

愛知工業大学大学院経営情報科学研究科

博士論文

実物体との空間的整合性を考慮した  
空中立体映像に対するインタラクション  
Interaction between Physical  
Objects and Stereoscopic Mid-air  
Images Considering Spatial  
Consistent

2025年3月

B22802 高崎 真由美

TAKAZAKI Mayumi

指導教授 水野 慎士 教授

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>4</b>
<b>第 2 章</b>	<b>関連研究</b>	<b>7</b>
2.1	空中像の投影方法	7
2.2	空中立体映像	8
2.3	インタラクション	8
2.4	空中像と影表現	9
2.5	オクルージョン	9
2.6	関連研究に対する本研究の位置付け	10
<b>第 3 章</b>	<b>MMAP を用いた空中立体映像の表示、インタラクション、および正しいオクルージョンの実現手法</b>	<b>11</b>
3.1	概要	11
3.2	MMAP を用いた空中立体映像の表示とインタラクションの実現	11
3.2.1	システム構成と概要	11
3.2.2	MMAP を用いた空中への映像表示	11
3.2.3	空中映像に対する運動視差立体視の適用による空中立体映像の実現	12
3.2.4	空中立体映像とのインタラクション	13
3.3	MMAP による空中立体映像と実物体との正しいオクルージョンの実現	14
3.3.1	方針	14
3.3.2	拡張手法の実現法	14
3.3.2.1	システム構成	14
3.3.2.2	空中 CG 物体と実物体との正しいオクルージョンの把握	15
3.3.2.3	投影用映像の生成と投影	15
3.4	問題点	16
<b>第 4 章</b>	<b>空中立体映像の表示とインタラクションにおける空間整合性の向上</b>	<b>19</b>
4.1	概要	19
4.2	素材感の表現	19
4.2.1	半透明オクルージョン	19
4.3	実環境のインタラクティブな反映	21
4.3.1	実物体間との影の生成	21
4.3.2	実環境の映り込み	22
4.4	複雑な変形・生成インタラクション	22
4.4.1	コップ内の流体表現	22
4.4.2	断面の表現	23
4.4.3	実空間のインクでの色塗り	24

<b>第5章 実験</b>	<b>29</b>
5.1 概要 . . . . .	29
5.2 実装環境 . . . . .	29
5.3 半透明オクルージョン . . . . .	29
5.4 実物体間との影の生成 . . . . .	30
5.5 実環境の映り込み . . . . .	30
5.6 コップ内の流体表現 . . . . .	31
5.7 断面の表現 . . . . .	31
5.8 実空間のインクでの色塗り . . . . .	31
<b>第6章 考察</b>	<b>43</b>
6.1 半透明オクルージョン . . . . .	43
6.2 実物体間との影の生成 . . . . .	44
6.3 実環境の映り込み . . . . .	44
6.4 コップ内の流体表現 . . . . .	44
6.5 断面の表現 . . . . .	44
6.6 実空間のインクでの色塗り . . . . .	44
6.7 全体の考察と今後の展開 . . . . .	45
<b>第7章 まとめ</b>	<b>46</b>
謝辞	47
参考文献	48

# 目次

1.1	MMAP を用いた空中像	5
1.2	平面的な空中像	5
1.3	空中 CG 物体への手での直接的インタラクション時に生じるオクルージョン矛盾の例	6
3.1	提案システム	12
3.2	運動視差	13
3.3	オクルージョン矛盾を解消するための拡張手法の方針	14
3.4	拡張システム	15
3.5	オクルージョン把握と投影用映像生成の模式図	16
3.6	空中 CG 物体と実物体とのオクルージョンの把握	17
3.7	オクルージョン矛盾を解消する投影映像の生成	18
4.1	投影映像の輝度値を変化させる手法の模式図. 左：横から見た場合. 右：上から見た場合	20
4.2	ボクセルを用いた投影映像のレンダリングにおける輝度値の変化	21
4.3	半透明実物体における物体の厚みによる色濃度の変化の様子	25
4.4	空中 CG 物体と手との相互の影の生成の模式図	26
4.5	使用したコップ	26
4.6	コップの三次元的な位置の取得のための処理手順	27
4.7	断面表現の概要	28
5.1	空中半透明 CG 物体における物体の厚みによる色濃度の変化の様子	32
5.2	円柱の空中 CG 物体でのオクルージョンを補完する投影映像の色濃度変化	33
5.3	様々な色と形状の空中 CG 物体でのオクルージョンを補完する映像の色濃度変化	34
5.4	空中 CG 物体と手との相互の影の生成	35
5.5	手による空中 CG 物体のつまみ上げ操作における影の生成	36
5.6	空中 CG 物体の描画操作における影の生成	36
5.7	環境マッピングによる空中 CG 物体への周囲環境の映り込み	37
5.8	空中 CG 物体へのスポットライトの照射	37
5.9	コップの位置に空中立体映像の流体を表示した様子	38
5.10	上方から流体が注ぎ込まれている様子	38
5.11	実物体の移動に応じて流体が揺れている様子	39
5.12	平板による空中立体映像とのインタラクション	40
5.13	空中立体映像に対する描画	41
5.14	空中立体映像に対する描画と変形	42

## 第1章 はじめに

近年、ディスプレイ技術が進歩し、VRやARなどHMD等を用いたコンテンツが開発されている。これらのコンテンツでは、実空間とは違う空間で自由に行動したり、実空間上に情報を重畳して空間を拡張し、CG物体が実空間上に存在するように観察したりインタラクションするなど、より直感的に操作可能で没入感の高い新しい体験を提供している。しかし、HMDを用いた手法では、画面酔いや機器の装着による煩わしさが課題となる。

このような中、情報の重畳による実空間の拡張について焦点を当て、理想的なシステムについて考える。実現に必要な要素として、裸眼による観察、立体視、手などによる直接的なインタラクションが挙げられる。ユーザが特別な装置を装着することなく、実物体と同様な3次元物体として観察しつつ、実物体に触れるように操作可能であることが望ましい。このような映像表現を実現するため、空中像に着目した。空中像とは、何もない空間中に浮いているように映し出された映像のことである。空中像は、裸眼で観察できる。また、直接手で触れられるものも多く、直感的なインタラクションの実現が期待できる。

本研究の目的は、立体物が現実空間に存在するように空中像として表示することができる手法を開発することである。これを実現するには、空中像を立体的に表示することが必要になる。また、空中像が実物体との間に空間整合性を持つことも求められる。具体的には、空中像に対して手などで操作を行ったときには、実物体に対して空中像がリアルタイムで適切に変化するインタラクションが必要になる。また、実物体との正しいオクルージョン、実環境や実物体のインタラクティブな反映、空中像の素材感の表現なども必要となる。本研究では、空中像で表示した立体物が現実空間に存在するように観察するために必要な要素として実物体との空間整合性に着目して、これらを実現するための手法を開発する。

空中像を実現する手法として、ミスト [1] [2]、レーザー [3]、ハーフミラー [55]、AIRR [4] がある。しかし、ミストやAIRRを用いる方法では映像の解像度が低いという課題がある。また、レーザーを用いる方法では映像が小さく、ハーフミラーを用いる方法では像がハーフミラーの奥に結像するため、手で直接触れるなどのインタラクションは実現が困難である。

そこで、本研究ではマイクロミラーアレイプレート (MMAP) を用いた空中像に着目した。MMAPは直交する2つのミラーアレイで構成され、面对称の位置に像を結像するという性質を持つ (図 1.1)。MMAPを用いた空中像は、裸眼で観察でき、手で直接触れられる。また、高解像度で表示でき、大型化も可能である。このようなことから、実在感のある映像表現の実現が期待できる。

しかし、MMAPを用いて現実空間に存在するような立体的な空中像を表示するにはいくつかの課題がある。まず、MMAPによる空中像ではディスプレイに表示した映像を空中に結像させることが一般的である。通常のディスプレイ映像は平面的であるため、その映像を空中に結像した空中像も図 1.2 に示すように平面的となる。また、映像と実物体の実際の位置関係にかかわらず、映像は常に実物体によって遮蔽されるため、図 1.3 に示すようにインタラクション中にオクルージョン矛盾が発生して、違和感を生じさせる原因となる。

そこで本研究の先行研究である修士研究では、空中像の課題として平面的であることとオクルージョン矛盾が生じることに焦点を当て、これらを解決する手法の開発を行った。平面的である空中像を立体的に表示させるために、空中像に運動視差立体視を適用する手法を開発した。オクルージョン矛盾を解決するために、プロジェクタで実物体に映像を投影することで空中像での実物体の遮蔽を擬似的に実現した。加えて、手の操作による変形や生成などのインタラクションを実現する手法の開発も行った。これらによ

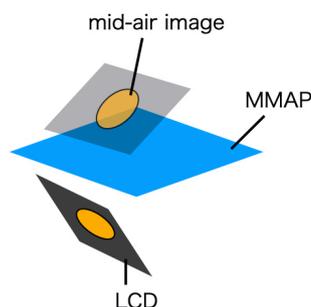
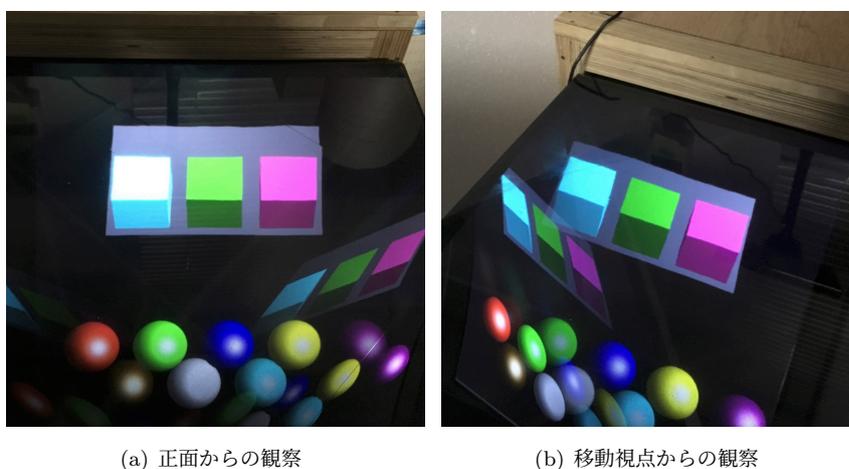


図 1.1: MMAP を用いた空中像



(a) 正面からの観察

(b) 移動視点からの観察

図 1.2: 平面的な空中像

り，現実空間に存在するような立体的な空中像を実現する基盤はある程度実現できた。

本研究では先行研究で開発した手法を基盤として用いて，実物体との空間整合性の再現度をさらに高めながら立体的な空中像を表示したりインタラクションを行うことができる手法の開発を行う。この中では，空中像が現実空間に存在する場合と同様に実物体や実環境と相互に干渉することを実現する。具体的には，空中像を手や実物体で触れた場合に，実物体の形状に応じて空中像が変形したり，空中像を実空間の色で着色することなどを実現する。また，空中像と実物体との相互間で影を発生させたり，現実空間の照明条件が空中像に反映されたりすることを実現する。さらに，オクルージョンの再現を拡張することで，空中像として表示している物体の素材感を再現したり，実物体で切断して断面を表示させることなどを実現する。

本論文は7章で構成されている。以降，第2章では，本研究と同様に空中像の表示やインタラクションを取り扱っている関連研究について述べる。第3章では，本研究のベースとなる MMAP を用いた空中立体映像の実現手法およびオクルージョン矛盾を解決する手法について述べる。第4章では，前章で述べた手法で実現した空中立体映像の空間整合性をより高めるために本研究で提案する手法として，素材感の表現，実環境の反映，複雑な変形と生成のインタラクションについて述べる。第5章では，提案手法の実装環境と実験結果について述べる。第6章では，実験結果に基づく提案手法に対する考察について述べる。最後に第7章では，本研究全体のまとめについて述べる。

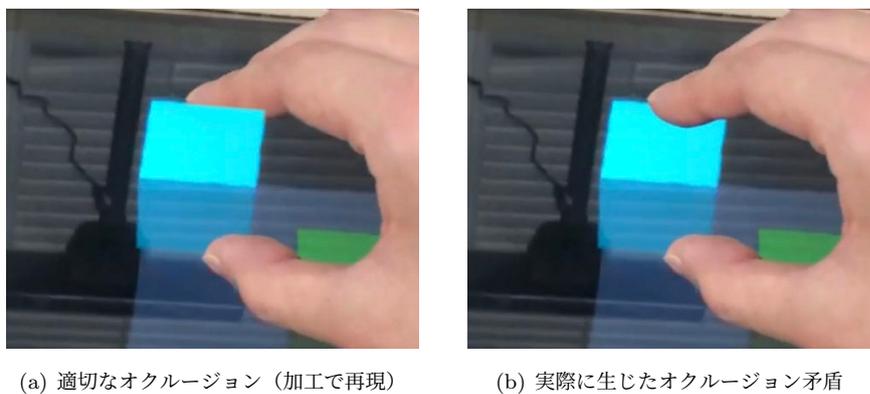


図 1.3: 空中 CG 物体への手での直接的インタラクション時に生じるオクルージョン矛盾の例

## 第2章 関連研究

### 2.1 空中像の投影方法

空中像の投影方法について提案している研究について述べる。

Koizumi は、太陽光のもとでも観察可能な空中像を提案している [5]。これは、空中像の表示に太陽光を利用しており、明るい場所で空中像を表示する際に問題となる電力消費量を低減している。Sano らは、光源を頭上に設置することでユーザからシステムを視認できないようにしつつ、ユーザ正面に空中像を表示可能な光学系を提案している [6]。建築物の壁を反射材として利用して景観を損ねず空中像を表示している。Koizumi らは、光沢面上に置いて空中像を直立に表示できる光学系を提案している [7]。小型のシステムであるため、持ち運びが容易である。Osato らは、奥行き方向に移動可能な空中像で、光学システムのサイズを小さくする手法を提案している [8]。ミラーとディスプレイをそれぞれ回転させることで、奥行き方向への移動を実現しながら装置のサイズを縮小している。星らは、テーブル上のタッチパネル上に直立する空中像を提案している [9]。偏光特性を利用して迷光を抑えつつ輝度効率を向上させ、鏡を組み込んで水平方向の視野角を改善している。また、タッチパネル上に空中像と連動した背景を表示できる。森らは、椅子の背もたれ部分に光学システムを組み込み、顔の周りに漫符を表示できるシステムを提案している [10]。対面コミュニケーションにおいて感情表現を豊かにすることを目的としており、空中像を用いることで顔と漫符の間に空間的な分断がなく、話者との一体感が生まれる可能性を示唆している。山本らは、テーブル面に直立する空中像を提案している [11]。テーブル面にハーフミラーを設置することで、光学系をユーザに意識させない空中像を実現している。平井らは、光学的整合性を考慮した空中像システムを提案している [12]。カメラで取得した画像から全天球画像を推定し、イメージベーストライティングを用いたレンダリングで実現している。福岡らは、実空間上で操作可能な照明に一致した照明環境で空中像を表示可能なシステムを提案している [13]。動的な照明が2次元空中像の立体感をより強く感じさせることを報告している。室井らは、アクリルを積層した積層型光学プリズムによる空中像を提案している [14]。アクリル板の持つ性質を利用して、プリズム下部のディスプレイの映像をプリズム内部に表示している。Kim らは、裸眼で観察可能な空間的に一貫したディスプレイを提案している [15]。あらゆる視点から観察可能で、ジェスチャーで表示する情報を変えられる。滝山らは、AIRR を用いた空中像の解像度を向上させる手法を提案している [16]。レンズを用いることで解像度低下の原因である回折・光線シフトを解消する。永野らは、色振動により情報を埋め込んだ映像を空中像として映し出す手法を提案している [17]。表示した空中像から実際に色振動情報の受信が可能であることを確認している。Takenawa らは、空中両面ディスプレイを4人に表示可能な空中像を提案している [18]。視野制御フィルムと偏光フィルムを使用して迷光を低減している。Sano らは、特定の反射面で、反射面上に直立する空中像と実測値に基づいた反射像を表示するシステムを提案している [19]。実際の反射率に基づいて反射像を表示できる。

空中像を実空間に表示するだけでなく、別の空間への移動を可能にする手法が提案されている。空中像の実在感を向上させつつ、空中像ならではの表現を可能にしている手法について述べる。

Makiguchi らは、鏡像空間と実空間をシームレスに移動する空中像を提案している [20]。ディスプレイの位置移動と表示面の向きを変えることで、2つの空間を移動する。また、4~5人で同時に観察できるよう改善し、かつ空中像の影や反射が表現できるシステムも提案している [21]。明石らは、実空間を動き回り鏡に映り込む空中像と、鏡に吸い込まれる空中像の2つの光学系を提案している [22]。光源として1つの両面ディスプレイのみを用いており、鏡面共役な位置関係を保った移動を実現している。野口らは、

実像と鏡像で違う映像を表示できるシステムを提案している [23]. 実像のみカラーで表示する手法と、モノトーンに限定されるが、実像と鏡像で異なる映像を表示する手法の2つを提案している。

しかし、これらの空中像は平面的で、インタラクションについても考慮されていないか、限定的である。

## 2.2 空中立体映像

空中像は表示するだけでは従来ディスプレイと同様に平面的な映像となる。空中像に立体感を付与する手法について提案する研究について述べる。

室伏らは、ピンアレイにプロジェクターで映像を投影することで、変形可能な光源による空中立体像を提案している [24]. 3つのピンアレイと対照ミラー構造を組み合わせることで、正面だけでなく、側面の形状表現も可能にしている。また、回転するミラーに映像を投影し、両眼視差再現による空中立体映像も提案している [25]. 柴田らは、逆ピラミッド型にしたハーフミラーを回転させモニター映像を連動させることで、空中立体映像を実現している [26]. 輝度低下を抑えるため、視野制御フィルムを用いず、DLP方式のプロジェクタを使用している。吉田は、テーブル型の立体視映像システムを提案している [27]. 錐体形状のスクリーンと複数のプロジェクタを組み合わせ、複数人で観察可能な両眼立体視を実現している。Shiinaらは、光源と液晶素子を分離し、光源にレンズアレイを設置することで指向性ディスプレイを作成し、両眼立体視を実現する手法を提案している [28]. 透明な湾曲した反射板に映像を反射させることで、あらゆる角度から内側に立体空中像が観察可能で、レイトレーシングで屈折を計算して解消している。杉本らは、ミストスクリーンを用いた空中像を提案している [29]. ミストによって投影された映像に立体感が生じる。また、光線を可視化する手法も提案している [30]. Uedaらは、3人まで同時観察可能な立体視システムを提案している [31]. LCD, アクティブシャッター, フレネルレンズの組み合わせを3つ用いることで実現している。Niiらは、裸眼で観察可能な立体視かつ、実物体との位置関係に一貫性を持たせたシステムを提案している [32]. ユーザの頭部位置を追跡し、フレネルレンズと液晶シャッターを用いて両眼立体視差を再現している。Makiらは、インテグラルフォトグラフィを用いた立体視ディスプレイを提案している [33]. MMAPを用いた空中像では奥行きが反転するため、予め深度を反転させて表示することで裸眼立体視を実現している。

