

多視点表示と体積表示を組み合わせた  
裸眼立体映像の研究

澤田 進平

システム情報工学研究科  
筑波大学

2015年 3月

# 目次

1 序論 .....	1
1-1 研究背景.....	1
1-2 先行研究.....	3
1-2-1 眼鏡式.....	3
1-2-2 裸眼立体視視差.....	8
1-2-3 ボリューム表示.....	10
1-2-4 光線再生手法.....	14
1-2-5 粗インテグラルボリューム表示.....	16
1-3 研究目的.....	19
1-4 論文の構成.....	20
2 光学歪み補正とその高速計算.....	21
2-1 光学歪み.....	21
2-2 従来の対策.....	23
2-3 GPUを用いた高速描画.....	24
2-4 実験.....	29
2-5 まとめ.....	31
3 偏心レンズによる高解像度化.....	32
3-1 高解像度化に対する既存の対策.....	32
3-2 偏心レンズによる高解像度化.....	34
3-3 実装.....	37
3-4 まとめ.....	41
4 多層化で生じるモアレの低減.....	42
4-1 モアレの原因.....	42
4-2 モアレの低減.....	46
4-3 実験.....	53
4-4 まとめ.....	56
5 エッジ分割による映像のずれの低減.....	57
5-1 映像のずれ.....	57
5-2 非負・非正エッジフィルタ.....	59
5-3 フィルタによる映像ずれの抑制.....	62
5-4 実験.....	64
5-5 まとめ.....	68

6 応用：フローティングボリュームビューア .....	69
6-1 CIVI の応用 .....	69
6-2 関連研究 .....	70
6-3 フローティングボリュームビューア .....	70
6-4 まとめ .....	73
7 結論 .....	74
謝辞 .....	78
参考文献 .....	79
著者文献 .....	82

# 1 序論

## 1-1 研究背景

近年、医療やアミューズメント業界など様々な分野で活用される 3D ディスプレイが開発されている。3D ディスプレイの主な用途のひとつはエンターテインメントである。具体的には映画やサイネージといったものがある。これらの用途では、映画館に代表されるようにスクリーンは観察者から離れていることが多い。人間の遠い位置の奥行き知覚は敏感でないため、後述する輻輳調節矛盾は大きな問題とはならない。また、これらは受動的なメディアであるため、観察者が正確な奥行き知覚を得る必要もなかった。

一方、エンターテインメント以外の 3D ディスプレイの用途としてロボットの遠隔操作や遠隔手術、手術シミュレーションがある。これらの用途は能動的な作業を要するため、受動的なメディアと異なり正確な奥行き知覚が必要とされる。また、複数人で共同作業をするケースも存在するが、その場合は複数の観察者の位置に合わせて映像を適切に表示する必要がある。さらに、能動的な作業をするための立体映像提示は観察者の至近距離に対して行われるため、輻輳調節矛盾も大きな問題となる[1][2]。

輻輳調節矛盾とは、両眼の輻輳角による奥行き知覚と目の焦点調節による奥行き知覚のずれである。図 1.1.1(左)に示すように、観察者が物体を注視するとき、物体の奥行きに応じて目の向く方向のなす角度が変化する。物体が遠くに存在する場合、両眼が向く方向はほぼ平行になる。このとき、両眼と物体を結ぶ 2 つの線のなす角度(輻輳角)は小さくなる。一方、物体が近くなると両眼が向く方向は内側に寄っていき、輻輳角は大きくなる。一方、焦点調節とは眼球が注視している物体の距離に応じて目のレンズである水晶体の焦点距離を変化させる機能である。図 1.1.1(中央)に示すように、物体が遠くに存在するとき、水晶体の焦点距離は長くなる。反対に、物体が近くに存在するとき水晶体の焦点距離は短くなる。図 1.1.1(右)のように、一般的な 3D ディスプレイでは、左右の目に異なる映像を見せるため、輻輳角は映像に合わせて変化し適切な角度になるが、目の焦点調節は常にディスプレイのスクリーン面に合ってしまう。そのため、輻輳角による奥行き感と目の焦点調節による奥行き感にずれが発生し、眼精疲労や不正確な奥行き知覚が引き起こされる。なお、輻輳角による奥行き知覚は 10 m から 20 m 程度まで、目の焦点調節による奥行き知覚は 2 m 程度まで対応できることが知られている[3]。よって、遠距離に映像を表示する場合は輻輳調節矛盾の影響は小さいが、近距離に映像を表示する場合は輻輳調節矛盾が大きな問題となる。

上述の通り、既存の 3D ディスプレイのほとんどは左右の目に異なる映像を見せることで立体を認識させる方式をとっている。この方式では、輻輳調節矛盾に加え、運動視差を提示できないという問題がある。そのため、撮影位置と対応する観察位置からのみ歪みのない 3 次元空間が知覚可能で、それ以外の位置からは幾何的に歪んだ映像が見えてしまう。映画館のように映像から観察者が遠く、かつ見る位置が制限されている場合、

この歪みは大きくないが、映像を近くに提示する場合、観察者が少し動くだけで歪みが大きくなる。この問題を解決する手法として、頭部の位置を検出してその視点に応じた立体映像を表示するディスプレイも存在するが[4]、その方法で複数人に対して正しい運動視差を提示するのは難しい。

ロボットの遠隔操作や遠隔手術、手術シミュレーション等に使用するには複数人に対して同時に幾何的に歪みのない立体映像を表示できることが望ましく、また手元で作業をするために輻輳調節矛盾を抑えてできるだけ正しい奥行き知覚が可能な環境を構築する必要がある。よって、そうした要求を全て満たす 3D ディスプレイの開発が望まれる。

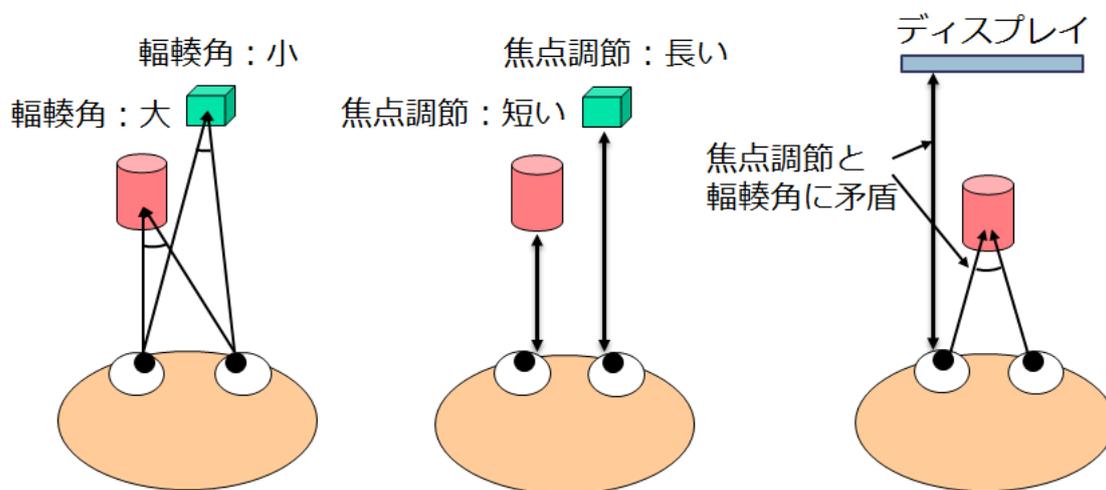


図 1.1.1. 輻輳調節矛盾

## 1-2 先行研究

### 1-2-1 眼鏡式

立体ディスプレイの実現方式の一つに眼鏡式がある。眼鏡式ではディスプレイに表示された映像を眼鏡によって左右の目に異なる映像として表示する。具体的には、左右の目の位置に合わせた映像を提示することで立体感を表現する。この方法を実現する最も簡単な方法としてアナグリフがある。図 1.2.1 に示すように、これは左右の眼鏡に異なる色のカラーフィルタを使用し、色の違いによって左右の目に別々の映像を表示する。例えば、左目には赤いフィルム、右目には青いフィルムを使用し左目用の画像は赤色、右目用の画像は青色で描画する。左右の目にはフィルムを透過する色の映像しか表示されないため、左右の目に異なる映像が表示される。この方法は最も簡易かつ安価に立体視を実現できるが、映像の色に制限を伴うという問題がある。

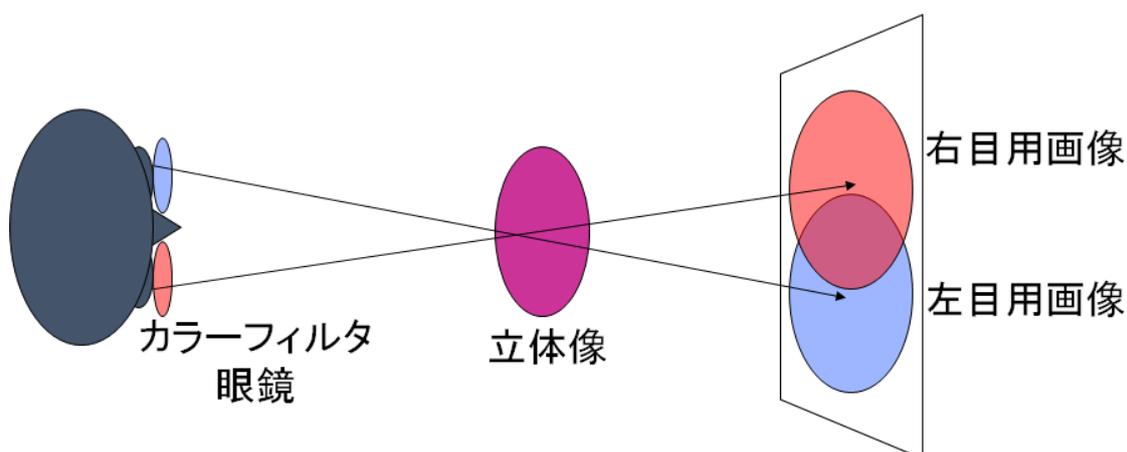


図 1.2.1. アナグリフ

色の制限が発生しない手段の一つとして偏光眼鏡方式がある。図 1.2.2 に示すようにディスプレイから左右の映像で別の偏光を持った映像を表示し、眼鏡のレンズに使用されている偏光板により映像を分離することで左右の目に別々の映像を投影する。用いられる偏光には直線偏光と円偏光の 2 種類がある。直線偏光の場合、頭部を傾けると左右の映像が正しく分離されず左右両方の映像が同時に見えてしまう現象（クロストーク）が発生するが、円偏光の場合はその問題は発生しない。この方式も眼鏡に偏光板を使用するのみのため安価にかつ容易に実現できる。偏光方式による映像表示部分としては複数プロジェクタを用いる方法以外に、スキャンラインごとに偏光を変える方法もある。ただし、この方法では 1 枚のディスプレイパネルで同時に 2 視点分の映像を表示しているため、1 視点あたりの解像度はディスプレイパネルの解像度の半分になる。

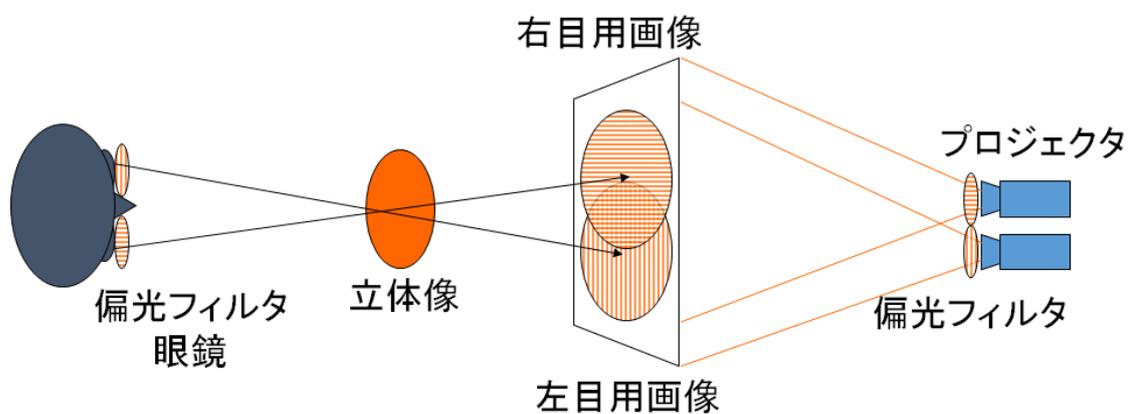


図 1.2.2. 偏光眼鏡

他にも眼鏡式立体表示方式としてよく知られたものに液晶シャッタ方式がある。この方式では、図 1.2.3 に示すようにディスプレイに左目と右目の映像を交互に表示し、それと同期して左目と右目の眼鏡レンズの透過と不透過を切り替える。これを高速に行うことにより左右の目に異なる映像が同時に表示されているように見せる。ディスプレイに左右の映像を交互に表示しているため解像度の低下は発生しない。ただし、この方式は眼鏡に電気を用いて光の透過と不透過を切り替える構造を組み込む必要があるため、眼鏡自体の製造コストが高くなるという問題がある。また、映像を切り替える際のシャッタの切り替えの反応の遅れ、LCD の応答遅れ、バックライトの漏れ光等によってクロストークが発生してしまうため、それを防ぐ対策を講じる必要がある[5]。

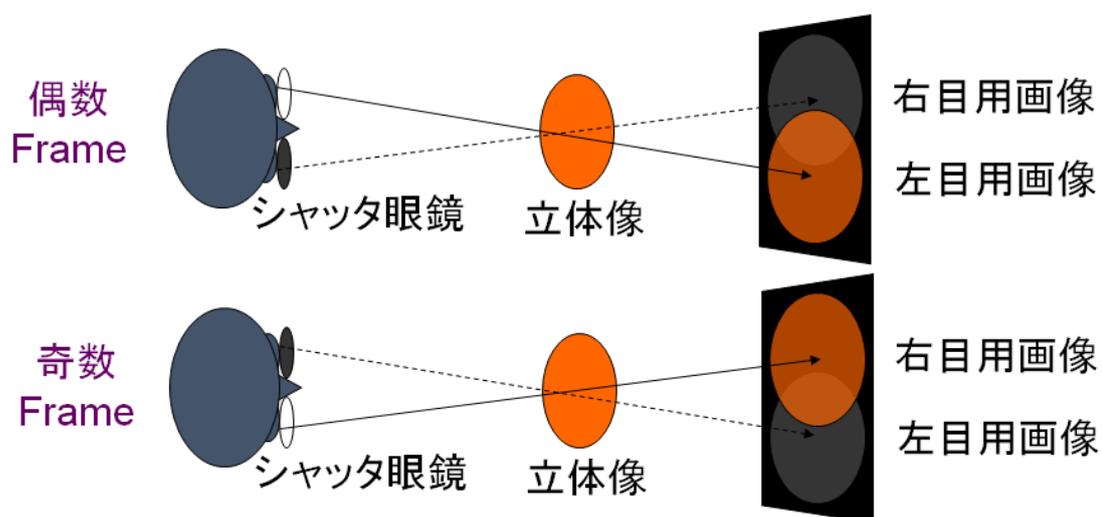


図 1.2.3. 液晶シャッタ眼鏡

比較的最近登場した眼鏡式立体表示方式として、干渉フィルタ方式がある[6][7]。図 1.2.4 に示すように、この方式では映像を構成する通常の 3 色に加え、異なる波長でほぼ同じ 3 色を加えた 6 色を使用して映像を構成する。眼鏡には特定の波長のみを通過させるダイクロイックフィルタを装着し、左右の目で見える波長が異なるようにする。元々あった 3 色で構成された映像が片目のみを通過するようにし、残りの 3 色で構成された映像は反対側の目のみを通過するようにする。こうすることで左右の目に異なる映像を表示する。ただし、この方式もダイクロイックフィルタが高価であるため眼鏡が高価になるという問題がある。

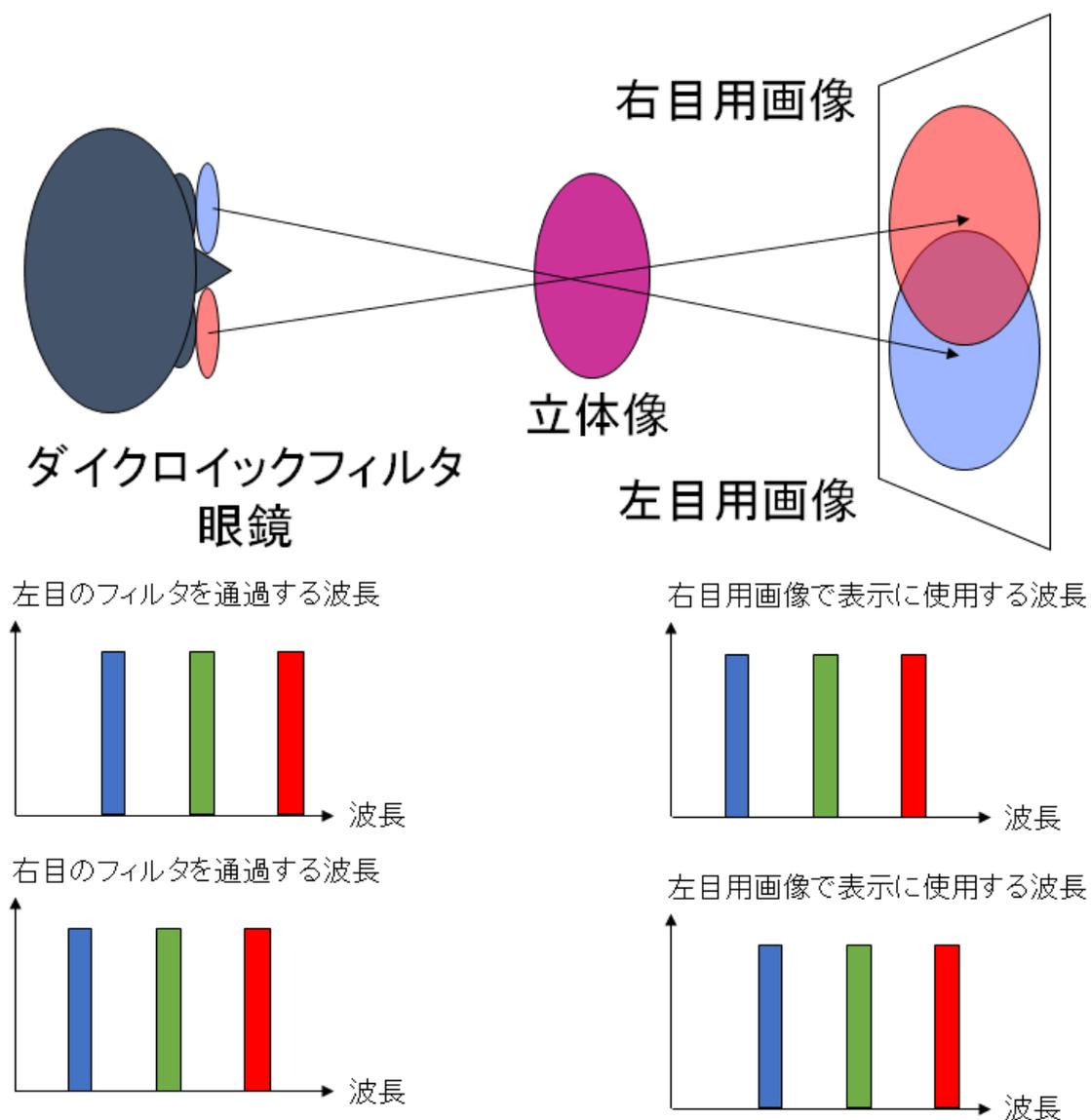


図 1.2.4. 干渉フィルタ方式

眼鏡式の共通の問題として、映像を見るために眼鏡をかける手間がかかるという点がある。この欠点は、日常的に使用する場合や観察者が相互にアイコンタクトをとってコミュニケーションをとる必要がある場合には大きな問題になる。また、表示部分は液晶パネルから2視点分の映像を表示しているのみであり、基本的には観察者がディスプレイの正面から映像を観察していることを前提としている。観察者の位置を取得し、それにあわせて描画内容を変化させれば、一人に対しては正しい運動視差を提示することができるが、複数人に正しい運動視差を同時に提示することはできない。さらに、目の焦点調節がスクリーン面に固定されることによる輻輳調節矛盾が発生してしまうという問題点もある。

### 1-2-2 裸眼立体視視差

眼鏡をかけずに立体視が可能な立体ディスプレイの方式の一つとして、視差バリア方式がある。この方式では、図 1.2.5 に示すように、画素の前に細いスリットが多数入った遮光板を配置することで、観察者の位置によって観察者から見える画素を制限する。スリットを通してディスプレイを見ると、観察者とスリットを結んだ先の画素のみが観察できる。ディスプレイ上には左目用画像と右目用画像を交互に配置し、左目からスリットを通してディスプレイを見ると左目用の画素が、右目からスリットを通してディスプレイを見ると右目用の画素が見えるようにする。遮光板を電氣的に透過、不透過を切り替えることにより 2D/3D の表示の切り替えも実現できる。

視差バリア方式の短所として、遮光板によって光を遮るため映像の輝度が低下する点が挙げられる。また、1枚の液晶ディスプレイの画素を複数視点に分配するため、1視点分の画像の解像度が低下する。また、眼鏡式と同じように左右の目に異なる映像を投影するため、眼鏡型と同じように輻輳調節矛盾は残るという問題がある。

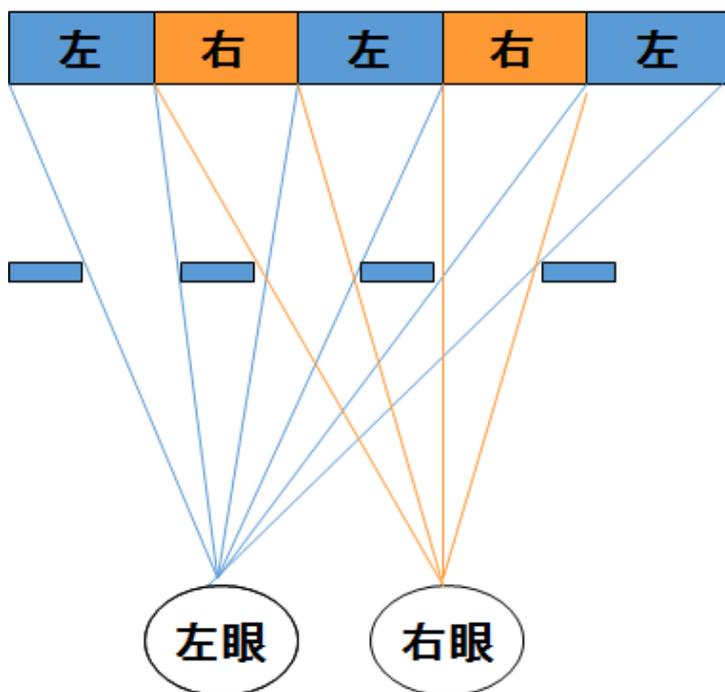


図 1.2.5. 視差バリア

視差バリア方式に近い裸眼立体視の手法の一つとして、レンチキュラ方式がある。この方式では、図 1.2.6 に示すように、ディスプレイパネルの前にかまぼこ状のレンズ（レンチキュラレンズ）を配置し、見る方向によって映像が切り替わるようにする。要素レンズが複数画素を覆うようなレンチキュラレンズを用い、ディスプレイとレンチキュラレンズの距離を要素レンズの焦点距離程度離すと、各画素と要素レンズの中心を結ぶ方向に指向性のある光を照射することができる。この方法は、パララックスバリア方式と異なり、遮光板を用いることによる輝度の低下が起きない。そのため、一つの要素レンズの背後に多数の画素を配置して、多視点表示による運動視差の再現を行うことも可能である。しかしながら、この方法では、運動視差を滑らかにする、あるいは視域を広げるため視点数を増やすほど 1 視点あたりの提示画像の解像度は低下してしまう。そのため広い視域にわたって運動視差を提示することは難しい。また、視差バリアの場合と異なり、2D/3D の表示の切り替えにはより複雑な機構が必要である[8]。さらに、視差バリア方式と同様に輻輳調節矛盾は残るという問題がある。

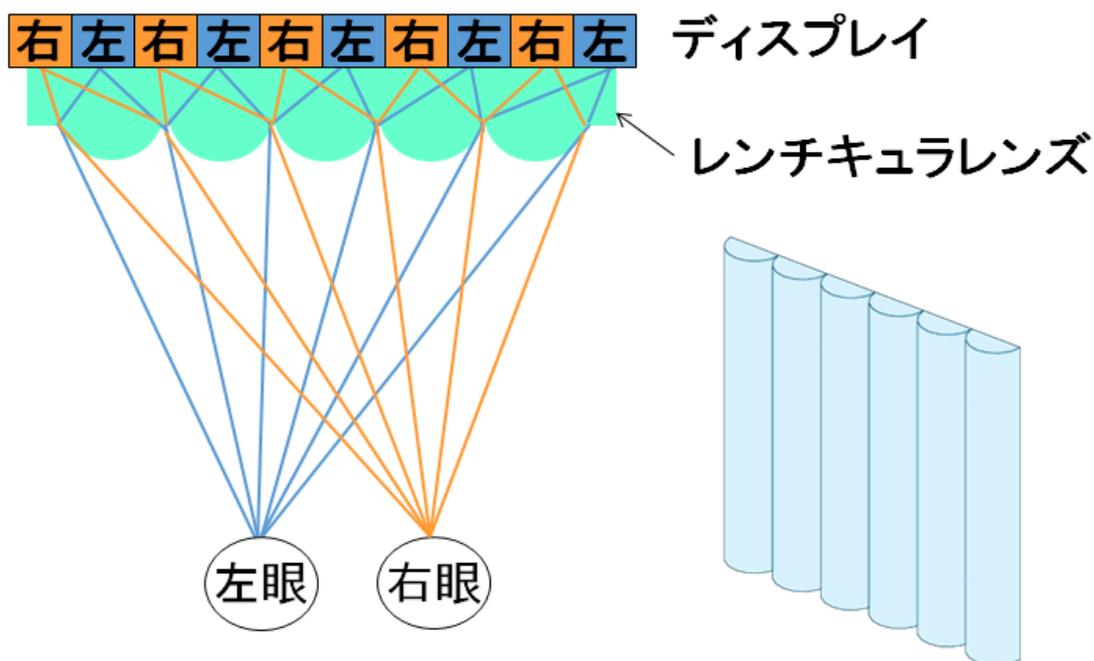


図 1.2.6. レンチキュラ

### 1-2-3 ボリューム表示

今まで述べてきた 3D ディスプレイは両眼に別々の映像を表示するだけであるため、どの方式も輻輳調節矛盾の問題を抱えている。この問題を解消する立体ディスプレイ方式の一つにボリューム表示方式がある。これは、映像を奥行き方向に重ねて表示することで異なる奥行きへの焦点調節の誘導を可能とする方式である。

ボリューム表示の実現方法の一つに Depth Cube 3D Display がある[9]。これは、図 1.2.7 に示すように多層化された PDLC 液晶パネルとプロジェクタで構成されるもので、リアプロジェクションで異なる奥行きへのスクリーンへ高速に映像を切り替えて投影することでボリューム表示を実現している。スクリーンとして用いる PDLC 液晶は電氣的に透過状態と拡散状態を高速に切り替えることができる。表示する映像にあわせて、その映像の奥行きに対応するパネルのみを拡散状態にし、他のパネルは透過状態にする。これにより、異なる奥行きへの時分割映像投影が可能になる。スクリーンの切り替えに応じて投影する映像を高速に切り替えるため、プロジェクタとしては DLP 方式のものをを用いる。

