

博士論文 (要約)

ライトフィールドにおける
光線制御とその応用

安井 雅彦

Ray Control in Light Field and Applications

Abstract

Ray control is an essential fundamental technology for capturing objects and events optically and adding information to the real world. In addition, it is used in various fields such as imaging, measurement, processing, communication, and information presentation. Until now, ray control has rarely controlled all of the degrees of freedom of a ray, such as position, direction, wavelength, and intensity. Therefore, it is difficult to control all the degrees of freedom of a ray with standard consumer devices. In recent years, however, ray control in the light field has been developed in various fields such as spatial image imaging, 3D sensing, and 3D image formation. However, the existing ray control methods have spatial limitations such as occlusion, viewing angle, and other lighting environments.

This research aims to eliminate the spatial limitations that exist in conventional ray control methods. In this study, we propose a new system and method of ray control in the light field to deal with these limitations. The proposed system and method extend the possible application area of ray control. First, we propose a system that applies the ray control used in 3D image formation to the projection and capture systems in active sensing. This system realizes 3D sensing with high robustness against occlusion. Second, we proposed a 3D image formation system based on integral photography using reflections from curved surface mirrors. The system achieves a wide viewing angle of ± 60 deg with a space-saving configuration of a single projector.

概要

光線制御は光学的に対象や事象を捉え、実世界に情報を付加するための重要な基盤技術であり、撮像、計測、加工、通信、情報提示といった様々な分野に活用されている。これまでの光線制御では、光線のもつ位置、方向、波長、強度といった自由度のうち、すべてを制御対象としたものは稀であった。このため、光線自由度のすべてを制御する、つまりライトフィールドにおける光線制御を行うことは、一般的に普及しているデバイスでは困難である。一方で近年では、空間像撮像、3次元センシング、3次元像形成といった各分野でライトフィールドにおける光線制御が発展してきており、その制御技術を用いた応用が進んでいる。これらは光源、レンズ、反射素子、撮像素子などに工夫を施し、またそれらを組合せることで所望の光線制御を可能としている。しかしながら、既存の光線制御方式には、遮蔽、視野角、他照明環境、などの空間的制約が挙げられる。

従来の光線制御に存在していた、空間的制御を撤廃することを本研究の課題として掲げる。本研究では、このような制約に対してライトフィールドにおける光線制御のシステムと方式を新たに提案し、光線制御の応用可能領域を拡張する。基盤技術としては、まず能動センシングにおける投影光と反射光に、3次元像形成で用いられる光線制御を適用したシステムを提案し、遮蔽への頑健性を高めた3次元センシングを実現した。次に、曲面合せ鏡による反射を利用したインテグラルフォトグラフィによる3次元像形成システムを提案し、プロジェクタ1台の省スペースな構成でありながら $\pm 60\text{ deg}$ の広い視野角を達成した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	光線制御	1
1.2	ライトフィールドにおける光線制御	1
1.3	本研究における方針と目的	4
1.4	本論文における構成	5
第 2 章	研究背景	8
2.1	ライトフィールドとその応用	8
2.2	3 次元センシング	10
2.3	3 次元像形成	14
2.4	プロジェクションマッピング	17
第 3 章	3 次元像形成における光線制御を応用した 3 次元センシング	20
3.1	はじめに	21
3.2	関連研究	24
3.3	3 次元像形成における光線制御を応用した 3 次元センシング	25
3.4	シミュレーション	33
3.5	評価実験	43
3.6	考察	50
3.7	本章のまとめ	53
第 4 章	曲面合せ鏡を用いた省スペースかつ広視野角な 3 次元像形成	55
4.1	はじめに	55
4.2	関連研究	57
4.3	曲面合せ鏡を用いた省スペースかつ広視野角な 3 次元像形成	59
4.4	評価実験	64
4.5	考察	72
4.6	本章のまとめ	73
第 5 章	****	75

iv 目次

第 6 章 結論	76
謝辭	79
参考文献	82

第 1 章

序論

1.1 光線制御

我々生命の中には、太古の時代よりその進化の過程で眼という感覚器官を手に入れ光を検出する術を身に着けた種がいる。またある種は、自らの身体に発光器を創出し光を出す術を身に着けた。一方人類は身体的能力であるところの眼によってもたらされる機能に加えて、火を手にし暗闇でも世界を明るく照らす技術的能力をものにした。やがて人類は鏡を作り、レンズを作り、光線制御の技を磨いていった。光線制御とは、光線の持つ自由度である位置、方向、波長、位相、強度、分極の少なくとも 1 つを制御することである。現代において光線制御は、撮像、計測、加工、通信、情報提示といった用途に必要な光線を得るために必要不可欠なものとなっている。光線制御においては、反射、屈折、干渉、偏光といった光学特性を持ったそれぞれの素子を用いて、目的とする光線自由度に対して的確な制御を行うことが重要になっている。

従来求められてきた光線制御では、光線自由度すべてを制御対象とすることは稀であった。空間の記録方式を例に取れば、写真は光線の波長と強度の制御を実現しているが、位置と方向の制御は不十分であり、このため写真では立体的な知覚を得ることはできない。また、撮像を例にとればこれは 3 次元的な光線の広がりをも 2 次元面に射影する行為であり、イメージセンサ上の各素子における強度のみを記録している。このため、各素子では光線の到来方向までは記録されておらず、そのような記録は必要とされてこなかった。これは、従来はデバイスの処理能力や記録容量に制限があり、さらにこれで事足りていたためである。しかし、周辺デバイス性能の向上によってより複雑な制御に対応した応用が可能となり、光線制御への要請水準が高まってきている。この中でも、高速性や正確性といった要請に加えて、光線自由度の制御対象拡充、ひいてはそのすべてを制御することが求められるようになってきている。

1.2 ライトフィールドにおける光線制御

上のような要請の中で、空間上に存在する光線を表現する概念として、ライトフィールド [1] が創出された。ライトフィールドは一般的に、空間内のすべての点における光線の情報を輝度

2 第1章 序論

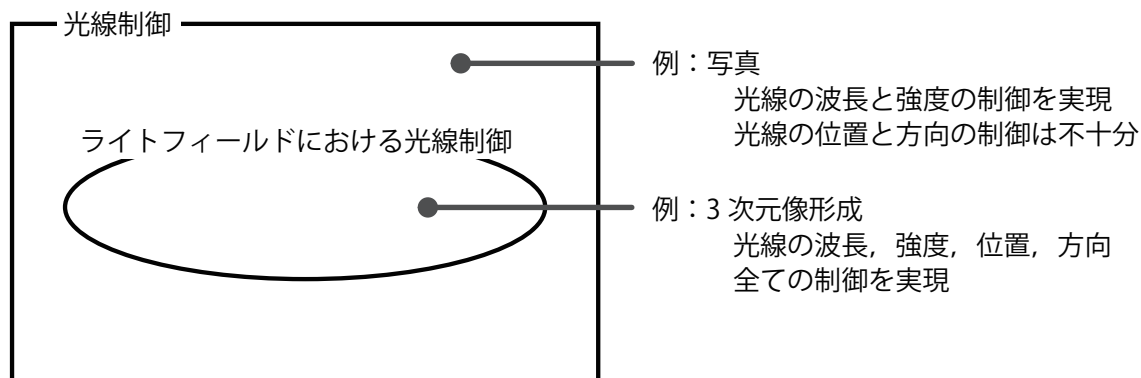


図 1.1. 光線制御とライトフィールドにおける光線制御の比較。写真は光線制御の一例ではあるがライトフィールドにおける光線制御ではない。写真では位置と方向の光線制御が不十分であるために立体的な知覚を得ることができない。一方でホログラフィはライトフィールドにおける光線制御である。光線の位置、方向、波長、強度を制御可能で、これによって立体的な知覚を得ることができる。

のスカラー場として表した関数、とされる。つまり位置と方向を変数として光線の輝度を与える関数と表現することである。本研究では、このような多次元的な光線自由度の記述を総称してライトフィールドと呼称する。ライトフィールドという概念は、元来コンピュータグラフィックス (CG) の分野において創出されたものである。CG におけるレンダリングを想定して、フォトリアリスティックな映像生成や3次元的な構成からの2次元映像生成、多視点映像生成への適用がなされてきた。

こうしたライトフィールドという概念が、CGだけでなく現実世界の光線制御においても活用されるケースが増えてきている。3次元ディスプレイにおける光線の表現方法でも同様の概念が創出されており、上で述べた光線自由度の制御対象拡充とともに、ディスプレイ、計測、撮像といった分野を始めとして、様々な場面で応用されるようになってきている。本研究では、図 1.1 に示すようにライトフィールドを以て現実の光線制御を行うことをライトフィールドにおける光線制御と呼称し、より具体的にはライトフィールドにおける光線制御を、多次元的な光線自由度を制御対象とした光線制御、とする。つまり本研究においては、光線制御 ≡ ライトフィールドにおける光線制御、という包含関係においてこれらを扱う。また、その名にあるように、ライトフィールドとは空間的な拡がりを持った概念である。故に、1本の光路のみを考えるようなレーザー光や2次元面として記述できるラインレーザやスリット光なども、ライトフィールドの対象に含まれるものの、本研究でターゲットとするのは空間的拡がりの中に無数の光線が存在している状態である。

ライトフィールドにおける光線制御による発展は多分野に及ぶ。空間上のある点へ光線があらゆる方向から集まるような構成を取ることで、その点にあたかも実物があるときと同じ光線の構成を作り出すことができる。これによって、3次元像を形成することが可能になる。また、ライトフィールドカメラによる撮像ではイメージセンサ上の各素子において、光線の入射方向ごとに強度を記録する。これによって、撮像後にピントや被写界深度を変更する事が可能

になる。

こうしたライトフィールドにおける光線制御が目指す方向性の1つに、ライトフィールドの完全な取得と再現がある。日常で我々が目にする空間でのライトフィールドを全て取得し、全てを別の場所に再現できれば、我々はあたかも元の空間にいるかのような視覚的知覚を得ることができる。現在ではヘッドマウントディスプレイなどの装着型デバイスによって得られる体験がそのようなデバイスの装着なしに実現できることになり、装着型デバイス起因の制約を撤廃することが可能になる。しかし、現時点でこのようなライトフィールドの完全な取得と再現は実現できていない。この理由には、空間的制約の存在がある。

光線制御を構成する光線自由度には、空間次元をなす位置と方向、そして非空間次元をなす強度、波長、位相、分極がある。ここで、光路が存在、つまり空間次元が制御できている上で、光線の内容、つまり非空間次元の制御を行うことは比較的容易である。光源のパワーを制御することや、フィルターを用いることで非空間次元の制御を行うことができる。一方で、光線の内容、つまり非空間次元が制御できている上で、光路の自由な制御、つまり空間次元の制御を行うことは比較的困難である。つまり、もともと光路が用意できた上でその内容を制御することは容易であっても、そもそも光路を自由に配置することの難易度が高い。このように、ライトフィールドにおける光線制御では、空間的制約の存在が光線制御の応用範囲拡充の妨げとなり、空間的制約の撤廃が課題となっていた。このような空間的制約には様々なものがある。身近な例を挙げれば、光線がある空間へ届かない、あるいはその空間から光線が届かない場合に計測や撮像が行えなくなってしまう。そこで本研究では、このような空間的制約の撤廃を課題として、ライトフィールドにおける光線制御の新たなシステムとその制御方式を提案する。

空間において光線にかかわる要素は、位置、方向、そしてその空間を満たす媒体の3つである。位置の制約となっているものとして、遮蔽がある。遮蔽とはある位置に光線が届かないことを意味する。これによって対象の計測がうまく行えなかったり、像が観察できなかったりといった弊害を生じる。方向の制約になっているものとして、狭い視野角がある。狭い視野角とは、光線の制御可能角度が狭いことを意味する。これによって、計測可能な画角が制限されてしまったり、提示装置に対して観察可能な角度が制限されてしまう。媒体の制約になっているものとして、他照明環境との共存がある。媒体とは、空間中に別の光線が存在していることを意味し、この影響によって所望のライトフィールドにおける光線制御が機能しなくなる、あるいはノイズが混入するなどの弊害を生じる。

このように、本研究が解決対象とする光線制御における空間的制約は遮蔽、視野角、他照明環境の3つである。遮蔽とは、光線制御可能な空間や対象形状における制約のことを指すものとする。視野角とは、光線制御可能な光線の方向における制約のことを指すものとする。他照明環境とは、光線制御対象空間に他の光線あるいは光線群が存在する事によって生じる制約のことを指すものとする。これらそれぞれに対して、本研究では主に3次元像形成で用いられる光線制御の方式を応用した新たなシステムと方式を以てこの解決を目指す。図1.2に示すように、本研究ではこれら空間的制約の撤廃により、光線制御の応用可能領域を拡張する。これによって、本研究の先にあるライトフィールドの完全な取得と再現に向けた足がかりを得ることを目標とする。

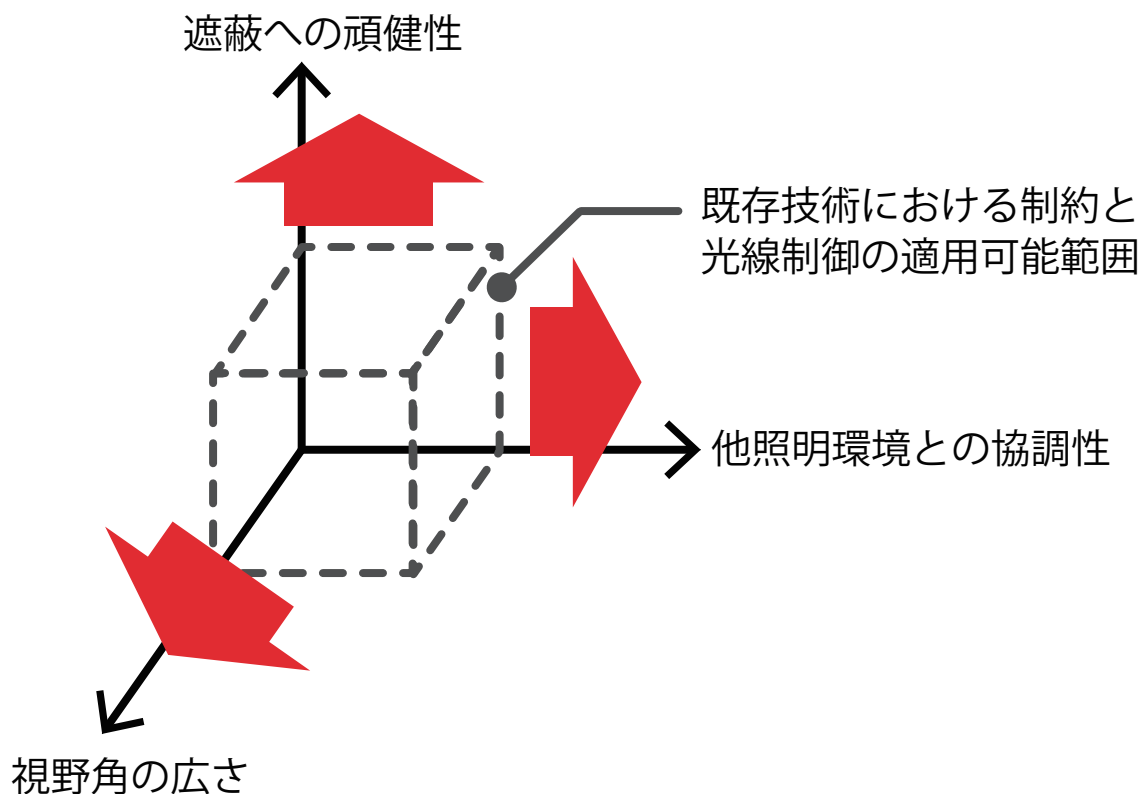


図 1.2. 光線制御における空間的制約解消による応用範囲の拡がり.

1.3 本研究における方針と目的

本論文では、光線制御のもつ空間的制約の解消に向けて、特に課題となっている遮蔽への高い頑健性、広い視野角、他照明環境との共存、を達成することを目指す。また、このような光線制御を達成するためのアプローチとして、それぞれの課題が顕在化するシーンでのライトフィールドにおける光線制御の新たなシステムの構成とその制御方式を提案する。

遮蔽の問題が顕在化するシーンの中で代表的なものとして、3次元センシングにおける遮蔽物による計測点の欠損がある。従来の光学的能動センシングにおいては、図 1.3 に示すように対象と装置を結ぶ1本の光路が遮られてしまうだけで、センシングが機能しなくなるという遮蔽物への脆弱性という問題があった。光学的能動センシングにおける投影光と反射光に3次元像形成に用いられる光線制御を適用したシステムを提案する。遮蔽への頑健性を高めた3次元センシングを実現した。修士課程における研究では、原理提案と簡単な評価実験にとどまっていた。本研究ではこれを発展させ、装置設計をシミュレーションによって評価し最適化を行う。さらに本システムによってセンシングと3次元像提示を同一のシステム内で完結させる方式を実現し、インタフェースとしての機能評価を行う。

広い視野角が求められるシーンの中で代表的なものとして、3次元像を斜めから観察する状

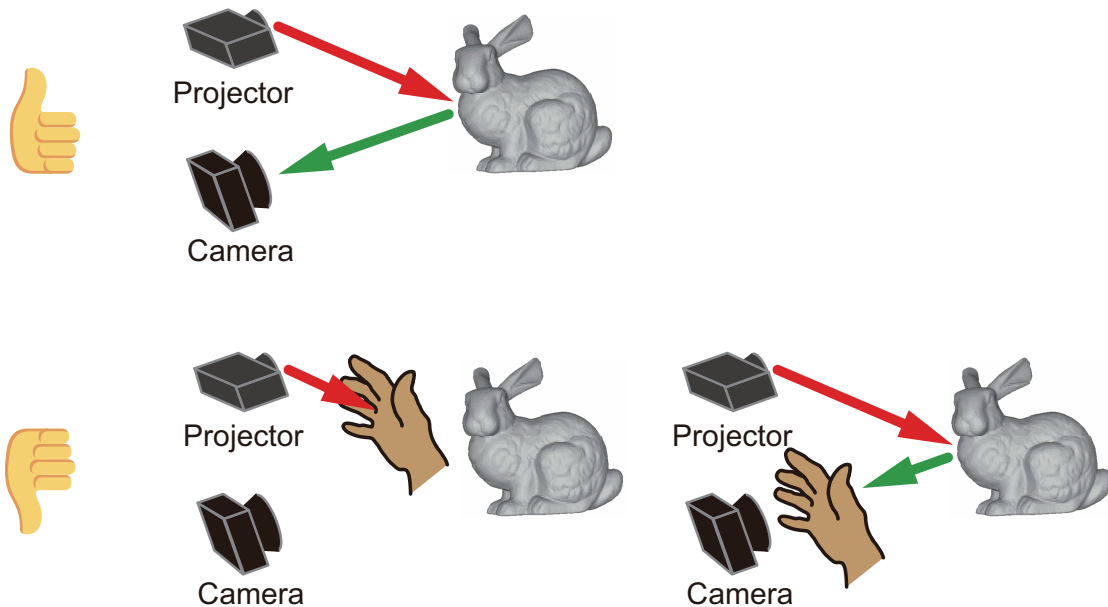


図 1.3. 従来の光学的能動センシングにおける遮蔽問題.

況が挙げられる．形成された 3 次元像を観察する際，正面からのみならず可能な限り斜めや横から観察できることがユーザー体験を高めることにつながる．レンズアレイにプロジェクタの光を投影し，ライトフィールドを形成して 3 次元像を形成するという投影型のインテグラルフォトグラフィを用いた手法は数多く存在する．しかし，像が見える角度，つまり視野角を広く取る設計では，プロジェクタをレンズアレイを中心とした扇形に並ぶようレンズアレイ後方に配置し，レンズアレイへの入射角が大きくなるようにする必要がある．この場合には，レンズアレイ後方に広いスペースが必要だった．図 1.4 に示すように，広い視野角とシステムが必要とするスペースにはトレードオフの関係があった．本研究では曲面合せ鏡による反射を用いて，プロジェクタ 1 台をレンズアレイの真後ろに設置するという省スペースな構成でもレンズアレイへの入射角を大きく取ることができるシステムを提案する．プロジェクタ 1 台の省スペースな構成でありながら $\pm 60 \text{ deg}$ の広い視野角を実現する．

-

博士論文の全文を公表できない場合のガイドラインに基づきこの部分の内容を非公開とします．本内容は 2 年以内に出版予定です．

-

1.4 本論文における構成

ライトフィールドの完全な取得と再現，というライトフィールドにおける光線制御での目的達成のため，本研究では空間的制約の撤廃を掲げた．そこで，この後続く各論では，それぞれ遮蔽への高い頑健性，広い視野角，他照明環境との共存，の実現を行う構成をとっている．

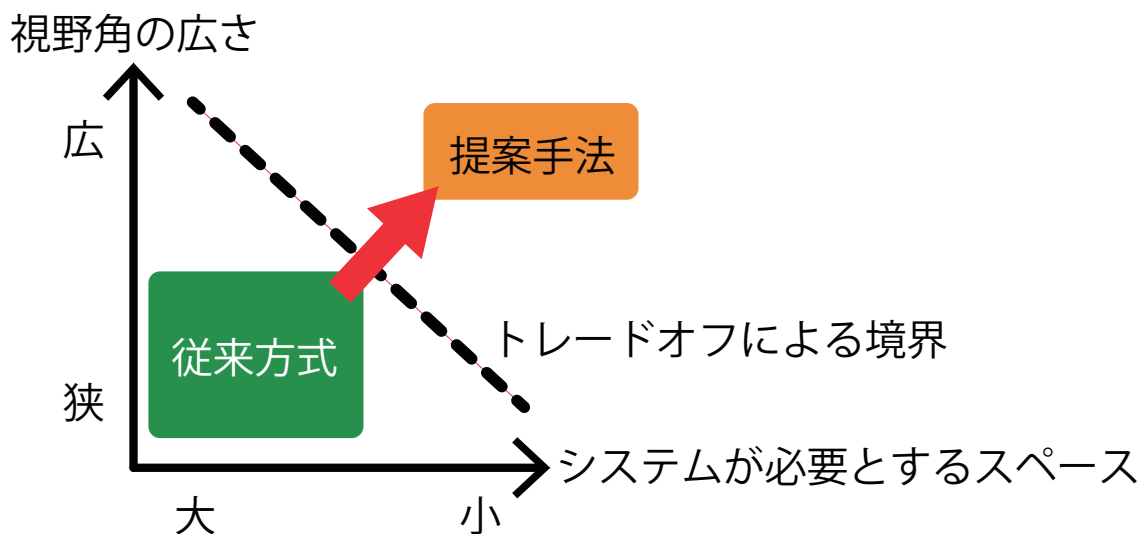


図 1.4. 従来の3次元像形成方式における視野角と必要スペースのトレードオフ。

この中で、各問題と各課題に対して、3次元センシングや3次元像形成といったそれぞれのシーンでの解決事例を示した。これらで得る方式は、他のシーンでも活用できる、あるいはその先行例となり得る内容となっており、各シーンに限定されるものではない。このように、各シーンでの解決を以て、光線制御全体の発展、新領域の開拓へとつなげる。

博士論文の全文を公表できない場合のガイドラインに基づきこの部分の内容を非公開とします。本内容は2年以内に出版予定です。

本論文の構成を図 1.5 に示す。第1章では、本研究で対象とする領域を定義し、本研究で採るアプローチの概要を述べる。第2章では、本研究の対象であるライトフィールドにおける光線制御を軸に、各応用領域でのアプローチと現状の課題を整理する。この中で、ライトフィールドにおける光線制御における恩恵とそれによって可能となったアプリケーションについても概観する。第3章では、光学的能動センシングにおける投影光と反射光に3次元像形成に用いられる光線制御を適用したシステムを提案する。これによって、遮蔽への頑健性を高めた3次元センシングを実現する。第4章では、曲面合せ鏡による反射を用いて、プロジェクタ1台をレンズアレイの真後ろに設置するという省スペースな投影型インテグラルフォトグラフィによる3次元像形成システムを提案する。これによって、プロジェクタ1台の省スペースな構成でありながら $\pm 60 \text{ deg}$ の広い視野角を実現する。第5章では、

博士論文の全文を公表できない場合のガイドラインに基づきこの部分の内容を非公開とします。本内容は2年以内に出版予定です。

第6章では、本研究で提案したシステムと制御方式の概観を述べ、将来的な方向性、加え

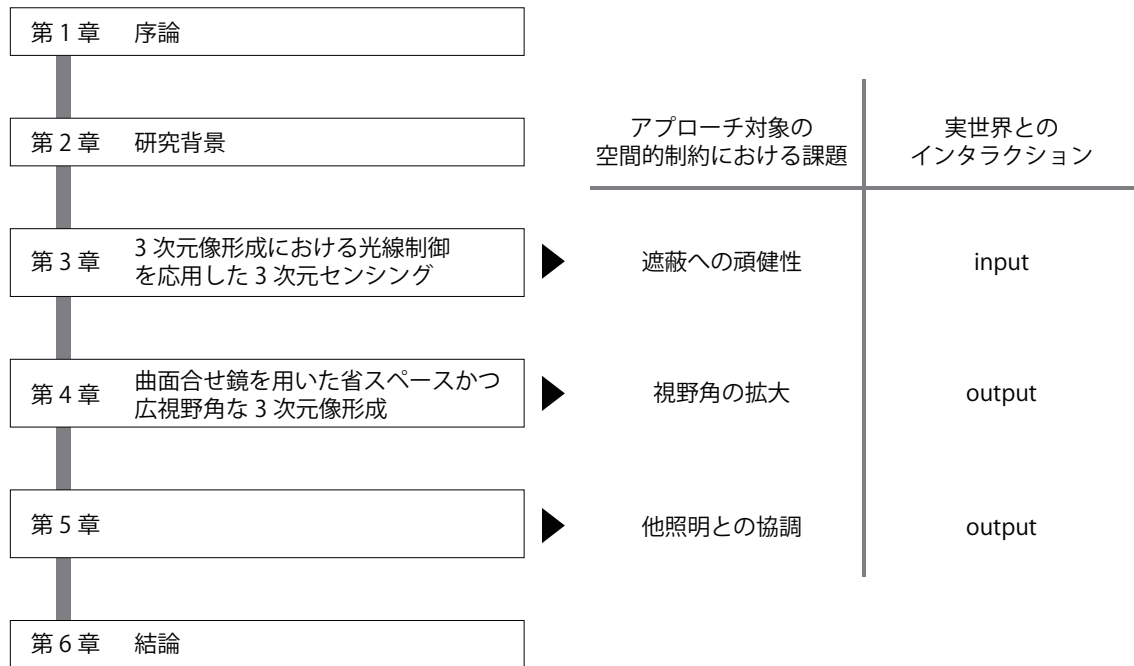


図 1.5. 本論文の構成.

てライトフィールドにおける光線制御での残置された課題について整理し，本論文の結論とする。

第 2 章

研究背景

本章では，ライトフィールドの概要をまず最初に整理する．次に，ライトフィールドにおける光線制御を軸にしながら，本研究と関連する技術とその応用，さらには現状の課題を述べる．

2.1 ライトフィールドとその応用

ライトフィールドの起源は古く，20 世紀初頭にまで遡る．カラー写真の撮像技術でノーベル物理学賞を受賞する Lippmann は，インテグラルフォトグラフィと呼ばれる技術を考案した [2]．これは写真の撮像面，現代ではイメージセンサであるが当時はフィルムあるいは乾板，の前にレンズアレイを置くことで，光線の到来方向までを記録することを可能にした．図 2.1 に示すように，撮像面の各領域はレンズアレイの各レンズに対応する．撮像した空間上の 1 点 A より飛来する光線が撮像面上の複数の点 a_i に記録され，これを現像することで光線の方向が推定できるというものである．この革新的技術は，フィルムや乾板といったデバイスではこの扱いに限界があり，当時それ以上の発展は長きにわたってなされることはなかった．

その後約 100 年の時が経ち，計算機の発展とともに CG の隆盛やデジタルカメラ，イメージセンサの開発によって，Lippmann の発案した光線制御は再び注目され，その表現体系としてライトフィールドが発明されるに至る．ライトフィールドの前身として，Adelson らは，人間が知覚する光線情報を Plenoptic Function という 7 次元関数 $P(x, y, \lambda, t, V_x, V_y, V_z)$ で記述した [3]．これは，視点位置を空間中の (V_x, V_y, V_z) に置いたとき，時刻 t では撮像平面上の (x, y) の位置に波長 λ の光が強度 P で観測される，ということを表している．しかし，光線情報を扱うにあたり波長 λ や時刻 t を省いて良い場合もあり，この場合は 5 次元関数となる．また，この関数形では空間上のある一点を基準点としているが，この光線の光路直線上で減衰による強度低下を考えなければこの基準点の情報は不要で，光線の記述には 4 次元あればよい．そこで，Levoy ら [1] は，図 2.2 左に示すように基準となる平面を 2 つ定義し，ある光線がそれぞれの平面を通過するときのそれぞれの平面上での位置 (u, v) および (s, t) による 4 変数によって光線を記述しこれをライトフィールドと呼称した．また，藤井ら [4] は，図 2.2 右に示すように基準面上の点 (x, y) を通過する光線が (θ, ϕ) の方向に進むとき，その光線情報を 4 変数関数 $f(x, y, \theta, \phi)$ によってした光線空間 (レイスペース) を提案した．これらライトフィール

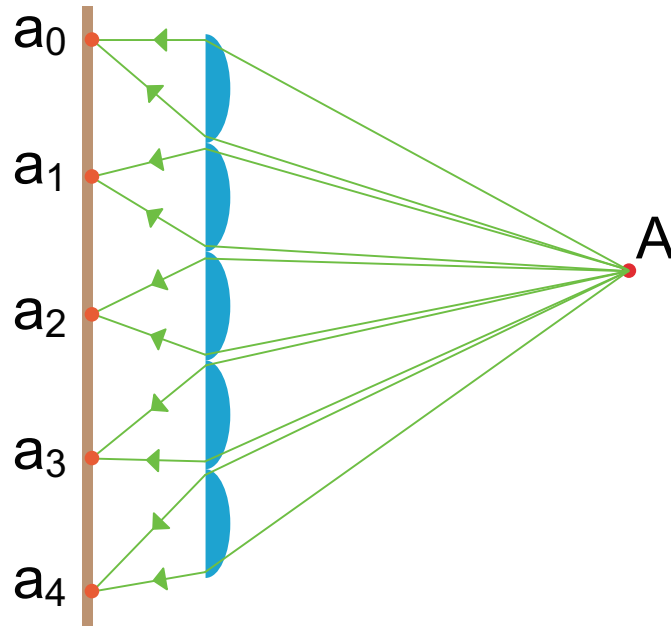


図 2.1. インテグラルフォトグラフィ.

ドとレイスペースはその表現方法が異なるのみで、同じ情報を保持している。ライトフィールドは CG におけるレンダリング、レイトレーシングを目的としており、2つの平面をカメラ画像面と物体対象面とするなど、様々な平面の組を使うことで CG での応用に対応できる。一方でレイスペースは3次元ディスプレイにおける光線記述を目的としており、点 (x, y) の属する基準面をそのまま表示発光デバイスの2次元面とすれば、その光線の表現と扱いに都合が良い。このように、Lippmann の考えた光線制御の概念が、CG 上の光線制御の分野と実空間上の光線制御の分野との双方から発展してきている事が分かる。

ライトフィールドは、本章の後半でも整理するように、3次元センシング、3次元像形成、プロジェクションマッピングなど様々な応用がなされている。本節では最後に、ライトフィールドの計測を応用した例について紹介する。近年では、先の Lippmann の提唱したインテグラルフォトグラフィをデジタルカメラで実装 [5] したライトフィールドカメラと呼ばれるデバイスがコンシューマ向け製品として発売されるまでに至っている。これはインテグラルフォトグラフィによってライトフィールドを取得し、撮影後にピント調節や被写界深度変更を可能にしたものである。このような製品のみならず、窓についた水滴をレンズアレイとして用い、窓の向こう側のライトフィールドを計測するという研究も存在する [6]。このように、専用のデバイスを用いずとも簡便にライトフィールドを計測しようという試みもあり、ライトフィールドにおける光線制御は研究分野からのみならずより一般的なレベルからの要請も増えゆくと考えられる。

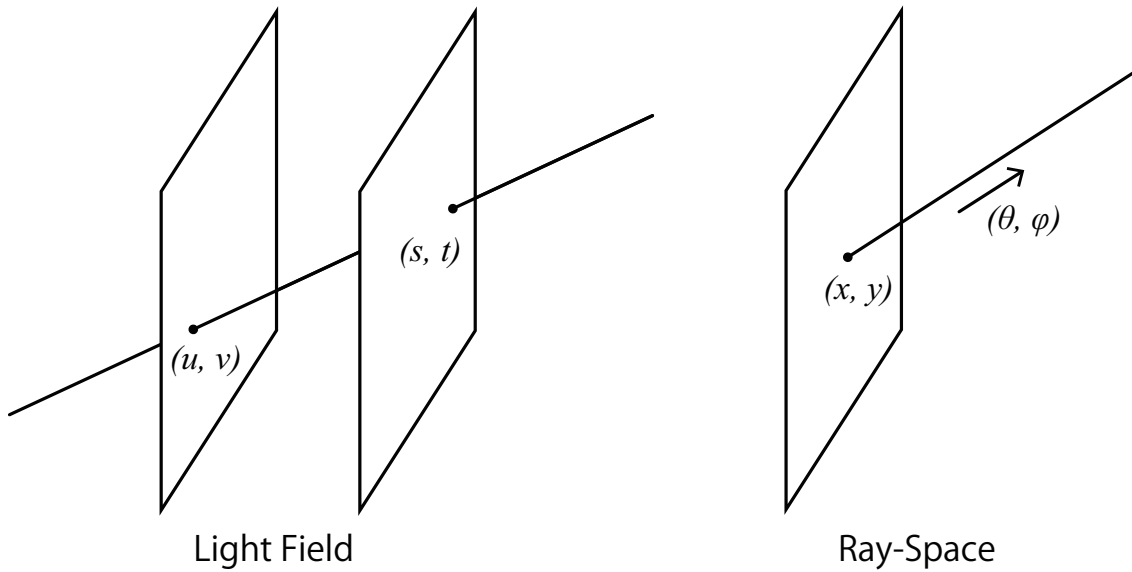


図 2.2. 左: ライトフィールド [1], 右: レイスペース [4].

