

令和元年度 博士学位論文

ライトフィールド技術を応用した
表示・撮影技術の研究

Developments of
display and image acquisition systems
using light field technology

東京農工大学 大学院工学府 電子情報工学専攻

指導教員：高木 康博 教授

山口 祐太

Yuta Yamaguchi

目次

目次	i
第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	9
1.3 本論文の構成	9
第 2 章 関連研究	10
2.1 インテグラルイメージングディスプレイ	10
2.2 ヘッドマウントディスプレイ	13
2.3 高速パンチルトカメラ	15
2.4 ライトフィールドカメラ	18
第 3 章 ライトフィールド技術を用いた AR ディスプレイ	22
3.1 研究目的	22
3.2 インテグラルイメージングディスプレイの透明化	25
3.3 実験装置	28
3.4 実験結果	29
3.5 考察	34
3.6 本章のまとめ	35
第 4 章 ライトフィールド AR ディスプレイにおける背景遮蔽	36
4.1 研究目的	36
4.2 マスクパターンによる背景光線の選択的遮蔽	38
4.3 実験装置	41
4.4 実験結果	44
4.5 考察	48
4.6 本章のまとめ	49
第 5 章 ライトフィールド AR ディスプレイを用いた背景結像機能	50
5.1 研究目的	50
5.2 原理	52
5.2.1 背景結像機能を実現する非対称インテグラルイメージング光学系	52
5.2.2 提案システムの制限	55
5.3 実験装置	57
5.4 実験結果	58
5.5 考察	62

5.6	本章のまとめ	65
第6章	ライトフィールド技術をもとにした高速パンチルトシステム	67
6.1	研究目的	67
6.2	レンズアレイシフトによる光線の偏向	69
6.3	長焦点距離のレンズアレイを用いた実験	71
6.3.1	実験装置	71
6.3.2	実験結果	73
6.4	短焦点距離のレンズアレイを用いた実験	74
6.4.1	実験装置	74
6.4.2	実験結果	75
6.5	考察	76
6.6	本章のまとめ	77
第7章	高速パンチルト機能を有するライトフィールドカメラ	79
7.1	研究目的	79
7.2	高速パンチルトリフォーカスカメラの原理	79
7.3	実験装置	84
7.3.1	レンズアレイおよび開口アレイの設計・作製	84
7.3.2	実験システムの構築	91
7.4	実験結果	93
7.5	考察	98
7.6	本章のまとめ	99
第8章	将来の展望	100
第9章	結論	105
	謝辞	108
	参考文献	109
	業績	113
	査読論文（本研究に関わるもの）	113
	査読論文（その他）	113
	受賞歴（本研究に関わるもの）	113
	国際発表	114
	国内発表	115

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、表示や撮影に関わる映像技術は大きな進化を遂げている。テレビ放送を例にとると、我が国で 1953 年に白黒映像で開始された地上波放送は、1960 年にはカラー映像となり、その後ハイビジョン化による高解像度化がなされたほか、2011 年には地上波放送がデジタル化されるなど、進歩を続けてきた。2018 年には 4K および 8K の衛星放送も開始された。4K および 8K 放送の解像度はそれぞれ $3,840 \times 2,160$ と $7,680 \times 4,320$ である。また、映像の高ダイナミックレンジ化や高フレームレート化も行われており、2 次元の映像を用いたテレビ放送技術は成熟を迎えつつあるといえる。また、撮影デバイスの高解像度化、高フレームレート化、高ダイナミックレンジ化が進み、品質の高い写真や動画を手軽に撮影できるようになった。また、スマートフォンやタブレット端末のようなモバイル機器の普及により、われわれが映像技術に触れる機会はますます増えている。

しかし、現在用いられている表示・撮影技術のほとんどは 2 次元の画像を表示・撮影する。その一方で、人間が知覚する空間は 3 次元である。2 次元の表示・撮影技術では、3 次元空間内の光の強度分布を 2 次元で表示・撮影するため、奥行き方向の情報が失われてしまう。2 次元映像の表示・撮影技術が成熟しつつある現在、これらの技術が目指すべき進歩の方向は、3 次元空間の映像情報を表示・撮影することであると考えられる。

3 次元映像情報を表示・撮影する技術の一つにライトフィールド技術がある。ライトフィールド技術は、将来の 3 次元映像の表示・撮影技術として、最近、研究が盛んに行われている。ライトフィールドとは空間を光線の間ととらえる考え方であり、Gershun によって提唱された概念である[1]。ライトフィールド技術とは、光線の間を表示・撮影する技術の総称である。空間内に無数に存在す

る光線を記述する方法として、Adelson と Bergen は plenoptic 関数と呼ばれる関数を提案している[2]。この関数では、観測点の位置を 3 次元の座標 (x, y, z) で表し、この観測点に到達する光の角度を (θ, ϕ) とする。さらに、光の波長を λ 、観察した時点の時刻を t で表すと、plenoptic 関数は次のような式で定義される。

$$P(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t) \quad (1.1)$$

Plenoptic 関数により空間内に存在するすべての光線を記述することができる。波長と観察時刻を固定すると、plenoptic 関数は

$$P(x, y, z, \theta, \phi) \quad (1.2)$$

のように 5 次元のスカラー関数で記述できる[3]。式(1.2)で表現される光線を図 1.1 に示す。

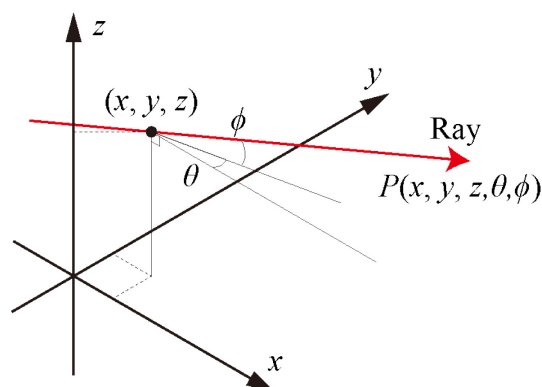


図 1.1 5次元の plenoptic 関数で記述される光線

この 5 次元の plenoptic 関数は、空間内に平行な二つの平面を導入することで、4 次元のスカラー関数へと次元を下げるができる。平行な 2 平面として、図 1.2 のように xy 平面と uv 平面を空間内に置く。この 2 平面が存在する空間内において、任意の光線はそれぞれの面と 1 回ずつ交わる。光線と xy 平面の交点と光線と uv 平面の交点の組み合わせにより、plenoptic 関数は次式のような 4 次元のスカラー関数で記述できる。

$$P(x, y, u, v) \quad (1.3)$$

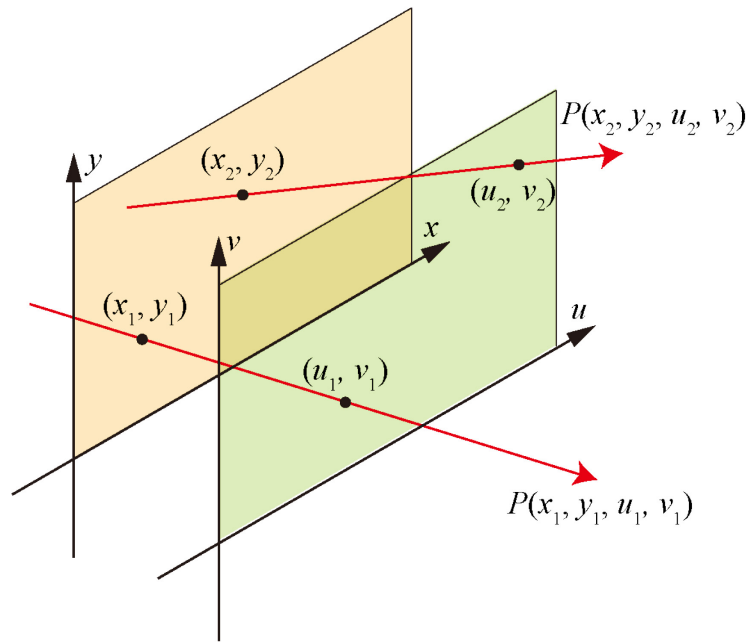


図 1.2 4次元の plenoptic 関数で記述される光線

ライトフィールド技術では、plenoptic 関数で記述される無数の光線を再現・記録することで、3次元の映像情報を表示・撮影することができる。

ライトフィールド技術に含まれる技術の一つにインテグラルイメージング [4][5]がある。インテグラルイメージングは、Lippmann によって立体写真の表示・撮影の方式として 1908 年に提案されたものであり [6]、インテグラルフォトグラフィーとも呼ばれている。図 1.3 に Lippman が提案したインテグラルイメージングの概念図を示す。この方式が提案された当時は、インテグラルイメージングを実現するために必要とされるデバイスの性能が十分ではなかったため、あまり注目されなかった [7]。近年になり、表示デバイスや撮影デバイスの性能向上に伴って将来の立体テレビの原理として注目を集めている。

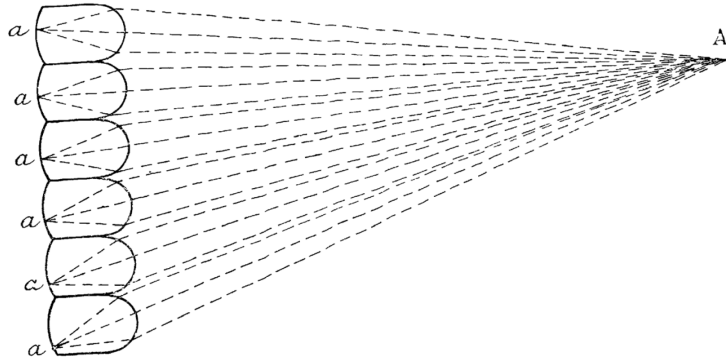


図 1.3 Lippmann が提案したインテグラルイメージング

インテグラルイメージングでは、複数のレンズを 2 次元的に配列した光学素子であるレンズアレイに、表示デバイスや撮影デバイスを組み合わせることで 3 次元映像の表示や撮影を実現できる。レンズアレイと表示・撮影デバイスの組み合わせにより、空間内に無数に存在する光線の一部の位置と進行方向を再現することで、3 次元映像の表示・撮影を実現する。インテグラルイメージングにおける 3 次元映像の表示・撮影は、式(1.3)に示した 4 次元の **plenoptic** 関数を表示・撮影することと等価である。

インテグラルイメージングによる 3 次元映像の表示について説明する。図 1.4 に、インテグラルイメージングによる 3 次元映像表示の原理図を示す。インテグラルイメージングディスプレイは、レンズアレイと、その焦点面に置かれたフラットパネルディスプレイなどの表示デバイスから構成される。表示デバイス上には、要素画像 (Elementary image) と呼ばれる複数の画素から構成される画像が表示されている。レンズアレイを構成するレンズ一つに要素画像一つが対応する。要素画像を構成する各画素から出射する光線それぞれをレンズによって屈折させ、異なる進行方向を与えることで 3 次元映像の光線を再現する。要素画像はレンズアレイの焦点面に配置されているため、要素画像上の一点から出射した光は平行光となる。この平行光の進行方向は、要素画像上の画素の位置によって異なる。これにより、インテグラルイメージングディスプレイからは様々な方向に出射する光線が再生され、実物体と同様に観察方向に応じて物体の異なる見え方を再現でき、立体表示が実現できる。レンズアレイを構成

するレンズ 1 個は立体像の 1 画素に対応するため、立体像の解像度はレンズ数によって決まる、また、レンズ 1 個に対応する要素画像の画素数は、再現できる光線の本数を決定する。インテグラルイメージングにおける表示は 4 次元の plenoptic 関数を表示することと等価であることを先に述べたが、フラットパネルディスプレイは図 1.2 における xy 平面に相当し、レンズアレイは同図の uv 平面に相当する。

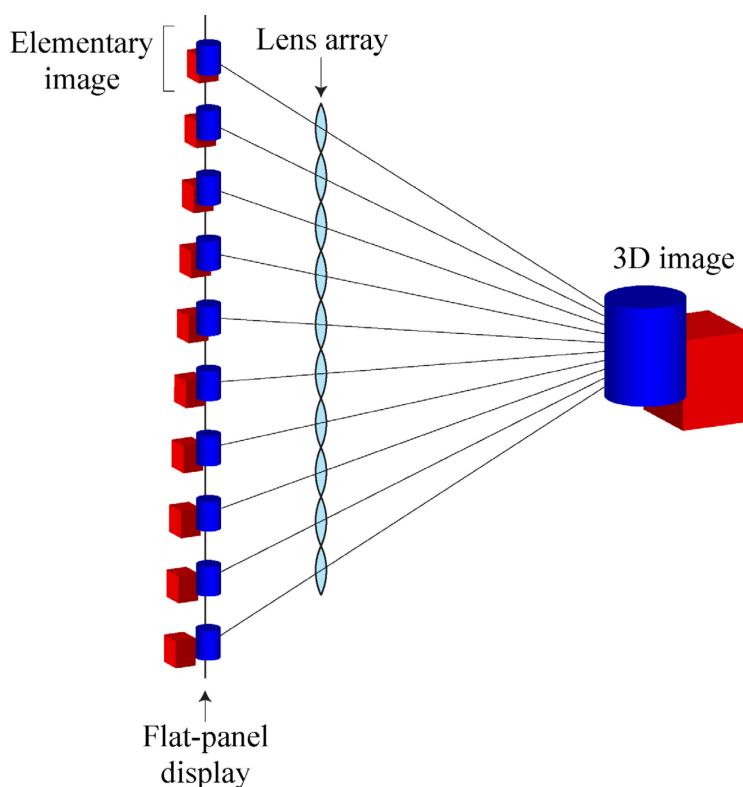


図 1.4 インテグラルイメージングによる 3 次元映像の表示

インテグラルイメージングによる 3 次元映像の撮影は、インテグラルイメージングによる立体像の表示とは逆のプロセスである。図 1.5 にインテグラルイメージングによる 3 次元映像撮影の原理図を示す。レンズアレイの焦点面にイメージセンサーなどの撮影デバイスを配置して、要素画像を記録する。レンズアレイを構成する各レンズに入射した光線は、その入射角に応じてイメージセンサー上の異なるピクセルにスポットを形成し、記録される。これにより光線の位置と角度をサンプリングすることができ、3 次元映像を撮影することができ

る。インテグラルイメージングによる撮影は4次元の plenoptic 関数を記録することと等価であり、レンズアレイは図 1.2 における xy 平面、撮影デバイスは uv 平面に相当する。

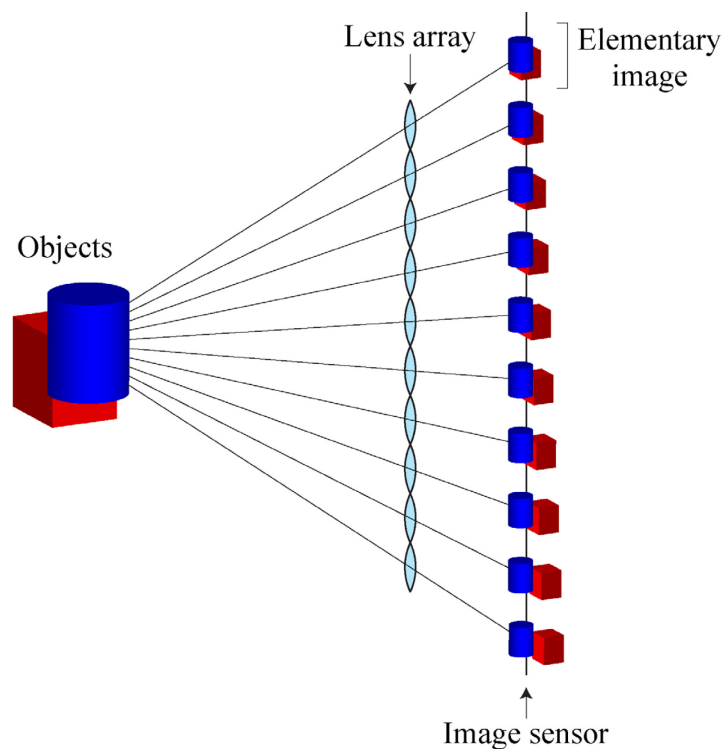


図 1.5 インテグラルイメージングによる3次元映像の撮影

近年、複雑な情報を人間に効率よく提示する技術が求められている。現実の風景にデジタル情報を重ねて表示する技術は拡張現実 (Augmented reality: AR) 技術の一つであり、情報を3次元映像として実空間の物体との関係を含めて表示できる。AR技術は、ゲームなどのエンターテインメント分野での利用のほか、自動車での運転支援情報の表示や、工場での製品組立サポートのような産業分野での利用など、様々な分野での利用が行われている。AR技術において、シースルーディスプレイは、現実風景へのデジタル情報の重畳表示に必須のデバイスである。現在市販されているシースルーディスプレイはヘッドマウントディスプレイ型が一般的である。図 1.6 は米 Microsoft が開発した AR 用ヘッドマウントディスプレイの HoloLens である。しかし、ヘッドマウントディスプレイはユーザーが常に頭部に装着する必要があり負担となる。3次元映像を風景に重

畳表示できる AR ディスプレイを、スマートフォンやタブレットなどのフラットパネル型で実現することができれば、ヘッドマウントディスプレイを頭部へ装着する必要がなくなり、より手軽に利用することが可能になる。



図 1.6 HoloLens の外観

また、ライトフィールド技術を用いた撮影技術として、ライトフィールドカメラがある。カメラ内部は、レンズアレイとイメージセンサーを組み合わせたインテグラルイメージングカメラの構成になっている。ライトフィールドカメラは、写真のピントを後から変更できるリフォーカス機能が実現できる。米 Lytro 社は 2014 年にライトフィールドカメラである Lytro を発売し、2016 年にはその後継機である Lytro Illum を発売している。図 1.7 に示すのは Lytro Illum の外観である。図 1.8 に示した例は Lytro Illum の画面上でリフォーカス処理を行った結果である。同図の左側では手前の被写体にピントが合っていて、同図の右側では遠方の被写体にピントが合っていることが分かる。



図 1.7 Lytro Illum の外観

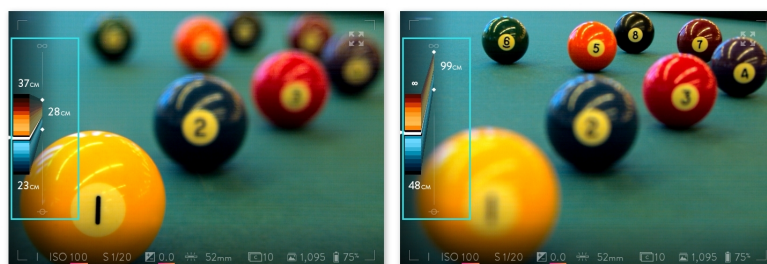


図 1.8 Lytro Illum によるリフォーカス

一方で、世界的なセキュリティに対する要求の高まりや、人工知能の急速な発展に伴ってカメラの重要性はますます高まっている。セキュリティ用途においては、カメラが撮影した映像は重要な証拠となりうるほか、顔認証システムの実現などその利用目的は多岐にわたる。また、人工知能による画像処理では、学習の過程で大量の画像情報を必要とする。最近、カメラの高解像度化や高フレームレート化、高ダイナミックレンジ化など、電子的性能の向上は著しい。しかし、カメラの水平垂直方向の視線移動であるパンチルトは、図 1.9 の例に示すように、従来からサーボモーター等により機械的に回転させる機構が用いられている。そのため、パンチルトを高速に実現することは困難である。また、カメラの焦点合わせも機械的機構が要求される機能であり、高速な実現が難しい。今後は、カメラの高速なパンチルトと高速な焦点合わせ実現方法の開発が重要になると考える。



図 1.9 機械的なパンチルト機構を備えたカメラ

1.2 研究目的

本研究は、ライトフィールド技術を用いた表示技術と撮影技術の両面から研究を行う。本研究の目的は以下の2点である。

- (1) 表示技術としては、AR ディスプレイを、ライトフィールド技術を用いてスマートフォンやタブレットのようなフラットパネル型で実現する方法を提案する。さらにライトフィールドAR ディスプレイにおいて、立体像で背景を遮蔽することを実現し、また、風景を近くや遠くへ結像することにより視力補助を可能にする。
- (2) 撮影技術としては、ライトフィールド技術を用いて、高速にパンチルトが行えるカメラの実現について研究を行う。さらに、リフォーカス機能を導入する方法について研究する。

1.3 本論文の構成

本論文は、以下のように構成される。第2章では、ライトフィールド技術を用いた表示・撮影技術について述べるとともに、本論文の関連研究について説明する。第3章では、ライトフィールド技術を用いてAR ディスプレイをフラットパネル型で実現する方法を説明する。第4章では、ライトフィールド技術を用いたAR ディスプレイにおいて、背景遮蔽機能を実現する方法を説明する。第5章では、ライトフィールド技術を用いたAR ディスプレイにおける背景結像機能について説明する。第6章では、ライトフィールド光学系をもとに高速パンチルトシステムを実現する方法を説明する。第7章では、高速パンチルトシステムにリフォーカス機能を導入して、高速パンチルトライトフィールドカメラを実現する方法を説明する。第8章では、本研究の今後の展望を論じる。最後に、第9章で本研究を総括する。

第2章 関連研究

本研究では、ライトフィールド技術としてインテグラルイメージングを用いた表示技術と撮影技術について研究を行う。この章では、本研究に関連する表示技術として、従来のインテグラルイメージングディスプレイおよびAR用ディスプレイの研究について説明する。また、本研究に関連する撮影技術として、従来の高速パンチルトカメラおよびライトフィールドカメラの研究について説明する。

2.1 インテグラルイメージングディスプレイ

インテグラルイメージングディスプレイにおける3次元映像の解像度は、レンズアレイを構成するレンズ一つが立体表示の光線1本に対応するため、レンズアレイのレンズ数と等しい。レンズアレイと組み合わせられた表示デバイス上にはレンズ数と同じ数の要素画像が表示されているが、図2.1に示すように要素画像は複数の画素から構成されており、要素画像の画素数は再生できる光線数と等しい。そのため、インテグラルイメージングディスプレイの解像度と光線数はトレードオフの関係にあり、インテグラルイメージングディスプレイの解像度は表示デバイスの解像度よりも低くなる。要素画像を構成する画素の数は数十×数十は必要であるため、インテグラルイメージングディスプレイの解像度は表示デバイスの解像度の数十×数十分の一に低下する。

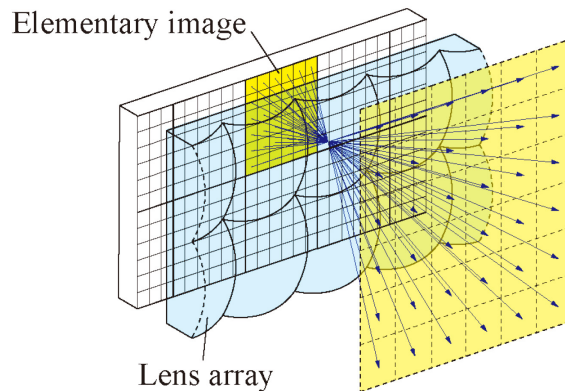


図 2.1 要素画像の構成

解像度の低下を抑えるため、NHK の Arai らは、高解像度な表示デバイスを複数組み合わせ、超高解像度な表示デバイスを等価的に実現し、インテグラルイメージングディスプレイを高解像度で実現する方法を提案している[8]。この方法では、RGB 各色に対応して 3 枚の LCOS (liquid crystal on silicon) ディスプレイを用いる。LCOS ディスプレイ 1 枚の解像度は $7,680 \times 4,320$ であり、これらをプロジェクターの光学系に組み込んで、等価的に $15,360 \times 8,640$ の解像度で要素画像群を表示する。図 2.2 にシステムの構成を示す。プロジェクターは拡散スクリーンに要素画像群を投影し、これにレンズアレイを組み合わせ、立体像を表示する。このシステムを用いて表示された 3 次元映像を図 2.3 に示す。同図(a) は表示した 3 次元映像を正面から観察した結果である。3 次元映像の解像度は 400×250 に向上した。同図(b)-(e)は表示した 3 次元映像を異なる方向から観察した結果であり、水平・垂直に視差を有していることが分かる。

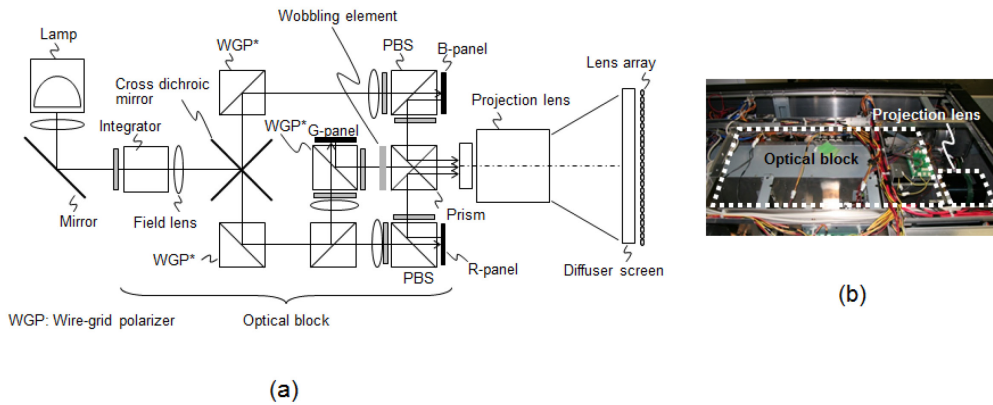


図 2.2 NHK の提案システムの構成

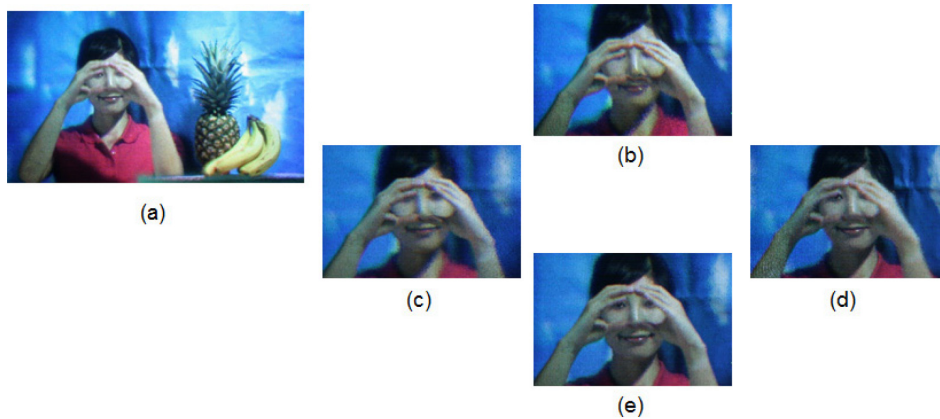


図 2.3 NHK の提案システムによる表示実験の結果

AR 技術では表示面が透明なディスプレイが必要であるため、インテグラルイメージングディスプレイの表示面を透明化する方法が提案されている。ソウル大学の Hong らは、波長選択性のあるレンズアレイを用いることで、透明な表示面をもつインテグラルイメージングディスプレイを実現する方法を提案している[9]。このレンズアレイは、レーザープロジェクターの波長に対してはレンズアレイとして機能する一方、これ以外の波長の光は透過するため、透明な表示面を実現できる。図 2.4 にシステムの外観を示す。図中で Lens-array HOE と示されているのが波長選択性のあるレンズアレイである。Beam projector と示されているのはレーザープロジェクターであり、これを用いて要素画像群を投影する。図 2.5 は、表示した 3 次元映像を異なる 5 方向から観察した結果である。3 次元映像は“SNU”の文字であり、文字ごとに奥行き位置が異なるため観察方

向に応じて視差が生じていることが分かる。実験システムの後方に置かれた立方体形状の実物体も同時に観察できていることが分かる。

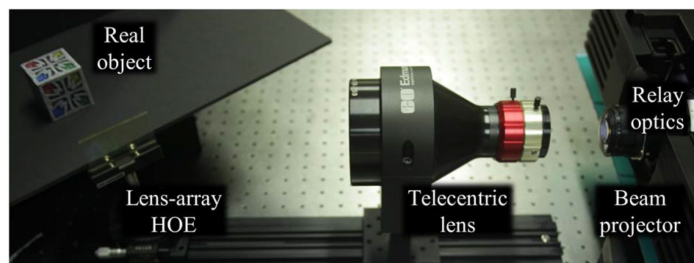


図 2.4 ソウル大学の提案システムの外観

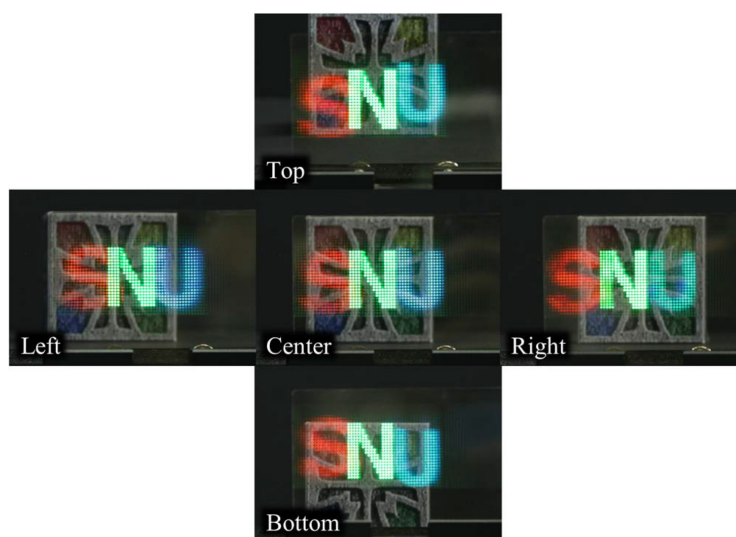


図 2.5 ソウル大学の提案システムによる表示実験の結果

2.2 ヘッドマウントディスプレイ

現在、AR 技術において、観察者に 3 次元映像を表示する手段としてはヘッドマウントディスプレイが用いられている。ここでは、AR 用ヘッドマウントディスプレイの基本的な表示原理について説明する。また、現在商品化されている AR 用ヘッドマウントディスプレイを紹介する。

まず、AR 用ヘッドマウントディスプレイの表示原理について説明する。図 2.6 に AR 用ヘッドマウントディスプレイの構成図を示す。AR 用ヘッドマウントディスプレイは、表示デバイスと結像レンズ、およびハーフミラーによって構成

される。立体表示を実現するため、右目用の光学系と左目用の光学系の 2 チャンネルの光学系により構成される。ディスプレイと結像レンズは虚像結像系を構成しており、ディスプレイに表示された画像は、結像レンズによって拡大虚像結像される。また、観察者の眼前には、ハーフミラーが眼の光軸に対して傾いた状態で置かれている。このハーフミラーにより虚像結像系の光軸が折り曲げられ、ユーザーの正面にディスプレイの虚像が観察できる。ハーフミラーは外界からの光を透過するため、ディスプレイの虚像が実風景に重畳表示され、AR 機能が実現できる。