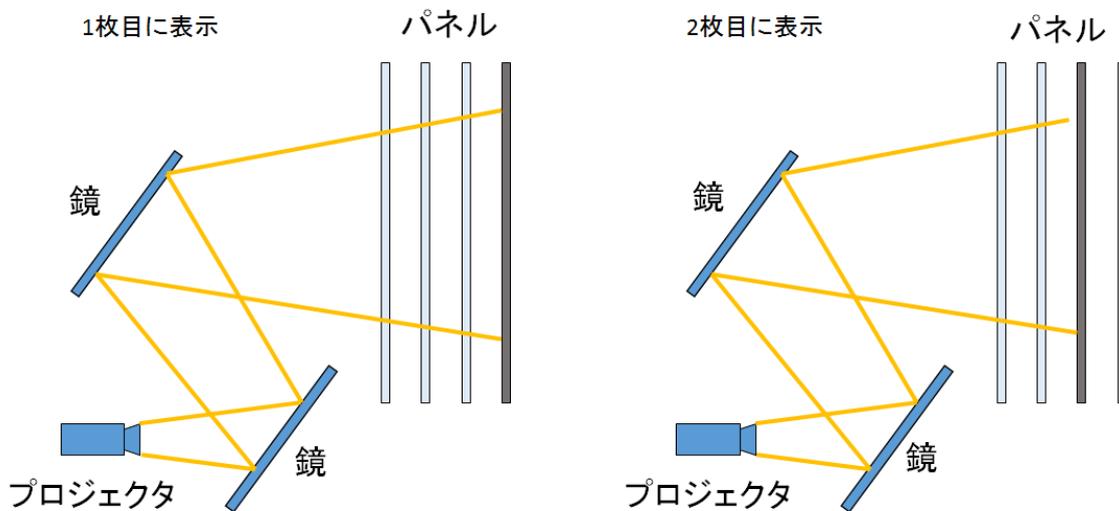


図 1.2.7. Depth Cube 3D Display

多層パネルでのボリューム表示で、パネル数を間引くレンダリング手法として、Depth Fused 3D Display(DFD)がある[10]。この方式では、図 1.2.8 に示すように、奥行きが異なる 2 つの位置に像面を形成し、表示する物体の奥行きに合わせて 2 枚の像面に表示された映像の輝度を調節する。手前と奥の合計 2 枚のパネルを用いる場合、表示する物体が手前の像面に近いときに手前の映像の輝度を強く、奥の映像に表示する物体が近いときに奥の映像の輝度を強くする。

異なる奥行き of 映像を重ねて表示する方法として、ハーフミラーを使用する方法と複数の液晶パネルを重ねる方法がある。ハーフミラーを使用する場合、2 枚のディスプレイに表示された映像がハーフミラーの反射と透過により光学的に重なって見えるようにハーフミラーを配置する。この時、各ディスプレイから観察者までの光学的距離に差をつける。液晶パネルを積層する場合、バックライトから投影される白色の光の輝度を液晶パネルで低下させて色を表示する。周囲の画素との輝度変化が大きい場所にエッジが生じ、それが目の焦点調節を誘導するので、映像を提示したい奥行きで輝度調整を行うことでボリューム表示を行う。

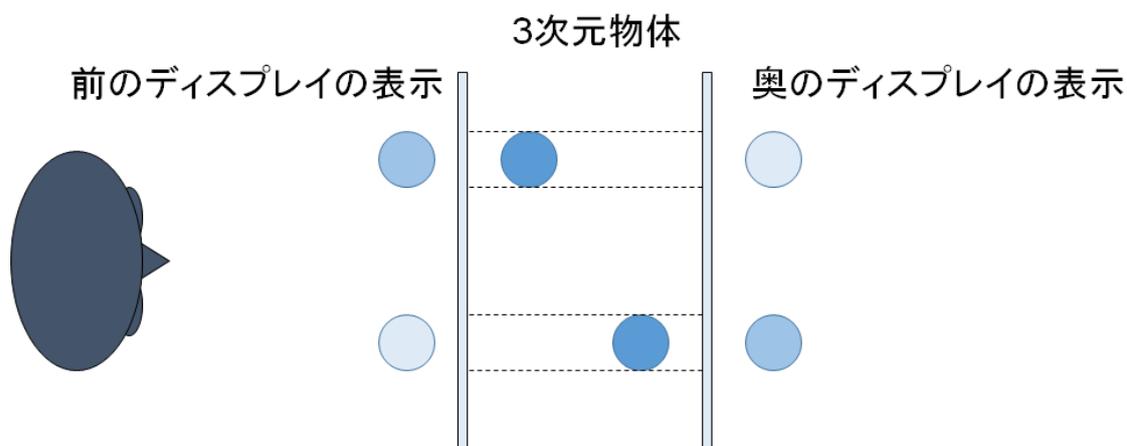


図 1.2.8. Depth Fused 3D Display

ボリューム表示の実現方法には、パネルの多層化以外に、物理的にディスプレイを高速に移動させる方法もある。Volumetric Display Based on Vibrating Mylar Beam Splitter and LED Backlit LCD はその一例である[11]。具体的には、図 1.2.9 に示すように液晶パネルから射出された光がハーフミラーを経由して凹面鏡で反射され観察者に表示される。このハーフミラーは高速で前後に移動しており、ハーフミラーの移動に合わせて映像も前後に移動する。映像を表示したい奥行きにハーフミラーが移動した時のみバックライトを照らすことで任意の奥行きに映像を表示できる。バックライトは複数に分割されており、位置に応じて異なる奥行きに映像を表示できる。ただし、バックライトは画素単位で分割されているわけではなく大まかな領域で分割されているため、細部の奥行きの違いは表現できない。

上記手法ではハーフミラーを高速に移動させることで実像の位置を移動していたが、映像を表示するために使用される鏡やレンズの焦点距離を高速に変化させることで、像面を高速に移動してボリューム表示を実現する可変焦点光学系によるボリュームディスプレイも存在する[12][13]。

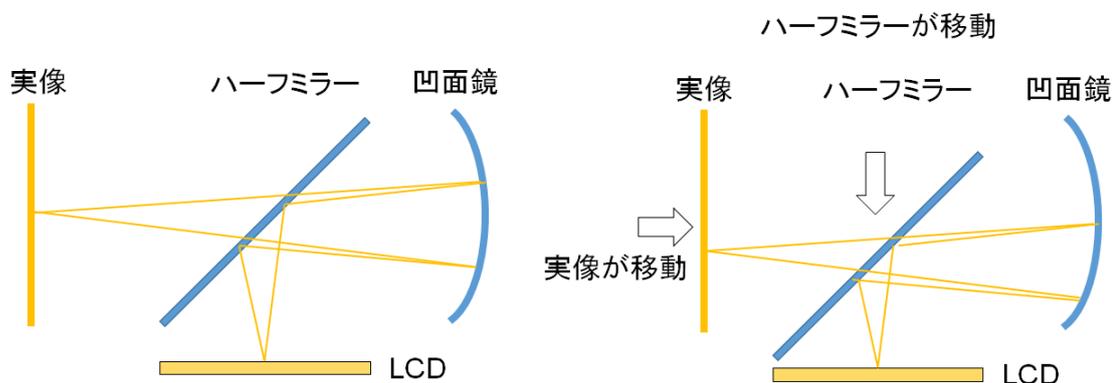


図 1.2.9. Volumetric Display Based on Vibrating Mylar Beam Splitter and LED Backlit LCD

ボリューム表示には、焦点調節を正しく誘導できるという利点がある一方、オクルージョンや光沢といった視点に依存する映像の変化（図 1.2.10）を正しく表現できないという問題がある。オクルージョンとは物体同士の遮蔽関係のことである。現実世界では、後方の物体は位置関係によっては前方の物体に遮蔽される。ところが、ほとんどのボリュームディスプレイは残像効果を用いるため、本来前方の物体に隠されるはずの後方の物体が透けて見えてしまう。また、現実世界では光沢のある物体は視点方向によって輝度が増える。光沢は観察者の位置、面の法線方向と材質、光源の位置の3つによって決まる。一般に、ボリュームディスプレイにおいては、どの画素も全ての方向に同じ輝度の光を発するため、光沢面の表現はできない。さらに、ボリューム表示は奥行きを多層化で表現しているため、正面方向から大きくずれた方法から観察すると、手前の層に描画した画像と奥の層に描画した画像の間にずれが生じてしまい、観察される画像が不連続になるという問題がある。

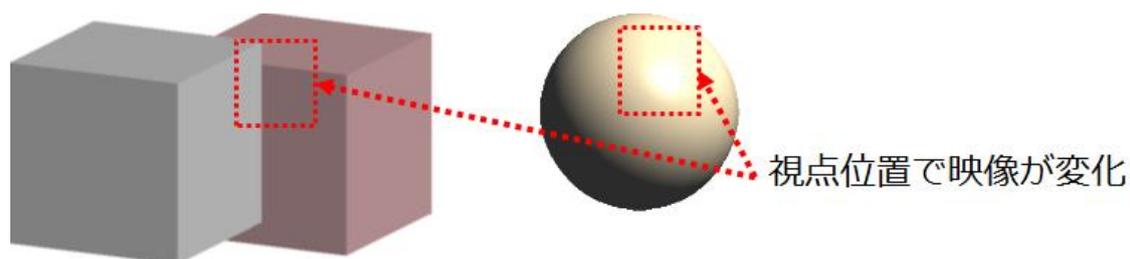


図 1.2.10. 視点に依存する効果

#### 1-2-4 光線再生手法

同時に観察可能な人数の制限や輻輳調節矛盾の問題を解決しつつ、オクルージョンや光沢面など視点位置に依存する効果を再現可能な手法として、光線再生方式がある。この方式では、実世界の光線空間を再現するため、輻輳調節矛盾が発生せず、かつオクルージョンや光沢面も表現できる。

光線を再現し観察者に提示する手法の一つとして、超多眼表示法がある[14][15][16]。この表示方式では、図 1.2.11 に示すように、多眼式の視点間隔を目の瞳孔以下にすることで、同時に眼球に 2 視点分の映像が投影されるように映像を表示している。2 視点分の映像が同時に眼球に投影されると、2 視点の映像が網膜上で焦点を結ぶように眼球の焦点調節が働くため、焦点調節を実現できる。さらに複数視点分の映像を表示しているため、運動視差や視点位置に依存する効果を再現できる。その結果、同時に輻輳調節矛盾の問題を解決しつつ、視点位置に依存する効果を再現できる。超多眼表示は予め眼球位置を設定して、その位置に対して映像を表示しているが、視点位置を設定せずディスプレイ前方の空間に対して同様の効果を実現する高密度指向性表示という手法もある[17][18]。

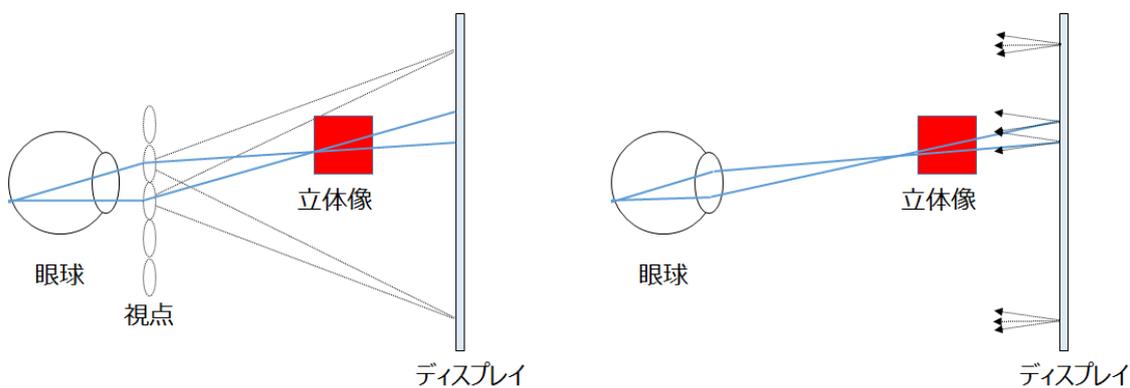


図 1.2.11. 超多眼表示(左) 高密度指向性表示(右)

いままでに説明されてきた手法では、光を光線として扱っていたが、光を波として扱い、物体から発せられた光の波面を再現する波面再生型の立体表示手法として、ホログラムがある[19][20][21]。この手法では、ディスプレイは多数の空間光変調器(SLM)で構成されている。SLMは光の位相や振幅を変調させるデバイスである。図1.2.12に示すように、立体像を多数の物体点で構成されていると考え、SLMから物体点に集光するように球面波を発することで立体表示を実現する。

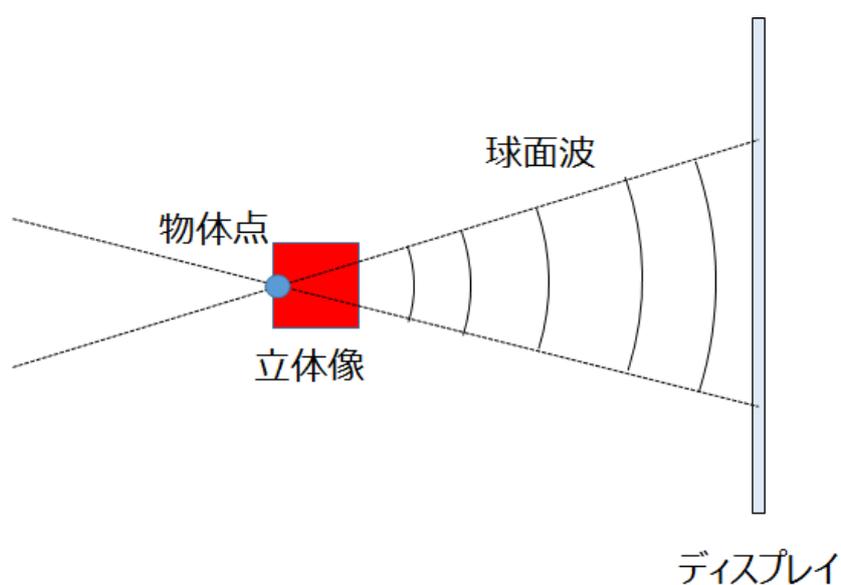


図 1.2.12. ホログラム

光線再生手法の問題として、映像の表示に必要なデータが膨大になるということがあ  
る。現実に物体が存在する場合とほぼ等しい映像を表示するため、二視点や多視点方式  
と比較して膨大なデータ量を必要とする。そのため、高解像度化が難しい。また、映像  
をリアルタイムに表示するには、その膨大なデータをリアルタイムに生成する必要があ  
り、計算量を必要とする。この計算量を必要とする問題を解決するために、超多眼表示  
法では、リアルタイムに2眼から多眼に映像を変更する手法が提案され[22]、ホログラ  
ムでは、GPUを用いてリアルタイムに計算する手法が提案されている[23]。

### 1-2-5 粗インテグラルボリューム表示

眼鏡式や視差バリア等による二視点、多視点方式は同時に観察可能な人数の制限や輻輳調節矛盾の問題があり、ボリューム表示にはオクルージョンや光沢面など視点位置に依存する効果を再現できない問題があった。さらに、光線再生方式には膨大なデータ量と計算量が必要となるという問題があった。視点位置に依存する効果と輻輳調節矛盾の解消の両方を、データ処理量の増大を抑えつつ実現する手法として、掛谷らは粗インテグラルボリューム表示方式(CIVI)を提案している [24] [25] [26] [27] [28]。この手法ではボリューム表示と多視点表示を組み合わせることで、深い奥行き表現と広視野角を実現している。

CIVI の概略を図 1.2.13 に示す。このシステムは多層化されたディスプレイパネル、レンズアレイ、大口径レンズで構成される。ディスプレイパネルは Depth Fused 3D Display と同じようにハーフミラー、もしくは液晶パネルを複数重ねることにより多層化されている。多層化されたディスプレイパネルに表示された映像はレンズアレイと大口径レンズを経由し結像する。ディスプレイパネルには奥行きに応じた映像が表示されており、手前のディスプレイパネルには映像中の物体の手前の部分が表示され、奥のディスプレイパネルには物体の奥の部分が表示されている。観察者は多層化された実像を見ることで奥行き感を得ることができる。映像の輝度の分配方法は先行研究の Depth Fused 3D Display と同じであり、多層化された実像でも眼の焦点調節を誘導し輻輳調節矛盾を軽減し奥行き知覚も改善されることは先行研究で示されている[31][32]。

レンズアレイの焦点距離はディスプレイパネルとレンズアレイ間の距離に近くすると、ディスプレイパネルに表示された映像はレンズアレイを通過するとほぼ平行光になる。その平行光を大口径レンズで結像させる。大口径レンズに平行光として光が入射するため、像は大口径レンズの焦点距離に近い位置に生成される。今回の実装例では映像を実像として表示しているが、ディスプレイパネルとレンズアレイの距離をレンズアレイの焦点距離よりも十分短くすると、映像は虚像として表示される。さらにディスプレイパネルには様々な方向から描画された映像が要素画像として複数表示されており、それらの映像がレンズアレイを構成する要素レンズを経由し複数の方向に向けて結像する。観察者の位置によって見える実像も変わるため、両眼視差と運動視差を表現できる。

このように視差提示とボリューム表示を組み合わせることで、CIVI 方式は、輻輳調節矛盾が少なくオクルージョンや光沢面も再現した自然な立体映像を提示することができる。

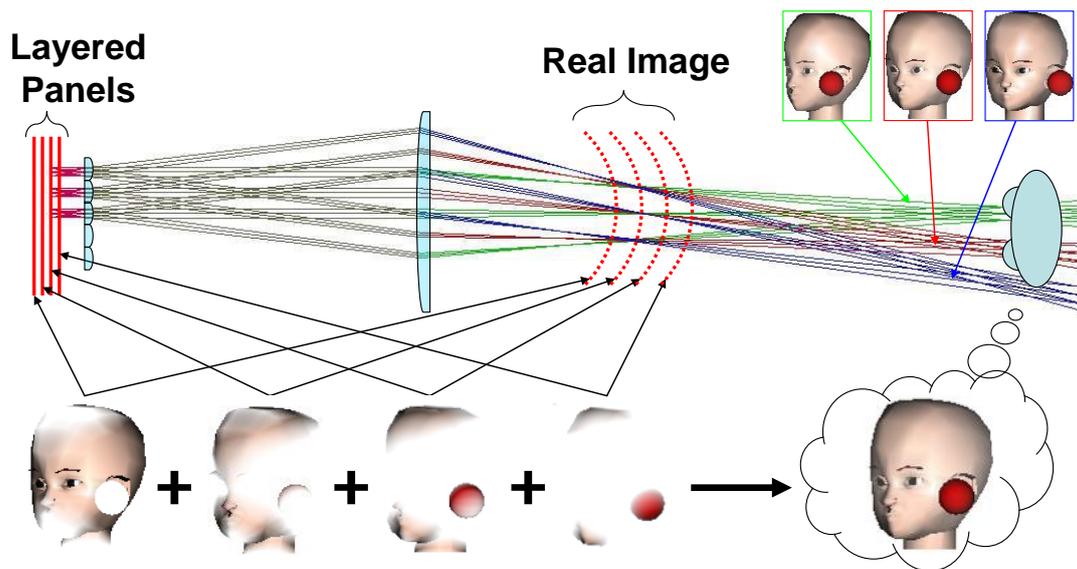


図 1.2.13. 粗インテグラルボリューム表示の実装例

上述したように CIVI の実現方法には、ハーフミラーを用いる方法と液晶パネルを積層する方法がある。

図 1.2.14 に示すようにハーフミラーを使用する場合、複数のディスプレイパネルの光を加算するため、輝度が低下しにくいという利点がある。一方、ハーフミラーで映像を折り返す必要があるため装置が大型になってしまう問題がある。

図 1.2.15 に示すように液晶パネルを積層する場合、バックライトや液晶パネルといった形状が平板の部品を重ねて構成するため CIVI を薄型にできるという利点はあるが、バックライトから発せられる光を複数の液晶パネルで減算するため輝度が低下し、かつ後述する理由でモアレが発生するという問題がある。ただ、輝度が低下する問題に対しては、モノクロパネルとカラーパネルを組み合わせるボリューム表示を実現する [25][26]、液晶パネルの偏光板を取り除くといった手法により [27]、ある程度輝度の低下を抑制できる。また、更なる薄型化のために大口径レンズとレンズアレイを近づける場合、要素レンズの継ぎ目が目立ってしまう。この問題についてはレンズを追加することで切り替わりを滑らかにする手法が提案されているが、その場合装置を十分薄型にすることは難しい [28]。

また、CIVI の多視点表示も従来の多視点表示と同じように 1 枚のディスプレイの映像を複数方向に表示することで実現しているため、視野角を拡大するほど、また運動視差を滑らかにするほど、解像度が低下する問題がある。それに加えて、従来のボリューム表示と同様に手前の映像と奥の映像のずれの問題も生じる可能性がある。さらに、CIVI では映像を表示するために少なくとも 2 枚のレンズを映像が通過するが、その屈折により映像は歪んでしまい、観察者にも歪んだ映像が表示されてしまうという問題もある。これを解消するには、画像処理により光学歪みを補正する必要がある。

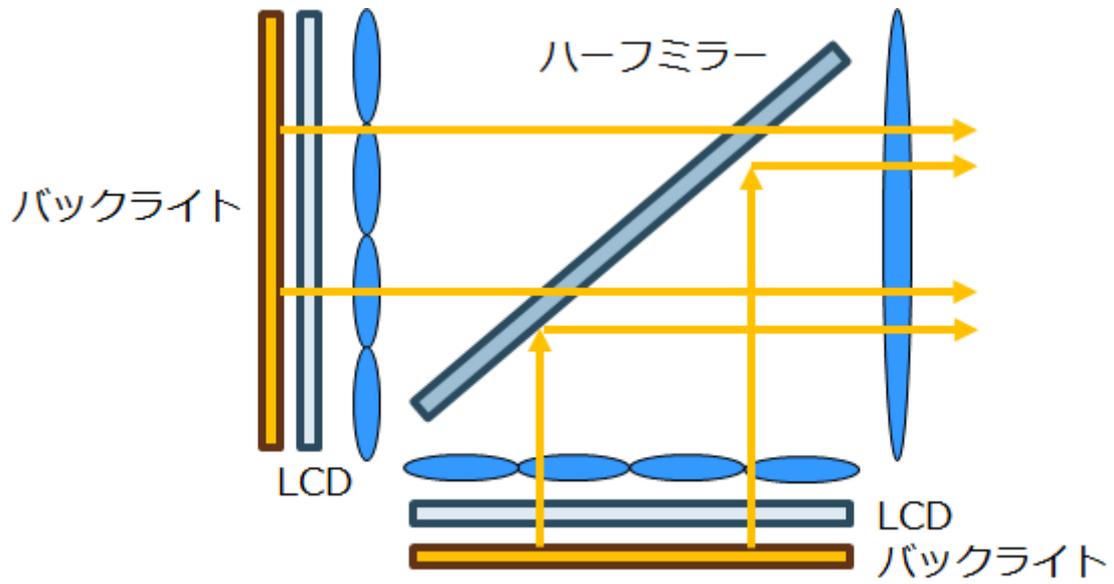


図 1.2.14. ハーフミラーによる CIVI

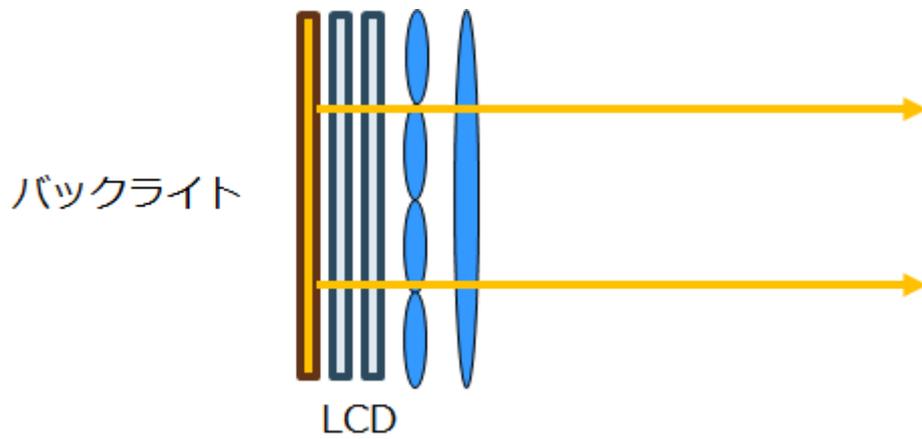


図 1.2.15. 積層された液晶パネルによる CIVI

### 1-3 研究目的

第2節で述べたように、様々な3Dディスプレイが先行研究に存在する。それら先行研究で実現された装置は、それぞれにメリットとデメリットを持つ。表1.3.1は先行研究の特徴をまとめたものである。

表 1.3.1 電子立体ディスプレイ各方式の特徴

	A: 運動視差の提示	B: 輻輳調節矛盾の解消	C: 遮蔽・光沢の表現	D: リアルタイム計算	E: 高解像度(画素数大)	F: 装置の小型化	実現方法の具体例
2眼式立体眼鏡	△ 1人限定	×	◎	◎	◎	◎	アナグリフ, 偏光式, 液晶シャッタ式
2眼・多眼式裸眼立体	△ 狭い	×	◎	◎	◎	◎	視差バリア, レンチキュラ, インテグラル, マルチプロジェクタ
ボリューム表示	○	○	×	○	○	△	可変焦点光学系, 移動・回転式ディスプレイ, 多層スクリーン
超多眼・高密度指向性	△ 横のみ	○	○	△	△	◎	パララックスバリア, レンチキュラ, マルチプロジェクタ
電子ホログラム	◎	○	◎	△	×	△	プロジェクタ用光変調素子の利用
ボリューム多視点混合	○	○	○	△	△	△	C I V I

- ◎ 他手法より優れている      ○ 標準的に実現できる  
△ 不完全だが実現できる      × 実現できていない

眼鏡式は輻輳調節矛盾を解消できず、観察者に眼鏡をかけさせる必要がある。2眼・多眼式裸眼立体表示では、観察者が眼鏡をかける必要はなくなるが、依然として輻輳調節矛盾の問題は残る。ボリューム表示は焦点調節を誘導できるため、輻輳調節矛盾の問題を解消できるが、オクルージョンや光沢を表現できない。超多眼表示や電子ホログラムはそれらの問題を解決できるが、リアルタイム計算や高解像度化の点で問題が残る。CIVIも運動視差、輻輳調節矛盾、遮蔽・光沢の表現といった問題を解決できるが、リアルタイム計算・高解像度化、装置の小型化といった点で問題がある。

本論文では、全ての項目で標準以上の性能を持つ立体ディスプレイの実現することを目的とする。それを達成するため、CIVI において不完全にしか実現できていない点を全て克服することを目指す。CIVI はオクルージョンや光沢といった視点位置に応じた映像表現が可能であり、輻輳調節矛盾を解決できるという特徴がある。その一方で、レンズが引き起こす映像の歪みをリアルタイム計算で十分に除去できていない問題、運動視差の滑らかさ・視野角を向上させると解像度が低下する問題、小型化に必要な液晶パネル積層の際に生じるモアレの問題、およびボリューム表示により手前と奥の映像の間でずれが生じる問題が残されている。本論文ではこれらの問題を全て解決することで、どの項目も標準以上の性能を持ち、遠隔操作やシミュレーション等のアプリケーションに広く使用可能なディスプレイの実現を目指す。このディスプレイの目標スペックとして、解像度は VGA～ハイビジョン、視野角は 60 度以上、視点数は 10 視点以上とする。この視野角と視点数を満たすと、ディスプレイから 60cm の位置で観察者 2 人が常に立体映像を見つつ共同作業できるようになる。人間の瞳孔間距離は約 6cm であり [33]、1 視点あたりの映像が表示される領域が 6cm 以下であれば、左右の目に同じ映像は表示されない。ディスプレイから 60cm の位置で、映像が見える領域は 60cm のため、10 視点あれば常に左右の目に別の映像を表示できる。