2.2 3次元センシング

本研究では、3次元センシングとは形状計測、距離計測、物体検出など、様々な解像度でのセンシングを含んだ表現として扱う。ただし、いずれの場合にも、対象とするある1点の位置あるいは姿勢を推定する、ということが最小の構成要素となっている。この要素の個数や密度によって、その結果得られるパフォーマンスが異なってくる。本節では、各方式がどのようにこの最小構成要素を成立させているかについて説明する。

3次元センシングには様々な方式があるが、非接触で対象を捉えることができる方式が主流である。これは対象物を破損させる危険性が低い点や、衛生的な観点など、利点が多いためである。非接触のセンシングにおいては、様々な帯域の電磁波や音波が用いられる。本節ではこの中でも光学的方式に絞って整理し、それ以外の方式については割愛する。光学的方式は受動的センシング方式と能動センシング方式に大別され、以下本節ではそれぞれについて述べる。さらに、3次元センシングにおける課題について説明する。

2.2.1 受動センシング方式

受動センシング方式は、撮像装置のみを用いて計測を行う3次元センシング方式である。システムの中に撮像装置以外の機器を必要としないことから、簡便かつ簡素にシステムを構成できる利点がある。

受動センシング方式の代表的なものがステレオ法である。これは、人間が両眼を用いて対象までの距離を感知する仕組みや、三角測量によって対象までの距離を測る方式と同じものである。この方式ではカメラを2台、場合によってはそれ以上の台数用意し、正確にキャリブレーション

ションしておく。計測対象の表面上に特徴点を見出しこれを対象点とする。各カメラで捉えた対象点の画像平面上での位置と、各カメラの位置姿勢とから対象点の位置を推定する。特徴点の決定には対象の色やシェーディング等による空間周波数が用いられ、決定を簡単にするためにマーカーを用いる場合もある。あるカメラの画像平面上に観測された対象点とカメラ中心を結んだ直線は、他のカメラ画像平面上ではエピポーラ線と呼ばれる線分となっており、このカメラ画像中で対象点はこのエピポーラ線上に乗ることになる。このため、理想上ではこの特徴点の対応付けは1次元の探索となるはずであるが、実際にはノイズや照明、対象表面の反射特性の影響などで画像全体の最適化問題を解く必要があり、こういった対応点問題における難解さがデメリットとなるケースもある。このようにステレオ法では、特徴点から飛来する光線のライトフィールドを2眼ないし複数眼の撮像によって解くことで、計測を行っていることがわかる。

次は Shape from Shading [7] と呼ばれる方式である。この方式では、位置姿勢の既知な光源から出た構成既知な光線群が、反射特性既知な対象表面で反射したとき、カメラによって観測される対象点ごとの光の強度から対象の計測点での法線方向が推定できることを利用したものである。これは、我々人間が対象物の陰影とそのライティングから対象物の形状を想像できることと同じものである。環境中の光源や対象物に必要なとされる事前情報が多いことがデメリットとしてあげられるものの、先のステレオ法に対するメリットとしては、カメラが1台で事足りる点が挙げられる。形状の推定は、勾配の積分を行うことにより可能である。Shape from Shading では、光源からの光線群のライトフィールドを既知として、更に反射特性を用いて反射後の光線のライトフィールドを推定し、これと撮像結果とから対象各点での法線方向を推定していることがわかる。

受動センシング方式の3つ目は計測に撮像の際のピントやボケを利用した Depth from Focus (DFF) [8], Depth from Defocus (DFD) [9] と呼ばれる方式である。DFF においては、複数の異なる焦点距離を持つ画像を撮像し、これを距離計測に用いる。DFF では複数の焦点距離を設定した画像を撮像する。計測対象の対象点ごとに、どの焦点距離の画像でピントが合っているかを判定し、最もピントのあっている画像の焦点距離から、その対象点までの距離を決定する。DFD においては、撮像画像のボケ具合を定量化し、この値から対象点までの距離を算出する。一般的には、2枚の異なる焦点距離の画像を用いる。しかし近年では、画像処理によって1枚の画像から別のボケ画像を生成する方式 [10] や、モデル化と最適化を用いた方式 [11] のように、1枚の画像から DFD を行う方式も存在している。これら撮像時のピントやボケを用いる方式では、カメラの視線方向に依存する焦点位置という情報を持ったライトフィールドの取得を試み、これによって対象点までの距離推定を行っていることがわかる。

2.2.2 能動センシング方式

能動センシング方式は、計測のための光を計測対象に照射し、撮像装置によってその反射を観測し計測を行う方式である。受動センシング方式での問題点を適応的な照明を用いることで解消させたものが多く見られる。

1 つ目は、Photometric Stereo 法 (照度差ステレオ法) [12] である。この方式は先に紹介した Shape from Shading の方式を拡張し、複数の照明を適応的に用いる。光源方向の異なる 3 枚以上の画像を用意し、それぞれにおける物体の明るさの比から、物体表面の法線ベクトルを求める方式である。複数の照明を適応的に用いることで 3 次元形状の取得を行うものである。この方式も先の Shape from Shading と同様に、反射後のライトフィールドの推定から対象の形状を得るものであり、対象に入射する光のライトフィールドを制御可能としている点で、その正確性や計算の容易性などにメリットがある。

次は Time of Flight (TOF) 法 [13] である。この方式では、対象に光を照射し、照射から反射を経てシステムにその反射光が返ってくるまでの時間からその光路長を計算し距離計測を行う。短いパルス的な発光とその計測までを文字通りストップウォッチでの計測のようにおこなう直接 TOF 法と、出射光線に時間的な変調をかけることで時間情報が直接信号量に変換できる間接 TOF 法とがある。TOF 法では、対応点の計算が不要である点や、測定距離が変化しても奥行き方向の距離分解能が一樣である点などの長所がある。この他にも、他方式ではカメラと照明の間や、カメラとカメラの間といった距離 (ベースライン) が一定の長さ必要であるのに対して、TOF 法ではこれが不要で同軸に撮像装置と光源を設計でき、省スペースな構成を取ることができる点がある。一方で、計測対象や計測環境内での多重反射光を 1 次反射光と分離することが困難であり、これに起因するノイズを排除することが課題となっている。TOF 法では、撮像装置と各対象点とを結ぶ各光路によって構成されるライトフィールドを、光線の飛翔時間によって分類することによって計測を行っていることがわかる。

能動センシング方式において、最も代表的な方式が次の構造化光法である。この方式では光線を、位置、時間、波長などにパターンを伴って照射する。先のステレオ法と同様に、三角測量によって対象点までの距離を計算する方式がある。この方式では、構造化光を用いて対象表面に特徴点となるパターンを投影できるので、特徴点検出の処理が非常に容易になるという長所がある。代表例の 1 つ目は光切断法 [14] がある。ラインレーザーを対象に投影し、対象表面上をそのラインと垂直方向に走査することで計測を行う。これによって、撮像画像中での計測対象表面にできるライン形状の変化から、形状を取得する事ができる。ラインレーザーの投影は 1 次元元的であるのに対して、2 次元的な投影を行う方式 [15] がある。この方式では、光切断法のように走査を行う必要がないため、1 回あるいは数回の撮像によって対象の形状を取得できる。このため動的物体の高速形状取得にも用いることも可能である [16]。ステレオ法の他にも、DFD に構造化光を適用した例 [17] がある。この方式では、ビームスプリッターを用いて同軸にカメラを 2 台配置、さらに同軸に設置したプロジェクタによってチェッカーボードパターンを計測対象に投影する。先述した DFD と同様に両カメラから得られる投影パターンのボケの量を比較することで、実時間計測を可能とした。構造化光法では、先述した方式でのライトフィールドにおける光線制御を行うにあたって計算量や撮像枚数を削減するための拘束条件として、構造化光を使用しており、この光線もまたライトフィールドにおける光線制御の賜物であることがわかる。

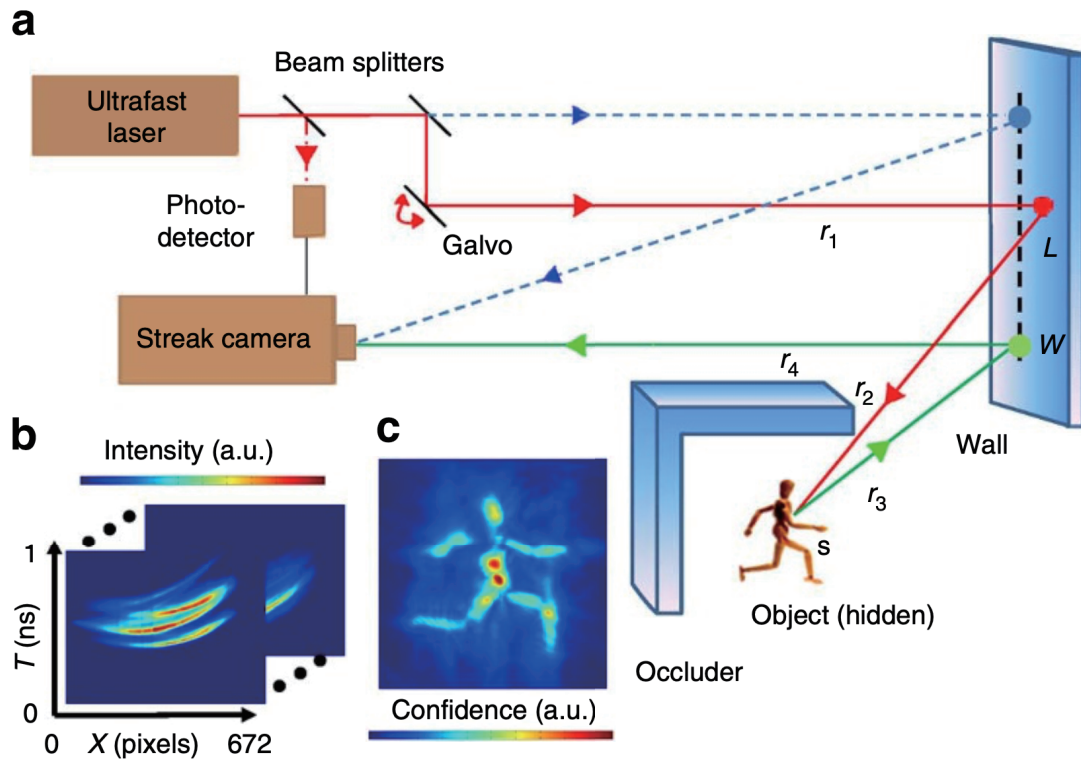


図 2.3. 遮蔽問題にアプローチした研究の 1 例 [18].

2.2.3 3次元センシングでの課題

光学的 3 次元センシングは、対象点へ光を届け、対象点からの光を撮像することで対象点の情報を得る。この時、光源と対象点、対象点と撮像装置のそれぞれ 2 点を 1 本の光路で結ぶことを起点とした発展をなしている。このため、この光路が遮蔽物や対象物の凹凸などで遮られると、この対象点の情報が捉えられなくなるという幾何的拘束が存在していた。このように、遮蔽が生じやすい環境でもセンシングを成立させるという課題に対して、様々な研究が存在するがそれらは十分な解決策では無かった。以下では、これまでなされた研究と、筆者が修士課程で行った研究の概要を整理する。

遮蔽問題にアプローチした研究の 1 つは、超高フレームレートを用いて、光の反射分布から遮蔽の向こう側の対象物を推定する研究 [18] がある。この方式では、図 2.3 に示すようにフェムト秒オーダーでレーザー光を遮蔽物とは別の物体、例えば壁に向けて非常に短い時間照射し、その反射を超高フレームレートで撮像するものである。得られた撮像結果から、照明装置、壁、対象、壁、撮像装置の順をたどる光路を推定し、先述の TOF 法における多次反射を利用して推定を行う。しかし、遮蔽物と対象との配置など、必要とする事前情報が多いことや、壁での反射を挟むことでノイズが多くなることなど、多くの課題が残されている。

他の方式では、ライトフィールドカメラを用いて、視点を切り替えることで遮蔽問題を回避

しようとする研究 [19] がある。ライトフィールドカメラによる撮像結果から、複数視点からの画像を生成することができ、遮蔽の影響を低減させることができる。しかし、得られる視点間での差異が少なく、低減できる遮蔽の影響も小さいものであった。また、遮蔽問題に対して有限個の視点を設置することによる解決には限界ある。つまり、有限 n 個の視点位置と対象点とが作る n 本の光路すべてを防ぎかねない遮蔽物の存在がありえるということである。

そこで、筆者は修士課程にて、3次元像形成で用いられる、ライトフィールドにおける光線制御の方式を、能動センシングに応用したシステムと方式を提案した [20]。3次元像形成では、空間中のある1点にそこにあたかも物体が存在し、その物体に光があたりそしてその拡散反射が周囲に広がっているかのように見えるような光線制御が求められる。このため、このような光線制御においては、その点に向けてあらゆる方向から光線を入射させあたかもその拡散反射かのように見せている。この、あらゆる方向から光を入射させる、ということをこの研究では能動センシングにおける投影と撮像の両方に応用した。

2.3 3次元像形成

本節では、3次元像形成の概要とその代表的な方式を整理した上で、その課題について述べる。

2.3.1 3次元像形成概要

物体が空間上にあるように人間に知覚させたり、映像として通常の撮影用カメラで記録されるためには、その空間上に実際に物体があるときと同様の光線群を構成することができれば良い。このため、3次元像形成のための方式では、実物体が存在するときに照明の光が物体表面で反射してその物体から放たれる反射光線を再現することでこれを成立させている。ここで、対象となる観察視点が1点のみである場合の問題設定は特異となる。この場合、上記のような光線すべてを構成する必要はなく、対象となる視点位置に向かう光線のみを正しく構成すれば事足りてしまう。つまり、この1視点の場合にはこの光線のみを正しく制御し、他の光線には don't care でも良いという問題に帰着する。このため、通常の OA 作業用などの2次元パネルディスプレイでも、視点位置の情報さえ得ることができれば、その視点からは3次元像を観察できるとも言うことができる。しかし本研究では、このような方式は3次元像形成の範囲外とする。本研究では実物体が照明光を反射して構成する光線群を再現し、複数視点でも同時に観察できどの位置でも矛盾なく像の観察が行えるものを3次元像形成の対象とする。

このような光線群の構成、つまりライトフィールドにおける光線制御の方式について説明する。現代において、3次元像形成を成し得る方式には様々な物がある。1つはホログラフィを用いるものである。ホログラフィは、反射光を様々な方向へと制御する事ができる回折格子を用いて所望の光線群を得るものである。回折格子には、写真乾板やフォトポリマーなどの他にも、フォトリフラクティブ結晶を用いた書き換えが可能な光学素子 [21] が存在している。近年では空間光変調器をもちいた電子ホログラフィによって、動画再生も可能となっている [22]。

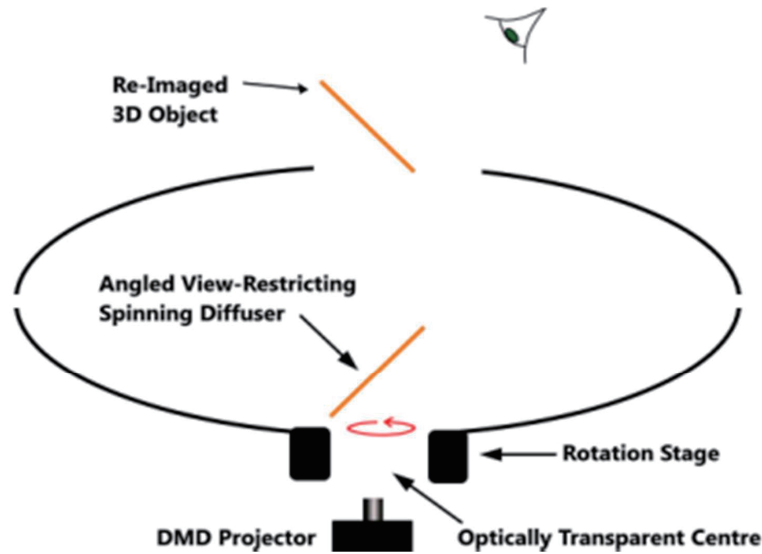


図 2.4. 凹面鏡を 2 つ重ね合わせた 3 次元像形成システム. [24] より.

また、発展型としてフォログラフィック光学素子を用いた光線制御による 3 次元像形成 [23] も盛んである。

別の方式には、鏡による反射光を用いて、実物体からの光を別の位置に集光させその位置に光線群を転送するような方式がある。この方式で代表的なものは、凹面鏡を 2 つ重ね合わせたものである [24]。図 2.4 に示すように、装置底部に置いた実物体からの光が 2 つの凹面鏡の間で反射、集光し装置上部に実像を結ぶ。装置の真上からの観察ではこの実像は観察できないが、装置を斜め上から観察し、装置上部の穴から下側の凹面鏡内部を見込むようにすることで、装置天井部に実物体があるかのような光景を得る。近年では、この他にもミラーアレイを用いた方式も盛んである [25]。この方式は、楕形に並べられた鏡面が 2 方向で直交するように成形された透明なプレートを用いる。このプレートを挟んで鏡像位置に、実物体の実像を結ぶものである。これは、このプレートに入射した光線が、ちょうどコーナーキューブでの反射から 1 回の反射を欠いたように、プレート内で 2 回の反射を経ることで、プレートに対して面対称となる位置と方向に出射されることで成立している。同様の光路を構成するものに Aerial Imaging by Retro-Reflection [26] がある。これは、ビームスプリッタと再帰性反射材を用いた反射と透過によってこのような光路の構成を実現する。

最後に説明する方式は、先述の Lippmann のインテグラルフォトグラフィの光線を逆方向に実装し、3 次元像形成における光線制御としたものである。Lippmann のインテグラルフォトグラフィは、ライトフィールドの取得を目的としたものであったが、光線投影装置であるプロジェクタや 2 次元面発光装置である 2 次元パネルディスプレイの登場によって、ライトフィールドの自在な構成を可能にした。プロジェクタやディスプレイから出射した光線は、レンズアレイに入射し、レンズアレイからは平行光となって空間上を進む、この平行光が空間上に再現する光線群の最小構成単位となり、所望の光線制御を実現する。インテグラルフォトグラフィ

による3次元像形成のメリットは、その自由度の高さにある。ホログラフィ、その中でも発展が期待されている電子ホログラフィは、精緻な像を結ぶことや、システムから離れた位置でもその結像性能の低下が少ないなどのメリットがある。その一方で、必要な演算リソースが大きいことや、ノイズ除去などに必要な周辺機器が多くなりシステム自体が大掛かりになること、そして視野角の向上が困難などの問題を抱えている。これに対して、インテグラルフォトグラフィによる3次元像形成では、屈折光学系に幾何計算による光線追跡による処理で事足りる点や、レンズアレイと2次元パネルディスプレイだけの構成で実現できる点、視野角も比較的広いなどの点で優れており、これによって得られる自由度は大きい。また、反射光による転送方式では、実物体、あるいは体積表示ディスプレイなどの実体に類する光線を発する光源装置が必要である。これに対してインテグラルフォトグラフィによる3次元像形成では、このような実体を用意する必要がなく、計算機の演算によって形成する入力画像だけで実現可能である。

2.3.2 インテグラルフォトグラフィによる3次元像形成での課題

このようなインテグラルフォトグラフィによる3次元像形成の中でも、近年新たな方式が登場している。この方式を構成する装置は2次元パネルディスプレイとレンズアレイの2つである。パネルディスプレイの解像度は年々向上してきており、半導体集積化技術の如き様である。一方で、レンズアレイの細密加工については高い形状精度を保つのが困難だとされている[27]。像を構成するための光線本数はパネルディスプレイの画素数によって決まるが、観察される像の解像度はレンズアレイの密集度合いによって決まる。これは図2.5左に示すように、1つの方向に出射する光線は、1つのレンズから1本までであるためである。このため、インテグラルフォトグラフィによる像の解像度はレンズアレイの密集度合いの制約を受けており、限界があるとされていた。この問題に一石を投じたのが投影型インテグラルフォトグラフィ[28]である。この方式では、レンズアレイの後方にパネルディスプレイではなく、プロジェクタを設置し、このプロジェクタからの光線をレンズアレイに入射させる。こうすることによって、図2.5右に示すようにレンズアレイのレンズ1つから1つの方向に複数の光線を出射することができるようになる。これによって、従来あった制約を解消する投影型インテグラルフォトグラフィが注目を集めている。

しかし、この投影型インテグラルフォトグラフィにおいて空間的制約が存在している。それは視野角における制約である。レンズアレイの後方に1台のみプロジェクタを設置した場合、像が観察できるのはレンズアレイ正面付近の領域のみとなり、視野角は非常に狭くなる。このため、投影型インテグラルフォトグラフィではレンズアレイを中心として扇形になるようにレンズアレイ後方にプロジェクタを設置する必要があった。このため、この方式では視野角を求めるとシステム全体が必要とするスペースが大きくなってしまいうという問題を抱えていた。つまり、視野角とシステムが要するスペースとの間にトレードオフが存在しており、これを打破し広い視野角と省スペースなシステムとを両立させる方式が望まれていた。

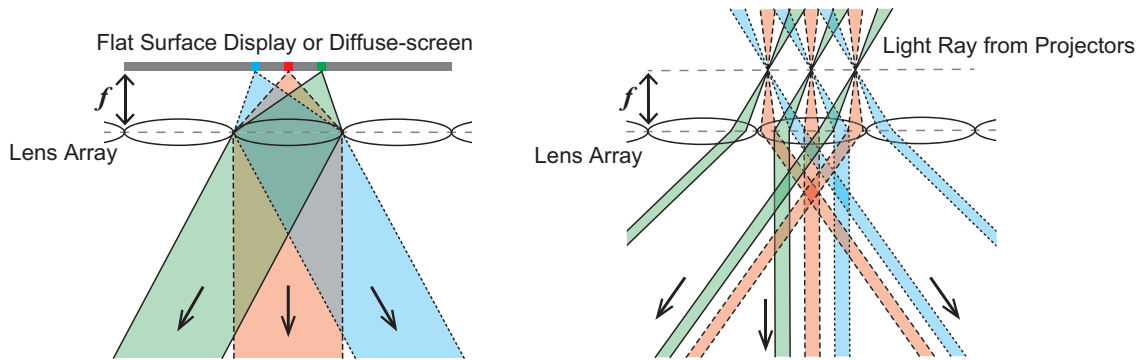


図 2.5. 左: 一般的なインテグラルフォトグラフィ, 右: 投影型インテグラルフォトグラフィ.

2.4 プロジェクションマッピング

本節では、プロジェクションマッピングの概要とその代表的な応用例を整理する。さらにプロジェクションマッピングにおける課題について述べる。

2.4.1 プロジェクションマッピングの概要

プロジェクションマッピングとは、空間上にある実物体に光を投影しその反射光を以て情報の提示や情報の付加を行うものである。これは現実にある情報を拡張して人間に知覚させる **Augmented Reality** の 1 分野を成している。日本国では、東京駅や東京ディズニーランド、東京オリンピックでの陸上トラック、歌手のライブパフォーマンスなどにおいてプロジェクションマッピングが使用され、一般にもよく知られた技術となっている。プロジェクションマッピングの対象は建造物といった巨大なものから、人間自身など我々の生活の身近なものまで様々である。

光を投影する装置は多くの場合プロジェクタが用いられる。プロジェクタは本来、暗環境下で、拡散反射が大きい白く平坦なスクリーンに投影して映像を提示する目的で製造されている。一方でプロジェクションマッピングの投影対象は多岐にわたり、その形状、移動や変形の有無や内容、色を始めとする反射特性、周囲の照明環境など条件は様々である。このため、このような様々な条件下でも所望のプロジェクションマッピングを実現するため、対象の形状計測とそれに基づく投影内容の幾何補正、色補償や相互反射補償、複数台制御による影消去など様々な方式が発展してきている [29]。情報提示の内容には、図 2.6 に示すように、対象物表面の色を変化させる、無地の表面に新たな模様を表示する、表面の反射特性を対象物の実態とは変えて再現する [30]、など様々なものがある。また、影やハイライトを模擬することで、実際には存在しない照明を仮想的に存在するように見せることも可能になっている [31]。

近年では、動的対象へのプロジェクションマッピング、つまり動的プロジェクションマッピングの発展が著しい。従来のプロジェクションマッピングの多くは静止している物体に、静的

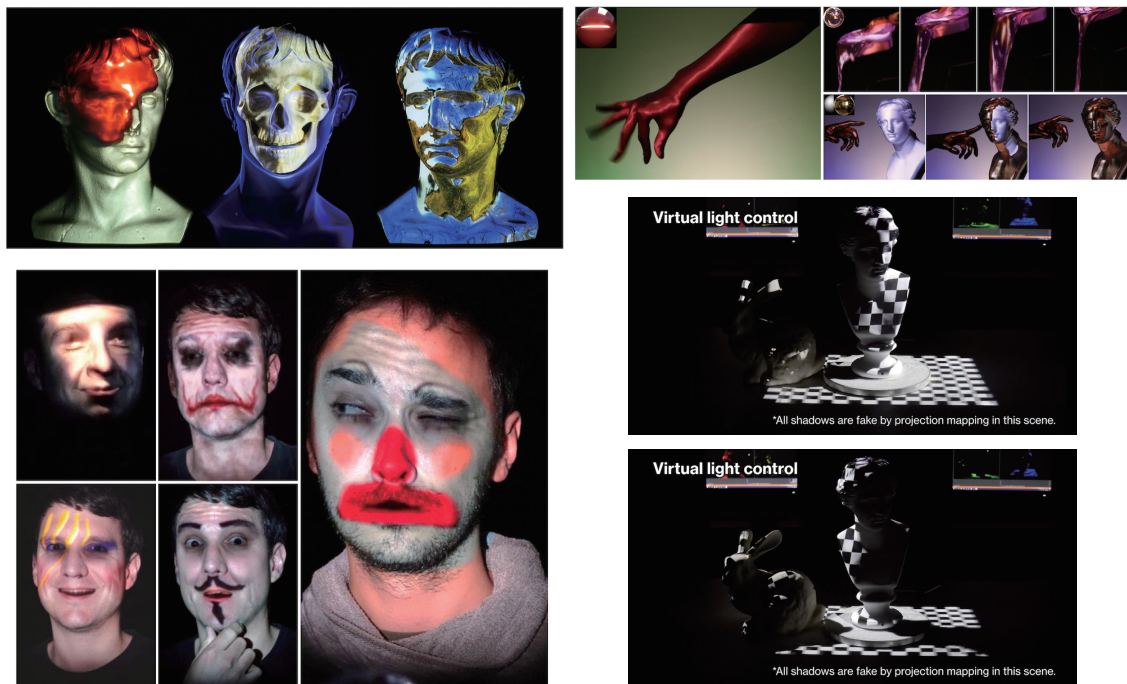


図 2.6. プロジェクションマッピングの応用例. 左上: 視点に応じた投影によって異なる反射特性を再現した例 [30]. 右上: 対象物の動的変形に対応した例 [32]. 左下: 人間の顔面にその動きに追従して投影を行った例 [33]. 右下: 実際には存在しない照明を仮想的に存在するように見せた例 [31].

な内容を投影する. 一方で動的プロジェクションマッピングでは, 投影対象含めた周囲環境の動的変化に追従させて投影内容を動的に変化させるプロジェクションマッピングである.

投影対象の変化に対して, 対象の位置と形状の変化に応じて投影内容を変化させ, プロジェクションマッピングによってあたかも対象に提示した内容が張り付いているかのように見せる応用例がある. 近年では, これに向けて高速で対象物をセンシングする技術 [32] と高速に低遅延で投影を追従させるための高速プロジェクタ [34] が開発され, 研究が進んでいる. 動的変化する環境の 1 つには, 観察者の視点がある. プロジェクションマッピングは対象物表面での反射後のライトフィールドを全て制御できるわけではないが, 対象物表面が拡散反射を主とする物体であれば, 光線の方向以外, つまり位置, 強度, 波長を制御可能である. これによって, 前節でも同様に述べたとおり, 1 つの視点位置に対しては所望の光線を届けるとができる. これによって, プロジェクションマッピングを用いて投影対象に凹凸や透過, 反射といった我々人間が日常中では光の陰影によって判断している情報を付加することができる. 動的変化する環境の別の例としては, 投影対象の周囲に再現する仮想的な光源がある. これは, 上の議論と同様にプロジェクションマッピングにおいて表現する投影対象の反射特性も, 実際の物体の反射特性も拡散反射が主たる場合には, ライトフィールドの全ての制御はできないものの, 光線の位置, 強度, 波長を制御できればよく, かつこの場合実際にこの 3 つを制御可能である. これによって, 仮想的に空間上に配置した光源が作り出す影や対象表面上の陰影をプ

ロジェクションマッピングによって再現することができ、この光源の動きも自由に再現できるのである。

2.4.2 プロジェクションマッピングの課題

-

博士論文の全文を公表できない場合のガイドラインに基づきこの部分の内容を非公開とします。本内容は2年以内に出版予定です。

-

第 3 章

3 次元像形成における光線制御を応用した 3 次元センシング

近年の 3 次元像形成の進化は目覚ましく，これに伴って 3 次元像とのインタラクションを行う方式の重要性が高まっている．特に，提示された像に直接手指を重ね，入力操作を行うことが重要である．このためには，手指が 3 次元像に接触しているかどうかを認識するセンシング方式が必要である．このようなセンシング方式は，一般には画像を用いた能動センシングによって手指の位置計測を行う方式が主流となっている．しかし，これらは下記 2 つの問題を解決していない．1 つ目は，提示像と入力位置の位置合せを正確に行う必要があるという，位置合せ問題である．2 つ目は，手の自由な動きを許容するために，センサと手の間に遮蔽物があってもセンシングを達成する，遮蔽頑健性問題である．これに対して，3 次元像に触れたときに生じる反射光を用いるセンシング方式が提案されている．このセンシング方式は前述の位置合せ問題を解決しているが，遮蔽頑健性問題は解決できていなかった．そこで本章では，3 次元像の反射光を使う方式をさらに強化し，遮蔽頑健性も解決する方法を提案する．本方式は，次の 2 点によってこれらの問題を解決する．1 点目は，3 次元像形成の中でもより広い範囲から光線を集める AIRR と呼ばれる方式を用いることである．2 点目は，能動計測における計測対象への投影とその反射光の撮像の両方で，3 次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を用いることである．また，反射光によって作られる光線群が，計測対象の傾きにに応じて変化することを利用して，対象の姿勢情報を取得する方式も提案する．提案したシステムを評価するため，シミュレーションと実験を行った．シミュレーションによってシステム構成の最適化を行った．位置計測実験では，遮蔽に対する計測誤差を評価し，1.74 mm 以内となった．姿勢計測で実験では，遮蔽に対する計測誤差を評価し，15.4 deg 以内となった．3 つ目の実験では，提案方式を用いた 3 次元像とのインタラクションシステムを構築し，このシステムの評価を行った．なお，本章の内容は OSA Journal “Applied Optics” に採録された内容 [35] である．

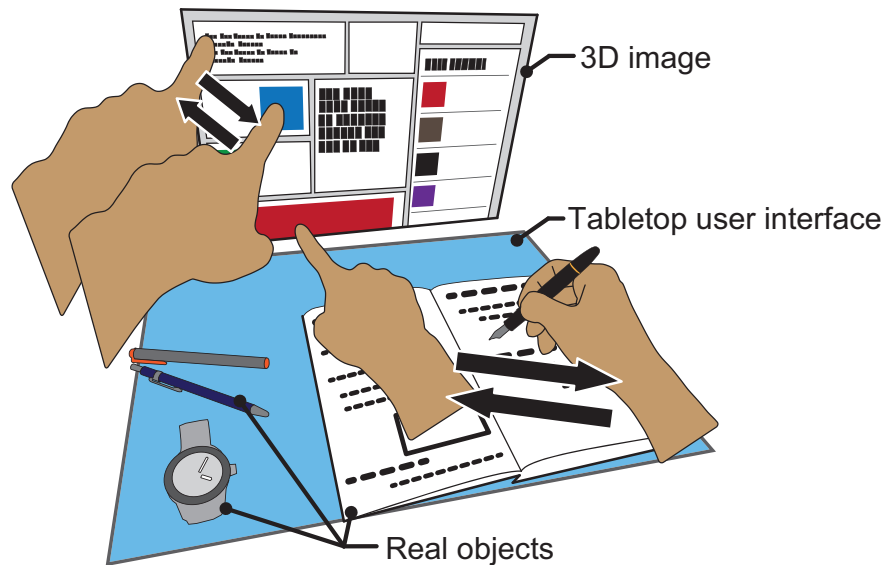


図 3.1. 実現を目指すアプリケーション像. このアプリケーションシステムにおいて, ユーザは 3 次元像と実物体を同時に操作する. また, このアプリケーションシステムにおいて作業空間上に実物体があっても 3 次元像とのインタラクションとの妨げとならない. これによってユーザはテーブル上面に置いたノートにメモを取りながら, 3 次元像とのインタラクションが可能となる.

3.1 はじめに

3 次元像の発展とともに, 提示される 3 次元像とのインタラクションを行う方式の重要性が高まっている. 特に, 特別なデバイスを介すること無く, 素手で 3 次元像に触れて操作する方式が直感的で多くの需要がある. 本章では, 手指の認識によって 3 次元像へのインタラクションを行うためのセンシング方式を対象とする. 本研究が将来的に実現を目指すアプリケーションを図 3.1 に示す. このアプリケーションでは, テーブルトップ型のユーザインタフェースを想定する. このシステムでは, テーブル下部に提示システムと計測システムを備える. 提示システムはテーブル上部に 3 次元像を作り出し, ユーザにこれを提示する. 計測システムは, ユーザの手の位置や形状を取得する. テーブル上部や側方にはカメラ等の計測機器は設置しない. これによって, 開放的な作業空間を得ることができる.

3 次元像とのインタラクションを実現するためのセンシング方式の主だったものは, 手の 3 次元位置を撮像装置を用いて捉えるものだ. これらの方式は, 計測対象に光を投影し, その反射光を計測する能動センシングである. このセンシング方式を用いた製品の例は Kinect や Leap Motion [36] がある. しかしこれらのセンシング方式は, 2 つの問題を解決しておらず, 十分とは言えない. 1 つ目は, 位置合せ問題だ. 提示像と入力位置を, 実空間の座標と計測系が再構成する座標との両方で正確に合わせなければならない. 例えば, 図 3.2(a) に示すように, 3 次元像に触れることで 3 次元像が変化するようなアプリケーションでは, 位置合せ誤差

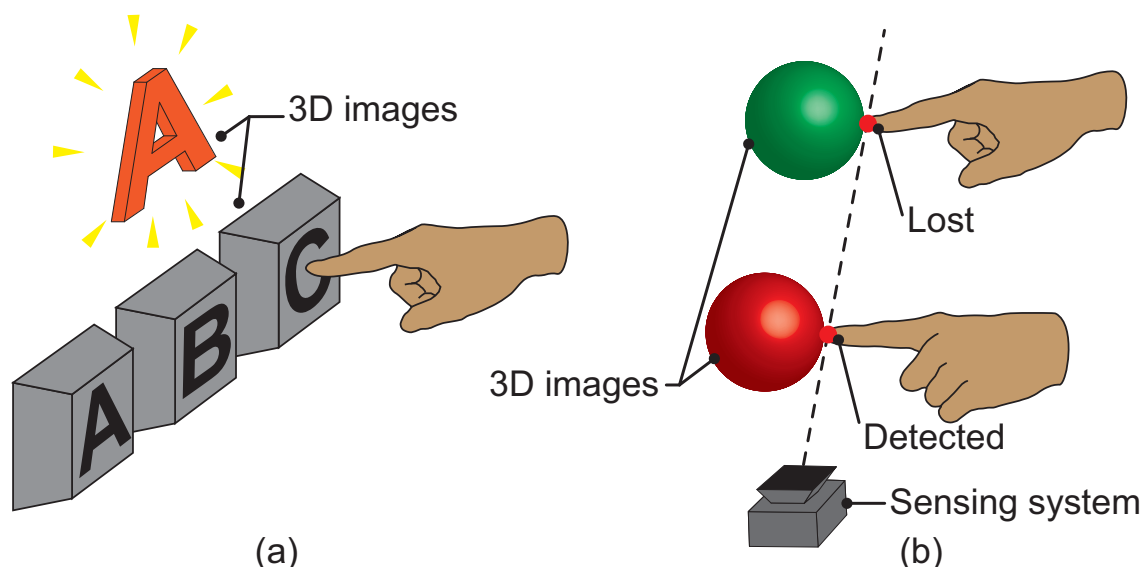


図 3.2. 従来法での、3次元像インタラクションにおける問題. (a): 位置合せ誤差のために、ユーザの入力とシステムの反応とが乖離する例. ユーザは“C”のボタンを押したつもりが、計測系が推定した指の位置は“A”のボタンの位置と認識されるため、システムは“A”を表示してしまう. (b): 遮蔽のために、ユーザの入力が行えなくなる例. ユーザは左右の指で3次元像を操作しているが、センシングシステムと右手左手が一直線に並ぶ際に、左手が右手に遮蔽され、左手での操作が行えなくなってしまう.

が生じると操作内容に対して、システムが正しく応答しない. 2つ目は、遮蔽頑健性問題だ. 手の自由な動きを許容するために、システムと手の間に遮蔽物があってもセンシングを達成しなければならない. 例えば、図 3.2(b) に示すように、両手で操作を行うと、片方の手が他方の手を遮蔽してしまうことがある. このような状況でも、安定してセンシングを達成できる必要がある.

これらの問題に対して、位置合せの問題を解消する方式 [23, 24] が提案されている. これらの方式は、ライトフィールドに基づく3次元像形成システムによって形成される光を3次元位置計測に用いる能動センシングとなっている. 提示像からの反射光は、手と3次元像が重なって初めて拡散光が生じるため、事前に positional registration の作業が不要である. しかし、この方式では遮蔽問題は解決されていない.

従来のセンシング方式に用いられる光学系が遮蔽への頑健性が低い理由を説明する. 図 3.3(a) に示すように、前述の Kinect など通常のシステムでは、センシング対象表面上のある点と投影系あるいは撮像系とは1本の直線的な光路のみで結ばれる. このため、投影系と対象上の点、または対象上の点と撮像系の間に遮蔽物が生じ、光路が遮られるとこの点のセンシングが機能しない. これに対して、3次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御は、像が空中に浮遊するように観察者に見せるため、特殊な光学系を用いて、光を各方向から目的の1点への集光させるこのような光線制御では、目的の1点へ集光する光はあらゆる経路を通る. これが3次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御である. こ

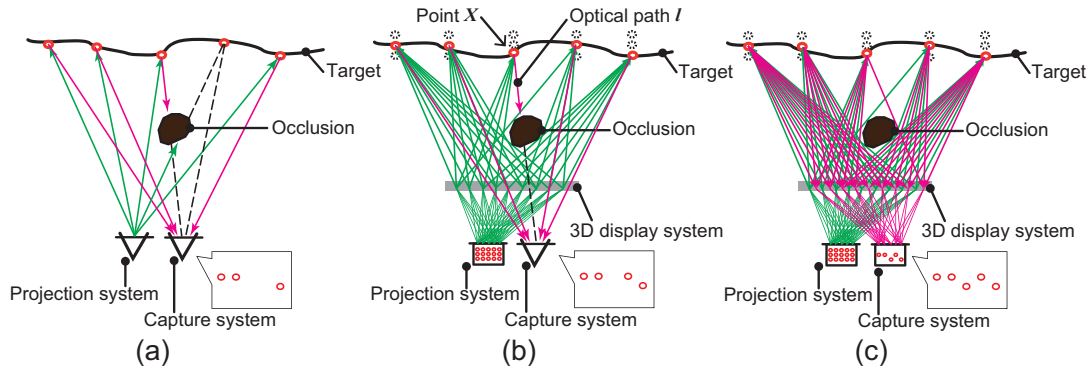


図 3.3. 従来法と提案方式との比較. (a): 従来の 3 次元センシングシステム (b): 3 次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を投影系に応用したシステム. (c): 提案方式. 3 次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を能動計測における投影系と計測系の両方に応用することで、従来法では計測できていなかった点に投影ができ、更に反射光を取得できる.