しかし、これらの空中像はインタラクションについて考慮されていないか、限定的である。

## 2.3 インタラクション

空中像は、手で直接触れられるなど、直感的なインタラクション性に優れている。空中像とインタラクションする手法についての研究について述べる。

Tsuchiyaらは、空中像キャラクターの視点からユーザを認識できるシステムを提案している [34]. 空中像正面のユーザに対して、空中像キャラクターを操作していないいないばあができる。水田らは、空中像に表示されるCGアバターとして実空間を移動するシステムを提案している [35]. 空中像は視域が狭いため、CGアバターの視域を提示することで、空中像付近にいる人がアバターを視認できる位置に移動できる。Hoshiらは、空中像による飛び出す絵本を提案している [36]. 光沢のある紙を使用した絵本を反射材として利用している。Fukuokaらは、空中像として表示されたキャラクターを操作する手法を提案している [37]. 人形の動きと操作者の動きを組み合わせることで、自由度の高い身体動作の表現を実現している。柏木らは、指さし入力を行うことで、空中像の欠如を防ぐ入力手法の提案を行なっている [38]. 指さしと決められたトリガー動作による入力を実装している。中村らは、同様の目的で、音とアニメーションによって空中像の欠如が発生する前に入力を完了させる手法を提案している [39]. 小湊らは、2次元映像を表示した際の空中像の立体感の計測を行なっている [40]. 空中像に触れる際、本来の結像位置よりも奥に指を持っていく傾向が多く見られるため、ユーザが知覚する空中像の結像位置と立体感

を明確にする目的がある。Makinoらは、隣接する3次元環境を光学的・物理的に相互にコピーするシステムを提案している [41]。デバイスの装着は不要で、人も物も移動できる。Kajitaらは、実物体に追従して移動する空中像を提案している [42]。光源を搭載した台に実物体を置き、同時に動かすことで実現している。菅原らは、移動完了のフィードバックを待たずに速度を更新することで、実物体の動きに高速で追従するシステムを提案している [43]。Matsuuraらは、空中像をすくい上げられるシステムを提案している [44]。水槽の水を手ですくうと、その動きに追従して空中像が移動する。安藤らは、AIRR. MMAPを用いた空中カメラで、正常に撮影可能な範囲の調査を行なっている [45]。GANで生成した顔画像を撮影し、顔検出できる割合での評価を報告している。Andoらは、ホットミラーを用いることで、ユーザからセンサーが見えないようにしたシステムを提案している [46]。また、実物体の形状に応じたインタラクションも提案している [47]。Kiuchiらは、透明実物体内に歪みのない空中像を表示可能なシステムを提案している [48]。パストレーシングを用いて歪みを補完した映像を生成することで、屈折を打ち消している。Ohshimaらは、空中像で炎を表現し、安全に実験を行うことができるシステムを提案している [49]。ユーザは実際にガスバーナーを操作するように体験できる。余合らは、テーブル上に表示された空中像と実物体を介してインタラクションできるシステムを提案している [50]。Kimらは、ブロック状の実物体を介して空中像とインタラクションする手法を提案している [51]。

星らは、提案しているタッチパネル上に直立する空中像において、直接空中像に触れるのではなく、タッチパネルを介した間接的なインタラクションを提案している [9]。空中像を照らす照明位置を変更したり、空中像を回転させたりでき、空中像の観察を楽しめるようになっている。

## 2.4 空中像と影表現

空中像の実在感を向上させる上で、空中像の影を表現することは重要な要素である。空中像の影を表現する手法を提案する研究について述べる。

Yanoらは、空中像の知覚において、影の長さによる奥行き知覚の変化と、地面の変化による速度知覚について調査している [52]。福地らは、AIRRを用いた空中立体映像提示と空中像に手の影を落とすインタラクションを提案している [53]。LeapMotionで指先位置を追跡し、仮想手指を配置することで影を表現している。

## 2.5 オクルージョン

映像の多様な表現や空間的な一貫性を持たせる上でオクルージョンは重要な要素である。オクルージョン表現に着目した研究について述べる。

梶田らは、2つの2次元空中像を重ねて表示する際に生じるオクルージョン問題を解決する手法を提案している [54]。マスク用の液晶シャッターを組み合わせることで、前後の空中像が重なって見えてしまう問題を解消している。巻口らは、空中像同士の重なり表現において、空中像同士の奥行き間隔を任意に設計できるシステムを提案している [55]。また、正面・背面から観察可能な背景2層、被写体1層の空中像システムを提案している [56]。村瀬らは、ハーフミラー前後の実空間と仮想空間を光学的・3次元的に融合するシステムを提案している [57]。オクルージョン問題を照明プロジェクタで解決し、時分割方式の立体視映像を実現している。ただし、予め形状と位置が計測された実環境のみを対象としている。Kurzらは、テーブルトップ上に表示された映像について、オクルージョンを適切に表示できるシステムを提案している [58]。しかし、実物体の形状は既知である必要がある。

## 2.6 関連研究に対する本研究の位置付け

立体空中映像に対するインタラクション自体はいくつか提案されているが、適切なオクルージョンが担保されたインタラクション手法は提案されていない。また、形状が既知でない実物体を用いたオクルージョン矛盾解消手法も実現されていない。加えて、空中像の素材感表現や複雑な変形・生成インタラクションは提案されておらず、実空間のインタラクティブな反映も限定的である。

本研究では、実空間上に存在するような空中立体映像表示と実物体によるインタラクションを提案する。この提案システムでは、適切なオクルージョン下で立体空中映像とインタラクションでき、実物体の形状が既知である必要はない。また、透明度などの立体空中映像の素材感を表現する手法や、空中像だけでなく実物体の影を考慮した表現・周囲環境の反映、流体表現や断面の表現、実空間のインクでの色塗りなど複雑な変形・生成インタラクションを実現する手法を提案する。

## 第3章 MMAPを用いた空中立体映像の表示, インタラクション, および正しいオクルージョンの実現手法

### 3.1 概要

本章では研究全体の基盤となる MMAP を用いた空中立体映像の表示とインタラクションの実現手法, および空中立体映像と実物体との正しいオクルージョンの実現手法について述べる.

まず, 空中立体映像の表示は MMAP を用いて空中に表示した平面的な映像に運動視差を適用することで実現している. また, 手の三次元的な位置を取得することで空中立体映像との直接的なインタラクションも実現している. 本章では, 実現のためのシステム構成や具体的な手法について述べる.

MMAP を用いた空中映像は, 手などの実物体によってその前後関係に関わらず原理的に遮蔽される. そのため, MMAP によって表示した空中立体映像と実物体との間でオクルージョン矛盾が発生することがある. 本章では, オクルージョン矛盾を解消するためにプロジェクションマッピングを適用した手法について述べる.

### 3.2 MMAPを用いた空中立体映像の表示とインタラクションの実現

#### 3.2.1 システム構成と概要

本研究のシステムの外観と構成を図 3.1 に示す. システムは MMAP, 液晶ディスプレイ, Kinect, Leap Motion, 制御用 PC で構成されている. MMAP はボックス上に設置されており, ボックス内に液晶ディスプレイが設置されている. ユーザはシステムのボックス前に立って一人で使用する.

三次元 CG 物体は MMAP 上の空中に表示される. このとき, ユーザの視点位置に応じて三次元 CG の見え方を適切に変化させることで運動視差を再現する. これにより, ユーザは空中に表示された三次元 CG 物体を立体感を感じながら観察することができる.

そして, 空中に表示された三次元 CG 物体を指で触れるように直接操作することができる. 物体に対する操作としては, 変形, 移動, 生成などである. 例えば, 円筒状の CG 物体の表面を指で触ると, 表面形状に凹凸を与えることができる. また, 空中に浮かぶ三次元 CG 物体を様々な方向から指で押すと, 空間中で物体を三次元的に移動させることができる. さらに, 空間中で指を動かすと, 指先を使って三次元的な線を描くこともできる.

#### 3.2.2 MMAPを用いた空中への映像表示

本研究のシステムで用いる MMAP は, 垂直に並べたマイクロミラーで構成されたプレートをミラーが直交するように 2 層に重ねた構造となっている.

MMAP は, 実物体の映像をプレートに対して面对称の位置に結像する性質を持つ. 例えば, MMAP を水平に置いて, その下に実物体を置けば, 実物体と面对称の空間中に実物体が存在するように観察さ

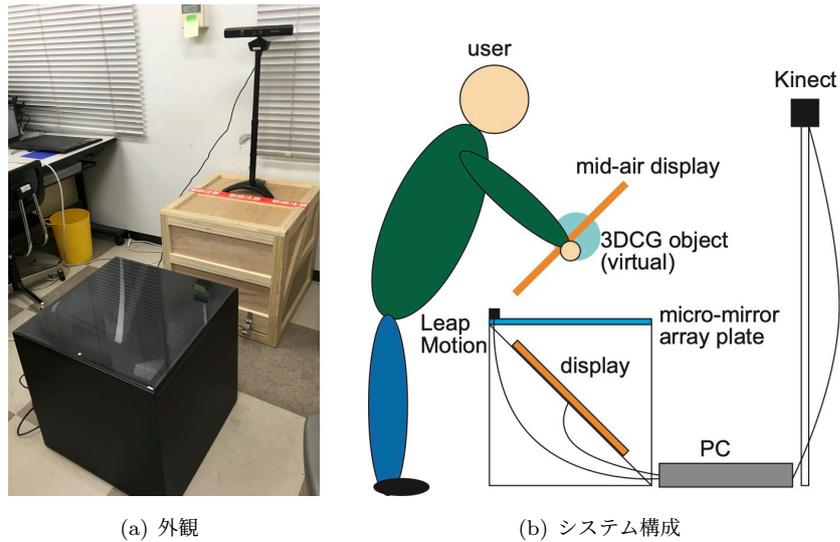


図 3.1: 提案システム

れる。そして、実物体として液晶ディスプレイを置いて、その液晶ディスプレイに映像を表示させれば、MMAP に対して液晶ディスプレイと面対称の空間中の位置に映像が表示されているように観察される。

本研究では、図 3.1(b) に示すように MMAP の下部に液晶ディスプレイを傾けて設置する。それにより、仮想的なディスプレイが MMAP 上の空間中に浮かんで存在することになり、液晶ディスプレイに表示された映像も空間中に浮かんで観察される。

### 3.2.3 空中映像に対する運動視差立体視の適用による空中立体映像の実現

運動視差は、立体物を観察するとき観察者または立体物が移動することで生じる見え方の変化である。図 3.2 に示すように、運動視差では観察者の移動に伴って今まで見えなかった部分が見えるようになったり、近くの物体が遠くの物体に比べて見え方が大きく変化する。運動視差は人の立体知覚にとって非常に大きな手がかりであり、運動視差のみで三次元形状と奥行きに関する十分な情報が得られて、観察者は両眼視差に匹敵する立体感が得られることが知られている [59]。

そして運動視差立体視 CG は、ユーザの視点に合わせて CG 映像を変化させて運動視差を再現することで立体視を実現したものである。運動視差立体視 CG は専用のディスプレイやメガネ等は不要で、三次元 CG 物体が実際にその場に存在するように観察したり操作することができる [60] [61] [62] [63] [64]。

本研究では、文献 [61] [62] [63] [64] で用いられた手法に基づき、MMAP で空中に表示している CG 映像に運動視差立体視を適用する。まず、Kinect で取得したユーザの 15ヶ所の関節点座標のうち頭部座標に基づいてユーザ視点の三次元位置を取得する。そして、実空間を再現した CG 空間を構築して、CG 映像をリアルタイムで生成する。具体的には、Kinect の設置位置に基づいて実空間の座標系を構築して、ユーザ視点、空中の仮想的ディスプレイ、表示物体のそれぞれの三次元座標を得る。この座標に基づいて、CG 生成用視点、CG 投影面、三次元 CG 物体を配置した CG 空間を構築して CG 映像を生成する。このように生成した三次元 CG 映像を仮想ディスプレイに表示してユーザ視点から観察すると、トロンプ・ルイユの原理で立体感が感じられるのに加えて、ユーザの移動に応じて三次元 CG 物体の見え方が適切に変化して運動視差が再現される。以上のことにより、ユーザは三次元 CG 物体が空中に実在するように立体感を持って観察することができる。

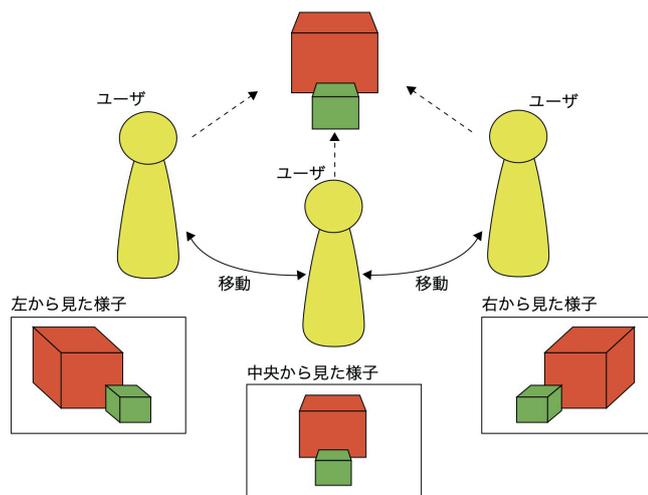


図 3.2: 運動視差

### 3.2.4 空中立体映像とのインタラクション

空中に表示された三次元 CG 物体とのインタラクションは、ユーザが CG 物体を指で直接触れることによって行う。

ユーザの指先の三次元位置は Leap Motion によって取得する。取得した座標は CG 空間の三次元座標に変換する。そして、指先の三次元座標に基づいて三次元 CG 物体の変形、移動、生成などのインタラクションを実現する。

変形対象となる三次元 CG 物体の形状は頂点格子で構成されている。そして、指先の三次元座標と三次元 CG 物体の各頂点との距離に基づいて接触判定を行い、接触と判定された頂点を指先座標から離れる方向に移動させる。また、三次元 CG 物体の移動も指先座標と物体頂点との接触判定に基づいており、接触と判定された場合に物体頂点全体を移動させる。なお、各指先座標には仮想的な球を配置して接触判定に用いる。

物体の生成は、指先座標に基づいて三次元 CG 物体を配置することで実現する。例えば、三次元 CG 物体として小さな球を用いて、指先座標に球を連続的に配置することで、指の移動によって空間中に三次元的な線状物体を生成することが可能である。

3.2.3 節で述べたように、CG 空間は実空間を再現したものになっている。そのため、ユーザの指先座標に基づいて三次元 CG 物体の変形、移動、生成を行った場合、ユーザからは自身の指で三次元 CG 物体に直接触れながらインタラクションを行っているように観察される。

ただし、空中に存在する CG 物体はその下に設置された MMAP を経由して表示しているため、手を空中 CG 物体の内部や奥に移動したとしても、ユーザからは常に手が CG 物体を遮蔽した状態で観察される (図 1.3(b))。このように、本手法では空中 CG 物体に対する手による直接的なインタラクションの際に、空中 CG 物体と手の間においてオクルージョンの矛盾が生じる場合がある。

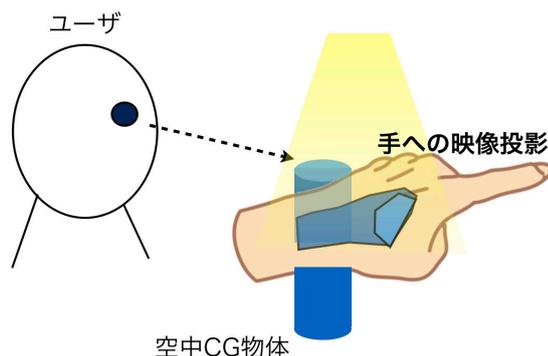


図 3.3: オクルージョン矛盾を解消するための拡張手法の方針

### 3.3 MMAP による空中立体映像と実物体との正しいオクルージョンの実現

#### 3.3.1 方針

3.2.4 節の最後に述べたように, MMAP を用いて空中に表示した CG 物体は空中の実物体と重なった場合でも手前に表示することはできない. そのため, 空中 CG 物体と手と視点の位置関係によってはオクルージョンの矛盾が生じる場合があった.

そこで, プロジェクタで実物体上に映像を投影することで, 空中 CG 物体による実物体の遮蔽を再現する手法を提案する. 図 3.3 に拡張手法の方針を示す. 空中 CG 物体との手による直接的なインタラクションを行うときに, ユーザから見て手が空中 CG 物体の内部や奥にあると判定された場合, CG 物体の映像をプロジェクタを用いて手に投影する. このとき, 適切な映像を手に投影することで, ユーザからは手の手前に見えるはずの空中 CG 物体がそのまま観察できるため, オクルージョンの矛盾が解消, 低減されることが期待される.

#### 3.3.2 拡張手法の実現法

前節で述べた手法で従来手法の拡張を実現するには, ユーザから見たときの空中 CG 物体と手などの実物体との正しいオクルージョンを把握することと, 空中 CG 物体によって手の遮蔽が生じたときに手に投影するための映像を適切に生成することが必要になる. 以下に従来手法の拡張を実現するための方法を述べる.

##### 3.3.2.1 システム構成

従来手法を拡張するためのシステム構成を図 3.4 に示す. 従来システムの構成に加えて, MMAP 上方に深度カメラ (Kinect) とプロジェクタを設置する. 深度カメラは, 手など空中に存在する実物体を三次元的にスキャンするために用いる. そしてプロジェクタは, ユーザから見て実物体が空中の CG 物体によって遮蔽されてオクルージョン矛盾が発生したと判定された場合に, オクルージョン矛盾を解消する映像を実物体に投影する.

