



Title	計算機合成ホログラムの動画の高速生成法に関する研究
Author(s)	渡邊, 良亮
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第14137号
Issue Date	2020-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14137
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78282
Type	doctoral thesis
File Information	Ryosuke_Watanabe.pdf



-博士論文-

計算機合成ホログラムの
動画の高速生成法に関する研究

Study on Fast Calculation Algorithm
for Computer-Generated Hologram Video

北海道大学大学院 情報科学研究科
メディアネットワーク専攻
渡邊 良亮

令和2年2月

学位論文内容の要旨

計算機博士の専攻分野の名称 博士（情報科学） 氏名 渡邊 良亮

学位論文題名

計算機合成ホログラムの動画の高速生成法に関する研究

(Study on Fast Calculation Algorithm for Computer-Generated Hologram Video)

近年、三次元表示技術が注目を集めており、映画やテレビ、ゲームなどの分野において実用化が進んでいるが、現在実用レベルで利用されている3次元表示方式は、左右の眼に異なる画像を見せるステレオグラム方式である。この方式は、両眼間の視差情報を基に物体を立体として認識できるものの、眼球の焦点が映像を映しているスクリーンの位置に調節されるため、焦点調節と輻輳との間で不整合が生じ、観察者が違和感や疲労感を抱くことが問題視されてきた。このような問題点を解決するために、人間の立体視の生理的要因をすべて満たすような三次元表示技術が必要である。そこで、人間が立体感を知覚するために必要とする生理的要因をすべて満たす三次元表示技術として知られているのがホログラフィである。ホログラフィ技術では、実物体を知覚するのと同様の光波を再現することで、実物と見間違ふような写実的な三次元表示を実現する。

本研究がターゲットとしている計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram : CGH) は、ホログラフィの記録の原理を、計算機を用いて実現する技術である。仮想物体を計算機内で定義し、それらからの光の伝搬や干渉を計算機内部でシミュレートし、最終的に画像データ等の電子媒体としてホログラムを出力する。CGHは記録に関し複雑な光学系を必要としないことに加え、計算機内で作成したコンピュータグラフィックス (Computer Graphics : CG) 等で定義される仮想物体から、光波の伝搬や干渉をシミュレーションして立体像を生成できることや、時間の流れと共に電子ディスプレイ上のホログラムを切り替えることで、ホログラフィの動画を作成できることなどの利点がある。

一方、CGHにはさまざまな課題も存在している。主な課題としては、3DのCGで表現される仮想物体からCGHを生成する際のレンダリング技法が確立されていないことや、視聴する際の視野角が狭いこと、CGH生成の際の光波シミュレーションの計算時間が大きいことなどが挙げられる。これらの問題を解決する一つの従来手法として、レイトレーシング法を用いた計算機合成ホログラムの生成手法が提案されてきた。この手法はCGの代表的なレンダリング手法の一つであるレイトレーシング法をCGHに拡張することで、写実的なCGHのレンダリングを実現する。加えて、この計算法をフーリエ変換光学系と呼ばれるレンズを用いた視野拡大手法に適用させたことで狭視野の問題を解決していた。一方、この従来手法の光波伝搬シミュレーションの計算時間は膨大で、計算時間の削減に関しては未解決であった。

そこで、本論文では写実性の高いレイトレーシング法を用いたCGHの計算手法の処理高速化に着手し、特にCGHの動画を作成する場合のCGH生成高速化方法

を提案した。CGH 動画を高速に生成するアプローチを考えた場合に、(1) 動画を構成する 1 フレームの生成時間そのものを高速化する方法、(2) 動画の特性を基に CGH 動画の生成時間を高速化する方法の 2 通りのアプローチが存在する。本論文では大きく分けて 3 つの提案手法を提案しており、(1) のアプローチとして回折角度に基づく物体点数削減法を、(2) のアプローチとして静止物体と移動物体を分けて計算することで動画全体の生成を高速化する移動物体分離法と、視聴者の視点移動が発生する場合の CGH 生成の高速化方法について提案した。そして各々のアルゴリズムに関して、その有効性を実験を通して示した。

本論文は以下の 10 の章から構成される。

第 1 章では、三次元表示技術と、本研究が対象とするホログラフィ及び CGH 技術の概要について述べ、本論文の研究背景と目的を明らかにし、第 2 章では主に CGH の計算原理について述べることで、CGH 技術の基本的な計算方法を説明する。

第 3 章と第 4 章では、それぞれ本研究を支える CGH に関する重要な従来技術の説明を行う。第 3 章ではレンズを用いてホログラフィの再生像を視聴する際の視野を拡大する技術であるフーリエ変換光学系 (Fourier Transform Optical System : FTOS) について述べる。また、第 4 章では、第 5 章以降の提案手法の基となった従来手法であるレイトレーシング法を用いた CGH のレンダリング手法について述べる。

第 4 章までは従来の技術に関する説明となるが、第 5 章以降は本研究における提案手法の説明となる。

まず第 5 章では回折角度に基づく物体点数削減法について述べる。この手法は、光波の回折角度に基づき、視野範囲外に存在する点を事前に除外し、計算を行わないことで高速化を行う。本手法により、シーンによっては計算時間を $1/3$ 以下に削減できることが示された。

第 6 章では、対象とする 3D シーンを静止物体と移動物体に分け、静止物体からの伝搬光波を予め計算しておき、動画生成時には移動物体が影響を及ぼす部分のみを計算することで、CGH 動画の生成を高速化する移動物体分離法を紹介する。こちらも移動物体のサイズによるが、光波伝搬の計算時間を $1/4$ 以下に削減することに成功している。

また、第 7 章ではホログラフィを視聴可能な HMD での計算法などを想定し、視聴者の視点移動が発生する場合の CGH 生成高速化方法について提案している。第 7 章の手法では視点の前後移動に対応できないという技術的課題が存在していたが、第 7 章の課題を解決し、改良させた手法を第 8 章で紹介し、視点移動が発生するような場面の CGH 動画の生成時間を約 $1/2$ にすることに成功した。

最後に第 9 章で、第 5 章～第 8 章で述べた各々の提案手法により得られる結果を俯瞰する形での考察を述べ、最後に第 10 章で本論文の全体のまとめと、今後の展望について述べた。

これらの結果から、写実性の高いレイトレーシング法を用いた CGH の計算法における計算処理時間が大きいという問題の解決を図り、CGH 動画の生成処理時

間的高速化に成功したことを示した。CGH 動画の特性などに着目した高速化手法に関する研究は多くなく，提案手法は将来 CGH による動画を生成するシステムの中で，基礎となるエッセンスとして利用されることが期待される。

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	三次元表示技術	1
1.2	ホログラフィ	2
1.2.1	ホログラフィの原理-記録-	2
1.2.2	ホログラフィの原理-再生-	2
1.3	計算機合成ホログラム	2
1.4	研究背景と目的	4
1.5	本論文の構成	5
第 2 章	計算機合成ホログラム (CGH)	7
2.1	概要	7
2.2	物体光計算	8
2.3	参照光計算	8
2.4	干渉縞の生成	9
2.5	周波数制限	10
2.5.1	物体光と参照光に位相差がない場合の周波数制限	10
2.5.2	物体光と参照光に位相差がある場合の周波数制限	11
2.6	CGH における動画作成	12
第 3 章	フーリエ変換光学系 (FTOS)	13
3.1	フーリエ変換光学系における視野拡大	13
3.2	フーリエ変換光学系における CGH 計算法	14
3.2.1	奥行き自由化計算法	15
3.2.2	共役像除去	17
第 4 章	レイトレーシング法を用いた CGH のレンダリング手法	19
4.1	CGH のレンダリング	19
4.2	レイトレーシング法を用いた CGH のレンダリング手法	20
4.2.1	要素ホログラムを用いた光線追跡	21
4.2.2	要素ホログラムごとの光波計算	22
4.2.3	GPU の使用における高速化	22
4.3	光線追跡法を用いた CGH に対する FTOS の適用	23
4.4	従来手法の計算時間	23

4.4.1	実験環境	23
4.4.2	実験結果	26
第 5 章	回折角度に基づく物体点数削減法 (提案手法 1)	29
5.1	研究背景と目的	29
5.2	回折角度に基づく物体点数削減法	29
5.3	実験	32
5.3.1	実験環境	32
5.3.2	実験 1：白板に関する比較	32
5.3.3	実験 2：白色球に関する比較	33
5.4	考察と結論	34
第 6 章	移動物体分離法 (提案手法 2)	37
6.1	研究背景と目的	37
6.2	移動物体分離法	38
6.2.1	移動物体分離法の光波伝搬計算	38
6.2.2	前方への静止物体の配置	40
6.2.3	移動物体分離法への提案手法 1 の導入	41
6.3	実験	41
6.3.1	実験環境	42
6.3.2	実験 1：適切な隠面消去の確認	43
6.3.3	実験 2：前方への静止物体の配置	46
6.3.4	実験 3：移動物体分離法による複雑な物体の表現	47
6.4	結論	49
第 7 章	視点移動の高速計算法 (提案手法 3)	52
7.1	研究背景と目的	52
7.2	従来手法	54
7.3	視点移動の高速計算法	54
7.3.1	平行移動	55
7.3.2	回転移動	57
7.3.3	提案手法により生じる誤差	59
7.4	実験	60
7.4.1	実験環境	61
7.4.2	実験 1：平行移動と回転移動の計算時間の測定	61
7.4.3	実験 2：提案手法を用いた CGH アニメーションの作成	65
7.4.4	実験 3：提案手法のコンテンツの違いによる比較実験	77
7.5	結論	78

第 8 章	任意方向への視点移動の高速計算法 (提案手法 4)	81
8.1	研究背景と目的	81
8.2	任意方向への視点移動の高速計算法	81
8.2.1	収束球面参照光波を用いた CGH 計算法	82
8.2.2	任意方向の視点移動高速化法	84
8.2.3	レイトレーシングの処理時間の削減	89
8.2.4	提案手法に関する議論	91
8.3	実験	92
8.3.1	実験環境	93
8.3.2	実験 1: 収束球面参照光波を用いた計算法の再生像と計算時間の確認	93
8.3.3	実験 2: 提案法を用いた CGH 動画の生成時間の測定	95
8.3.4	実験 3: 提案手法で作成した再生像の主観評価実験	104
8.3.5	実験 4: 異なる視点移動速度における提案手法の計算時間の測定	105
8.4	結論	106
第 9 章	考察	108
第 10 章	結論	110
10.1	まとめ	110
10.2	今後の展望	110
参考文献		112
謝辞		118

目 次

1.1	ホログラフィの記録原理	3
1.2	ホログラフィの再生原理	3
2.1	CGH の生成過程	7
2.2	点充填法における物体光伝搬計算	9
2.3	位相差がない場合の周波数制限	11
2.4	位相差がある場合の周波数制限	12
3.1	フレネルホログラムの光学配置	14
3.2	FTOS の光学配置	15
3.3	直接像と共役像の再生位置	16
3.4	レンズとホログラム間の隙間を考慮した光学系	17
3.5	共役像の除去	18
4.1	CG における光線追跡法	20
4.2	要素ホログラム	21
4.3	従来手法における光線追跡法	21
4.4	FTOS を導入した従来手法の計算手順	24
4.5	セミポータブルホログラフィックディスプレイ	26
4.6	記録に用いたシーン	27
4.7	従来手法の再生像	28
5.1	従来手法の計算領域	30
5.2	提案手法 1 の計算領域	30
5.3	提案手法 1 の処理の流れ	31
5.4	実験 1 の再生像 (提案手法 1)	33
5.5	実験 2 に用いたシーン	34
5.6	実験 2 の再生像 (提案手法 1)	35
6.1	従来手法を用いての CGH 動画作成の流れ	38
6.2	Base-frame の記録	39
6.3	移動物体の計算法 1	39
6.4	移動物体の計算法 2	40
6.5	前方への静止物体の配置	41

6.6	提案手法を用いた CGH 動画の作成法	42
6.7	従来動画の作成法	43
6.8	実験 1 の物体配置	44
6.9	実験 1 の再生像 (提案手法 2)	45
6.10	実験 2 の物体配置	46
6.11	実験 2 の再生像 (提案手法 2)	48
6.12	実験 3 の物体配置	49
6.13	実験 3 の再生像 (提案手法 2)	50
7.1	ホログラフィック HMD	53
7.2	6 自由度の VR 鑑賞	54
7.3	視点とホログラム面の移動	55
7.4	FTOS を用いたときの平行移動	56
7.5	平行移動の計算法	56
7.6	平行移動計算の問題点	57
7.7	空白領域の計算範囲	58
7.8	回転移動の計算法	59
7.9	平行移動による誤差	60
7.10	実験 1 に用いたシーンの詳細	62
7.11	平行移動距離と計算時間の関係	63
7.12	実験 1 の再生像 (提案手法 3)	64
7.13	従来動画と提案動画	65
7.14	実験 2 に用いたシーン A と B の詳細	66
7.15	実験 2 に用いたシーン C の詳細	67
7.16	実験 2 に用いたシーン D の詳細	67
7.17	CGH 動画の計算時間のグラフ	69
7.18	シーン A の再生像 (提案手法 3)	70
7.19	シーン B の再生像 (提案手法 3)	71
7.20	シーン C の再生像 (提案手法 3)	72
7.21	シーン D の再生像 (提案手法 3)	73
7.22	平行移動計算による歪み	74
7.23	DCR 法のタイムパターン	75
7.24	主観評価実験結果のグラフ (実験 2-3)	76
7.25	実験 3 に用いたシーン E の詳細	77
7.26	実験 3 に用いたシーン F の詳細	77
7.27	計算時間測定結果のグラフ (実験 3)	79
7.28	実験 3 の再生像 (提案手法 3)	79
8.1	収束球面参照光を用いた記録光学系	82
8.2	任意方向への視点移動高速計算法の計算フロー	85

8.3	x 方向への平行移動の高速計算法	86
8.4	y 軸中心の回転移動	86
8.5	視点の前方への移動とホログラム面の物体光波の縮小の関係性 . . .	88
8.6	ホログラム面の物体光波のスケーリングによる光波差	89
8.7	スケーリングによって生じる位置の誤差	90
8.8	前後移動における再計算頻度	91
8.9	視点移動時の要素ホログラムからの光線追跡	92
8.10	実験用シーンの構成図	94
8.11	参照光の違いによる再生像の比較 (シーン A)	95
8.12	参照光の違いによる再生像の比較 (シーン B)	95
8.13	実験に用いたシーンと, その視点移動に関する詳細図	97
8.14	異なる再計算頻度での CGH 動画の生成処理時間.	100
8.15	レイトレーシング数と再計算頻度の関係グラフ	101
8.16	前後移動シーケンスの再生像の比較 (255 フレーム目)	102
8.17	各視点移動における主観評価実験の結果	103
8.18	視点の移動速度と計算時間の関係性を示したグラフ	106
8.19	異なる平行移動スピードにおける再生像	107
9.1	各提案手法の関係性及びその成果	109

表 目 次

4.1	使用した計算機の性能	25
4.2	再生装置のパラメータ	25
4.3	記録に用いるパラメータ (従来手法)	25
4.4	従来手法の各ステップの計算時間	27
5.1	第 5 章で使用した計算機の性能	32
5.2	記録に用いるパラメータ (提案手法 1)	32
5.3	実験 1 の計算時間 (提案手法 1)	33
5.4	実験 2 の計算時間 (提案手法 1)	34
6.1	第 6 章で使用した計算機の性能	43
6.2	記録に用いるパラメータ (提案手法 2)	44
6.3	実験 1 の計算時間 (提案手法 2)	46
6.4	実験 2 の計算時間 (提案手法 2)	47
6.5	実験 3 の計算時間 (提案手法 2)	49
7.1	第 7 章で使用した計算機の性能	61
7.2	記録に用いるパラメータ (提案手法 3)	61
7.3	平行移動と回転移動の計算時間	63
7.4	BFR を変化させたときの CGH 動画の計算時間	68
7.5	各シーンの物体点数	68
7.6	DCR 法における評価	69
7.7	実験 2-3 の主観評価実験結果	75
7.8	計算時間測定結果 (実験 3)	80
7.9	実験 3 の主観評価実験結果	80
8.1	CGH 計算に用いた計算機のスペック (提案手法 4 の実験用).	93
8.2	参照光の違いによる CGH 生成時間の比較	96
8.3	実験に用いた CGH 動画の視点移動の詳細表	96
8.4	従来手法と提案手法で生成するフレームの生成時間の比較表.	99
8.5	さまざまな再計算頻度 R_f での CGH 動画の生成時間	104

第1章 序論

1.1 三次元表示技術

近年、三次元表示技術が注目を集めており、映画やテレビ、ゲームなどの分野において実用化が進んでいる。これらの三次元表示技術については盛んに研究が行われており、さまざまな方式が提案されてきた [1]。

通常、人間は多数の立体視の生理的要因を組み合わせ、三次元物体の奥行きを知覚している。立体視の生理的な要因の一例としては、瞳の水晶体の厚みを変化させることで眼球のピントを合わせる”焦点調節”が知られている。また、両眼の視軸の間の角度を知ることができれば、物体の奥行きを判断することができる。このような観察物への距離に応じた眼球の回転運動を輻輳眼球運動と呼び、この”輻輳”からも物体の奥行きを判断することができる。このような眼球の動きに基づく生理的要因の他にも、左右の眼の網膜に映る映像の差異から奥行きを知覚する”両眼視差”や、ある時点と次の時点の網膜に映る映像の差異から奥行きを知覚する”運動視差”など、網膜に映る映像のずれに基づく生理的要因がよく知られている。眼球の動きに基づく焦点調節や輻輳は、視点からの絶対的距離を知ることには役立つ一方、網膜に映る映像のずれに基づく両眼視差や運動視差からは、注視点基準とした相対的な奥行きしか得られないという特徴がある [2]。その他にも、物体の大きさや重なり合い、陰影などによって、人間は三次元物体の奥行きを判断している。

このように人間の三次元知覚の要素はさまざまあるものの、現在3D映画や3Dテレビ、3Dゲーム等に実用化されている三次元表示技術は、多くの技術が両眼視差のみにより立体感を実現している。この両眼視差のみの三次元表示技術の問題点として、眼球の焦点が映像を映しているスクリーンやディスプレイの位置に調節されるため、焦点調節と輻輳との間で不整合が生じ、観察者が違和感や疲労感を抱くことが問題視されてきた。また、すべての生理的要因を満たさない故に、実物と見間違えるような立体感を再現することは困難であった。このような問題点を解決するためには、すべての人間の立体視の生理的要因を満たすような三次元表示技術が必要である。

1.2 ホログラフィ

人間が立体感を知覚するために必要とする生理的要因をすべて満たす三次元表示技術として知られているのがホログラフィ(Holography) [3] である。1940 年代後半に、ハンガリーの物理学者 Dennis Gabor によって考案されたホログラフィは、実際に人間が物を観察するときの光の振る舞いを再現する技術であり、理想的な三次元表示技術とされてきた。holo-はギリシャ語で”完全な”という意味を示す”holos”を語源としており、graphy は”記録法”を表す言葉である。その語源の通り、holography は物体のすべての情報を記録する技術である。ホログラフィは、物体からの光波を光の干渉を利用して記録し、光の回折を利用して再生を行う。この記録と再生の原理について詳しく説明する。

1.2.1 ホログラフィの原理-記録-

ホログラフィの記録の原理を、図 1.1 に示した。ホログラフィの記録には、干渉性の高いコヒーレントな光源を用いる。このような光を二つに分割し、一方を記録媒体に直接照射し、もう一方を物体に照射する。物体に照射された光は反射光となり、記録媒体上で直接照射した光と干渉する。このときに生じた干渉縞を記録するのが、ホログラフィの記録の原理である。干渉縞を記録する媒体には写真乾板やフィルム等を用い、他の光が入らない暗室にて記録を行わなければならない。干渉のために直接照射された光を参照光、物体から反射して記録媒体に入射する光を物体光と呼ぶ。また、この干渉縞が記録された記録媒体のことをホログラムと呼ぶ。

1.2.2 ホログラフィの原理-再生-

次にホログラフィの再生の原理について説明する。ホログラフィの再生は、図 1.2 のように物体光を記録したホログラムに参照光と等価な光(再生照明光)を照射することによって行われる。このとき、干渉縞に当てられた再生照明光は回折を起こし、その結果として物体光と同じ波面を持つ光波が再生される。これを観察者が観察することで、実際に物体を観察するのと同じ効果を得ることができ、理想的な三次元表示が可能となる。

1.3 計算機合成ホログラム

写真乾板等を用いたアナログのホログラフィの記録と再生の原理については前章で説明したが、近年はデジタルなホログラフィとして、計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram : CGH)と呼ばれる技術が注目されている。CGH

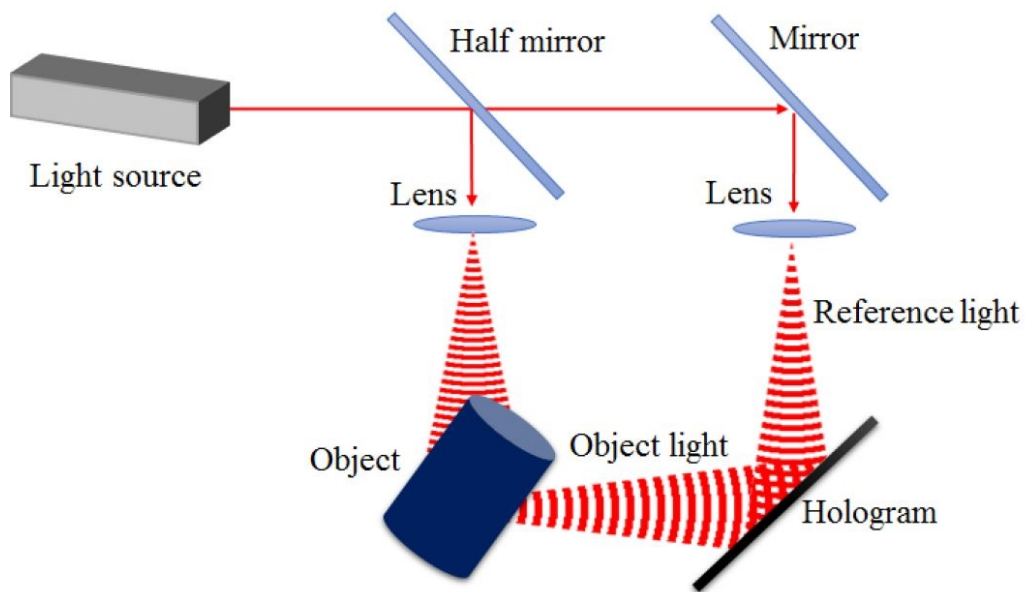


図 1.1: ホログラフィの記録原理

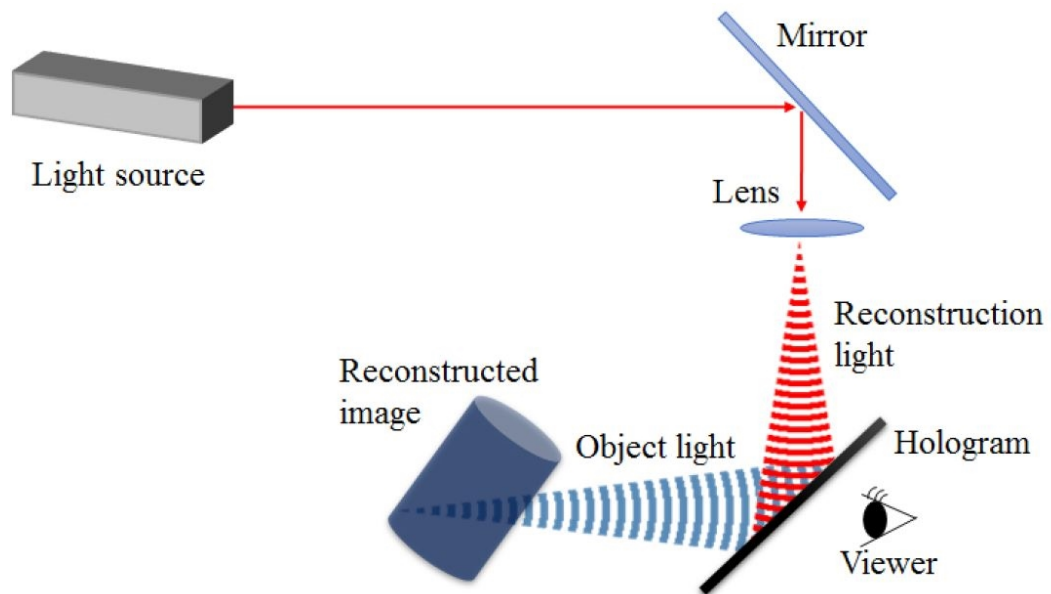


図 1.2: ホログラフィの再生原理

は、ホログラフィの記録の原理を、計算機を用いて実現する技術である [4]。仮想物体を計算機内で定義し、それらからの光の伝搬や、参照光との干渉を計算機内部でシミュレートし、最終的に画像データ等の電子媒体としてホログラムを出力する。こうして生成された CGH は、空間光変調器 (Spatial Light Modulator : SLM) 等の電子ディスプレイ上に出力され、そこに再生照明光を照射することで再生を行うことができる。

写真乾板等を記録材料として記録を行うアナログのホログラフィは、記録の際に複雑な光学系を必要とする。加えて暗室などの環境が必要になる点や、記録過程においてレーザーや化学薬品を利用するために危険性が伴うなどの問題点が存在していた。しかし、CGH は計算機があればホログラムの生成を行うことができるため、ホログラムの作成を容易に行うことができ、前述のような問題は発生しない。さらに、計算機内で作成したコンピュータグラフィックス (Computer Graphics : CG) 等で定義される仮想物体から、光波の伝搬や干渉をシミュレーションして立体像を生成できることや、時間の流れと共に電子ディスプレイ上のホログラムを切り替えることで、ホログラフィの動画を作成できることなどの利点が CGH には存在している。

1.4 研究背景と目的

前述のように、CGH は大規模な記録光学系を必要としないだけでなく、ホログラフィ動画の作成を行うことができる。特に、ホログラフィはテレビやゲーム分野への応用が考えられており、それらの実現のためには動画の作成が可能であるということは非常に重要である。このように、多くの利点を持つ CGH であるが、研究課題も多く残されている。

- 再生像を観察するときの視野が狭い
- 写実的な場면을表現するためのレンダリング技法が確立されていない
- 計算時間が膨大である

再生像の観察を行う際に視野が狭いという問題に関しては、アイトラッキングを用いた手法 [5] や時分割表示により視野角を拡大する手法 [6]、曲面型アレイを用いる方法 [7]、tiled SLM を用いる方法 [8] が提案されている。しかし、これらの手法では再生に用いる光学系が大規模になってしまうという問題があった。そこで、本研究では小規模な光学系で視野角を拡大することのできるフーリエ変換光学系 (Fourier Transform Optical System : FTOS) [9] に着目した。この FTOS に適用できる写実性のあるレンダリング手法として、光線追跡法を用いた CGH のレンダリング手法 [10] が既に提案されている。この手法を用いれば、FTOS と光線追跡法を用いた CGH のレンダリング手法を組み合わせることによって、広視野かつ写実性のある CGH の再生が可能である。

しかしながら、光線追跡法を用いた CGH のレンダリング手法は、CG のレンダリング手法の中でも計算コストの高い光線追跡法に基づいたアルゴリズムであるため、CGH の他計算手法と比較しても特に計算時間が大きいという問題が存在していた。将来的に CGH をスポーツ中継やゲーム等に応用することを考えた場合、リアルタイム計算を実現することは必要不可欠である。よって、CGH の分野では今までにさまざまな高速生成手法が研究されてきた。例えばホログラフィックステレオグラム法 [11,12] や、物体を構成するポリゴンからの光波伝搬を計算する手法 [13] が提案されている。しかし、光線追跡法を用いた CGH のレンダリング手法は CGH 計算法の中でも、仮想物体を点ベースで分割して計算を行う点充填法に基づいた計算手法であった。そのため、上記のようなホログラフィックステレオグラム法や、ポリゴン法を適用することは難しい。点充填法の高速化アプローチとしては、例えば Graphic Processing Unit(GPU) による並列コンピューティングを用いた高速化がよく知られている [14]。光線追跡法を用いた CGH のレンダリング手法にも、既に GPU による高速化を適用した研究が成されているが、リアルタイム化に向けては更なる高速化が必要であることが報告されている [15]。その他の点充填法の高速生成手法としては、隣接ピクセルの差分を利用した手法 [16] や、点充填法に基いてパッチモデルを高速計算する手法 [17,18]、三角関数の性質に着目して高速に計算を行う手法 [19]、予めゾンプレート計算して足し合わせることで高速化を図る Look-Up Table(LUT) を用いた手法 [20-24] 等が提案されてきた。しかしながら、前述のように CGH は動画としての利用を期待されているということを考慮すれば、CGH の 1 枚あたりの生成時間を高速化するだけでなく、初めから CGH 動画を作る前提で、動画の特徴に着目して高速化するアプローチにも意義があると考えられる。

そこで本研究では、写実性に優れ、かつ広視野再生が可能な計算手法である、光線追跡法を用いた CGH のレンダリング手法 [10] の動画生成高速化を図ることを研究の目的とした。その目的のために、CGH 1 枚単位の生成を高速化するアプローチと、動画の作成を行うという前提に立って動画の特性に着目して高速化を行うアプローチの両面から CGH 動画を高速に生成する手法について研究を行い、その結果について報告することとした。

1.5 本論文の構成

本論文は 10 の章から構成される。第 1 章では研究背景と目的について述べた。第 2 章では計算機合成ホログラム、第 3 章ではフーリエ変換光学系という本論文の議論を進める上で重要な要素技術の解説を行い、第 4 章にて第 5 章以降の提案手法の基となった従来手法である「光線追跡法を用いた CGH のレンダリング手法」の概要について述べる。第 5 章から第 8 章では各章それぞれ一つずつ提案手法について述べるが、CGH 動画を高速に生成するアプローチを考えた場合に、(1) 動画を構成する 1 フレームの生成時間そのものを高速化する方法、(2) 動画の特性を

基に CGH 動画の生成時間を高速化する方法の 2 通りのアプローチが存在する．そこで第 5 章では (1) のアプローチである「回折角度に基づく物体点数削減法」について述べる．第 6 章から第 8 章は (2) のアプローチに基づく提案手法について述べるが，第 6 章ではまず静止物体と移動物体を分けて計算することで動画全体の生成を高速化する「移動物体分離法」を紹介する．次に第 7 章ではホログラフィを視聴可能な HMD での計算法などを想定し，視聴者の視点移動が発生する場合の CGH 生成高速化方法について提案する．第 7 章の手法では視点の前後移動に対応できないという技術的に大きな課題が存在していたが，第 7 章の課題を解決し，第 7 章の手法を拡張させた手法を第 8 章で紹介している．最後に第 9 章で第 5 章から第 8 章までの各提案手法を踏まえて，俯瞰した上での考察を述べ，第 10 章では全体のまとめと今後の展望について記載する．

第2章 計算機合成ホログラム (CGH)

2.1 概要

本章では，一般的な CGH の生成法について説明を行う．CGH の生成は，ホログラフィの記録の原理をコンピュータの中で光波シミュレーションとして行うことによって実現される．基本的な流れとしては，まずコンピュータの内部に仮想物体を定義し，仮想物体からホログラム面までの物体光波の伝搬を計算する．その後，参照光源からの光波の伝搬計算を行う．最後に，物体光波と参照光波のホログラム面上での干渉を計算し，その結果を CGH として出力する．この生成手順を示したのが，図 2.1 である．得られた CGH は画像データとして扱われ，それらを再生装置の表示デバイスに出力し，そこに再生照明光を照射することで，CGH の再生を実現することが可能である．

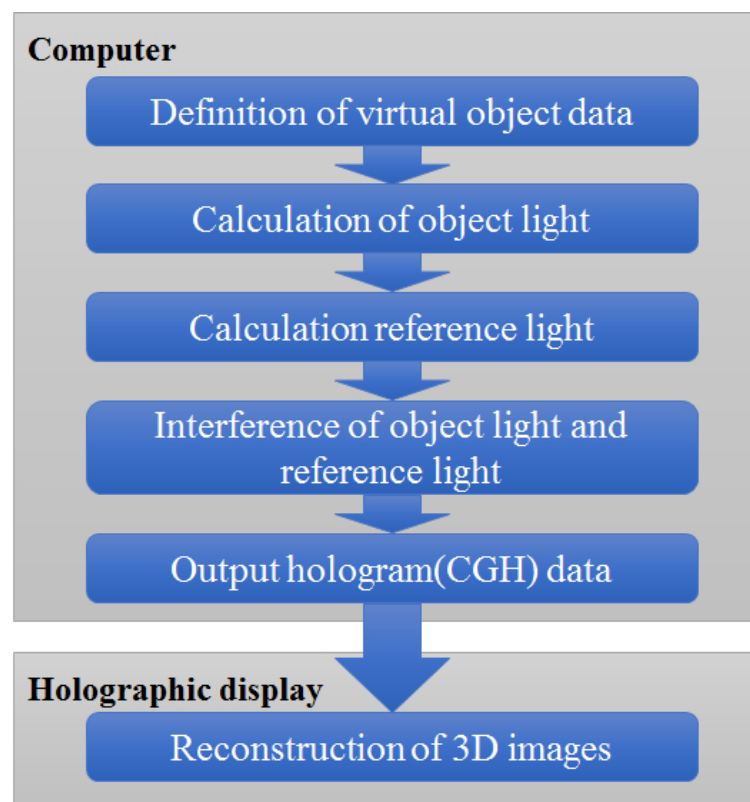


図 2.1: CGH の生成過程

2.2 物体光計算

CGHにおける物体光計算の手法は、点充填法、ホログラフィックステレオグラム法 [11,12]、フーリエ変換を用いた手法 [13] など多岐に渡る。本研究のベースとなっている光線追跡法を用いた CGH の生成手法では、点充填法に基づく光波伝搬計算が行われている。よって、ここでは物体光計算手法として、点充填法の計算についてのみ説明を行うこととした。

点充填法は、物体を三次元座標を持つ点光源の集合として形成する手法である。点充填法を用いる場合のホログラム面上での複素振幅分布 $O(x, y)$ について考える (図 2.2)。仮想物体を構成する任意の点光源の位置座標を (x_i, y_i, z_i) としたとき、この点光源からの光波 $E_i(x, y, z = 0)$ は、次式で表される。

$$E_i(x, y, z = 0) = \frac{A_i}{r_i} \exp(-jkr_i), \quad (2.1)$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2}. \quad (2.2)$$

この式において r_i は、ある点光源の位置 (x_i, y_i, z_i) から、ホログラム面上の任意の位置 (x, y) までの距離を示しており、 A_i は点光源の輝度値である。また k は波数であり、再生に用いる光源の色に対応する波長から決定される。

記録を行う仮想物体が N 個の物体点光源から構成されているとき、それぞれの点光源からの光波伝搬を式 (2.1) を用いて計算し、すべて加算することによって、物体点群からのホログラム面上の複素振幅分布 $O(x, y)$ を算出することができる。

$$O(x, y) = \sum_{i=1}^N E_i(x, y, 0). \quad (2.3)$$

この式は、点充填法の計算時間が物体点数とホログラム面の画素数に比例することを示している。また、この伝搬計算中では三角関数や平方根の計算を必要とするため、一般的に点充填法は他の物体光計算手法と比べ、多くの計算時間を必要とする。

2.3 参照光計算

CGH の計算では、仮想物体からホログラム面までの伝搬光波を計算した後に、物体光と参照光の干渉を計算しなければならない。ここでは、その際に用いる参照光の計算について述べる。参照光として用いられるのは、一般的には平行光源から伝搬される平面波か、点光源から伝搬される球面波のどちらかである。

参照光に平行光源を用いる場合、参照光をホログラム面に対して垂直に入射すると再生時に実像と虚像の二つの再生像が現れてしまうため、像の観察が困難となる。よって、参照光は一定の角度をもって入射させるのが望ましい。このような

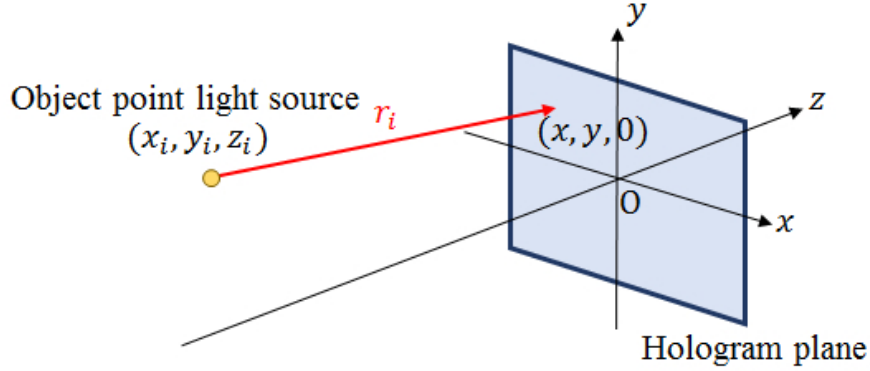


図 2.2: 点充填法における物体光伝搬計算

オフアクシスホログラフィでの，ホログラム面での参照光の光波分布 $R_p(x, y)$ は次の式で与えられる．

$$R_p(x, y) = R_0 \exp(jky \sin \theta). \quad (2.4)$$

ただし，上式では参照光を y 軸の方向に角度を θ だけ傾けている． R_0 は参照光の振幅を示しており，参照光に固有の定数である．

また，参照光に球面波を用いる場合，参照光のホログラム面上での光波分布 $R_s(x, y)$ は次の式で与えられる．

$$R_s(x, y) = R_0 \exp(jkr_{ref}). \quad (2.5)$$

ここで r_{ref} は参照光源からホログラム面上の任意の点 (x, y) までの距離を示す．

2.4 干渉縞の生成

次に，ホログラム面上での物体光と参照光の干渉計算について述べる．ホログラム面上での物体光と参照光の干渉を計算し，その干渉縞を得ることで，CGH の記録を行うことができる．ホログラム面上での物体光波分布を $O(x, y)$ ，参照光波分布を $R(x, y)$ としたとき，二つの光の干渉によって生じる光強度分布 $I(x, y)$ は次式で計算される．

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2, \\ &= |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O^*(x, y)R(x, y) + O(x, y)R^*(x, y), \\ &= |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + 2\text{Re}[O^*(x, y)R(x, y)]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

$O^*(x, y)$ と $R^*(x, y)$ は、それぞれ物体光と参照光の光波分布の複素共役を示す．式 (2.6) の第1項と第2項はそれぞれ物体光と参照光の強度を表している．そして、第3項が物体光と参照光の干渉を示す部分である．そのため、CGH では干渉を表す第3項を記録した干渉縞に再生照明光を照射することで再生像を得ることが可能である．

2.5 周波数制限

ホログラフィにおいて広い視野を得るためには、高い空間周波数を表現することのできる微細なピクセルピッチの電子デバイスが必要である．しかし、現状の電子デバイスのピクセルピッチの細かさには限界があり、表示に用いる電子デバイスの解像度に応じて、表現できる空間周波数は限られてしまう．このとき、電子デバイスのサンプリング周波数を超える高周波領域では、折り返し雑音 (エイリアシング) が発生してしまう．このエイリアシングが発生すると、再生時に高次回折像 (ゴースト像) が生じ、正しい像の観察に支障をきたす．そのため、CGH の計算を行う際にはホログラム面上の空間周波数の高い部分を除去する必要がある．この処理のことを周波数制限と呼ぶ．

2.5.1 物体光と参照光に位相差がない場合の周波数制限

まずは、物体光と参照光に位相差がない場合における周波数制限について考える．ホログラム面上の空間周波数は、位相の方向微分によって求められる．図 2.3 のように、 $(0, 0, z)$ の位置に物体点光源が存在しているとき、 x 方向の空間周波数 f_x について考える．点光源からホログラム面までの距離を r とすると、この点光源からホログラム面に至る光波の複素振幅分布 $u(x)$ は次式で与えられる．

$$u(x) = \exp(-jkr), \quad (2.7)$$

$$r = \sqrt{x^2 + z^2}. \quad (2.8)$$

このときの空間周波数は、位相 $\phi = -kr$ の方向微分として与えられるので、

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dx} = -\frac{1}{\lambda} \frac{dr}{dx} = -\frac{x}{\lambda\sqrt{x^2 + z^2}}, \quad (2.9)$$

と計算される．ここで周波数 f_x がサンプリング周波数 f_{max} を超えるとエイリアシングが生じる．エイリアシングが生じない f_x は以下のように計算される．

$$|f_x| < f_{max}. \quad (2.10)$$

$$\frac{x}{\lambda\sqrt{x^2 + z^2}} < \frac{1}{2p} \quad (2.11)$$

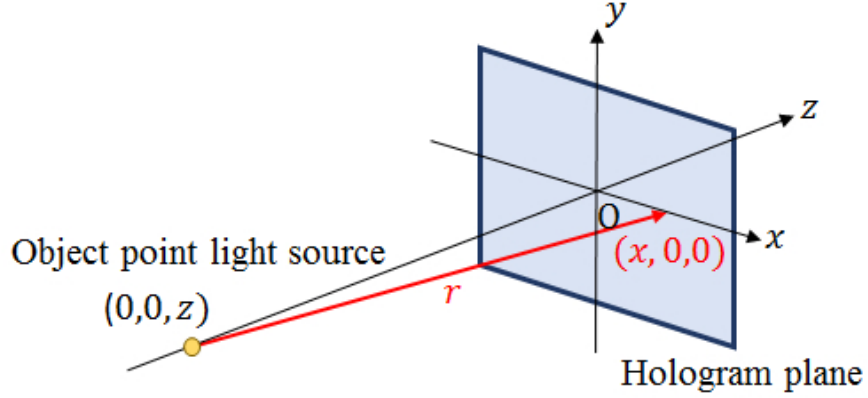


図 2.3: 位相差がない場合の周波数制限

p は表示に用いる電子デバイスのピクセルピッチである．式 (2.10) から， $x/\sqrt{x^2 + z^2}$ の部分は最大で 1 となることから，

$$p < \frac{\lambda}{2}, \quad (2.12)$$

を満たす表示デバイスであれば周波数制限を行う必要性はない．しかし，この条件を満たすためには $1[\mu m]$ 以下のピクセルピッチが必要であり，現状ではこの条件を満たす表示デバイスは存在しない．そのため，高次回折像の抑制を行うためにサンプリング定理に基づいた周波数制限を行う必要がある．ここでは x 方向の空間周波数 f_x について考えたが， y 方向の空間周波数 f_y についても同様に考えることができる．

2.5.2 物体光と参照光に位相差がある場合の周波数制限

一般的に，ホログラム面上の空間周波数は物体光と参照光の角度に比例する．参照光に角度がつく場合や，参照光として球面波を用いる場合には，物体光と参照光に位相差が生じるため，前述の処理を適用することはできない．そのため位相差が生じる場合には，隣接するピクセルに対する光路差を用いた周波数制限を行う．

図 2.4 のように，物体光と参照光の位置が異なる場合について考える． $(x_1, 0, 0)$ と $(x_2, 0, 0)$ は， x 方向に隣接するピクセルである．物体光から各ピクセルまでの距離を r_{O1} , r_{O2} と定義し，参照光から各ピクセルまでの距離を r_{R1} , r_{R2} と定義する．このとき，各ピクセルに対する参照光と物体光の距離の差 Δr_1 と Δr_2 は以下

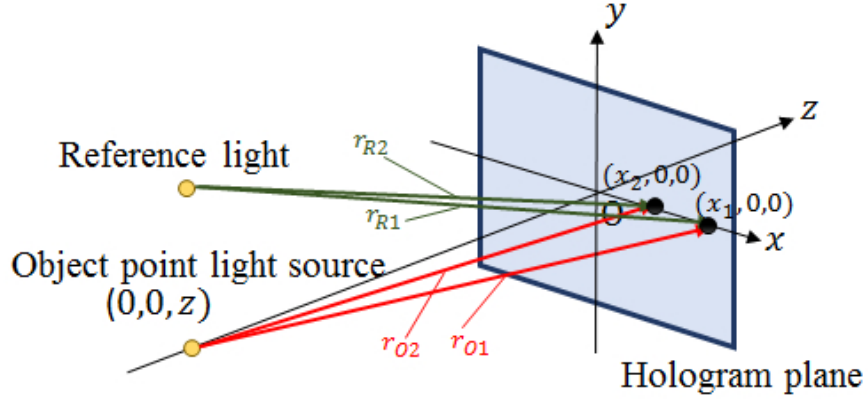


図 2.4: 位相差がある場合の周波数制限

のように表される.

$$\Delta r_1 = r_{R1} - r_{O1}, \quad (2.13)$$

$$\Delta r_2 = r_{R2} - r_{O2}. \quad (2.14)$$

このとき, 周波数制限の条件式は次のようになる.

$$|r_1 - r_2| < \frac{\lambda}{2}. \quad (2.15)$$

2.6 CGH における動画作成

アナログのホログラフィでは実現できず, CGH では実現できる技術として, ホログラフィ動画の作成が挙げられる. 動画化は液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display : LCD) 等の電子デバイス上の CGH を次々と切り替えていくことによって実現される. この切り替えの最中に再生照明光をディスプレイに照射し続けることによって, 実際の再生像も時間と共に変化し, 動いている像が観察される. 動画の再生のためには, 静止物体の位置を少しずつ変化させながら多数の CGH を作成しなければならず, 膨大な計算時間が必要とされる.