の特性を利用すれば、一部の光線が遮断されても残りの光線によって集光することができ、遮蔽があってもある地点からある地点へ光線を到達させることができる。本章では、この点に注目して、遮蔽にも頑健な 3 次元センシングとその応用としての 3 次元像とのインタラクションの実現を目指す。

なお、先の方式 [23, 24] も、同様の光線制御をセンシングに用いているが、以下の 2 つの理由により遮蔽への頑健性は低い。1 つ目の理由は広い範囲から集光するようなライトフィールドを形成する光学系を用いていないことが挙げられる。狭い範囲からの集光では、小さな遮蔽物でも、すべての光が遮蔽されてしまうため、遮蔽への頑健性が低くなる。2 つ目の理由は、図 3.3(b) に示すように投影系と撮像系の両方でこのような光線制御を用いていなかったためである。このため、投影系と撮像系のどちらかと、計測対象のある 1 点との間が 1 本の直線的な光路のみで結ばれるために、この光路が遮られるとセンシングが達成されない。例えば、図 3.3(b) において、点 X と撮像系は 1 本の直線的な光路によって結ばれる。故に、遮蔽への頑健性が低いと考えられる。

本章では、位置合せ問題と遮蔽問題の両方を解決する能動センシング方式を提案する。この方式でも 3 次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御によって形成される 3 次元像の光と、計測対象表面からの反射光をセンシングに用いる。このため、位置合せ問題を解決できる。さらに、以下 2 点によって遮蔽頑健性問題を解決する。1 つ目は、広い範囲から集光するライトフィールドを構成するために、我々は 3 次元像形成に Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [26, 37] を用いる。2 つ目は、図 3.3(c) に示すように投影系と撮像系の両方に、3 次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を適用する。投影系では、AIRR による光線制御を行い光線群を構成する。この光線群と計測対象が重なると、反射光が生じる。撮像系では、この反射光を光源として AIRR が形成する 3 次元像を観測する。しかし、このように、投影系と撮像系で 3 次元像形成のためのシステムを共有する構成では、

投影系の光源位置と撮像系の観測位置が近くなる問題があった。この場合には、対象からの反射光のみを観測することが難しく、うまく計測ができない。そこで本方式では、鏡を用いて投影系の光と撮像系の光を分離することで、この構成によるセンシングを実現している。加えて、反射光によって作られるライトフィールドが、反射対象の傾きにに応じて変化することを利用して、回転情報を取得する方式も提案する。

本章の構成は以下になっている。2節にて、関連する研究を挙げる。3節では、本方式の詳細について説明する。4節では、本方式による計測のシミュレーションを行い、装置の最適な構成および遮蔽環境下での性能を評価した。5節では、実際にシステムを構築し、遮蔽環境下での性能を評価した。6節では、実験結果についての考察を行った。7節では、この論文についての総括を行う。

3.2 関連研究

3次元像との入力操作に用いられるセンシング方式について述べる。従来のセンシング方式には位置合せ問題と遮蔽問題とが存在していた。位置合せ問題を解決する方式として、センシングのための能動光として、3次元像をそのまま使う例がある [23, 24] Yamaguchi らの方式では、投影系にホログラフィによるライトフィールドを用い、手と3次元像が重なってできる反射光を通常のカメラで計測する。Butler らの方式では、凹面鏡によって形成されるライトフィールドを用いた2つの系が提案された。1つ目の系では、投影系に凹面鏡によって形成されるライトフィールドを用い、手と3次元像が重なってできる反射光を通常のカメラで計測する。2つ目の系では、撮像系に凹面鏡によって形成されるライトフィールドを用い、手の3次元像を観測する。しかし、両方の系で遮蔽への頑健性に限界があった。これは、投影系と撮像系の両方で同時に3次元像形成で用いられるライトフィールドを用いていなかったためである。このため、このライトフィールドを用いていない投影系か撮像系のどちらかと、計測対象のある1点との間が1本の直線的な光路のみで結ばれるために、この光路が遮られるとセンシングが達成されない。故に、遮蔽への頑健性が低いと考えられる。

3次元像とのインタラクションには導入されていないが、3次元センシングの分野では、遮蔽への頑健性にアプローチした研究がある。アプローチの一つにインテグラルフォトグラフィを用いた方式がある [19]。この方式では、撮像系にレンズアレイを用いたインテグラルフォトグラフィによって多視点で計測対象を観測する。これによって、いずれかの視点では遮蔽物に遮られずに計測対象を観測できる。この原理に基づき、計測対象の形状を復元する。しかし、視点数は有限であり、計測対象のある点と撮像系を結ぶ光路も有限本に限定される。別のアプローチでは、光の反射を超高速度カメラで捉える方式がある [18]。これらの方式では、壁などの周囲の物体からの反射光を用いて、物陰に隠れた対象の形状を復元する。壁にレーザーを照射し、壁、対象、壁の拡散反射を時間的に超高解像度で計測することで、曲がり角の向こう側の対象形状を取得する。このため、遮蔽がある場合でも対象の形状計測が行える。しかし、これらの方式は計測対象の周囲に遮蔽物以外の物体が存在していることを前提としているため、3次元像とのインタラクション向けに導入することは難しい。また、この他にも遮蔽問題にア

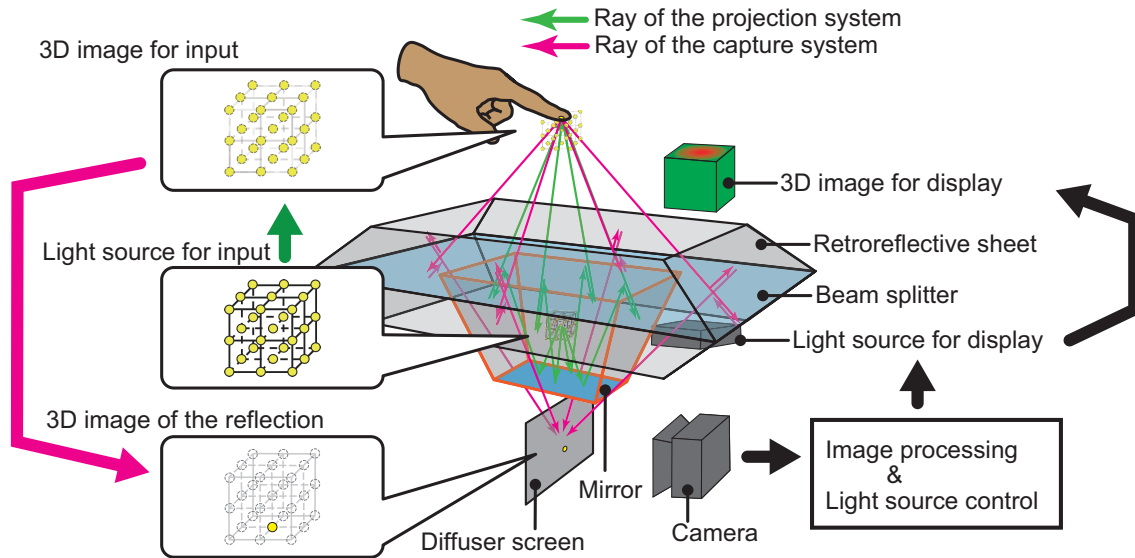


図 3.4. システム概要. センシングの過程は以下の通り. まず, 緑色矢印で示したように, 光源の3次元像が計測領域に形成される. 次に, 計測対象と3次元像が重なる. 撮像素子は, 反射光を計測対象表面にできた光点の実像として観測する. 桃色矢印で示したように, この像がカメラの前に置かれた拡散体スクリーン上に形成される. そして, 拡散体スクリーンにできた像をカメラが取得する. 画像処理によって入力内容を分析する, 提示用の光源を制御する. 情報提示用の3次元像が変化する.

アプローチした研究は存在する [38, 39, 40, 41, 42]. しかし, センシングというよりも撮像において遮蔽環境下でもノイズ低減させるものや, 透明物体の遮蔽について扱ったものだった. これらの方式も3次元像とのインタラクション向けに導入することは難しい.

筆者が行った修士課程での研究とそれを投稿した内容 [20] において, 提案方式の基本原則を提案した. それらを一般化するため, 博士課程における本研究ではまずシミュレーションによってシステムの最適化と提案方式の評価を行った. さらにこの設計に基づいて実システムを構築し, これを用いてセンシング精度における評価実験を行った. さらに, 目標とするアプリケーションの実現に向けて提案システムを用いた3次元像の形成とこれとのインタラクションを行うデモシステムを構築し, これを用いた評価を行った.

3.3 3次元像形成における光線制御を応用した3次元センシング

3.3.1 提案システムの概要

図 3.4 にシステム構成を示す. 本システムでは, 単光源を3次元的に配置した光源で形成される3次元像を入力操作領域としてユーザに提供する. ユーザは, 入力用の3次元像に触れることで, 情報提示用の3次元像を操作することが可能だ. 用いる光源には光量を上げるため, 高輝度のものを使用する. この理由はシステムの構造上, 投影した光の内撮像素子が観測できる

光量はわずかであり、強い光源が必要だったからである。

システムは、3次元センシングを実施するために、能動光を投影する投影系と、反射光を捉える撮像系の2つから成る。能動3次元計測の方式を採用し、投影系と撮像系の両方で3次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を用いる。投影系に3次元像形成での光線制御を用い、センシング対象表面とこの3次元像との重なりにより生じる拡散反射を発生させる。撮像系では、計測対象表面での拡散反射を光源として、これを3次元像形成での光線制御によって再び3次元像とし、計測システム内部に像を形成しこれをカメラで撮像する。つまり、撮像系にも3次元像形成での光線制御を用いている。投影系と撮像系の両方同時に遮蔽への頑健性を備えることで、システム全体としてより高い頑健性を備える。撮像系では、3次元像を拡散体スクリーンを以て撮像することで、対象の位置及び姿勢計測が可能となっている。

3.3.2節では、提案システムで採用した3次元像形成技術 AIRR [26, 37] について述べる。3.3.3, 3.3.4節では、投影系と撮像系のそれぞれの構成について述べる。3.3.5, 3.3.6節では、計測処理について説明する。

3.3.2 3次元像形成方式

3次元像を形成させる方式には、ミラーアレイを用いるもの [43] やレンチキュラアレイ [44] を用いるものや凹面鏡を用いるもの [45] などがある。提案方式では、遮蔽への高い頑健性と広い計測範囲とを実現したい。このためには、以下の特性を持つ方式が必要である。まず、広い角度において拡散と集光を可能とし3次元像を広い範囲に形成可能で、かつシステムから離れた位置に3次元像を形成可能であることが求められる。このような条件を満たすのは AIRR である。AIRR は、図 3.5 に示すように再帰性反射材とビームスプリッタによって構成される光学系を用いて、光源のビームスプリッタに対する面对称位置に3次元像を形成する。再帰性反射材とは、拡散反射、鏡面反射とは異なり、光を入射方向に反射させる光学素子のことを指す。

3.3.3 投影系

投影系では集光によって計測領域に光源の実像を形成する。本論文では、面発光や線発光ではなく、点光源を使用したシステムを用いる。単光源を用いたシステムでは、計測領域空中の特定の1点での位置計測と姿勢計測が可能になる。

この投影系のシステムでは、図 3.4 に示すように、光源が内部に設置された四角錐台(オレンジ色の線で描かれた部分)を用いる。投影における光路は図 3.4 の中で、緑色矢印で表される。四角錐台の天板とその対向する面はそれぞれビームスプリッタとミラーに接している。ミラーに写った光源の鏡像を3次元像化させるため、光源はミラーの方向を向いて設置する。光はミラーに反射し、ビームスプリッタに入射した後2つに別れる。それらの光線はビームスプリッタに反射するもの、ビームスプリッタを透過するものである。投影系では、ビームスプ

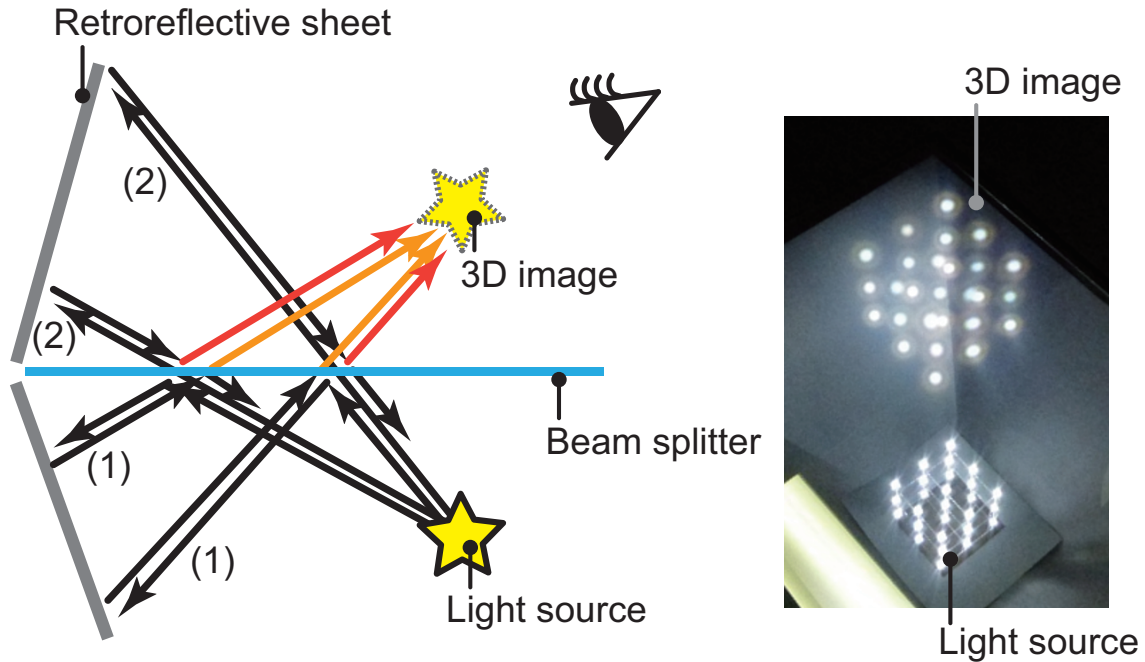


図 3.5. 左: AIRR に基づく 3 次元像形成の原理. 光源から出射した光はビームスプリッタに入射した後 2 つに別れる. この 2 つは, (1) ビームスプリッタに反射する光線, (2) ビームスプリッタを透過する光線である. (1) の中で再帰性反射材において反射した後, ビームスプリッタを透過する光路と, (2) の中で再帰性反射材において反射した後, ビームスプリッタで反射する光路をたどる光線が, ビームスプリッタに対してもとの点光源の面対称位置に再び集まる. 右: 立方体構造 ($3 \times 3 \times 3$) を持った光源の実像

リッタで反射する光のみを用いる. 四角錐台内面の再帰性反射材において反射した後, ビームスプリッタを透過する光路をたどる光線が, 点光源の鏡像位置のビームスプリッタに対する面対称位置に再び集まる. この底面にミラーを配置する構成は, 投影系と撮像系の両方に 3 次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を導入するうえで非常に重要な役割を担う. 詳細は次節で述べる.

3.3.4 撮像系

提案方式では, 対象上での反射光の観測のため, 撮像系においても AIRR を用いている. 投影系によって計測領域に局在化された光が計測対象と重なると, 計測対象表面上で反射が起きる. 撮像系では, 反射した光をビームスプリッタと再帰性反射材を介した AIRR によって集光し, 観測を行う. 集光した光による像と拡散スクリーンとを重ね, カメラで観測する. これによって, 1 台のカメラでも多方向から集まった光線によって形成された光点を観測することができる. 四角錐台を用いる構成とすることで, 光源の実物と撮像系の集光点位置とを分離することができる. 撮像系で観測する光を計測対象上での反射からの光のみとすることができる. この分離がなければ, 光源位置と撮像系における集光位置が一致し, 光点の検出が困難になる.

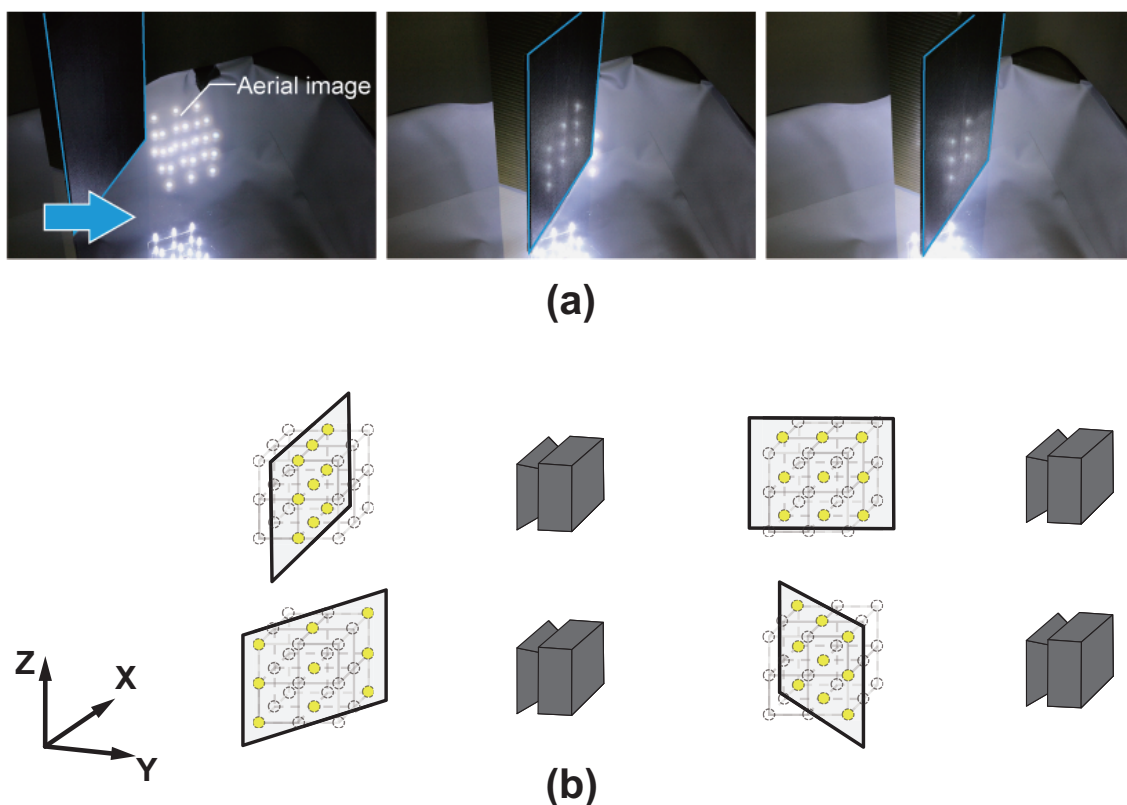


図 3.6. 立体走査 (a): 図 3.5 右に示した 3 次元像に平板が異なる位置で重なった様子. (b): 黄色の点が、拡散体スクリーンと重なった空中の光点を示す.

この構成によって投影系と撮像系の両方に 3 次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を導入することができる.

3 次元的分布の構成を持つ光源を用いる場合には、図 3.6(a) に示すように、撮像系内部に形成される 3 次元像をスクリーンで走査することですべての光点を観測することができる提案方式では、図 3.6(b) に示すように、3 次元的分布の構成を持つ 3 次元像を計測可能となるよう、拡散体を Z 軸周りに回転させ、計測領域を立体的に走査する. この操作を本研究では体積走査と呼ぶ.

一方でこのシステムには、図 3.7 に示すような多重反射像に起因する問題の可能性がある. 対象表面で反射した光の一部は四角錐台に戻ってしまい、計測領域に新たな 3 次元像を形成する. この 3 次元像は、計測誤差を引き起こすものとして考慮せねばならない. しかし、この像の光量は第 1 の 3 次元像と比較して非常に小さい. それは 8 分の 1 以下と推定できる. それ故、この多重反射の影響は非常に小さく、無視して良いもの判断できる.

3.3.5 位置計測

ここでは位置計測について説明する. この節の説明では簡単のため、1 点の光源を用いた観測装置で観測される現象について説明する. この実像を形成する光は図 3.8(a,b) に示すように

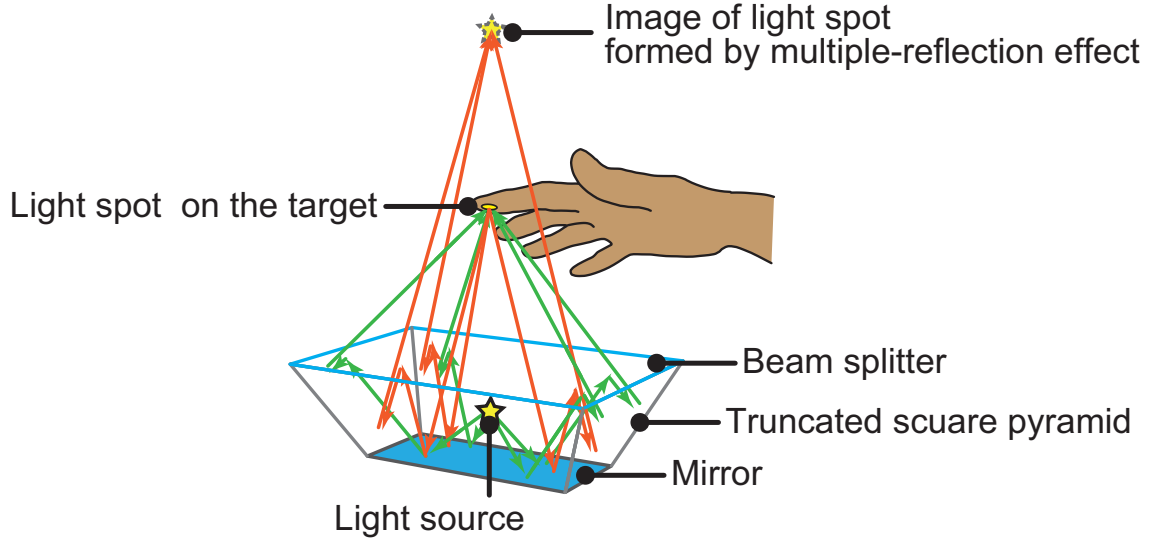


図 3.7. 多重反射像の例. 対象表面で反射した光の一部は四角錐台に戻ってしまい, 計測領域に新たな3次元像を形成する.

錐体を上下に2つ組み合わせた, 砂時計のような形状の経路が形成される. この形状のために, 集光点に対して砂時計形状の中心軸の方向で, ある程度の範囲には十分な光線密度が形成される. このため, 光源1点に対して, 計測可能領域は集光点位置のみの非常に小さな点だけではなく, Z軸方向に一定の範囲をもつ. 3.4節で紹介するシミュレーションによる結果を図3.8(c,d)に示す. 集光点の周辺において, XZ平面に入射する投影光の入射点の分布を示している. 集光点中心に対して一定の範囲に高い光線密度の領域があることがわかる.

図3.8(a,b)を用いて, 位置関係を具体的に説明する. 四角錐台と光源が図3.8(a,b)に示したような各パラメータを取るとする. 点 $(p, q, 0)$ は, 四角錐台の底面上のある点である. さらに光源がZ軸上にあるとき, 計測領域に投影系が形成する光線は以下の式3.1のように記述できる.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_1 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} p \\ q \\ -h_1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

AIRRによる3次元像形成はビームスプリッタに対する面对称位置へ光源の実像を形成させるものである. 図3.8(a,b)において, 点 j は点 i のミラーにおける面对称位置にあり, 点 k は点 j のビームスプリッタにおける面对称位置である.

撮像系において形成される光の経路の集合も同様に砂時計型のものが形成される. カメラの内部パラメータと, 拡散体スクリーンの位置姿勢が既知であれば, 拡散体スクリーン上の光点の中心位置 \mathbf{X}_s をカメラ画像から推定することができる. 図3.9示すように, 計測対象上の光点位置 \mathbf{X}_o と拡散体スクリーン上の光点位置 \mathbf{X}_s はビームスプリッタに対して面对称の位置

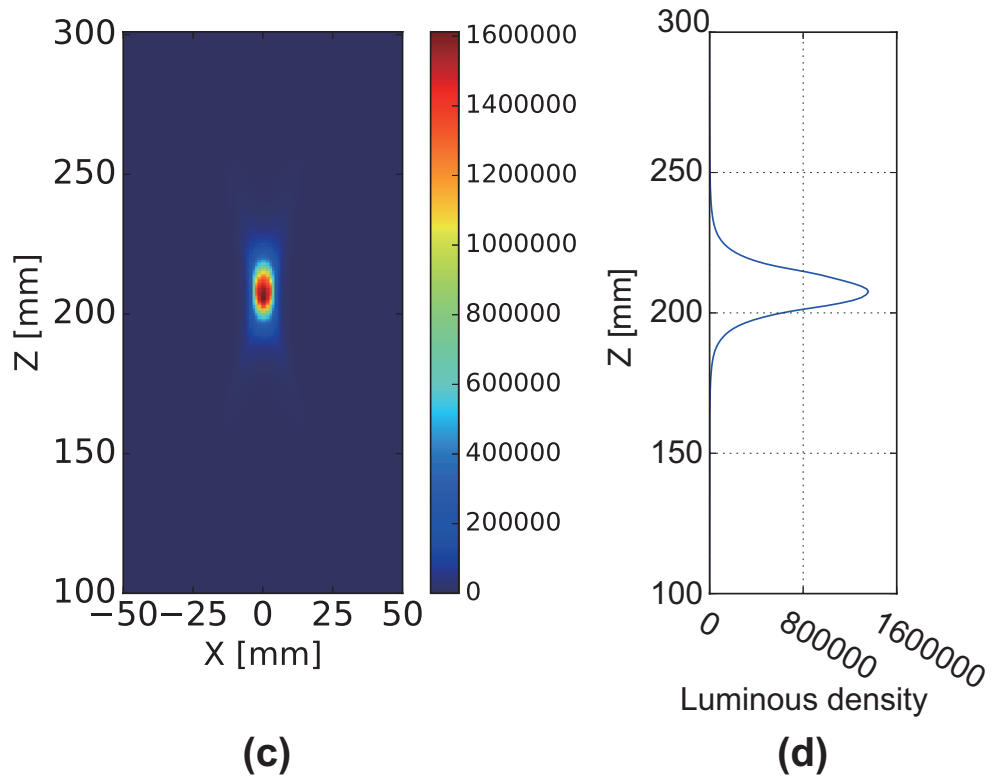
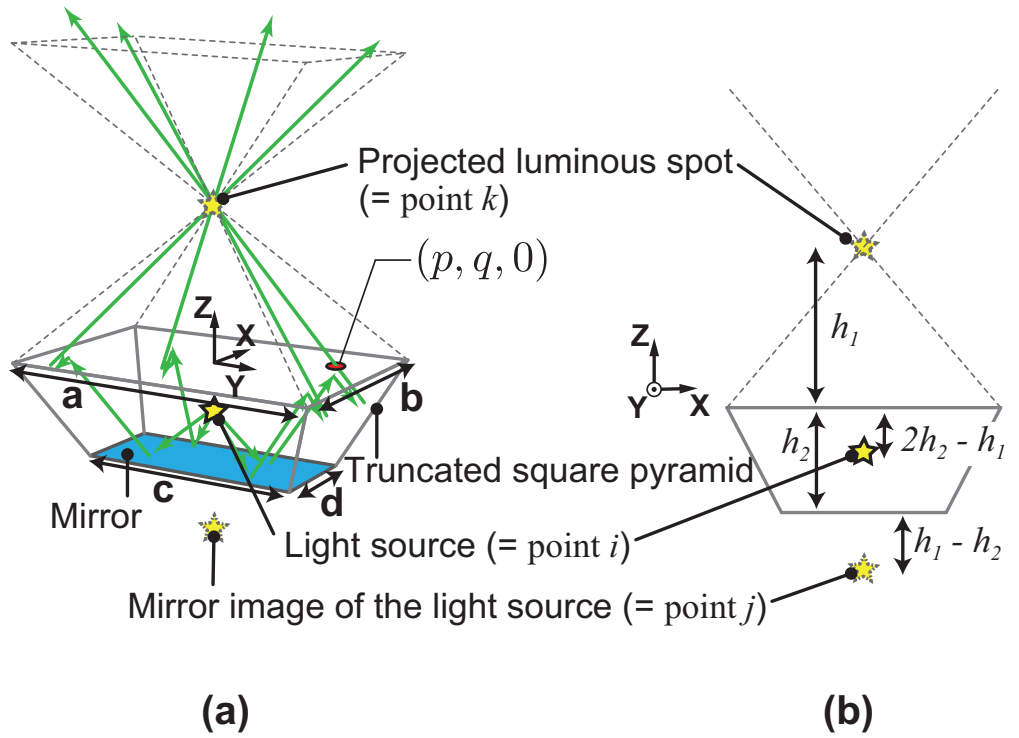


図 3.8. 投影系における光路は砂時計型の領域を形成する. (a): 立体図. (b): 平面図. (c): 3.4 節で紹介するシミュレーションによって得られた光線分布. (d): 図 (c) での $X = -3 \text{ mm}$ to 3 mm の範囲の平均での Z 座標位置における光線分布

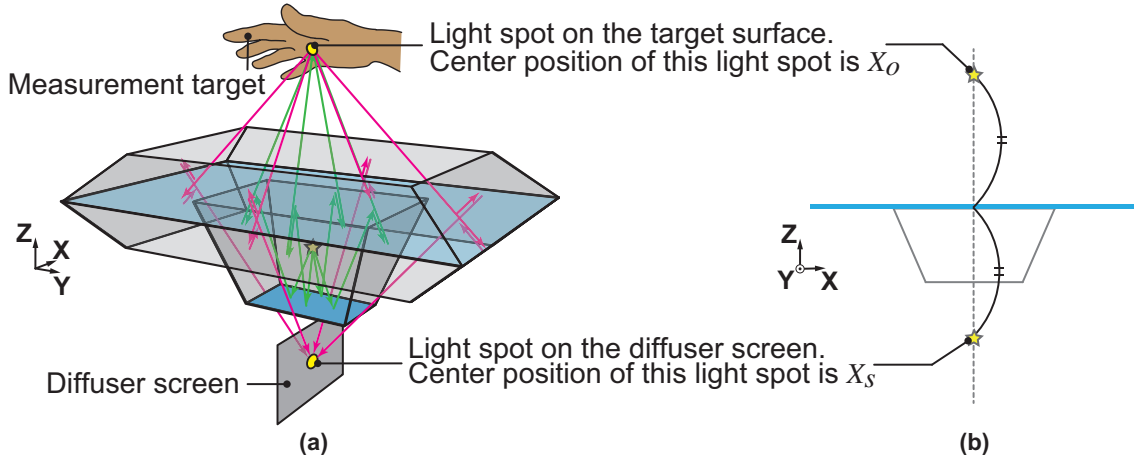


図 3.9. 計測対象上の光点位置 X_o と拡散体スクリーン上の光点位置 X_s の位置関係. (a): 立体図. (b): 平面図.

にある。故にこれらの点は以下の式を満たす

$$\mathbf{X}_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_s. \quad (3.2)$$

つまり、 \mathbf{X}_s がわかれば、 \mathbf{X}_o が導出できる。この対応関係から対象の位置計測を行う。

3.3.6 姿勢計測

計測対象の傾きを計測する処理について説明する。図 3.10 に示すように、計測対象の傾きの情報を得ることができる。計測対象表面にできた光点の実像が撮像系の集光点位置に形成される。これは焦点の集合体となっている。この光の経路の集合を拡散体スクリーンでの切片として観測する。計測対象が水平で、ビームスプリッタと平行な場合には、図 3.10(a) に示すように焦点の集合は水平に並んでおり、拡散体スクリーンに入射する光の左右のバランスは等しくなる。計測対象が、拡散体スクリーンの法線方向を軸として傾くと、図 3.10(b) に示すように焦点の集合体も傾き、拡散体スクリーンに入射する光のバランスが偏る。この偏りによって、拡散体スクリーン上の光点に傾きが生じる。

対象の傾きと拡散体スクリーン上の光点の傾きには対応関係が存在する。光点の傾きの評価には画像モーメントと呼ばれる特徴量を用いて、長軸方向の傾きを求める [46]。計測対象の傾きと光点の傾きは線形に変化しない。計測対象の姿勢計測に向けて、この対応関係を 4 節でシミュレーションする。光点に傾きが生じる際でも、拡散体スクリーン上での光点中心位置は変化しないため、位置計測への影響は無い。このため、位置計測と姿勢計測は独立して行うことができる。

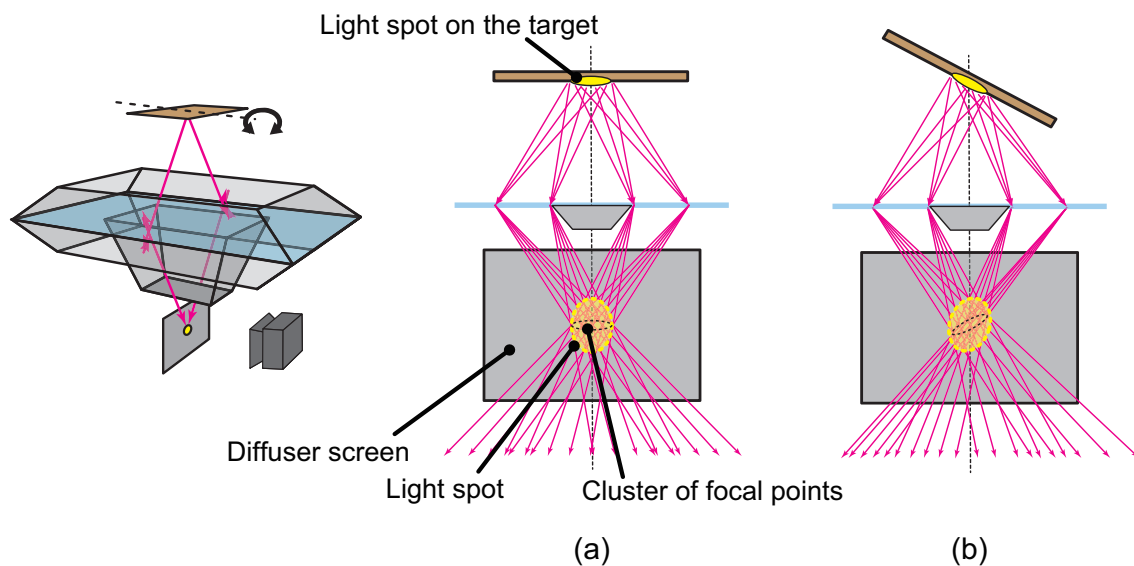


図 3.10. 拡散体スクリーンの法線方向と平行な方向を軸として計測対象が回転すると、拡散体スクリーン上の光点に傾きが生じる。(a): 計測対象が水平のとき、拡散体スクリーン上の光点に傾きは生じない。(b): 計測対象が回転すると、拡散体スクリーン上の光点に傾きが生じる。

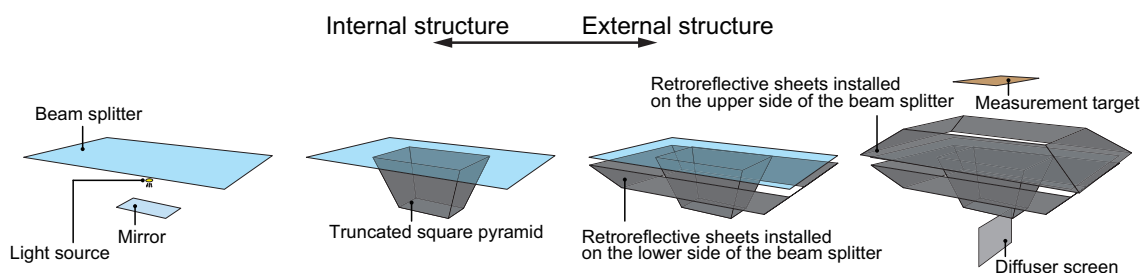


図 3.11. シミュレーション対象としたシステム左から順に内部の構造を示している

3.3.7 複数センシング点

3.3.5, 3.3.6 節では、単光源での場合について述べたが、複数光源の場合も同様である。図 3.5(Right) に示すように、点光源を複数並べれば、空中に計測点を複数個所配置することができる。複数光源を立体配置したものを用いたシステムでは、空中の特定の領域での形状復元が可能になる。本システムでは、この領域において手の形状による操作を想定している。

ここで、通常の一般的なセンシング方式においては対応点問題を考慮する必要がある。三次元計測における能動ステレオ法では、投影系と撮像系の捉えた特徴点をそれぞれ一致させる必要がある。誤った対応付けをしてしまわないよう、従来は時間的・空間的に特徴を付加した構造化光を投影することでこの問題を解消してきた [47, 48, 49]。一方で提案方式では、撮像系において観測される光点の画像平面上の位置と拡散体スクリーンの位置姿勢の情報から、計測対

表 3.1. システム設計詳細

Setup	Specification	Characteristic
Projected luminous spot	Height from the beam splitter (h_1)	208.3 mm
	Height from the top of the device	134 mm
Truncated square pyramid	Width \times Length of top side ($a \times b$)	252 mm \times 180 mm
	Width \times Length of bottom side ($c \times d$)	105 mm \times 75 mm
	Height	115 mm
Mirror	Width \times Length	100 mm \times 65 mm
	Distance from the beam splitter (h_2)	118.3 mm
Beam splitter	Thickness	3 mm
	Width \times Length	356 mm \times 254 mm
Light source	Shape	Disc-shaped, radius = 3.5 mm
	Distance from the beam splitter ($2h_2 - h_1$)	28.3 mm
	Thickness of the heat sink plate	20 mm
Retroreflective sheets installed on the upper side of the beam splitter	Width \times Length of top opening	261 mm \times 211 mm
	Width \times Length of bottom opening	416 mm \times 314 mm
	Height	74 mm
Retroreflective sheets installed on the lower side of the beam splitter	Width \times Length of top opening	356 mm \times 254 mm
	Width \times Length of bottom opening	272 mm \times 211 mm
	Height	40 mm

象表面上の光点位置が一意に定まる．ゆえに提案方式では対応点問題を考慮する必要がない．

3.4 シミュレーション

この節では，3.3 節で説明した計測が物理現象として正しく行えることをシミュレーションを用いて確認する．同時に，この方式が持つ遮蔽への頑健性を評価する．さらに，実験に用いる装置の構成を最適化する．

本節の構成は以下のようになっている．3.4.1 節にて，シミュレーション対象とするシステムの設計とシミュレーションの方式について説明する．3.4.2 節では，最適な再帰性反射シート配置について説明する．3.4.3 節では，本方式による位置計測のシミュレーションをおこない，性能を評価した．3.4.4 節では，本方式による回転計測のシミュレーションをおこない，性能を評価した．

3.4.1 システムとシミュレーションの設計

この節では，まずシステムの構成を説明する．次に，シミュレーションの方式について説明する最後に，システムの各寸法をどのように決定したかを説明する．

シミュレーションの対象を図 3.11 に示す．図 3.11 の右に示すように，撮像系用の再帰性反射材はビームスプリッタの上下 8 枚の板に設置している．下で述べる方針に沿って各部の寸法を決定した．シミュレーションに用いた各機器の寸法を表 3.1 に示す．

シミュレーションにおける光学設計について説明する．光源から照射される光線の方向は，

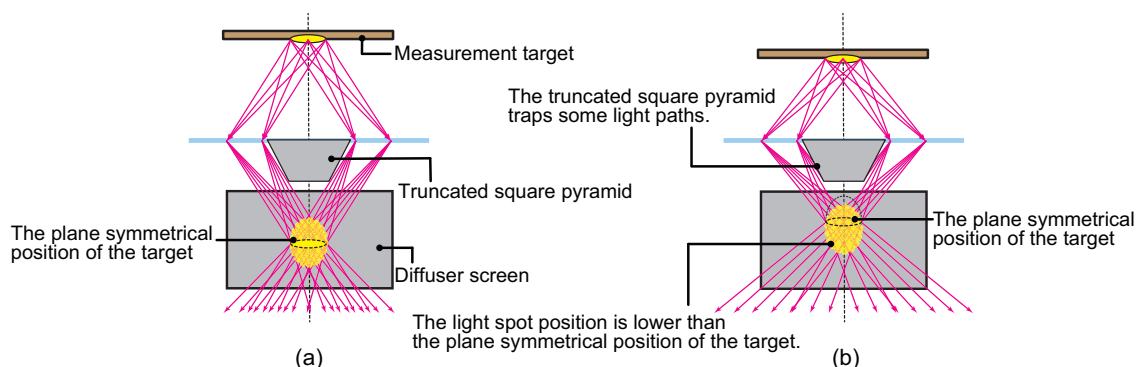


図 3.12. 位置計測における四角錐台の影の影響. (a): 四角錐台の高さが低いときあるいは計測対象の位置が高い時は、光点は計測対象の面对称位置にある. (b): 計測対象の位置が低い時は、四角錐台の影の影響で光点は計測対象の面对称位置よりも低い位置にある.

