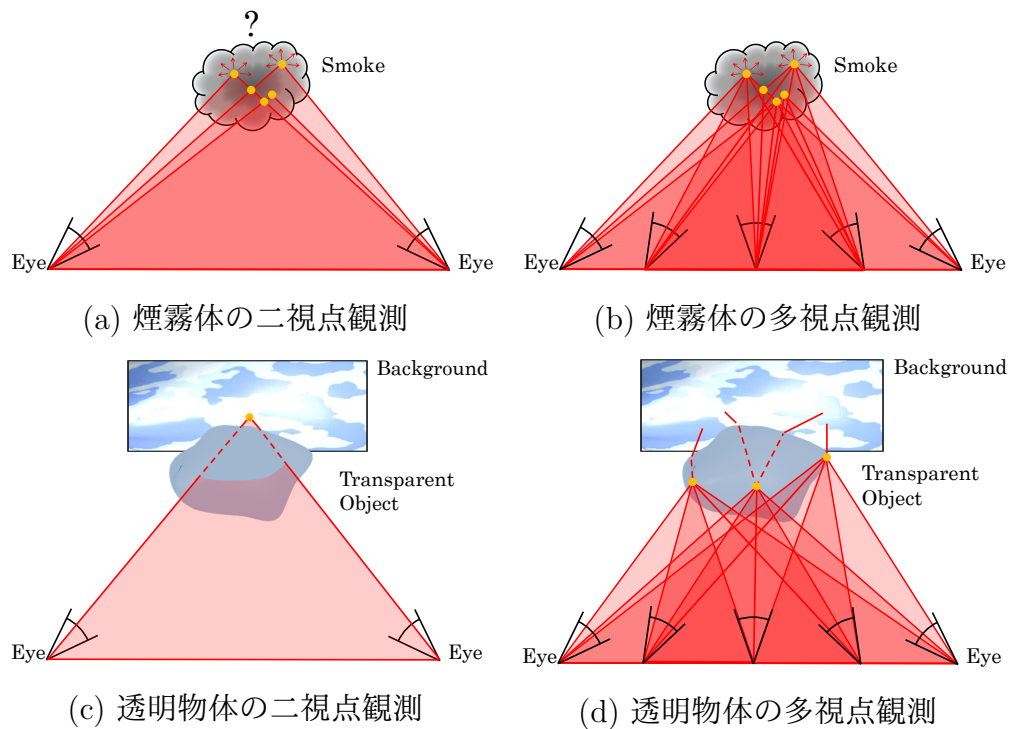


図 2.19 推定対象の観測

第3章

三次元計測と計算手法

本章では、光学センサであるカメラを用いた三次元計測手法について説明し、また、計算手法についても説明する。カメラによる三次元計測手法では、計測物体にピントを合わせて撮影することで、ピンホールカメラとして扱う。

3.1 三次元計測手法

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推定可能であることが期待される。また、透明物体では表面で光が屈折するため、屈折光を観測することで表面形状が推定可能であると期待される。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がある。本節では、これらの手法について説明する。

3.1.1 Time of Flight 法

TOF 法 [53] とは図 3.1 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_{tof} 、光速を c とするとき、図 3.2 に示す光の飛行時間 Δt_{tof} は式 (3.1) 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 変化すると、対象物までの距離は 150 mm 変化する。したがって、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。例えば、計測分解能を 1 mm にするためには 150 GHz のサンプリング周波数が必要である。この問題を解決する方法として、光の強度を周期 T_{tof}

で正弦波状に変化させ、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 3.3 に示す時間差を Δt_{tof} とするとき、式 (3.2) のようになる。

$$d_{\text{tof}} = \frac{c\Delta t_{\text{tof}}}{2} \quad (3.1)$$

$$d_{\text{tof}} = k_{\text{tof}}cT_{\text{tof}} + \frac{c\Delta t_{\text{tof}}}{2} \quad (3.2)$$

k_{tof} は、係数であり、0 以上の整数である。また、この手法は連続的に変化する周期信号を検出することで距離を計測するため、雑音に対して頑強である。しかし、この手法は、距離が短い場合には通常 $k_{\text{tof}} = 0$ であるが、距離が $c\Delta t_{\text{tof}}$ より長くなると、 $k_{\text{tof}} \neq 0$ となるため、 $k_{\text{tof}}c\Delta t_{\text{tof}}$ の曖昧性を発生させる。

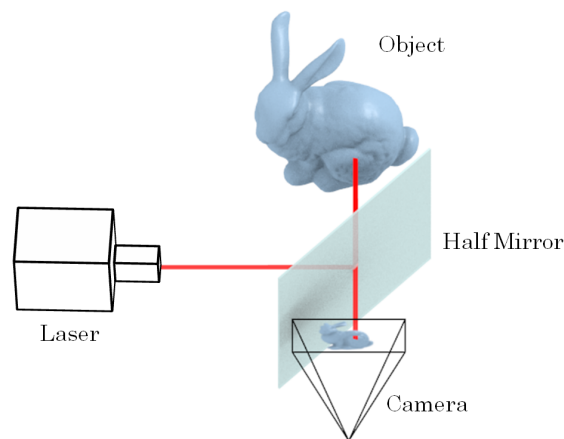


図 3.1 TOF 法の撮影環境

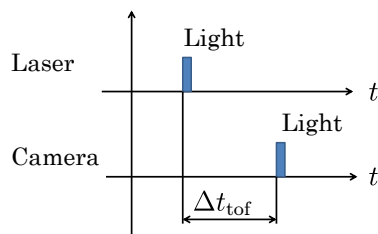


図 3.2 TOF 法の光の飛行時間

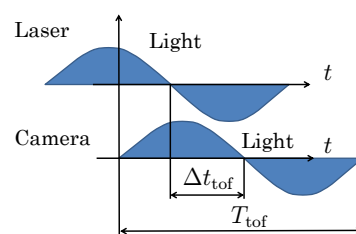


図 3.3 位相差 TOF 法

3.1.2 パッシブステレオ法

パッシブステレオ法 [54, 55] では、三角法による距離計測を利用し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。対象物を二つの位置から目測し、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 3.4 に示すような位置関係の場合に、2 点間の距離 $(d_{p1} + d_{p2})$ とそれぞれの角度 $(\theta_{p1}, \theta_{p2})$ から距離を求めることができ、この時の対象までの距離 d_{ps} は式 (3.3) となる。

$$d_{ps} = (d_{p1} + d_{p2}) \frac{\tan \theta_{p1} \tan \theta_{p2}}{\tan \theta_{p1} + \tan \theta_{p2}} \quad (3.3)$$

したがって、2 点間の距離 $(d_{p1} + d_{p2})$ とそれぞれの角度 $(\theta_{p1}, \theta_{p2})$ を計測することで、対象までの距離 d_{ps} を求めることができる。また、二つの視線の間の角度は輻輳角と呼ばれ、輻輳角が大きい場合に、 d_{ps} の変化に対する θ_{p1} 、 θ_{p2} の変化は大きくなる。

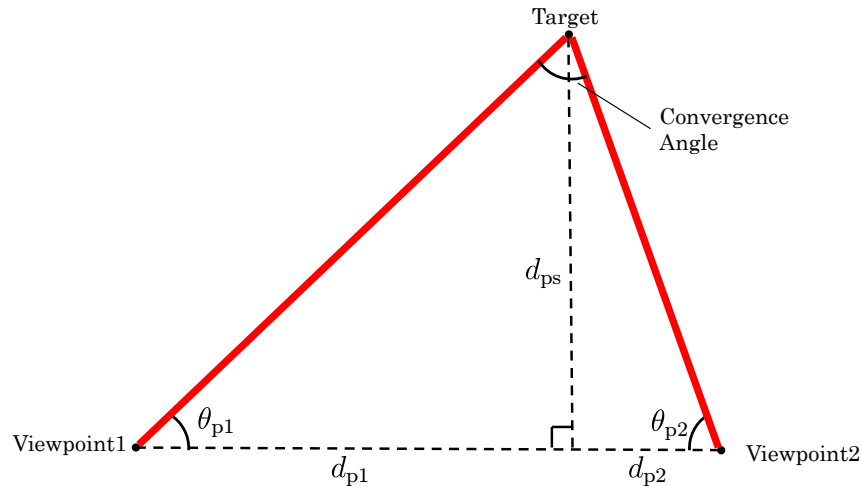


図 3.4 三角法の概要

カメラを用いたパッシブステレオ法は、図 3.5 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 3.6 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写るかという対応付けを行う。その後、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。これを全ての点で行うことで形状を計測する。パッシブステレオ法では画像処理により対象物の各点の対応付けを行うが、特徴点がない対象や表面に繰り返し模様がある対象などでは、対応付けに誤りが発生する問題がある。

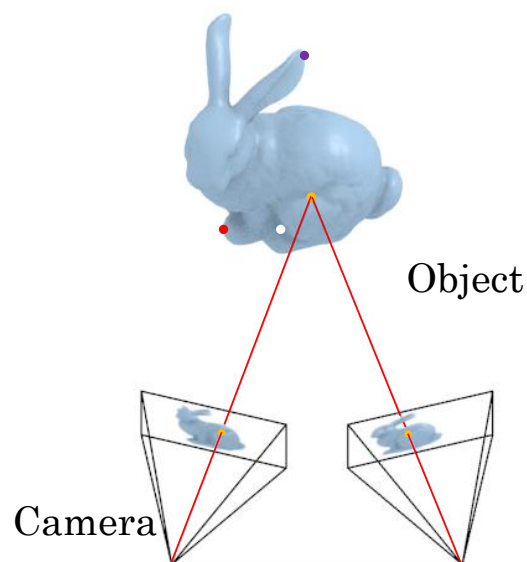


図 3.5 パッシブステレオ法の概要

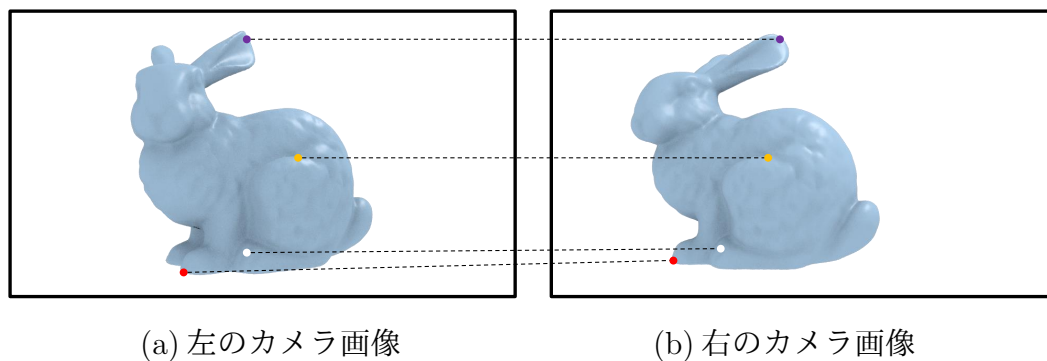


図 3.6 各点の対応付け

3.1.3 アクティブステレオ法

アクティブステレオ法 [56–58] は、図 3.7 に示すように、プロジェクタなどによりスリット光を物体に投影し、その際に投影された光の位置から三次元形状を計測する手法である。この手法は、まずパッシブステレオ法の方のカメラの代わりに、プロジェクタなどによって投影されたスリット光またはパターン光を走査させ、カメラにより撮影する。つぎに、カメラとプロジェクタの関係から得られた画像の対応点を意図的に作り、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。

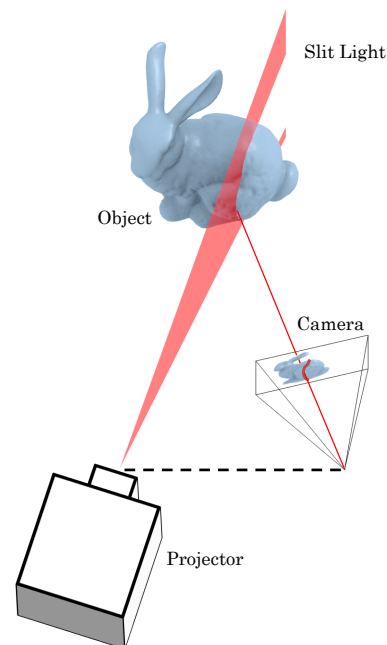


図 3.7 アクティブステレオ法の概要

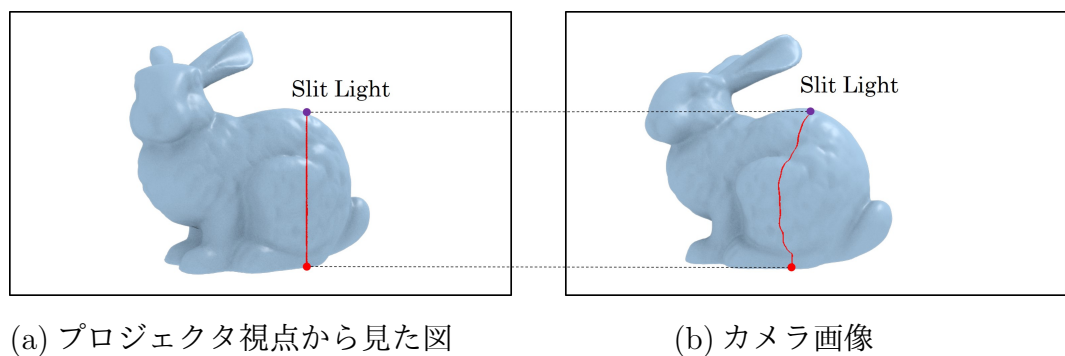


図 3.8 スリットの投影

3.1.4 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。以下、カメラが二台の場合を例に説明する。シルエット画像とは、図3.9に示すように、カメラの取得画像内の対象物体が写る領域を示す画像である。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 [59]。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。また、視体積交差法により得られた形状は Visual Hull と呼ばれる。視体積交差法は SCM (Space carving method) [60,61] と VIM (Volume intersection method) [62–64] の二種類の手法に分けられる。

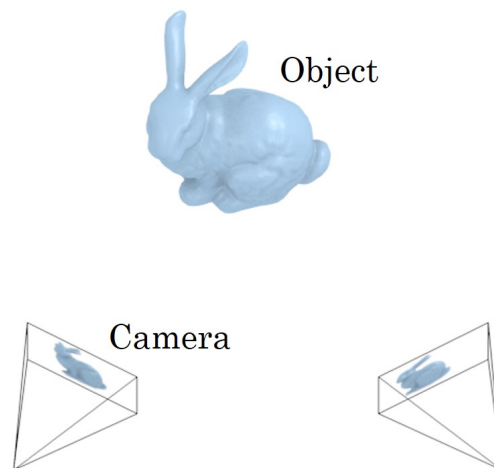


図 3.9 対象とカメラの位置関係

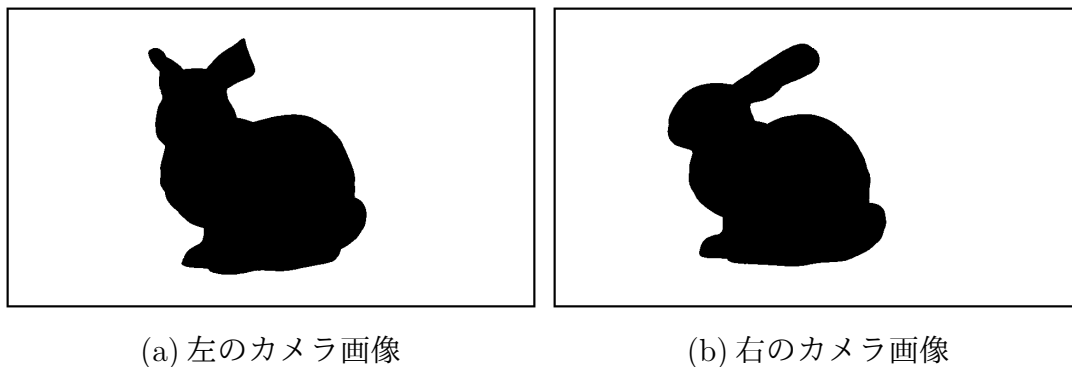


図 3.10 シルエット画像の取得

SCMは、まず図3.11(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3.11(b)に示すようにシルエットがない部分に対応するボクセルを削除する。対応するボクセルの削除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3.11(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。

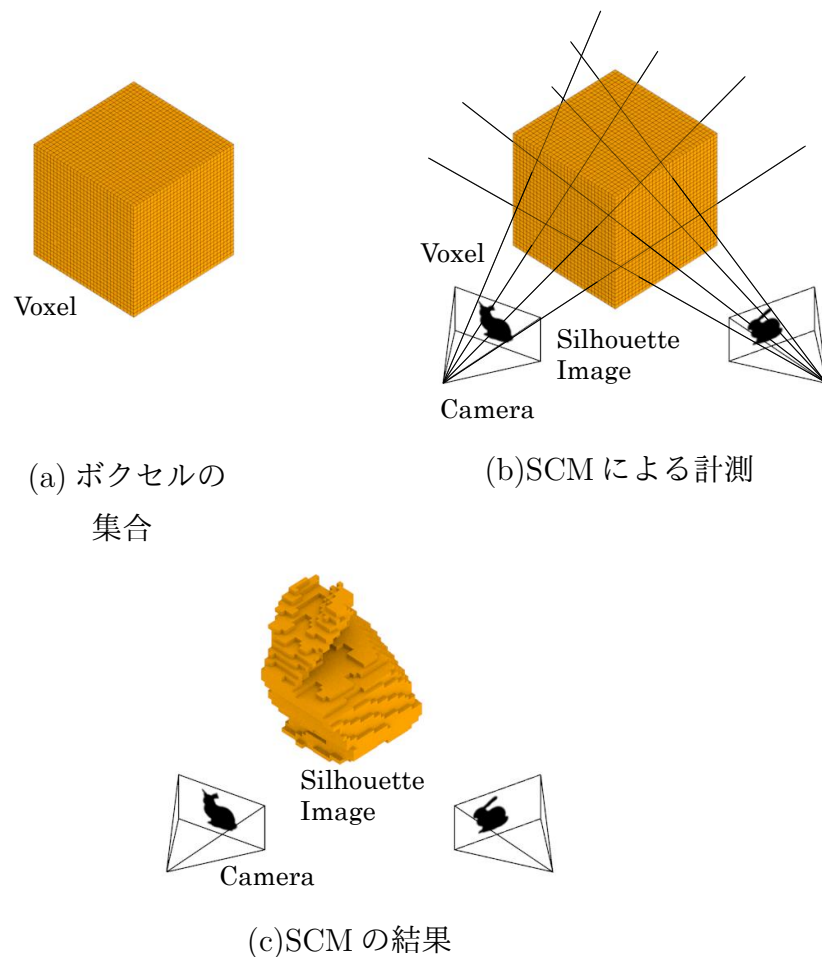
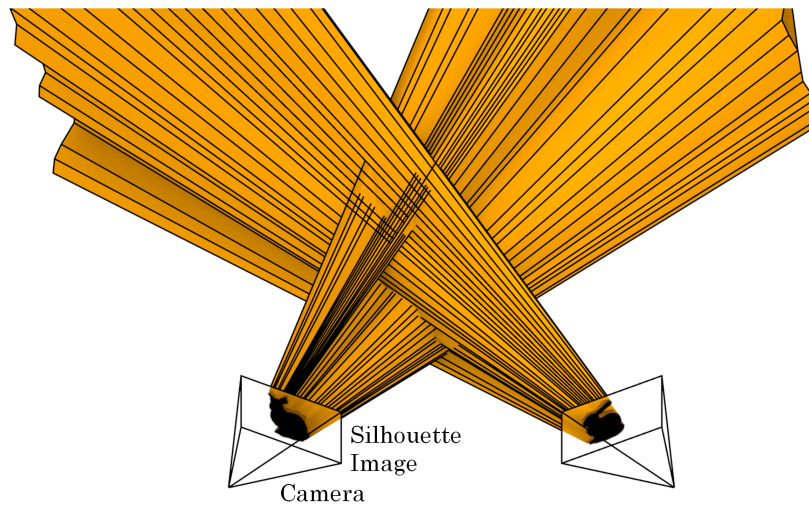
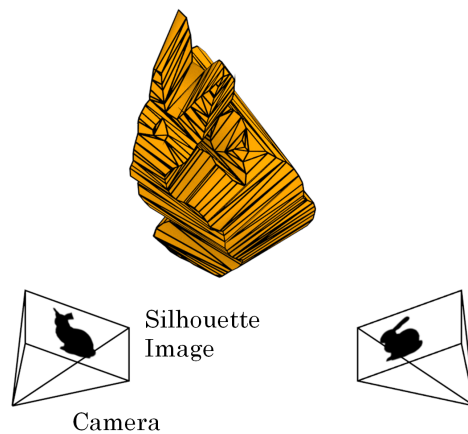


図 3.11 SCM の概要

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 3.12 VIM の概要

3.1.5 光学的恒常性を有しない対象への適用

煙霧体の濃度が高いとき、単位体積あたりの微粒子の数が多くなるため、光を散乱させる頻度も多くなる。煙霧体の濃度が高いとき、単位体積あたりの散乱光の光量は多くなる。したがって、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、煙霧体の三次元濃度分布を推定可能であると考えられる。

表 3.1 に、これらの手法の長所と短所をまとめる。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推定に適用できないか考える。図 3.13 (a) に、煙霧体に光を入射した際の散乱の様子を示す。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できないため、煙霧体の濃度分布を推定することは不可能である。パッシブステレオ法では、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。したがって、パッシブステレオ法は、煙霧体の濃度分布を推定することは不可能である。アクティブステレオ法では、プロジェクタなど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できず、結果として濃度分布を推定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。したがって、濃度分布を推定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。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空間濃度分布を推定することは不可能である。

つぎに、前述した三次元形状計測手法が透明物体の表面形状計測に適用できないか考える。図 3.13(b) に、透明物体に光を入射した際の様子を示す。これまでの手法は、物体表面で光が等方的に反射することを利用して三次元形状を計測している。しかし、透明物体では物体表面では、等方的な反射は発生しない。したがって、これらの手法では透明物体の表面形状を計測することはできない。

表 3.1 単レンズカメラを用いた三次元計測手法の長所と短所

手法	長所	短所
TOF 法	分解能が距離に依存しない	レーザ光源が必要
パッシブ ステレオ法	環境光で計測可能	特徴点がない対象では 対応付けに誤りが発生する 分解能が距離に依存する
アクティブ ステレオ法	特徴点がない対象でも 計測可能	レーザ光源が必要 分解能が距離に依存する
視体積交差法	シルエットを作成できれば 計測可能	凹形状は計測できない

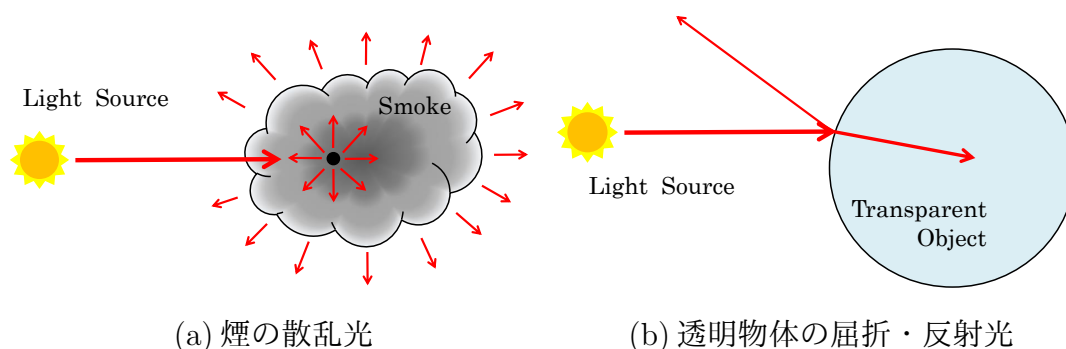


図 3.13 対象に入射する光

3.2 計算手法

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。本節では、演繹的手法と帰納的手法について説明する。

3.2.1 演繹的手法

以下の式に示すように観測値 ξ と結果 ψ の関係を関数 F_ξ により表せるとき、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。

$$\psi = F_\xi(\xi) \quad (3.4)$$

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_{tof} を計測することで式 (3.1) より、距離 d_{tof} を求める事ができる。

3.2.2 帰納的手法

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

$$\psi_{i+1} = M_{\psi}\psi_i + \mathbf{k}_{\psi} \quad (3.5)$$

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行列 M_{ψ} 、係数ベクトル \mathbf{k}_{ψ} を決定し、 ψ_i 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。

煙霧体の三次元空間濃度分布を推定する問題は、推定するパラメータの数より観測できる観測値の数が少ないため、観測値を満たす三次元空間濃度分布が複数存在するような劣決定問題となる。そのため、演繹的な手法により観測値から煙霧体の三次元空間濃度分布の解を一意に求めることは極めて困難である。したがって、複数の経路を通過する光線から、帰納的に濃度を推定する必要がある。また、煙霧体の三次元空間濃度分布を推定するためには、一度の撮影で必要な情報を取得する必要があるため、複数のライトフィールドカメラを用いる。

透明物体は物体表面で光を屈折させる。したがって、屈折光を観測しその観測値から透明物体の表面形状を推定する。光の屈折の解析は、透明物体の形状が複雑であるほど複雑な問題となる。そのため、より多方向の光線を取得可能なライトフィールドカメラを用いて、透明物体の表面形状を推定する。

第4章

ライトフィールドカメラによる画像

煙霧体の三次元空間濃度分布および透明物体の表面形状を推定するために、ライトフィールドカメラを使用する。本章では、Light Field、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。

4.1 Light Field とカメラ

図 4.1 (a) に示すように、光源とカメラがある状況を考える。カメラは位置 $(x_{\text{cam}}, y_{\text{cam}}, z_{\text{cam}})$ に到達する光線の方向 (θ, φ) の情報を記録できる装置である。図 4.1 (a) に示すように、光源が一つの場合には、光源とカメラの間の直線上における光線は同じであるため、カメラは位置 $(x_{\text{cam}}, y_{\text{cam}}, z_{\text{cam}})$ の光線を記録することで、光源とカメラの間の光線も記録できる。一方、図 4.1 (b) に示すように、光源が二つ存在する場合には、光源とカメラの間の光線は位置によりそれぞれ異なることになる。実際の環境では、光源は複数存在し、物体での散乱なども発生するため、光線は位置により異なることになる。したがって、実際の環境では、カメラは Light Field $(x, y, z, \theta, \varphi)$ の内の位置 $(x_{\text{cam}}, y_{\text{cam}}, z_{\text{cam}})$ に到達する光線の方向 (θ, φ) の情報のみを記録することができる。そして、カメラは光源がどの方向にあるかという情報は記録できるが、位置に関する情報は記録できない。位置 (x, y) の情報を記録するためには、図 4.1 (c) に示すように、カメラを並べたカメラアレイを配置する必要がある。これにより、光線の位置 (x, y) と方向 (θ, φ) の情報を記録することができる。近年、カメラアレイと同様の Light Field を記録できるカメラとしてライトフィールドカメラが開発された。ライトフィールドカメラは、メインレンズを通過する光線の位置によって異なる撮像面に光線が到達する構造となっており、メインレンズ内の位置 (x, y) の情報も記録することができる。つまり、カメラは到達する光線の方向 (θ, φ) の情報を記録するのに対し、ラ

第4章 ライトフィールドカメラによる画像

イトフィールドカメラは光線の位置 (x, y) と方向 (θ, φ) の情報を記録することが可能である。そして、ライトフィールドカメラは、光線の (x, y, θ, φ) の情報も記録できるため、光源の位置に関する情報も取得できる。

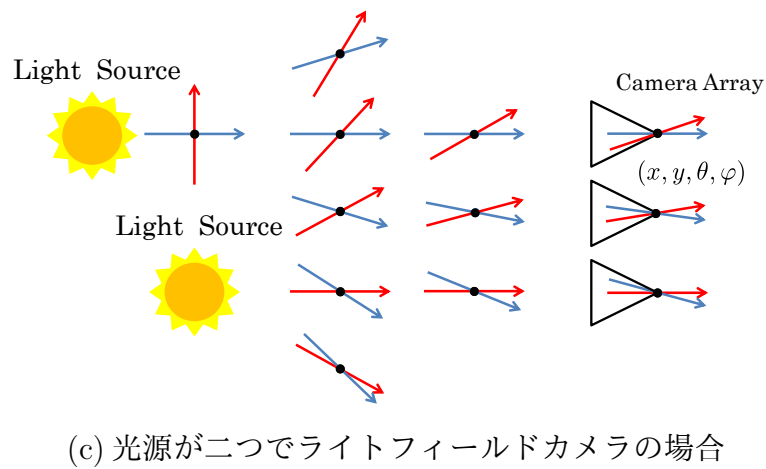
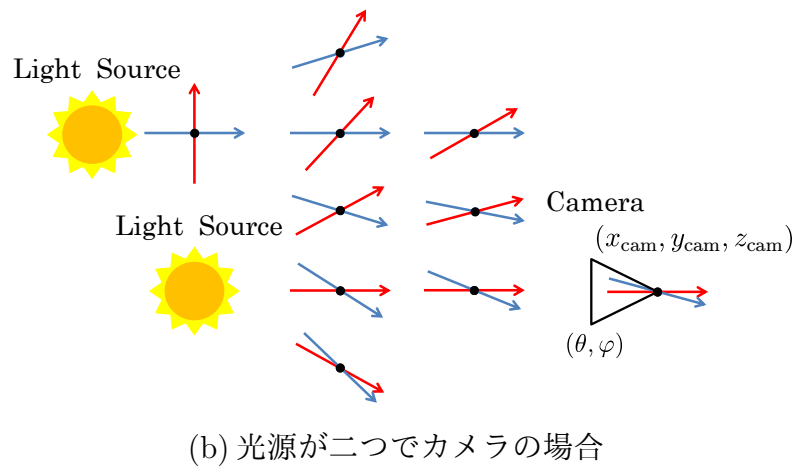
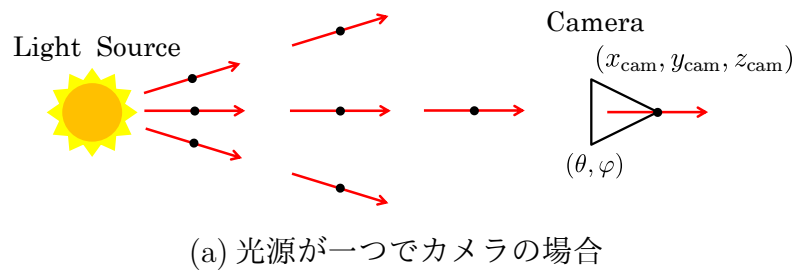


図 4.1 光線の記録

4.2 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 4.2 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である。図 4.2 (a) は手前の物体にピントを合わせた画像で、図 4.2 (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 4.2 ライトフィールドカメラによるリフォーカス