第3章 フーリエ変換光学系 (FTOS)

本研究における従来手法 [10] では，フーリエ変換光学系 (Fourier Transform Optical System : FTOS) を用いた視野拡大を行っている．フーリエ変換光学系は，CGH の再生を行うときの光学配置にレンズを組み込むことで，小規模の光学系の変更で視野拡大を実現する手法である．本研究における高速化手法はフーリエ変換光学系の使用を前提としていることから，本章ではフーリエ変換光学系の詳細について述べるものとする．

3.1 フーリエ変換光学系における視野拡大

レンズ等を用いずに，物体を有限の距離に配置して記録を行うホログラムをフレネルホログラムと呼ぶ．このフレネルホログラムにおいては，図 3.1 のように観察できる視野角はホログラム面における再生照明光の回折角度と等しくなる．この視野角 θ_N は，電子ディスプレイのピクセルピッチ p と，再生照明光の波長 λ を用いて次のように計算される．

$$\theta_N = 2 \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2p} \right). \quad (3.1)$$

波長は色ごとの定数値であることから，フレネルホログラムにおける視野角は電子ディスプレイのピクセルピッチに依存し，満足な視野を得るためには $1[\mu\text{m}]$ 以下の細かい画素ピッチが必要となる．しかし，現状の表示デバイスは，そこまで微細な画素ピッチを持たない．そのため，表示デバイスの解像度によって表現できる周波数は限られてしまう．

それに対して，FTOS は図 3.2 のように，レンズと点光源の参照光を用いた光学配置である．レンズの焦点距離を変更することで，視野の拡大を実現することが可能であるが，視野角を広げた場合に視域の最大幅 w が制限されてしまう．この視域の最大幅 w は，

$$w = \frac{\lambda f}{p}, \quad (3.2)$$

と計算される．このとき，ホログラムの最大幅を S と表現すると，FTOS によって得られる視野角の最大値 θ_f は以下の式で表される．

$$\theta_f = 2 \tan^{-1} \left(\frac{S + w}{2f} \right). \quad (3.3)$$

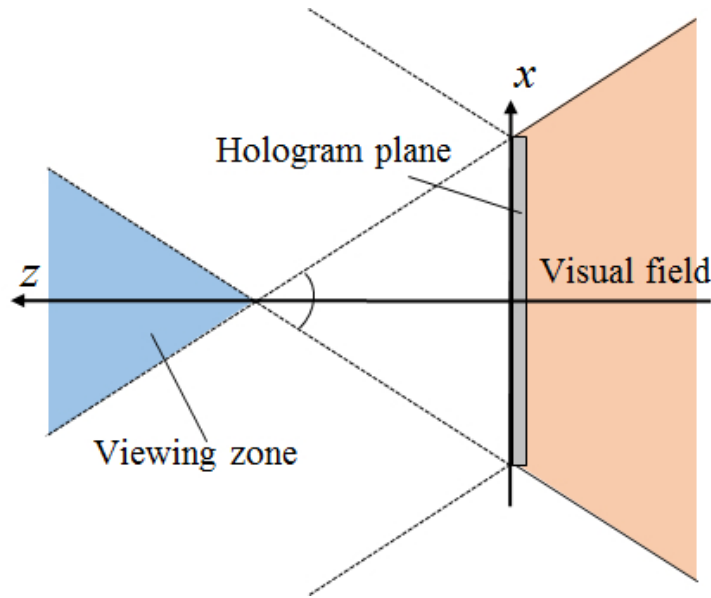


図 3.1: フレネルホログラムの光学配置

また FTOS では 0 次光やゴースト像はレンズの焦点位置に収束するため，焦点位置に物理的なバリアを設置することで参照光や 0 次光などの妨害光を遮蔽し，再生像のみを観察することができる．本研究では，広い視野角を得られる FTOS を利用した再生装置を用いた再生と，それを前提とした CGH 計算を行う．

3.2 フーリエ変換光学系における CGH 計算法

前述の通り，FTOS は再生時にレンズを用いて視野拡大を行う手法である．このようなフーリエ変換ホログラムの記録においては，記録の際に記録物体とホログラム面の間にレンズを配置して記録を行う手法の他に，レンズを用いずに記録を行うレンズレスフーリエ変換 [25] に基づく記録手法が存在する．このように記録されたホログラムをレンズレスフーリエ変換ホログラムと呼ぶ．本研究では，このレンズレスフーリエ変換に基づいた記録手法で CGH を作成している．レンズレスフーリエ変換は，ホログラム面から同じ距離にある，記録物体と同一平面内に球面波参照光を配置することで近似的にフーリエ変換を行う計算法である．すなわち従来のレンズレスフーリエ変換の計算では，仮想物体は参照光と同一の深さにしか配置することができず，自由な奥行きに仮想物体を配置しようとするとき，その奥行きによって像が拡大や縮小されて正しい位置に点光源を再生することができない．この問題点を解決するためには，レンズレスフーリエ変換における奥行き自由化計算法 [26] を導入する必要がある．

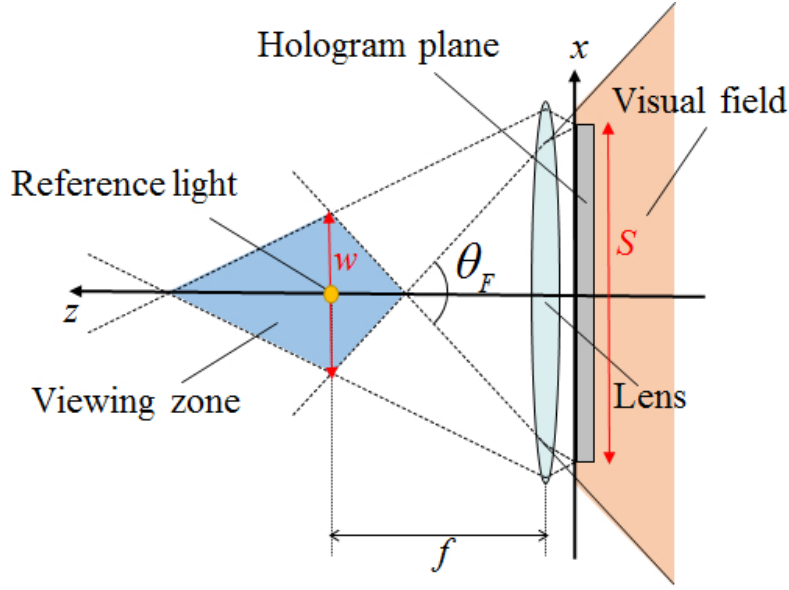


図 3.2: FTOS の光学配置

3.2.1 奥行き自由化計算法

ここでは簡単のために、記録したい物体点光源が一つだけ存在している場合を考える．この物体点 O が置かれている位置を $O(x_o, y_o, z_o)$ とする．このとき図 3.3 のように直接像 P と共役像 Q が再生される．この再生位置をそれぞれ $P(x_p, y_p, z_p)$, $Q(x_q, y_q, z_q)$ とする．ここで $P(x_p, y_p, z_p)$ と $Q(x_q, y_q, z_q)$ は次の式によって求められる．

$$x_p = \frac{x_o}{z_o} z_p, \quad (3.4)$$

$$y_p = \frac{y_o}{z_o} z_p, \quad (3.5)$$

$$z_p = \frac{f z_o}{f + z_o}, \quad (3.6)$$

$$x_q = x_o, \quad (3.7)$$

$$y_q = y_o, \quad (3.8)$$

$$z_q = -z_o. \quad (3.9)$$

つまり、レンズレスフーリエ変換の記録過程ではレンズを用いないが実際の再生ではレンズが用いられるために、本来 $O(x_o, y_o, z_o)$ に再生したい像が $P(x_p, y_p, z_p)$ に再生されてしまう．よって、再生したい位置 $P(x_p, y_p, z_p)$ から、置くべき位置 $O(x_o, y_o, z_o)$ を逆算して、その位置に点光源を位置補正することによって、仮想物

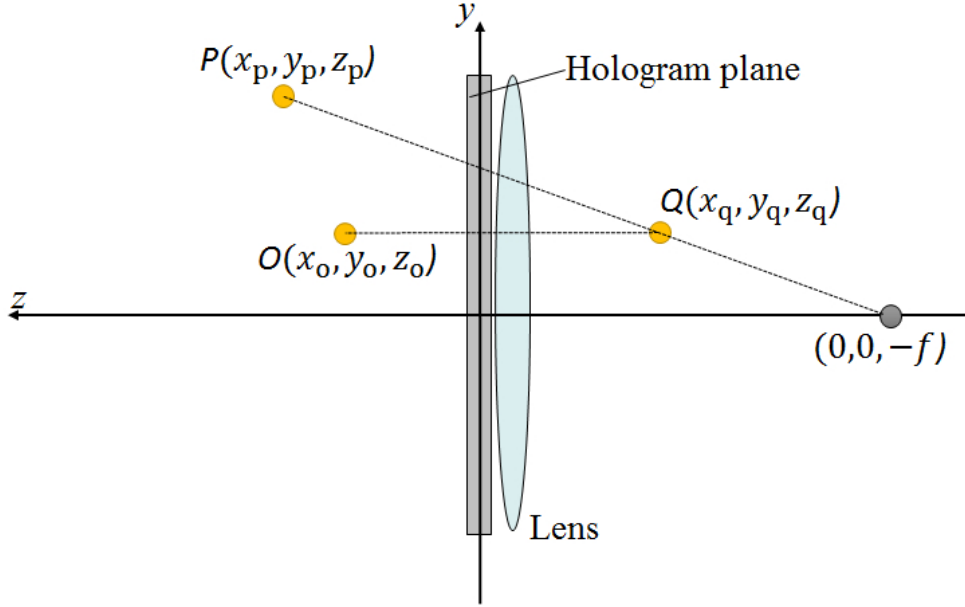


図 3.3: 直接像と共役像の再生位置

体を自由な位置に再生することができる．この逆算を行った結果，

$$x_o = \frac{x_p}{z_p} z_o, \quad (3.10)$$

$$y_o = \frac{y_p}{z_p} z_o, \quad (3.11)$$

$$z_o = \frac{f z_p}{f - z_p}, \quad (3.12)$$

という位置補正式を得ることができる．よって，物体点からの光波伝搬計算を行う前に，仮想物体を構成する点光源の座標値を，上記の位置補正式に代入して位置を変更する必要がある．しかし，上記の計算はレンズとホログラムの間に隙間が全くない場合の光学系を想定していた．実際にはレンズとホログラム面の間の距離を 0 として光学系を設計することは不可能のため，この距離に関して考慮する必要がある．ここでは図 3.4 のようにレンズとホログラム面の間の距離を D とする．このとき，レンズの効果によってホログラムは後方へ拡大され， z 方向へ z_h だけシフトされる．この z_h は以下の式で求められる．

$$z_h = - \left(\frac{fD}{f - D} - D \right). \quad (3.13)$$

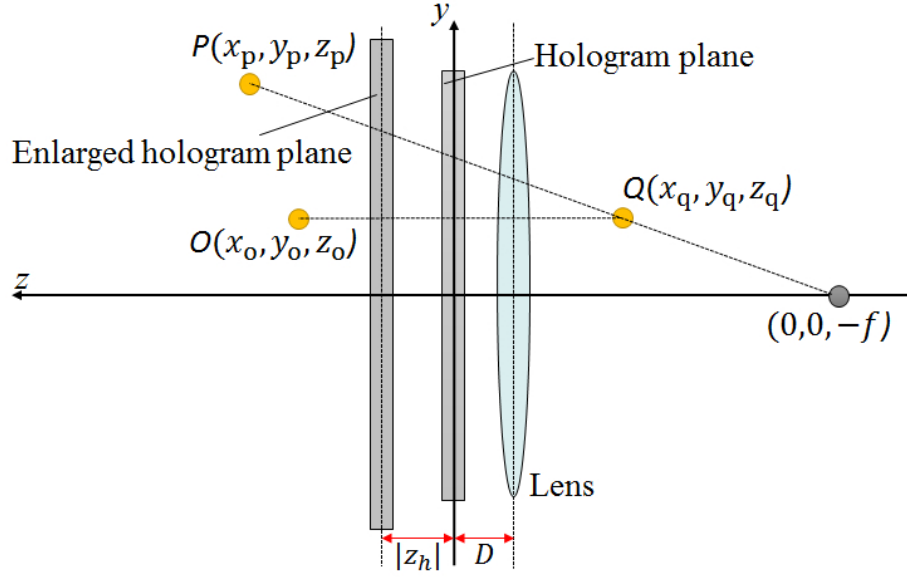


図 3.4: レンズとホログラム間の隙間を考慮した光学系

このことを考慮して式 (3.10)～(3.12) に変更を加えると、それぞれ以下のように計算される．

$$x_o = x_p z_o B, \quad (3.14)$$

$$y_o = y_p z_o B, \quad (3.15)$$

$$z_o = -\frac{f A}{f - A}. \quad (3.16)$$

ただし、上式の A , B は次のように計算される．

$$A = \frac{z_p(f - D) + D^2}{z_p - D - f}, \quad (3.17)$$

$$B = \frac{A + D - f}{A f}. \quad (3.18)$$

この計算式を用いて位置補正を行うことによって、レンズとホログラム面の隙間を考慮した記録を行うことが可能となる．

3.2.2 共役像除去

前述の通り、FTOS を用いた光学系では図 3.3 のように直接像 $P(x_p, y_p, z_p)$ と共役像 $Q(x_q, y_q, z_q)$ の二つの像が再生される．そのため、直接像のみの観察を可能と

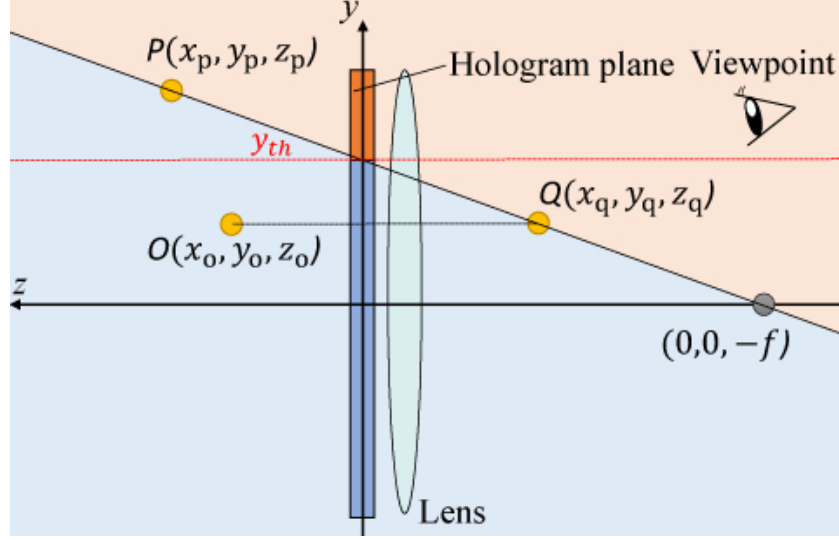


図 3.5: 共役像の除去

するためには共役像の除去処理が必要となる．本研究では空間周波数フィルタリング法に基づいた共役像除去法 [27] を用いて共役像の除去を行った．

FTOSにおいては，0次光をカットするためのバリアを焦点位置に配置する．そのため，実際は焦点よりも x 方向か y 方向にややずれた位置で観察を行わなければならない．ここでは図 3.5 のように y 軸の正方向からやや見下ろすように観察を行う場合について考える．このとき，直接像に関する記録が行われている部分と，共役像に関する記録が行われている部分は，それぞれ直線 PQ で分割されたホログラム面の上部と下部に対応している．よって直接像 P のみを再生するためには，直線 PQ よりも上部のゾーンプレートのみを記録すればよく，下部のゾーンプレートに関しては除去を行う必要がある．ホログラム面と直線 PQ の交点の y 座標を y_{th} と定義すると，

$$y_{th} = \frac{f y_o}{f + z_o}, \quad (3.19)$$

のように求めることができる．よって FTOS では，すべての点光源に対して y_{th} より下の部分のゾーンプレートを削除することによって，共役像の除去を実現している．このとき図 3.5 の橙色の領域から視聴することで，共役像のない像の観察を行うことが可能である．

第4章 レイトレーシング法を用いた CGHのレンダリング手法

CGHの研究において、写実的な表現を可能とするレンダリング手法は未だ確立されていない。しかし、仮想物体を表現するにあたりCGHのレンダリング手法を確立することは非常に重要である。本章ではCGHのレンダリングについての概要を述べ、従来手法として採用されている光線追跡法を用いたCGHのレンダリング手法について説明を行う。

4.1 CGHのレンダリング

モデリングされた三次元物体のデータに対して、カメラや光源の位置、物体の材質等の情報に従って対象シーンの描画を行い、ホログラムを計算することをCGHのレンダリングと呼ぶ。写実的な表現のためには、CGのレンダリングと同様に、CGHにおいても隠面消去や物体の材質に基づくシェーディング、影付けなどを実現しなければならない。しかしながらホログラフィは視差を持たなければならないため、通常のCGのレンダリングアルゴリズムをそのまま適用することはできない。例えば隠面消去について考えると、視点を動かしても像が観察できることがホログラフィの特徴であるため、CGのような一視点からの隠面消去ではCGHの隠面消去を実装することはできない。よって、前述したCGにおける隠面消去アルゴリズムに工夫を加えたCGHのレンダリング手法がいくつか提案されてきた [28–30]。

しかしながらCGHのレンダリングにおいて、隠面消去だけでなくシェーディングや影付け、物体の屈折や反射、映り込みなどの複雑なレンダリングを実現する手法はあまり提案されて来なかった。そこで本研究では、これらの複雑なレンダリングを実現する手法である”光線追跡法を用いたCGHのレンダリング手法 [31, 32]”について着目し、これをベースとして研究を行った。

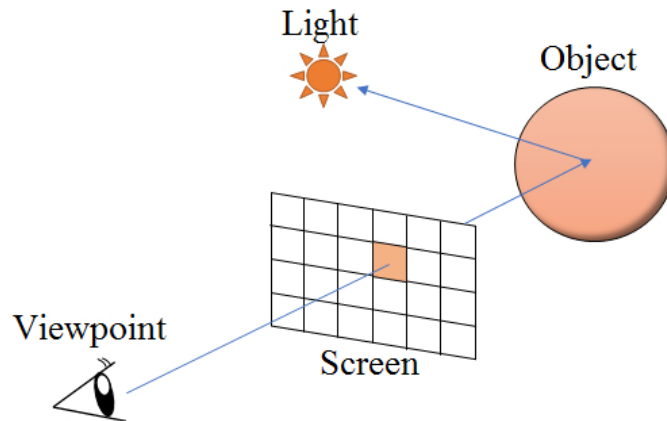


図 4.1: CG における光線追跡法

4.2 レイトレーシング法を用いた CGH のレンダリング手法

CG 分野における光線追跡法 (レイトレーシング法) は, 図 4.1 のように, 視点から表示を行うスクリーン上の各ピクセルの方向へ光線を飛ばし, 物体との交点を計算する. そして視点に最も近い交点の色で該当ピクセルを着色することによりレンダリングを行う手法である [33, 34]. それぞれのピクセルを細かく描写することができるため, 非常に美しいレンダリングを実現することが可能な手法とされており, 光線の追跡を行うことで隠面消去だけでなく, 物体表面での透過や, 屈折, 反射等を忠実に再現することができる.

この光線追跡法を CGH の分野に応用し, 隠面消去やシェーディング, 影付けやガラス球の屈折等を表現することを可能としたのが”光線追跡法を用いた CGH のレンダリング手法”である. 本研究では, この手法を FTOS に適用させたものを従来手法と呼び, ベースとして研究を行っている. 前述のように, CG においては固定された一つの視点から光線を飛ばすことでレンダリングを実現していたが, ホログラフィには運動視差が存在するため, 一つの視点からの光線追跡では視点の移動に伴い物体が欠けたりしてしまう. そこで従来手法では, ホログラム面を要素ホログラムと呼ばれる複数の小領域に分割し, その中心からそれぞれ光線追跡を行う. 光線追跡の結果得られた点情報群から, それぞれの要素ホログラムへの光波伝搬を計算し, 物体光波として記録することで近似的に運動視差を実現している. この要素ホログラムを用いた計算法については, 次の節で詳細を説明する. FTOS の位置補正や共役像除去を含めた全体の計算のフローについては, 4.3 節で詳しく説明を行うものとした.

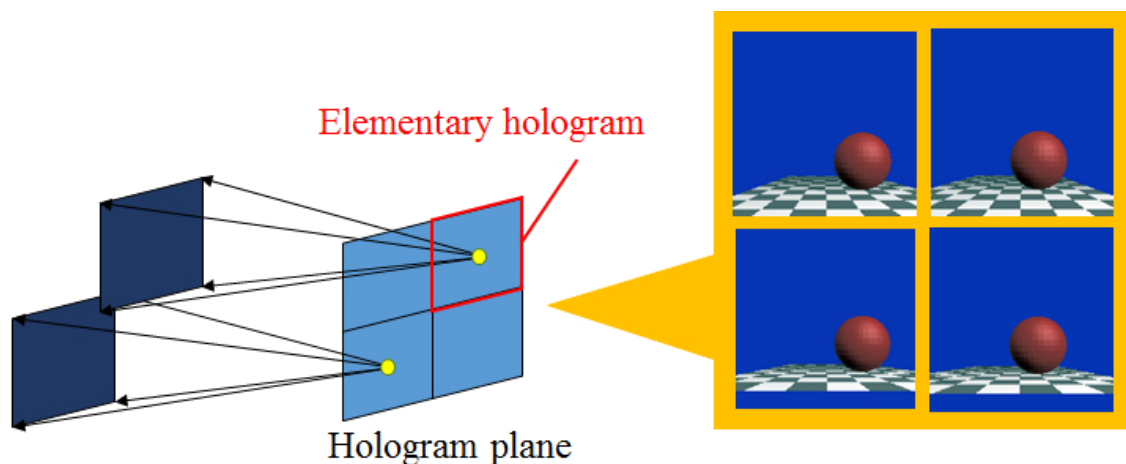


図 4.2: 要素ホログラム

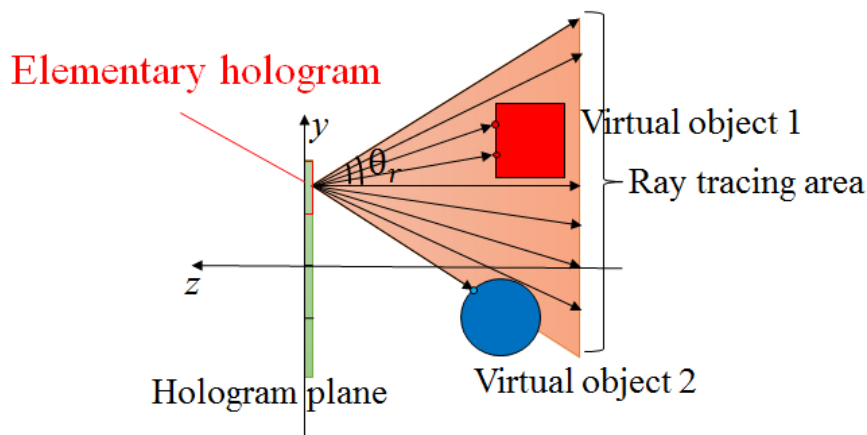


図 4.3: 従来手法における光線追跡法

4.2.1 要素ホログラムを用いた光線追跡

前述の通り，従来手法では図 4.2 のようにホログラム面を要素ホログラムと呼ばれる小領域に分割して，その中心からそれぞれ光線追跡を行うことで，それぞれの視点からの物体の情報を取得している．光線を飛ばす最大角度は，ホログラム面が x - y 平面に位置しているとする， x ， y 方向に対して一定の角度 θ_r である (図 4.3)．この角度は，再生装置で観察できる視野をカバーできるように設定されている．光線の間隔については，点と点の隙間が見えない程度に細かい光線間隔を設定する必要がある．一般には人間の瞳の分解能は $1/60$ 度と呼ばれており，これより細かい光線間隔であれば隙間はわからないとされているが，本研究における再生像の解像度には限界があるため，現状 $1/20$ 度程度の光線間隔でも隙間を観察することはできない．よって，本研究における実験等では光線間隔を $1/20$ 度としているが，適切な光線間隔がどの程度であるかという点に関しては今後検討が必要

となる課題である。また、要素ホログラムに関しても、ホログラム面を細かく分割すればするほど視差の連続性が保たれるが、要素ホログラム 1 枚あたりのピクセル数が減少することにより解像度が低下してしまう。そのため適切な要素ホログラム数についても、今後明らかにしなければならない課題である。

4.2.2 要素ホログラムごとの光波計算

本手法では、要素ホログラムごとに光線追跡法を用いて物体点光源を取得する。その後、それぞれの物体点から要素ホログラムまでの、光波の伝搬計算を行う必要がある。この光波伝搬は、要素ホログラムを用いているということを除けば、一般的な点充填法に基づいた計算で実現される。よって、この光波伝搬は次式で計算される。

$$h_m(x, y) = \sum_{i=1}^I \frac{A_i}{r_i} \exp(jkr_i + j\phi_i). \quad (4.1)$$

ただし、 m は要素ホログラム番号を表し、 i は各光線を表す。また k は波数、 ϕ_i は各点光源の初期位相で、 r_i 、 A_i はそれぞれ物体点から要素ホログラム上の各画素への距離と、物体点の輝度である。このようにそれぞれの要素ホログラムの光波分布を求めることで伝搬計算を行っている。

4.2.3 GPU の使用における高速化

従来、計算機において演算を行うのは CPU (Central Processing Unit) の役割であった。しかしながら、一般的なディスプレイへの画像や映像の表示を高速に行うためには、CPU のような複雑な論理演算に適したデバイスではなく、大量のデータを一度に並列処理できるデバイスの方が望ましい。この考えから生み出されたのが GPU である。本来はグラフィックス用途で生み出された GPU であったが、GPU が持つ高い並列計算性能を汎用的な計算に利用するという試みが近年盛んに行われるようになってきた。GPU をこのような一般的な並列計算に利用することを GPGPU (General purpose computing on GPU) と呼ぶ。GPU は並列計算に適しているため、点充填法を用いる場合に、ホログラム面上の各画素への伝搬計算を並列化することで高速な計算を行うことが可能である。よって、CGH の分野でも点充填法の計算に GPU を用いて高速化を行う研究がここ数年盛んになってきている [14]。

本研究では、NVIDIA 社が開発した CUDA (Compute Unified Device Architecture) と呼ばれる GPGPU 用の統合開発環境を使用して GPU を用いた計算を行っている。点充填法の計算のみならず、光線追跡法の計算も各光線の処理が独立しているために GPU を適用することが可能である。よって本研究では光線追跡法を

用いて点情報を取得する部分と，点充填法を用いて光波伝搬を計算する部分の両方に GPU を用いて計算を高速化している [15].

4.3 光線追跡法を用いた CGH に対する FTOS の適用

光線追跡法を用いた CGH の計算法は FTOS への適用が既に考案されている [10]. FTOS を導入した場合の計算手順について，図 4.4 に示す．第 3 章で述べたように光線追跡法によって取得した点光源を正しい位置に再生するためには，奥行き自由化計算法 [26] を導入する必要がある．よって，光線追跡法によって点光源に対して位置の補正を行う．これは，光波伝搬を計算する前の点光源に対して行わなければならないため，光線追跡法を用いて点情報を取得した直後に補正を行う．そして位置補正を行った点光源からホログラム面までの光波伝搬を計算する．この光波伝搬計算の中で，それぞれの物体点光源からの伝搬光波に対して，共役像を除去するための空間周波数フィルタリング法を適用する [27]. この処理によって，共役像部分のゾーンプレートがカットされ，直接像のみの観察を実現することが可能となる．それに加え，伝搬計算の中で周波数制限処理を行う必要がある．よって，伝搬計算を行う前に周波数制限と共役像除去を行う範囲を計算し，除去を行う必要がない部分に対してのみ光波伝搬計算を行うことで効率的に計算を行っている．

4.4 従来手法の計算時間

従来手法の計算時間については，文献 [32] 等の中でも触れられているが，本研究の従来手法に関するプログラムは時を経るごとに最適化が成され，高速化が進んでいる．よって提案手法の高速化を説明する際に，一概に過去の論文と計算時間を比較することは望ましくない．よって本節では最新のプログラムでの従来手法の計算時間を測定し，それを従来手法の実験結果として紹介することとした．

4.4.1 実験環境

使用した計算機

まず，本研究に用いた計算機のスペックを表 4.1 に示した．従来手法には GPU による高速化が取り入れられており，計算速度には CPU だけでなく，GPU の性能も大きく関わってくる．

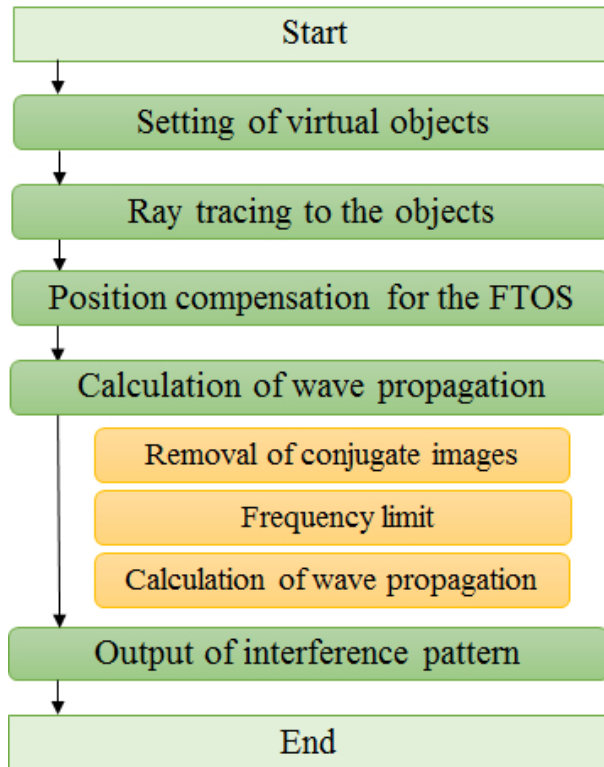


図 4.4: FTOS を導入した従来手法の計算手順

CGH 計算部の概要

従来手法の計算においては，光線追跡部と光波伝搬部には GPGPU による高速化を施し，参照光との干渉計算やファイルの出力過程においては CUDA 用の並列アルゴリズムライブラリである thrust ライブラリを用いて高速化を実現した．また光線追跡部ではパッチに対して，フォンシェーディング [35] の計算を実装した．

また，フルカラー再生のためには赤と緑，青の干渉縞をそれぞれ計算する必要があるが，このときに点光源からホログラム面のあるピクセルまでの距離計算等は 3 色につき一度行えば十分である．そのため最適化の一環として，従来手法においては 3 色に関して一度で済む計算は一度だけ行うような形で最適化を施すことで高速化を図った．

使用した装置と記録上のパラメータ

従来手法に関する実験の中で，再生実験に用いた装置と，記録上のパラメータに関して示す．本章における実験には，FTOS を適用した接眼型セミポータブルホログラフィックディスプレイ [36, 37] を使用した (図 4.5)．本装置は，独立した単眼視用のユニットを二つ組み合わせて両眼視を実現するものであるが，両眼再生の場合には左右の眼に合わせるための座標変換を必要とすることを除けば，単

表 4.1: 使用した計算機の性能

Computer parameters for exmeriments	
CPU	Intel® Core(TM) i7-3970X
OS	Windows 7 Professional 64 bits
Memory capacity	64.0[GB]
Clock frequency	3.5[GHz]
GPU	NVIDIA GeForce GTX TITAN
The number of CUDA cores	2688

表 4.2: 再生装置のパラメータ

SLM のピクセルピッチ	9.6(H)×9.6(V)[μm]
SLM のピクセル数	1280×768[pixels]
リフレッシュレート	180[Hz]
波長 (赤, 緑, 青)	625, 525, and 465[nm]
レンズの焦点距離	100[mm]
SLM とレンズの間の距離	8.0[mm]

眼視用の計算を二度行うだけで両眼再生が可能である [38]. よって, 今回の実験においてはすべて単眼用として一つのユニットを用いて CGH の記録と再生を行った. また, 本装置は時分割方式でフルカラーの再生を可能としている. 再生光源としては LED(Light Emitting Diode) を用い, LED と再生に用いる LCD を同期回路で制御することによってフルカラー再生を実現している [39]. 表 4.2 は, 今回の実験に用いた装置のパラメータである. 本研究中で紹介されるすべての実験について, ここで紹介した再生装置を用いて再生実験を行っている.

また, 今回の記録過程の計算に用いるパラメータを表 4.3 に記した. 記録過程における光線追跡法の光線は, FTOS で達成される視野をすべてカバーできる最小本数で飛ばすものとし, 光線間隔を 0.05 度とすると, このときの光線本数は 161×161 本となる. さらに従来手法の計算時間測定においては, ある程度視差の連続性を保つために, 要素ホログラム数は 10×6 枚とした.