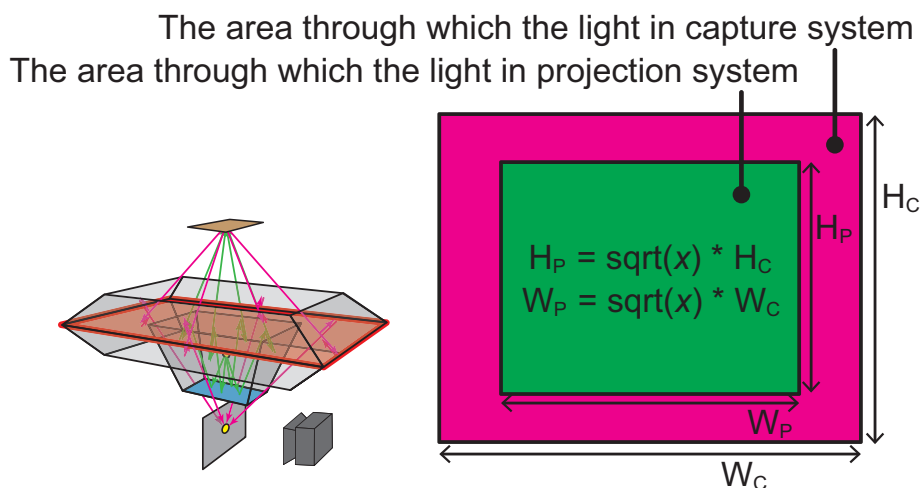


図 3.13. ビームスプリッタの面積を投影系と撮像系で2分する. 投影光が通る領域の面積を x , 撮像光が通る領域の面積を $1-x$ とする. 中心の緑色領域が投影用光路が通る領域, 周囲の赤色領域が撮像用光路が通る領域である.

azimuth 角 elevation 角の両方で均等に分布するように設定する. 光線はミラー, ビームスプリッタ, 再帰性反射材, 計測対象, 以外に入射した場合は全て吸収され, 迷光は無いものとする. ミラーに入射した光線は全て理想的な鏡面反射するものとした. ビームスプリッタに入射した光線は 50% の確率で鏡面反射, 50% の確率で透過するものとする. このシミュレーションではビームスプリッタの厚みによる屈折の影響は無視した. 再帰性反射材に入射した際のシミュレーションについては 3.4.2 節にて詳しく説明する. まず投影系において, 計測対象に入射する光線の本数と入射位置をシミュレーションする. 次に, 撮像系では, 入射位置と本数に応じて, 反射光線を出射させる. 撮像系では, この光線と拡散体スクリーンとの交点を記録する. 全交点の重心を計算し, これを拡散体スクリーン上の光点の中心位置と定義する. 全交点の画像モーメントから長軸方向の傾きを計算し, これを拡散体スクリーン上の光点の傾きと定義

Truncated square pyramid

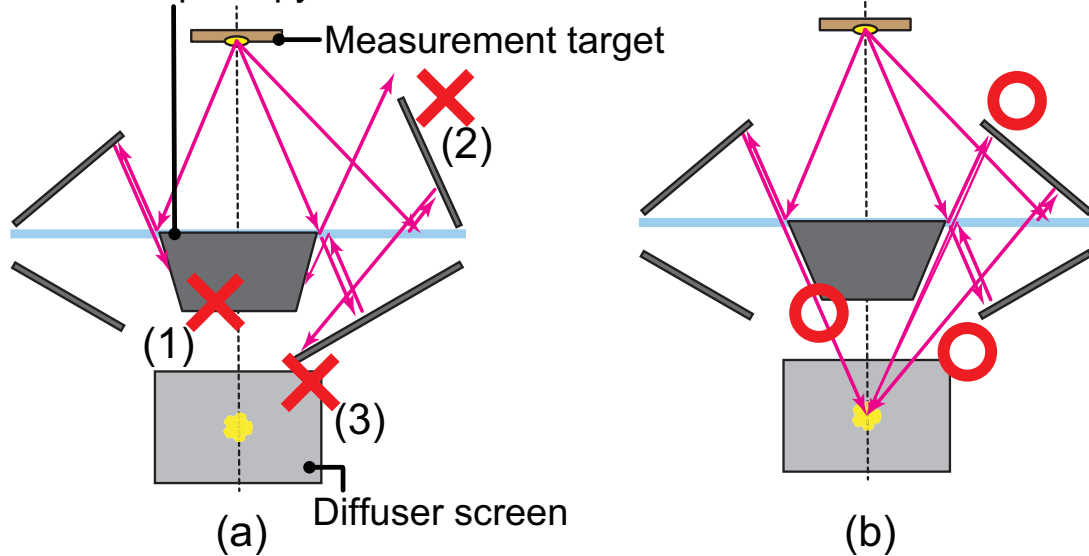


図 3.14. 無駄になる光が最小限になる構成. (a): 各構成要素のサイズが適していない場合に、無駄になる光が多くある. (1) 四角錐台底面が大きすぎるため、拡散体スクリーンに光が入射しない. (2) 再帰性反射シートの角度が適切でないため、光が反射しない. (3) 再帰性反射シートが大きすぎるため、拡散体スクリーンに光が入射しない. (b): 各構成要素のサイズが最適である場合は、無駄になる光が最小限となっている.

する.

システム設計指針について説明する. システム設計のために、シミュレーションを用いて提案方式を実現する効率的な仕様を定める. テーブル面の上空に提示された3次元像とインタラクションを行うテーブルトップ型インタフェースへの応用を想定したシステムを設計する. この前提の下、計測範囲はシステム上面からおよそ 130 mm から 140 mm の範囲とした. ここから、空間上に投影される光点位置をテーブル面から 134 mm ($h_1 = 208.3$ mm 図 3.8(b)) に定める. 次に、四角錐台内部のミラーとビームスプリッタの距離 ($= h_2$ 図 3.8(b)) を決定する. h_2 は光源の位置とミラーの反射を考慮して $0.5h_1 < h_2 < h_1$ の範囲に限定される. 注意すべき点として、四角錐台の影による計測誤差がある、図 3.12 に示すように、四角錐台の高さが高いと、四角錐台の影が拡散体スクリーンにでき、計測誤差が生まれる. なので、できる限り h_2 を小さくし、四角錐台の高さを低くするように設計する. ただし実際には、光源自身の大きさとヒートシンクの厚みのため、 h_2 を $0.5h_1$ まで小さくすることはできない. 光源とビームスプリッタの距離 ($2h_2 - h_1$) はできる限り小さくすることが望ましい. 光源の大きさとヒートシンクの厚みから、 $2h_2 - h_1$ は最小値が 28.3 mm となる. 以上から、 $2h_2 - h_1$ を 28.3 mm とし、 h_2 を 118.3 mm に決定する.

最後に、これらの設計値を用いて、ビームスプリッタ上の投影光が通る領域と撮像光が通る領域の分割比を決定する. 投影光が通る領域の面積を x 、撮像光が通る領域の面積を $1 - x$ とする. それぞれの領域の分割方法は図 3.13 に示す. ビームスプリッタ上の中心部分を投影光

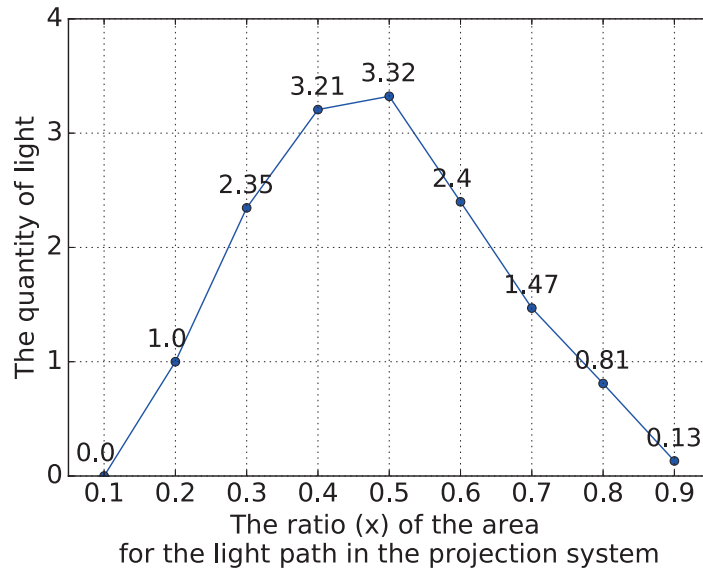


図 3.15. 投影系の光路の面積比率 (x) に応じて、システムが観測できる光量のシミュレーション結果. $x = 0.2$ のときにシステムが観測する光量を 1.0 として、各条件での光量を数値化した. $x = 0.5$ のときにシステムが観測する光量が最大となる.

が通る領域、その周囲の部分に撮像光が通る領域とする. また、遮蔽物としてシステム上面に透過率 0.5 のフィルタが置かれていると仮定する. このとき、 x の値に応じてシステムが観測できる光量のシミュレーションを行った. なお図 3.14 に示すように、ここまで示した各仕様が定まれば、無駄になる光を最小限にする観点から、四角錐台底面の大きさと各再帰性反射材の大きさ及び最適な設置方法を定めることができる. このシミュレーション結果を図 3.15 に示す. $x = 0.5$ のときシステムが観測できる光量が最大となる. 以上からビームスプリッタの面積を二等分し、投影用光路の領域、撮像用光路の領域に分ける.

3.4.2 再帰性反射材の配置

この節では提案するシステムに用いる再帰性反射材の種類を決定するためのシミュレーションについて説明する. 再帰性反射材には、マイクロビーズ型とプリズム型の 2 種類がある. 再帰性反射材と光の入射角の組み合わせにおいて AIRR での返光効率が異なることが知られている [50]. 先行研究 [50] に示された再帰性反射材の評価実験を基に、図 3.16 に示すようにシミュレーションに用いる性能を設定した. もっとも返光効率が良いのはプリズム型に入射角を 0° 付近で入光させる場合である. 入射角 0° 付近でマイクロビーズ型を用いた場合、反射効率はプリズム型の半分程度となる. マイクロビーズ型は入射角度が大きくなっても 40° 付近までは返光効率がほとんど一定である. これに対して、プリズム型は入射角度が大きくなるとともに返光効率が急激に低下する. 図 3.16(d) に示すように、本論文でのシミュレーションでは、観測角に関する反射強度はプリズム型ビーズ型に依存せず同一なものとする.

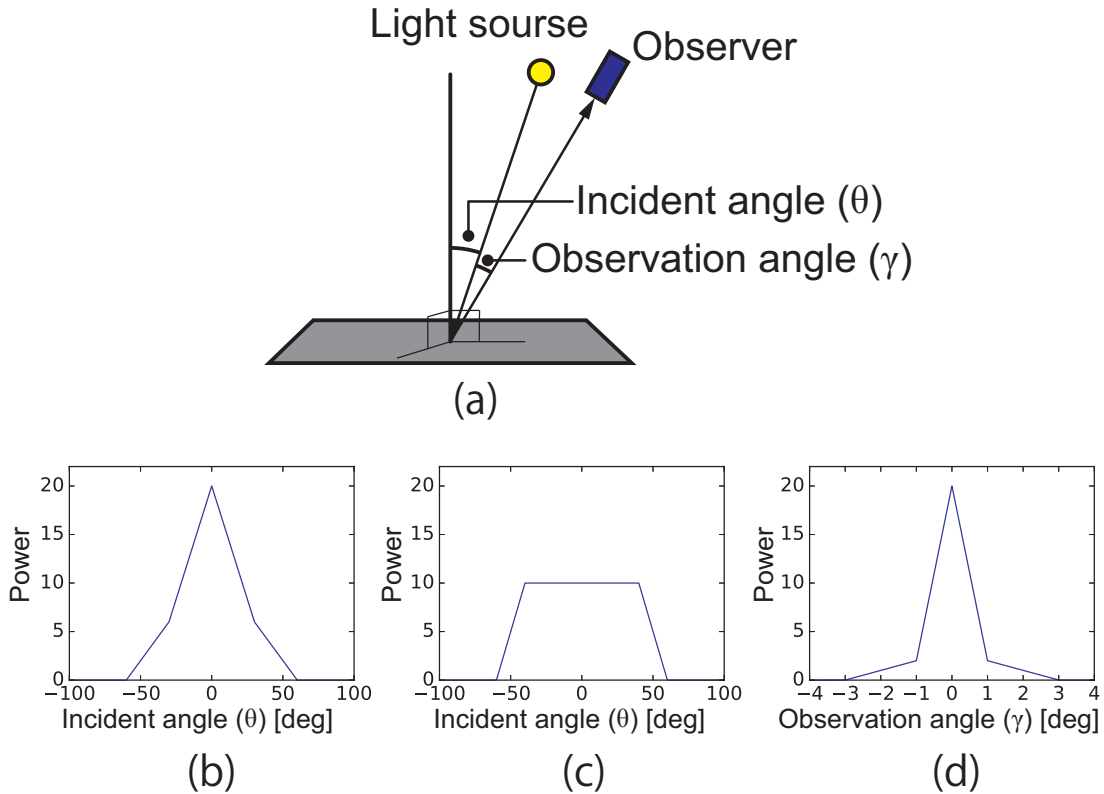


図 3.16. シミュレーションに用いた再帰性反射材の性能の設定. (a): 入射角 (θ) と観察角 (γ).
 (b): プリズム型再帰性反射材の入射角 (θ) に対する反射強度, (c): マイクロビーズ型再
 帰性反射材の入射角 (θ) に対する反射強度, (d): 観察角 (γ) に対する反射強度

再帰性反射材の配置によって光量がどのように変化するかシミュレーションによって評価した図 3.17(a) に示すように、投影系、撮像系それぞれにおいて 4 つの構成を用意した。4 つの構成は以下になっている：Arrangement_0: 全面ビーズ型再帰性反射材を用いた構成、Arrangement_1: 全面プリズム型再帰性反射材を用いた構成、Arrangement_2: 長辺ビーズ型 & 短辺プリズム型を用いた構成、Arrangement_3: 長辺プリズム型 & 短辺ビーズ型を用いた構成。図 3.17(b) は、投影系、撮像系それぞれにおいて、Arrangement_0 の光量を 1.0 として、他の構成の光量を比較したグラフである。シミュレーションの結果から、投影系では全面ビーズ型の構成 (Arrangement_0)、撮像系ではビーズ型を長辺に、プリズム型を短辺に配置する構成 (Arrangement_2) が良いことがわかった。投影系において、四角錐台の内側に張られる再帰性反射材に入射する光は、入射角を小さく取ることが難しく、入射角が大きくなる。このため、投影系には全面にビーズ型の再帰性反射材を用いることで大きな光量が得られると考えられる。撮像系では、使用する再帰性反射材に入射する光の入射角を小さく取よう設置できる箇所があるため、先程説明した特性から、該当箇所にはプリズム型の再帰性反射材を用いることで大きな光量が得られると考えられる。以後のシミュレーションではこの構成を採用する。

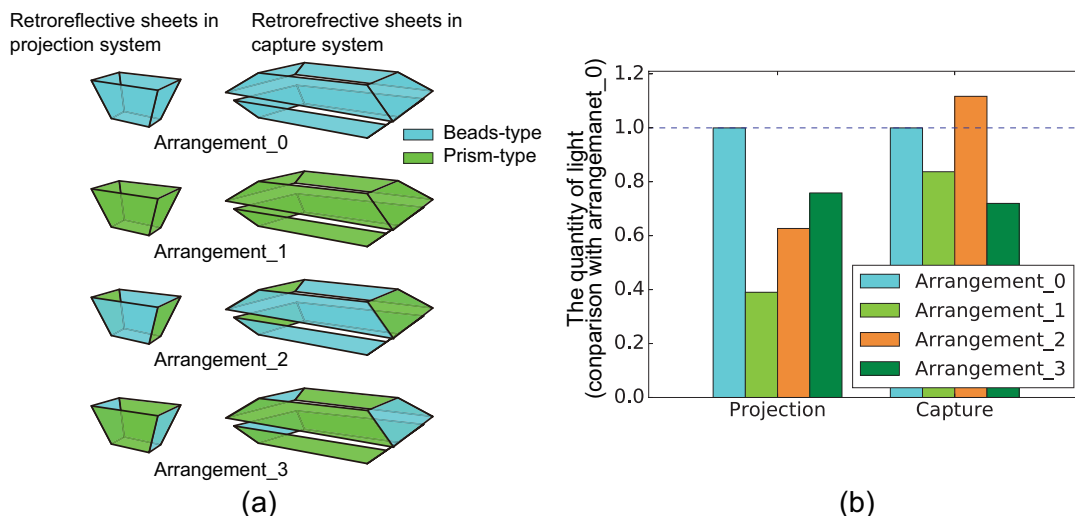


図 3.17. プリズム型とビーズ型の再帰性反射材の設置による、光量のシミュレーション。(a): Arrangement_0: 全面ビーズ型再帰性反射材を用いた構成, Arrangement_1: 全面プリズム型再帰性反射材を用いた構成, Arrangement_2: 長辺ビーズ型&短辺プリズム型を用いた構成, Arrangement_3: 長辺プリズム型&短辺ビーズ型を用いた構成。(b): 投影系と撮像系それぞれにおいて、4つの構成での Arrangement_0 の光量を 1.0 として、他の構成の光量を比較した。

3.4.3 位置計測シミュレーション

このシミュレーションでは、集光点の周り Z 軸方向 ± 10 mm の範囲に 1 mm 刻みで 21 地点に計測対象を設置する。この範囲は、図 3.8(d) に示した光線密度が光点中心の 33% 以上の範囲である。シミュレーションでの座標系は図 3.8 に示した座標系とし、ビームスプリッタ中心を原点とした。

まず、遮蔽を設置しない条件での、計測対象位置に対する光点位置のシミュレーション結果を図 3.18(a) に示す。また、拡散体スクリーン上に形成される光点のシミュレーション結果を図 3.18(b) に示す。計測対象位置の変化と、拡散体スクリーン上での光点位置の変化の関係は単調減少となっていることがわかる。このことから、光点の位置から対象の位置が一意に定まる事が確認でき、光点位置の計測による計測対象の位置計測が行えることが確認できた。この時、計測対象の位置が低い時、拡散体スクリーン上での光点が線形に変化しなくなるのは、図 3.12 に示した四角錐台の影の影響であると考えられる。

次に、遮蔽に対する頑健性を評価した。図 3.19(a,b,c) に、遮蔽物を置く領域を通る光路の密度分布シミュレーションを示す。光路の密度分布は一定では無い事がわかる。遮蔽物はシートと円盤を用いた。遮蔽シートには、網目状に矩形の窓を開けた。遮蔽シートは、図 3.19(d) に示すように開いている窓の一辺の大きさを 30 mm に固定し、枠の幅を変えることで、遮蔽率 50%, 60%, 70%, 80%, 90% の 5 種類を用意した。例えば、遮蔽率 70% の遮蔽シートの L_2

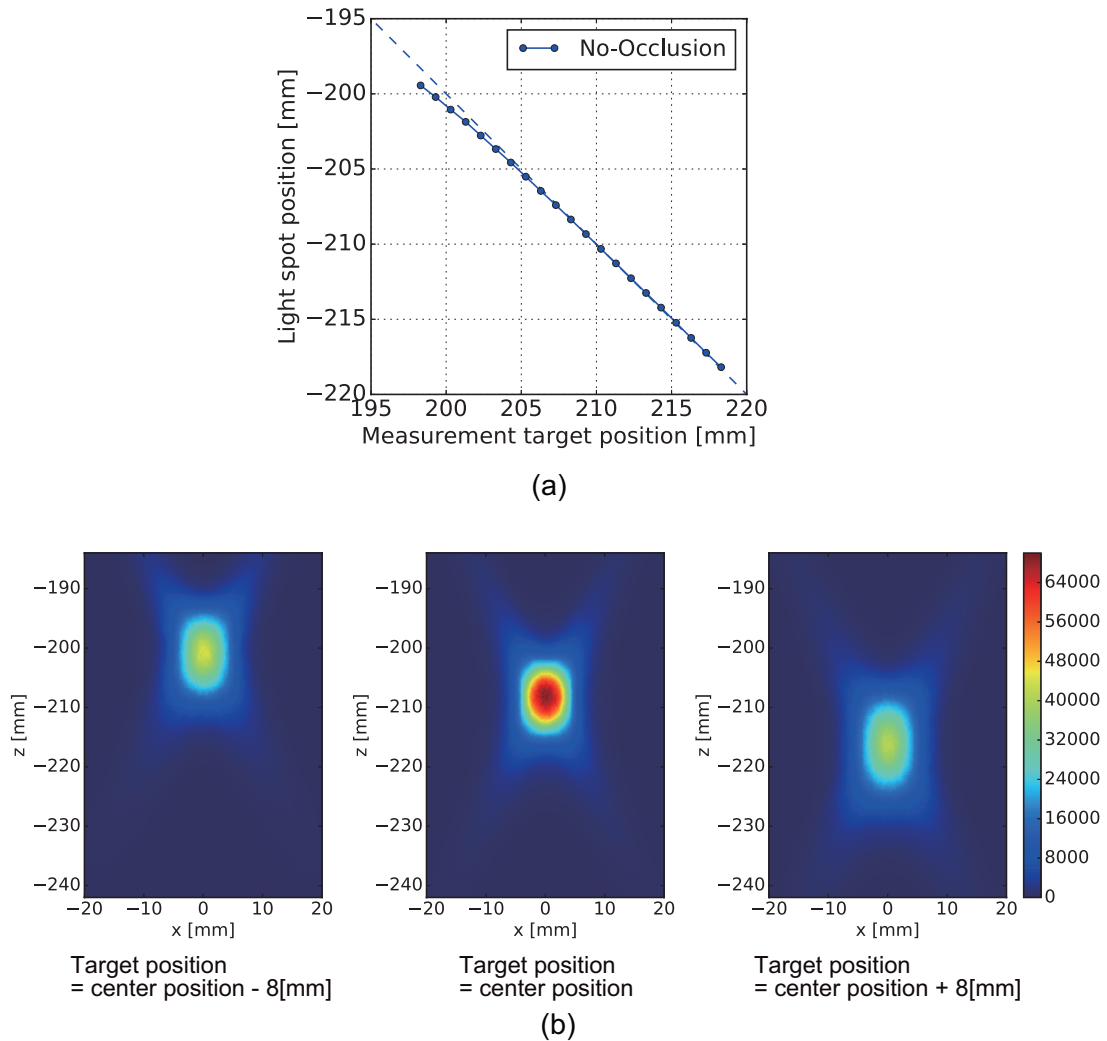


図 3.18. 遮蔽物を設置しない条件での、計測対象位置に対する光点位置のシミュレーション結果. (a): 計測対象位置に対する光点位置の変化. (b): 拡散体スクリーン上に形成される光点のシミュレーション結果. 色は入射する光線の本数を表している.

は 16.43 mm である. 遮蔽円盤の大きさは、直径 50 mm、厚さ 6 mm とし、図 3.19(e) に示したアクリル板上の 5 地点にそれぞれ設置した. 2 種類の遮蔽物に対しての性能を考慮することで、一様に設置された遮蔽と局所的に設置された遮蔽それぞれへの頑健性を評価することができる.

遮蔽シート及び遮蔽円盤を設置した条件でのシミュレーション結果を図 3.20(a,b) に示す. また、遮蔽物を設置しない条件での結果を用いて、計測対象の位置推定を行った結果を図 3.20(c,d) に示す. なお、推定の方法としては直近 2 サンプルによる線形補間としており、以後の推定でも同様である. 推定誤差は遮蔽シートを設置した条件で 0.92 mm 以内、遮蔽円盤を設置した条件で 0.13 mm 以内となった. シミュレーション結果から、提案方式を実装し

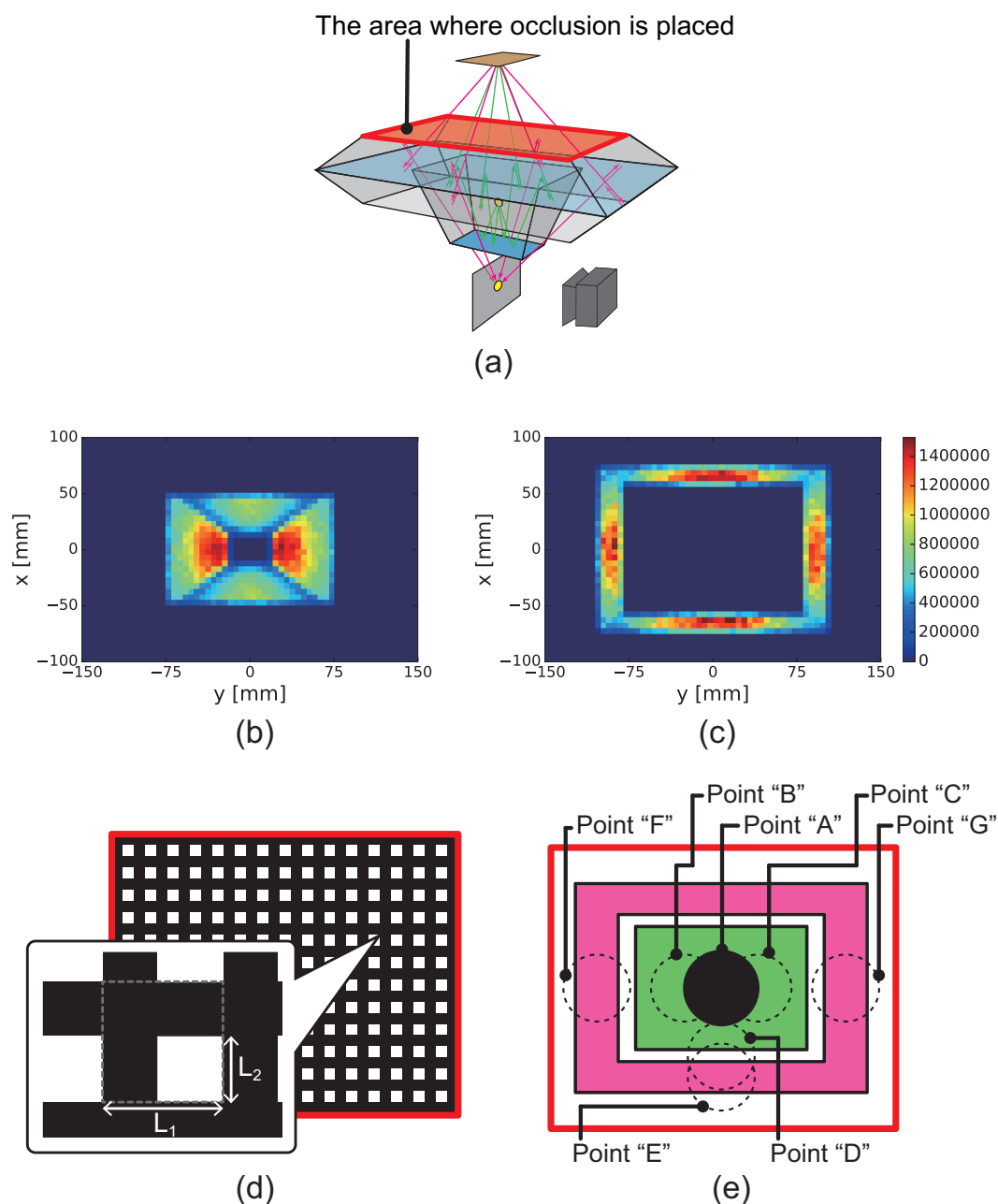


図 3.19. (a): 遮蔽物が置かれる領域 (b,c): 遮蔽物が置かれる領域を通る光路の密度分布 (b): 投影系の光路の密度分布 (c): 撮像系の光路の密度分布 (d): 遮蔽シート. 正方形のサイズ (L_1) は 30 mm で固定とした. 遮蔽率は窓のサイズ (L_2) を変えることで複数用意した. (e): 遮蔽円盤. 遮蔽円盤が設置される地点を示している. 緑色で示した領域は投影系の光が通過する領域である. 赤色で示した領域は撮像系の光が通過する領域である.

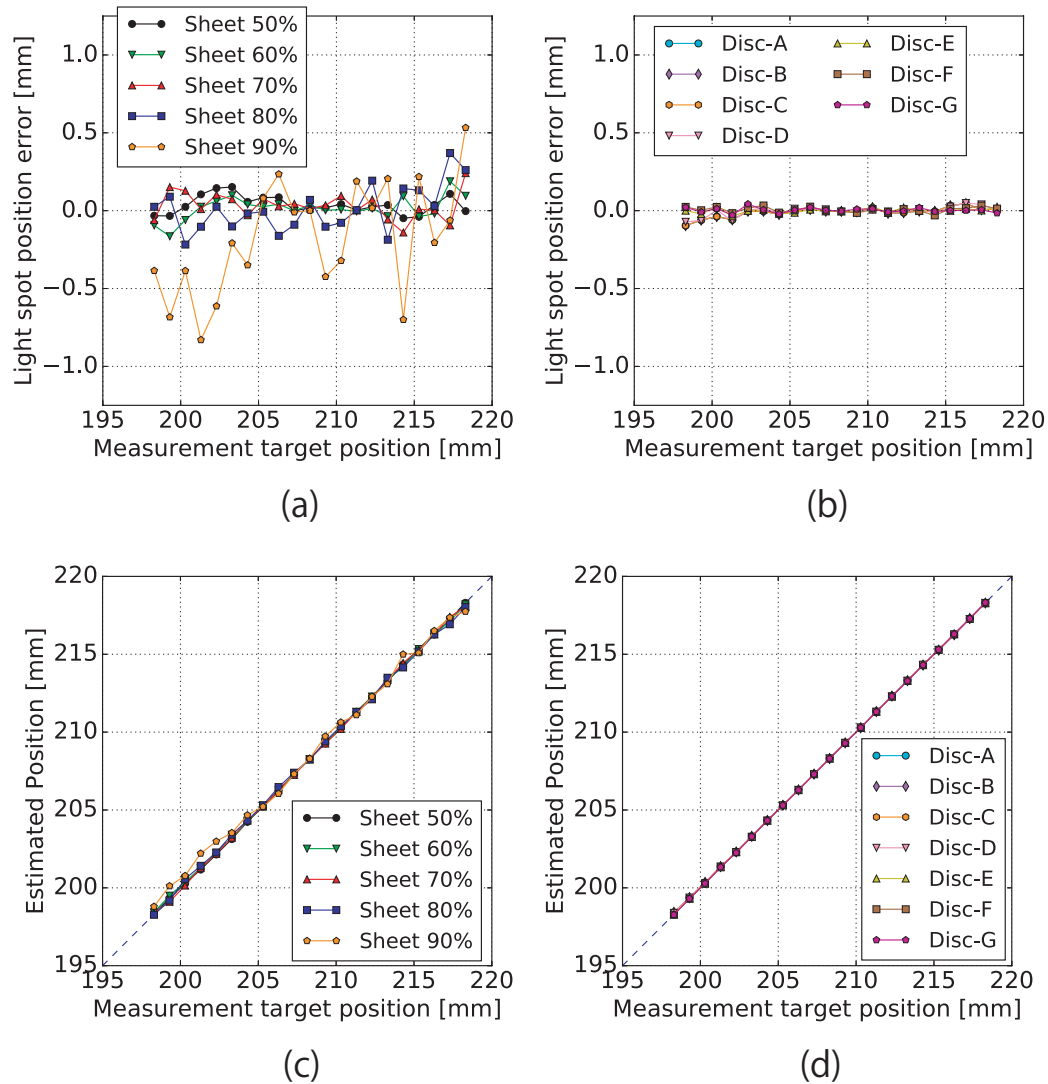


図 3.20. 遮蔽条件下での計測対象の位置と光点位置のシミュレーション結果. (a,b): 遮蔽シート (a) 及び遮蔽円盤 (b) を設置した条件での、計測対象位置に対する無遮蔽条件と比較した光点位置の誤差のシミュレーション結果. (c,d): 遮蔽物を設置しない条件での計測対象と光点位置変化の関係をルックアップテーブルとして、遮蔽シート (c) 及び遮蔽円盤 (d) を設置した条件での光点位置から計測対象の位置推定を行った場合のシミュレーション結果.

