



Title	Beyond 5G 網におけるホログラフィ通信のための高効率圧縮伝送技術の研究開発
Author(s)	坂本, 雄児; 山ノ井, 高洋; 姜, 錫
Description	1. 本書の目的 本プロジェクトの概要 2. ホロメトリック・ビデオ・ストリーミング 3. 研究成果 3-1. 放送局側でのホログラフィデータの生成 3-1-a. 光線追跡法によるリアリスティック レンダリング 3-1-b. ホログラムデータの高速計算 3-2. 共通データフォーマットと ホログラムデータの生成 3-2-a. 共通データフォーマットとしての 物体光 3-2-b. 自由視点に対応したホログラム データの生成 3-2-c. 円筒形物体光の高速計算 3-3. ホログラフィック表示装置 3-3-a. ホロHMD 3-3-b. ホロHMP 3-3-c. 携帯型ホログラムデータ専用生成 装置 3-3-d. ベンチトップ型ホログラフィック 表示装置 広視野装置 広視域装置 3-3-e. スペックルノイズの削減 3-4. 視覚特性を用いたホログラムデータ の生成 3-4-a. 周辺視用再生像の感性評価 3-4-b. ホログラムデータ計算の高速化 3-4-c. 高い圧縮率の実現 3-5. 実世界データを用いた自由視点生成 4. まとめ 5. 社会的インパクト・実用化展開 6. プロジェクトの沿革 謝辞 研究業績 特許 展示 報道 受賞 論文・口頭発表 1. Purpose of This Report 2. Holometric Video Streaming 3. Research Results 3-1. Generation of Holographic Data at the Broadcasting Station 3-1-a. Realistic Rendering Based on Ray Tracing 3-1-b. High-Speed Computation of Hologram Data — Parallel Computation Using a GPU Cluster — 3-2. Common Data Format and Generation of Hologram Data 3-2-a. Object Light as a Common Data Format 3-2-b. Generation of Hologram Data for Free-Viewpoint 3-2-c. High-Speed Computation of Cylindrical Object Light 3-3. Holographic Display Devices 3-3-a. Holographic Head-Mounted Display (Holo-HMD) 3-3-b. Holographic Head-Mounted Projector (Holo-HMP) 3-3-c. Portable Dedicated Hologram Data Generation Device 3-3-d. Benchtop Holographic Display Device Wide-Field-of-View Display Device Wide Viewing-Zone Display Device 3-3-e. Reduction of Speckle Noise 3-4. Hologram Data Generation Using the Human Visual System 3-4-a. Subjective Evaluation of Reconstructed Images for Peripheral Vision 3-4-b. Acceleration of Hologram Data Computation 3-4-c. Achievement of a High Compression Ratio 3-5. Free-Viewpoint Experiment Using Real-World Data 4. Conclusion 5. Social Impact and Practical Applications 6. Project History Acknowledgments Research achievements Patent Exhibition Press coverage Award Academic papers and conference presentations 他
Citation	北海道大学グループ研究成果報告書, 2-19
Issue Date	2026-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/100106
Type	research report
File Information	北海道大学_ホログラム_研究成果報告書.pdf



北海道大学グループ研究成果報告書

Beyond 5G 網における ホログラフィ通信のための 高効率圧縮伝送技術の研究開発

著者：坂本 雄児・山ノ井 高洋・姜 錫（北海道大学）

助成：国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）



発行年月：2026 年 2 月

目 次

1. 本書の目的

本プロジェクトの概要

2. ホロメトリック・ビデオ・ ストリーミング

3. 研究成果

3-1. 放送局側でのホログラフィデータの 生成

3-1-a. 光線追跡法によるリアリスティック
レンダリング

3-1-b. ホログラムデータの高速計算

3-2. 共通データフォーマットと ホログラムデータの生成

3-2-a. 共通データフォーマットとしての
物体光

3-2-b. 自由視点に対応したホログラム
データの生成

3-2-c. 円筒形物体光の高速計算

3-3. ホログラフィック表示装置

3-3-a. ホロ HMD

3-3-b. ホロ HMP

3-3-c. 携帯型ホログラムデータ専用生成
装置

3-3-d. ベンチトップ型ホログラフィック
表示装置

広視野装置

広視域装置

3-3-e. スペックルノイズの削減

3-4. 視覚特性を用いたホログラムデータ の生成

3-4-a. 周辺視用再生像の感性評価

3-4-b. ホログラムデータ計算の高速化

3-4-c. 高い圧縮率の実現

3-5. 実世界データを用いた自由視点生成

4. まとめ

5. 社会的インパクト・実用化展開

6. プロジェクトの沿革

謝辞

研究業績

特許

展示

報道

受賞

論文・口頭発表

1. 本書の目的

本書は、北海道大学の研究グループが「国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の革新的情報通信技術研究開発委託研究」の助成のもと行われた研究の成果をまとめたものである。本書は基本的には光学及び計算科学分野の専門家向けに書かれているが、多くの読者に興味を持っていただけるように簡潔にまとめている。詳細に関しては、研究業績の文献を参考にされたい。