そして, システムでは空中映像物体と実物体スキャンデータを実空間と同じ位置関係で CG 空間に配置して, ユーザ視点から見た CG 映像生成に基づいて正しいオクルージョンの把握を行い, プロジェクタ光源から見た CG 映像生成に基づいて投影用映像を生成する (図 3.5).

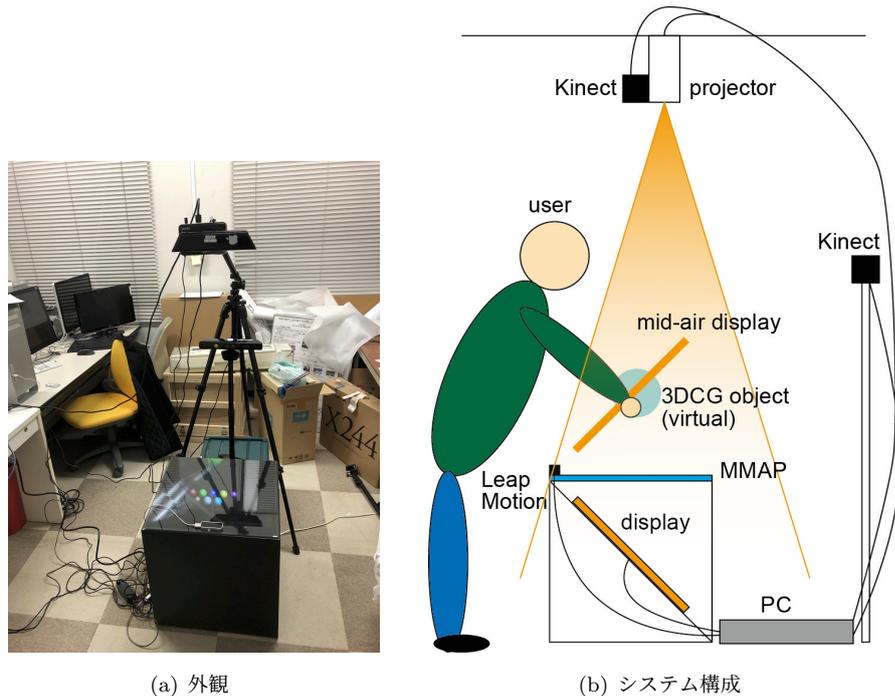


図 3.4: 拡張システム

### 3.3.2.2 空中 CG 物体と実物体との正しいオクルージョンの把握

空中 CG 物体と実物体との正しいオクルージョンの把握は, 3DCG の隠面除去処理に基づいて行う. 図 3.6 に処理手順を示す.

まず, MMAP 上方に設置した深度カメラによって得られた手などの実物体をスキャンして得られた点群データを CG モデルとして再構築して (図 3.6(a)), 空中に表示する CG 物体と同じ CG 空間に配置する (図 3.6(b)). そして視点追跡用の Kinect で取得したユーザ視点に基づいて, 空中 CG 物体と実物体 CG モデルの 3DCG の映像のレンダリングを行う. このとき, 通常の 3DCG 生成の隠面除去法に基づいてレンダリングすれば, ユーザ視点から見た CG 物体と実物体とのオクルージョンが正しく再現される (図 3.6(c)). そして, 背景色と実物体 CG モデルを黒色でレンダリングすれば, ユーザから直接観察されるべき空中 CG 物体の見かけ映像が生成される (図 3.6(d)).

図 3.5 においては, ユーザ視点  $e$  に基づいて空中 CG 物体と実物体 CG モデルの三次元 CG 映像生成を行うことになる. 空中 CG 物体および実物体 CG モデル上の点  $p_0 \sim p_3$  のうち,  $e$  からの可視点は  $p_0, p_1, p_3$  である. そして,  $p_0$  と  $p_1$  は空中 CG 物体の色でレンダリングを行い,  $p_3$  は背景色の黒でレンダリングを行うことになる. これらの処理は OpenGL で用意されたモデリング変換, 視野変換, 投影変換の関数やレンダリング関数で実装可能である [65].

### 3.3.2.3 投影用映像の生成と投影

前節でユーザ視点から観察されるべき空中 CG 物体の見かけの映像を生成したが, 映像中で空中 CG 物体が実物体 CG モデルを遮蔽している部分は, 空中映像システムで観察したときには実物体が空中 CG 物体を遮蔽するため, オクルージョンの矛盾が生じることになる. そこで, 実物体の該当部分に対してプロジェクタで映像を投影することで, オクルージョン矛盾の解消を図る.

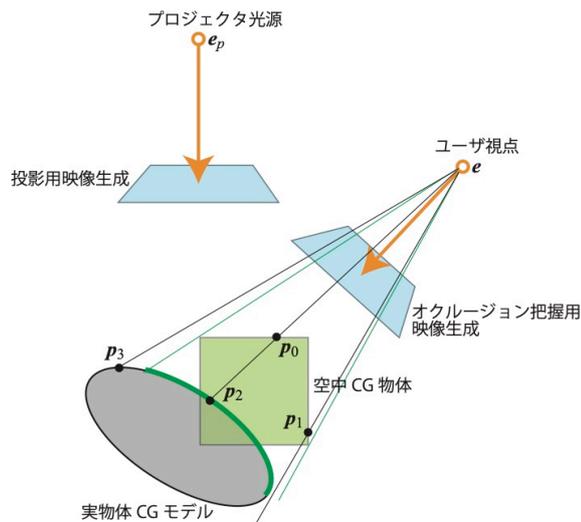


図 3.5: オクルージョン把握と投影用映像生成の模式図

投影用映像の生成手順を図 3.7 に示す。まず、ユーザ視点から見た実物体 CG モデルに対して、前節で生成したユーザから観察されるべき空中 CG 物体の見かけ映像 (図 3.7(a)) を投影マッピングする (図 3.7(b))。空中 CG 物体のうち、この処理で実物体 CG モデル投影される部分は、システムで空中 CG 物体を観察したときには実物体によって遮蔽されており、オクルージョン矛盾が発生している。そして、投影マッピングによって実物体 CG モデルに施された空中 CG 物体テクスチャが、オクルージョン矛盾を解消する手へのプロジェクションマッピング結果そのものである。

そこで、今度はプロジェクタに相当する位置を視点として、投影マッピングによって空中 CG 物体テクスチャが施された実物体 CG モデルのレンダリングを行う。このとき、テクスチャが施されない部分は黒色でレンダリングする (図 3.7(c))。これがオクルージョン矛盾を解消するためにプロジェクタで投影する映像である。

図 3.5 においては、はじめにユーザ視点  $e$  から実物体 CG モデルの三次元 CG 映像生成を行う。このとき、4.2.2 節で生成したオクルージョン把握用映像を実物体 CG モデルにマッピングする。つまり、 $p_0$  のレンダリング結果が  $p_2$  にマッピングされることになる。 $p_1$  はマッピングされないことになる。次にプロジェクタ光源  $e_p$  からオクルージョン把握用映像がマッピングされた実物体 CG モデルの三次元 CG 映像生成を行う。このとき、マッピングされていない部分は背景色の黒色でレンダリングする。そのため、 $e_p$  からの実物体 CG モデル上の可視点である  $p_2$  と  $p_3$  のうち  $p_2$  だけが視認される。これらの処理は OpenGL で用意されたモデリング変換、視野変換、投影変換の関数やレンダリング関数、そしてテクスチャ行列生成関数で実装可能である。

生成された映像をシステム上部に設置したプロジェクタで投影すると、空中 CG 物体とのオクルージョン矛盾が発生している実物体の部分に映像がマッピングされて、ユーザからは空中 CG 物体が実物体を適切に遮蔽しているように観察される。MMAP 上や実物体上でオクルージョン矛盾が発生していない部分には映像は投影されない。

### 3.4 問題点

従来手法の課題について述べる。従来手法では、空中立体映像とオクルージョン補完を実現した。しかし、空中立体映像と実物体の位置関係について、前後関係のみの提示にとどまっており、距離感の提示はできていない。また、空中立体映像は完全な不透明物体として表示されており、透明度などの考慮はされ

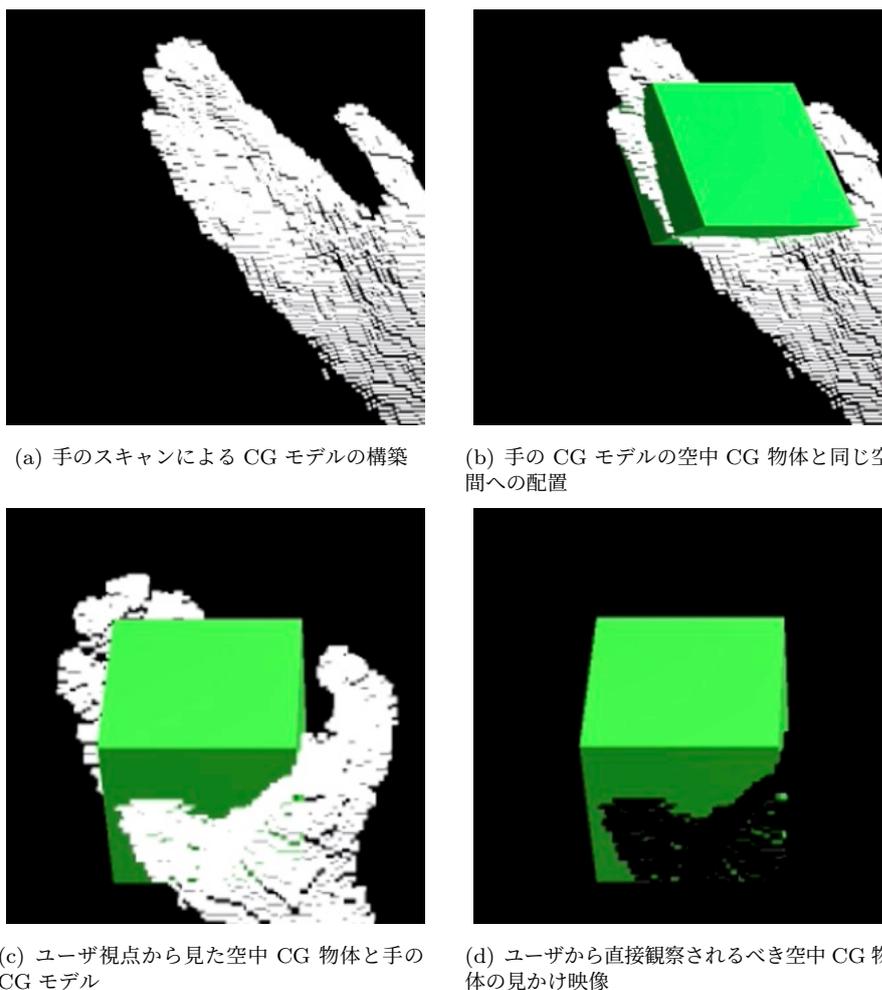


図 3.6: 空中 CG 物体と実物体とのオクルージョンの把握

ていない。加えて、空中立体映像に触れて変形や移動を行うことはできるが、それ以外の実空間の環境の反映はされておらず、実空間とのつながりが希薄である。また、より複雑なインタラクションの実現も課題である。

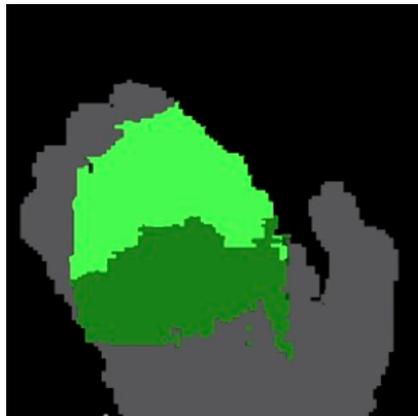
本研究では、これらの課題を解決するため、空中立体映像の素材感の表現、実空間のインタラクティブな反映、複雑な変形・生成インタラクションを提案する。具体的には、半透明のオクルージョン、実物体間との影の生成、実環境の映り込み、実空間の照明の反映、コップ内の液体表現、断面の表現、実空間のインクでの色塗りを実現する。



(a) ユーザから直接観察されるべき空中 CG 物体の見かけ映像 (図 3.6(d) と同じ)



(b) 手の CG モデルに対する映像 (a) の投影マッピング



(c) 投影マッピングが施された手の CG モデルをプロジェクタ視点から見た様子

図 3.7: オクルージョン矛盾を解消する投影映像の生成

## 第4章 空中立体映像の表示とインタラクションにおける空間整合性の向上

### 4.1 概要

本章では前章で述べた MMAP を用いた空中立体映像の空間整合性を高めるための要素、およびそれらを空中立体映像で実現するための手法について述べる。

まず、空中立体映像の素材感の表現について述べる。具体的には空中立体映像の不透明度の表現の実現である。不透明度の違いによって空中立体映像による実物体のオクルージョンの状況が変化するため、空中立体映像と実物体との空間整合性を向上させるためには不透明度の違いを表現することが必要な要素となる。

また、実環境の変化を空中立体映像に対して反映させたり、その逆に空中立体映像の様子を実物体に対して反映させることについて述べる。実物体が照明によって照らされたり、実物体の上に影が生じるなど、実物体は実環境や他の実物体から視覚上の影響を受ける。空中立体映像と実物体との空間整合性を向上させるためには、空中立体映像も実環境や実物体から視覚上の影響を受けたり、逆に与えることが必要な要素となる。

さらに、空中立体映像に対して実物体で物理的な影響を与えることについても述べる。具体的には、液体的な性質を持つ物体を空中立体映像と表示させながらコップの中で液体としての運動させることを実現すること、空中立体映像で表示した物体を実物体で切断することを実現すること、そして空中立体映像で表示した物体を現実空間のペン等で着色することである。いずれも、空中立体映像で表示した物体に対して実物体と同様の振る舞いを再現することであり、空中立体映像と実物体との空間整合性の向上に寄与すると思われる。

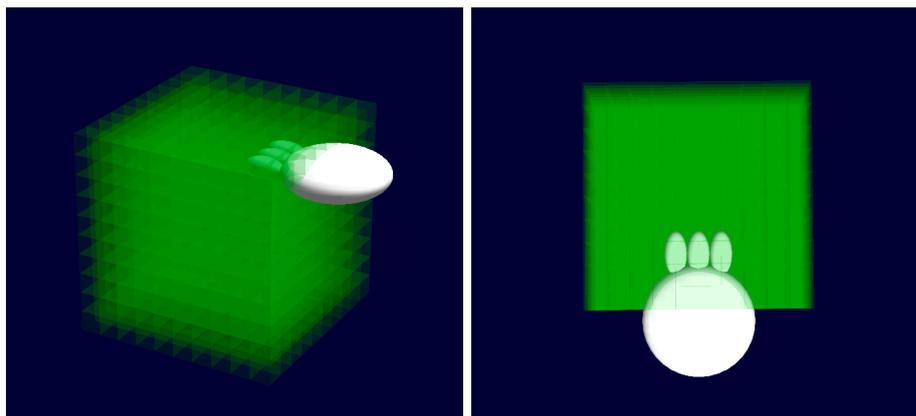
### 4.2 素材感の表現

#### 4.2.1 半透明オクルージョン

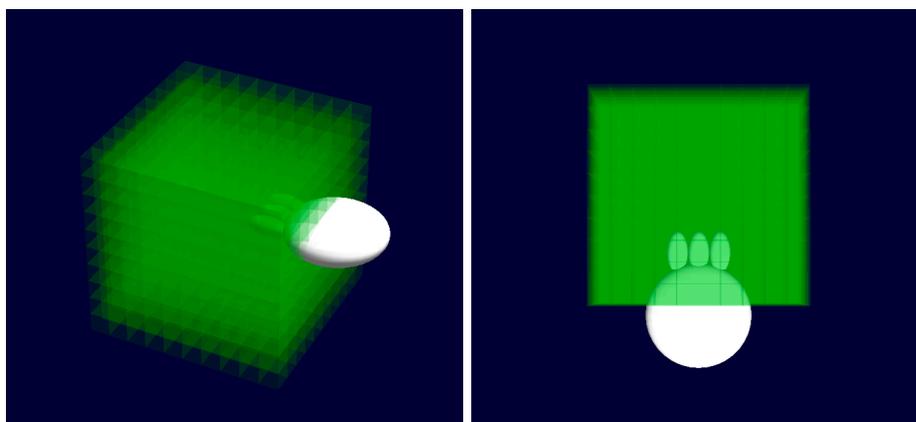
MMAP による空中像では MMAP 自体が空中像の奥に見えるなど実物体を完全に遮蔽することはできないため、半透明のように観察される。そのため、立体的に表示された空中 CG 物体は、ミストや透過性のある液体、シャボン玉のような半透明な素材のように観察される。そこで、オクルージョン矛盾解消処理においても、空中 CG 物体が半透明であることを想定できることが望ましい。

ミストや透過性のある液体などの物体に手を入れたり、物体の奥に手を置いたとき、物体中の手の深さや物体の厚みによって手の見え方が変化する。そこで、本研究では従来手法で生成したオクルージョン矛盾解消のための投影映像について、手と空中 CG 物体の位置関係によって手を遮蔽する CG 物体の色の輝度値を変化させるように拡張する。

提案手法の概念を図 4.1 に示す。緑色の物体は半透明物体を表し、白色の物体は手の三次元モデルを模している。前節で述べたように、オクルージョン矛盾解消のために手に投影する映像は、手のモデルと重なっている半透明物体の領域を手のモデルに投影マッピングしたものである。図 4.1(a) のように、ユーザから見て手が空中 CG 物体の浅い場所にある場合には、オクルージョン矛盾解消のために手に投影す



(a) 手が浅い位置にある場合



(b) 手が深い位置にある場合

図 4.1: 投影映像の輝度値を変化させる手法の模式図. 左: 横から見た場合. 右: 上から見た場合

る CG 物体の色が薄くなるようにする. 一方, 図 4.1(b) のように, ユーザから見て手が空中 CG 物体の深い場所にある場合には, 手に投影する CG 物体の色が濃くなるようにする. これにより, 手と空中 CG 物体の位置関係に応じて, オクルージョン矛盾解消用映像の色の輝度値が変化する.

これを実現するため, 3.2 節および図 3.6, 3.7 で説明した従来のオクルージョン矛盾解消用映像の生成手法を拡張する. 具体的には, 投影像生成のための CG 物体の表示手法としてボリュームレンダリングに対応させる. ボリュームレンダリングはボクセルデータなどのソリッドモデルの CG 表示に用いられ, 各ボクセルの透明度を設定することで半透明物体の表示が可能で, 厚みによる透過度の変化にも対応している.