#### 1-4 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 CIVI に使用されているレンズが引き起こす映像の歪み補正とその高速化について述べる。第 3 章では提示映像の高解像度化の方法について述べる。第 4 章では液晶パネルを積層した際に生じるモアレを抑制する方法について述べる。第 5 章ではボリューム表示における映像のずれを抑制する方法を述べる。第 6 章では CIVI の応用例のひとつであるフローティングボリュームビューアについて述べ、第 7 章で結論を述べる。

## 2 光学歪み補正とその高速計算

この章では、CIVI における画像処理による高速な光学歪みの補正手法を提案する。CIVI には複数のレンズを映像表示のために使用している。映像がレンズを通過すると必ず光学歪みが発生する。光学歪みは観察者が 3 次元空間を正しく知覚することを阻害する。この問題を解消するため、画像処理による光学歪み補正を行い、さらに GPU を用いた高速計算を用いることで、リアルタイムで歪みがない映像表示を実現する。第 1 節では、光学歪みの種類について述べる。第 2 節では、従来の CIVI における光学歪みの手法について述べる。第 3 節では、GPU を用いて高速に光学歪みを補正する手法を提案する。第 4 節では、提案した歪み補正の効果及び GPU による高速化の効果を実験により検証する。最後に、第 5 節でまとめを行う。

### 2-1 光学歪み

CIVI では映像を表示するためにディスプレイパネルに表示された映像を複数のレンズにより結像させている。レンズを通すと映像に必ず収差が発生するため、像面湾曲、歪曲収差、色収差といった光学歪みの問題を避けられない。

像面湾曲は奥行き方向の歪みである。図 2.1.1 に示すように平面の映像をレンズに投影すると、レンズによって生成される像は湾曲する。図 2.1.1 の場合、観察者から見ると中央より周囲の映像が奥に表示されているように見える。

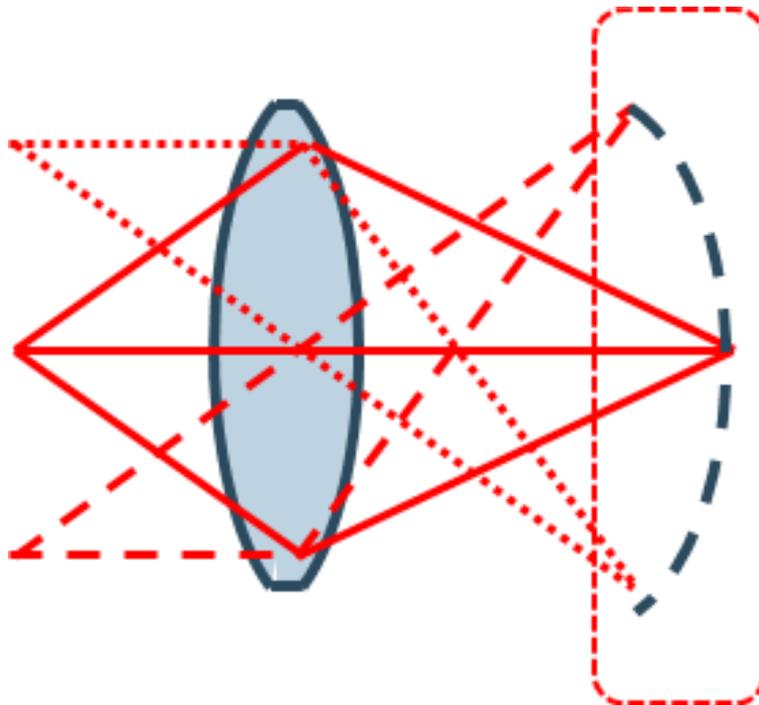


図 2.1.1. 像面湾曲

歪曲収差は縦横方向の歪みである。図 2.1.2 に示すように、格子状の映像をレンズに投影すると、レンズを通して観察者から見る格子は縦横方向に歪んでしまう。映像が膨らむ場合、樽型歪み、映像が縮む場合、糸巻き型歪みと呼ぶ。図 2.1.2 に示されている歪みの形状は樽型歪みである。

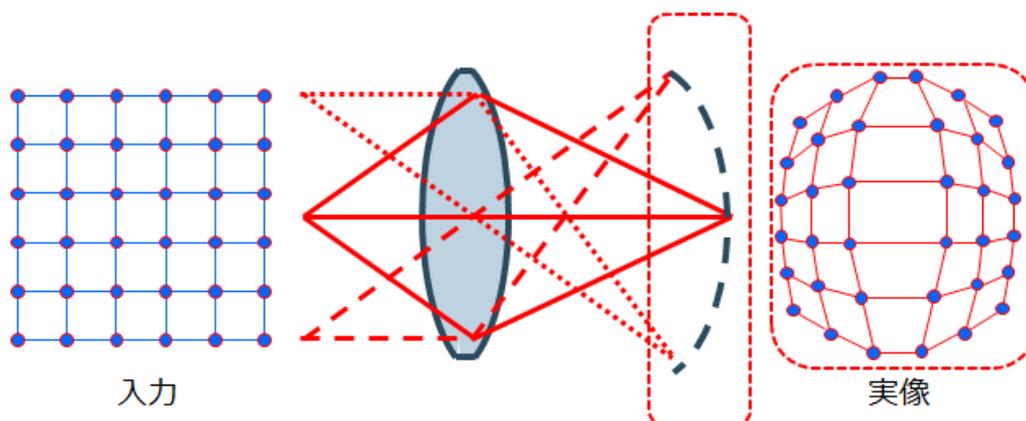


図 2.1.2. 歪曲収差

色収差は色ごとの結像位置の違いである。物質の屈折力は光の波長ごとに異なっており、光源が同じ位置に存在したとしても表示する色の波長によりレンズによる結像位置は変化する。図 2.1.3 に示すように、同じ平行光を入射したとしても、結像位置が色ごとに前後にずれてしまう。赤色より青色の方が屈折力は強く、この凸レンズの場合、青色光の焦点距離は赤色光の焦点距離より短くなる。色収差によって像面湾曲や歪曲収差の歪み方も色ごとに変化する。

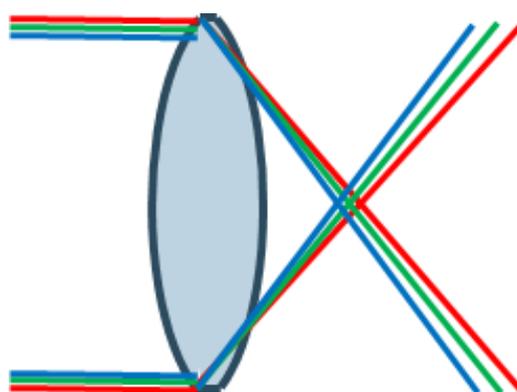


図 2.1.3. 色収差

CIVI においてもこれらの収差の影響を受け、表示される映像は奥行き方向に曲がり縦横方向に歪み、色ごとに像の位置や歪み方が異なっている。そのため、CIVI で幾何的に正しい立体像を提示するためには、これらの歪みを補正する必要がある。

## 2-2 従来の対策

従来の CIVI では、図 2.2.1 に示すように、手前と奥の像面の形状を回転放物面として近似して歪みを補正している[29]。近似した像面から像の奥行きを計算し、表示する映像の奥行きに合わせて、元の映像の輝度を手前と奥の映像に分配している。奥行きが手前の像面に近い場合、手前の映像の輝度を強く、後ろの像面に近い場合、後ろの映像の輝度を強くする。像面間の間では正しく奥行きを表示できるので、像面湾曲により像面が曲がっても像面間に限れば正しく奥行きを表示できる。しかし、この方法で補正できるのは像面湾曲のみであり、縦横の歪みを引き起こす歪曲収差や色ごとに像面の位置が変わる色収差の補正はできない。また、回転放物面近似は、観察位置が正面からずれていくに従い、近似精度が低下するという問題もある。よって、従来はこれらの近似誤差が小さい範囲でしか映像を表示できないため、広視野角な CIVI ディスプレイは実現できなかった。また、従来の奥行き方向の歪み補正は CPU で実行されていたため、画素数が多くなるとレンダリング速度が低下し、自然なアニメーションを表示できないという問題もあった。

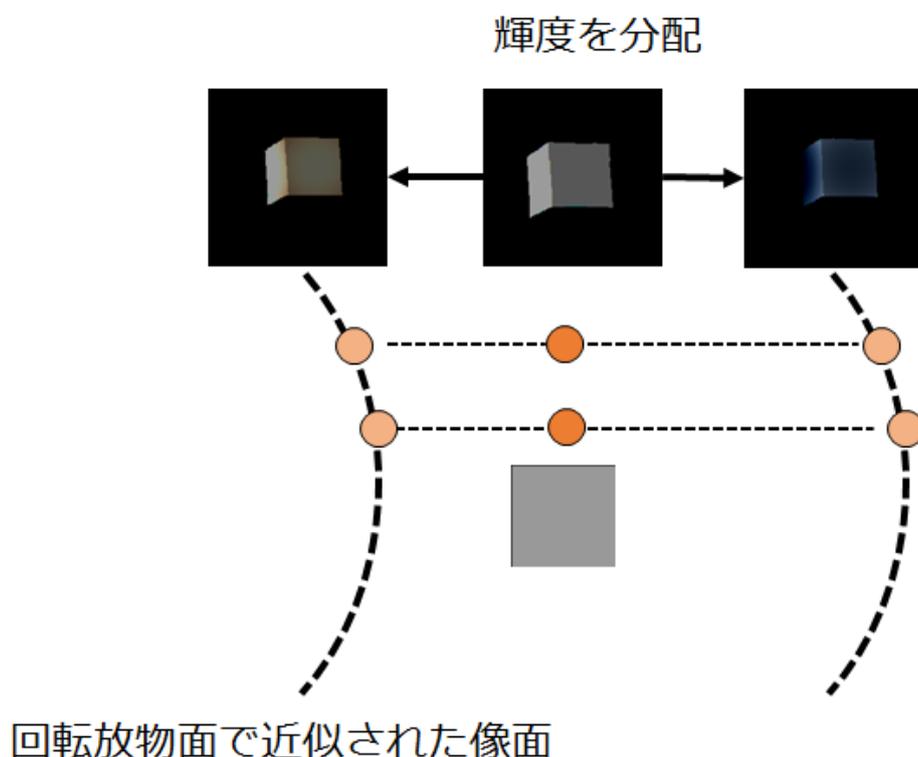


図 2.2.1. 従来の対策

## 2-3 GPU を用いた高速描画

像面の形状を回転放物面で近似することなく像面湾曲、歪曲収差、色収差をより正確に補正するため、本研究では光学シミュレーションを使用した光学歪み補正手法を提案する。提案手法では、光学シミュレーションを用いて像面の形状を計算する。その形状を元にして画像処理により収差を補正する。まず、各視点から見た画像を通常のコンピュータグラフィックスの手法により描画する。ここでは、正射影を用いて 3 次元空間から深度情報を伴った 2 次元画像を生成している。次に、光学シミュレータを用い、ディスプレイパネル上の画素から発せられた光線が屈折した後、像を結ぶ位置を計算する。その位置を上記の正射影面に投影し、投影された点がディスプレイのどの画素から発せられていたかを記録する。これにより、正射影上の点とディスプレイの画素との対応関係が得られる。この対応をもとに、正射影で得られた画像をどのように変形してディスプレイ上に描画するかを決定する。この変形処理の実装には、テクスチャマッピング技術を使用する。このようにして、逆方向に歪んだ画像をディスプレイ上に表示することにより、観察者は歪みのない画像を見ることができる。

さらに、今まで CPU で計算していた部分も含め全ての歪み補正を GPU 上で実行することで、画素数が増えても高速なアニメーションを表示できるようにする。CIVI システムではフレーム毎に歪み補正を伴う画像描画を行うため、高負荷の計算が要求される。故に、リアルタイムにインタラクティブな高リフレッシュレートのアニメーションを表示するには、高性能なコンピュータが必要である。DFD 法を用いて多層化された像によるボリューム表示は、像面湾曲の影響で複雑な計算が必要となるが、従来はこの計算を CPU により実現していた。この計算はディスプレイ上の全ての画素に対して実行する必要があり、これが高解像度な CIVI における描画高速化を阻むボトルネックの一つになっている。加えて、CPU を用いた計算はメインメモリと GPU メモリ間の膨大な通信を要求するため、多くの時間を必要とする。GPU により描画された画像は、歪み補正の計算の前に GPU メモリからメインメモリに送信され、CPU にて歪み補正の計算をした後、その結果が GPU メモリに戻される。この往復も CIVI の描画高速化に対するボトルネックの一つである。この問題を解決するために、GPU 上で DFD 法の計算を行うことで高速にボリューム表示を実現するアルゴリズムを提案する。これにより、従来のシステムよりも高いリフレッシュレートが実現できると期待される。

このアルゴリズムでは、GPU を用い並列計算を行うことで CPU を用いるよりも高速に計算することができる。また、このアルゴリズムでメインメモリと GPU メモリ間の通信の削減をすることができる。

本論文で提案する手法では、GPU を用いて歪みを以下の手順で補正する。

まず、画像を描画し始める前に、歪み補正に必要なデータを用意する。光学シミュレータを用いて、ディスプレイパネルからの光線が図 2.3.1 に示すように射影平面(Plane 1) を貫く点を計算する。そこで得られた点をプロットすると、図 2.3.2 のように歪んだ格子パターン( $x, y$ )が得られる。また、ディスプレイパネルからの光線が光学系を介した後、集光する点の深度  $z$  を計算する。これら( $x, y, z$ )を GPU メモリ(歪み補正用データ)に保存する。歪み補正用データの構造は 2 次元配列であり、配列の大きさは要素画像の大きさと等しい。 $(x, y)$ を求める時に使用した光線の射出元の要素画像の座標が( $x, y, z$ )を保存する先のインデックスと等しいので、ディスプレイパネル上の光線の射出元と格子パターンの対応を用いて( $x, y, z$ )を歪み補正用データに保存する。

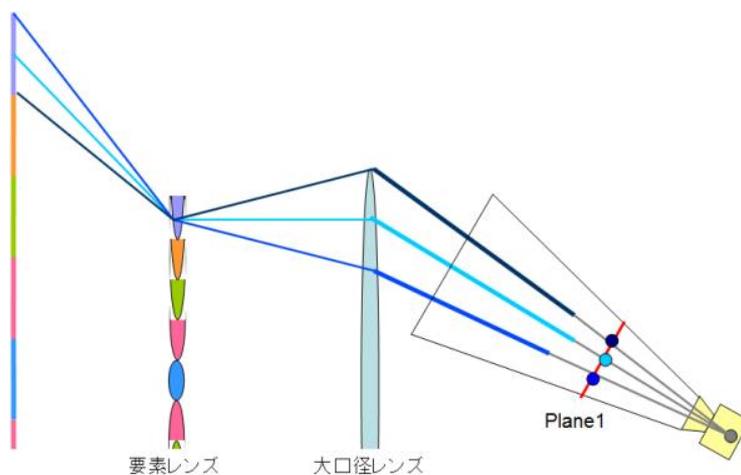


図 2.3.1. Plane 1

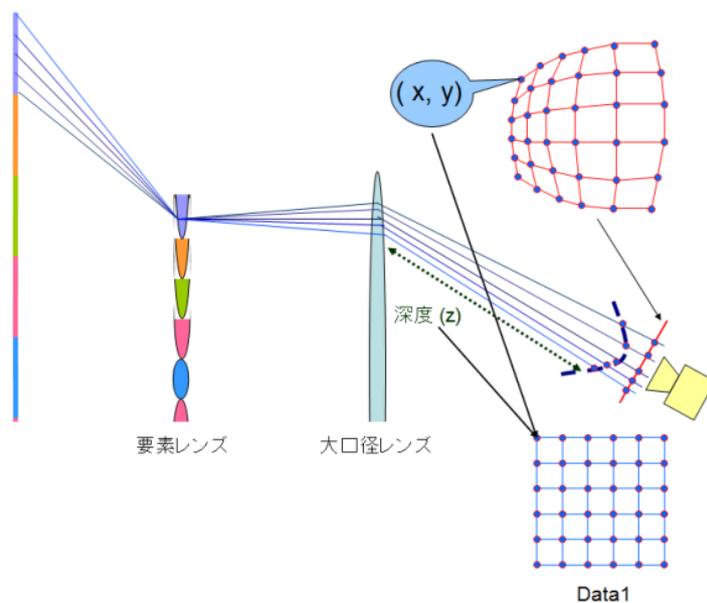


図 2.3.2. 歪み補正用データ

次に、各視点から Plane 1 への射影投影により要素画像を生成する。射影投影の視点位置は以下のように光学シミュレータをもとに決定する。まず、光学シミュレータにて、ディスプレイパネル上の要素画像の格子点から要素レンズの幾何中心に光線を飛ばす。そして、光線がレンズを介して進む方向を計算する。さらに、大口径レンズを通過後の光路を延長し、最も光線が集まる点を射影変換の視点として定義する。ここで、レンズアレイと大口径レンズの距離が、大口径レンズの焦点距離よりも長い場合、光路が交わる点は観察者側に配置されるが、逆に大口径レンズの焦点距離よりも短い場合は、図 2.3.3 に示すように観察者の反対側に配置されることになる。この場合は、図 2.3.4 に示すような変則的な透視投影変換を行う。通常透視投影変換では、物体に重なりがある場合、デプス値を参照しながら、視点に近いオブジェクトを遠いオブジェクトに上書きする。しかし、図 2.3.4 の場合、観察者は透視投影変換の視点の反対側にいるので、視点から遠いオブジェクトを上書きする。

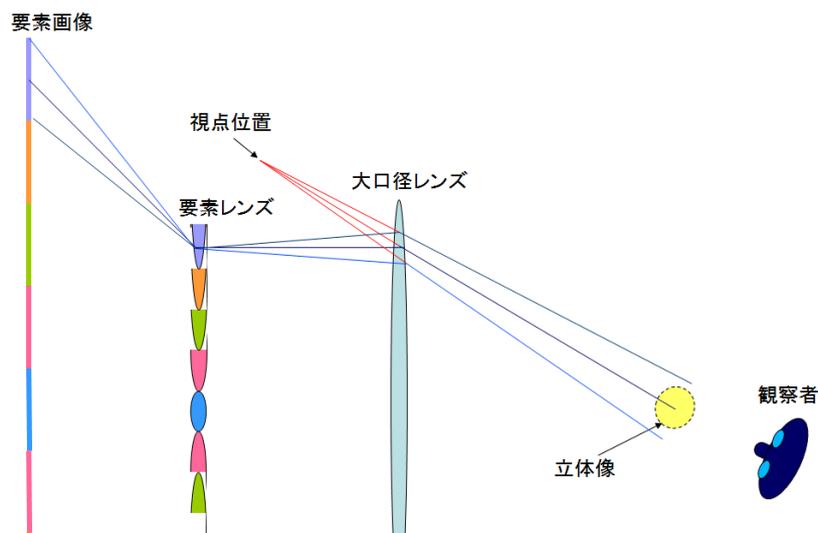


図 2.3.3. 視点位置の求め方

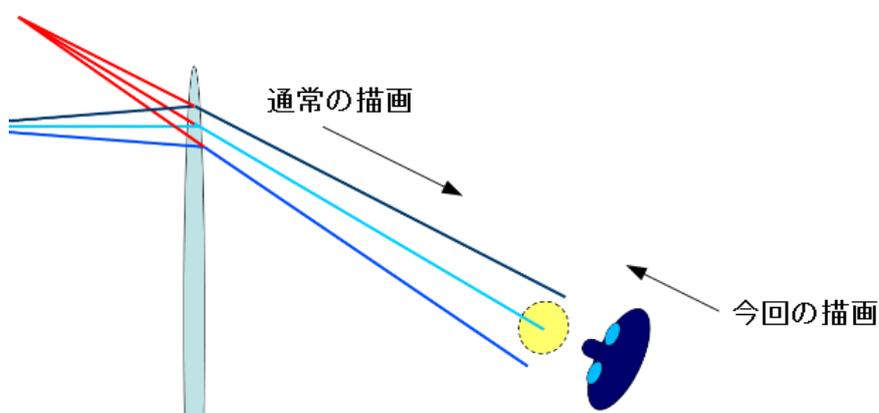


図 2.3.4. 描画の方法

このアルゴリズムでは、標準の深度バッファは GLSL からアクセスすることができないため、GLSL を用いて深度バッファを計算している。また、高速に描画するために、マルチレンダーターゲット技術を使用する。これは、1 回の描画命令で、複数のテクスチャデータを格納することができるようにする技術である。

また、同じような計算を 2 回行うのを防ぐために、RGB と深度の描画を一度の描画で行う。図 2.3.5 に示すように、RGB を 1 枚目のテクスチャに深度バッファを 2 枚目のテクスチャに描画データとして格納する。

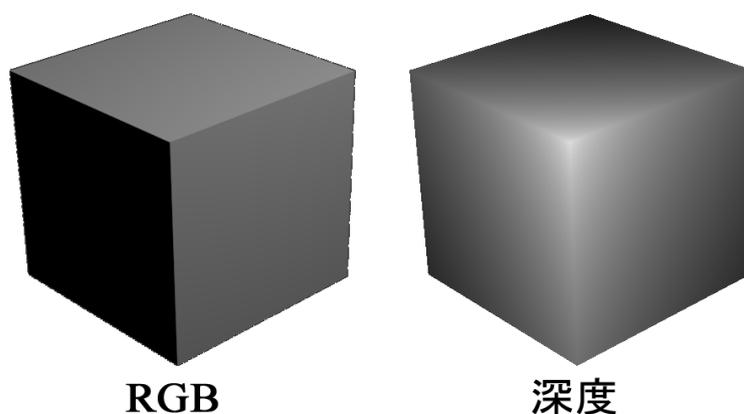


図 2.3.5. 描画データ (RGB と深度の値)

最終的に、図 2.3.6 に示すように、歪み補正用データの  $x, y$  値を読み込みつつ、描画データの  $(x, y)$  の位置に存在する RGB 値を選択することで、ディスプレイパネルに描かれる画像を生成する。ディスプレイパネル上の点からの光線は Plane 1 の  $(x, y)$  に表示されるので、その RGB 値は観察者の位置から見て正確な位置に提示される。RGB 値はボリューム表示するためにそれぞれのディスプレイパネルに振り分けられる。そこで描画データの座標  $(x, y)$  の深度値と各ディスプレイパネルの歪み補正用データの深度  $z$  を比較する。描画データの深度値が 2 つのディスプレイパネルの深度  $z$  の間に存在する場合、この RGB 値はそれぞれ歪み補正用データの深度  $z$  との差の逆比で分配される。一方、描画データの深度値が 2 つのディスプレイパネルの深度  $z$  の間にはない場合、描画データの深度値が最も近い像を生成するディスプレイパネルにのみ RGB 値が割り当てられる。色収差の影響で、像面の位置や歪み方は色ごとに異なるため、この処理を RGB 独立で行う。そのため、要素画像に色ずれが発生し、また、奥行きによって要素画像の色味が変化する。

以上のアルゴリズムにより、全ての計算は GPU でおこなうことができ、結果として描画計算の高速化が達成できる。

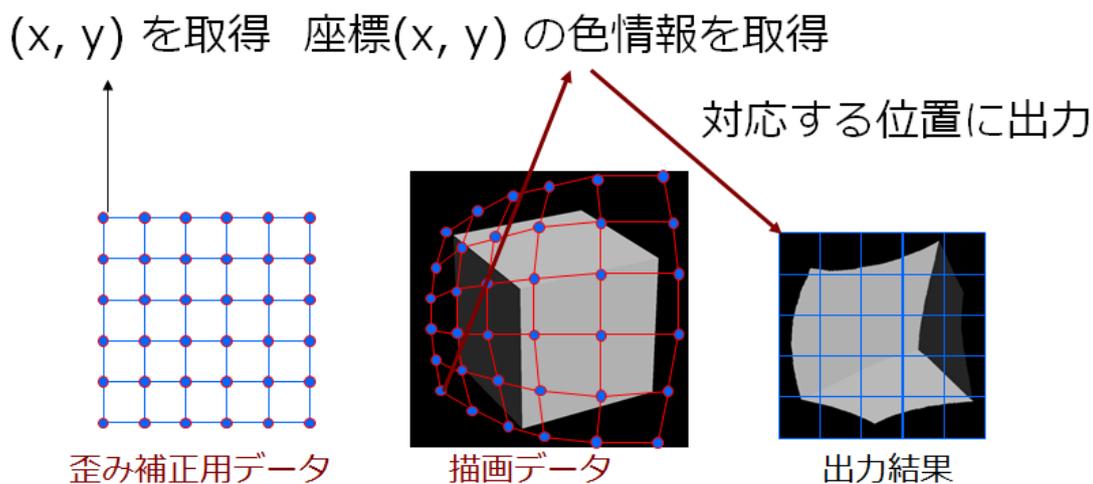


図 2.3.6. 歪み補正

## 2-4 実験

以上で述べたアルゴリズムを元に新しいプログラムを開発した。そのプログラムを用いて、2つの実験を行った。1つ目の実験では歪み補正を適用していない場合と歪み補正を適用した場合を比較した。実験で使用した CIVI システムは表 2.4.1 のとおりである。

表 2.4.1. スペック

視点数	横方向 10 縦方向 6 視差
層数	2
大口径レンズ	400 mm × 300 mm
要素レンズサイズ	38 mm × 38 mm
要素画像サイズ	48 mm × 48 mm
画素数	384 × 384
大口径レンズ焦点距離	325 mm

CIVI の歪みは正面よりも斜め方向から見た視点の映像に強く現れるため、斜め方向から撮影した画像を比較した。その結果を図 2.4.1. に示す。図 2.4.1. (左)は歪み補正を適用していない場合の画像、図 2.4.1. (右)は歪み補正を適用した場合の画像である。

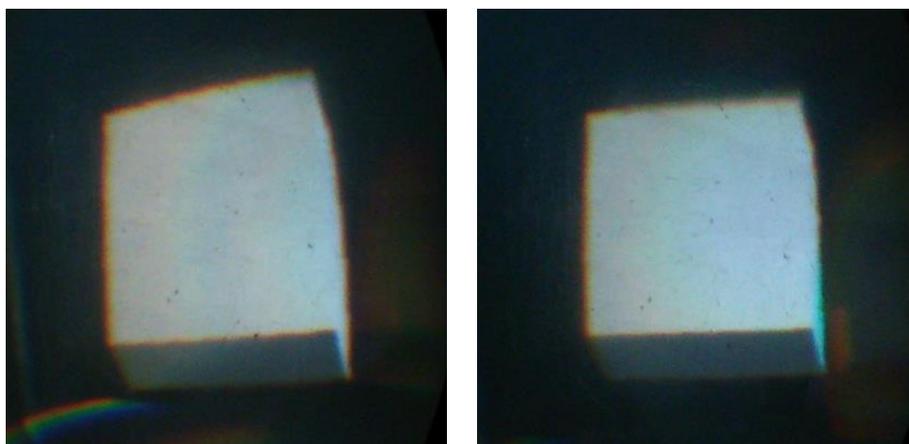


図 2.4.1. 歪み補正適用前(左) 歪み補正適用後(右)