図 4.3 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 4.4 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 [65]。対象からの光は、図 4.5 に示すように、メインレンズに到達する角度により異なるマイクロレンズに到達する。更に、マイクロレンズ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。マイクロレンズに到達する光の角度は、メインレンズに到達する光の位置に対応している。したがって、メインレンズに入射する光線のどの位置にどの方向から来たかという情報である Light Field の記録が可能となる。図 4.6 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的な画像となっている。



図 4.3 ライトフィールドカメラ (Lytro)

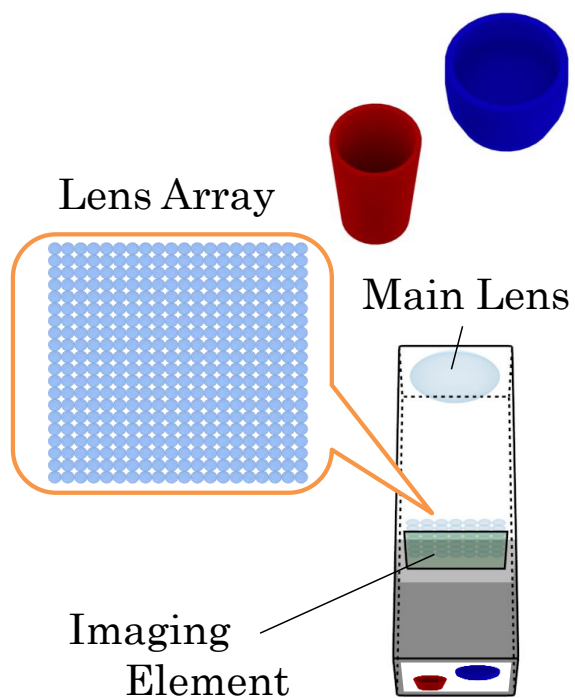


図 4.4 ライトフィールドカメラの構造

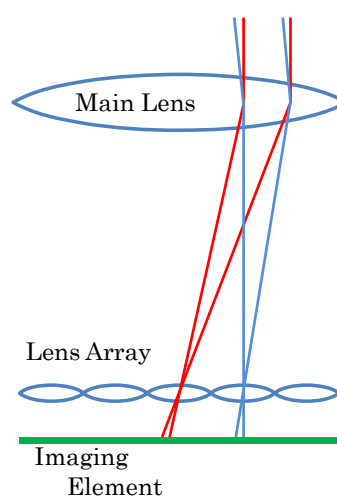


図 4.5 マイクロレンズを通る光

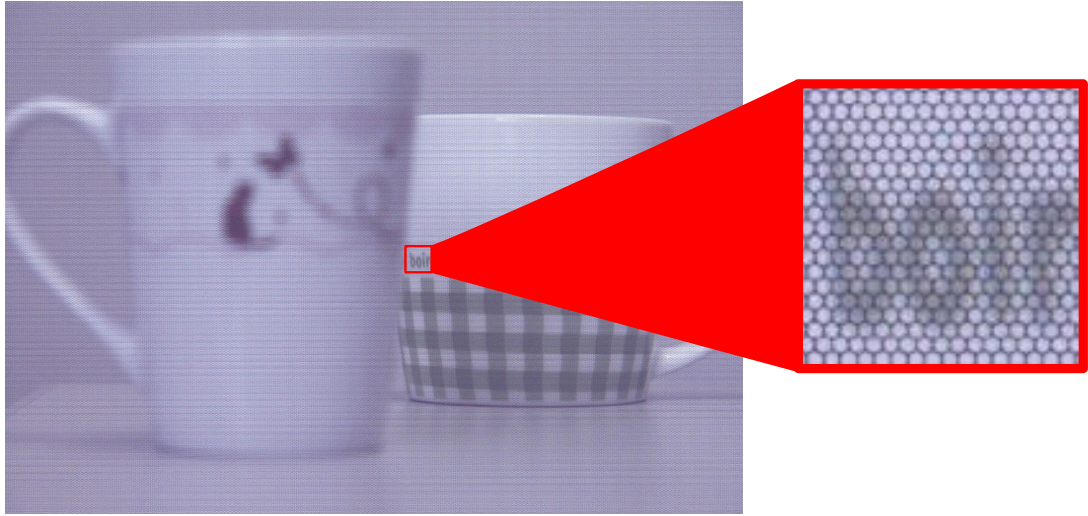


図 4.6 ライトフィールドカメラによる取得画像

図 4.7 に示すように、メインレンズの任意の範囲（部分開口）を通る光は、各マイクロレンズに対して撮像素子の同じ位置に収束する。逆に、到達する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）を作成できる。例えば、図 4.7 (a) に示す位置の素子を集めることで、メインレンズの中央の部分開口画像を作成できる。この処理をメインレンズ全体で行うことで図 4.8 のような画像を作成できる。部分開口画像は、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 [66] 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。図 4.9 に示すように、ライトフィールドカメラの取得画像 I_{ml} からカメラアレイ画像 I_{cam} へは (X, Y) 軸と (u, v) 軸を入れ替えることで変換される。以降では、ライトフィールドカメラにより得られる取得画像は、カメラアレイ画像であるとして取り扱う。図 4.10 に取得画像 I_{ml} からカメラアレイ画像 I_{cam} への変換の例を示す。

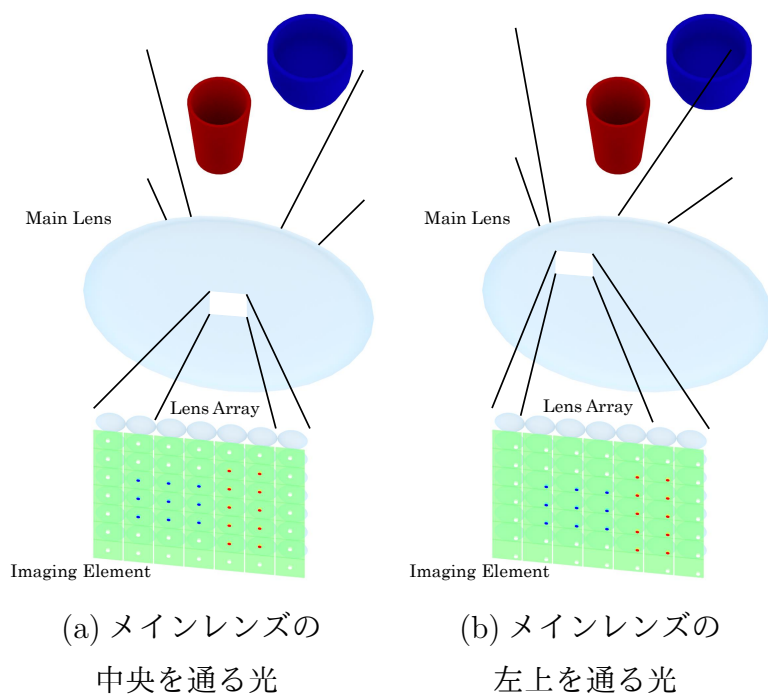


図 4.7 部分開口を通る光

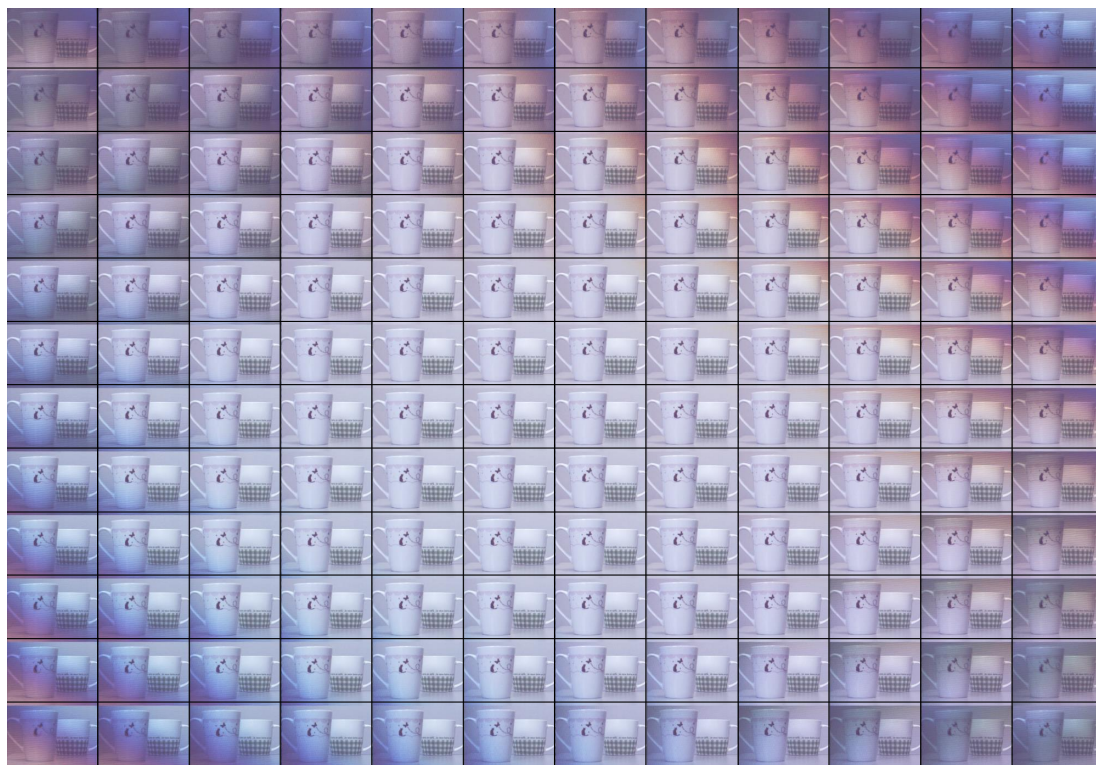


図 4.8 部分開口画像

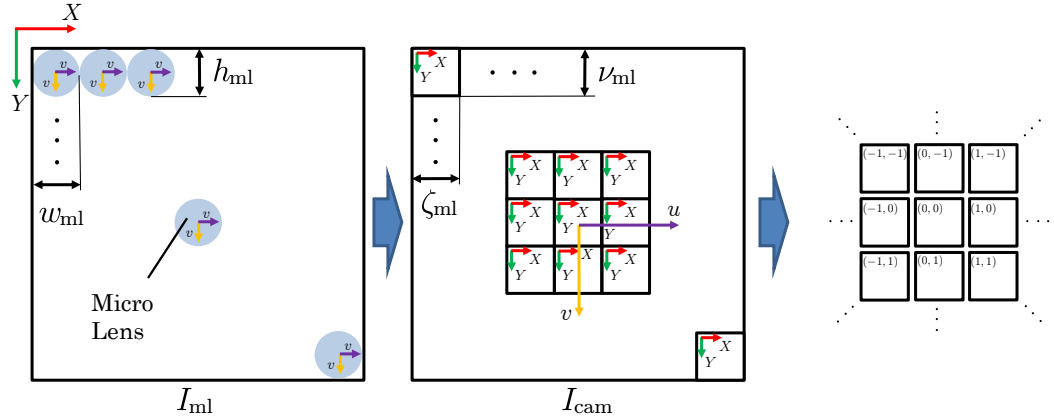


図 4.9 取得画像と部分開口画像の変換

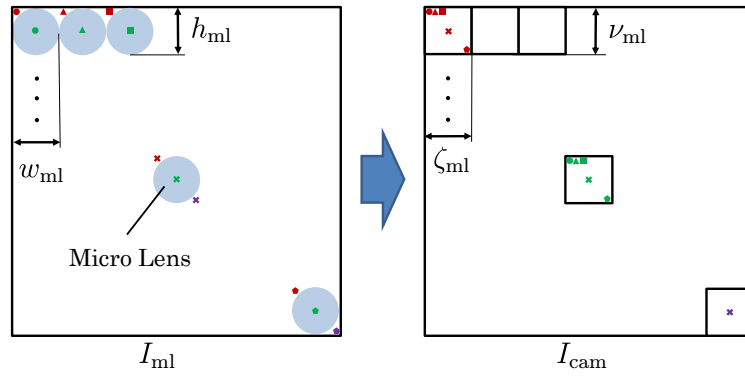


図 4.10 取得画像と部分開口画像の変換例

4.3 カメラアレイ画像間の関係

図 4.11 に示すように、二台のピンホールカメラを光軸が平行になるように配置する。二台のピンホールカメラの画角および撮像面の大きさは同じであるとする。この二台のピンホールカメラで任意の一点を見た場合、以下の関係が成立する。

$$\tan \theta_{\text{tar}} = \frac{x_{\text{tar}}}{d_{\text{img}}} = \frac{d_{\text{cam}}}{d_{\text{tar}}} \quad (4.1)$$

d_{tar} は任意の点までの距離、 d_{img} はカメラの撮像面までの距離、 x_{tar} は撮像面に写った点と光軸との距離、 θ_{tar} は光軸と任意の点の角度、 d_{cam} はカメラ間距離である。

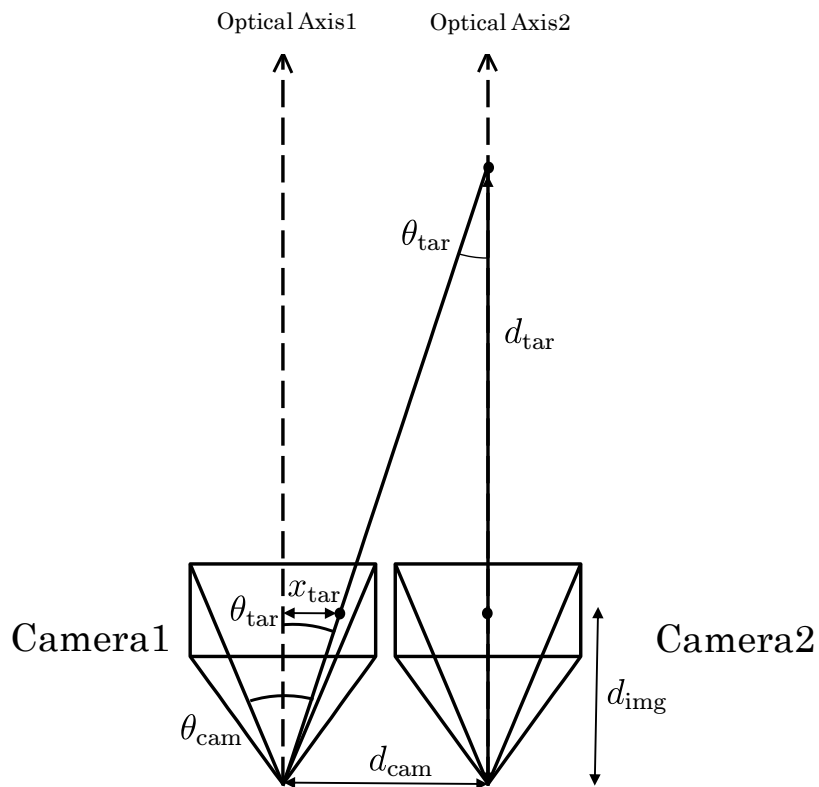


図 4.11 カメラと空間中の点の位置関係

カメラから取得する画像の画素数を W_{cam} 、中心から点 x_{tar} までの画素数を ΔW_{tar} 、カメラの画角を θ_{cam} とすると、それぞれの関係は以下のようなになる。

$$\frac{\Delta W_{tar}}{W_{cam}} = \frac{x_{tar}}{d_{img} \tan \frac{\theta_{cam}}{2}} \quad (4.2)$$

$$\Delta W_{tar} = \frac{W_{cam} d_{cam}}{2 d_{tar} \tan \frac{\theta_{cam}}{2}} \quad (4.3)$$

したがって、カメラから距離 d_{tar} に存在する点は左のカメラでは中心から ΔW_{tar} ピクセル右に写ることになる。

4.4 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である。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 4.12 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 4.13 に示すようになる。図 4.14(a) に示すように、この得られた画像を完全に重ね合わせた場合、無限遠にピントを合わせた画像となる。また、重ね合わせた状態から、図 4.13(a) は左に、図 4.13(c) は右に平行移動させることで、対象物 B にピントが合った画像となる (図 4.14(b))。図 4.14(c) に示すように、さらに平行移動させる距離を大きくすることで、対象物 A にピントが合った画像となる。このように、重ね合わせた状態からそれぞれのカメラの位置に対応する方向に画像を平行移動することで、任意の距離にピントが合った画像を作ることが可能である。カメラアレイの横と縦の数をそれぞれ ζ_{cam} 、 ν_{cam} とし、一つのカメラの横と縦の画素数をそれぞれ W_{cam} 、 H_{cam} とするとき、カメラアレイ画像 $I_{\text{cam}}^{(u,v)}(X,Y)$ から、リフォーカス画像群 $I_{\text{rfc}}(X,Y,Z)$ への変換は以下の式により行う。ave() は平均値を返す関数である。

$$\begin{aligned}
 I_{\text{rfc}}(X,Y,Z) &= \text{ave}_{u,v} (I_{\text{cam}}(X + X_{\text{mv}}(Z,u), Y + Y_{\text{mv}}(Z,v))) \\
 &\quad u = 1, 2, \dots, \zeta_{\text{cam}}, \quad v = 1, 2, \dots, \nu_{\text{cam}} \\
 X_{\text{mv}}(Z,u) &= \frac{W_{\text{cam}} d_{\text{cam}}}{2Z \tan \frac{\theta_{\text{cam}}}{2}} \frac{u - \frac{\zeta_{\text{cam}}}{2}}{\frac{\zeta_{\text{cam}}}{2}} \\
 Y_{\text{mv}}(Z,v) &= \frac{H_{\text{cam}} d_{\text{cam}}}{2Z \tan \frac{\theta_{\text{cam}}}{2}} \frac{v - \frac{\nu_{\text{cam}}}{2}}{\frac{\nu_{\text{cam}}}{2}}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

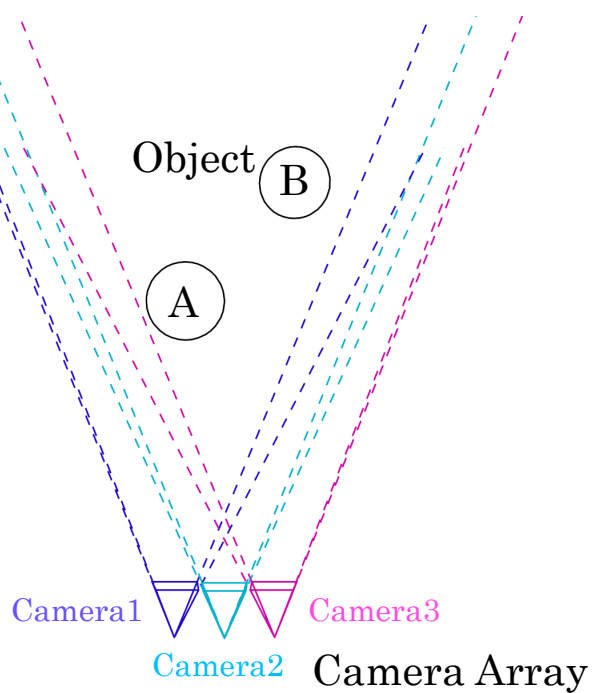
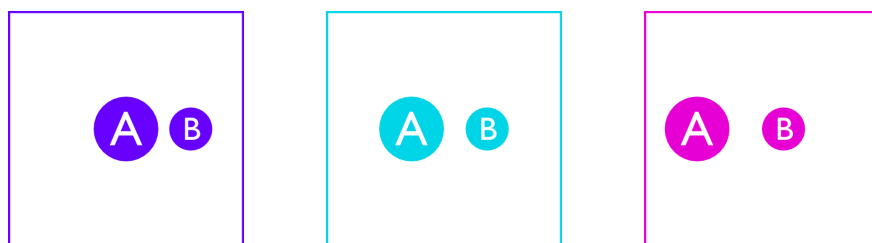
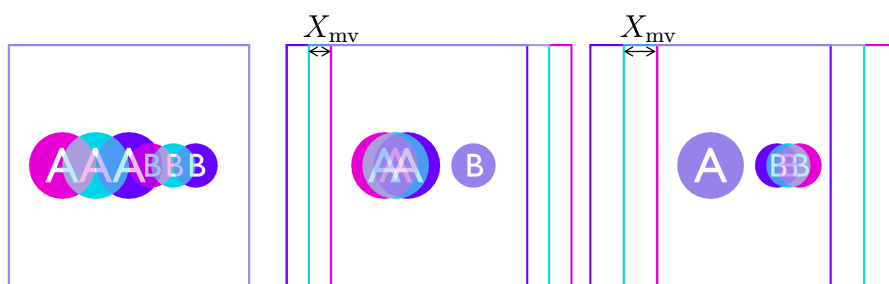


図 4.12 カメラアレイ



(a) カメラ 1 の画像 (b) カメラ 2 の画像 (c) カメラ 3 の画像

図 4.13 カメラアレイにより得られる画像



(a) 無限遠 (b) 対象物 B (c) 対象物 A

図 4.14 ピントを合わせた場合

第5章

空間濃度分布推定手法

本章では、ライトフィールドカメラを用いて、煙、霧などの煙霧体の空間濃度分布を推定する手法を提案する。提案手法では、任意の距離にピントを合わせた画像であるリフォーカス画像を、ライトフィールドカメラにより得られた画像より生成し、リフォーカス画像から空間濃度分布を推定する。

5.1 煙霧体の光学的モデル

図 5.1 に示すように、光源からの光は煙霧体で散乱し、煙霧体を通過してライトフィールドカメラに到達する。位置 p での煙霧体の濃度を $D(p)$ 、煙霧体の吸光断面係数を ρ 、ライトフィールドカメラに到達する光の方向を γ 、 γ 方向の減衰項を τ_γ 、位置 p でのライトフィールドカメラへの散乱光を L_{sct} 、背景の輝度値を L_{bg} と表現するとき、煙霧体を通過してライトフィールドカメラに到達する光の強度 L_{cam} は以下の様になる [67]。

$$L_{\text{cam}} = \int_{p_{\text{cam}}}^{p_{\text{bg}}} \rho D(p) \tau_\gamma(p) L_{\text{sct}} dp + L_{\text{bg}} \tau_\gamma(p_{\text{bg}}) \quad (5.1)$$

$$\tau_\gamma(p) = \exp \left(- \int_{p_{\text{cam}}}^p \rho D(p') dp' \right) \quad (5.2)$$

光源の輝度値を L_{src} とし、光源から位置 p への方向を χ 、光源から位置 p 方向の減衰項を τ_χ 、方向 γ と方向 χ の間の角を θ_{src} 、煙の散乱の指向性を表すフェーズ関数を $\Phi(\theta_{\text{src}})$ とし、一次散乱光のみを考慮した場合、式 (5.1) の初項の散乱光 L_{sct} は以下の様になる。

$$L_{\text{sct}} = L_{\text{src}} \tau_\chi(p) \Phi(\theta_{\text{src}}) \quad (5.3)$$

$$\tau_\chi(p) = \exp \left(- \int_{p_{\text{cam}}}^p \rho D(p') dp' \right) \quad (5.4)$$

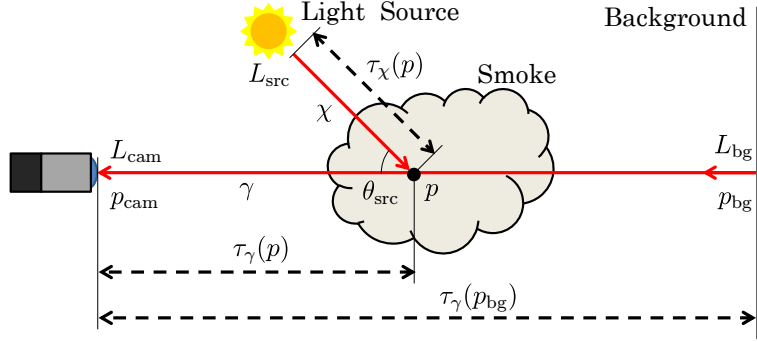


図 5.1 煙を通過する光

背景が十分に暗い場合には、式 (5.1) の第二項は無視できるため以下の様になる

$$L_{cam} = \int_{p_{cam}}^{p_{bg}} \rho D(p) \tau(p) L_{sct} dp \quad (5.5)$$

本研究では、背景が見えるほど濃度の低い煙霧体を対象としている。煙霧体の濃度が十分に低い場合には、減衰項は通常無視され [23, 68]、式 (5.5) は以下の様になる。

$$L_{cam} = \int_{p_{cam}}^{p_{bg}} \rho D(p) L_{src} \Phi(\theta_{src}) dp \quad (5.6)$$

光源をライトフィールドカメラと煙霧体から十分遠くに配置することで、光源を平行光源であるとみなすことができる。したがって、 θ_{src} は一台のライトフィールドカメラに対して煙霧体内のどの位置においても等しくなるため、 $\Phi(\theta_{src})$ も一定となる。さらに、光源と各ライトフィールドカメラとの位置関係が等しくなる位置に各ライトフィールドカメラを配置することで、式 (5.1) は最終的に以下の様になる。

$$L_{cam} \propto \int_{p_{cam}}^{p_{bg}} D(p) dp \quad (5.7)$$

5.2 提案手法の概要

図 5.2 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 5.3 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。リフォーカス画像群は、各距離にピントを合わせたリフォーカス画像を多数生成した画像の群である。次に、リフォーカス画像群を、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、初期濃度分布は空間的にボケた分布となる。提案手法では、濃度の空間的ボケのモデルを仮定し、濃度分布の最適化を行うことで濃度の空間的ボケを除去する。空間的ボケを除去することで、煙霧体の空間濃度分布を推定する。

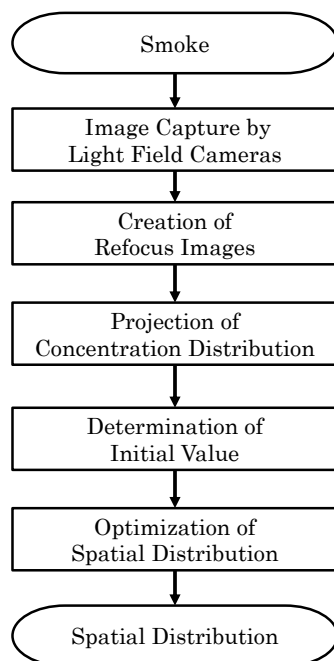


図 5.2 提案手法のアルゴリズム

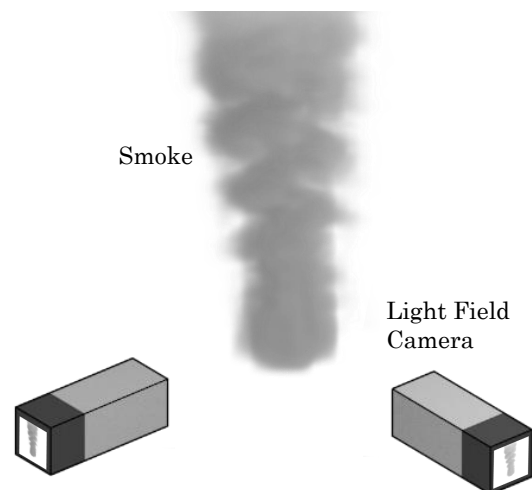


図 5.3 提案手法の概要

5.3 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ことで、ボクセル空間を生成する。次に、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 5.4 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。投影する際には、式 (5.8) に示すように、投影面のカメラからの距離 d_{pro} に比例して投影される各リフォーカス画像を拡大縮小する。 k_{pro} は拡大縮小の係数である。この投影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。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \frac{d_{\text{pro}}}{k_{\text{pro}}} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

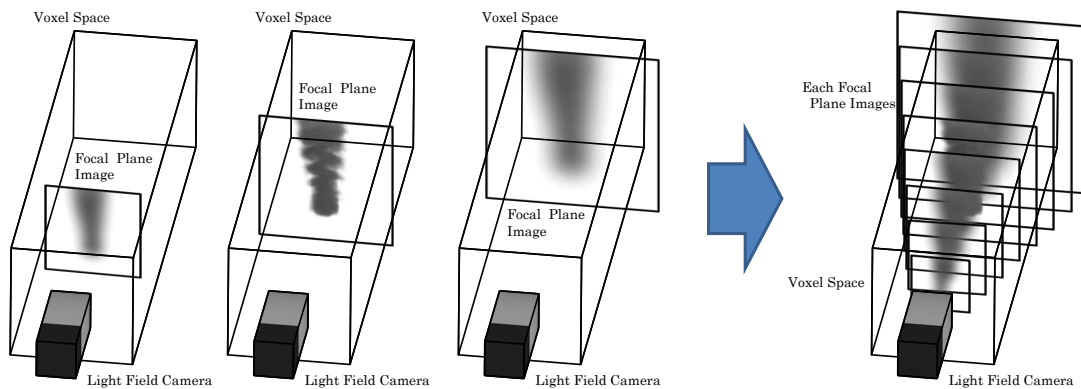


図 5.4 リフォーカス画像の投影

5.4 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群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 $I_{\text{pro},j}(x, y, z)$ とするとき、濃度値 $D_{\text{init}}(x, y, z)$ は式 (5.9) 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 (5.9) の \min は最小値を返す関数である。

$$D_{\text{init}}(x, y, z) = \min_j (I_{\text{pro},j}(x, y, z)), j = 1, 2, \dots, \eta_{\text{lfc}} \quad (5.9)$$

5.5 繰り返し演算による濃度分布の更新

図 5.5 に示すように、取得した画像は複数の位置と方向の情報を含んでいることになる。これらの情報から初期濃度分布を更新する。図 5.6 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。(a) に示すように、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、真の濃度分布に何らかの関数 $F_{\text{psf}}(x, y, z)$ を作用させることで得られることになる。一方、(b) に示すように、推定値から投影される濃度分布も、推定した濃度分布に関数 $F_{\text{psf}}(x, y, z)$ を作用させた濃度分布である。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。濃度分布を更新により、図 5.7 のように、濃度の空間的ボケを除去する。