表 4.3: 記録に用いるパラメータ (従来手法)

要素ホログラム数	10(H)×6(V)
各要素ホログラムから射出される光線数	161×161

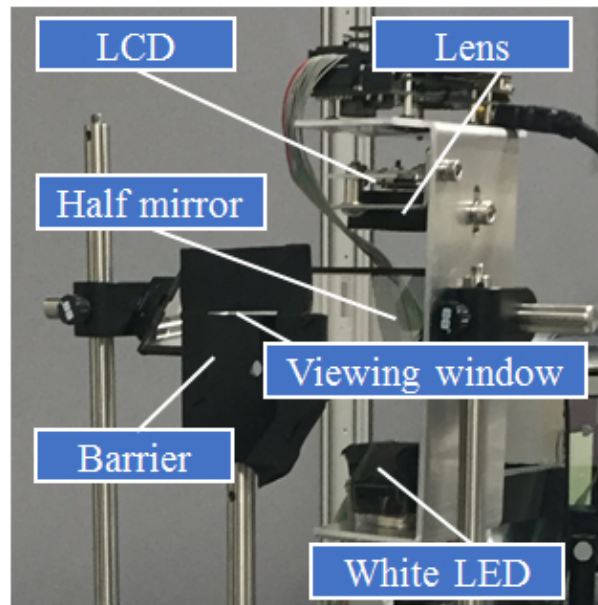


図 4.5: セミポータブルホログラフィックディスプレイ

記録に用いたシーン

本手法の計算時間は、記録を行う仮想物体の複雑さや、仮想物体が視野の中でどれだけの大きさを持っているかに大きく依存する．そのため基準となる計算時間として、図 4.6 のように視点から 1m 先に半径 2cm の赤い球、視点から 2m 先に巨大な白の板を配置したシーンについて計算時間を測定した．ただし視点からホログラム面までの距離は 10cm である．このシーンでは、すべての光線の先に点光源が存在することとなり計算時間は非常に大きくなる．白板は巨大な三角形パッチを 2 枚を組み合わせで四角形とすることで実現し、赤い球は 960 枚のパッチから構成されているため、このシーン全体のパッチ数は 962 枚である．

4.4.2 実験結果

実験の計算時間について表 4.4 に示す．表 4.4 に示される各ステップである Setting, Raytracing, Wave propagation, Interference の詳細について以下に記した．

- Setting : 仮想物体の配置を行う．今回は FBX ファイルから作成した CGH 用フォーマットから各ポリゴン情報を全て入力し、仮想物体の配置を行った．
- Raytracing : 光線追跡を行う部分で、要素ホログラムの枚数分の光線追跡を行う必要がある．また、FTOS のための位置補正に関する計算時間もこのス

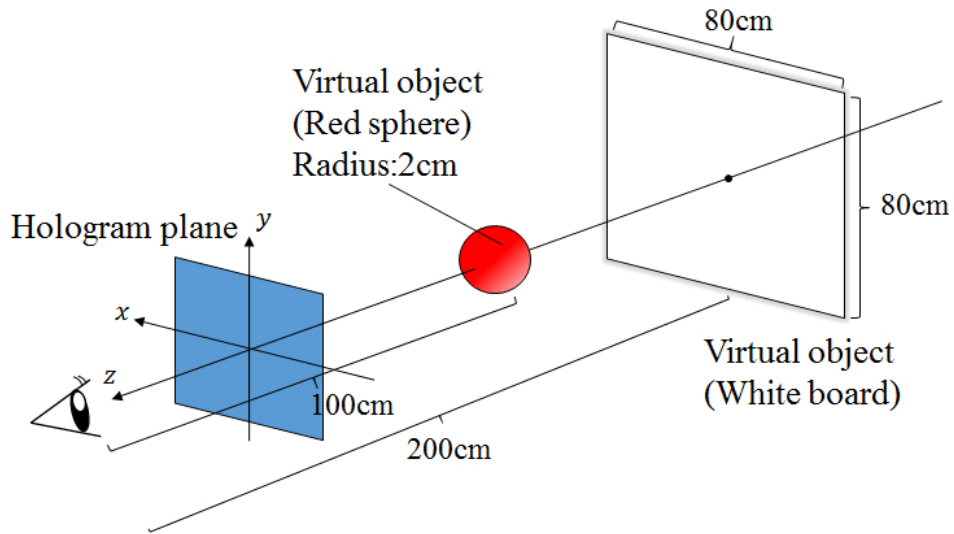


図 4.6: 記録に用いたシーン

表 4.4: 従来手法の各ステップの計算時間

ステップ	計算時間 [ms]
Setting	13
Raytracing	396
Wave propagation	1647
Interference	11
Total	2067

ステップの計算時間に含めてあるが、光線追跡の計算時間と比べると微小である。

- Wave propagation : 光波伝搬に関する計算部分。今回は点情報の格納されたバッファを CPU から GPU へ移動するなどのメモリコピーの時間を含めての計算時間とした。伝搬計算そのもの以外にも、周波数制限や共役像除去の計算時間も含まれる。この計算において、計算結果をグローバルメモリへ書き込む処理のコストが大きいと考えられるため、各点光源からの伝搬計算の結果は常にレジスタに蓄えられ、最後に全ての光波伝搬計算を済ませたレジスタの値をホログラム面を格納するバッファへ代入することで、一度だけの書き込みでホログラム面を計算できるように実装している。
- Interference : 挿入する参照光の計算と、参照光と物体光波の干渉計算に加えて、今回は CGH を ppm 画像の形式で出力したが、この画像出力に関する計算時間も含めている。正規化等のために行う輝度値の最大値、最小値の探索

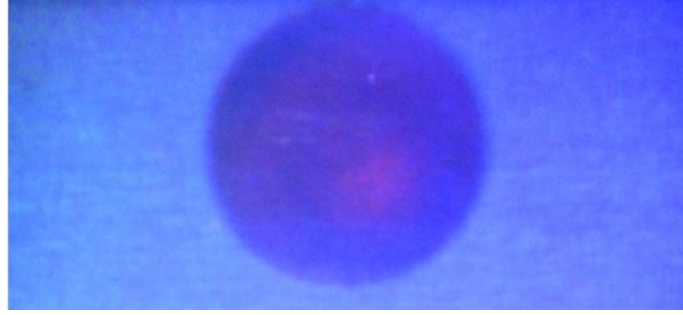


図 4.7: 従来手法の再生像

に関して Thrust ライブラリを導入し，従来よりも高速な干渉計算と出力を行えるようにした．

今回のコンテンツは，すべての光線の先に点光源が存在するため，一つの要素ホログラムに対して $25921(161 \times 161)$ 個の物体点数を計算している．この結果から，計算の大部分を光線追跡と光波伝搬に関する計算時間が占めていることがわかった．よって，高速化を考える場合には光線追跡と光波伝搬の計算時間を減らす必要があり，特に計算時間の大きい光波伝搬計算の計算時間を減らしていくことが必要であると言える．また，今回は 962 枚のパッチを用いたが，パッチ数が多くなればなるほど光線追跡の計算時間が増加することが考えられる．よって，光線追跡の計算時間についても削減していくことが今後の課題となる．また本実験に用いた光学再生像を図 4.7 に示した．

第5章 回折角度に基づく物体点数削減法 (提案手法1)

5.1 研究背景と目的

従来手法 [10] は、光線追跡法に基づく写実的な場面の表現と、FTOS による広視野での観察を可能とする手法であった。しかしながら従来手法には計算時間が膨大であるという欠点が存在していた。特に CGH で動画を作成する場合には、多くのフレームを生成しなければならず計算時間は非常に大きくなってしまう。この CGH 動画の作成を高速化することを考えたときに、高速化のアプローチは CGH1 枚単位を高速化するアプローチと、動画の特性に着目して高速化するアプローチの二つに分けられる。まず、本章では前者のアプローチである、CGH1 枚単位で高速化を行う手法について提案した。

1 枚単位の高速化のアプローチとしては、隣接ピクセルの差分を利用した手法 [16] や、点充填法に基いてパッチモデルを高速計算する手法 [17, 18]、三角関数の性質に着目して高速に計算を行う手法 [19]、予めゾーンプレートを計算して足し合わせることで高速化を図る LUT を用いた手法 [20, 21] 等が提案されてきたことは以前の章にて述べた。しかし多くの高速計算手法は画質の劣化が発生したり、LUT のように劣化が少ない手法でも、メモリの消費量が大きかったり、メモリへのアクセスの頻度が大きいために GPU 計算との相性が悪いなどの問題が存在していた [40]。

もともと [10] の手法は、最初は FTOS を適用しない形での提案が行われており [31]、FTOS に完全に最適化されているわけではなかった。そこで、我々は従来手法 [10] の計算の無駄な部分を削減することで、画質の劣化やメモリの使用量を増やすことなく、CGH の生成において特に計算時間の大きい光波伝搬部分の計算処理時間を削減することに着手した。FTOS を使用した場合の効率の良い計算法を提案し、これを提案手法1として紹介する。

5.2 回折角度に基づく物体点数削減法

4.4.2 項で示したように、従来手法では光波伝搬に関する計算時間が大きいことが全体の計算時間の増加の原因となっていた。故に、計算を高速化するためには伝搬計算部分の高速化を図ることが肝要である。

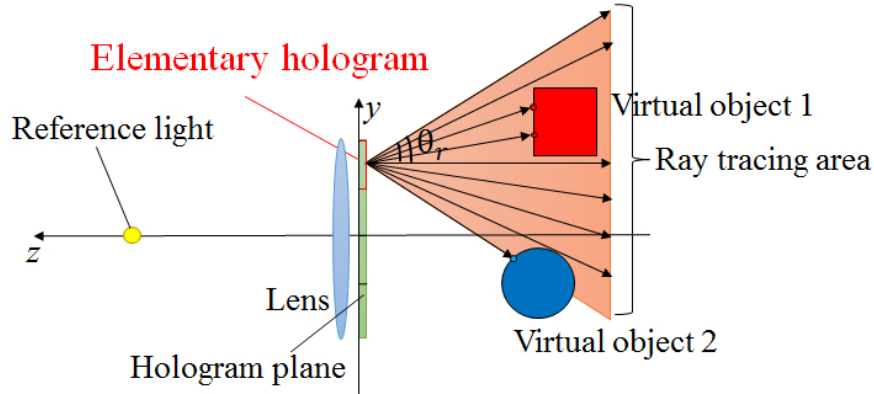


図 5.1: 従来手法の計算領域

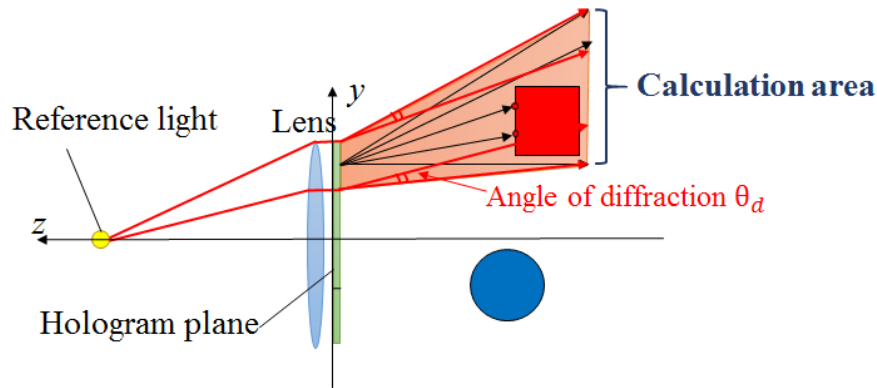


図 5.2: 提案手法 1 の計算領域

第 4 章で紹介したように、従来手法において光線追跡は図 5.1 のように θ_r と定義された一定の角度に対して行われていた。そして、そこから得られた点光源に対して FTOS のための位置補正を行い、その後に光波伝搬を計算していた。しかしながら、この計算法は FTOS に最適化されたものではなかった。本来、ホログラフィの再生は参照光波がホログラム面上で回折を起こすことによって行われる。よって、この回折光が届かないであろう角度の位置にある物体点光源に関しては計算を行う必要はない。従来手法においては、このような点光源は光波伝搬部分の周波数制限処理において除去されることで正しい像を再生することができていた。

しかし、GPU での光波伝搬計算を行う場合、GPU のグローバルメモリへのメモリアccessや、CPU から GPU へのデータの伝送に大きな処理時間を要する。したがって伝搬計算を行う前に、このような回折角度外の点光源に関しては除去してしまうのが望ましい。よって提案手法では図 5.2 のように、回折角度をホログラム面のピクセルピッチから計算し、回折光が届かない領域の点光源を予め除去してから、GPU における光波伝搬計算を行うことで効率的な計算を実現する。ホロ

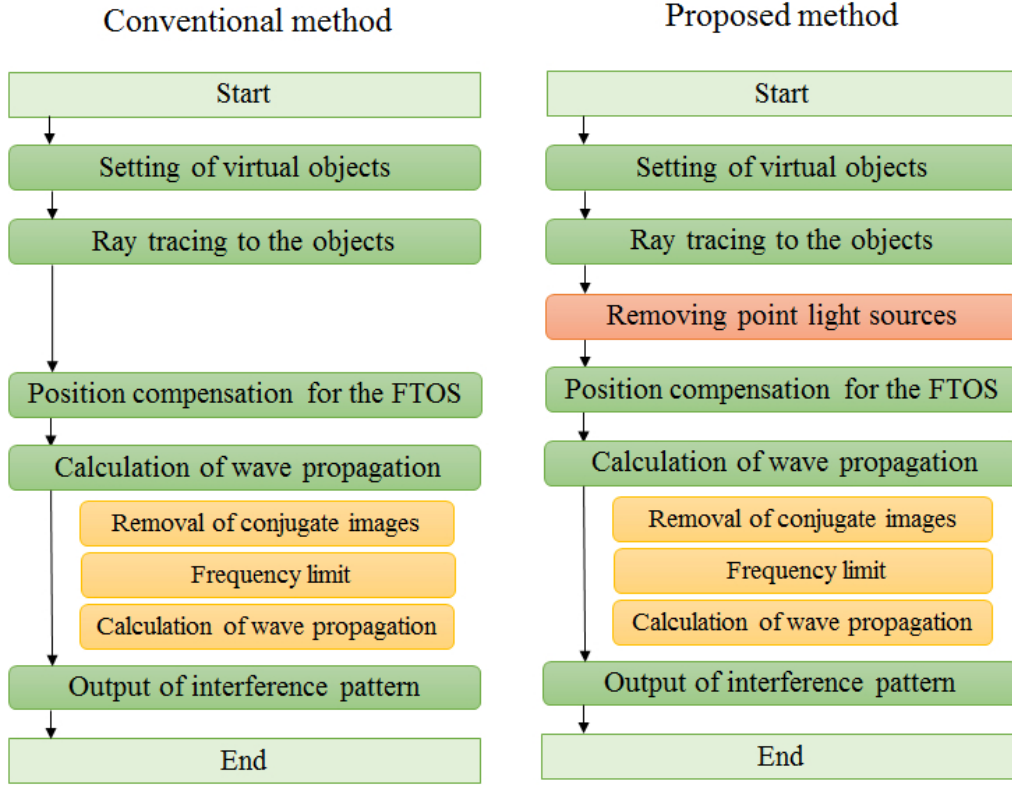


図 5.3: 提案手法 1 の処理の流れ

グラム面での回折角度 θ_d は次の式で計算される。

$$\theta_d = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2p} \right). \quad (5.1)$$

ここで p は記録面のピクセルピッチ， λ は参照光の波長である．さらに，図 5.3 に従来手法の計算プロセスと，提案手法の計算プロセスを比較のために記した．提案手法では光波伝搬計算の前に回折角度に基づいた計算領域を算出し，その範囲外にある点に関しては除去を行っている．式 (5.1) によると，回折角度は波長に依存する．しかし，フルカラーの再生を行う場合には，赤，緑，青の光の三原色を用いるため，それぞれの色に関する CGH を出力する必要がある．よって，色ごとに回折角度は異なり，除去を行うべき範囲も異なってくるという点に関しては注意しなければならない．また，このことは青よりも緑，緑よりも赤の方が計算範囲が広いことを示唆しており，全体的に赤が多いシーンの方が，全体的に青が多いシーンよりも計算時間が大きくなるということが考えられる．しかし，今回の実験では色ごとのばらつきによる計算時間の違いについては検討を行わなかったため，今後の課題とする．

表 5.1: 第 5 章で使した計算機の性能

Computer parameters for exmeriments	
CPU	Intel® Core(TM) i7-3970X
OS	Windows 7 Professional 64 bits
Memory capacity	64.0[GB]
Clock frequency	3.5[GHz]
GPU	NVIDIA GeForce GTX TITAN
The number of CUDA cores	2688

表 5.2: 記録に用いるパラメータ (提案手法 1)

要素ホログラム数	10(H)×6(V)
各要素ホログラムから射出される光線数	161×161

5.3 実験

本手法の有効性を示すために、従来手法と提案手法で同一のコンテンツを作成し、その計算時間と再生像について確認を行った。

5.3.1 実験環境

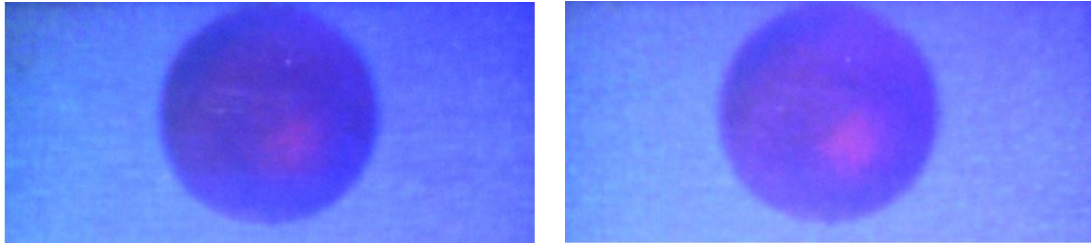
まず、本研究に用いた計算機のスペックを表 5.1 に示した。ここでは、第 4 章と同じ実験環境を用いて実験を行った。本研究における実験には、第 4 章と同じ FTOS を適用した接眼型セミポータブルホログラフィックディスプレイ [36] を使用した。また、今回の計算に用いるパラメータを表 5.2 に記した。

5.3.2 実験 1：白板に関する比較

初めに 4.4.2 項で計算した従来手法の計算時間との比較を行うために、図 4.6 と同一のシーンに対して提案手法で計算を行った。視点から 1m 先に半径 2cm の赤い球、視点から 2m 先に巨大な白の板を配置している。この計算時間について、従来手法と提案手法を比較した結果を表 5.3 に示した。ただし、ここでの計算時間は光波伝搬部に関する時間のみを記載しており、回折角度外の物体点の除去に必要な計算時間は微小であるため、全体の計算時間に影響を与えないことを確かめている。この実験の結果、光波伝搬の計算時間が 1647ms から 481ms に短縮され、3 倍以上の高速化が成されていることがわかった。また、このときの計算点数は従

表 5.3: 実験 1 の計算時間 (提案手法 1)

手法	計算時間 [ms]
従来手法 [10]	1647
提案手法	481



(a) 従来手法の再生像

(b) 提案手法の再生像

図 5.4: 実験 1 の再生像 (提案手法 1)

来手法で 25921 点, 提案手法では 7237 点であった. さらに, 本手法での再生像の劣化が起こらないことを確かめるために, 従来手法と提案手法の再生像をカメラで撮影した. その結果が図 5.4 である. 若干色合いに違いはあるものの, 提案手法の方が色合い等やや鮮やかに見え, 少なくとも提案手法を用いて画質が劣化することはないということがわかる.

色合いに若干の変化が生じる理由について, 通常最終生成物の CGH を出力する際には, 値を 0-255 などの離散値に変換し, 画像データとして CGH を出力する. 一方, この画像データの元となる干渉縞の強度分布や, ホログラム面の物体光波は離散値ではない. 点数が多ければ多いほど, 最大値を持つピクセルと最小値を持つピクセルの差が大きくなり, 0-255 に量子化した際の誤差が大きくなる可能性がある. 結果, 二つの結果を比較して, 色合いの変化が生じているものと考えられる.

5.3.3 実験 2 : 白色球に関する比較

実験 2 では, 実験 1 と比べて小さい物体に関する計算時間と再生像を比較した. 図 5.5 のように, 実験 1 と同様の球を色を白に変えて 1 個だけ配置して, 背景には何も配置しなかった. このコンテンツでは光線追跡は全面に対して行われるが, 交差判定において物体と交差しない光線が出てくるため, 物体点数は従来手法と提案手法のどちらにおいても実験 1 と比較して減少する. このとき, 従来手法の物体点数は 2560 点, 提案手法の物体点数は 1233 点となった. 計算時間について

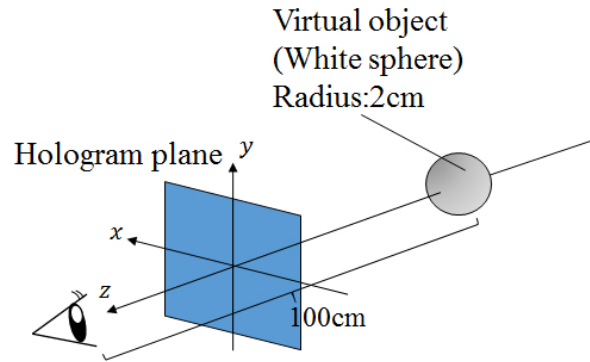


図 5.5: 実験 2 に用いたシーン

表 5.4: 実験 2 の計算時間 (提案手法 1)

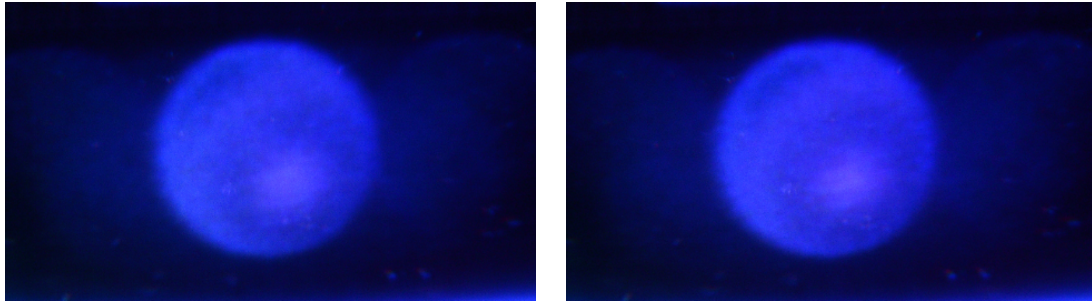
手法	計算時間 [ms]
従来手法 [10]	160
提案手法	120

て、従来手法と提案手法を比較した結果を表 5.4 に示した．この実験の結果，光波伝搬の計算時間が 160ms から 120ms に短縮され，1.3 倍程度の高速化を実現できていることがわかったが，実験 1 ほどの高速化の結果を得ることはできなかった．次に，本実験の再生像について図 5.6 に示した．この結果，本手法では再生像の劣化が起こらないということを実験的にも確認することができた．

5.4 考察と結論

実験 1 と実験 2 を通して共通する結果として示すことができたのは，本手法によって再生像の劣化は全く見られないということと，コンテンツの違いによる影響はあれども，光波伝搬の計算時間を削減できるということである．この実験において，視野をすべて満たすための θ_r は約 4 度と計算される．それに対して，回折角度から算出される θ_d は，最も波長の長い赤の波長を用いても約 1.9 度と計算される．このことから， θ_d を用いて算出した点光源の存在範囲は，従来手法で光線を飛ばしていた範囲よりも狭いことは明らかであり，範囲外の点を予め削除しておくことで GPU へのメモリコピーの時間等を減らすことが可能となり，計算時間が削減される．よって再生像の劣化が見られないことを考慮すれば，本手法は従来手法を効率的に計算することのできるアルゴリズムであると言える．

一方，実験 1 では 3 倍以上の高速化が図られたのに対して，実験 2 では 1.3 倍程度しか高速化されなかった．この理由について考察を行う．まず実験 2 のように，すべての光線が物体と交差しないような小さい物体の場合には，本手法で除去を



(a) 従来手法の再生像

(b) 提案手法の再生像

図 5.6: 実験 2 の再生像 (提案手法 1)

行う範囲に多くの物体点光源が存在するとは限らず、効率が低下してしまうことが考えられる．実際，実験 1 では計算点数が従来手法で 25921 点，提案手法では 7237 点であったのに対して，実験 2 では従来手法の物体点数は 2560 点，提案手法の物体点数は 1233 点である．また，実験 1 のようにすべての光線の先に物体が存在するようなシーンでは，それぞれの要素ホログラムが，ほぼ同一の数の物体点光源から計算される．しかし，実験 2 のような x - y 平面の中央に小さい球が置かれているようなシーンでは，中央付近の要素ホログラムの計算のために多くの点光源が必要となるのに対して，端の方の要素ホログラムに対してはほとんど伝搬計算を必要とせず，GPU の並列計算を行う際にピクセルごとの処理時間にばらつきが生じてしまう．並列化をして計算を行った場合，基本的には先に計算を終えるコアがあったとしても，最も計算時間を必要とするコアが計算を終えるのを待たなければならない．よって，このピクセルごとの計算時間のばらつきによって効率を落としているのではないかと考えられる．さらに，実験 2 はもともとの計算時間が小さいため，従来手法と提案手法で共通に必要となるオーバーヘッドタイムの影響が大きく出てしまい，その分だけ効率が低下しているのではないかと考えられる．

このように，コンテンツによっては大きな効果を期待することができない場合もあるが，本手法は多くの高速計算アルゴリズムと違い，理論的にも実験からも再生像の劣化が起こらないということは明らかである．よって，今後従来手法を用いて計算を行う場合には，回折角度に基づいて範囲外の点を除去してから光波伝搬の計算を行うことが望ましい．

実験で用いたプログラムでは，光線追跡法を行った後に一度点情報を GPU 側から CPU 側へ戻して，回折角度外の点の除去を行い，点情報のバッファを作り直した後に，光波伝搬処理で再び GPU 側に伝送している．しかし，光線追跡部から光波伝搬部までを全て GPU 側で一貫して行える方がメモリコピーの時間が減少するため望ましい可能性がある．ただし，このような除去処理を一定に並んだ点情報

バッファに行ってしまうと，光波伝搬部において点情報へのコアレスドアクセスが行われなくなる可能性もあるため，一概にこの実装が望ましいとは言えない．将来的には CPU にデータを戻さずに光線追跡部から光波伝搬部まで計算できるようなプログラムを実装し，既存のものと計算時間についての比較検討を行っていく必要がある．

第6章 移動物体分離法 (提案手法2)

6.1 研究背景と目的

前の章では CGH1 枚の生成処理を高速化する回折角度に基づく物体点数削減法について述べた。これは光線追跡法ベースの CGH 計算法において、CGH1 枚の生成を高速化する手法であった。言うまでもなく、動画は複数枚の CGH の集合であることから、CGH1 枚単位の生成時間を高速化することで、動画の出力も高速化することができる。一方、CGH 動画の生成を行う場合、図 6.1 のように毎フレームで光線追跡と光波伝搬の計算を繰り返し実施する。しかし、動画の中でシーン内のすべての箇所が時間の流れと共に変化するのは稀であるため、全面の再計算を行うことは、計算の効率の面から無駄であることが多い。そこで、CGH1 枚単位の高速化アルゴリズムとは違うアプローチとして、動画の特性に着目し、フレーム間の冗長性などに基づいて計算量を削減するアルゴリズムも考えられる。このようなアルゴリズムが一切導入されない場合、従来手法を用いて CGH 動画を作成する場合には、物体の配置の変化がわずかであったとしても、その度に同一の処理を行い CGH を出力しなければならない。

このような動画の特性を利用した計算手法としては、先行研究として LUT を用いた手法 [41] や、モーションベクトルを用いて高速化する手法 [42] などが提案されていた。しかし、LUT を用いた手法はメモリアクセスが増えるために GPU との相性が悪く、またモーションベクトルを用いた手法は、仮想物体の位置する深さが大きく変化した場合に再計算しなければならないなどの問題が存在していた。さらに、その他の手法としては時分割で記録、再生を行って高速化する手法 [43,44] が提案されているが、時分割化による画質の劣化は避けられない。従来手法は非常に高い写実性を持つ計算手法であるため、大きな画質の劣化が起こることは望ましくない。

一般に、CGH 動画としてあるシーンを表現する場合、シーンは移動する物体と、移動が起こらない静止物体に分割可能であることが多い。そこで、本章では動画の中で動く移動物体と、動画の中でも動かない静止物体にオブジェクトを分割して高速化を行う移動物体分離法を提案する。移動物体分離法では、初めに静止物体に関しての CGH 計算を済ませ、その結果として得られたホログラム面上の物体光波を保存しておく。その後は静止物体から得られた物体光波に、移動物体が与える影響を加減算することで CGH 動画の高速計算を行う。画面全体に対して移動物体が占める領域が小さければ、計算量を削減することが可能である。本アルゴ

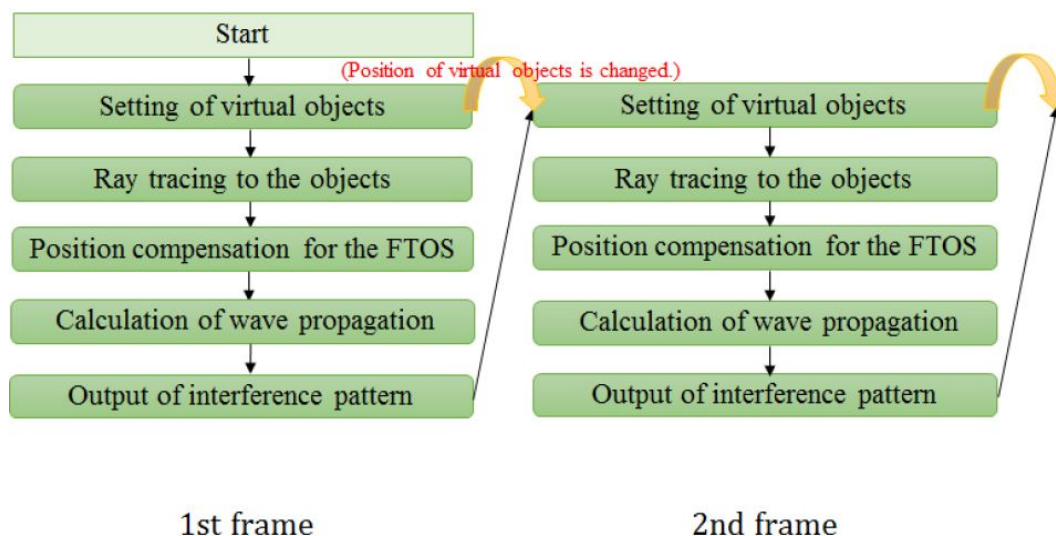


図 6.1: 従来手法を用いての CGH 動画作成の流れ

リズムの適用先としては，例えばスポーツシーンの 3D シーンを再現する自由視点映像技術 [45–47] などが挙げられる．自由視点映像技術は，例えば競技場などに置かれた複数のカメラからシーンの 3DCG のモデルを復元する技術である．このとき，背景のスタジアムなどの CG モデルなどは静的なモデルとして用意され，移動する人物やボールなどの被写体のみを 3D モデル化する．よって，移動物体と静止物体が明示的に分かれて入力される．このような自由視点映像技術を応用したサービスとして，3DCG のモデルとして復元したデータをホログラムのような立体映像技術で再現し，空間を丸ごと再現することで，遠方で行われているスポーツシーンを立体映像として目の前に再現することなどが考えられる．そういったユースケースの中で，静止物体と移動物体を分離して高速に計算することのできる本アルゴリズムを用いることで，高速に計算を行うことが期待される．

6.2 移動物体分離法

6.2.1 移動物体分離法の光波伝搬計算

提案手法では初めに，動画の各時間のフレームとは別に，静止物体からの光波を計算して保存しておかなければならない．この計算は従来手法と同一の処理によって行われる．まず静止物体のみが存在するシーンに対し光線追跡を行う．そして光線追跡によって得られた点光源から，ホログラム面までの光波伝搬を計算し，その結果を保存する．これが Base-frame であり，ここでは説明のために Base-frame として記録されたホログラム面上の光波分布を $u_{base}(x, y)$ と定義する．この処理を説明したのが図 6.2 である．ただし説明に用いている図は簡単のために，1 枚の要素ホログラムを Base-frame とし，1 枚の要素ホログラムに関する処理だけを記述

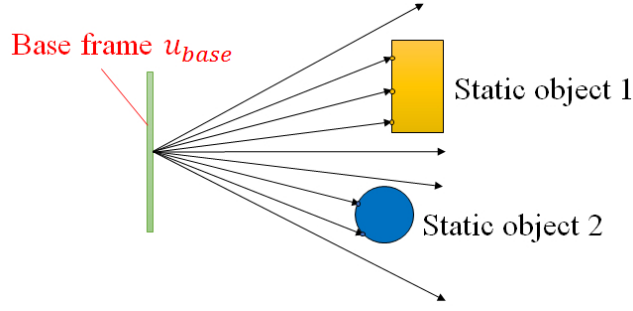


図 6.2: Base-frame の記録

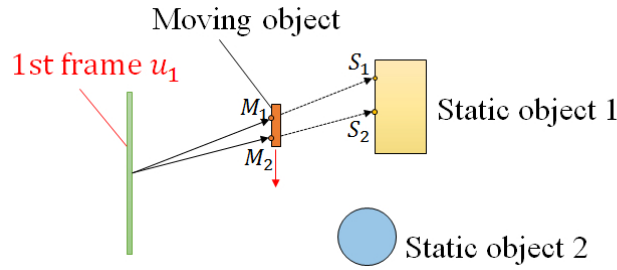


図 6.3: 移動物体の計算法 1

している．実際にはすべての要素ホログラムに対して同一の処理を行わなければならない．

提案手法では次に，移動物体に関する部分の計算を行い，動画内の各フレームを生成する．移動物体に対しても，初めに光線追跡を行い点情報を取得する．この処理を図 6.3 を使って具体的に説明する．図 6.3 中では，移動物体を構成する点光源は M_1 と M_2 である．そして移動物体 M_1 , M_2 によって隠される部分の点は S_1 , S_2 である．よって，このシーンにおけるホログラム面上の光波分布 $u_1(x, y)$ を求めるためには，Base-frame の光波 $u_{base}(x, y)$ に対して，移動点光源 M_1 , M_2 からの光波 $u_{M_1}(x, y)$, $u_{M_2}(x, y)$ を加算し，それによって隠される S_1 , S_2 からの光波である $u_{S_1}(x, y)$, $u_{S_2}(x, y)$ を減算すればよく，

$$u_1(x, y) = u_{base}(x, y) + u_{M_1}(x, y) + u_{M_2}(x, y) - u_{S_1}(x, y) - u_{S_2}(x, y) \quad (6.1)$$

と式で表すことができる．これにより，移動物体によって隠される部分の隠面消去を実現することができる．このように，物体の影となる部分からの伝搬光波を減算することで隠面消去を実現する手法を影伝搬法と呼ぶ [48]．この影伝搬法を CGH 動画に適用することで，画面全体に対して移動物体が占める領域が小さければ，計算量を削減することが可能である．

また，この計算は移動物体がさらに移動した場合においても同様に行うことができる．図 6.4 のように，移動物体が下へ動いた場合を考えると，新しいフレーム

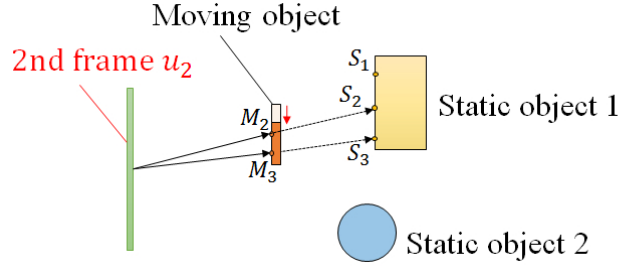


図 6.4: 移動物体の計算法 2

$u_2(x, y)$ は

$$u_2(x, y) = u_{base}(x, y) + u_{M_2}(x, y) + u_{M_3}(x, y) - u_{S_2}(x, y) - u_{S_3}(x, y), \quad (6.2)$$

と計算できる．ただし， $u_{M_3}(x, y)$ は M_3 による光波で， $u_{S_3}(x, y)$ は M_3 によって覆い隠される点光源 S_3 からの光波であるとする．

よって，移動物体の物体点からの光波を $u_{M_i}(x, y)$ とし，それによって覆い隠される部分の光波を $u_{S_i}(x, y)$ とすると，以下のように移動物体分離法の計算式を一般化することができる．

$$u_l(x, y) = u_{base}(x, y) + \sum_{i=1}^N u_{M_i}(x, y) - \sum_{i=1}^N u_{S_i}(x, y). \quad (6.3)$$

ここで $u_l(x, y)$ は，求めるべきフレームの光波分布である．

6.2.2 前方への静止物体の配置

このアルゴリズムは，移動物体によって遮られる静止物体からの光波を減算することで隠面消去を実現する手法である．しかし，実際には静止物体の間を移動物体がすり抜けるような，前方に静止物体が存在するシーンについて計算を行わなければならないことも多い．よって，移動物体の前方に静止物体が置かれている場合の計算法について，ここでは簡潔に示すこととする．

提案手法では，静止物体の光波を記録する Base-frame を計算する段階で，光線追跡の視点から見える静止物体を構成する物体点光源の位置はすべて特定されている．そのため，移動物体の計算を行う際に，静止物体を構成する点光源との奥行き値の比較を行い，もし静止物体を構成する点光源が移動物体よりも前方にあれば，移動物体に関する計算を行わないという処理を加えることで前方に静止物体を置くことが可能となる．これはどの光線に，どの点光源が存在していたかということを関連付けておけば，簡単に行うことができる処理である．ここでは，例えば図 6.5 のような二つの静止物体の間を，移動物体の面がすり抜けていくようなシーンについて考える．このシーンでは移動する橙色の面の前方に，緑の静止物

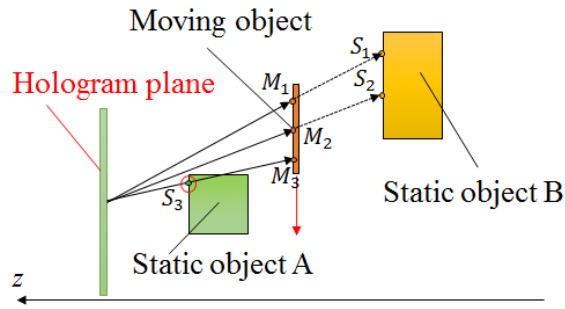


図 6.5: 前方への静止物体の配置

体 A が存在している．このとき，図中の点光源 M_1 と M_2 は前方に静止物体がないため計算が行われるが， M_3 に関しては S_3 との奥行き値の比較により S_3 の方が前方にあるということがわかるため， M_3 に関する計算は行われない．よって，前方にある S_3 の結果だけが残る，移動物体に対する隠面消去も正しく行われることになる．

6.2.3 移動物体分離法への提案手法 1 の導入

本論文中における移動物体分離法には，第 5 章で紹介した提案手法 1(回折角度に基づく物体点数削減法)を組み込むこととした．移動物体分離法に関する研究発表では，3次元画像コンファレンス 2014 では雪のような粒子状の点光源に関する移動物体分離法について提案し [49]，JSAP-OSA Joint symposia 2014 では点を組み合わせる面を構成しても隠面消去ができるということを証明したが [50]，提案手法 1 が発表されたのは 2015 年に入ってからのものであり [51]，いずれの発表においても移動物体分離法に提案手法 1 は組み込まれていなかった．移動物体分離法に回折角度に基づく物体点数削減法を導入するためには，Base-frame の計算で回折角度外の点を除去し，また移動物体の計算においても同様に除去を行えば良いため，特に難しい処理は必要にならない．よって，後述される実験では移動物体分離法に提案手法 1 を組み込んだものに関して実装し，その結果について報告することとした．また最後に，回折角度に基づく物体点数削減法を導入した場合の移動物体分離法の計算処理の流れについて，図 6.6 に示した．

6.3 実験

本手法の有効性を示すために，従来手法を用いた従来動画と，提案手法を用いた提案動画を作成し，比較を行うこととした．従来動画の生成の流れは図 6.7，提案動画の生成の流れは図 6.6 である．今回の従来動画の各フレームは，提案手法 1 を導入して回折角度外の点をすべて除外したものを用いており，各フレーム間で