歪み補正を適用することで、歪曲収差により丸みのかかったエッジが直線になっていることがわかる。このことから、提案している歪み補正が有効に機能していることがわかる。

2つ目の実験では CPU を使用した場合と GPU を使用した場合の実行速度を比較した。詳細な CIVI システムと使用したコンピュータのスペックは表 2.4.2 のとおりである。

表 2.4.2. スペック

CPU	Intel Core i3 570 3.07Ghz
ビデオカード	Radeon HD 5770
メインメモリ	DDR3 4GB
層数	2
視差数	10×5
画素数	196×196

CPU を使用したプログラムでは、GPU で 3D オブジェクトを描画し、CPU で歪み補正を行なっている。2種類のオブジェクトを描画した時のリフレッシュレートを測定した。箱のポリゴン数は 12 であり、骸骨のポリゴン数は 60339 である。これらは図 2.4.2 に示されている。比較した結果を表 2.4.3. に示す。

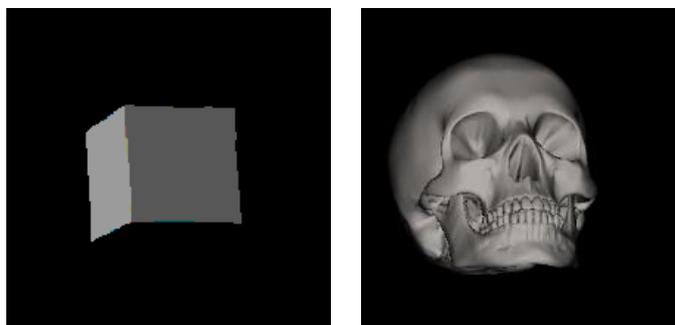


図 2.4.2. 描画されたオブジェクト (左: 箱, 右: 骸骨)

表 2.4.3. 実験から得られたリフレッシュレート

	箱	骸骨
CPU	9 fps	9 fps
GPU	142 fps	57 fps

表 2.4.3 が示す通り、GPU を使用したプログラムは CPU を使用した場合よりも少なくとも 6 倍高速である。また、達成されたリフレッシュレートの数値から、GPU を用いた描画手法は自然なアニメーションを提示するのに十分高速であることが分かる。

GPU を使用した時の、箱と骸骨のリフレッシュレートの差はポリゴン数の差に起因し、また、リフレッシュレートをポリゴン数で割った値が各ケースで大きく異なることから、描画命令が多くの時間を要すると推測される。

CPU を使用した場合において、箱と骸骨を描画した時のリフレッシュレートが等しいのは、CPU と GPU の計算が並列に行われていることによると推測される。GPU は CPU が計算している間も描画をしていると仮定すると、GPU は次の画像の送受信が終わるまで描画するのを待たなければならない。もし、CPU での計算時間とメインメモリと GPU メモリ間の通信時間の合計時間が、GPU での描画時間よりも多くの時間を必要とする場合、GPU の計算時間の違いを無視できると考えられる。

## 2-5 まとめ

本章では、GPU を用いて CIVI の光学歪み補正を高速に実行する手法を提案した。映像をレンズによる歪みとは逆方向に歪ませて、それらを互いに打ち消しあうことで、観察者に正しい映像を提示することが可能となった。また、CIVI にて GPU メモリとメインメモリの通信量を減らし、GPU で演算することで高速化を達成した。さらに、提案したアルゴリズムを元にプログラムを作成し 2 つの実験を行った。1 つ目の実験では歪み補正を適用していない場合と適用した場合を比較し、提案する歪み補正アルゴリズムの効果を確認した。2 つ目の実験では CPU で歪み補正した場合と GPU で歪み補正した場合の処理時間を比較し、GPU による計算でより高いリフレッシュレートが得られることを確認した。

### 3 偏心レンズによる高解像度化

この章では、偏心レンズを用いて映像を高解像度化する手法を提案する。CIVI には、視点数を増加させ、視野角の拡大や滑らかな運動視差を実現しようとするすると解像度が低下する問題がある。その問題を偏心レンズにより解決することで高解像度化を実現する。第 1 節では、既存の高解像度化する手法について述べる。第 2 節では、偏心レンズを用いて高解像度化する手法について述べる。第 3 節では、提案した手法の効果を実験により検証する。最後に第 4 節でまとめを行う。

#### 3-1 高解像度化に対する既存の対策

要素画像の解像度を向上させる最も簡単な方法は、ディスプレイパネルの画素ピッチを縮小し、単位面積あたりの画素数を増やすことである。しかしながら、ディスプレイパネルの画素ピッチ縮小に物理的制約があるため、この方法による解像度の向上に限界がある。ディスプレイパネルの代わりに複数のプロジェクタを使用すれば解像度を向上させられるが、装置の大型化や光学設計の高難易度化といった問題がある。これらの代替手段として、要素レンズの大きさは固定したまま、要素レンズに対応する要素画像を拡大し、要素レンズに投影される画像の画素数を増やすことによって解像度を向上させることが考えられる。

要素レンズと要素画像の大きさが等しい場合、要素レンズの大きさによって要素画像の表示に使用されるパネルの領域が決まる。要素レンズの大きさと使用枚数は光学設計に依存するため、場合によってはパネルの端部が要素画像の描画に使用されないことがある。この時、要素レンズの大きさは固定したまま要素画像を拡大し、パネル全面を要素画像の描画に使用することで、高解像度化を実現できると考えられる [34]。

図 3.1.1 に要素画像を拡大した CIVI の模式図を示す。このように、要素画像が拡大すれば、視点数を維持しつつ要素画像を構成する画素数を増やすことができる。しかしながら、この方法をそのまま用いると、図 3.1.2 に示すように、端視点の要素画像が生成する像の歪みが極めて大きくなるという問題がある。この問題が生じる原因は、端視点の要素画像からの光が急峻な斜め方向から大口径レンズに入射することと、中央視点の要素画像と端視点の要素画像で大口径レンズと要素レンズ間の光路長が大幅に異なることに由来する。光路長が異なると、結像面までの距離も違ってくるため、要素画像の結像位置が視点によってばらつき、隣接視点間の映像が滑らかに接続しないという問題が発生する。

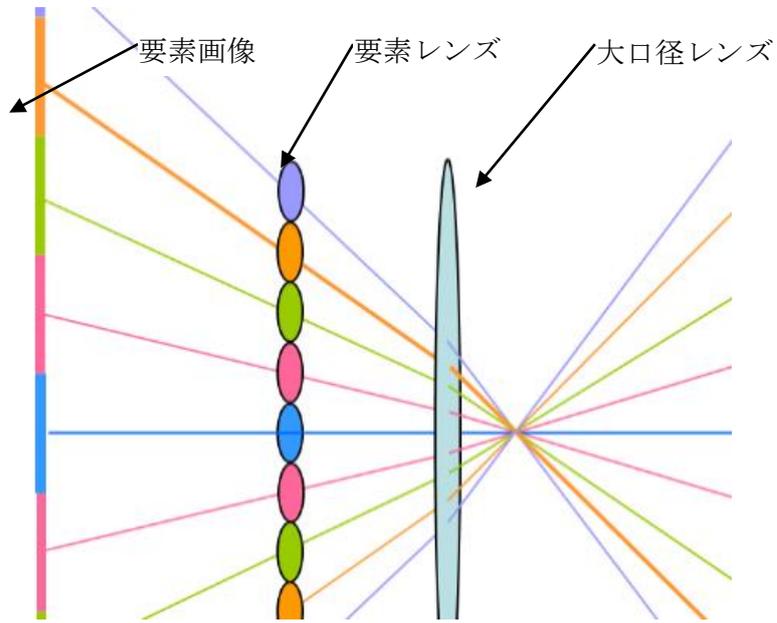


図 3.1.1. 要素画像を拡大した CIVI

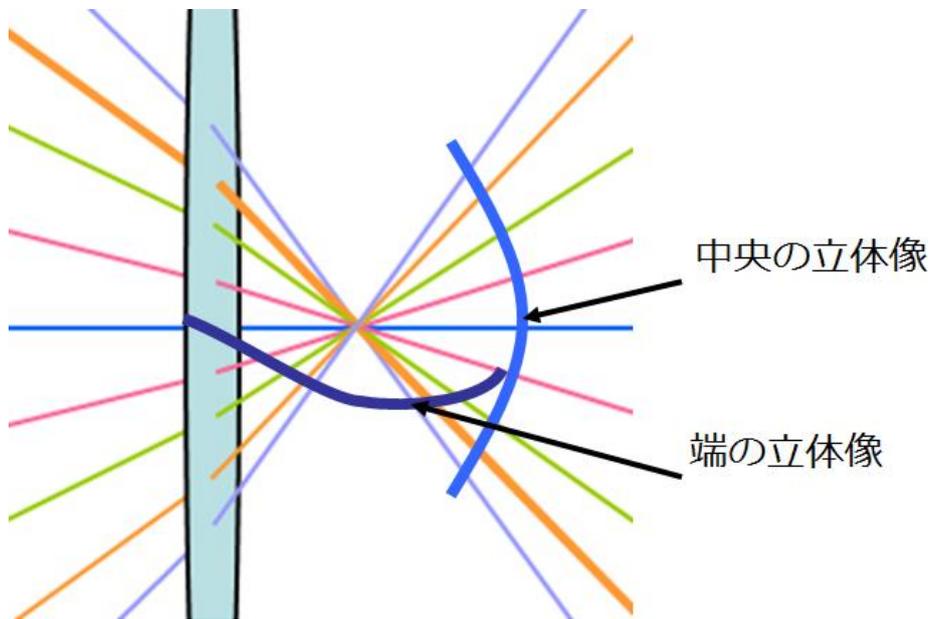


図 3.1.2. 像の歪み

### 3-2 偏心レンズによる高解像度化

端視点の要素画像が生成する像の歪みを抑制する方法として、本研究ではレンズの光軸をずらす方法を提案する。図 3.2.1 に光軸がずれた要素レンズで構成された CIVI の概要を示す。従来の CIVI では、要素レンズの幾何中心にレンズ中心が存在していたが、提案する CIVI では、要素レンズの幾何中心から離れた位置にレンズ中心が存在する。そのレンズ中心の位置は要素レンズごとに異なり、要素レンズの配置が中央から離れるほど、その要素レンズの幾何中心から外側方向へずれた位置にする。具体的には、図 3.2.2 に示すように、要素画像の幾何中心が要素画像に対応する要素レンズの光軸上になるように設計されたレンズを使用する。

一般的に、光軸が幾何中心からずれたレンズは偏心レンズと呼ばれる。図 3.2.3 は偏心要素レンズの一例である。要素レンズは大型のレンズの一部を切り取り、要素レンズの幾何中心から離れた位置に光軸が置かれるようにする。像の歪みを抑制するためには、端視点の要素画像の光が垂直に大口径レンズに入射され、かつ中央と端の視点で要素レンズと大口径レンズ間の光路長の差をなくす必要がある。これらを実現するには、要素画像からの光が要素レンズによって大口径レンズと光軸と平行な方向に向かうように補正される必要がある。ディスプレイパネルと要素レンズの距離は要素レンズの焦点距離とほぼ等しいので、ディスプレイパネルから射出された光は平行光になる。

要素画像の幾何中心が要素レンズの光軸上にあると、要素画像の幾何中心から射出された光は要素レンズで屈折された結果、要素レンズの光軸に対して平行な平行光になる。その平行光は大口径レンズの光軸にも平行となり、垂直な角度で大口径レンズに入射する。要素レンズと大口径レンズ間の平行光の光路長は要素レンズの位置によらず等しいため、いずれの要素画像もほぼ同じ奥行きに結像する。

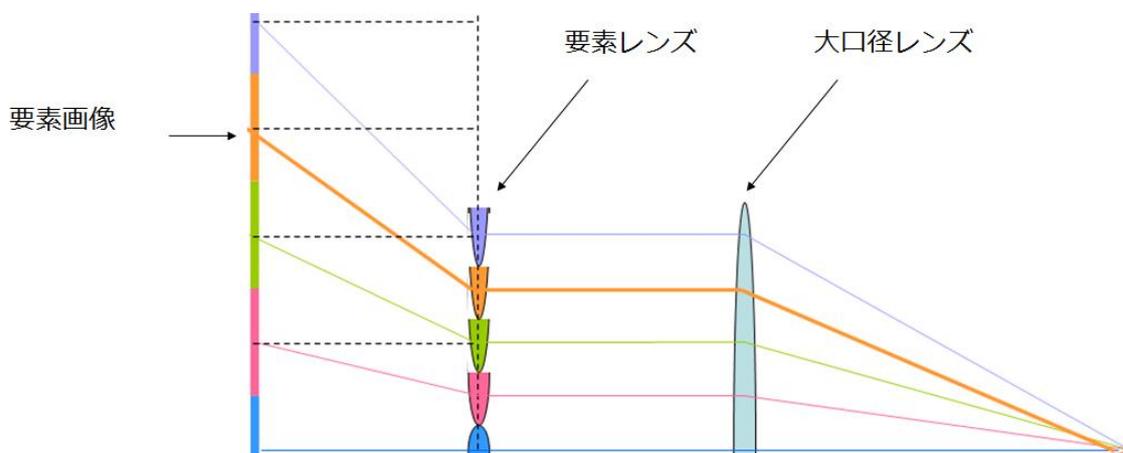


図 3.2.1 光軸をずらしたレンズアレイを使用

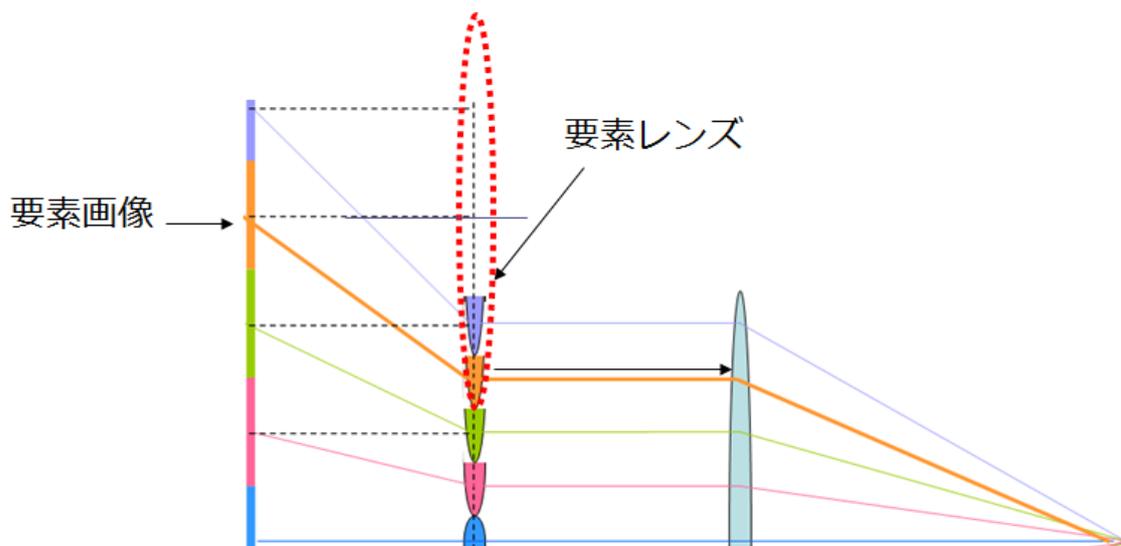


図 3.2.2. 偏心レンズ

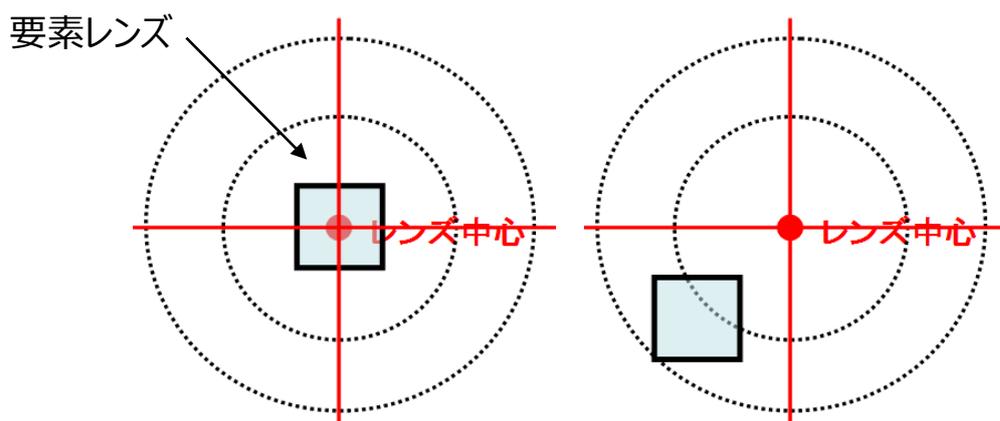


図 3.2.3. 要素レンズ(左従来、右本手法)

ここで提案する手法は、歪みが補正できるだけでなく、要素レンズの製造コストが安いという利点もある。従来の CIVI では、光学設計の仕様を満たした要素レンズを視点数分用意する必要があった。一方、提案した CIVI では、大型のレンズの一部を切り出すことで要素レンズとして使用される偏心レンズを製造できる。1枚の大型レンズから複数枚の偏心レンズを切り出せるので、偏心レンズの設計によっては通常の CIVI より安価に製作できる。

要素レンズに偏心レンズを使用した場合も、第 2 章で提案した歪み補正のアルゴリズムで歪みを補正できる。従来の CIVI の歪み補正と同じように、要素画像上の点から要素レンズの幾何中心に向けて光線を飛ばす。その光線はレンズで屈折され 1 点に集光する。光線が集光する点を視投影変換の視点とし、後は第 2 章で提案した方法同じ手順で歪み補正を実現することができる。

ここで提案した手法は、非一様な要素レンズで構成されたインテグラルイメージングの一種として分類される。非一様な要素レンズを持つインテグラルイメージングの一つとして、異なる焦点距離と口径を持つ要素レンズで構成されたシステムがある[35]。このシステムでは、時分割で映像表示に使用するレンズを高速に切り替えることで深い奥行き表現と映像の高画質化を実現している。偏心レンズを使用した 3D ディスプレイは多視点の映像表示の研究でも見られる[36]。このディスプレイは 1 つのプロジェクタと偏心したマイクロレンズアレイで構成されている。プロジェクタから投影された映像をマクロレンズアレイが複数の異なる方向に曲げることで、広視野角な 3D 映像を表示している。本論文で提案した手法は、CIVI に偏心レンズを要素レンズとする凸レンズアレイを適用した点に新規性がある。

### 3-3 実装

前節で提案した手法に基づき、偏心したレンズアレイを使用した CIVI システムを実装した。図 3.3.1 に示す CIVI システムの仕様は表 3.3.1.のとおりである。

表 3.3.1. スペック

視点数	横方向 10 縦方向 5 視差
層数	2 層
要素画像	48 mm×48 mm
要素レンズサイズ	38 mm×38 mm
要素レンズ焦点距離	90 mm
画素数	196×196
大口径レンズサイズ	400 mm×300 mm
大口径レンズ焦点距離	275 mm
要素画像画素数	192×192

ディスプレイ面とレンズアレイの距離は 90 mm と 93 mm、レンズ間の間隔は 350 mm である。この装置で表示した画像の写真を図 3.3.2 に示す。図の通り、歪みが補正された画像を提示できていることがわかる。今回の設定では、要素画像の一边が要素レンズの一边の約 1.26 倍となり、面積にして約 1.6 倍の倍率での高解像度化が実現している。

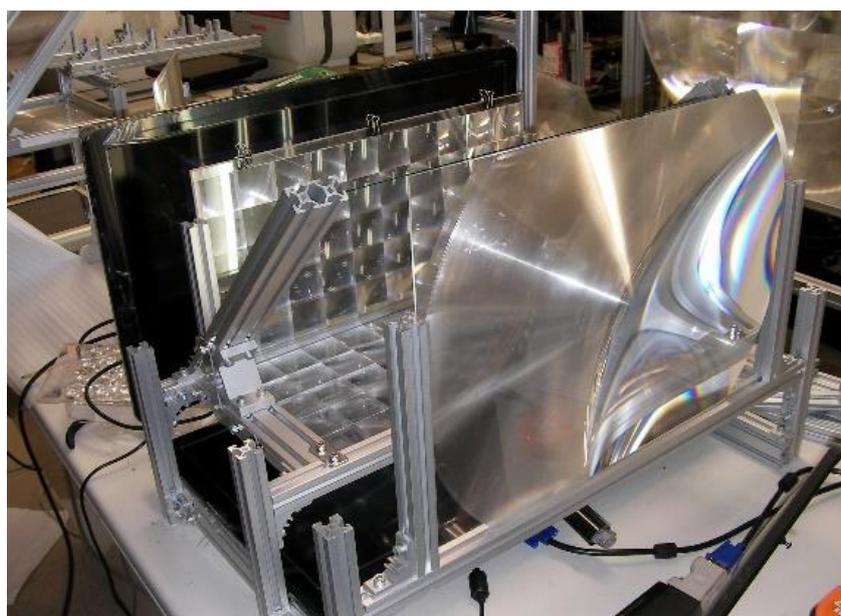


図 3.3.1. 実装した装置

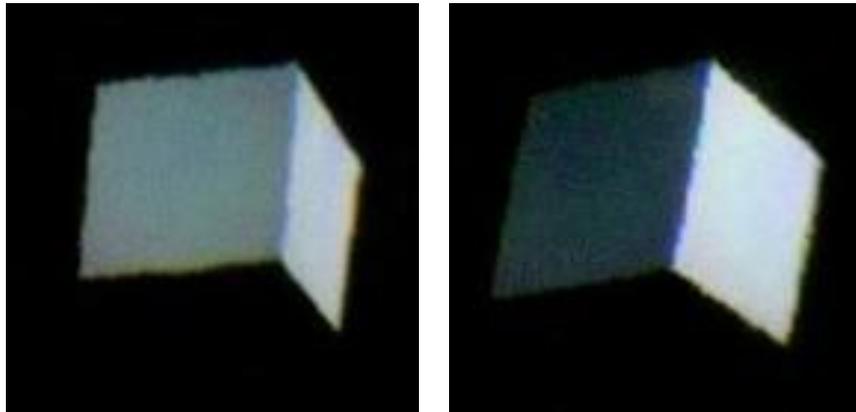


図 3.3.2. 異なる 2 視点から観察される画像

さらに、従来の要素レンズを使用した場合と、偏心した要素レンズを使用した場合の像を比較した。図 3.3.3 は従来のレンズを使用した場合、図 3.3.4 は偏心したレンズを使用した場合の正面の視点に表示される像の光路図である。正面の視点の場合、双方とも実像の形状にほとんど差はない。図 3.3.5 は従来のレンズを使用した場合、図 3.3.6 は偏心したレンズを使用した場合の端の視点に表示される像の光路図である。偏心レンズを使用した場合の実像の形状は中央の視点の実像を回転させた形状に近い。一方、従来のレンズを使用した場合の像は大きく歪んでいて、一部は実像を結べなくなっている。表示する映像が像面間にあれば、奥行き方向の歪みは輝度の分配により補正できるが、この場合、像面自体が大きく正面の像の位置からずれているため、奥行方向の歪みを補正できない。図 3.3.7 は従来の要素レンズを使用した場合と、偏心レンズを使用した場合の映像である。従来の要素レンズの場合、歪みにより視点間の切り替わりが滑らかに行われず、映像の一部が不連続になっている。一方、偏心レンズを使用することで正しく映像が表示されることがわかる。

以上の結果から、偏心レンズの導入により、像の歪みを抑制しながらディスプレイパネルの画素を有効活用することで高解像度化を実現できることが示された。設計の自由度が向上することで、解像度と視点数のトレードオフ、視野角と運動視差の滑らかさのトレードオフがともに緩和されることになる。