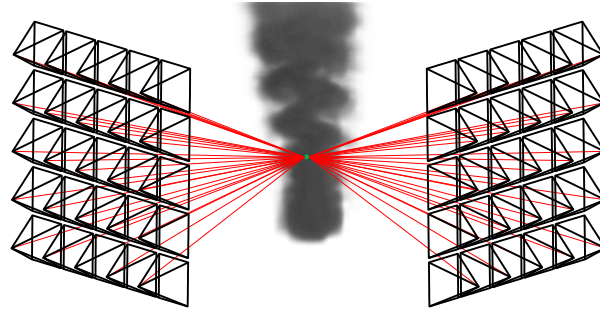


図 5.5 観測される Light Field

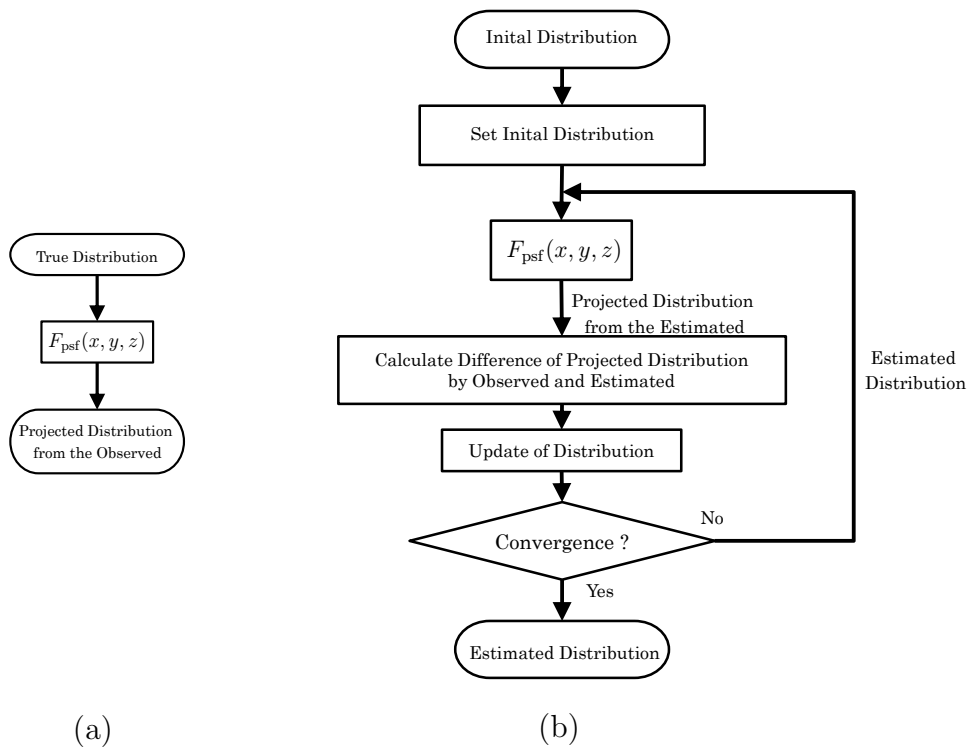


図 5.6 濃度分布の更新アルゴリズムの概要

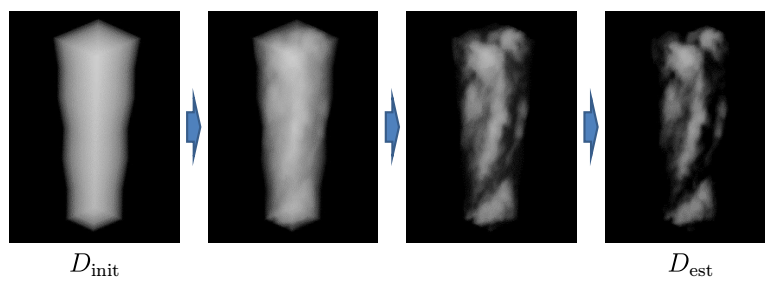
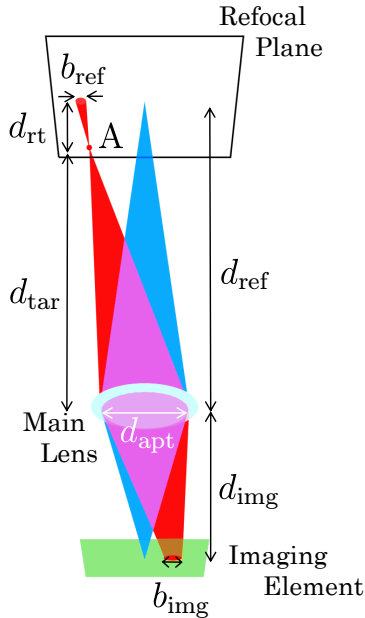


図 5.7 濃度分布の更新

5.5.1 ボケの広がりモデル化

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ボケの広がりモデル化を行う。図 5.8 に示すように、点 A 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_{img} の間に等間隔に到達する。薄凸ズームレンズモデル [69] を用いると、このボケ幅 b_{img} は式 (5.10) の様に表せる。また、到達する光線の光量は位置に依存せず一定であり、ボケ幅内の光線の光量の合計はボケ幅に依存せず一定である。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_{img} は焦点面でのボケ幅 b_{ref} と等価であり、またボケ幅 b_{ref} は式 (5.11) のように表せる。図 5.9 に示すように、リフォーカス画像群を並べた座標系 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 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 (5.12)-(5.14) 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 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ では、点 A から焦点面までの距離 \tilde{d}_{rt} は式 (5.15) のように表すことができ、ボケ幅 \tilde{b}_{ref} は式 (5.16) に示すように距離 \tilde{d}_{rt} に比例することになる。したがって、 $d/z_{r0} = 2$ とすることでライトフィールドカメラによるボケの広がりを式 (5.17) に示す関数で表現することが可能となる。ボケの広がりを図 5.10 に示す。



$$b_{\text{img}} = d_{\text{img}} d_{\text{apt}} \left| \frac{1}{d_{\text{ref}}} - \frac{1}{d_{\text{tar}}} \right| \quad (5.10)$$

$$b_{\text{ref}} = \frac{d_{\text{rt}}}{d_{\text{tar}}} d_{\text{apt}} \quad (5.11)$$

図 5.8 ボケ幅とレンズとの距離

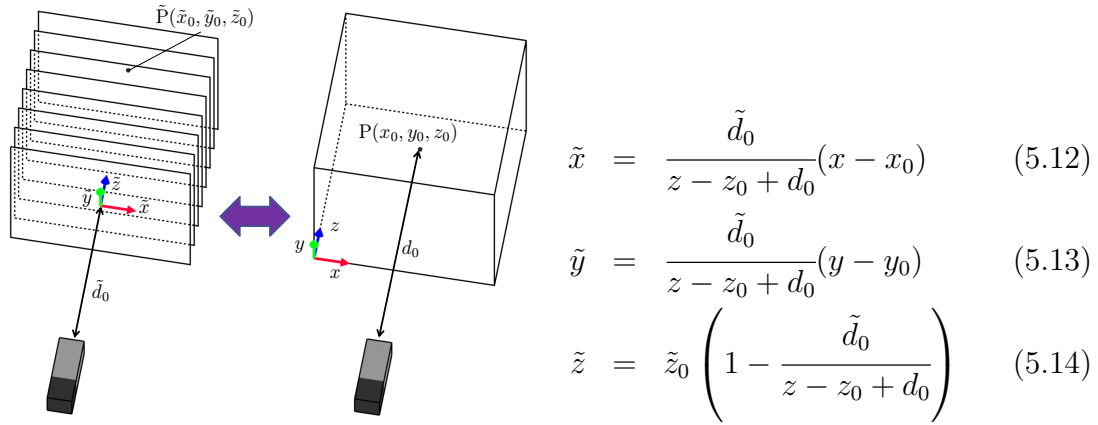


図 5.9 座標変換

$$\tilde{d}_{\text{rt}} = \tilde{z}_0 \left(\frac{\tilde{d}_0}{d_{\text{tar}} - z_0 + d_0} - \frac{\tilde{d}_0}{d_{\text{tar}} + d_{\text{rt}} - z_0 + d_0} \right) \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} \tilde{b}_{\text{ref}} &= \frac{\tilde{d}_0 d_{\text{rt}}}{(d_{\text{tar}} + d_{\text{rt}} - z_0 + d_0)(d_{\text{tar}} - z_0 + d_0)} d_{\text{apt}} \\ &= \frac{d_{\text{apt}}}{z_{r0}} \tilde{d}_{\text{rt}} \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$F_{\text{psf}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) = \begin{cases} \frac{1}{4\tilde{z}^2} & (|\tilde{x}| \leq |\tilde{z}|, |\tilde{y}| \leq |\tilde{z}|) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5.17)$$

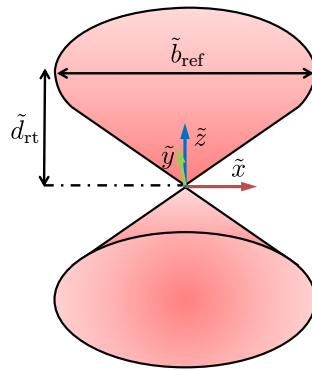


図 5.10 ボケの広がり範囲

5.5.2 濃度分布の更新

まずボケの広がりを実任意の関数 $F_{\text{psf}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ の畳み込みで表現するため、式 (5.18) に示すように、 $D_{\text{pro}}(x, y, z)$ を $D_{\text{pro}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ に写像する。次に、投影された濃度分布 $D_{\text{pro}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ は、式 (5.19) に示すように、本来の濃度分布 $D_{\text{true}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ にボケの広がり関数 $F_{\text{psf}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 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 5.11 に示す。仮の濃度分布 $D_{\text{est}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ を式 (5.20) に示すように関数 $F_{\text{psf}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ で畳み込み積分した濃度分布 $D_{\text{blur}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ が投影された濃度分布 $D_{\text{pro}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ と等しいとき、仮の濃度分布 $D_{\text{est}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ は本来の濃度分布 $D_{\text{true}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ と等しくなる。したがって、式 (5.21) に示すエネルギー E_D を最小化することで、 $D_{\text{est}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ を最適化する。 E_D を最小化するために、式 (5.22) により $D_{\text{est}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ を更新し、式 (5.21) のエネルギー E_D が閾値以下になるまで繰り返す。この時の κ_D は任意の係数とし、これまで求めた初期濃度分布 $D_{\text{init}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ を $D_{\text{est}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ の初期値とする。 $*$ は畳み込みを意味する。複数台のライトフィールドカメラにより濃度分布を更新する場合には、ライトフィールドカメラ j により投影された濃度分布を $D_{\text{pro},j}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ とし、求める濃度分布にボケを考慮した濃度分布を $D_{\text{blur},i,j}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ とするとき、ライトフィールドカメラ j によるエネルギーを式 (5.24) とし、全エネルギーは式 (5.25) となる。これにより、図 5.12 に示すように、ボケの除去が行われる。

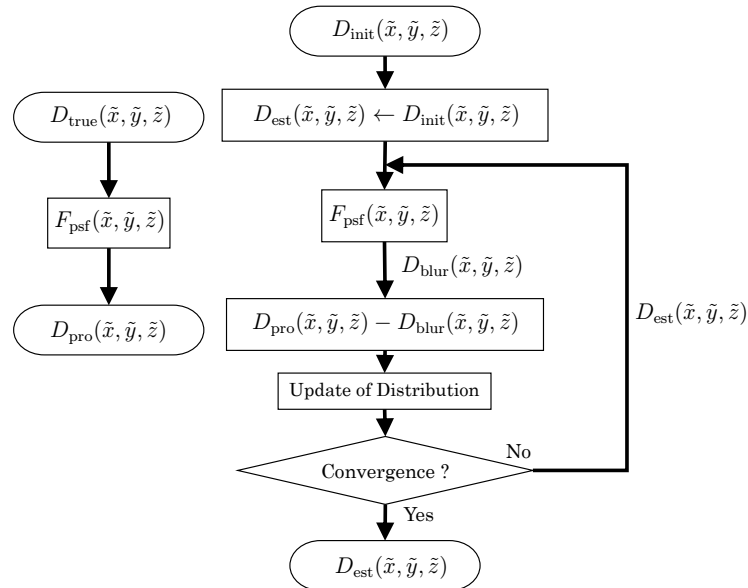


図 5.11 濃度分布の更新アルゴリズム

$$D(x, y, z) \xrightarrow{\tilde{F}} D(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \quad (5.18)$$

$$D_{\text{pro}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) = D_{\text{true}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) * F_{\text{psf}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \quad (5.19)$$

$$D_{\text{blur},i}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) = D_{\text{est},i}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) * F_{\text{psf}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \quad (5.20)$$

$$E_{\text{D},i} = \iiint \{D_{\text{pro}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) - D_{\text{blur},i}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})\}^2 d\tilde{x} d\tilde{y} d\tilde{z} \quad (5.21)$$

$$D_{\text{est},i+1}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) = D_{\text{est},i}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) - \kappa_{\text{D}} \frac{\partial E_{\text{D},i}}{\partial D_{\text{est},i}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})} \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{\text{D},i}}{\partial D_{\text{est},i}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})} = & -2\kappa_{\text{D}} \iiint \left\{ (D_{\text{pro}}(\tilde{x}', \tilde{y}', \tilde{z}') - D_{\text{blur},i}(\tilde{x}', \tilde{y}', \tilde{z}')) \right. \\ & \left. \left(\frac{\partial D_{\text{blur},i}(\tilde{x}', \tilde{y}', \tilde{z}')}{\partial D_{\text{blur},i}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})} \right) \right\} d\tilde{x}' d\tilde{y}' d\tilde{z}' \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$E_{\text{D},i,j} = \iiint \{D_{\text{pro},j}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) - D_{\text{blur},i,j}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})\}^2 d\tilde{x} d\tilde{y} d\tilde{z} \quad (5.24)$$

$$E_{\text{D},i} = \sum_j E_{\text{D},i,j} \quad (5.25)$$

$D_{\text{pro}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$: 投影された濃度分布

$D_{\text{true}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$: 真の濃度分布

$D_{\text{blur}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$: 求める濃度分布にボケを考慮したもの

$D_{\text{est}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$: 求める濃度分布

$D_{\text{init}}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$: 初期濃度分布

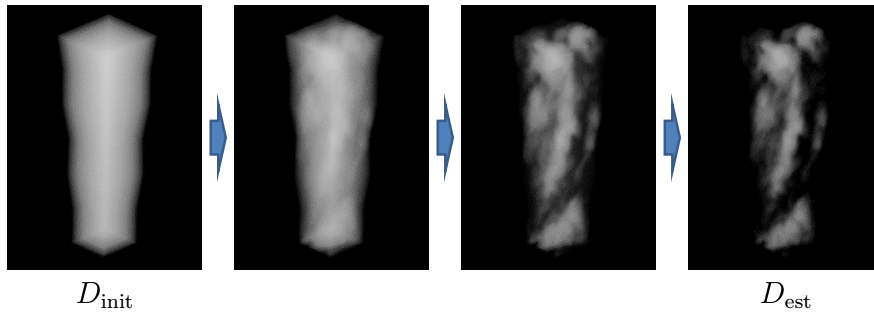


図 5.12 濃度分布の更新による変化

第6章

空間濃度分布推定実験

本章ではシミュレーションおよび実際のライトフィールドカメラを用いて煙を撮影し、煙の三次元の濃度分布を推定した結果を示す。また、ボケモデルを改善することで推定精度が向上することを示す。

6.1 濃度分布推定

6.1.1 シミュレーション環境

提案手法の精度およびボケ除去により精度が向上することを調べるため、シミュレーション実験を行った。シミュレーションで想定した環境を図 6.1 に示す。煙霧体は一辺が 100 mm の立方体内に存在し、その立方体の中心から 100 mm 離れた位置に二台のライトフィールドカメラ同士の向きが 90 deg になるように配置した。ライトフィールドカメラの台数は、実用的で簡便な推定システムを想定するために二台とした。光源は、二台のライトフィールドカメラとの光軸の角度が 45 deg になる位置（二台のライトフィールドカメラの間）で、煙霧体を上方 45 deg から照らす高さに設置した。煙霧体の濃度値の範囲は 0.0~1.0 とし、一辺が 100 mm の立方体を 100^3 個のボクセルで区切り、各ボクセルの濃度を推定した。

ライトフィールドカメラによる撮影画像は、実際のライトフィールドカメラにより得られる画像を考慮して、縦横それぞれ 10 台の仮想カメラにより構成されるカメラアレイの画像として、一枚 600×600 pixel でレンダリングした。また、実際のライトフィールドカメラによる取得画像を想定し、カメラ間距離は 0.67 mm とした。今回の実験では実験結果から光源の指向性による影響を排除するため、いずれのライトフィールドカメラからも光源の光軸とカメラの光軸の間の角が等しくなるように配置した。また、濃度の希薄な煙霧体の場合には、光源からの光

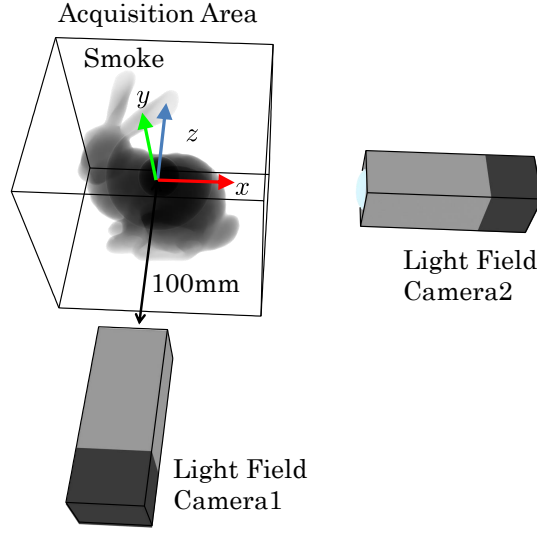


図 6.1 シミュレーション実験環境

は減衰せずに各ボクセルに到達し、濃度に応じて等方散乱する。したがって、シミュレーション画像は以下の式より生成した。

$$I(X, Y) = \sum_{r_{XY}} D_{\text{true}} \quad (6.1)$$

$\sum_{r_{XY}}$ は $I(X, Y)$ の光線方向にボクセルの濃度を加算することを意味する。 r_{XY} は、 $I(X, Y)$ を通る光線方向である。

6.1.2 評価

これらの推定対象に対して濃度分布の一致度を定量的に評価するため、分布一致度として以下の式を定義した。

$$G_{\text{sub}}(\mu_1, \mu_2) = \sqrt[3]{\frac{\eta_{\text{vox}}(\Omega_{\text{sub}}(\mu_1, \mu_2) \cap \Omega_{\text{true}}(\mu_1, \mu_2))}{\eta_{\text{vox}}(\Omega_{\text{sub}}(\mu_1, \mu_2) \cup \Omega_{\text{true}}(\mu_1, \mu_2))}} \quad (6.2)$$

sub は初期 (init) または推定結果 (est) を表す添字である。 $\Omega_{\text{sub}}(\mu_1, \mu_2)$ は、 $\mu_1 < D_{\text{sub}}(\mathbf{x}) \leq \mu_2$ となる D_{sub} の内のボクセルの集合であり、 $\eta_{\text{vox}}(\Omega)$ は集合 Ω のボクセルの数を表す。分布一致度は、真の濃度分布 D_{true} の値を三等分するように、 μ_1 、 μ_2 を設定した。この指標により初期濃度分布の分布一致度 G_{init} と推定結果の分布一致度 G_{est} を算出した。

また、推定結果の各位置での濃度値を評価する指標として、真値との誤差値を以下のように定義した。

$$\varepsilon_{\text{sub}} = \frac{\sum_x \sum_y \sum_z |D_{\text{sub}} - D_{\text{true}}|}{N_{\text{true}}} \quad (6.3)$$

sub は初期 (init) または推定結果 (est) を表す添字である。 N_{true} は、 D_{true} の濃度が0でないボクセルの数である。この指標により初期濃度分布の誤差値 $\varepsilon_{\text{init}}$ と推定結果の誤差値 ε_{est} を算出した。

また、以下の式により相関を求めた。

$$C_{\text{sub}} = \frac{\sum_x \sum_y \sum_z (D_{\text{sub}} - \bar{D}_{\text{sub}})(D_{\text{true}} - \bar{D}_{\text{true}})}{\sqrt{\Lambda_{\text{sub}} \Lambda_{\text{true}}}} \quad (6.4)$$

$$\Lambda_{\text{sub}} = \sum_x \sum_y \sum_z (D_{\text{sub}} - \bar{D}_{\text{sub}})^2 \quad (6.5)$$

$$\Lambda_{\text{true}} = \sum_x \sum_y \sum_z (D_{\text{true}} - \bar{D}_{\text{true}})^2 \quad (6.6)$$

\bar{D}_{sub} 、 \bar{D}_{true} はそれぞれ、 D_{sub} 、 D_{true} の平均値を表す。

6.1.3 シミュレーション結果および考察

提案手法の有効性を調べるため、形状や分布の異なる三つの対象で実験を行った。まず図 6.2 に示すような境界が曖昧で対称性の高い煙霧体の空間濃度分布 (球状) を推定する実験を行った。図 6.3 (a) (d) (g) に、対象の濃度分布を示す。図 6.3 (a) (d) (g) はそれぞれ、対象とした煙霧体の真の空間濃度分布 D_{true} の断面の濃度であり、(a) は上から見た $y = 0$ の断面、(d) はライトフィールドカメラ 1 から見た $z = 0$ の断面、(g) はライトフィールドカメラ 2 から見た $x = 0$ の断面の濃度である。図 6.3 は、濃度をカラーマップで表現している。対象とする煙霧体の濃度は、煙霧体の存在する領域の中心からの距離に応じて線形に減少するものとし、その値は中心で 1.0 とし距離 20 mm で 0.0 となるようにした。

図 6.3 (b) (e) (h) に推定した初期濃度分布 D_{init} を示す。この初期濃度分布 D_{init} から空間的ボケを除去した結果 D_{est} を図 6.3 (c) (f) (i) に示す。提案手法による濃度の値は、 D_{init} 、 D_{est} 共に相対的な値となる。したがって、濃度分布の類似性を評価するため、 D_{init} と D_{est} にそれぞれの ε が最小となる係数を掛けた。また、図 6.4 に、各ライトフィールドカメラの位置から推定した濃度分布をレンダリングした結果を示す。また、 $y = z = 0$ における推定結果を図 6.5 に示す。図 6.3 (e) および (h) は概ね外形と濃度分布が正しく推定できていることがわかる。しかし、(b) に関しては外形が大きく異なり、空間的ボケ除去前の初期濃度分布では不充分であることがわかる。一方、図 6.3 (c) を見ると、初期濃度分布から空間的ボケが除去されることで推定した濃度分布が真値に近づいたことが確認できる。しかし、図 6.3 (f) (i) の $z = 0$ 、 $x = 0$ の断面においては、濃度が左右に広がっていることが確認できる。図 6.6 に分布一致度を示す。図 6.6 を見ると、空間的ボケの除去によりすべての分布一致度が増加したことが確認できる。すべての分布一致度が増加した理由は、図 6.3 (b) の $y = 0$ の断面に見える四角状の分布が、空間的ボケの除去により円状に近づいたためであると考えられる。この結果から、境界が曖昧な煙霧体の空間濃度分布を推定できることが確認できた。

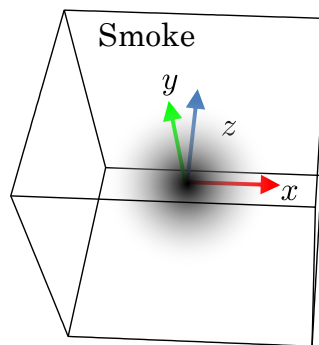


図 6.2 推定対象：球状

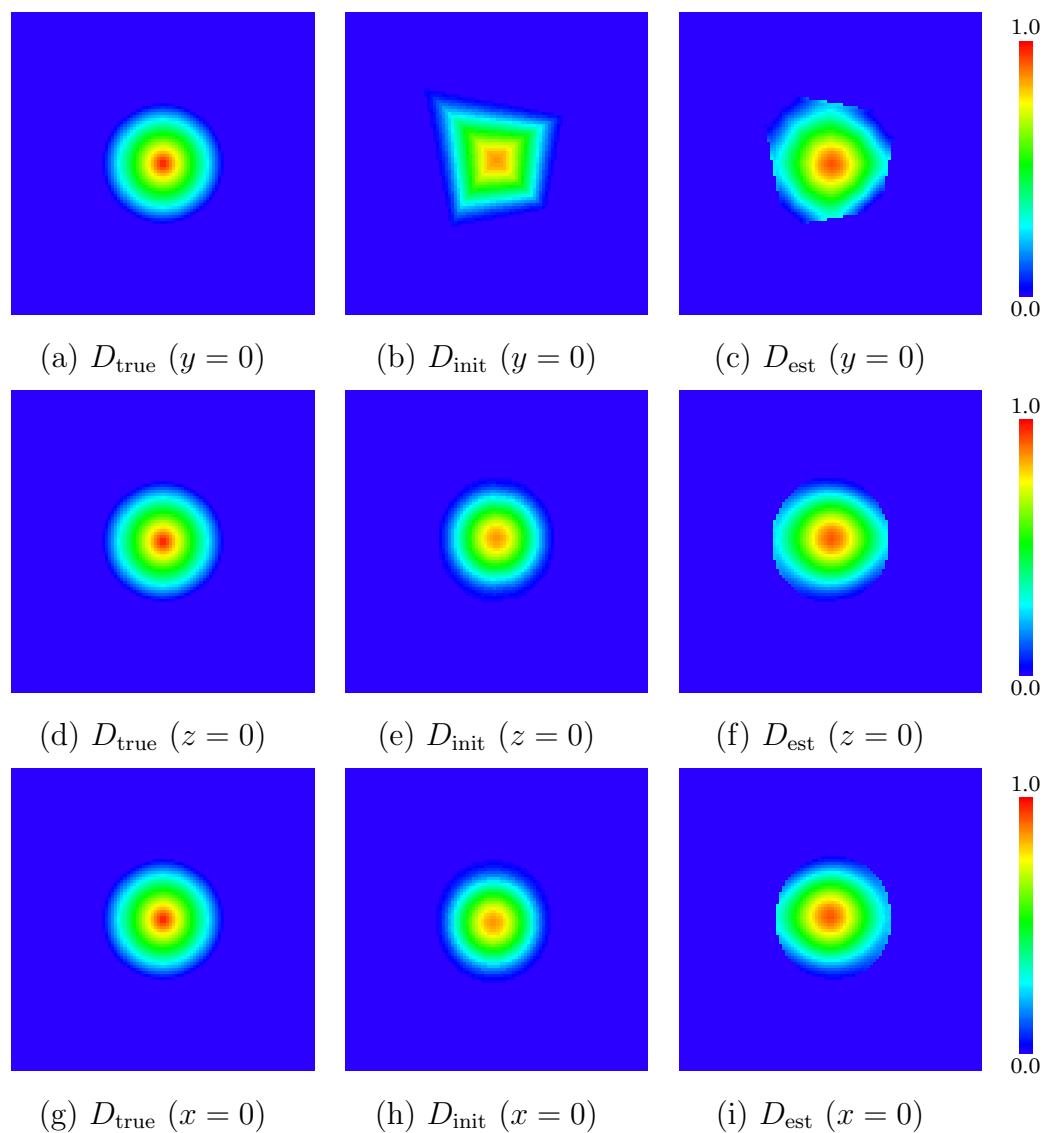
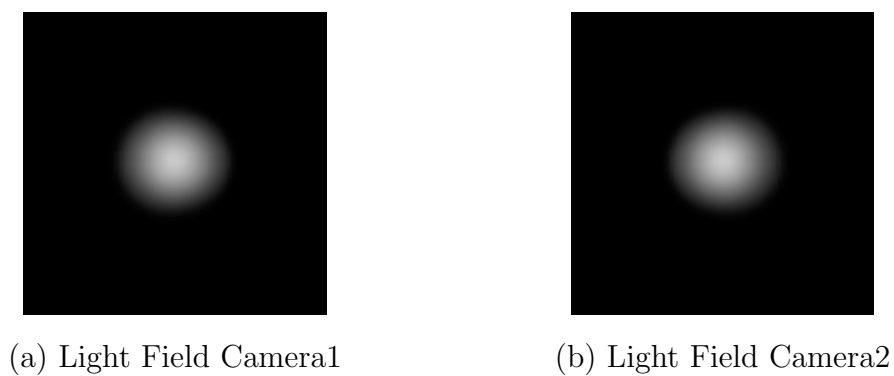


図 6.3 推定結果：球状

図 6.4 D_{est} のレンダリング結果：球状

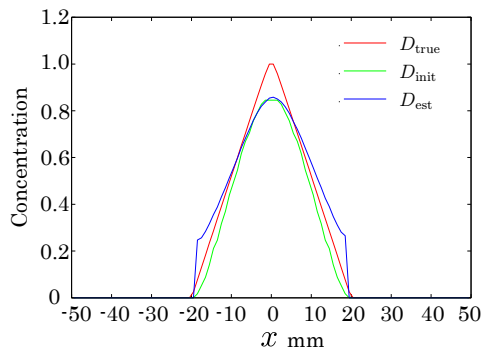


図 6.5 $y = z = 0$ における推定結果：
球状

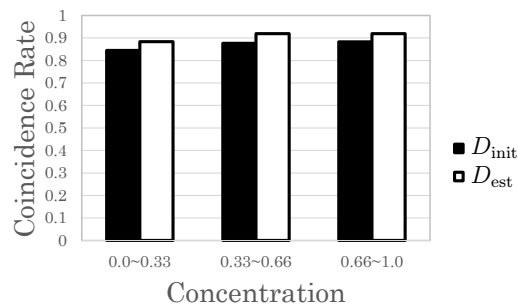


図 6.6 球状の分布一致度

次に、図 6.7 に示すような外形が複雑な煙霧体の空間濃度分布（Bunny 状）を推定する実験を行った。図 6.8 (a) (d) (g) に、対象とした煙霧体の真の空間濃度分布 D_{true} の断面の濃度値を示す。対象とする煙霧体は、外形が Bunny [70] 状であり、濃度が中心からの距離によりステップ状に変化するものとした。

図 6.8 (b) (e) (h) に推定した初期濃度分布 D_{init} を示す。この初期濃度分布 D_{init} から空間的ボケを除去した結果 D_{est} を図 6.8 (c) (f) (i) に示す。また、図 6.9 に、各ライトフィールドカメラの位置から推定した濃度分布をレンダリングした結果を示す。また、 $y = z = 0$ における推定結果を図 6.10 に示す。図 6.8 では、煙霧体が存在している範囲を推定できていることが確認できる。空間的ボケの除去により推定した濃度が真値に近づいたことが確認できる。図 6.11 に分布一致度を示す。図 6.11 を見ると、空間的ボケ除去により濃度（0.0～0.33、0.66～1.0）の分布一致度は増加したが、濃度（0.33～0.66）においては減少した。これは図 6.8 (b) の $y = 0$ の断面に見える四角状の分布が、空間的ボケの除去により真の濃度分布に近づくため、すべての分布一致度が増加する一方で、濃度（0.33～0.66）のボクセルの一部が濃度（0.66～1.0）になったため濃度（0.33～0.66）では減少したと考えられる。この結果から、煙霧体の外形が複雑であっても推定することが確認できた。