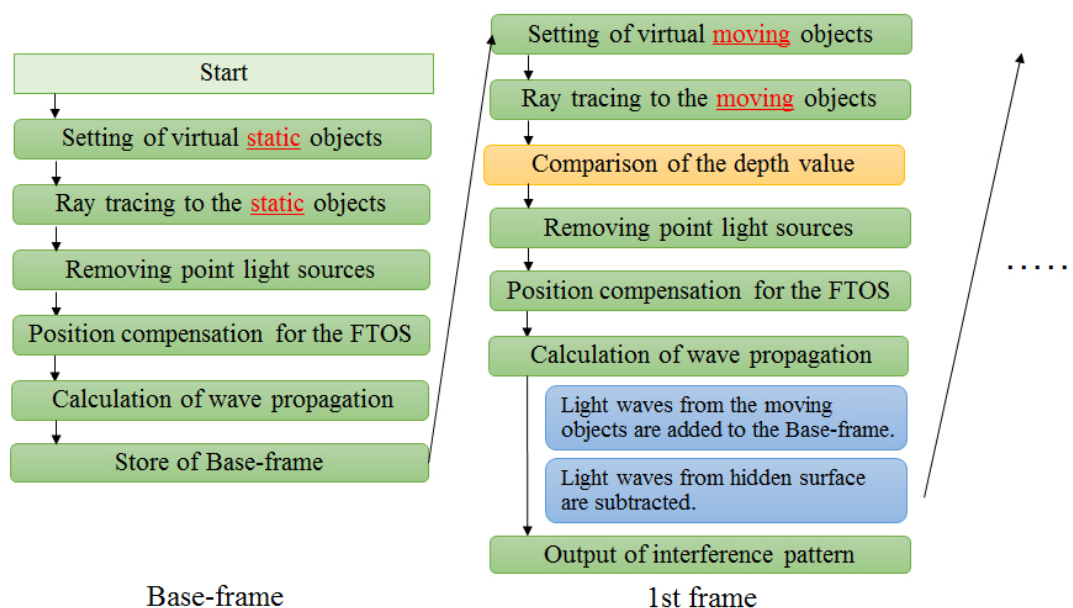


図 6.6: 提案手法を用いた CGH 動画の作成法

移動物体の位置を少しずつ変更し，すべてのフレームを最初から計算し，繋ぎ合わせることで動画を作成した．提案動画は，初めに Base-frame を生成し，その後移動物体に対して前述の提案した移動物体分離法を用いて計算を行った．使用した計算機と再生装置については，4.4.1 項に記載したものと同一の環境を利用した．まず実験 1 で隠面消去が正しく行われていることと，1 フレームを高速に計算できていることを確認し，実験 2 で前方に静止物体を置けることを確認した．そして最後に実験 3 として，複雑な移動物体を配置できることを示した．

6.3.1 実験環境

まず，本研究に用いた計算機のスペックを表 6.1 に示した．ここでは，第 4 章と同じ実験環境を用いて実験を行った．

また，再生装置と記録上のパラメータに関して示す．本研究における実験には，FTOS を適用した接眼型セミポータブルホログラフィックディスプレイ [36] を使用した．また，今回の計算に用いるパラメータを表 6.2 に記した．今回の記録過程の計算に用いる要素ホログラム数は従来手法と提案手法共に 60(10×6) 枚とし，161×161 本の光線を飛ばした後に，従来手法，提案手法共に回折角度外の点の除去を行った．

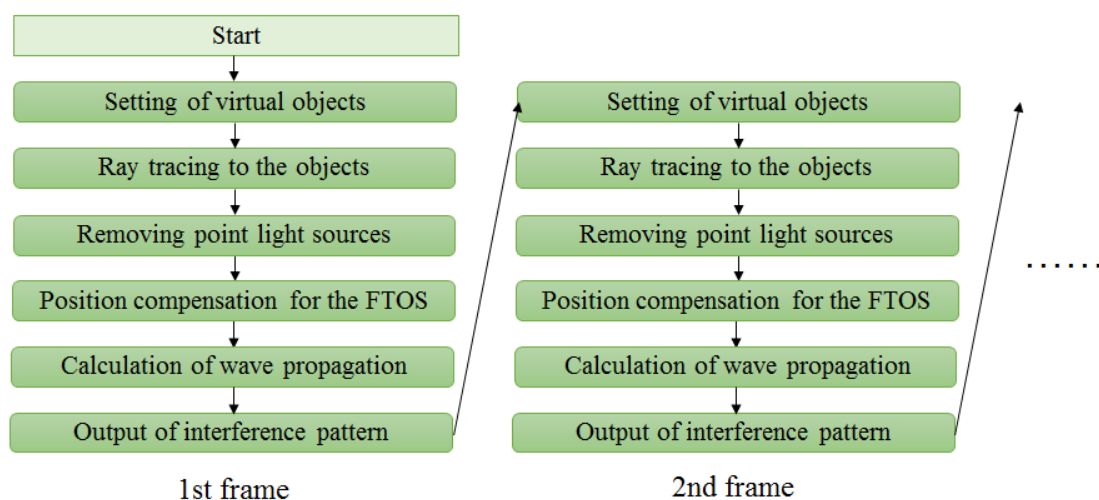


図 6.7: 従来動画の作成法

表 6.1: 第 6 章で使用した計算機の性能

Computer parameters for exmeriments	
CPU	Intel® Core(TM) i7-3970X
OS	Windows 7 Professional 64 bits
Memory capacity	64.0[GB]
Clock frequency	3.5[GHz]
GPU	NVIDIA GeForce GTX TITAN
The number of CUDA cores	2688

6.3.2 実験 1 : 適切な隠面消去の確認

実験内容

図 6.8 のような，視点から 1m 先に垂直にチェッカーボードが存在し，その正面を青い板が移動するようなシーンについて動画を作成した．チェッカーボードは 200 枚の三角パッチから作成されており，移動することのない静止物体である．そして，視点から 80cm の深さに 2cm 四方の青い板を配置し，チェッカーボードの前を x - y 平面に平行かつ直線的に動くように設定した．この青い板は 2 枚の三角パッチを組み合わせることで作成されている．従来動画はこの青い板を少しずつ動かした場面に対して，すべてのフレームを忠実に計算した．一方提案動画は，チェッカーボードからの光波を保存した Base-frame に対し，動画内の各フレームで青い板からの光波を加算し，その背面となる部分の光波を減算することで動画を作成した．

表 6.2: 記録に用いるパラメータ (提案手法 2)

要素ホログラム数	10(H)×6(V)
各要素ホログラムから射出される光線数	161×161

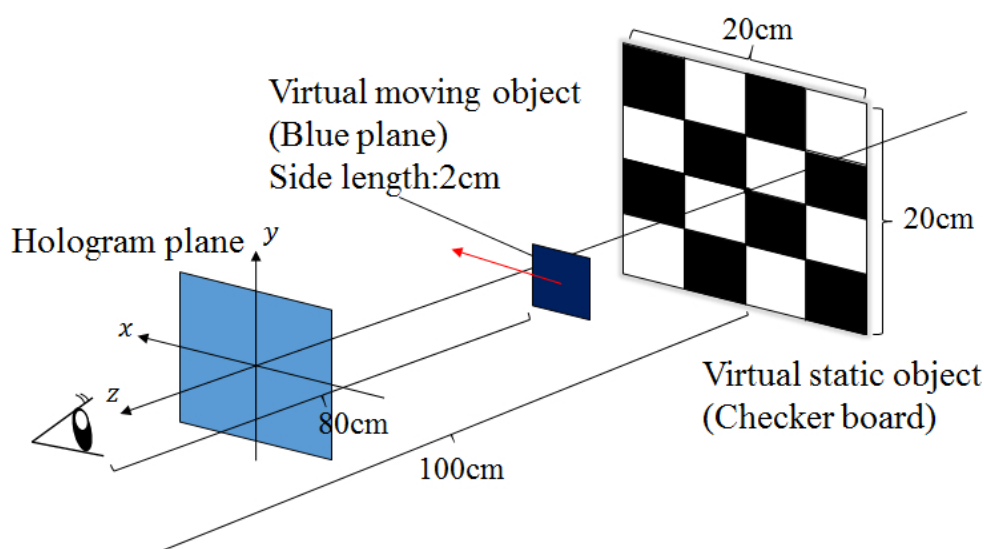


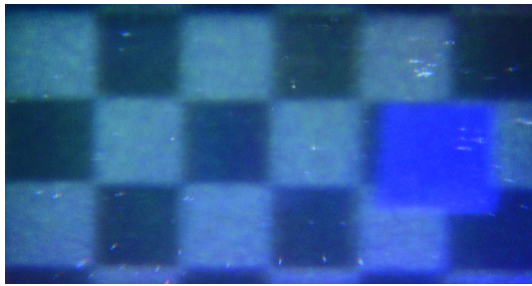
図 6.8: 実験 1 の物体配置

実験結果と考察

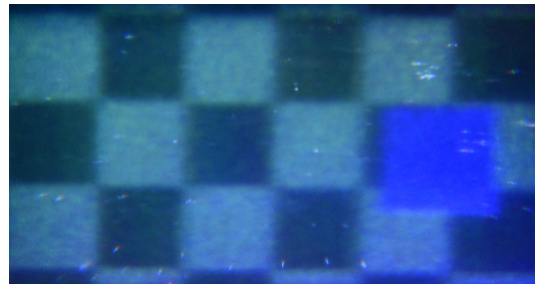
計算時間について表 6.3 に記した．今回は 90 フレームの動画を作成したが，90 フレーム合計の計算時間を 90 で割り，1 フレームあたりの計算時間を算出している．そして提案動画の計算時間には Base-frame の計算時間も含んでおり，Base-frame と，Base-frame を元に計算した 90 フレームの計算時間の和を，全体のフレーム数である 90 で割ることで計算時間としている．また表 6.3 中の Total は物体の配置から光線追跡，FTOS のための位置補正，回折角度外除去，光波伝搬，干渉計算，画像としての出力などのすべての処理の合計の時間である．この実験結果より，光波伝搬の計算時間が 4 倍程度高速化されているということがわかる．これは移動物体の大きさにもよるが，移動物体のサイズが大きくなれば，提案手法を用いて動画の作成を高速に行うことができることが明らかになった．

加えて，従来動画と提案動画の再生像について図 6.9 に示した．今回は 90 フレームの動画なので，1 フレーム目，30 フレーム目，60 フレーム目，90 フレーム目を代表フレームとして画像を載せている．提案手法で作成された図 6.9(b)，図 6.9(d)，図 6.9(f)，図 6.9(h) を見ると，青い板によって背面のチェッカーボードが覆い隠されており，適切な隠面消去が行われているということが明らかにされた．

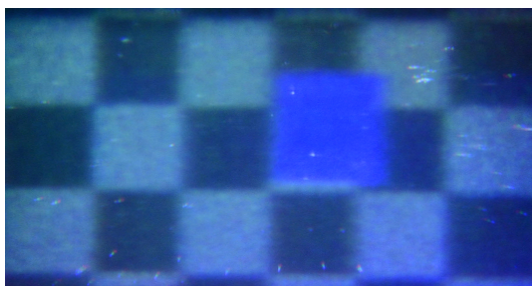
よって，小さい移動物体であれば提案手法により計算時間を削減し，かつ適切



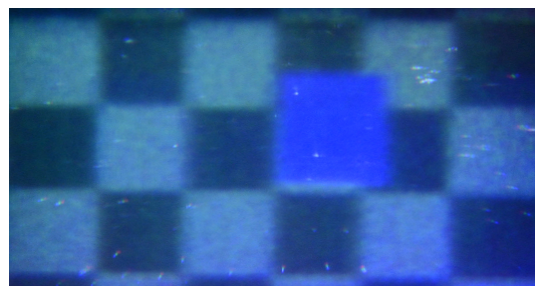
(a) 1 フレーム目 (従来手法)



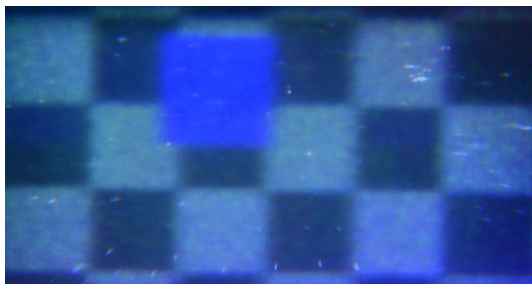
(b) 1 フレーム目 (提案手法)



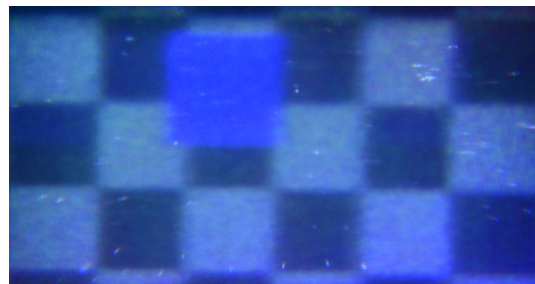
(c) 30 フレーム目 (従来手法)



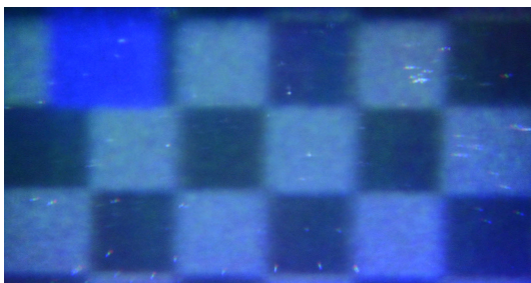
(d) 30 フレーム目 (提案手法)



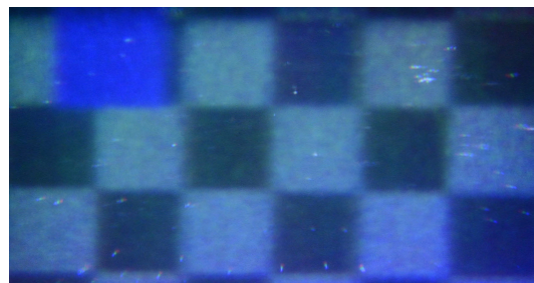
(e) 60 フレーム目 (従来手法)



(f) 60 フレーム目 (提案手法)



(g) 90 フレーム目 (従来手法)



(h) 90 フレーム目 (提案手法)

図 6.9: 実験 1 の再生像 (提案手法 2)

表 6.3: 実験 1 の計算時間 (提案手法 2)

手法	計算時間 [ms]	
	光波伝搬計算	総処理時間
従来手法 [10]	481	623
提案手法	116	255

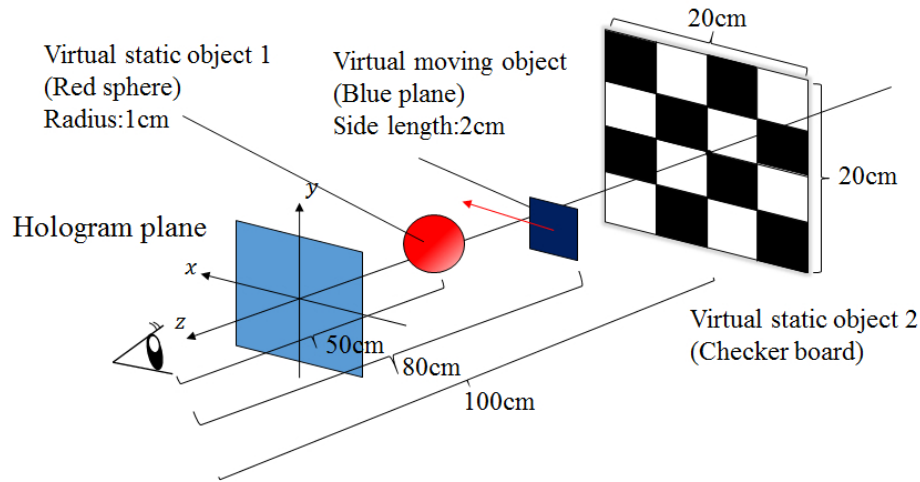


図 6.10: 実験 2 の物体配置

な隠面消去を行うことができるということがわかった。これにより、提案手法の有効性が証明された。

6.3.3 実験 2：前方への静止物体の配置

実験内容

実験 2 では、6.2.2 項で説明した前方への静止物体の配置が正しく行われているかを確認するために、図 6.10 のように実験 1 で用いたシーンの青い面の前方に静止物体の球を配置し、この球によって移動物体が覆い隠されるようなシーンに関して実装し、実験を行った。また、本実験の目的は前方に静止物体を配置できることを確認することであるため、従来動画の作成は行わず、提案動画の作成のみを行い、それについて計算時間と再生像を報告することとした。

実験結果と考察

実験 2 の計算時間について表 6.4 に記した。実験 2 では、1 枚あたり約 80ms でフレームを計算することができ、これは実験 1 よりも良好な結果であった。これ

表 6.4: 実験 2 の計算時間 (提案手法 2)

手法	計算時間 [ms]	
	光波伝搬計算	総処理時間
提案手法	80	226

は、静止物体の赤色球によって覆い隠されている部分では移動物体分離法での計算を行う必要がなく、計算点数が少なかったためである。

次に実験 2 の再生像について図 6.11 に示した。赤色球の後ろを移動物体の青い板が通るときに、青い板が隠れているのがはっきりと確認できる。これにより、移動物体分離法を用いた場合に、前方にも静止物体を配置できるということが明らかにされた。

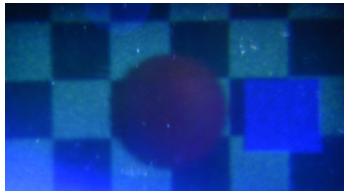
6.3.4 実験 3：移動物体分離法による複雑な物体の表現

実験内容

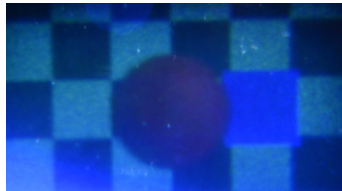
移動物体分離法に関しての研究発表において、3次元画像コンファレンス 2014 では雪のような粒子状の点光源に関する移動物体分離法について提案し [49]、JSAP-OSA Joint symposia 2014 では点を組み合わせる面を構成しても隠面消去ができるということを証明していた [50]。しかしこれらの発表における実験では、実験 1 や実験 2 で示したような平板 1 枚を移動物体として作成できるということを明らかにするに留まっており、移動物体として例えば球のような多数のパッチから構成される複雑な物体を再生することができるかに関しては、理論的には可能であると考えられていたものの、実験の上では報告されていなかった。よって実験 3 では球を移動物体として定義し、これに関して移動物体分離法を使って適切に記録と表示ができるのかについて明らかにし、その結果について報告することとした。実験 3 では図 6.12 のように、移動物体に青い板ではなく青い球を用い、球にはフォンシェーディングを施している。さらに、移動物体分離法の強みはモーションベクトルを利用した手法 [42] 等と比較した際に、移動物体の奥行きの変化が発生しても問題なく計算できるという点にある。よって、本実験では実験 1 や実験 2 と違い、1 フレーム目には視点から 60cm の深さにあった球が、最後の 90 フレーム目では奥行き 90cm のところまで移動するように、奥行き方向に関しても一定に深度値を変化させ、その結果について確認した。

実験結果と考察

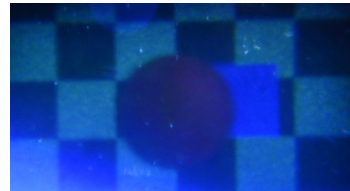
実験 3 の計算時間を表 6.5 に記した。実験 3 においても光波伝搬を 134ms で計算することができ、実験 1 の従来手法等と比較すると良好な結果を得ることができ



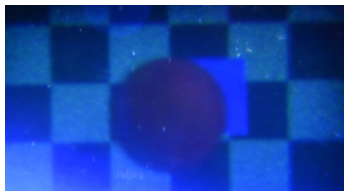
(a) 1 フレーム目の再生像



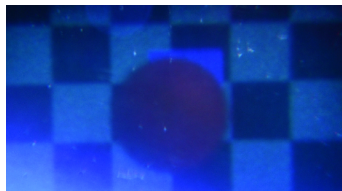
(b) 10 フレーム目の再生像



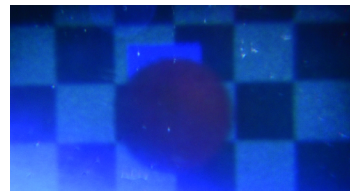
(c) 20 フレーム目の再生像



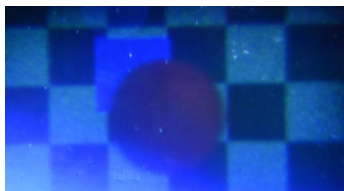
(d) 30 フレーム目の再生像



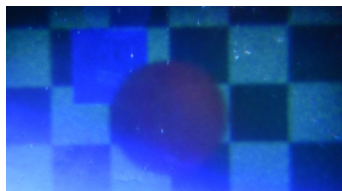
(e) 40 フレーム目の再生像



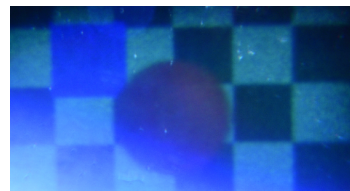
(f) 50 フレーム目の再生像



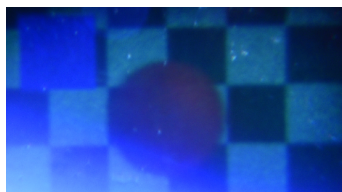
(g) 60 フレーム目の再生像



(h) 70 フレーム目の再生像



(i) 80 フレーム目の再生像



(j) 90 フレーム目の再生像

図 6.11: 実験 2 の再生像 (提案手法 2)

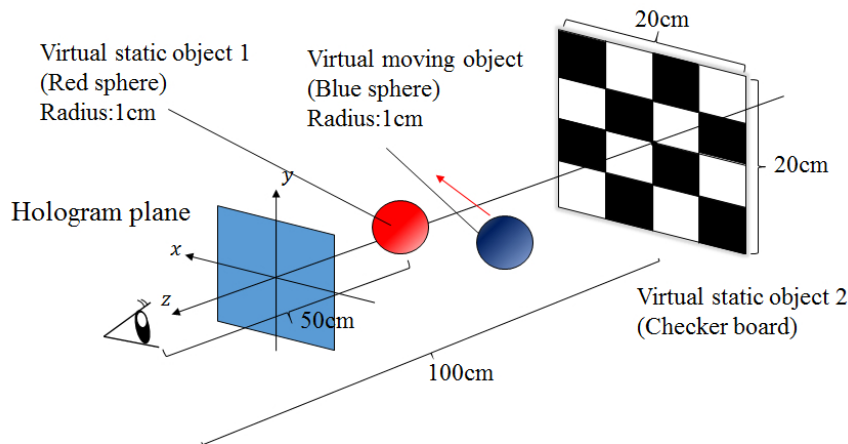


図 6.12: 実験 3 の物体配置

表 6.5: 実験 3 の計算時間 (提案手法 2)

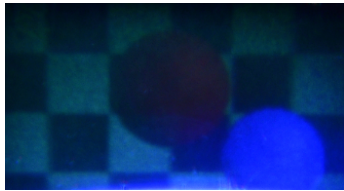
手法	計算時間 [ms]	
	光波伝搬計算	総処理時間
提案手法	134	379

た．全体の計算時間に関しては，960 枚のパッチから構成される球を移動物体として用いている関係から，平板を移動物体として用いた実験 1 や実験 2 に比べると少々大きくなっている．

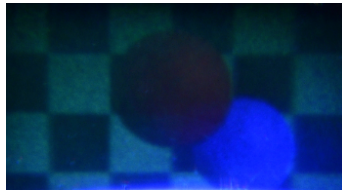
次に実験 3 の再生像について図 6.13 に示した．赤色球の後ろを移動物体の青い球が通るときに，青い球が隠れているのがはっきりと確認できる．また青い球にシェーディングが施されているということも確認することができた．これにより，多数のパッチを組み合わせた複雑な移動物体に関しても，計算を高速に行うことができるということが証明された．また，今回は移動物体の球を視点から奥行き 60cm のところから 90cm のところまで一定に変化させた．そのため図 6.13(a) では，青い球は赤い球よりほんのわずかに小さい程度の大きさであるが，図 6.13(h)，図 6.13(i)，図 6.13(j) に至っては球がかなり小さく見える．同じ大きさの球の奥行きが変化すれば，球のサイズが変化するのはごく自然であり，奥行きが変化するような移動物体に関しても移動物体分離法を適用することができるということが確認できた．

6.4 結論

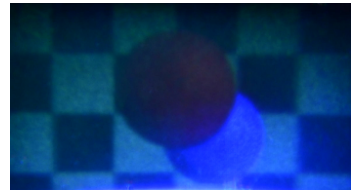
本章では静止物体と移動物体を分離し，静止物体からの光波を一度だけ計算し，その後は移動物体に関する計算だけを行うことで CGH 動画の作成を高速化する手法について提案し，その有効性を示すために実験を行った．実験では約 4 倍程度



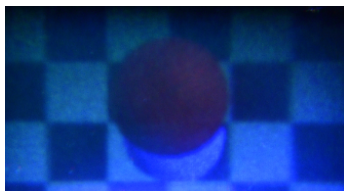
(a) 1 フレーム目の再生像



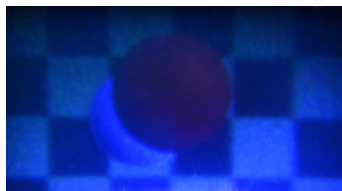
(b) 10 フレーム目の再生像



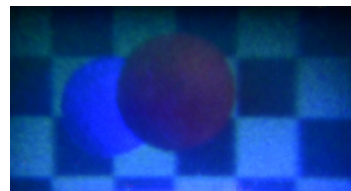
(c) 20 フレーム目の再生像



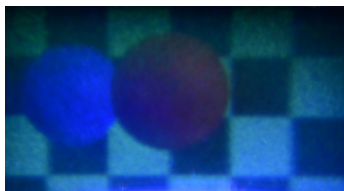
(d) 30 フレーム目の再生像



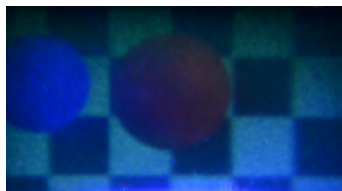
(e) 40 フレーム目の再生像



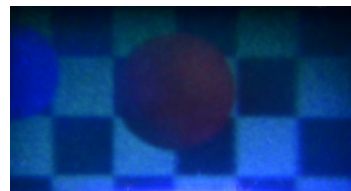
(f) 50 フレーム目の再生像



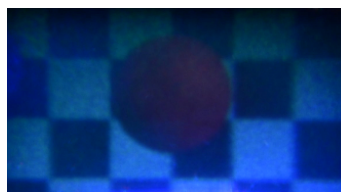
(g) 60 フレーム目の再生像



(h) 70 フレーム目の再生像



(i) 80 フレーム目の再生像



(j) 90 フレーム目の再生像

図 6.13: 実験 3 の再生像 (提案手法 2)

の光波伝搬計算の高速化に成功しており、小さい移動物体であれば効率よく CGH 動画の作成が行えるということを証明することができた。提案手法の欠点としては、現状では静止物体が移動物体へ及ぼす影や、移動物体が静止物体へ及ぼす影などが計算できないことが挙げられる。そのため、従来手法と同じ表現を完全に行うことができない。よって、今後はこれを解決できるようなアルゴリズムについて考案し、導入していく必要がある。さらに、提案手法は移動物体からの光波の加算と、背面部の減算という二つの処理が必要であることから、理論的に移動物体がシーンの 50 パーセント以上を占めるようなシーンに対して適用することができない。よって、さらに効率的に計算が行えるようなアルゴリズムに関しても、今後研究を行っていくべきである。

また、提案手法の利点として、光波伝搬の計算時間を削減できるということのみならず、光線追跡法の計算時間を削減できる可能性があることも示唆しておきたい。第 4 章～第 5 章の議論より、従来手法の光波伝搬の計算時間についてはかなり高速化が進んでおり、光線追跡部の計算時間が全体の計算時間に対して無視できない割合を占めている。よって今後は光線追跡部の高速化についても考える必要がある。そこで移動物体分離法を用いた場合、移動物体にのみ光線を飛ばすことになるため、光線追跡に必要となる計算パッチ数が従来手法よりも減少し、光線追跡部の計算時間も削減されることが予想される。今回の実験では、実験 1 で少々その兆候が見られたものの、大きな結果としては現れなかった(実験 1 において合計の計算時間から光波伝搬の計算時間を引いた計算時間について、提案手法の方が少ないのは、パッチ数が少ないためであると考えられる)。これは、光線追跡部のプログラムがまだまだ洗練されたものではなく、オーバーヘッドタイムが大きいためにあまり大きな差として現れなかったのではないかと考えられる。将来的には光線追跡部に関しても移動物体分離法を用いることで高速に計算できるということを示すことで、提案手法の有効性を証明する必要がある。

第7章 視点移動の高速計算法 (提案手法3)

7.1 研究背景と目的

前章で紹介した移動物体分離法は，シーンを移動物体と静止物体に分割することにより，CGH 動画の特性に着目した上で高速計算を行う手法であった．しかしながら移動物体分離法は，ホログラフィの視聴を行う視聴者の視点位置の移動に弱く，視点の移動が発生した場合にはCGHをすべて最初から計算しなければならない可能性が高い．しかし，わずかに視点が動いたときにCGHをすべて計算し直さなければならないのは非効率的である．

特に，ホログラフィ技術の応用先を考えた場合には，図 7.1 のようなホログラフィを視聴可能なHMDを使用した拡張現実 (Augmented Reality: AR) [52–54] への注目度が高まっている．このようなAR技術は仮想的に作り出した像を現実空間に重ねることで，エンターテインメントや医療，ナビゲーションの目的に使用できる．既存の立体視ディスプレイは調節と輻輳の競合のために視覚的な不快感と疲労を引き起こす懸念 [55] があるが，CGHを用いたホログラフィックARはそのような懸念がないため，次世代のディスプレイとして期待される [56, 57]．しかしながら，このようなデバイスの中では着用者の視点位置は常に動き続けることが考えられる．具体にはHMDに位置センサーや加速度センサーなどを取り付け，装着者の動きに応じて再生像の見え方が変化していく必要があり，この計算はリアルタイムで成される必要がある．よって，このような条件下に適した高速化アルゴリズムを考案することには大いに意義があると考えられる．

前述の通り，前章で紹介した移動物体分離法は，視点の移動が発生すると静止物体の見え方が変わってしまうことから，静止物体をそのまま保存したBase-frameを利用できず，視点の移動が発生した場合の高速化を実現することはできなかった．その他のCGH動画の特性に着目した生成高速化の先行研究についても同様に，このような視点の移動が発生することは想定しておらず，基本的にはテレビへの応用のような液晶面が常に固定される用途で利用されることが想定されていた．例えば，フレーム間の差分を計算し，変化した部分からの光波を計算し，ホログラム面を更新することで高速化を図る手法 [41] では，視点の移動が発生すると，ホログラム面の各ピクセル位置から見たときの物体の相対位置や深さに変化が生じてしまうことから，全面が再計算領域となってしまう，計算が行えなくなっ

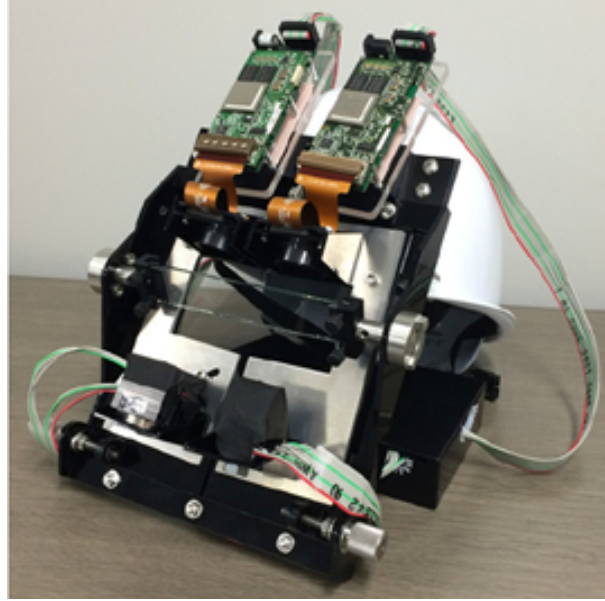


図 7.1: ホログラフィック HMD

てしまう。また，[41] を発展させた手法としてモーションベクトルを利用した手法 [42] が提案されている。この手法は，3D シーンを，そのシーンを構成するいくつかの物体に分割し，分割された物体のモーションベクトルを計算し，そのモーションベクトルに応じてホログラム面の光波をシフトさせる。このアルゴリズムに基づけば，視点の平行移動はシーン全体の逆方向への平行移動と捉えられることから，視点の平行移動だけであれば高速計算に対応することが可能である。しかしながら VR や AR に利用する HMD デバイスでの視点の移動は図 7.2 のような 6 種類の視点の移動から構成されることが多い。これは上下左右前後への移動に加えて，視点の向きを回転させる 3 種類の動きに対して自由なので，6DoF (Degree of Freedom) に対応した HMD と呼ぶ。[42] の手法では視点の平行移動だけしか対応ができないため，そのうちの 2 種類の移動 (上下・左右) のみしか計算できず，視点の移動に対して高速が図れるとは言えない。また，残像効果に基づいて点光源を時分割して表示することで動画生成を高速化する手法 [43, 44] に関しても，基本的には点の数を減らしても残像効果で点が見え続けるという人間の生理的な機構に基づいているため，視点位置が変わり点の呈示位置が大きく変わるようなケースに対して自然な表示を行うことは難しい。

このように，CGH の動画生成を行う観点からの高速化手法は複数の先行研究があるものの，ホログラフィック HMD 中での視点移動発生に対応して高速化が図れるようなアルゴリズムは過去提案されていなかった。そこで，本章では視点移動の高速計算アルゴリズムを提案し，その有効性を実験を通して確認した。



図 7.2: 6 自由度の VR 鑑賞

7.2 従来手法

提案手法について説明する前に，本手法の従来手法について説明を行う．本手法の従来手法は第 4 章で説明した従来手法 [10] ではなく，第 5 章で説明した提案手法 1 の回折角度に基づく物体数削減法を従来手法 [10] に組み入れたものとした．また，今回は簡単のために要素ホログラムは用いずに，ホログラム面の中央から 1 度だけ光線追跡を行い，そこから得られた点情報からホログラムを計算することとした．本手法は要素ホログラムの枚数が多いほど画素あたりの計算点数が減少する傾向にあるため，計算時間が短くなる．本手法の従来手法や提案手法の計算時間が第 5 章と比較して大きいのは，要素ホログラムを 1 枚しか用いていないためである．本章で紹介する提案手法 3 に対する要素ホログラムの適用は今後の課題とする．

7.3 視点移動の高速計算法

ホログラフィにおいて，視点の移動は図 7.3 のようなホログラム面の移動と関連付けられる．一般的なフレネルホログラムにおいては，あるシーンに対して視点の移動が平行移動したように見えるということは，ホログラム面の物体光波が相対的に逆方向に平行移動したことに等しくなる．実際，このような視点の移動をリアルタイムに計算しようとするとき，1 秒あたりに約 30 枚程度の CGH を計算しなければならない．それぞれの CGH の間の変化は微小であることが多い．しかしながら，従来手法では僅かな視点の移動であっても，各フレームの計算をすべて最初から行わなければならない．これは非効率的である．よって本研究では，従来手法で計

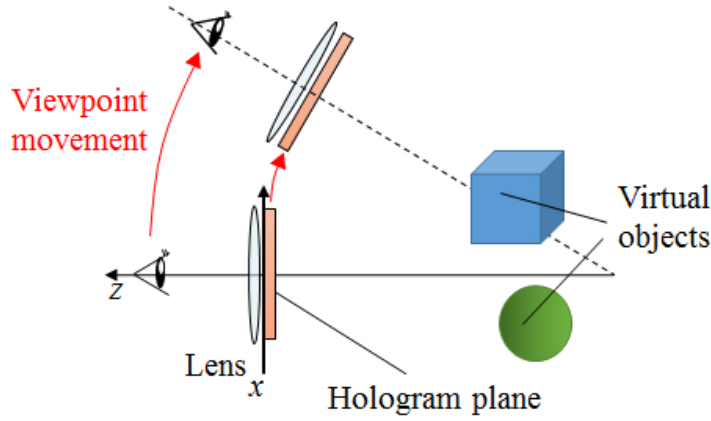


図 7.3: 視点とホログラム面の移動

算した光波をベースにして，その一部を再利用することによって高速に視点移動を計算する手法を考案することとした．

7.3.1 平行移動

初めに平行移動の高速計算法について説明する．ただし簡単のために，ここでは x 軸方向への移動を考えるものとした． y 軸方向への平行移動に関しても，同様のアルゴリズムで計算を行うことができる．

図 3.1 のような FTOS の用いられていない通常フレネルホログラムにおいては，平行移動はホログラム面上の物体光波の平行移動として実現される．したがって，そのときの移動によってできる重なり領域 (Overlap region) に関しては再利用を行うことができる．しかしながら，FTOS を用いる場合には，ホログラム面上の光波をただ平行移動させるだけでは，レンズの存在によって再生像が歪んでしまう．これを説明したのが図 7.4 である．再生照明光として用いられた点光源から発せられる光が，レンズを通過してホログラム面へと当たることによって再生が行われるが，この際に通過するレンズの場所が異なるため，乗算されるレンズ位相の値が異なってくる．すなわち，ただホログラム面を平行移動させるだけではレンズ位相の問題により平行移動を実現できない．そこで，レンズの位相を考慮して，FTOS での計算をフレネルホログラムと同様に扱うことによって平行移動時にホログラム面の光波を再利用できる手法を考案した．

まず提案手法では図 7.5 のように，レンズの位相を外したときの光波 $u_{lens}(x, y)$ について考える．ホログラム面上の光波を $u(x, y)$ としたとき， $u_{lens}(x, y)$ は次の式で計算される．

$$u_{lens}(x, y) = u(x, y) \exp(j\phi_{lens}(x, y)). \quad (7.1)$$

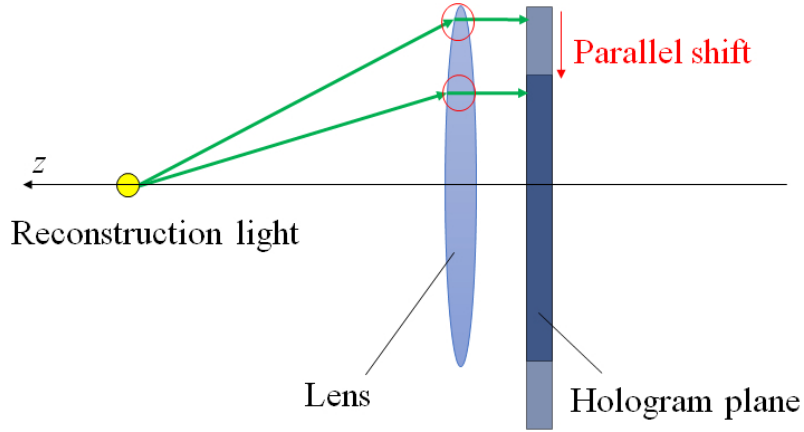


図 7.4: FTOS を用いたときの平行移動

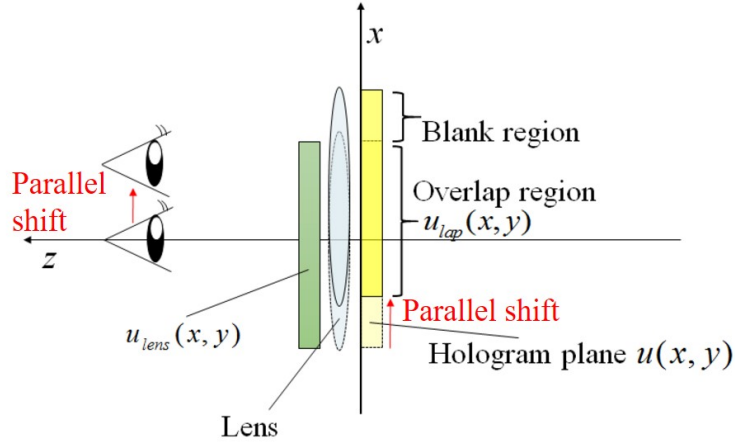


図 7.5: 平行移動の計算法

ここで $\phi_{lens}(x, y)$ はレンズによって生じる位相を表す式であり，以下のように計算される．

$$\phi_{lens}(x, y) = k(\sqrt{(x^2 + y^2 + f^2)} - f). \quad (7.2)$$

このようにレンズの位相を外してから平行移動を行うことによって，レンズによって生じる歪みを回避することができる．

しかし，この手法を用いても平行移動においては一つの問題が発生する．図 7.6 のように，ホログラム面を平行移動させるとき，ホログラム面から遠い距離に位置している物体点光源ほど大きく平行移動してしまう．つまり，本手法ではホログラム面の平行移動量と物体点光源の平行移動量が一致しない．しかし本来の平行移動は，視点がある方向に平行移動した場合，物体は相対的に逆方向へ同じ距離だけ平行移動しなければならないため，本手法の平行移動の計算では齟齬が生じてしまう．この問題を解決するために，ある深さを決め打ち点 (Targeting point, TP) と定め，その深さに関しては適切な平行移動を行えるようにした．よって本