図 4.2 に拡張手法でオクルージョン矛盾解消映像を生成する様子を示す. 緑色の物体は半透明物体で, 白色の物体は手の三次元モデルである. 拡張手法では, 空中 CG 物体をボクセル集合で表現して, 各ボクセルを半透明立方体として表示する. その結果, 空中 CG 物体と手の三次元モデルを用いたオクルージョン発生箇所の抽出手順において, 両者の位置関係に応じて CG 物体を表示する色の輝度値が変化する. 例えば, ユーザ視点から見て手が空中 CG 物体の浅い場所にある場合には, 図 4.2(a) に示すように CG 物体は色が薄く見え, ユーザ視点から見て深い場所にある場合には, 図 4.2(b) に示すように CG 物体は色が濃く見える. そして, レンダリングした映像をオクルージョン矛盾解消映像としてプロジェクタで手に投影する. その結果, 手と空中 CG 物体との位置関係によって, 手に投影されるオクルージョン矛盾解消用映像の輝度値を変化させることが実現される.

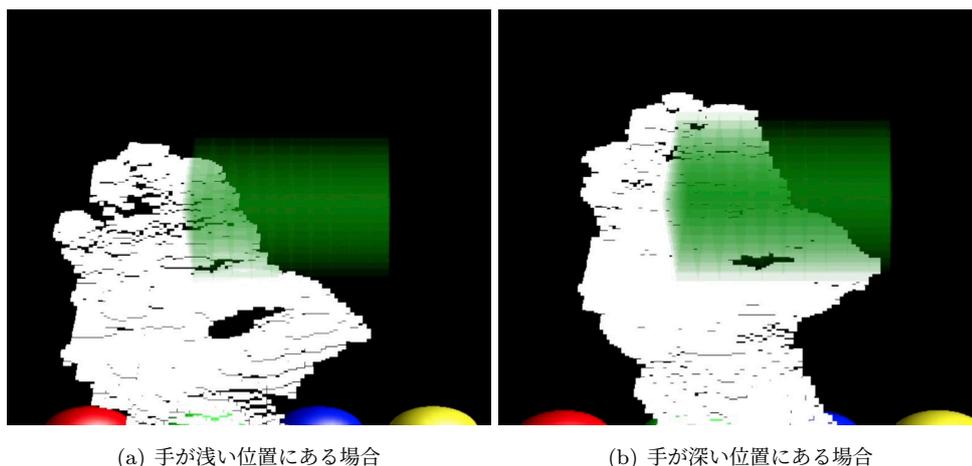


図 4.2: ボクセルを用いた投影映像のレンダリングにおける輝度値の変化

これにより、ユーザは手に投影されたオクルージョン補完映像の色変化を確認することができ、手と空中 CG 物体との位置関係をより明確に把握することができる。また、空中 CG 物体のためのボクセルの透明度を変化させることで、空中 CG 物体の透明度を変化させることも可能である。

半透明物体の表示方法については、半透明実物体の見かけの色濃度の変化を参考にする。そのため、半透明実物体を用いて物体の厚みを 0cm から 8cm まで変化させて、背景と半透明物体が重なる部分で見かけの色濃度の変化を測定する実験を行った。

図 4.3 に色濃度の変化の様子を示す。使用した半透明実物体は市販の洗口液で、一般的に緑色を生成するために使われる青色 1 号と黄色 4 号で着色されている。グラフの数値から、半透明実物体の厚みが増えるほど、赤成分や青成分など背景には含まれるが半透明実物体にあまり含まれない色成分の濃度について、厚みに対してほぼ直線的に減少していることを確認した。

## 4.3 実環境のインタラクティブな反映

### 4.3.1 実物体間との影の生成

複数の物体があるとき、影は各物体の相互の位置関係を知るために重要な要素の一つである。そこで本研究では、空中 CG 物体に対して手の影が生成されたり、逆に空中 CG 物体の影が手に生成されたりする改良を行う。

これは、従来手法における空中 CG 映像の表示手法およびオクルージョン矛盾解消用映像を拡張することで実現する。具体的には、それぞれの映像生成手順において、シャドウマッピングによる影の生成処理を新たに加える。このとき、影を生成する照明位置は任意に設定することが可能であるが、本研究ではプロジェクタの光源位置に点光源照明があるとする。

図 4.4 に模式図を示す。青色が空中 CG 物体で白色が手である。まず、手の影が空中 CG 物体に生成されることを実現するため、空中 CG 物体映像の生成処理において、図 4.4(a) に示すように、ユーザの手の三次元モデルによる影の生成を考慮しながら、空中 CG 物体の映像をレンダリングする。これを空中映像として表示することで、ユーザの手が空中 CG 物体の上方にある場合に空中 CG 物体に手の影が生成される様子が観察される。

一方、空中 CG 物体の影が手に生成されることを実現するため、オクルージョン矛盾解消のための投影映像の生成処理において、図 4.4(b) に示すように、空中 CG 物体による影を考慮しながら、ユーザの手

の三次元モデルをレンダリングする。その際、従来手法ではオクルージョン矛盾を補完する空中 CG 物体だけをレンダリングして投影していたが、手の三次元モデルのうち影が生成されない部分についても、照明と影との差を与えるために少し明るさを与えてレンダリングする。そして、生成された映像を手で投影すると、オクルージョンが発生している部分には空中 CG 物体の映像、オクルージョンが発生しておらず空中 CG 物体の影が生成されていない部分には照明を示す手の三次元モデルの映像が投影されるが、空中 CG 物体の影が生成される部分には何も映像が生成されない。その結果、ユーザの手が空中 CG 物体の下方にある場合に手に空中 CG 物体の影が生成される様子が観察される。

これにより、ユーザは手と空中 CG 物体のお互いの影の生成を確認することができ、手と空中 CG 物体との位置関係をより明確に把握することができる。

### 4.3.2 実環境の映り込み

CG 映像のリアルな表示において、周囲環境の反映は重要な要素の一つである。そこで本研究では、空中 CG 物体にもその周囲の環境を反映させる。具体的には、空中 CG 物体が金属など鏡面反射特性を強く持つ場合に、物体表面への周囲環境の映り込みを実現する。また、実空間のスポットライト光源を空中 CG 物体に反映させることを実現する。

空中 CG 物体に周囲環境の反映させるためには、周囲環境の状況の取得が必要となる。そこで、本研究のシステムでは 3.2 節で示したように、新たに全周囲カメラを設置して、空中 CG 物体の周囲をビデオ撮影している。

空中 CG 物体表面への周囲環境の映り込みは、鏡面による反射を簡易的に再現する CG 手法である環境マッピングを用いる。一般的な環境マッピングは、CG 空間を覆う球面ドームに周辺画像を貼り付けて、対象物体の座標、法線、および CG 表示用視点の位置関係に基づいて視線反射方向と球面ドームの交点を求めた上で、球面ドーム上の画素をテクスチャとして適用する。本研究では、全周囲カメラで撮影したビデオ映像を球面ドームに貼り付ける。そして、空中 CG 物体に環境マッピングを適用してレンダリングを行い、空中映像として表示する。

スポットライト光源は、全周囲カメラ映像中から輝点を検出するか、ユーザの指の位置に光源が存在すると仮定することで実現する。そして、CG 物体にスポットライト光源を追加した上でレンダリングを行い、空中 CG 映像として表示する。ここでは、スポットライトの方向の計算の簡単のため、スポットライトは常に空中 CG 物体の中心に向いていると仮定している。

空中 CG 物体と周囲環境が連動することにより、ユーザは空中 CG 物体がより現在表示されている環境に実在しているような感覚が得られる。

## 4.4 複雑な変形・生成インタラクション

### 4.4.1 コップ内の流体表現

本研究では、透明なプラスチック製コップに流体が入っているように観察可能な空中立体映像システムを開発する。コップ内の空中映像は MMAP の観察可能範囲内であればどの方向からでも立体的に観察可能である。また、コップの移動による水面の揺れも表現されており、ユーザがコップを揺らすことによるインタラクションが可能である。

これを実現するためには、空中立体映像の実現、コップの三次元的な位置の取得、リアルタイムの流体表現が必要となる。本稿では、コップの三次元的な位置の取得とリアルタイムの流体表現を実現する手法について述べる。

図4.5に本研究で使用するコップを示す。コップはプラスチック製のものを用いた。透明な物体はKinectで深度値を取得できないため、コップの上部にドーナツ型に切った紙を貼り付けている。また、流体シミュレーションのため、コップのサイズは事前に測定している。

コップの三次元的な位置の取得のための処理手順を図4.6に示す。まず、MMAP上方のKinectを用いて、MMAP上方の深度画像を得る(図4.6(a))。深度画像にはコップに取り付けたドーナツ状の紙が写る。次に、この深度画像に対して輪郭検出を施す(図4.6(b))。円形度と領域面積を用いて検出された輪郭がコップの輪郭であるかを識別する。そして、コップの輪郭と識別された場合には、輪郭線上の点の重心座標を求める(図4.6(c))。輪郭線上の点は深度を持つため、その重心座標も三次元座標として得られる。そして、この座標をコップの三次元位置として用いる。なお、コップの傾きは現時点では行っていない。

コップ内に入っている流体の表現はリアルタイム流体シミュレーションで実現する。本研究では、流体シミュレーションの方法として、粒子法の一つで、比較的単純なアルゴリズムで実装が可能であり、水面の大きな変形も表現可能なSmoothed particle hydrodynamics (SPH)法を用いた。また、流体が入る容器の大きさは事前に測定したコップの大きさに設定し、パーティクルと容器との衝突はペナルティ法を用いた。

また、水面の描画はvan der Laanらが提案したscreen space fluid renderingを参考にして行った[66]。本研究では、deferred renderingを実装し、パーティクルとして球体を用いた。また、水面を描画する際のパーティクルの深度値の平滑化を、単純な平均化フィルターを用いて行った。実装したシステムでは、流体の厚みや表面の泡立ちの描画などは行っていない。

#### 4.4.2 断面の表現

空中立体映像との平板を用いたインタラクションにおいて、ユーザは実物体として棒が取り付けられた平らな板を使用する。ユーザがこの平板の棒の部分を持ち空中立体映像の間に差し込むと、空中立体映像は平板によって切断されたように感じられる。結果として、平板に空中立体映像の断面が表示される。この様子を図4.7に示す。ユーザの視点から観察すると、平板の下部にある空中立体映像はMMAPによって表示され、断面より上部にある立体空中映像は平板によって遮蔽される。それにより、空中立体映像が平板によって切断され、その断面が可視化される状況が再現される。ユーザは自由に平板を動かすことができ、切断面の映像は平板の位置に応じてインタラクティブに変化する。

これを実現するため、平板を追跡し三次元的な座標と向きを取得し、空中立体映像との位置関係を検証する必要がある。その後、空中立体映像の断面をレンダリングし、平板に投影する必要がある。平板の三次元的な座標の座標と向きの検出は、MMAP上方のKinectを用いて実現される。ユーザは棒付きの平板を操作するので、距離値に基づく深度画像の2値化で平板領域が抽出できる。平板の領域抽出を行った後、領域は四角形であると考えられるので、距離値を用いて現実空間での4つの頂点座標が決定できる。これにより、現実空間における平板の三次元的な位置と向きの計算が可能になる。

本研究では、空中立体映像はボクセルデータとして表現される。空中立体映像の座標は、現実空間に基づいている。結果として、平板の位置と向きは空中立体映像との位置関係の特定に直接的に使用できる。平板を表現する平面の方程式を求め、空中立体映像のボクセルそれぞれの距離を計算し、特定の位置にあるボクセルだけが描画される。このレンダリング結果は空中立体映像の断面を描画する。

レンダリングされた断面は、MMAP上方のプロジェクターから平板に投影される。平板の三次元的な座標と向きは既知であるので、オクルージョン矛盾解消で用いたものと同様の手法で実現できる。断面の画像は、3DCG空間の平板にテクスチャマッピングされ、そのレンダリング画像が現実空間の平板に投影される。平板と空中立体映像とのオクルージョン補完映像は、従来手法と同様に平板に投影される。

### 4.4.3 実空間のインクでの色塗り

空中像に対して、実物体を用いた色付けを実現する。ここでは指先を使った描画を提案する。ユーザは、指先にインクをつけたり、色紙を巻いた状態で空中像に触れることで、指先の色に応じたインクで空中像に描画できる。

これを実現するため、指先位置の取得、指先の色の取得、空中像に反映の3つを行う必要がある。指先位置は LeapMotion を用いて取得できる。この LeapMotion で得られた指先座標を基にして、ユーザの指先が空中立体映像に触れたかどうかを判定する。次にユーザの指先の色で空中立体映像の色付けするため、ユーザの指先が空中立体映像に触れた際に指先の色を認識する必要がある。これは、MMAP 上方の Kinect でユーザの指先の色を取得することで実現する。指先領域は Kinect で取得した RGBD 画像から深度値に基づいて抽出する。そして、指先位置の RGB 値から、空中立体映像に触れているそれぞれの指先の色を取得する。

空中立体映像への色付けは、テクスチャマッピングによって実現される。指先が触れている位置に一致する領域を取得した色で満たすことで空中立体映像の色を変え、指先での色付けを実現する。

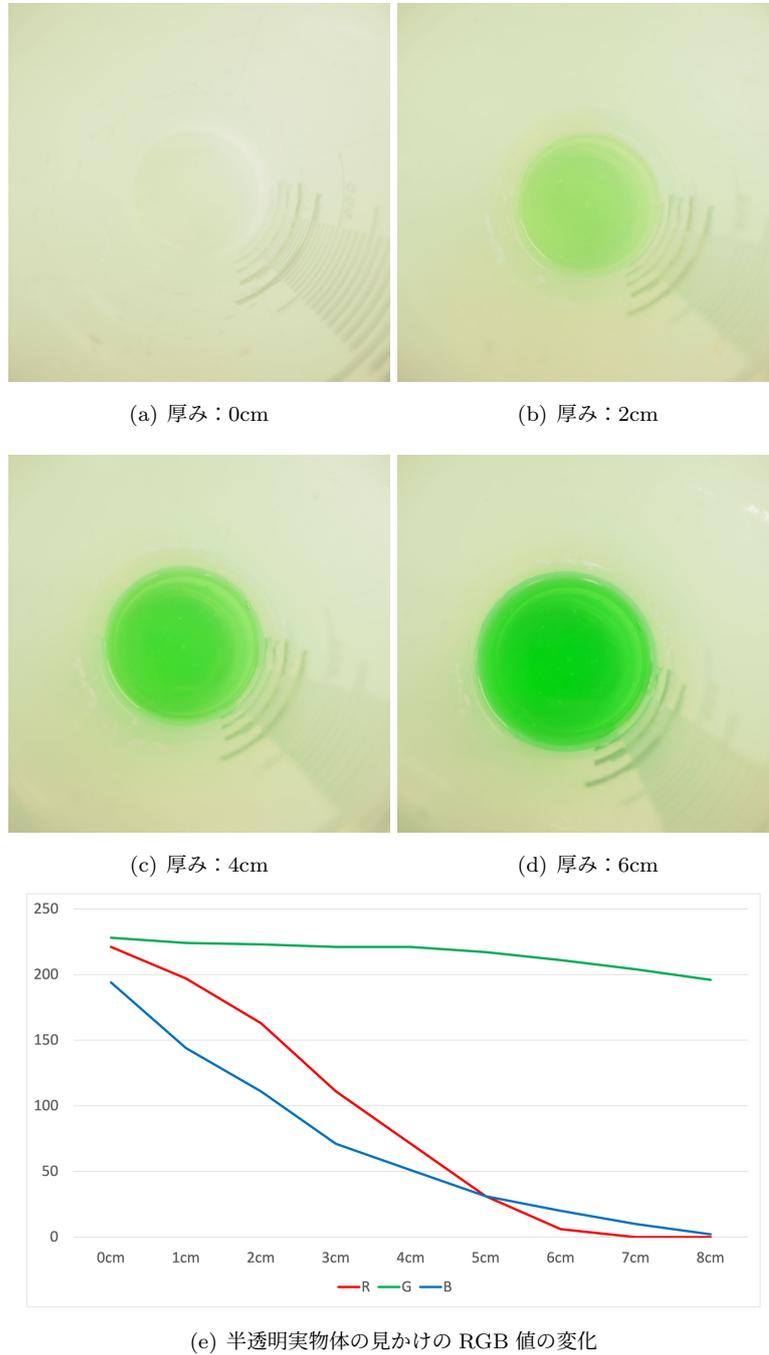
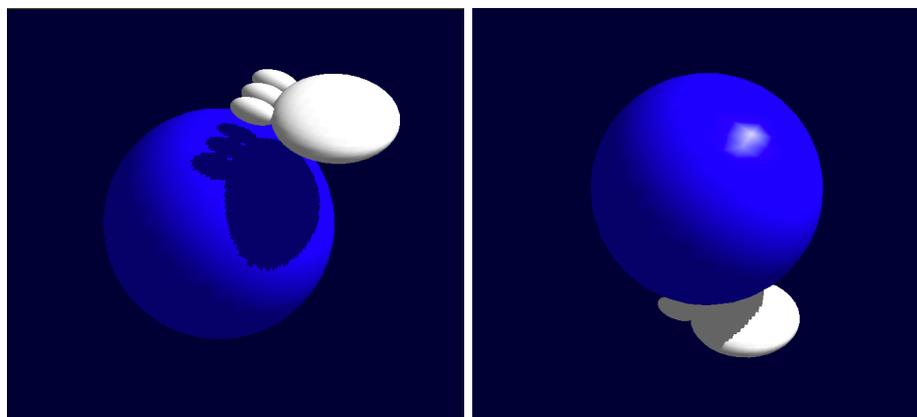