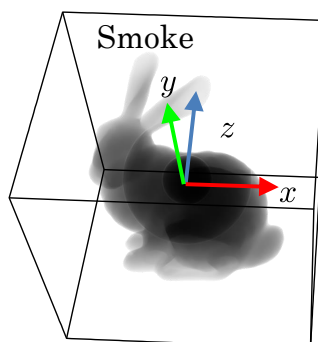


図 6.7 推定対象 : Bunny 状

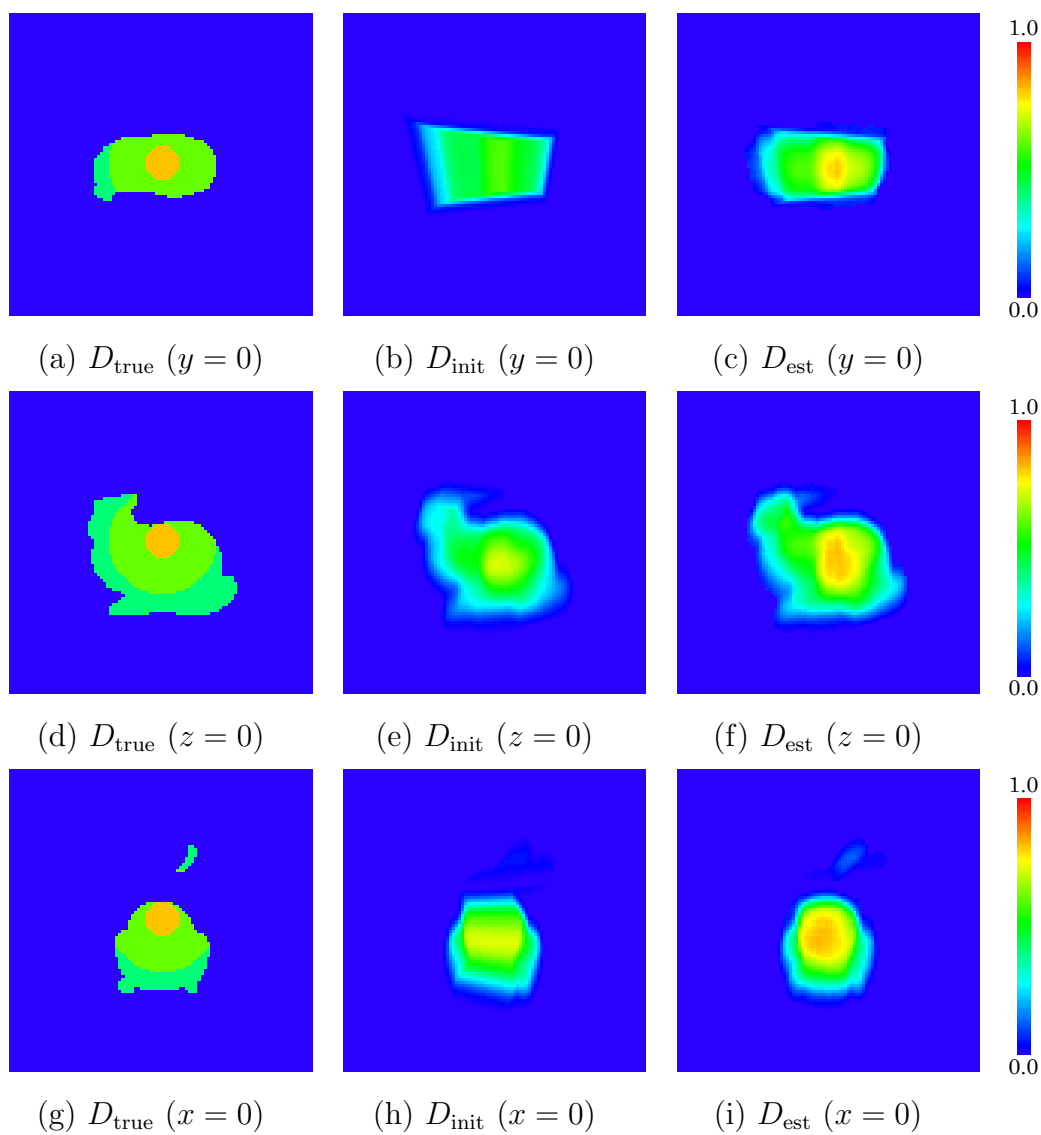
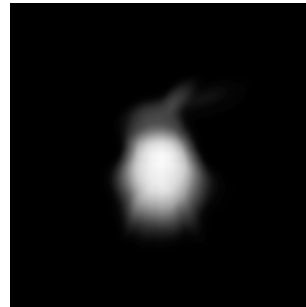


図 6.8 推定結果 : Bunny 状



(a) Light Field Camera1



(b) Light Field Camera2

図 6.9 D_{est} のレンダリング結果 : Bunny 状

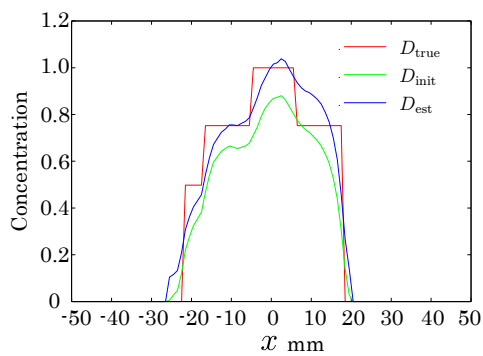


図 6.10 $y = z = 0$ における推定結果 : Bunny 状

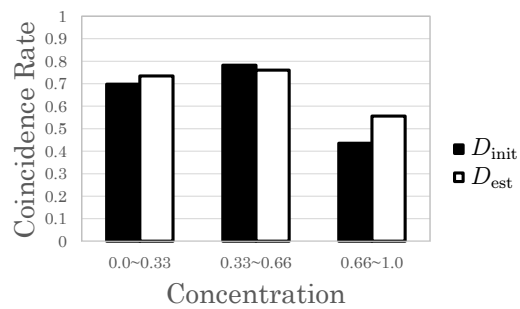


図 6.11 Bunny 状の分布一致度

さらに、図 6.12 に示すような、境界が曖昧な領域とはっきりした領域を持つ煙霧体の空間濃度分布（立方体状）の推定実験を行った。図 6.13 (a) (d) (g) に、対象とした煙霧体の真の空間濃度分布 D_{true} の断面の濃度値を示す。煙霧体の濃度は、 $x = 25$ mm、 $z = -25$ mm で 1.0 となり、 xz 平面上の距離に応じて線形に減衰し、 $x = 25$ mm、 $z = -25$ mm からの距離が 50 mm 以上で 0.0 となるようにした。

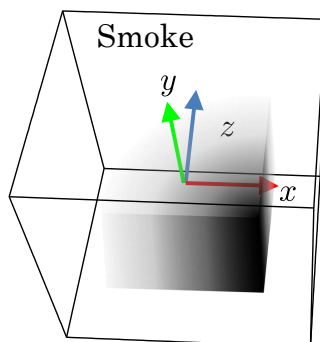


図 6.12 推定対象：立方体状

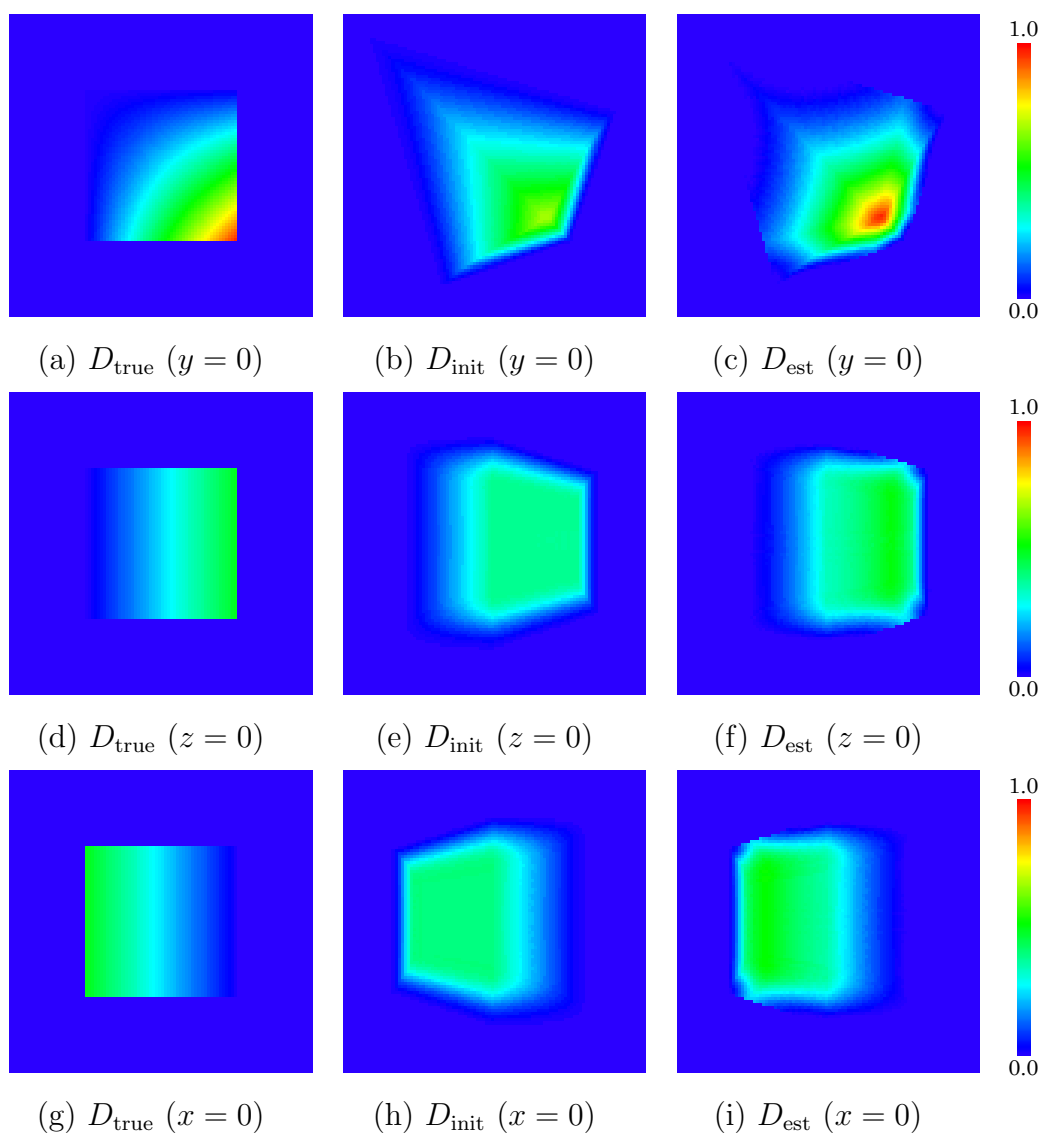
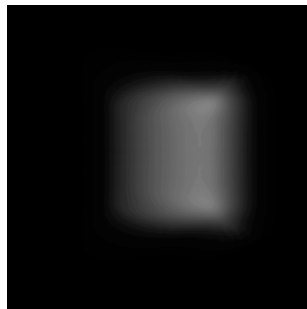
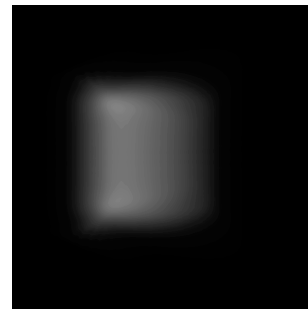


図 6.13 推定結果：立方体状



(a) Light Field Camera1



(b) Light Field Camera2

図 6.14 D_{est} のレンダリング結果：立方体状

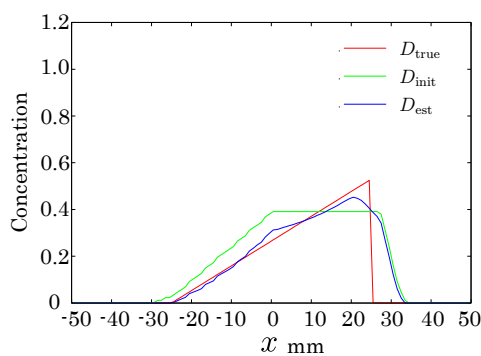


図 6.15 $y = z = 0$ における推定結果：立方体状

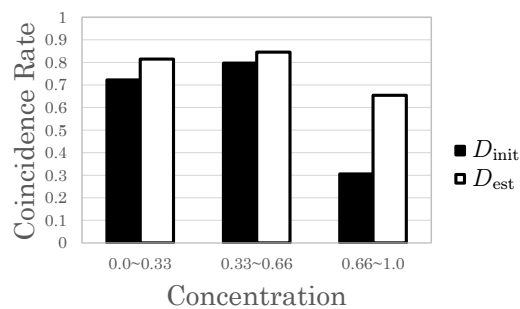


図 6.16 立方体状の分布一致度

図 6.13 (b) (e) (h) に推定した初期濃度分布 D_{init} を示す。この初期濃度分布 D_{init} から空間的ボケを除去した結果 D_{est} を図 6.13 (c) (f) (i) に示す。また、図 6.14 に、各ライトフィールドカメラの位置から推定した濃度分布をレンダリングした結果を示す。また、図 6.15 に、 $y = z = 0$ における推定結果を示す。図 6.13 でも同様に、空間的ボケの除去により推定した濃度が真値に近づいたことが確認できる。また、煙霧体が存在している範囲は、ボケ除去により真値に近づいていることがわかる。空間的ボケモデルはカメラの透視投影の影響を考慮しており、この結果はボケ除去により初期濃度分布の透視投影の影響を補正することができたことを示している。一方、煙霧体が存在している境界でボケたような推定結果が確認された。この理由として、提案している空間的ボケ除去手法により、空間的ボケが完全には除去できていないことが考えられる。境界でのボケは、解の不定性によるものであるためライトフィールドカメラの台数を増やすことで改善できる

と考えられる。図 6.16 に分布一致度を示す。また、図 6.16 を見ると、空間的ボケの除去によりすべての分布一致度が増加したことが確認できる。特に濃度（0.66～1.0）の増加が大きいが、この理由として濃度（0.66～1.0）のボクセルの数が少ないため変動が大きくなったと考えられる。この結果から、境界が曖昧な領域とはっきりした領域を持つ場合でも推定できることが確認できた。

また表 6.3 に各対象における誤差を示す。この結果より、すべての対象においてボケ除去により誤差値が減少したことが確認できる。表 6.2 に相関を求めた結果を示す。誤差の結果と同様に相関についてもすべての対象でボケ除去により相関が大きくなった。これは初期濃度分布を与える際の解の不定性が、空間的ボケの除去によって緩和されたためである。この結果からも空間濃度分布を正しく推定するために、提案したボケ除去の手法が有効であることが確認できる。また、Bunny 状の対象の誤差値が他の対象に比べて高くなった。これは、光線方向の濃度の積分値が同じでも分布は異なる場合がある、という解の不定性により、光線の奥行方向に広く分布する場合と、局所的に濃度が高い分布の場合との区別がつかないこと、対象が非対称性の場合には必ずしも最小値を割り当てるのが良いわけではないことが原因であると考えられる。これらの結果から、提案手法は濃度分布が連続的に変化している煙霧体の濃度分布を推定することに適しており、濃度が急激に変化する濃度分布に対しては精度が低下することがわかった。

表 6.1 真の濃度分布と推定値との平均誤差

	$\varepsilon_{\text{init}}$	ε_{est}
球状	0.075	0.057
Bunny 状	0.354	0.298
立方体状	0.161	0.103

表 6.2 真の濃度分布と推定値との濃度分布の相関

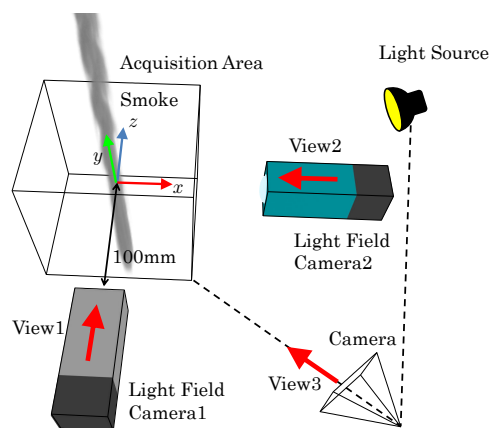
	C_{init}	C_{est}
球状	0.965	0.982
Bunny 状	0.873	0.911
立方体状	0.840	0.897

6.1.4 実測実験

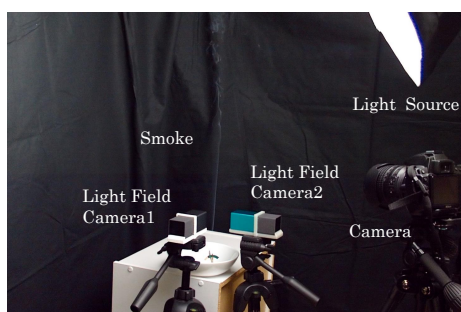
実際のライトフィールドカメラを用いて、煙の空間濃度分布が推定できることを示すため、実測実験を行った。

実験環境

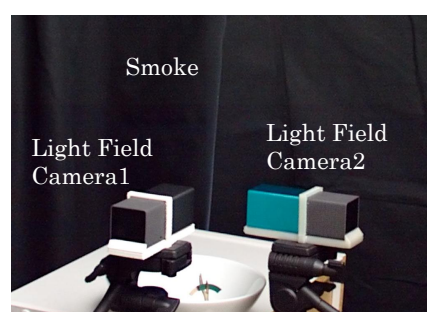
図 6.17 に示すように、シミュレーション実験と同じ配置で実測実験を行った。一辺が 100 mm の立方体の空間を煙の推定範囲とし、二台のライトフィールドカメラ（Lytro 社製 Lytro）は、推定範囲の中心から 100 mm 離れた位置にライトフィールドカメラ同士の光軸の向きが 90 deg になるように設置した。ライトフィールドカメラ（Lytro 社製 Lytro）は、 330×380 個のマイクロレンズが配置されており、 3280×3280 pixel の画像を取得可能である。煙は、推定範囲の下方に線香を設置し、線香により発生させた煙を用いた。また、光源には白色光源を用いて、煙から 1000 mm 離れた位置にライトフィールドカメラと光源の角度が 45 deg になる位置で、煙を上方 45 deg から照らす高さに設置した。各ライトフィールドカメラにより取得したリフォーカス画像の内の一枚を図 6.18 に示す。また、煙の推定範囲のボクセル数は 100^3 個として濃度分布を推定した。また、推定した空間濃度分布 D_{est} をレンダリングした画像の精度を検証するため、推定に使用していない方向から単レンズカメラにより煙を撮影した画像と、同じ方向からレンダリングした画像を比較した。単レンズカメラ（Nikon 社製 D5000）は、二台のライトフィールドカメラの間（ライトフィールドカメラの光軸との角度が 45 deg）になる位置に設置した。また、空間濃度分布の推定がレンダリングに重要であることを示すため、視体積交差法を用いて推定した Visual Hull [59–61] により煙の外形を計測し、内部の濃度を一定としてレンダリングした結果と比較した。



(a) 機器配置

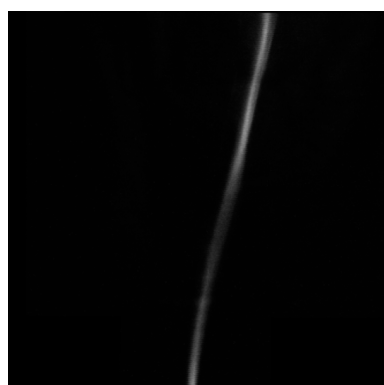


(b) 実験風景

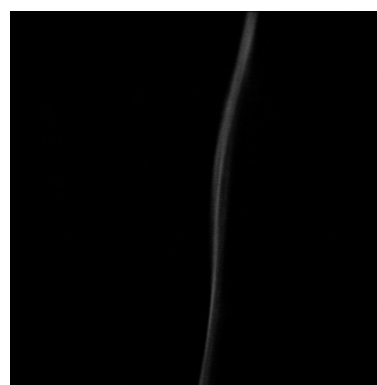


(c) 実験風景の拡大図

図 6.17 実験環境



(a) Light Field Camera1



(b) Light Field Camera2

図 6.18 リフォーカス画像

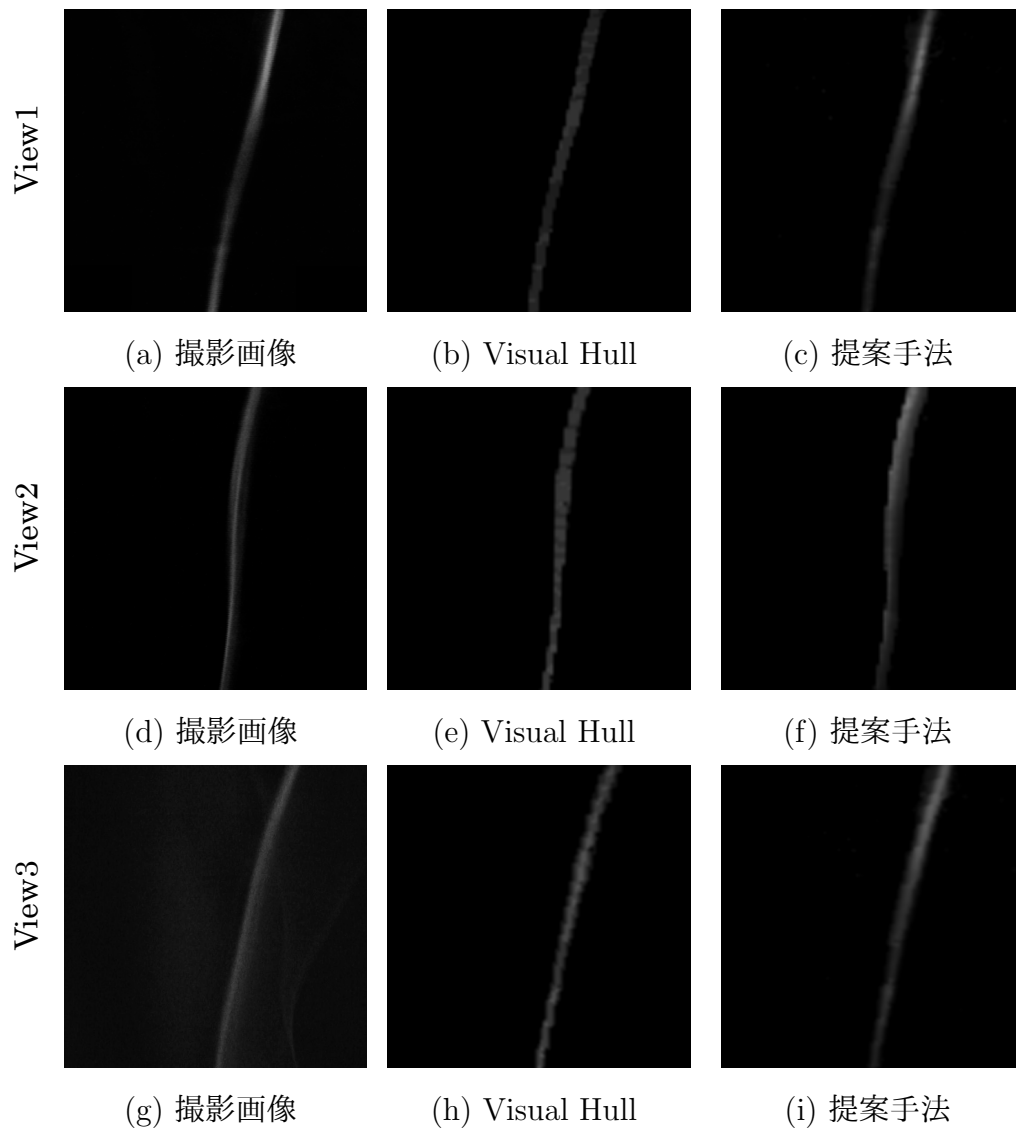


図 6.19 レンダリング結果：(a) (d) (g) 撮影画像、(b) (e) (h) 濃度を一定とした Visual Hull のレンダリング結果、(c) (f) (i) 推定結果 D_{est} のレンダリング画像

結果

図 6.19 (a) (d) に、各ライトフィールドカメラにより取得したリフォーカス画像の一枚を示す。二台のライトフィールドカメラの間から単レンズカメラにより撮影した画像を図 6.19 (g) に示す。図 6.19 (c) (f) (i) はそれぞれ、推定した空間濃度分布 D_{est} を各ライトフィールドカメラおよび単レンズカメラの位置から見た場合の画像をレンダリングした結果である。また、比較のため、図 6.19 (b) (e) (h) に Visual Hull [59–61] の濃度を一定としてレンダリングした結果を示す。

図 6.19 (a) (c) (d) (f) を見ると、推定した空間濃度分布 D_{est} のレンダリング結果は、ライトフィールドカメラの取得画像と類似していることが確認できる。さらに、図 6.19 (g) (i) を見ると、推定した空間濃度分布 D_{est} が、単レンズカメラにより得られた画像と類似していることが確認できる。このことから、推定結果を用いて、空間濃度分布の推定に使用していないカメラの方向から見た場合の煙の画像をレンダリングできることが確認できる。一方、図 6.19 (b) (e) (h) に示す Visual Hull のレンダリング結果は、煙の存在する範囲は反映されているが、濃度分布に関しては不十分であることがわかる。また、Visual Hull の結果は境界で輝度値が不連続に変化していることがわかる。一方提案手法では、実際の煙のように煙の境界が曖昧になっていることが確認できる。これらの結果より、提案手法が濃度の低い煙の空間濃度分布の推定に適していることが確認できた。

6.1.5 考察

提案手法では、散乱の指向性 $\Phi(\theta_{\text{src}})$ を無視するため、光源と各ライトフィールドカメラの光軸の角度 θ_{src} が同じになるように配置している。そのため、ライトフィールドカメラの設置位置に制限がある。この制限については、今後モデルに散乱の指向性を導入することで緩和できると考えられる。また、ライトフィールドカメラは、カメラに近い位置ほど多くの濃度に関する情報を取得する特性を持っている。したがって、ライトフィールドカメラの遠方では、推定精度が低下する問題がある。また、提案手法では [23, 68] と同様に、濃度の低い煙を対象とすることで、多重散乱や減衰を無視してモデル化を行っている。多重散乱は全体の散乱光を強くし、減衰はカメラ遠方からの散乱光ほど弱くする。したがって、現在の提案手法で濃度の高い煙の空間濃度分布を推定した場合には、逆に、多重散乱は全体の濃度を低く、減衰はカメラ遠方の濃度ほど高く推定させる影響を持つ。

これらの影響を除去するために、濃度の高い煙に対してはこれらの現象をモデルに追加することが必要であると考えられる。また、提案手法では空間濃度分布の更新に最急降下法を用いているため、解が局所解に収束している可能性がある。したがって、より最適解に収束する可能性の高い遺伝的アルゴリズムや焼きなまし法を用いることで、推定精度が向上すると考えられる。また、煙の空間濃度分布を時間的に推定することで煙の流れを推定することができると考えられる。

6.2 ボケモデルの改善

現在のボケモデルは、式(5.17)に示すように、ボケ幅内で光量は位置に依存せず一定であると仮定している。リフォーカス画像は、カメラアレイによる取得画像を重ね合わせることで生成されるため、平均フィルタを施した画像であるとみなされる。しかし実際の取得画像は、画像中心部に対し周辺部が暗い画像が取得される。そのため、作成したリフォーカス画像もこの影響を受けた画像となる。したがって、ボケモデルにこの影響を導入し、ボケモデルを改善する必要がある。また、煙霧体には光の散乱の指向性が存在する。したがって、ボケのモデルを光の散乱を考慮したモデルにすることで推定精度が向上すると考えられる。本節では、ボケの広がりを実測することでボケモデルを改善し、さらに散乱の指向性を導入したボケモデルで推定実験を行う。

6.2.1 フィルタの推定

リフォーカス画像群がどのようなフィルタを施した画像であるかを調べるために、式 (6.7) に示す平均フィルタ、式 (6.8) に示すガウスフィルタ、式 (6.9) に示す三角形フィルタを施した場合で比較した。図 6.20 に各フィルタを施した画像の一部を示す。

$$F_{\text{fil}} = 1 \quad \left(1 > \frac{X}{\sigma}, 1 > \frac{Y}{\sigma} \right) \quad (6.7)$$

$$F_{\text{fil}} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left(-\frac{X^2 + Y^2}{2\sigma^2} \right) \quad (6.8)$$

$$F_{\text{fil}} = 1 - \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\sigma} \quad \left(1 > \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\sigma} \right) \quad (6.9)$$

X 、 Y は各画素の位置であり、 σ はフィルタの幅を決定する係数である。

図 6.21 に示すように、ぼかした画像は元画像にフィルタを畳み込んだ画像である。フーリエ変換後の値を $I_{\mathcal{F}}$ とするとき、図 6.21 のフーリエ変換後の画像は $\log |I_{\mathcal{F}}|$ を表した画像である。ぼかした画像は、元画像およびフィルタをフーリエ変換し、掛け合わせた後、逆フーリエ変換した画像として表すことができる。したがって、式 (6.12) に示すように $\mathcal{F}[I_{\text{psf}}]$ を求め逆フーリエ変換することでフィルタを求めることができる。求めたフィルタを図 6.22 に示す。図 6.22 は、カラーマップにより値を表示している。この結果から、リフォーカス画像は線形フィルタが作用したものであることが確認できる。 $*$ は畳み込みを表し、 \cdot は積を表す。

$$I_{\text{blur}} = I_{\text{inf}} * I_{\text{psf}} \quad (6.10)$$

$$\mathcal{F}[I_{\text{blur}}] = \mathcal{F}[I_{\text{inf}}] \cdot \mathcal{F}[I_{\text{psf}}] \quad (6.11)$$

$$\mathcal{F}[I_{\text{psf}}] = \mathcal{F}[I_{\text{blur}}] / \mathcal{F}[I_{\text{inf}}] \quad (6.12)$$