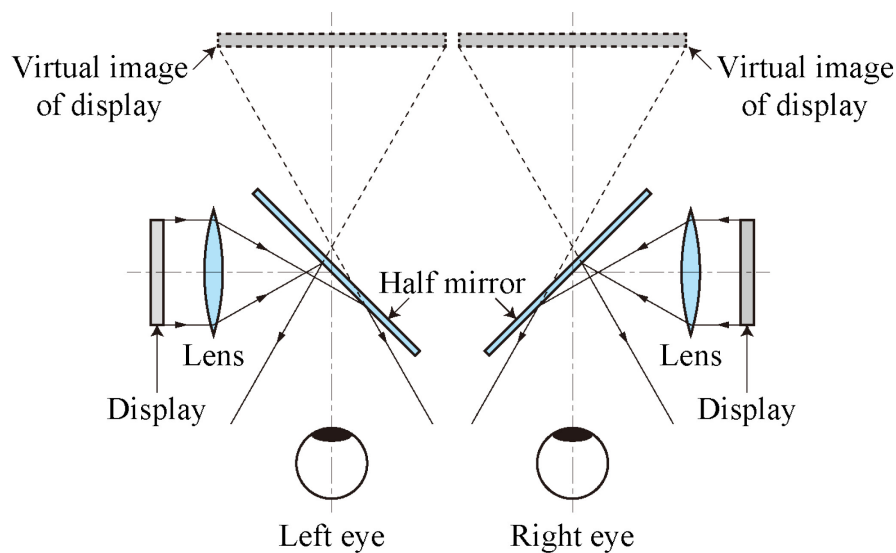


図 2.6 AR 用ヘッドマウントディスプレイの原理的な構成

AR 用ヘッドマウントディスプレイは様々なメーカーから商品化されているが、米 Microsoft の HoloLens はその先駆的な製品である (図 1.6 参照)。その後継製品として 2019 年に HoloLens2 が発売されている。図 2.7 にその外観を示す。ディスプレイデバイスとしては MEMS (micro electro mechanical system) ミラーを内蔵している。片目あたりの解像度は 2K であり、視野角は約 50°である。



図 2.7 HoloLens2 の外観

米 Magic Leap 社の Magic Leap One も AR 用ヘッドマウントディスプレイの代表的な製品の一つである。図 2.8 に同製品の外観を示す。ディスプレイデバイスとしては LCOS ディスプレイが内蔵されており、ディスプレイの光源には LED が使用されている。視野角は約 50° であり HoloLens2 と同程度である。



図 2.8 Magic Leap One の外観

ヘッドマウントディスプレイを用いることで、ユーザーは常にヘッドマウントディスプレイを装着する必要があり、負担になる。この負担が AR 用ヘッドマウントディスプレイの普及を妨げる要因となっている。

2.3 高速パンチルトカメラ

つぎに、撮影技術に関連する研究について説明する。現在のカメラ技術において、解像度やダイナミックレンジなどの電子的性能が急激に進歩している。一方で、パンチルトは機械的機構を必要とするため、性能向上が進んでいない。

ここでは、機械的機構によりカメラの高速なパンチルトを実現した研究を紹介する。図 2.9 に、カメラ自体を回転させる従来からあるパンチルト機能を示すが、低速なパンチルトしか実現できない。これを解決する方法として、東京大学の Okumura らは、カメラ自体を回転させるのではなく、2 台のガルバノミ

ラーを組み合わせることでカメラの光軸を水平垂直に偏向させることで高速なパンチルトを実現する方法を提案している[10]。図 2.10 に示すように、パン用のガルバノミラーとチルト用のガルバノミラーが独立に回転することで、高速なパンチルトを実現する。図 2.11 に実際に作製したシステムの写真を示す。このシステムを用いた高速パンチルトの実証実験として、テニスボールを撮影した実験結果を図 2.12 に示す。飛んできたテニスボールをラケットで打ち返す様子を撮影したものであるが、提案システムのパンチルト機能により、テニスボールは常にカメラの視線の中央にあることが分かる。このシステムでは、高速なパンチルトを実現した一方で、機械的機構としてガルバノミラーを用いているため、システムサイズが大型となる点や、システムの耐久性が課題である。

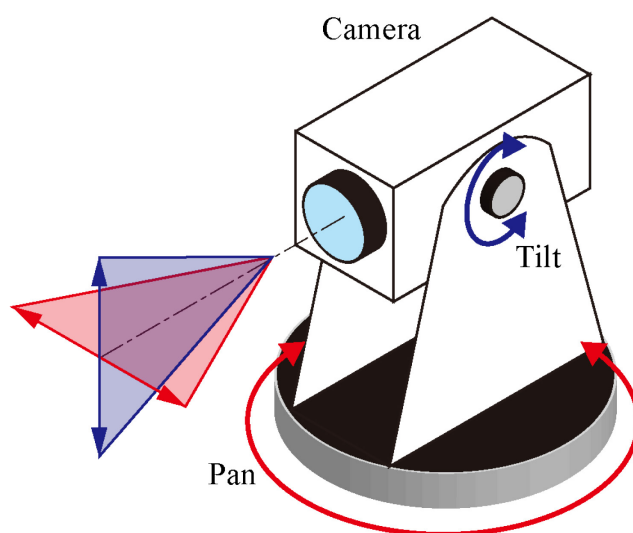


図 2.9 従来のパンチルトの実現方法

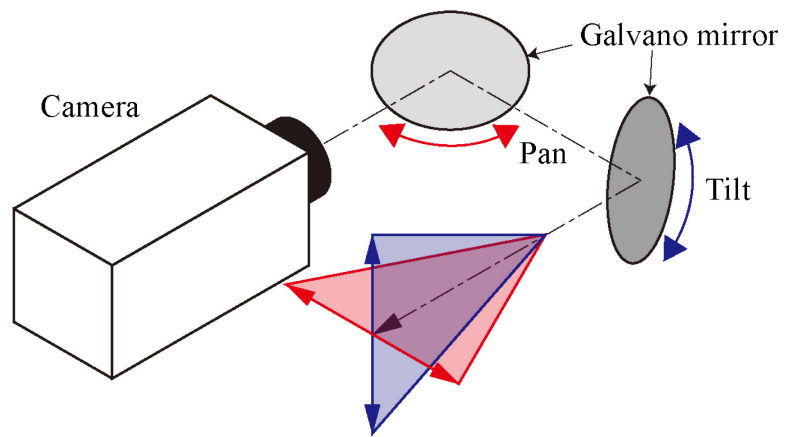


図 2.10 東京大学の提案するシステム



図 2.11 東京大学の提案システムの外観

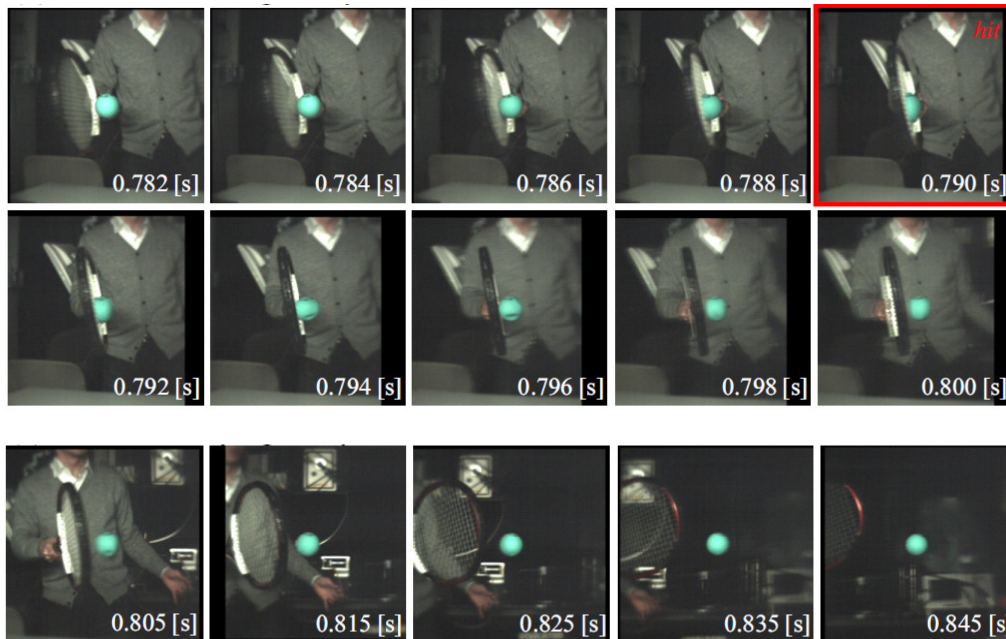


図 2.12 東京大学の提案システムによる高速パンチルト機能検証実験の結果

2.4 ライトフィールドカメラ

カメラの視線移動に加えて、カメラの焦点合わせにも機械的機構が要求される。ライトフィールドカメラを用いると機械的機構を用いることなく、計算的に焦点合わせを実行することが可能である。

ライトフィールドカメラの構成は、図 2.13 に示すようにイメージセンサーと撮像デバイスを組み合わせたインテグラルイメージングカメラの構成が用いられる。レンズアレイの焦点面に撮像デバイスを配置して要素画像群を撮影する。インテグラルイメージングディスプレイではレンズアレイのレンズ数により 3 次元映像の解像度が決まることを述べたが、インテグラルイメージングカメラでもレンズアレイのレンズ数が撮影画像の解像度を決定する。これは、レンズアレイを構成するのレンズ一つと、それに対応するイメージセンサーの 1 画素が 1 本の光線に対応するためである。レンズアレイのレンズ一つひとつに対応する撮像デバイスの画素数が記録できる光線数を決定する。そのため、インテグラルイメージングカメラは、インテグラルイメージングディスプレイと同様、高解像度な撮像デバイスが必要である。

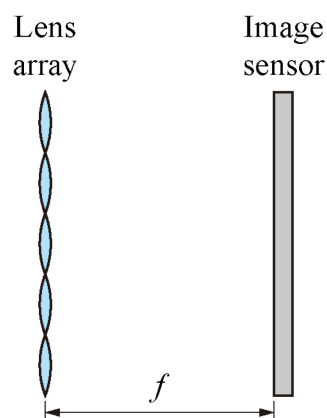


図 2.13 インテグラルイメージングカメラの原理図

インテグラルイメージングカメラにおける高解像度な撮影を可能にするため、東京大学の Neamura らは、レンズアレイとハイビジョンカメラを組み合わせたインテグラルイメージングカメラを提案している[11]。ハイビジョンカメラのイメージセンサー上にレンズアレイを組み合わせて、インテグラルイメージングの要素画像群を撮影するシステムを構築している。レンズアレイのレンズ数は 54×63 個である。図 2.14 に示したのはこのシステムを用いて撮影された要素画像群である。被写体として、奥行き位置の異なる二つの犬の置物を使用している。要素画像群から、これらの異なる奥行き位置にある物体それぞれにコンピュータでリフォーカス処理を行った結果、図 2.15 のような画像が得られている。同図の左側の写真は奥の置物にフォーカスを合わせており、右側の写真では手前の置物にフォーカスを合わせている。

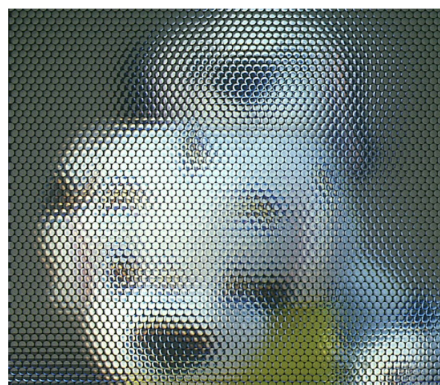


図 2.14 撮影された要素画像群



図 2.15 リフォーカス処理の結果

また、米 Lytro 社の Lytro と Lytro Illum について第 1 章で述べたが、同社の創業者である Ng らはスタンフォード大学在学中に、市販のカメラを用いてインテグラルイメージングカメラを実現する方法を提案している[12]。市販の一眼レフカメラ内部のイメージセンサーにレンズアレイを組み合わせてインテグラルイメージングカメラを実現している。図 2.16 に Ng らが実現したインテグラルイメージングカメラの外観を示す。このカメラでは、イメージセンサー上の約 $4,000 \times 4,000$ 画素の領域にレンズ数が 296×296 個のレンズアレイを組み合わせている。レンズアレイのレンズ数が多いため、Naemura らによるインテグラルイメージングカメラよりも高解像度な撮影画像が得られる。図 2.17 は撮影した要素画像群から計算機上でリフォーカス処理を行った結果である。同図左側の写真は被写体の女性の頭髪にフォーカスを合わせていて、同図右側の写真は女性の顔面にフォーカスを合わせている。このように、インテグラルイメージングカメラは機械的機構なしに計算によりピント合わせが実現できる。



図 2.16 Ng らによるインテグラルイメージングカメラの外観

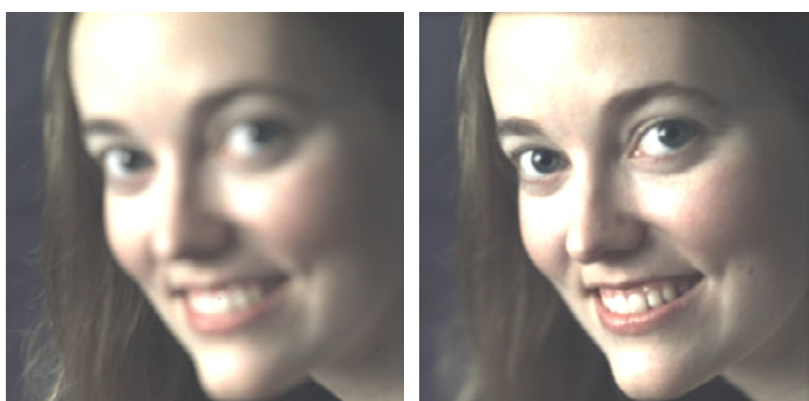


図 2.17 リフォーカス処理の結果

第3章 ライトフィールド技術を用いたARディスプレイ

本章からは、本研究で提案したライトフィールド技術を用いたARディスプレイの研究について述べる。

3.1 研究目的

本研究では、インテグラルイメージングディスプレイをシースルー化することでARディスプレイを実現する方法を提案する。インテグラルイメージングディスプレイをシースルー化するためには、まずフラットパネルディスプレイを透明化する必要がある。しかし、レンズアレイによって背景からの光線が拡散するため、単純にシースルー化することはできない。本研究では、インテグラルイメージングディスプレイにレンズアレイを追加することで透明化を行い、実風景に3次元映像を重畳表示できるシースルーインテグラルイメージングディスプレイを実現する。フラットパネル型として実現できるため、薄型軽量に実現でき、タブレットやスマートフォンの形態でAR用表示デバイスが実現できる。

これまでに、様々なタイプのAR用ディスプレイが開発されてきたが、これらはヘッドマウントディスプレイとして実現されてきた。Google glassに代表される単眼式のヘッドマウントディスプレイは、2次元映像を実風景に重畳表示できるが、単眼にしか映像を提示しないため3次元映像を表示することはできない。第2章で言及した2眼式のヘッドマウントディスプレイを用いれば、3次元映像を実風景に重畳表示することができ、実空間の物体と同じ奥行き位置に3次元オブジェクトを表示することが可能である。しかし、2眼式のヘッドマウントディスプレイで知覚される3次元映像の奥行き位置は人間の眼の瞳の位置や瞳孔間距離によって変化する。そのため、ヘッドマウントディスプレイで3次元映像を実空間に正しい奥行き位置に重畳表示するためには瞳位置の検出が必要で

ある。この問題を解決するため、右目用と左目用に撮影された現実空間の画像に立体像を電子的に重畳表示するビデオシースルー方式のヘッドマウントディスプレイが開発されている[13]。しかし、ビデオシースルーヘッドマウントディスプレイでは、カメラで撮影した映像に表示したいオブジェクトを合成して表示するため表示までに遅延が発生するほか、実空間の解像度がカメラとディスプレイによって制限される点が問題となる。

2 眼式の光学的シースルー方式のヘッドマウントディスプレイおよびビデオシースルー方式のヘッドマウントディスプレイの問題点を解決する方法として、インテグラルイメージングにもとづく光学的シースルー方式のヘッドマウントディスプレイが提案されている[14]。このヘッドマウントディスプレイは、フリーフォーム光学素子を用いて小型のインテグラルイメージングディスプレイで表示した 3 次元映像を現実空間に虚像結像して重畳表示する。インテグラルイメージングディスプレイは運動視差を有するため、瞳検出を行わずに 3 次元映像の正しい奥行き位置への重畳表示が可能である。図 3.1(a)に示したのはこのディスプレイの実験システムであり、同図(b)は要素画像群、同図(c)および(d)は 3 次元映像を実風景に重畳表示した結果である。

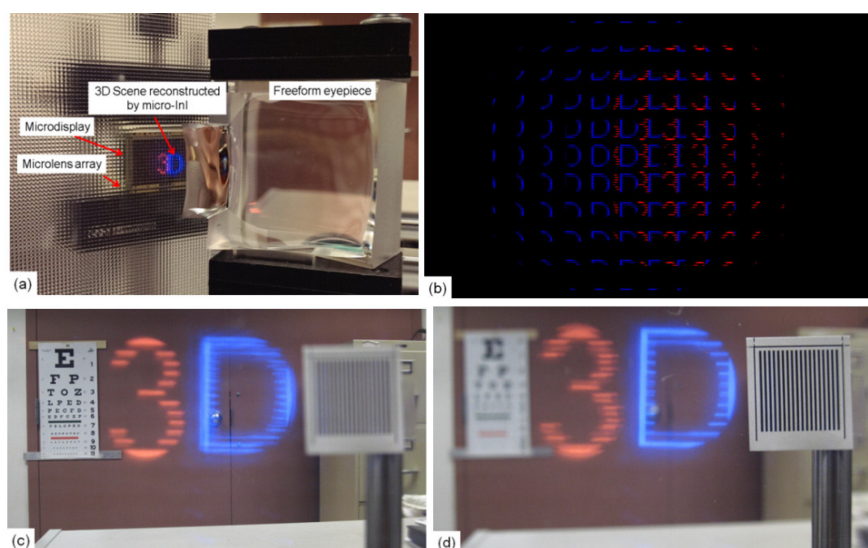


図 3.1 インテグラルイメージングにもとづくシースルーヘッドマウントディスプレイ

しかし、ここまでに説明したシースルーディスプレイはいずれもヘッドマウントディスプレイである。第 2 章でも言及したように、ヘッドマウントディスプレイはユーザーが常に装着する必要がある、この負担が AR ディスプレイの普及を妨げる要因となっている。

AR ディスプレイを、ヘッドマウントディスプレイではなく、スマートフォンやタブレットのようなフラットパネル型で実現できればより手軽な利用が可能になる。このようなフラットパネル型の表示面をもつ AR ディスプレイとしては、第 2 章で言及した Hong らによる波長選択性のあるレンズアレイを用いる方式があるが、この方式はプロジェクション光学系を必要とする。超多眼表示にもとづくウィンドシールドディスプレイもフラットパネル型の表示面をもつ AR ディスプレイとして提案されているが[15]、この方式もプロジェクション光学系を必要とする。プロジェクション光学系を必要とする方式では、システム全体が大型化する点が問題である。

この章では、インテグラルイメージングディスプレイを透明化して AR ディスプレイを実現する方法を提案する。インテグラルイメージングディスプレイはフラットパネルディスプレイとレンズアレイによって実現できるため薄型であり、これに複数のレンズアレイを追加することで透明化する。そのため、フラットパネル形状で実現できる。また、プロジェクション光学系を必要としないため、システム全体を小型で実現できる。

提案法では、インテグラルイメージングによって水平垂直に視差を有する（フルパララックス）3次元映像を実風景に重畳表示するため、観察位置が変化しても3次元映像と実空間の物体の相対的な位置関係は変化しない。また、従来の立体ディスプレイでは輻輳調節矛盾による視覚疲労が生じ、利用者の長時間の観察を妨げてきた。超多眼ディスプレイ[16][17]はこの問題を解決するために開発されてきたが、インテグラルイメージングによって生成される光線数が超多眼条件を満たす程度に増加すれば、提案するライトフィールド AR ディスプレイは輻輳調節矛盾を解決する可能性がある。

フラットパネル型のライトフィールド AR ディスプレイのプロトタイプシステムを作製し、提案法の有効性を実験により示す。

3.2 インテグラルイメージングディスプレイの透明化

本章の提案であるライトフィールド AR ディスプレイの原理であるダブル $4f$ 結像系について説明する。この結像系は複数のレンズアレイによって構成される。この結像系の構成は、複数のレンズアレイを用いるという点において Fuchs らが以前に提案している 6D reflectance field display [18] と類似している。これは、インテグラルイメージングディスプレイにおいて、照明光の入射方向によって 3 次元映像のハイライトが変化するというものである。しかし、このディスプレイはシースルー機能をもたない。また、Fuchs らの提案ではレンズピッチの異なるレンズアレイを複数使用しているが、本研究で提案する結像系では同一のレンズピッチをもつレンズアレイを複数使用する点で異なっている。

一般的なインテグラルイメージングディスプレイの構成を図 3.2(a) に示す。レンズアレイを構成する一つひとつのレンズは、要素画像に対応する。要素画像上の各画素から出射した光線はレンズによって屈折されるため、各光線は異なる方向に進行する。インテグラルイメージングディスプレイを透明化するためには、まず表示デバイスとして透過型液晶ディスプレイや透過型 OLED ディスプレイを用いる必要がある。しかし、表示デバイスを透過型のものに単純に置き換えただけでは透明化を実現することはできない。これは、レンズアレイ上の各レンズに入射した実空間からの光線が収束されるため、観察者は図 3.2(b) に示すように拡散した実空間からの光線を見ることになるためである。

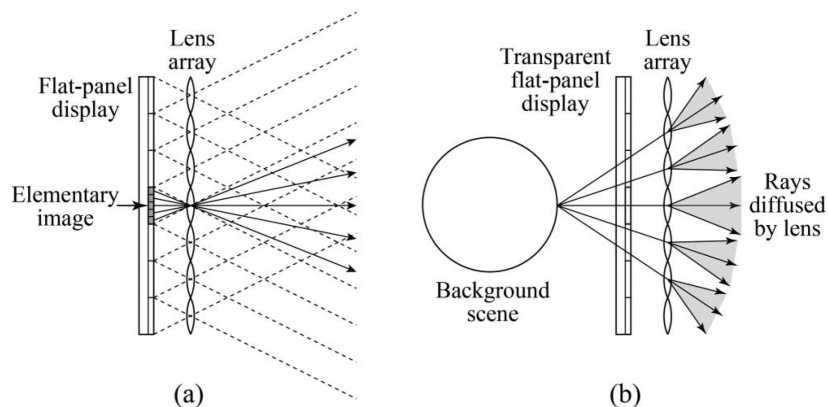


図 3.2 一般的なインテグラルイメージングディスプレイ：
 (a) 光線再生による立体像の生成、(b) 実空間からの光線の拡散

そこで、実空間からの光線の状態をインテグラルイメージングディスプレイの前面に再現することで透明化を実現する。光線状態を再現するために、複数のレンズアレイを加えて、レンズアレイを構成する一つひとつのレンズが結像系を構成するようにする。各レンズアレイを構成するレンズのうち、対応する一つひとつのレンズが構成する結像系を要素結像系と呼ぶことにする。図 3.3 に要素結像系を示す。同図(a)に示すのは二つのレンズからなる $4f$ 結像系である。この結像系では倒立像が得られる。正立像を得るために、この結像系を二つ接続したダブル $4f$ 結像系を同図(b)に示す。このダブル $4f$ 結像系はよりレンズの少ない結像系で置き換えることができる。同図(c)は単純化したダブル $4f$ 結像系である。図 3.3(b)のダブル $4f$ 結像系における中心部の 2 枚のレンズを、もとのレンズの半分の焦点距離をもつ 1 枚のレンズで置き換えることで、同図(b)と等価な結像系を 3 枚のレンズで構成することができる。

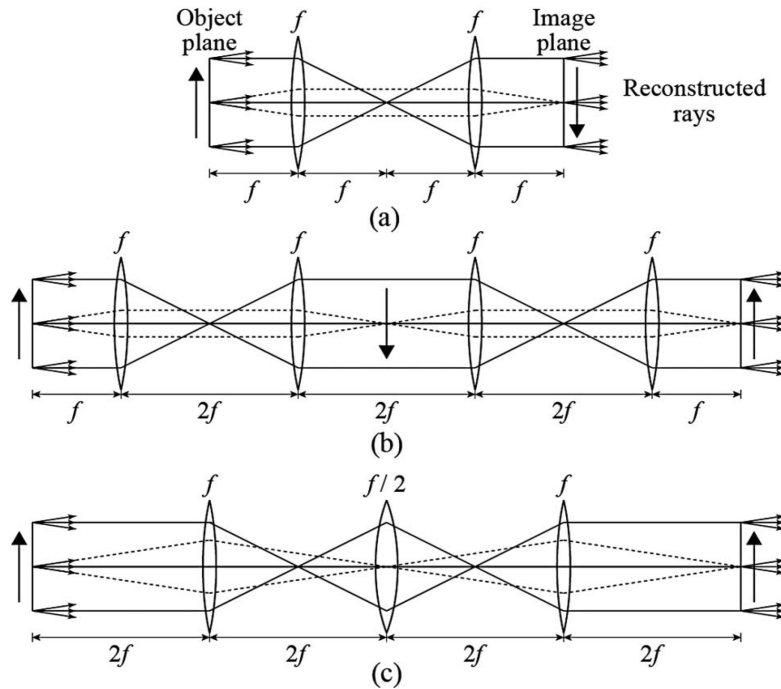


図 3.3 要素結像系：

(a) $4f$ 結像系、(b) ダブル $4f$ 結像系、(c) 単純化したダブル $4f$ 結像系

図 3.4 に示すのは提案するライトフィールド AR ディスプレイの構成である。このシステムは 3 枚のレンズアレイと透過型フラットパネルディスプレイおよび光隔壁板から構成される。レンズアレイ A、B および C は図 3.3(c) に示すダブル $4f$ 結像系を構成し、実空間から入射した光線群は、この結像系の作用によってレンズアレイによって拡散されることなくシステムを透過してシースルー機能が実現される。透過型フラットパネルディスプレイとレンズアレイ C はインテグラルイメージングディスプレイを構成し、立体像の光線を生成する。実空間からの光線に立体像の光線が加わることで、実風景に立体像が重畳表示され AR 機能を実現する。光隔壁板は実風景の多重像が発生することを防止する機能を持ち、レンズアレイ A と B の間に配置される。これは、実空間から入射した光線がレンズアレイ A 上の一つのレンズで屈折して、レンズアレイ B 上の隣接する複数のレンズに入射すると実風景の多重像が発生するため、このような光線の漏れを防止するためである。

レンズアレイ A およびレンズアレイ C の焦点距離は同一でありこれを f とすると、レンズアレイ B の焦点距離は $f/2$ である。また、レンズアレイのレンズピッチを p とする。この場合、立体像の視域角は、

$$2 \tan^{-1}(p/2f) \quad (3.1)$$

で与えられる。また、実風景の視域角は、

$$2 \tan^{-1}(p/4f) \quad (3.2)$$

であり、立体像の視域角の約 1/2 である。

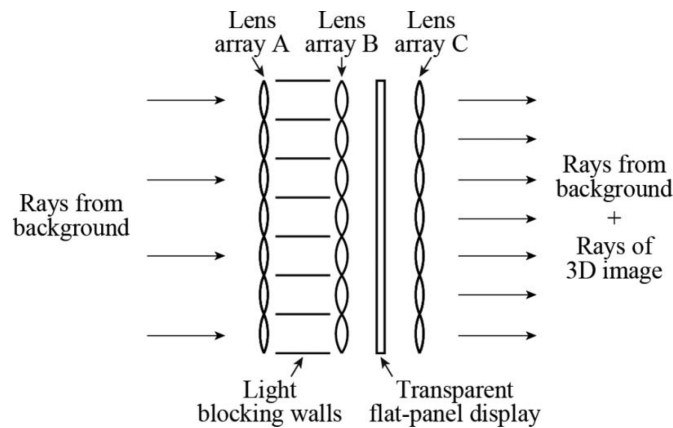


図 3.4 ライトフィールド AR ディスプレイの構成

3.3 実験装置

提案したライトフィールド AR ディスプレイにおけるシースルー機能と背景への立体像の重畳表示機能を実験により検証した。この実験では、透過型フラットパネルディスプレイの代わりに、要素画像群を印刷した透明フィルムを用いた。これは、高解像度な透過型フラットパネルディスプレイが市販されていなかったためである。

図 3.5 に実験システムの構成図を示す。実験システムは 4 枚の同一のレンズアレイと光隔壁板、および透明フィルムで構成される。レンズアレイには、レンズピッチ 1.0 mm、焦点距離 3.3 mm、サイズ 152 mm×152 mm のものを用いた

(#630, Fresnel technologies Inc.)。図 3.4(c)で示した、レンズアレイ A、C の 1/2 の焦点距離をもつレンズアレイ B は、図 3.5 に示すようにレンズアレイ 2 と 3 の凸面を密着して組み合わせて実現した。レンズアレイ 2 と 3 を正確に位置合わせするため、アルミの薄板に 4×2 個の穴をレンズピッチと同一ピッチで開けたアライメント板を作製し、レンズアレイの 4 辺に挟み込んだ。レンズアレイの上部および下部はレンズアレイ同士の位置合わせに用いたため、表示面のサイズは 152 mm×142 mm となった。背景および立体像の視域角の計算値は、式(3.1) および式(3.2)より、それぞれ 8.7°および 17.2°である。光隔壁板は、光造形型 3D プリンターを用いて作製した。隔壁の高さは 2.0 mm である。隔壁の厚さは、光の透過率を確保するため可能な限り薄いほうが望ましいが、3D プリンターの最小作成精度による制限のため 0.2 mm となった。これにより、光隔壁板の開口率は 64%となった。実験システムの透過率の実測値は 50.4%であった。要素画像群を印刷した透明フィルムにはカラーリバーサルフィルムを用いた。印刷の解像度は 1,016 dpi で、要素画像 1 個当たりの画素数は 40×40 画素である。

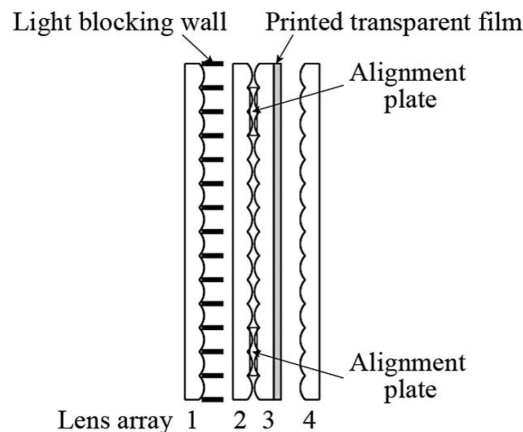


図 3.5 実験システムの構成

3.4 実験結果

まず、ライトフィールド AR ディスプレイのシースルー機能を確認する実験を行った。実験システムを通して、その後方に配置した実物体を観察した結果を図 3.6 に示す。比較のため、単一のレンズアレイの後方に実物体を配置してこ

れを観察した結果も同図に示す。実物体として文字列”SEE-THROUGH”を印刷した紙を用いた。この実物体を実験システムおよび単一のレンズアレイの後方 50 mm から 300 mm の距離に配置した。図 3.6(a, d, g, j)は単一のレンズアレイの後方に実物体を配置して観察した結果であり、実物体はボケてしまい文字列を読み取ることはできない。同図 (b, e, h, k) および同図 (c, f, i, l) は実験システム背後に実物体を配置して観察した結果である。前者は光隔壁板を取り付けていない実験システムを使用した場合の実験結果であり、後者は光隔壁板を取り付けた実験システムを使用した場合の実験結果である。いずれの場合も、実物体を観察できていることが分かる。実験システムと実物体との距離が大きくなると、観察される実物体にボケとひずみが観察された。ボケはレンズの収差によるものであると考えられる。ひずみはレンズアレイの位置合わせにずれが生じていることによるものであると考えられる。光隔壁板を取り付けていない実験システムにおいては、多重像が発生している影響で観察された実物体のコントラストが低下している。一方、光隔壁板を取り付けたシステムでは多重像が抑制されているが、観察された実物体の明るさは低下した。光隔壁板を取り付けたシステムにおいても弱い多重像が観察されたが、これは光隔壁板の高さがレンズアレイ 1 と 2 の間隔よりも小さいためである。