図 4.3: 半透明実物体における物体の厚みによる色濃度の変化の様子



(a) 手が上の場合

(b) 手が下の場合

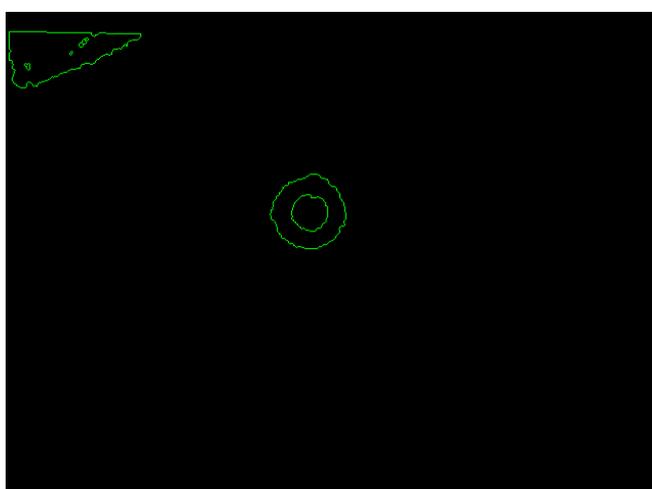
図 4.4: 空中 CG 物体と手との相互の影の生成の模式図



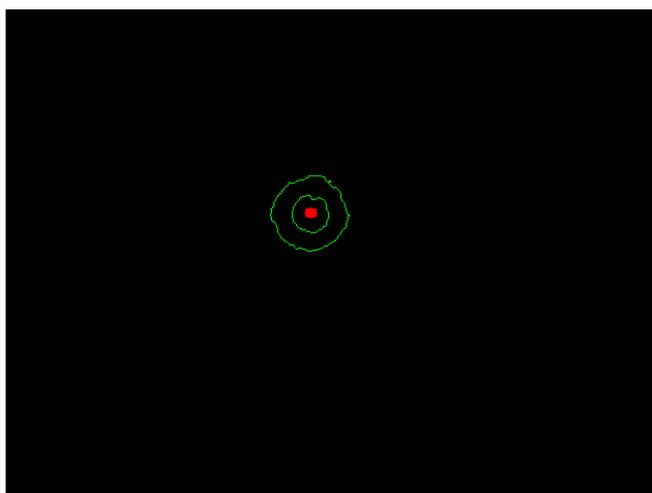
図 4.5: 使用したコップ



(a) 取得した深度画像



(b) 深度画像から抽出した輪郭線



(c) 輪郭線の重心

図 4.6: コップの三次元的な位置の取得のための処理手順

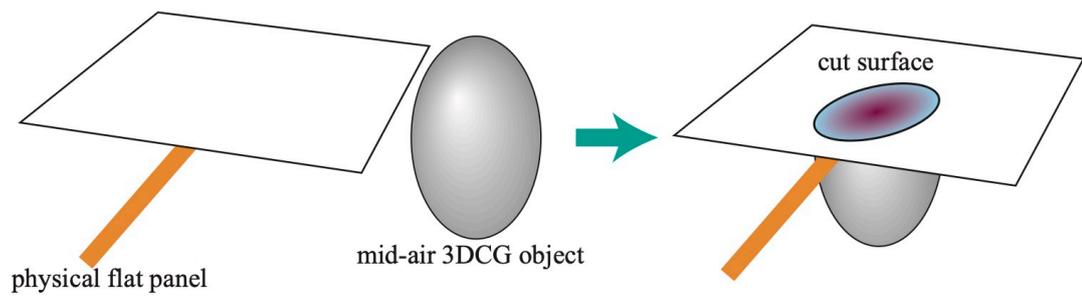


図 4.7: 断面表現の概要

## 第5章 実験

### 5.1 概要

本章では前章で述べた空中立体映像の空間整合性を高めるための手法の実装および実験結果について述べる。

はじめに、システムの実装環境について述べる。また、空中立体映像の空間整合性を高めるための各要素について、実装したシステムを用いた実験を行って、それらの有効性について検証する。

### 5.2 実装環境

提案手法の実装と実験を行った。使用した MMAP は (株) アスカネット製の 50cm 四方のガラス素材のもの (AI プレート) で、MMAP の下に設置された液晶ディスプレイは 15 インチのフル HD モニター ( $400\text{cd}/\text{m}^2$ ,  $1920 \times 1080$  画素) である。このシステムは 2 つの PC と C++ を用いて実装されている。一つの PC (MacBook Pro) では Kinect でユーザの視点を追跡するために用いられる。その取得した座標は、UDP 通信でもう一つの PC (iMac) に送信される。iMac では、空中に投影される映像とプロジェクター投影用の映像を OpenGL で生成する。プロジェクターは Vivitek QUMI Q6 (800 ANSI ルーメン,  $1280 \times 720$  画素) を用いた。半透明物体のためのボクセルは 1 辺の長さが 1cm の立方体とした。

なお、運動視差を再現することによる立体視とオクルージョン補完のための投影映像生成は、文献 [2] の基盤技術をそのまま利用しながら拡張したものであり、映像の精度は先行研究と同程度であると考えられる。また、インタラクションと映像生成は 30fps を保持していることを確認しており、従来通りのリアルタイム処理を実現している。

### 5.3 半透明オクルージョン

色濃度変化へ対応させる実装は、4.2.1 節で行った実験を参考にして、半透明物体の影響によって元の色が減色するようにする。OpenGL には半透明物体のための混合関数がいくつか用意されているが、最も一般的な手法は、半透明物体の色と元の色について、アルファ値  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) および 1 からアルファ値を引いた値 ( $1 - \alpha$ ) をそのまま重みにして加算するアルファブレンドである。そして、半透明実物体の実験結果と同様の色の減色の振る舞いを OpenGL で実現するには、半透明 CG 物体の色の RGB 値がそれぞれ背景色の RGB 値を超えないようにしながらアルファブレンドすればいい。そのため、色濃度変化へ対応したオクルージョン矛盾解消映像の生成においても、投影映像の背景に明るさを与えておき、ボリュームレンダリングのための各ボクセルの RGB 値はそれぞれ背景色の RGB 値を超えないように設定した。

そして、厚さ 8cm の空中半透明 CG 物体を用意して、白板を空中 CG 物体中に置きながらオクルージョン矛盾解消映像が投影される様子を撮影して見かけの色濃度の変化を測定した。図 5.1 に色濃度の変化の様子を示す。空中半透明 CG 物体は不透明度 0.03 のボクセルで表現しており、RGB 値 ( $0 \leq R, G, B \leq 1$ ) はそれぞれ、0.0, 0.5, 0.0 とした。CG 映像中では厚さ 8cm の厚みで背景色が約 60% に減衰する。背

景色の RGB 値はそれぞれ, 0.5, 0.5, 0.45 とした. 実験の結果, 撮影環境の違いのためスケールは異なるが, RGB 値の変化の様子は半透明実物体の結果 (図 4.3) と同様の傾向となることを確認した.

次に, 手に対してオクルージョン矛盾解消映像投影して, 従来手法と提案手法を比較する実験を行った. 提案手法で用いたボリュームレンダリングのためのボクセルの不透明度は 0.03 とした. 図 5.2 に円柱形状を用いた実験を示す. 従来手法 (図 5.2(a)(b)(c)) においては, 手と空中 CG 物体の位置関係にかかわらず, 手に投影される CG 物体の色は同一であり, 手と空中 CG 物体の位置関係がやや把握しづらい. また, 手が見えているため空中 CG 物体は半透明と認識されるが, 空中 CG 物体内で手を前後に動かしても投影される映像の濃度が変化しないため, 両者の矛盾によって不自然さが感じられた. 一方, 提案手法 (図 5.2(d)(e)(f)) においては, 投影映像は手と空中 CG 物体との位置関係, 特に手が空中 CG 物体の浅い位置にあるか深い位置にあるかによって適切に投影される空中 CG 物体の色濃度が変化していることが確認できる. これにより, 空中 CG 物体と手の位置関係をより明確に把握することができた. また, 空中 CG 物体が半透明な物体であることが自然に感じられた.

図 5.3 に様々な色と形状の空中 CG 物体に対して提案手法を適用した結果を示す. 観察される色は, 手に含まれる色と空中半透明 CG 物体との関係に影響する. 手の色には青色成分があまり含まれていないため, 青色の空中半透明 CG 物体を対象とした場合は, 物体表面から浅い位置でも見かけの色濃度が大きく変化して透明度が低く感じた. 一方, 赤色の空中半透明 CG 物体を対象とした場合には色濃度の変化が小さく, 透明度が高く感じた. 空中半透明 CG 物体の形状が直接的な影響を与える感じはあまりなかったが, 円柱や円錐に対する操作よりは球に対する操作の方が違和感がなかった.

## 5.4 実物体間との影の生成

図 5.4 に空中 CG 物体と手との相互の影を生成した様子を示す. 図 5.4(a)(b) は従来手法を用いた場合の結果である. 手や空中 CG 物体に影が映ることはなく, 位置関係が把握しづらい.

一方, 図 5.4(c)(d) は提案手法を用いた場合の結果である. 図 5.4(c) に示すようにユーザの手が空中 CG 物体の上にある場合には, 手の影が空中 CG 物体に生成されることを確認した. また, 図 5.4(d) に示すように手が空中 CG 物体の下にある場合には, オクルージョン補完映像に加えて空中 CG 物体の影が生成されて, 手に投影されることを確認した. この影は, 手による直接的なインタラクションにおいて, 空中 CG 物体と手の位置関係を把握するために有用であると思われる.

図 5.5 に手で空中 CG 物体をつまみ上げている様子, 図 5.6 に指先で空中 CG 物体を描画する様子を示す. 図 5.5 では, 下の写真で手の影が物体が置かれた平面に生成されていることが確認でき, 図 5.6 では描画する手の動きに合わせて三次元描画物体に手の影が生成されながら変化していることが確認できる. このように, 先行研究で実現していた様々なインタラクションにおいて, 手と空中 CG 物体との相互の影が適切に生成されることを確認した.

## 5.5 実環境の映り込み

図 5.7 に周囲環境を反映する物体の表示を行った様子を示す. ユーザの動きに応じて物体表面の映り込みが変化し, そこに強い鏡面反射特性を持つ空中物体が存在しているように観察された. また, 図 5.7 の下の写真が示すように, 手が空中 CG 物体に近付くにつれて, 手が大きく映るように見えるため, 手と空中 CG 物体の位置関係の把握にも有用であった.

図 5.8 に指の位置にスポットライトがあると仮定して, 空中 CG 物体の周囲でスポットライトを移動させている様子を示す. 指先の移動に応じて空中 CG 物体のハイライトの位置が変化して, 指の移動に応じて空中 CG 物体が指先で照らされている感じが得られた. また, スポットライトの当たり方によるハイラ

イトの移動を観察することで、空中CG物体がより立体的に感じられるとともに、実際にその場に存在するようにも感じられた。

## 5.6 コップ内の流体表現

コップをMMAPの上に持っていったときに空中立体映像として流体を表示すると、図5.9に示すように流体が実際にコップの中に入っているように観察された。MMAPによる空中立体映像は常にコップの奥にあるように観察されるが、液体がコップ内に入っている表現のためには都合がよく、流体がコップの外に溢れ出す表現をしない限り矛盾は生じない。実装した流体シミュレーションでは、200個のパーティクルで計算を行った。

実装したシステムでは、MMAPの中心付近にコップを移動させると、上方から空中立体映像で表示された流体がコップに注ぎ込まれる。その様子を図5.10に示す。このとき、コップの中に実際に流体が注ぎ込まれて溜まるような状態が観察できた。

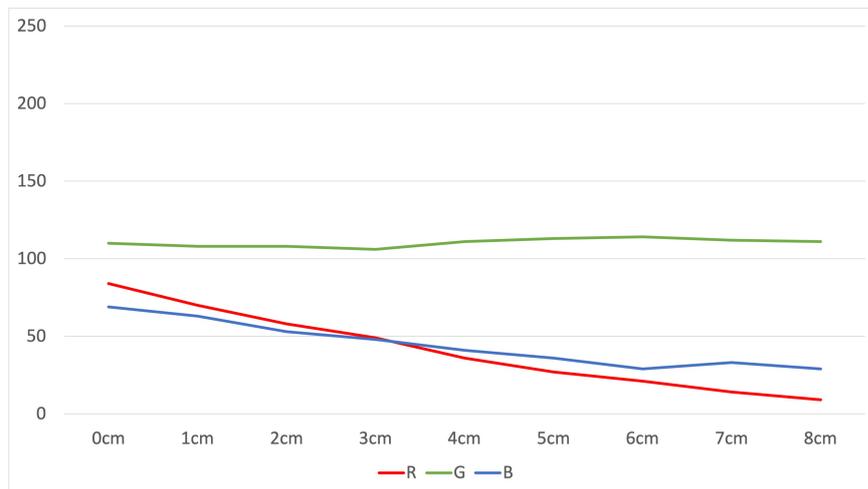
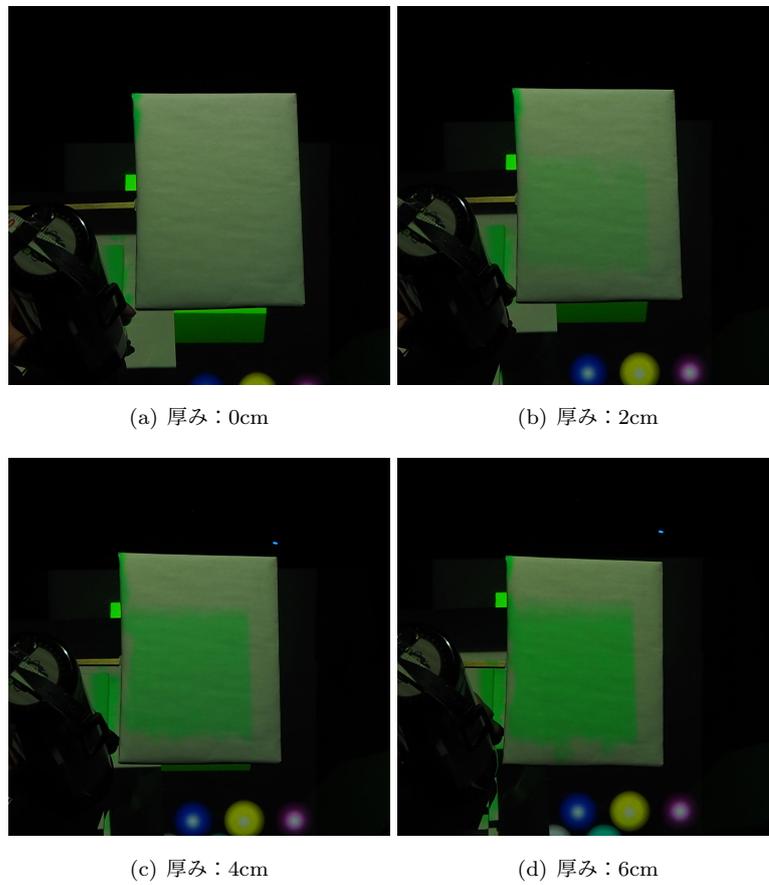
そして、コップを持った状態で上下前後左右に動かすと、コップ内に入った流体が揺れて変形する。その様子を図5.11に示す。コップの位置に合わせて空中立体映像の流体が表示されながら、コップの動きに合わせて揺れる様子が確認できた。これにより、ユーザは実際に液体の入ったコップを持っているように感じられる。

## 5.7 断面の表現

空中立体映像のボクセルは、 $10 \times 10 \times 10$ で構成されている。図5.12に結果を示す。空中立体映像の上方に平板がある場合、空中立体映像は平板によって遮蔽される(図5.12(a))。平板が空中立体映像の中にある場合、平板に空中立体映像の断面が表示され、空中立体映像の断面上部は平板によって遮蔽される。結果として、空中立体映像が平板によって切断されたように観察できる(図5.12(b)(c))。平板が完全に空中立体映像の下部にある場合、従来手法と同様の方法で平板と空中立体映像とのオクルージョンを補完する映像が平板に投影される(図5.12(d))。

## 5.8 実空間のインクでの色塗り

空中立体映像として表示される円筒は、 $50 \times 50$ の頂点数で構成されている。結果を図5.13に示す。ユーザの指先が空中立体映像に触れた場合に、ユーザの指先の色に応じて空中立体映像が色付けされる。また、空中立体映像を変形させることも可能である。図5.14に、空中立体映像に対する色付けと変形の様子を示す。