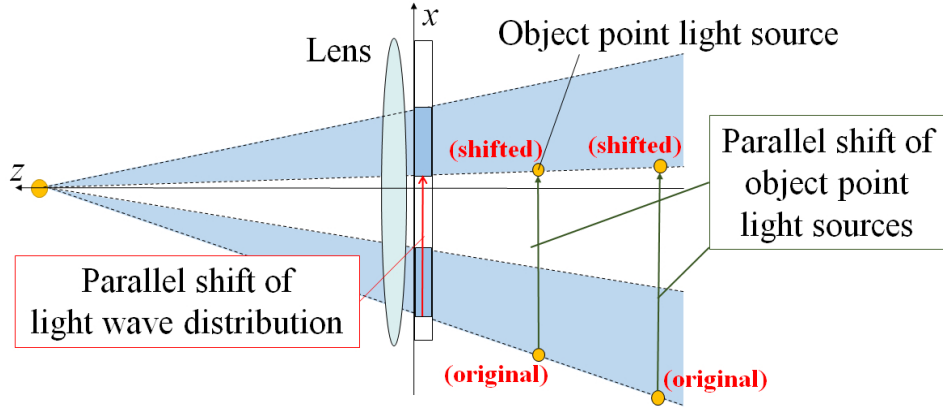


図 7.6: 平行移動計算の問題点

手法では、シーンにおいて重要な深さを TP として設定しなければならない。例えば、物体が存在する深さの範囲の中央値を TP として定めることなどが誤差を少なくする上で望ましいと言える。TP として定めた深さを z_{tp} とし、視点の平行移動量を Δx_{vp} とすると、ホログラム面上の平行移動量 Δx_{holo} は次の式で計算される。

$$\Delta x_{holo} = \frac{f \Delta x_{vp}}{f + |z_{tp}|}. \quad (7.3)$$

こうして導かれた平行移動量に基づいて、ホログラム面上の光波を平行移動させる。その後、レンズ位相を元に戻す計算を行うことによって、重なり領域の物体光波 $u_{lap}(x, y)$ を以下のように計算することができる。

$$u_{lap}(x, y) = u_{lens}(x, y) \exp(-j\phi_{lens}(x - \Delta x_{holo}, y)). \quad (7.4)$$

したがって、このアルゴリズムでは TP 以外の深さでは位置に誤差が発生する。この誤差については 7.3.3 項にて説明するため、ここでは省略するものとする。

次に重なり領域以外の部分について説明する。平行移動を行った場合、図 7.5 のように重なり領域以外の空白領域 (Blank region) が発生する。この領域に関しては再計算が必要となる。この計算過程は従来手法と同じとなるが、計算領域が非常に小さいことに加え、図 7.7 のように計算に必要となる物体点光源の数も少なくなることから、この計算時間は非常に小さくなる。よって、重なり領域と空白領域の双方を短時間で計算できるため、高速な平行移動の計算が可能である。

7.3.2 回転移動

この項では平行移動に引き続き、回転移動の計算手法について説明を行う。ここでは簡単のために y 軸中心の回転について考えるが、 x 軸中心の回転についても計算は同様に行われる。回転移動の計算は、平行移動と同じようにレンズ位相を外

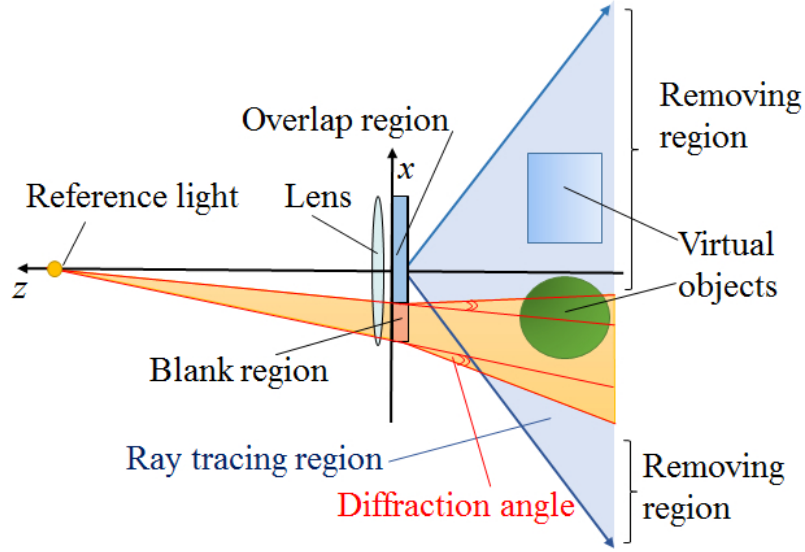


図 7.7: 空白領域の計算範囲

した後に回転移動によって生じる位相を乗算し、レンズ位相を元に戻すことによって行われる (図 7.8). レンズ位相を外したときの光波分布 $u_{lens}(x, y)$ は、式 (7.1) を用いて $u(x, y)$ より計算される. ここで回転移動によって生じる位相 $\phi_{rot}(x, y)$ は

$$\phi_{rot}(x, y) = kx \sin \theta_{rot}, \quad (7.5)$$

と示される. θ_{rot} はホログラム面の回転する角度を示している. よって、この回転位相を乗算した後の光波分布 $u'_{lens}(x, y)$ は次の式で与えられる.

$$u'_{lens}(x, y) = u_{lens}(x, y) \exp(j\phi_{rot}). \quad (7.6)$$

そして最後に、得られた $u'_{lens}(x, y)$ に対してレンズの位相を元に戻すと、最終的な回転移動による光波分布 $u_{rot}(x, y)$ が計算される.

$$u_{rot}(x, y) = u'_{lens}(x, y) \exp(-j\phi_{lens}). \quad (7.7)$$

ここで、これらの式をすべてまとめて書くと、

$$u_{rot}(x, y) = u(x, y) \exp(j\phi_{lens}(x, y)) \exp(j\phi_{rot}(x, y)) \exp(-j\phi_{lens}(x, y)), \quad (7.8)$$

$$= u(x, y) \exp(j\phi_{rot}(x, y)), \quad (7.9)$$

のように計算することができ、レンズの位相について考慮することなく計算が可能であるということがわかる. これは、回転移動の計算においては、レンズに対するホログラム面の相対位置が変化しないため、レンズに関する計算を省略することができると考えられる. よって回転移動の計算においては、レンズの位相を考慮する必要はない.

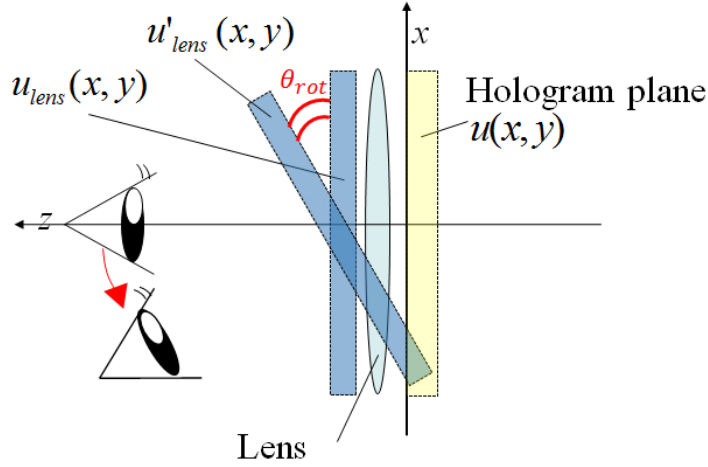


図 7.8: 回転移動の計算法

7.3.3 提案手法により生じる誤差

提案手法は、大きな平行移動や回転移動を加えると、計算誤差が大きくなるという欠点がある。そのため、数枚に一度は従来手法で計算を行い、その間のフレームを提案手法で計算するということが必要となる。本項では、この手法によって生じる可能性のある誤差について議論を行う。

光線追跡法におけるオクルージョン

提案手法の平行移動と回転移動の計算を行う場合でも、記録されている点情報は平行移動の空白領域を除き、従来手法で計算したフレームが元になっている。よって、平行移動や回転移動を大きく行った場合、オクルージョンが正しく表示されない可能性がある。そのため、この手法は大きな平行移動や回転移動には対応できず、小さい平行移動や回転移動に適した手法であると言える。

平行移動による誤差

次に平行移動によって生じる誤差について説明する。前述の通り、図 7.9 のように提案手法では TP 以外の深さにおいて誤差が発生する。ある深さ z_e に生じる誤差を Δe とすると、この誤差は以下のように計算される。

$$\Delta e = \left| \frac{\Delta x_{vp}(|z_e| + f)}{f + |z_{tp}|} - \Delta x_{vp} \right|. \quad (7.10)$$

ここで z_{tp} は TP の深さであり、 Δx_{vp} は視点の平行移動量である。よって、適切な TP を定めることが重要であると言えるが、動画内の連続するフレーム間に現れるような微小な平行移動ならば、この誤差を知覚することは難しいと考えられる。

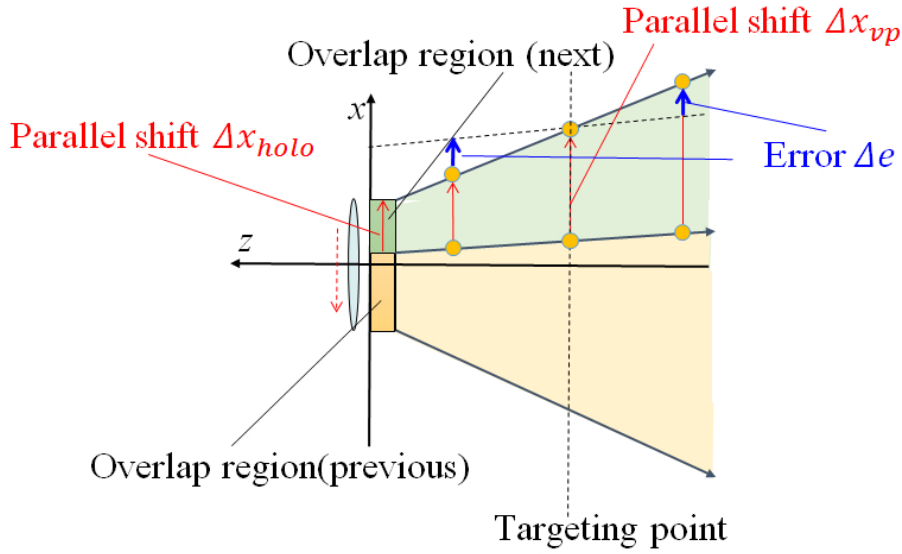


図 7.9: 平行移動による誤差

回転移動における周波数制限

回転移動の計算においては、式 (7.6) において回転移動の位相を乗算した際に、電子ディスプレイのピクセルピッチによって許される最大空間周波数を超えてしまう可能性がある。この場合には高次回折像が生じ、正しい像を観察することができない。これは、理論的には回転移動によって生じる位相差が $\lambda/2$ を超えると発生すると考えられる。この式 (7.6) の計算において、ホログラム面上の隣接ピクセル間に生じる位相差 ϕ_p は次の式で求められる。

$$\phi_p = p \tan \theta_{rot}. \quad (7.11)$$

しかしながら、約 1 度程度の小さい角度の回転であれば位相差が $\lambda/2$ を超えることはなく、1 度以上回転させる場合には光線追跡をやり直さないとオクルージョンが非常に大きくなってしまうことから、現実的にはこの誤差はあまり考慮しなくても問題は生じない。

7.4 実験

本手法の有効性を示すために、三つの実験を行った。実験 1 では、従来手法の次のフレームを提案手法で計算し、提案手法での計算時間と再生像の確認を行った。実験 2 では四種類のシーンに対して 300 フレームの動画を作成し、その有効性を確かめた。最後に実験 3 では視点の動きを同一として、表示するコンテンツを変化させることで、コンテンツによる手法の有効性の違いを確かめた。

表 7.1: 第 7 章で使用した計算機の性能

Computer parameters for exmeriments	
CPU	Intel® Core(TM) i7-3970X
OS	Windows 7 Professional 64 bits
Memory capacity	64.0[GB]
Clock frequency	3.5[GHz]
GPU	NVIDIA GeForce GTX TITAN
The number of CUDA cores	2688

表 7.2: 記録に用いるパラメータ (提案手法 3)

要素ホログラム数	$1(H) \times 1(V)$
各要素ホログラムから射出される光線数	161×161

7.4.1 実験環境

まず，本研究に用いた計算機のスペックを表 7.1 に示した．本研究における実験には，FTOS を適用した接眼型セミポータブルホログラフィックディスプレイ [36] を使用した．また，今回の計算に用いるパラメータを表 7.2 に記した．今回の記録過程の計算に用いる要素ホログラム数は従来手法と提案手法共に 1 枚とした．また計算点数は回折角度に基づく物体点数削減法を利用して除去した後の計算点数を記載している．

7.4.2 実験 1：平行移動と回転移動の計算時間の測定

実験内容

提案手法の平行移動と回転移動が高速に計算されるということを確かめるため，それぞれの計算時間の測定を行った．初めに 1 枚の CGH を従来手法を用いて計算し，その後，次のフレームを従来手法と提案手法を用いて計算した．そして，その計算時間と再生像について比較を行った．この際に，次のフレームとしては 1mm の平行移動，5mm の平行移動，0.1 度の回転移動，0.5 度の回転移動の 4 パターンを作成した．この実験に用いたシーンの概要は図 7.10 に示した．チェッカーボードの上に白色球が配置されている．また，この実験における TP は白色球が配置されている $z = -700[mm]$ のところに定めるものとした．さらに，本実験の過程で計算時間が平行移動量に応じて変化することがわかったため，1mm から 10mm

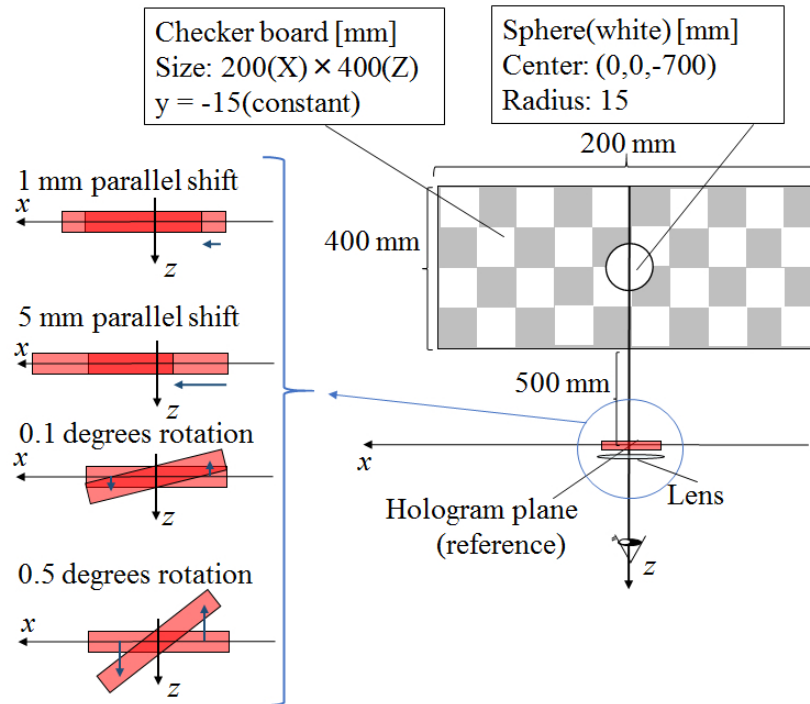


図 7.10: 実験 1 に用いたシーンの詳細

まで 1mm 刻みで平行移動量を変化させ、その計算時間を測定することで、平行移動計算の計算時間について確認を行った。

実験結果と考察

これらの計算時間を表 7.3 に示した。提案手法を用いることで、高速に計算を行っていることがわかる。平行移動が行われるとき、提案手法を用いると 6~8 倍の高速化を図ることができる。回転移動が行われるときには、計算時間は約 40 倍程度高速化される。

提案手法の回転移動は、式 (7.6) によって実現される。この式から回転角度が変わっても、代入する θ_{rot} の値が変化しただけで計算オーダーは変化しないことがわかる。よって、回転角度を変化させても計算時間は変わらない。一方、回転移動の計算と比較すると、平行移動の計算には多くの時間が必要となる。平行移動の計算時間は、重なり領域の計算時間と空白領域の計算時間の和として示される。重なり領域においては、ホログラム面上の光波を平行移動させるために GPU のグローバルメモリへのアクセスが必要であり、この計算時間が非常に大きくなるものの、計算時間は平行移動量には依存せず一定となる。しかし、空白領域では計算時間は一定とはならない。これは、移動によって生じる空白領域が大きくなればなるほど、計算すべきホログラム面の範囲が拡大し、計算時間が大きくなるためである。今回の実験では 1mm の平行移動のときに再計算が必要な画素数

表 7.3: 平行移動と回転移動の計算時間

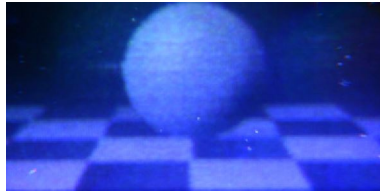
動き	計算時間 [ms]	
	提案手法	従来手法
1mm 平行移動	104	794
5mm 平行移動	125	798
0.1 度 回転移動	20	795
0.5 度 回転移動	20	803



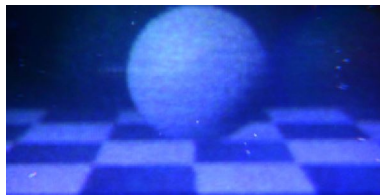
図 7.11: 平行移動距離と計算時間の関係

は $13(W) \times 768(H)$ [pixels] で、5mm の平行移動のときに再計算が必要な画素数は $65(W) \times 768(H)$ [pixels] であった。まとめると、ただ回転の位相を乗算すれば実現できる回転移動と比較すると、平行移動計算は重なり領域と空白領域に分けて処理をしなければならず、処理が複雑であることに加えて、GPU のグローバルメモリに格納されている光波をシフトさせるという処理が必要となるため、計算時間が回転移動と比較して大きくなるということが考えられる。平行移動距離と計算時間の関係を明らかにするために、1mm から 10mm まで 1mm 刻みで平行移動量を変化させ、その計算時間を測定した結果のグラフが図 7.11 である。このグラフからも平行移動距離が大きくなるにつれて計算時間が多く掛かるということと、重なり領域の計算時間が一定に必要であるということがわかる。しかし、表 7.3 の結果から、平行移動、回転移動共に従来手法と比べると大幅に高速化が成されており、平行移動と回転移動を組み合わせたとしても、十分に高速化を図ることができることが示された。

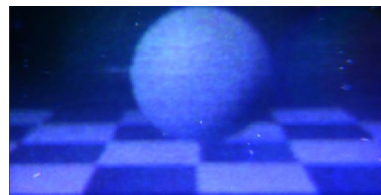
また、従来手法と提案手法の再生像について図 7.12 に示した。この再生像の提案手法と従来手法を比較すると、提案手法の再生像の誤差が小さいということがわかる。しかし、5mm の平行移動に関して従来手法を用いて計算した図 7.12(d)



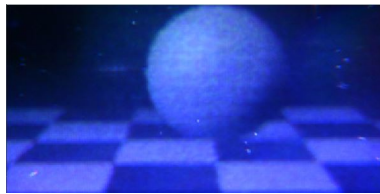
(a) 基準フレーム (従来)



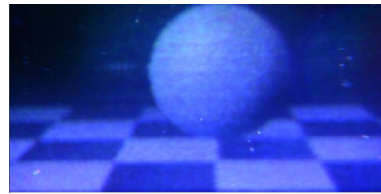
(b) 1mm の平行移動 (従来)



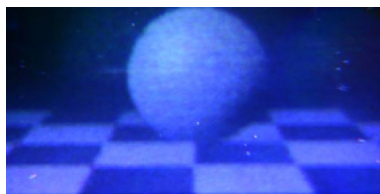
(c) 1mm の平行移動 (提案)



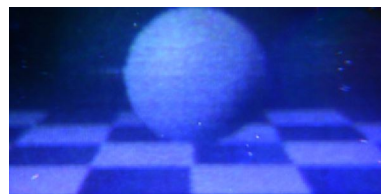
(d) 5mm の平行移動 (従来)



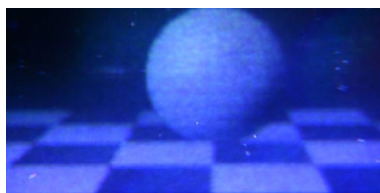
(e) 5mm の平行移動 (提案)



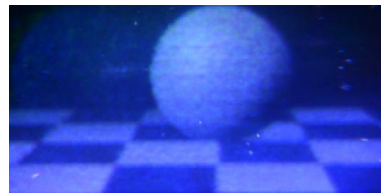
(f) 0.1 度の回転移動 (従来)



(g) 0.1 度の回転移動 (提案)



(h) 0.5 度の回転移動 (従来)



(i) 0.5 度の回転移動 (提案)

図 7.12: 実験 1 の再生像 (提案手法 3)

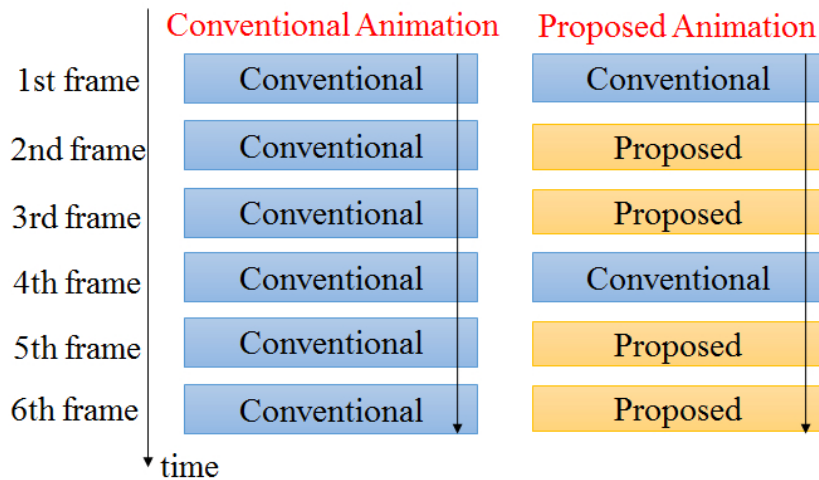


図 7.13: 従来動画と提案動画

と，提案手法を用いて計算した図 7.12(e) の結果を比較すると，球の位置には違いがないものの，ほんのわずかにチェッカーボードが提案手法では歪んでいるということがわかる．これは TP 以外の点では歪みが生じるという 7.3.3 項での議論を裏付ける結果となっている．よって，CGH 動画を作成する際には，この誤差による影響について考える必要がある．したがって次の項の実験では，提案手法を用いて CGH 動画を生成し，その動画に関して評価実験を行うことで再生像の劣化に関して検討を行った．

7.4.3 実験 2：提案手法を用いた CGH アニメーションの作成

実験内容

提案手法の有効性を確かめるために，300 フレームから構成される視点移動を伴う CGH 動画を生成した．比較を行うために，すべてのフレームを従来手法で作成した”従来動画”と，連続する数枚のフレームのうち最初一枚を従来手法で作成し，それ以外のフレームを提案手法で作成した”提案動画”を用意した．また”提案動画”において，何枚に一枚を従来手法で作成するかという頻度を示すパラメータとして，BFR(Basic Frame Rate) を定義した．BFR が 3 のときには，図 7.13 のように 1 枚目，4 枚目，7 枚目…… $(3i + 1)$ 枚目……が従来手法で生成され，それ以外のフレームが提案手法によって生成される．本実験では，すべてのフレームを従来手法で計算した従来動画の他に，BFR が 2, 3, 5, 10 の提案動画を作成した．ただし，表やグラフの結果においては，従来動画は BFR が 1 の動画として示してある．

加えて，あらゆる視点移動に対応できることを確かめるために，仮想物体の配置と視点の移動のパターンを変化させて，4 種類のシーンを作成した．図 7.14 に示

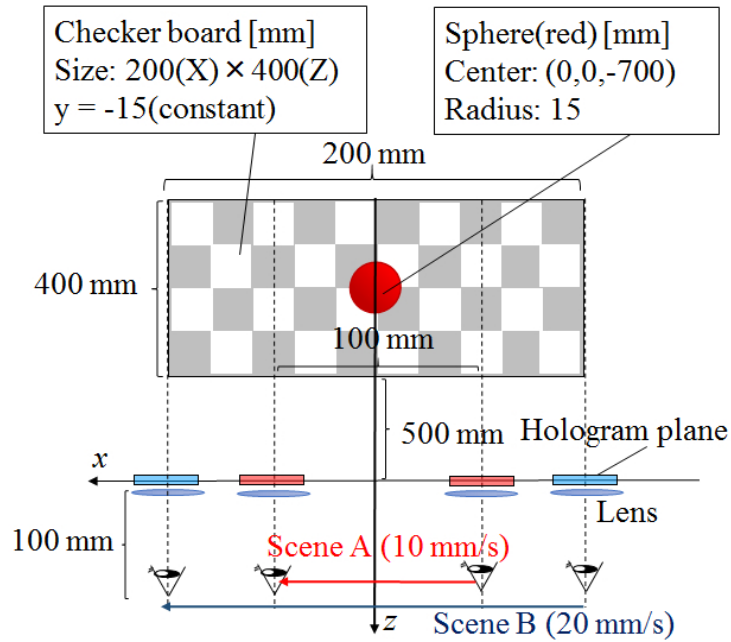


図 7.14: 実験 2 に用いたシーン A と B の詳細

されたシーン A とシーン B は，平行移動のみで構成されるシーンで，チェッカーボードの上に赤い球が配置されている．シーン A とシーン B の違いは視点の移動速度で，シーン A では 10mm/s，シーン B では 20mm/s のスピードで視点の移動速度が平行移動している．シーン C は視聴者が一点を中心に回転するようなシーンで，仮想物体としてはチェッカーボードの上に緑色の球が配置されている (図 7.15)．シーン D は逆に，チェッカーボードの上に白い球が浮いているシーンに対して，視聴者がその周りを円弧を描くように回転して移動するシーンである (図 7.16)．シーン C とシーン D は，平行移動と回転移動を組み合わせることによって実現されるシーンであり，どちらも 3degree/s の速度で視聴者が回っている．また，シーン A とシーン B の TP は $z = -700\text{mm}$ ，シーン C とシーン D の TP は $z = -400\text{mm}$ とした．

まとめると，今回の実験ではシーン A～シーン D までの四つのシーンに対して，BFR が 1(従来動画)，2，3，5，10 の 5 パターンの動画を作成しており，計 20 本の CGH 動画が存在している．すべての動画は 30fps(frames per second) で作成しており，300 フレームで 10 秒の動画となっている．実験では初めに，これらの動画に対して計算時間の測定を行い，高速に計算ができることを確かめた (実験 2-1)．次に，これらの動画に関して再生像の確認を行い，画質の劣化が少ないことを確かめた (実験 2-2)．そして最後に，画質の劣化が少ないということを主観評価実験を行うことで証明した (実験 2-3)．

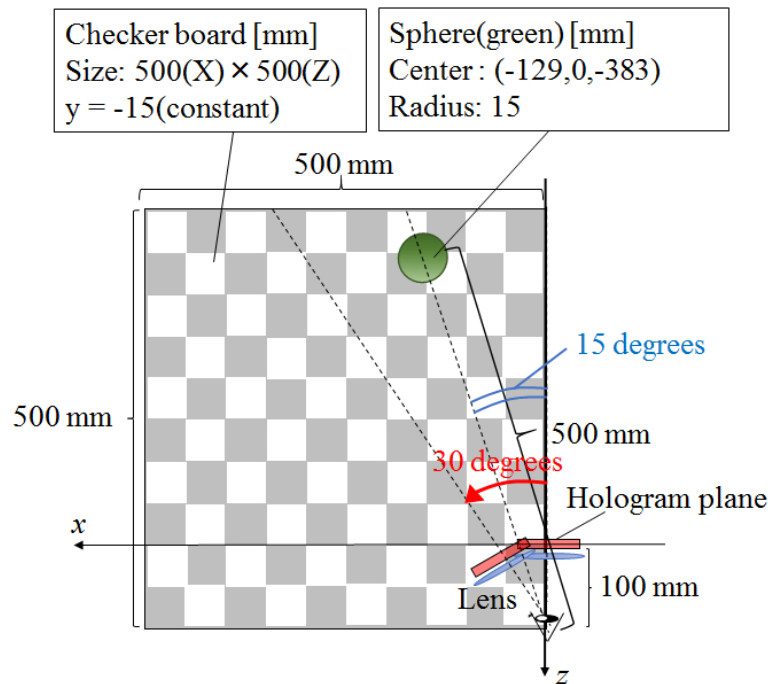


図 7.15: 実験 2 に用いたシーン C の詳細

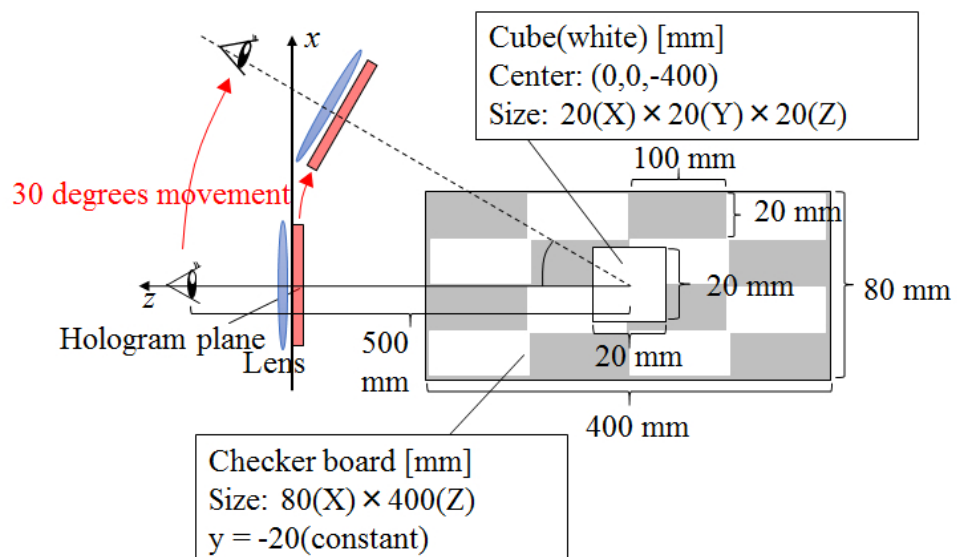


図 7.16: 実験 2 に用いたシーン D の詳細

表 7.4: BFR を変化させたときの CGH 動画の計算時間

Basic frame rate (BFR)	1 フレームの計算時間 [ms]			
	シーン A	シーン B	シーン C	シーン D
1(従来手法)	879	682	1946	1106
2	458	366	1020	581
3	323	270	710	422
5	216	187	447	296
10	147	134	288	210

表 7.5: 各シーンの物体点数

シーン	シーンを構成する物体点光源数
シーン A	9243
シーン B	7674
シーン C	18670
シーン D	11777

実験 2-1 : CGH 動画の計算時間の測定

シーン A からシーン D までの、それぞれの BFR における計算時間について表 7.4 に示した。1 フレームにおける計算時間は、動画全体を作成するのに必要な時間を総フレーム数で割ることによって算出した。またシーン A からシーン D までの、1 フレームあたりの平均物体点数を表 7.5 に記した。1 フレームあたりの点光源数は、すべてのフレームにおいて計算に用いた点光源数を足し合わせ、それを総フレーム数で割ることによって求めた。従来手法の計算時間がシーンによって異なっているのは、それぞれのシーンが持つ物体点光源の数が異なっているためである。また、この結果を図 7.17 にグラフとしてまとめた。この結果により、提案手法を用いることで従来手法よりも高速に動画が生成できるということと、BFR が大きくなればなるほど計算時間は少なくなるということが証明された。

実験 2-2 : CGH 動画の再生像の確認

今回作成した CGH 動画の、代表フレームでの再生像を示す。今回、本論文に掲載した再生像はそれぞれの動画の 1 フレーム目、150 フレーム目、300 フレーム目の 3 種類とした。その結果が、図 7.18(シーン A)、図 7.19(シーン B)、図 7.20(シーン C)、図 7.21(シーン D) である。1 フレーム目は BFR がいくつであっても従来手法によって計算されるため、1 フレーム目の再生像は 1 枚しか掲載していない。150 フレーム目と 300 フレーム目は、BFR が 2, 3, 5, 10 の場合は最も誤差が溜まるフレームであるため、今回掲載するフレームとして選択した。これらの再生像を

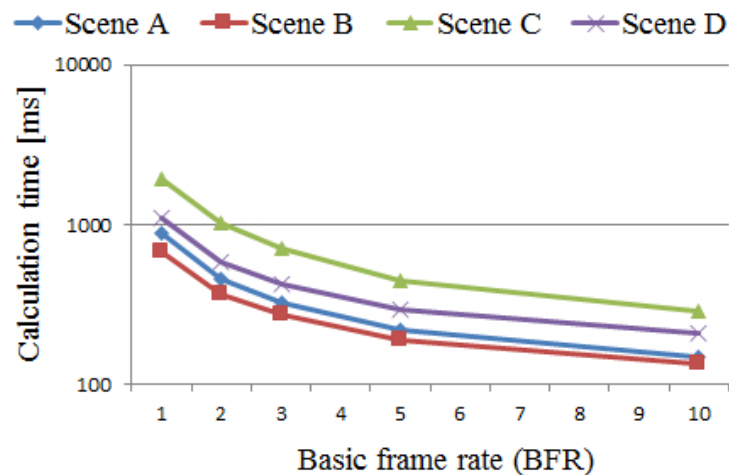


図 7.17: CGH 動画の計算時間のグラフ

表 7.6: DCR 法における評価

評価値	評価コメント
5	Imperceptible
4	Perceptible but not annoying
3	Slightly annoying
2	Annoying
1	Very annoying

見ると、従来手法と提案手法で作成したフレームの違いは小さく、提案手法により誤差の少ない CGH 動画を作成できているということがわかる。

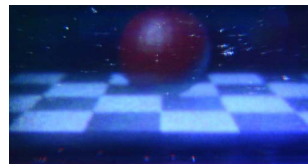
加えて、7.3.3 項で紹介した平行移動の歪みについて確認するために、シーン A の 150 フレーム目を BFR を 50 として作成し、その再生像を比較した。図 7.22(c) を見ると、チェッカーボードが図 7.22(a), 図 7.22(b) と比較して大きく歪んでいるということがわかる。この再生像から、BFR や平行移動距離を大きくしすぎると誤差が大きくなってしまうため、適切な BFR を定めることが重要であるということがわかった。

実験 2-3：主観評価実験

提案手法を用いた CGH 動画について、画質の劣化がどの程度起こっているのかを示すために、4.4.1 項で示した装置を用いて主観評価実験を行った。主観評価実験の手法としては、動画の画質劣化の評価手法として知られている DCR(Degradation Category Rating) 法を適用した。DCR 法の評価方法を図 7.23 に示す。被験者は初めに基準動画を 10 秒間視聴する。この基準動画としては、各シーンの従来動画を



(a) 1 フレーム目 (従来)



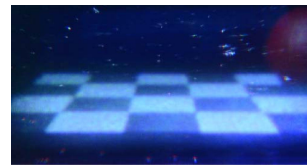
(b) 150 フレーム目 (従来)



(c) 300 フレーム目 (従来)



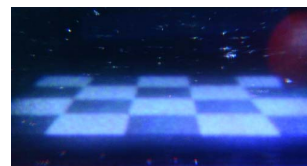
(d) 150 フレーム目
(BFR:2)



(e) 300 フレーム目
(BFR:2)



(f) 150 フレーム目
(BFR:3)



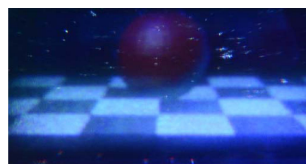
(g) 300 フレーム目
(BFR:3)



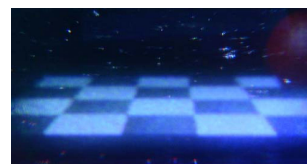
(h) 150 フレーム目
(BFR:5)



(i) 300 フレーム目
(BFR:5)



(j) 150 フレーム目
(BFR:10)

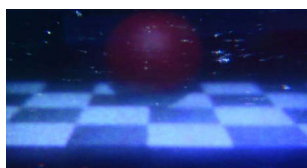


(k) 300 フレーム目
(BFR:10)

図 7.18: シーン A の再生像 (提案手法 3)



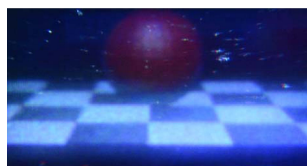
(a) 1 フレーム目 (従来)



(b) 150 フレーム目 (従来)



(c) 300 フレーム目 (従来)



(d) 150 フレーム目
(BFR:2)



(e) 300 フレーム目
(BFR:2)



(f) 150 フレーム目
(BFR:3)



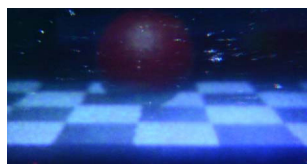
(g) 300 フレーム目
(BFR:3)



(h) 150 フレーム目
(BFR:5)



(i) 300 フレーム目
(BFR:5)



(j) 150 フレーム目
(BFR:10)

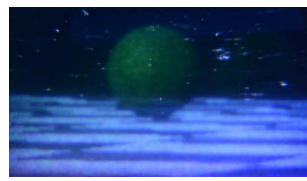


(k) 300 フレーム目
(BFR:10)

図 7.19: シーン B の再生像 (提案手法 3)



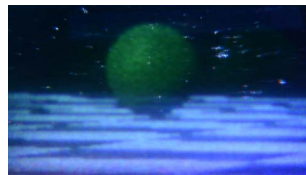
(a) 1 フレーム目 (従来)



(b) 150 フレーム目 (従来)



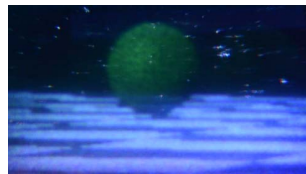
(c) 300 フレーム目 (従来)



(d) 150 フレーム目
(BFR:2)



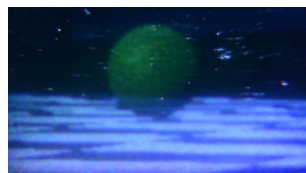
(e) 300 フレーム目
(BFR:2)



(f) 150 フレーム目
(BFR:3)



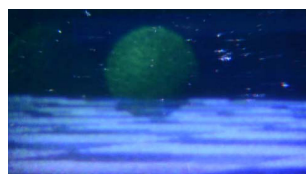
(g) 300 フレーム目
(BFR:3)



(h) 150 フレーム目
(BFR:5)



(i) 300 フレーム目
(BFR:5)

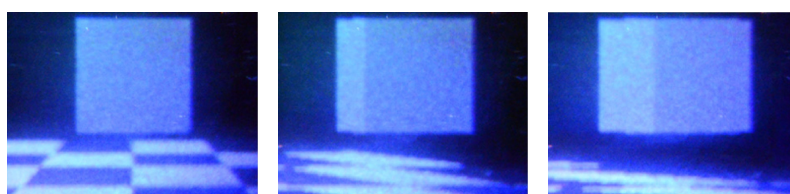


(j) 150 フレーム目
(BFR:10)



(k) 300 フレーム目
(BFR:10)

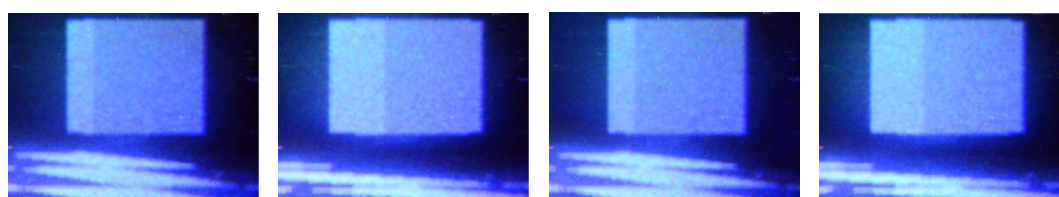
図 7.20: シーン C の再生像 (提案手法 3)