本書が今後のホログラフィの研究・開発に参考となることを切に願うものである。

本プロジェクトの概要

名称：国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の革新的情報通信技術研究開発委託研究

採択番号：06801（機能実現型プログラム 一般課題）

研究開発課題名：Beyond 5G 網におけるホログラフィ通信のための高効率圧縮伝送技術の研究開発

北海道大学研究者：坂本雄児・山ノ井高洋・姜錫（詳細は沿革参照）

研究目的：

電波の有効利用と、Beyond 5G を特徴づける視聴体験創出に寄与するため、ホログラフィを含むマルチモーダル（五感のうち視覚・聴覚・触覚の3モーダル）の情報を高効率に通信するための圧縮伝送技術の確立を目指している。具体的には、Beyond 5G 網を想定した 1.5 Gbps 以下のビットレートへの圧縮（従来比で 8 倍の高効率化に相当）を目指すと共に、世界初となる End-to-End のリアルタイム伝送の実証を計画した。

実施期間：令和 4 年度～令和 7 年度

研究機関：株式会社 KDDI 総合研究所，国立大学法人北海道大学，国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学，学校法人関西大学，公立大学法人公立諏訪東京理科大学，株式会社クレセント

2. ホロメトリック・ビデオ・ストリーミング

ホログラフィは理想の立体表示技術であり、理論的には撮影した物体と表示された像が区別できないほど、リアルに表示されることが知られている。このためホログラフィ技術を用いたTVシステム（ホロTV）は実用化が期待されてきた。1966年のIBMベル研究所の検討を始め、実現に向けて多くの要素技術やシステムの提案がなされてきた。しかし、ホログラムデータの膨大さや表示デバイスの解像度が要因となる技術的な問題があり、実用化は遠い将来と考えられてきた。近年のコンピュータ技術、通信技術、電子表示デバイスの進展により、周囲の技術環境は整ってきている。特に Beyond 5G で想定されるような大容量通信システムにより、ホログラムデータも通信が可能となってきた。

図1に示すように、ホロTVシステムは、個々のユーザが異なるさまざまなホログラフィック表示デバイス（ホログラフィック表示装置）を用いることが考えられる。例えば、ホログラフィック・ヘッドマウント・ディスプレイ（ホロHMD）やタブレット型、ベンチトップ型、モニタ型、プロジェクタ型、全部屋型（ホロルーム）などで、さまざまな種類の装置をサポートする必要がある。これらのデバイスは光学系および表示デバイスの仕様などがそれぞれ異なるため、装置構成に応じて異なるホログラムデータが必要となる。また、ユーザが高度な臨場感を感じるためには、ユーザの自由な動きに合わせた像の表示（自由視点）も重要である。特にユーザの動きの6自由度（6DoF）に対応することが望まれている。

しかし、各ユーザのホログラフィック表示装置やその際の視点位置は多様であり、これに合わせて送信局側でホログラムデータを送信するには、送信局側の計算負荷と通信負荷は膨大なものとなる。

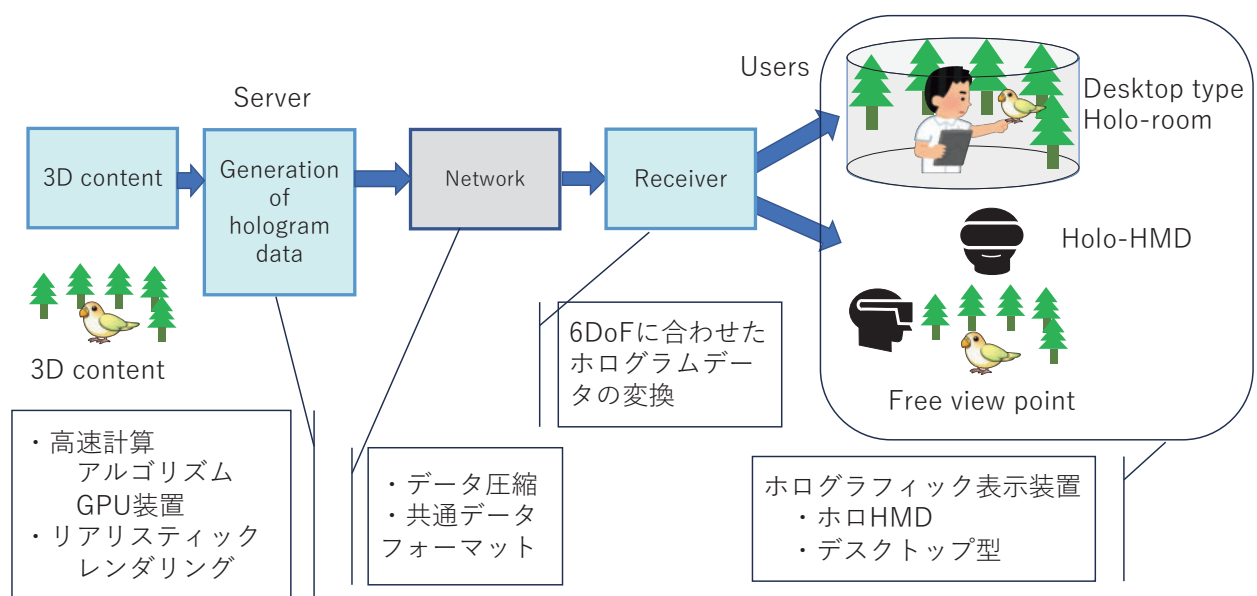


図1 ホロメトリックビデオストリーミングとその技術的な課題

ホロメトリック・ビデオ・ストリーミング

ホロ TV での計算負荷と通信容量の問題を解決するために、我々はホロ TV の構成としてホロメトリック・ビデオ・ストリーミング (HVS) を提案している[40, 41]. 図 1 にその構成を示すとおり, 3D コンテンツを放送局側のスタジオで対象となる物体を撮影し, その 3D データからホログラフィに適したデータを生成し, これを伝送 (または保管) し, 受信側でホログラフィック表示装置を用いて視聴する.