た位置計測において、一様に広がる遮蔽物と局所的に置かれた遮蔽物に対して頑健性が確認できた。

3.4.4 姿勢計測シミュレーション

このシミュレーションでは、計測対象の Z 軸方向位置は変化させることなく、水平状態の角度を 0 deg として、 $\pm 40 \text{ deg}$ の範囲に 10 deg 刻みで 17 姿勢に計測対象を設置し光点の観測

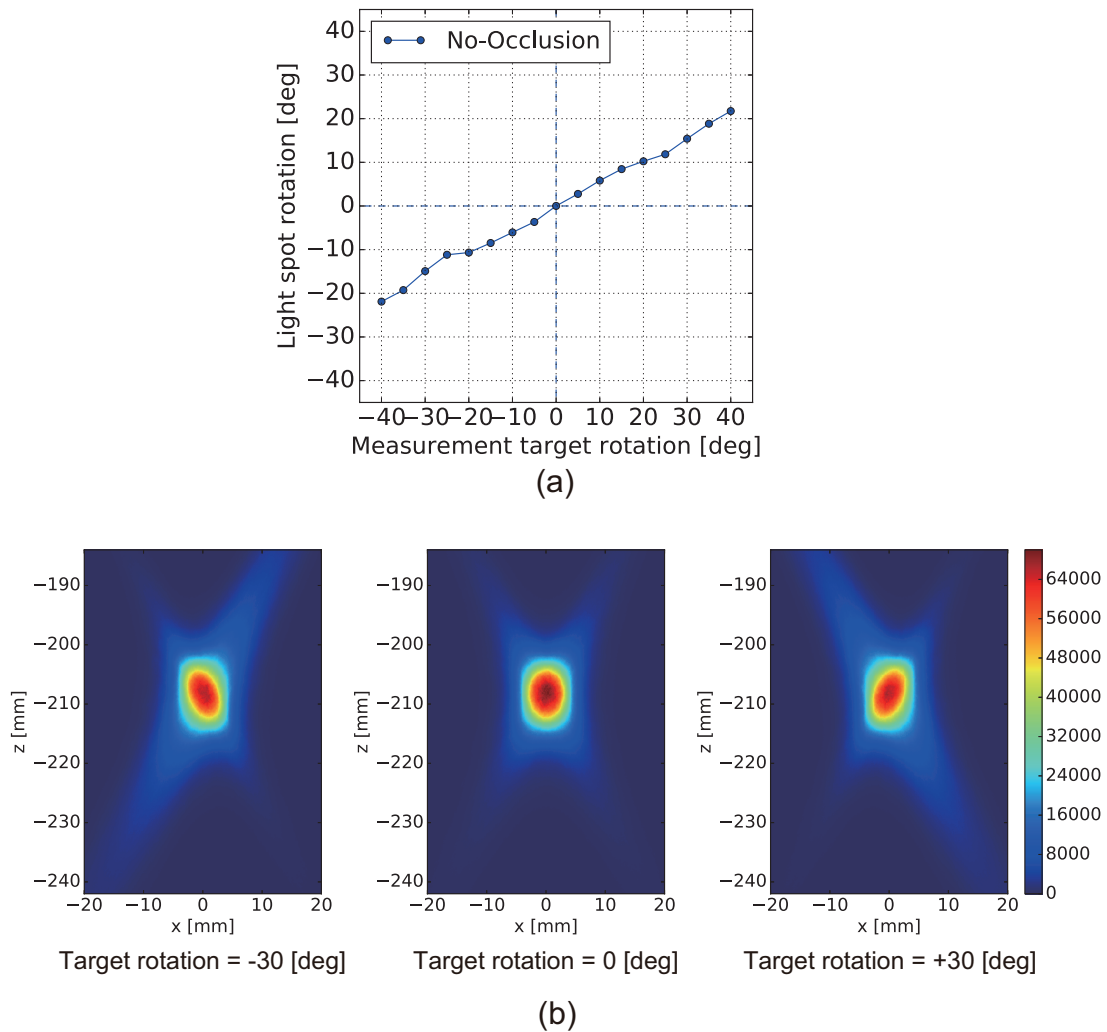


図 3.21. 遮蔽を設置しない条件での、計測対象の傾きに対する光点傾きのシミュレーション結果。(a): 計測対象の傾きに対する光点傾きの変化。(b): 拡散体スクリーン上に形成される光点のシミュレーション結果。色は入射する光線の本数を表している。

を行った。計測対象は集光点位置の高さに設置した。

まず、遮蔽を設置しない条件での計測対象の傾きに対する光点傾きのシミュレーション結果を図 3.21(a) に示す。また、拡散体スクリーン上に形成される光点のシミュレーション結果を図 3.21(b) に示す。計測対象姿勢の変化と、拡散体スクリーン上での光点傾きの変化の関係は単調増加となっていることがわかる。このことから、光点傾きから対象の傾きが一意に定まる事が確認でき、光点傾きの計測による計測対象の姿勢計測が行えることが確認できた。

次に、遮蔽シート及び遮蔽円盤を設置した際のシミュレーション結果を図 3.22(a,b) に示す。遮蔽率が 80% 以上の場合には、拡散体スクリーンに入射する光量が低下し、計測対象姿勢の変化と、拡散体スクリーン上での光点傾きの変化の関係が単調増加を満たさない事がわかった。遮蔽物を設置しない条件での結果を用いて、計測対象の姿勢推定を行った結果を

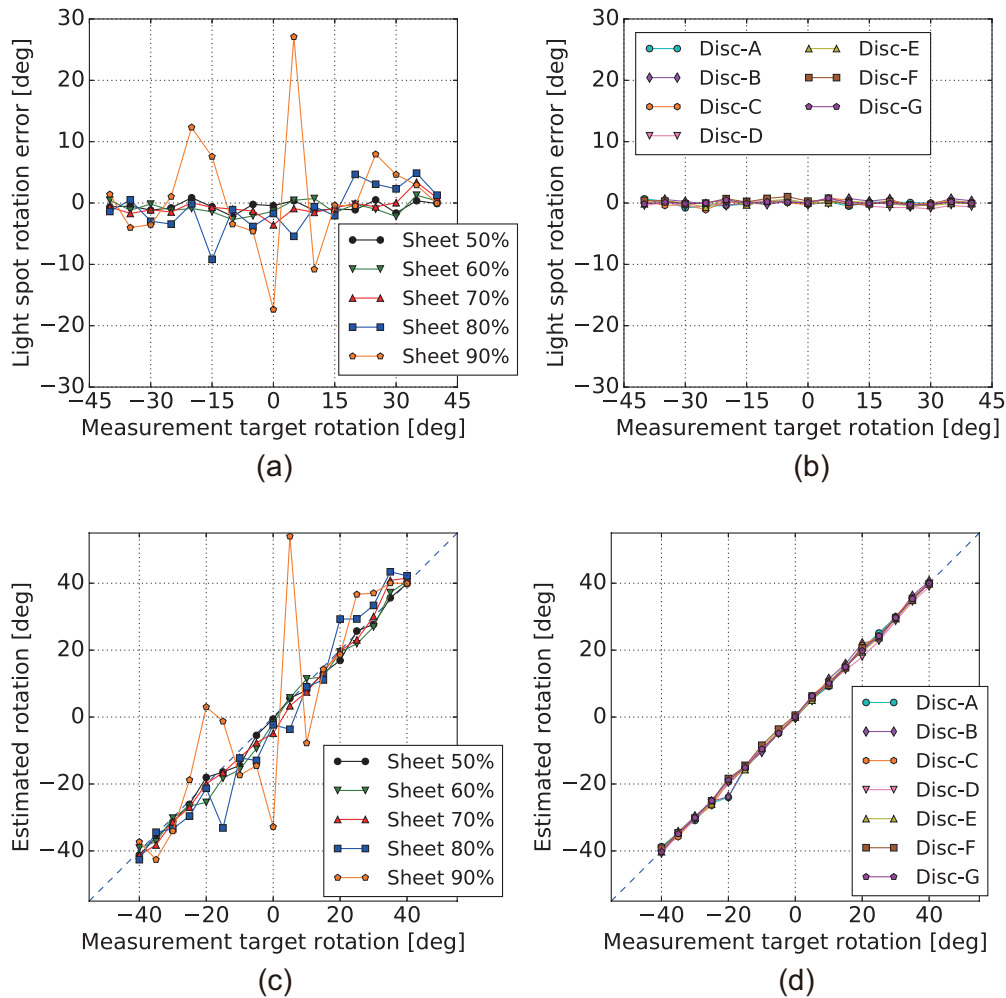


図 3.22. 遮蔽条件下での計測対象の姿勢と光点傾きのシミュレーション結果. (a,b): 遮蔽シート (a) 及び遮蔽円盤 (b) を設置した条件での、計測対象の傾きに対する光点傾きのシミュレーション結果. (c,d): 遮蔽物を設置しない条件での計測の傾きと光点傾きの変化の関係を用いて、遮蔽条件での光点傾きから計測対象の傾き推定を行った場合のシミュレーション結果.

図 3.22(c,d) に示す、遮蔽率が 70% 以内の遮蔽条件でのシミュレーション結果における、推定誤差は 5.88 deg 以内となり、誤差は 3.98 deg 以内となった。シミュレーション結果から、提案方式を実装した姿勢計測において、一様に広がる遮蔽物に対して、一定の遮蔽率の条件下では頑健性が確認できた。

3.5 評価実験

実験系を図 3.23 に示す。実験にはシミュレーションで用いたものと同じシステムを制作した。実験に用いた各装置の詳細を表 3.2 に示す。3.4.2 節にて最適と判断された構成で再帰性

表 3.2. 実験系詳細

Setup	Specification	Characteristic
Light source	Model	Lumileds L2C3-5080109E06000
	Power	16 W
Diffuser screen	Material	Three sheets of stacked tracing paper (40 g/m ²)
	Width × Height	74 mm × 58 mm
Camera	Model	EOSENS MC1362
	Resolution	1024 × 768
	Exposure time	10.5 ms
	Lens system	20 mm, F1.8
Sensing target	Material	Flat plate, on which a sheet of white paper was attached
	Width × Length	60 mm × 50 mm
Top plate of the device	Material	2 mm thick acrylic plate
	Width × Length	278 mm × 228 mm

反射材を設置した。これは投影系では全面ビーズ型の構成 (Arrangement_0), 撮像系ではビーズ型を長辺に, プリズム型を短辺に配置する構成 (Arrangement_2) である。

3.5.1 位置計測実験

位置計測実験では, シミュレーションよりも少ない計測点に対して計測を行った。これは, 中心位置から離れる位置では, 観測される光量が小さくなり, 計測が安定しないためである。シミュレーションで用いた 21 点の計測点の内, 中心位置に近い 17 点を計測点とした。この範囲は, 図 3.8(d) に示した光線密度が中心位置の 50% 以上の範囲である。拡散体スクリーン上での光点中心の計算方法はシミュレーションと同一の方法を用いた。

遮蔽を置かない条件下での計測対象位置に対する観測される光点位置の計測結果を図 3.24(a) に示す。この時, 計測用カメラによって撮影された画像を図 3.24(b) に示す。計測対象位置に対する観測される光点位置の計測結果とシミュレーションの結果との誤差は 0.38 mm 以内に収まった。故に, この方式を用いた場合には, 事前の位置合せ無しに位置計測が可能であることを示した。

また, 遮蔽を設置した各条件での計測結果を図 3.25(a,b) に示す。この時, 遮蔽を置かない条件下でのシミュレーション結果を用いて, 位置推定を行った場合の結果を図 3.25(c,d) に示す。この結果から, 遮蔽シートを設置した一様に広がる遮蔽条件の場合には, 遮蔽率が 80% 以上になる条件下では光量の低下のために, 誤差が大きくなることがわかったしかし遮蔽率が 70% 以下であれば, 計測誤差は 1.74 mm 以内となった。遮蔽円盤を設置した局所的な遮蔽条件の場合には, 計測誤差は 1.28 mm 以内となった。これより, この方式を用いた場合には, 遮蔽に頑健な位置計測が可能であることを示した。

3.5.2 姿勢計測実験

姿勢計測実験では, シミュレーションよりも少ない計測点に対して計測を行った。これは, 計測対象の傾きが大きくなる場合には, 観測される光量が小さくなり, 計測が安定しないため

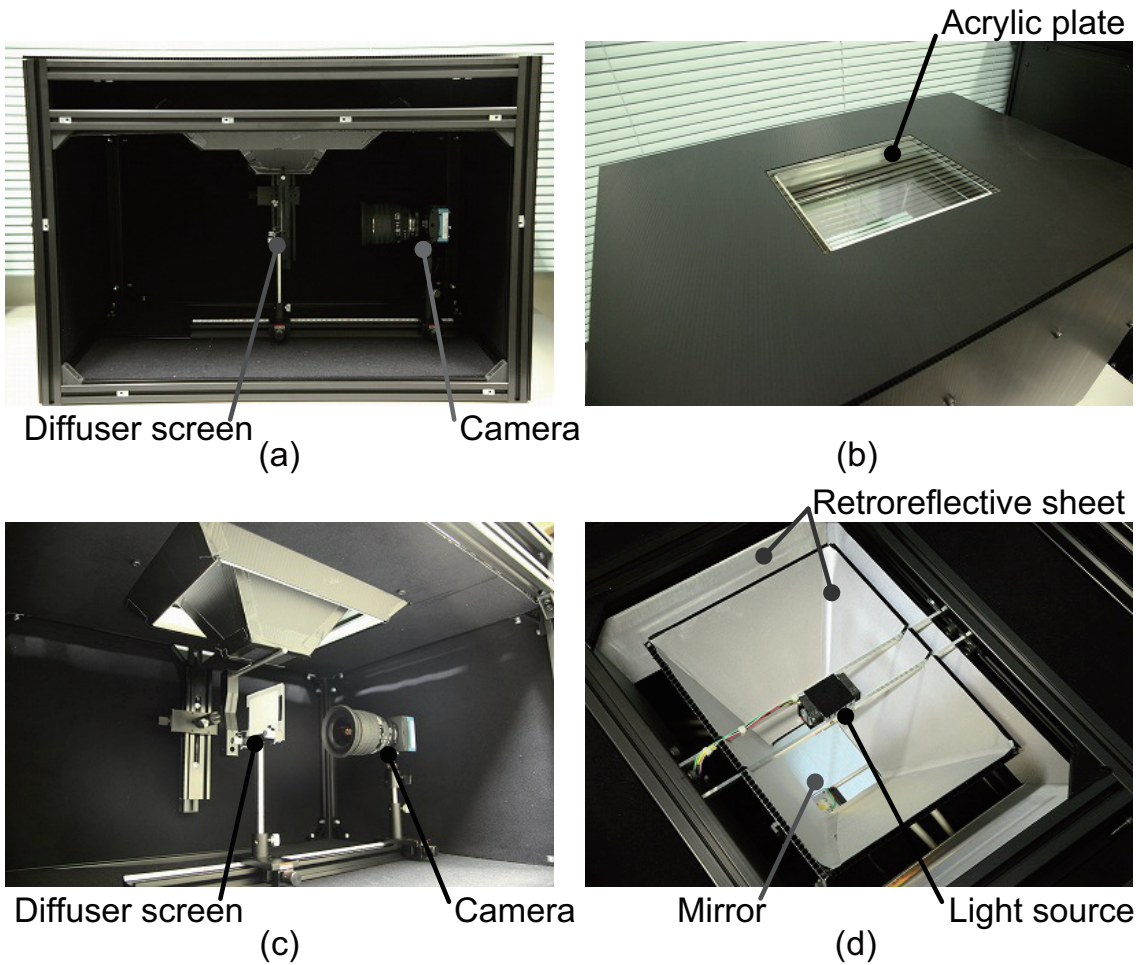


図 3.23. 実験に用いたシステム: (a): 正面から, (b): 上から, (c): システム内部, (d): 四角錐台の内部.

である。シミュレーションで用いた 17 の計測姿勢の内、傾きの小さい 13 姿勢を計測対象とした。拡散体スクリーン上での光点傾きの計算方法はシミュレーションと同一の方法を用いた。

遮蔽を置かない条件下での計測対象姿勢と観測される光点傾きの計測結果を図 3.26(a) に示す。この時、計測用カメラによって撮影される画像を図 3.26(b) に示す。また、遮蔽を設置した各条件での計測結果を図 3.27(a,b) に示す。この時、遮蔽率が 80% 以上になる場合には誤差が大きくなり、安定して計測が行えなかったため、実験結果は 50% から 70% の 3 条件を示す。この時、遮蔽を置かない条件での実験結果を用いて、姿勢推定を行った場合の結果を図 3.27(c,d) に示す。以上の結果から、一様な遮蔽条件では、遮蔽率が 60% 以下であれば、計測誤差は 15.4 deg 以内となった。遮蔽円盤を設置した局所的な遮蔽条件の場合には、計測誤差は 5.58 deg 以内となった。故に、この方式を用いた場合には、遮蔽に頑健な姿勢計測が可能であることを示した。

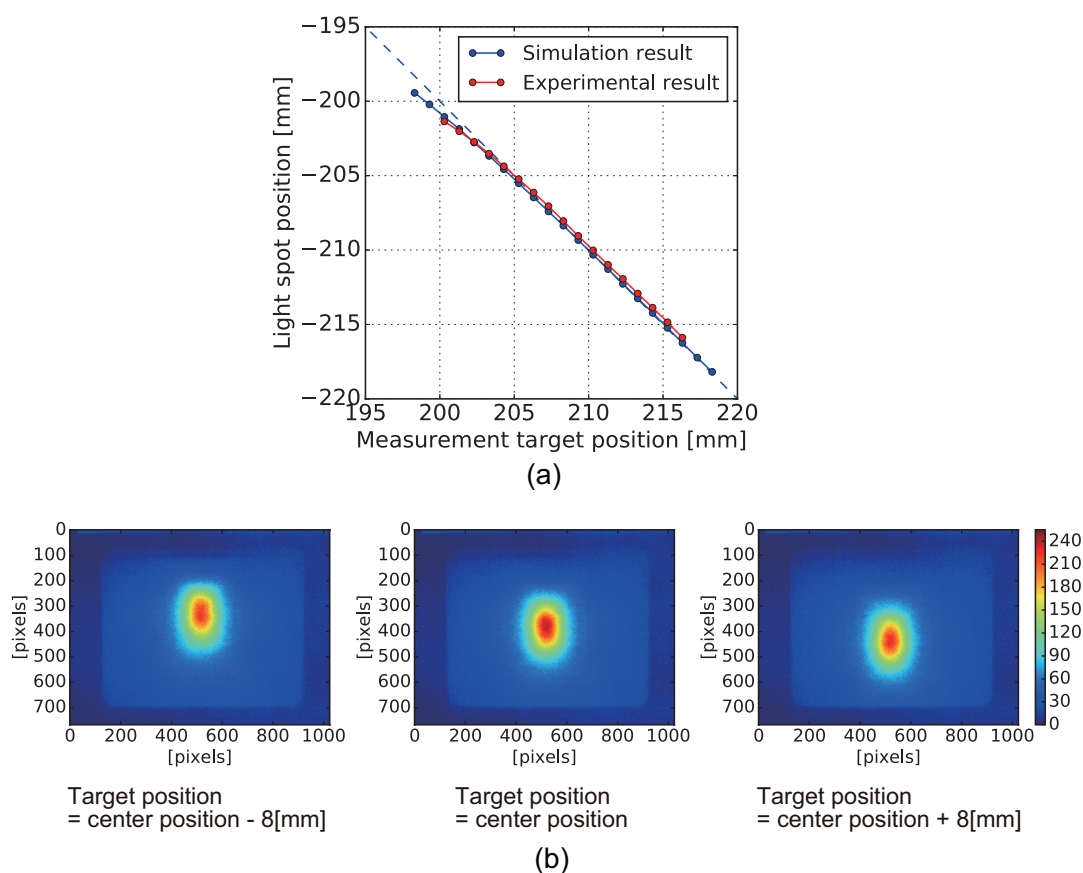


図 3.24. 遮蔽を設置しない条件での、計測対象位置に対する光点位置の実験結果. (a): 計測対象位置に対する光点位置の変化. 図 3.18(a) に示したシミュレーション結果を再掲した. (b): 拡散体スクリーン上に形成される光点の撮像結果.

3.5.3 Verification in Actual Situation

1つの応用例として、テーブルトップユーザインタフェースを実装した. 図 3.28 に示すように、提案方式を用いたインタフェースを構築した. 光点3次元像への入力によって、7セグメントLEDとバーLEDの3次元像が変化する. 対象の位置が高くなると、左の3次元像のバーが高くなり、左の3次元像の7セグメントLEDの数字が大きくなる. 対象が回転すると傾きの度合いに合わせて、右の3次元像のboxが左右に動き、左の3次元像の7セグメントLEDに“/”, “-”, “\”のいずれかが表示される. 図 3.29 に手の平と指によって2種類の環境での2種類の入力を示す. 上で説明したとおりに、手や指の動きに対応して3次元像が変化する. 我々の提案する系は位置合せを必要としないので、キャリブレーションなしに、光点3次元像の位置と入力反応位置とを一致させることができています. 図 3.30 に手の平と指によって入力を行った様子を示す. この実験では、対象の高さをデバイス天板からの距離と定義している. 位置の推定は先に示した遮蔽なし条件でのシミュレーション結果を用いて行った. 姿勢推定は

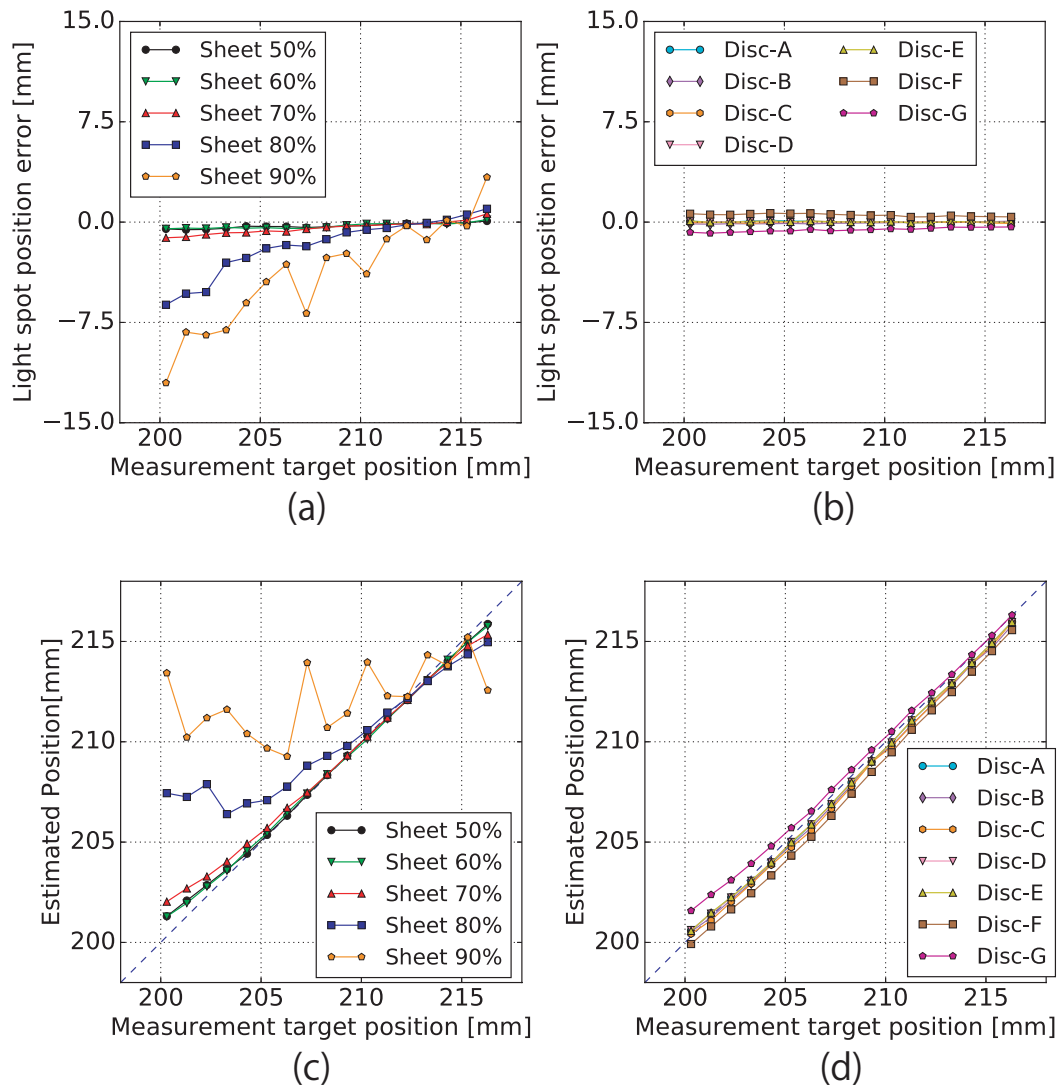


図 3.25. 遮蔽条件下での計測対象の位置と光点位置の実験結果. (a,b): 遮蔽シート (a) 及び遮蔽円盤 (b) を設置した条件での, 計測対象位置に対する光点位置の実験結果. (c,d): 遮蔽物を設置しない条件での, 計測対象と光点位置変化の関係をj用いて, 遮蔽シート (a) 及び遮蔽円盤 ((b) を設置した条件での光点位置から計測対象の位置推定を行った場合の実験結果.

先に示した遮蔽なし条件での実験結果を用いて行った我々の提案する系は遮蔽に対して頑健性を持つので, 計測装置の上が散らかっていても, 複雑な手の形を取っても, 使用者の入力が滞ることがない. 図 3.30(a) において, 後半は手の平の傾きのみ変化させたはずだが, 高さも変化している. この理由は, 手の回転軸の位置と計測点がずれていたからだ. 手の平の回転に伴って計測点の位置が変化した. 図 3.30(b) からわかるように指による入力時には姿勢計測が安定しなかった. これは, 指は細いため, 十分な光量が得られなかったためだと考えられる. 安定性が必要な場合には, 時間平均フィルタを用いることで対処可能であると考えているが,

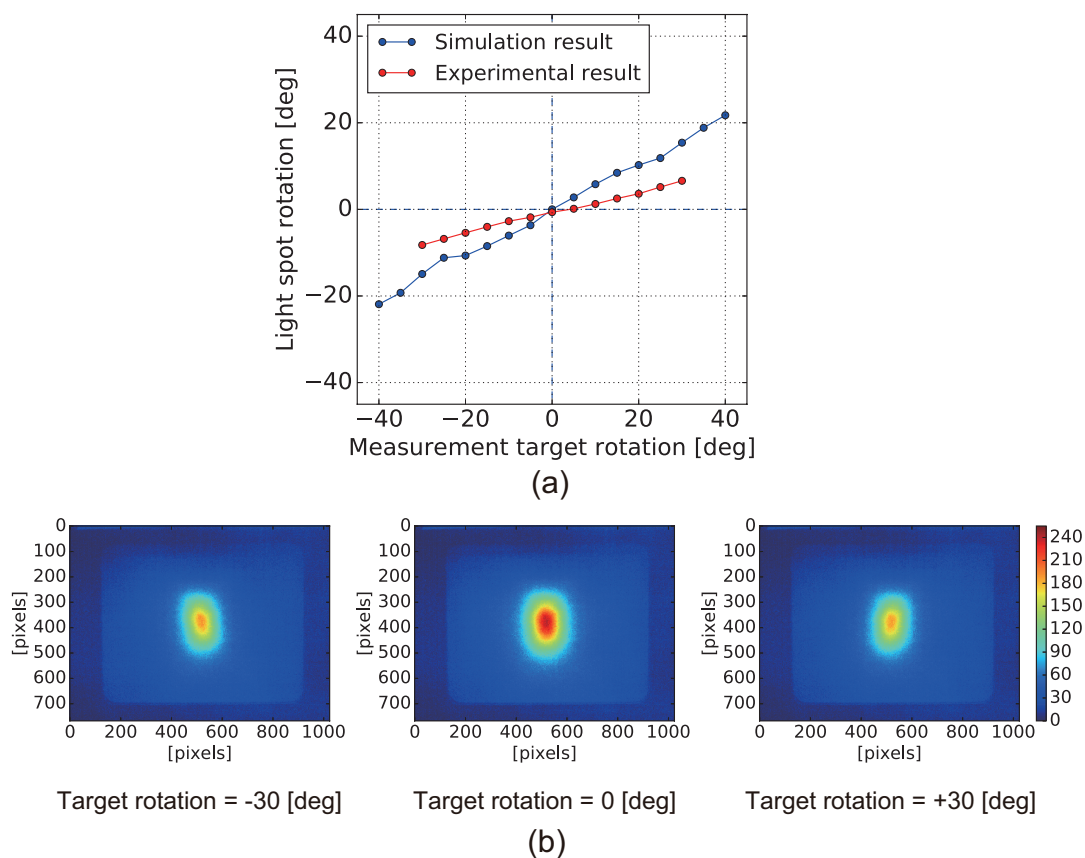


図 3.26. 遮蔽を設置しない条件での、計測対象の傾きに対する光点傾きの実験結果. (a): 計測対象の傾きに対する光点傾きの変化. 図 3.21(a) に示したシミュレーション結果を再掲. (b): 拡散体スクリーン上に形成される光点の撮像結果.

この点は今後の課題である

3.5.4 立体走査

光源を 8 点として、3.5.1 節での位置計測の実験と同様のものを行った。この実験によって拡散体スクリーンの回転による立体走査が可能であることを示す。光源には OptoSupply 社製 3mm 高輝度白色 LED(OSPW3131P, 165 mW) を 8 つ、図 3.31(a) に示すように 1 辺 15 mm の立方体の各頂点に LED の中心が一致するよう空中配線したものをを用いた。撮像用カメラの露光時間を 150, ms に設定し撮像を行った。計測対象を水平に保ちながら、Z 方向に動かした図 3.31(b) に示すように、スクリーンを 2 つの姿勢に回転させることで、4 つの光点をスクリーンで観測した。実験結果を図 3.32 に示す。この実験結果から、提案方式を実装した位置計測において、空間的に広がる配置を持つ光源に対しては拡散体スクリーンを回転させることで立体走査を行い計測できることを確認した。本提案方式を用いたシステムで、15 mm × 15 mm × 25 mm の計測範囲において、水平方向 15 mm、垂直方向 1 mm の空間解

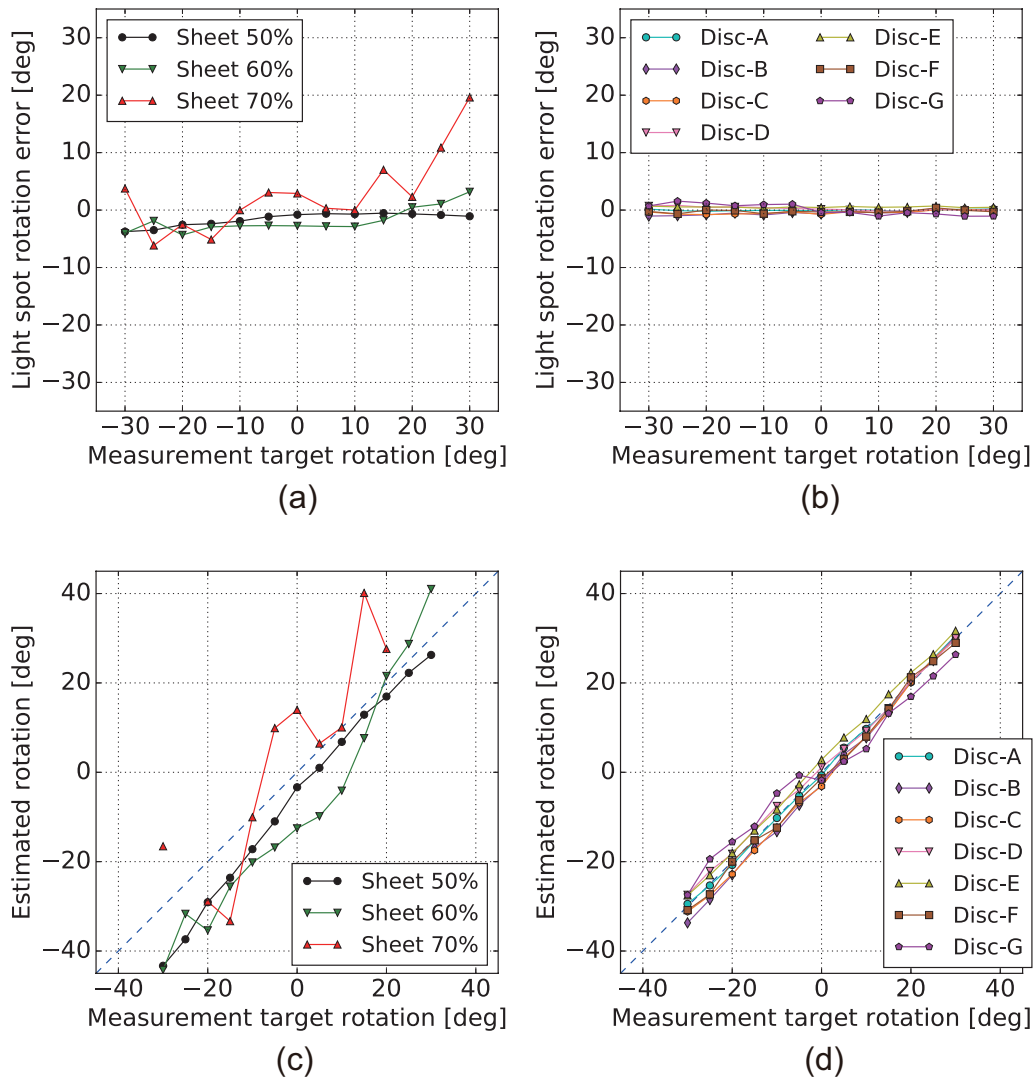


図 3.27. 遮蔽条件下での計測対象の姿勢と光点傾きの実験結果. (a,b): 遮蔽シート (a) 及び遮蔽円盤 (b) を設置した条件での, 計測対象の傾きに対する光点傾きの実験結果. (c,d): 遮蔽物を設置しない条件での, 計測対象と光点位置変化の関係をj用いて, 遮蔽シート (a) 及び遮蔽円盤 (d) を設置した条件での光点位置から計測対象の傾き推定を行った場合の実験結果. 結果の可読性のため, 70% の遮蔽条件下では, 推定される傾きが -45 deg から 45 deg の間に収まらない点は表示していない. 表示していない結果は以下の通り [sensing target rotation / estimated rotation] = $[-25 \text{ deg} / -46.9 \text{ deg}]$, $[25 \text{ deg} / 62.7 \text{ deg}]$, $[30 \text{ deg} / 97.9 \text{ deg}]$.

像度を達成した. このスペックで, 空中に提示したキーボードをタイプするようなアプリケーションが実現できると考えられる.