(e) 空中半透明 CG 物体のオクルージョン矛盾解消映像の投影結果の RGB 値の変化

図 5.1: 空中半透明 CG 物体における物体の厚みによる色濃度の変化の様子



(a) 従来手法：手が物体の上に存在



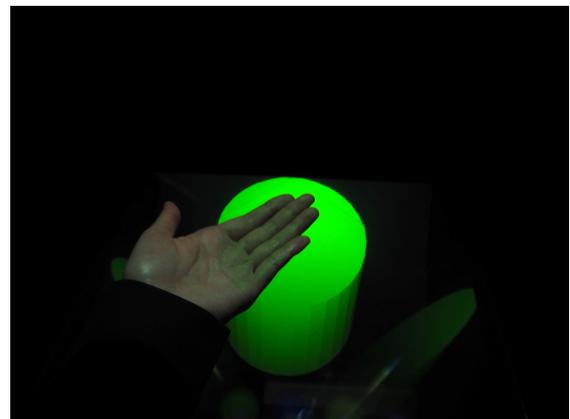
(b) 従来手法：手が物体表面から約 2cm 内部に存在



(c) 従来手法：手が物体表面から約 4cm 内部に存在



(d) 提案手法：手が物体の上に存在

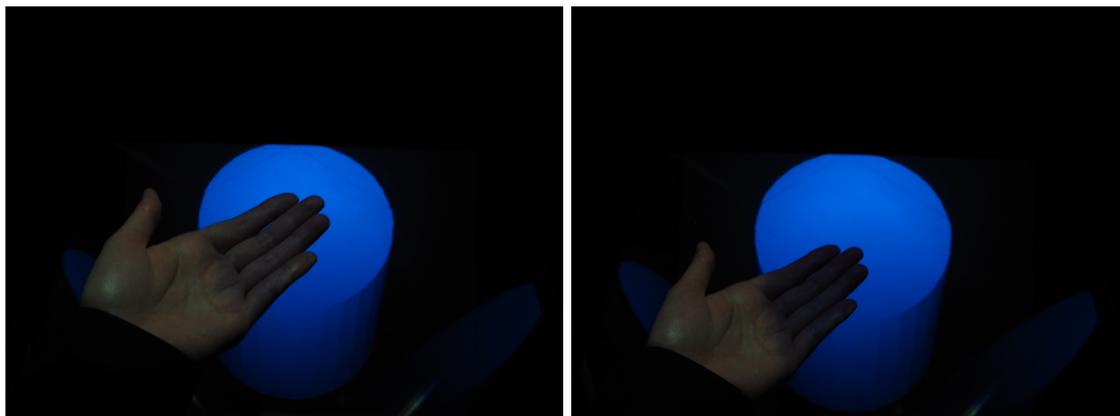


(e) 提案手法：手が物体表面から約 2cm 内部に存在

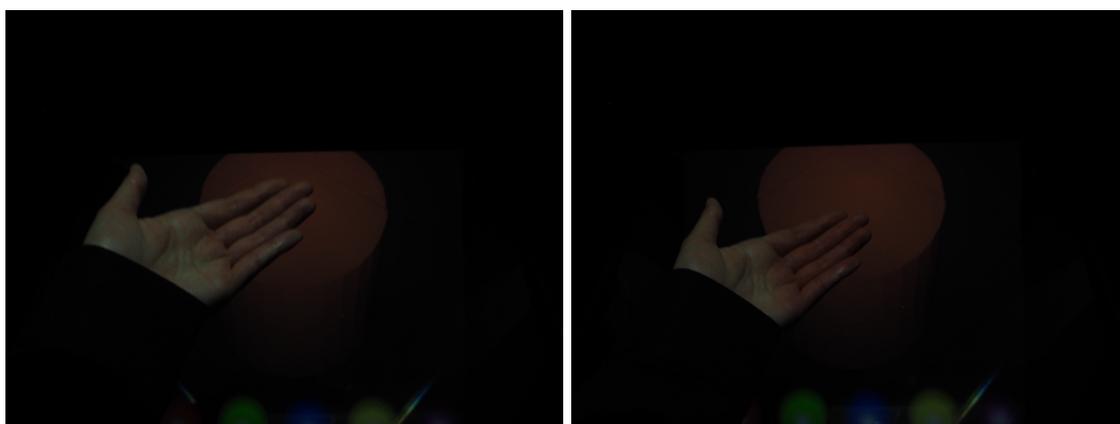


(f) 提案手法：手が物体表面から約 4cm 内部に存在

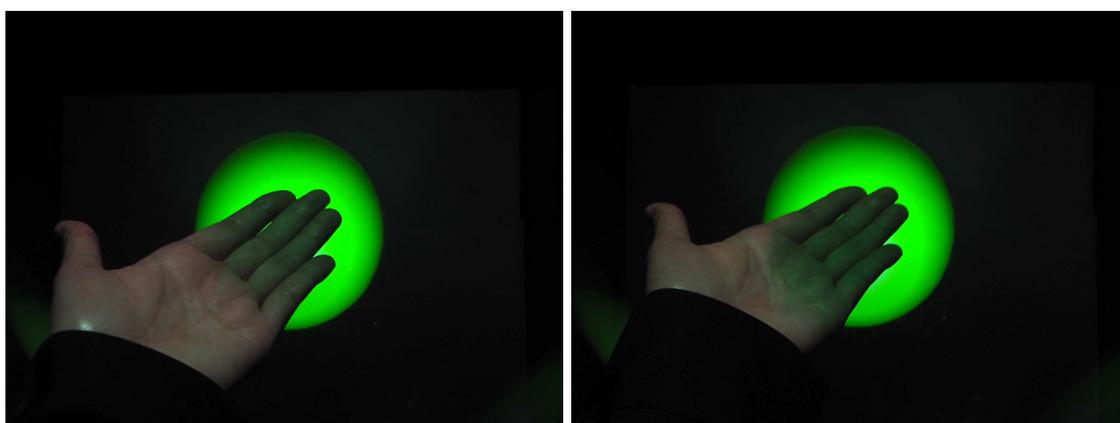
図 5.2: 円柱の空中 CG 物体でのオクルージョンを補完する投影映像の色濃度変化



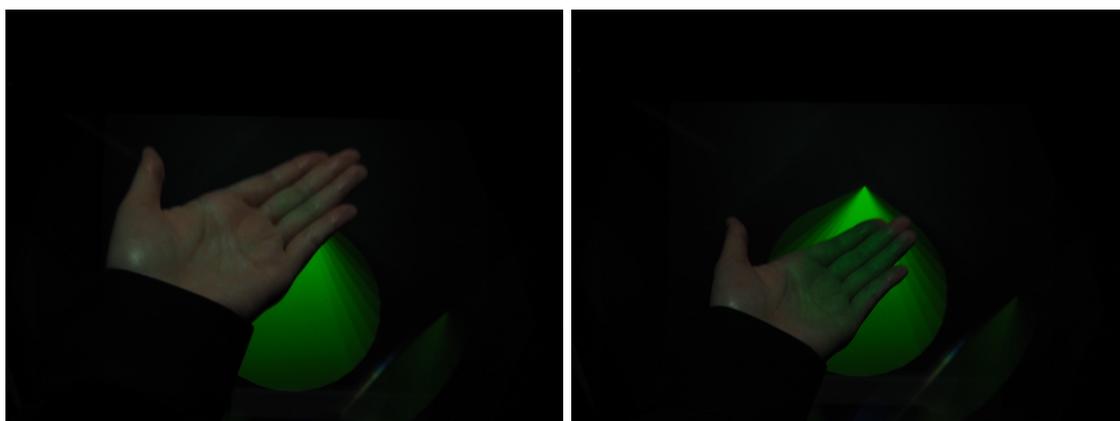
(a) 円柱 (青色 : RGB = (0.0, 0.0, 0.5))



(b) 円柱 (ピンク色 : RGB = (0.5, 0.2, 0.2))

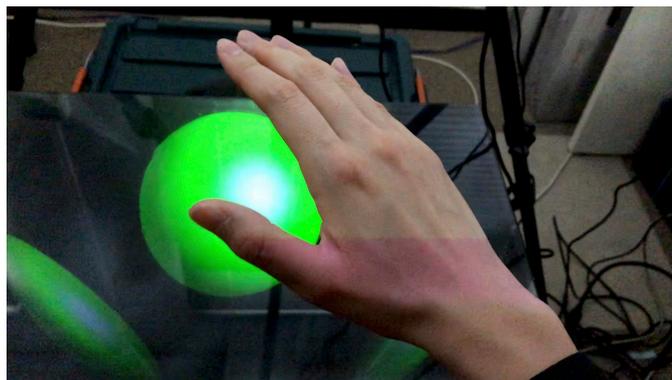


(c) 球体 (緑色 : RGB = (0.0, 0.5, 0.0))



(d) 円錐 (緑色 : RGB = (0.0, 0.5, 0.0))

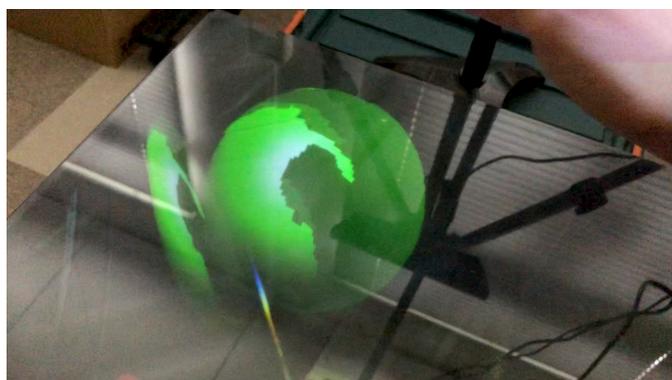
図 5.3: 様々な色と形状の空中 CG 物体でのオクルージョンを補完する映像の色濃度変化



(a) 従来手法：手が空中 CG 物体の上に存在



(b) 従来手法：手が空中 CG 物体の下に存在



(c) 提案手法：手が空中 CG 物体の上に存在



(d) 提案手法：手が空中 CG 物体の下に存在

図 5.4: 空中 CG 物体と手との相互の影の生成

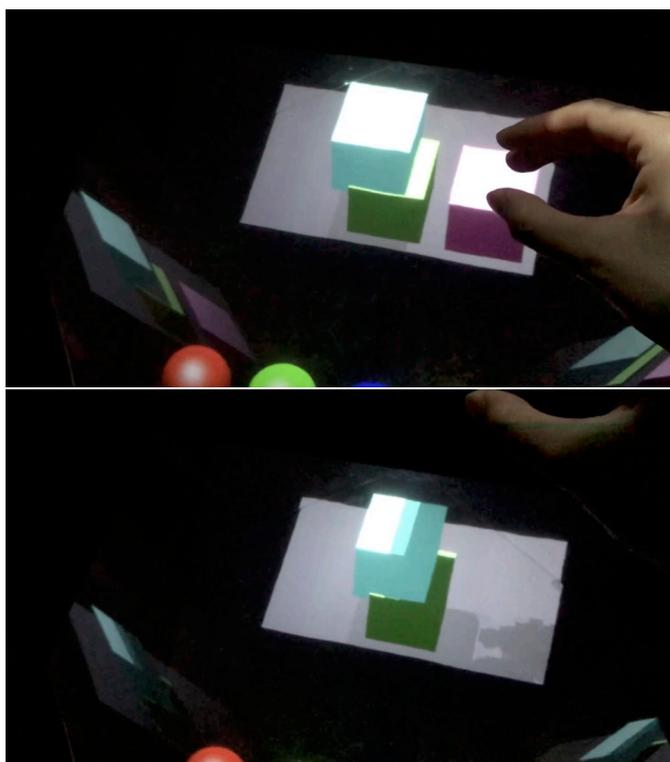


図 5.5: 手による空中 CG 物体のつまみ上げ操作における影の生成



図 5.6: 空中 CG 物体の描画操作における影の生成



図 5.7: 環境マッピングによる空中 CG 物体への周囲環境の映り込み

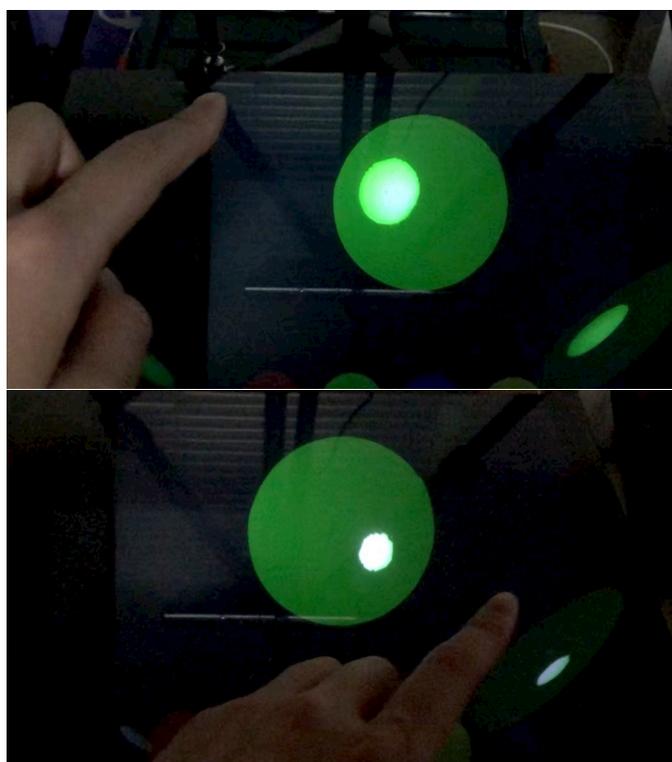


図 5.8: 空中 CG 物体へのスポットライトの照射

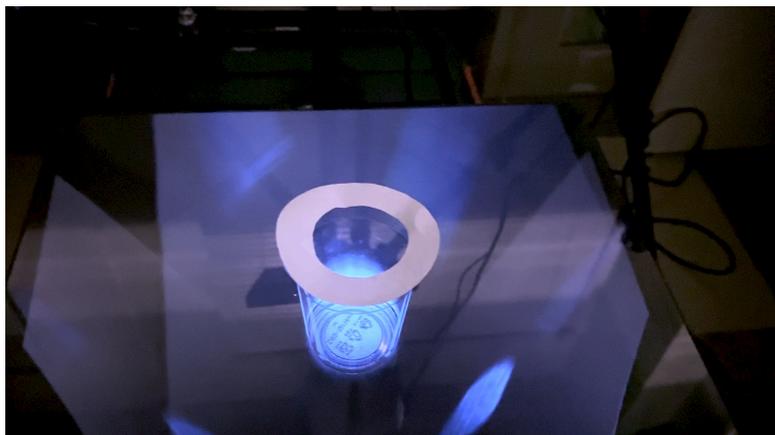


図 5.9: コップの位置に空中立体映像の流体を表示した様子

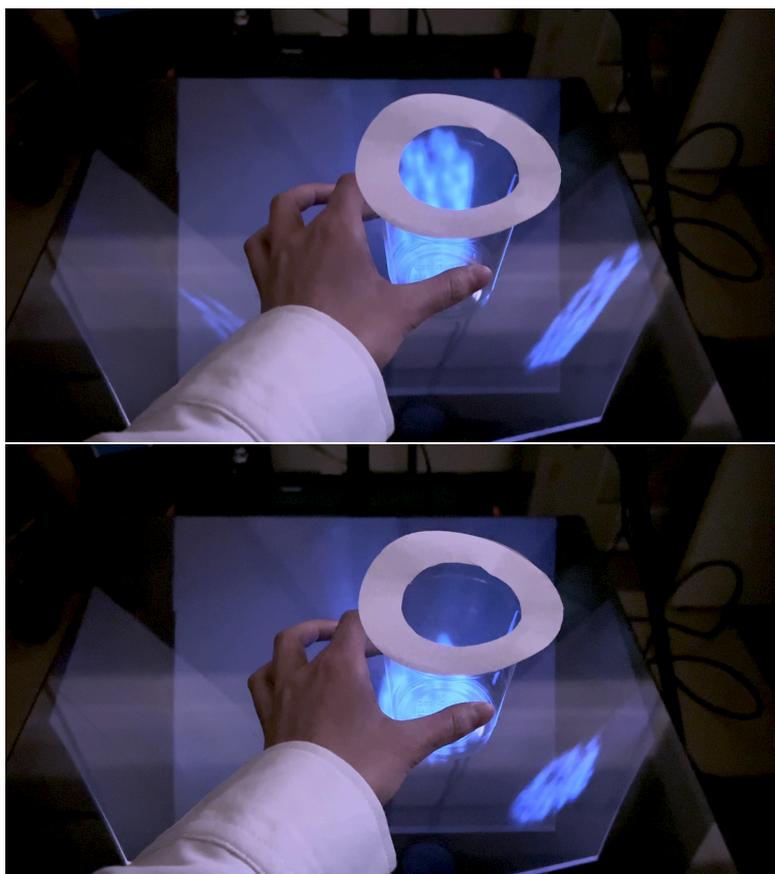


図 5.10: 上方から流体が注ぎ込まれている様子

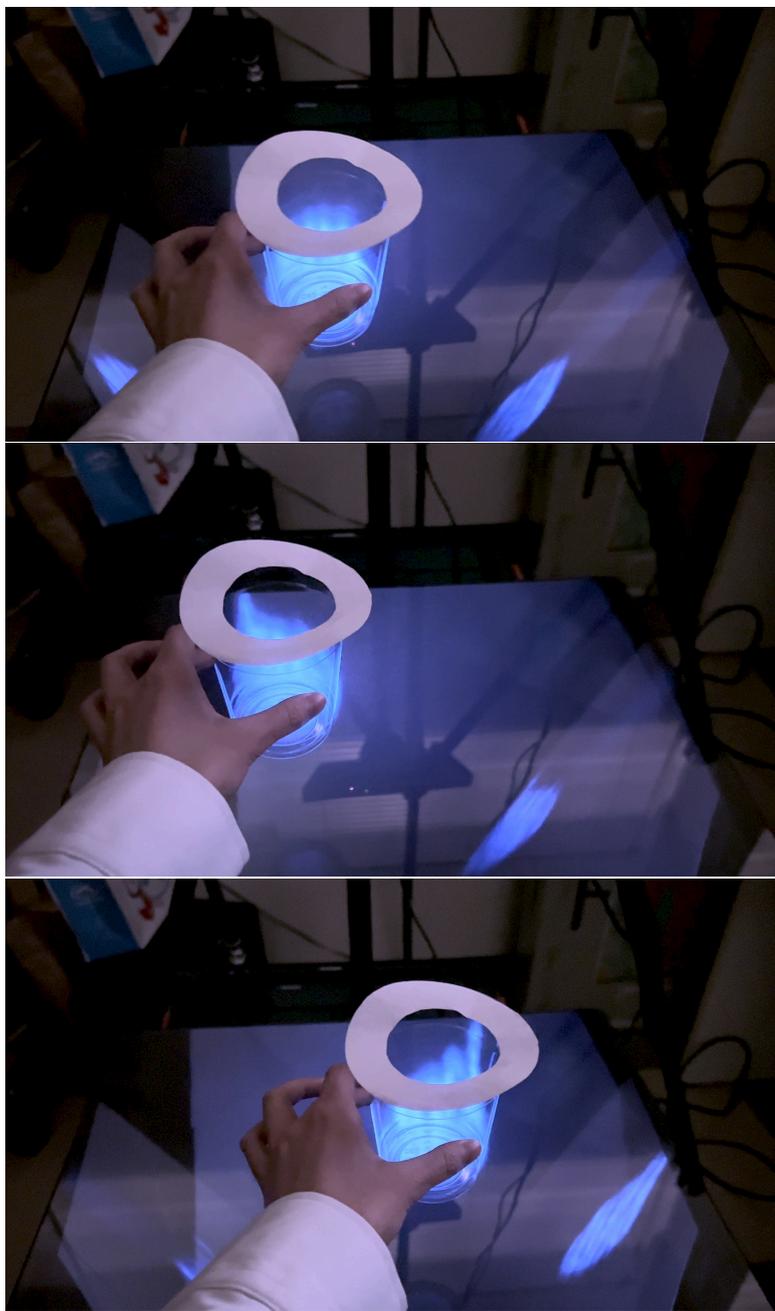
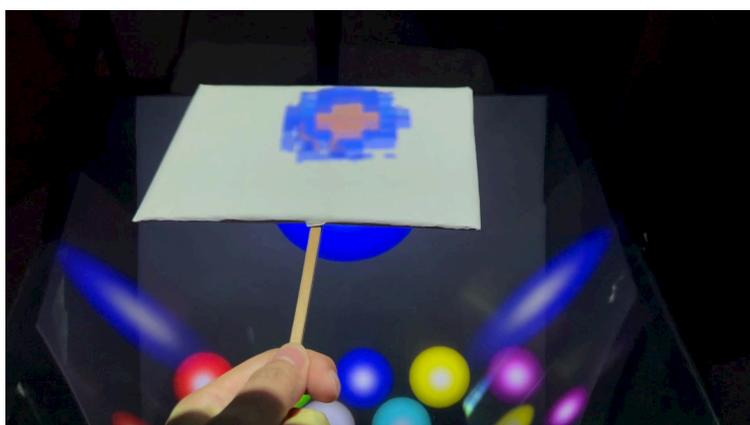