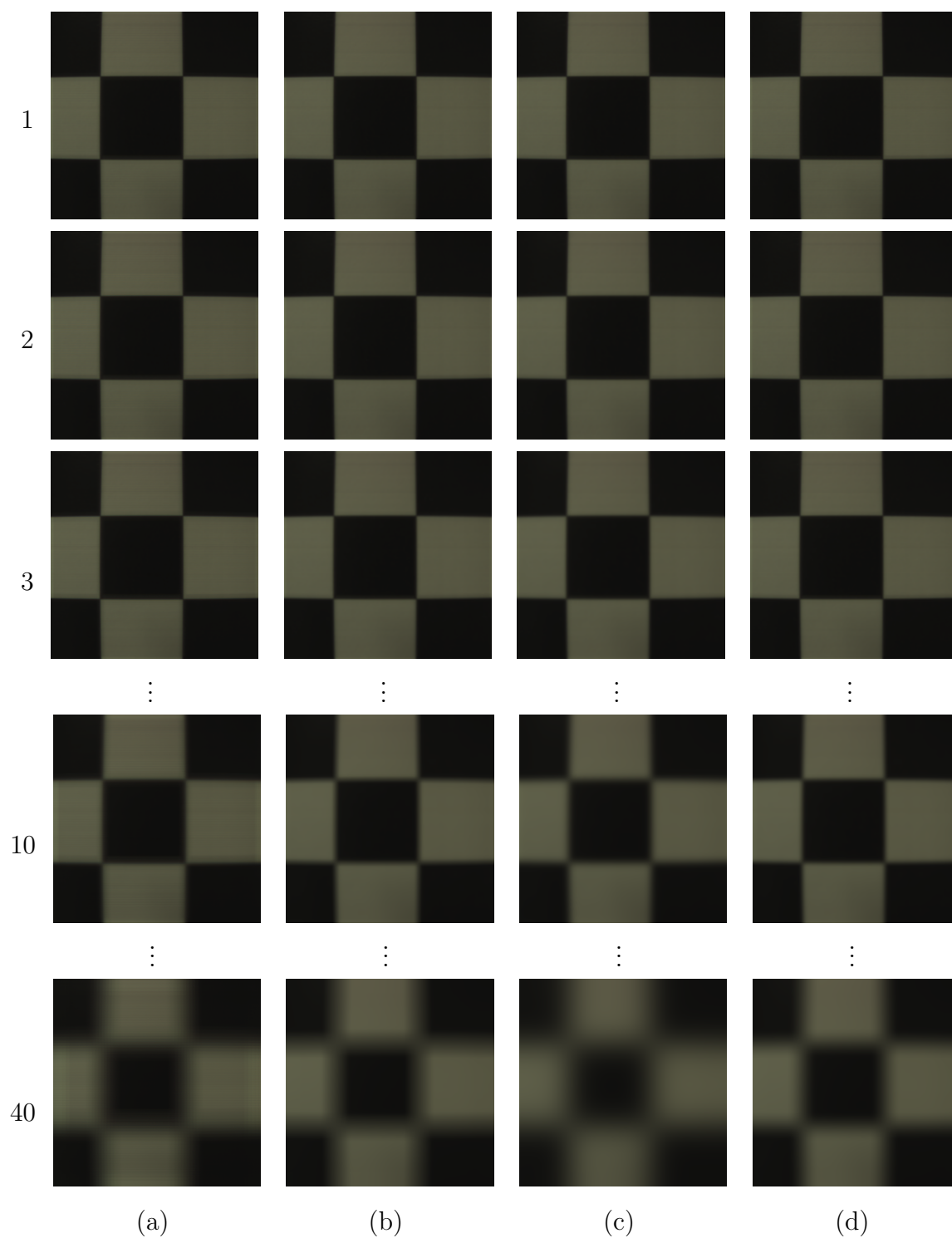
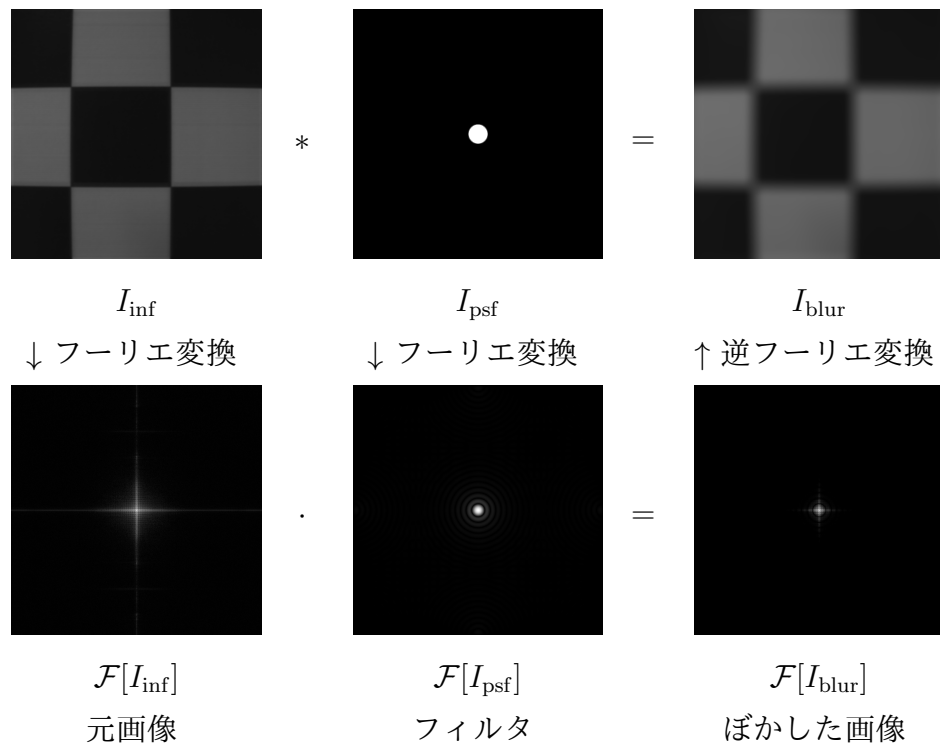
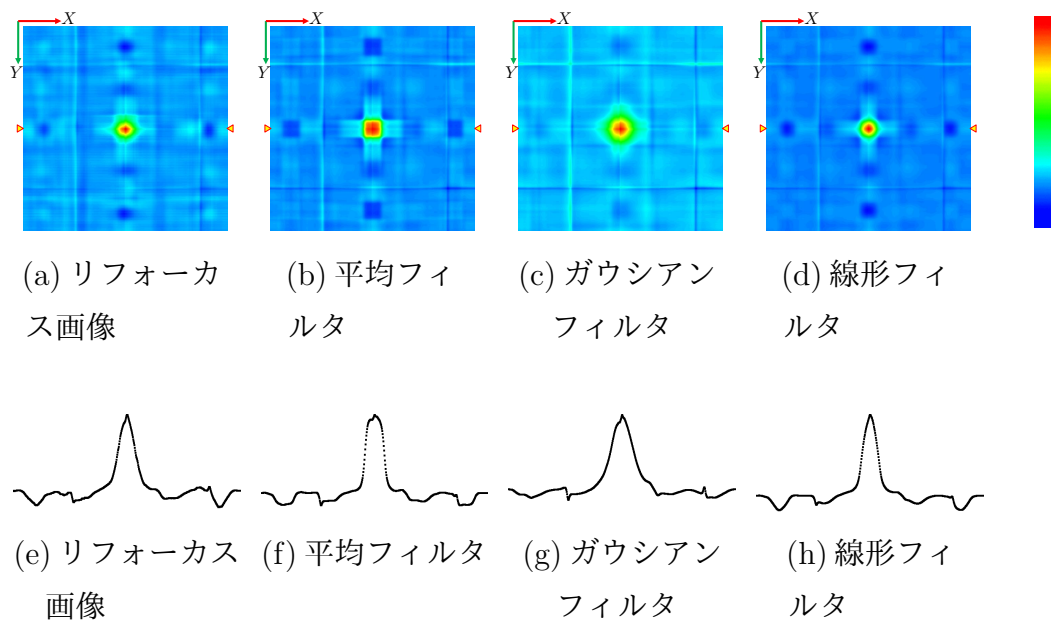


図 6.20 リフォーカス画像とぼかした画像 600×600 pixel(ボケ幅=1、2、3、10、40 pixel) : (a) リフォーカス画像、(b) 平均フィルタ、(c) ガウシアンフィルタ、(d) 線形フィルタ

図 6.21 ボケとフーリエ変換 (*は畳み込みを表し、 \cdot は積を表す)図 6.22 求めたフィルタ画像: (a) - (d) フィルタ画像、(e) - (h) フィルタの中心での X 方向への変化

6.2.2 実測実験

計測したボケモデルおよび光の指向性を考慮した場合に、推定結果が向上することを確認するため実験を行った。図 6.17 に示すような配置で実測実験を行った。一辺が 100 mm の立方体の空間を煙の推定範囲とし、二台のライトフィールドカメラ（Lytro 社製 Lytro）は、推定範囲の中心から 100 mm 離れた位置にライトフィールドカメラ同士の光軸の向きが 90 deg になるように設置した。煙は、推定範囲の下方に線香を設置し、線香により発生させた煙を用いた。また、光源には白色光源を用いて、煙から 1000 mm 離れた位置にライトフィールドカメラと光源の角度が 45 deg になる位置で、煙を上方 45 deg から照らす高さに設置した。各ライトフィールドカメラにより取得したリフォーカス画像の内の一枚を 6.24 (a) と (e) に示す。式 (5.6) の煙の散乱の指向性 $\Phi(\theta_{\text{src}})$ は、以下に示すフェーズ関数として推定を行った（図 6.23）。

$$\Phi(\theta_{\text{src}}) = 1 + \cos^2 \theta_{\text{src}} \quad (6.13)$$

また、煙の推定範囲のボクセル数は 100^3 個として濃度分布を推定した。また、推定した空間濃度分布をレンダリングした画像の精度を検証するため、推定に使用していない方向から単レンズカメラにより煙を撮影した画像と、同じ方向からレンダリングした画像を比較した。単レンズカメラ（Nikon 社製 D5000）は、二台のライトフィールドカメラの間（ライトフィールドカメラの光軸との角度が 45 deg）になる位置に設置した。また、比較のため Visual Hull [59–61] により煙の外形を計測し、内部の濃度を一定としてレンダリングした結果と比較した。

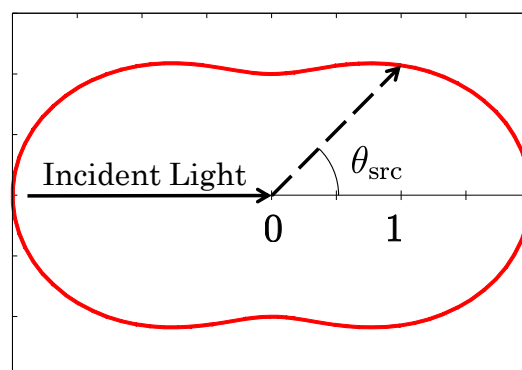


図 6.23 フェーズ関数

6.2.3 評価

画像の類似度を数値的に評価するため、画像の各領域におけるヒストグラムの相関を求めた。まず、レンダリング画像と撮影画像（600 × 600pixel）を縦横 30 × 30 個の計 900 個の領域に分割し、各領域内のヒストグラムを算出した。次に、それぞれの領域内において以下のように各領域においてレンダリング画像と撮影画像のヒストグラムの相関を求めた。

$$C(H_1, H_2) = \frac{\sum_I (H_1(I) - \overline{H_1})(H_2(I) - \overline{H_2})}{\sqrt{\sum_I (H_1(I) - \overline{H_1})^2 \sum_I (H_2(I) - \overline{H_2})^2}} \quad (6.14)$$

$C(H_1, H_2)$ の値域は、 $-1.0 \sim 1.0$ である。 H_1 は撮影画像のヒストグラム、 I は輝度値、 H_2 はレンダリング画像のヒストグラム、 $\overline{H_1}$ および $\overline{H_2}$ は H_1 および H_2 の平均値であり以下のように求める。

$$\overline{H_1} = \frac{\sum_I (H_1(I))}{\eta_l} \quad (6.15)$$

η_l は輝度値の分解能である。

6.2.4 結果

図 6.24 (a) (i) にリフォーカス画像、(q) に単レンズカメラにより撮影された画像を示す。図 6.24 (d) (l) (t) に、ボケの計測および指向性の導入により改善された推定結果 D'_{est} を各ライトフィールドカメラおよび単レンズカメラの位置から見た場合の画像をレンダリングした結果を示す。図 6.24 (c) (k) (s) に改善する前の推定結果 D_{est} のレンダリング画像を示す。図 6.24 (b) (j) (r) に Visual Hull [59–61] の濃度を一定としてレンダリングした結果を示す。図 6.24 (e) - (h) (m) - (p) にそれぞれの拡大画像を示す。さらに、図 6.25 に、各ライトフィールドカメラから見た場合のレンダリング画像をカラーマップで表した画像を示す。

図 6.26 に煙の場合のヒストグラムの相関図を示す。図 6.26 (a) (d) (g) は Visual Hull のヒストグラムの相関図であり、(b) (e) (h) は改善前の推定結果のヒストグラムの相関図であり、(c) (f) (i) は改善した推定結果のヒストグラムの相関図である。図 6.27 は相関図からさらにヒストグラム求めたものである。表 6.3 に、煙の場合のヒストグラムの相関の平均値を示す。

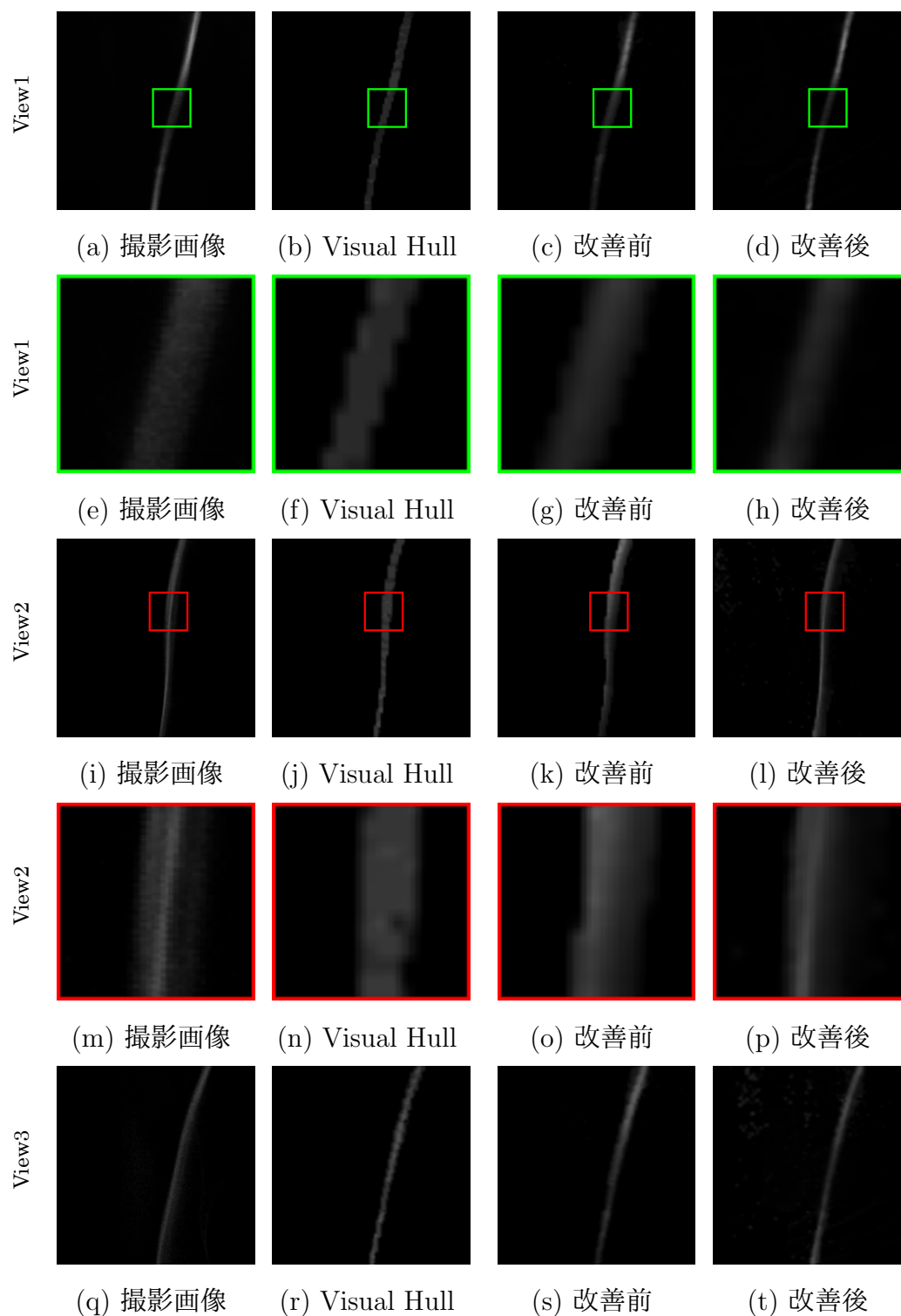


図 6.24 煙のレンダリング結果：(a) (i) (q) 撮影画像、(b) (j) (r) 濃度を一定とした Visual Hull のレンダリング画像、(c) (k) (s) 推定結果 D_{est} のレンダリング画像、(d) (l) (t) 改善した推定結果 D'_{est} のレンダリング画像、(e) - (h) (m) - (p) 拡大画像

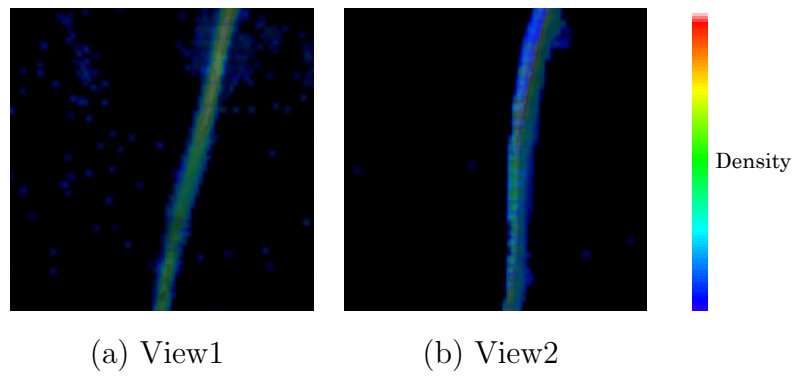


図 6.25 改善した推定結果 D_{est} のカラーマップによるレンダリング画像

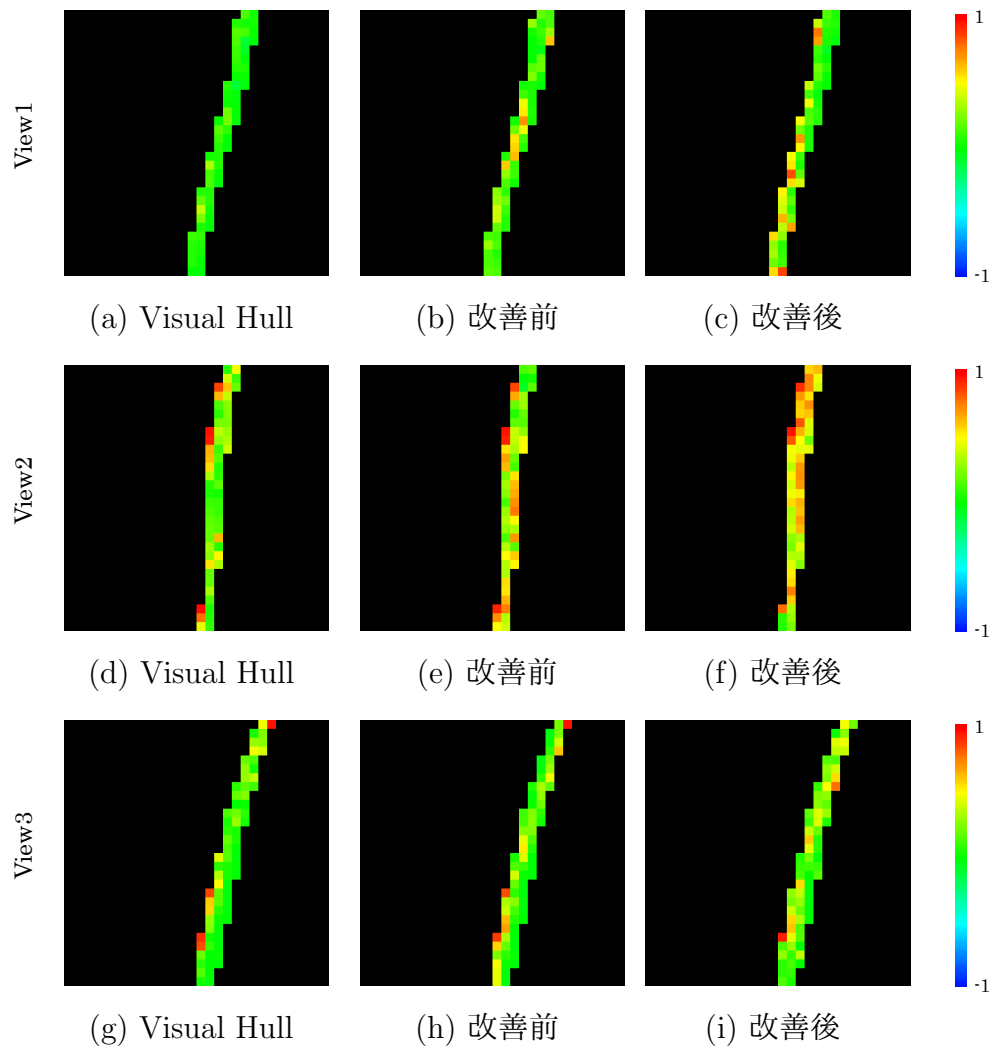
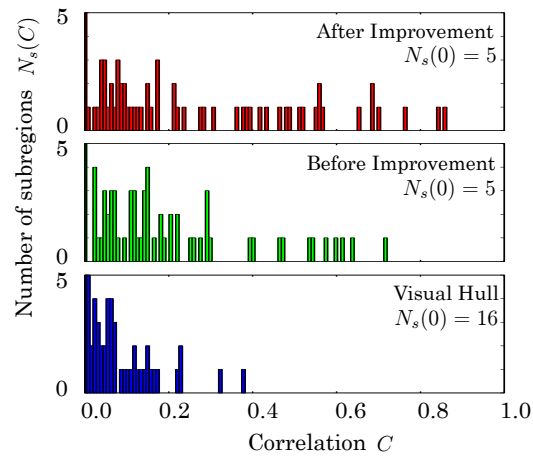
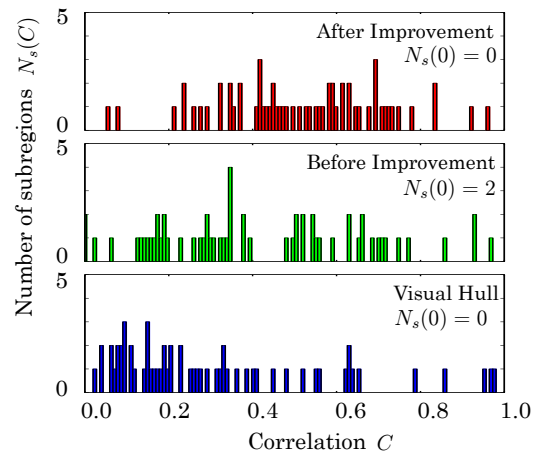


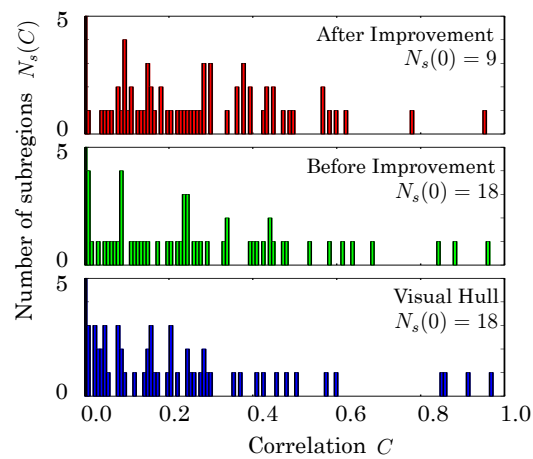
図 6.26 各領域内のヒストグラムより得られた相関図



(a) View1



(b) View2



(c) View3

図 6.27 相関図のヒストグラム

表 6.3 ヒストグラムの相関の平均値

	Visual Hull	Before Improvement	After Improvement
View1	0.064	0.20	0.26
View2	0.32	0.42	0.52
View3	0.18	0.21	0.25

6.2.5 考察

図 6.24 (a) (d) (i) (l) より、改善した推定結果 D'_{est} とライトフィールドカメラによる撮影画像は、全体的に概ね類似していることが確認できる。特に図 6.24 (m) と (p) は他の結果よりも類似していることが確認できる。さらに、図 6.24 (q) (t) より、単レンズカメラによる撮影画像と D'_{est} が全体的に似ていることが確認できる。図 6.24 (b) (j) (r) に示すように、Visual Hull のレンダリング画像は煙の存在範囲により濃度が増減しているように見える。また、図 6.24 (f) に示すように、Visual Hull の結果は、ジャギーが発生している。一方、図 6.24 (h) に示すように、改善した推定結果はジャギーは発生せず、なめらかである。図 6.25 に示すように、カラーマップのレンダリング結果から煙の中心において濃度が高いことが確認できる。しかしながら、カラーマップのレンダリング結果では雑音が存在することが確認できる。図 6.27 より、改善した推定結果の相関のヒストグラムは、より高い値へと移動していることが確認できる。表 6.3 より、改善した推定結果のヒストグラムの相関の平均は、他の場合に比べて高いことが確認できる。これらの結果から、ボケの計測と指向性の導入により推定精度が向上することが確認できた。

第7章

透明物体形状推定手法

本章では、ライトフィールドカメラを用いて、透明物体の三次元形状を推定する手法を提案する。提案手法では、ライトフィールドカメラをカメラアレイとみなした際に発生する光学的部分恒常性に着目し、透明物体を通過する光線の収束性を利用することで透明物体の表面形状を推定する。

7.1 透明物体の光学的モデル

図 7.1 に示すように、透明物体を見た時の光の屈折を考える。この時の光の屈折角の関係はスネルの法則より以下ようになる。

$$n_{\text{air}} \sin \theta_{\text{air}} = n_{\text{tra}} \sin \theta_{\text{tra}} \quad (7.1)$$

$$\theta_{\text{tra}} = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_{\text{air}}}{n} \right) \quad (7.2)$$

n は $n_{\text{tra}}/n_{\text{air}}$ である。つぎに、 θ_{air} の変化に対する θ_{tra} の変化を考えると以下のよう表現できる。

$$\Psi(\theta_{\text{air}}) = \frac{\partial \theta_{\text{tra}}}{\partial \theta_{\text{air}}} \quad (7.3)$$

$$= \frac{\cos \theta_{\text{air}}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{\text{air}}}} \quad (7.4)$$

したがって、 $\Delta \theta_{\text{tra}}$ は $\Delta \theta_{\text{air}}$ を用いて以下のように書ける。

$$\Delta \theta_{\text{tra}} \approx \frac{\partial \theta_{\text{tra}}}{\partial \theta_{\text{air}}} \Delta \theta_{\text{air}} \quad (7.5)$$

$$\approx \frac{\cos \theta_{\text{air}}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{\text{air}}}} \Delta \theta_{\text{air}} \quad (7.6)$$

透明物体の周囲が空気であるとき $1 < n \leq 2.5$ 程度であるため、 $\cos \theta_{\text{air}} \neq 0$ となる領域であれば、視線の角度が変化することで θ_{tra} も変化する。特に、透明物体の中央付近において $\theta_{\text{air}} \approx 0$ となる領域では $\Delta \theta_{\text{tra}} = \Delta \theta_{\text{air}}/n$ となる。このように、透明物体では、視点が変化することで異なる位置からの光を観測することになる。

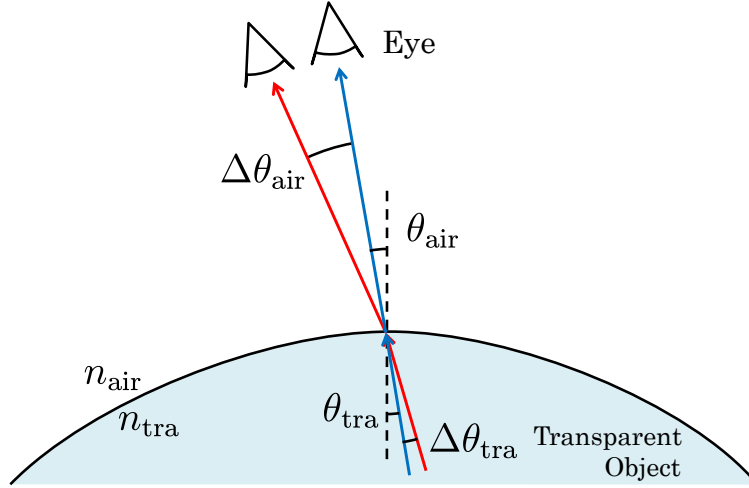


図 7.1 透明物体での光の屈折

一方で図 7.2 に示すように、透明物体の辺縁を見た時の光の屈折を考える。透明物体の表面の法線と視線の成す角が約 90 deg になる部分を透明物体の辺縁と定義する。式 (7.4) より $\theta_{\text{air}} = 90 \text{ deg}$ のときには $\Psi(\theta_{\text{air}}) = 0$ となるため、 $\Delta \theta_{\text{tra}} = 0$ となる。また、 $\Psi(\theta_{\text{air}})$ を $\theta_{\text{air}} = 90 \text{ deg}$ のまわりでテイラー展開し、四次以降の微小項を無視すると以下ようになる。

$$\Psi(\theta_{\text{air}}) = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\text{air}} \right) + \frac{n^2 + 2}{(\sqrt{n^2 - 1})^3} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\text{air}} \right)^3 \quad (7.7)$$

この式より $\Psi(\theta_{\text{air}})$ は、 θ_{air} に対して単調減少であり、 $|\Psi(\theta_{\text{air}})|$ は $\theta_{\text{air}} = 90 \text{ deg}$ に近いほど小さく、 $\Delta \theta_{\text{tra}}$ は 0 に近づく。また、 n が高いほど $\Psi(\theta_{\text{air}})$ は小さくなる。このように、透明物体の辺縁では、視線の角度の変化に対して θ_{tra} の変化が非常に小さいため、視点が変化しても観測される光が同じになる。この現象を光学的部分恒常性と呼ぶ。仮に、透明物体を一般的なガラスであるソーダ石灰ガラス ($n = n_{\text{tra}}/n_{\text{air}} = 1.51$)、ライトフィールドカメラをカメラアレイとみなした時の輻輳角の最大値を 5 deg と仮定した場合、 $\theta_{\text{air}} = 85 \text{ deg}$ のときには $\Psi(\theta_{\text{air}}) = 0.08$

となり、さらに θ_{air} が $85 \sim 90$ deg の領域において、 $\Delta\theta_{\text{tra}} < 0.08\Delta\theta_{\text{air}}$ となる。したがって、 θ_{air} が $85 \sim 90$ deg の間で変化するとき、 θ_{tra} の変化量は非常に小さくなるため、同じ光が観測される。

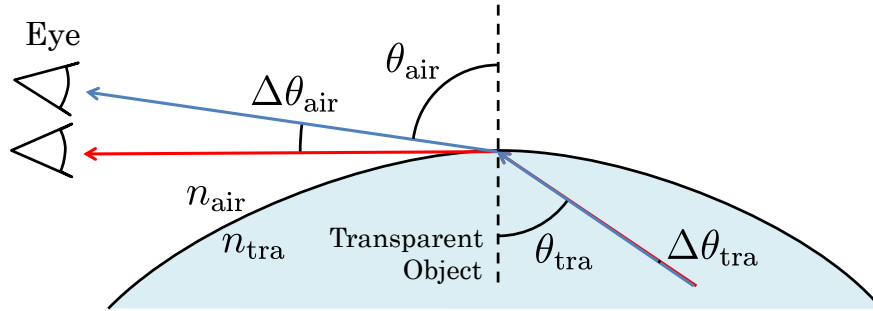


図 7.2 辺縁付近での光の屈折

7.2 提案手法の概要

図 7.3 に提案手法の概要を、図 7.4 にアルゴリズムを示す。まず、ライトフィールドカメラの前に透明物体を配置し撮影する。撮影する際には、3.1.2 節で説明したパッシブステレオにおいて、対応付けに誤りが発生しないような背景であることが望ましい。つぎに、4.2 節で説明したように、ライトフィールドカメラから得られる画像をカメラアレイにより得られるアレイ画像とみなし、取得したアレイ画像から透明物体の辺縁の対応点を推定することで初期視差を求める。初期視差は、各カメラからの光線の収束性を表す光線収束性を基に推定する。透明物体は、表面上のある一点を観測したとき、視線の角度によって透明物体を通して見える背景の場所が異なるため、通常は物体表面において対応する点を推定することは困難であるが、辺縁においては見る角度によって見かけの色が変化しないため推定可能である。この辺縁とみなせる領域は、式 (7.6) より視線の角度である輻輳角が小さいほど広がる。ライトフィールドカメラをカメラアレイとみなしたときの輻輳角は小さいため、ライトフィールドカメラを用いることで辺縁とみなせる領域を実用的な広さまで拡大できる。つぎに、視差を更新することで、推定精度の向上を図る。視差の推定精度の指標として、面の法線方向および初期視差の確からしさをを用いる。面の法線方向および確からしさは、光線収束性の分布から求める。視差の更新処理では、初期視差、面の法線方向および確からしさをパラメータとする誤差関数を定義し、誤差関数の値が最小となる視差を求める。