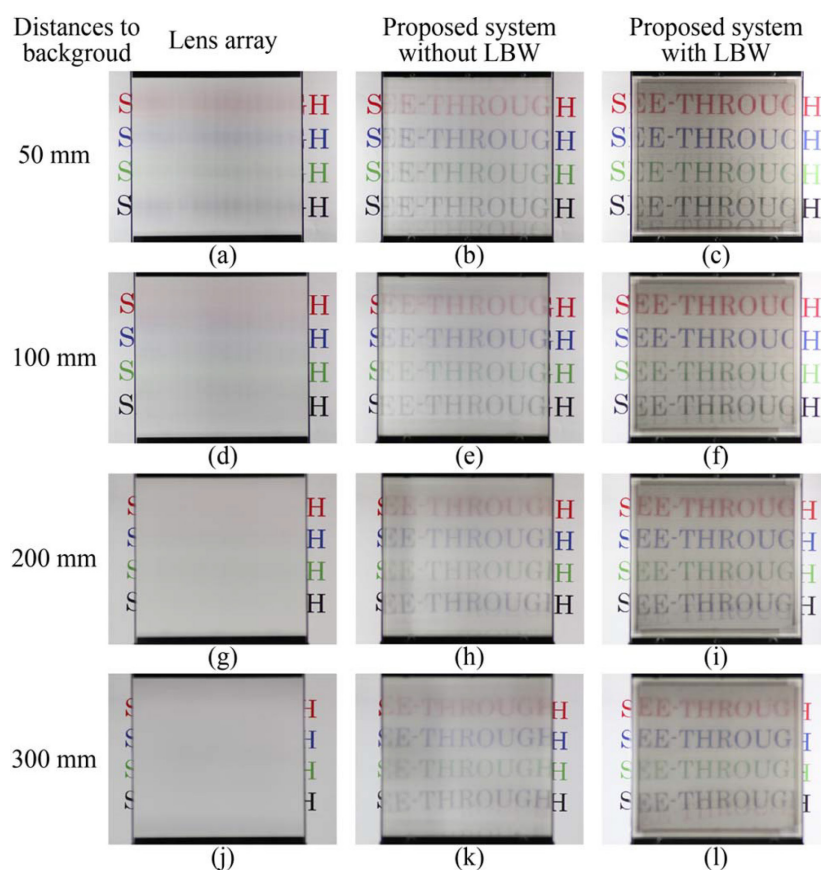


図 3.6 シースルー機能の実験結果：

(a, d, g, j) 単一のレンズアレイ、(b, e, h, k) 光隔壁板を取り付けていない実験システム、(c, f, i, l) 光隔壁板を取り付けた実験システム (実物体までの距離：(a-c) 50 mm、(d-f) 100 mm、(g-i) 200 mm、(j-l) 300 mm)

図 3.7 に、光隔壁板を取り付けた実験システムのレンズアレイ 4 を拡大した画像を示す。各要素結像系内に小さい像が観察できる。この結果は、実物体の解像度がレンズアレイのレンズ数によって制限されていないことを示している。すなわち、実物体はレンズアレイによって空間的にサンプリングされない。



図 3.7 実験システムにおけるレンズアレイ 4 を拡大した画像（実物体までの距離：50 mm）

図 3.8 に、光隔壁板を取り付けた実験システム後方に実物体としてミニカーを配置して観察した結果を示す。実物体は実験システムの後方 50 mm に配置し、これを実験システム前方の異なる 5 方向から撮影した。観察方向に応じて、実物体の見え方が異なっていることが分かる。特に、実物体表面の光沢の変化が顕著である。この結果から、シースルー画像が水平および垂直に視差を有していることが分かる。しかし、実物体の多重像が視域を制限したため、実風景の視域角は 4.3° となった。また、実際に作製した光隔壁板の開口ピッチがレンズピッチよりもわずかに小さかったため、斜めの方向から観察した場合に黒色の領域が生じた。また、入射角の大きい光線は中央のレンズアレイ 2 および 3 によってケラレた。

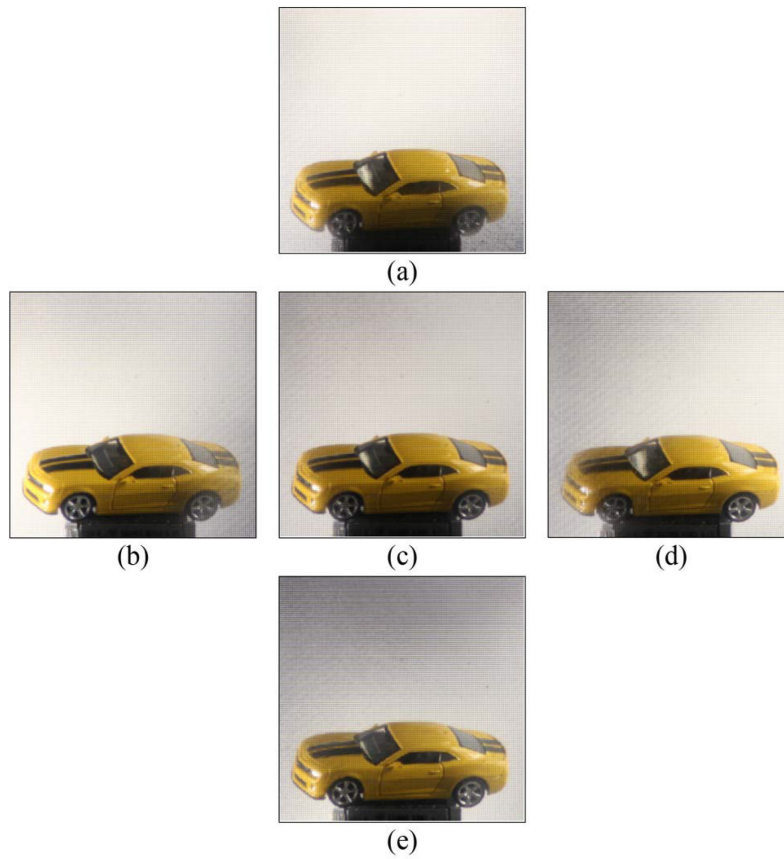


図 3.8 実験システムを通して観察した実物体：
 (a) 上から撮影、(b) 左から撮影、(c) 正面から撮影、(d) 右から撮影、(e)
 下から撮影

次に、実物体への立体像の重畳表示機能を確認する実験を行った。立体像を表示するため、要素画像群を印刷した透明フィルムをレンズアレイ 4 の焦点面に配置した。実物体に立体像を重畳表示し、これを異なる 5 方向から観察した結果を図 3.9 に示す。実物体には図 3.8 に示したものと同様のものを用いた。立体像は文字の”3D”および”IMAGE”であり、それぞれ実験システムの前方 50 mm と後方 50 mm の位置に表示されている。実物体は立体像の”IMAGE”とほぼ同じ奥行き位置に配置されているため、これらの相対的な位置関係は観察方向を変化させてもほとんど変わらなかった。一方で、表示されている奥行き位置の異なる”3D”と”IMAGE”の相対的な位置関係は観察方向に応じて変化した。観察方向を水平および垂直方向に変化させると、”3D”も水平および垂直方向に動くことが分かる。立体像の視域角の実測値は 14.3° であり、実風景の視域角の

方が小さかった。そのため、実験システム全体としての立体像の視域角は、実風景の視域角 4.3° によって制限される。

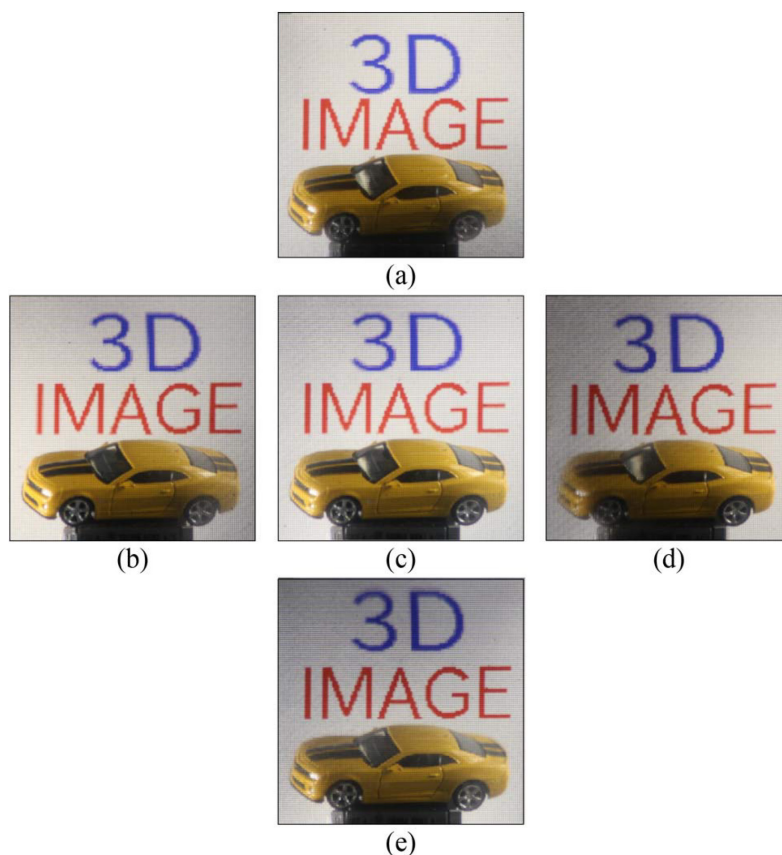


図 3.9 実物体への立体像の重畳表示：

(a) 上から撮影、(b) 左から撮影、(c) 正面から撮影、(d) 右から撮影、(e) 下から撮影

3.5 考察

実風景の視域角は、ダブル $4f$ 結像系を屈折率分布型 (GRadient INdex: GRIN) レンズアレイにより構成することで拡大できる。GRIN レンズは硬性内視鏡のリレー光学系を構成する際によく用いられるが、これは GRIN レンズを用いることで大きい光線の入射角を実現できるためである。

この章の実験では、透過型フラットパネルディスプレイの代わりに透明フィルムを用いたが、実際に透過型のディスプレイを使用した場合は、その画素構

造による回折のため背景物体の多重像が生じる。回折の効果は、ディスプレイの画素ピッチが小さくなるほど、また開口率が低下するほど顕著になる。この効果により観察可能な背景物体までの距離が制限される。また、透過型フラットパネルディスプレイとして液晶ディスプレイ（LCD）を用いると、偏光板やカラーフィルターの影響により、提案システムの透過率は低下する。フィールドシーケンシャルカラーLCD パネルを用いるとカラーフィルターによる透過率の低下が生じないため、提案システムの透過型ディスプレイとして適している。

また、要素画像群を印刷した透明フィルムを使用した。フィルム自体は発光しないため、背景からの光とシステム正面からの光によってフィルムを照明した。このようにパッシブなディスプレイを用いた場合、立体像の輝度分布は照明の輝度分布に依存することになる。そのため、システムに用いる透過型ディスプレイには自発光型のディスプレイが適している。

立体像が表示されている奥行き位置を定量的に評価する方法としては、カメラを用いて立体像のコントラストが最も高くなる位置を求め、これを実物体の奥行き位置と比較して測定する方法が考えられる。しかし、今回の実験では立体像の解像度が低く、カメラのピントを変化させても立体像のコントラストがほとんど変化しなかったためこのような評価は行わなかった。

3.6 本章のまとめ

本章では、インテグラルイメージングディスプレイを透明化することで、ライトフィールド AR ディスプレイをフラットパネル型で薄型軽量に実現する方法を提案した。提案システムは、3枚のレンズアレイと透過型フラットパネルディスプレイ、および光隔壁板から構成される。実験システムを作製して、実風景に立体像を重畳表示する実験を行い、提案法の有効性を示した。

第4章 ライトフィールドARディスプレイにおける背景遮蔽

4.1 研究目的

従来のAR技術では、背景が3次元映像に透けて見えることが問題であった。これを光学的に解決するためには、複雑な光学系が必要であった。本研究では、3枚のレンズアレイで対称インテグラルイメージング光学系を構成し、背景遮蔽用のマスクパターンを表示するディスプレイを追加することで背景遮蔽機能を光学的に実現する方法を提案する。

3次元映像によって、その背後にある実空間の物体を遮蔽する背景遮蔽機能は、AR用表示デバイスにおける課題の一つであり、多くのAR用表示デバイスで実現できていない。図4.1(a)に、背景遮蔽機能をもたないAR用表示デバイスによって3次元映像を実空間の物体に重畳表示した状態を模式的に示した。背景遮蔽機能をもたないAR用表示デバイスでは3次元映像が半透明であるため、3次元映像の表示位置よりも後方にある実空間の物体も同時に観察される。これは、ハーフミラーなどのコンバイナーを用いて3次元映像を実風景に重畳表示する一般的な構成のAR用表示デバイスや、第3章で提案したライトフィールドARディスプレイに共通する問題である。同図(a)に示すように、背景遮蔽機能がない場合は3次元映像に背景が透けて見えるため、3次元映像と実空間の物体の前後関係の知覚が難しくなる。そのため、AR用表示デバイスにおける背景遮蔽機能の欠如は、3次元映像の実在感を低下させる。図4.1(b)に示すように、3次元映像による背景遮蔽機能が実現できれば、立体像の実在感が向上する。Azumaも同様にARアプリケーションにおける背景遮蔽機能の重要性を指摘している[19]。

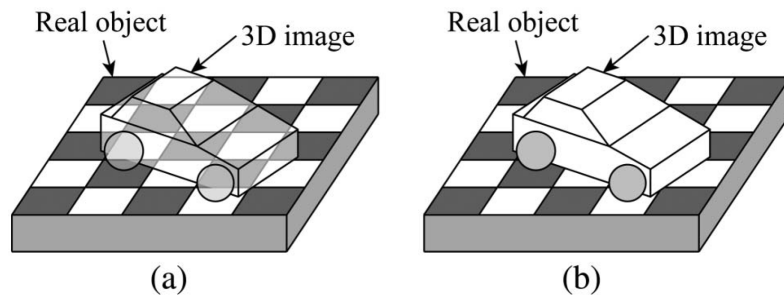


図 4.1 AR アプリケーションにおける背景遮蔽機能の効果：
 (a) 背景遮蔽機能がない場合、(b) 背景遮蔽機能がある場合

AR 用表示デバイスにおいて背景遮蔽機能を実現する容易な手法として、ビデオシースルー型のヘッドマウントディスプレイを用いることが考えられる。この場合、ビデオカメラで撮影した右目用と左目用の実風景に 3 次元映像を電子的に重畳表示することで背景遮蔽機能を実現できる。また、**Takeya** らはプロジェクション型のインテグラルイメージングディスプレイにおいて、背景遮蔽を実現するビデオシースルー型のディスプレイを提案している[20]。しかし、第 3 章でも言及したように、ビデオシースルー型の AR 用表示デバイスでは実風景の解像度がビデオシステムによって制限されるほか、画像表示における遅延が生じる。

光学的に背景遮蔽機能を実現する方法として、**Kiyokawa** らは、背景遮蔽機能を有する 2 眼式の光学的シースルーヘッドマウントディスプレイを提案している[21]。このヘッドマウントディスプレイは、図 4.2 に示すように映像を表示する LCD パネルと、映像に重なる実風景を遮蔽するためのマスキング用の LCD パネルを内蔵した光学系を、右目用と左目用に 2 チャンネル有する。光学系の構成が複雑であり、システム全体が大型で重い点が課題である。より軽量の背景遮蔽機能を有する AR 用表示デバイスとしてとして、**Maimone** と **Fuchs** は、マルチレイヤー型の立体ディスプレイと光シャッターで構成されるヘッドマウントディスプレイを提案している[22]。このディスプレイでは、背景遮蔽機能を実現するために立体像と背景を遮蔽するパターンを交互に順次表示する時分割方式を用いている。しかし、立体像と背景遮蔽パターンは時分割表示であるため、

立体像を表示している期間は背景を遮蔽できないため、完全に背景を遮蔽することはできない。Maimoneらは、LCDパネルと点光源アレイによって構成され、広い視野角をもつ3次元映像を表示できるヘッドマウントディスプレイにおいて背景遮蔽機能を実現する方法も提案している[23]。しかし、このディスプレイでも背景遮蔽機能は時分割表示によって実現されており、背景の完全な遮蔽は実現できていない。

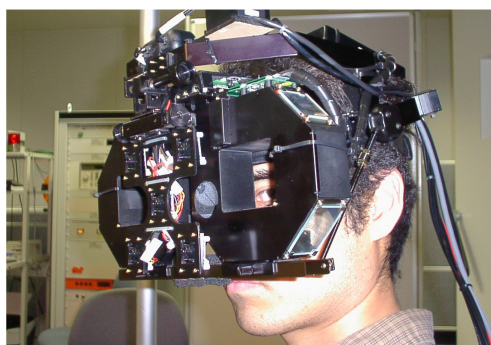


図 4.2 背景遮蔽機能を有する2眼式ヘッドマウントディスプレイの一例

本研究では、第3章で提案したフラットパネル型のライトフィールドARディスプレイの光学系に、実空間からの光線を遮蔽するためのマスクパターンを表示するLCDパネルを1枚加えたシンプルな光学系により、立体像による背景遮蔽機能を光学的に実現する方法を提案する。第3章で作製したプロトタイプシステムを改造した実験システムを用いて、提案法の有効性を検証する。

4.2 マスクパターンによる背景光線の選択的遮蔽

本研究で提案する、背景遮蔽機能を有するライトフィールドARディスプレイの光学系の構成を図4.3に示す。第3章で提案したライトフィールドARディスプレイの光学系に、透過型ディスプレイであるディスプレイ2を新たに加えた構成になっている。ディスプレイ2はレンズアレイ2の焦点面に位置している。この光学系は、二つのインテグラルイメージングディスプレイをレンズアレイ3によって結合した対称インテグラルイメージング光学系である。

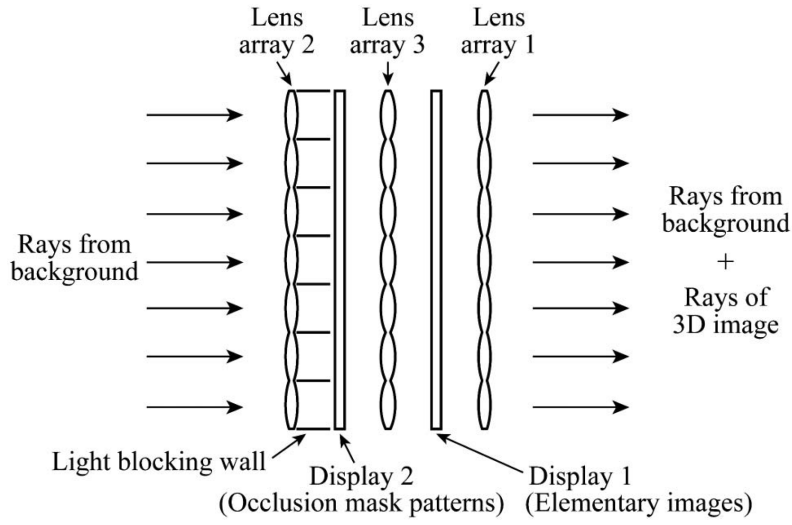


図 4.3 シースルー立体ディスプレイにおける背景遮蔽機能を実現する対称インテグラルイメージング光学系

この光学系の機能を、マトリックスによる光線伝搬解析によって求めた[24]。ディスプレイ 2 から 1 までの移行マトリックス S_c を求めると次のよう表すことができる。

$$S_c = T_f L_{f/2} T_f \quad (4.1)$$

ただし、 T_f は距離 f での光線の伝搬に対応するマトリックスであり、次式で表される。

$$T_f = \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

また、 $L_{f/2}$ はレンズアレイ 3 のレンズマトリックスであり、次式で表される。

$$L_{f/2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/f & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

以上から S_c は次のように求まる。

$$S_c = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2/f & -1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

この行列の (1, 1) 成分が-1 で (1, 2) 成分が 0 であるため、ディスプレイ 2 のスクリーンはディスプレイ 1 のスクリーンに等倍で倒立して結像される。

背景遮蔽機能を実現するために、ディスプレイ 2 には背景からの光線を選択的に遮断するマスクパターンを表示する。式(4.4)に示したように、ディスプレイ 1 のスクリーンは、レンズアレイ 3 によってディスプレイ 2 のスクリーンと共役の関係にある。そのためディスプレイ 2 に表示するマスクパターンは、ディスプレイ 1 に表示する各要素画像を上下左右に反転させ、さらに要素画像中の非透明な画素を黒色の画素で置換して図 4.4 のように生成する。このマスクパターンにより、背景からの光線のうち、立体像の光線に重畳するものを選択的に遮断することができる。

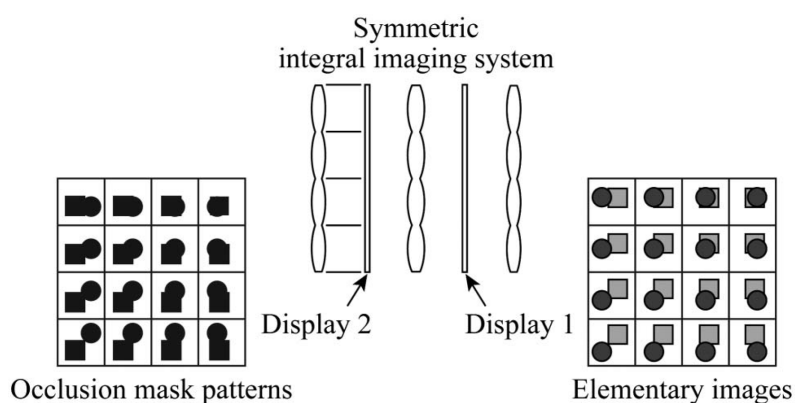


図 4.4 マスクパターンの生成

ディスプレイ 1 として、LCD パネルのようなパッシブなディスプレイを使用した場合、透過型のバックライトを組み合わせる必要がある。これは、ディスプレイ 2 に表示したマスクパターンによって背景からの光線が遮断されるため、ディスプレイ 1 の立体像の光線を生成する画素が照明されないためである。Amazon Kindle のような電子ペーパーを搭載した電子書籍リーダーに用いられている透過型のフロントライトを利用することも可能である。これらの透過型バックライトおよびフロントライトは一般的に、アクリル等の透明な薄いプレートに全反射条件を乱す微細構造を設けた構造になっている。このプレートの端面から光を入射させることで、バックライトもしくはフロントライト

として機能する。ディスプレイ 1 に OLED ディスプレイのような自発光型のディスプレイを使用すれば、照明のためのデバイスは不要である。

ディスプレイ 1 とディスプレイ 2 に LCD パネルを用いた場合、ディスプレイ 1 の偏光子とディスプレイ 2 の検光子の偏光方向は同一である必要がある。この場合でも、偏光子により 50%の光は損失となる

立体像を LCD パネルでカラー表示する場合、第 3 章でも言及したように、カラーフィルターによる光の損失を避けるため、ディスプレイ 1 はフィールドシーケンシャル方式の LCD パネルが適している。この場合、フロントライトもしくはバックライトは RGB の 3 色で順次発光する。カラーフィルターを用いる一般的な LCD パネルを使用すると、カラーフィルターにより 1/3 以上の光は損失となる。

4.3 実験装置

本章の提案を検証するために実験を行った。実験システムの構成を図 4.5 に示す。同一の平凸レンズアレイを 4 枚使用し、そのうち 2 枚は外側の 2 枚のレンズの半分の焦点距離をもつ中央部のレンズアレイ（レンズアレイ 3）を構成するために組み合わせた。本章の実験でも、第 3 章と同様に高解像度な透過型ディスプレイが市販されていなかったため、透明フィルムに要素画像群およびマスクパターンを印刷したものをディスプレイ 1 およびディスプレイ 2 として用いた。要素画像を印刷した透明フィルムの照明にはフロントライトを用いた。

実験システムは第 3 章で作製したプロトタイプシステムを改造して作製したため、使用したレンズアレイは第 3 章のものと同一である。レンズピッチ p は 1.0 mm、焦点距離 f は 3.3 mm であり、サイズは 152 mm×152 mm である。この実験では、透過率を向上させるため、レンズアレイに反射防止コーティングを施した。

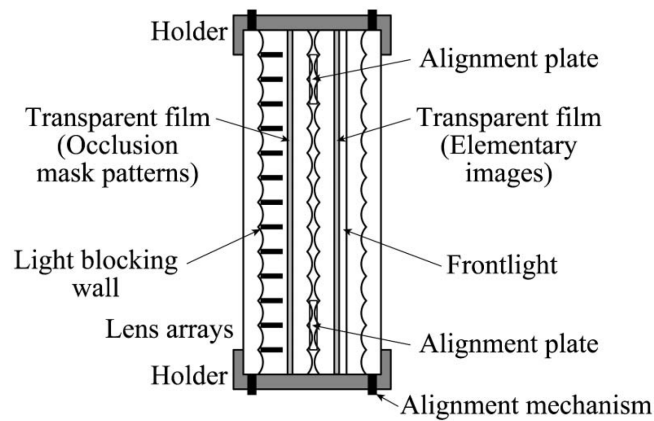
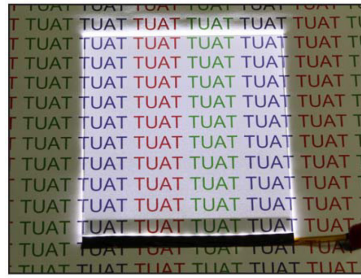


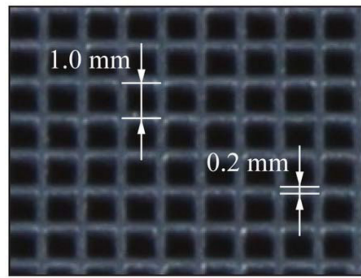
図 4.5 実験装置

要素画像群とマスクパターン群は熱溶融プリンターを用いて 600 dpi の解像度で印刷した。この場合、レンズアレイを構成する一つのレンズに対応する要素画像およびマスクパターンは 24×24 画素で構成される。フロントライトには、厚さ 0.4 mm のアクリル板の片面に透明で微細なドットパターンを施したものを使用した。白色 LED アレイを、このアクリル板のエッジの 1 辺に取り付けて光を入射させた。作製したフロントライトを図 4.6(a)に示す。

光隔壁板は、第 3 章の実験と同様に光造形型 3D プリンターを使用して作製した。隔壁板の高さは 3.0 mm とし、壁ピッチは 1.0 mm とした。壁面の厚さは、光利用効率を可能な限り高くするため薄いほうが良いが、3D プリンターの最小作成精度の制限により 0.2 mm となったのは前章の実験と同様である。そのため、光隔壁板の開口率は 64%である。図 4.6(b)に、作製した光隔壁板の構造を拡大したものを示す。



(a)



(b)

図 4.6 実験システムの構成要素：
(a) フロントライト、(b) 光隔壁板

レンズアレイおよび他の構成要素の正確な位置合わせを行うため、ホルダーを設計し作製した。このホルダーは、外側 2 枚のレンズアレイの位置合わせのための微調機構を備えている。各レンズアレイはそれぞれの 4 辺を用いて固定したため、有効なスクリーンサイズは 146 mm×146 mm となった。図 4.7 に作製した実験システムを示す。



図 4.7 作製した実験システム

4.4 実験結果

まず、改造したプロトタイプシステムのシースルー機能を確認した。図 4.8 に、要素画像群・マスクパターンを印刷したフィルムを組み込んでいない実験システムを通して実物体を観察した結果を示す。実物体としてミニカーと文字を印刷した紙を使用し、それぞれを実験システムの後方 50 mm と 150 mm の位置に配置した。実験結果は異なる 5 方向から撮影した。シースルー画像は水平・垂直ともに視差があることが分かる。同図(f)に示した拡大した画像を見ると、各レンズ内に像を観察することができ、シースルー画像の解像度はレンズアレイのレンズ数に制限されていないことが分かる。

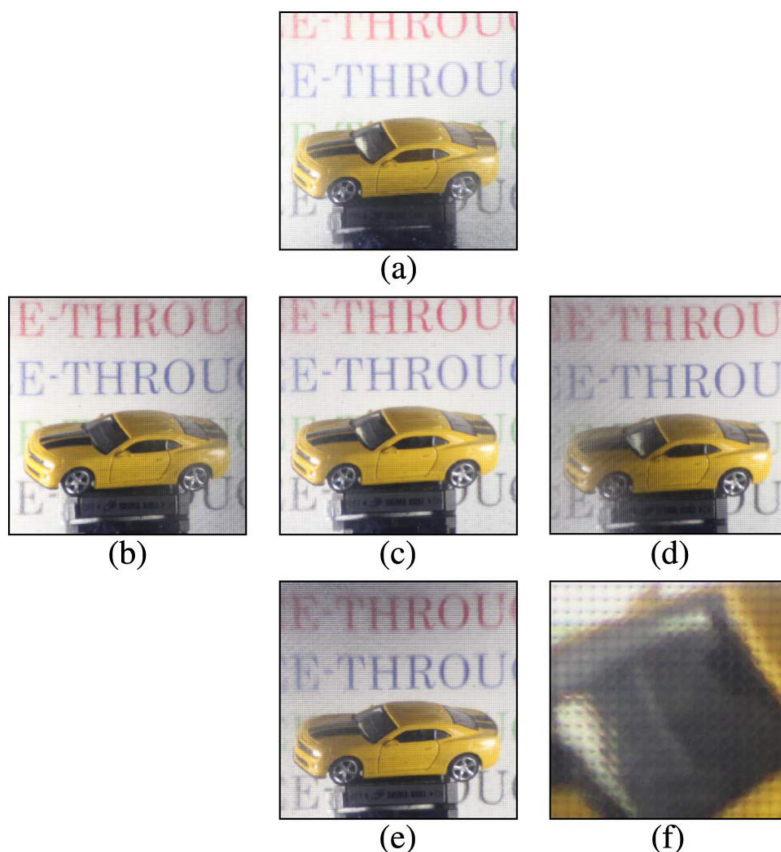


図 4.8 実験システムで得られたシースルー画像：
(a) 上から撮影、(b) 左から撮影、(c) 正面から撮影、(d) 右から撮影、(e)
下から撮影、(f) (e) を拡大

次に、背景遮蔽を行わずに実物体への立体像の重畳表示を行った。図 4.9 は実験システムに立体像を表示するための要素画像群を印刷したフィルムを組み込んで、実物体への立体像の重畳表示を行った結果である。立体像として表示した文字の“3D”は実験システムの前方 50 mm の位置に表示されており、“IMAGE”は実験システムの後方 500 mm の位置に表示されている。立体像が表示され、これらが実物体に重畳表示されているが、立体像を透過して背景物体が見えていることが分かる。

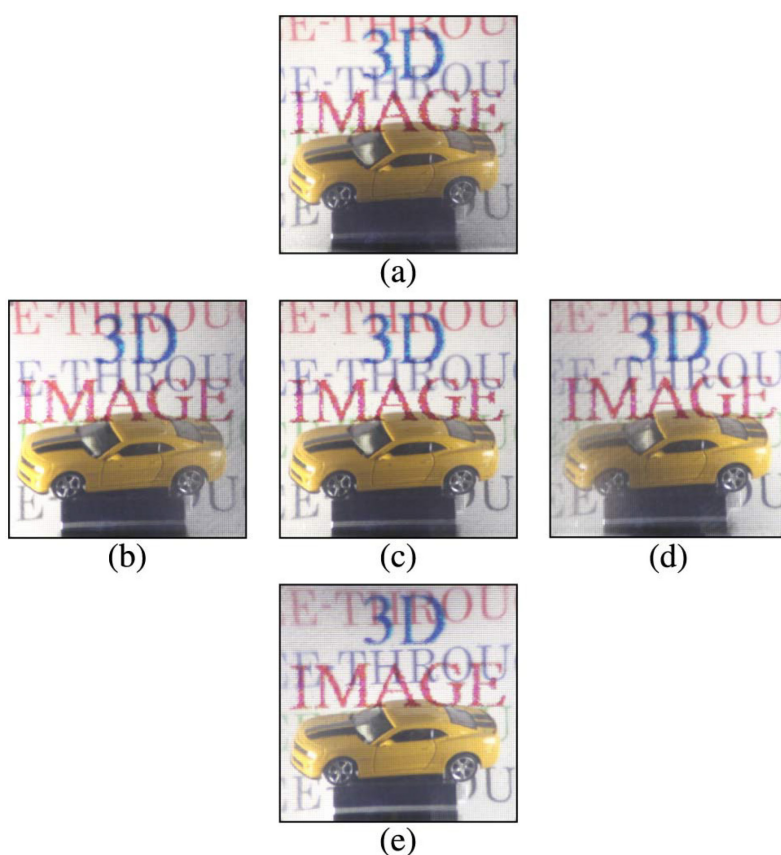


図 4.9 マスクパターンを用いずに立体像を背景に重畳表示した結果：
(a) 上から撮影、(b) 左から撮影、(c) 正面から撮影、(d) 右から撮影、(e)
下から撮影