図 5.11: 実物体の移動に応じて流体が揺れている様子



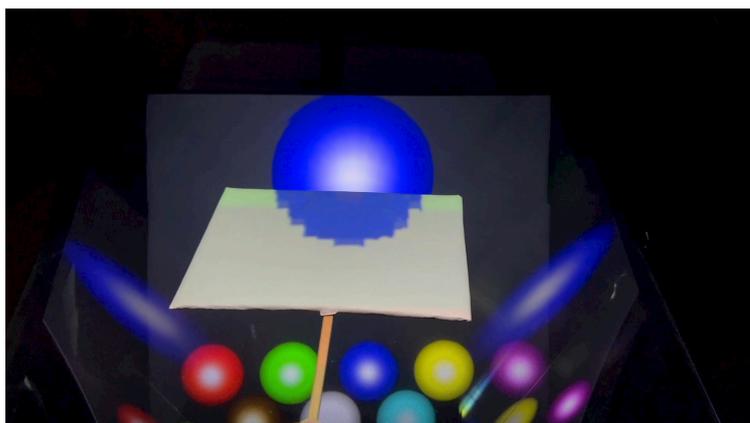
(a) 空中立体映像の上



(b) 空中立体映像の中 (上部)

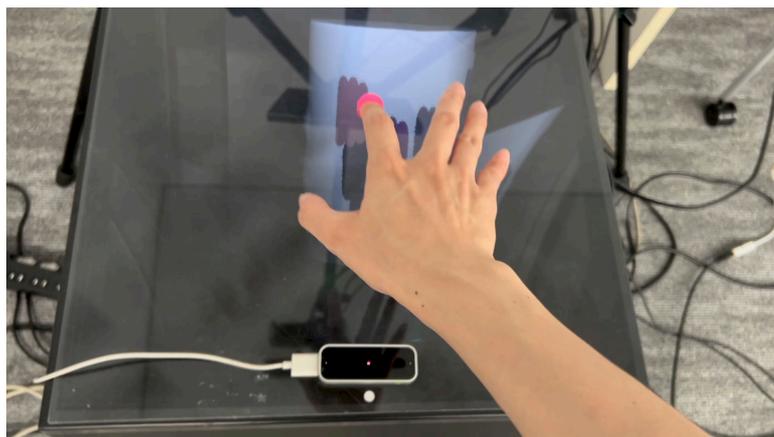


(c) 空中立体映像の中 (下部)

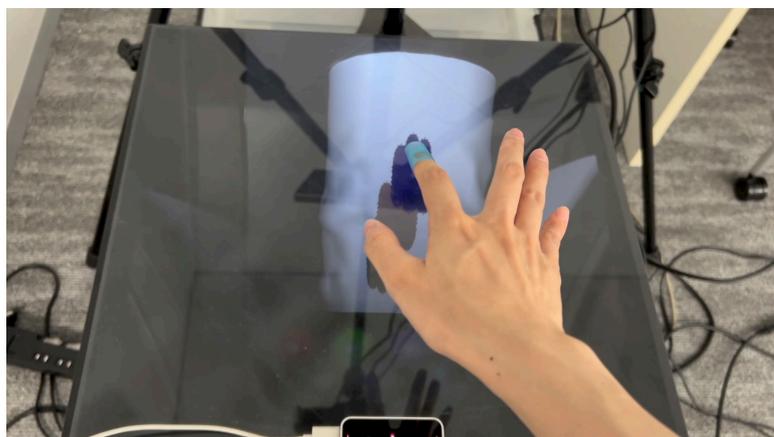


(d) 空中立体映像の下

図 5.12: 平板による空中立体映像とのインタラクション



(a) ピンク色の場合



(b) 青色の場合

図 5.13: 空中立体映像に対する描画

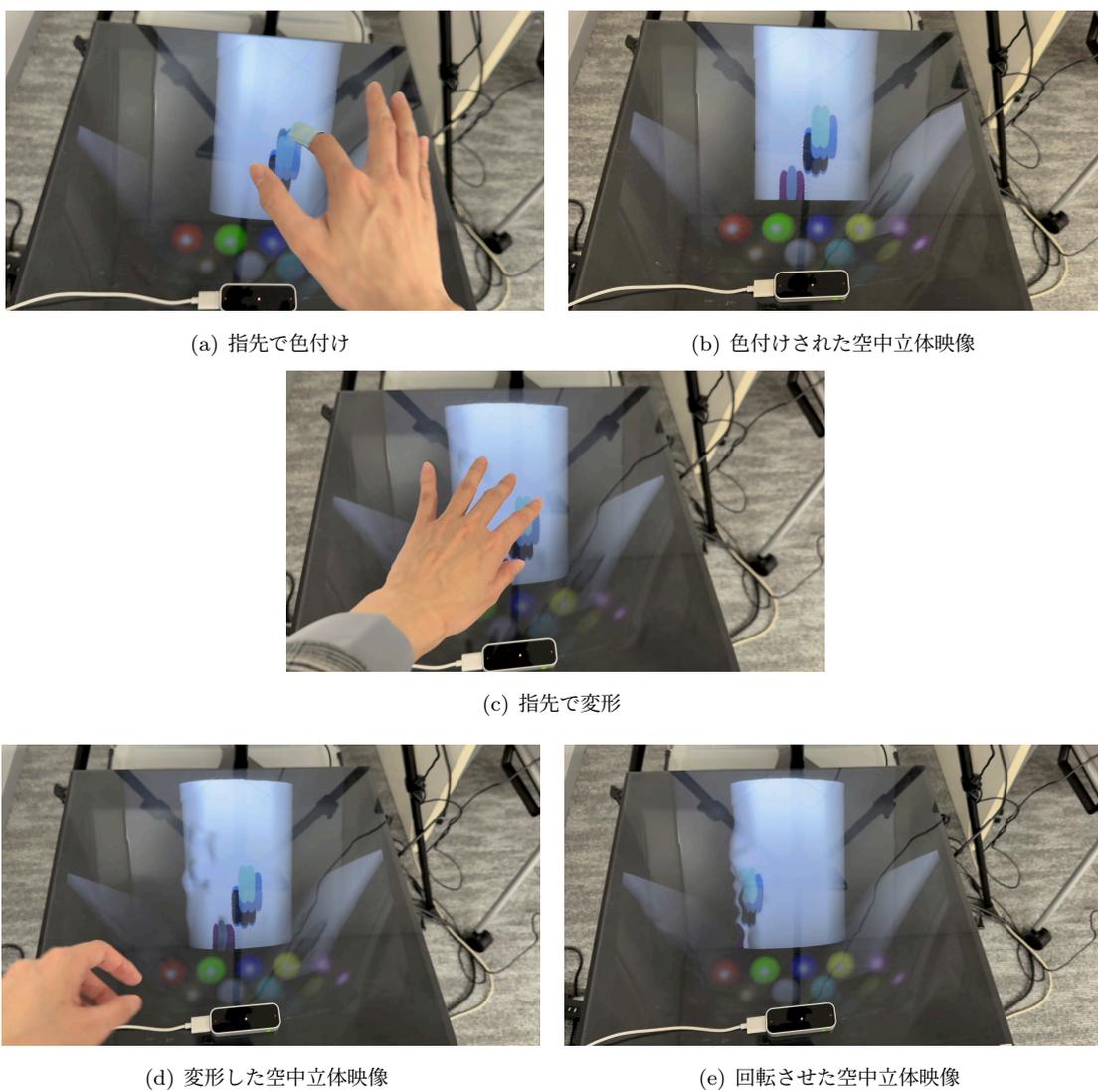


図 5.14: 空中立体映像に対する描画と変形

## 第6章 考察

### 6.1 半透明オクルージョン

本論文の提案手法を検証するため、4名のユーザ（20代）を被験者として、空中CG物体の観察と手による操作の実験とアンケート調査を行った。各ユーザには、透明度提示の概念を取り入れていない従来手法の空中CG物体と、透明度の概念を取り入れた本論文の提案手法に空中CG物体を扱ってもらった。透明度の概念を取り入れた空中CG物体については、色（緑色：RGB = (0.0, 0.5, 0.0), 青色：RGB = (0.0, 0.0, 0.5), ピンク色：RGB = (0.5, 0.2, 0.2)), 透明度（ポリウムレンダリング用ブロックのアルファ値が0.03, 0.02, 0.01), 形状（円柱, 立方体, 球, 円筒), サイズ（10cm角内, 5cm角内）を変えながらユーザに提示して、手で触れるような動作をしながら観察してもらった。投影像の背景色は、4.1章の実験と同じでRGB=(0.5, 0.5, 0.45)とした。

従来手法と本論文の提案手法との比較では、全員が提案手法による空中CG物体の方が自然であるという回答であった。具体的には、「提案手法による空中CG物体はそこに色の付いた透明の液体があるような感じがするのに比べて、従来手法はライトで照らされているような感じがする」「提案手法による空中CG物体の中に手を入れると、それが半透明であることを実感する」「従来手法に手を入れたときは、奥行き感があまり感じられない」などの感想が得られた。本論文の提案手法によって、空中CG物体と手の位置関係が把握しやすくなったり、空中CG物体の素材特性を与えることができるようになったりすることが示唆された。

提案手法同士での色の違いに関する比較では、全員が緑色が最も自然という感想であった。具体的には、「青色は影のような感じがする」「ピンク色は透明度が高い感じがする」という感想が得られた。提案手法では、手に投影する映像の背景色がベースとなり、そこから空中半透明CG物体の透明度に応じて投影輝度値は減少する。そのため、肌の色に近いピンク色は透明感が強く感じて、肌の色とは遠い青色は影のように感じた可能性がある。また、空中半透明CG物体と似たような性質の透明液体を考えた場合、緑色の透明液体は入浴剤などで身近に存在するのに対して、ピンク色や青色の透明液体は馴染みが薄く、今回の実験で不自然に感じた可能性もある。

提案手法同士での透明度の違いに関する比較では、3人はすべての透明度の違いが認識できたのに対して、1人はアルファ値が0.03と0.02の違いが認識できなかった。また、1名がアルファ値が0.01の場合には色が薄くてわかりにくいという回答であった。空中半透明CG物体の想定する透明度によってポリウムレンダリング用ブロックのアルファ値を変化させる必要があるが、色の違いに関する実験結果も考慮すると、アルファ値だけでなくRGB値も調整することで、より自然な透明感を実現できる可能性がある。

提案手法同士での形状の違いに関する比較では、円柱や立方体など辺が明確な物体は奥行き感が強く感じるが、一方で不自然さも感じるという感想が2件あった。空中に半透明で実際に存在する物体は煙や霧などであり、辺が明確な半透明物体は現実離れしているため、不自然さを感じる結果となった可能性がある。

提案手法同士でのサイズの違いに関する比較では、全員が単に空中半透明CG物体のサイズが変化しただけに感じるという感想であった。

この実験の結果から、本研究で提案した空中CG物体に対する透明度の提示の概念の導入は、より自然な空中半透明CG物体の表示やインタラクションに有効である可能性が示された。また、色や形状の違い

によって空中 CG 物体に対する感じ方がかなり変わる可能性が示された。透明度の違いを表現できる可能性も示された。そして、空中 CG 物体のサイズについてはあまり大きな影響がない可能性がある。

## 6.2 実物体間との影の生成

影の投影については、5.4 節の実験結果について考察する。従来手法では、空中 CG 物体に触れたり、空中 CG 物体の奥に手を移動させない限り、空中 CG 物体とのインタラクションを観察することはできなかった。しかし、影を反映させたことにより、空中 CG 物体に手をかざせばユーザの動きに空中 CG 物体が反応していることが観察できるため、空中 CG 物体が実際にその場に存在するように感じられるようになった。また、影が投影されることにより空中 CG 物体と手との位置関係がより明瞭に提示できるようになった。

## 6.3 実環境の映り込み

周囲環境の反映については、5.5 節の実験結果について考察する。周囲環境の反映により、鏡や金属のような表面に周囲環境の映り込みが起こる空中 CG 物体の表現が可能になった。また、空中 CG 物体に手を伸ばせば手が徐々に大きく映るようになるため、手と空中 CG 物体の位置関係が提示できる。ただし、周囲環境を把握するための全周囲カメラは空中 CG 物体の奥に置かれている。そのため、手が空中 CG 物体の比較的近い場所にあると、手が空中 CG 物体に近づいても空中 CG 物体表面の手の大きさの変化が緩やかであるように見えるため、違和感を感じることもある。これを解消するためには、全周囲カメラで取得した画像を空中 CG 物体の位置を視点とするような画像に変換するなどの工夫が必要となる。

## 6.4 コップ内の流体表現

流体表現については、5.6 節の実験結果について考察する。使用したコップは透明な薄いプラスチック製のものであったため屈折の影響は少なく、映像は歪むことなく鮮明に観察できた。また、ユーザのコップの操作に応じて空中立体映像は滑らかに変化し、実際にコップの中に液体が入っているように観察できた。

## 6.5 断面の表現

断面の表現については、5.7 節の実験結果について考察する。提案手法により、ユーザは平板を動かすことで空中立体映像の断面を観察できる。平板の位置に応じて表示する断面が変わるため、実際に空中立体映像の内部を観察しているように感じられた。また、空中立体映像より上部にある場合には平板に映像は投影されず、完全に下部にある場合にはオクルージョンを補完するための映像が投影されるため、従来手法と同様に空間的な整合性を保ったまま空中立体映像を観察できた。

## 6.6 実空間のインクでの色塗り

空中立体 CG 映像に対する描画については、5.8 節の実験結果について考察する。実際の指先の色を考慮して描画されるため、空中立体映像に対して指先にインクを付着させ色付けをしているように感じられた。また、空中立体映像を変形させることも可能なため、直感的に CG 物体を操作しているように感じられた。

## 6.7 全体の考察と今後の展開

本研究で提案した手法により、素材感の表現、実空間の反映、複雑なインタラクションが実現され、より実在感の高い立体空中映像表現が可能となった。しかし、MMAPを用いた空中像の持つ課題である視域の狭さや迷光、触覚フィードバックがないことがまだ解決されておらず、実在感を損ねる要因となりうる。ここでは、それぞれの問題について、これまでに提案された手法について述べる。

はじめに、視域が狭いことについて述べる。空中像の視域を拡大する手法が提案されている。Hoshiらは、AIRRを2つ用いることで水平方向に視域を拡大する手法を提案している [67]。室伏らは、ミラーを用いて空中像の視域を拡大する手法を提案している [68]。レンチキュラーレンズを用いた視差画像で立体視を実現しており、立体視ディスプレイを複数設置し、対称ミラー構造を利用して空間的に同位置にすることで視域拡大と立体視を実現している。横瀬らは、テーブルトップ空中像ディスプレイについて、テーブル奥を見込む領域での視域拡大を提案している [69]。対称ミラー構造を用いて実現している。明石らは、ASKA3Dを用いた空中像の水平方向の視域拡大を提案している [70]。輝度分布特性の実測に基づいて対称ミラーと素子のなす角を決定することで、高輝度での視域拡大を実現している。藤原らは、空中像をあらゆる方向から観察可能なシステムを提案している [71]。ユーザの顔の位置・視線をリアルタイムで計測し、空中ディスプレイの相対位置を制御することで実現している。Yanoらは、360度から観察可能な空中像を提案している [72]。MMAPと4枚のVCFを回転させることで、迷光を抑えつつあらゆる方向から観察可能な空中像を実現している。古谷らは、空中像の飛び出し距離を拡張する手法を提案している [73]。AIRR・フレネルレンズ・リニアアクチュエータを利用して、大きな輝度劣化なく実現している。像の歪みや解像度については未検証である。大川らは、大型かつ収差のない空中像の表示手法を提案している [74]。凸レンズを再帰透過光学系に関して対称に配置している。Kikuchiらは、対称ミラー構造を用いたテーブルトップ空中像で輝度が著しく低い視点位置を改善する手法を提案している [75]。ミラー位置を改善することで輝度を改善している。Kurogiらは、水平方向に並べて拡張可能な裸眼立体視ディスプレイを提案している [76]。

次に、迷光について述べる。片桐らは、空中像の輝度低下を抑えつつ迷光を低減する手法を提案している [77]。再帰透過光学系への入射角度の違いに着目し、迷光を生じさせる入射光のみを散乱させ、空中像の輝度低下を防いでいる。星らは、レンダリングと画像処理を組み合わせた迷光を検出する手法を提案している [78]。この手法を用いて、完全可視範囲の拡大について検討している。林らは、空中像と迷光のアフィン変換行列を求めて、ゲームエンジンで迷光の位置・変形を再現できる手法を提案している [79]。このシミュレーションはVR空間で観察可能である。また、空中像・VRシミュレーション上の空中像・VRオブジェクトの3つに対して、空中像の視域、インタラクションの2点について比較を行なった結果を報告している [80]。

空中像は直接触れられる映像であるが、実際に物体が存在するわけではないので、視覚的には触れていても触覚フィードバックはない。空中像に触覚を付与する研究について述べる。Monnaiらは、空中像に対して、装置の装着なしに触覚フィードバックを行う手法を提案している [81]。Inoueらは、空中像の触覚を付与し、あらゆる方向からの圧力を表現するシステムを提案している [82]。Morisakiらは、粗さの違う素材を表現可能な超音波触覚デバイスと組み合わせた空中像を提案している [83]。岡本らは、空中像に対して温かさを感じられる空中像を提案している [84]。光源と熱源を分離し、2層矩形ミラーアレイによって局所的に温める手法を実現している。

これらの手法と組み合わせることで、より実在感の高い立体空中映像が実現できる。

## 第7章 まとめ

本研究では、現実空間に存在するようにCG物体を表示する手法の開発を行った。従来手法である空中立体映像と実物体と空中立体映像の正しいオクルージョンを実現する手法を拡張し、空間的整合性を考慮した空中立体映像の表示とインタラクションについて提案した。具体的には、空中立体映像に対する実環境のインタラクティブな反映、空中立体映像の素材感の表現、空中立体映像との複雑な変形・生成インタラクションを提案した。提案手法により、実物体と空中立体映像とのより明瞭な位置関係の提示、空中立体映像の透明度の表現、空中立体映像に対する実空間の反映、複雑なインタラクションが実現された。結果として、空中立体映像として表示されたCG物体が実空間に存在するように観察しながらインタラクションすることができた。