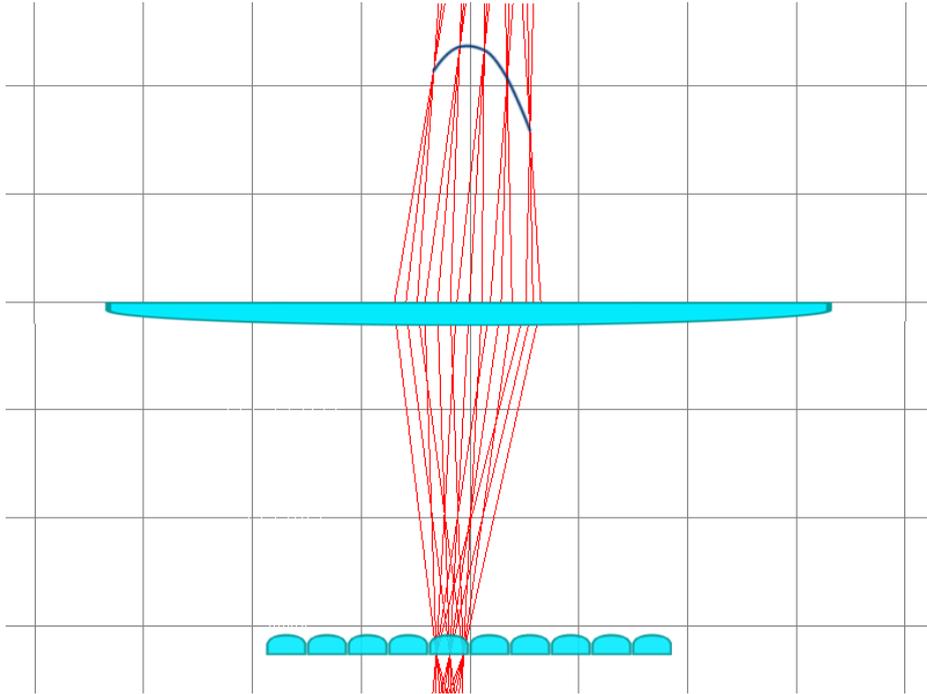


図 3.3.3. 従来のレンズを使用した場合の中央視点の光路図

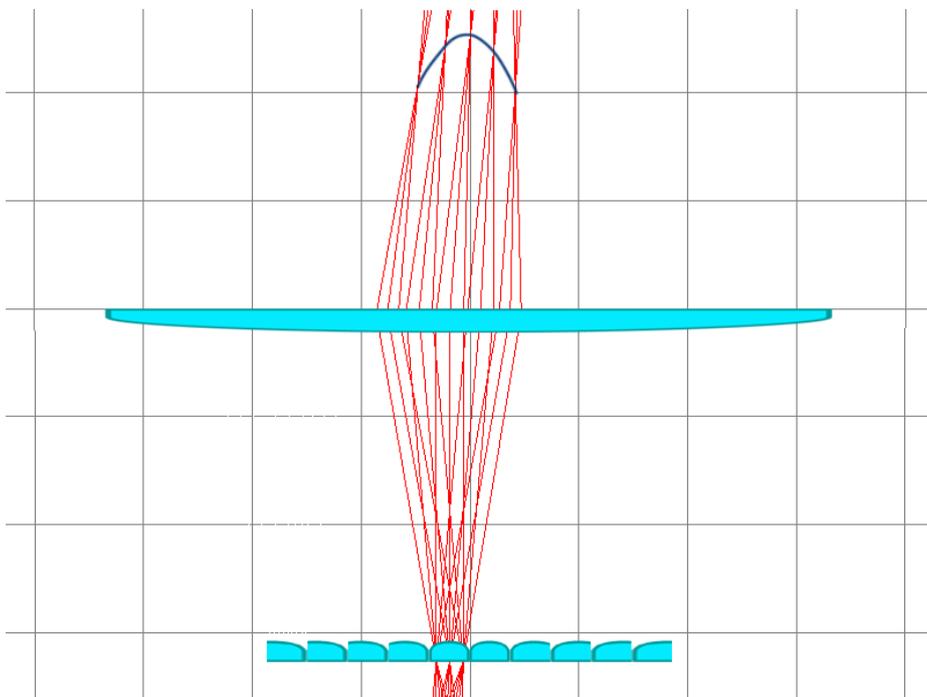


図 3.3.4. 偏心レンズを使用した場合の中央視点の光路図

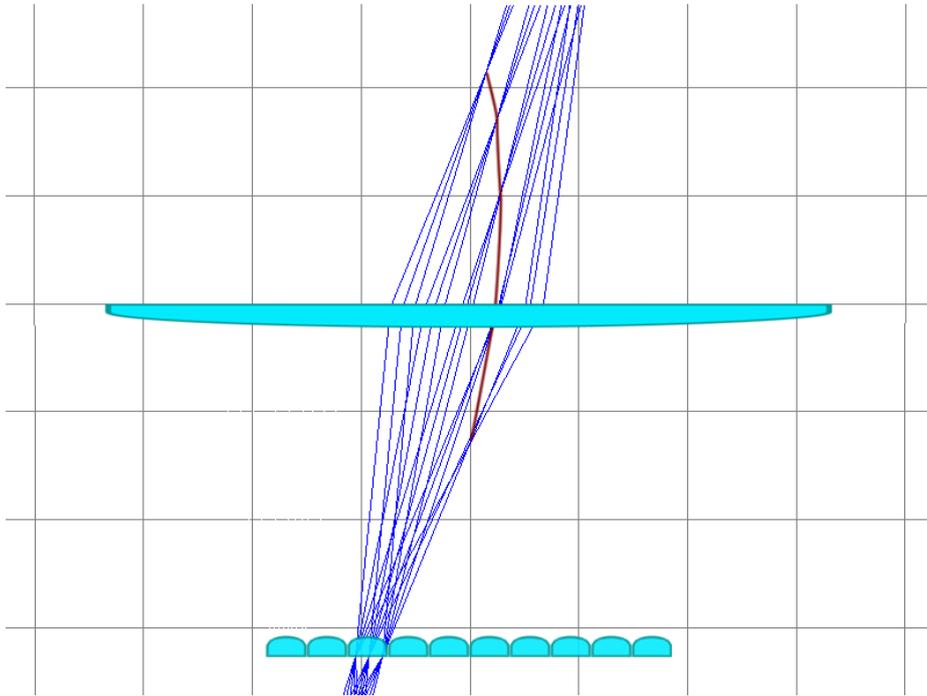


図 3.3.5. 従来のレンズを使用した場合の端視点の光路図

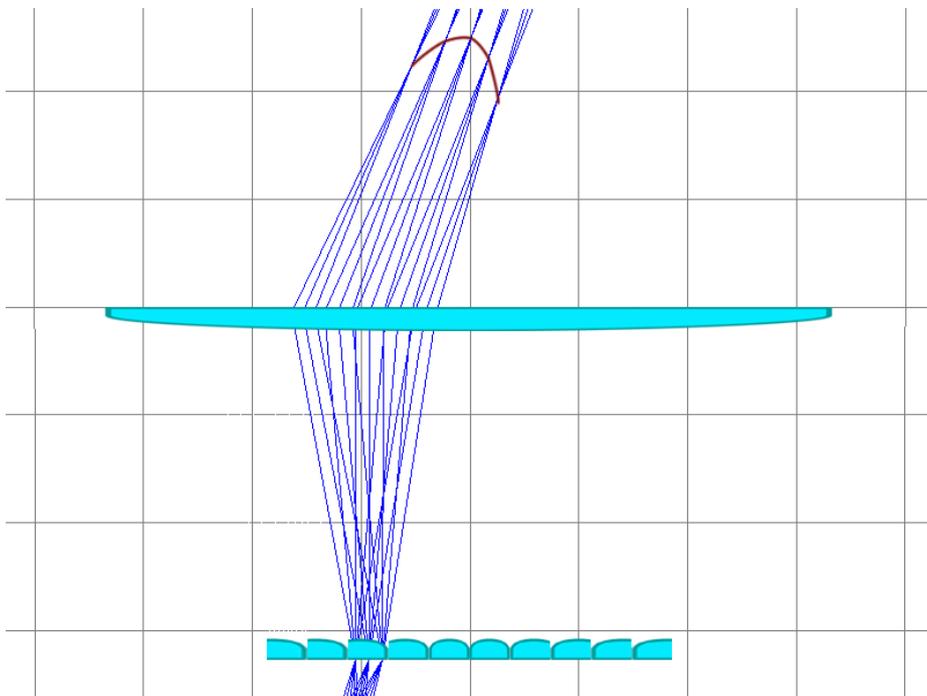


図 3.3.6. 偏心レンズを使用した場合の端視点の光路図

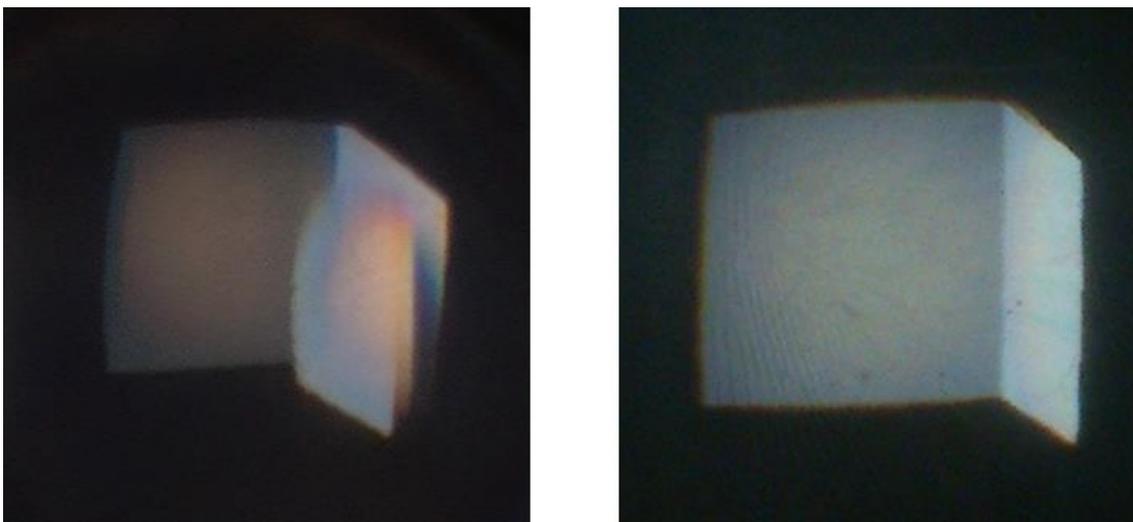


図 3.3.7. 端視点の映像 (左 従来のレンズ、右 偏心レンズ)

### 3-4 まとめ

本研究では、レンズ中心が幾何中心からずれた要素レンズで構成されたレンズアレイを使用し、要素レンズの大きさを固定したまま要素画像の大きさを拡大することで、視点数を維持しつつ提示像の高解像度化を実現する手法を提案した。従来の要素レンズを使用した場合と偏心レンズを使用した場合を光学シミュレーションと実機製作により比較した。その結果、従来の要素レンズを使用した場合では、映像が歪んで視点の切り替わりが不連続になるが、偏心レンズを使用すると正しく映像を表示できることを確認した。これにより提案した手法で、提示像の高解像度化を実現できることがわかった。また、設計の自由度が向上し解像度と視点数のトレードオフや視野角と運動視差の滑らかさのトレードオフが緩和された。

## 4 多層化で生じるモアレの低減

この章では、映像に生じるモアレを抑制する手法を提案する。装置の薄型化のために液晶パネルを重ねて奥行きを提示する CIVI の場合、映像にモアレが生じて CIVI の画質が低下する。そこで、モアレを抑制して画質の低下を防ぐ 2 種の方法を提案する。1 つ目の方法では多層化された液晶パネルの前に凸レンズアレイを追加し、2 つ目の方法では前後の液晶パネルの画素ピッチを変更する。モアレを抑制することで、装置を薄型化で生じるデメリットを減らし、薄型 CIVI の画質を実用レベルに近づけることを目指す。第 1 節では、モアレ発生の原因について述べる。第 2 節では、モアレを抑制する 2 種類の手法について述べる。第 3 節では、提案した手法の効果を実験により検証する。最後に、第 4 節でまとめを行う。

### 4-1 モアレの原因

液晶パネルを重ねて奥行きを提示する CIVI の場合、映像にモアレが生じて CIVI の画質が低下する。このモアレの原因は液晶パネルの開口が制限されていることにある。図 4.1.1 に示すように、液晶パネルの画素の領域はバックライトの光を通過させるが、画素間の配線が配置されている不透過領域は光を遮断する。バックライトと液晶パネル 1 枚で構成された通常のディスプレイパネルでは、バックライトの光が画素の領域のみを通過し、映像として観察者に提示される。観察者が斜め方向からディスプレイを見たとしても、様々な方向に向かうバックライトの光が画素の領域を通過するため、観察者に映像が提示される。一方、図 4.1.2 に示すように、液晶パネル同士を重ねるとディスプレイを観察する方向に依存した輝度の強弱が生じる。手前の液晶パネルの画素と奥の液晶パネルの画素が直線上に並ぶ方向から観察しても、バックライトの光は液晶パネルを透過するため、映像の輝度は殆ど低下したように見えない。一方、画素間の不透過領域と画素が直線上に並ぶ方向から観察すると、バックライトの光が画素間の不透過領域に遮断されるため、映像の輝度が低下して見える。輝度が低下し映像が暗く見える方向は全ての画素で等しいため、特定の方向からディスプレイパネルを観察すると映像全体が暗く見える。この場合、映像全体が暗く見えるためモアレは観察できない。しかし、レンズアレイと大口径レンズを液晶パネルの前に配置するとモアレが目立つようになる。

図 4.1.3 は CIVI において映像が暗く見える方向を黒い線で描いた図である。レンズを配置する前は、全ての画素において暗く見える方向が等しく、映像全体が暗く見えるためモアレが目立たなかった。一方、レンズを配置すると、レンズの屈折により画素毎に暗く見える方向が変化し、暗く見える方向が観察方向を向いている画素とそうでない画素が同時に観察されるようになる。この方向の違いが映像に明暗を発生させ、モアレとして観察される。さらに、以下の理由により映像に表示されているような縞状のモアレ

レが生じる。直接ディスプレイパネルを観察すると、画素毎の暗く見える方向は平行であるため、映像全体が暗く見え、モアレは観察されない。しかし、ここにレンズが加わると、暗く見える方向が屈折により一点に集まる。この点では、暗く見える方向が交差しており、どの方向から観察しても輝度が低下する。これがモアレを構成する縞として見える。以下の議論では、では暗く見える方向を負の光線、モアレをそれらの負の光線の焦点とみなす。暗く見える方向が平行光になっている場合、焦点は無限遠に存在し像を結べないためモアレは見えない。一方、レンズを追加することで暗く見える方向が焦点を結んでいる場合、焦点の位置にモアレが生じることになる。

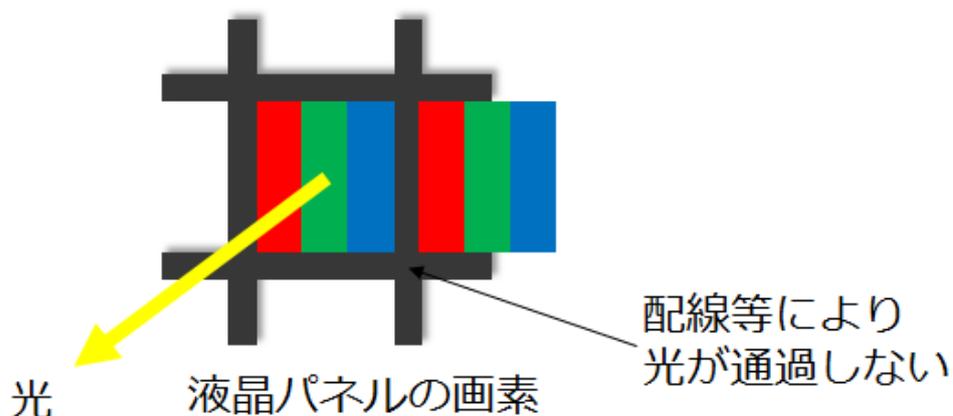


図 4.1.1. 液晶パネルの拡大図

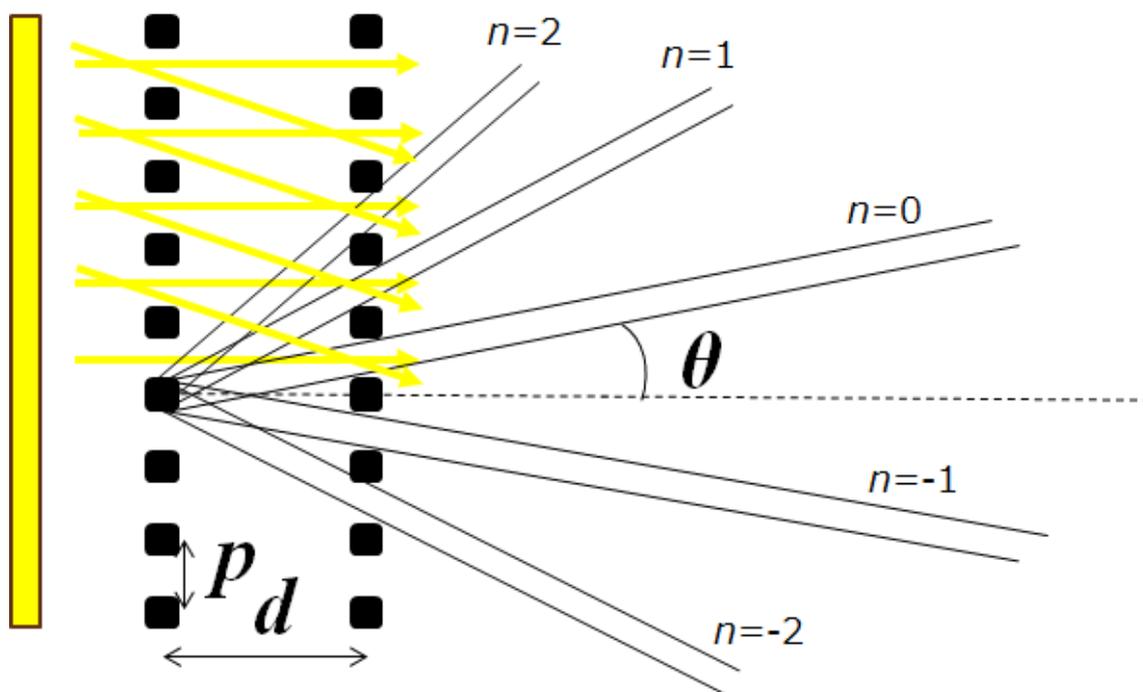


図 4.1.2. 光が遮断される領域

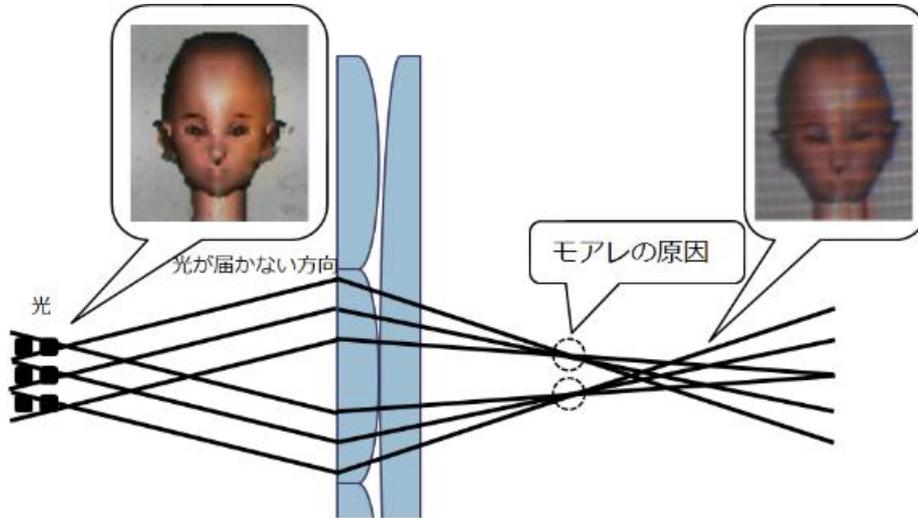


図 4.1.3. CIVI に生じるモアレの原因

モアレを抑制する手法を提案する前に、先述したモアレの原因となる暗く見える方向の発生メカニズムについて述べる。図 4.1.2 に示すように、後ろのパネルの画素間の不透過領域と手前のパネルの画素が直線上に並ぶ方向が暗く見える方向になる。同じ画素ピッチのパネルが重なっている場合、各画素は、式

$$\tan \theta = \left( n + \frac{1}{2} \right) p / d, \quad (1)$$

を満たす角度  $\theta$  の方向から観察すると画像は暗くなる。ここで、 $n$  は整数、 $p$  はパネルの画素ピッチ、 $d$  はパネル間の距離である。多層化されたパネルと観察者間の距離が  $L$  のとき、画素が暗く見える位置の間隔は  $Lp/d$  で与えられる。

求めた式の正当性を確かめるために、パネル間の距離を変更しつつ、ディスプレイから 250 mm 離れた位置から暗く見える位置の間隔を測定し、 $Lp/d$  から求められる理論値と測定から求められる実測値を比較した。手前のパネルと奥のパネルの画素ピッチは 0.203 mm である。図 4.2.4 は理論値と実測値の比較である。測定された間隔は方程式から求められる間隔とほぼ等しい。このことから暗く見える方向は画素間の不透過領域によって生じ、その方向は画素ピッチとパネル間の距離で求められることが確かめられた。

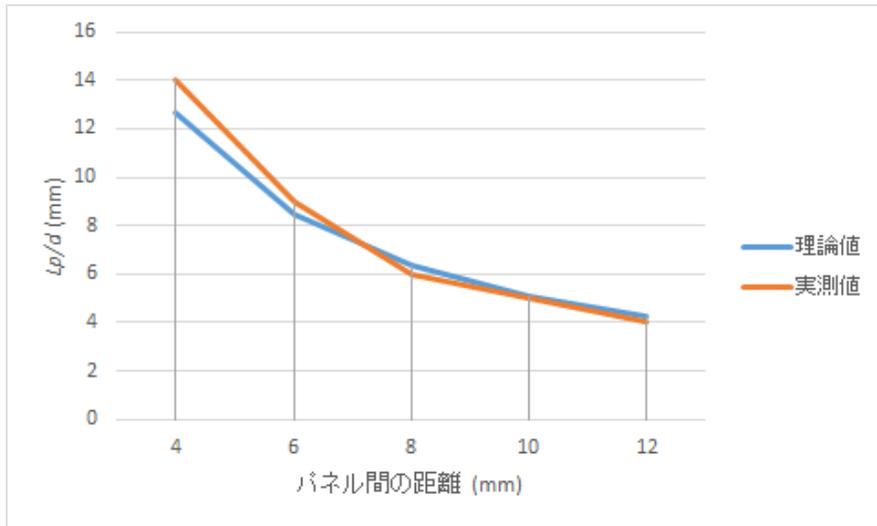


図 4.2.4. パネル間の距離を変更した時の $Lp/d$

## 4-2 モアレの低減

モアレを抑制する従来の手法として、映像の像面の位置にマイクロレンズアレイを追加する手法がある[37]。追加されたマイクロレンズアレイがマイクロレンズアレイの近傍以外で結像した像を全てぼかすことで、モアレを目立たなくしている。しかしこの手法は、レンズをディスプレイの前方に追加するため、装置が大型化してしまい、かつ映像も若干ぼけてしまう。

そこで映像をぼかすことなくモアレを抑制するために、2つの手法を提案する。1つ目の方法では多層化された液晶パネルの前に凸レンズアレイを追加し、2つ目の方法では前後の液晶パネルの画素ピッチを変更する。

まず、1つ目の液晶パネルに凸レンズアレイを追加する手法について説明する。この手法では、図 4.2.1 に示すように、多層化された液晶パネルの前に凸レンズアレイを追加する。追加された凸レンズアレイの要素レンズの大きさは要素画像の大きさと等しく、追加された要素レンズと要素画像の枚数も等しい。丁度、要素画像と追加される要素レンズの幾何中心が一致するように配置する。追加された凸レンズアレイにより、暗く見える方向が大口径レンズで屈折した後に平行になるようにする。

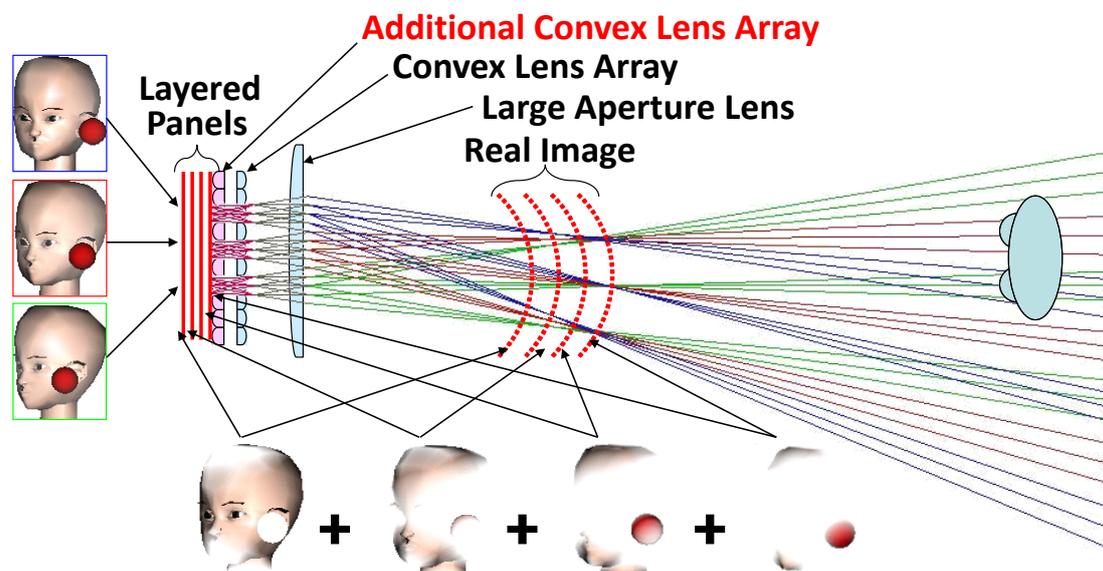


図 4.2.1. 凸レンズアレイを追加した光学設計

追加された凸レンズアレイを用いてモアレを抑制する光学設計について説明する。追加された凸レンズアレイの焦点距離を $g$ とする。また、2つのレンズアレイ間の距離は既存のレンズアレイを構成する要素レンズの焦点距離 $f$ と等しくなるようにする。この時、既存のレンズアレイを構成する要素レンズと大口径レンズの合成焦点距離 $G$ は

$$G = \frac{fF}{f + F}, \quad (2)$$

となる。ここで、 $F$ は大口径レンズの焦点距離である。この光学設計の場合、図 4.2.2 に示すように、 $G = f - g$ の時、ディスプレイパネルから射出された平行光は全てのレンズを通過した後、再度平行光になる。追加された凸レンズアレイを構成する要素レンズの焦点距離が $g$ なので、ディスプレイパネルから射出された平行光は距離 $g$ で一度結像する。合成焦点距離 $G$ のレンズ群は結像した位置から距離 $G$ 前方にあるので、光線はレンズ群を通過すると再度平行光になる。暗く見える方向はディスプレイパネル上では平行のため、この光学系ではレンズを経由した後も暗く見える方向は平行になる。そのため、暗くなる方向を表す負の光線は結像せずモアレは見えなくなる。

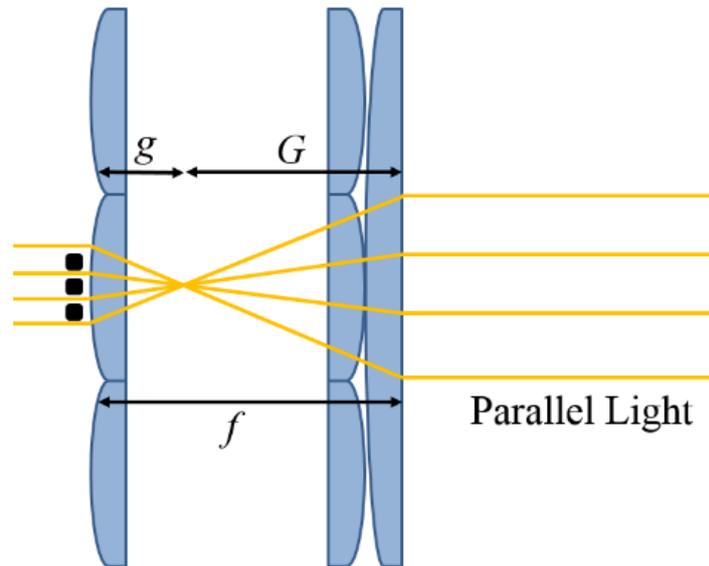


図4.2.2. 提案するシステム上の暗く見える方向の光路

モアレの抑制に加えて、凸レンズアレイを追加する他のメリットとして、解像度の均一化効果がある。凸レンズアレイを追加しないと、図 4.2.3 (a)のように観察者から遠い層の画素より近い層の画素の方が画素ピッチが粗くなってしまう。ここで凸レンズアレイを追加すると、反対に近くの画素ピッチを細かくできる。画素の粗さを凸レンズアレイの効果で相殺することで解像度を均一化できる。

凸レンズアレイを追加する場合、手前のパネルの要素画像の大きさに対する奥のパネルの要素画像の大きさの拡大率を変更する必要がある。図 4.2.3 (b)に示すように $a$ と $b$ をディスプレイパネル上の観察可能な領域の横幅とし、 $d$ を2枚の液晶パネル間の距離とする。この時、画像の拡大を表現する三角形の高さ $l$ は

$$l = \frac{fg}{f-g}, \quad (3)$$

となり、拡大率の関係式は

$$b = \frac{l-d}{l}a. \quad (4)$$

で表される。式(3)と(4)のを結合すると、

$$b = \frac{fg - df + gd}{fg}a, \quad (5)$$

が求まる。ゆえに拡大率は液晶パネル間の距離とレンズの焦点距離で表現できる。この拡大率を元に画像を拡大する。

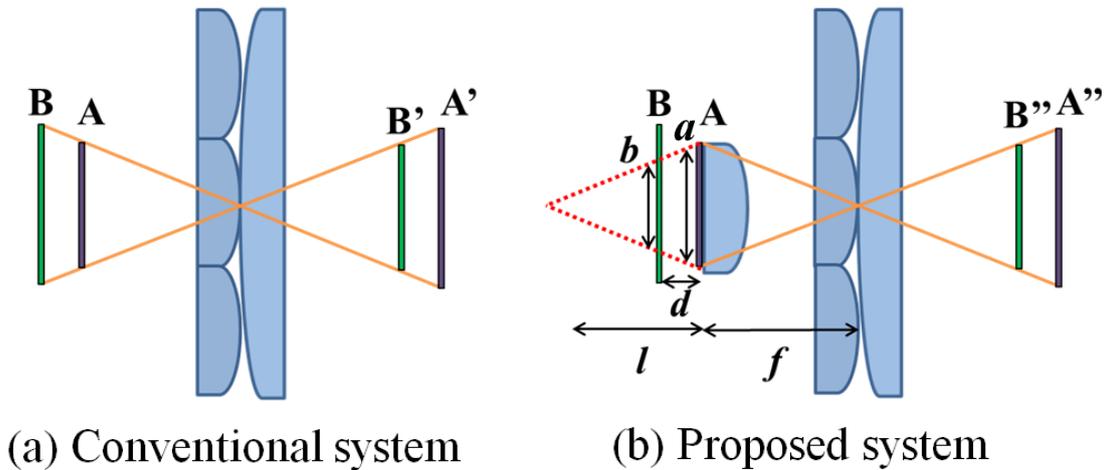


図 4.2.3. 要素レンズによる画像の拡大率

2 つ目のモアレを抑制する手法は手前のパネルの画素ピッチは固定したまま後ろのパネルの画素ピッチを大きくすることである。従来の CIVI では、手前のパネルと奥のパネルの画素ピッチは等しい。一方、提案する手法では、パネルの画素ピッチは手前のディスプレイより奥のディスプレイの方が大きくなるようにする。