(a) 1 フレーム目
(従来)

(b) 150 フレーム
目 (従来)

(c) 300 フレーム目
(従来)

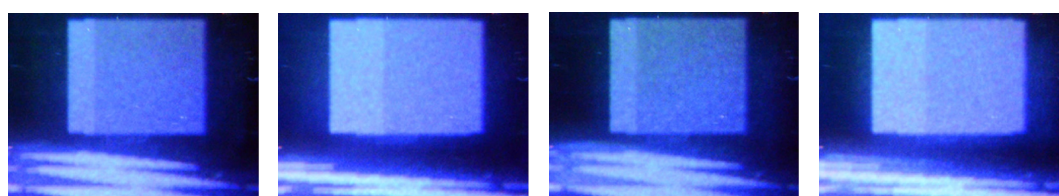


(d) 150 フレーム
目 (BFR:2)

(e) 300 フレーム目
(BFR:2)

(f) 150 フレーム目
(BFR:3)

(g) 300 フレーム目
(BFR:3)



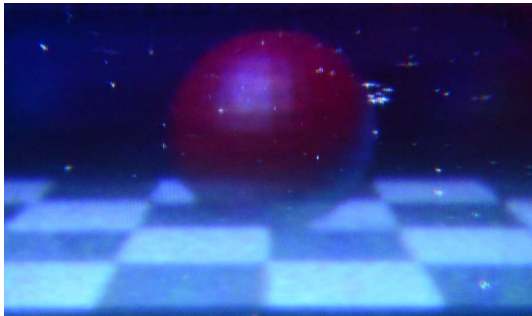
(h) 150 フレーム
目 (BFR:5)

(i) 300 フレーム目
(BFR:5)

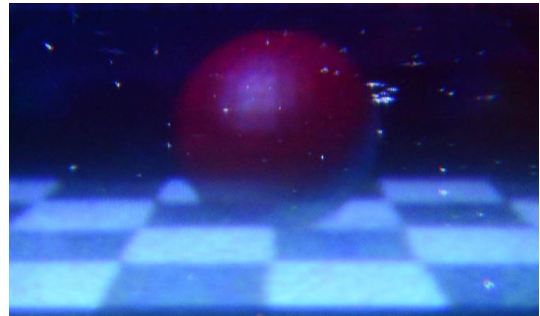
(j) 150 フレーム目
(BFR:10)

(k) 300 フレーム目
(BFR:10)

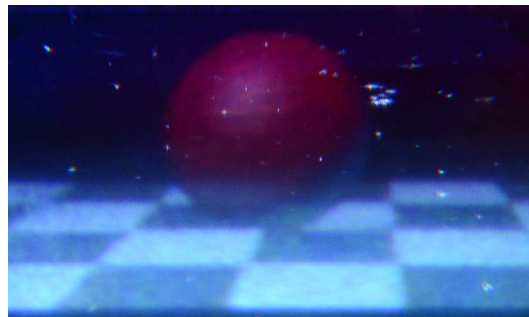
図 7.21: シーン D の再生像 (提案手法 3)



(a) 従来手法の再生像



(b) BFR:3 の再生像



(c) BFR:50 の再生像

図 7.22: 平行移動計算による歪み

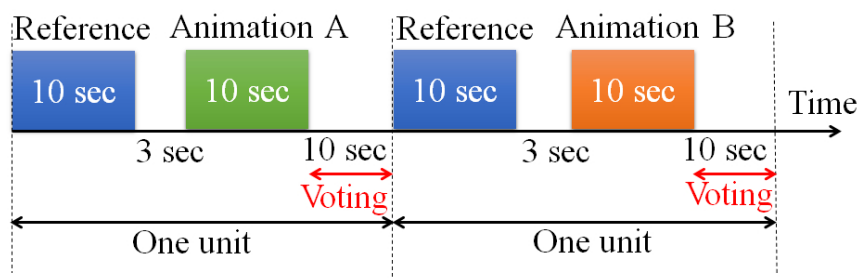


図 7.23: DCR 法のタイムパターン

表 7.7: 実験 2-3 の主観評価実験結果

Basic frame rate (BFR)	評価値			
	シーン A	シーン B	シーン C	シーン D
2	3.95	4.17	4.23	4.33
3	4.07	3.73	4.52	4.00
5	3.36	3.34	3.71	3.26
10	3.49	2.67	3.74	2.30

用いた．被験者は基準動画の視聴後，約 2 秒程度の間隔を開けて，評価を行う動画を視聴する．そして最後に，表 7.6 に示される 5 点満点の点数をつけることで評価を行う．今回はシーン A からシーン D までの，BFR が 2, 3, 5, 10 のすべての動画に対して評価を行った．被験者は 21 歳から 55 歳までの男女 15 名とし，最終的な結果は全員の得点の平均として算出した．ただし，DCR 法においては 3.5 点以上が画質劣化に対する許容域とされているため，今回の実験も 3.5 点以上であれば画質の劣化が少ないと評価することとした [59]．

この主観評価実験の結果を表 7.7 と図 7.24 に示す．BFR が 2 と 3 のときには，すべてのシーンにおいて評価結果は許容値である 3.5 以上を示した．よって，BFR が 2 や 3 のときには劣化が少ないとすることができる．また，すべてのシーンにおいて BFR 値が高くなるほど，画質は劣化するという結果も得られた．この傾向が示すこととしては，計算時間と画質劣化のバランスから適切な BFR を選択する必要があるということである．加えて，シーン A とシーン C では，シーン B やシーン D と比べて比較的良好な評価実験結果が得られた．これは，シーン A やシーン C の平行移動距離が，シーン B やシーン D の平行移動距離よりも少ないためであると考えられ，平行移動計算の距離が大きくなってしまうと，画質も劣化すると考えられる．

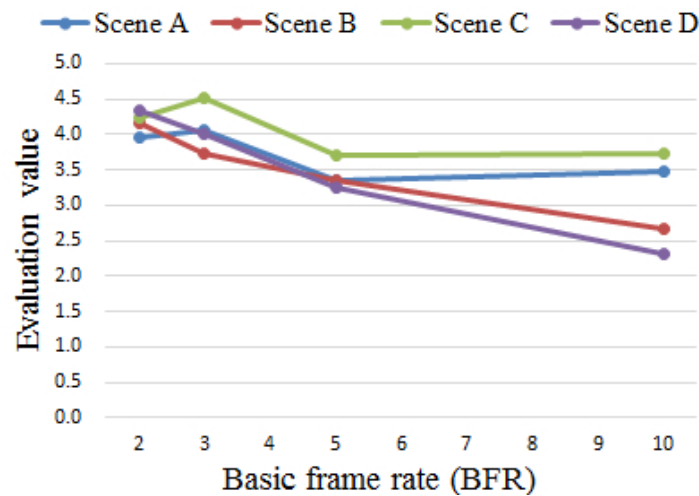


図 7.24: 主観評価実験結果のグラフ (実験 2-3)

実験 2-1～2-3 を通した考察

実験を通して、シーン C が最も良い結果が得られた。シーン C では、DCR 法の画質劣化の許容域である 3.5 以上をすべての BFR において保つことができおり、BFR が 10 の場合で約 6 倍の高速化を図ることができている。よって、シーン C では画質劣化を少なくして、6 倍以上速く CGH 動画を生成できると考えられる。また、すべてのシーンにおいて BFR が 2 と 3 の場合には、DCR 法の評価値が 3.5 以上となった。よって、シーン C 以外のシーンについても有効性が証明され、シーン A やシーン B、シーン D においても 2 倍以上の高速化を図ることができた。

主観評価実験の項で考察したように、どのくらいの BFR まで許されるかというのは平行移動量が大きく関係すると考えられる。チェッカーボードは非常に歪みがわかりやすいコンテンツであるため、その他のコンテンツではもっと良い結果が得られることも考えられる。今回は実験を通してすべてのシーンで 2 倍以上の高速化を行うことができたため、提案手法の有効性を示すことができた。

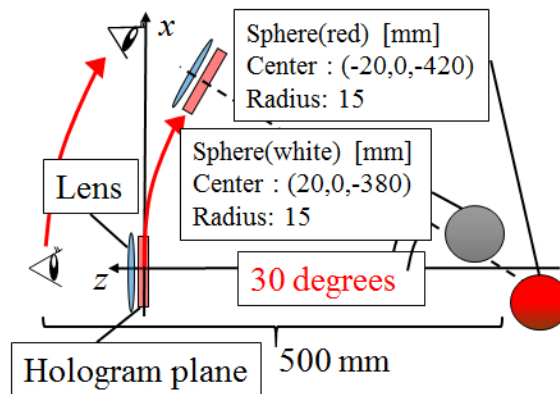


図 7.25: 実験 3 に用いたシーン E の詳細

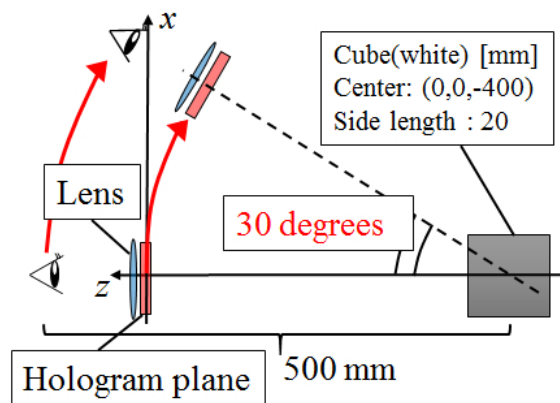


図 7.26: 実験 3 に用いたシーン F の詳細

7.4.4 実験 3：提案手法のコンテンツの違いによる比較実験

実験 3 では、視点の動き方を同一にして、異なるコンテンツに対して計算時間と再生像の劣化について調べたので、その結果について報告する。

実験内容

視点から 500mm 先の地点を中心に視点が 30 度回転するようなシーンについて、3 種類のコンテンツを作成し、その結果について比較実験を行った。この視点移動は実験 2 におけるシーン D と同一の動きである。このことから、3 種類のコンテンツは実験 2 で用いたシーン D と、新しく製作したシーン E とシーン F を用いた。シーン E は図 7.25 のように視点から約 500mm 先に白い球と赤い球が配置されており、シーン F は図 7.26 のように視点から 500mm 先に立方体が一つ配置されている。すべてのシーンにおいて TP は $z = -400\text{mm}$ とした。また、この実験にお

いて作成した提案動画の BFR は、比較を行いやすいようにすべて 3 で統一することとした。

実験結果と考察

三つのシーンについて、従来動画と BFR が 3 の提案動画を作成し、それぞれの計算時間を測定した。その結果が表 7.8 であり、それをグラフにまとめたのが図 7.27 である。グラフにおける従来手法の計算時間の違いは計算点数の違いに起因しており、シーン D が最も計算に用いる物体点数が多く、シーン F が最も計算に用いる物体点数が少ない。よってシーン D が最も複雑であり、シーン F が最も単純な形をしていると言える。最後に、画質の劣化を確かめるために実験 2-3 と同様の方法で主観評価実験を行った。ここでは被験者は 7 名とし、実験 2-3 と同様に DCR 法を用いた主観評価とした。その結果が表 7.9 である。また参考のために、図 7.28 に、それぞれシーン E とシーン F の再生像を示した。ここで示している再生像は、いずれもシーンの 150 枚目のフレームにおけるものである。シーン D の再生像は実験 2-3 にて掲載したため、ここでは紹介しないが、この結果から画質の劣化が少ないことがわかる。

今回の実験ではシーン D で 2.6 倍以上、シーン E で 2.5 倍以上、シーン F で 2.3 倍以上の高速化が図られた。このことから計算時間の効率について考えると、複雑な物体ほど提案手法の有効性が高いと言える。これは、CGH 計算におけるオーバーヘッドタイムの存在が一因となっている。例えば、ホログラム面を記録するためのバッファの確保や、それに関するメモリコピー等は、どのシーンでも共通に行わなければならない計算である。提案動画の計算時間が少なければ少ないほどこのオーバーヘッドタイムの影響が濃く現れてしまい、効率が上がらなくなることが考えられる。加えて主観評価実験の結果によると、シーン F が最も良く、シーン D が最も悪いという結果になった。これは、シーン D のチェッカーボードのようなものは歪みを知覚しやすく、それに対して二つの球や一個の立方体が置かれたシーンは深さの差も少ないため、適切な TP を定めることで劣化の少ない動画を作成することができるためであると考えられる。しかし、いずれのコンテンツでも DCR 法の許容域である 3.5 ポイントを大幅に上回っており、さらにいずれのコンテンツでも計算時間が 2 倍以上高速化されていることから、コンテンツの違いによって効率の違いはあれど、提案手法はあらゆるシーンに対して有効であると考えることができる。

7.5 結論

本章では提案手法として、予め計算された光波を再利用することで、視点の平行移動と回転移動を高速化する手法を提案した。動画を作成して計算時間を測定することで、提案手法で高速な計算が実現できることを示し、さらに主観評価実

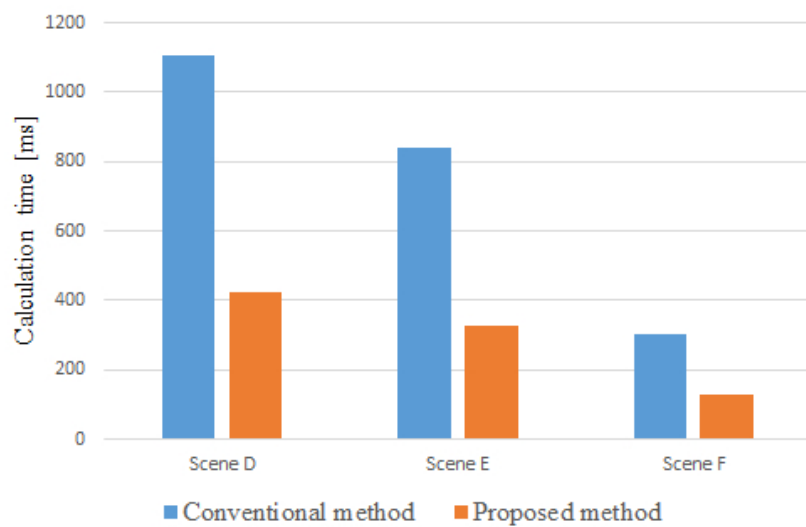
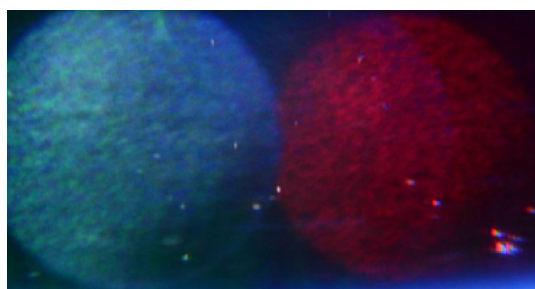
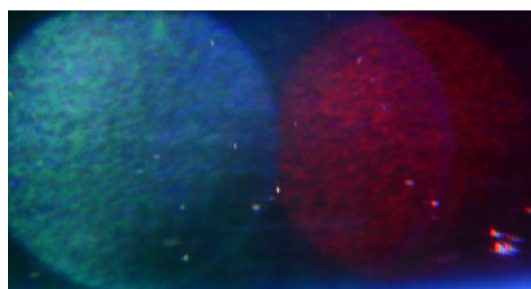


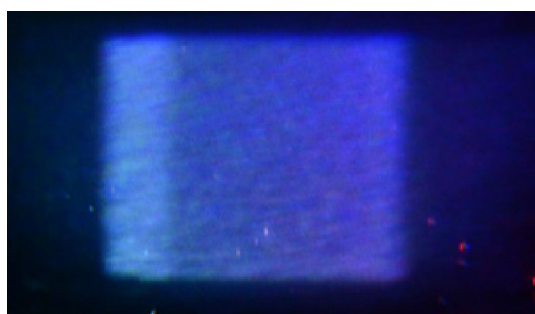
図 7.27: 計算時間測定結果のグラフ (実験 3)



(a) シーン E(従来手法)



(b) シーン E(提案手法)



(c) シーン F(従来手法)



(d) シーン F(提案手法)

図 7.28: 実験 3 の再生像 (提案手法 3)

表 7.8: 計算時間測定結果 (実験 3)

シーン	計算時間 [ms]		高速化比率 (従来手法/提案手法)
	従来手法	提案手法 (BFR:3)	
シーン D	1106	422	2.63
シーン E	841	326	2.58
シーン F	304	130	2.33

表 7.9: 実験 3 の主観評価実験結果

	シーン D	シーン E	シーン F
評価値	3.94	4.07	4.26

験を行うことで提案手法による再生像の劣化が少ないということを示すことができた。またさまざまなコンテンツに対して提案手法を用いることで、あらゆるコンテンツに対して本手法が有効であるということを証明することができた。

提案手法は将来的に HMD への適用が考えられている。そのためにはリアルタイム化が必要であるが、提案手法ではリアルタイム計算を実現するには至っていない。将来的には、提案手法をさらに高速にし、リアルタイム計算を実現することが必要となる。また、今回は平行移動と回転移動の高速化法を提案したが、これに加えて前後移動の高速化法を実現することで、あらゆる視点移動に対応できる手法となる。よって、前後移動を高速に計算できるアルゴリズムを生み出すことが今後の課題である。さらに提案手法を実用的に利用することを考えると、視点の移動量に基づいて、劣化が起こりにくい BFR がどの程度なのかを明らかにする必要がある。

第8章 任意方向への視点移動の高速 計算法 (提案手法4)

8.1 研究背景と目的

第7章において、前フレームの物体光波を再利用することで視点移動を高速化する手法を提案したが、この提案手法は視点の平行移動と回転移動のみの計算法を示しており、視点の前後方向への移動ができないという大きな問題点があった。よって、この高速化法は5DoFにしか対応していなかった。実用上、高速計算が実現できない動きが混在する場合、少しでも前後方向への移動が発生した場合には計算をやり直さなくてはならないなどの問題が大きく、例えばホログラフィックHMDに表示するCGHを計算するために、第7章の手法を使用することを考えると制約が大きい。この観点から、本章では第7章の提案手法を拡張することで、任意方向の視点移動の高速計算が可能な6DoF対応の手法を提案し、その有効性を確認した。

8.2 任意方向への視点移動の高速計算法

一般的に、視点の前後移動はホログラム面に記録された物体光波の縮小及び拡大によって実現することが可能である。しかしながら、第7章の手法では、FTOSの導入のために点光源の位置補正を行っていることから、記録に用いる点光源の位置と、実際に再生される点光源の位置が異なるため、単なるホログラム面の拡大や縮小では前後移動を実現できない。

この問題を解決するためのソリューションとして、収束球面参照光を使用する計算法 [60,61] を導入した。収束球面参照光を用いることでFTOSに必要であった位置補正を不要とすることができる。これにより、ホログラム面の物体光波をフレネルホログラムと同じように扱うことができ、上記で説明したホログラム面の拡大と縮小に伴う前後移動を実現することが可能となる。本節の中では、まず8.2.1項にて収束球面参照光を用いたFTOSの計算法について説明し、次の8.2.2項にて、前後方向の視点移動の高速化法を導入する。第7章で説明した平行移動・回転移動の計算法をベースとして組み合わせることで、任意の視点移動の高速な計算法について紹介する。ここまでは物体光波の伝搬計算を高速化する機構の提案であったが、従来手法 [10] の計算時間としては光線追跡に用いる時間も大き

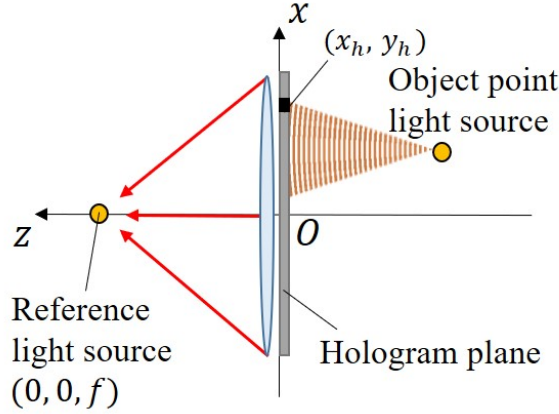


図 8.1: 収束球面参照光を用いた記録光学系

い．そこで，第7章の手法より高速に計算するエッセンスとして，第8.2.3項では光線追跡部分の高速化を実現するための選択的レイトラシング手法について説明を行う．最後に8.2.4項にて，本手法の計算時間の削減効果と，本手法によって生じる再生像への影響について議論を行う．

8.2.1 収束球面参照光波を用いた CGH 計算法

FTOS 環境における CGH を計算する際に，参照光として通常の点光源の代わりに収束球面参照光波を用いて CGH を計算することで，通常の FTOS で必要とされる位置補正が不要となる．あくまでこの計算法は，コンピュータ内でのシミュレーションで CGH を計算する際の記録過程で，参照光として収束球面参照光を用い，実際の再生装置の再生照明光に対し変化を加える必要はない．よって，一般的なプログラムの書き換えだけで対応することが可能である．本項では，この理由について説明する．

まず，図 8.1 に示されるように，レンズの焦点距離 $(0, 0, f)$ の位置に収束球面参照光が配置されている場合を考える．このとき，ホログラム面上まで伝搬される参照光波 $R_c(x_h, y_h)$ は以下の式で表される．

$$R_c(x_h, y_h) = R_0 \exp(jkr_h(x_h, y_h)). \quad (8.1)$$

ここで R_0 は参照光の振幅であり， r_h は参照光源からホログラム面上の位置 $(x_h, y_h, 0)$ までの距離である．もし，レンズの存在による影響を考慮しない場合，ホログラム面上の干渉縞の強度分布 $I(x_h, y_h)$ は以下の式で計算される．

$$\begin{aligned} I(x_h, y_h) &= |u(x_h, y_h) + R_c(x_h, y_h)|^2 \\ &= |u(x_h, y_h)|^2 + |R_c(x_h, y_h)|^2 \\ &\quad + u(x_h, y_h)R_c^*(x_h, y_h) + u^*(x_h, y_h)R_c(x_h, y_h), \end{aligned} \quad (8.2)$$

ここで $u(x_h, y_h)$ はホログラム表面のオブジェクトの光波で $*$ は複素共役を示す．式 (8.2) の最初の項 $|u(x_h, y_h)|^2$ と，2 番目の項 $|R_c(x_h, y_h)|^2$ はそれぞれ物体光と参照光の強度に過ぎないため再生像に影響を及ぼさない．干渉縞に影響を及ぼすのは第3項と第4項の $u(x_h, y_h)R_c^*(x_h, y_h) + u^*(x_h, y_h)R_c(x_h, y_h)$ の部分のみである．

この式を踏まえ，次はレンズが存在するものとして計算式を組み立てると，レンズを通過した後のホログラム面上の干渉縞の強度分布 $L(x_h, y_h)$ は次のように計算される．

$$L(x_h, y_h) = (u(x_h, y_h)R_c^*(x_h, y_h) + u^*(x_h, y_h)R_c(x_h, y_h)) \exp(jk\alpha), \quad (8.3)$$

ここで α はレンズによって発生する光路差であり，以下の式で計算される．

$$\alpha(x_h, y_h) = r_h - f = \sqrt{x_h^2 + y_h^2 + f^2} - f. \quad (8.4)$$

ここで式 (8.3) の第1項と第2項は

$$\begin{aligned} u(x_h, y_h)R_c^*(x_h, y_h) \exp(jk\alpha) \\ &= u(x_h, y_h)R_0 \exp(-jkr_h) \exp(jk(r_h - f)) \\ &= u(x_h, y_h)R_0 \exp(-jkf), \end{aligned} \quad (8.5)$$

$$\begin{aligned} u^*(x_h, y_h)R_c(x_h, y_h) \exp(jk\alpha) \\ &= u^*(x_h, y_h)R_0 \exp(jkr_h) \exp(jk(r_h - f)) \\ &= u^*(x_h, y_h)R_0 \exp(jk(2r_h - f)). \end{aligned} \quad (8.6)$$

と計算されるから，レンズ通過後の強度分布 $L(x_h, y_h)$ は，

$$L(x_h, y_h) = u(x_h, y_h)R_0 \exp(-jkf) + u^*(x_h, y_h)R_0 \exp(jk(2r_h - f)). \quad (8.7)$$

と計算される．この式の中で，第1項は直接像を，第2項は共役像を表している．3.2.2 項で説明されているように共役像を除去することで第2項による再生像は除去され，第1項の直接像のみが残る．

ここで FTOS の光学系では，再生照明光として配置される点光源がレンズによって平行光に変換されるため，ホログラム面に照射される再生照明光は平行光となる．つまり，記録時に参照光を平行光として計算していれば，従来の FTOS のような記録光学系と再生光学系でホログラム面に到達する参照光及び再生照明光が異なることを埋めるための位置補正は不要になる．この事実は [60] の文献の中においても言及されている．ここで再び収束球面参照光の計算法の説明に戻ると，式 (8.7) 中の直接像 $u(x_h, y_h)R_0 \exp(-jkf)$ 中の $R_0 \exp(-jkf)$ は定数であるため， $R_0 \exp(-jkf)$ という式自体は平行光を表している．したがって，直接像

$u(x_h, y_h)R_0 \exp(-j k f)$ は、記録するオブジェクトからの物体光 $u(x_h, y_h)$ と平行参照光 $R_0 \exp(-j k f)$ で構成されており、この二つの光の干渉縞であると捉えられる。このことから、参照光は実際の光学系と同じ平行光が用いられるのと同じ効果を生み、 $u(x_h, y_h)$ という通常のフレネルホログラムの物体光計算法で物体光を計算するだけで、FTOS での物体光波を同様に計算することができる。

8.2.2 任意方向の視点移動高速化法

この項では、収束球面参照光波を用いた場合の視点移動の高速計算方法について説明する。基本的な考え方としては第7章と同様に、前のフレームのオブジェクトの光波を再利用することで高速化を行う。視点の動きが小さい場合、ホログラム面上の多くの領域を再利用できるため計算を高速化できる。干渉計算に収束球面参照光を使用することにより、物体光の計算にレンズの効果を含める必要もなくなる。提案手法の計算手順を図8.2に示す。

視点の平行移動の高速計算法

通常のホログラムでは図8.3に示すように、視点の平行移動が実行されると前のフレームの物体光波を再利用できる。この考え方は7.3.1項にて紹介したものと同じである。ただし、7.3.1項で紹介した手法ではホログラム面が x - y 平面上で平行に移動すると、レンズによって引き起こされる位相差のために歪みが発生する。この歪みは、ホログラム面から距離が離れた領域では大きな移動となり、ホログラム面に近い部分では小さな移動として現れる。よって、特定の深度の物体だけは正しくシフト可能であるが、他の深度のオブジェクトには位置誤差が生じる。

一方、7.3.1項で紹介した手法と違い、こちらの提案手法ではその位置誤差が生じない。これは収束球面参照光を使用するため、ホログラム面の光波を通常のフレネルホログラムと同様に扱うことが可能であるためである。図8.3に示すように x 方向のホログラム面の平行移動を検討すると、平行移動された N 枚目のフレームの光波分布 $u_N(x_h, y_h)$ は次のように計算される。

$$u_N(x_h, y_h) = u_{N-1}(x_h - \Delta x, y_h), \quad (8.8)$$

ここで Δx は視点の平行移動の距離である。

この平行移動距離が小さい場合、連続するフレーム間の重なる領域を再利用できる。一方、図8.3に示すように重なりが生じない領域に関しては、レイトラッシング法に基づき物体点光源を得た後に、各物体点光源からの光波伝搬を計算する。この領域が小さくなればなるほど、計算時間も小さくなる。

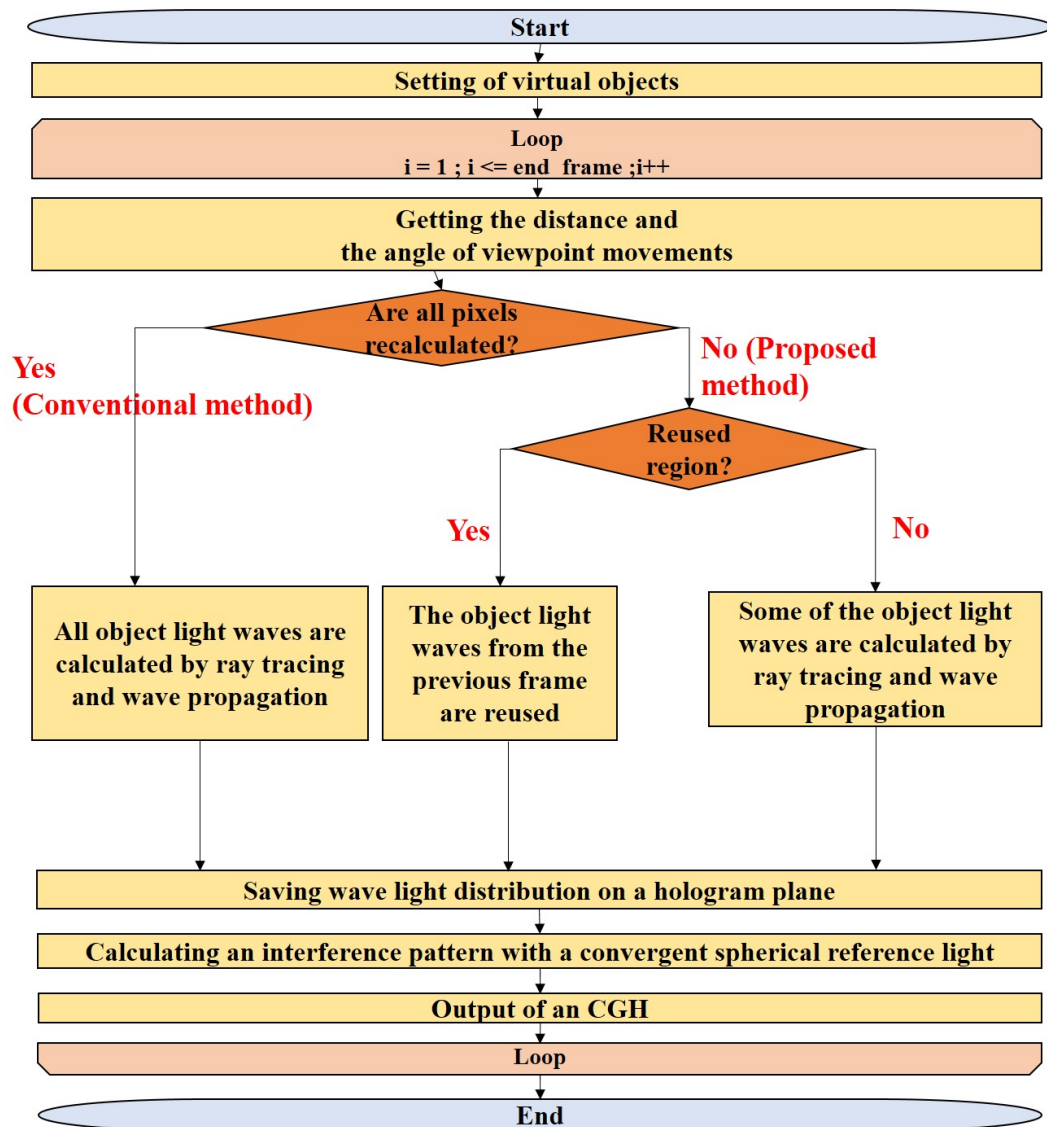


図 8.2: 任意方向への視点移動高速計算法の計算フロー

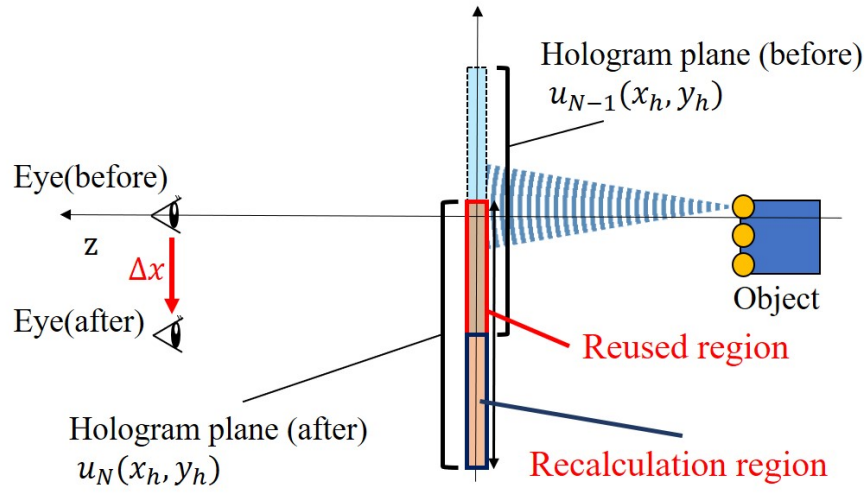


図 8.3: x 方向への平行移動の高速計算法

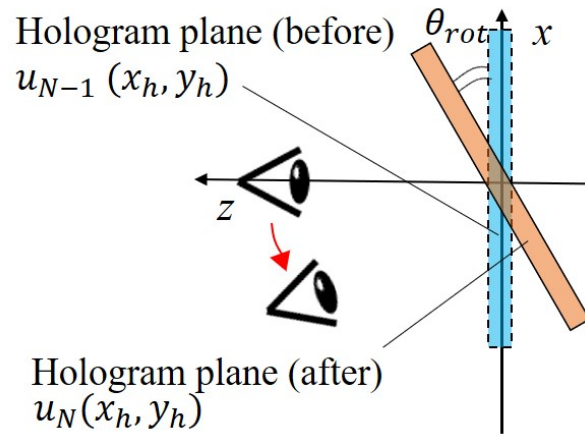


図 8.4: y 軸中心の回転移動

視点の回転移動の高速計算法

次に視点の回転移動の高速計算法について述べる．図 8.4 のように y 軸を中心にホログラム面が回転する場合，回転移動によって生じる位相差は次の式で計算される．

$$\phi_{rot}(x_h, y_h) = kx_h \sin \theta_{rot}, \quad (8.9)$$

ここで θ_{rot} はホログラム面の回転角度であり，回転後の光波分布 $u_N(x_h, y_h)$ は以下の式で計算される．

$$u_N(x_h, y_h) = u_{N-1}(x_h, y_h) \exp(j\phi_{rot}). \quad (8.10)$$

したがって位相差を利用することで，回転移動が近似的に計算される．

視点の前後移動の高速計算法

最後に前後運動の高速計算について説明する．図 3.1 に示すような通常のアレイホログラムでは，ホログラム面上の物体光波分布を拡大あるいは縮小することにより，物体の光源の深さを変更することができる．図 8.5 に示すように，物体光波分布を記録するホログラム面が縮小されると，オブジェクトの点光源が近づいたように感じられる．これはすなわち，前のフレームのオブジェクトの物体光波を縮小することで，前方に視点が移動しているかのような感覚を生むことができることを示している．同様にホログラム面上の物体光波分布が拡大されると，物体がさらに深い位置に呈示されるように見えることから，視点の後方への移動が達成される．ここでも干渉縞の収束球面参照光が使用されることから，位置補正が必要ないため，このような拡大および縮小に応じた前フレームの物体光波の再利用を実現することができる．

前後移動を実現する場合のスケーリング率を決定するには，図 8.6 に示すように，正しく深度を変化させたい深度 (x_t, y_t, z_t) を定義する必要がある．本論文では，この位置を対象深度点 (Target depth point) と呼ぶことにし，実験ではシーンの特徴に応じて目標となる対象深度点は手動で決定された．前のフレームと現在のフレーム間の前後の移動距離を ΔD と示すと，スケーリング率 s_r は次のように計算される．

$$s_r = \frac{D_c}{D_p} = \frac{D_p + \Delta D}{D_p}, \quad (8.11)$$

ここで D_p は，前のフレームの対象深度点からホログラム面までの距離であり， D_c は現在のフレームの対象深度点からホログラム面までの距離である．このように決定されたスケーリング率 s_r に基づいて，ホログラム面の原点を中心にホログラム面上の物体光波をスケーリングする．このスケーリングのために，最近傍補間 [62]

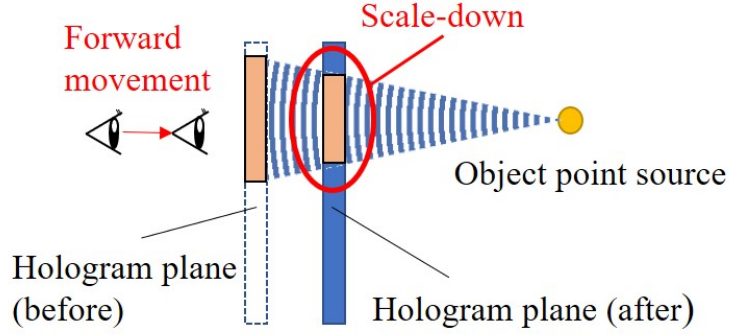


図 8.5: 視点の前方への移動とホログラム面の物体光波の縮小の関係性

による補間に基づいてホログラム面を拡大及び縮小させた．しかしながら， $N-1$ フレーム目のホログラム面 $u_{N-1}(x_p, y_p)$ をリサンプリングして，スケーリングされたホログラム面の物体光波 $u_s(x_c, y_c)$ を計算すると，図 8.6 のようにホログラム面の端で光路差に誤差が出ることが考えられる．よって，ホログラム面の中心からずれるほど，位相差に誤差が現れる．この光路差 $r_d(x_c, y_c)$ は次のように計算される．

$$r_d(x_c, y_c) = (r_c(x_c, y_c) - D_c) - (r_p(x_p, y_p) - D_p), \quad (8.12)$$

ここで r_c は対象深度点と，現在のホログラム面上のピクセル (x_c, y_c) の距離であり， r_p は対象深度点と，1 フレーム前のホログラム面上のピクセル (x_p, y_p) の距離である．この光路差によって生じる位相差を考慮すると，ホログラム面上の光波分布 $u_N(x_c, y_c)$ は

$$u_N(x_c, y_c) = \frac{D_p}{D_c} \exp(-jkr_d(x_c, y_c)) u_s(x_c, y_c), \quad (8.13)$$

と計算され， $u_N(x_c, y_c)$ を一つ前のフレームの光波から計算することができる．式 (8.12) および式 (8.13) を用いることで，再生像の正しい深度を得ることが可能である．

さらに式 (8.13) の計算を行ったとしても，図 8.7 に示されるような再生位置の誤差が現れる．図 8.7 は，正しい物体光波と，スケーリングされた際の物体光波の位置の違いを示している．図 8.7 に示されるように，ホログラム面上の位置がスケーリングの基準点から遠くなればなるほど，実際の再生される位置に誤差が生じる．これは，ホログラムにおいて深度を浅くするためには，ホログラム面を縮小しなければならないが，実際の物体は深度が浅くなるにつれて大きくなるように見えてくるという縮小動作と，見た目の大きさの変化に齟齬が生じるためである．よって平面の中心から遠くなるほど，位置誤差が大きくなる．

この問題を回避するために，提案手法では光波伝搬の再計算を，ホログラム平面の外側の領域でより頻繁に実行することとした．後に述べる実験では，ホログラム面の中心からのユークリッド距離に従って，図 8.8 に示すように，ホログラム