今後の課題として、視野角の拡張、触覚の提示、迷光の低減があげられる。MMAPを用いた空中像では視野角が狭いため、観察時やインタラクション時に煩わしさを感じさせる可能性がある。また、視域から外れた際に、立体空中映像が正しく観察できず実在感の低下につながる。加えて、空中立体映像が表示されている場所には何もなかったため、インタラクション時に触覚フィードバックはない。そのため、空中立体映像に触れているかどうかをユーザは視覚的に判断するしかなく、実際に触れている実感を低下させる要因となり、これも実在感を減少させる。また、迷光の存在は快適な観察の妨げとなる。これらの課題を解決することで、より実在感のある空中立体映像が実現できる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの御指導、御鞭撻を賜りました水野慎士教授、森本正志教授、北坂孝幸教授に深く感謝致します。また、日頃から熱心に討論、助言してくださいました水野慎士研究室のみなさんに深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 橋本 直己, 東 佑圭:霧を用いた空中立体像提示システムの提案, 映像情報メディア学会誌, 65 巻, 7 号, pp.1007-1010, 2011.
- [2] Mayumi Takazaki, Mayu Asakura, Shinji Mizuno: Creating Interactive Digital Contents “ Muchu Genka ” and “ Virtual Ikebana ” Based on Japanese Flower Arrangement, IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2021), 2021.
- [3] Yoichi Ochiai, Kota Kumagai, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki: Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields, ACM Trans. Graph. 35, 2, Article 17, 2016.
- [4] Hirotsugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), Opt. Express 22, 26919-26924, 2014.
- [5] Naoya Koizumi: Sunny Day Display: Mid-air Image Formed by Solar Light, In Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '17), 2017.
- [6] Ayaka Sano, Naoya Koizumi: Mid-air imaging technique for architecture in public space, in Proc. IS&T Int'l Symp. on Electronic Imaging: Stereoscopic Displays and Applications XXIX, pp.111-1 - 111-9, 2018.
- [7] Naoya Koizumi and Ayaka Sano: Optical system to display mid-air images on a glossy plane and remove ground images, Opt. Express 28, 26750-26763, 2020.
- [8] Yui Osato, Naoya Koizumi: Compact optical system displaying mid-air images movable in depth by rotating light source and mirror, Computers & Graphics, Volume 91, pp.290-300, 2020.
- [9] 星 彩水, 巻口 誉宗, 佐野 文香, 千明 裕, 望月 崇由: タッチパネル上に直立空中像を表示する光学系とそのインタラクションの初期検討, 情報処理学会 インタラクション 2024, pp.907-912, 2024.
- [10] 森 登志樹, 古谷 佳輝, 崔赫 秦, 中村 優吾, ハウタサーリ アリ, 福嶋 政期: 漫符を顔の周りに提示する椅子型空中像インタフェースの基礎検討, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2E2-08, 2024.
- [11] 山本 紘暉, 梶田 創, 小泉 直也, 苗村 健: EnchanTable: テーブル面の反射を用いた直立空中像ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21 巻, 3 号, p. 401-410, 2016.
- [12] 平井 良磨, 井村 誠孝: 再帰透過素子を用いた光学的整合性を有する空中ディスプレイ, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2024, pp.278-285, 2024.
- [13] 福岡美結, 小泉直也: 2次元空中像の立体感提示のための動的な照明の提案, 情報処理学会研究報告, Vol.2024-EC-74, No.6, 2024.

- [14] 室井 克仁, 大島 登志一: 積層式導光プリズムによる疑似空中像型タンジブルユーザインタフェースの研究, 情報処理学会 インタラクション 2024, pp.1240-1245, 2024.
- [15] Hanyuool Kim, Shun Nagao, Satoshi Maekawa, Takeshi Naemura : MRsionCase: A Glasses-free Mixed Reality Showcase for Surrounding Multiple Viewers, ITE Transactions on Media Technology and Applications, Volume 2, Issue 3, Pages 200-208, 2014.
- [16] 滝山 和晃, 岩根 透, 陶山 史朗, 山本 裕紹: 再帰反射による空中結像 (AIRR) への凸レンズ導入による解像度の向上, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2E2-03, 2024.
- [17] 永野 里奈, 服部 真吾, 平木 剛史: 不可視の色振動を用いた空中像への情報埋め込み手法の基礎検討, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1D4-2, 2022.
- [18] Mizuki Takenawa, Tomoyo Kikuchi, Yuchi Yahagi, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura : ReQTable: Square tabletop display that provides dual-sided mid-air images to each of four users, In ACM SIGGRAPH 2022 Emerging Technologies (SIGGRAPH '22), 2022.
- [19] Ayaka Sano, Motohiro Makiguchi, Ayami Hoshi, Hiroshi Chigira, and Takayoshi Mochizuki : Aerial Imaging System to Reproduce Reflections in Specular Surfaces. In Proceedings of the 30th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '24), 2024.
- [20] Motohiro Makiguchi, Ayaka Sano, Takahiro Matsumoto, Hiroshi Chigira, and Takayoshi Mochizuki : Implementation of Interactive Mirror-Transcending Aerial Imaging System, In Proceedings of the 2023 ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI '23), 2023.
- [21] Motohiro Makiguchi, Ayami Hoshi, Ayaka Sano, Takahiro Kusabuka, Hiroshi Chigira, and Takayoshi Mochizuki : Mirror-Transcending Aerial Imaging System for Multiple Users, In ACM SIGGRAPH 2024 Emerging Technologies (SIGGRAPH '24), 2024.
- [22] 明石 穂紀, 韓 燦教, 苗村 健: 鏡に映り込む空中像と鏡に吸い込まれる空中像, 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1C2-02, 2023.
- [23] 野口 拓馬, 武井 亮, 日暮 拓海, 福地 健太郎: 円偏光方式の立体ディスプレイを用いた鏡に実像と異なる鏡像を表示する手法の提案, 情報処理学会 インタラクション 2022, pp.156-159, 2022.
- [24] 室伏 皓太, 橋本 直己: 形状変化が可能な広視野角フルパララックス立体空中像の検討, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1C-08, 2019.
- [25] 室伏 皓太, 橋本 直己, 視差を再現した立体空中像の奥行き知覚への影響, 映像情報メディア学会誌, 74 巻, 1 号, pp.222-225, 2020.
- [26] 柴田 龍一, 橋本 渉, 水谷 泰治, 西口 敏司: 回転するハーフミラーを用いたペッパーズゴーストによる全方位型立体像提示装置, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3G-20, 2022.
- [27] 吉田 俊介: メガネなしテーブル型 3D ディスプレイ技術 fVisiOn, 画像電子学会誌, 45 巻, 3 号, pp. 392-396, 2016.
- [28] Mari Shiina and Naoki Hashimoto: Transparent 360-Degree Display for High-Resolution Naked-Eye Stereoscopic Aerial Images, SIGGRAPH Asia 2024 Posters (SA Posters ' 24), 2024.
- [29] 杉本 佳亮, 水野 慎士: MMAP とミストを使った空中立体映像システムの開発, 情報処理学会論文誌・デジタルコンテンツ, Vol. 11, No. 2, pp.1-11(2023).

- [30] 杉本 佳亮, 水野 慎士 : 可視化された光線の空中映像化とインタラクションの実現, 情報処理学会 インタラクション 2024, pp.490-493, 2024.
- [31] Yuta Ueda, Karin Iwazaki, Mina Shibasaki, Yusuke Mizushina, Masahiro Furukawa, Hideaki Nii, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi:HaptoMIRAGE: mid-air autostereoscopic display for seamless interaction with mixed reality environments, In ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies (SIGGRAPH '14), 2014.
- [32] Hideaki Nii, Kening Zhu, Hiromi Yoshikawa, Nyan Lin Htat, Roland Aigner, and Ryohei Nakatsu : Fuwa-Vision: an auto-stereoscopic floating-image display, In SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies (SA '12), 2012.
- [33] Nahomi Maki, Toshiaki Yamanouchi, and Kazuhisa Yanaka : 3D aerial display with micro mirror array plate and reversed depth integral photography, In ACM SIGGRAPH 2019 Posters (SIGGRAPH '19), 2019.
- [34] Kei Tsuchiya, Ayaka Sano, and Naoya Koizumi : Interaction system with mid-air CG character that has own eyes, In SIGGRAPH Asia 2018 Posters (SA '18), 2018.
- [35] 水田 柚花, 土谷 慧, 小泉 直也 : Avatar Crossing : 空中像を用いた移動可能な実世界CGアバタシステム, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2020, pp.17-25, 2020.
- [36] Ayami Hoshi, Shunji Kiuchi, and Naoya Koizumi : PicPop: A pop-up picture book comprising mid-air images, In Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '21), 2021.
- [37] M. Fukuoka, S. Ando,N. Koizumi : Prototype to Control a Mid-air CG Character Using Motion Capture Data of a Plush Toy, International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments, 2022.
- [38] 柏木 嵐, 林 竜吾, 小泉 直也 : 空中像の欠如を防ぐための指さし入力方法の基礎検討, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2E2-05, 2024.
- [39] 中村 一翔, 佐野 遵平, 小泉 直也 : 指による映像欠如を防ぐ空中像ボタン入力手法の基礎検討, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2E2-06, 2024.
- [40] 小湊 咲, 福岡 美結, 小泉 直也 : 指さしによる空中像の結像位置知覚および立体感の評価, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2E2-07, 2024.
- [41] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda : HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16), 2016.
- [42] Hajime Kajita, Naoya Koizumi, and Takeshi Naemura : SkyAnchor: Optical Design for Anchoring Mid-air Images onto Physical Objects, In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16), 2016.
- [43] 菅原 陵央, 林 竜吾, 小泉 直也 : Followingraphic Display: 実物体に追従する空中像, 情報処理学会 インタラクション 2024, pp.913-916, 2024.

- [44] Yu Matsuura and Naoya Koizumi : Scoopirit: A Method of Scooping Mid-Air Images on Water Surface, In Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '18), 2018.
- [45] 安藤 将平, 小泉 直也 : 各種再帰透過光学系を用いた空中カメラで撮影可能な範囲, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2D2-6, 2021.
- [46] Shohei Ando and Naoya Koizumi : Floagent: Interaction with Mid-Air Image via Hidden Sensors, In SIGGRAPH Asia 2022 Emerging Technologies (SA '22), 2022.
- [47] S. Ando and N. Koizumi : An Optical Design for Interaction With Mid-Air Images Using the Shape of Real Objects, IEEE Access, vol. 12, pp. 39129-39138, 2024.
- [48] S. Kiuchi and N. Koizumi : Distortion-free Mid-air Image Inside Refractive Surface and on Reflective Surface, IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 606-614, 2022.
- [49] Toshikazu Ohshima and Kai Nishimoto : HoloBurner: Mixed Reality Equipment for Learning Flame Color Reaction by using Aerial Imaging Display, In SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies (SA '21), 2021.
- [50] 余合 彩子, 倉本 大資, 韓 燦教, 苗村 健 : AIR-range Plus : テーブル上を動き回る複数の空中像とのインタラクション, 情報処理学会 インタラクション 2024, pp.468-473, 2024.
- [51] Hanyuool Kim, Issei Takahashi, Hiroki Yamamoto, Satoshi Maekawa, Takeshi Naemura : MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects, Entertainment Computing, Volume 5, Issue 4, pp.233-241, 2014.
- [52] Yutaro Yano, Naoya Koizumi : Mid-air image 's background changes the impression of a mid-air image, International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments, 2023.
- [53] 福地 健太郎, 松浦 向日葵, 大野 貴広 : テーブル上に投影された空中立体映像に対する影を用いたインタラクション手法, 情報処理学会 インタラクション 2022, pp.747-750, 2022.
- [54] 梶田 創, 小泉 直也, 苗村 健 : OpaqueLusion: 多層空中像におけるオクルージョン表現の基礎検討, 情報処理学会 インタラクション 2015, pp.1010-1015, 2014.
- [55] 巻口 誉宗, 高田 英明, 新島 有信, 松井 龍也, 横山 正典 : モバイル端末で利用可能な小型多層空中像投影装置の提案と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.58, No.11, pp.1787-1798, 2017.
- [56] 巻口 誉宗, 高田 英明, 坂本 大介, 小野 哲雄 : 両面透過型多層空中像表示技術の提案と実装, 情報処理学会論文誌・デジタルコンテンツ, Vol. 8, No. 1, pp.1-10, 2020.
- [57] 村瀬香緒里, 小木哲朗, 齋藤康太, 小山尚英 : 大画面ハーフミラーによる没入型拡張現実環境の構築とオクルージョン表現, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp.141-150, 2008.
- [58] D. Kurz, K. Kiyokawa, H. Takemura: Mutual Occlusions on Table-top Displays in Mixed Reality Applications, Proc. of ACM VRST 2008, pp. 227-230, 2008.
- [59] B. J. Rogers, M. Graham: Motion Parallax as an Independent Cue for Depth Perception, J. of Perception, No. 8, pp. 125-134, 1979.

- [60] 原田一馬, 菅野祐介, 佐藤洋一: 運動視差を用いた直感的なマルチタッチインタラクション, インタラクション 2012 論文集, pp. 795–800, 2012.
- [61] 塚田真未, 川島卓也, 水野慎士: 運動視差を用いた立体視 CG システムの構築と科学館での活用の検討, 情報処理学会研究報告, デジタルコンテンツクリエイション, 2013-DCC-4, No. 3, 2013.
- [62] 上原悠永, 水野慎士: 擬似的三次元コピーの生成とインタラクションの実現方法, 情報処理学会論文誌・デジタルコンテンツ, Vol. 3, No. 2, pp. 22–31, 2015.
- [63] 水野慎士: 2人用テーブルトップ型運動視差立体視 CG システムによる CG 空間の共有とインタラクション, 情報処理学会論文誌・デジタルコンテンツ, Vol. 5, No. 2, pp. 1–10, 2017.
- [64] S. Mizuno, M. Tsukada, Y. Uehara: Developing a Stereoscopic CG System with Motion Parallax and Interactive Digital Contents on the System for Science Museums, Springer International Journal of Multimedia Tools and Applications, 76, pp. 2515-2533, 2017.
- [65] OpenGL 策定委員会: OpenGL プログラミングガイド原著第5版, ピアソン・エデュケーション, 2006.
- [66] Wladimir J. van der Laan, Simon Green, and Miguel Sainz : Screen space fluid rendering with curvature flow, In Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games (I3D '09), 2009.
- [67] Ayami Hoshi, Motohiro Makiguchi, Ayaka Sano, Hiroshi Chigira, and Takayoshi Mochiduki : Aerial image display with expanded viewing area that can be viewed by multiple people. In Proceedings of the 2023 ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI '23), 2023.
- [68] 室伏 皓太, 橋本 直己 : 複数の立体ディスプレイの組み合わせによる立体空中像の視域拡大, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 25 巻, 4 号, p.432-438, 2020.
- [69] 横瀬 哲也, 阪口 紗季, 苗村 健 : 対称ミラー構造を用いたテーブルトップ空中像ディスプレイ, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1C-02, 2019.
- [70] 明石 穂紀, 韓 燦教, 苗村 健 : 空中像光学系の水平視域拡大のための対称ミラー構造の設計, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2E2-04, 2024.
- [71] 藤原 徹平, 井村 誠孝 : 二面直交リフレクタアレイを用いた視点追従空中ディスプレイ, 情報処理学会 インタラクション 2017, pp.162-165, 2017.
- [72] Yutaro Yano and Naoya Koizumi : Omnidirectional mid-air image system using micro-mirror array plates, Opt. Express 32, 21473-21486, 2024.
- [73] 古谷 佳輝, 福嶋 政期 : 再帰反射による空中結像における飛び出し距離の拡張, 情報処理学会 インタラクション 2023, pp.340-343, 2023.
- [74] 大川 達也, 横瀬 哲也, 苗村 健 : 結像素子より大きな空中像を表示する対称光学系の提案, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 13D-2, 2018.
- [75] Tomoyo Kikuchi, Yuchi Yahagi, Shogo Fukushima, Saki Sakaguchi, Takeshi Naemura : AIR-range: Designing optical systems to present a tall mid-AIR image with continuous luminance on and above a tabletop, ITE Transactions on Media Technology and Applications, Volume 11, Issue 2, pp. 75-87, 2023.

- [76] Tadatoshi Kurogi, Hideaki Nii, Roshan Lalintha Peiris, and Kouta Minamizawa : Scalable Autostereoscopic Display for Interaction with Floating Images. In Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '18), 2018.
- [77] 片桐 麦, 草間 健太郎, 小泉 直也 : 異方性光拡散フィルムを用いた空中像ディスプレイのゴースト低減, 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1C2-07, 2023.
- [78] 星 彩水, 木内 舜司, 小泉 直也 : 環境反射空中像装置において迷光を見せないための設計, 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2B3-1, 2020.
- [79] 林 竜吾, 齋藤 旭, 小泉 直也 : ゲームエンジンを用いた再帰透過光学素子における迷光の位置・変形の再現, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3E1-5, 2022.
- [80] 林 竜吾, 小泉 直也 : 実空間及び VR 空間での空中像インタラクションの比較, 第 71 回 情報処理学会エンタテインメントコンピューティング研究会, 2024.
- [81] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda : HaptoMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen, In Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '14), 2014.
- [82] Seki Inoue, Koseki J. Kobayashi-Kirschvink, Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda : HORN: the hapt-optic reconstruction, In ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies (SIGGRAPH '14), 2014.
- [83] Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda : Midair Haptic-Optic Display with Multi-Tactile Texture based on Presenting Vibration and Pressure Sensation by Ultrasound, In SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies (SA '21), 2021.
- [84] 岡本 智行, 小堀 智史, 小野瀬 翔, 小貫 健太, 堀江 ひとみ, 久次米 亮介, 糸井川 高穂, 山本 裕紹 : 空中結像技術と温度感覚表示技術による空中ディスプレイ, 映像情報メディア学会技術報告, 41.02 巻, 41.02 情報ディスプレイ, セッション ID IDY2017-8, p. 61-64, 2017.