画素ピッチを変更することでモアレを抑制する光学設計について説明する。1 つ目の手法では、凸レンズアレイを追加することでパネルとレンズアレイの間で負の光線を結像させたが、手前と奥とパネルの画素ピッチを変更することでも同様の効果を実現できる。従来の多層化されたパネルでは、奥のパネルの画素と手前のパネルの画素は完全に。

重なっていた。一方、提案するシステムでは画素の相対位置がずれていく。画素が暗く見える角度 $\theta$ は、

$$\tan \theta = \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)p - mq}{d} \quad (6)$$

を満たす。ここで、 $n$ と $m$ は整数、 $p$ は手前のパネルの画素ピッチ、 $q$ は奥のパネルの画素ピッチ、 $d$ はパネル間の距離である（図 4.2.4）。この系では、画素ピッチとパネル間の距離を変更することで結像位置を調節できる。手前のパネルの画素ピッチが奥のパネルの画素ピッチより大きいとき、結像位置 $s$ と画素ピッチの関係性は、

$$s : s + d = p : q, \quad (7)$$

で表され、座標 $s$ は、

$$s = \frac{pd}{q - p}, \quad (8)$$

で与えられる。この式は三角形間の相似によって求まる関係である。 $s$ が $G - f$ に等しいとき、図 4.2.5 に示すように、負の光線は平行になりモアレは見えなくなる。これは画素ピッチの変更によりディスプレイ上からの平行光が結像する位置がレンズアレイと大口径レンズの合成焦点距離の位置に一致しているからである。

求めた関係式の正当性を確かめるために、パネル間の距離を変更しつつ、パネルとモアレの距離を測定し、式から求められた理論値と比較した。手前のパネルの画素ピッチは 0.227 mm で奥のパネルの画素ピッチは 0.255 mm である。図 4.2.6 は理論値と実測値を比較した結果である。この図より、測定された距離 $s$ は式から求めた距離とほぼ等しいことが分かる。

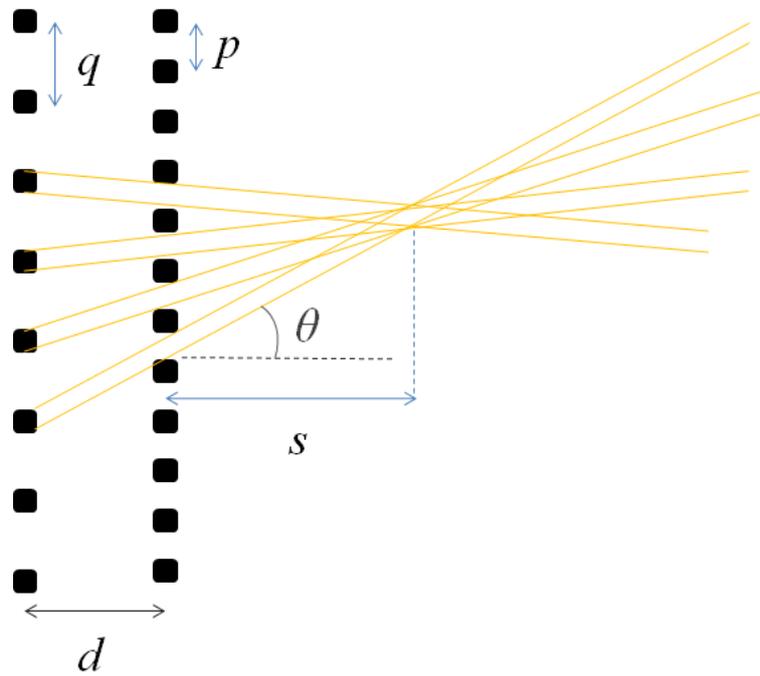


図 4.2.4. 画素ピッチを変更した場合の暗く見える方向の結像位置

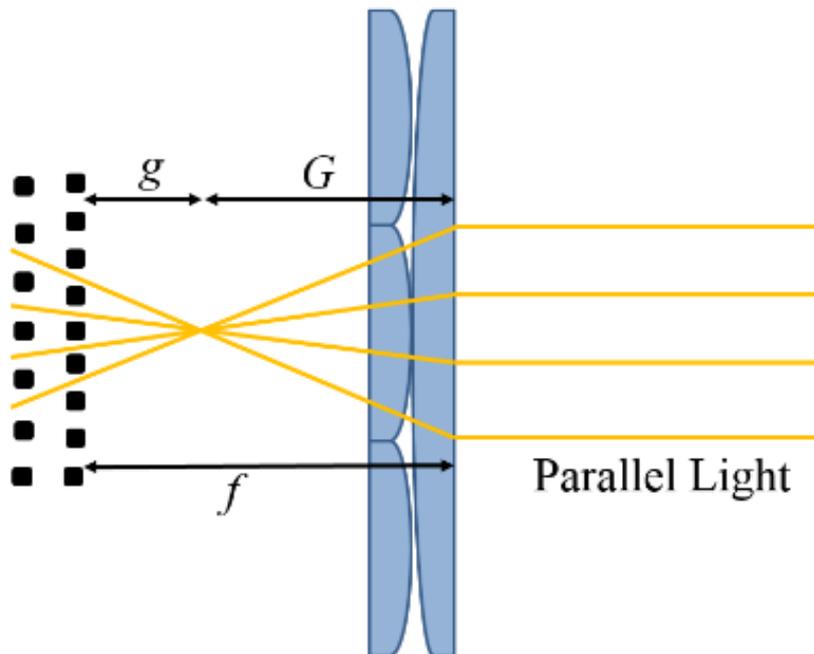


図4.2.5. 提案するシステム上の暗くなる領域の光路

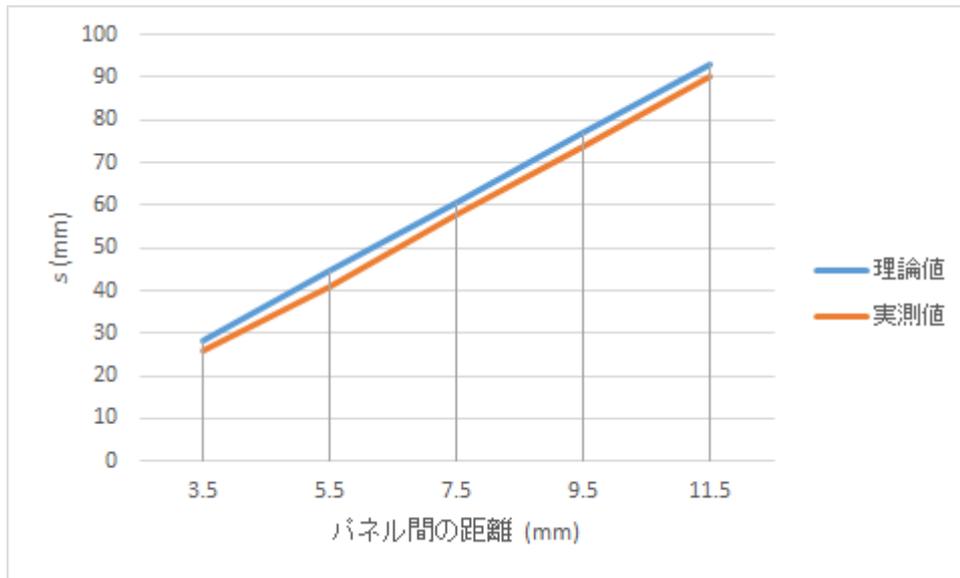


図 4.2.6. パネル間の距離を変更した時の $s$

この手法も解像度の均一化を実現するものである。実像を形成している手前のパネルの領域は奥の実像を形成しているパネルの領域より小さく、手前のパネルが生成する実像は奥のパネルが生成する実像より大きい。ゆえに実像を生成する手前のパネルの領域は奥のパネルのそれより粗である。一方、手前のパネルの画素数は奥のパネルの画素数より密である。実像の拡大率の大小を画素の密度の高低で相殺することで、実像の解像度が均一化される。

画素ピッチを変更した場合においても、手前のパネルの要素画像の大きさに対する奥のパネルの要素画像の大きさの拡大率を変更する必要がある。 $a$ と $b$ をディスプレイパネル上の観察可能な領域の横幅とし、 $d$ を2枚の液晶パネル間の距離とする。また、観察できる領域の画素数を $\alpha$ と $\beta$ とする。この時、拡大率の式は、

$$b = a \cdot \frac{f + d}{f} \quad (9)$$

となり、画素数 $\alpha$ 、 $\beta$ は

$$\alpha = \frac{a}{p} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{b}{q} \quad (11)$$

と与えられる。(9),(10),(11)を組み合わせると、

$$\beta = \alpha \frac{(f + d)p}{fq} \quad (12)$$

が求まる。ゆえに拡大率はレンズの焦点距離とパネル間の距離で表現できる。この拡大率を元に画像を拡大する。

今回、2つの手法を提案したが、それぞれに長所がある。1つ目の手法の長所は光学設計の自由度の高さである。パネルの画素ピッチに選択肢はほとんどないが、一方、画素ピッチと比較して容易にレンズの焦点距離を選択できる。2つ目の手法の長所は製造の容易さである。適切なディスプレイパネルが存在する場合、システム全体を安価に製造することができる。また、物理的には何も追加せずディスプレイパネルを変更するのみなので、1つ目の手法と比較してシステムの重量が軽くなる。以上のことから、状況に応じて2つの手法を使い分ける必要がある。

### 4-3 実験

まず1つ目に提案した手法を元にプロトタイプを製作した。図 4.3.1 は提案した手法を元に製作したシステムの写真を示している。製作したシステムは表示領域の解像度が  $1280 \times 1024$  の 18.1 インチの 1 枚のカラーパネルと 3 枚のモノクロパネルで構成されている。これらの液晶パネルはバックライトの前に 2 mm ごとに配置されており、レンズアレイから 103 mm 離れている。レンズアレイは大きさが  $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$  で焦点距離 103 mm の 48 枚の要素レンズで構成されている。大口径レンズは焦点距離 300 mm であり、レンズアレイの手前に配置されている。追加されたレンズアレイの焦点距離は 25.4 mm で液晶パネルの表面の前に配置される。

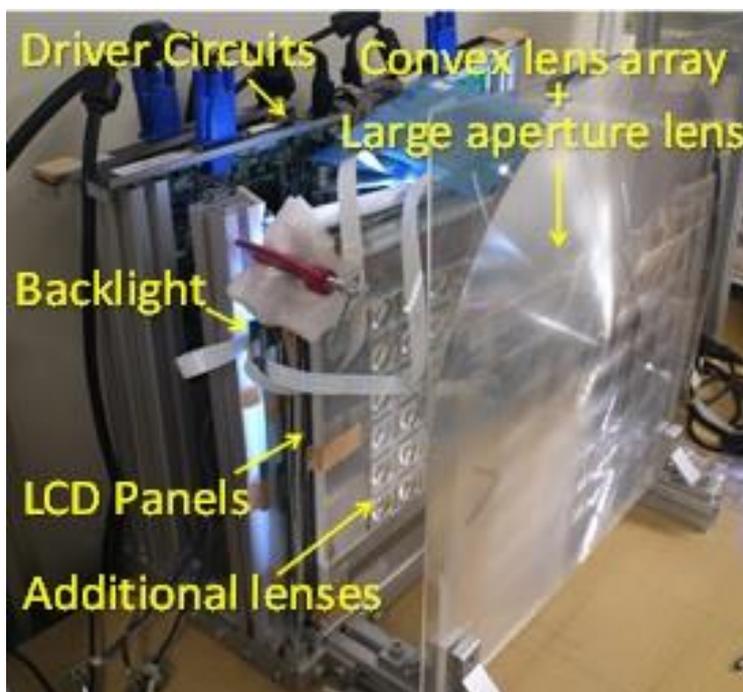


図4.3.1. 提案した手法を元にしたディスプレイ

図 4.3.2 は多層化されたパネルに表示される要素画像の 1 つを示している。パネルにカメラの焦点を合わせた時、モアレはほとんど目立たない。一方、凸レンズアレイを追加することで、パネルから 25 mm の位置に狭いピッチのモアレが生じる。この光学設計では式(2)から  $G = 77 \text{ mm}$  が求められる。 $f = 103 \text{ mm}$ ,  $g = 25.4 \text{ mm}$  なので  $f - g$  はほとんど  $G$  と等しい。故に凸レンズアレイを追加した時、モアレは目立たなくなると考えられる。図 4.3.3 は従来のシステム(左)と提案したシステム(右)で表示された画像の写真を示している。従来のシステムと比較して提案したシステムの画像のモアレは目立たなくなっていることが分かる。

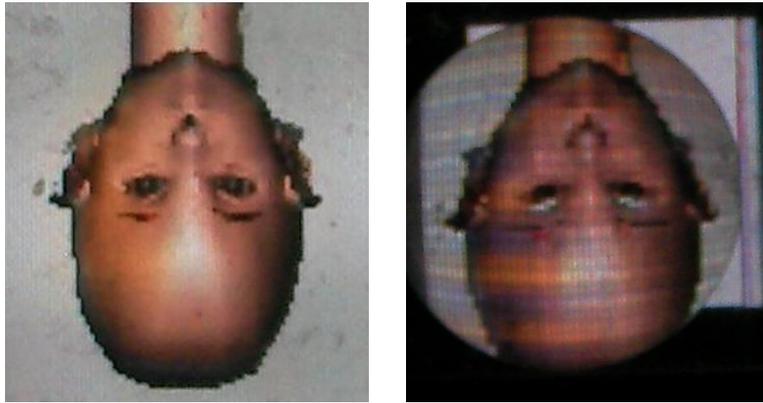


図4.3.2. 要素画像(左、レンズを追加する前、右、レンズを追加した後)

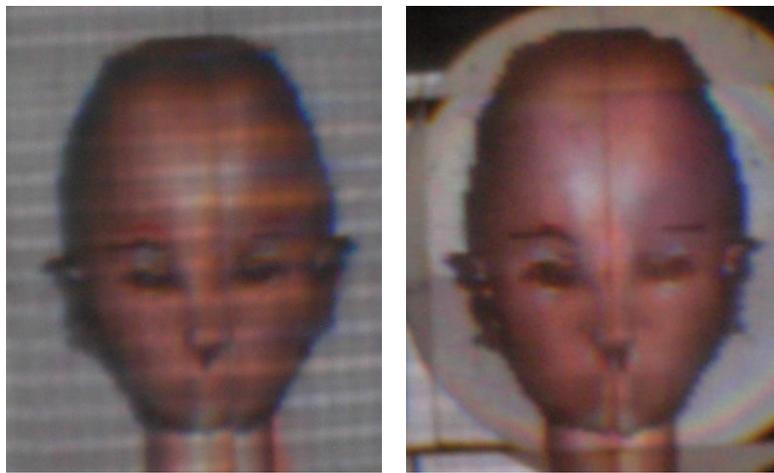


図4.3.3. 表示される画像(左、従来のシステム、右、提案したシステム).

次に2つ目に提案した手法を元にプロトタイプを製作した。提案した手法の効果を確かめるためにプロトタイプを2つの条件で比較した。図4.3.4は提案した手法を元に製作したディスプレイの写真である。このシステムは1枚のモノクロパネルと1枚のカラーパネルで構成されている。モノクロパネルの画素ピッチは0.255 mmで条件1のカラーパネルの画素ピッチは0.203 mm、条件2では0.227 mmである。2つのパネル間の距離は2.5 mmである。多層化されたパネルはレンズアレイの後ろ103 mmの位置にある。レンズアレイは大きさ32×32 mmで焦点距離103 mmの要素レンズ48枚で構成されている。大口径レンズの焦点距離は300 mmでレンズアレイの手前に配置されている。方程式(8)から条件1の $s$ は9.76 mmで、一方、条件2の $s$ は20.28 mmである。この設計では $G=76.67$  mmなので条件2の $f-g$ は条件1より $G$ に近い。

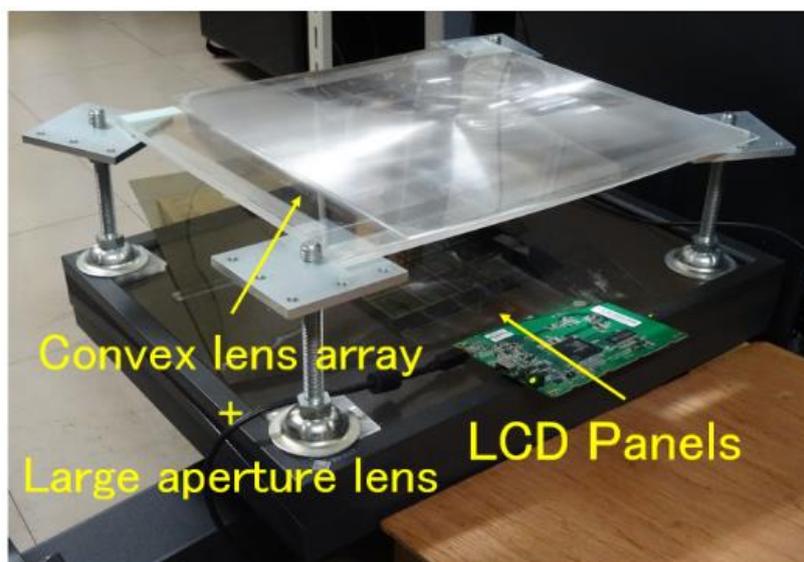


図4.3.4. 提案した手法を元に製作したディスプレイ.

図 4.3.5 は条件 1(左)と条件 2(右)で表示された画像の写真を示している。モアレは条件 1 と比較して条件 2 のほうが抑制されている。このことから、ここで提案した方法が有効に機能することが確認された。



図4.3.5. 表示される画像(左、従来のシステム、右、提案したシステム)

#### 4-4 まとめ

多層化されたディスプレイパネルで構成された CIVI で発生するモアレを抑制する 2 つの手法を提案した。いずれの手法もパネルとレンズアレイの間で暗く見える方向を表す負の光線を結像させ、それがレンズアレイと大口径レンズにより平行になるようにする。1 つ目の手法では、多層化されたディスプレイパネルの前に、焦点距離の短い凸レンズアレイを追加した。2 つ目の手法では、手前のパネルの画素ピッチを固定したまま奥のパネルの画素ピッチを拡大した。どちらの手法も、ディスプレイパネルの前に負の光線を結像させるものである。提案した 2 つの手法を元にしたシステムを製作し、提案手法を適用していないシステムと適用したシステムで発生するモアレを比較した。その結果、提案手法の適用により、実際にモアレが抑制されることを確認し、提案手法の有効性を確かめた。

## 5 エッジ分割による映像のずれの低減

この章では、ボリューム表示において、手前の映像と奥の映像のずれを画像処理により低減する手法を提案する。CIVI において、要素画像を要素レンズの光軸と離れた方向から観察すると、手前の層に描画した画像と奥の層に描画した画像の間にずれが生じ、観察される画像が不連続になるという問題がある。これを解決するため、画素の加算、もしくは減算のみで元の画像を復元可能な非負・非正エッジフィルタを適用する方法を提案し、この手法による映像のずれの低減効果を検証する。映像のずれを低減することで、1 視点あたりの視野角を広げ滑らかな運動視差を実現しやすくする。第 1 節では、映像のずれの原因について述べる。第 2 節では、非負・非正エッジフィルタについて述べる。第 3 節では、非負・非正エッジフィルタにより映像のずれが低減される理由について述べる。第 4 節では、映像のずれが低減される効果を実験により検証する。最後に、第 5 節でまとめを行う。

### 5-1 映像のずれ

ボリューム表示や CIVI は複数の映像を奥行き方向に重ねることで奥行き表現を実現している。元の映像の輝度を前後の映像の分配することで目の焦点調節を誘導し奥行き感を表示する。この時、図 5.1.1 の中央の視点のように、前後の映像の画素と眼球の位置が直線上に並んでいると仮定して輝度を分配することが多い。その場合、輝度が分配された画素の両方を結ぶ直線上の視点から見ると、映像が正しく重なって元の映像が復元される。一方、右の視点から左の方を見ると手前の映像の中央の視点に表示するための画素と、奥の映像の左の視点に表示するための画素が重なって見えてしまう。この時、当該画素がエッジ部分だった場合、そのずれが大きく目立つことになる。

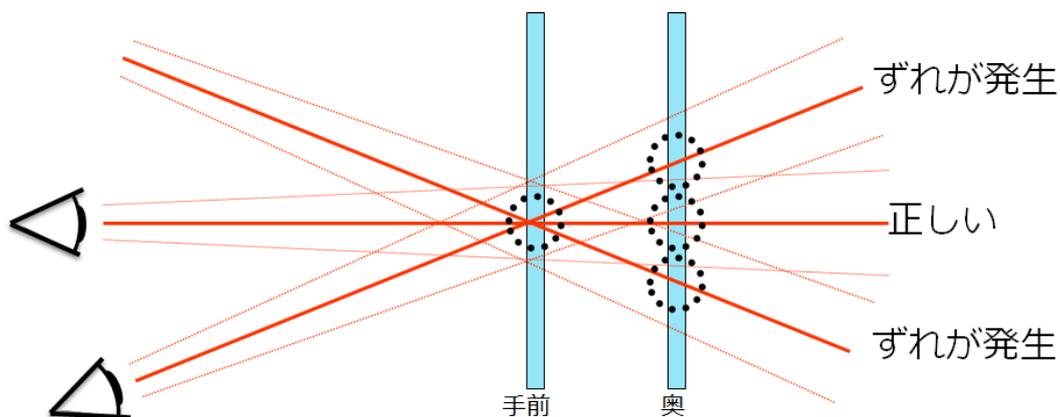


図 5.1.1. 視点位置とボリューム表示

CIVI の場合、ボリューム表示と違い複数方向の映像を用いて広視野角を実現するため、ひとつの視点あたりの映像の視野角は狭くなっている。しかし、ある視点映像の視野角の中央付近から映像を見た場合は正しく重なって映像が見えるものの、視野角の端の方から見ると前後の画素の間に若干のずれが生じる。図 5.1.2 では、正面の視点からは画素 1a と画素 1b が重なって見えるが、端の視点からでは画素 1a と画素 2b が重なって見えている。画素 1a と画素 1b が重なるように輝度が設定されているため、端の視点から見ると映像のずれが生じてしまう。手前と奥の像の距離が短い場合、ずれは小さく目立たないが、距離が長い場合、ずれが大きくなり目立ってしまう。液晶パネルを重ねて奥行きを表現するディスプレイの場合、輝度の低下を抑えるためには、像の枚数を少なくし像面間の距離を大きくする必要がある。そのため、輝度の低下を抑えた時に映像のずれが目立ってしまう。

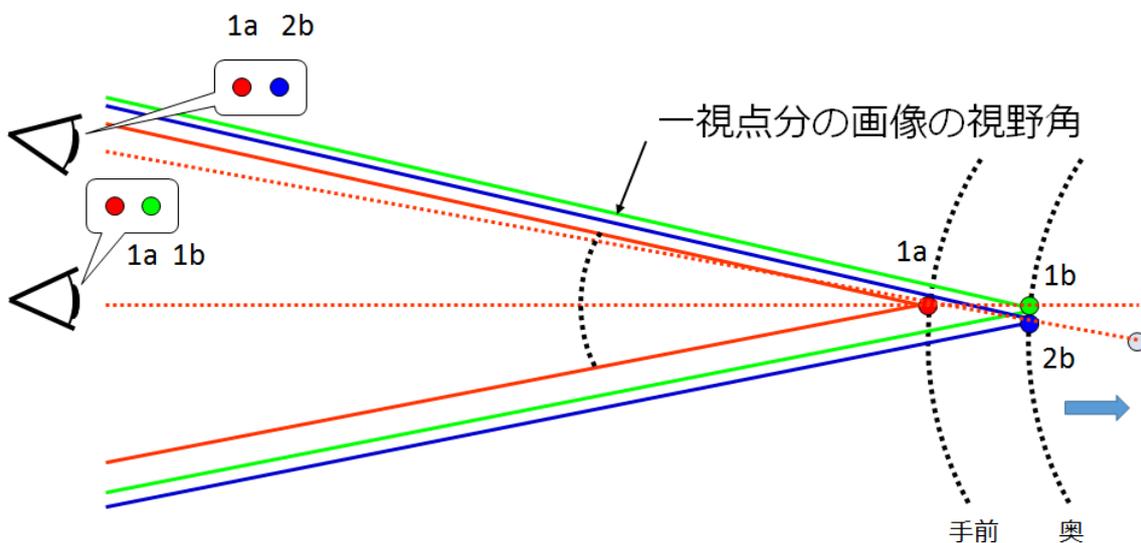


図 5.1.2. 視点位置と CIVI

## 5-2 非負・非正エッジフィルタ

3D ディスプレイで実写映像を提示する場合、奥行き推定を行う必要があるが、多視点画像に基づいて実写のボリューム表現に必要な各画素の奥行き推定を行うのは、大きな計算量を要するとともに精度も高くない。アクティブカメラを用いた能動的奥行き情報取得方法ならばこの問題を解決できるが[38]、多視点ボリューム画像を取得するためには複数のアクティブカメラを用いる必要がある。その場合、投影した複数の光が干渉し、奥行き情報を安定に取得することができなくなる。ステレオマッチングや平面走査法のような受動的な奥行き推定は輝度の変化が平坦な領域の奥行きを推定できないが、エッジ部分の奥行き推定精度は高い。また、人間はエッジのぼけが最小になるように目の焦点を合わせるため、焦点調節は画像のエッジ部分に依存する。ゆえに、エッジ部分を適切な奥行きに表示すれば、輻輳調節矛盾は低減すると期待される。それには、適切なエッジ抽出が必要となる。

Yasui ら[39]と Ebisu ら[40]は画像のエッジ領域のみをボリューム表示する手法を提案している。しかしながら、この方法では画像のエッジが強調されてしまい、オリジナルの画像を復元できていないという問題点がある。そこで、本研究では、オリジナルの画像を再構成できるエッジ抽出フィルタとして非負・非正エッジフィルタを提案する。オリジナル画像を正しい奥行きに提示するエッジ画像と任意の奥行きに提示可能な平滑化画像に分離し、エッジ画像のみを正しい奥行きに提示して平滑化画像は任意の奥行きに提示してよい。このフィルタはオリジナルの画像の復元を加算のみで可能にするエッジフィルタと平滑化フィルタであり、オリジナルの画像から平滑化された画像を生成し、オリジナルの画像と平滑化された画像の差分をエッジ画像としている。