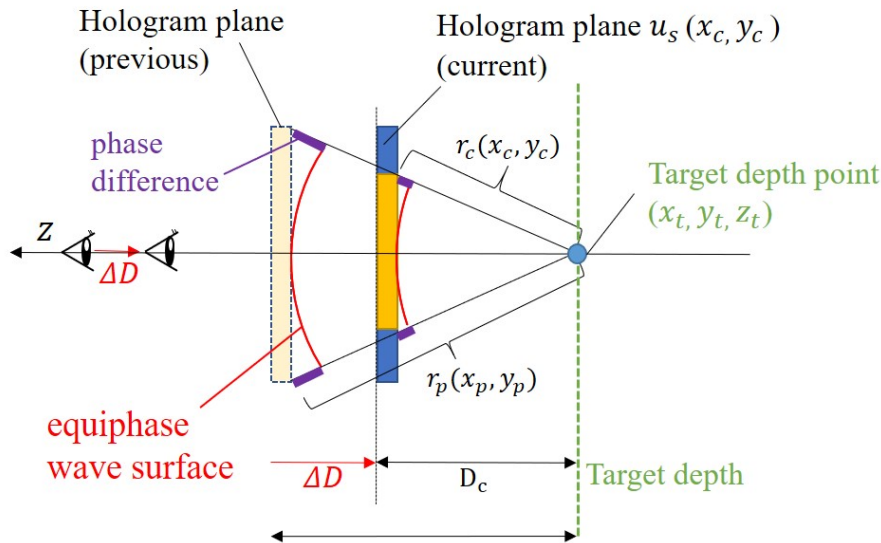


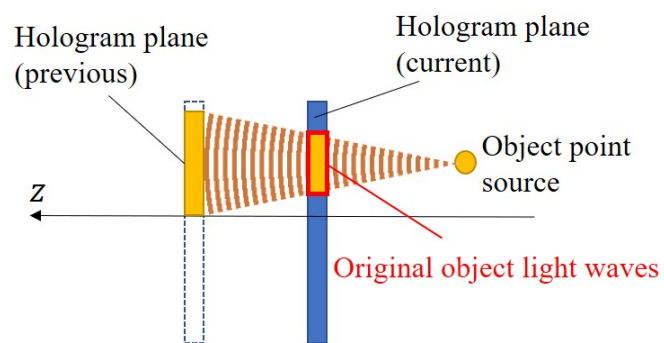
図 8.6: ホログラム面の物体光波のスケーリングによる光波差

面を3つの領域に分割した．外側の領域はより高い頻度で再計算され，内側の領域はより低い再計算頻度を持つことで，見た目にも誤差の少ない前後移動の高速化を実現することが可能となる．

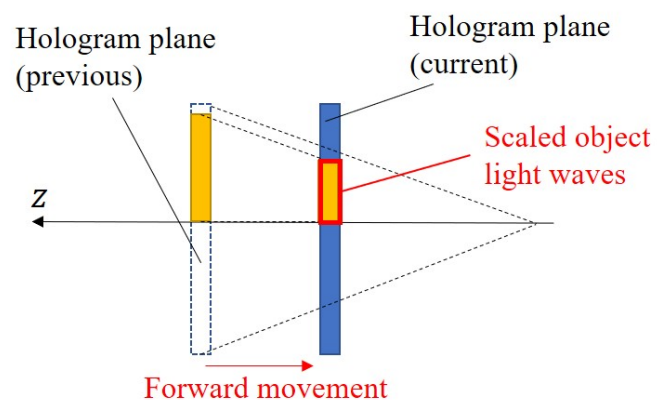
8.2.3 レイトレーシングの処理時間の削減

第7章で説明した手法は光波伝搬の計算時間の削減にのみ焦点を当てているが，従来手法 [10] の処理時間については，光波伝搬の処理時間ほどではないものの，レイトレーシング法を用いて物体点光源を得る部分の計算時間も無視できるほど小さいわけではなく，更なる計算処理時間の削減を図る必要がある．その観点から，ここでは光線追跡の処理時間を短縮する方法を併せて提案した．ホログラム面の一部を再利用する場合には，再利用領域に関しては物体点光源からの光波伝搬を計算する必要はなく，すなわち物体点光源を得るための光線追跡を行う必要はない．よって，すべての要素ホログラムから光線追跡を計算する必要はなく，視点の移動量を基に，光線追跡の計算が必要ない要素ホログラムを特定することで，光線追跡の計算処理時間を減らすことが可能である．

したがって，提案手法の処理の中では，視点の移動量に基づき各ピクセルの計算方法が決まった時点で，各要素ホログラムごとに，その要素ホログラムに属するピクセルが，前フレームの光波を再利用するのか，あるいはレイトレーシング法の計算を行い光波伝搬計算を行う必要があるのかを確認する．このように選択的にレイトレーシングを行うことで，要素ホログラム上のすべてのピクセルが再利用される場合，図8.9に示すように，要素ホログラムからの光線追跡を実行しないことで計算時間の削減を行うことが可能である．これは回転移動に関する光波



(a) 正しいホログラム面上の光波



(b) スケーリングによるホログラム面上の光波

図 8.7: スケーリングによって生じる位置の誤差

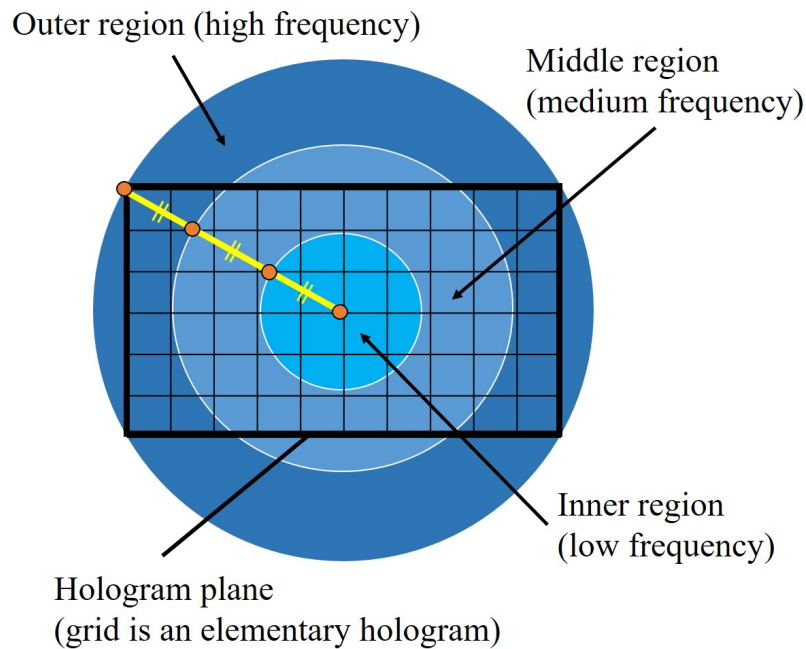


図 8.8: 前後移動における再計算頻度

伝搬に関しては、ホログラム面の全ての領域を再利用できることから光線追跡を行う必要がなく、平行移動または前後移動の場合には、再利用領域の大きさに応じて光線追跡の数を減らすことが可能である。

8.2.4 提案手法に関する議論

計算時間に関する議論

CGH の計算時間は、物体からの光波伝搬の計算に時間がかかるため、物体点光源の数とホログラム面のサイズに大きく依存する。加えて、我々がベースとした光線追跡法を用いた CGH の計算法 [10] では、レイトレーシングの計算時間が比較的長くなる傾向になる。この提案手法は前のフレームの物体光波を再利用することで、光線追跡と光波伝搬の計算時間の双方を削減することが可能である。この高速計算に関わる式は非常に単純 (式 (8.8) から式 (8.13)) であり、光波を再利用可能な領域ではレイトレーシングと光波伝搬の計算が必要ないため、迅速に計算を実行することが可能である。また、図 8.3 および図 8.8 に示すように、光線追跡と光波伝搬の計算は、平行移動と前後移動で再計算が必要な領域に用いられるが、全てのピクセルで実行されるわけではないため、従来の方法に比べて計算時間が短縮される。

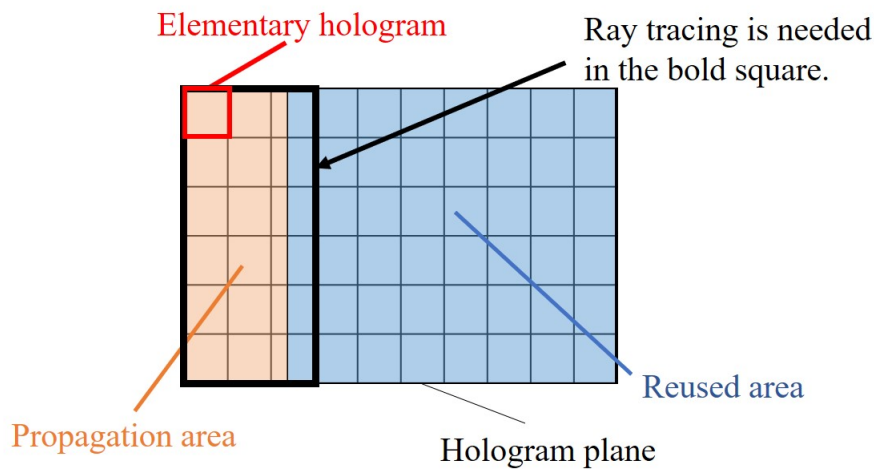


図 8.9: 視点移動時の要素ホログラムからの光線追跡

発生する誤差

提案手法によって引き起こされる計算誤差について説明する．第一に，本手法の高速計算法は，ホログラム面上の光波分布に位相を負荷することで近似的に視点の移動を実現するものであるから，ホログラム面上の光波分布の空間周波数が，電子ディスプレイのピクセルピッチによって決定される最大空間周波数を超える可能性がある．ただし，移動量が少ない場合にはこの付与される位相が少ないため，光波分布は最大空間周波数を超えることはない．次に図 8.7 に示すように，前後移動によって再生位置に誤差が生じる．この種の誤差は、ホログラム平面の外側の領域で大きくなるため，ホログラム面の外側領域での再計算を，ホログラム面の内側の領域よりも高い頻度で実施することで，この誤差の影響を軽減可能である．さらに前後移動を計算する際に，ホログラム面の画素をスケールリングするため，このときの補間によってエラーが発生する．最後にホログラム面上の光波が再利用されるとき，それらは光線追跡で前のフレームから得られる点光源を使用して計算される．したがって，視点の動きに応じた 3D シーンのおクルージョンは正しく表示されない懸念があり，その観点でも適切な頻度で全面の再計算を行う必要がある．これらの誤差が懸念されることから，数フレームに 1 回は従来手法で計算する必要がある．

8.3 実験

本手法の有効性を示すために，四つの実験を行った．まず，実験 1 として 8.3.2 項にて，収束球面参照光波を用いた FTOS の計算法と，従来の FTOS を用いた場合の計算法で作成した CGH の再生像と，生成処理に必要な時間を測定し，収束球面参照光波を用いた計算法と，従来の計算法の比較を行った．次に実験 2 と

表 8.1: CGH 計算に用いた計算機のスペック (提案手法 4 の実験用).

CPU	Intel Core(TM) i7-7700
Operation system	Windows 10 Professional 64 bits
Clock frequency	3.60[GHz]
RAM	64.0[GB]
GPU	GeForce RTX 2080 Ti
The number of CUDA cores	4352

して 8.3.3 項で実際に CGH 動画を制作した場合の制作処理時間を測定し，さらに実験 3 として 8.3.4 項で主観評価実験を行い，画質劣化の評価を行った．最後に，8.3.5 項にて視点の移動速度を変更した場合の，提案手法の効果に関する検証を実施した．

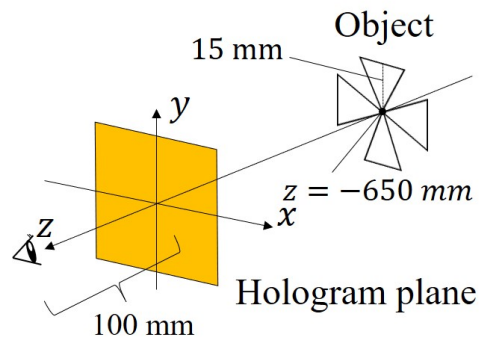
8.3.1 実験環境

本実験に用いた実験環境について述べる．本研究における実験には，第 4 章と同様に FTOS を適用した接眼型セミポータブルホログラフィックディスプレイ [36] を使用した．本装置は，独立した単眼視用のユニットを二つ組み合わせて両眼視を実現するものであるが，両眼再生の場合には左右の眼に合わせるための座標変換を必要とすることを除けば，単眼視用の計算を二度行うだけで両眼再生が可能である [38]．

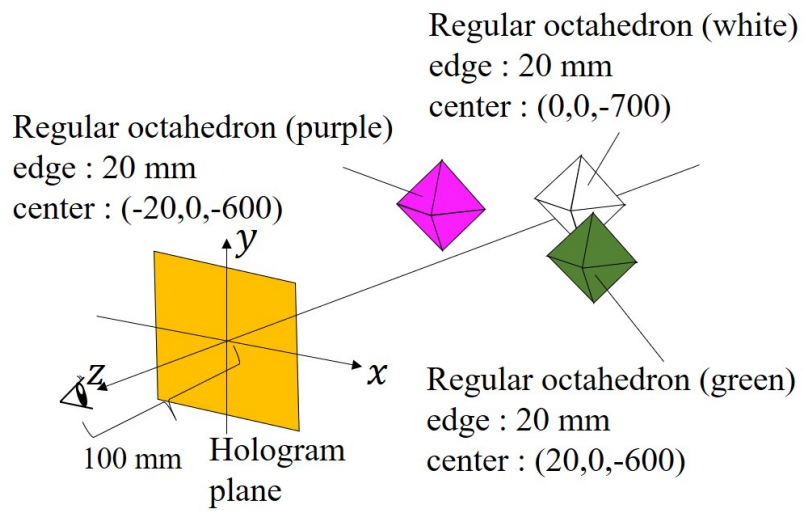
また，要素ホログラムに関しては，従来手法 [10] 同様に 10×6 枚を用い，各要素ホログラムから射出されるレイトラッキングのための光線は 161×161 本に設定された．また，今回の実験に使用した計算機のスペックは表 8.1 に示す通りである．実験で比較に用いた従来手法，提案手法共に CUDA を用いた並列計算を行い，計算速度を高速化させた．

8.3.2 実験 1：収束球面参照光波を用いた計算法の再生像と計算時間の確認

まず，従来の FTOS の計算方法にて光線追跡法を用いた CGH [10] を計算する場合と，収束球面参照光波を用いて CGH を計算する場合の比較を行った．実験のため，ここではシーン A，シーン B という二つのシーンを実験のために準備した．シーン A は図 8.10(a) のような一つの白のマルタ十字が配置されたシンプルなシーンである．一方，シーン B は図 8.10(b) のように紫，緑，白の正八面体を三つ配置したシーンで，シーン A と比較して複雑な物体が配置されるシーンである．ホログラム面はワールド座標系の原点を中心として， x - y 平面上に配置している．実験

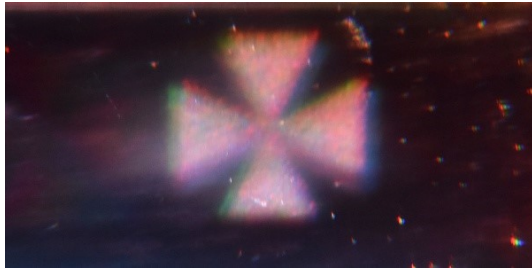


(a) シーン A

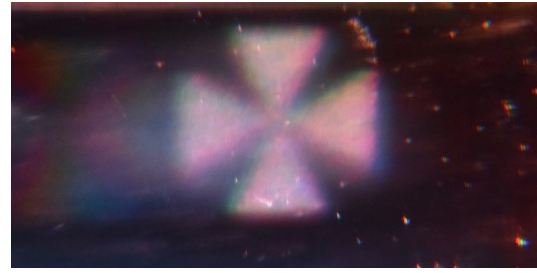


(b) シーン B

図 8.10: 実験用シーンの構成図

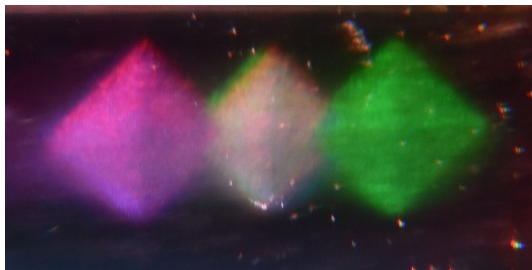


(a) 従来の参照光 [10]

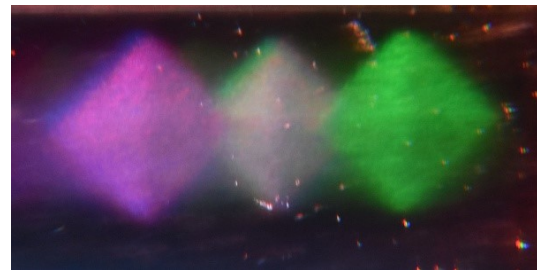


(b) 収束球面参照光

図 8.11: 参照光の違いによる再生像の比較 (シーン A)



(a) 従来の参照光 [10]



(b) 収束球面参照光

図 8.12: 参照光の違いによる再生像の比較 (シーン B)

の結果，得られたシーン A の再生像を図 8.11 に，シーン B の再生像を図 8.12 に示した．この結果，収束球面参照光波を用いた計算法で，光線追跡法を用いた CGH を正しく計算できていること，及びどちらの計算法においても生成される再生像の品質は同等であることが確認された．次に，各計算法の計算時間の測定を行い，その結果を表 8.2 にまとめた．収束球面参照光波を用いた場合の方がわずかに計算時間が小さくなる傾向にある．これは，収束球面参照光波を用いた計算法の場合には FTOS の位置補正が不要になることからであると考えられる．この実験の結果，品質や処理時間の劣後を招くことなく，収束球面参照光波を用いて CGH を計算することが可能であることが確認された．

8.3.3 実験 2：提案法を用いた CGH 動画の生成時間の測定

次に，視点移動を伴う 300 フレーム (30fps) の CGH 動画を作成し，全てのフレームに関して，全ての物体点光源からの光波を計算する場合と，提案手法の視点移動の高速化法を用いて高速化を行った場合の生成時間と再生像の品質について比

表 8.2: 参照光の違いによる CGH 生成時間の比較

方法	計算時間 [ms]	
	シーン A	シーン B
従来の計算法 [10]	124.47	281.28
収束球面参照光による計算法	121.78	279.93

表 8.3: 実験に用いた CGH 動画の視点移動の詳細表

動画の種類	開始位置 (x, y, z) [mm]	終了位置 (x, y, z) [mm]	平行 移動量 [mm]	回転 移動量 [$^{\circ}$]	前後 移動量 [mm]
(1) 平行移動	(50,0,0)	(-50,0,0)	100	-	-
(2) 回転移動	(460,0,-190)	(460,0,-190)	-	15	-
(3) 前後移動	(0,0,150)	(0,0,150)	-	-	300(前方へ) + 300(後方へ)
(4) 混合	(0,0,150)	(-50,0,-150)	50	5.74	300 (前方へ)

較を行った．表 8.3 と図 8.13 に示すように，4 種類の視点移動に関する動画を作成した．この 4 種類とは (1) 平行移動のみ，(2) 回転移動のみ，(3) 前後移動のみ，(4) 混合の 4 パターンである．混合の動画は平行移動，回転移動，前後移動の全てを組み合わせたものであり，本実験では計算処理の順番は平行移動，回転移動，前後移動の順序で計算し，予定する視点移動の動きを再現する形とした．これらの 4 種類の動きについて，8.3.2 項で紹介したシーン A とシーン B を対象に CGH 動画の作成を行った．全ての CGH 動画において，対象深度点は $(0, 0, -650)$ に設定された．

8.2 節で説明したように，本手法では近似誤差が発生することから，何枚かに 1 枚のフレームは従来手法を用いて計算されなくてはならない．この従来手法を用いて，全てのピクセルへの光波伝搬を計算するフレームの登場する頻度を再計算頻度 (Recalculation frequency) R_f と定義した．例えば， $R_f = 3$ のとき， $(3i + 1)$ 枚目のフレーム ($i = 0, 1, \dots, 99$) は従来法で計算が成される．一方，その他のフレームは $(3i + 1)$ 枚目のフレームで計算された物体光波を基にして，近似的に提案手法で計算される．また， R_f が 1 の場合は全てのフレームが従来法で計算されるため，本実験では $R_f = 1$ で生成された CGH 動画を従来手法で生成された CGH 動画としている．加えて，提案手法では前後移動の動きが入る場合には，再計算頻度をホログラム面の外側ほど小さく設定することで，誤差を小さくする機構が導入されている．本実験では図 8.8 で示したように，ホログラム面の中心からの距離に基

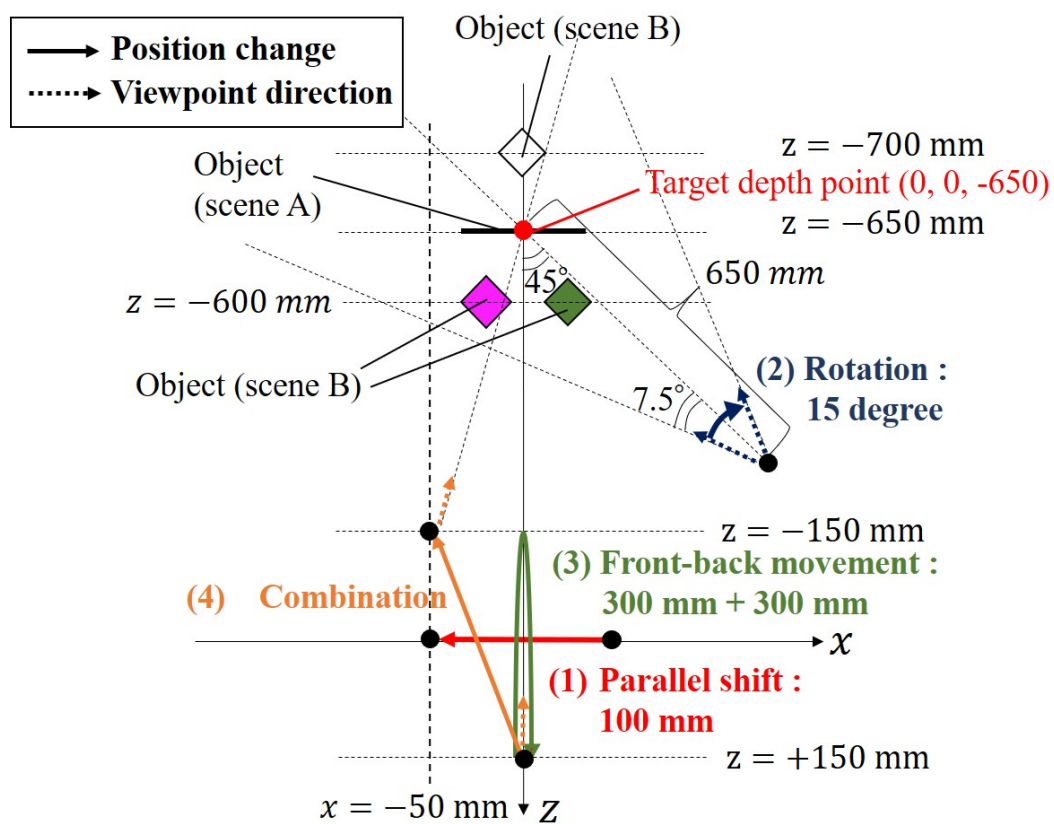


図 8.13: 実験に用いたシーンと，その視点移動に関する詳細図

づいて三つの領域に分け、それぞれに対して再計算頻度を設定している．よって、前後移動の場合にはホログラム面の画素位置によって再計算頻度の変更されるため、前後移動が入る動画では R_f は三つのパラメータを持ち、 $R_f = (R_1, R_2, R_3)$ と表現される．ここで、 R_1 は最も内側の再計算頻度を、 R_3 は最も外側の再計算頻度を、 R_2 は中間領域の再計算頻度を示す．また、この三つの再計算頻度が設定される場合の混合シーケンスの計算においては、簡単のために平行移動と回転移動の再計算頻度は R_1 と等しく設定されるようにした．

最初の実験として、提案手法を用いて前フレームから近似的に計算される CGH のフレームと、従来手法を用いて計算される 1 フレームの処理時間の比較を行った．確認のため、再計算頻度が $R_f = 2$ あるいは $R_f = (2, 2, 2)$ に設定される平行移動のみ、回転移動のみ、前後移動のみの 3 種類の 300 フレームの CGH 動画に関して、奇数番目のフレームの計 150 フレームの生成処理の平均時間と、偶数番目のフレームの計 150 フレームの生成処理の平均時刻を算出することで、従来手法によるフレームと、提案手法のフレームの生成時間の比較を行った． $R_f = 2$ あるいは $R_f = (2, 2, 2)$ の場合には、1,3,5,7 といった奇数番目のフレームは全て従来手法で計算され、一方偶数番目のフレームは全て提案手法をベースに計算される．この平均処理時間を、全体の計算処理を三つのセクションに分け、表 8.4 に示した．その他の計算時間には、CGH 動画の生成に用いるシーンのセッティングに用いる時間や、干渉計算の時間、画像データの出力に関する時間などが含まれる．

この表の結果から、視点移動を伴う際に前フレームの物体光波を再利用することで、計算処理時間を劇的に改善することができることが示された．回転移動と前後移動のシーケンスでは、式 (8.9) から式 (8.13) で示されるシンプルな式が各ピクセルに対して計算されるだけのため、GPU の並列計算を用いることで約 0.5ms の処理時間で光波伝搬の計算を近似的に行うことが可能である．一方、平行移動の場合にはホログラム面の一部に関してレイトレーシングと物体光源からの光波伝搬を計算しなければならない．結果として、提案手法の平行移動の物体光伝搬計算は、回転移動や前後移動と比較して長くなる．しかしながら、提案法の計算時間 (12.24 ms) は、従来手法 (109.98 ms) の約 9 倍の高速化が図られており、平行移動においても提案法で劇的に高速計算を実現することができることが確かめられた．

次に再計算頻度 R_f を変更して 300 フレームの CGH 動画を作成し、その計算処理時間を測定した．その結果を表 8.5 に示し、表に示される結果を図 8.14 にてグラフにまとめた．表 8.5 に含まれる平均計算時間は、CGH 動画の生成に必要とされたトータルの計算時間を、フレーム数である 300 で割ったもので、全ての動画において、従来法での全面再計算を行うフレームの計算処理時間も含まれている．例えば $R_f = 4$ の場合では、全体の 4 分の 1 に該当する 75 フレームが従来手法の計算方法により生成され、残りの 225 フレームが提案手法に基づく近似計算によって出力されている．表 8.5 の結果からも、提案手法で計算されるフレームの処理時間が、従来手法によって計算されるフレームの処理時間よりも非常に少ないこと

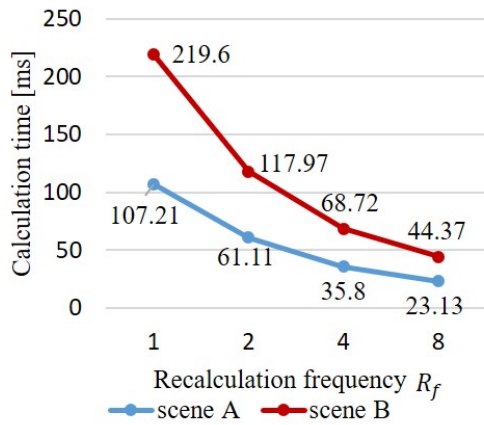
表 8.4: 従来手法と提案手法で生成するフレームの生成時間の比較表.

移動の種類	手法	1 フレームの CGH 生成時間 [ms]			
		光線追跡	物体光波伝搬	その他	合計
平行移動	従来手法	27.57	78.88	3.53	109.98
	提案手法	4.07	4.72	3.45	12.24
回転移動	従来手法	27.92	54.11	3.48	85.51
	提案手法	0	0.59	3.51	4.10
前後移動	従来手法	27.72	98.48	3.47	129.67
	提案手法	0	0.54	3.55	4.09

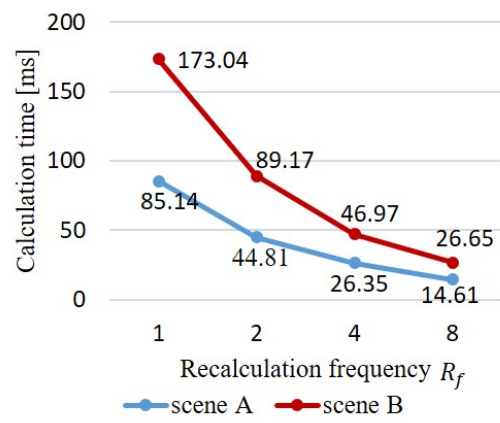
が読み取れる．また，用意したシーン A とシーン B の共に，同様に計算処理時間を削減できており，シーンの違いに左右されずに計算処理時間が削減可能であることが確認された．

加えて，8.2.3 項にて紹介した選択的レイトレーシングの効果を確認するため，各 CGH 動画中で，レイトレーシングの計算を行う必要のある要素ホログラムが何枚存在するかについて確認を行った．レイトレーシングの計算時間は，レイトレーシングを必要とする要素ホログラムの数に比例するため，この数が少なければ少ないほど，光波伝搬計算だけでなくレイトレーシングの処理時間も削減できているものと考えられる．このレイトレーシングの必要回数の，1 フレームにおける平均の算出結果を図 8.15 にグラフとしてまとめた．再計算頻度 R_f が 1 のとき，1 フレームの要素ホログラム数が 60 枚で設定されていることから，レイトレーシングを行う回数は各フレームごとに 60 回となる．一方，図 8.15 に示されるように， R_f が増加するにつれてレイトレーシングの平均回数が少なくて済むことがわかる．このことは，選択的レイトレーシング手法が，提案手法のレイトレーシングの処理時間を削減し，提案手法が光波伝搬計算のみならず，レイトレーシングの処理時間をも効果的に削減できることを示している．

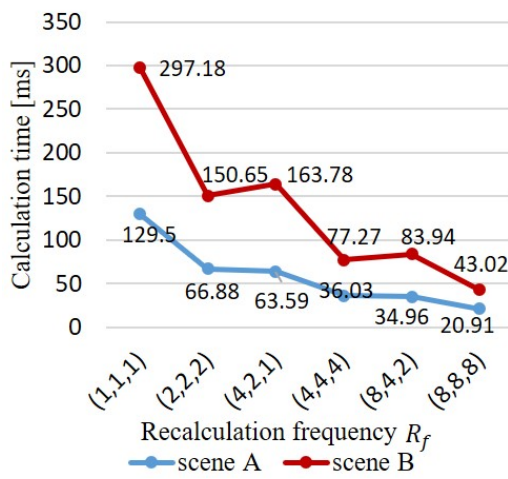
最後に，再生像の品質について確認するため，再生像を撮影した結果を図 8.16 に示した．紙面の都合上，全ての動き及び全てのシーンに対して再生像を示すことは膨大なページを必要とすることから，ここでは前後移動のみのシーケンスのシーン B についてのみ結果を示している．図 8.16(a) と図 8.16(f) を比較すると， $R_f = (8, 8, 8)$ の正八面体は，わずかに境界線が $R_f = (1, 1, 1)$ のものと比較して膨らんでいるように見える．これは，提案手法による近似誤差によるものであると考えられ，一般に R_f が大きくなるにつれて，誤差も大きくなっていくものと考えられる．この誤差については更なる評価を行う必要があるため，次の項にて主観評価実験を行った結果を紹介する．



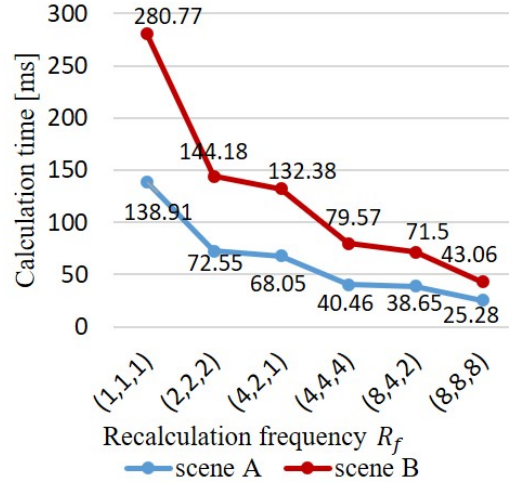
(a) 平行移動のみ



(b) 回転移動のみ

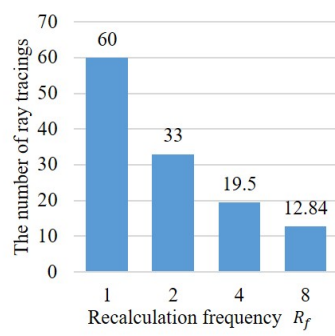


(c) 前後移動のみ

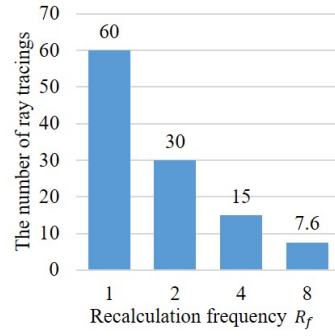


(d) 混合

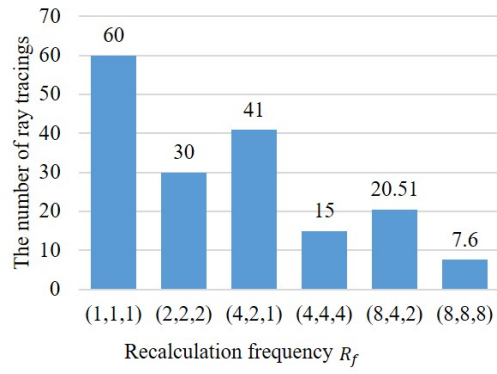
図 8.14: 異なる再計算頻度での CGH 動画の生成処理時間.



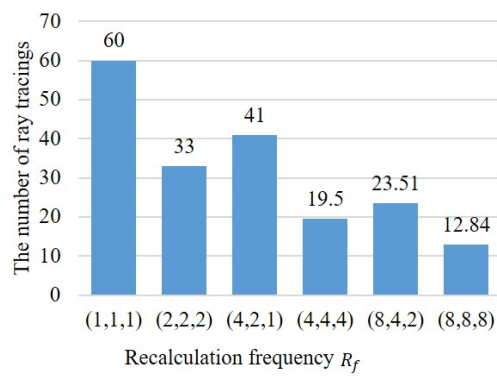
(a) 平行移動



(b) 回転移動



(c) 前後移動



(d) 混合

図 8.15: レイトレーシング数と再計算頻度の関係グラフ

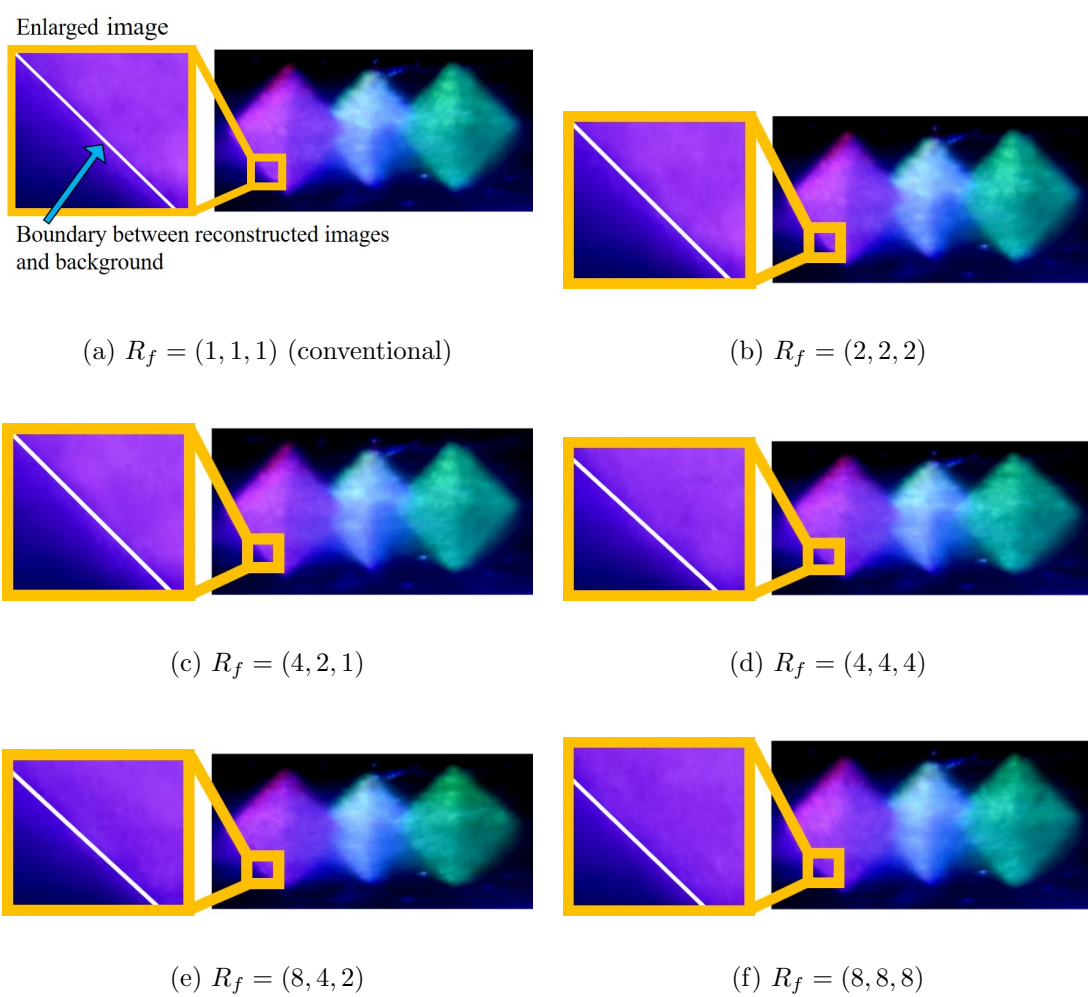
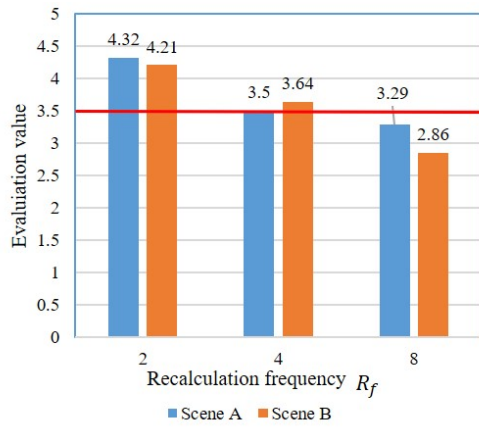
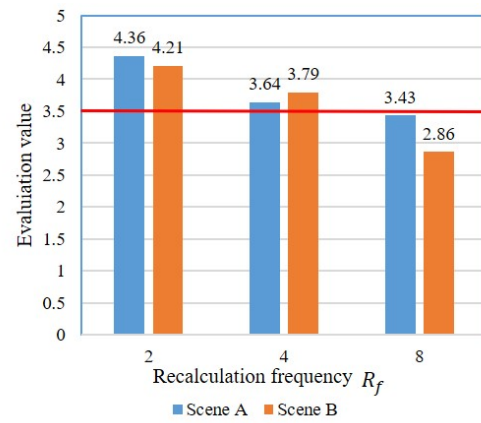


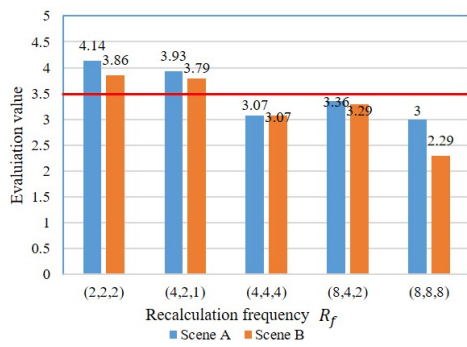
図 8.16: 前後移動シーケンスの再生像の比較 (255 フレーム目)