このシステムでは, 個々のユーザに合わせてホログラムデータを伝送するのではなく, ユーザの装置や視点位置に関わらない共通データを伝送し, 各ユーザにおいてホログラムデータに変換するところである.

これを実現するには, さまざまなクリアしなければならない技術的な問題がある.

- ・撮影された 3D データから放送局側で共通データの生成
 - リアリスティックなホログラフィ映像を作り出す方法
 - 高速な計算法
- ・膨大な容量となるホログラムデータの圧縮
- ・以下の特性を実現する共通データフォーマット
 - 各ユーザにおける独立な自由視点の実現
 - ホログラフィック表示装置ごとのホログラムデータの生成
- ・ホログラフィック表示装置の開発

本書では, これらを実現するための要素技術の研究を行った結果を報告する. ただし, 解決法や応用先が複雑なため図 2 にその概要を示す.

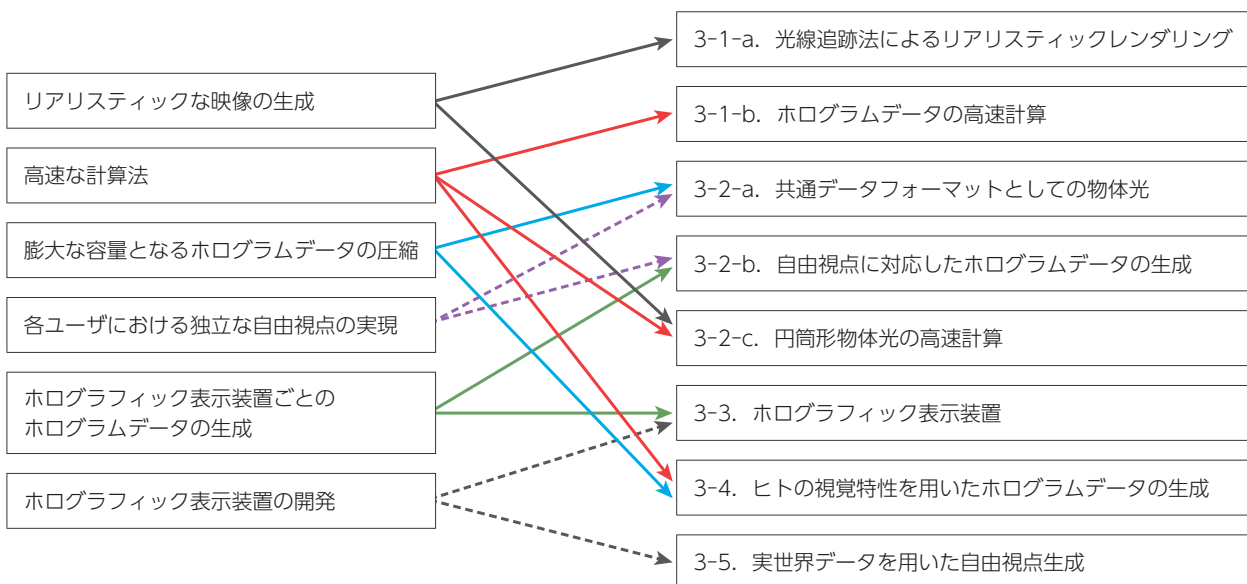


図 2 ホロメトリックビデオストリーミングを実現するための問題と本書の章立ての関係

3. 研究成果

3-1. 放送局側でのホログラフィデータの生成

3-1-a. 光線追跡法による リアリスティックレンダリング

ポリゴンデータや点群データとして得られた3D データからホログラムデータを生成する方法は計算機合成ホログラム (CGH) と呼ばれる。この際、隠面消去や物体表面の質感を表現するリアリスティックレンダリング技法は立体感の高い再生像を得るために極めて重要である。しかし、CGH においてはこれらを十分に考慮した計算アルゴリズムはまだ十分に確立していない。そこで本研究では光線追跡法を用いたリアリスティックレンダリング技法について研究を行った。

光線追跡法を用いた CGH の計算では、図 3-1 に示すように物体を構成する各点よりホログラム面上までの光線を考える。この光線が他の物体と交差する場合、その点からの光はホログラム面に到達しないものとみなし、隠面として処理する。つまり、この点は隠面の中にあるものとして、ホログラム面の点では見えないものとして扱われる。また、鏡がある場合は、鏡表面での反射も含めて、光線の経路が求められる必要がある。

従来研究では隠面消去、物体表面への反射特性の付与、平面鏡での反射が実現されてきた。一方、身の回りには金属製のドアノブ、車の外装、ガラス製の容器、カーブミラーなど、多くの曲面鏡が存在する。本プロジェクトにおいては、曲面鏡に映った周囲の情景を生成するアルゴリズムの研究を行った。

曲面の表現 3D データとして CG 分野で広く用いられているベジェ曲面を採用した。提案したアルゴリズムでは、ベジェクリッピングを用いてベジェ曲面上での反射点および光路を求め、これに基づいてホログラムデータを計算する手法を実現した[16]。これにより、曲面で反射した周囲の情景を含む再生像を生成することが可能となった。さらに、視点移動に応じた運動視差にも対応しており、自然な立体像が観察できることを確認した。