ここで加算型の平滑化画像を生成するためのフィルタを説明する。横方向が左から*i*番目、縦方向が上から*j*番目の画素(*i, j*)の画素値を*I(i, j)*とする。このとき、提案する平滑化フィルタでは、画素(*i, j*)の値を

$$U(i, j) = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N S(i, j, k) \quad (13)$$

で与える。ただし、*S(i, j, k)*は

$$S(i, j, k) = \min_{-k \leq t, s \leq k} I(i+t, j+s) \quad (14)$$

で定義される。すなわち、*S(i, j, k)*は画素(*i, j*)を中心とした $(2k+1) \times (2k+1)$ の正方形のウィンドウ内の画素値の最小値である。

$N$ はフィルタのウインドウの大きさを定義するパラメータで、 $(2N + 1) \times (2N + 1)$ 画素がウインドウに含まれる。 $S(i, j, k)$ は $k$ によらず常に $I(i, j)$ 以下であるので、 $U(i, j)$ も $I(i, j)$ 以下となる。さらに、エッジフィルタについては、画素 $(i, j)$ の値を

$$DoU(i, j) = I(i, j) - U(i, j) \quad (15)$$

で与える。

$U(i, j)$ は小さな近傍ウインドウ内の最小値から大きな近傍ウインドウ内の最小値までの平均をとることで平滑化を実現する。一方、 $DoU(i, j)$ は元画像と平滑化画像の差分をとることで画像のエッジを抽出する。

$U(i, j)$ は常に $I(i, j)$ 以下であるため、 $DoU(i, j)$ は非負の値しかとらない。(図 5.2.1)。よって、平滑化フィルタとエッジフィルタとして、 $U(i, j)$ と $DoU(i, j)$ を使うことで、オリジナルの画像を加算操作のみで再現することができる。実際にこのフィルタを図 5.2.2(左)の画像に用いたときの平滑化画像とエッジ画像をそれぞれ図 5.2.2 (中央)と図 5.2.2 (右)に示す。これらの図が示すとおり、 $U(i, j)$ と $DoU(i, j)$ のフィルタによって、平滑化とエッジ抽出が実現できていることが分かる。

ハーフミラーで複数の奥行き画像を重ねてボリューム表示を行う場合、上述した加算型の非負エッジフィルタを利用できる。しかしながら、複数のパネルを重ねてボリューム表示する場合は、各パネルの透過率を乗算したものが観察者に表示される輝度になる。透過率の対数をとると、この計算は加算になる。各パネルの最大透過率は1であり、対数をとった値は正にならない。よって、対数をとった上で、非正エッジフィルタを用いることで、元画像の輝度を復元することができる。

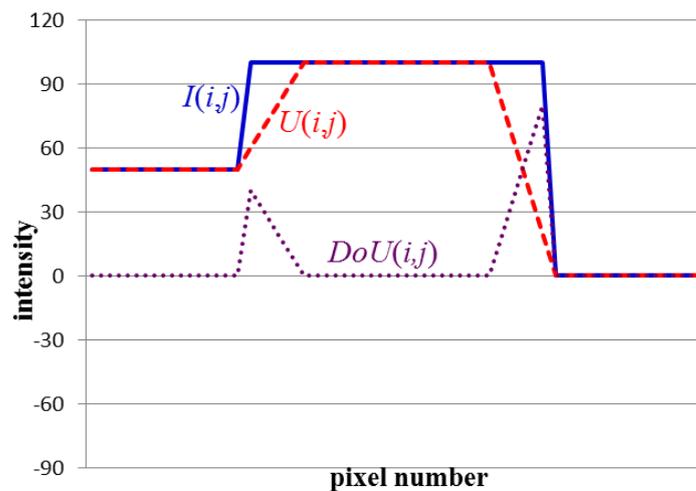


図 5.2.1. 加算型の平滑化フィルタとエッジフィルタ (簡単のため $j$ 方向に画素値は変化しないとして $i$ 方向の平滑化とエッジ抽出について図示している)

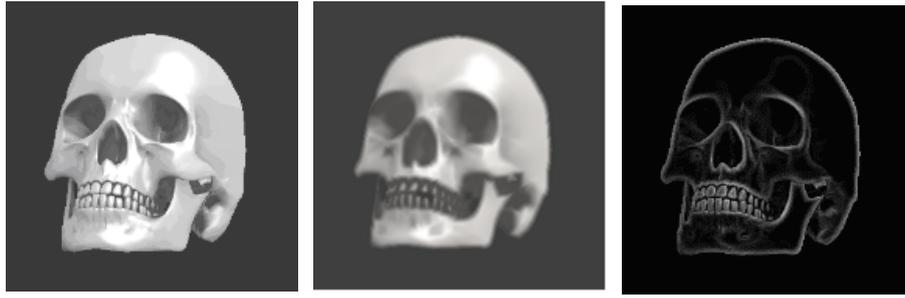


図 5.2.2. 元画像(左) 平滑化画像(中央) エッジ画像(右)

実写映像をインテグラルボリューム表示する場合、以下の画像処理が必要となる。まず、第 1 段階では、提案したフィルタを用いて、多視点カメラによって取得された画像からエッジ画像を抽出する。次に、第 2 段階では、多視点カメラによって撮影された画像からエッジ画素のデプス値を取得する。これの実現方法として、平面走査によるステレオアルゴリズムを用いる[41]。第 3 段階で、各奥行きディスプレイパネルに表示する画像を生成する。平滑化画像はどの奥行きに描画してもよいが、ここでは平滑化画像を  $1/M$  の輝度 ( $M$  はディスプレイパネルの枚数) にした画像を生成して、全てのパネルに分割して表示する。一方、エッジ画像は、近隣する 2 枚のパネルに各画素のデプス値とパネルの距離に逆比例するよう輝度値を分配して描画する。

この 3 つの段階のうち、最初の 2 段階は必要な計算量が多い。第 2 段階については、高速な計算が既に提案されている[42] [43]。そこで、ここでは第 1 段階のエッジフィルタと平滑化フィルタの計算の高速化について考える。これは、GPU を用いることで実現される。

まず、

$$V(i, j, k) = \min_{-k \leq s \leq k} I(i, j + s) \quad (16)$$

を  $0 \leq k \leq N$  の範囲で全ての画素  $(i, j)$  について計算する。ここで、

$$S(i, j, k) = \min_{-k \leq t \leq k} V(i + t, j, k) \quad (17)$$

であることに着目すると、上で計算した  $V(i, j, k)$  から  $S(i, j, k)$  を高速に計算することができ、それを利用して  $U(i, j)$  も高速に得ることができる。

以上のいずれの計算も並列に実行できるので、GPU を用いて大幅な高速化をすることが期待できる。平面走査ステレオについても、画像のエッジ部分のみに対してデプス値を計算することで高速化できる。エッジのしきい値を設定し、画像のエッジ部分のみに平面走査ステレオの計算を限定することで、必要とされる計算量は減少する。

### 5-3 フィルタによる映像ずれの抑制

以下では、非負・非正エッジフィルタの利用により映像のずれを低減できるメカニズムについて説明する。ここでは、図 5.3.1 に示すように、映像のずれの影響が最も大きいと考えられる輝度が高い領域は手前に存在し、輝度が低い領域が奥に存在するエッジ部分を例に出して説明する。

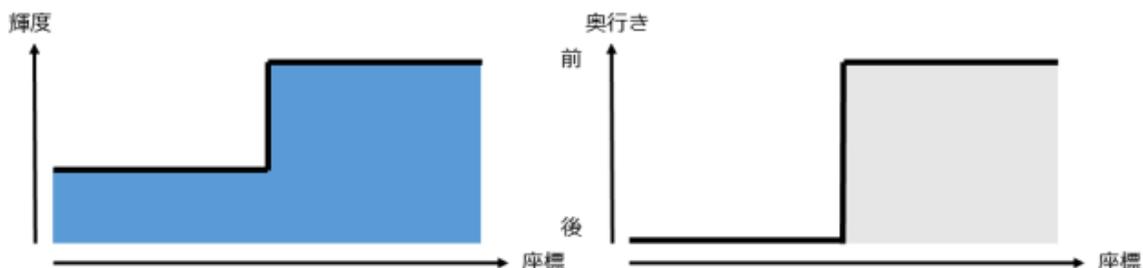


図 5.3.1. 輝度と奥行きの分布

この時、従来手法で描画すると、手前と奥の映像の輝度は図 5.3.2 の左のように、非負・非正エッジフィルタを用いて描画すると、手前と奥の映像の輝度は図 5.3.2 の右のように表される。

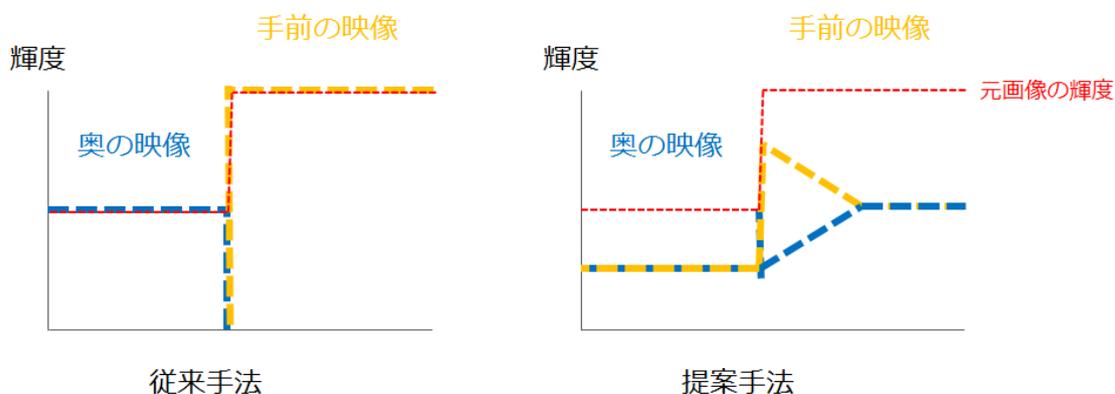


図 5.3.2. 手前と奥のディスプレイの輝度  
従来手法(左) 提案手法(右)

観察者が映像を斜めから見た時、奥の映像が手前の映像に対してずれる。奥の映像が手前の映像に対して映像が重なる方向に動く場合の手前と奥の映像の加算した結果を図 5.3.3 に示す。この図が示すように、従来手法では輝度が高い領域が生じているが、提案手法では輝度の増加が抑制される。

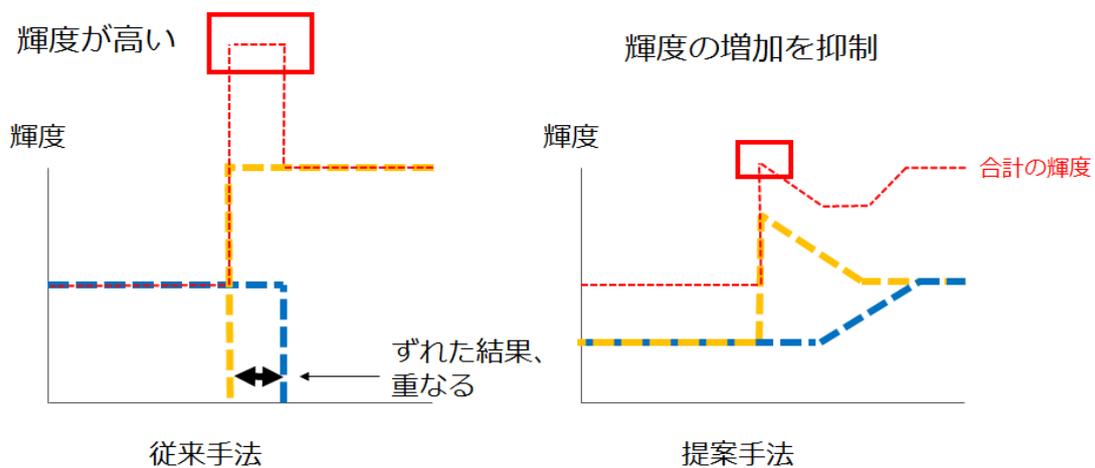


図 5.3.3. 提示される輝度 従来手法(左) 提案手法(右)

一方、奥の映像が手前の映像に対して離れる方向に動く場合の手前と奥の映像の加算した結果を図 5.3.4 に示す。この図が示す通り、従来手法では輝度が低く黒い領域が生じているが、提案手法では従来手法と比較して輝度の低下が抑制される。

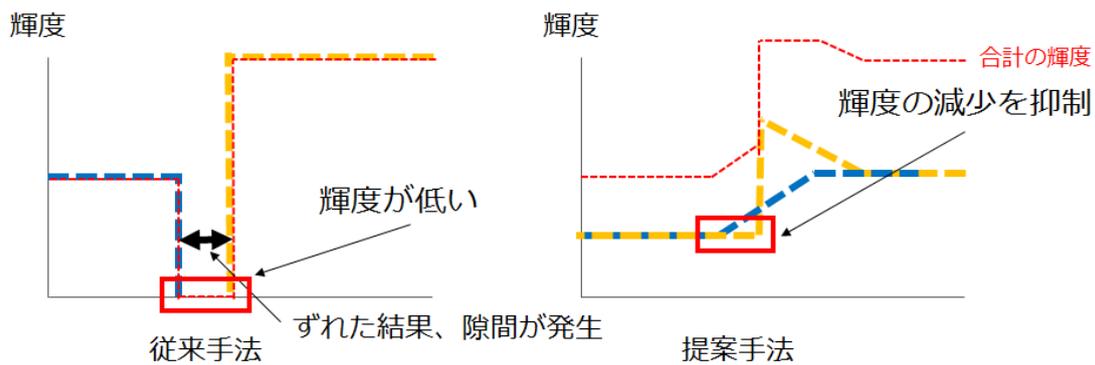


図 5.3.4. 提示される輝度 従来手法(左) 提案手法(右)

## 5-4 実験

ボリューム表示の映像ずれにおける非負・非正エッジフィルタの有用性を確認するために、観察者に提示される映像ずれを再現した映像を生成し評価した。評価用の映像は設計可能なディスプレイを仮定し、そこで生じるずれの量を元に生成している。図 5.4.1 に示すように、ディスプレイの 1 視点に表示される映像の大きさを  $G$ 、映像間の距離を  $\beta$ 、視野角を  $\theta$ 、観察者と手前のディスプレイの距離を  $\alpha$  とする。この時、画素の最大のずれ幅  $g$  は、相似により

$$g = \tan(\theta/2) \cdot \beta \quad (18)$$

と表せる。また、要素画像の画素数を  $p$  とすると、最大のずれ幅は  $p \frac{g}{G}$  画素分となる。

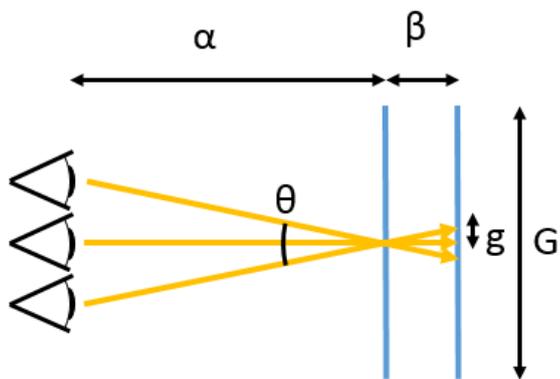


図 5.4.1. 仮定されたディスプレイ

ここでは、 $\beta = 1 \text{ cm}$   $G = 4 \text{ cm}$   $\theta = 4^\circ$  画素数 250 のディスプレイを仮定する。この時、最大のずれ幅は 2.18 画素である。そのため 2 画素ずらした画像を比較する。画像には図 5.4.2、図 5.4.3 に示す Tsukuba[44]と骸骨を用いた。



図 5.4.2. Tsukuba カラー画像(左) 奥行き画像(右)

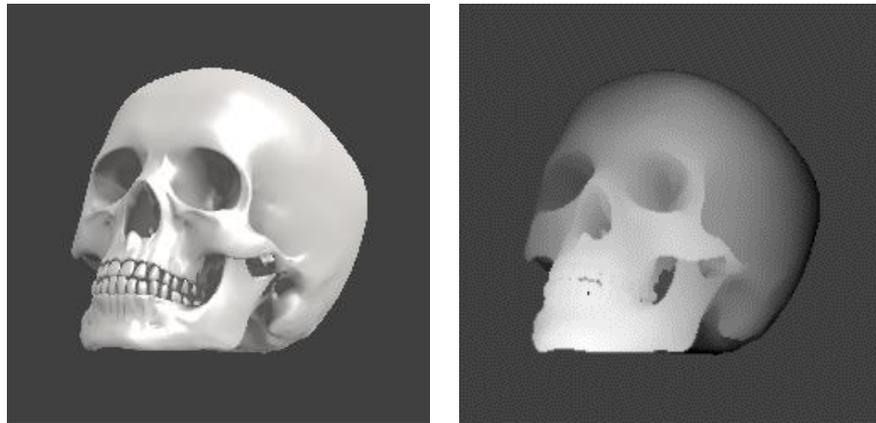


図 5.4.3. 骸骨 カラー画像(左) 奥行き画像(右)

従来手法と非負・非正エッジフィルタを用いた提案手法でこれらの画像を2画素ずらして重ね合わせた画像を生成した。図 5.4.4 は2画素ずらして描画された Tsukuba の一部を拡大した画像である。図 5.4.5 は2画素ずらして描画された骸骨の一部を拡大した画像である。

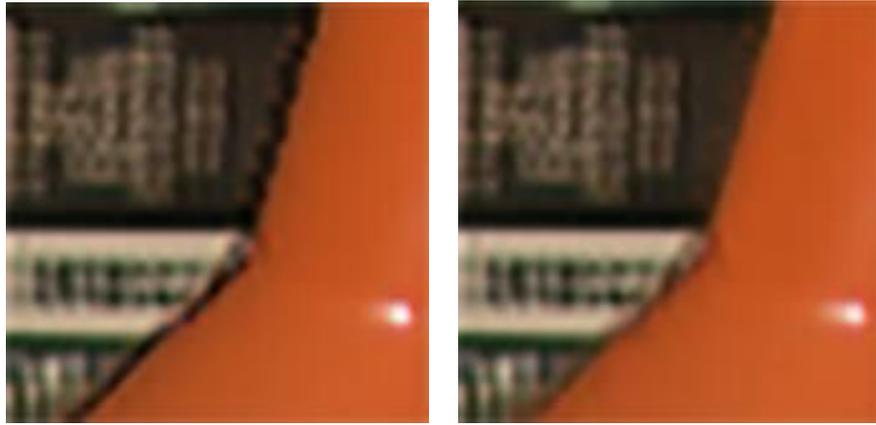


図 5.4.4. 従来手法(左) 提案手法(右)

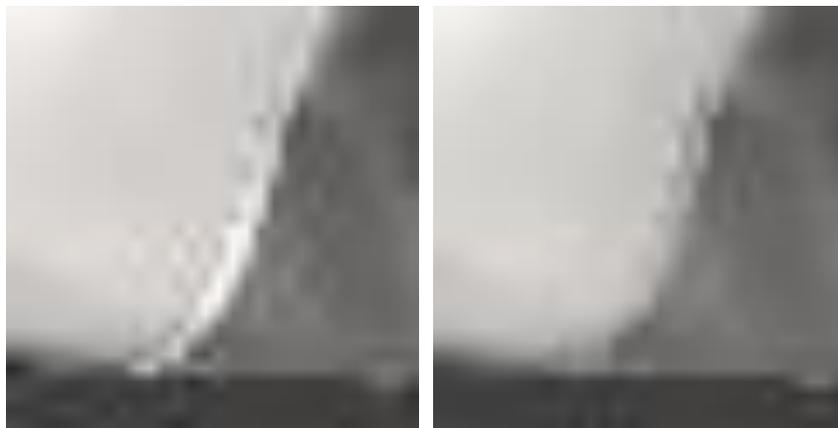


図 5.4.5. 従来手法(左) 提案手法(右)

図 5.4.4 では、従来手法で描画した場合、手前の画像と奥の画像の間に黒い隙間が生じているのが分かる。一方、非負・非正エッジフィルタを適用することにより黒い隙間が目立たなくなっている。図 5.4.5 では、従来手法で描画した場合、輝度の高い帯が発生しているが、非負・非正エッジフィルタを適用することにより輝度の高い帯が目立たなくなっている。

次にオリジナルの画像に対しての差分を比較した。実験では画素を 8bit、256 階調で表現した。比較する数値としてオリジナルの画像と生成された画像の画素の差の二乗を平均した数値の平方根を用いた。結果を表 5.4.1 に示す。従来手法に対して提案手法の方がいずれの場合も数値が小さくなることが分かる。

表 5.4.1. 誤差の二乗の平均の平方根

オブジェクト	提案手法	従来手法
Tsukuba	24.23	25.55
骸骨	19.64	21.26

続いて、実際に実機を製作し、従来手法と提案手法で生成される画像を比較した。実機のパラメータは表 5.4.2 のとおりである。

表 5.4.2. スペック

画素ピッチ(奥)	0.255 mm
画素ピッチ(中間)	0.227 mm
画素ピッチ(前)	0.210 mm
液晶パネル間の距離	3.0 mm
液晶パネルとレンズアレイ間の距離	100 mm
レンズアレイ焦点距離	100 mm
大口径レンズ焦点距離	225 mm



図 5.4.6. 従来手法(左) 提案手法(右)

今回は液晶パネルを重ねて奥行きを表現しているため、非正エッジフィルタを使用した。図 5.4.6 は従来手法と提案手法で立方体を表示した時の映像である。左の従来手法による映像は視点が切り替わる時に白い帯と黒い帯が発生しているのがわかる。一方、右の提案手法による映像は白い帯と黒い帯が抑制され、正しく映像が表示されていることがわかる。

以上の 2 つの実験により提案手法が映像のずれの改善に有効であることが確かめられた。

## 5-5 まとめ

本章では、ボリューム表示において、視点位置によって発生する手前の映像と奥の映像の間のずれを目立たなくする方法を提案した。具体的には、非負・非正エッジフィルタを用いた描画を行った。提案手法の有効性を確認するため、ソフトウェア的にずれを発生させて重ね合わせる画像を生成し、非負エッジフィルタ処理を用いることで、ずれが目立たなくなることを確かめた。また、実際に実機で提案手法を実装し、従来手法に比べ、視点の切り替わり時に発生するノイズが提案手法によって抑制されることを確かめた。

## 6 応用：フローティングボリュームビューア

この章では、CIVI の実用性を検証するため、CIVI を用いて空中に浮かんでいる 3 次元映像を切断し中身を観察できるという新たな体験を提供するシステムを構築する。第 1 節では、システムの概要について述べる。第 2 節では、関連研究について述べる。第 3 節では、システムの詳細について述べる。最後に、第 4 節でまとめを行う。

### 6-1 CIVI の応用

CIVI の実用性を検証するテストベッドとして、空中に浮かんでいる 3 次元映像を切断し、インタラクティブに中身を観察できるという新たな体験を提供するフローティングボリュームビューアを設計した。フローティングボリュームビューアは 6 軸モーションセンサがついた透明なアクリル板と CIVI で構成されている。図 6.1.1 に示すように、観察者はセンサを備えた透明な板で CIVI が提示した空中像を切断し、提示像の任意の断面を見ることができる。図 6.1.2 に示すように、CIVI はホログラムのように見る位置に応じた映像を表示できるので、複数人の観察者が同時にこの体験を共有することができる。

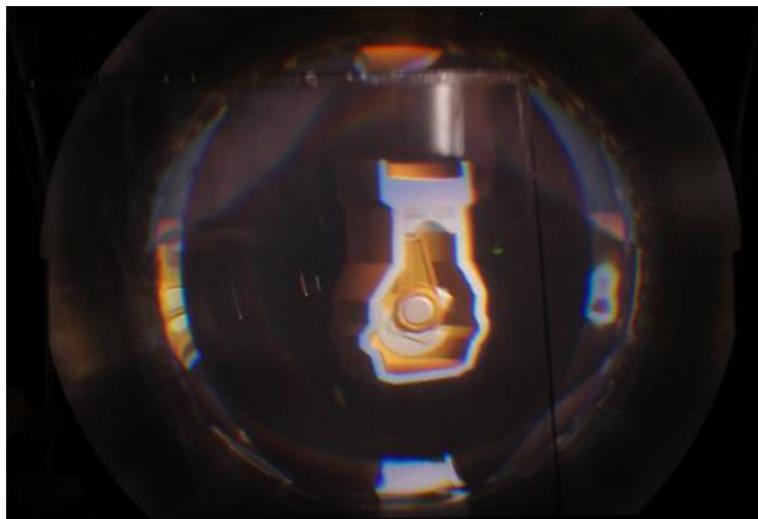


図 6.1.1. 観察者がアクリル板でオブジェクトを切断した映像

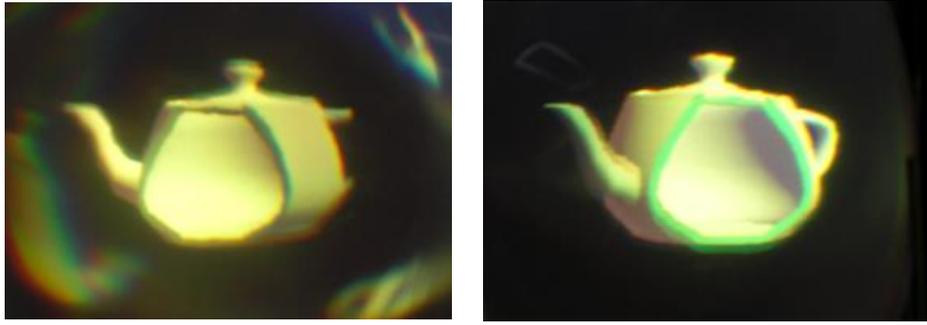


図 6.1.2. 切断されたオブジェクトを左と右から見た映像

## 6-2 関連研究

インタラクティブな断面提示を実現した従来のシステムは2つ存在する。Cassinelli と Ishikawa が開発した Volume Slicing Display はコントローラとプロジェクタと紙で構成されている[45]。紙の位置と角度をリアルタイムに検出し、それを元にコントローラはプロジェクタを用いて 3D オブジェクトの断面を紙に投影する。しかし、このシステムは断面を表示するのみであり、直感的に物体の位置を観察者に提示することは難しい。Nagakura と Oishi が開発した Deskrama は建築物の図面を書いた紙の上に液晶パネルを置き、置いた位置に応じて建築物の断面をその液晶パネルに表示する[46]。このシステムは断面だけでなく射影投影を元にして背景を描画する。

以上述べた従来システムはいずれも 2D ディスプレイ技術を元にしており、提示された映像から奥行きを直接知覚することはできない。また、観察者は映像を見るために紙やディスプレイパネルを自分の顔に向けて把持する必要がある。ゆえに映像空間が物理空間内に同時に存在しているようには感じにくいという問題もある。

## 6-3 フローティングボリュームビューア

上述の通り、フローティングボリュームビューアは観察者が空中に浮かんでいる物体を直接切断できる環境を提供することを目的とする。実際に、CIVI の実機を用いてシステムを製作した。ここでは、画質の解像度を最優先するため、パネルの多層化による小型化はせずに、2章と3章で述べた高画質化と高速化アルゴリズムを採用したハーフミラーによるボリューム化を利用した CIVI をディスプレイとして採用することにした。

システムに使用されている CIVI は  $10 \times 6$  視点で 1 視点の解像度は  $384 \times 384$  である。図 6.3.1 に示すように、アクリル板の位置と姿勢を 6 軸のポヒマスセンサで検出し、空中像とアクリル板が交差した位置を検出し、空中像が切断された映像を表示する。図 6.3.2 はフローティングボリュームビューアを構成するアクリル板と CIVI である。