続いて、立体表示を行わずに背景遮蔽のみを行った。図 4.10 はマスクパターンを印刷したフィルムのみを実験システムに組み込み、実験システムを通して

実物体を観察した結果である。図 4.9 で立体像が表示されていた領域に黒色の領域が生成されていることが分かる。

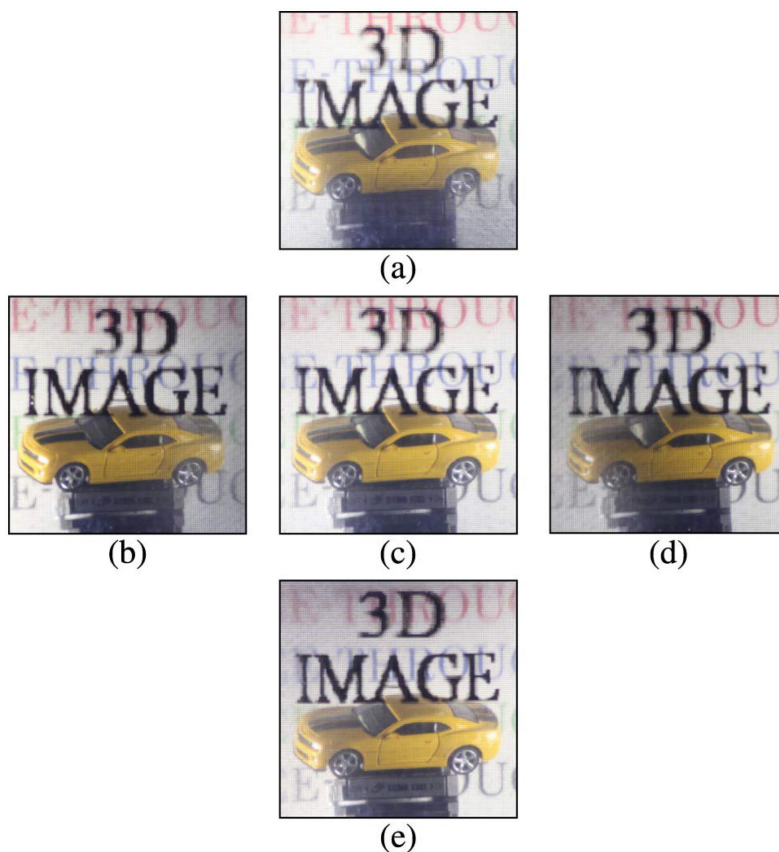


図 4.10 シースルー画像とマスクパターンによって生成された黒色の領域：
(a) 上から撮影、(b) 左から撮影、(c) 正面から撮影、(d) 右から撮影、(e)
下から撮影

以上を踏まえて、立体像による背景遮蔽機能を確認した。図 4.11 に実験結果を示す。この実験では、要素画像群のフィルムとマスクパターンのフィルムの両方が実験システムに組み込まれている。立体像が表示され、その立体像の後方に位置する実物体が遮蔽されていることが分かる。この結果から、提案法によって背景遮蔽機能が実現できることが示された。

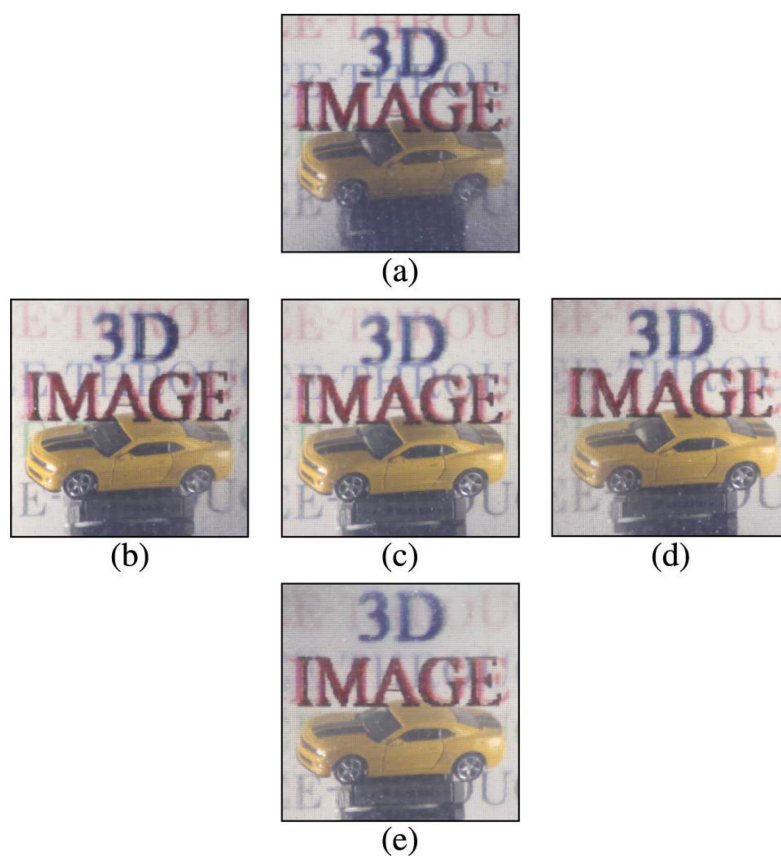


図 4.11 背景遮蔽機能をもつ立体像の重畳表示の結果：
 (a) 上から撮影、(b) 左から撮影、(c) 正面から撮影、(d) 右から撮影、(e)
 下から撮影

図 4.12 に、実物体に立体像を重畳表示した他の実例を二つ示す。同図 (a) と (c) はマスクパターンなしの場合のシースルー画像であり、同図 (b) と (d) はマスクパターンを用いた場合のシースルー画像である。これらの場合においても、背景物体の像が立体像によって遮蔽されていることが確認できる。

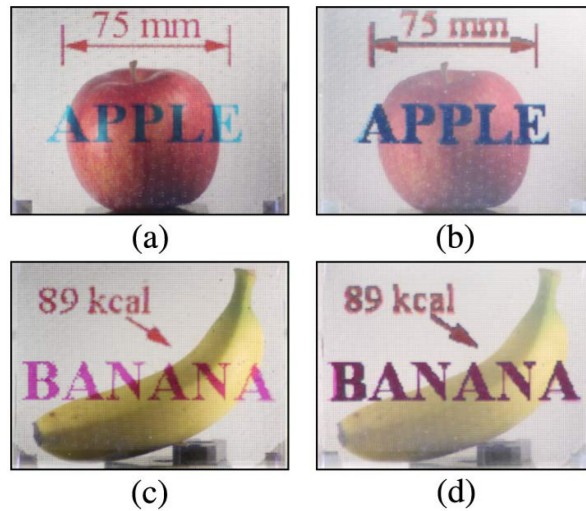


図 4.12 実物体としてリンゴとバナナを用いた例：

(a) (c) マスクパターンなしの場合のシースルー画像、(b) (d) マスクパターンありの場合のシースルー画像

4.5 考察

図 4.11 に示した結果を見ると、立体像が黒色の領域と正確には重なっていないことが分かる。提案法においてマスクパターン群は、要素画像群上に等倍で結像されている必要がある。しかし、実際の結像倍率は等倍よりも小さかった。これは、中央の組み合わせレンズアレイと外側の 2 枚のレンズアレイの間隔の調整を、最小厚さが 0.1 mm のスペーサーを複数枚組み合わせて行っていたためである。結像倍率は、レンズアレイ間の距離が 0.1 mm 変化すると約 6% 変化する。マスクパターン群が要素画像群よりも小さかったため、黒色の領域が立体像よりも後方に生成されることになり、これによって立体像と黒色の領域が正確に重ならなかったと考えられる。

背景物体の像の視域角は、計算値が 8.7° であるのに対して実測値は 4.3° であった。これは、光隔壁板の実際の開口ピッチがレンズアレイのレンズピッチよりも小さかったためであり、第 3 章で述べた原因と同一である。

立体像の光強度は高くなかった。光強度を向上させるためにはフロントライต์表面のドット構造の密度を上げる必要がある。一方で、実験システムのスクリーン上において、疎で低コントラストな規則的パターンが観察された。これ

は、フロントライト表面のドット構造がレンズアレイによって拡大されたためである。使用したフロントライトのドットの直径は 33 μm であったが、このパターンの発生を避けるためにはドットの直径をより小さくする必要がある。

2 枚の透明フィルムを組み込んでいない状態の実験システムの透過率の実測値は 47.9% だった。光隔壁板の開口率の低さが透過率低下の主な原因である。また、フロントライトにおける光の反射および散乱も透過率低下の原因となっている。

実験結果から、立体像を生成するためのディスプレイと背景をマスクするためのディスプレイの 2 枚の独立したディスプレイを用いるという本研究の提案手法により、立体像が背景物体を完全に遮蔽することが可能であることが示された。

4.6 本章のまとめ

本章ではフラットパネル型のライトフィールド AR ディスプレイにおいて、背景遮蔽を光学的に実現する方法を提案した。背景遮蔽機能は、3 枚のレンズアレイと 2 枚の透過型ディスプレイからなる対称インテグラルイメージング光学系により実現する。提案法を、第 3 章で作製したプロトタイプシステムを改造した実験システムにより検証し、立体像による背景遮蔽機能が実現できることを確認した。

第5章 ライトフィールドARディスプレイを用いた背景結像機能

5.1 研究目的

対称インテグラルイメージング光学系のレンズアレイの間隔を適切に変更して非対称化することで、実風景を任意の距離に結像することが可能になる。遠くにある物体を近くに結像したり、近くにある物体を遠くに結像したりすることができるため、近視、遠視、老眼などの屈折異常の人に対して視力補助機能を提供できる。

近視や遠視などの屈折異常の人が、眼鏡・コンタクトレンズなどの矯正具を使用することなく画像を観察することを可能にする視力補助機能をもったディスプレイシステムがこれまでにいくつか提案されている。Huang らは、複数のLCD パネルを積層したマルチレイヤー型の視力補助ディスプレイシステムを提案している[25]。このシステムでは、屈折異常のある眼の点像応答関数を用いて表示したい画像をデコンボリューションし、得られた画像をマルチレイヤーディスプレイで表示する。図 5.1 はこのシステムによって画像を表示した結果である。上段は表示画像、下段は屈折異常のある眼で観察した場合のシミュレーション結果である。デコンボリューションにより得られた画像が負の画素値を含むため、これを補うためにマルチレイヤー構成としているが、同図右下のように表示できる画像のコントラストは低い。Pamplona らは、ライトフィールドディスプレイシステムを用いて視力補助ディスプレイを実現する方法を提案している[26]。ディスプレイから出射する光線の進行方向を観察者の眼の点像応答関数によって決定する。このシステムは、表示できる画像のコントラストがHuang らの提案によるものより高いが、インテグラルイメージングにもとづくシステムであるため、表示画像の解像度は低い。Huang らは、これら二つのシステムを組み合わせ、高コントラストで高解像度な視力補助ディスプレイを実現

する方法を提案している[27]。このシステムでは、眼の点像応答関数でデコンボリューションされた画像をライトフィールドディスプレイで表示する。これらの表示システムは、屈折異常をもつ人々に対して眼鏡などの矯正具なしで 3 次元映像を提示することが可能であるが、AR 機能はもたない。この章では、屈折異常をもつ人々に対して実風景と 3 次元映像の両方を眼鏡なしで提示できる、AR 用表示デバイスを実現する方法を提案する。

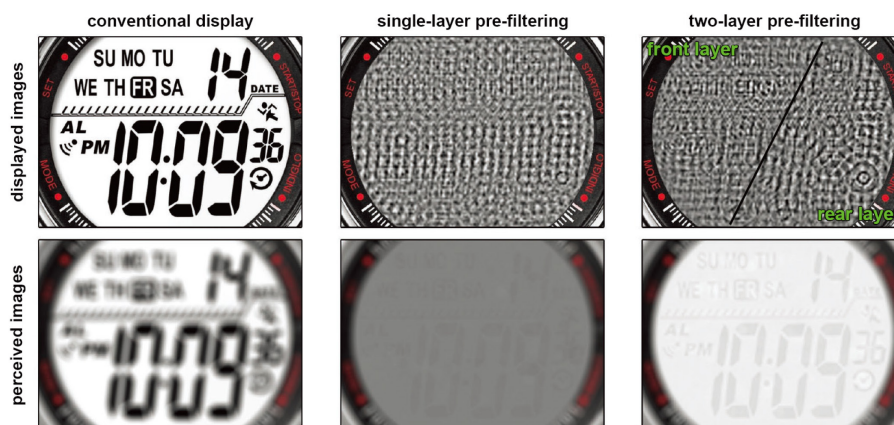


図 5.1 マルチレイヤー型の視力補助ディスプレイ

第 3 章で提案したライトフィールド AR ディスプレイは、3 枚のレンズアレイと 1 枚の透過型フラットパネルディスプレイから構成される。3 枚のレンズアレイがシースルー機能を実現し、これにインテグラルイメージング 3 次元映像を重畳表示することでフラットパネル型のライトフィールド AR ディスプレイを実現した。第 4 章では、このディスプレイシステムにマスクパターン用のフラットパネルディスプレイを加えて背景遮蔽機能を実現し、3 次元映像による実物体の遮蔽を示した。これらのディスプレイシステムでは、シースルー機能を実現するために、3 枚のレンズアレイを対称に配置した結像系を用いていた。この結像系では、結像系から物体面までの距離と、結像系から像面までの距離は等しい。本研究では、この結像系の構成に変更を加え、物体面までの距離と像面までの距離が等しいという制約を取り除き、物体面および像面の位置を可変にする。これにより、実風景を様々な奥行き位置に結像することができる背景結像機能を実現できる。この背景結像機能により、屈折異常をもつ人々の眼のピ

ント合わせが有効に働く奥行き位置に実風景を結像することで、視力補助機能を実現することができる。任意の奥行き位置に結像した実風景と同じ奥行き位置に3次元映像を重畳表示することで、実風景と3次元映像を同時に眼鏡なしで観察することが可能になる。

本研究では、第4章で作製したプロトタイプシステムを改造して、レンズアレイ間の距離を可変にして背景結像機能を付与するとともに、新たに市販のレンズアレイを用いたスケールアップモデルを作製して、提案法の有効性を実験により確認する。

5.2 原理

5.2.1 背景結像機能を実現する非対称インテグラルイメージング光学系

第3章および第4章で提案したライトフィールドARディスプレイの光学系では、物体面は左側のレンズアレイから $2f$ の位置、像面は右側のレンズアレイから $2f$ の位置に固定されていた。本研究では、レンズアレイによる結像系を非対称にすることで、物体面と像面の位置を可変にする。この場合、3枚のレンズアレイ間の二つの間隔は可変となり、実風景をレンズアレイ結像系から任意の距離に結像できる。

図5.2(a)に本研究で提案する非対称インテグラルイメージング光学系の構成を示す。物体面はレンズアレイ2から l の距離の位置にあり、像面はレンズアレイ1から l の距離の位置にある。レンズアレイ3とレンズアレイ2の距離を d_1 とし、レンズアレイ3とレンズアレイ1の距離を d_2 とする。

図5.2(b)に非対称インテグラルイメージング光学系を構成する要素結像系を示す。各要素結像系は等倍の正立像を結像する必要がある、要素結像系群によって結像された像は図5.3に示すように連続的に接続されている必要がある。

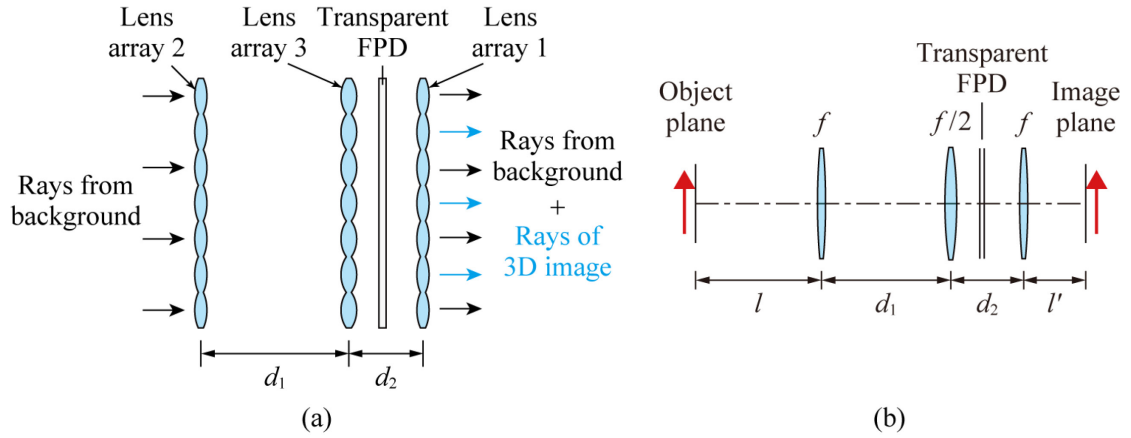


図 5.2 非対称インテグラルイメージング光学系：
 (a) システムの構造、(b) 要素結像系

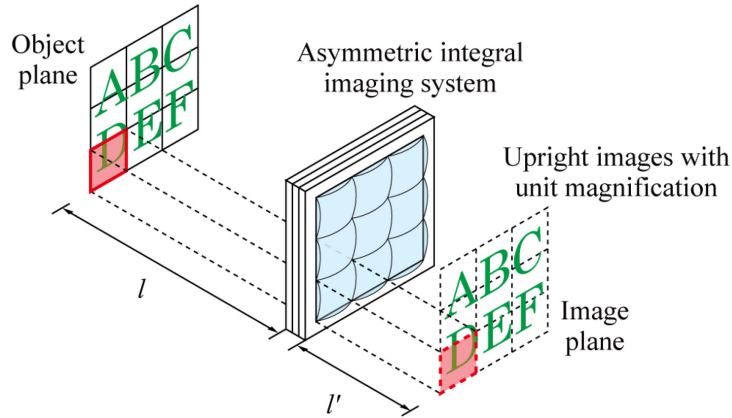


図 5.3 非対称インテグラルイメージング光学系による背景結像

非対称インテグラルイメージング光学系におけるレンズアレイ間の距離 d_1 と d_2 はマトリックスによる光線伝搬解析によって求めた[24]。非対称インテグラルイメージング光学系の要素結像系のシステムマトリックス S は次のような式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 S &= \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \\
 &= T_l L_f T_{d_2} L_{f/2} T_{d_1} L_f T_l \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & l' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

T と L はそれぞれ移行マトリックスとレンズマトリックスである。結像条件を満たすためにはシステムマトリックスの B 成分はゼロである必要があり、結像倍率が等倍であるためには A 成分は1である必要がある。これらの A と B の条件からレンズアレイ間の距離 d_1 と d_2 は次のように求まる。

$$d_1 = \frac{3l - l'}{2(l - f)} f \quad (5.2)$$

$$d_2 = \frac{3l' - l}{2(l' - f)} f \quad (5.3)$$

提案システムによって生成される実風景の像の解像度は、各要素結像系が像を生成するためレンズアレイのレンズ数によって制限されない。すなわち、このシステムは実風景を空間的にサンプリングしない。

背景結像機能は、屈折異常をもつ人が実風景を観察することを可能にする。近視をもつ人に対しては、図 5.4(a)のように実風景を目の近くに結像する。これは、近視をもつ人がピント合わせ可能な範囲は、正常な眼よりも近方に位置するためである。この場合、像面までの距離 l' は正である。遠視や老眼をもつ人に対しては、図 5.4(b)のように、実風景を遠方に結像する。遠視や老眼の場合には、ピント合わせ可能な範囲が正常な眼の場合よりも遠方に位置するためである。この場合、像面までの距離 l' は負である。このように、観察者のピント合わせ可能な領域内に実風景を結像することで、眼鏡やコンタクトレンズを着用することなく実風景を観察することができる。この場合、インテグラルイメージングによる立体像を実風景の結像位置と同じ奥行き位置に表示するためには、フラットパネルディスプレイの位置を適切に調整する必要がある。フラットパネルディスプレイとレンズアレイ 1 の間隔を s 、要素画像の幅を w とすると、立体像の視域角は

$$2 \tan^{-1}(w/2s) \quad (5.4)$$

である。立体像の視域角は、非対称インテグラルイメージングシステムの設定によって変化する実風景の視域角と等しいか大きくなければならない。

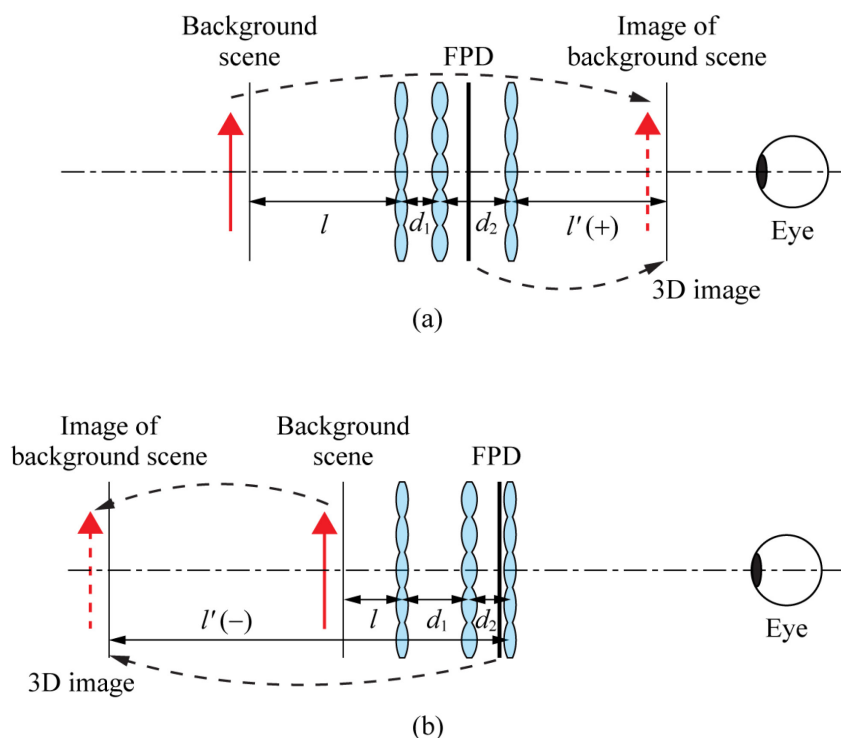


図 5.4 屈折異常をもつ人に対する背景結像機能：
(a) 実風景を近方に結像（近視）、(b) 実風景を遠方に結像（遠視・老眼）

5.2.2 提案システムの制限

ここで、提案システムにおいて実風景を結像可能な条件について説明する。まず、レンズアレイ間の距離 d_1 および d_2 は正であるものとする。 $d_1 \geq 0$ の条件から、 l と l' の関係は式(5.2)より次のように求められる。

$$\begin{aligned} l' &\leq 3l \quad (\text{for } l > f), \\ l' &\geq 3l \quad (\text{for } l < f) \end{aligned} \quad (5.5)$$

同様に、 $d_2 \geq 0$ の条件から、 l と l' の関係は式(5.3)より次のように求められる。

$$\begin{aligned} l' &\geq l/3 \quad (\text{for } l > f), \\ l' &\leq l/3 \quad (\text{for } l < f) \end{aligned} \quad (5.6)$$

レンズアレイ 2 から物体面までの距離 l も同様に正でなければならない。

図 5.5 に、式(5.5)と式(5.6)から求めた結像可能な領域を示す。結像可能な領域は図中で赤色および青色で示した部分であり、制限があることが分かる。図 5.4(a)に示したような近視の場合の背景結像条件は、 $l' > 0$ または $l + d_1 + d_2 > -l'$ (ただし $l' > 0$) と書ける。式(5.2)および式(5.3)の条件を組み合わせると以下の関係が得られる。

$$l' > 0, \quad (5.7)$$

$$(2l - 3f)l'^2 + 2(l + f)ll' - 3fl^2 < 0 \quad (\text{for } l' < 0)$$

近視の眼に対する結像可能な領域はここまでの式から求めることができ、図 5.5 の青色で示した領域に対応する。続いて、図 5.4(b)に示した遠視および老眼の場合の背景結像条件は、 $l + d_1 + d_2 < -l'$ (ただし $l' < 0$) と書くことができ、近視の場合と同様に結像可能な領域を求めると次の式が得られる。

$$(2l - 3f)l'^2 + 2(l + f)ll' - 3fl^2 > 0 \quad (\text{for } l' < 0) \quad (5.8)$$

遠視および老眼の眼に対する結像可能な領域は常識で示した範囲であり、図 5.5 の赤色で示した領域に対応する。同図中に丸およびクロスで示した点は、この後の節で説明する実験の条件を示している。

第 3 章および第 4 章で説明したシースルーディスプレイにおいては、対称インテグラルイメージング光学系によって背景からの入射光線の高さおよび入射角は保存されていた。しかし、非対称インテグラルイメージング光学系では、入射光線の高さのみを保存する。そのため、本章における提案システムは 2 次元画像を結像する用途に適している。しかし、屈折異常をもつ人々は本や新聞、PC 等のモニターなどの 2 次元画像から情報を得ることができるため、このような制限のもとにおいても提案法は有効である。

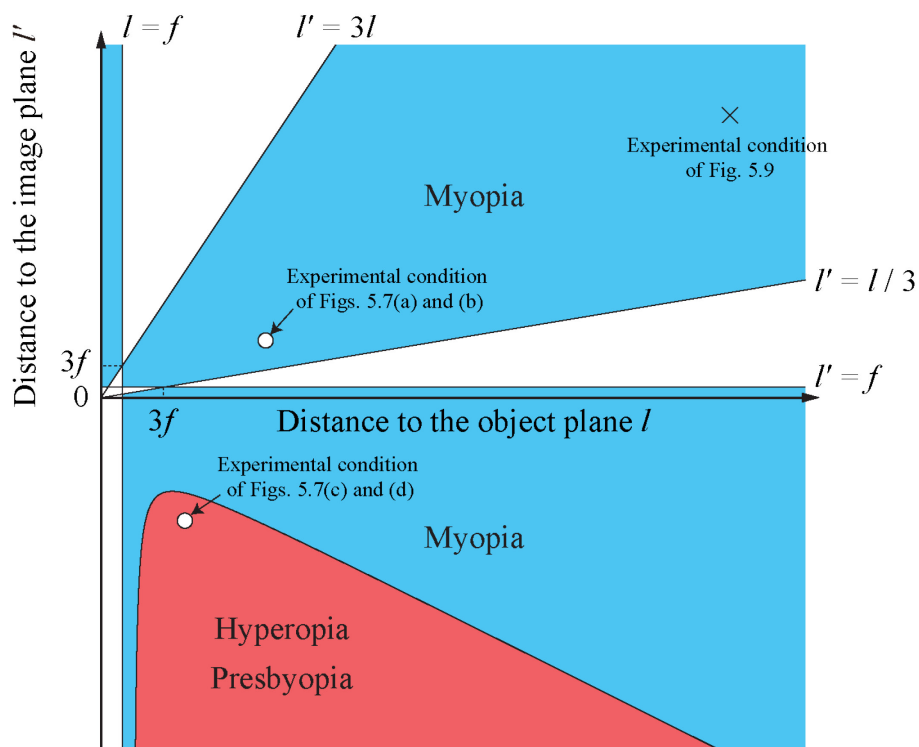


図 5.5 背景結像機能における結像可能な範囲（丸とクロスで示した点は本章の実験における実験条件を示す）

5.3 実験装置

提案法による背景結像機能を確認するため、レンズピッチの大きいレンズアレイを用いてスケールアップモデルを作製して実験を行った。スケールアップモデルの構成を図 5.6 に示す。レンズアレイには市販の平凸レンズアレイ（#63-230、Edmund Optics Inc.）を 4 枚用いた。このレンズアレイは 10×13 個の矩形レンズで構成されており、水平レンズピッチは 4.0 mm、垂直レンズピッチは 3.0 mm である。各レンズのサイズは 3.0 mm \times 4.0 mm で、焦点距離は 38.1 mm である。外側の 2 枚のレンズアレイの半分の焦点距離をもつ中央のレンズアレイは 2 枚のレンズアレイの凸面を密着して対向させて用いた。この実験では図 5.7 のように、アルファベットを表示した LCD モニターを実風景内の背景物体として使用した。

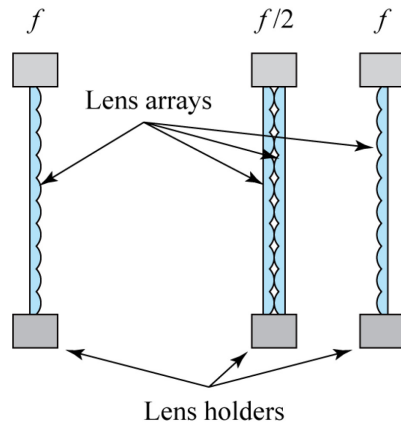


図 5.6 提案システムのスケールアップモデル

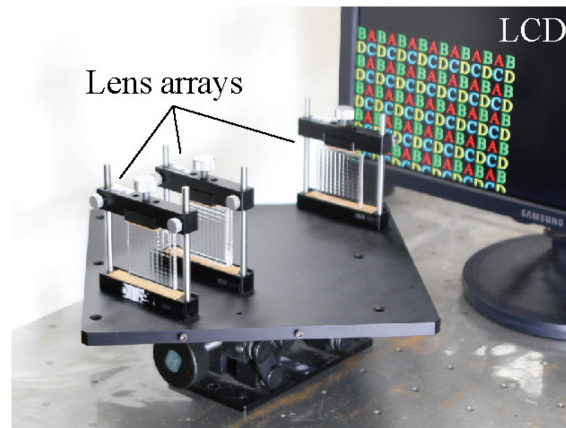


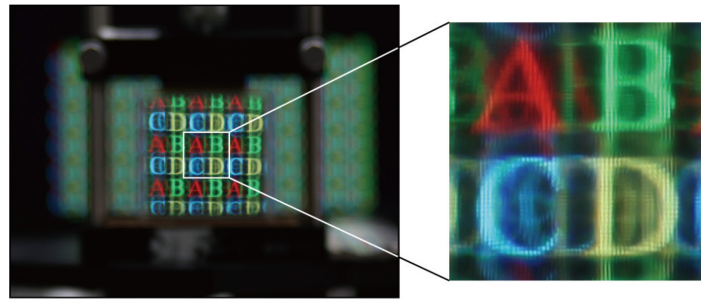
図 5.7 スケールアップモデルを用いた実験の様子

5.4 実験結果

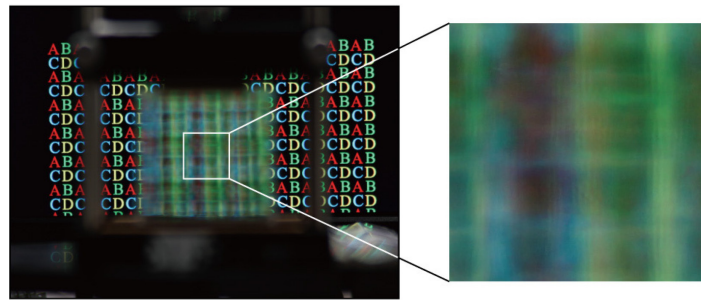
図 5.8(a)に背景物体の像を観察者近方に結像した場合の実験結果を示す。背景物体は実験システムの後方 300 mm に配置されており、背景物体の像は実験システムの前方 200 mm に結像されている ($l = 300$ mm、 $l' = 200$ mm)。図 5.5 中の近視領域内に丸で示した点が本実験の条件を示している。レンズアレイ間の距離はそれぞれ $d_1 = 50.9$ mm と $d_2 = 35.3$ mm である。図 5.8(a)はカメラのピントを背景物体の像に合わせており、背景物体の像はクリアに観察できる一方で、背景物体そのものはボケている。図 5.8(b)ではカメラのピントを背景物体に合わせており、背景物体はクリアに観察できている一方で、背景物体の像はボケている。図 5.8(a)に拡大した背景物体の像を示したが、弱い多重像が観察された。こ