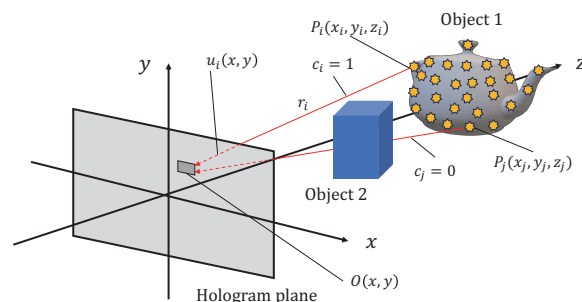


図 3-1 点光源法と光線追跡法による隠面消去

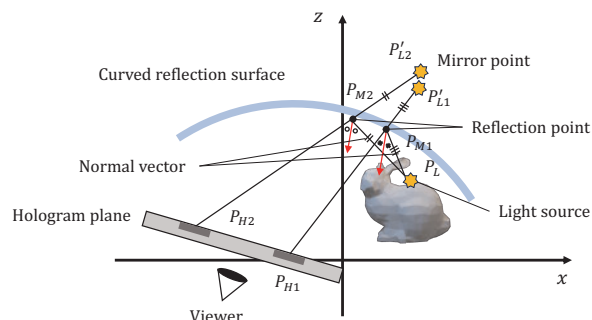


図 3-2 曲面での反射の計算原理

しかし、この手法では、2K (1920×1080 pixel) のホログラムデータで数時間の計算時間がかかるという問題があった。これを解決するため、我々はベジェ曲面を微小な平面に分割することで高速に計算する手法を提案し、30 倍以上の高速化を実現した (図 3-2) [13, 22, 25]。

さらに、光路のフェルマーの原理を用いた手法を導入することで、約 100 倍のさらなる高速化を達成し、秒オーダーでのホログラムデータ生成が可能となった[31, 42]。この結果、従来は計算時間の制約から困難であった複数反射面での反射表現も実現された。図 3-3 にウサギを観察者の前に置き、1 枚目の鏡は観察者の背後に、2 枚目の鏡はウサギの奥に配置した再生像を示す。写真ではウサギと二回反射した二つの像が観察できる。両像の奥行きに違いがあることが示されており、正しい反射表現が実現されていることが分かる。

3-1-b. ホログラムデータの高速計算

— GPU クラスタによる並列計算—

ホログラムデータの生成には膨大な計算量が必要であり、リアルタイム表示を実現するためには

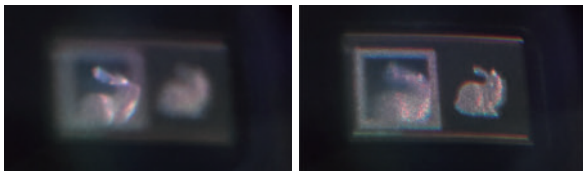


図 3-3 2 枚の鏡に反射した再生像。
左は実像，右は 2 回反射した像に焦点を合わせた。

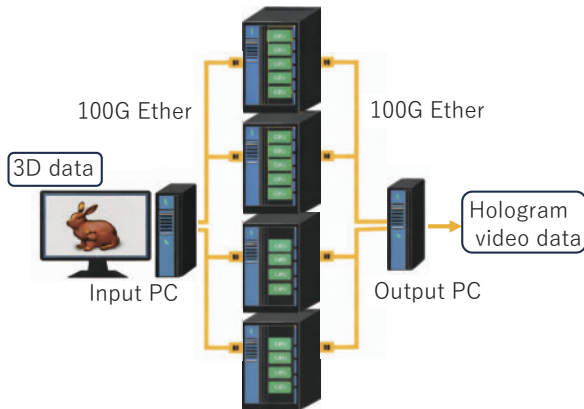


図 3-4 GPU サーバーの構成

高速な計算手法が不可欠である。この課題に対し、これまで多くの研究グループがアルゴリズムおよびハードウェアの両面から高速化に取り組んできた。その中で、高性能計算機を用いた計算機パワーによる解決法は有効なアプローチの一つである。特に、放送局側には大型計算機を設置するため、本研究ではこの構成を前提とした高速計算手法を研究した。

ホログラムデータの計算は並列計算に向けたアルゴリズムであり、多数の計算コアを用いることによって効率的な高速化が実現できる。そこで、本プロジェクトでは、多数の Graphics Processing Unit (GPU) を用いたクラスタ計算システムを構築した[6, 8, 30, 36]。

構築した計算システムは 4 台のサーバーから構成され、合計 18 台の GPU (NVIDIA 社 RTX-4090) から構成される (図 3-4)。サーバー間は 100 Gbps のイーサネット接続される。各 GPU は数千個の計算コアを有することから、全体として、約 9 万個の計算コアで、2PFLOPS の理論計算能力を持つ。