オブジェクトの中身は 3D テクスチャフォーマットで格納されている。3D テクスチャデータで与えられた断面のテクスチャは切断より生成された断面の表面にリアルタイムにマッピングされる。断面も正しく表示されるため観察者は直接手で持ったアクリ

ル板で空中の像を切断しているかのように感じる。断面は 3D テクスチャとして保存しているため、内部が不均一な材質で充填されているオブジェクトを扱える。例えば図 6.3.3 のようなキウイである。切断する位置によってはキウイの種や芯を確認できる。断面はリアルタイムで計算し形状を生成しているため、オブジェクトが動的に変化していたとしても断面を表示できる。図 6.3.4 のようなエンジンがその例である。エンジンが稼働中で各パーツが独立に動いていたとしても、エンジンを停止することなく内部の形状を表示できる。また、半透明物体にも対応しており図 6.3.5 のような内臓も表示できる。

製作した実機を展示会などで多くの一般ユーザに体験させた結果、設計意図通りの体験をユーザに提供できることが確認された。

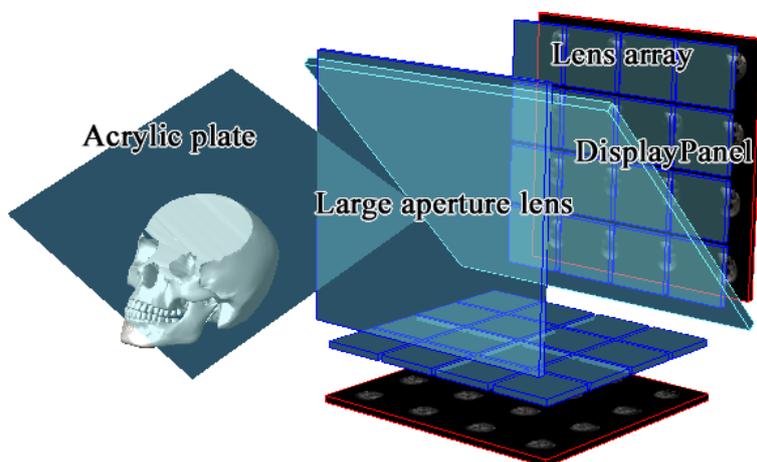


図 6.3.1. フローティングボリュームビューアの原理

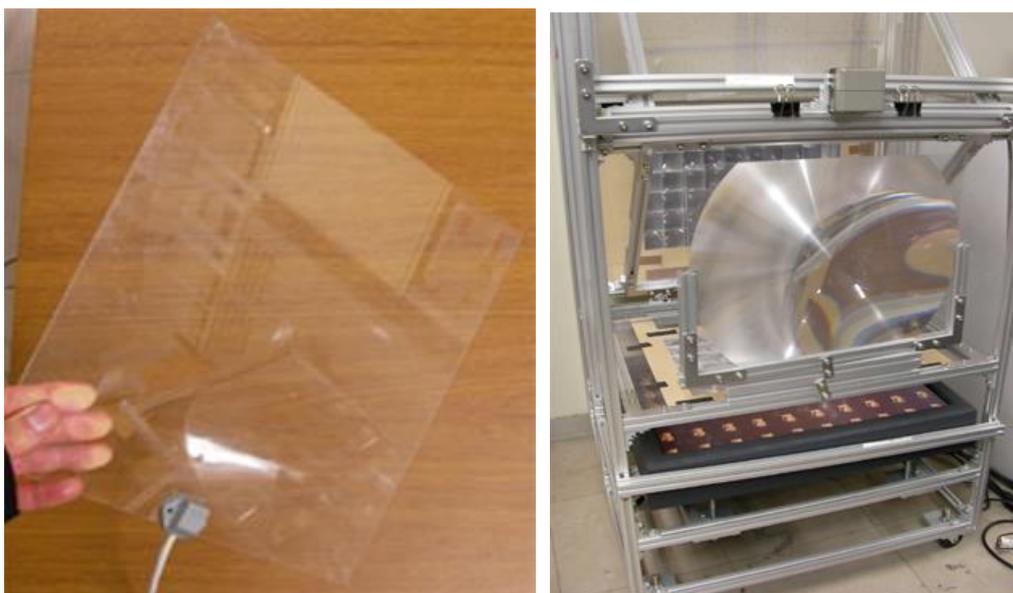


図 6.3.2. アクリル板(左) CIVI(右)

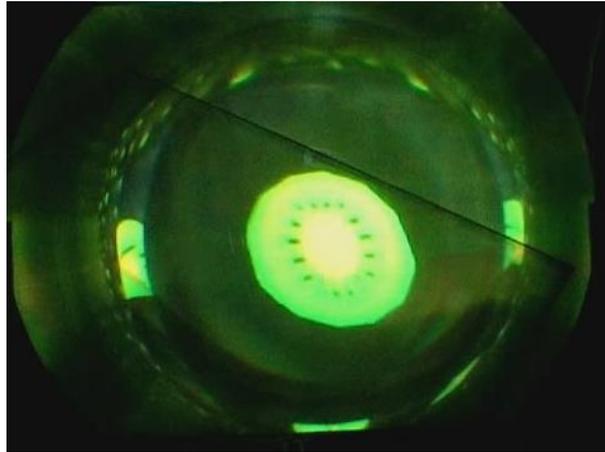


図 6.3.3. キウイ

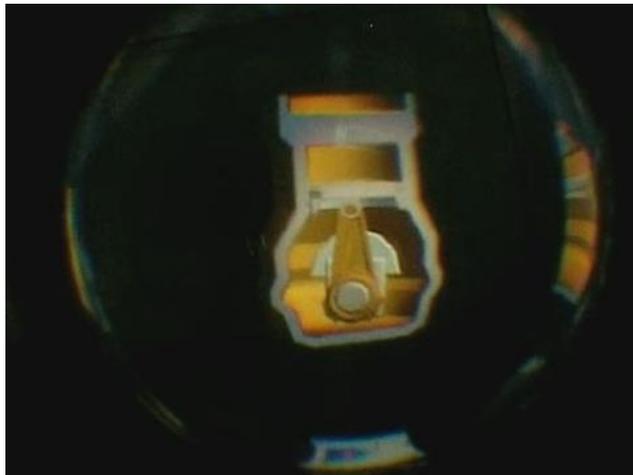


図 6.3.4. エンジン

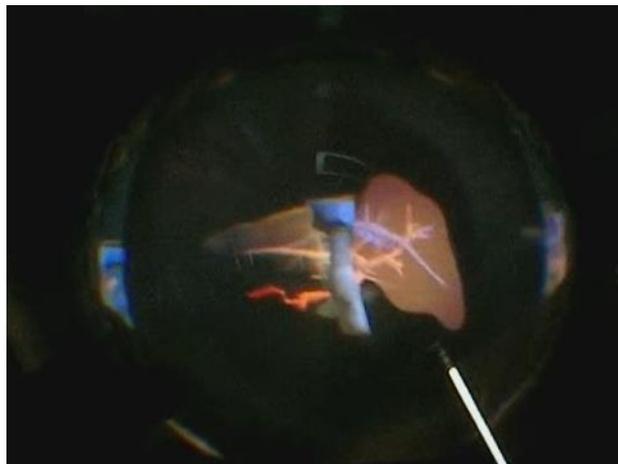


図 6.3.5. 内臓

## 6-4 まとめ

CIVI の実用性を検証するため、空中に浮かんでいる 3 次元映像を切断し、インタラクティブに 3D 像の断面を観察できるフローティングボリュームビューアを設計・製作した。多くのユーザにシステムを体験させ、ボリュームデータの直感的な理解の提供が可能なことを確認した。将来的には提案したシステムは博物館のインタラクティブな展示や CT データの可視化といった用途に使えると期待される。

## 7 結論

本論文では遠隔操作や遠隔手術、およびそれらの作業のトレーニングやシミュレーションでの利用を想定し、正確な奥行き情報の提示が可能で、かつ複数人で立体映像を同時に観察できる高画質な裸眼立体ディスプレイの開発を行った。具体的には、ボリューム表示方式と多視点表示方式を組み合わせた粗インテグラルボリューム表示方式について、光学歪みの補正、解像度の改善、画質の低下を抑えた装置の小型化などの課題に取り組み、いずれについても既存の問題を解決した。これにより、上述の目的を達する裸眼立体ディスプレイの実現が可能なることを、インタラクティブな作業環境のモデル(フローティングボリュームビューア)で確認した。

既存の3Dディスプレイには眼鏡式、視差バリア、レンチキュラといった3Dディスプレイが存在する。これらの3Dディスプレイはいずれも両眼に異なる映像を表示することで立体表示を実現しているが、この方法では両眼の輻輳角による奥行き知覚は変化するが、眼球の水晶体の焦点調節による奥行き知覚はディスプレイのスクリーン面に固定されるため、輻輳調節矛盾が発生する。この輻輳調節矛盾は正しい奥行き知覚の妨害や眼精疲労を引き起こす。エンターテインメントのような映像の表示位置が遠距離かつ受動的に映像を見る用途の場合、輻輳調節矛盾は大きな問題にならないが、遠隔操作や遠隔手術、作業シミュレーションといった能動的な作業を伴い、手元に映像を表示する必要がある用途の場合、この輻輳調節矛盾が作業の妨げになる。輻輳調節矛盾を解決する方法として、奥行き方向に映像を重ねることで奥行き知覚を実現するボリューム表示がある。しかし、オクルージョンや光沢面などの視点の位置に依存する映像表現ができないという問題が存在した。このように、既存の3Dディスプレイは遠隔操作や遠隔手術などの能動的作業を実施する視覚インターフェースとして十分な作業環境を提供するものではなかった。

輻輳調節矛盾を解決し、かつ視点の位置依存の映像を表示する裸眼立体ディスプレイ方式に、粗インテグラルボリューム表示(CIVI)がある。CIVIは観察者の位置に応じて異なる映像を同時に表示するだけでなく、ボリューム表示も併用するため、輻輳調節矛盾の問題を解決し、正確な奥行き情報を提示できる。しかしながら、CIVIにはレンズの収差により映像に歪みが生じてしまう問題、視野角や滑らかな運動視差と解像度がトレードオフの関係にあり解像度を上昇させにくい問題、液晶パネルの積層によるCIVIの映像に生じるモアレの問題、観察者の位置によっては手前の映像と奥の映像にずれが生じる問題があった。これらの問題を解決し、遠隔操作や遠隔手術、作業シミュレーション等に使用可能な裸眼立体ディスプレイを開発することが本研究の目的であった。

レンズの収差による映像の歪みの問題は、映像をレンズによる歪みとは逆方向に歪ませることで、歪みを打ち消しあうことで観察者に正しい映像を表示できるようにし解決した。さらにCIVIにてGPUメモリとメインメモリの通信量を減らし、GPUで演算す

ることで高速化を達成した。そして、提案したアルゴリズムを元にプログラムを作成し2つの実験を行い高速に歪みが補正できることを確認した。

CIVIの解像度を上昇させにくい問題は、光学中心が中央からずれた要素レンズで構成されたレンズアレイを使用し、要素レンズの大きさを固定したまま要素画像の大きさを拡大することで視点数を維持しつつ提示像の高解像度化を実現する手法により解決した。従来の要素レンズを使用した場合と偏心レンズを使用した場合を光学シミュレーションと実機製作により比較し、従来の要素レンズを使用した場合では、映像が歪んで視点の切り替わりが不連続になるが、偏心レンズを使用すると正しく表示できることを確認した。

液晶パネルの積層によるCIVIの映像に生じるモアレの問題は2種類の手法により解決した。一つ目の手法は多層化されたディスプレイパネルの前に焦点距離の短い凸レンズアレイの層を追加することである。二つ目の手法は手前のパネルの画素ピッチを固定したまま奥のパネルの画素ピッチを拡大することである。2つの方法をもとにしたプロトタイプを作成し、それらの手法の有効性を確かめた。

観察者の位置によっては手前の映像と奥の映像にずれが生じる問題は、ボリューム表示におけるステレオマッチング高速化のための非負・非正エッジフィルタを適用することで解決した。そして実際に有用性を確認するために、特定の条件下で発生する可能性のある最大のずれの幅を計算し観察者に提示される映像を作成した。数値的な評価により、手前の映像と奥の映像の隙間に生じていた黒い領域が提案手法により目立たなくなっていることを確認した。さらに、実機でも映像のずれが目立たなくなることを確認した。

CIVIの応用例として、自由な方向から物体の断面及び中身を観察できるフローティングボリュームビューアを開発した。これはCIVIの正しい奥行きかつ広視野角な映像を表示できるメリットを活かした例であり、このシステムに切断した断面の位置に応じて文字情報を表示する機能を付加すれば、医療や博物館で使用可能なボリュームデータ表示システムと使用できると考えている。

これらの改良により薄型で高画質な映像を表示可能なCIVIを実現した。表7.1は第1章で示した3Dディスプレイの特徴の表に本研究で改良された点を追加したものである。第2章でリアルタイム計算の実現、第3章で高解像度化の実現、第4章で薄型化した時の画質の低下の最大要因であるモアレ発生抑制、第5章で薄型化したディスプレイの輝度の低下を抑制する時に発生する映像のずれを抑制した。その結果、リアルタイム計算、高解像度、小型化の項目の性能が向上し、全ての項目で標準以上の性能を持つ立体ディスプレイを実現した。

6章で開発したディスプレイの解像度は $384 \times 384$ 、視野角は60度、視点数は10であり、解像度以外は序論で述べた目標スペックを満たしている。また、5章では液晶パネルのピッチを変更することでモアレを抑制しつつ、フィルタにより映像のずれも抑制

したディスプレイを開発した。この2つを組み合わせることで解像度以外は目標スペックを満たすディスプレイを開発できる。高解像度な映像を表示する場合、パネルの選択肢が少なくパネルのピッチの変更によるモアレの抑制は難しいが、レンズアレイを追加することでモアレを抑制する手法は適用できると考えている。また、解像度を目標スペックに到達させるために、ディスプレイパネルを変更する必要がある。しかし1枚の液晶パネルに要素画像を表示し、その要素画像を複数方向に表示する現状の構造では解像度に限界がある。この問題に対しては、スマートフォンに使用されるような高解像度かつ小型の液晶パネルを複数配置し、液晶パネル間の隙間が映像の表示に使用されないように偏心レンズを設計することでさらに高解像度化できると考えている。

表 7.1 本研究の貢献

	A: 運動視 差の提 示	B: 輻輳調 節矛盾 の解消	C: 遮蔽・光 沢の表 現	D: リアル タイム 計算	E: 高解像 度(画素 数大)	F: 装置の 小型化	実現方法の具体例
2眼式 立体眼鏡	△ 1人限定	×	◎	◎	◎	◎	アナグリフ, 偏光式, 液晶シャッタ式
2眼・多眼式 裸眼立体	△ 狭い	×	◎	◎	◎	◎	視差バリア, レンチキ ュラ, インテグラル, マルチプロジェクタ
ボリューム 表示	○	○	×	○	○	△	可変焦点光学系, 移 動・回転式ディスプレ イ, 多層スクリーン
超多眼・ 高密度 指向性	△ 横のみ	○	○	△	△	◎	バララックスバリア, レンチキュラ, マルチプロジェクタ
電子 ホログラム	◎	○	◎	△	×	△	プロジェクタ用光変調 素子の利用
ボリューム 多視点混合	○	○	○	△→○	△→○	△→○	C I V I

◎ 他手法より優れている

○ 標準的に実現できる

△ 不完全だが実現できる

× 実現できていない

本論文で CIVI に表示したコンテンツは全てコンピューターグラフィックスの映像であった。しかしながら、遠隔操作への実用につなげるには、実写映像へ対応していく必要がある。CIVI で実写映像を提示するためには、複数のカメラで多視点映像を撮影するだけでなく、ボリューム表示を実現するために全ての画素の奥行き値を取得する必要がある。それを実現する方法は、ステレオマッチングなどの既存の技術の利用も考えられるが、遠隔操作ではリアルタイムで映像を生成する必要があるため、奥行き情報の復元の高速化が課題となる。一方、最近はやさしいデプスカメラが市販されるようになっており、複数のデプスカメラを使った撮影による多視点ボリューム映像の取得も可能であると考えられる。

遠隔操作による複雑な作業の実現への需要は、今後ますます増えていくものと考えられる。医療分野においては、医療の地域格差が問題となっているが、高度遠隔医療が実現・普及すれば、医療格差を埋めることも可能になるであろう。また、エボラ出血熱のような感染症の治療にあたる医療スタッフの感染リスクを減らすことも可能である。医療分野以外にも、原子力発電所における作業員の被曝リスクの低減などにも遠隔操作の普及は貢献することが期待される。

## 謝辞

指導教員である掛谷先生には研究の進め方、論文の書き方、プレゼンテーションの仕方等をご指導頂き大変お世話になりました。研究だけでなく、政治を中心とした様々な知識について教えていただき考え方が広がりました。研究室に配属されてから学生でない期間を含めて充実した5年間を送る事が出来ました。本当にありがとうございました。

亀田先生、丸山先生、北原先生、矢野先生にはお忙しい中、論文の審査をしていただき感謝を申し上げます。

視覚メディア研究室のメンバーには、研究に対する意見から様々な雑談等、色々な面に関わっていただき非常に感謝しております。先輩も後輩も優秀で個性的な人が多く、今まで全く知らなかった視点から話をしていただき様々なことを学びました。

株式会社東芝 研究開発センター マルチメディアラボラトリーの方々には、既に社会人の身分ながら大学に通うということに理解をしていただき、柔軟に対応してくれたことを感謝しております。

図画団、AmusementCreators、情報学類誌 WORD、Twitter でお世話になった方々には、研究室配属後、工学システム学類の同期と話す機会が減り人間関係が狭くなる中、研究とは一切関係ない人間関係として様々な面に関わることができ、精神的に助かりました。

最後に、これまでの学生生活を支え続けてくれた両親に心からの感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

## 参考文献

- [1] 江本正喜, 矢野澄男, ”立体画像観視における両眼の輻輳と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係” 映像情報メディア学会誌, Vol.56, No.11, pp.1803-1812 (2001)
- [2] 恵比須博充, 木村哲也, 掛谷英紀, ”ボリューム表示と多視点表示を組み合わせた 3次元ディスプレイ” 3次元画像コンファレンス'07 講演論文集, pp.180-183 (2007)
- [3] 大越孝敬, ”三次元画像工学” 朝倉書店 (1991)
- [4] S. Ishizuka and H. Kakeya, ”Flat panel autostereoscopic display with wide viewing zone using time-division multiplexing backlight, ” SID 13 Digest, pp. 1173-1176 (2013)
- [5] 岩中由紀, 三田雄志, 馬場雅裕, ”3D ディスプレイのクロストーク低減技術” 東芝レビュー, Vol.67, No.6, pp.32-35 (2012)
- [6] H. Jorke and M. Fritz, ”Infitec – a new stereoscopic visualization tool by wavelength multiplex imaging, ” Journal of Three Dimensional Images 19 (3), pp. 50–56 (2005)
- [7] H. Jorke, A. Simon and M. Fritz, ”Advanced stereo projection using interference filters,” Journal of the Society for Information Display 17(5), pp. 407–410 (2009)
- [8] 高木亜矢子, 最首達夫, 柏木正子, 平山雄三, ”部分切替可能な裸眼 2D/3D 切替ディスプレイの開発” 映像情報メディア学会技術報告 34(30), pp. 5-8 (2010)
- [9] A. Sullivan, ”DepthCube solid state 3D volumetric display, ” Proc. SPIE 5291, 279-284 (2004)
- [10] 高田英明, 陶山史郎, 大塚作一, 上平員丈, 酒井重信, ”新方式メガネなし 3次元ディスプレイ” 3次元画像コンファレンス 2000 講演論文集 (2000)
- [11] Lanny Smoot, Quinn Smithwick, and Daniel Reetz, ”Volumetric Display Based on Vibrating Mylar Beam Splitter and LED Backlit LCD, ” SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies (2011)
- [12] A. C. Traub, ”Stereoscopic Display Using Rapid Varifocal Mirror Oscillations, ” Appl. Opt., 6, pp. 1085-1087(1967)
- [13] S.Suyama, M.date and H.Takada, ”Three-dimensional Display System with Dual-Frequency Liquid-Crystal Varifocal Lens, ” Jan.J.Appl.Phys.,39, pp.480-484(2000)
- [14] 梶木善裕, 吉川浩, 本田捷夫, ”集束化光源列(FLA)による超多眼立体ディスプレイ” 3次元画像コンファレンス'96 講演論文集, pp.108-113(1996)
- [15] 篠崎陽平, 名郷日陽, 高木康博, ”256 視点超多眼立体ディスプレイの表示性能の改善” 映像情報メディア学会技術報告 34(43), pp. 25-28 (2010)
- [16] 中村淳也, 高木康博, ”水平視差型超多眼ディスプレイに対する調節応答と網膜像

- 評価” 映像情報メディア学会技術報告 37(24), pp. 9-12 (2013)
- [17] 高木康博, ”64 眼式三次元カラーディスプレイとコンピューター合成した三次元物体の表示” 3 次元画像コンファレンス 2002 講演論文集, pp.85-88(2002)
- [18] 渡部正行, 名手久貴, 高木康博, ” 高密度指向性 3 次元表示による運動視差が物体の奥行き知覚に与える効果” 映像情報メディア学会誌 60(12), pp. 1956-1963 (2006)
- [19] 山本健詞, 三科智之, 妹尾孝憲, 大井隆太郎, 栗田泰市郎, ” 4 K 映像システムを用いた電子ホログラフィシステム” 情報通信研究機構季報 56(1・2), pp.9-18 (2010)
- [20] 菊池宏, ”ホログラフィー基盤技術の研究概要” N H K 技研 R&D No.138, pp.8-21 (2013)
- [21] 池田恭平, 中村淳也, 高木康博, ” 4k2k-SLM を用いたホログラム表示モジュールの開発” 映像情報メディア学会技術報告 36(12), pp. 33-36 (2012)
- [22] 上倉孝博, 高木康博, ” リアルタイム化を目指した 2 眼多眼変換へのブロック品質評価の導入” 映像情報メディア学会技術報告 36(43), pp. 39-42 (2012)
- [23] A. Shiraki, N. Takada, M. Niwa, Y. Ichihashi, T. Shimobaba, N. Masuda, T. Ito, ”Simplified Electroholographic Color Reconstruction System Using Graphics Processing Unit and Liquid Crystal Display Projector,” Optics Express 17(18), pp. 16038-16045 (2009)
- [24] H. Kakeya, ”Coarse integral imaging and its applications,” Proc. SPIE 6803, 680317 (2008)
- [25] H. Kakeya, ”Improving Image Quality of Coarse Integral Volumetric Display,” Proc. SPIE 7237, 723726 (2009)
- [26] H. Kakeya, T. Kurokawa, and Y. Mano, ”Electronic Realization of Coarse Integral Volumetric Imaging with Wide Viewing Angle,” Proc. SPIE 7524, 752411 (2010)
- [27] Y. Ueda and H. Kakeya, ”Multilayered integral imaging with improved image clarity,” SID Int. Symp. Digest Tech. Papers 42(1), 1116-1119 (2011)
- [28] 植田侑樹男, 掛谷英紀, ”長焦点フライアイレンズによる多視点立体像の平滑化” 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集 No.10-1 (2011)
- [29] H. Kakeya, ”Realization of undistorted volumetric multiview image with multilayered integral imaging,” Optics Express 19 (21), 20395-20404 (2011)
- [30] <http://www.diginfo.tv/v/11-0207-r-en.php>
- [31] 間野裕一郎, 王琪, 松田健, 掛谷英紀, ”ボリューム・多視点混合式立体表示法の実験的評価” 3 次元画像コンファレンス 2009 講演論文集, pp.97-100(2009)
- [32] 黒川智也, 王琪, 掛谷英紀, ”立体映像提示法の違いによる奥行き知覚精度の比較評価” 3 次元画像コンファレンス 2010 講演論文集, pp59-62(2010)
- [33] 産業技術総合研究所 日本人頭部寸法データベース 2001

- [34] H. Deng, Q. Wang, D. Li, and F. Wang, "An Integral Imaging Display With Wide Viewing Angle," *SID' 11 Digest of Technical Papers*, 42, 1095-1097 (2011)
- [35] J. Jang, and B. Javidi, "Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperture sizes," *Optics Letters*, 28 (20), pp. 1924-1926 (2003)
- [36] L. Bogaert, Y. Meuret, S. Roelandt, A. Avci, H. Smet, and H. Thienpont, "Demonstration of a multiview projection display using decentered microlens arrays," *Optics Express*, 18 (25), pp. 26092-26106 (2010)
- [37] H. Kakeya, S. Sawada, Y. Ueda, and T. Kurokawa, "Integral volumetric imaging with dual layer fly-eye lenses," *Opt. Express*, 20(3), 1963-1968, (2012)
- [38] H. Kakeya and Y. Ishii, "Real-time image pickup system for multiview volumetric 3D display using RGB-D camera," to appear in *Proc. 3DSA* (2013)
- [39] R. Yasui, I. Matsuda, and H. Kakeya, "Combining volumetric edge display and multiview display for expression of natural 3D images," *Proc. SPIE 6055*, 60550Y (2006)
- [40] H. Ebisu, T. Kimura, and H. Kakeya, "Realization of electronic 3D display combining multiview and volumetric solutions," *Proc. SPIE 6490*, 64900Y (2007)
- [41] R. Collins, "A space-sweep approach to true multi-image matching," *Proc. CVPR*, 358-363 (1996)
- [42] R. Yang and M. Pollefeys, "Multi-resolution real-time stereo on commodity graphics hardware," *Proc. CVPR*, I.211-217 (2003)
- [43] D. Gallup, J.-M. Frahm, P. Mordohai, Q. Yang, and M. Pollefeys., "Real-time plane-sweeping stereo with multiple sweeping directions," *Proc. CVPR*, 0:1?8 (2007)
- [44] <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2001/>
- [45] A. Cassinelli and M. Ishikawa, "Volume slicing display," *SIGGRAPH ASIA 2009 Emerging Technologies* (2009)
- [46] T. Nagayama and J. Oishi, "Deskram," *SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies* (2006)

## 著者文献

S. Sawada, Y. Ueda, and H. Kakeya, "Reduction of moiré for coarse integral volumetric imaging," *Applied Optics*, Vol. 53, Issue 27, pp. 6268-6273 (2014)

S. Sawada and H. Kakeya, "Integral volumetric imaging using decentered elemental lenses," *Optics Express*, Vol. 20, Issue 23, pp. 25902-25913 (2012)

S. Sawada and H. Kakeya, "Coarse Integral Volumetric Imaging with Flat Screen and Wide Viewing Angle," *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 21, Issue 1, pp. 011004.1-7 (2012)

H. Kakeya, S. Sawada, Y. Ueda, and T. Kurokawa, "Integral volumetric imaging with dual layer fly-eye lenses," *Optics Express*, Vol. 20, Issue 3, pp. 1963-1968 (2012)

S. Sawada and H. Kakeya, "Integral volumetric imaging with high resolution and smooth motion parallax," *SPIE Proceedings Volume 8288*, pp. 82881R1-10 (2012)

S. Sawada and H. Kakeya, "Fast Rendering of Integral Volumetric Imaging Using," *Proc. of 3DSA 2012*, pp. 110-113 (2012)

H. Kakeya and S. Sawada, "Realization of precise depth perception with coarse integral volumetric imaging," *SPIE Proceedings Volume 8043*, pp. 80430B1-10 (2012)