これは、スケールアップモデルにおいて光隔壁板を使用しなかったためである。背景物体の像の中の文字は LCD モニターのスクリーン上に表示されているものよりも大きく見えているが、これは背景物体の像が LCD モニターのスクリーンよりも観察位置に近いためである。

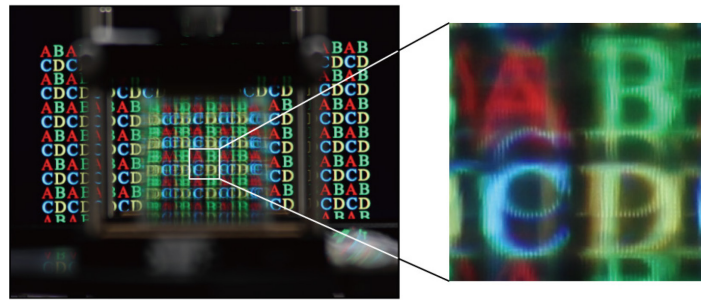
図 5.8(c)に背景物体の像を観察者遠方に結像した場合の実験結果を示す。背景物体は実験システムの後方 153 mm に配置されており、背景物体の像は実験システムの後方 237 mm に結像されている ($l = 153 \text{ mm}$ 、 $l' = -450 \text{ mm}$)。すなわち、背景物体の像は背景物体そのものよりも後方に結像されている。図 5.5 の遠視および老眼領域内に丸で示した点が本実験の条件に対応している。レンズアレイ間の距離はそれぞれ $d_1 = 162.6 \text{ mm}$ と $d_2 = 58.2 \text{ mm}$ である。図 5.8(c)ではカメラのピントを背景物体の像に合わせており、背景物体の像がクリアに観察できていることが分かる。図 5.8(d)ではカメラのピントを背景物体に合わせており、背景物体がクリアに観察できていることが分かるが、背景物体がクリアに観察できている一方で、図 5.8(c)の背景物体の像と比較して強い多重像も同時に観察されている。ただし、図 5.8(c)においても拡大した背景物体の像を見ると多重像が観察されている。この実験条件では、背景物体の像が LCD モニターのスクリーンよりも後方に結像されているため、LCD モニター上の文字よりも像の文字の方が小さく見えている。



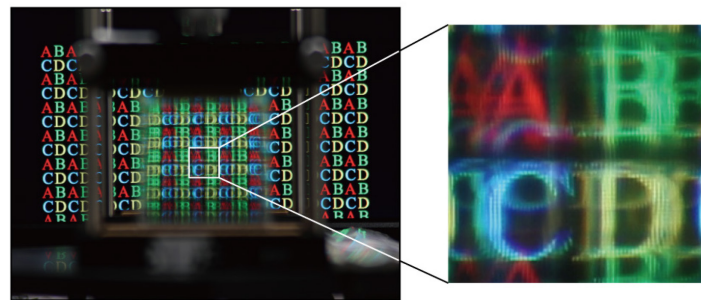
(a)



(b)



(c)



(d)

図 5.8 スケールアップモデルを用いた実験結果：

(a) (b) 背景物体の像を観察者近方に結像し (a) 背景物体にピント (b) 背景物体の像にピント、(c) (d) 背景物体の像を観察者遠方に結像し (c) 背景物体にピント (d) 背景物体の像にピント

スケールアップモデルを用いた実験のほかに、第 4 章で作製したプロトタイプシステムを用いた背景結像機能の検証も行った。ただし、レンズアレイ間の距離は可変となるように改造した。使用したレンズアレイは、第 3 章および第 4 章の実験で用いたものと同じであり、レンズピッチは 1.0 mm、レンズ数は 154×154 個、各レンズのサイズは 1.0 mm×1.0 mm で、焦点距離は 3.3 mm である。スケールアップモデルを用いた実験と同様、中央のレンズアレイは 2 枚のレンズアレイを組み合わせている。レンズアレイは専用のホルダーを用いて図 5.9 のように位置合わせを行った。本実験でも、スケールアップモデルを用いた実験と同様、背景物体には LCD モニターを用いた。

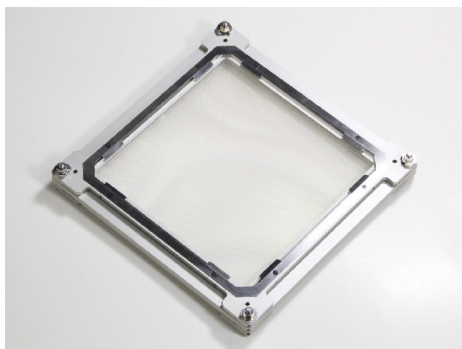


図 5.9 実験に用いたプロトタイプシステム

図 5.10 に背景物体の像を観察者近方に結像した場合の実験結果を示す。背景物体は実験システム後方 100 mm に配置し、背景物体の像は実験システム前方 90 mm に結像されている ($l = 100$ mm、 $l' = 90$ mm)。図 5.5 にクロスで示した点が本実験の条件である。レンズアレイ間の距離はそれぞれ $d_1 = 3.6$ mm と $d_2 = 3.2$ mm である。背景物体の像が実験システムを通して観察できていることが分かる。また、背景物体が観察者近方に結像されているため、LCD モニター上よりも文字が拡大していることが分かる。背景物体の像のボケは、光隔壁板を用いなかったため多重像が発生したためである。本実験システムにおいては、レンズアレイ間の距離を調整できる範囲が制限されていたため、背景物体を観察者遠方に結像することはできなかった。

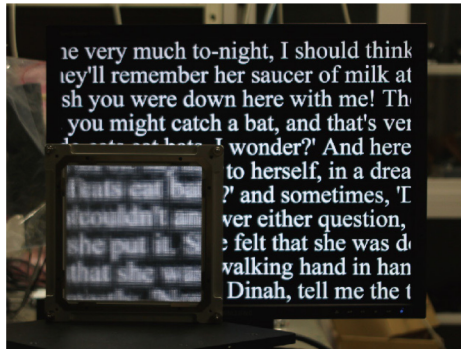


図 5.10 プロトタイプシステムによる実験結果

最後に、背景物体の像への立体像の重畳表示機能を実験的に示した。要素画像群を印刷した透明フィルムをスケールアップモデルに組み込んだ。この実験では、最も観察者側のレンズアレイの焦点面に要素画像を印刷した透明フィルムを配置した。図 5.11 に示すように、立体像の“3D”が背景物体の像に重畳表示できていることが分かる。ただし、スケールアップモデルに使用したレンズアレイのレンズ数が少ないため、立体像の解像度は低い。

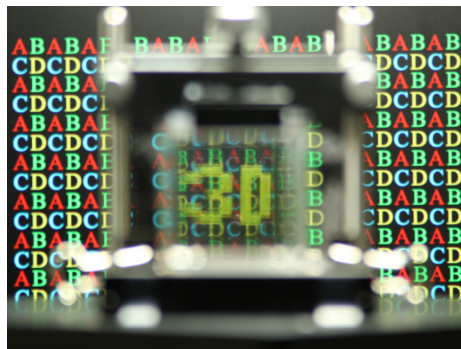


図 5.11 背景物体の像への立体像の重畳表示

5.5 考察

図 5.8(c)において、背景物体の像は同図(a)に示したもののほどシャープではなかった。レンズアレイ間の距離 d_1 と d_2 はそれぞれ式(5.2)と式(5.3)から求めたものであるが、これらは近軸近似にもとづいた値である。背景物体の像の質を向上させるため、これらの値を光学設計ソフトウェアである ZEMAX (ZEMAX,

LLC) を用いて最適化した。その結果、 $d_1 = 157.5 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 54.0 \text{ mm}$ となった。図 5.12(b)はこの最適化結果にもとづく背景物体の像である。比較のため同図(a)に最適化前の実験条件における背景物体の像を示した(図 5.8(c)と同一)。元の実験条件よりも像がシャープになってることが分かる。さらに像の画質を向上させるため、レンズの収差による画質低下を防ぐために中央のレンズアレイと物体側のレンズアレイの間に開口アレイを配置した。開口アレイとレンズアレイ間の距離も ZEMAX を用いて最適な値を求め、開口アレイは物体側のレンズアレイから 139.9 mm の位置に配置した。開口形状は正方形で、サイズは $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ である。開口アレイは、透明フィルムに熱溶融プリンターで印刷して作製した。図 5.12(c)は開口アレイを用いた場合の背景物体の像であり、同図(b)の像よりもシャープになっていることが分かる。

要素結像系の結像特性は、要素結像系の最大入射角の影響を受ける。図 5.4(a)のように背景物体の像が観察者の近方に結像される図 5.8(a)に示した実験結果の場合、LCD モニターのスクリーンから出射して要素結像系を通過する光線の最大の入射角は 0.38° である。この場合において、最大入射角は像側のレンズアレイを構成するレンズのサイズによって決まる。一方、図 5.4(b)のように背景物体の像が観察者の遠方に結像される図 5.8(b)および図 5.12(c)に示した実験結果の場合、最大入射角はそれぞれ 0.22° および 0.24° である。この場合、最大入射角は物体側のレンズアレイを構成するレンズのサイズによって決まる。前者のケースの方が後者のケースよりも最大入射角が大きいため、解像度は前者のケースの方が高くなる。図 5.8(a)に示した像は前者のケースにあたるが、後者のケースにあたる同図(c)および図 5.12(b)の像よりもシャープである。しかし、いずれのケースにおいても最大入射角は非常に小さいため、解像度は低かった。

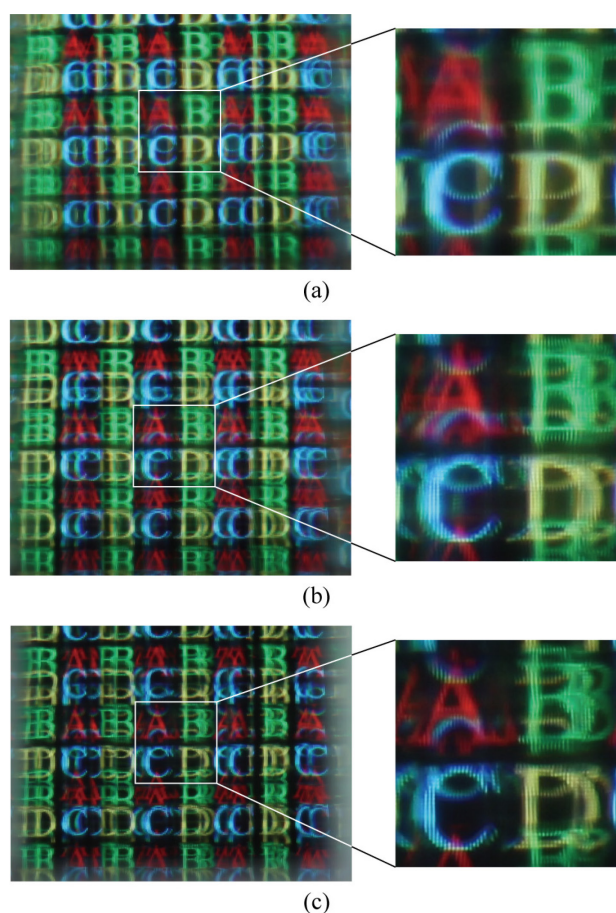


図 5.12 背景物体のシャープさの向上：
 (a) もとの実験条件の場合、(b) レンズアレイ間の距離を最適化した場合、(c)
 開口アレイを用いた場合

ここまで示した実験結果では、光隔壁板を用いていなかったため背景物体の像の多重像が観察されていた。第 3 章および第 4 章の対称インテグラルイメージングシステムでは光隔壁板を作成していたが、非対称インテグラルイメージング光学系では背景物体の像の結像条件に応じてレンズアレイ間の距離が変わるため光隔壁板を作製することが難しい。しかし、ここでは非対称インテグラルイメージング光学系においても光隔壁板が有効であることを確認した。光隔壁板は黒色の紙を用いて 3×3 個のレンズに対応するものを作成して、像側のレンズアレイと中央のレンズアレイの間に配置した。図 5.13 に得られた背景物体の像を示す。 3×3 個のレンズに対応する領域を黄色の線で示した。この結果を、図 5.12 で示した結果と比較すると多重像が低減していることが確認できる。な

お、光隔壁板の領域外に発生している暗い部分は、光隔壁板を支える部品によるものである。背景結像機能を有するシステムにおいて多重像の発生を防ぐためには、高さが可変な光隔壁板を開発する必要がある。

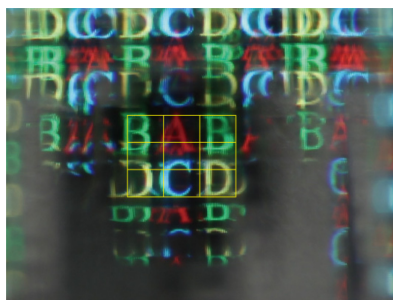


図 5.13 3×3 個のレンズに対応する光隔壁板による多重像発生防止

本章で提案したシステムには、第 4 章で示した背景遮蔽機能を組み込むことが可能である。この場合、レンズアレイ 2 と 3 の間にもう一枚の透過型フラットパネルディスプレイを追加する。このフラットパネルディスプレイは、要素画像を表示するフラットパネルディスプレイと共役な位置に配置する。立体像が背景物体の像の前方に表示されている場合、マスクパターンを表示することで背景物体を立体像により遮蔽できる。

5.6 本章のまとめ

ライトフィールド AR ディスプレイに用いる対称インテグラルイメージング光学系の構成を変更した非対称インテグラルイメージング光学系を提案し、背景結像機能を実現した。背景結像機能を用いることで、近視、遠視、老眼などの屈折異常をもつ人に対して視力補助機能を実現することができる。

提案法による背景結像機能を実験的に検証するため、4.0 mm×3.0 mm のレンズからなるレンズアレイを用いたスケールアップモデルを構築した。スケールアップモデル後方に配置した物体を、その物体の前方および後方に結像した。また、フラットパネル型のライトフィールド AR ディスプレイのプロトタイプシステムを用いた実験でも同様に背景結像機能を検証した。

背景物体の像の質を向上させるため、光学設計ソフトウェアにより非対称インテグラルイメージング光学系の最適化を行った。開口アレイおよび光隔壁板の使用も、本章で提案する光学系における全体的な像の質の向上に有効であることが判明した。

本章で提案した方法は、屈折異常をもつ人々が眼鏡やコンタクトレンズなしで画像を観察することを可能にすることが期待できる。

第6章 ライトフィールド技術をもとにした高速パンチルトシステム

本章からは、ライトフィールド技術を応用した撮影技術の研究について述べる。

6.1 研究目的

近年、カメラはスマートフォンやタブレット端末といった個人用の端末から、防犯用セキュリティシステムなどの幅広い機器に組み込まれているため、その重要性を増している。また、ディープラーニングをベースとした画像認識システムは、高い認識精度を実現するために大量の画像データを必要としており、大量の画像データを出力できるカメラへの需要も高まっている。このような背景のもとカメラの解像度やダイナミックレンジといった電子的性能が急速に向上しているが、カメラの光軸の水平・垂直の回転であるパンチルト機能は、従来通りのサーボモーターなどの機械的機構によって実現されている。

この章では、ライトフィールド型のレンズアレイ光学系により高速なパンチルトシステムを実現する方法を提案する。前章までで説明したフラットパネル型のライトフィールド AR ディスプレイの光学系を用いた実験の過程で、われわれはレンズアレイを面方向に微小にシフトさせると図 6.1(a)に示すように透過光の方向が大きく変化し、画像がシフトすることを見いだした。また、レンズアレイの微小な回転によって図 6.1(b)に示すように透過光が回転して、画像が回転することにも気づいた。本研究では、レンズアレイの微小なシフトによって透過光の方向が大きく変化することに着想を得て、新しいパンチルト光学系を考案し、その最適な構成方法について研究を行った。提案するパンチルト光学系では、レンズアレイをレンズピッチ程度シフトさせると、入射側の光軸が回転し、透過光の方向を大きく変えることができる。レンズピッチが 100 μm 程度のレンズアレイを用いれば、ピエゾアクチュエーターのような変位量が小さい

一方で動作が高速なアクチュエーターを用いてレンズアレイを移動させることにより高速なパンチルトが可能になる。また、パンチルト光学系をフラットパネル形状で実現することが可能である。



図 6.1 レンズアレイの面方向シフトと回転による画像のシフトと回転：
(a) 画像のシフト、(b) 画像の回転

画像のスキャンには、ガルバノミラーが幅広く用いられてきた[28]。この方法では、サーボモーターを用いてミラーを回転させるため、スキャン角は大きいがスキャン速度は低い。画像を回転させる用途には、ダブプリズムが用いられている。ダブプリズムを用いると画像を 360° 回転させることが可能であるが、プリズムの質量と非対称な形状により画像の高速な回転は難しい。レーザー光のスキャンにおいては、音響光学素子を用いた偏向装置が用いられている[29][30][31]。超音波によって媒質中に誘起された屈折率分布によって光が回折される現象を利用するため、スキャン速度が高速であるという特徴がある。ただし、スキャン角は小さい。レーザー光をスキャンする方法としてはこのほか、液晶を用いる方法[32][33]や計算機合成ホログラム (CGH) を用いる方法[34][35]も提案されている。いずれの方法もフラットな形状での実装が可能であるが、前者はスキャン角が小さく、後者は CGH を回転させる必要がある。

本研究の以前に、レンズアレイを用いて透過光の方向を変化させるスキャンシステムを実現する方法が提案されている。2枚のレンズアレイ間の面方向のシフトによりレーザー光をスキャンする方法が提案されているが[36][37]、レンズアレイの周期構造に起因する回折により離散的なスキャン角のみが実現できる。Akatay らは、連続的なスキャン角を実現するために、レンズアレイ光学

系にプリスキャンレンズと呼ばれるレンズを加える方法を提案している[38]。この方法は、高解像度なビームスキャンシステムを構築するために用いられているが[39]、これらのスキャン方法はレーザー光にのみ用いることができ、画像のスキャンに用いることはできない。本研究で提案する方法は、レンズアレイのシフトによって画像そのものを直接スキャンできる点に特徴がある。

本章では、長焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルと短焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルによる実験により、提案法の有効性を示す。

6.2 レンズアレイシフトによる光線の偏向

図 6.2(a)にレンズアレイを用いた提案するパンチルトシステムを示す。図 4.3 で示した対称インテグラルイメージング光学系からフラットパネルディスプレイを取り除き、焦点距離が $f/2$ のレンズアレイを 2 枚加えた構成となっている。左側 2 枚のレンズアレイにはアクチュエーターを取り付ける。提案システムは、要素結像系の 2 次元アレイからなっている。図 6.3 に要素結像系を示す。要素結像系に加えた 2 枚の要素レンズは、一つの要素結像系から隣接する要素結像系への光線の漏れを防止するフィールドレンズとして機能する。他のレンズのものよりも小さい右側のフィールドレンズの直径は、要素結像系の画角を決める。要素結像系を通過する光線の方向は、図 6.2(b)に示すように左側の 2 枚のレンズアレイをアクチュエーターでシフトすることによって変更する。ただし、左側 2 枚のレンズアレイをシフトさせても、図 6.2(b)に示す中央のレンズアレイから最も右側のレンズアレイの間の光線の方向は、同図(a)に示すこれらの光線の方向と同一である。すべての要素結像系の入射側における光軸は同時に回転し、これらの要素結像系は等倍の正立像を生成する。これにより、提案法は画像をスキャンすることができ、カメラ用のフラットパネル型のパンチルト機構が実現できる。提案システムの開口は、レンズアレイのレンズ数を増やすことによって拡大できるため、イメージセンサー近傍に配置して、そのイメージセンサーのアクティブ領域全体をカバーできる。

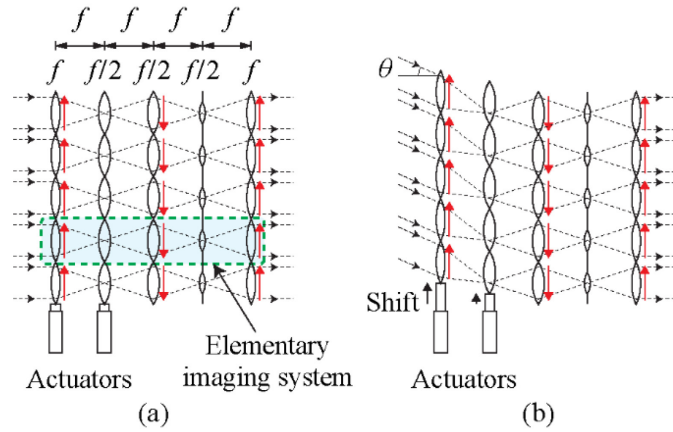


図 6.2 提案する画像パンチルトシステム：
 (a) 光学系の構成、(b) レンズアレイのシフトによる画像パンチルト

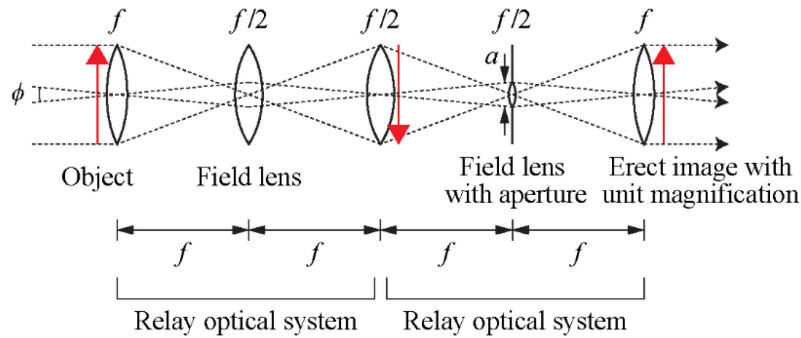


図 6.3 提案するパンチルト光学系の要素結像系

レンズアレイのシフト量について説明する。簡単のため、ここでは 1 次元の画像スキャンについて考える。入射側の光軸の回転角を θ で表すと、最も左側のレンズアレイのシフト量 s_1 と左から 2 番目のレンズアレイのシフト量 s_2 はそれぞれ次のように求められる。

$$s_1 = f \tan \theta \tag{6.1}$$

$$s_2 = (f/2) \tan \theta \tag{6.2}$$

レンズアレイの周期構造のため、レンズアレイの最大シフト量はこれらのレンズピッチと等しい。レンズアレイのレンズピッチを p とすると、入射側の光軸の最大回転角は次式で与えられる。

$$\theta_{\max} = \pm \tan^{-1}(p/f) \quad (6.3)$$

最大回転角は、レンズアレイの焦点距離を短くするかレンズピッチを大きくすることで大きくできる。

提案するパンチルトシステムの画角 ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = 2 \tan^{-1}(a/2f) \quad (6.4)$$

ただし a は左側のフィールドレンズアレイの各レンズの直径である。

最大パンチルト角に対応する最も左側のレンズアレイおよび左から 2 番目のレンズアレイのシフト量は、それぞれ p および $p/2$ である。レンズピッチを小さくすることでレンズアレイのシフト量も小さくすることができるため、レンズアレイを高速にシフトさせることが可能である。レンズアレイをシフトさせるためのアクチュエーターとして、ピエゾアクチュエーターのような高速に動作するアクチュエーターを用いると、高速パンチルト機能を実現することが可能である。また、レンズピッチを小さくすると提案するパンチルトシステムの厚さが小さくなる。ただし、レンズピッチを小さくすると画像の解像度は低下する。

6.3 長焦点距離のレンズアレイを用いた実験

提案法を、長焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルと短焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルによる実験によって確かめた。まず、長焦点距離のレンズアレイを用いた実験について述べる。

6.3.1 実験装置

画像のパンチルトを検証するために長焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルを構築した。スケールアップモデルには、図 6.4 に示すように 8 枚のレンズアレイ (#63-230, Edmund Optics) を使用した。これらのレンズアレイは 10×13 個のレンズから構成されており、焦点距離は 38.1 mm、水平と垂直のレンズピッチはそれぞれ 4.0 mm と 3.0 mm である。同図に示す内側の 3 個

のレンズアレイは、2枚の同一レンズアレイをそれぞれの凸面を密着して対向させて用いることで、外側の2枚のレンズアレイの半分の焦点距離をもつ。式(6.3)より、最大のパンおよびチルト角はそれぞれ $\pm 6.0^\circ$ (水平方向において $s_1 = 4.0 \text{ mm}$, $s_2 = 2.0 \text{ mm}$) と $\pm 4.5^\circ$ (垂直方向において $s_1 = 3.0 \text{ mm}$, $s_2 = 1.5 \text{ mm}$) である。図 6.4 に示すように、レンズアレイは 5 個のレンズホルダーを用いて固定した。最も左側のレンズホルダーと左から 2 番目のレンズホルダーには、レンズアレイを水平垂直に動かすために 2 次元移動ステージを取り付けた。右側のフィールドレンズを構成する 2 枚のレンズアレイの間には、レンズの有効径を制限するために 10×13 個の矩形開口を挿入した。開口のサイズは $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ である。レンズアレイ間の距離 (d_1, d_2, d_3, d_4) は、結像特性を向上させるため ZEMAX を用いて決定した。光学系が対称であるという制約のもと、 d_1 と d_4 は 37.5 mm 、 d_2 と d_3 は 30.0 mm と求めた。図 6.5 に構築したスケールアップモデルの写真を示す。

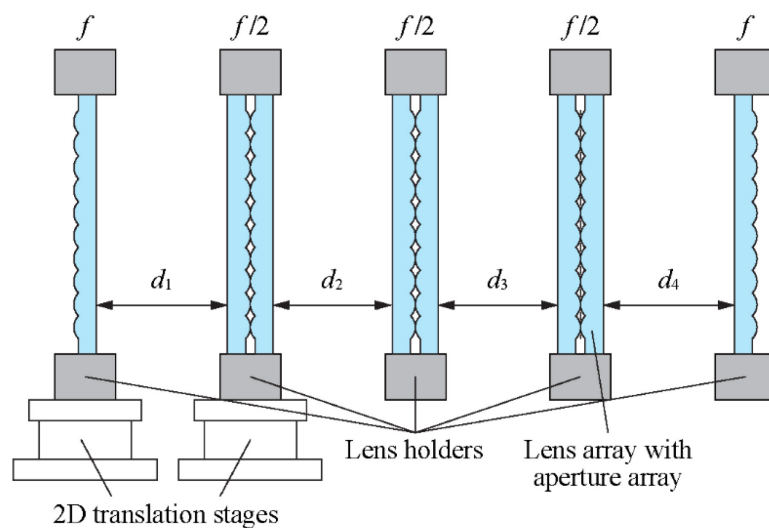


図 6.4 市販のレンズアレイを用いたスケールアップモデル

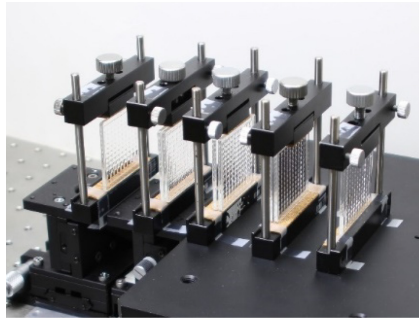


図 6.5 長焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデル

6.3.2 実験結果

図 6.6 にスケールアップモデルによって得られた像を示す。テスト画像を表示した LCD モニターのスクリーンがスケールアップモデル後方 400 mm に配置されている。像は、二つのレンズアレイを水平垂直に移動させることでシフトさせた。LCD モニター上のテスト画像の表示位置は、実験システムの観察者側のレンズを通して像が観察されるように 2 次元的に移動させた。図 6.6(a) に示した結果は、像を水平垂直に移動させなかった場合に観察された像である。同図 (b)-(d) に示した結果は像を水平方向に移動させた場合に観察された像であり、同図 (e)-(g) に示したのには像を垂直方向に移動させた場合に観察された像である。

図 6.6(a) に示したように、各要素結像系が結像した像がスムーズにつながっている。水平方向の像シフトの場合、実験システムによってパンされた像の後方に、LCD モニターに表示したテスト画像が同時に観察されている。パン角が 5.5° ($s_1 = 3.7 \text{ mm}$, $s_2 = 1.8 \text{ mm}$) より大きい場合、同図 (b) に示すように黒色の垂直な線が現れた。同様に、チルト角が 4.0° ($s_1 = 2.7 \text{ mm}$, $s_2 = 1.3 \text{ mm}$) より大きい場合、同図 (g) に示すように黒色の水平な線が現れた。

以上より、提案法によるパンチルト機能が実験的に確かめられた。しかし、使用したレンズアレイの焦点距離がレンズピッチよりも数倍大きかったため、最大パンチルト角は小さいものとなった。

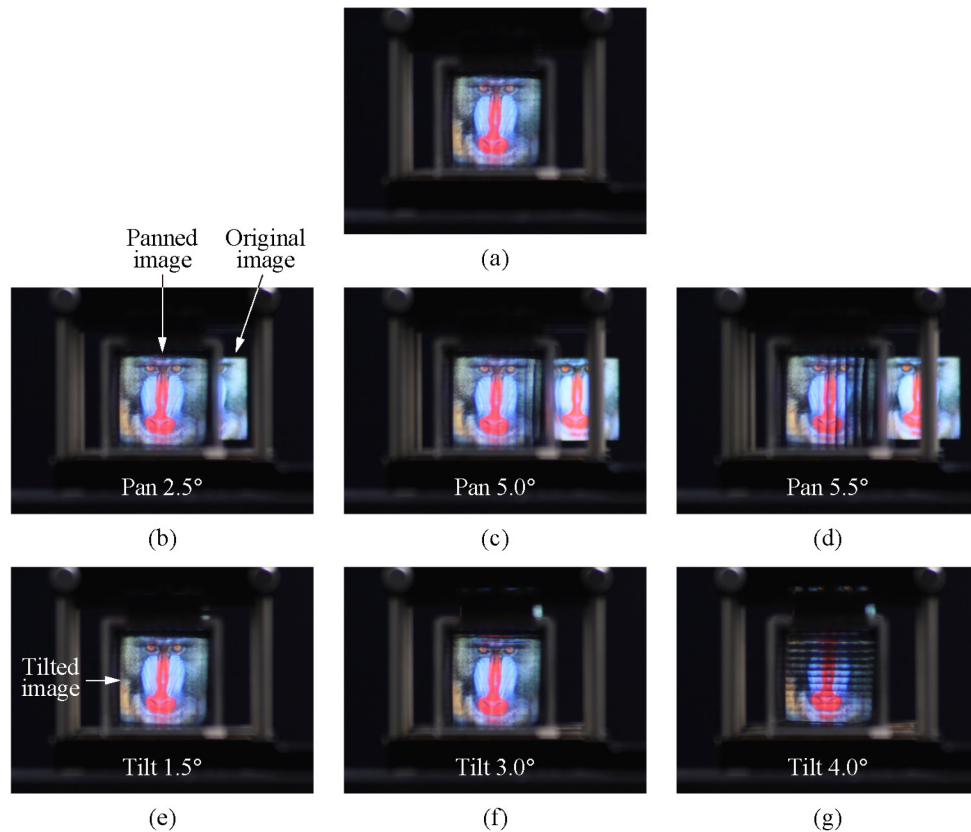


図 6.6 長焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルによる実験結果：

(a) パンチルトなし、(b) パン角 2.5° ($s_1 = 1.7 \text{ mm}$, $s_2 = 0.8 \text{ mm}$)、(c) パン角 5.0° ($s_1 = 3.3 \text{ mm}$, $s_2 = 1.7 \text{ mm}$)、(d) パン角 5.5° ($s_1 = 3.7 \text{ mm}$, $s_2 = 1.8 \text{ mm}$)、(e) チルト角 1.5° ($s_1 = 1.0 \text{ mm}$, $s_2 = 0.5 \text{ mm}$)、(f) チルト角 3.0° ($s_1 = 2.0 \text{ mm}$, $s_2 = 1.0 \text{ mm}$)、(g) チルト角 4.0° ($s_1 = 2.7 \text{ mm}$, $s_2 = 1.3 \text{ mm}$)