計算環境において高効率な処理を実現するた



図 3-5 再生動画 (うさぎとシーソー) 時間は左から右へ

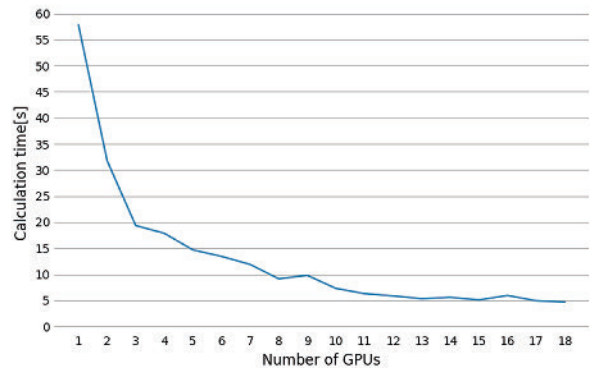


図 3-6 GPU 数 vs 計算時間 (120 フレームの生成時間)

め、以下の三つの手法を組み合わせた高速計算アルゴリズムを開発した[10, 11]。

- ・CGH 計算を「前処理 (点光源配置)」「本処理 (物体光計算)」「後処理 (参照光・干渉縞生成)」に分割し、パイプライン化を行った。
- ・ホログラム面を空間的に分割し GPU 計算コアによる並列計算アルゴリズムを導入した。
- ・18 台の GPU が異なるフレームを並列処理を行った。

計算アルゴリズムは、前章に述べた光線追跡法を用いた。ホログラムサイズは 2K で行い、点光源数が少ない条件ではリアルタイムでの動画生成を実現した。動画生成実験では、物体の落下や跳ね上がりなどの物理シミュレーションに加え、球をホールに入れるパターゲームなど複雑な動きが試され、光学再生像において再現されることが確認された。

図 3-5 にシーソーに乗ったウサギの反対側に鉄球を落とした物理シミュレーションの再生動画像の例を示す。ウサギが鉄球の落下の反動でウサギが跳ね上がる様子が確認できる。このウサギとシーソーでは点光源数は 10,000 点、120 フレームで計算を行い、GPU 数と計算時間の関係を図 3-6 に示す。18 台を全て使った場合は、全フレームの生成時間は 4.661 秒で 25.8 frame per second

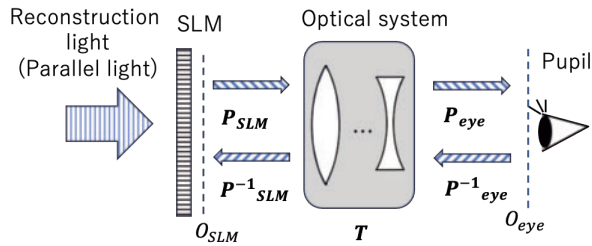


図 3-7 ホログラフィック表示装置の光学概念図

(FPS) となり、準リアルタイムが実現された。

これらの手法により、大規模なホログラムデータを高速に生成することが可能となり、動的なホログラフィ映像の生成に必要な計算性能を実現した。

3-2. 共通データフォーマットと ホログラムデータの生成

3-2-a. 共通データフォーマットとしての物体光

HVS ではユーザ毎のホログラフィック表示装置のハードウェアの構成やデバイスの仕様、光学系の構成は異なってくる。ホログラムデータも装置毎に異なり、またホログラムデータの計算アルゴリズムも同じではない。そこで本研究では、共通のデータフォーマットでデータを送信し、受信側で各装置に適したホログラムデータに変換する方法を提案した[28, 34, 40]。

一般的にホログラフィック表示装置は図 3-7 に示すように、SLM（空間光変調器）と光学系から構成される。再生像を得るためには、SLM にホログラムデータを表示し、再生光として平行光が SLM を照射する。SLM によって生成された光 O_{SLM} は光学系へと伝搬し（伝搬変換 P_{SLM} ）、そこで光学的変換 T を受ける。その後、光は瞳まで伝搬し（伝搬変換 P_{eye} ）、瞳位置の光波 O_{eye} を見ることによって再生像を見ることができる。この関係を式に表すと以下となる。

$$O_{eye} = P_{eye} T P_{SLM} O_{SLM}, \quad (1)$$

光学系は一般に複数のレンズや球面鏡で構成されるため、 T はそれぞれの光学素子による変換および素子間の伝搬を組み合わせた変換として表される。

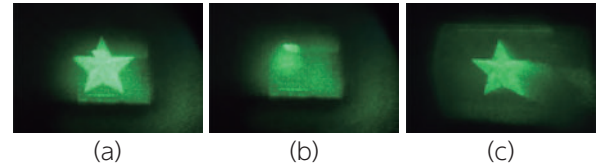


図 3-8 提案法による再生像

ホログラフィック表示装置の種類に依存せずユーザに同じ再生像を観察することができるためには、瞳の位置での光波 O_{eye} が同一であれば良い。これを実現するためには、各表示装置の光学系を考慮した上で、SLM の後方の光 O_{SLM} を決定する必要がある。式 (1) より、 O_{SLM} は次式で表される。

$$O_{SLM} = P_{SLM}^{-1} T^{-1} P_{eye}^{-1} O_{eye} \quad (2)$$

ここで、 P^{-1} および T^{-1} はそれぞれ P および T の逆変換を表し、これは逆伝搬（back-propagation）を意味する。式 (2) は、同一の O_{eye} から、各ユーザのホログラフィック表示装置の光学系に対応した固有 O_{SLM} を得られることを示している。