そして、更新した視差を用いて、透明物体の表面のライトフィールドカメラからの距離を計算する。最終的な表面形状は、ライトフィールドカメラからの距離画像として推定される。以降に、提案手法の各項目について詳細を説明する。

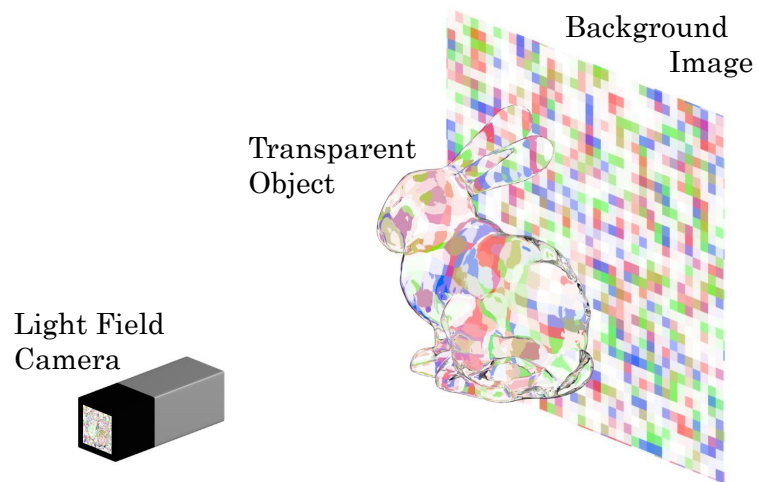


図 7.3 提案手法の撮影環境

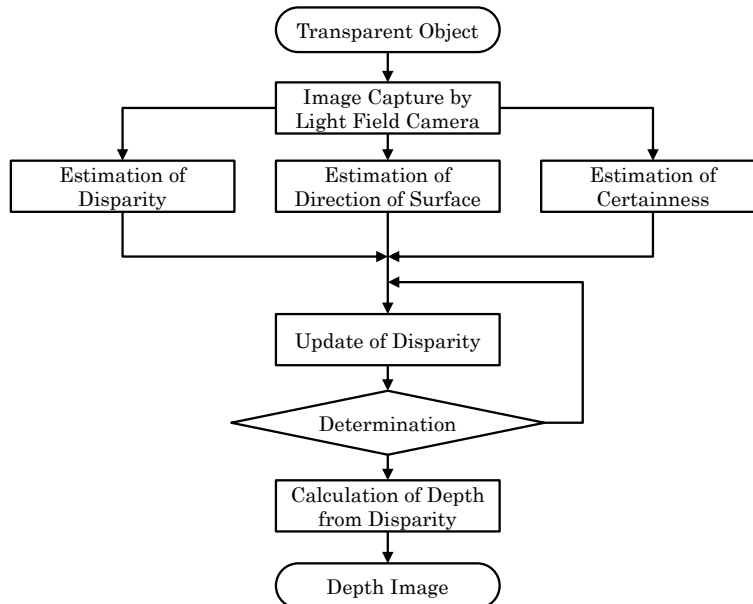


図 7.4 提案手法のアルゴリズム

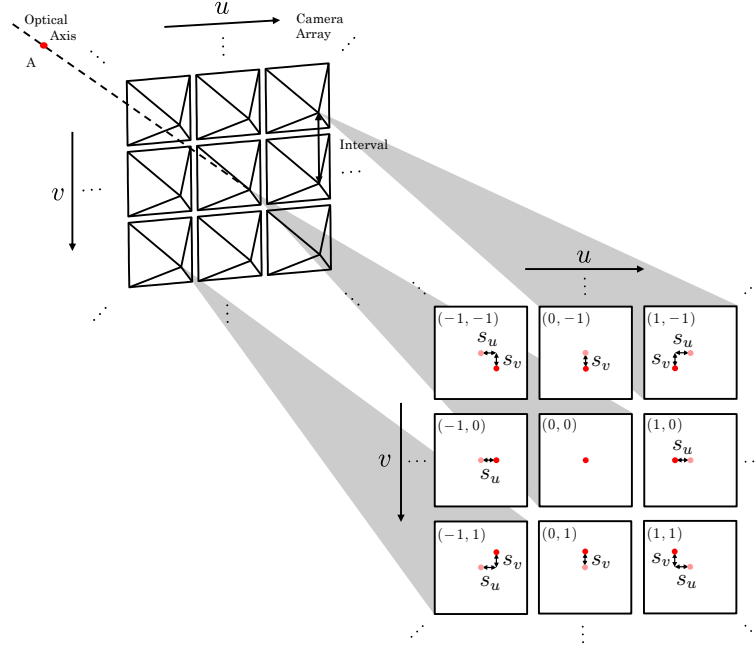


図 7.5 取得されるカメラアレイ画像

7.3 光線収束性

図 7.5 に、光軸上の点を見た時のカメラアレイ画像を示す。この点はカメラの位置に応じて中心からズレて写る。このズレが各カメラの視差となる。このズレて写った点へのカメラからの光線は、すべて光軸上の点に収束することになる。したがって、視差ベクトル \mathbf{s} を変化させることで、カメラからの光線を任意の距離に収束することができる。さらに、各カメラの縦軸と横軸をそれぞれ u 、 v とするとき、各カメラ (u, v) で視差 $s^{(u,v)}$ を異なる値とすると、すべての光線は一点で収束せず、視差ベクトル \mathbf{s} により収束する光線と収束しない光線が発生する。この光線の収束性を、光線収束性と呼ぶ。カメラ (u, v) により取得される画像の輝度を $I^{(u,v)}(x, y)$ とし、視差 $s^{(u,v)}$ に応じて取得画像の輝度 $I^{(u,v)}(x, y)$ を視差を戻す方向に平行移動した画像の輝度を $I_{\text{sh}}^{(u,v)}(x, y, s^{(u,v)})$ とし、カメラの総数を N_{uv} とするとき、光線収束性を以下の様な誤差関数により表現する。

$$E_{\text{cv}}(x, y, \mathbf{s}) = \iint \sum_{u,v} \{ I_{\text{sh}}^{(u,v)}(x', y', s^{(u,v)}) - \sum_{u',v'} I_{\text{sh}}^{(u',v')}(x', y', s^{(u,v)}) / N_{uv} \}^2 dx' dy' \quad (7.8)$$

x' 、 y' および u' 、 v' は、 x 、 y および u 、 v の置き換えである。任意の x 、 y について考えた時、 $E_{cv}(x, y, \mathbf{s})$ は、 \mathbf{s} に対して分布を持つことになる。 $E_{cv}(x, y, \mathbf{s})$ の分布を解析することで、その空間における光学的情報を取得することが可能である。しかし、 \mathbf{s} は N_{uv} 次元のベクトルであるため、すべてを解析するには膨大な計算量を必要とする。そのため本稿では \mathbf{s} を s_u と s_v のみで簡略化して表現し、 $E_{cv}(x, y, s_u, s_v)$ の分布を部分的に解析することで、透明物体の表面形状推定に必要な情報を取り出すことができるか検証する。

7.4 初期視差の推定

図 7.5 に示すように、光軸上の点を見た時の各カメラアレイ画像内での視差は、カメラの位置によって均一であるため、視差は単一の変数 s で表現できる。カメラ (u, v) により取得される画像の輝度を $I^{(u,v)}(x, y)$ とし、カメラ (u, v) と視差 s に応じて取得画像の輝度 $I^{(u,v)}(x, y)$ を視差を戻す方向に平行移動した画像の輝度を $I_{sh}^{(u,v)}(x, y, s)$ とし、カメラの総数を N_{uv} とするとき、光線収束性は以下のような誤差関数として簡略化して表現する。

$$E_s(x, y, s) = \iint \sum_{u,v} \{I_{sh}^{(u,v)}(x', y', s) - \sum_{u,v} I_{sh}^{(u,v)}(x', y', s)/N_{uv}\}^2 dx' dy' \quad (7.9)$$

実際には、この x および y は離散化して扱う。この E_s は、物体表面上の一点に収束したとき最小となる。

図 7.6 に透明物体を通過する光線を示す。図 7.6 は、三つの視点からの光線がどの点に収束するかを、(a) - (d) の場合に分けて示している。(a) (d) は透明物体の辺縁で背景に収束した場合と透明物体の表面の辺縁に収束した場合を示しており、(b) (c) は透明物体の中央付近で透明物体の表面に収束した場合と透明物体を通過して背景に収束した場合を示している。(a) では途中で透明物体を通過した光線が屈折し、それぞれの光線は他の場所に到達するため E_s は大きくなる。一方、(d) では辺縁に収束した後背景の同じ場所に光線が収束する。したがって、(d) の場合に E_s は小さくなる。また、(b) では屈折により収束せず、(c) では背景に収束するため E_s が小さくなる。したがって、以下の様に誤差関数 E_s が最小になる s を求めることで、透明物体の表面の辺縁と背景に対応する点を探索することで、初期視差 $\hat{s}_0(x, y)$ が得られる。

$$\hat{s}_0(x, y) = \arg \min_s E_s(x, y, s) \quad (7.10)$$

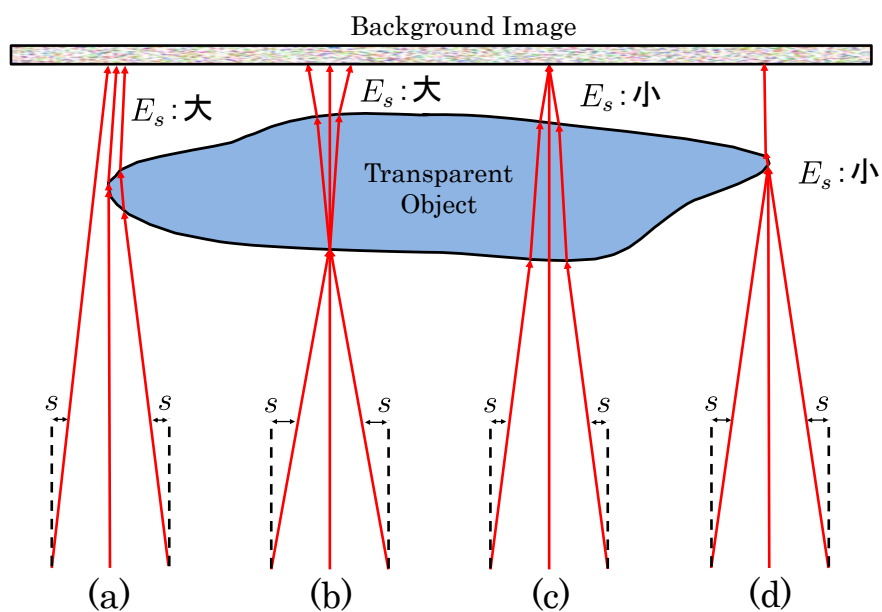


図 7.6 透明物体を通過する光線

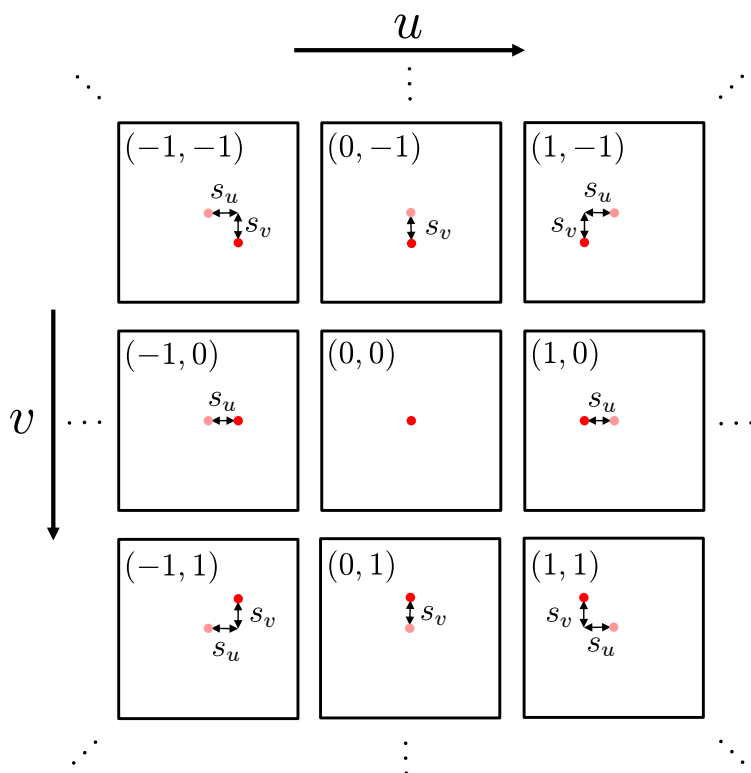


図 7.7 カメラアレイ画像での視差

7.5 辺縁における面の法線方向推定

図 7.7 に示すように、光軸上の点を見た時の視差 s をカメラの uv 方向でベクトル化し、 u 方向の視差を s_u 、 v 方向の視差を s_v として、光線収束性を誤差関数 E_{uv} を以下のように定義する。

$$E_{uv}(x, y, s_u, s_v) = \iint \sum_{u,v} \{ I_{\text{sh}}^{(u,v)}(x', y', s_u, s_v) - \sum_{u',v'} I_{\text{sh}}^{(u',v')}(x', y', s_u, s_v) / N_{uv} \}^2 dx' dy' \quad (7.11)$$

図 7.8 に示すように、辺縁における面の法線が v 方向となる点 A での誤差関数 E_{uv} を、視差 s_u 、 s_v を軸とした画像で表現したものが図 7.9 に示すような光線収束性マップとなる。図 7.8 に示すように、透明物体の辺縁を観測したとき、7.1 節で示したように、 v 方向に視点が変化しても見かけの色は変化しない。そのため、図 7.8 のように、辺縁の面の法線が v 方向に向いている面では、 v 方向の視差 s_v が正しいとき誤差関数 E_{uv} は小さくなり、逆にそれ以外では大きくなる。一方、 u 方向に視点が変化した場合には、光学的部分恒常性が維持されず、見かけの色が異なることになる。したがって、 u 方向の視差 s_u が正しいときとそれ以外の誤差関数 E_{uv} の違いは小さくなる。したがって、図 7.9 に示すように、光線収束性マップにおける分布は長軸が s_u 方向の楕円形状になる。逆に、辺縁における面の法線が u 方向に向いている場合には、長軸が s_v 方向の楕円形状になる。したがって、光線収束性マップにおける分布の楕円形状の長軸の向きを調べることで、辺縁の面の法線の向きを推定できる。

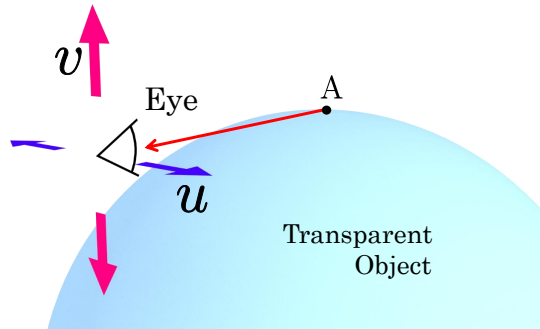


図 7.8 視線の移動

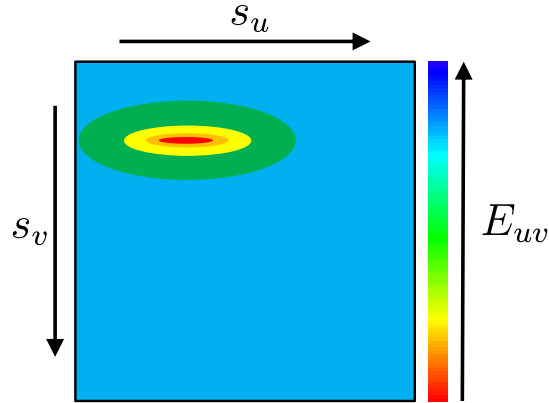


図 7.9 点 A における光線収束性マップ

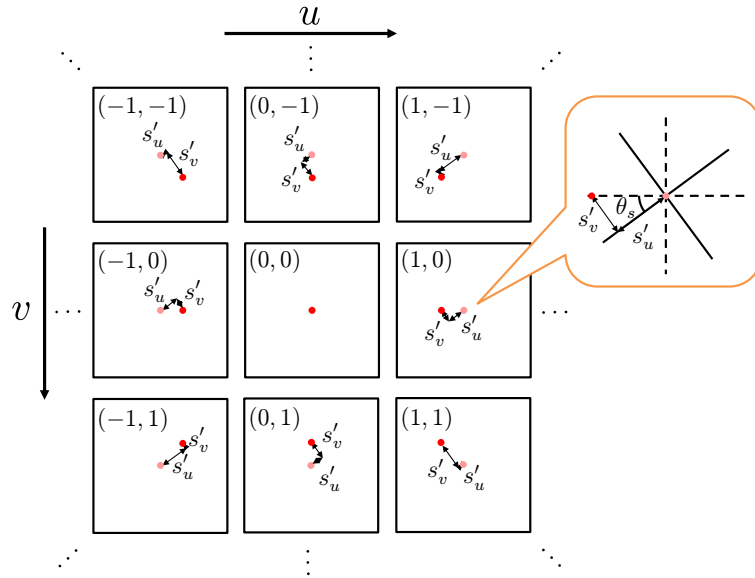


図 7.10 視差の回転

さらにより正確に法線方向を推定するために、視差 s_u, s_v を図 7.10 に示すように、 s'_u, s'_v, θ_s により新たに表現し直す。 s_u, s_v と s'_u, s'_v, θ_s の関係は以下のようなになる。

$$s_u = |s'_u \cos \theta_s + s'_v \sin \theta_s| \quad (7.12)$$

$$s_v = |s'_v \cos \theta_s - s'_u \sin \theta_s| \quad (7.13)$$

光線収束性マップにおける分布の楕円形状の長軸の向きは、 θ_s を変化させることでも変化する。図 7.11 に、 θ_s と光線収束性マップの関係の例を示す。 θ_s を変化させた際の s_u と s_v の軸に対して、面の法線の向きが平行あるいは垂直の時に、光

線収束性マップにおける分布の楕円形状の長軸と短軸の長さの比が最大となる。したがって、光線収束性マップにおける分布の楕円形状の長軸と短軸の長さの比が最大となるときの θ_s を $\hat{\theta}_s$ とするとき、法線方向 θ_{est} は以下の式より求めることができる。

$$\theta_{\text{est}} = \begin{cases} \hat{\theta}_s & \text{Ellipse is horizontal} \\ \hat{\theta}_s + \frac{\pi}{2} & \text{Ellipse is vertical} \end{cases} \quad (7.14)$$

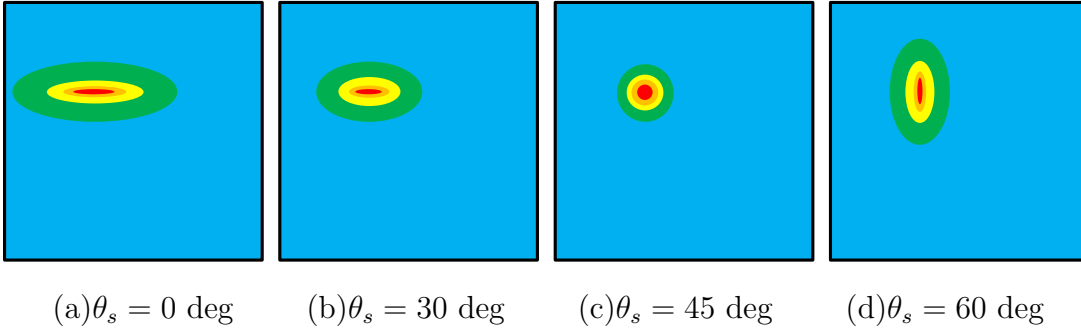


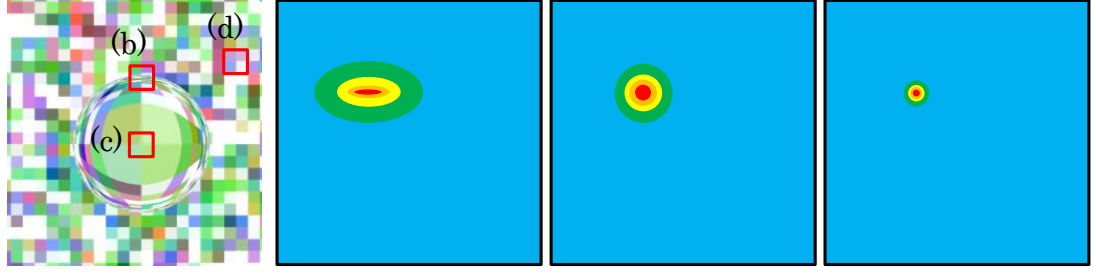
図 7.11 光線収束性マップの θ_s 依存性

7.5.1 透明物体領域推定

図 7.12 に、球形状の透明物体の辺縁、中央を通過した場合と背景での光線収束性マップを記す。屈折せずに背景に到達した場合の光線収束性マップに対して、透明物体を通過し屈折した場合の光線収束性マップは変形または拡大されたような画像となる。したがって、最小値からの勾配を調べることで、光線が屈折したかどうかを調べることができる。光線収束性マップにおける最小の値を $E_{\min}(x, y)$ とするとき、以下の式より屈折の影響 $R(x, y)$ を求めることができる。

$$R(x, y) = \frac{\nabla_{s_u, s_v}^2 E_{uv}(x, y, s_u, s_v)|_{s_u=0, s_v=0}}{E_{\min}(x, y)} \quad (7.15)$$

$$\nabla_{s_u, s_v}^2 = \frac{\partial^2}{\partial s_u^2} + \frac{\partial^2}{\partial s_v^2} \quad (7.16)$$



(a) 球体を見たとき (b) 球体の辺縁 (c) 球体の中央 (d) 背景部

図 7.12 光線収束性マップへの屈折の影響

7.6 視差の更新

新たに以下のように、誤差関数を定義する。

$$E_{s,n}(x, y, s) = \kappa_A F_{\text{ave}}(x, y, s) + \kappa_B F_{\text{gra}}(x, y, s) + \kappa_C F_{\text{gr0}}(x, y, s) \quad (7.17)$$

κ_A 、 κ_B 、 κ_C は各項の影響を決める重み係数である。第一項の $F_{\text{ave}}(x, y, s)$ は、重みを考慮した移動平均である。第二項の $F_{\text{gra}}(x, y, s)$ は、重みを考慮した勾配の移動平均である。第三項の $F_{\text{gr0}}(x, y, s)$ は、輪郭において \hat{s}_0 の勾配を保存する項であり、 \hat{s}_0 の勾配から計算される法線の方向と θ_{est} が一致しているほど影響が大きくなる。輪郭は、 R を二値化して輪郭を抽出することで求める。また、最も外側の輪郭の内部を塗りつぶし、輪郭付近を除いた領域を計算領域とした。重みは、計算領域の外側を 0 とし、計算領域の内部の輪郭を 1 とし、計算領域内の輪郭から距離に応じて線形に減衰し、最も輪郭から遠い位置で 0 になるように設定した。計算領域内において、以下に示すような誤差関数 $E_{s,n}$ を最小化することで、最終的な推定視差 \hat{s}_n を求める。

$$\hat{s}_{n+1}(x, y) = \hat{s}_n(x, y) - \frac{\kappa_d}{\sum_{x,y} E_{s,n}(x, y, s)} \frac{\partial E_{s,n}(x, y, s)}{\partial s} \quad (7.18)$$

κ_d は更新量を決める 0 以上の係数であり、 $\sum_{x,y} E_{s,n}(x, y, s)$ により正規化される。式 (7.18) の処理を任意の回数または第二項の値がしきい値以下になるまで計算を繰り返す。

7.7 距離の計算

図 7.13 に示すように、光軸上の一点をカメラアレイで見た時、この点はカメラの位置に応じて中心からズレて写る。このときの視差 s は、カメラの画角を θ_{cam} とし、カメラ間距離を d_{cam} とし、画像のピクセル幅を W_{cam} とし、光軸上の点までの距離を d_{tar} とするとき、式 (4.3) により以下の式で表せる。

$$s = \frac{W_{\text{cam}} d_{\text{cam}}}{2 d_{\text{tar}} \tan \frac{\theta_{\text{cam}}}{2}} \quad (7.19)$$

したがって、推定視差 $\hat{s}_n(x, y)$ から推定距離 $d_{\text{est}}(x, y)$ への変換は以下の様にして行うことができる。

$$d_{\text{est}}(x, y) = \frac{W_{\text{cam}} d_{\text{cam}}}{2 \hat{s}_n(x, y) \tan \frac{\theta_{\text{cam}}}{2}} \quad (7.20)$$

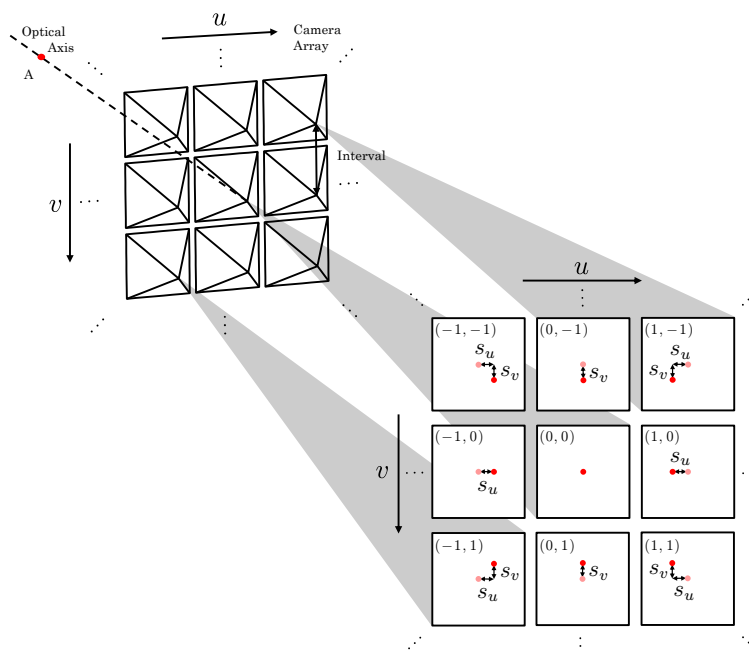


図 7.13 取得されるカメラアレイ画像

第8章

透明物体形状推定実験

本章では透明物体をライトフィールドカメラで撮影した画像をシミュレーションにより作成し、視差を更新することで、推定結果が改善されることを示す。さらに、実際に透明物体をライトフィールドカメラにより撮影し、同様の処理を行うことで、実測においても同様の結果が得られることを示す。

8.1 形状推定シミュレーション実験

視差画像を更新することで、透明物体の三次元の形状を推定した結果が改善されることを確認するため、シミュレーション実験を行った。

8.1.1 シミュレーション結果

図 8.1 に示すように、ライトフィールドカメラを背景画像から距離 120 mm に配置し、透明物体をライトフィールドカメラから距離 80 mm の間に配置した。透明物体の屈折率は 1.51 とした。透明物体をライトフィールドカメラにより撮影した場合に得られるアレイ画像は、CG レンダリングソフトの Blender [71] を用いて作成した。作成した画像の画質は 1078×748 画素とし、カメラの画角は 60 deg とした。カメラアレイは、輻輳角を小さくするために縦横 6×6 個のカメラで構成されているとし、カメラ間距離を 0.3 mm とした。

まず、図 8.2(a) に示す単純な形状である球状の透明物体で推定実験を行った。つぎに、物体の内側が覆われているか否かを区別できることを確かめるため、図 8.2(b)(c) に示すトーラス状の透明物体とトーラス状の内側を平面で覆った形状である円盤状の透明物体でそれぞれ実験を行った。また、現実的な形状での精度を検証するため、図 8.2(d)(e) に示す複雑な形状である Bunny [70] 状および

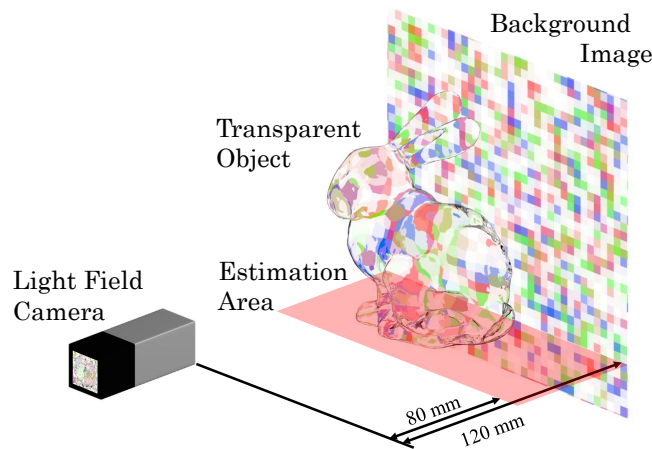
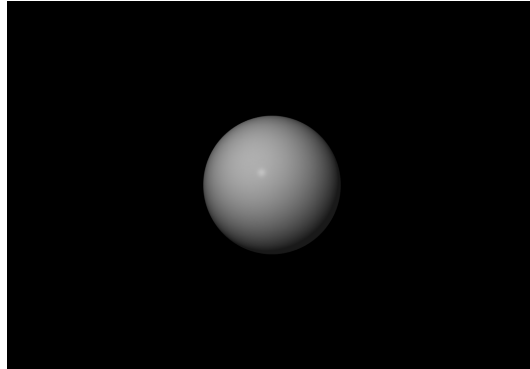