6.4 短焦点距離のレンズアレイを用いた実験

6.4.1 実験装置

次に、パンチルト角の拡大を検証するために短焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルを作製して実験を行った。短焦点距離のレンズアレイにはカスタムで設計、作製したものを使用した。作製したレンズアレイの焦点距離は 17.3 mm 、レンズピッチは 10.0 mm であり、最大のパンチルト角は $\pm 30^\circ$ である。最大パンチルト角を $\pm 30^\circ$ としたのは、一般的な広角カメラが 60° 程度の画角を有するためである。

レンズアレイは、カスタムの平凸レンズを作製してこれを正方形の形状に切り出したものを5×5個接着して作製した。図 6.7(a)に作製したレンズアレイを示す。同図(b)は短焦点距離のレンズアレイを用いて構築したスケールアップモデルである。作製したレンズアレイに合わせてレンズアレイホルダーもカスタムで作製した。このレンズアレイホルダーは最も物体側のレンズアレイと物体側から2枚目のレンズアレイを水平に動かすことが可能になっているため、画像のパンを行うことができる。多数の平凸レンズを用いると収差が大きくなるため、この実験ではフィールドレンズアレイのうち、観察者側のものを取り除いた。ただし、隣接する要素結像系への光線の漏れが生じている可能性がある。

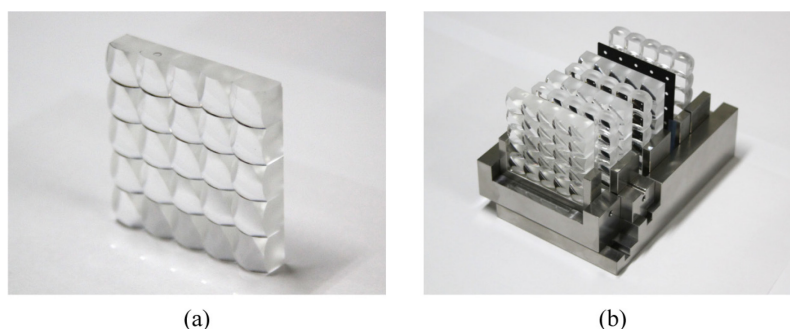


図 6.7 短焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデル：
(a) 作製したレンズアレイ、(b) パン機能をもつレンズアレイホルダー

6.4.2 実験結果

図 6.8 に実験結果を示す。テスト画像として LCD モニターに4種の文字 (A, B, C, D) の2次元アレイを表示した。同図(a)に示すように、パン角 0° ($s_1 = 0$ mm, $s_2 = 0$ mm) のとき各要素レンズ内で文字がクリアに観察できる。しかし、各要素レンズの境界に黒色の領域が観察され、さらに要素レンズの周辺領域では光の拡散も観察された。正方形の要素レンズ側面は粗面であり、ここで光が拡散されている。同図(b)に示すように、パン角が 10° ($s_1 = 3.1$ mm, $s_2 = 1.5$ mm) に増大しても文字はクリアに観察できている。同図(c)および(d)に示すようにパン角が 20° ($s_1 = 6.3$ mm, $s_2 = 3.1$ mm) および 25° ($s_1 = 8.1$ mm, $s_2 = 4.0$ mm) にまで増大すると、粗面であるレンズ側面を通過する光線が増加するため光の拡散が強くなり現れている。また、拡散に加えて、像のボケも観察された。パン角が 25°

のとき、各要素結像系の結像倍率が急速に大きくなっており、これによって要素結像系間の像の接続性が低下している。同図(e)に示すように、パン角が 30° ($s_1 = 10.0 \text{ mm}$, $s_2 = 5.0 \text{ mm}$) まで増大すると像は観察できなくなることから、最大のパンチルト角は 20° であると考える。

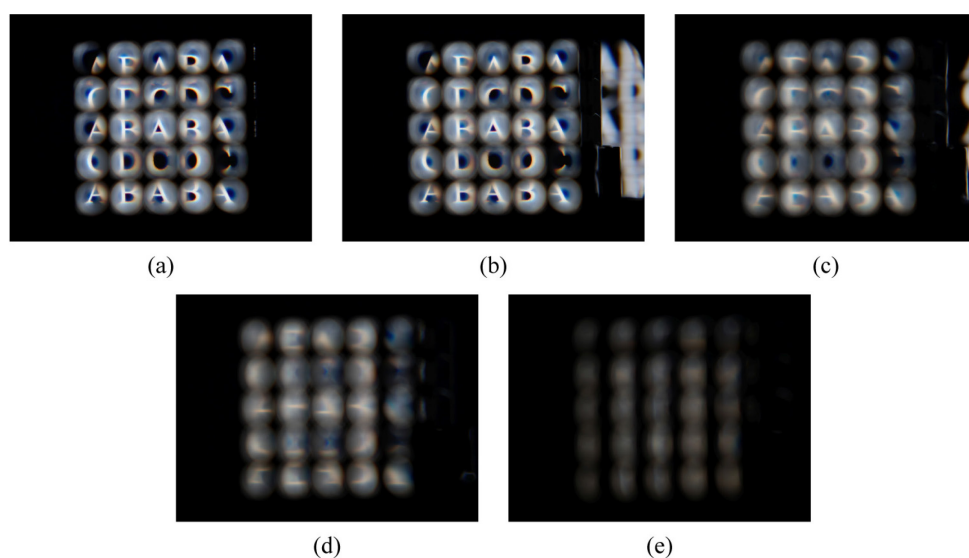


図 6.8 短焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルによる実験結果：

- (a) パン角 0° ($s_1 = 0 \text{ mm}$, $s_2 = 0 \text{ mm}$)、(b) パン角 10° ($s_1 = 3.1 \text{ mm}$, $s_2 = 1.5 \text{ mm}$)、
- (c) パン角 20° ($s_1 = 6.3 \text{ mm}$, $s_2 = 3.1 \text{ mm}$)、(d) パン角 25° ($s_1 = 8.1 \text{ mm}$, $s_2 = 4.0 \text{ mm}$)、(e) パン角 30° ($s_1 = 10.0 \text{ mm}$, $s_2 = 5.0 \text{ mm}$)

6.5 考察

長焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルを用いたとき、図 6.6 に示したようにパンチルト角がこれらの最大角に近づくと黒色の線が観察された。パンチルト角が小さいため、これらの線はレンズの収差によって生じたものではない。これは、パンチルト角が最大角に近づくと光線が物体側のフィールドレンズの境界近くを通過するため、光線の一部が失われるためである。

短焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルにおいては、正方形の要素レンズ側面の粗面を平滑な面で置き換えるべきである。ただし、光の拡散が除かれたとしても、図 6.8 に示したようにパン角の増大に伴って結像倍

率が拡大する傾向にある。この結像倍率の変化はレンズの収差によって発生していると考えられる。要素レンズの F ナンバーが小さいため、レンズアレイは非球面レンズで構成すべきである。これにより、最大パンチルト角を拡大できる可能性がある。

スケールアップモデルを用いたいずれの実験でも、提案法を確かめるためにレンズアレイは手動でシフトさせた。実用的な実装のためには、レンズアレイのサイズはイメージセンサーのアクティブ領域のサイズにまで小さくする必要がある。1/3 インチイメージセンサーを用いた場合、レンズアレイのサイズは 4.8 mm×3.6 mm となる。レンズピッチを 0.05 mm、焦点距離を 0.1 mm とすると、最大パンチルト角は $\pm 26.6^\circ$ となる。このようなレンズアレイを、厚さを 0.25 mm、材質を熔融シリカとして作製すると質量は約 0.01 g となる。このような軽量のレンズアレイの微小な変位は、ピエゾアクチュエーターを用いて高速に実行することができる。現在市販されているピエゾアクチュエーターを用いた場合、このレンズアレイを 1 kHz で振動させることが可能であり、高速パンチルトシステムを実現できる。

6.6 本章のまとめ

本章の研究では、フラットパネル型のライトフィールド AR ディスプレイの光学系に基づき、5 枚のレンズアレイで構成されるフラットパネル型の画像パンチルトシステムを提案した。2 枚のレンズアレイの微小な変位によって大きなパンチルト角を実現できるため、高速パンチルト機能を実現できる。

二つのスケールアップモデルを構築して提案法を検証した。まず、パンチルト機能の原理を確認するため、市販の長焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルを構築した。画像がシフトすることが確認でき、最大のパンチルト角とチルト角はそれぞれ 5.0° と 3.0° だった。次に、カスタムの短焦点距離のレンズアレイで構成されるもう一つのスケールアップモデルを構築し、最大パンチルト角を調べた。シフト角が 20° よりも大きくなると、レンズの収差と光の拡散による像の劣化が明らかであった。そのため、さらなるパンチルト角の拡大の

ためには一体形成された非球面レンズアレイを用いるべきである。提案法は画像のシフトを約 1 kHz で実行できる可能性があるため、高速パンチルトカメラの実現が期待できる。

第7章 高速パンチルト機能を有するライトフィールドカメラ

7.1 研究目的

ライトフィールドカメラは 3 次元映像を撮影できるデバイスである。ライトフィールドカメラによって取得した空間の 3 次元情報を用いると、空間内の物体の形状を再構成できるほか、任意の奥行き位置にある物体に計算による焦点合わせ（リフォーカス）を行うことが可能である。ライトフィールドカメラの画角を拡大することで、より広範囲の実空間の 3 次元映像を撮影することが可能になる。パンチルト機能はライトフィールドカメラの画角を拡大するために有効な機能であり、第 6 章で開発したパンチルト光学系を応用することでライトフィールドカメラの画角を拡大できる。

この章では、高速パンチルトシステムに、リフォーカス機能を導入する方法を提案する。ライトフィールドカメラはイメージセンサーにレンズアレイを組み合わせて構成されている。そこで、第 6 章で提案したパンチルト光学系を構成するレンズアレイと、ライトフィールドカメラを構成するレンズアレイとを一体化することを考えた。

本研究では、レンズピッチが約 $100\ \mu\text{m}$ のレンズアレイを作製して、これをピエゾステージおよびイメージセンサーと組み合わせたシステムを作製し、提案法の有効性を実験により確認する。

7.2 高速パンチルトリフォーカスカメラの原理

本研究で提案するシステムは 2 枚のレンズアレイによってパンチルト機能とリフォーカス機能を実現する。第 1 のレンズアレイは、広角ライトフィールド情報を取得し、パンチルト機能を実現する機能をもつ。第 1 のレンズアレイには開口アレイが組み合わせられており、この開口アレイは第 1 のレンズアレイ

によって得られた広角ライトフィールド情報の一部を選択して、狭角ライトフィールド情報を取り出す。第 1 のレンズアレイはアクチュエーターに取り付けられており、これによってレンズアレイがシフトすると、開口アレイによって広角ライトフィールド情報の異なる部分が選択されて、パンチルト機能を実現できる。第 2 のレンズアレイは、第 1 のレンズアレイと開口アレイによって取得された狭角ライトフィールド情報を拡大結像することで、詳細なライトフィールド情報を取得する。詳細なライトフィールド情報からは視差画像群を抽出することができ、この視差画像群を用いてリフォーカス画像を得る。

本研究で提案するパンチルト機能を有するライトフィールドカメラの構成を図 7.1 に示す。レンズアレイ 1 は広角ライトフィールド情報を取得するレンズアレイであり、その焦点面にインテグラルイメージングの要素画像群を形成する。開口アレイはレンズアレイ 1 の焦点面に配置されていて、レンズアレイ 1 によって取得した広角ライトフィールド情報の一部を選択して狭角ライトフィールド情報を得る。レンズアレイ 2 は、レンズアレイ 1 と開口アレイによって得られた狭角ライトフィールド情報をイメージセンサー上に拡大結像し、詳細なライトフィールド情報を得る。

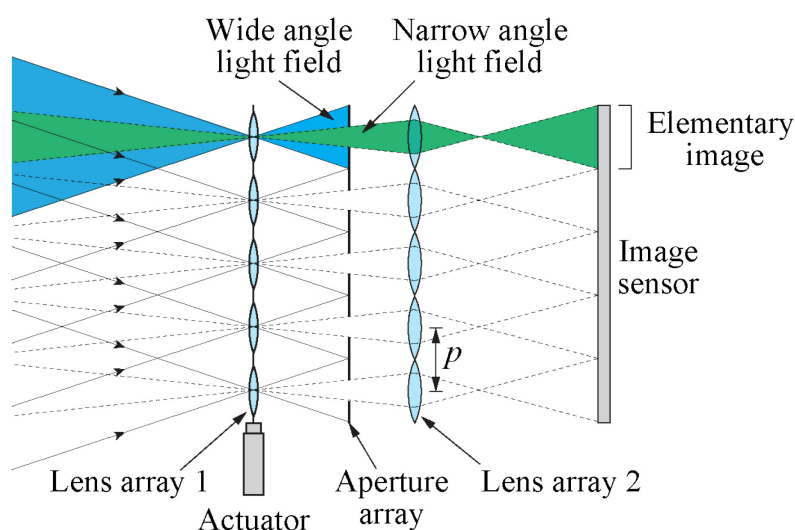


図 7.1 パンチルト機能を有するライトフィールドカメラの構成

パンチルト機能はレンズアレイ 1 をアクチュエーターによってシフトすることで実現する。図 7.2 に示すように、レンズアレイ 1 がシフトすると、開口によって選択される要素画像の部分が変化する。これにより、レンズアレイ 2 によって結像される狭角ライトフィールド情報の入射角が回転して、パンチルト機能を実現できる。レンズアレイは周期構造をもつため、要求されるシフト量は最大でもレンズピッチ p であり、第 6 章のパンチルトシステムと同様である。レンズアレイに要求されるサイズはイメージセンサーのアクティブエリアと同程度の小さいサイズであり、レンズピッチを $100 \mu\text{m}$ 程度とすれば、 piezo アクチュエーターを用いて高速にシフトすることが可能である。これにより、高速なパンチルト機能を実現できる。

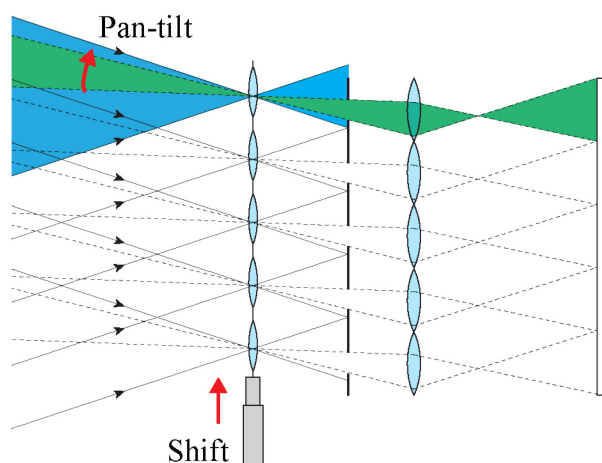


図 7.2 レンズアレイのシフトによるパンチルト

図 7.3 にパンチルトライトフィールドカメラの要素結像系を示す。最大パンチルト角 θ_{\max} は、レンズアレイ 1 の焦点距離 f_1 とレンズピッチ p によって次式で与えられる。

$$\theta_{\max} = \pm \tan^{-1}(p/2f_1) \quad (7.1)$$

開口アレイの開口径 a は要素結像系の画角 ϕ 、すなわち狭角ライトフィールド情報を取得可能な角度を決定し、次のような式で与えられる。

$$\phi = 2 \tan^{-1}(a/2f_1) \quad (7.2)$$

レンズアレイ 2 の結像倍率 M は、イメージセンサーの画素を有効に利用するため、開口の像の直径がレンズピッチと等しくなるように、

$$M = p/a = s_2/s_1 \quad (7.3)$$

と設定する。ただし、レンズアレイ 2 と開口アレイの間隔 s_1 と、同レンズアレイとイメージセンサーの間隔 s_2 は以下の結像公式を満たす。

$$1/f_2 = 1/s_1 + 1/s_2 \quad (7.4)$$

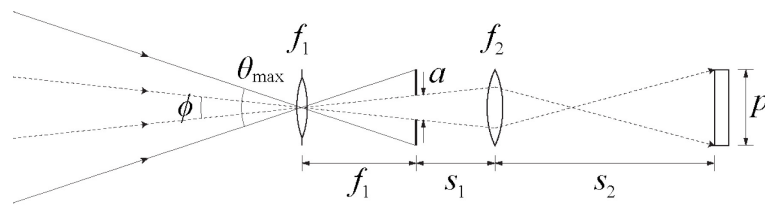


図 7.3 パンチルトライトフィールドカメラの要素結像系

リフォーカス機能を実現するためには撮影したライトフィールド情報から視差画像群を抽出する必要がある。ある光線方向に対応する 1 枚の視差画像は、各要素画像の同じ位置にある画素を収集することで抽出できる。図 7.4 に視差画像を抽出する様子を示す。

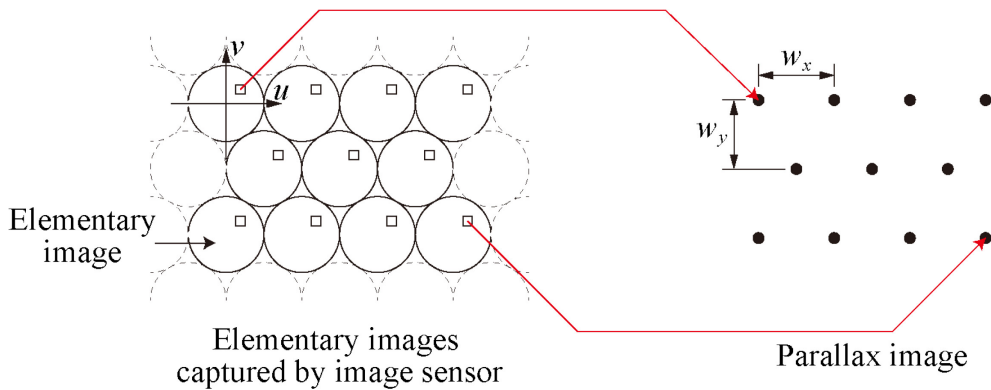


図 7.4 視差画像の抽出

本研究では、イメージセンサー上の画素を有効に利用するためにレンズアレイのレンズ配置をハニカム配置とした。そのため、要素画像から画素を取り出してレンズの位置に画素値を配置することで、画素値もハニカム状に並ぶ。レンズアレイの水平方向のレンズピッチ p_x と垂直方向のレンズピッチ p_y は異なり、

$$p_y = \frac{\sqrt{3}}{2} p_x \quad (7.5)$$

の関係にある。そのため、サンプリング点の水平ピッチ w_x と垂直ピッチ w_y も異なり、レンズピッチと同様に $w_y = \sqrt{3}w_x/2$ の関係にある。このハニカム状に並んだ画素値を、通常の直交配列の画素値に変換する必要がある。その際に、画素値の情報を失わないためにオーバーサンプリングを行う。オーバーサンプリングの際の画素ピッチは、水平画素ピッチ w_x を基準として、水平・垂直ともに $w_x/2$ とする。視差画像のオーバーサンプリングの様子を図 7.5 に示す。

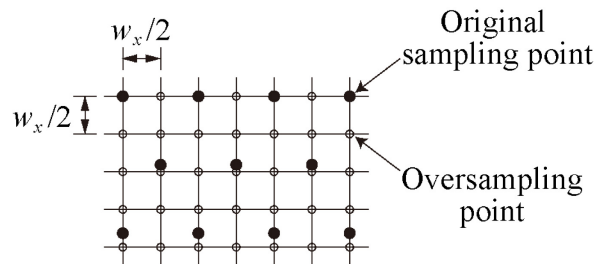


図 7.5 視差画像のオーバーサンプリング

要素画像中から収集する画素の位置から、視差画像の光線方向を求めることができる。要素画像中で (u, v) に位置する画素に対応する開口アレイ面での入射光線の水平入射角 θ_x と垂直入射角 θ_y は、式(7.3)の結像倍率と図 7.3 から次式のように求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{u/M}{2f_1} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{ua/p}{2f_1} \right) \quad (7.6)$$

$$\theta_y = \tan^{-1}\left(\frac{v/M}{2f_1}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{va/p}{2f_1}\right) \quad (7.7)$$

図 7.6 に、要素画像上で u に位置する画素に対応する光線の水平入射角 θ_x を示す。

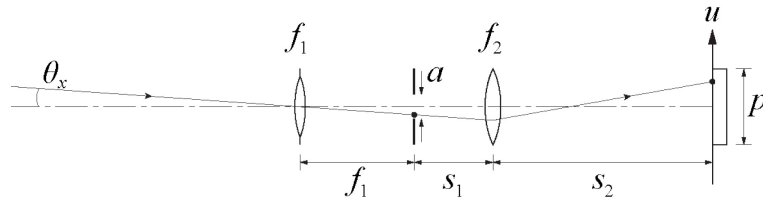


図 7.6 光線の水平入射角

7.3 実験装置

7.3.1 レンズアレイおよび開口アレイの設計・作製

実験で使用するレンズアレイおよび開口アレイの設計と作製を行った。今回の実験では、レンズアレイ 1 と 2 レンズアレイ 2 の二つのレンズアレイを使用するが、それぞれ必要な性能が異なる。レンズアレイ 1 は広角ライトフィールド情報を取得する機能をもつため、様々な角度から入射した平行光を焦点面なるべく小さいスポットに集光する性能が求められる。一方、レンズアレイ 2 は、開口アレイによって選択された狭角ライトフィールド情報を拡大結像して詳細なライトフィールド情報を取得してリフォーカスを実現する機能をもつため、開口面の狭角ライトフィールド情報を、指定した倍率で高画質に結像する性能が求められる。

2 種類のレンズアレイの設計にあたり、両者に共通するレンズピッチを決定した。この後の節で述べるが、使用するピエゾステージの最大シフト量が $100 \mu\text{m}$ であるため、これに近い値となるようにした。レンズピッチ P がイメージセンサの画素ピッチ ($3.45 \mu\text{m}$) の整数倍であると要素画像抽出を抽出する際に画像処理が容易であるため、画素数 $N = 30$ として、 $P = 103.5 \mu\text{m}$ とした。また、

材料には合成石英（屈折率 $n_d = 1.459$ ）を使用した。レンズ形状は平凸として設計を行った。

(1) レンズアレイ 1 の設計・作製

レンズアレイ 1 は、最大パンチルト角 $\theta_{\max} = \pm 25^\circ$ として設計を行った。レンズアレイ 1 の焦点距離 f_1 は、レンズピッチと最大パンチルト角が決まると式(7.1)より求めることができ、 $f_1 = 111.0 \mu\text{m}$ となった。凸面の曲率半径 r_1 は $50.9 \mu\text{m}$ と、レンズピッチに対して小さい値となった。ZEMAX を用いてこの平凸レンズのシミュレーションを行った結果、入射角が 25° に近い平行光を入射させると、曲率半径が小さいためレンズ外周部では入射光が全反射してレンズとして作用しないことが判明した。そのため、レンズアレイ 1 を構成する各レンズのレンズ径 D_1 はレンズピッチの $1/2$ である $51.75 \mu\text{m}$ とした。このレンズアレイの広角ライトフィールド情報の取得性能を向上させるため、非球面形状を導入し、ZEMAX による最適設計を行った。非球面形状を表す式は、一般的に用いられる次の式によった。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (7.8)$$

式中の z はレンズ頂点からの距離であり、 r はレンズ中心軸からの距離、 c は曲率で曲率半径の逆数、 k は円錐定数である。円錐定数 $k = -1$ のときレンズ形状は球面である。入射角が 0° 、 8.3° 、 16.7° 、 25.0° の 4 種類の平行光を入射させ、それぞれが焦点面に形成するスポットサイズができる限り小さくなるように最適化を行った。最適設計の結果、レンズの曲率半径 r_1 は $55.7 \mu\text{m}$ 、円錐定数 k は -0.928 となった。図 7.7 に最適設計を行った結果の光線図と焦点面のスポットダイアグラムを示す。スポットダイアグラムに示したスポット径は RMS 半径であり、入射角 0° の場合に最も小さく、入射角が大きくなると拡大する傾向にある。

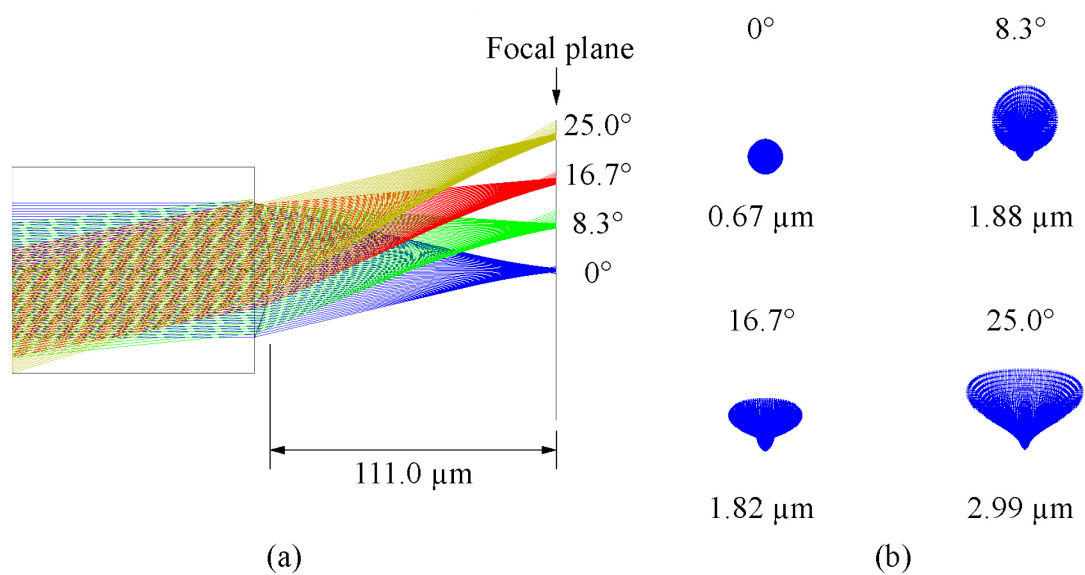


図 7.7 レンズアレイ 1 の最適設計結果：
 (a) 光線図、(b) スポットダイアグラム

以上の設計にもとづいて作製したレンズアレイ 1 の外形寸法とレンズ配置を図 7.8 に示す。レンズ径 D_1 がレンズピッチ P よりも小さいため、基板上的非レンズ形成部にはクロム膜を蒸着し不要光の透過を防止した。

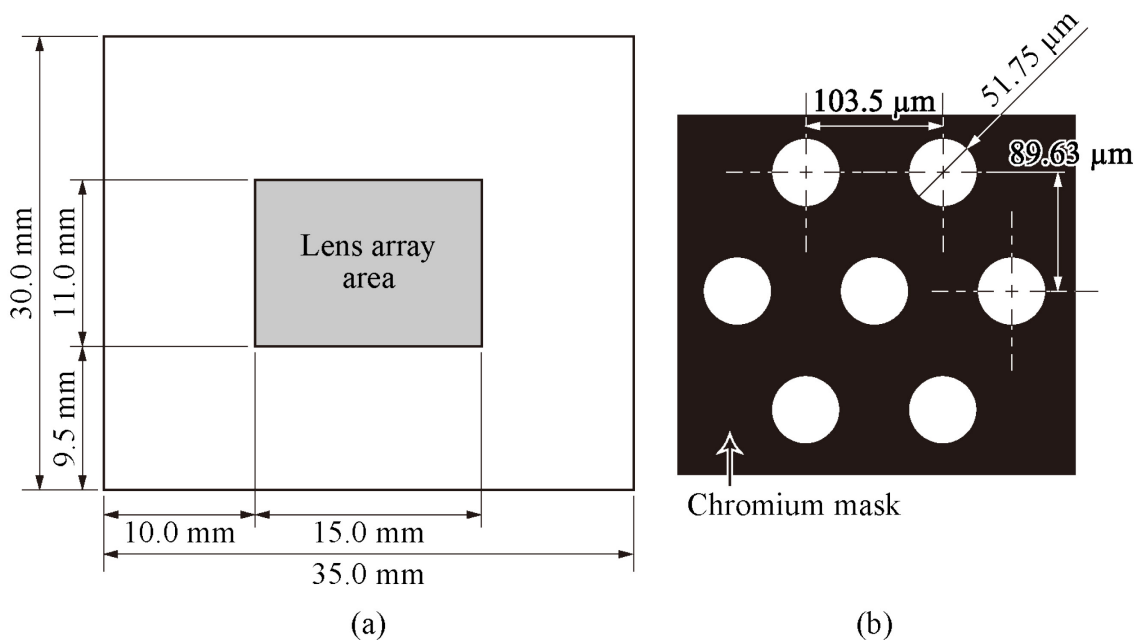


図 7.8 レンズアレイ 1 の外形寸法とレンズ配置：
 (a) 外形寸法、(b) レンズ配置

(2) レンズアレイ 2 の設計・作製

レンズアレイ 1 を構成する各レンズ（要素レンズ）の分解能から開口アレイの開口径を求めることができる。要素レンズの分解能を δ とすると、 $\delta = 1.22\lambda f_1 / D_1$ で求めることができる。波長 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ とすると、 $\delta = 1.31 \mu\text{m}$ である。すなわち、要素レンズに入射角 0° で入射した平行光が形成するスポット径は $1.31 \mu\text{m}$ である。一つのスポットをイメージセンサーの 2 画素で撮影するとすると、開口アレイの開口径 a は $N\delta / 2 = 19.6 \mu\text{m}$ と求められる。

図 7.1 に示した構成図で、開口アレイは独立した構成要素として描かれているが、可動するレンズアレイ 1 と異なり、開口アレイとレンズアレイ 2 は固定されている。そのため、レンズアレイ 2 と開口アレイを一体で作製することを検討した。また、同図ではレンズアレイ 2 とイメージセンサーの間が空間となっているが、実際にはイメージセンサー表面にはカバーガラスが取り付けられている。そのため、レンズアレイ 2 はイメージセンサーのカバーガラス上に直接密着させることにした。図 7.9 に一体化した開口アレイとレンズアレイ 2、およびイメージセンサーの位置関係を示す。

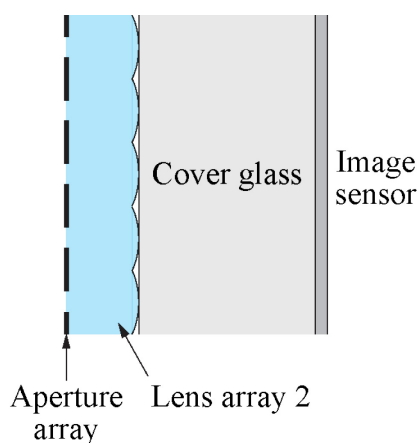


図 7.9 開口アレイとレンズアレイ 2 の一体化

レンズアレイ 2 は開口アレイによって選択された狭角ライトフィールド情報をイメージセンサー上に拡大結像する機能をもつため、結像倍率を設定する必要がある。結像倍率を設定すると、開口アレイとレンズアレイ 2 の間隔 s_1 と焦