これより O_{eye} は装置に依存しない共通データと扱うことができ、放送型ホログラフィックシステムにおける伝送フォーマットとして適している。

図 3-8 にホログラフィック表示装置による再生像を示す。(a) は視点での物体光 O_{eye} から作ったホログラムの再生像であり、本来見えるべき像であり、星形の再生像がはっきりと見える。次に凸レンズが 1 枚入ったホログラフィック表示装置を考え、 O_{eye} を本方式によりを変換して、 O_{SLM} を求め得たホログラムデータを、レンズを入れないホログラフィック表示装置で観察した結果は (b) で、大幅にボケていることが分かる。レンズを入れたホログラフィック表示装置を入れた結果は (c) で、(a) と同様に星形の再生像が明瞭に観察できる。

このように、本方式による共通データフォーマットを用いることで、さまざまなホログラフィック表示装置に対応することが可能となり、計算負荷および通信負荷を大幅に低減できる。

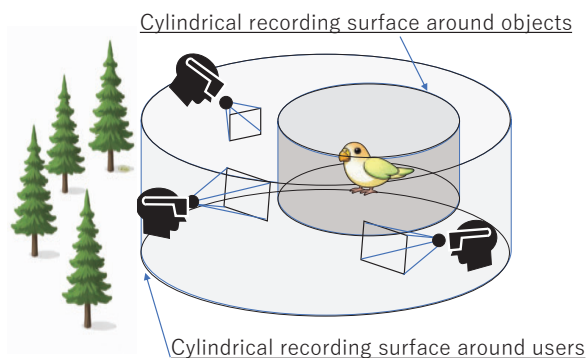


図 3-9 円筒形物体光記録面とホログラム面への伝搬

3-2-b. 自由視点に対応したホログラムデータの生成

ユーザがそれぞれ独立した自由視点からの再生像を観察できることは、高い臨場感を有するユーザ体験を提供する上で重要である。これを実現する一つの方法としては、ユーザの視点情報に放送局側にフィードバックし、放送局側で各ユーザに対応したホログラムデータを生成することが考えられる。しかし、この方法では、放送局側に多大な計算負担がかかるとともに、通信回線にもユーザ毎に異なる必要があり、スケーラビリティの点で課題がある。

そこで本研究では、波面データを記録可能な円筒形の記録面を用いる手法を検討した[15]。図 3-9 に示す様に、物体からの光は全周に渡り円筒面に記録され、この情報を放送局から多数のユーザに送信することを考える。この円筒面からユーザのホログラム面までの伝搬を計算することによって、ユーザのホログラム面での光波面情報を得ることができる。これによって、各ユーザの視点からの映像を独立に得ることができ、6DoF に対応した自由視点のホログラムが実現できる。

物体の周囲に円筒記録面を配置することによって、物体をさまざまな方向から観察することができる。また、ユーザの周囲に円筒記録面を作ることによって、パノラマ映像も見ることができる。

図 3-10 には、視点が物体光を記録した円筒中心にあり、ホロ HMD を回転させた再生像である。観察方向に応じて異なる物体が視野内に現れており、パノラマ画像として表示されていることが確認できる。

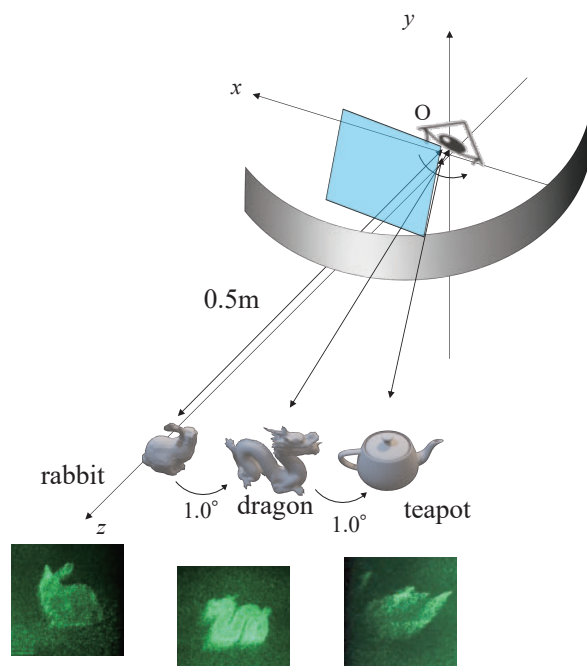


図 3-10 頭部を回転させることによるホログラフィックパノラマ映像

3-2-c. 円筒形物体光の高速計算

円筒記録面上の物体光を点光源法によって直接計算する場合、記録面の面積が広いため、計算量が膨大となるという問題がある。特に、リアリスティックレンダリングを考慮した場合には、隠面消去や反射計算が加わるため、計算量はさらに増大する。

一方、ホログラム面が平面である物体光のリアリスティックレンダリングは 3-1-a 節で示したように、すでに提案されており、高速化も実現されている。そこで本研究では、平面に記録されたりリアリスティックレンダリング済みの物体光から、円筒形記録面上の物体光を高速に計算するアルゴリズムを開発した。

本手法は、以下の三段階から構成される[18]。

- (i) 物体近くに物体光を記録する平面を配置し、物体からのリアリスティックレンダリングを考慮した物体光を記録する。
- (ii) 円筒中心に別の記録平面を配置し、先ほどの記録面から光波の逆伝搬を行い、物体光を記録する。
- (iii) 中心に置かれた物体光より、円筒記録面への光波面伝搬を計算する。