図 8.1 実験状況

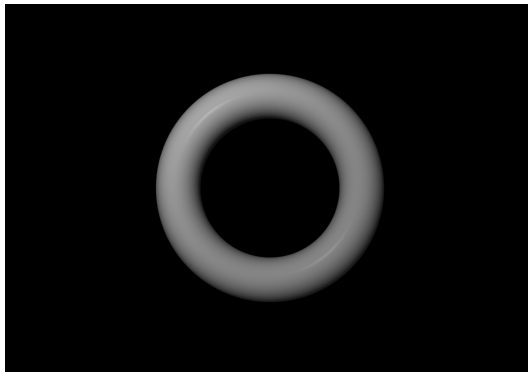
Dragon [70] 状の透明物体においても実験を行った。図 8.3 に、球状の場合の取得したカメラアレイ画像の一部を示す。これらの画像を元に、透明物体の表面形状をライトフィールドカメラからの距離として推定した。推定範囲は図 8.1 に示すように、距離 80 ～ 120 mm の間とした。図 8.4 に、推定した結果を示す。(a) は真値であり、(b) は初期視差から求めた奥行きであり、(c) が推定結果である。また、(d) は推定した法線方向であり、(e) は屈折の影響であり、(f) は視差更新の際の計算領域であり、(g) は輪郭画像であり、(h) は重みである。推定結果は、これらの画像より式 (7.18) をパッチサイズ $5 \times 5 \text{ pixel}$ として計算し、解像度 $100 \times 100 \text{ pixel}$ で求めた。図 8.5 - 8.8 に、トーラス状の透明物体とトーラス状の場合の取得したカメラアレイ画像の一部および推定結果を示す。図 8.9 - 8.12 に、Bunny 状および Dragon 状の場合の取得したカメラアレイ画像の一部および推定結果を示す。また、真値と初期推定結果および推定結果の平均誤差を求めた結果を表 8.1 に示す。

表 8.1 推定結果の平均誤差 (mm)

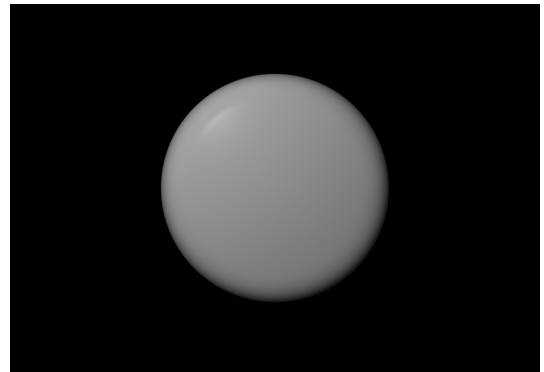
対象	初期推定結果	推定結果
球状	1.86	0.456
トーラス状	0.96	1.51
円盤状	5.16	1.06
Bunny 状	1.33	1.16
Dragon 状	0.832	0.824



(a) 球状



(b) トーラス状



(c) 円盤状



(d) Bunny 状



(e) Dragon 状

図 8.2 推定対象

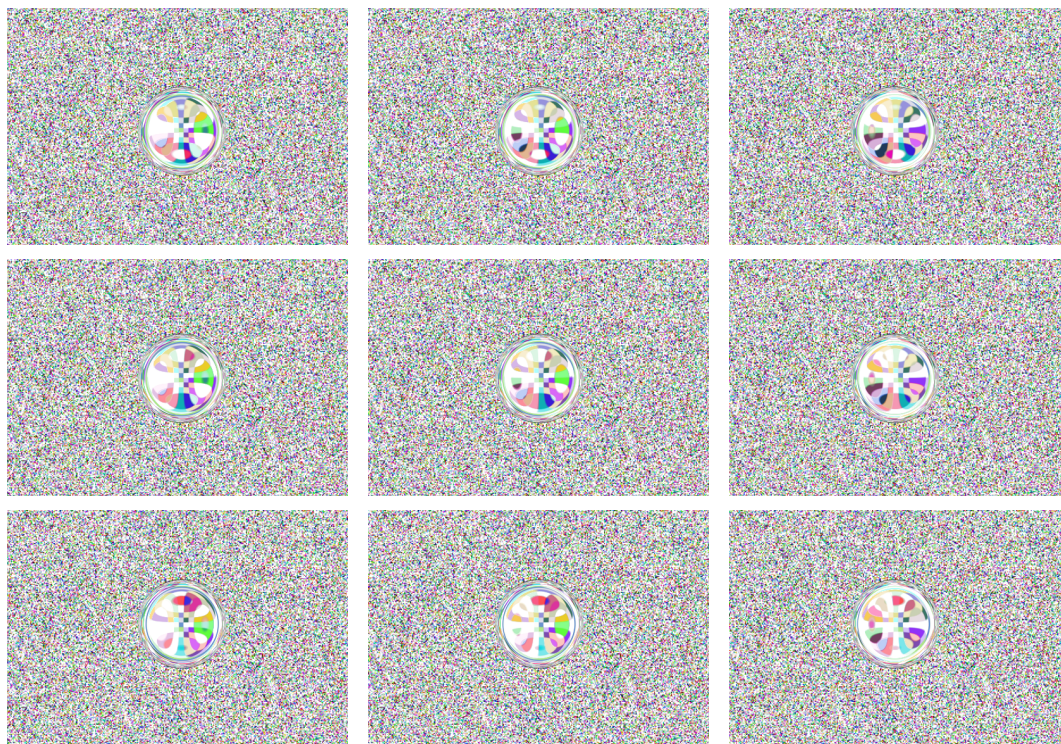


図 8.3 球状の透明物体のカメラレイ画像の一部

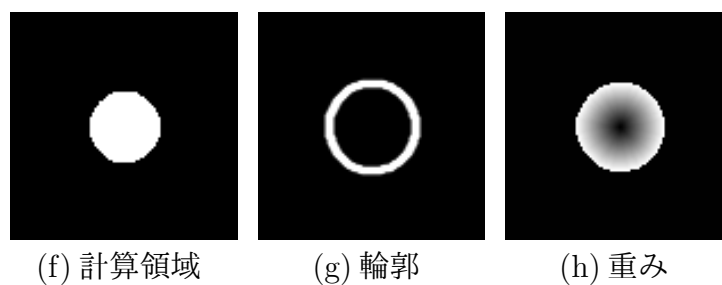
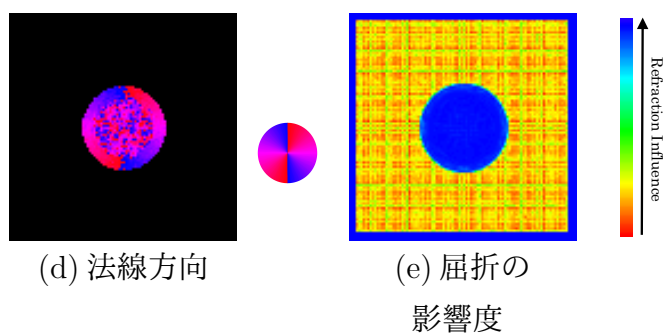
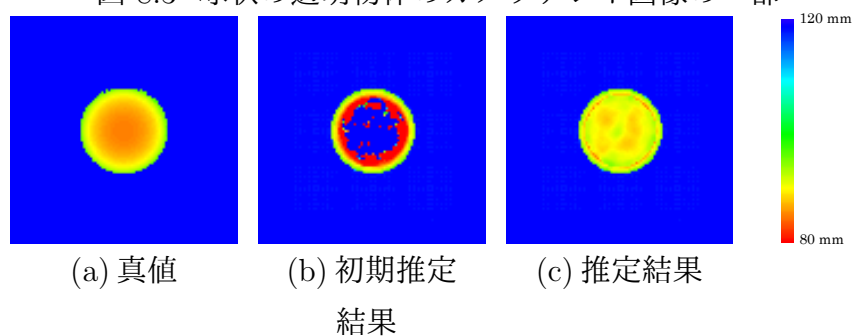


図 8.4 球状の透明物体の推定結果

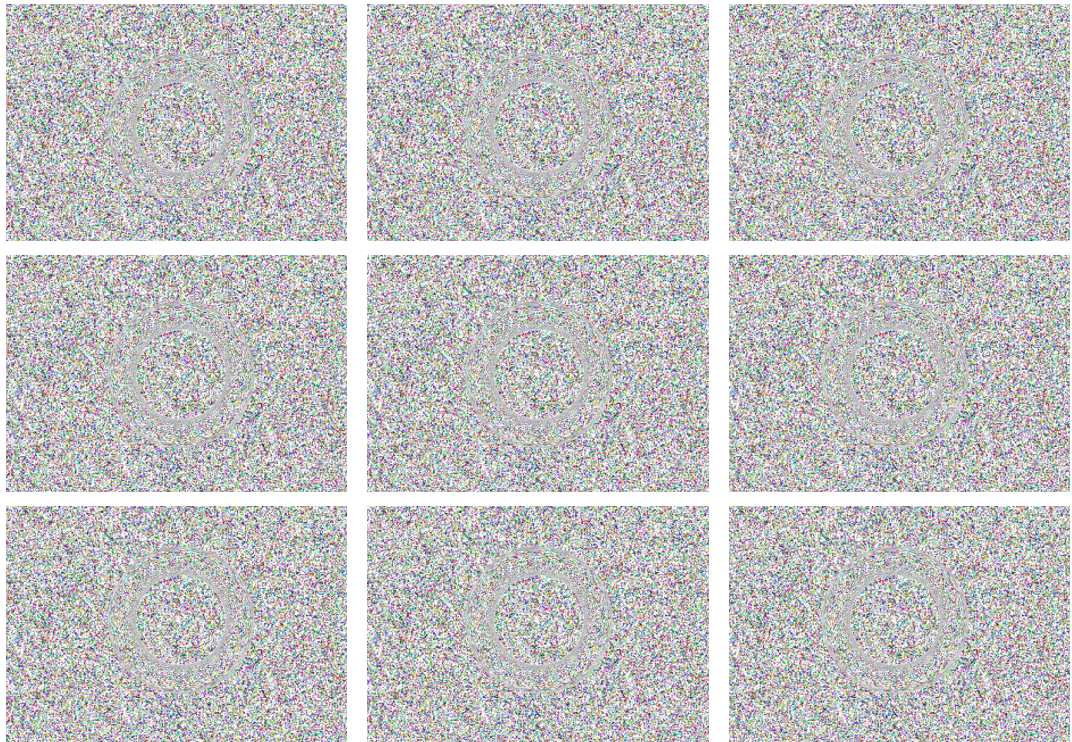


図 8.5 トーラス状の透明物体のカメラアレイ画像の一部

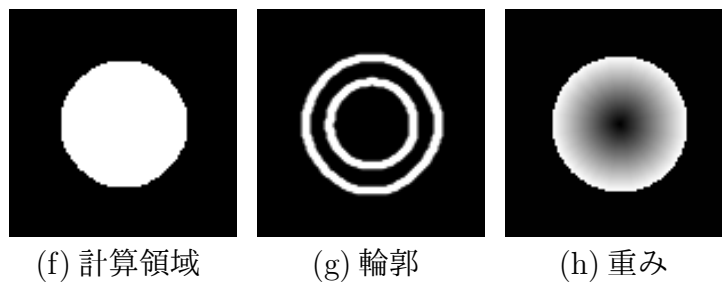
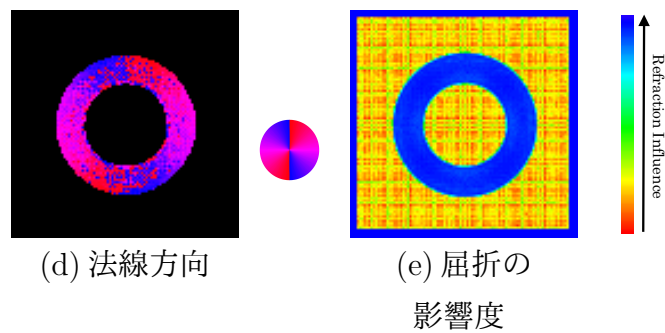
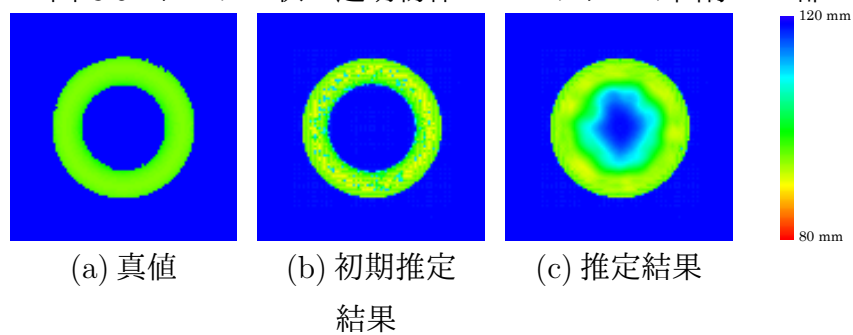


図 8.6 トーラス状の透明物体の推定結果

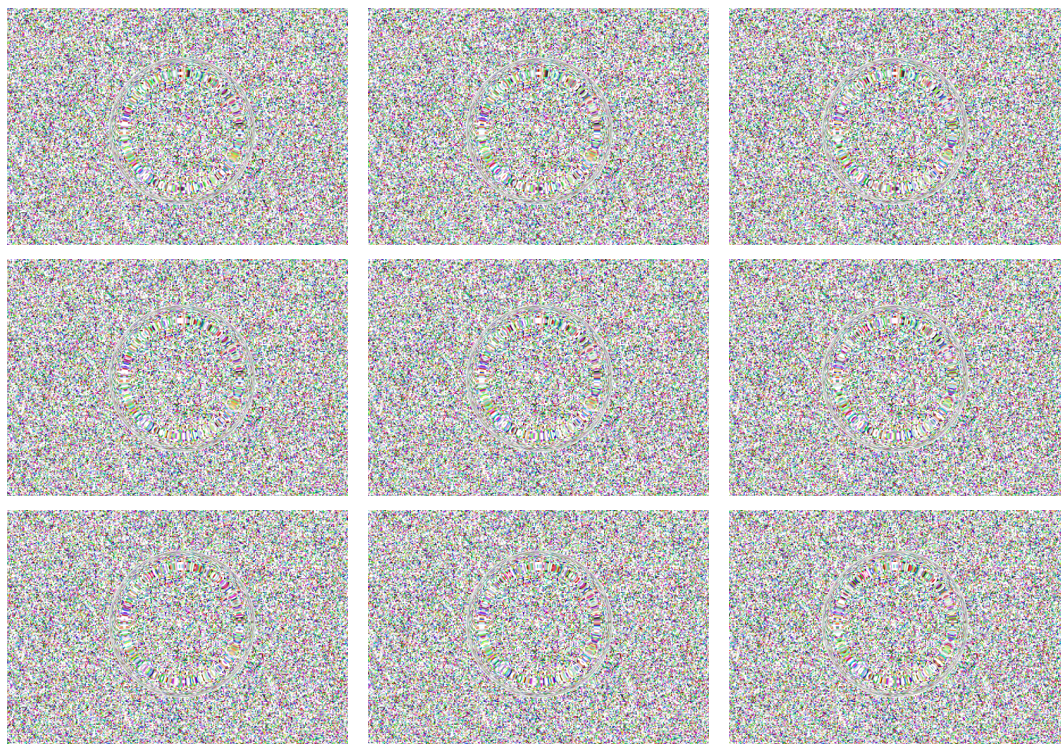


図 8.7 円盤状の透明物体のカメラレイ画像の一部

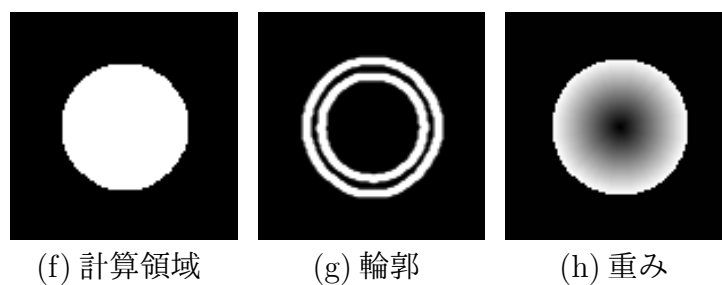
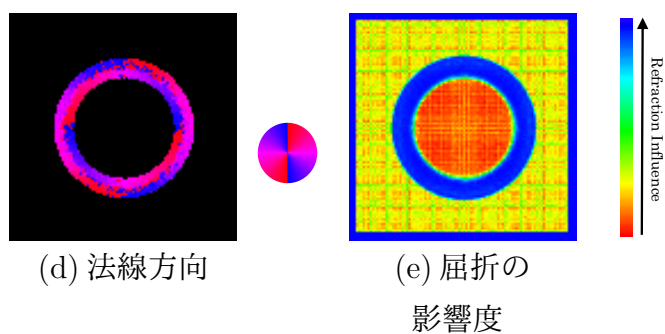
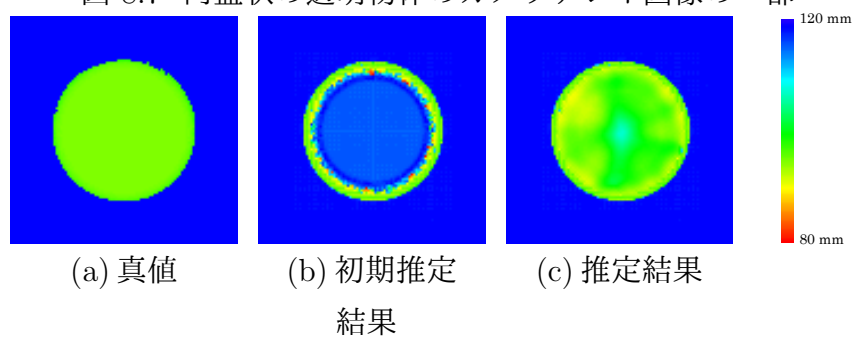


図 8.8 円盤状の透明物体の推定結果

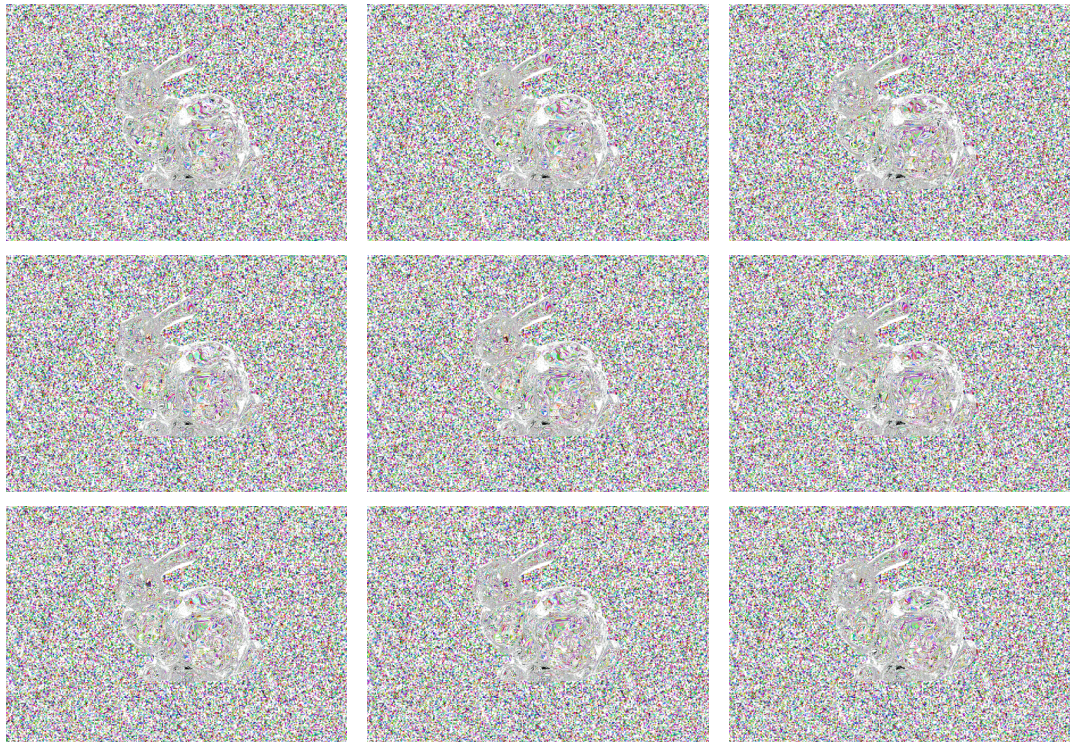


図 8.9 Bunny 状の透明物体のカメラアレイ画像の一部

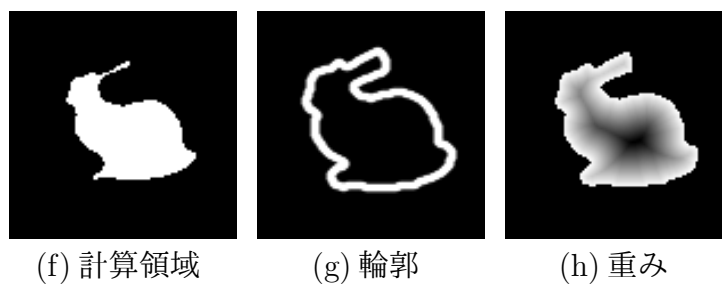
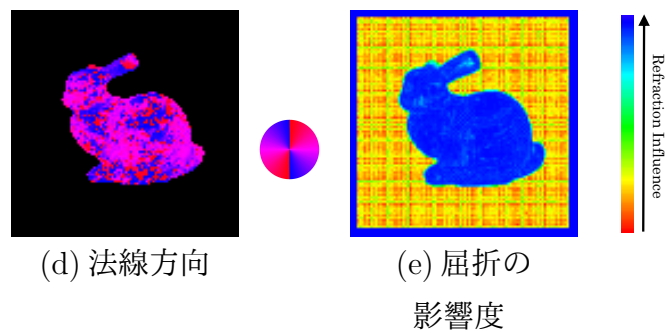
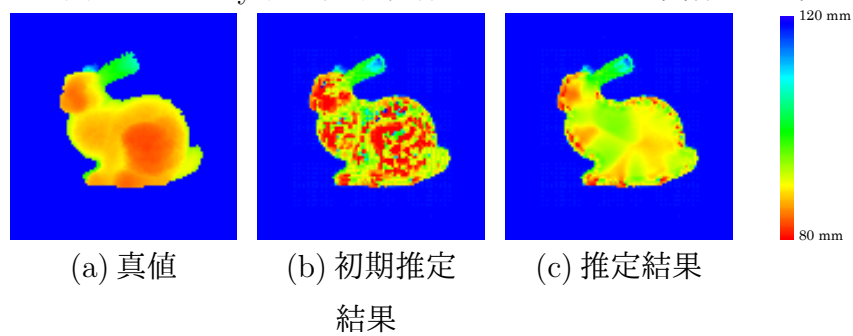


図 8.10 Bunny 状の透明物体の推定結果

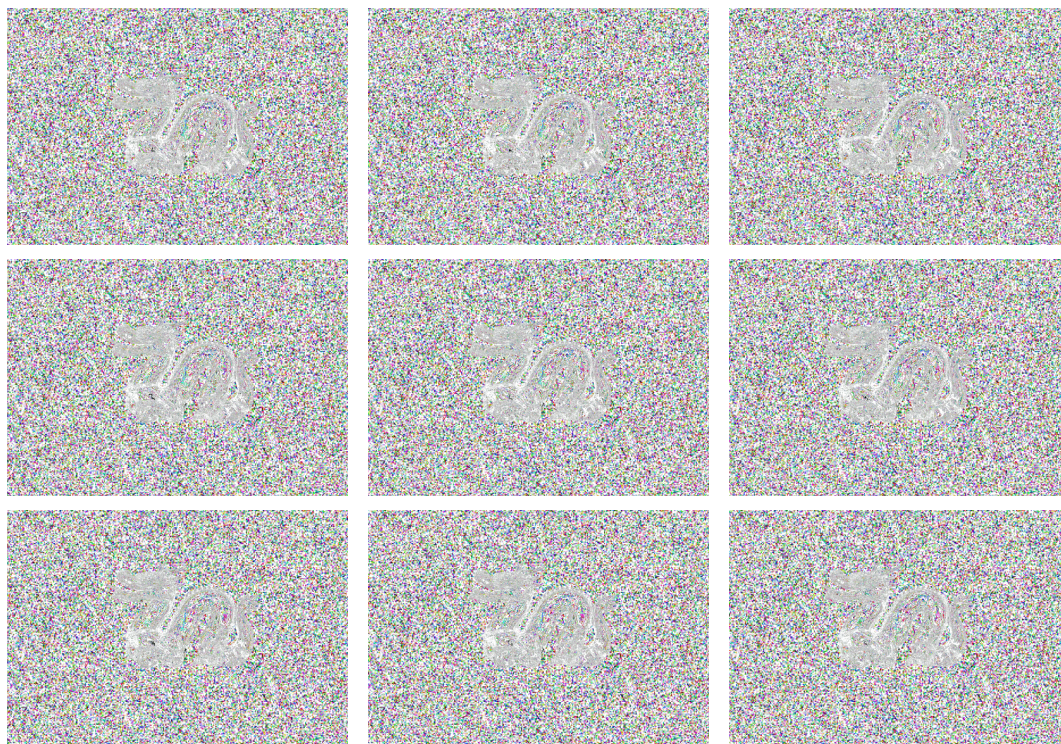


図 8.11 Dragon 状の透明物体のカメラレイ画像の一部

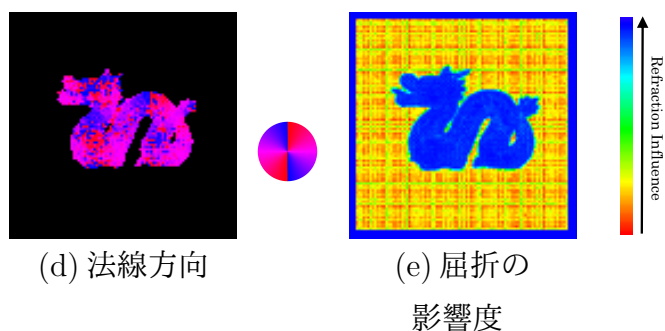
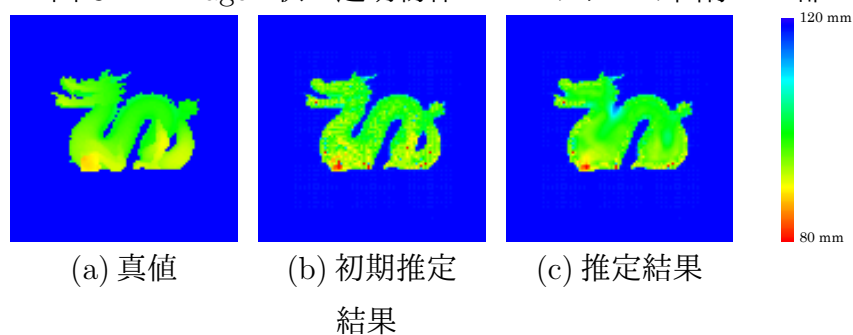


図 8.12 Dragon 状の透明物体の推定結果

8.1.2 考察

図 8.4(b) を見ると、球状の透明物体では、背景および透明物体の辺縁では距離を推定できるが中央では推定できないことが確認できる。一方 (c) を見ると、視差を更新することで、中央においても概ね推定できていることが確認できる。また (d) では、辺縁において法線方向が推定できていることが確認できる。また (e) では、透明物体の存在している領域のみの区別ができていることが確認できる。図 8.6(b) を見ると、トーラス状の透明物体は、すべての領域を辺縁とみなすことができたため、概ね推定できていることが確認できる。しかし、(c) に示すように、視差を更新することで内側の領域での正しく推定できなくなっていることが確認できる。これは、視差を更新する際に内側の領域を辺縁であるとみなすことができないことが原因であると考えられる。図 8.8 の円盤状の物体では、(b) に示すように辺縁のみ推定できているが中央は推定できていない。一方 (c) では、視差の更新により中央の推定結果が改善されたことが確認できる。また、図 8.6 と図 8.8 を比べると、(b) では、トーラス状の透明物体か円盤状の透明物体のどちらであるかを区別できないが、(c) に示すように、視差を更新することでトーラス状の透明物体か円盤状の透明物体のどちらであるかを区別できるようになることが分かる。つぎに図 8.10 および 8.12 において、(b) と (c) を比べると、奥行きの変化が滑らかになっていることが確認できる。また、表 8.1 を見ると、トーラス状の透明物体を除いて、視差を更新することで誤差が小さくなっていることが確認できる。これらの結果から、視差の更新によって形状が単純でひと塊の物体ほど精度が向上することが分かる。したがって、物体の形状により視差の更新処理を導入するかどうかを判断することで、精度の高い透明物体形状推定が可能になる。

8.2 形状推定実測実験

実測においてもシミュレーションと同様の結果が得られることを確かめるため、実験を行った。

8.2.1 実測結果

図 8.13 に示すように、ライトフィールドカメラ（Lytro Illum）を背景画像から距離 120 mm の位置に配置し、透明物体をライトフィールドカメラから距離 100 mm の位置に配置した。実験ではまず、図 8.14 に示すようなガラスで作られた林檎状の透明物体の形状を推定した。図 8.17 に、取得したカメラアレイ画像の一部を示す。図 8.18 に、推定結果を示す。つぎに、図 8.15 に示すようなガラスで作られた龍状の透明物体の形状を推定した。図 8.19 に、取得したカメラアレイ画像の一部を示す。図 8.20 に、推定結果を示す。さらに、図 8.16 に示すようなガラスで作られた虎状の透明物体の形状を推定した。図 8.21 に、取得したカメラアレイ画像の一部を示す。図 8.22 に、推定結果を示す。