点距離 f_2 が求められる。その際、レンズアレイとイメージセンサーの間隔 s_2 は既知である必要がある。レンズアレイ 2 をイメージセンサーのカバーガラスの上に密着させて使用することにしたため、 s_2 はカバーガラスの空気換算長である。この値はレンズアレイ 2 の設計に先立って測定を行い、 $s_2 = 770 \mu\text{m}$ という測定値を得た。また、開口アレイの開口径 $a = 19.6 \mu\text{m}$ であり、レンズピッチ $P = 103.5 \mu\text{m}$ であるため、式(7.3)より結像倍率は $M = 5.27$ となる。また、式(7.4)より開口アレイとレンズアレイ 2 の間隔 s_1 を求めると $146.0 \mu\text{m}$ となる。ただし、開口アレイとレンズアレイ 2 は一体で形成するため、この間隔 s_1 に材料の屈折率 n_d を掛けた $213.0 \mu\text{m}$ をレンズアレイの厚さの初期値とした。レンズアレイ 2 の焦点距離 f_2 は $122.7 \mu\text{m}$ であり、曲率半径 r_2 は $56.3 \mu\text{m}$ である。レンズアレイ 2 の最適な厚さ、および非球面形状を求めるため、レンズアレイ 1 と同様に ZEMAX を用いた最適設計を行った。レンズアレイの厚さおよびレンズ形状を変数とし、開口面の半径上の 4 点である $0 \mu\text{m}$ 、 $3.27 \mu\text{m}$ 、 $6.54 \mu\text{m}$ 、 $9.81 \mu\text{m}$ の高さに配置した点光源がイメージセンサー面上に結像されるときスポット径がなるべく小さくなるように最適化を行った。また、最適化の際の条件として、結像倍率が設計値の 5.27 に近くなるように設定した。最適設計の結果、レンズの曲率半径 r_2 は $63.3 \mu\text{m}$ 、円錐定数 k は -0.555 、レンズアレイの厚さは $239.8 \mu\text{m}$ となった。また、結像倍率 M は 5.16 となり、設計値である 5.27 に近い値となった。図 7.10 に最適設計を行った結果の光線図とイメージセンサー面のスポットダイアグラムを示す。開口面内の高さ $0 \mu\text{m}$ の点光源に対するスポット径が最も小さく、点光源の高さが高くなるとスポット径が拡大する傾向にある。

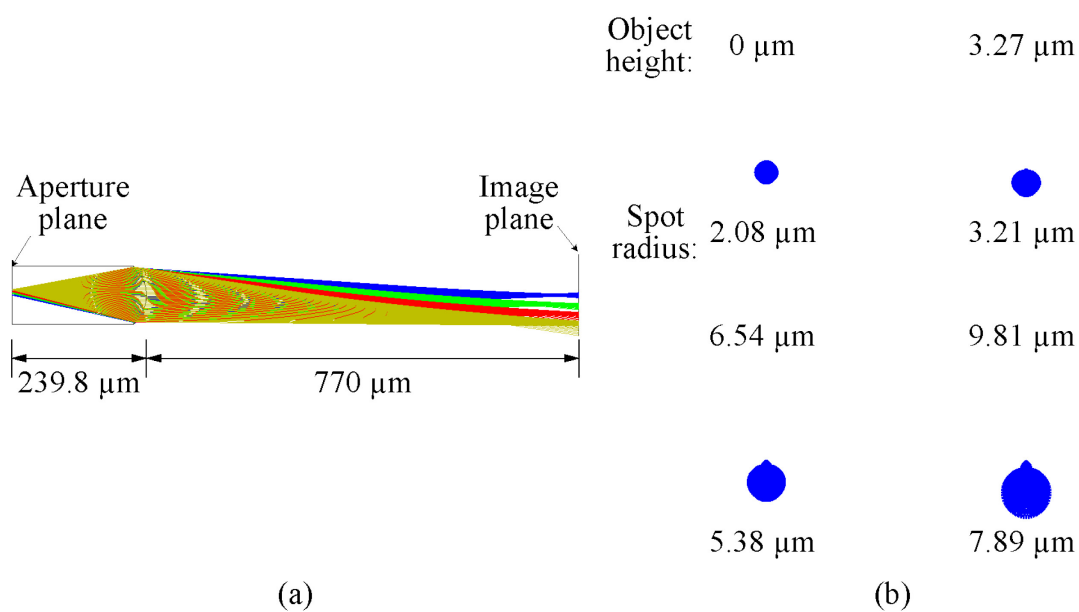


図 7.10 レンズアレイ 2 の最適設計結果：
 (a) 光線図、(b) スポットダイアグラム

レンズアレイ 2 の最適設計の過程で、レンズアレイの厚さが数 μm 程度変化すると結像特性に大きく影響を与えることが判明した。その一方で、レンズ作製における厚さ制御の精度は数十 μm 程度と、必要な精度より 10 倍程度低いことが判明した。そこで、開口アレイとレンズアレイ 2 をそれぞれ厚さ 100 μm 程度の基板に作製し、この 2 枚の間にスペーサーを挿入して空気層を設け、空気層の厚さを調整することで、開口アレイとレンズアレイ 2 を一体形成したものの厚さを実質的に調整することにした。作製したレンズアレイ 2 および開口アレイの外形寸法とレンズおよび開口の配置を図 7.11 に示す。開口アレイは、基板にクロム膜を蒸着して作製した。実際にレンズアレイ 2 および開口アレイを作製した結果、それぞれの厚さは 103.4 μm と 112.0 μm となり、これに対応した最適な空気層の厚さは 13.7 μm となった。図 7.12 に作製したレンズアレイ 2 の写真を示す。

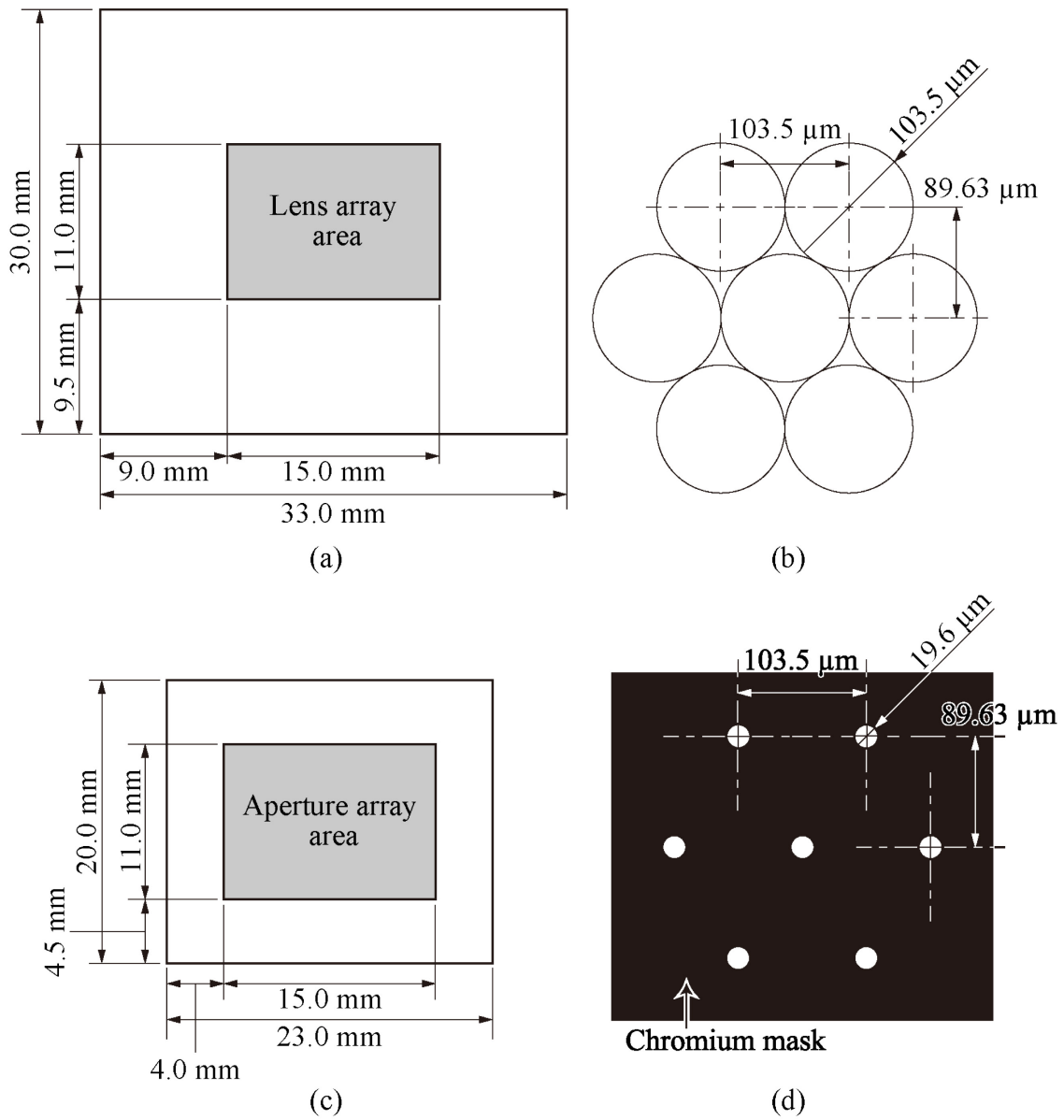


図 7.11 レンズアレイ 2 と開口アレイの外形寸法とレンズ・開口配置：
 レンズアレイ 2 (a) 外形寸法、(b) レンズ配置；
 開口アレイ (c) 外形寸法、(d) 開口配置

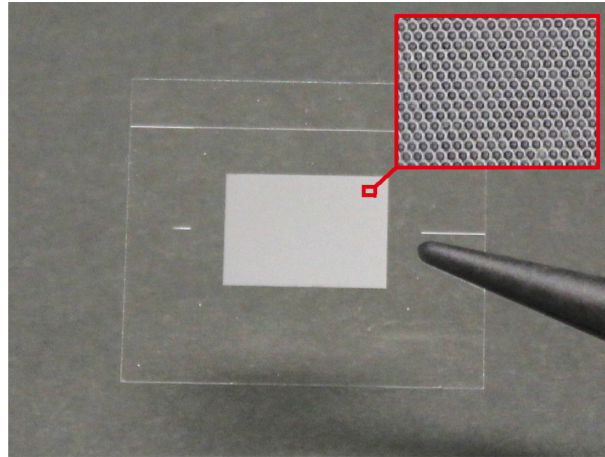


図 7.12 作製したレンズアレイ 2

以上で作製したレンズアレイ 1、レンズアレイ 2 および開口アレイを組み合わせて作製した要素結像系の光路図を図 7.13 に示す。

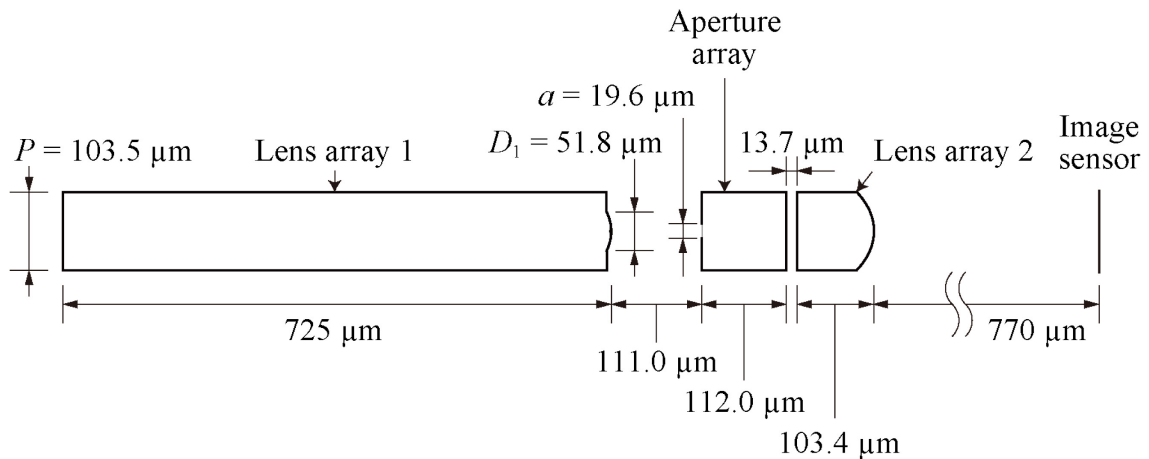


図 7.13 要素結像系の光路図

7.3.2 実験システムの構築

提案法によるパンチルト機能とリフォーカス機能を検証するため、作製したレンズアレイ・開口アレイと 4K カメラおよびピエゾステージを用いて実験システムを構築した。構築した実験システムの構成を図 7.14 に示す。最大パンチルト角の計算値 θ_{max} は $\pm 25^\circ$ であり、要素結像系の画角 ϕ の計算値は 10.1° である。レンズアレイ 1 はピエゾステージに取り付けられており、 xy 方向にシフトさせることができる。ピエゾステージには 2 軸ステージである PK2L150-U100 (THK

プレジジョン株式会社)を使用した。ピエゾステージの最大シフト量は $100\ \mu\text{m}$ であり、レンズアレイのレンズピッチとほぼ等しい。また、分解能は $2\ \text{nm}$ 、共振周波数は $420\ \text{Hz}$ である。このピエゾステージを、ピエゾコントローラーの NCM6201C (THK プレジジョン株式会社) を用いて駆動した。ピエゾコントローラーは、ピエゾステージに内蔵された変位センサーの出力をもとにクローズドループ制御を行っているため、ヒステリシスやクリープが生じない。4K カメラには ORX-10G-123S6C (FLIR Systems, Inc.) を使用した。解像度は $4,096 \times 3,000$ であり、画素ピッチは $3.45\ \mu\text{m}$ である。レンズアレイ 2 は 4K カメラのイメージセンサーのカバーガラス上に固定されている。開口アレイは、レンズアレイ 2 との間にスペーサーを挟んで固定した。

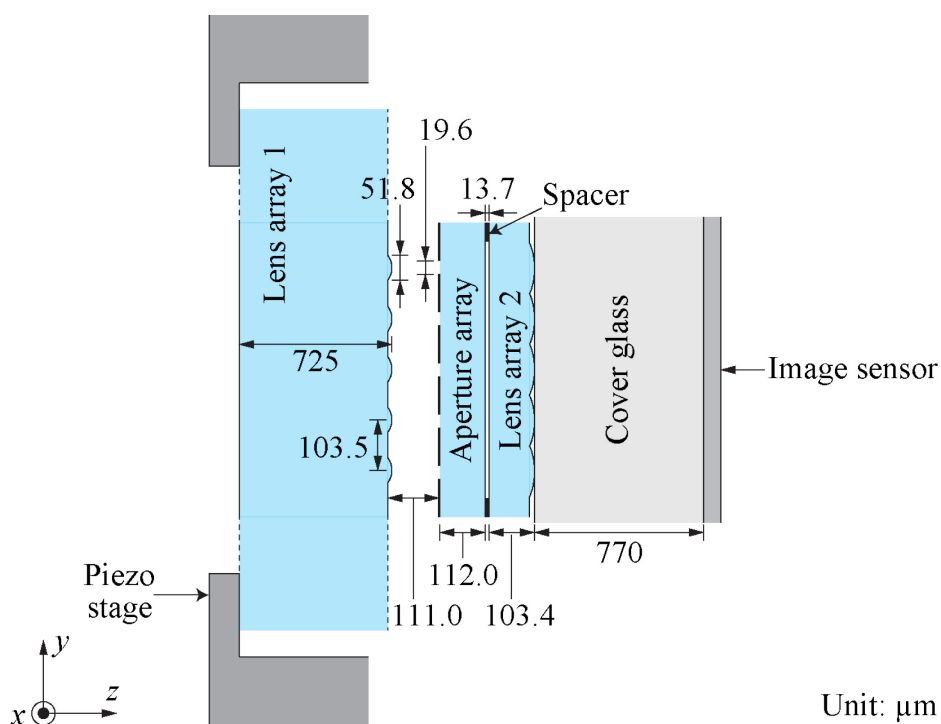


図 7.14 実験システムの構成

図 7.15 に構築した実験システムを示す。使用したピエゾステージの姿勢の制限からカメラシステムの光軸が鉛直方向を向いてしまうため、中間にミラーを挿入した $4f$ リレー光学系を用いて光軸を 90° 折り曲げて実験を行った。

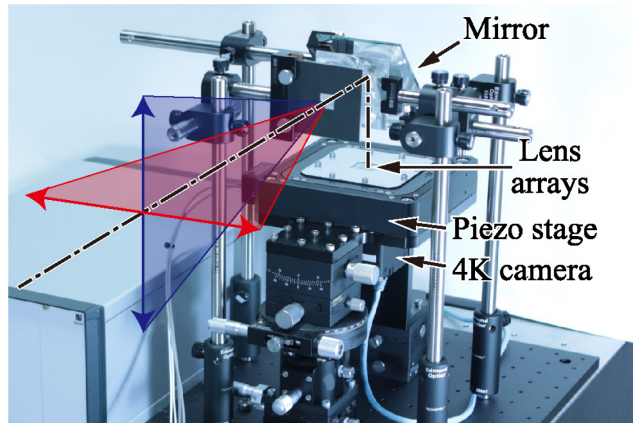


図 7.15 構築した実験システム

7.4 実験結果

まず、要素画像群を撮影して、視差画像を抽出する実験を行った。撮影した要素画像群から視差画像を抽出するためにはレンズアレイを構成する各レンズの中心を求める必要がある。ただし、イメージセンサー上へのレンズアレイの取り付けの際には、センサーに対してレンズアレイが回転しているため、その回転を補正して各レンズの中心を求める必要がある。そこで、レンズアレイを構成する各レンズが、図 7.16 に示すような座標モデルに従って並んでいると仮定して各レンズの中心を求めた。イメージセンサーに対するレンズアレイの回転を θ_L で表す。 (x, y) はイメージセンサー上の座標を表す。各レンズ $L_{m,n}$ の中心座標は $(x_{m,n}, y_{m,n})$ で表すことにする。添え字の m と n は n 行 m 列目のレンズであることを表す。また、レンズがハニカム配置であるため偶数行のレンズと奇数行のレンズで中心座標を求める式が異なる。行番号が偶数のレンズの中心座標は次式で求められる。

$$\begin{pmatrix} x_{m,n} \\ y_{m,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} mp_x \cos \theta_L - np_y \sin \theta_L \\ mp_x \sin \theta_L + np_y \cos \theta_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{0,0} \\ y_{0,0} \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

行番号が奇数のレンズの中心座標は次式で求められる。

$$\begin{pmatrix} x_{m,n} \\ y_{m,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(m + \frac{1}{2}\right) p_x \cos \theta_L - n p_y \sin \theta_L \\ \left(m + \frac{1}{2}\right) p_x \sin \theta_L + n p_y \cos \theta_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{0,0} \\ y_{0,0} \end{pmatrix} \quad (7.10)$$

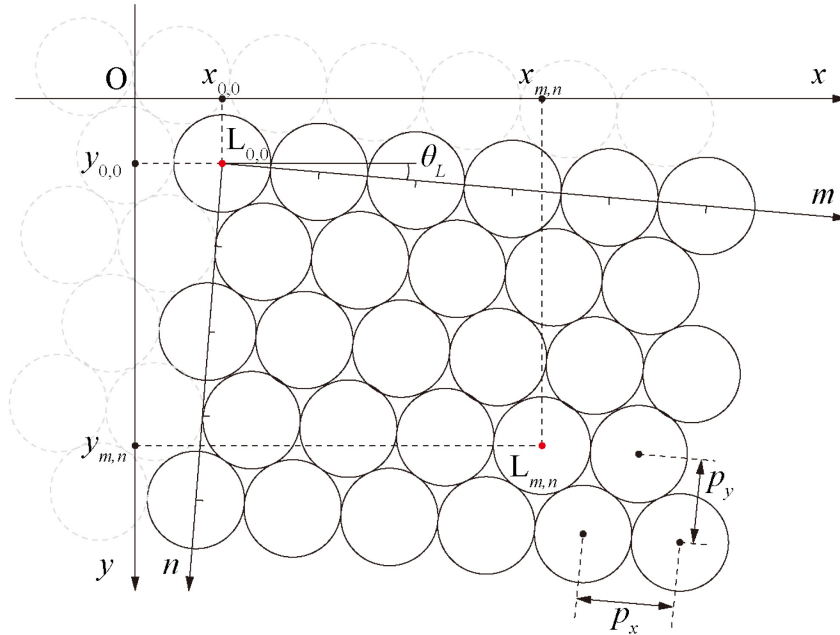


図 7.16 レンズアレイの座標モデル

視差画像の抽出は、レンズアレイの回転を補正してから行った。イメージセンサー上で左上と右下にある二つのレンズのように、なるべく離れた位置にある二つのレンズの中心座標を画像上で測定し、その数値からレンズアレイの回転 θ_L を求め、画像を $-\theta_L$ だけ回転させて補正を行った。測定したレンズアレイの回転 θ_L は 0.156° であった。

まず、パンチルト角をいずれも 0° として要素画像群を撮影した。図 7.17 に撮影した要素画像群を示す。被写体として、雷門の提灯の画像を使用した。同図 (a) を見ると、被写体である雷門の提灯が撮影されていることが分かる。同図 (b) は (a) の一部を拡大したものであるが、円形の要素画像群がハニカム配列で並んでいることが確認できる。

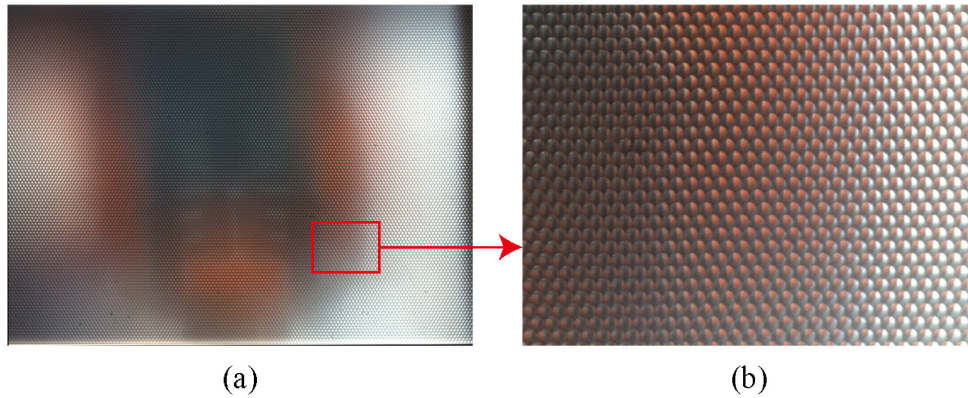


図 7.17 要素画像群の撮影結果：
(a) 要素画像群全体、(b) 要素画像群の一部を拡大

この要素画像群から視差画像を抽出した結果を図 7.18 に示す。各視差画像に付した番号は視点番号である。視点番号ごとに要素画像群から抽出する画素の位置が異なるため、入射光線の水平入射角 θ_x および垂直入射角 θ_y がそれぞれ異なる。視点番号の変化に応じて、被写体を異なる角度から撮影した視差画像が抽出されていることが分かる。ただし、入射光線の角度が大きい視差画像ではひずみが大きくなった。

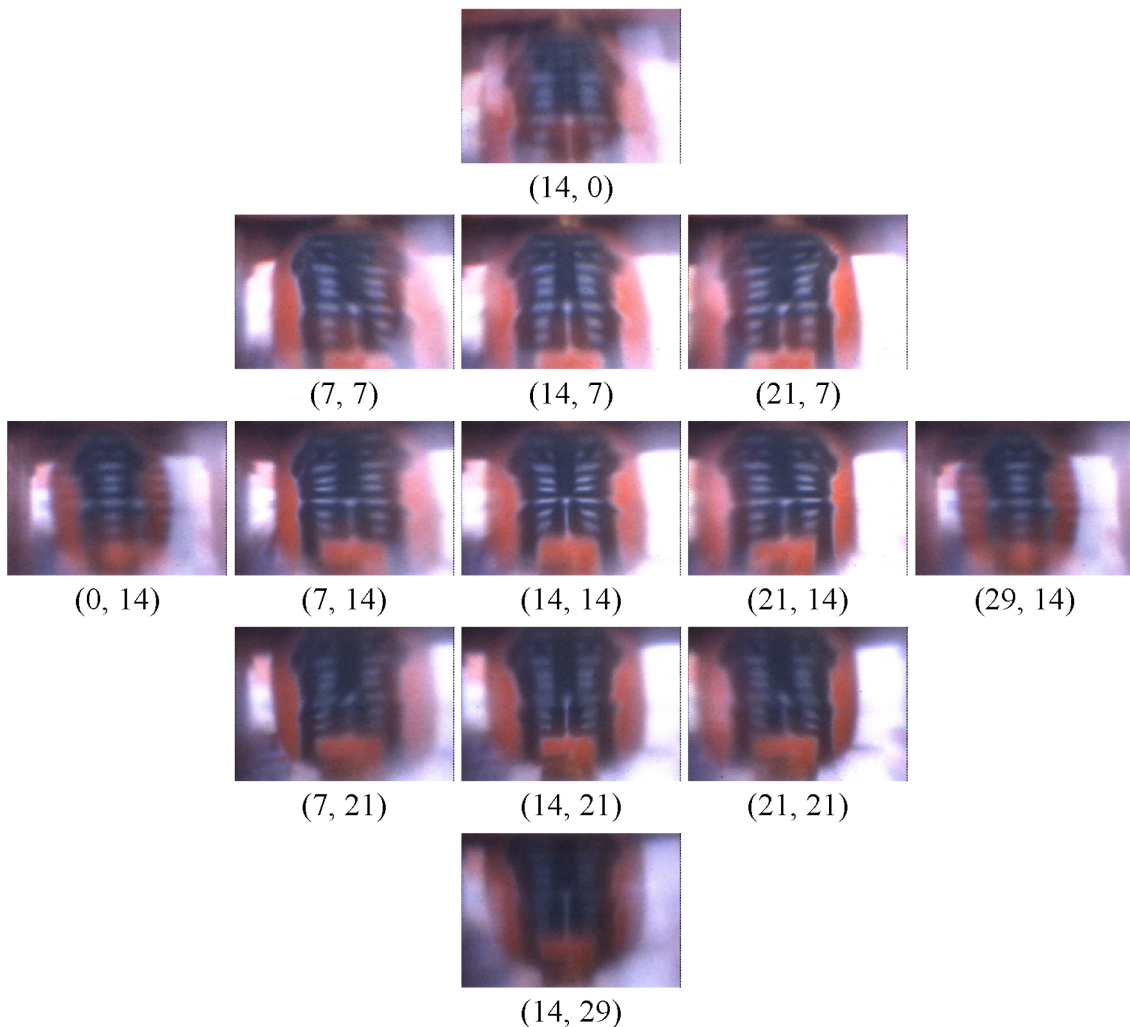


図 7.18 視差画像の抽出結果

続いて、ピエゾステージによってレンズアレイのシフト量を変化させ、パンチルト角を変えながら要素画像群を撮影して視差画像を抽出し、パンチルト機能を検証した。図 7.19 に、異なるパンチルト角で撮影した要素画像群から視差画像を抽出した結果を示す。抽出した視差画像はいずれも水平垂直の入射角がほぼ 0° のもの（視点番号(14, 14)）である。被写体としては同じく、雷門の提灯の画像を使用した。同図 (a) から (g) は画像をパンさせた結果で、同図 (h) から (n) は画像をチルトさせた結果である。パン角が変化すると、被写体の水平方向の異なる部分が観察できることが分かり、チルト角が変化すると被写体の垂直方向の異なる部分が観察できていることが分かる。この結果から。パン

チルト機能が実現できていることを確認できた。ただし、パンチルト角が最大値に近づくにつれて画像のひずみが大きくなったほか、視差画像が暗くなった。

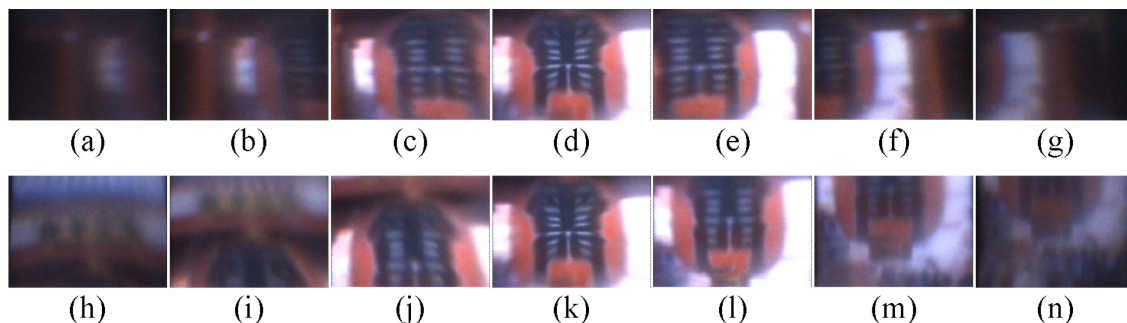


図 7.19 パンチルト機能の実験結果：

パン角 (a) -25° 、(b) -20° 、(c) -10° 、(d) 0° 、(e) 10° 、(f) 20° 、(g) 25° ；
チルト角 (h) -25° 、(i) -20° 、(j) -10° 、(k) 0° 、(l) 10° 、(m) 20° 、(n) 25°

最後に、リフォーカス機能の検証を行った。被写体として、異なる奥行き位置に配置したシカとウマの置物を用いた。図 7.20 に、それぞれの物体にリフォーカスを行った結果を示す。同図 (a) は手前に配置されたシカの置物にフォーカスを合わせた結果であり、同図 (b) は奥に配置されたウマの置物にフォーカスを合わせた結果である。一方の被写体にフォーカスを合わせると、もう一方の被写体がボケていることが分かる。この結果から、リフォーカス機能が実現できることが確認できた。ただし、奥の物体よりも手前の物体にフォーカスを合わせている場合のほうが比較的シャープな画像が得られている。また、いずれの物体にピントを合わせた場合も、画像のシャープさは低かった。

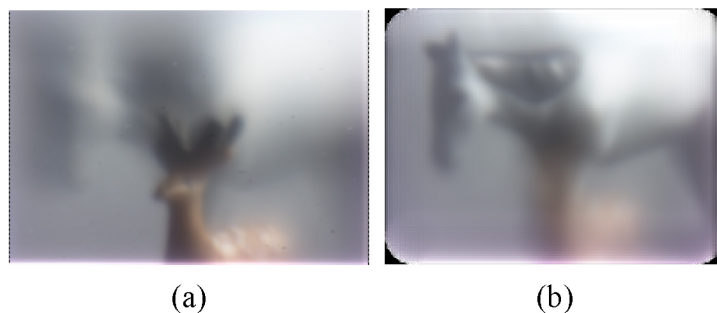


図 7.20 リフォーカス機能の実験結果：

(a) 手前の物体にフォーカス、(b) 奥の物体にフォーカス

7.5 考察

視差画像を抽出する実験においては、図 7.18 に示したように、入射光線の角度が大きくなるほど画像のひずみが大きくなる結果となった。この原因としては、レンズアレイ 2 の特性と、レンズ中心の不正確さが考えられる。まず、前者のレンズアレイ 2 の特性であるが、図 7.10 に示したように、開口の中心より外側の点ほどイメージセンサー上で大きいスポットとして結像される特性がある。入射光線の入射角度が大きいほど、スポットは開口中心から離れた位置に形成されるためスポット径が拡大し、本来抽出すべきでない角度の光線が取り出されている可能性がある。また、後者のレンズ中心の不正確さも、本来抽出すべきでない角度の光線を取り出す原因となる。視差画像を抽出する際には、レンズアレイ上のレンズは、図 7.16 に示した座標モデルに従って正確に配置されているものと考えている。しかし、実際に撮影した要素画像群に、このモデルに従って各レンズの中心点を描画すると、実際のレンズ中心とモデルのレンズ中心にずれが生じている箇所が存在することが判明している。単純な座標モデルを用いるのではなく、各レンズの中心を個別に求めることで正確な視差画像抽出が可能になる。