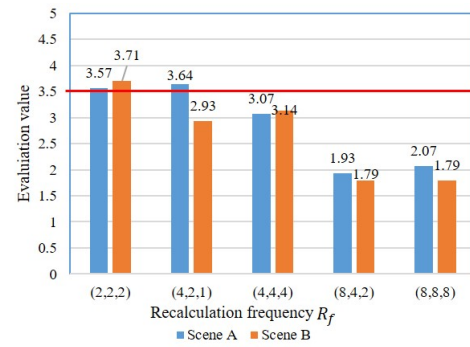
(a) 平行移動のみ



(b) 回転移動のみ



(c) 前後移動のみ



(d) 混合

図 8.17: 各視点移動における主観評価実験の結果

表 8.5: さまざまな再計算頻度 R_f での CGH 動画の生成時間

移動の種類	再計算頻度 R_f	平均計算時間 [ms] (従来手法の計算時間との比率)	
		シーン A	シーン B
平行移動	1(従来手法)	107.21(100%)	219.60(100%)
	2	61.11(57%)	117.97(54%)
	4	35.80(33%)	68.72(31%)
	8	23.13(22%)	44.37(20%)
回転移動	1(従来手法)	85.14(100%)	173.04(100%)
	2	44.81(53%)	89.17(52%)
	4	26.35(31%)	46.97(27%)
	8	14.61(17%)	26.65(15%)
前後移動	(1,1,1)(従来手法)	129.50(100%)	297.18(100%)
	(2,2,2)	66.88(52%)	150.65(51%)
	(4,2,1)	63.59(49%)	163.78(55%)
	(4,4,4)	36.03(28%)	77.27(26%)
	(8,4,2)	34.96(27%)	83.94(28%)
	(8,8,8)	20.91(16%)	43.02(14%)
混合	(1,1,1)(従来手法)	138.91(100%)	280.77(100%)
	(2,2,2)	72.55(52%)	144.18(51%)
	(4,2,1)	68.05(49%)	132.38(47%)
	(4,4,4)	40.46(29%)	79.57(28%)
	(8,4,2)	38.65(28%)	71.50(25%)
	(8,8,8)	25.28(18%)	43.06(15%)

8.3.4 実験 3 : 提案手法で作成した再生像の主観評価実験

提案手法での画質劣化を確認するために、7.4.3 項の実験と同じく DCR 法を用いた主観評価実験を行った。DCR 法のタイムパターンと評価スコアは、7.4.3 項の図 7.23 と表 7.6 に示されるものと同一である。評価の基準となる動画は再計算頻度が $R_f = 1$ で生成された動画であり、その他の提案手法で作成された動画と比較し、品質の評価を行った。実験では、視力 1.0 以上を持ち、実験に対する予備知識を持たない 18 名の被験者が、暗室にてセミポータブル型の再生装置 [36] を通して CGH 動画の再生像を視聴した。評価にあたり、外れ値による影響を軽減するために、各被験者の出したスコアを平均化し、最高点となった被験者と最低点となった被験者に関しては結果から除外し、計 16 名の平均点で各 CGH 動画の評価を行った。

図 8.17 は被験者実験の結果を示している。DCR 法では、平均スコアが 3.5 以

上の場合，ほとんどの被験者が視聴に対して不快感や違和感を抱いていないとされている．その基準を基に結果を確認すると，平行移動と回転のシーケンスでは， $R_f = 2$ と $R_f = 4$ の条件で 3.5 ポイント以上の評価結果が得られ， R_f が大きくなるほど劣化が目立つという結果が示されている．表 8.5 によると， $R_f = 4$ の条件では提案手法で作成した動画が，従来手法で作成した動画の 3 分の 1 以下の処理時間で出力されており，劣化を抑えながら約 3 倍の高速化を図れていることがわかる．加えて，前後移動のシーケンスでは $R_f = (2, 2, 2)$ と $R_f = (4, 2, 1)$ のシーケンスにおいて，3.5 ポイント以上のスコアを獲得している．この条件下では，提案手法は従来手法の 2 倍の高速化を実現することに成功している．また， $R_f = (4, 2, 1)$ と $R_f = (8, 4, 2)$ の主観評価値が， $R_f = (4, 4, 4)$ と $R_f = (8, 8, 8)$ よりも高くなる傾向にあり，外側の領域を頻度高く再計算することは，CGH 動画の品質を保つことが示されている．最後に，全ての動きを織り交ぜた混合のシーケンスでは，シーン A の $R_f = (2, 2, 2)$ と $R_f = (4, 2, 1)$ ，シーン B の $R_f = (2, 2, 2)$ にて 3.5 ポイント以上の評価値を獲得している．この条件においても，提案手法は従来手法の約 2 倍程度の高速化が実現できている．よって，提案手法はどのシーン，移動法においても約 2 倍程度の高速化効果を示すことができ，提案手法の有効性を確認することができた．

一方，全ての動画において R_f が高くなることによって，評価結果が悪化する傾向にあることが示された．これは，8.2.4 項にて議論されたように， R_f が大きくなるほど誤差が蓄積し，画質の劣化を招くためであると考えられる．実際のホログラフィック AR に提案手法を適用する場合，フレーム間の視点の移動はわずかであることが多いと考えられることから，提案手法を十分に組み込める余地があると考えられるが，高速な視点の移動などが発生する場合には，品質が劣化してしまうことが考えられる．このことから，提案手法の誤差を抑制し，なるべく大きな距離の視点移動であっても低誤差で計算できるような手法の改善が成されれば，さらに提案手法の有効性が高まることから，今後の検討としたい．

8.3.5 実験 4：異なる視点移動速度における提案手法の計算時間の測定

提案手法において，再計算頻度 R_f の他に，視点移動の速度も重要なファクターである．したがって，視点移動の速度を変えた際の処理速度への影響を確認するために，視点の移動速度を変更した CGH 動画を作成した．この実験では，シーン A の平行移動、回転、前後のシーケンスに対し，再計算頻度を $R_f = 2$ または $R_f = (2, 2, 2)$ に保ち，視点移動の速度のみを変更した．視点の開始位置と終了位置は表 8.3 および図 8.10 に示されているものと同一の設定とし，フレーム数を 150 フレーム ($=300/2$)，75 フレーム ($=300/4$)，及び 38 ($=300/8$) フレームとすることで，表 8.3 で説明されているシーケンスよりも約 2，4 または 8 倍高速に視点を移動させた CGH 動画を作成した．まず，提案手法の移動速度と計算時間の関係を明

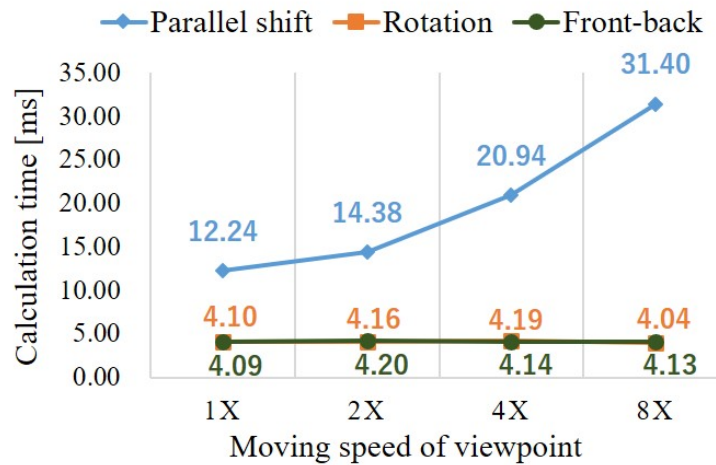


図 8.18: 視点の移動速度と計算時間の関係性を示したグラフ

らかにするために、表 8.3 のように、提案手法で計算されたフレームの平均計算時間を確認し、図 8.18 に計算時間と移動速度の関係をグラフとして示した。平行移動のシーケンスでは、連続するフレーム間にてホログラム面が重なり、物体光波の再利用が可能な領域が小さくなるため、視点の移動速度が増加するにつれて計算時間が増加したと考えられる。しかしながら移動速度が 8 倍になった場合でも処理時間は 31.4ms であり、表 8.4 に示されている従来手法の計算時間 (109.98ms) よりもはるかに短かった。それに対して、回転移動と前後移動の計算時間は、視点の移動速度を変化させてもほぼ一定であった。これは、式 (8.9) から式 (8.13) が視点の動きの距離に依存せずに計算が成されることから明らかである。さらに再生像の品質を確認するために、再生像の画像の一部を図 8.19 に示す。再生像は、図 8.19 に示すように、速度を速くするほど劣化しやすくなるものの、視聴者がすばやく移動する場合、視聴者の目線としては画質の劣化を知覚しづらくなると考えられることから、提案手法の限界については更なる研究を行う必要があると考えられる。

8.4 結論

本章では、第 7 章で紹介した視点の平行移動と回転移動に対する高速計算法を拡張し、任意の視点移動に適用可能な視点移動の CGH 高速計算法を提案した。結果として、提案法を用いることで質を保ちながら約 2 倍の生成高速化が図れることを実験を通して確認し、本提案手法の有効性を示すことができた。本提案手法を実現する上でのエッセンスとして、従来の FTOS の計算法の代わりに収束球面参照光波を用いた計算法を導入し、ホログラム面上の物体光波分布の拡大及び縮小を行うことで、第 7 章の手法では実現成し得なかった前後移動の高速化を実



(a) 従来手法 (速度 1 倍/150 フレーム目)



(b) 提案手法 (速度 1 倍/150 フレーム目)



(c) 従来手法 (速度 8 倍/20 フレーム目)



(d) 提案手法 (速度 8 倍/20 フレーム目)

図 8.19: 異なる平行移動スピードにおける再生像

現した．一般に，ホログラフィを視聴可能な AR デバイス等を用いて立体像を視聴する場合を考えると，視点の移動の種類に制約があった第 7 章の手法は導入することが難しく，それが任意の視点移動に拡張されたことは実用を考える上で非常に有効な改善であると言える．加えて更なる工夫として，ホログラム面の外側に誤差が生じやすいという課題を鑑み，外側ほど頻度高くホログラム面上の物体光波を再計算する機構を導入することで，視聴においても違和感の少ない計算法を設計した．将来的に，本手法はホログラフィック AR 向けの CGH の高速計算法として利用されることが期待される．

第9章 考察

本章では、第5章～第8章まで提案してきた4つの提案手法に関して、俯瞰的な視点から考察を述べる。まず、4つの提案手法に基づく高速化の関係及びその成果を図9.1にまとめた。まず、論文[10]に示されている計算時間に対して、プログラム最適化を行うことで計算時間を1枚あたり約1.6秒まで最適化した。この結果は第4章にて従来手法の計算結果として記載を行っており、提案手法として提案されたものではない。しかしながら、高速化を行う上では、論文となるようなアルゴリズムを考案することも重要であるものの、計算機リソースを余すことなく使用することができるように最適化を図ることも重要である。本論文に用いたプログラムに関しても最適化を行ったものを第4章にて紹介しているが、計算機と、グラフィックボードの進化などに基づき、アーキテクチャを理解した更なる最適化を行っていく必要がある。例えば、近年NVIDIA社よりRTXプラットフォーム[63]を持つGPUが発売された。これはリアルタイムレイトレーシングを実現するためのレイトレーシングの高速化に特化した“RTコア”を持つGPUであり、要素ホログラムの中央から大量のレイトレーシングを行う光線追跡法を用いたCGHの計算法に関しても、このRTコアの能力を活かすことで高速な計算を実現できるものと考えられるが、現在、このRTコアを利用したレイトレーシングの計算を、プログラムの中で実施するには至っていない。このように、グラフィックボードのアーキテクチャの進化・多機能化に合わせて、計算機リソースを有効に使うことで更なる高速化を図ることが期待されると考えられる。また、図9.1に示した通り、第5章で紹介した回折角度に基づく物体点光源除去法により、計算時間を特定のシーンで約1/3以下にすることに成功した。第5章の実験1では、背面に巨大な白色板のあるシーンについて計算を行ったが、このシーンにて大幅な生成時間の短縮を実現している。動画生成における高速化を図るために、動画の特性に基づいて計算量を削減する手法(提案手法2～4)を導入する場合でも、まずはそのベースとなるCGH1枚の計算時間が少なくなれば、その計算時間をスタート地点として計算量削減に取り組むことができるため、1枚単位の高速化を図っていくことも重要である。こういったアプローチの手法は、必ずしも全て組み合わせられるわけではないが、他の高速化手法との組み合わせも行うことが可能なケースも多い。例えば、視聴者が注視している領域のみを細かくレンダリングするFoveated Renderingの研究なども近年登場してきており[64,65]、このような手法を組み合わせることで、1フレームの処理時間をさらに削減できると考えられる。

また、第6章で紹介した移動物体分離法と、第7章から第8章に掛けて紹介した

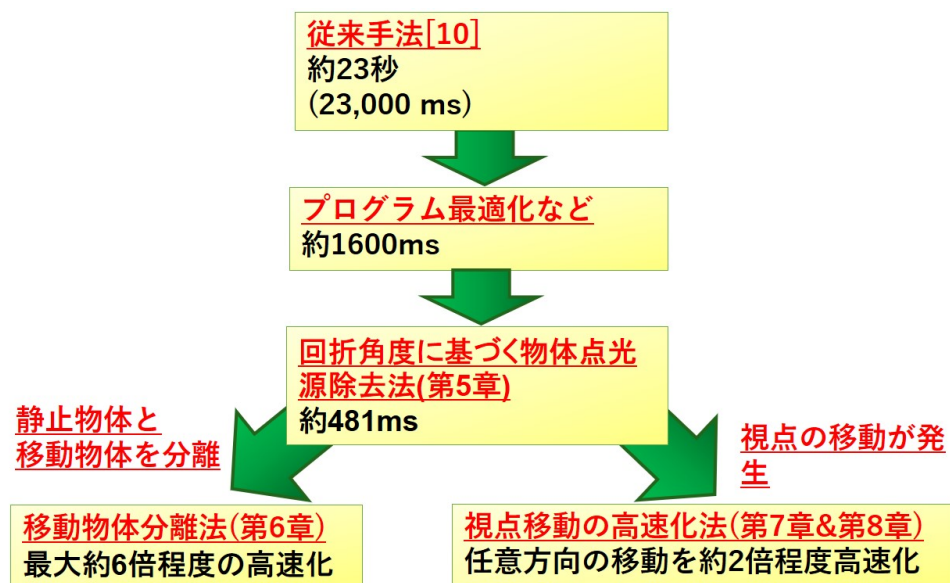


図 9.1: 各提案手法の関係性及びその成果

視点移動の高速化法は、CGH 動画を作るという前提に立ち、CGH 動画の生成を高速化する手法であるが、これらの手法は必ずしも全てのシーンに対する高速化が実現できるわけではない。しかしながら、第6章で述べた移動物体分離法は、自由視点映像技術 [45–47] などを実現される移動物体と静止物体が分かれた 3D シーンのパログラムを高速に計算することができ、第7章～第8章で述べた視点移動の高速化法はホログラフィック AR [56,57] などの用途における視点移動発生時の CGH 動画の計算を高速化できる。近年では自由視点映像技術で再現された 3D シーンを、HMD などでもスタジオの上にいるような視点で見えるような技術も登場していることから、このようなユースケースとの親和性が非常に高いと言える。

加えて、例えば第6章で述べた移動物体分離法の例では、比較的小さい板を移動物体として表示した場合に、1 フレームを約 80ms 程度の時間で計算ができていた。そのため、極小の移動物体が存在するようなシーンを計算する場合であれば、既に光波伝搬の計算部分に限りはリアルタイム計算 (30fps と仮定して、約 33ms) を行うことも可能な域に達している。よって、両目の前に比較的小さな液晶を配置することで実現されるホログラフィック HMD [58] などの用途においては、リアルタイム計算が行える時代が近づきつつあると言える。

第10章 結論

10.1 まとめ

本論文では、CGH 動画の生成する際の生成処理時間を高速化する研究について述べた。第5章から第8章までで4つの提案手法を考案した。CGH 動画を高速に生成するアプローチを考えた場合に、(1) 動画を構成する1フレームの生成時間そのものを高速化する方法、(2) 動画の特性を基に CGH 動画の生成時間を高速化する方法の2通りのアプローチが存在するが、第5章の手法は(1)のアプローチにあたり、第6章から第8章までの手法は(2)のアプローチである。ここではそれぞれの手法について、内容を振り返りつつ、今後の展開について述べる。

まず、第5章では回折角度に基づく点光源除去法(提案手法1)について考案した。この手法により、計算に用いる点光源数が減少し、効率的な計算が可能となった。次に第6章では、静止物体と移動物体を分けて計算を行うことで計算高速化を図る移動物体分離法を提案した。提案手法2の移動物体分離法では、本論文の実験の中で約6倍の高速化を図ることができたコンテンツも存在し、このときの光波伝搬の計算時間は約80msであった。

最後に第7章と第8章にて視聴者の視点移動時の CGH 高速計算法を述べた。第7章の時点では視点の前後移動に対応できないという問題があったところを、収束球面参照光波を用いた計算法の導入により、第8章にて解決し、任意の視点移動に対応可能な高速計算の手法を確立した。基本的なアルゴリズムの構築はできたものの、本手法では近似誤差が発生することから、数フレームに一度は従来手法で全面を再計算しなければならないという課題が存在している。この頻度を減らすこと、すなわち高速計算中でも品質をいかに保ち続けるかを考えることが今後の課題である。このような近似誤差の削減にて、さらに有効性を高めることで、ホログラフィック HMD システムの中でのベースとなる計算法として、本計算法が採用されることが期待される。

10.2 今後の展望

本研究では CGH 動画生成の高速化に取り組み、その結果、現在の再生環境 [36] ではリアルタイムに近い時間で CGH の生成を行うことが可能となった。一方、今後の CGH という分野の研究の展望として、再生デバイスの進化に伴い、今よりも

多くの情報量を処理しなければならない時代が到来する。例えば、ホログラフィをHMDデバイスでVRやARに応用する研究はホットになりつつあるということは本研究の中でも述べているが、それにあたり再生デバイスのピクセルピッチは、現状の再生環境のものよりも細かいものが求められる。これは、現在市販されるVRやARデバイスの視野角が約100度程度のもので多いのに対し、ホログラフィが同じ視野角を保つためには回折原理に基づいてさらに細かいピクセルピッチのデバイスが必要不可欠であるからである。ピクセルピッチが精細になり、視野角が広がるということは、光波伝搬先であるホログラム面のピクセル数が膨大に増加することを意味するだけでなく、伝搬元である物体点光源も視野の拡大に伴い増加するため、計算に必要な点光源自体も増加し、現在の再生環境の数百倍の計算スペックが求められる可能性がある。その先に、ホログラフィを用いたテレビなどの実用を考えれば、ホログラム面のサイズ自体もさらに拡大していく可能性がある。

ここまで述べたように、CGHの実用化を目指す上では、そのCGHを表示する再生デバイスの進化に伴って、今後も計算時間が爆発的に増加していく可能性がある。そしてこれは、現在のCPUやGPUなどの計算機スペックの進化を凌ぐ速度で進んでいく可能性があると考えられる。そのため、今後も引き続き計算高速化の研究に取り組む必要性は高い。その上で、第5章で述べたような1フレーム単体の生成を高速化する方法、第6章から第8章で述べたような動画の特性に基づいて高速化する方法の双方のアプローチを組み合わせるべきである。特に第6章から第8章で述べたような動画の特性に基づいて高速化する方法は、アプローチを行っている研究者が少ないが、実用が近づいたタイミングで研究が加速することが考えられ、そのタイミングで第6章から第8章で述べた手法のエッセンスがベースとして利用され、高速な計算処理を行うシステムに組み込まれることが期待される。

参考文献

- [1] J. Geng, "Three-dimensional display technologies," *Advances in Optics and Photonics* **5**, 456–525 (2013).
- [2] 坂根巖夫 他, "立体視テクノロジー-次世代立体表示技術の最前線," NTS (2008).
- [3] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* **161**, 777–778 (1948).
- [4] J. P. Waters, "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods," *Appl. Phys. Lett.* **9**, 40-407 (1966).
- [5] R. Häussler, S. Reichelt, N. Leister, E. Zschau, R. Missbach, and A. Schwerdtner, "Large real-time holographic displays: from prototypes to a consumer product," *Proc.SPIE* **7237**, 72370S (2009)
- [6] T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi, and T. Kurita, "Viewing-zone-angle-expanded color electronic holography system using ultrahigh-definition liquid crystal displays with undesirable light elimination," *Journal of Display Technology* **7**, 382-390 (2011).
- [7] J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park, and B. Lee, "Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators," *Opt. Express* **16**, 12372-12386 (2008).
- [8] T. Kozacki, M. Kujawinska, G. Finke, B. Hennelly, and N. Pandey, "Extended viewing angle holographic display system with tilted SLMs in a circular configuration," *Appl. Opt.* **51**, 1771-1780 (2012).
- [9] A. Kato and Y. Sakamoto, "An electro holography using reflective LCD for enlarging visual field and viewing zone with the Fourier transform optical system in CGH," *Proc.SPIE* **7619**, 761910 (2010).
- [10] T. Ichikawa, T. Yoneyama, and Y. Sakamoto, "CGH calculation with the ray tracing method for the Fourier transform optical system," *Opt. Express* **21**, 32019-32031 (2013).

- [11] D.J.DeBitetto, "Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings," *Appl. Opt.* **8**, 1740-1741 (1969).
- [12] M.C.King, A.M.Noll, and D.H.Berry, "A new approach to computer generated holography," *Appl.Opt.* **9**, 9471-9475(1970).
- [13] K. Matsushima and S. Nakahara, "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method," *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [14] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit," *Opt. Express* **14**, 603-608 (2006).
- [15] T. Ichikawa and Y. Sakamoto, "Full parallax computer generated hologram using GPU-accelerated ray tracing method," *Proc.SPIE* **8281**, 82810E (2012).
- [16] H. Yoshikawa, "Fast Computation of Fresnel Holograms Employing Difference," *Optical Review* **8**, No.5, pp.331-335 (2001).
- [17] Y. Ogihara and Y. Sakamoto, "Fast calculation of a CGH for a patch model using a point-based method," *Appl. Opt.* **54**, A76-A83 (2015).
- [18] T. Sugawara, Y. Ogihara, and Y. Sakamoto, "Fast point-based method of a computer-generated hologram for a triangle-patch model by using a graphics processing unit," *Applied Optics*, Vol. **55**, Issue 3, pp.A160-A166 (2016).
- [19] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, D. Arai, and T. Ito, "Simple and fast cosine approximation method for computer-generated hologram calculation," *Optics Express* Vol. **23**, Issue 25, pp.32465-32470 (2015).
- [20] M. Lucente, "Interactive computation of holograms using a look-up table," *J. Electron. Imaging* **2**, 28-34 (1993).
- [21] S. Kim, J. Kim, and E. Kim, "Effective memory reduction of the novel look-up table with one-dimensional sub-principle fringe patterns in computer-generated holograms," *Opt. Express* **20**, 12021-12034 (2012).
- [22] S. Kim and E. Kim, "Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method," *Appl. Opt.* **47**, D55-D62, (2008).
- [23] Y. Pan, X. Xu, S. Solanki, X. Liang, R. B. A. Tanjung, C. Tan, and T.-C. Chong, "Fast CGH computation using S-LUT on GPU," *Opt. Express* **17**, 18543-18555 (2009).

- [24] S. Jiao, Z. Zhuang, and W. Zou, "Fast computer generated hologram calculation with a mini look-up table incorporated with radial symmetric interpolation," *Opt. Express* **25**, 112–123 (2017).
- [25] G.W.Stroke, "Lensless fourier transform method for optical holography," *Appl. Phys. Lett.* **6**, 201-203 (1965).
- [26] Y.Sato and Y.Sakamoto, "Calculation method for reconstruction at arbitrary depth in CGH with Fourier transform optical system," *Proc.SPIE* **8281**, 82819W (2012).
- [27] 坂本雄児, "空間周波数フィルタリング法による計算機合成ホログラムの共役像除去," *映像情報メディア学会誌*, Vol.**59**, No.4, pp.588-591 (2005).
- [28] 大島勇樹, 佐伯優一, 中原住雄, 松島恭治, "画家のアルゴリズムによる隠面消去を用いた全方向視差計算機合成ホログラム," *電子情報通信学会総合大会*, D-11-75 (2007).
- [29] 近藤暁靖, 松島恭治, "全方向視差 CGH における Babinet の原理による隠面消去," *3次元画像コンファレンス 2002 講演論文集*, pp.113-116 (2002).
- [30] Y.Sakamoto, "An algorithm of hidden surface removal using shadow-propagation method for computer generated hologram," *IEICE Trans.Information Syst.*2002, **J85-D-II**, 1832–1839 (2002).
- [31] 市川翼, 坂本雄児, "ホログラム面からの逆追跡による CGH 計算法," *FIT2011*, I-004, pp.285-286 (2011).
- [32] T.Ichikawa, K.Yamaguchi, and Y.Sakamoto, "Realistic expression for full-parallax computer-generated holograms with the ray-tracing method," *Applied Optics.* **52**, pp.A201-209 (2013).
- [33] A.Appel,"Some techniques for machine rendering of solids," *AFIPS Joint Computer Conference* 37–45 (1968).
- [34] T.Whitted, "An improved illumination model for shaded display," *Comm.ACM.*23, 343-349 (1980).
- [35] B. T. Phong, "Illumination for Computer Generated Pictures," *Communications of the ACM*, vol.**18**, No. 6, pp.311-317 (2011).
- [36] T.Yoneyama, T.Ichikawa, and Y.Sakamoto, "Semi-portable full-color electro-holographic display with small size," *Proc.SPIE* **9006**, 9006-17(2014).

- [37] T. Yoneyama, E. Murakami, Y. Oguro, H. Kubo, K. Yamaguchi, and Y. Sakamoto, "Holographic head-mounted display with correct accommodation and vergence stimuli," *Opt. Eng.* **57(6)**, 061619 (2018).
- [38] T.Yoneyama, C.Yang, Y.Sakamoto, and F.Okuyama, "Eyepiece-type full-color electro-holographic display for binocular vision," *Proc. SPIE* **8644**, 8644-38 (2013).
- [39] M. Oikawa, T. Shimobaba, T. Yoda, H. Nakayama, A. Shiraki, N. Masuda, and T. Ito, "Time-division color electroholography using one-chip RGB LED and synchronizing controller," *Opt. Express* **19**, 12008-12013 (2011).
- [40] 荻原佑基, 市川翼, 坂本雄児, "GPUにおけるCGH高速計算アルゴリズムの比較と検討," 三次元画像コンファレンス 2013, **P-7** (2013).
- [41] S.-C. Kim, J.-H. Yoon, and E.-S. Kim, "Fast generation of three-dimensional video holograms by combined use of data compression and lookup table techniques," *Applied Optics* Vol.**47**, No.32, pp.5986-5995 (2008).
- [42] S.-C. Kim, J.-H. Yoon, and E.-S. Kim, "Fast generation of video holograms of three-dimensional moving objects using a motion compensation-based novel look-up table," *Optics Express* Vol.**21**, pp.11568-11584 (2013).
- [43] H. Niwase, H. Araki, N. Takada, H. Nakayama, A. Sugiyama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Time-Division Electroholography of the Three-Dimensional Object," *Proc. of Three Dimensional Systems and Applications 2013*, **P4-2**, 1–3 (2013).
- [44] H. Niwase, N. Takada, H. Araki, H. Nakayama, A. Sugiyama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography with a single graphics processing unit utilizing movie features," *Optics Express* Vol.**22**, pp.28052-28057 (2014).
- [45] J. Kilner, J. Starck, A. Hilton and O. Grau, "Dual-Mode De-formable Models for Free-Viewpoint Video of Sports Events," 6th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2007), pp. 177-184 (2007).
- [46] U. Yusuke, K. Takahashi and T. Fujii, "Free viewpoint video generation system using visual hull," 2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), pp. 1-4 (2018).
- [47] H. Sankoh, S. Naito, K. Nonaka, H. Sabirin, and J. Chen. "Robust Billboard-based, Free-viewpoint Video Synthesis Algorithm to Overcome Occlusions

- under Challenging Outdoor Sport Scenes,” In Proceedings of the 26th ACM international conference on Multimedia, pp. 1724-1732 (2018).
- [48] 坂本雄児, “影伝搬法を用いた計算機合成ホログラムの隠面消去法,” 電気情報通信学会論文誌, Vol.**J85-D-2**, No.12, pp.1832-1839 (2002).
 - [49] 渡邊良亮, 市川翼, 坂本雄児, “光線追跡法を用いた計算機合成ホログラムにおける動画作成時の高速隠面消去法に関する研究,” 3次元画像コンファレンス 2014, **2-2** (2014).
 - [50] R. Watanabe and Y. Sakamoto, “Fast Generation Method for Computer-Generated Hologram Animation with Hidden Surface Removal Using Ray Tracing Method,” JSAP-OSA Joint Symposia (The 75th JSAP Autumn Meeting 2014), **20a-C4-7** (2014).
 - [51] R. Watanabe, T. Sugawara, and Y. Sakamoto, “Fast calculation method of computer generated hologram using ray tracing method for Fourier transform optical system,” 10th International Symposium on Display Holography, **P-16** (2015).
 - [52] R. Van Krevelen and R. Poelman, “A survey of augmented reality technologies, applications and limitations,” *Int. J. Virtual Real.* **9**, 1 (2010).
 - [53] J. Carmigniani, B. Furht, M. Anisetti, P. Ceravolo, E. Damiani, and M. Ivkovic, “Augmented reality technologies, systems and applications,” *Multimed. Tools Appl.* **51**, 341–377 (2011).
 - [54] A. Sanna and F. Manuri, “A survey on applications of augmented reality,” *Adv. Comput. Sci.* **5**, 18–27 (2016).
 - [55] M. Lambooi, W. IJsselsteijn, M. Fortuin, and I. Heynderickx, “Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: A review,” *J. Imaging Sci. Technol.* **53**, 030201 (2009).
 - [56] H. Gao, F. Xu, J. Liu, Z. Dai, W. Zhou, S. Li, Y. Yu, and H. Zheng, “Holographic three-dimensional virtual reality and augmented reality display based on 4k-spatial light modulators,” *Appl. Sci.* **9(6)**, 1182 (2019).
 - [57] Q. Gao, J. Liu, X. Duan, T. Zhao, X. Li, and P. Liu, “Compact seethrough 3d head-mounted display based on wavefront modulation with holographic grating filter,” *Opt. Express* **25**, 8412–8424 (2017).
 - [58] Y. sakamoto, “Holographic HMD with Wide Visual Field,” 21th International display Workshops, **3D3-4** (2014).

- [59] ITU-T, "Subjective video quality assessment methods for multimedia applications," Recommendation P.910, International Telecommunication Union (2008).
- [60] 中村孝雅, 坂本雄児, "フーリエ変換光学系における異なるホログラムデータ計算法の比較・検証," 3次元画像コンファレンス 2018, **1-1** (2018).
- [61] Takamasa Nakamura, Yuji Sakamoto, "Fast Calculation Algorithm for Computer-Generated Hologram Using Point-to-Point Difference Method with Lens Enlarge Optical System," The 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2018), **19P30** (2018).
- [62] T. M. Lehmann, C. Gonner, and K. Spitzer, "Survey: interpolation methods in medical image processing," IEEE Transactions on Med. Imaging **18**, 1049–1075 (1999).
- [63] NVIDIA, "GeForce RTX プラットフォームとは", <https://www.nvidia.com/ja-jp/geforce/20-series/rtx/>, 訪問日 2019/12/16.
- [64] Y. Ju and J. Park, "Fast Generation of Mesh Based CGH in Head-Mounted Displays using Foveated Rendering Technique," in Imaging and Applied Optics 2018, OSA Technical Digest, **DTu5F.6** (2018).
- [65] Lingjie Wei and Yuji Sakamoto, "Fast calculation method with foveated rendering for computer-generated holograms using an angle-changeable ray-tracing method," Appl. Opt. **58**, A258-A266 (2019).

謝辞

本論文をまとめるにあたり，本学情報科学研究科メディアネットワーク専攻情報メディア学講座メディア創生学研究室坂本雄児教授には，本研究の機会を与えてくださり，学士から長年ご指導していただきました．また，社会人博士課程への入学と在学中の研究に際しても，多大なサポートをいただき，円滑に研究を進めることができました．ここに深く感謝の意を表します．並びに，貴重なご教示を賜りました本学情報科学研究科メディアネットワーク専攻情報メディア学講座言語メディア学研究室荒木健治教授，メディアダイナミクス研究室長谷山美紀教授，メディア創生学研究室姜錫助教に深く感謝致します．

最後に，本研究を進めるにあたり，多くの助言やご協力を頂いた本研究室の先輩，同輩，後輩の皆さんに深く感謝いたします．特に，社会人博士課程での研究を進めるにあたり，遠隔地から再生実験ができない際に代行していただくなど，度々実験などにご協力いただきました水戸部将也君には，この場を借りて厚く御礼申し上げます．

研究業績

論文

- Ryosuke Watanabe, Kazuhiro Yamaguchi, Yuji Sakamoto, "Fast calculation method of CGH animation for viewpoint parallel shift and rotation using Fourier transform optical system, " *Applied Optics* **55**, Issue. 3, pp.A167–177, 2016.
- Ryosuke Watanabe, Takamasa Nakamura, Masaya Mitobe, Yuji Sakamoto, Sei Naito. "Fast calculation method for viewpoint movements in computer-generated holograms using a Fourier transform optical system, " *Applied Optics* **58**, Issue. 34, pp.G71–G83, 2019.
- 山口一弘 (諏訪東京理科大), 渡邊良亮, 野崎亜弥, 坂本雄児, "伝送エラーが電子ホログラフィの再生像へ与える影響," *映像情報メディア学会誌*, Vol. **70**, No.5, pp. 105–113, 2016.
- Jun Chen, Keisuke Nonaka, Hiroshi Sankoh, Ryosuke Watanabe, Houari Sabirin, Sei Naito, "Efficient Parallel Connected Component Labeling With a Coarse-to-Fine Strategy," in *IEEE Access*, vol. **6**, pp. 55731–55740, 2018.

国際学会

- Ryosuke Watanabe, Yuji Sakamoto, "Fast Generation Method for Computer-Generated Hologram Animation with Hidden Surface Removal Using Ray Tracing Method," *JSAP-OSA Joint Symposia (The 75th JSAP Autumn Meeting 2014)*, **20a-C4-7**, 2014.
- Ryosuke Watanabe, Takuya Sugawara, Yuji Sakamoto, "Fast calculation method of computer generated hologram using ray tracing method for Fourier transform optical system," *10th International Symposium on Display Holography*, **P-16**, 2015.
- Ryosuke Watanabe, Yuji Sakamoto, "Fast Generation Method of CGH Animation for Viewpoint Movement using Fourier Transform Optical System," *International Workshop on Holography and related technologies 2015*, **We5-P10**, 2015.
- Eishin Murakami, Ryosuke Watanabe, Yuji Sakamoto, "Viewing Zone Expansion Method by Switching LEDs for Holographic HMD Based on Fourier

Transform Optical System,” International Workshop on Holography and related technologies 2015, **We5-P11**, 2015.

- Keisuke Nonaka, Ryosuke Watanabe, Jun Chen, Houari Sabirin, and Sei Naito, “Fast plane-based free-viewpoint synthesis for real-time live streaming,” in IEEE International Conference on Visual Communications and Image Processing. IEEE, 2018.
- Jun Chen, Ryosuke Watanabe, Keisuke Nonaka, Tomoaki Konno, Hiroshi Sankoh, Sei Naito, A Fast Free-Viewpoint Video Synthesis Algorithm for Sports Scenes,” 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), **WeAT17.2**, 2019.

国内学会

- 渡邊良亮, 市川翼, 坂本雄児, ”光線追跡法を用いた計算機合成ホログラムにおける動画作成時の高速隠面消去法に関する研究,” 3次元画像コンファレンス 2014, **2-2**, 2014.
- 渡邊良亮, 坂本雄児, ”複数フレーム先行レンダリングによる CGH 動画の高速生成手法,” 第 50 回応用物理学会北海道支部/第 11 回日本光学会北海道地区合同学術講演会, **C-16**, 2015.
- 渡邊良亮, 野中敬介, 三功浩嗣, 内藤整, “畳み込みニューラルネットワークを用いた複数カメラ環境における背番号認識手法,” 第 100 回オーディオビジュアル複合情報処理研究発表会, AVM(3)-12 2018.
- 渡邊良亮, 陳軍, 野中敬介, 今野智明, 内藤整 ”物体認識と背景差分を用いた高精度シルエット抽出手法,” 2019 映像情報メディア学会年次大会, **31C-2**, 2019.
- 渡邊良亮 ”[招待講演] リアルタイム自由視点映像技術のこれまでと今後の展望,” 2019 映像情報メディア学会冬季大会, 企画 **1-1**, 2019.
- 坂本雄児, 菅原拓弥, 渡邊良亮, ”幾何級数を用いた計算機合成ホログラムの高速計算法,” 平成 27 年度第 3 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会, **005**, 2015.
- 山口一弘（諏訪東京理科大）, 渡邊良亮, 野崎亜弥, 坂本雄児, ”再生シミュレーションを用いた計算機合成ホログラムにおける無線伝送エラーによる影響の一検討,” 平成 27 年度 電子情報通信学会 信越支部大会, **9C-3**, 2015.

- 韋靈傑, 渡邊良亮, 坂本雄児, ”光線追跡法を用いた計算機合成ホログラムにおける動画作成システムの研究,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, **B-7-40**, 2016.
- 水戸部将也, 渡邊良亮, 坂本雄児, ”光線追跡法を用いた計算機合成ホログラムにおけるスペックルノイズの主観評価,” 3次元画像コンファレンス 2016, **5-1**, 2016.
- 野中敬介, 渡邊良亮, 内藤整, “[招待講演] リアルタイム超臨場感体験に向けた xR 技術の最新動向と自由視点の取組み” 信学技報, vol. **118**, no. 133, IE 2018-29, pp. 13–16, 2018.
- Keisuke Nonaka, Ryosuke Watanabe, Jun Chen, Sei Naito, Real-time free viewpoint rendering via view-dependent polygon plane arrangement,” AVM(3), 2019.
- 鶴崎裕貴, 渡邊良亮, 野中敬介, 内藤整, “高解像スポーツ映像におけるリアルタイムボール追跡手法の一検討,” 第 106 回 AVM-(14), 2019.
- 野中敬介, 渡邊良亮, 塚本航平, “5G 網を利用した自由視点映像リアルタイム配信技術,” 企画 **4-4**, 2019.

出願済特許

- 渡邊良亮, 野中敬介, 特願 2017-228752, ”オブジェクト識別装置及び方法,” 2017 年 11 月.
- 渡邊良亮, 野中敬介, 特願 2018-030991, ”自由視点映像のリプレイ映像を再生するシステムおよび方法,” 2018 年 2 月.
- 渡邊良亮, 野中敬介, 特願 2018-061567, ”オブジェクト同定装置,” 2018 年 3 月.
- 渡邊良亮, 特願 2018-179892, ”オブジェクト識別装置、方法およびプログラム,” 2018 年 9 月.
- 渡邊良亮, 陳軍, 特願 2019-009705, ”オブジェクト抽出方法および装置,” 2019 年 1 月.
- 渡邊良亮, 坂本雄児, 特願 2019-127852, ”ホログラム生成装置およびホログラム生成方法,” 2019 年 7 月
- 渡邊良亮, 特願 2019-149690, ”オブジェクト抽出装置、方法およびプログラム,” 2019 年 8 月

- 渡邊良亮, 特願 2019-195844, ”3D モデル生成装置および方法,” 2019 年 10 月
- 鶴崎裕貴, 渡邊良亮, 特願 2019-203196, ”物体追跡装置及び方法,” 2019 年 11 月

受賞

- 野中敬介, 渡邊良亮, 内藤整
電子情報通信学会 画像工学研究会「IE 賞」, ”リアルタイム超臨場感体験に向けた xR 技術の最新動向と自由視点の取組み”
2018 年 7 月
- 野中敬介, 渡邊良亮, 塚本航平
一般社団法人映像情報メディア学会「技術振興賞 進歩開発賞（研究開発部門）」, ”5G 網を利用した自由視点映像リアルタイム配信技術”
2019 年 5 月

学会活動

- 2018 年 10 月～現在 映像情報メディア学会 スポーツ情報処理時限研究会 幹事