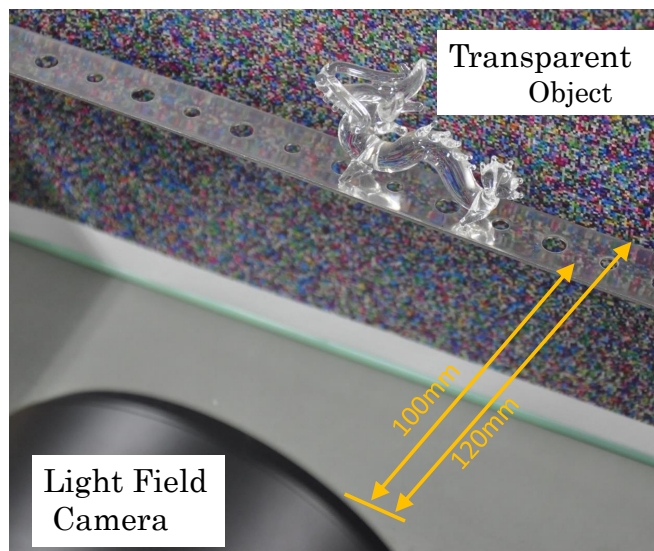


図 8.13 透明物体計測の実測環境

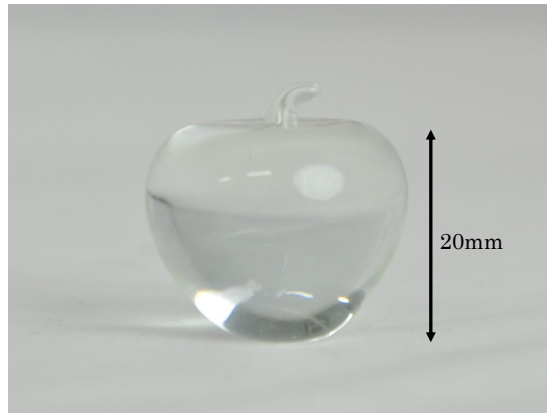


図 8.14 林檎状の透明物体



図 8.15 龍状の透明物体



図 8.16 虎状の透明物体

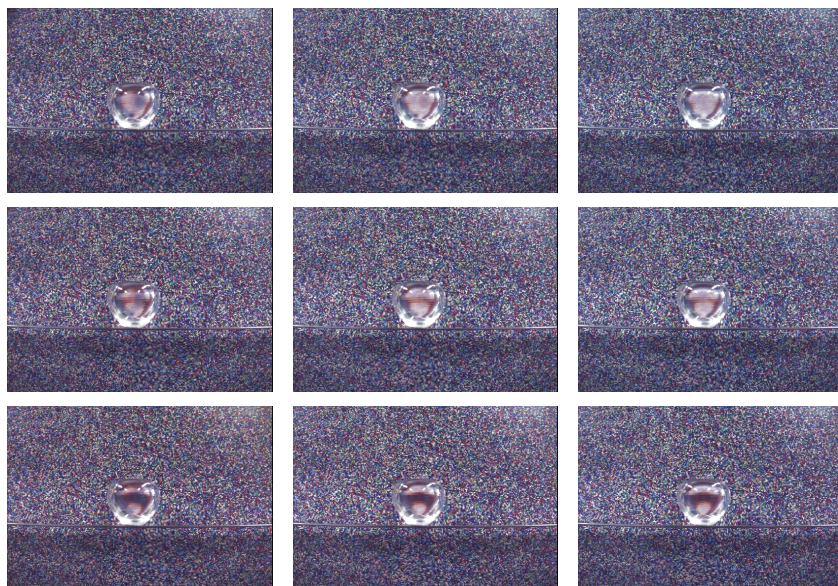
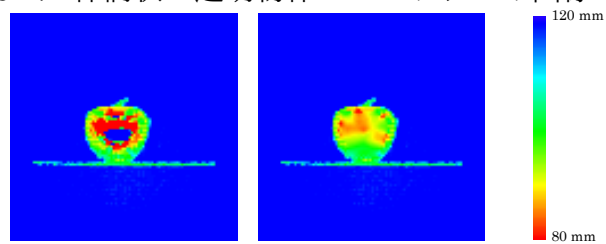
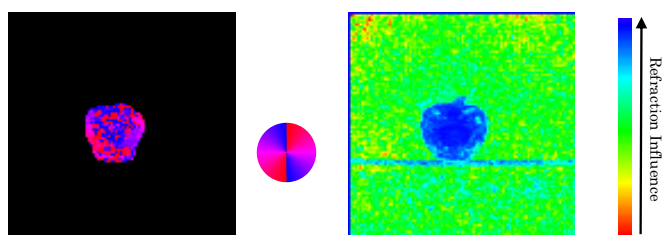


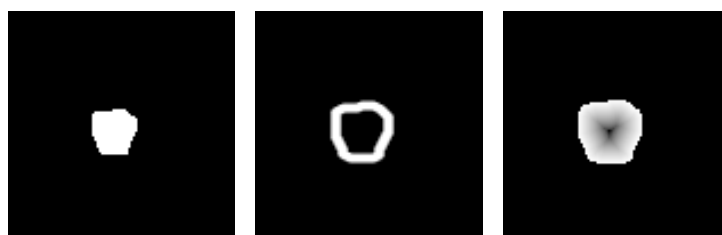
図 8.17 林檎状の透明物体のカメラレイ画像の一部



(a) 初期推定
結果 (b) 推定結果



(c) 法線方向 (d) 屈折の
影響度



(e) 計算領域 (f) 輪郭 (g) 重み

図 8.18 林檎状の透明物体の推定結果

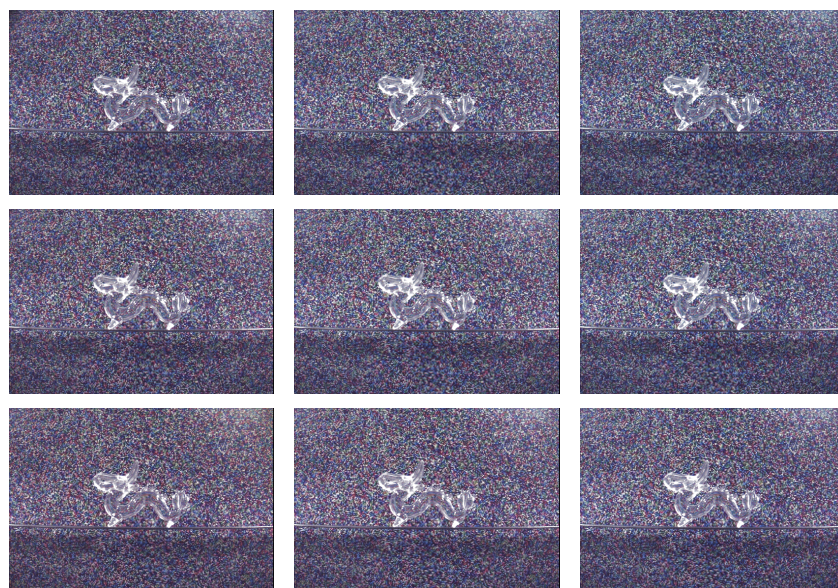
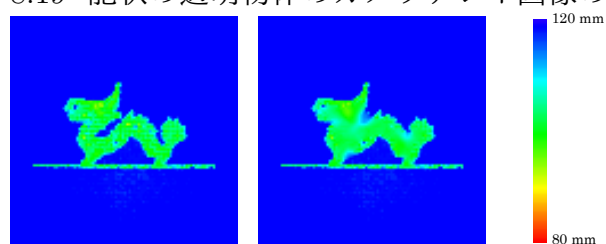
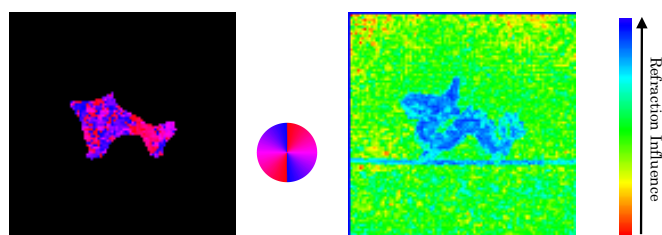


図 8.19 龍状の透明物体のカメラレイ画像の一部

(a) 初期推定
結果

(b) 推定結果



(c) 法線方向

(d) 屈折の
影響度

(e) 計算領域

(f) 輪郭

(g) 重み

図 8.20 龍状の透明物体の推定結果

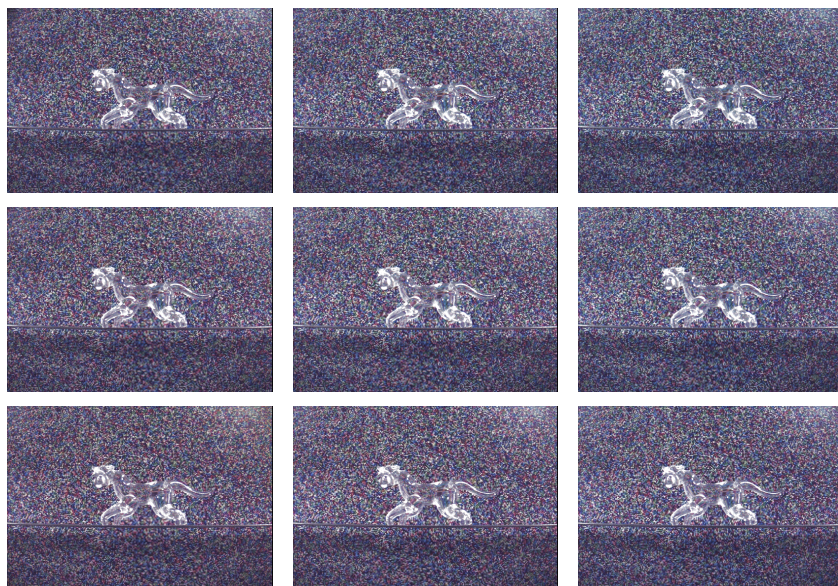
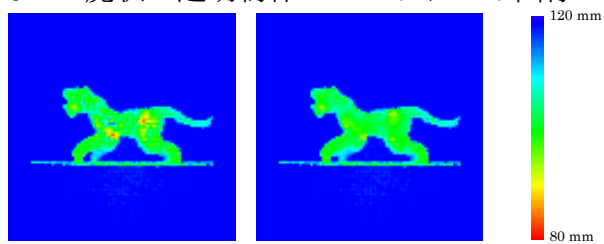
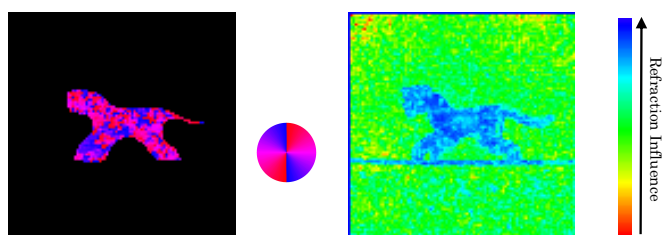


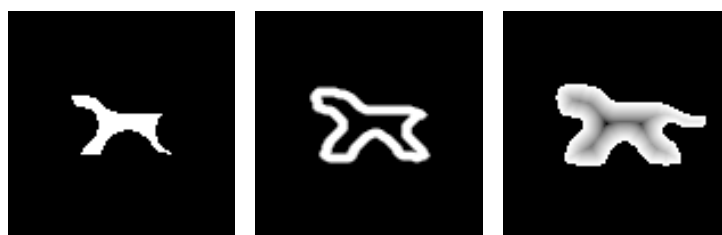
図 8.21 虎状の透明物体のカメラレイ画像の一部



(a) 初期推定
結果 (b) 推定結果



(c) 法線方向 (d) 屈折の
影響度



(e) 計算領域 (f) 輪郭 (g) 重み

図 8.22 虎状の透明物体の推定結果

8.2.2 考察

図 8.18 (a)、図 8.22 (a) を見ると、辺縁において距離および法線方向を推定できていることが確認できる。また、背景部分の推定結果が大きく外れた値となっていないことから、背景に用いた画像が対応付けに誤りが生じさせない画像であることが確認できた。しかし図 8.18 (a)、図 8.22 (a) では物体の中央付近において奥行きが正しく推定できていないことが確認できる。一方、視差の更新処理を施した結果の (b) においては、中央付近においてもっともらしい値に近づいていると予想される。また図 8.20 の結果においては、(a) でほとんどの領域において距離を推定できていることが確認できる。しかし (b) においては、一部の領域において物体が繋がる部分があることが確認できる。これは、(f) に示すようにその領域において正しく辺縁を判定できていないことが原因であると考えられる。これらの結果から、実測においてもシミュレーション同様に辺縁および法線方向を推定できることが確認できた。また、物体の形状によって影響が異なることも確認できた。

第9章

おわりに

本研究では、ライトフィールドカメラを用いて煙霧体の空間濃度分布および透明物体の表面形状を推定する手法を提案している。煙霧体の空間濃度分布を推定する手法では、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。精度を評価するため、シミュレーションにより得られた画像から、濃度分布の推定を行った。その結果、真値と推定結果の相関が約9割程度であることを確認した。また、実際に煙霧体が存在する空間を2台のライトフィールドカメラで撮影し、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、推定結果をボリュームレンダリングした画像と取得したリフォーカス画像が類似していることが確認できた。さらに、ボケモデルを改善することにより推定結果を向上することができることを確認した。

また、透明物体の表面形状を推定する手法では、1台のライトフィールドカメラを用いて透明物体を撮影し、得られたアレイ画像より表面形状を推定する。精度を評価するため、シミュレーションにより得られた画像から、表面形状の推定を行った。その結果、奥行きを平均推定誤差が1mm程度であることを確認した。また、実測において透明物体の形状および面の向きを推定する実験を行った。その結果、透明物体の形状および面の向きを推定できることを確認した。また物体の形状に依存するが、視差の更新により結果が改善されることを確認した。

透明物体の表面形状を計測する従来手法は、その多くが暗室で計測する手法であり、透明物体の屈折率を仮定する必要や物体形状の制限などがあり、図1.9に示すように、不透明体の計測手法に比べ実環境性が低い。また、手法によっては複数回の撮影を必要とする手法もある。また、煙霧体の濃度分布を計測する従来手法は、レーザ光を用いて複数回の撮影を必要とするため、図9.1に示すように、不透明体の計測手法に比べ実環境性・実時間性が低い。一方、本研究で提案する

透明物体の表面形状推定手法は、環境光下で推定でき、透明物体の屈折率の仮定などの制限がない。また、本研究で提案する煙霧体の空間濃度分布推定手法は、特殊な光源を用いないため安価で簡便であり、事前に一度背景を撮影することで、環境光下での推定も可能である。本研究の提案手法は、ライトフィールドカメラによる受動的な手法であるため、自然な環境に適用可能な手法である。また、提案手法は一回の撮影により得られた Light Field を用いて、屈折率などを仮定しない推定手法であるため、屈折率が未知であったり時間的に変動する対象であっても推定することが可能である。したがって、提案手法は光学的恒常性を有しない対象のための手法でありながら、実環境性・実時間性の高い手法である。

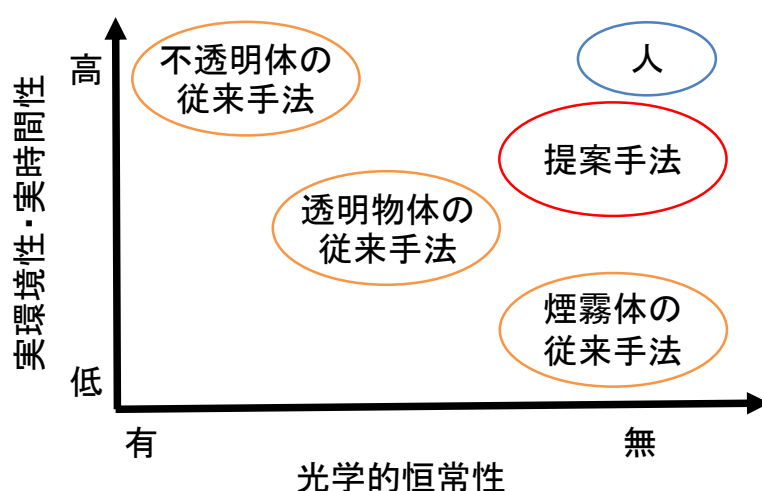


図 9.1 従来手法と提案手法の比較

本システムが実用化されれば、エンジン噴霧の推定、火事の際の煙および炎の推定、空気の流れの推定などの際に三次元空間濃度分布を推定し可視化、ガラス細工や氷彫刻の形状の推定、ガラス・プラスチック製品の形状の推定することが可能となる。したがって、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、ガラス・氷作品の記録、ロボットの透明物体の認識への適用などが期待される。表面で拡散反射しない対象の三次元の情報を推定することは、さまざまな用途に利用できる。特に提案手法は、一度の撮影画像から三次元情報を推定できるため、早い空気の流れの可視化や透明な流体の流れの解析などにも利用できると考えられる。したがって、流体解析への貢献にも繋がると考えられる。

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。

本研究を行うに当り、修士から五年に渡る研究生活において多くの方々に、ご助力頂きながら楽しく研究生活を送れたこと誠に感謝いたします。

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。また、多くの学会やコンテストへの参加などの勉学の機会を与えてくださったことを大変感謝いたします。

本論文の副査を引き受けて頂き、また、手厚いご指導ご鞭撻を賜りました大阪大学 大学院基礎工学研究科 和田成生教授ならびに、大阪大学 大学院基礎工学研究科 出口真次教授に感謝致します。

研究で提案する手法の方針などのご相談や議論などをさせて頂いた関西学院大学 理工学部 井村誠孝教授、また、プログラムのご指導をして頂いた大阪大学 大学院基礎工学研究科 黒田嘉宏准教授に感謝の意を表します。

定期的なミーティング等で研究についてご指導して頂き、本論文の執筆に関してもご指導して頂いた大阪大学 サイバーメディアセンター 浦西友樹准教授に感謝いたします。また、進路先の相談などの重要なことから些細なことまで相談させていただきありがとうございました。

また研究や進路等のご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お話を頂いた大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城研究室 招へい研究員 三宅正夫先生に感謝致します。

また皆で昼食に行った際などに気軽に話しかけて頂いた大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城研究室 秘書 杉浦延予氏に感謝いたします。

また、日頃より共に励まし合い、共に過ごしてきた大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城研究室の学生および卒業生の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] トンボ. <https://ja.wikipedia.org/wiki/トンボ> (reference 2017-1-26).
- [2] K. N. Kutulakos and S. M. Seitz. A theory of shape by space carving. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 38, No. 3, pp. 199–218, 2000.
- [3] P. Hanrahan and W. Krueger. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In *Proc. 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 165–174. ACM, 1993.
- [4] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan. A practical model for subsurface light transport. In *Proc. 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 511–518. ACM, 2001.
- [5] Z. Janko and D. Chetverikov. Photo-consistency based registration of an uncalibrated image pair to a 3d surface model using genetic algorithm. In *Proc. Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on*, pp. 616–622. IEEE, 2004.
- [6] G. Vogiatzis, C. H. Esteban, P. H. Torr, and R. Cipolla. Multiview stereo via volumetric graph-cuts and occlusion robust photo-consistency. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 29, No. 12, pp. 2241–2246, 2007.
- [7] S. N. Sinha and M. Pollefeys. Multi-view reconstruction using photo-consistency and exact silhouette constraints: A maximum-flow formulation. In *Proc. Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1*, Vol. 1, pp. 349–356. IEEE, 2005.

- [8] K. Koshikawa. A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects. In *Proc. International Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp. 493–495, 1979.
- [9] C. Inoshita, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, and Y. Yagi. Shape from single scattering for translucent objects. In *Proc. Computer Vision–ECCV 2012*, pp. 371–384. Springer, 2012.
- [10] D. Miyazaki and K. Ikeuchi. Inverse polarization raytracing: estimating surface shapes of transparent objects. In *Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 910–917. IEEE, 2005.
- [11] D. Miyazaki, M. Kagesawa, and K. Ikeuchi. Transparent surface modeling from a pair of polarization images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, No. 1, pp. 73–82, 2004.
- [12] 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.
- [13] K. Maeno, H. Nagahara, A. Shimada, and R. Taniguchi. Light field distortion feature for transparent object recognition. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2786–2793, 2013.
- [14] G. Wetzstein, D. Roodnick, W. Heidrich, and R. Raskar. Refractive shape from light field distortion. In *Proc. IEEE International Conf. Computer Vision*, pp. 1180–1186. IEEE, 2011.
- [15] G. Wetzstein, W. Heidrich, and R. Raskar. Computational schlieren photography with light field probes. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 110, No. 2, pp. 113–127, 2014.
- [16] Y. Qian, M. Gong, and Y. H. Yang. 3d reconstruction of transparent objects with position-normal consistency. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4369–4377, 2016.
- [17] K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, and Y. Yagi. Recovering transparent shape from time-of-flight distortion. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4387–4395, 2016.

-
- [18] B. Atcheson, I. Ihrke, W. Heidrich, A. Tevs, D. Bradley, M. Magnor, and H. P. Seidel. Time-resolved 3d capture of non-stationary gas flows. *ACM Trans. Graphics*, Vol. 27, No. 5, p. 132, 2008.
- [19] J. Yu, J. Ye, and J. Yu. Reconstructing gas flows using light-path approximation. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2507–2514, 2013.
- [20] 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.
- [21] 張玉銀, 伊藤友昭, 西田恵哉. レーザ吸収・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.
- [22] 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.
- [23] T. Hawkins, P. Einarsson, and P. Debevec. Acquisition of time-varying participating media. *ACM Trans. Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 812–815, 2005.
- [24] O. Chum, T. Pajdla, and P. Sturm. The geometric error for homographies. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 97, No. 1, pp. 86–102, 2005.
- [25] R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [26] 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.
- [27] R. Ng. Fourier slice photography. Vol. 24, No. 3, pp. 735–744, 2005.
- [28] 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.

- [29] 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.
- [30] V. Vaish, B. Wilburn, N. Joshi, and M. Levoy. Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004.
- [31] T. Georgiev and A. Lumsdaine. Reducing plenoptic camera artifacts. *Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd*, pp. 1955–1968, 2010.
- [32] Z. Yu, J. Yu, A. Lumsdaine, and T. Georgiev. An analysis of color demosaicing in plenoptic cameras. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 901–908, 2012.
- [33] T. Georgiev, Z. Yu, A. Lumsdaine, and S. Goma. Lytro camera technology: theory, algorithms, performance analysis. IS & T/SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, pp. 86671J–1–86671J–10, 2013.
- [34] E. H. Adelson and J. Y. A. Wang. Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 99–106, 1992.
- [35] T. E. Bishop, S. Zanetti, and P. Favaro. Light field superresolution. In *Proc. Computational Photography (ICCP), 2009 IEEE International Conference on*, pp. 1–9. IEEE, 2009.
- [36] L. Wei, C. Liang, G. Myhre, C. Pitts, and K. Akeley. Improving light field camera sample design with irregularity and aberration. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 34, No. 4, p. 152, 2015.
- [37] Z. Yu, J. Yu, A. Lumsdaine, and T. Georgiev. An analysis of color demosaicing in plenoptic cameras. In *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on*, pp. 901–908. IEEE, 2012.

-
- [38] D. G. Dansereau, O. Pizarro, and S. B. Williams. Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1027–1034, 2013.
- [39] T. E. Bishop and P. Favaro. Plenoptic depth estimation from multiple aliased views. In *Proc. IEEE International Conf. Computer Vision Workshops*, pp. 1622–1629. IEEE, 2009.
- [40] T. E. Bishop and P. Favaro. Full-resolution depth map estimation from an aliased plenoptic light field. In *Proc. Asian Conference on Computer Vision*, pp. 186–200. Springer, 2010.
- [41] M. W. Tao, S. Hadap, J. Malik, and R. Ramamoorthi. Depth from combining defocus and correspondence using light-field cameras. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 673–680, 2013.
- [42] I. Tosić and K. Berkner. Light field scale-depth space transform for dense depth estimation. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 435–442, 2014.
- [43] M. Diebold, O. Blum, M. Gutsche, S. Wanner, C. Garbe, H. Baker, and B. Jähne. Light-field camera design for high-accuracy depth estimation. In *Proc. SPIE Optical Metrology*, pp. 952803–952803. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [44] O. Johannsen, A. Sulc, and B. Goldluecke. What sparse light field coding reveals about scene structure. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3262–3270, 2016.
- [45] <http://www.sound-pro.jp/cn6/pg24.html> (reference 2013-12-12).
- [46] <http://www.kirinoikeuchi.co.jp/nozzle/products/kind/nozzle02/77kb.html> (reference 2014-7-23).
- [47] <http://www.kanshin.com/keyword/1307264> (reference 2013-12-12).
- [48] Glass sculpture. http://www.f-w.jp/gallery/g_insects/kuwa.html (reference 2015-07-13).

- [49] Ice sculpture. <http://www.mtlabs.co.jp/shinshu/event/koori.htm> (reference 2015-07-13).
- [50] Plastic crafts. <http://eexpo.jp/products/2000251758> (reference 2015-07-13).
- [51] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1, chapter 26. Basic Books, 1963.
- [52] 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.
- [53] 井口征士, 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 東京, 1990.
- [54] 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.
- [55] R. Nevatia. Depth measurement by motion stereo. Vol. 5, pp. 203–214. Elsevier, 1976.
- [56] A. Yamashita, H. Higuchi, T. Kaneko, and Y. Kawata. Three dimensional measurement of object 's surface in water using the light stripe projection method. In *Proc. IEEE International Conf. Robotics and Automation*, 2004.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] B. G. Baumgart. Geometric modeling for computer vision. *PhD dissertation, aIM-249, STAN-CS-74-463, Computer Science Dept., Stanford Univ.*, 1974.
- [60] C. H. Chien and J. K. Aggarwal. Volume/surface octress for the representation of three-dimensional objects. Vol. 36, pp. 100–113, 1986.

-
- [61] R. Szeliski. Rapid octree construction from image sequences. Vol. 58, pp. 23–32, 1993.
- [62] S. Lazebnik, Y. Furukawa, and J. Ponce. Projective visual hulls. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 74, No. 2, pp. 137–165, 2007.
- [63] J. S. Franco and E. Boyer. Efficient polyhedral modeling from silhouettes. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 31, No. 3, pp. 414–427, 2009.
- [64] A. Bottino and A. Laurentini. The visual hull of smooth curved objects. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, No. 12, pp. 1622–1632, 2007.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] K. Zhou, Z. Ren, S. Lin, H. Bao, B. Guo, and H. Y. Shum. Real-time smoke rendering using compensated ray marching. *ACM Trans. Graphics*, Vol. 27, No. 3, p. 36, 2008.
- [68] C. Fuchs, T. Chen, M. Goesele, H. Theisel, and H. P. Seidel. Density estimation for dynamic volumes. *Computers & Graphics*, Vol. 31, No. 2, pp. 205–211, 2007.
- [69] 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.
- [70] The stanford 3d scanning repository. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/> (reference 2015-10-06).
- [71] Blender. <https://www.blender.org/> (reference 2016-10-06).

研究業績

- 関連論文

1. 井手口裕太, 浦西友樹, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 大城理. ライトフィールドからの煙の空間濃度分布推定. 映像情報メディア学会誌, Vol.70, No.7, pp. J146-J157, 2016.
2. Yuta Ideguchi, Yuki Uranishi, Shunsuke Yoshimoto, Yoshihiro Kuroda, Masataka Imura, Osamu Oshiro. Reconstruction of Smoke based on Light Field Consistency. IEEE Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.136, No.12, pp.522-531, 2016.

- 参考論文

1. 井手口裕太, 浦西友樹, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 大城理. Oil Bubble Display: 油を投影面とした変形・結合・分裂が可能なディスプレイ. 芸術科学会, 投稿中

- 国際会議

1. Junki Kawaguchi, Yuta Ideguchi, Yuki Uranishi, Shunsuke Yoshimoto, Yoshihiro Kuroda, Masataka Imura, Osamu Oshiro. Oil Bubble Display: Oil Display for Flexible Interaction with Projected Images. Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Teleexistence, 2015/10.
2. Yuta Ideguchi, Yuki Uranishi, Shunsuke Yoshimoto, Yoshihiro Kuroda, Osamu Oshiro. Surface Estimation of Transparent Object based on Local Photo Consistency. Proceedings of International Workshop on Advanced Image Technology, 1B-5, 2016/01.
3. Pasi Raunonen, Yuta Ideguchi, Yuki Uranishi, Markku Åkerblom, Mikko Kaasalainen, Shunsuke Yoshimoto, Yoshihiro Kuroda, Osamu

Oshiro. Virtual Reality Forest: Realistic Trees Based on Laser Scans. Proceedings of European Association for Virtual Reality and Augmented Reality, 2016/11.

● 国内発表

1. 横畑亮輔, 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. 第 57 回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, 横畑亮輔, 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. 第 28 回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
7. 井手口裕太, 浦西友樹, 吉元俊輔, 井村誠孝, 大城理. ボクセル空間における煙霧のボケ除去の GPU を用いた高速化. 第 58 回システム制御情報学会研究発表会, iSCIe 58:335-3, 2014 年 5 月
8. Yuta Ideguchi, Yuki Uranishi, Shunsuke Yoshimoto, Masataka Imura, Osamu Oshiro. Reconstruction of Spatial Density of Smoke based on Light Field Consistency. 第 17 回画像の認識・理解シンポジウム MIRU2014, SS1-58, 2014 年 7 月

9. 加藤高浩, 上西健太, 川口純輝, 古澤大樹, 井手口裕太. 渡る世間は綱渡り. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.156-157, 2014 年 09 月
10. 川口純輝, 加藤高浩, 上西健太, 古澤大樹, 井手口裕太. Oil Bubble Display. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.148-149, 2014 年 09 月
11. 井手口裕太, 川口純輝, 和田章宏, 浦西友樹, 吉元俊輔, 井村誠孝, 大城理. Oil Bubble Display : 油の変形・結合・分離による投影像の形状や色とのインタラクション. インタラクション 2015 論文集, pp.1005-1009, 2015 年 3 月
12. 井手口裕太, 浦西友樹, 吉元俊輔, 井村誠孝, 大城理. 平行投影近似のためのライトフィールドカメラへの補助レンズの追加. 第 59 回システム制御情報学会研究発表会, iSCIe 59:343-2, 2015 年 5 月
13. Yuta Ideguchi, Yuki Uranishi, Shunsuke Yoshimoto, Masataka Imura, Osamu Oshiro. Light Field Consistency for Spatial Density Estimation of Smoke. 第 18 回画像の認識・理解シンポジウム MIRU2015, SS1-9, 2015 年 7 月
14. Yuta Ideguchi, Yuki Uranishi, Shunsuke Yoshimoto, Yoshihiro Kuroda, Masataka Imura, Osamu Oshiro. Spatial Density Estimation of Smoke based on Light Field Consistency. 第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 30am2-PS-070, 2015 年 10 月
15. 井手口裕太, 浦西友樹, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理. 辺縁での光学的部分恒常性に基づく透明物体の表面形状推定. 第 161 回 GCAD・第 199 回 CVIM 合同研究会, 11, 2015 年 11 月
16. Yuta Ideguchi, Yuki Uranishi, Shunsuke Yoshimoto, Yoshihiro Kuroda, Osamu Oshiro. 5D Estimation of Transparent Object based on Light Field Convergency. 第 19 回画像の認識・理解シンポジウム MIRU2016, OS1-02, 2016 年 8 月
17. 井手口裕太, 浦西友樹, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理. 光線収束性を用いた透明物体表面の五次元推定の高精度化. CVIM 第 204 回・CGVI 第 165 回・DCC 第 14 回合同研究会, 4, 2016 年 11 月

● 受賞

1. 井手口裕太. 第28回エンタテインメントコンピューティング研究発表会 学生発表賞. 2014年3月
2. 井手口裕太. 第57回システム制御情報学会研究発表会 学会奨励賞. 2014年5月
3. 加藤高浩, 上西健太, 川口純輝, 古澤大樹, 長坂信吾, 和田章宏, 井手口裕太. IVRC2014 川上記念特別賞および未来観客賞. 2014年10月
4. 井手口裕太. MIRU 学生奨励賞. 2016年8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
3. 井手口裕太. Light Field Consistency に基づくボケ除去による煙霧の空間濃度分布推定. 河原研-大城研合同ゼミ, 2014年6月
4. 井手口裕太. Light Field Consistency に基づくボケ除去による煙霧体濃度推定. 生体工学領域交流会, 2014年7月
5. 井手口裕太. Light Field Consistency に基づくボケ除去による煙霧の濃度計測. 生体工学領域交流会, 2015年9月
6. 井手口裕太. 物体透過時の光線収束性. 生体工学領域交流会, 2016年7月