パンチルト機能を検証した実験においても、図 7.19 に示したように視差画像のひずみが確認された。この原因としては、レンズアレイ 2 の特性とレンズ中心の不正確さに加えて、レンズアレイ 1 の特性の影響も考えられる。レンズアレイ 1 は、図 7.7 に示したように、入射光線の角度が大きくなると焦点面のスポット径が拡大する傾向にあり、パンチルト角が大きくなると視差画像のひずみとして現れると考えられる。また、パンチルト機能の検証ではパンチルト角が大きくなると視差画像が暗くなる傾向も見られた。これは、パンチルト角を大きくするとレンズアレイ 1 のシフト量が大きくなり、レンズアレイ 1 の遮光部と開口アレイの遮光部の重なりが大きくなり、透過光量が減少するためである。

レンズアレイ 1 とレンズアレイ 2 の特性が良好でない原因として、レンズピッチに対して焦点距離が短いため曲率が大きく、収差が大きいことが挙げられる。今回レンズアレイの材料として使用した合成石英は屈折率が 1.46 程度であるが、より高屈折率な材料を用いることで、曲率の小さいレンズを作製することが可能になり、収差を低減できる。

リフォーカス機能の検証実験では、図 7.20 に示すように異なる奥行き位置の物体それぞれにリフォーカスが可能であることを示したが、いずれもボケが大きかった。これは、ここまでで考察した各種要因によって生じた視差画像のひずみが原因であると考えられる。ひずんだ視差画像をもとにリフォーカス計算を行ったために、これらのひずみが累積してボケとして結果画像に現れていると考えられる。そのため、視差画像のひずみを改善することで、よりシャープなリフォーカス画像を得られる。

7.6 本章のまとめ

本研究では、第 6 章で提案した高速パンチルトシステムに、リフォーカス機能を導入する方法を提案した。提案システムは 2 枚のレンズアレイと開口アレイ、ピエゾアクチュエーター、およびイメージセンサーから構成される。

レンズピッチが $103.5 \mu\text{m}$ の 2 種類のレンズアレイと、開口ピッチが $103.5 \mu\text{m}$ の開口アレイを作製した。これらのレンズアレイと開口アレイ、ピエゾステージ、および 4K 解像度のイメージセンサーを組み合わせることで実験システムを構築し、パンチルト機能およびリフォーカス機能を検証した。

第8章 将来の展望

本論文では、ライトフィールド技術としてインテグラルイメージングを用いた表示技術と撮影技術に関する研究を行い、前半ではARディスプレイに関する研究について説明し、後半では高速パンチルトシステムに関する研究について説明した。2次元映像における表示技術と撮影技術が対になっているように、本研究におけるライトフィールド技術を基盤とした3次元映像の表示技術と撮影技術も表裏一体である。本研究で提案した高速パンチルトライトフィールドカメラによって撮影した映像を3次元映像として表示するためには、ライトフィールドディスプレイが必要であり、そのような表示デバイスとして、本研究で提案したライトフィールドARディスプレイを用いることができる。図8.1に、撮影システムと表示システムを統合した概念図を示す。このように2つのシステムを統合する場合、撮影したライトフィールド映像を表示に適したライトフィールド映像へと変換する画像処理が必要になる。

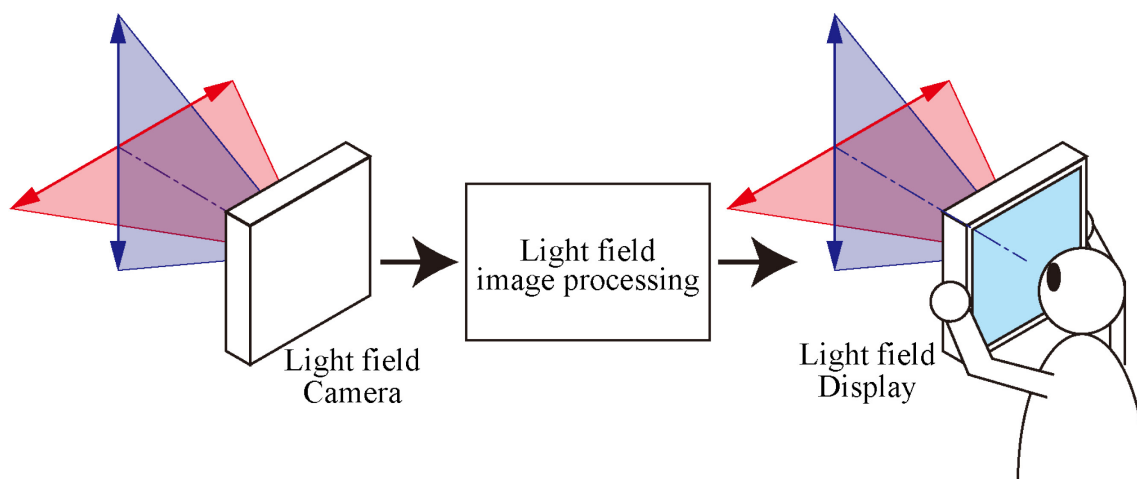


図 8.1 撮影システムと表示システムの統合

本研究で提案したライトフィールドARディスプレイをフラットパネル型で実現して手軽な利用を可能にする上で、システムの厚さは薄いほうが望ましい。本研究の提案方法では、システムの厚さは主にレンズアレイの厚さと、レンズ

アレイの焦点距離によって決まる。本研究の実験で使用したレンズアレイは厚さが約 3 mm、焦点距離は 3.3 mm であり、実験システム全体の厚さは約 30 mm であった。より薄型に実現するためには、短焦点距離で薄いレンズアレイが必要である。レンズアレイは焦点距離を短くすると、レンズピッチが縮小し、レンズアレイの厚さも薄くなる傾向にある。

ライトフィールド AR ディスプレイは、使用するディスプレイデバイスの技術の進展により、高性能化が期待できる。解像度に着目すると、第 3 章の実験では要素レンズ当たりの光線数を 40×40 としていたが、これを 8K ($7,680 \times 4,320$) ディスプレイを使用して実現した場合、立体像の解像度は 192×108 と、一般的な 2 次元ディスプレイと比較して低くなる。ディスプレイデバイス技術が順調に進展し、解像度が 16K、32K のように向上すれば、立体像の解像度も向上する。32K ($30,720 \times 17,280$) 解像度のディスプレイが利用できれば、立体像の解像度は 768×432 と大きく向上する。図 8.2 に、ディスプレイデバイスの解像度ごとの、立体像の解像度と光線数の関係をグラフにしたものを示す。ディスプレイデバイスの解像度が向上すれば、光線数が増えても立体像の解像度が高く保たれることが分かる。

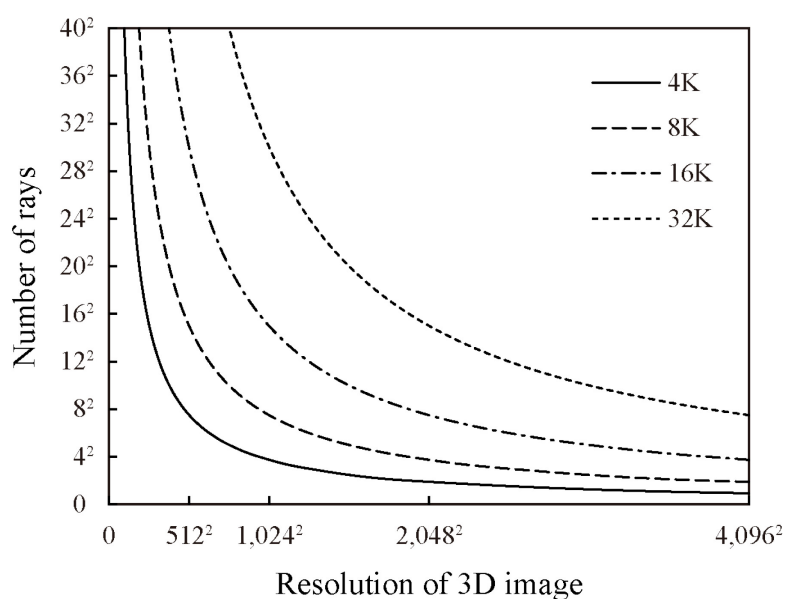


図 8.2 立体像の解像度と光線数の関係

また、ディスプレイデバイスの透過率は AR ディスプレイ全体の透過率に大きく影響をおよぼす。カラーLCD を用いた場合、偏光板の透過率が 1/2 であるほか、カラーフィルターの透過率は 1/3 未満であり、トータルの透過率は 16% に満たない。自発光型のディスプレイデバイスである OLED ディスプレイを用いると、偏光板とカラーフィルターが不要であるため透過率が向上する。カラー OLED ディスプレイとしては透過率 50% 程度のものが実現されている。AR ディスプレイの透過率が向上することで、実風景と 3 次元映像のより自然な重畳表示が可能になる。

高速パンチルトライトフィールドカメラにおいても、使用するデバイス技術の進展による高性能化が期待できる。第 7 章の実験では 4K 解像度のカメラを使用した。表示デバイスに関する考察で述べた解像度の向上のように、イメージセンサーの解像度が向上することで、より高解像度な視差画像を撮影することが可能になり、得られるリフォーカス画像の解像度も向上する。ただし、イメージセンサーの高解像度化に伴う画素ピッチの縮小は光の波長程度までに限られるため、これは高解像度化に向けた制約となる。4K および 8K カメラのフレームレートは 60 Hz が一般的であるが、それぞれ 120 Hz ものが実用化されている。フレームレートを向上させることで、時分割による解像度の向上が可能である。図 8.3 に、カメラの解像度とフレームレートの組み合わせに対する、視差画像の解像度と視差画像数の関係をグラフにしたものを示す。同一解像度のカメラでもフレームレートが向上すれば、視差画像数が増加しても解像度が高く保たれることが分かる。

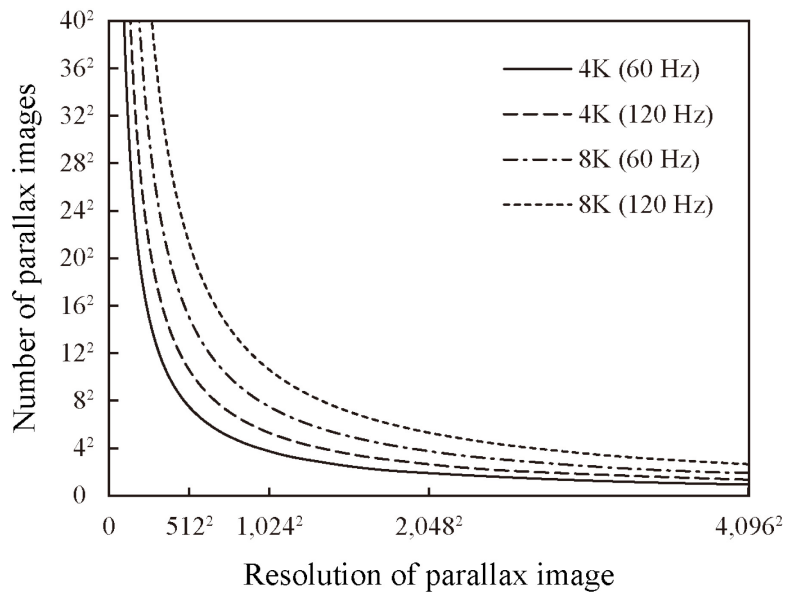


図 8.3 視差画像の解像度と視差画像数の関係

また、第6章および第7章でレンズピッチを $100\ \mu\text{m}$ 程度にすることで約 $1\ \text{kHz}$ でのパンチルトが可能になると述べたが、この速度でのパンチルトを実現するためにはレンズアレイを駆動するピエゾステージ自体の小型化も必要である。イメージセンサー近傍に、レンズアレイと一体化した小型のピエゾアクチュエーターを組み込むことで高速なパンチルトが可能になる。

高速パンチルトシステムのピエゾアクチュエーターに要求されるシフト周波数は、高速パンチルトシステムの利用方法によって異なる。高速パンチルトシステムで広い範囲を周期的に撮影する場合、ピエゾアクチュエーターに要求されるシフト周波数はビデオレート ($60\ \text{Hz}$) 程度である。一方、カメラの視線をある点からある点へと高速に移動させる場合はピエゾアクチュエーターをステップ駆動する必要がある。ステップ駆動は高調波成分を多く含む動作であり、 kHz オーダーの周波数で駆動できるピエゾアクチュエーターが必要である。

高速なパンチルトライトフィールドカメラで撮影した要素画像群からの視差画像抽出や、抽出した視差画像群を用いたリフォーカス処理などの画像処理には時間がかかる。一方でこれらの画像処理は並列度が高い処理であり、高速化には GPU が利用できる。これについては、学内の共同研究として情報工学科の

並木美太郎教授と研究を進めている。現在のところ、リフォーカス処理を 3.854 ms で実現できている。

第 7 章の実験で得られた視差画像やパンチルト画像、およびリフォーカス画像にボケやひずみが現れた原因の一つとしてレンズアレイ 1 および 2 の収差を挙げた。この収差の原因として考えられるのは、これらのレンズアレイを構成する各レンズの形状である。いずれのレンズアレイもレンズピッチに対して焦点距離が短いため曲率半径が小さく、収差の影響が大きく生じていると考えられる。製造プロセス上の制限によりレンズアレイの材料には合成石英を使用した。屈折率が 1.46 程度と低いため曲率半径が小さくなった。高屈折率の材料としては、例えば屈折率 1.86 の S-TiH53 がある。材料の屈折率が n のとき、焦点距離は $n-1$ に反比例する。そのため、同一の焦点距離のレンズアレイを実現する場合は、高屈折率の材料を使用することで曲率半径を大きくすることが可能であり、収差を低減できる。

第9章 結論

本研究では、ライトフィールド技術としてインテグラルイメージングを用いた表示技術と撮影技術の両面から研究を行った。表示技術については、AR ディスプレイを手軽に利用できるように、ライトフィールド技術を用いてこれをフラットパネル型で実現する方法を提案した。また、提案したライトフィールドAR ディスプレイにおいて、3次元映像の実在感を向上させる背景遮蔽を実現する方法と、視力補助を可能にする背景結像機能を実現する方法を提案した。撮影技術については、ライトフィールド技術を用いてカメラの高速なパンチルトを実現する方法を提案し、さらに高速パンチルトシステムにおいてリフォーカス機能を実現する方法を提案した。

第1章では、本研究の背景を説明した。将来の3次元映像の表示・撮影技術として研究されているライトフィールド技術の基盤であるライトフィールドの概念について説明した。また、ライトフィールド技術に包含される技術であり、本研究の基礎となる技術であるインテグラルイメージングについて説明した。

第2章では、本研究の関連技術について説明した。表示技術として、インテグラルイメージングを原理とする立体ディスプレイについて説明した。また、AR技術について説明し、現在は、ユーザーはヘッドマウントディスプレイを着用する必要があるため、普及が進まないことを説明した。次に、撮影技術として、現在のカメラ技術は解像度やダイナミックレンジなどの電子的性能は急激に進歩しているが、パンチルトや焦点合わせは機械的機構を必要とするため性能向上が進んでいないことを説明した。従来の高速パンチルトシステムやライトフィールドカメラに関する研究例について説明した。

第3章では、本研究で提案するライトフィールド技術を用いたフラットパネル型のARディスプレイについて説明した。インテグラルイメージングディスプレイにレンズアレイを追加することで透明化を行い、風景に3次元映像を重畳表示することを可能にした。フラットパネル型であるため、薄型軽量に実現で

き、タブレットやスマートフォンの形態で AR 用表示デバイスが実現できる。プロトタイプシステムを作製し、提案法の有効性を示した。

第 4 章では、第 3 章で提案したフラットパネル型の AR 用表示デバイスに背景遮蔽機能を付与する方法を提案した。従来の AR 技術では、背景が立体像に透けて見えることが問題であり、これを解決するためには複雑な光学系が必要であった。本研究では、3 枚のレンズアレイと 2 枚のディスプレイから構成されるシンプルな光学系である対称インテグラルイメージング光学系を提案し、背景遮蔽機能を光学的に実現した。第 3 章で作製したプロトタイプシステムを改造して行った実験により、提案法の有効性を示した。

第 5 章では、フラットパネル型の AR 用表示デバイスを用いて視力補助機能を実現する方法を提案した。対称インテグラルイメージング光学系のレンズアレイの間隔を適切に変更して非対称化することで、実風景を任意の距離に結像することができる。遠くにある物体を近くに結像したり、近くにある物体を遠くに結像したりすることができるため、近視、遠視、老眼などの屈折異常の人に対して視力補助機能を提供できる。第 3 章で作製したプロトタイプシステムを改造したもののほか、スケールアップモデルを作製して実験を行い、提案法の有効性を確認した。

第 6 章では、ライトフィールド型のレンズアレイ光学系により高速なパンチルトシステムを実現する方法を提案した。レンズアレイを微小にずらすと透過光の方向が大きく変化することをもとに、新しいパンチルト光学系を考案し、最適な構成方法について研究を行った。レンズアレイをレンズピッチ (100 μm) 程度動かすことで光線の方向を $\pm 30^\circ$ 程度変えることができるため、ピエゾ素子を用いてレンズを移動して、高速なパンチルトができる。長焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルと、短焦点距離のレンズアレイを用いたスケールアップモデルによる実験により、提案法の有効性を示した。

第 7 章では、高速パンチルトシステムにリフォーカス機能を付与する方法を提案した。ライトフィールドカメラは、イメージセンサーにレンズアレイを取り付けた構造をもっているため、高速パンチルトシステムを構成するレンズア

レイとライトフィールドカメラを一体化して、リフォーカス機能を実現した。提案システムを2枚のレンズアレイと開口アレイ、ピエゾステージおよび4Kイメージセンサーによって構成した。レンズアレイは、レンズピッチが103.5 μm のものを作製して最大パンチルト角 $\pm 25^\circ$ の光学系を構築し、提案法によるパンチルト機能とリフォーカス機能の有効性を実験により示した。

第8章では、本研究で提案したライトフィールド技術を応用した表示技術と撮影技術の統合について論じた。また、本研究で提案した表示技術および撮影技術と、これらに用いる各種デバイスの進歩の可能性から、本研究の将来展望を示した。

本研究により、ライトフィールド技術の表示技術と撮影技術の両側面への広範な応用の可能性を示した。

謝辞

まず、本研究の機会を与えてくださり、貴重なお時間を割いて大変細やかにご指導とご鞭撻をくださりました高木康博教授に心より感謝を申し上げます。本研究は、先生のご理解とご指導なしには成し遂げられませんでした。お忙しい中、研究や論文作成の方針について数々の有益なご助言をくださり、広範にわたってご支援くださりましたことに深く感謝の意を表します。

千葉大学の中村淳也博士には、高木研究室ご在職中、数々のご助言とご指導を頂き、感謝の念に堪えません。また、高木研究室に日本学術振興会外国人特別研究員として来日され、筆者に博士課程進学のきっかけを与えてくださった LetinAR Inc. の Dr. Soon-gi Park に感謝の意を表します。日常より、研究のさまざまな面でご支援をいただいた高木研究室の皆様にも感謝の意を表します。

第 3 章から第 6 章で使用した実験装置の設計および作製にあたっては、株式会社ユニオプト 統括部長 高和宏行博士に数多くのご助言を頂き、深く感謝の意を表します。また、第 7 章の実験で使用したレンズアレイおよび開口アレイはウシオ電機株式会社によって作製されたものです。作製にあたってご尽力いただいた、同社システムソリューション事業部 マーケティング&イノベーション部 福富康博氏、同社技術統括本部開発部 機能部品開発グループ シニアエンジニア 太田圭亮氏、同エンジニア 古屋隆太氏に感謝の意を表します。

研究活動を進めるにあたり、筆者は日本学術振興会特別研究員 DC1 として採用され、援助を受けました。本研究の一部は JSPS 科研費（特別研究員奨励費）JP17J02464、およびセコム科学技術振興財団の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] A. Gershun, “The light field,” Moscow, 1936, P. Moon and G. Timoshenko, translations, *J. Math. Phys.*, **18**(2), 51–151 (1939).
- [2] E. Adelson and J. Bergen, “The plenoptic function and the elements of early vision,” in *Computational Models of Visual Processing* (MIT, 1991), pp. 3–20.
- [3] J. Geng, “Three-dimensional display technologies,” *Adv. Opt. Photonics*, **5**, 456–535 (2013).
- [4] J. Hong, Y. Kim, H. Choi, J. Hahn, J. H. Park, H. Kim, and B. Lee, “Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues,” *Appl. Opt.*, **50**(34), H87–H115 (2011).
- [5] B. Javidi and S. H. Hong, “Three-dimensional holographic image sensing and integral imaging display,” *J. Disp. Technol.*, **1**(2), 341–346 (2005).
- [6] M. G. Lippmann, “Épreuves réversibles. Photographies intégrales,” *C. R. Acad. Sci.*, **146**, 446–451 (1908).
- [7] J.-H. Park, K. Hong, and B. Lee, “Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging,” *Appl. Opt.*, **48**(34), H77–H94 (2009).
- [8] J. Arai, M. Kawakita, T. Yamashita, H. Sasaki, M. Miura, H. Hiura, M. Okui, and F. Okano, “Integral three-dimensional television with video system using pixel-offset method,” *Opt. Express*, **21**(3), 3474–3485 (2013).
- [9] K. Hong, J. Yeom, C. Jang, J. Hong, and B. Lee, “Full-color lens-array holographic optical element for three-dimensional optical see-through augmented reality,” *Opt. Lett.*, **39**(1), 127–130 (2014).
- [10] K. Okumura, H. Oku, and M. Ishikawa, “High-Speed Gaze Controller for Millisecond-order Pan/tilt Camera,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (IEEE, 2011), pp. 6186–6191.

- [11] T. Naemura, T. Yoshida, and H. Harashima, “3-D computer graphics based on integral photography,” *Opt. Express*, **8**(4), 255–262 (2001).
- [12] R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, “Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera,” *Compt. Sci. Tech. Rep.*, **2**(11), 1–11 (2005).
- [13] J. P. Rolland and H. Fuchs, “Optical versus video see-through head-mounted displays in medical visualization,” *Presence*, **9**(3), 287–309 (2000).
- [14] H. Hua and B. Javidi, “A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display,” *Opt. Express*, **22**(11), 13484–13491 (2014).
- [15] Y. Takaki, Y. Urano, S. Kashiwada, H. Ando, and K. Nakamura, “Super multi-view windshield display for long-distance image information presentation,” *Opt. Express*, **19**(2), 704–716 (2011).
- [16] Y. Takaki and N. Nago, “Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display,” *Opt. Express*, **18**(9), 8824–8835 (2010).
- [17] Y. Takaki, K. Tanaka, and J. Nakamura, “Super multi-view display with a lower resolution flat-panel display,” *Opt. Express*, **19**(5), 4129–4139 (2011).
- [18] M. Fuchs, R. Raskar, H.-P. Seidel, and H. P. A. Lesch, “Towards passive 6D reflectance field display,” *ACM Trans. Graph.*, **27**(3), 58:1–58:8 (2008).
- [19] R. Azuma, “A survey of augmented reality,” *Presence*, **6**(4), 355–385 (1997).
- [20] H. Kakeya, S. Ishizuka, and Y. Sato, “Realization of an aerial 3D image that occludes the background scenery,” *Opt. Express*, **22**(20), 24491–24496 (2014).
- [21] K. Kiyokawa, M. Billinghurst, B. Campbell, and E. Woods, “An occlusion-capable optical see-through head mounted display for supporting co-located collaboration,” in *Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (IEEE,2003), pp. 133–141.
- [22] A. Maimone and H. Fuchs, “Computational augmented reality eyeglasses,” in *Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (IEEE, 2013), pp. 29–38.

- [23] A. Maimone, D. Lanman, K. Rathinavel, K. Keller, D. Luebke, and H. Fuchs, “Pinlight displays: Wide field of view augmented eyeglasses using defocused point light source,” *ACM Trans. Graph.*, **33**(4), 89:1–89:11 (2014).
- [24] E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley, 2002), Chap 6.
- [25] F.-C. Huang, D. Lanman, B. A. Barsky, and R. Raskar, “Correcting for optical aberrations using multilayer displays,” *ACM Trans. Graph.*, **31**(6), 185:1–185:12 (2012).
- [26] V. F. Pamplona, M. M. Oliveira, D. G. Aliaga, and R. Raskar, “Tailored displays to compensate for visual aberrations,” *ACM Trans. Graph.*, **31**(4), 81:1–81:12 (2012).
- [27] F.-C. Huang, G. Wetzstein, B. A. Barsky, and R. Raskar, “Eyeglasses-free display: towards correcting visual aberrations with computational light field display,” *ACM Trans. Graph.*, **33**(4), 59:1–59:12 (2014).
- [28] J. D. Zook, “Light beam deflector performance: a comparative analysis,” *Appl. Opt.*, **13**(4), 875–887 (1974).
- [29] G. D. Reddy and P. Saggau, “Fast three-dimensional laser scanning scheme using acousto-optic deflectors,” *J. Biomed. Opt.*, **10**(6), 064038 (2005).
- [30] S. Zeng, X. Lv, C. Zhan, W. R. Chen, W. Xiong, S. L. Jacques, and Q. Luo, “Simultaneous components for spatial and temporal dispersion of acousto-optical deflectors for two-dimensional scanning with a single prism,” *Opt. Lett.*, **31**(8), 1091–1093 (2006).
- [31] D. Trypogeorgos, T. Harte, A. Bonnin, and C. Foot, “Precise shaping of laser light by an acousto-optic deflector,” *Opt. Express*, **21**(21), 24837–24846 (2013).
- [32] D. P. Resler, D. S. Hobbs, R. C. Sharp, L. J. Friedman, and T. A. Dorschner, “High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering,” *Opt. Lett.*, **21**(9), 689–691 (1996).
- [33] X. Wang, D. Wilson, R. Muller, P. Maker, and D. Psaltis, “Liquid-crystal blazed-grating beam deflector,” *Appl. Opt.*, **39**(35), 6545–6555 (2000).

- [34] O. Bryngdahl and W.-H. Lee, "Laser beam scanning using computer-generated holography," *Appl. Opt.*, **15**(1), 183–194 (1976).
- [35] W. Gerbig, "Computer-interferometric holograms used for laser beam scanners," *Opt. Commun.*, **36**(2), 90–93 (1981)
- [36] E. A. Watson, "Analysis of beam steering with decentered microlens arrays," *Opt. Eng.*, **32**(11), 2665–2670 (1993).
- [37] J. Duparre and R. Goring, "Numerical wave optical analysis of microlens array telescopes and comparison with experimental results," *Appl. Opt.*, **42**(33), 3992–4001 (2003).
- [38] A. Akatay, C. Ataman, and H. Urey, "High-resolution beam steering using microlens arrays," *Opt. Lett.*, **31**(19), 2861–2863 (2006).
- [39] A. Akatay and H. Urey, "Design and optimization of microlens array based high resolution beam steering system," *Opt. Express*, **15**(8), 4523–4529 (2007).

業績

査読論文（本研究に関わるもの）

1. Y. Takaki and **Y. Yamaguchi**, “Flat-panel see-through three-dimensional display based on integral imaging,” Opt. Lett., **40**(8), 1873–1876 (2015). (本文第 3 章の内容に関連する)
2. **Y. Yamaguchi** and Y. Takaki, “See-through integral imaging display with background occlusion capability,” Appl. Opt., **55**(3), A144–A149 (2016). (本文第 4 章の内容に関連する)
3. **Y. Yamaguchi** and Y. Takaki, “Asymmetric integral imaging system for a see-through three-dimensional display with background imaging function,” Opt. Express, **25**(17), 20369–20380 (2017). (本文第 5 章の内容に関連する)
4. **Y. Yamaguchi** and Y. Takaki, “Flat-type image pan-tilt system with a large aperture employing a symmetric integral imaging system,” Opt. Commun., **466**, 125703 (2020). (本文第 6 章の内容に関連する)

査読論文（その他）

1. S.-G. Park, **Y. Yamaguchi**, J. Nakamura, B. Lee, and Y. Takaki, “Long-range 3D display using a collimated multi-layer display,” Opt. Express, **24**(20), 23052–23062 (2016).

受賞歴（本研究に関わるもの）

1. 山口祐太, 2014 年度 映像情報メディア学会 鈴木記念奨励賞（透過型イン

テグラルイメーシングディスプレイの提案).

国際発表

1. **Y. Yamaguchi** and Y. Takaki, “Transparent Flat-panel Integral Imaging Display,” IDW 2014 (The 21st International Display Workshops), Niigata, Japan, Dec. 2014.
2. **Y. Yamaguchi** and Y. Takaki, “See-through Integral Imaging Display with Background Occlusion Capability,” Digital Holography and Three-dimensional Imaging 2015, Shanghai, China, May 2015.
3. **Y. Yamaguchi** and Y. Takaki, “See-through Integral Imaging Display with Vision Enhancement Capability,” 3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception, and Applications 2016, Heidelberg, Germany, July 2016.
4. S.-G. Park, **Y. Yamaguchi**, J. Nakamura, B. Lee, and Y. Takaki, “Depth-fused Display for Expression of Objects with Large Depth Range,” 3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception, and Applications 2016, Heidelberg, Germany, July 2016.
5. **Y. Yamaguchi** and Y. Takaki, “High-speed Image Pan-tilt Using Two-dimensional Lens Arrays,” OSA Imaging and Applied Optics Congress, San Francisco, California, USA, June 2017.
6. Y. Takaki, T. Ueno, **Y. Yamaguchi**, and Y. Nagahama, “Simplified Implementation of Super Multi-View Head-Mounted Display,” 56th SID International Symposium (Display Week 2019), San Jose, California, USA, May 2019.
7. **Y. Yamaguchi**, T. Ono, Y. Miyajima, K. Kato and Y. Takaki, “Visual Fatigue Reducing 3D Glasses by Extending Depth of Field of Eyes,” 56th SID International Symposium (Display Week 2019), San Jose, California, USA, May 2019.

8. **Y. Yamaguchi** and Y. Takaki, “Light Field Camera with Pan-tilt Function,” IDW’19 (The 26th International Display Workshops), Sapporo, Japan, Nov. 2019.

国内発表

1. 山口祐太, 高木康博, “透過型インテグラルイメージングディスプレイの提案”, 2014年映像情報メディア学会冬季大会, 東京, 2014年12月.
2. 山口祐太, 高木康博, “透過型インテグラルイメージングディスプレイにおける背景遮蔽の実現”, 3次元画像コンファレンス 2015, 横浜, 2015年7月.
3. 山口祐太, 高木康博, “視覚補助機能を有する立体シースルーディスプレイの提案”, 3次元画像コンファレンス 2016, 大阪, 2016年7月.
4. 山口祐太, 高木康博, “フラットパネル型立体シースルーディスプレイの背景結像特性の改善”, 第64回応用物理学会春季学術講演会, 横浜, 2017年3月.
5. 山口祐太, 高木康博, “2次元レンズアレイを用いた高速画像パンチルトシステム”, 3次元画像コンファレンス 2017, 千葉, 2017年7月.
6. 並木美太郎, 高木康博, 本田舜, 山口祐太, “ライトフィールドカメラにおける GPGPU を用いた画像処理の高速化の検討”, 情報処理学会第161回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 函館, 2017年9月.
7. 山口祐太, 高木康博, “レンズアレイを用いた高速パンチルトシステムの偏向角拡大”, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 2018年3月.