これによって、リアリスティックレンダリングされた像の物体光を、従来法に比べ 10,000 倍以上高速な計算を実現できた。

3-3. ホログラフィック表示装置

3-3-a. ホロ HMD

VR/AR 用途では、頭部の動きに応じてホログラムをリアルタイムで生成することが必須である。しかし、CGH では膨大な計算量が必要であり、リアルタイム処理が困難であった。この課題を解決するために位相補償に基づく高速 CGH 計算法を導入し、ユーザの頭の向き（姿勢角）に応じてホログラムを高速に更新する手法を提案した。

開発したホロ HMD は、既存研究を基盤とした光学系を採用しており、単一の RGB レーザ光源を使用したフルカラー再生が可能である（[図 3-11](#)、[図 3-12](#)）。また、凸面鏡により視野角（FOV）を広げ、ヘッドマウント型でありながら比較的広い表示領域を実現している。理論視野角は 18.2° 、実測値は 16.4° である。搭載されている SLM は解像度 2K で、ピクセルピッチは $4.5\mu\text{m}$ である。本機の外形寸法は $125\times 130\times 40\text{ mm}$ と比較的コンパクトで、AR 表示向けの光学設計が施されている。また、頭部の回転を測定するモーションセンサも搭載されている[4, 9, 20, 24, 43]。

HVS では放送局側に大型計算機を設置して共通データを計算し、計算能力の限られたユーザ側では処理負荷の小さい高速計算アルゴリズムが必要とされる。本研究で提案した高速計算はユーザの姿勢角に応じて光路差に基づく位相補償を行う方式である（[図 3-13](#)）。従来の点光源法では、点光源数の増加に比例して計算量が増大するため、ホログラムのリアルタイム更新は困難であった。これに対し、本方式では、物体光が与えられた後の計算量が点光源数に依存せず、ほぼ一定時間で処理できるという特徴を有している。そのため、CGH の更新を高速に行うことが可能である。実験において、頭部の回転に対して再生像が追従し、6DoF に対応することが確認された。また、



図 3-11 ホロ HMD の使用例

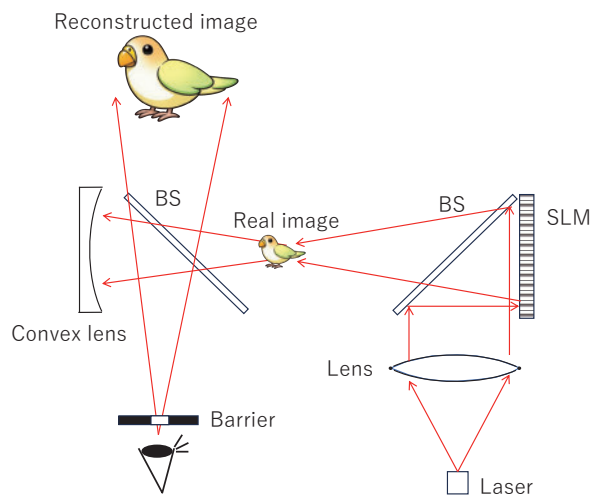


図 3-12 ホロ HMD の光学系

その速度は、30 FPS を超え、リアルタイム動作を実現している。[図 3-14](#) に再生像の一例を示す。

以上の結果より、本研究のホロ HMD は、ユーザの姿勢角に追従する AR 表示を可能とし、リアルタイムでのホログラム更新を実現することが確認された。また、6DoF、カラー、頭部装着可能なサイズおよび重量など、実用的な HMD に求められる主要な要件を満たしており、ホロ HMD の実用化に向けての有効性を示した。

3-3-b. ホロ HMP

HMD はユーザの裸眼視野を遮り、現実世界の視界を奪うという課題がある。この問題を解決するため、本研究ではヘッドマウント型プロジェクタ（Head-Mounted Projector: HMP）を用いて視野角を拡大する方式を提案した[5, 19, 23]。