(*) 3D image of light spot

(**) 3D images of seven-segment LED and bar LED

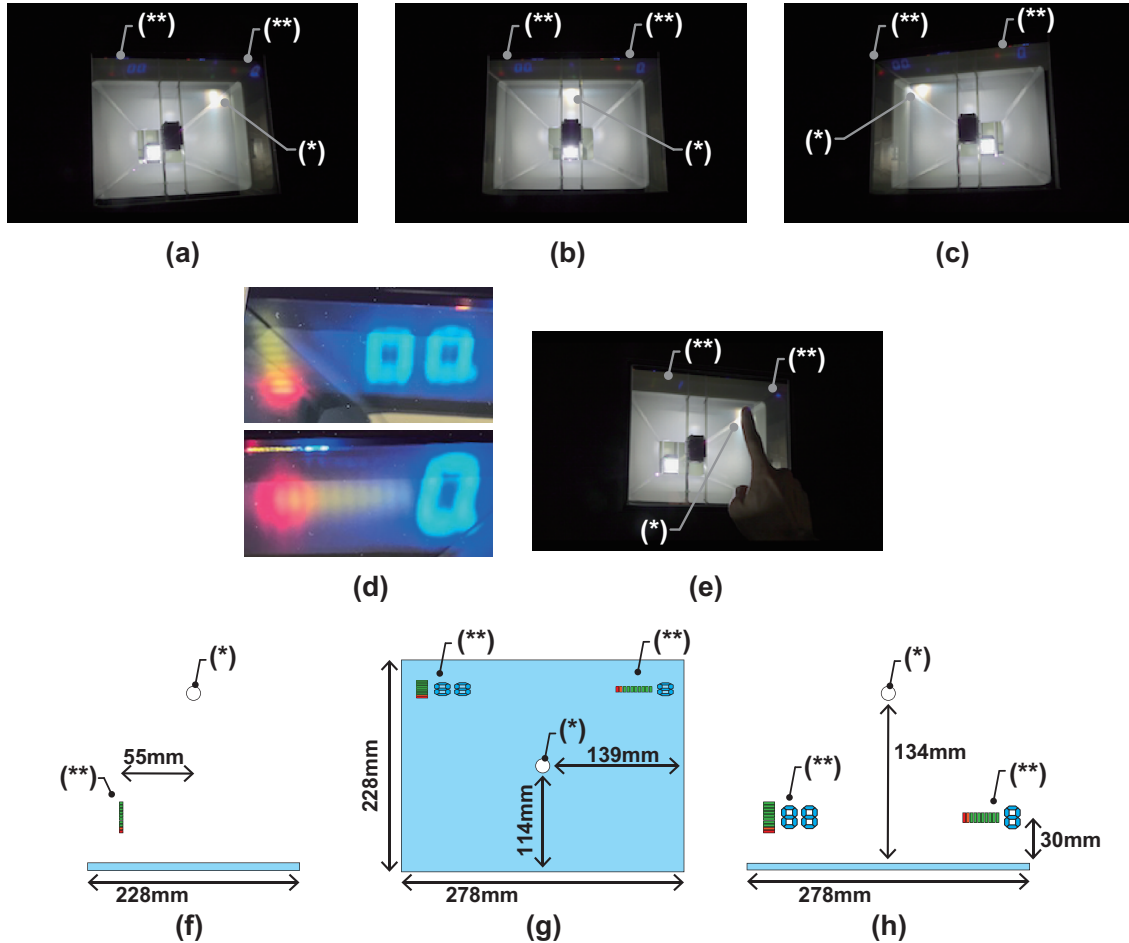


図 3.28. (a-e): 実際のテーブルトップユーザインタフェースシステムの写真 (a): 左斜め上から見た図 (b): 正面斜め上から見た図 (c): 右斜め上から見た図 (d): 7 セグメント LED とバー LED の図 (e): 光点 3 次元像に指先でタッチする様子. (f-h): 光点 3 次元像, 7 セグメント LED とバー LED 3 次元像の位置関係 (f): Side view. (g): Top view. (h): Front view.

3.6 考察

3.6.1 シミュレーションと実験結果との差異

図 3.24(a) と図 3.26(a) に遮蔽を設置しない条件における光点位置と光点傾きそれぞれのシミュレーション結果及び実験結果の比較を示している. 位置計測では, シミュレーション結果と実験結果にはほとんど差が無い. これに対して, 姿勢計測では, シミュレーション結果と実験結果で最大約 5 deg の誤差が生じている. この原因の 1 つとして光の分布の変化に対して, 光点の重心の計算はロバストであるのに対して, 光点の画像モーメントの計算は敏感である事

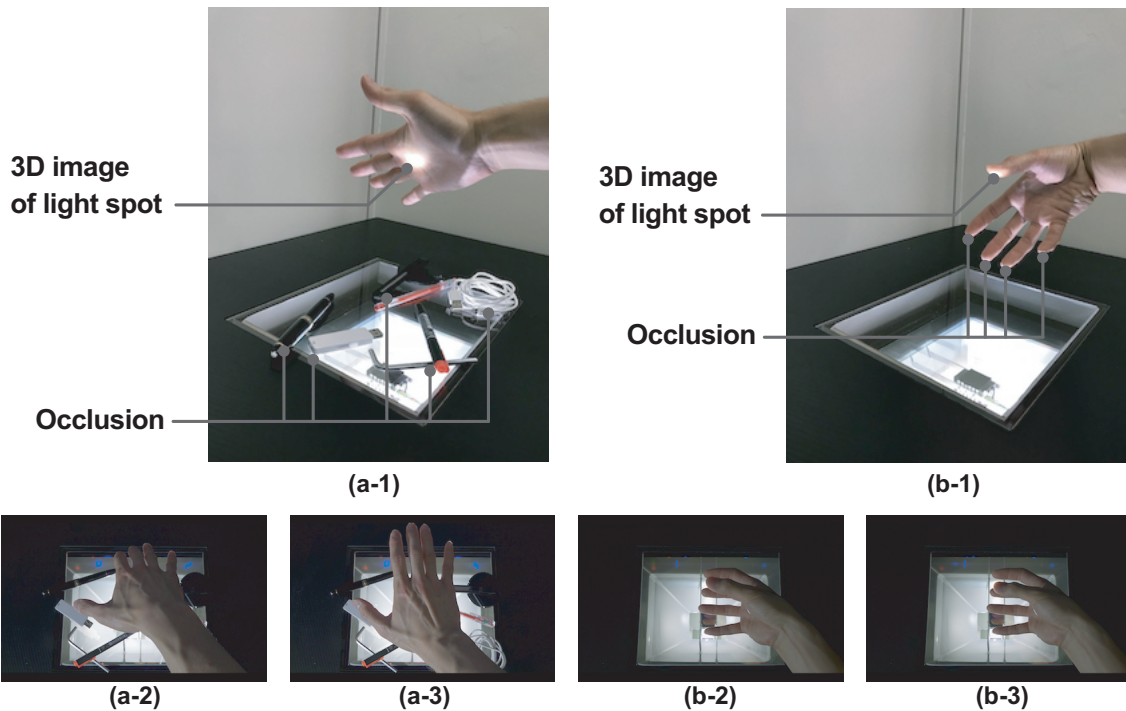


図 3.29. 異なる環境における手による入力操作の様子。計測対象である手に対して、机の上が散らかっていても (a), すぐ近くに別の手があっても (b), 位置、姿勢が取得できている様子。

が考えられる。

シミュレーションでは再現できていなかった光線の存在を考慮する必要がある。図 3.33(a) に示すように、シミュレーションでは理想的な光線のパスのみ再現している。例えば、投影系でシミュレーションしている光路は、“光源 → ミラーで反射 → ビームスプリッタへ入射して反射 → 再帰性反射材 → ビームスプリッタへ入射して透過 → 計測対象”である。しかし、現実にはこの光路以外にも、“光源 → ミラーで反射 → ビームスプリッタへ入射して反射 → 再帰性反射材 → ビームスプリッタへ入射して反射 → ミラーで反射 → 光源 → ミラーで反射 → ビームスプリッタへ入射して反射 → 再帰性反射材 → ビームスプリッタへ入射して透過 → 計測対象”という経路が存在する。また、この他にも再帰性反射シートでの再帰性反射には図 3.16(d) に示すように広がりがあり、これによって blur が生じる。シミュレーションでは、投影系と撮像系それぞれで 1 回の再帰性反射をシミュレートしていた。しかし実際には、光源から出た光が再び光源に戻り、再び再帰性反射を経て対象に入射する経路がありえる。このような複数回の再帰性反射と blur によって、迷光が発生すると考えられる。この他にも、シミュレーションしていない光路がある。再帰性反射材に入射した後の光路には、再帰性反射する光路以外にも、実際には鏡面反射や拡散反射の成分がある。このような光線も迷光の原因となる迷光が発生すると、拡散体スクリーン全体が明るくなる。図 3.24(b) や図 3.26(b) に示す結果を見ても、拡散体スクリーン上の光点以外の部分も明るくなっていることがわかる。

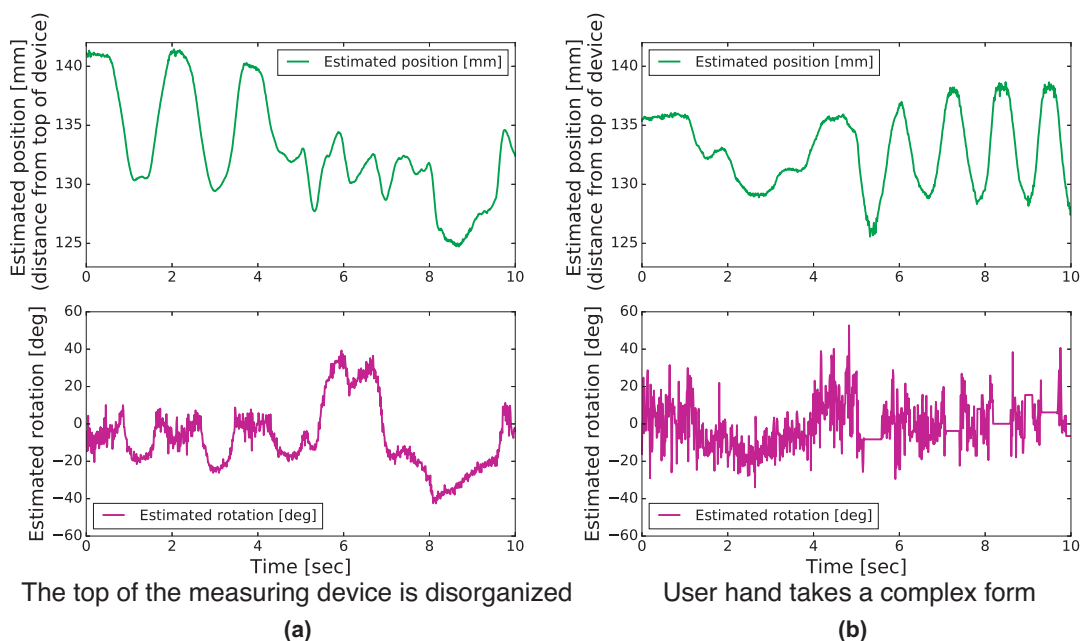


図 3.30. 図 3.29 で示した状況での位置姿勢計測結果の時系列変化. (a) 前半の 5 秒間に手のひらを 3 回上下させた. 後半の 5 秒間に, まず手のひらを奥側に傾け, 次に手前側に傾けた (b) 前半の 5 秒間に親指を段階的に上下させた後半の 5 秒間に親指を五回上下させた

シミュレーションで, 迷光として拡散体スクリーン全体に一樣に光が入射した場合の結果を図 3.33(b) に示す. 実験結果において, 光点の最も明るい部分の画素値は 255 であり, 拡散体スクリーン上の光点以外の部分の画素値はおおよそ 50 であった. シミュレーション結果において, 光点の最も明るい部分の光線本数はおおよそ 70000 であり, 拡散体スクリーン上の光点以外の部分の光線本数は 0 であった. シミュレーション結果で迷光を再現するためには全体の光線本数を $17000 (= x \lfloor 255 : 50 = 70000 + x : x)$ 底上げすれば良いことがわかる. 図 3.26(a) に示したシミュレーション結果の, 拡散体スクリーン上の各地点に 17000 本の光線を一樣に入射させることで迷光をシミュレートした. 迷光を考慮することで, 実験結果とシミュレーション結果の差が小さくなっていることがわかる. このような理由から光点傾きにおけるシミュレーション結果と実験結果に差が生じたと考えられる.

3.6.2 センシングの限界

図 3.20 で示したシミュレーションにおける位置計測結果では, 用意したどの条件でも安定した計測が行えると判断できた. しかし, 図 3.25 で示した実験結果において, 遮蔽率が 80% 以上になる条件では計測を行えなかった. これはカメラの撮像感度の限界を考慮していなかったためだと考えられる. シミュレーションでは, 拡散体スクリーンに入射した光線はすべてカメラに観測されるものとして扱っている. しかし実物のカメラでは感度限界より弱い光を観測することはできない. 計測装置に対して計測対象表面の角度が垂直に近づく場合には, 光量が

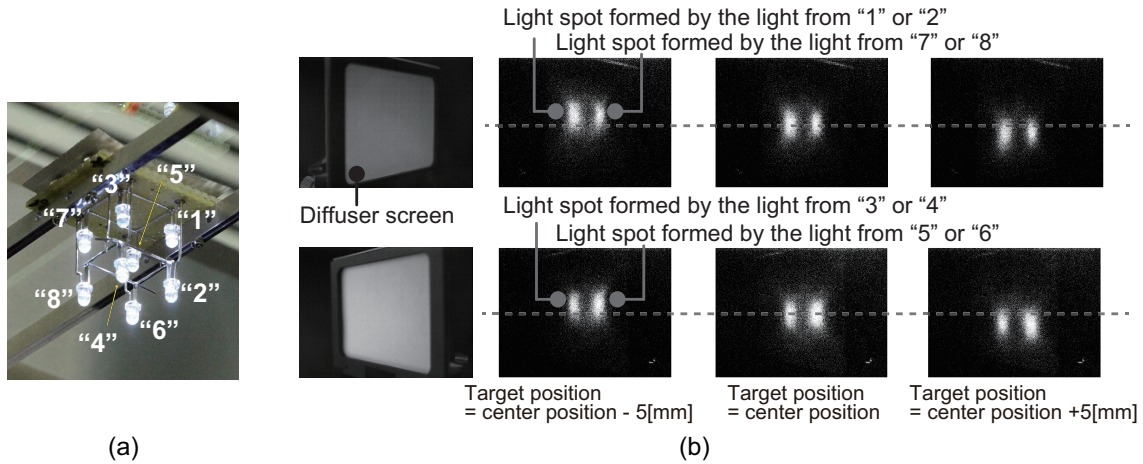


図 3.31. 立体走査による計測でも光点位置が対象の位置に応じて変化する (a): 立方体構造の光源. 光源には 1 から 8 の番号をつけた. (b): 計測対象の各位置における, 拡散体スクリーン上の交点の撮像結果番号はどの光源から来た光かを表している.

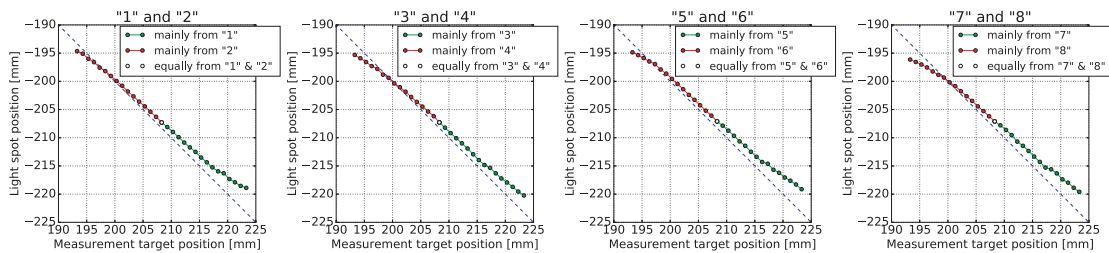


図 3.32. 立体走査の結果. 計測対象の位置に応じた光点の位置変化の結果. グラフに用いた数字は, 図 3.31(a) に用いた光源のどれから来た光による光点かを表している. プロットに用いた色は, 光点がそれぞれの光源からの光で形成されたかをあわせている

減少するため, 奥行き計測及び姿勢計測の両方で計測不能となる. また, 姿勢計測には計測対象表面上での拡散反射成分を用いていることから, 鏡面反射成分のみの表面テクスチャを持つ物体では計測を行えない.

3.7 本章のまとめ

本章では, 3 次元像とのインタラクションのための方式を提案した. 3 次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を 3 次元センシングに用いながら, 位置及び姿勢計測が可能かつ遮蔽への頑健性を備えた方式を提案した. この方式によって位置合せ問題と遮蔽問題の 2 つの問題が解消された. 我々は, まず提案方式のシミュレーションを行い, システム構成の最適化を行ったその後実験によって提案方式の有用性を示した. また, 提案システムでの奥行き計測・姿勢計測における遮蔽物の限界を定量的に評価した. 実際に, 提案方式によって 3 次元像とのインタラクションが可能であることを示した.

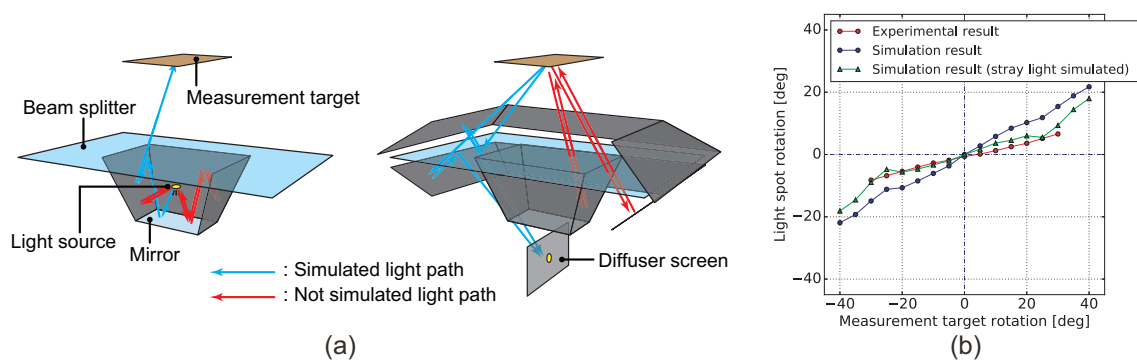


図 3.33. シミュレーションと実験結果の差異に対する迷光の影響. (a): シミュレーションにおいて, 考慮されている光路と考慮されていない光路. (b): シミュレーションにおいて, 迷光を考慮した光点の姿勢計測結果.

第 4 章

曲面合せ鏡を用いた省スペースかつ 広視野角な 3 次元像形成

近年では AR/VR 技術の発達とともに 3 次元像形成の進化は目覚ましい。ユーザの体験向上のため、3 次元像自体の品質向上とともに必要なデバイスの小型化が進んできている。本章では、投影式インテグラルフォトグラフィにおいて、省スペースなシステムで大きな視野角を実現するシステムを提案する。従来の方式では、レンズアレイ後方に複数台のプロジェクタを放射状に配置する必要があった。この結果、システムは大きなスペースを必要とした。そこで我々は、曲面鏡の合せ鏡を応用する。レンズアレイの真後ろにプロジェクタを設置し、プロジェクタからの光線を取り囲むように曲面鏡を設置する。合せ鏡の間で、複数回の反射を経てレンズアレイに向かう光の入射角は大きくなる。これによって全体の入射角のバリエーションは大きくなり、視野角は大きくなる。また、レンズアレイに対して斜めの位置にプロジェクタは設置する必要がなくなる。これによって省スペースな系を得る。提案方式によって、レンズアレイの後方に 1 台のプロジェクタを設置したシステムで、我々は $\pm 60^\circ$ の視野角を実現する。なお、本章の内容は OSA Journal “Optics Express” に採録された内容 [51] である。これはすでに [52] にて報告した平面鏡を用いたシステムに対して、曲面鏡を用いたシステムへとアップデートしたものであり、システムの最適化やそれに伴う視野角性能の向上などを報告したものである。

4.1 はじめに

インテグラルフォトグラフィは、3 次元像形成方式として用いられることも多い [53, 54, 55, 56, 57, 58, 59]。この方式では、光線の位置、方向、強度、波長を制御して、空間上に物体があるのと同等の光線を作り出す。3 次元像形成方式としてのインテグラルフォトグラフィには、2 つの方式がある。それらは、パネル式 [53, 54] と投影式 [55, 56, 57, 58, 59] だ。いずれもレンズアレイの後方から光を入射させる。パネル式では光源に 2 次元パネルディスプレイ、投影式ではプロジェクタを用いる。特に、投影式の中には、3 次元像の解像度がレンズアレイのピッチに依存しない方式がある [58]。他の多くの投影式の方式では、解像度の向上にはレンズ

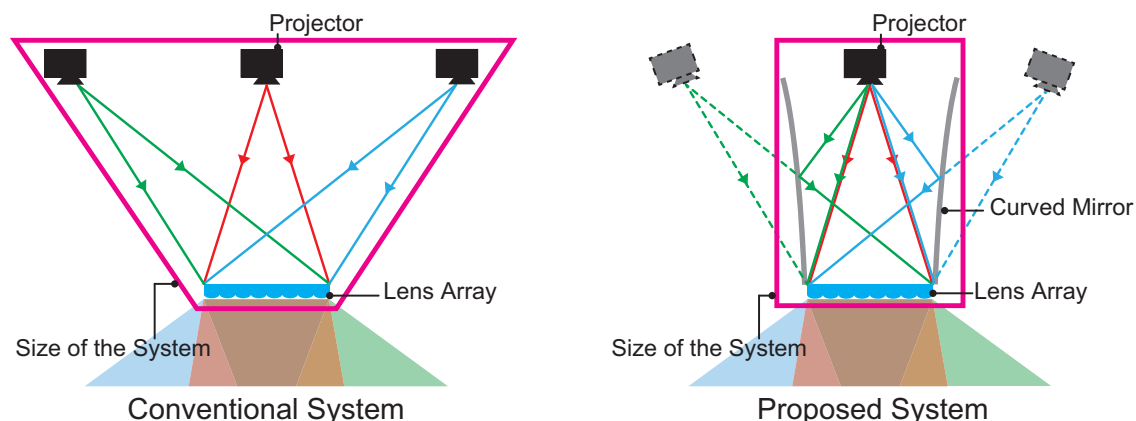


図4.1. 従来法と提案方式の比較.

アレイの高ピッチ化が必須であったため、この方式が注目されている。投影式インテグラルフォトグラフィでは、視野角を拡げようとするシステム用のスペースが大きくなってしまっていた。なぜなら、視野角を拡げるためにはレンズアレイに入射させる光線の入射角を大きくする必要があるからだ。図4.1左に示すように、レンズアレイ後方に複数台のプロジェクタを放射状に設置する必要があった。そこで、本稿では、投影式インテグラルフォトグラフィにおける、広い視野角とシステムの省スペース化の両立を目的とする。

我々は合せ鏡を用いてシステムを省スペース化する方式を提案する。図4.1右は、提案方式を用いて、レンズアレイの真後ろにのみプロジェクタを設置した省スペースな構成となっている。この場合でも、合せ鏡内部での複数回の反射によって、レンズアレイへ向かう光線の入射角を大きくできる。結果として、視野角を大きくするための必要条件を満たすことができる。すでに筆者は、平面鏡による合せ鏡を用いた方式を提案し報告済である[52]。ただし、平面鏡を用いた点、シミュレーションを用いたシステム最適化は行っていなかった点、この2点からこの報告時点では視野角は狭かった。本章では、曲面鏡を用いた合せ鏡による方式を新たに提案する。平面鏡を用いた場合よりも、曲面鏡を用いた場合のほうが、より入射角の最大値を大きくすることができ、視野角を大きくすることができる。これによって、広い視野角とシステムの省スペース化の両立が達成できる。ただし、システム設計の際には決定すべきパラメータがいくつか存在する。これらのパラメータ間にはトレードオフがあり、これによって視野角が変動する。本稿では、視野角をベースとした評価値を新たに設定した。この評価値とベイズ最適化を用いて、最適パラメータの探索を行った。最適化の結果に基づいたシステムを用いて、 $\pm 60\text{ deg}$ の視野角を省スペースなシステムで実現した。

4.2 関連研究

4.2.1 インテグラルフォトグラフィ

インテグラルフォトグラフィを本章では3つの方式に分類する。1つ目の方式はレンズアレイの後方に平面ディスプレイを設置する方式である [53, 54]。この方式では、レンズアレイのすぐ後ろに平面のディスプレイパネルが配置される構成だ。この方式を本章ではパネル式と呼ぶ。それ以外の方式では、レンズアレイの後方からプロジェクタを投影する。2つ目の方式は、レンズアレイとプロジェクタとの間にレンズアレイの近くに拡散板を置く方式 [55, 56, 57, 59] だ。この方式を本章ではディフューザ式と呼ぶ。3つ目の方式は、レンズアレイにプロジェクタの光を直接入射させる方式がある [58]。この方式を本章では投影式、あるいは投影式インテグラルフォトグラフィと呼ぶ。

形成できる光線数という観点では、パネル式は光線数はディスプレイの解像度に依存する。これに対して、ディフューザ式と投影式はプロジェクタ台数を増やすことで光線数を拡張可能である。3次元像の解像度という観点では、パネル式とディフューザ式はレンズアレイのレンズピッチに依存する。これらは、図 4.2 左に示すように、一つのレンズから、同じ方向には1種の光しか出射できないからだ。一方で、投影式はレンズピッチに依存しない。図 4.2 右に示すように、1つのレンズに複数の方向から光を到来させている。これによって、1つのレンズから、同じ方向に別々の光を出射できる。別々の光というのは、個別に点灯と色を制御できることを意味している。このように、この投影式の方式は、その他の方式に対して、光線数と解像度の観点からアドバンテージを持つが、1つ問題を持つ。それはシステムが必要とするスペースだ。パネル式では、レンズアレイの後方には平面のディスプレイのみがある、このためシステムは省スペースな構成となる。一方、パネル式と同様の視野角を実現するためには、直接投影式の方式では後方に大きなスペースが必要となってしまう。直接投影式では、図 4.3 に示すように、レンズアレイに対して入射角が大きいと、出射角が大きくなる。これらの理由から、視野角の range を向上させるためには、レンズアレイに入射させる入射角の range を向上させる必要がある。このため、直接投影式では後方に複数台プロジェクタを放射状に設置する必要がある、このためのスペースが必要となってしまう。本稿で提案する方式は、大きな視野角と省スペースな系を同時に達成するものである。

4.2.2 視野角

本方式と同様に、広い視野角の達成を目指した研究が存在する [60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67]。この中でも特に視野角 $\pm 60^\circ$ を達成している研究がある [64, 65, 66, 67]。この性能を本稿では視野角の基準及び目標とする。ある研究では、パネル式で用いるレンズアレイに複数のレンズを組み合わせた [64, 65] ものがある。1つのレンズ単位を3枚のレンズを用いて構成することで広い視野角を達成している。レンズを複雑化するアプローチは本研究にも導入できる。しかし、レンズピッチの向上が通常のレンズアレイよりも大幅に困難である。このため、レンズ

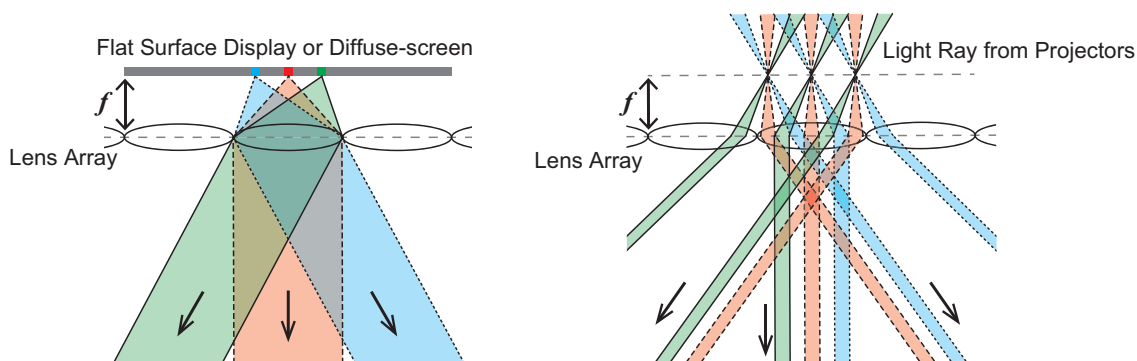


図 4.2. 光源の異なるインテグラルフォトグラフィ. 左: パネル式とディフューザ式, 右: 投影式. なお, これは第2章の図 2.5 の再掲である.

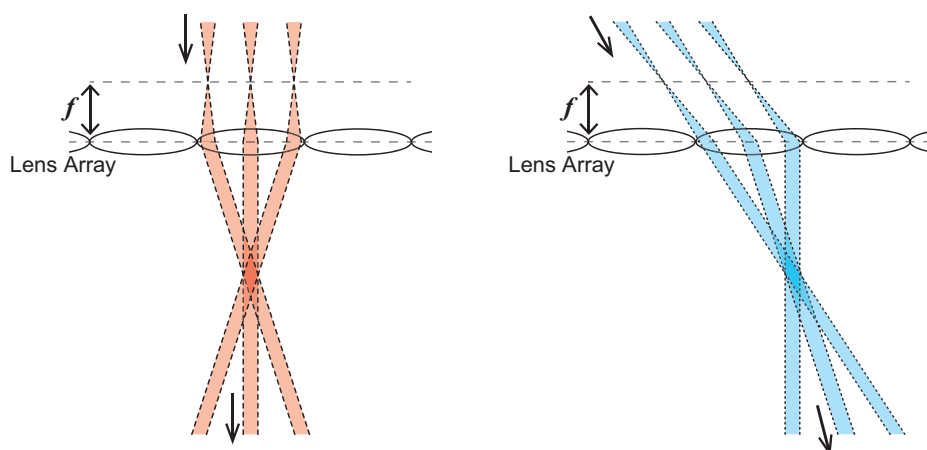


図 4.3. 入射角と出射角の関係. 入射角が大きくなれば, 出射角も大きくなる.

アレイには通常のレンズを用い, 曲面鏡を用いるアプローチを我々は採用した. またある研究では, 光源の特別構造と時間分割を用いたアプローチを採用した [66]. このアプローチは本研究への導入は難しい. また, このアプローチは将来的により高解像度で高リフレッシュレートなシステムが求められた場合に制約がある. 投影式では, これらの制約を受けないため, 我々はこれを採用した. ある研究では, negative index lens が用いられた [67]. この研究では, 負の屈折率の平板レンズアレイを用いた IP を理論的に検証している. ただし, negative index media は現在の技術では周波数帯域の制限などがあるため, この論文で検証されたレンズの製作は遠い未来の技術である (the negative index lens is a technology for use in the distant future(原論文より)). このため実機を用いた検証実験は未だ行われていない.

4.2.3 複数鏡面の利用

目的は異なるが, 提案方式と同様に複数の鏡を用いた方式がある. 1つ目は, 合せ鏡を用いて表面反射特性の計測を行う方式がある [68]. この方式では, 鏡を組み合わせて三角柱を作り,

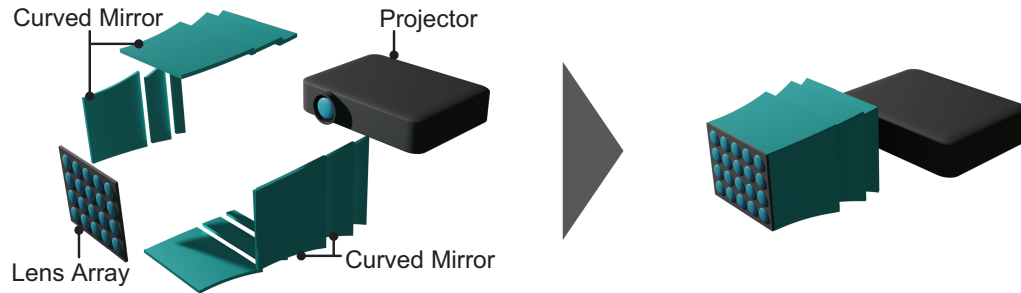


図 4.4. システム全景.

その中に入れた計測対象を上から光源とカメラを用いて観察する。照明の鏡像が複数形成され、様々な方向から計測対象に光線が入射する。また、鏡によって計測対象の鏡像が複数形成され、様々な方向からカメラで計測対象を撮影することができる。この方式によって、省スペースな系で、計測対象に様々な方向から光を当て、様々な方向から撮影を行うことを実現している。2つ目は、3次元像の形成に合せ鏡を用いた方式がある [69]。この方式によって、もともと狭い範囲でしか観察できなかった3次元像を広い範囲から観察可能にしている。この方式と本研究とは、3次元像や広い観察可能範囲という観点で共通点がある。しかし、3次元像の形成方式が異なっている。この方式では、3次元像を形成するためには光源に実物体を設置する必要があるが、本研究で採用するインテグラルフォトグラフィではその必要がない。加えて、提案方式で用いる曲面鏡はこの方式では用いることができない点と、この方式では省スペース化の恩恵がない点といった違いがある。3つ目は、複数枚設置した鏡に向かって投影することで、プロジェクタ1台でインテグラルフォトグラフィを実現した方式がある [70]。この方式では、鏡は曲面にタイル状に設置されている。鏡の配置によってプロジェクタを密集して設置するのと同じ効果を得ている。これによって、3次元像の光線密度が上がる。このように、この方式では鏡の反射を光線密度向上に利用している。この方式では、視野角の向上や省スペース化が目的ではない。

4.3 曲面合せ鏡を用いた省スペースかつ広視野角な 3 次元像形成

図 4.4 に提案するシステムを示す。図に示すように、レンズアレイの真後ろにプロジェクタを設置した。また、プロジェクタからの光線を取り囲むように曲面鏡を設置した。

4.3.1 合せ鏡

合せ鏡を用い、その反射を利用することで省スペースな構成とすることができる。加えて、曲面鏡を用いることで、平面鏡の場合と比較して視野角を大きくすることができる。図 4.5 に平面鏡と曲面鏡との比較を示した。3種の鏡での反射を図 4.5(a-c) に示し、鏡の形状比較を

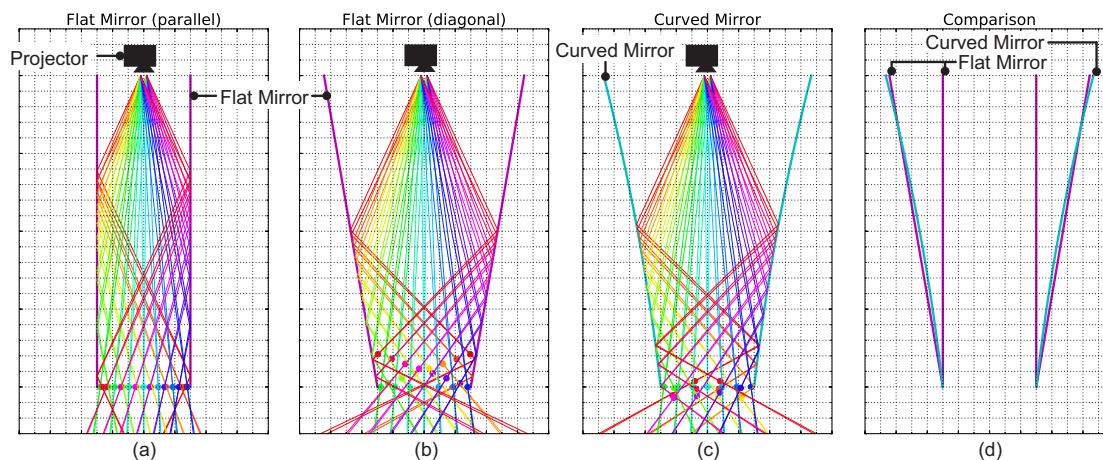


図 4.5. 平面鏡と曲面鏡での反射の比較. 各点はプロジェクタの焦点を示している. (a): 平面鏡が対面に平行に設置されたとき. (b): 平面鏡が対面に角度をつけて設置されたとき. (c): 曲面鏡が対面に設置されたとき. (d): 3つを重ねて比較.

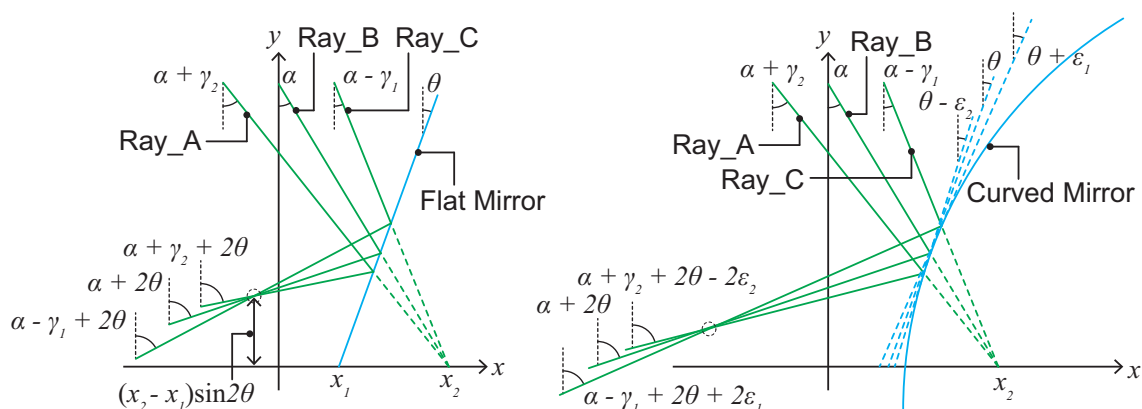


図 4.6. 平面鏡と曲面鏡での光の反射. 左: 平面鏡での光の反射. 右: 曲面鏡での光の反射.

図 4.5(d) に示した. 図 4.5(a) に示すように, 平面鏡を平行に設置した場合, レンズアレイに向かう光線の入射角はプロジェクタの画角以上に大きくできない. 一方, 図 4.5(b) に示すように, 平面鏡同士を斜めに設置し, 合せ鏡を作成した場合, 入射角は大きくできる. 図 4.5(c) に示すように, 曲面鏡の場合も, プロジェクタの画角以上の入射角を得ることができる.

入射角とともに, 焦点群も重要である. プロジェクタの焦点はレンズアレイの焦点面と重なることが望ましい. これによって, レンズアレイからの各出射光の光束が平行となる. 出射光の光束の拡がりが大きいと, クロストークなど不具合の原因となってしまう. 図 4.5(a) に示すように, 平面鏡を平行に設置した場合, プロジェクタの焦点は平面上に並ぶので, プロジェクタとレンズアレイの焦点面を一致させることができる. 一方, 図 4.5(b) に示すように, 平面鏡同士を斜めに設置し, 合せ鏡を作成した場合, プロジェクタの焦点は平面上に並ばないので, プロジェクタの焦点とレンズアレイの焦点面が大きく乖離する. このため, 出射光の光束

が平行にならず、拡がってしまう。注目すべきは、図 4.5(c) に示すように、曲面鏡の場合プロジェクタの焦点は 1 つの平面上に並ばないものの、近似平面を設定するとその近くに集まっていることが分かる。このため、プロジェクタの焦点とレンズアレイの焦点面を近づける事ができる。

図 4.6 の左に平面鏡の反射の詳細を示す。Ray_A, Ray_B, Ray_C はすべて同じピクセルを構成する光線を表している。鏡がなければ 3 つの光線は $x = x_2$ の焦点に集まる。平面鏡の設置角が θ であれば、反射光線の x 軸への入射角は 2θ が加算される。焦点は、 x 軸から $(x_2 - x_1)\sin 2\theta$ 離れる。以上から、平面鏡を用いた場合、 θ を大きくして入射角を大きくするほど焦点は x 軸から離れてしまう。図 4.6 の右に曲面鏡の反射の詳細を示す。平面鏡の場合と同様に、反射光線 Ray_B の入射角に 2θ が加算される設計にしたものである。つまり、Ray_B は図 4.6 の左右で同じ光路をたどっている。このとき、Ray_A, Ray_C は設置角がそれぞれ $\theta - \epsilon_2$, $\theta + \epsilon_1$ の平面鏡に反射する状況と同一である。これによって、Ray_A の入射角は $2\epsilon_2$ 分だけ、平面鏡での反射の場合に比べて小さくなり、Ray_C の入射角は $2\epsilon_1$ 分だけ、平面鏡での反射の場合に比べて大きくなる。曲面鏡の場合の焦点と x 軸の距離は、解析的に出すのが難しい。しかし、Ray_A と Ray_C の入射角度の変化からわかるように、曲面鏡の場合の焦点と x 軸の距離は平面鏡の場合よりも近くできる。以上から、曲面鏡の場合は、平面鏡の場合よりも焦点を x 軸に近づけることができる。以上の入射角と焦点群に関する理由から、我々は曲面鏡の合せ鏡を採用した。

4.3.2 システム設計

システムの作成のため、最適化を用いて設計パラメータを決定する。本稿で探索対象とする設計パラメータは、プロジェクタのオフセット (I), ミラーの曲率半径 (II), シフト量 (III), ミラーの段差高さ (IV) とした。これらは図 4.7 に示した。プロジェクタの基本位置は、レンズアレイの焦点面からプロジェクタの焦点距離だけ離れた位置とした。プロジェクタのオフセット (I) は、この基本位置からどれだけ離れるかを表す。我々は曲面鏡に円柱曲面を採用した。ミラーの曲率半径 (II) とはこの円柱の半径のことである。図 4.7 右に示すように、シフト量 (III) によってこの円柱曲面のどの部分を切り出すかを決定する。言い換えれば、曲面鏡の設置角度をシフト量 (III) によって決定している。ミラーの段差高さ (IV) が大きい場合にはミラーはただの曲面鏡となる。ミラーの段差高さ (IV) が小さい場合には図 4.7 右に示すように、一定の厚みごとに曲面を分割したミラーを作成する。これによって、フレネルレンズのように厚みを抑える効果が期待できると考えた。なお、ミラーの曲率半径 (II) とシフト量 (III) は左右用と上下用にそれぞれ 2 つのパラメータを設定する。

これら 4 つの設計パラメータは大きすぎても小さすぎても理想のシステムを作成できないので、最適値の探索が必要となる。曲率半径 (II) が大きすぎたり、シフト量 (III) が小さすぎたりする場合には、鏡面はプロジェクタの光軸方向と平行に近づくため、入射角を大きくすることができない。逆に、曲率半径 (II) が小さすぎたり、シフト量 (III) が大きすぎたりする場合には、鏡面とプロジェクタの光軸方向との角度が大きくなるため、プロジェクタの光がレン

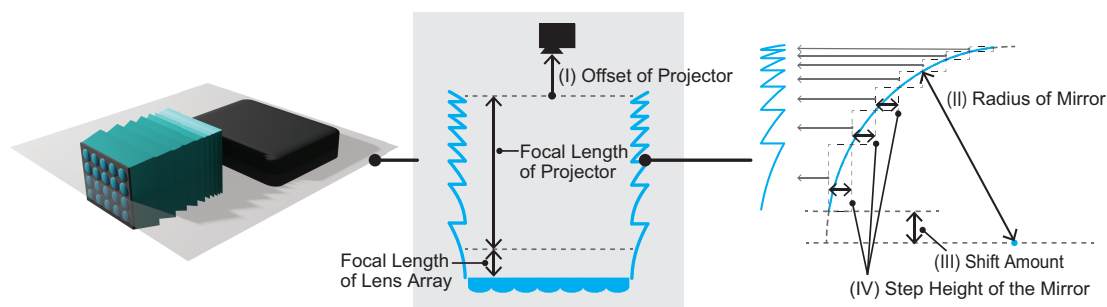


図 4.7. システムの設計パラメータ.

ズアレイに入射しなくなる。先述のとおり，図 4.5(c) に示すように曲面鏡を用いた場合プロジェクタの焦点をレンズアレイの焦点面と完全に一致させることができない。このため，プロジェクタのオフセット (I) を動かすことが有効な場合がある。また，ミラーの段差高さ (IV) を細かく設定するとシステムの大きさがより小さくなる。一方，段差の頂点に衝突した光線は焦点面上で結像しない。このため，あまりに細かい段差を設けると，レンズアレイ焦点面付近で結像する光線数が減る。以上に説明したトレードオフから，設計パラメータの最適値の探索が必要だ。

4.3.3 パラメータ探索

最適な設計パラメータの探索のため，視野角をベースとした評価値を新たに設定した。どれだけ多くの視点位置に光が届くかを用いて評価を行う。設計パラメータごとの評価値は，Algorithm 1 に示す処理を用いて算出した。この評価値を最大化する最適化を行う。まず，図 4.8 上に示す 35 の視点位置を作成する。図 4.8 上において X 軸は，紙面と垂直手前の向きに取る。 X 軸 Y 軸と平行にレンズアレイを設置し，視点位置はすべて YZ 平面上に設置した。レンズアレイ正面を $\pm 0 \text{ deg}$ の視点位置とし，ここから水平移動させ，レンズアレイの法線からの角度を以て $\pm 5 \text{ deg}, \pm 10 \text{ deg}, \dots, \pm 85 \text{ deg}$ の視点位置を作る。これらの視点位置はすべてレンズアレイ中心から同じ距離にある。これらの視点位置において，レンズアレイにあるすべてのレンズから光線が届くのであればその視点位置は有効，そうでなければ無効とする。なお，レンズアレイの個数，及びレンズアレイから視点位置の距離は，次節でのシミュレーション中の値 (15 個, 350 mm) を Algorithm 1 及び図 4.8 に記載している。 $\pm 0 \text{ deg}$ の視点位置から有効な視点位置が何個連続するかを数えることで評価値を決定する。更に，初めて無効になった視点位置とその 2 つ先の視点位置までの 3 つの視点位置において，光線が届いているレンズの数が多ければ多いほど評価値が大きくなるよう設定した。このように評価値ができる限り連続値に近くなるようにした。この理由は，離散値よりも連続値のほうが最適解の探索に向いているためである。

本論文の目標は $\pm 60 \text{ deg}$ の視野角であるが，より広い視野角を目指して， $\pm 85 \text{ deg}$ までの視点位置を設置した。 $\pm 90 \text{ deg}$ 以上の視点位置にはシステムの構造的に光が届かないと判断し

Algorithm 1 Calculating the evaluation value.

Require: design parameters**Ensure:** evaluation value

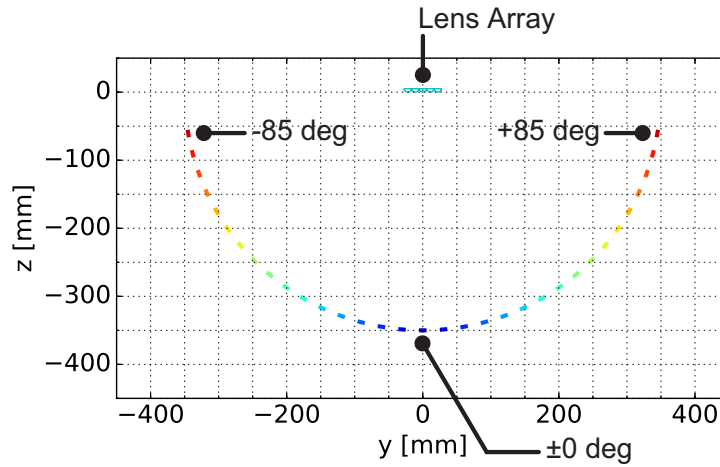
```

1:  $LensNumAll = 15$  (in this paper, we use 15 lenses)
2:  $ViewPointList = [\text{viewpoint of } \pm 0 \text{ deg, viewpoint of } +5 \text{ deg, ... , viewpoint of } +80 \text{ deg,}$ 
    $\text{viewpoint of } +85 \text{ deg}]$ 
3:  $EvaluationVal = 0$ 
4: for  $i$  in  $\text{range}(\text{len}(ViewPointList))$  do
5:    $ViewPointTmp = ViewPointList[i]$ 
6:    $LensNumTmp = \text{number of lenses from which rays incident on } ViewPointTmp$ 
7:   if  $(LensNumTmp == LensNumAll)$  then
8:      $EvaluationVal += 1$ 
9:   else
10:     $EvaluationVal += LensNumTmp / LensNumAll$ 
11:     $ViewPointTmp = ViewPointList[i + 1]$ 
12:     $LensNumTmp = \text{number of lenses from which rays incident on } ViewPointTmp$ 
13:     $EvaluationVal += LensNumTmp / LensNumAll^2$ 
14:     $ViewPointTmp = ViewPointList[i + 2]$ 
15:     $LensNumTmp = \text{number of lenses from which rays incident on } ViewPointTmp$ 
16:     $EvaluationVal += LensNumTmp / LensNumAll^3$ 
17:    break
18:   end if
19: end for

```

て、この視点位置は設置していない。我々のシステムではレンズアレイと平行な方向に光を出すことは難しいためである。±60 deg よりも広い視野角を求めたことが原因で、得られる解の安定性が低くなる可能性もある。解の安定性が低いというのは、例えば、あるレンズからある視点位置に届く光線本数が極めて少なくなるというような場合である。しかし、本研究ではより広い視野角が得られることを重視した。

提案したシステムでは、曲面鏡を用いているため、球面収差が発生する。また、4.3.1 節で先述の通り、プロジェクタの焦点とレンズアレイの焦点は完全に一致しない。これらが原因となって、プロジェクタの 1 ピクセルを構成する光線の光束はレンズアレイから出射された後は僅かな広がりが生じる。広がりが大きいとクロストークなど不具合の原因となる。しかし、Algorithm 1 ではこの広がりを評価していないので、このままではこれらの問題が生じる。そこで、本手法では広がりが大きい光線を除外した。除外というのはプロジェクタの当該ピクセルを光らせないことで、光線を生成させないことを意味する。このため、視点位置で瞳孔間距離の平均 [71] の半分である 32 mm 以上に光束が広がる場合にはその光線を除外した。こうすることによって、球面収差や焦点ズレがある場合でも問題が発生しないようにしている。



Viewpoint	Number of lenses whose rays reach the viewpoint	Contribution to the evaluation value
±0 deg	15	$+15/15 = +1$
+5 deg	15	$+15/15 = +1$
+10 deg	10	$+10/15 = +0.667$
+15 deg	7	$+7/(15)^2 = +0.031$
+20 deg	6	$+6/(15)^3 = +0.002$
+25 deg	3	$+0$

図 4.8. 設定した視点位置と評価値計算の例. 上: 評価に用いる 35 の視点位置. 下: 評価値計算の例. 評価値は 2.700 となる.

図 4.8 下に評価値の計算例を示す. この例では, ± 0 deg と $+5$ deg の視点位置までは有効となっている. それ以降 3 つ先の視点位置においては, 光線が届くレンズ数に応じて評価値に加算を行う. この例で, 評価値は 2.700 となる.

この最適化計算では, 局所最適解にトラップされてしまうことが多い. また, 条件によって光束の広がりが大きくなる場合は光線の除外を行うため, 微分不可能な点が多数存在している. さらに, 探索範囲は広大でありグリッドサーチは有効ではない. 以上の理由から最適化探索にはベイズ最適化を用いた [72, 73].

4.4 評価実験

最初に, 設計パラメータの最適化をシミュレーション上で行った. これで得た設計パラメータを用いて, 実システムを構築した. 次に, 組付け誤差を推定するためのキャリブレーションを実行した. 次に, シミュレーションで得た結果と同等の性能が実機でも得られるかを検証した. 最後に, 本システム上で 3 次元像を表示した.

4.4.1 最適化

この最適化では、先に述べた設計パラメータにおいて視野角を最大化するセットを見つけることを目的とする。

シミュレーションで用いる系の中で、プロジェクタとレンズアレイは先に決定した。レンズアレイやプロジェクタのパラメータも最適化探索の対象に加えることも可能である。しかし、これ以上パラメータを増やし、探索空間を大きくすると最適化探索が困難になることが予想されるため、探索対象から除外した。プロジェクタは、市販品の中で出来るだけ小型かつ高解像度であるものを探し、Qumi Q38 (body size: 186 × 116 × 35 mm, image size: 1920 × 1080 pixel) を採用した。焦点距離は最短の 200 mm にセットした。レンズアレイは出来るだけ 1 つのレンズにおいて numerical aperture (NA) が大きいものが望ましい。レンズアレイとして一般的な製品はフライアイレンズである。しかし、フライアイレンズは本来均一照明を用意するために用いられることが多く、この目的のため、NA が小さい製品がほとんどである。このため、レンズアレイは自作した。レンズには、Edmund Optics 社の製品の中で、NA が大きいものとして #69-852 (直径: 10 mm, 焦点距離: 7.5 mm) を採用した。レンズアレイには、このレンズを 1 mm 間隔で並べ、3 × 5 の合計 15 個を配置した。

光線追跡シミュレーションの実装には Python 3 を用い、ベイズ最適化の部分には GPy-Opt [74] を用いた。また、シミュレーションに用いる光線の波長は 589.3 nm (D-line of sodium) を用いた。探索範囲は、曲面鏡の曲率半径: 0 mm - 5000 mm, シフト量: 0 mm - 2500 mm, プロジェクタのオフセット: -20 mm - 20 mm, ミラーの段差高さ: 0 mm - 20 mm とした。このとき、シフト量が曲面鏡の曲率半径よりも大きくなると、システムを作成できない。このような設計上の制約条件を設定した上で最適化を実行した。以上の条件で 5000 回の試行を設定し、探索を実行した。しかし、この探索は 2406 回目で停止した。これは、次の探索位置が前の探索位置に十分近い場合に探索を停止する上記ソフトウェアの機能が働いたためであった。ここまでの結果ではまだ最適解ではないと考え、ここまでの結果で最良の値を出したセットの周辺、曲面鏡の曲率半径: 4500 mm - 5000 mm, シフト量: 0 mm - 250 mm, プロジェクタのオフセット: 4 mm - 8 mm, ミラーの段差高さ: 11.5 mm - 16.6 mm, で 2500 回の試行を行った。

このパラメータ探索の結果を表 4.1 に示す。これらのパラメータを用いて、評価値 13.467 を得た。これによって、シミュレーション上では ±60 deg の視野角を実現した。一方、平面ミラーを平行に設置した場合の評価値は 10.988 であり、このときに実現する視野角は ±45 deg であった。平面ミラーと比較して、曲面鏡を用いることで視野角を 15 deg 拡大できた。ミラーの曲率半径は大きく、また段差は 14.28 mm と大きいため、フレネルミラーとはならなかった。当初の想定ではフレネルレンズのような形状のミラーが最適だと考えていたが、そのようにはならず、段差の無い曲面鏡が最適とする結果になった。

表 4.1. Results of the parameter search.

Parameter	Value
Radius of the left and right mirrors	4567.89 mm
Radius of the upper and lower mirrors	4532.72 mm
Shift of the left and right mirrors	239.12 mm
Shift of the upper and lower mirrors	9.04 mm
Offset of the projector	4.21 mm
Step height of the mirrors	14.28 mm

4.4.2 実験系

シミュレーションの結果に基づいて、曲面鏡を作成した。レンズアレイとプロジェクタ、曲面鏡を組み合わせ、シミュレーションで得た最適な設計パラメータで実システムを組み立てた。実験に使用したシステムを図 4.9 に示す。実験装置の外枠はアルミフレームで作成している。ガイドレールがアルミフレームに固定されている。ガイドレールの上にベーススタンドが乗っている。ベーススタンドはガイドレール上をスライドして移動でき、固定もできる。ベーススタンドは回転と並進の自由度を持っており、レンズアレイ、曲面鏡、プロジェクタの位置と姿勢は調整可能だ。曲面鏡は、アルミ蒸着でミラーコートしたアクリル板を基材に貼り付けて作成した。基材は切り出したアクリル板を張り合せて作成した。基材の曲面はレーザーカッターで切り出した。組み立ての際には、最適な設計パラメータの通りに各パーツが配置されるように留意した。

4.4.3 キャリブレーション

組付け誤差、つまり組付けパラメータを推定するため、キャリブレーションを行った。キャリブレーションに用いるカメラは、XIMEA 製 xiQ MQ003MG-CM を用いた。まず、カメラを任意の位置に設置する。カメラの位置と姿勢を計測する。次に、プロジェクタ画像平面上の各ピクセルを順に光らせる。このとき、カメラで撮像を行い、画像上のレンズアレイに光点を生じるか否かを観察した。これによって、カメラ画像中での光点位置 L^c と対応するプロジェクタ画像平面上のピクセル位置 L^p との組を得た。

次に、組付けパラメータの推定を行う。4 枚の曲面鏡、1 台のプロジェクタそれぞれの回転並進 6 自由度、合計 30 自由度を組付けパラメータとした。推定のために用いる評価値は再投影誤差の合計を用いた。この評価値を最小化する最適化計算を行うことで組付けパラメータを

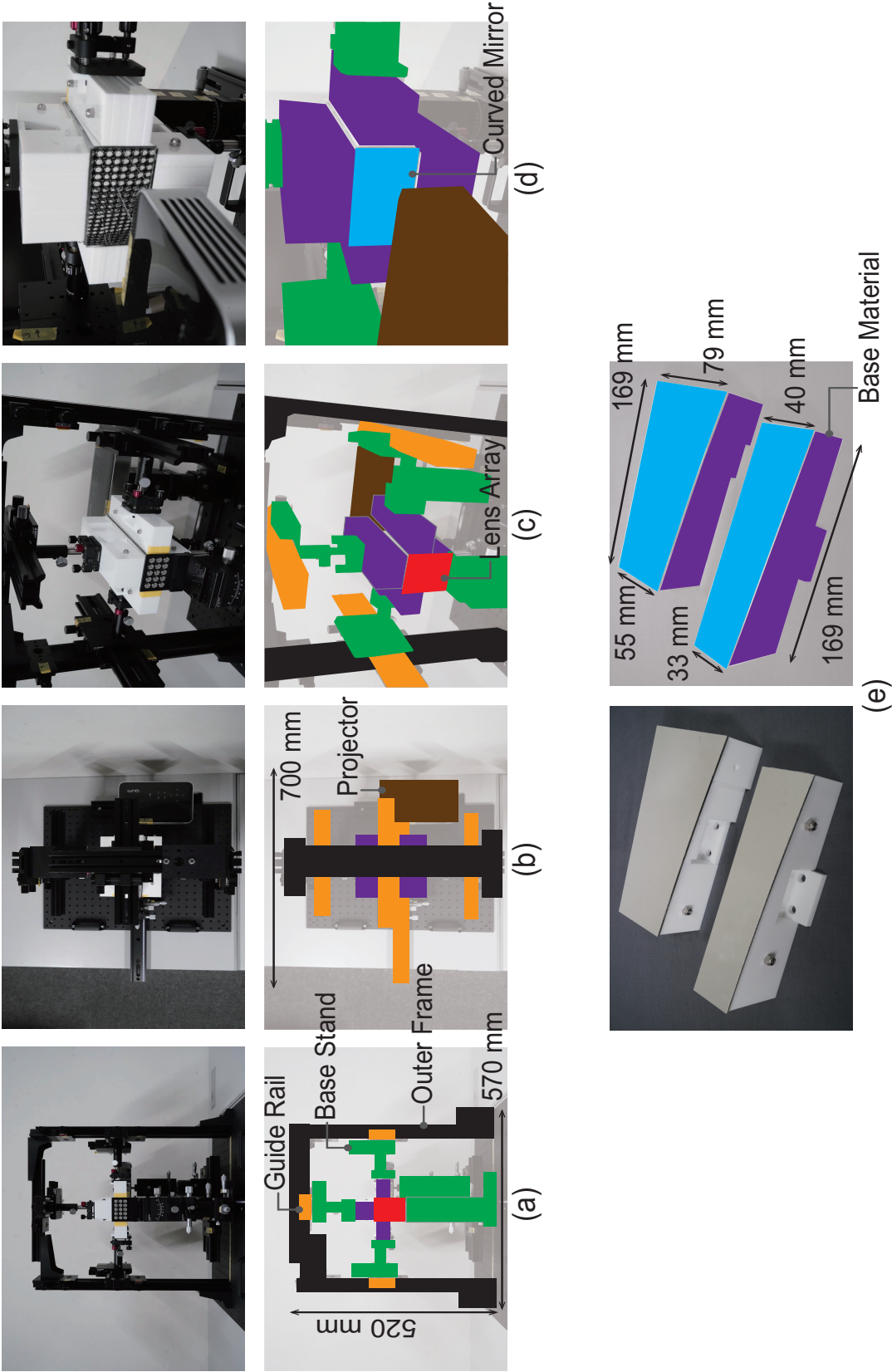


図 4.9. 実験系. (a): 正面から, (b): 上から, (c): 横から, (d): プロジェクタの方から見たレンズアレイと曲面鏡, (e): 曲面鏡と基材.

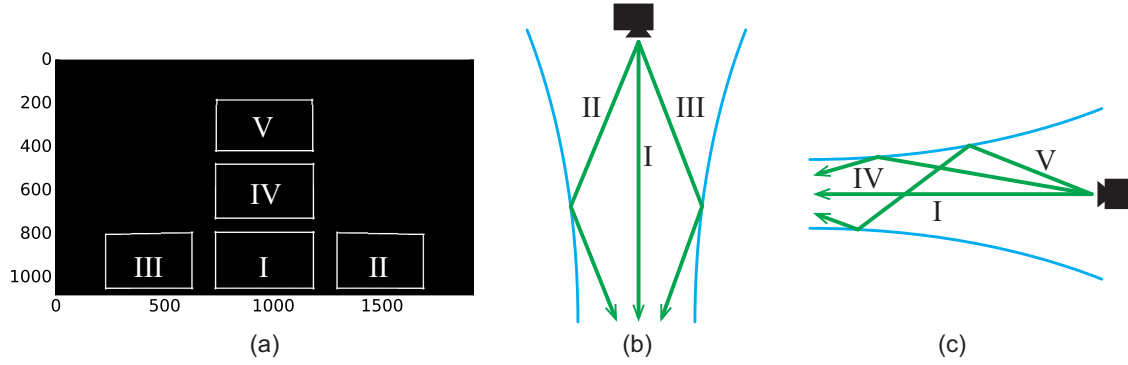


図 4.10. 投影画像中の画素位置における分類. 領域 I, II, III, IV, V 以外の領域の画素からの光線は, キャリブレーションには使用しない. 領域 II, III, IV の画素からの光線は, 1 回反射する. 領域 V の画素からの光線は, 上下のミラーでそれぞれ 1 回ずつ反射する. (a): 画素位置の分布. (b): 上から見た図. (c): 横から見た図.

推定する. ある組付けパラメータにおける評価値の計算方法を式 4.1 に示す.

$$\begin{aligned}
 error &= \sum_i \omega_i |L_i^c - L_i^c| \alpha_i + (1 - \omega_i) \beta, \\
 \omega_i &= \begin{cases} 1 & \text{observed by the camera,} \\ 0 & \text{not,} \end{cases} \\
 \alpha_i &= \begin{cases} 1 & SpreadTmp < SpreadTH, \\ SpreadTmp / SpreadTH & SpreadTmp \geq SpreadTH, \end{cases} \\
 \beta &= 10^{10}.
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

シミュレーション上で, L_i^c が光ったときカメラ画像平面上に生じる光点位置を L_i^c として, L_i^c と L_i^c の二乗誤差を再投影誤差に用いた. ただし, L^p 由来の光線の拡がり $SpreadTmp$ が 4.3.3 節で用いた閾値 $SpreadTH$ 以上の場合には, 重み ($= SpreadTmp / SpreadTH$) を誤差に乗算する. また, L^p 由来の光線がカメラに入射しない場合には, 再投影誤差として 10^{10} を計上した.

このとき, 30 個のパラメータは最適化計算を行うには数が多すぎる. そこで, パラメータを 5 つのグループに分けて最適化を行った. まず, プロジェクタ画像平面上において, 図 4.10(a-c) の I で示した領域内のピクセル由来の光は, どのミラーにも入射せず, レンズアレイに直接入射する. これらの光は, 曲面鏡の組付けパラメータの影響を受けない. したがって, この光だけを用いた最適化に寄与する組付けパラメータは, プロジェクタの 6 つのパラメータだけだ. これによって, 同時に推定するパラメータを 30 個ではなく 6 個に減らすことができ, 現実的な計算時間の中で最適化を実行できる. 同様に, 図 4.10(a, b) にて II で示した領域内のピクセル由来の光は, プロジェクタの 6 つのパラメータと左の曲面鏡の 6 つのパラメータのみが寄与する. 図 4.10(a, b) にて III で示した領域内のピクセル由来の光は, プロジェクタの 6 つのパラメータと右の曲面鏡の 6 つのパラメータのみが寄与する. 図 4.10(a, c) にて IV で示した領域内のピクセル由来の光は, プロジェクタの 6 つのパラメータと上の曲面

表 4.2. Results of the calibration.

Parameter	Value
Rotation of the projector (around X, Y, Z)	0.052 deg, 0.464 deg, 0.006 deg
Translation of the projector (X, Y, Z-axis direction)	1.000 mm, 0.000 mm, 2.750 mm
Rotation of the right mirror (around X, Y, Z)	0.498 deg, 1.503 deg, 0.031 deg
Translation of the right mirror (X, Y, Z-axis direction)	1.500 mm, -1.000 mm, -1.500 mm
Rotation of the left mirror (around X, Y, Z)	-0.229 deg, 0.000 deg, 0.250 deg
Translation of the left mirror (X, Y, Z-axis direction)	1.500 mm, 0.000 mm, 1.500 mm
Rotation of the upper mirror (around X, Y, Z)	-0.250 deg, 0.750 deg, 0.000 deg
Translation of the upper mirror (X, Y, Z-axis direction)	0.999 mm, -0.258 mm, -0.252 mm
Rotation of the lower mirror (around X, Y, Z)	1.503 deg, 0.273 deg, -0.527 deg
Translation of the lower mirror (X, Y, Z-axis direction)	0.250 mm, 0.000 mm, -1.500 mm

鏡の 6 つのパラメータのみが寄与する．図 4.10(a, c) にて V で示した領域内のピクセル由来の光は，プロジェクタの 6 つのパラメータと上下の曲面鏡の 12 のパラメータのみが寄与する．これらの制約を用いて，I, II, III, IV, V の順に最適化を行い，順にプロジェクタ，左のミラー，右のミラー，上のミラー，下のミラーの順にパラメータを推定した．

推定方法は，まず第一にグリッドサーチによって評価値が一定以下となるパラメータセットを発見しておく．第二に，発見したパラメータセットを初期値として，Levenberg–Marquardt (LM) 法 [75, 76] で局所最適解を得る．最後に，得られた局所最適解の中で，最小のものを最適解とした．以上の手順を以て，組付けパラメータの推定を完了した．推定した組付けパラメータを表 4.2 に示す．

4.4.4 評価実験

シミュレーションで行った視野角の評価と同様のものを，組付けパラメータを統合したシミュレーションで行った．Algorithm 1 による評価値計算の結果，視野角は ± 45 deg で評価値は 10.999 となった．シミュレーションで得ていた評価結果 ± 60 deg と比較して下がる結果となった．この理由は，わずかに組付けパラメータが理想から外れると， ± 60 deg 以下のいくつかの視点位置で光が到達しないレンズが存在してしまうためだ．実際には， ± 50 deg の視点位置で光線が到達するレンズは 14/15 個， ± 55 deg の視点位置で光線が到達するレンズは 14/15 個， ± 60 deg の視点位置で光線が到達するレンズは 10/15 個だった．このため， ± 50 deg から ± 60 deg の視点位置はわずかに有効とならずに評価値が下がる結果となってしまう．シミュレーションでは，一つの波長 (589.3 nm) のみを用いたが，実際のディスプレイとして用いる場合には複数の波長の光を同時に投影する．このとき，光線の波長が短ければ，光線はレンズでより大きく屈折するので ± 60 deg の視点位置にも光線が到達する可能性がある．また，光線の波長が長い場合には，レンズの焦点距離が長くなるので 589.3 nm の波長では除外

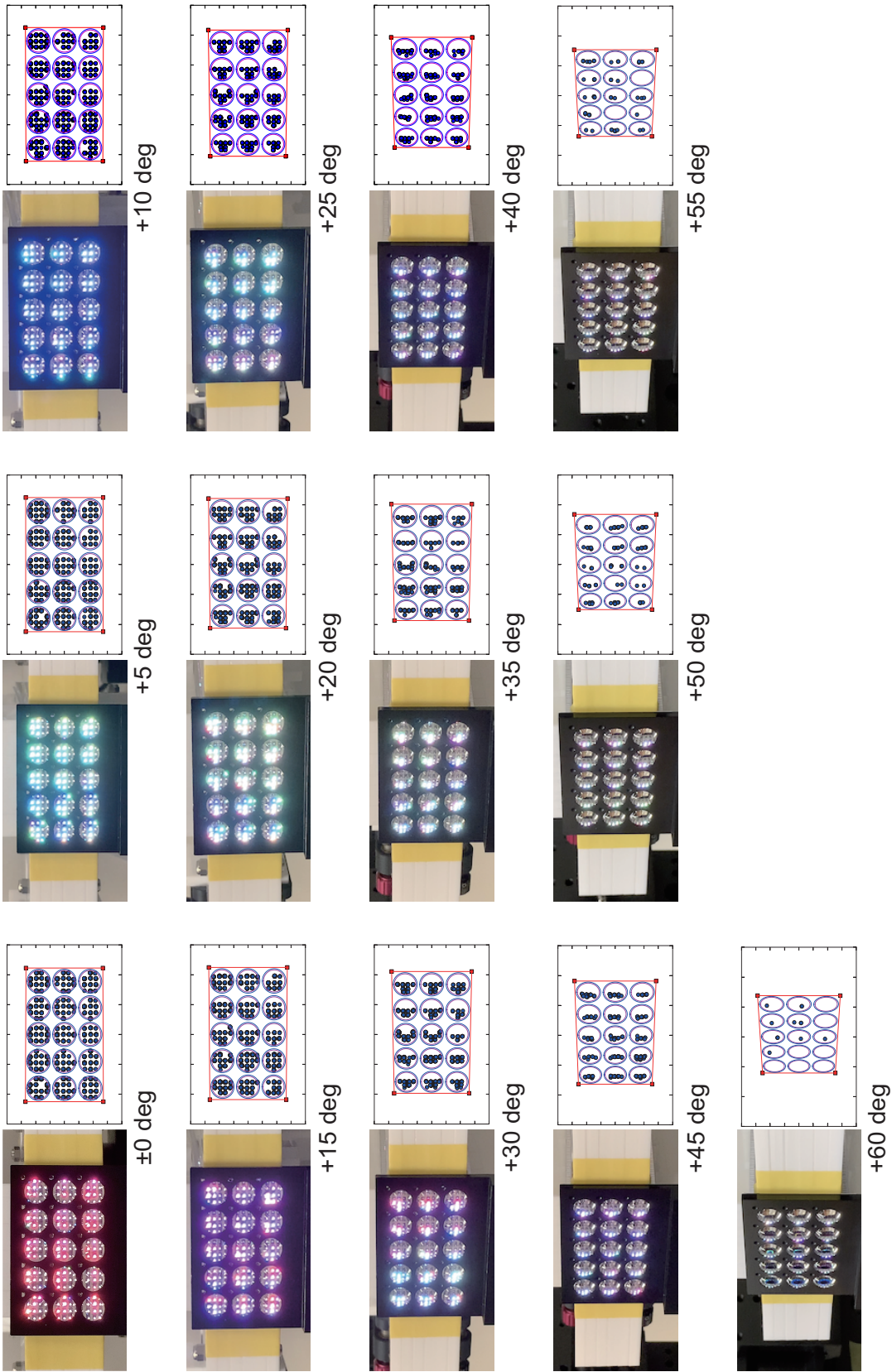


図 4.11. 視野角評価実験結果. 赤, 緑, 青がそれぞれの視点で観察できるようにプロジェクター映像を用意した. 左側が実際の見え方, 右側がシミュレーション上での見え方となっている.

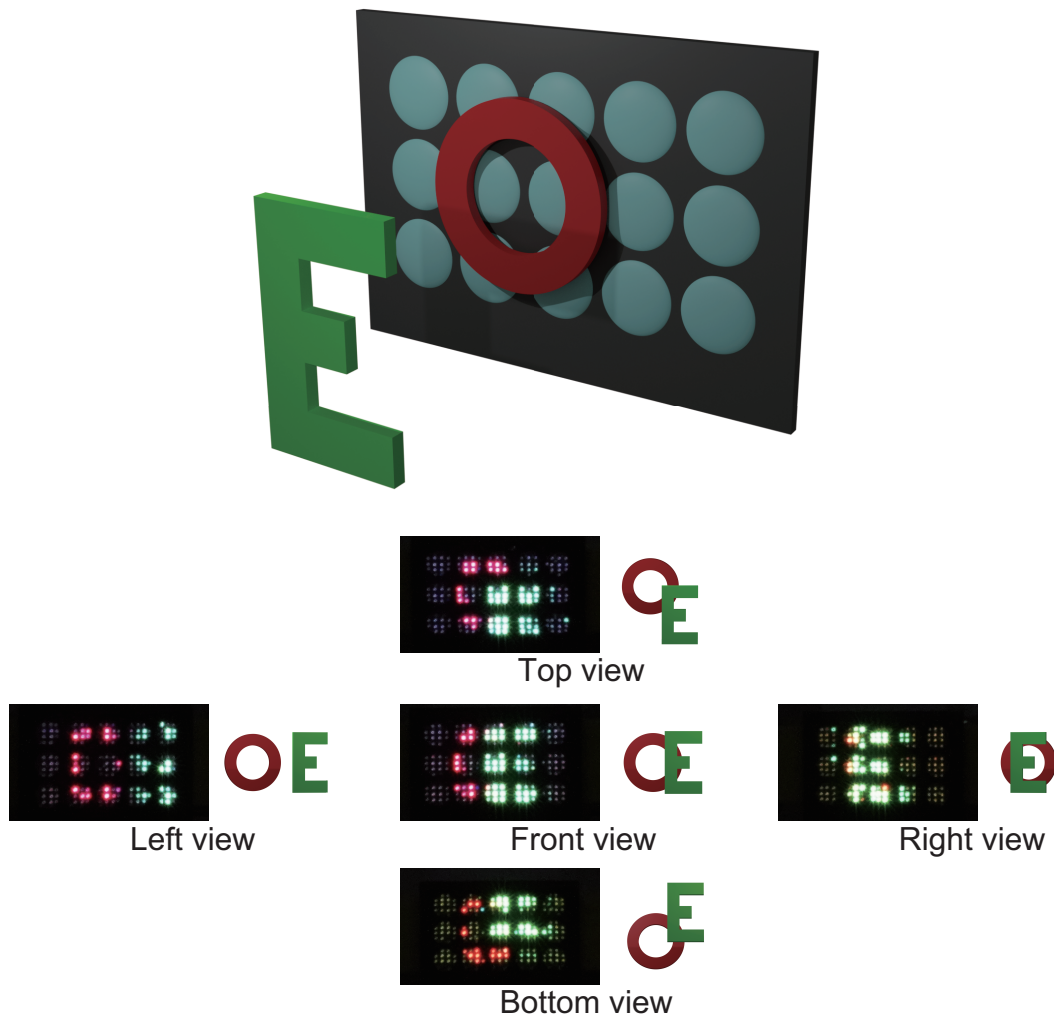


図 4.12. 提案システムによる 3 次元像. 上: 3 次元像とレンズアレイの位置関係. 下: 5 つの視点位置から観察した 3 次元像.

されていた光線が除外されなくなる可能性がある。このとき、 $\pm 60 \text{ deg}$ の視点位置にも光線が到達する可能性がある。これらより、波長が異なれば $\pm 50 \text{ deg}$ から $\pm 60 \text{ deg}$ の視点位置でもすべてのレンズから光線が到来する可能性がある。このため、 $\pm 60 \text{ deg}$ の視野角に近い性能を実現できていると言える。

次に、実システムを用いて、各視点位置からの観察結果を評価した。シミュレーションの評価で用いた各視点位置に、別色の光が到来するようなプロジェクタ用画像を作成した。各視点位置には、赤色、緑色、青色が順に到来するようにした。例えば、 $\pm 0 \text{ deg}$ の視点位置には赤色の光のみ、 $\pm 5 \text{ deg}$ の視点位置には緑色の光のみ、 $\pm 10 \text{ deg}$ の視点位置には青色の光のみが到来するようにする。プロジェクタ用画像の作成には、組付けパラメータを統合したシミュレーションを用いた。シミュレーションの際、光線の波長を 706.5 nm 、 546.1 nm 、 435.8 nm とし、それぞれ赤色、緑色、青色の光とした。各視点位置での実際の観察結果とシミュレーション結

果を図4.11に示す。想定した色でない光線も混じっていたり、一部のレンズからは光線が到達しなかった。しかし、実験結果から、 ± 60 degの視点位置まで光線が到達している事がわかる。このようにシミュレーションと実機で差が出る原因は、組付けパラメータの推定結果と実際との間に差があったことが原因だと考えられる。以上から、組付けパラメータの推定が十分でない影響があるものの、実機でも ± 60 degの視野角を実現できた。

最後に、実システムを用いて3次元像を作成した。図4.12上に示すように、レンズアレイ前方1mmの位置に赤色で大文字の”O”の像を作成し、レンズアレイ前方50mmの位置に緑色で大文字の”E”の像を作成した。この像をレンズアレイ前方800mmの位置から撮影した結果を図4.12下に示す。レンズアレイからの距離を保ちながら上下左右に観察位置を動かし、観察を行った。上下左右への移動量は、真正面位置からおよそ200mmほど(視野角およそ ± 14 deg)である。撮像結果を見て分かる通り、本手法を用いて3次元像が作成できた。

4.5 考察

本章で示した実験結果における3次元像では解像度が低かったが、この問題は改善可能だ。レンズアレイのレンズピッチを上げることで解像度は向上する。投影型インテグラルフォトグラフィは、解像度はレンズピッチに制限されないと4.2.1節で述べた。しかしそれは十分にレンズピッチを上げた後のことである。実験に用いたシステムでは、レンズの距離が11mmと大きいので、解像度には限界がある。技術的には1mmよりもはるかに小さいピッチすることは可能である。このため、技術的に解像度の向上は困難なことではない。解像度が上がると、光線数が相対的に不足するという指摘が想像に易いが、この方式ではプロジェクタ台数を増やせば光線数を増やすことができる。なお、提案方式において、プロジェクタ台数を増やすことは直接スペースが大きくなることにつながらない。従来法だと、広い視野角を達成しながら解像度を向上させるためには、複数のプロジェクタを距離を離して設置する必要がある。このため、従来法だとスペースが増大する。しかし、提案手法だとプロジェクタ同士の距離を取らずに密に配置できる。このため、システムに必要なスペースは小さいままで、光線数を増加させさらに解像度を向上させることができる。

実験では、組付けパラメータの推定に誤差があり、想定した色でない光線が混じっていたり一部のレンズからは光線が到達しないという問題があった。この原因としては、3つ理由が考えられる。1つ目はカメラパラメータの推定誤差だ。外部パラメータの推定の際、レンズアレイの撮像によってPnP問題を解いた。このとき、レンズアレイ自体の大きさがカメラの画角に対して小さく、誤差が乗った可能性がある。この問題に対してはレンズアレイの周囲にもマーカーを設置することで改善が見込まれる。外部パラメータの推定に用いるマーカーをカメラ画像中の広い範囲に分布させることで、推定の精度を上げる事ができる。2点目は組付けパラメータ推定時の初期値決定だ。本稿では、グリッドサーチを行い、その結果を初期値としてLM法により探索した。グリッドサーチにおける粒度が不十分で、大域的最適解に収束していない可能性がある。この問題に対しては、より多くの計算リソースを用意し大域的最適解に近づけることが必要だ。3点目は組付け誤差それ自体だ。図4.13に組付け誤差と評価値の関係を示し

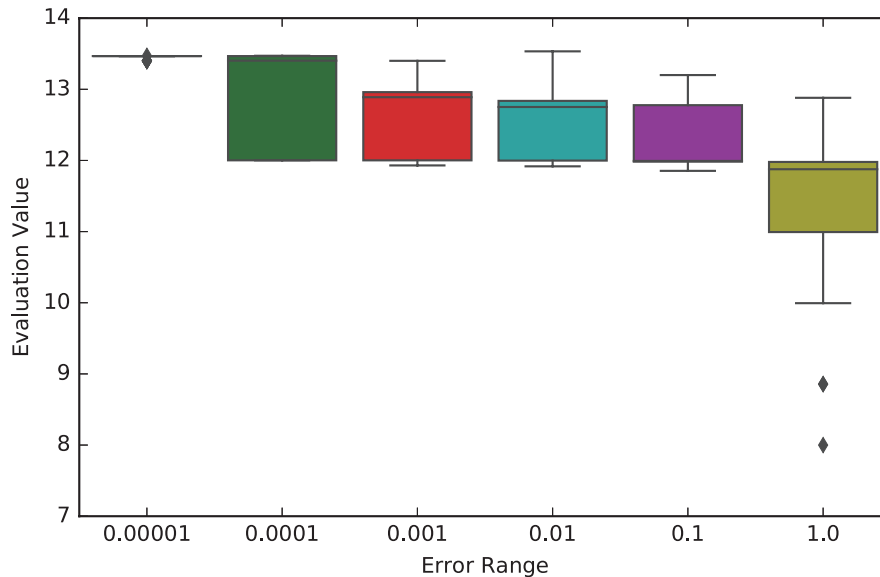


図 4.13. 組立誤差と評価値のボックスプロット. 横軸を組立誤差の幅, 縦軸を評価値とした. ダイヤ型のプロットは外れ値を表している組立誤差の幅ごとに, $Error\ Range * randselect(\{-1, 0, +1\})$ を組付誤差として評価値を計算した. $randselect(\{-1, 0, +1\})$ というのは, $-1, 0, +1$ のうち 1 つがランダムに選出されることを示す. 組立誤差の幅ごとに, 100 回の試行を行った.

た. 各設計パラメータを表 4.1 として, 各組付け誤差が $Error\ Range\ mm$ or $Error\ Range\ deg$ となる場合の評価値を計算した. 本章では視野角 $\pm 60\ deg$ を達成する評価値 13.0 以上が目標値とした. 図 4.13 からわかるように, 僅かな誤差でも評価値は 13.0 以下に下がってしまう. つまり, 僅かな誤差でも視野角は $\pm 60\ deg$ を達成できなくなる. これは, 正面付近の視点位置に到達する光線の量は十分であるのに対して, $\pm 60\ deg$ の視点位置に到着する光線の数はずかであるためだ. 僅かな組付け誤差で, いずれかのレンズからの光線が $\pm 60\ deg$ の視点位置に到着しなくなってしまう. このため, 高精度な組付けが要求されることが分かる. 手動での調整は難しいが, 光学用精密アクチュエータの動作分解能があれば, $\pm 10^{-5}\ mm, \pm 10^{-5}\ deg$ オーダーの調整は可能である. このようなアクチュエータ機器を使った投影, 観察, 調整のフィードバックループを用いて, 組付け誤差を十分小さくすることができると考えている.

4.6 本章のまとめ

投影式インテグラルフォトグラフィにおいて, 省スペースなシステムで大きな視野角を実現するシステムを我々は提案した. 従来の手法では, システムは大きなスペースを必要とした. そこで我々は, 曲面鏡の合せ鏡を応用した. 提案手法に基づいた, システムを実際に構築した. シミュレーションと実機実験により性能を評価した. シミュレーションでは $\pm 60\ deg$ の視点位置で, すべてのレンズから光線が到来した. 実機実験では, $\pm 60\ deg$ の視点位置で, レ

74 第4章 曲面合せ鏡を用いた省スペースかつ広視野角な3次元像形成

ンズアレイのすべてのレンズからではないものの光線が到来した。以上から、提案手法によって $\pm 60\text{ deg}$ の視野角が達成された。

第 5 章

-

博士論文の全文を公表できない場合のガイドラインに基づきこの部分の内容を非公開とします。本内容は 2 年以内に出版予定です。

-

第 6 章

結論

本論文では、光線制御の中でも光線自由度を多次元に亘って制御対象とするライトフィールドにおける光線制御に着目した。古くはおよそ 1 世紀前に提唱されていたライトフィールドの技術が、デバイスや計算機の発達によって現代に再び隆盛を極めている。その中で、これまでの光線制御の応用ではライトフィールドを対象とした光線制御に対応できない点に着目し、これらに対処する方式の提案を行った。本論文では、現代のライトフィールドにおける光線制御での制約として、遮蔽、視野角、他照明環境といった、空間的制約を挙げた。そこで、これら空間的制御を撤廃することを本研究の課題として掲げ以下の提案を行い、これら制約の打破とその先に広がる応用について述べた。本研究では、ライトフィールドにおける光線制御のシステムと方式を新たに提案し、光線制御の応用可能領域を拡張した。まず、センシング技術における遮蔽問題に着目した。つまり、対象と装置との間に遮蔽物が存在するとセンシングが機能しなくなる問題である。この問題に対して、能動センシングにおける投影光と反射光に、3 次元像形成で用いられる光線制御を適用したシステムを提案し、遮蔽への頑健性を高めた 3 次元センシングを実現した。次に、3 次元像形成における視野角における視野角と装置に必要なスペースのトレードオフの問題に着目した。これは、視野角を拡げようとした場合に、装置全体が必要とするスペースが増大してしまう問題である。そこで、本研究では曲面合せ鏡による反射を利用したインテグラルフォトグラフィによる 3 次元像形成システムを提案し、プロジェクタ 1 台の省スペースな構成でありながら $\pm 60 \text{ deg}$ の広い視野角を達成した。

-

博士論文の全文を公表できない場合のガイドラインに基づきこの部分の内容を非公開とします。本内容は 2 年以内に出版予定です。

-

これら各提案方式とその応用例は、すぐさまコンシューマ製品などに活用できるものではない。例えば現状では、解像度が低い、精度が低いなどの指摘が予想できる。これは各方式が基礎研究段階故に発生する指摘である。性能向上に向けたアプローチは他事例を参考にすることで可能であり、手の打ちようがないなどということはなく発展は十分に可能である。今後はこのような点にも注力して研究を進めていきたい。

これら提案方式は、それぞれセンシング、3 次元像形成、プロジェクションマッピングと分

野を絞っての応用例を示した。しかし、基盤技術はそれぞれライトフィールドにおける光線制御という根本を共通としている。このため、これら技術は相互に応用先をとることが可能で、組み合わせることが可能である。これによって、情報提示やセンシングといった分野に留まらず、本論文では言及しなかったような通信や加工、撮像といった光線制御の広い範囲内に応用されていくことが期待できる。2020年代初頭の現代では、機械学習、AIブームの影響から全てソフトウェアで解決してしまうという試みが多く見られ、かつそれが重んじられている。このように、ソフトウェア偏重の傾向が見られるがソフトウェアだけでは解決できない問題が必ず発生する。今後予想されるハードウェア再評価のタイミングで、本研究の成果が活きることを願う。

最後に、各章で述べた内容を要約して結論とする。

第1章では、本研究での主題である光線制御、中でもライトフィールドにおける光線制御について概観し、これらの技術とその応用先の重要性について述べた。また、これらに対して本研究のアプローチの概要を述べた上で、本論文の構成と概要について述べた。

第2章では、ライトフィールドという概念の歴史とその概要、応用分野について整理した。さらに、ライトフィールドにおける光線制御の応用発展が目覚ましい分野である、3次元センシング、3次元像形成、プロジェクションマッピングそれぞれについて整理した。これらの分野における応用例、代表的な手法、それらが抱える課題などを述べた上で、本研究が解決課題とする空間的制約についての概観を述べた。

第3章では、3次元像とのインタラクションを行うユースケースに着目した。このようなケースでは作業空間上に、3次元像の他にも複数の作業者とそれらの手指、ノートやペンなど様々な実物体が存在するような使用方法に需要がある。しかし、このような状況で既存の一般的なセンシング方式では位置合せ問題と遮蔽頑健性問題が存在することを紹介した。そこで、能動センシングにおける計測対象への投影とその反射光の撮像の両方で、3次元像形成で用いられるライトフィールドにおける光線制御を用いる方式を提案した。提案手法のシステム構成の最適化とその結果を用いた実システムの構築、実システムでの性能評価を実施した。最後に、本手法を用いて3次元像とインタラクションを行うシステムを構築し、実際に所望のインタラクションが実現できることを確認した。

第4章では、3次元像形成における様々な方式の中で一般的な、レンズアレイを介したインテグラルフォトグラフィに基づく方式に着目した。特に、近年課題となっていたレンズアレイの集密加工精度における制約に対しての方策である投影型インテグラルフォトグラフィを紹介した。その中でも、ここで問題となる視野角と装置が必要とするスペースのトレードオフへのアプローチをとった。そこで我々は、曲面鏡の合せ鏡を応用する手法を提案した。レンズアレイの真後ろにプロジェクタを設置し、プロジェクタからの光線を取り囲むように曲面鏡を設置する。合せ鏡の間で、複数回の反射を経てレンズアレイに向かう光の入射角は大きくなる。これによって全体の入射角のバリエーションは大きくなり、視野角は大きくなる。また、レンズアレイに対して斜めの位置にプロジェクタは設置する必要がなくなる。これによって省スペースな系を得る。曲面鏡を使うことの優位性を示した上で、設計パラメータの最適化を数理的に行い、これを用いて実システムを構築した。提案方式によって、レンズアレイの後方に1台の

78 第 6 章 結論

プロジェクタを設置したシステムで、我々は $\pm 60 \text{ deg}$ の視野角を実現した。最後に、このシステムを用いた 3 次元像を形成し、3 次元像形成技術としての性能を評価した。

第 5 章では、

-

博士論文の全文を公表できない場合のガイドラインに基づきこの部分の内容を非公開とします。本内容は 2 年以内に出版予定です。

-

第 6 章では、本研究でのアプローチとそこで得られた成果を整理するとともに、今後の応用や将来の期待を述べて結論とした。

謝辞

振り返ればあっという間のようでもあり、それでいて個々のイベントを思い出してみるとその非常に濃密な日々の記憶から、まだあれからこれだけの年月しか経っていないのかと思える、そんな時の流れでした。初めて石川研究室の門をくぐったのは2011年、学部のプロジェクト演習でした。そこから卒業論文、修士論文、そしてこの博士論文とおおよそ11年の月日を石川研でお世話になりました。学部卒業後の休学とその復学、修士修了後就職した後に再度社会人博士で戻ってくるなど、あまりストレートには進まなかった自分の選択をいつも尊重して温かく迎え入れていただいたこと、本当に感謝いたします。石川先生の東京大学情報基盤センターへの異動後も研究環境を用意していただき、4年と半年という長期履修になってしまいましたが高んとか最後までたどり着くことができました。全ては石川研究室でなければ続かなかったであろうな、難しかったであろうな、と思うことばかりで本当に環境に恵まれたこと感謝いたします。

石川正俊教授は、上記全ての課程で指導教員をお引き受けいただきました。研究のための環境を用意していただき、研究の進め方についての助言をいただくにとどまらず、人生の重要な節目節目で大きな助言をいただきました。物事への取り組み方、考え方、人生観など、教えていただいたことは計り知れません。初めてお会いしたのは学部生の頃に私の所属していた運動会自転車部の戦績報告会で、当時先生には部長をご担当頂いておりました。それ以来進路振り分けや大学院入試、休学のこと、進路のこと、社会人博士のことなど、とてもたくさんのお話を相談しそのたびに私をあるべく方向に導いてくださいました。私は石川研究室を離れることを2回、戻ってくることを2回、それぞれ行ってしまいましたが、そのたびに背中を押して思い切り送り出してくださり、そして温かく快く迎えてくださったこと、忘れることができません。まことにありがとうございます。先生への感謝は本当に何を申し上げても足りません。今後とも何卒よろしくお願い申し上げます。

東京工業大学の渡辺義浩准教授には、修士と博士にて研究指導をしていただきました。博士課程の途中に東工大へ異動された後も、お忙しい時間を割いて指導していただきました。夜遅くまで議論してしまい、それでもやっぱり最後に実物で実験してみようとなり、レンズやプロジェクトを輪講室に持ち込んで簡易実験を行い、深夜に思った通りの結果になって2人喜んだ日のことが忘れられません。エンターテイメントやカルチャーの趣向が近く、そういった雑談もしていただき、また子育ての相談なども聞いてくださいました。研究ストーリーの相談や論文添削などいつも丁寧にくださり、自分1人では到底到達できなかったレベルにまで引き

上げてくださり、おかげでなんとか3本のテーマを形にすることができました。まことにありがとうございました。

篠田裕之教授には石川先生の異動にあたって、指導教員を引き継いでいただきました。研究室内に実験用のスペースを用意いただいたり、実験装置についてコメント頂いたり、非常に多くのことをいただきました。途中から合流した私のために、最善の環境を用意していただきました。また、博士論文審査にあたって事務的な手続きや審査会の準備などを引き受けていただきました。本当にありがとうございました。

末石智大特任講師には、渡辺先生の異動後、研究室内での所属グループがなくなっていた状態の私のいわば身元引受け人となっただき、非常に多くの助けを頂きました。連絡事項の伝達、部屋割や物品購入時のサポートから、研究内容のアドバイスまで頂きました。また、実験室にて私の大掛かりな装置について気をかけてくださり、他の使用者の方にご迷惑にならないように、私のスペースが確保できるように配慮いただきました。その豊富な経験から、博士課程のあり方やそのキャリアについてのお話など、非常に沢山の有益情報をいただきました。本当にありがとうございました。

石川研究室の秘書様方には本当に多くのことを助けていただきました。学生の間にも分かっているつもりではいましたが、一度企業に就職し自分で事務手続きの殆どを行わなければならない環境に置かれると、これほどまでに石川研の秘書様方に助けていただいていたのかと衝撃を受けます。また、自分のイレギュラーな状態故に予算の配分や扱い等が困難である中で、お忙しいにも関わらず大変なご配慮をいただきました。本当にありがとうございました。

稲見昌彦教授、堀崎遼一准教授には、お忙しい中でこの博士論文の副査をお引き受けいただきましてまことにありがとうございました。関連分野の第一線で世界最先端の研究をなさっている先生方からの貴重なコメントを頂くことで、博士論文としてのより高みに進めると自負しております。本当にありがとうございました。

石川研究室、篠田研究室の関係者の皆様には、お一方お一方に感謝のお言葉がございます。しかし挙げていくとこれだけで10ページほどになってしまいそうですのでここではまとめさせていただきます。必ず直接お伝えいたします。本当にありがとうございました。

社会人博士として、大学に通うことを許可して下さった株式会社日立製作所の皆様に感謝いたします。皆様のご理解とその博士号への考え方によって支えられた学生生活、そして社会人生活との二足のわらじ生活でした。平日の就業時間に大学に通うことを是とし、大学成果による国際会議海外出張を是とし、授業料の補助を賜り、なんと恵まれた環境かと思います。特に、私が入社1年と半年での入学が早すぎる、2年間の研修員(日立製作所では入社後の2年間は研修員と呼ばれ研修中の身であるとされる)が終わってからが適切ではないか、という意見も出た際、背中を押して下さった同僚や上司の方々のことは一生忘れません。あのタイミングで入学できていなければ、その後のライフステージからの入学は大きく足踏みしてしまっていたことのように思います。本当にありがとうございました。

いつも応援してくれた家族に感謝いたします。両親は進学に賛成して背中を押してくれました。入学した頃には妻と2人暮らしだった我が家も今ではにぎやかな4人家族になりました。子どもたちは本当に心の支えになってくれ、さらには会話もできるようになると研究の悩みや

行き詰まりを相談し、その会話の中で解決のヒントをもらったこともありました。妻は暴れ盛りの子どもたちの世話を引き受けてくれ、積極的に研究の時間を作ってくれました。このような助けがなければ修了はもうあと何年先になっただろうかと思います。本当にありがとう。これからずっとよろしくおねがいします。

支えてくれた方々、応援してくれた方々、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Marc Levoy and Pat Hanrahan. Light field rendering. In *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 31–42, 1996.
- [2] Gabriel Lippmann. Epreuves réversibles photographies intégrals. *Comptes-Rendus Academie des Sciences*, Vol. 146, pp. 446–451, 1908.
- [3] Edward H Adelson, James R Bergen, et al. *The plenoptic function and the elements of early vision*, Vol. 2. Vision and Modeling Group, Media Laboratory, Massachusetts Institute of ..., 1991.
- [4] Toshiaki Fujii and Masayuki Tanimoto. Free-viewpoint TV system based on ray-space representation. In *Three-Dimensional TV, Video, and Display*, Vol. 4864, pp. 175–189. International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [5] Ren Ng, Marc Levoy, Mathieu Brédif, Gene Duval, Mark Horowitz, and Pat Hanrahan. *Light field photography with a hand-held plenoptic camera*. PhD thesis, Stanford University, 2005.
- [6] Julian Iseringhausen, Bastian Goldlücke, Nina Pesheva, Stanimir Iliev, Alexander Wender, Martin Fuchs, and Matthias B. Hullin. 4D imaging through spray-on optics. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH 2017)*, Vol. 36, No. 4, pp. 35:1–35:11, 2017.
- [7] Ruo Zhang, Ping-Sing Tsai, James Edwin Cryer, and Mubarak Shah. Shape-from-shading: a survey. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 21, No. 8, pp. 690–706, 1999.
- [8] Shree K Nayar and Yasuo Nakagawa. Shape from focus. *IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 16, No. 8, pp. 824–831, 1994.
- [9] D Ziou. Passive depth from defocus using a spatial domain approach. In *Computer Vision, International Conference on*, pp. 799–804. IEEE, 1998.
- [10] Shaojie Zhuo and Terence Sim. On the recovery of depth from a single defocused image. In *Computer Analysis of Images and Patterns*, pp. 889–897. Springer, 2009.
- [11] Vinay P Nambodiri and Subhasis Chaudhuri. Recovery of relative depth from a single observation using an uncalibrated (real-aperture) camera. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1–6. IEEE, 2008.
- [12] Robert J Woodham. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 191139–191144, 1980.
- [13] S Burak Gokturk, Hakan Yalcin, and Cyrus Bamji. A time-of-flight depth sensor-system

- description, issues and solutions. In *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW)*, p. 35. IEEE, 2004.
- [14] Yusuke Oike, Hiroaki Shintaku, Shinichi Takayama, Makoto Ikeda, and Kunihiro Asada. Real-time and high-resolution 3D imaging system using light-section method and smart CMOS sensor. In *Sensors*, Vol. 1, pp. 502–507. IEEE, 2003.
 - [15] Joaquim Salvi, Jordi Pages, and Joan Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, Vol. 37, No. 4, pp. 827–849, 2004.
 - [16] 渡辺義浩, 小室孝, 石川正俊. 多点瞬時解析高速ビジョンによる運動/変形物体のリアルタイム三次元センシング. *日本ロボット学会誌*, Vol. 25, No. 6, pp. 1005–1013, 2007.
 - [17] Shree K Nayar, Masahiro Watanabe, and Minori Noguchi. Real-time focus range sensor. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 12, pp. 1186–1198, 1996.
 - [18] Andreas Velten, Thomas Willwacher, Otakrist Gupta, Ashok Veeraraghavan, Mounsi G Bawendi, and Ramesh Raskar. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging. *Nature communications*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–8, 2012.
 - [19] Jae-Hyun Jung, Keehoon Hong, Gilbae Park, Indeok Chung, Jae-Hyeung Park, and Byoungcho Lee. Reconstruction of three-dimensional occluded object using optical flow and triangular mesh reconstruction in integral imaging. *Optics express*, Vol. 18, No. 25, pp. 26373–26387, 2010.
 - [20] Masahiko Yasui, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Occlusion-robust 3D sensing using aerial imaging. In *2016 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pp. 1–10. IEEE, 2016.
 - [21] P-A Blanche, A Bablumian, R Voorakaranam, C Christenson, W Lin, T Gu, D Flores, P Wang, W-Y Hsieh, M Kathaperumal, et al. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer. *Nature*, Vol. 468, No. 7320, pp. 80–83, 2010.
 - [22] Hisayuki Sasaki, Kenji Yamamoto, Koki Wakunami, Yasuyuki Ichihashi, Ryutaro Oi, and Takanori Senoh. Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators. *Scientific reports*, Vol. 4, No. 1, pp. 1–8, 2014.
 - [23] Masahiro Yamaguchi and Ryo Higashida. 3D touchable holographic light-field display. *Applied optics*, Vol. 55, No. 3, pp. A178–A183, 2016.
 - [24] Alex Butler, Otmar Hilliges, Shahram Izadi, Steve Hodges, David Molyneaux, David Kim, and Danny Kong. Vermeer: direct interaction with a 360 viewable 3D display. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 569–576, 2011.
 - [25] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. Haptomime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. In *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 663–667, 2014.
 - [26] Hirotsugu Yamamoto and Shiro Suyama. Aerial 3D LED display by use of retroreflective

- sheeting. In *Stereoscopic Displays and Applications XXIV*, Vol. 8648, p. 86480Q. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [27] Sebastian Scheiding, Y Yi Allen, Andreas Gebhardt, Roman Loose, Lei Li, Stefan Risse, Ramona Eberhardt, and Andreas Tünnermann. Diamond milling or turning for the fabrication of micro lens arrays: comparing different diamond machining technologies. In *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics IV*, Vol. 7927, p. 79270N. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [28] Masami Yamasaki, Hideyuki Sakai, Kei Utsugi, and Takafumi Koike. High-density light field reproduction using overlaid multiple projection images. In *Stereoscopic Displays and Applications XX*, Vol. 7237, p. 723709. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [29] Anselm Grundhöfer and Daisuke Iwai. Recent advances in projection mapping algorithms, hardware and applications. In *Computer Graphics Forum*, Vol. 37, pp. 653–675. Wiley Online Library, 2018.
- [30] Christian Siegl, Matteo Colaianni, Lucas Thies, Justus Thies, Michael Zollhöfer, Shahram Izadi, Marc Stamminger, and Frank Bauer. Real-time pixel luminance optimization for dynamic multi-projection mapping. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 34, No. 6, pp. 1–11, 2015.
- [31] Takashi Nomoto, Wanlong Li, Hao-Lun Peng, and Yoshihiro Watanabe. Dynamic projection mapping with networked multi-projectors based on pixel-parallel intensity control. In *SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2020.
- [32] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Midas projection: Markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 37, No. 6, pp. 1–12, 2018.
- [33] Amit H Bermano, Markus Billeter, Daisuke Iwai, and Anselm Grundhöfer. Makeup lamps: Live augmentation of human faces via projection. In *Computer Graphics Forum*, Vol. 36, pp. 311–323. Wiley Online Library, 2017.
- [34] Yoshihiro Watanabe, Gaku Narita, Sho Tatsuno, Takeshi Yuasa, Kiwamu Sumino, and Masatoshi Ishikawa. High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay. In *The International Display Workshops*, pp. 1064–1065, 2015.
- [35] Masahiko Yasui, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Occlusion-robust sensing method by using the light-field of a 3D display system toward interaction with a 3d image. *Applied optics*, Vol. 58, No. 5, pp. A209–A227, 2019.
- [36] Leap Motion. <https://www.leapmotion.com/>.
- [37] Hirotsugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama. Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR). *Optics express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924, 2014.
- [38] Byung-Gook Lee, Ho-Hyun Kang, and Eun-Soo Kim. Occlusion removal method of partially occluded object using variance in computational integral imaging. *3D Research*, Vol. 1,

- No. 2, p. 2, 2010.
- [39] Maryam Ghaneizad, Zahra Kavehvasht, and Hamid Aghajan. Human detection in occluded scenes through optically inspired multi-camera image fusion. *JOSA A*, Vol. 34, No. 6, pp. 856–869, 2017.
 - [40] Joon-Jae Lee, Byung-Gook Lee, and Hoon Yoo. Image quality enhancement of computational integral imaging reconstruction for partially occluded objects using binary weighting mask on occlusion areas. *Applied optics*, Vol. 50, No. 13, pp. 1889–1893, 2011.
 - [41] Hector Navarro Fructuoso, Manuel Martínez-Corral, Genaro Saavedra Tortosa, Amparo Pons Marti, and Bahram Javidi. Photoelastic analysis of partially occluded objects with an integral-imaging polariscope. *Journal of Display Technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 255–262, 2014.
 - [42] Dong-Hak Shin, Hoon Yoo, Chun-Wei Tan, Byung-Gook Lee, and Joon-Jae Lee. Occlusion removal technique for improved recognition of partially occluded 3D objects in computational integral imaging. *Optics Communications*, Vol. 281, No. 18, pp. 4589–4597, 2008.
 - [43] Daisuke Miyazaki, Noboru Hirano, Yuuki Maeda, Keisuke Ohno, and Satoshi Maekawa. Volumetric display using a roof mirror grid array. In *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, pp. 75240N–75240N, 2010.
 - [44] Cees Van Berkel, David W Parker, and Anthony R Franklin. Multiview 3D LCD. In *Electronic Imaging: Science & Technology*, pp. 32–39, 1996.
 - [45] Virgil B Elings and Caliste J Landry. Optical display device, 1972. US Patent 3,647,284.
 - [46] Ramakrishnan Mukundan and KR Ramakrishnan. *Moment functions in image analysis: theory and applications*, Vol. 100. 1998.
 - [47] Jun Chen, Qingyi Gu, Hao Gao, Tadayoshi Aoyama, Takeshi Takaki, and Idaku Ishii. Fast 3-D shape measurement using blink-dot projection. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2683–2688, 2013.
 - [48] Paul M Griffin, Lakshmi S Narasimhan, and Soung R Yee. Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition. *Pattern recognition*, Vol. 25, No. 6, pp. 609–616, 1992.
 - [49] Jason Geng. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Adv. Opt. Photon.*, Vol. 3, No. 2, pp. 128–160, Jun 2011.
 - [50] Yuka Tomiyama, Shiro Suyama, and Hirotugu Yamamoto. Comparison of retroreflective elements in directivity of aerial imaging by retroreflection (AIRR). In *JSAP-OSA Joint Symposium*, p. 20a_C4_4, 2014.
 - [51] Masahiko Yasui, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Wide viewing angle with a downsized system in projection-type integral photography by using curved mirrors. *Optics Express*, Vol. 29, No. 8, pp. 12066–12080, 2021.
 - [52] Masahiko Yasui, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Projection-type integral 3D display using mirrors facing each other for a wide viewing angle with a downsized system.

- In *Advances in Display Technologies X*, Vol. 11304, p. 1130406. International Society for Optics and Photonics, 2020.
- [53] Hisayuki Sasaki, Naoto Okaichi, Hayato Watanabe, Masanori Kano, Masato Miura, Masahiro Kawakita, and Tomoyuki Mishina. Color moiré reduction and resolution enhancement of flat-panel integral three-dimensional display. *Optics Express*, Vol. 27, No. 6, pp. 8488–8503, 2019.
- [54] Yujiao Chen, Xiaorui Wang, Jianlei Zhang, Shuo Yu, Qiping Zhang, and Bingtao Guo. Resolution improvement of integral imaging based on time multiplexing sub-pixel coding method on common display panel. *Optics Express*, Vol. 22, No. 15, pp. 17897–17907, 2014.
- [55] Peng Wang, Songlin Xie, Xinzhu Sang, Duo Chen, Chenyu Li, Xin Gao, Xunbo Yu, Chongxiu Yu, Binbin Yan, Wenhua Dou, et al. A large depth of field frontal multi-projection three-dimensional display with uniform light field distribution. *Optics Communications*, Vol. 354, pp. 321–329, 2015.
- [56] Wojciech Matusik and Hanspeter Pfister. 3D TV: a scalable system for real-time acquisition, transmission, and autostereoscopic display of dynamic scenes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 23, No. 3, pp. 814–824, 2004.
- [57] Ruigang Yang, Xinyu Huang, Sifang Li, and Christopher Jaynes. Toward the light field display: Autostereoscopic rendering via a cluster of projectors. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 14, No. 1, pp. 84–96, 2007.
- [58] Hideyuki Sakai, Masami Yamasaki, Takafumi Koike, Michio Oikawa, and Miho Kobayashi. 41.2: Autostereoscopic display based on enhanced integral photography using overlaid multiple projectors. In *SID symposium digest of technical papers*, Vol. 40, No. 1, pp. 611–614. Wiley Online Library, 2009.
- [59] Yasuhiro Takaki and Nichiyo Nago. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display. *Optics Express*, Vol. 18, No. 9, pp. 8824–8835, 2010.
- [60] Sung-Wook Min, Sungyong Jung, Jae-Hyeung Park, and Byoungcho Lee. Study for wide-viewing integral photography using an aspheric fresnel lens array. *Optical Engineering*, Vol. 41, No. 10, pp. 2572–2577, 2002.
- [61] Yunhee Kim, Jae-Hyeung Park, Heejin Choi, Sungyong Jung, Sung-Wook Min, and Byoungcho Lee. Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens array. *Optics Express*, Vol. 12, No. 3, pp. 421–429, 2004.
- [62] Sungyong Jung, Jae-Hyeung Park, Heejin Choi, and Byoungcho Lee. Viewing-angle-enhanced integral three-dimensional imaging along all directions without mechanical movement. *Optics Express*, Vol. 11, No. 12, pp. 1346–1356, 2003.
- [63] Hideya Takahashi, Hiromitsu Fujinami, and Kenji Yamada. Wide-viewing-angle three-dimensional display system using HOE lens array. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII*, Vol. 6055, p. 60551C. International Society for Optics and Photonics, 2006.

- [64] Roberto Lopez-Gulliver, Shunsuke Yoshida, Sumio Yano, and Naomi Inoue. Poster: Toward an interactive box-shaped 3D display: Study of the requirements for wide field of view. In *2008 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp. 157–158. IEEE, 2008.
- [65] Hwi Kim, Joonku Hahn, and Hee-Jin Choi. Numerical investigation on the viewing angle of a lenticular three-dimensional display with a triplet lens array. *Applied optics*, Vol. 50, No. 11, pp. 1534–1540, 2011.
- [66] Boyang Liu, Xinzhu Sang, Xunbo Yu, Xin Gao, Li Liu, Chao Gao, Peiren Wang, Yang Le, and Jingyan Du. Time-multiplexed light field display with 120-degree wide viewing angle. *Optics express*, Vol. 27, No. 24, pp. 35728–35739, 2019.
- [67] Hwi Kim, Joonku Hahn, and Byoungho Lee. The use of a negative index planoconcave lens array for wide-viewing angle integral imaging. *Optics Express*, Vol. 16, No. 26, pp. 21865–21880, 2008.
- [68] Jefferson Y Han and Ken Perlin. Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope. In *ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, pp. 741–748, 2003.
- [69] Naoki Hashimoto and Kyosuke Hamamoto. Aerial 3D display using a symmetrical mirror structure. In *ACM SIGGRAPH 2018 Posters*, pp. 1–2, 2018.
- [70] Bin Chen, Lingyan Ruan, and Miu-Ling Lam. Light field display with ellipsoidal mirror array and single projector. *Optics Express*, Vol. 27, No. 15, pp. 21999–22016, 2019.
- [71] Neil A Dodgson. Variation and extrema of human interpupillary distance. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*, Vol. 5291, pp. 36–46. International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [72] Bobak Shahriari, Kevin Swersky, Ziyu Wang, Ryan P Adams, and Nando De Freitas. Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 104, No. 1, pp. 148–175, 2015.
- [73] Yutian Chen, Aja Huang, Ziyu Wang, Ioannis Antonoglou, Julian Schrittwieser, David Silver, and Nando de Freitas. Bayesian optimization in AlphaGo. *arXiv preprint arXiv:1812.06855*, 2018.
- [74] The GPyOpt authors. Gpyopt: A bayesian optimization framework in python. <http://github.com/SheffieldML/GPyOpt>, 2016.
- [75] Kenneth Levenberg. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, Vol. 2, No. 2, pp. 164–168, 1944.
- [76] Donald W Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431–441, 1963.