HMP は光学系を頭部に装着し、プロジェクタとして使用することで、物体像を広い範囲に投影できる表示方式である。本研究では、凹面鏡を前方

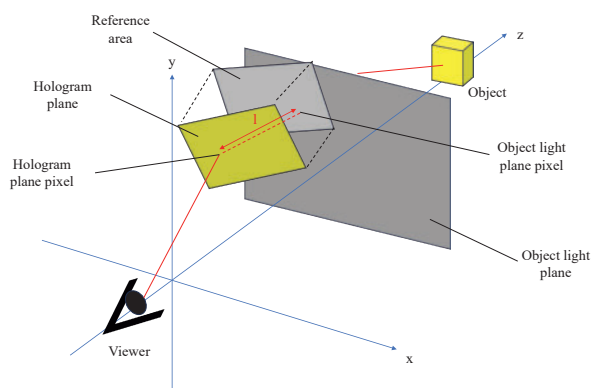


図 3-13 位相補正法の概念図

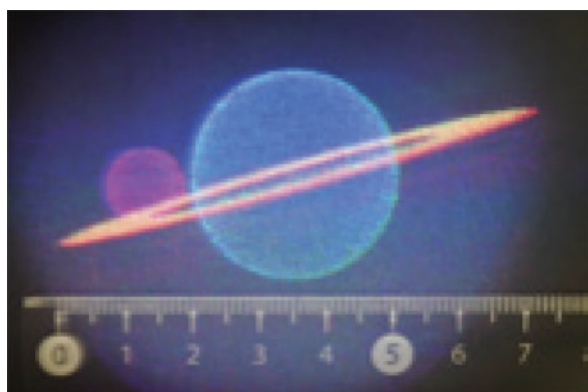


図 3-14 再生像

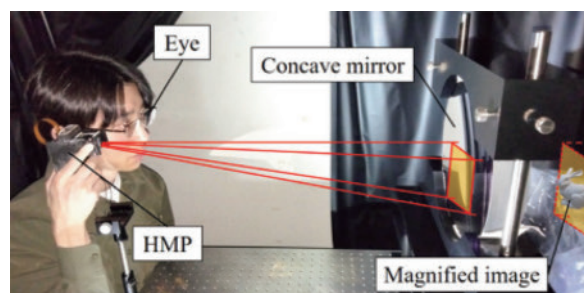


図 3-15 ホロ HMP の使用例

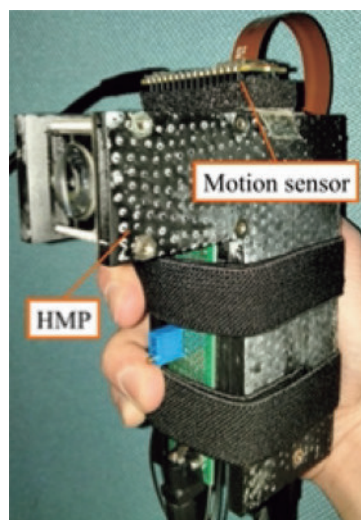


図 3-16 ホロ HMP の頭部装着部

に配置し，HMP から投影された再生像を凹面鏡で拡大する構成を採用した（図 3-15，図 3-16）．この方式により，HMD のように視界を遮らず，現実の視野を維持しながらホログラフィ映像を提示することが可能となった．

さらに本研究では，ユーザの姿勢角（特に頭部のロール角）に応じてホログラフィ再生像を動的に更新し，視覚的な一貫性を保つために加速度センサを利用した．これをリアルタイムで処理するために，ホロ HMD にも採用した位相補償アルゴリズムを用いた．これにより，ユーザの頭が左右に傾いた際にも，再生像が現実の物体と同じように見えるよう補正が行われ，より自然な 3 次元表示が実現された．

以上より，提案する HMP 方式は，視界を遮らずにホログラフィック表示装置の視野角を拡大でき，さらにユーザの姿勢角に応じて再生像を補正できることを示した．本研究は，より没入感の高い 3 次元表示技術の実現に向けた有用なアプロー

チである．

3-3-c. 携帯型ホログラムデータ専用生成装置

従来，ホログラムデータの生成には GPU を搭載した PC が必要とされ，装置は大型かつ重量が大きく，携帯用途には適さないという課題があった．そこで，図 3-17 のように携帯可能なホログラムデータ生成装置の開発をおこなった[7, 12, 21, 39]．装置は Field-programmable gate array (FPGA) を用いた専用計算装置であり，前述の円筒形物体光からホログラムデータを生成することを目的として設計されている．

FPGA は XCVU 9P-L2FLGA2104E（論理素子：2,586,150）を用いた（図 3-18）．計算はホログラムの画素毎に独立に計算可能で，これを画素毎の並列化と，パイプライン構造による 2 種類の回路構成で製作し，実験を行なった．どちらの方法でも頭部の回転に合わせたホログラムデータの生成は正しく行われた．計算速度に関してはパ

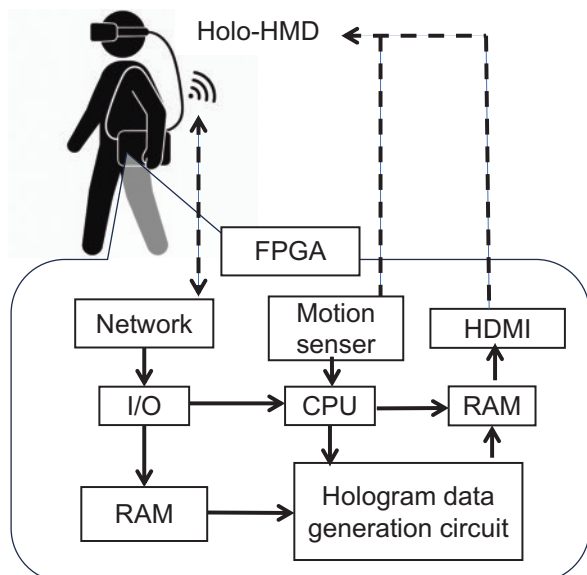


図 3-17 携帯型ホログラムデータ専用生成装置の基本構成



図 3-18 FPGA の外観

イプライン方法が高速で、 128×128 pixel のホログラムデータを 0.68 ms で生成することができた。これはホロ HMD に用いられている 2K の SLM では準リアルタイムの 11 FPS となり、さらなる高速化が必要ではあるが、携帯型のホログラムデータ専用生成装置の可能性を示すことができた。

3-3-d. ベンチトップ型ホログラフィック表示装置

HMD や HMP は頭部に装置を装着する必要があるが、利用者に装置の重量や装着の不快感などを与える問題があった。そこで本研究では、視点の近くに装置などの物理的な障害がなく、圧迫感のないベンチトップ型ホログラフィック表示装置の

検討を行った。

広視野装置

一般にホログラフィック表示装置は視野角が狭いという課題がある。本研究で開発したベンチトップ型装置は広い視域を確保したもので、 12.8 度の視野を実現した [29]。このシステムでは、4f 光学系に加えて、2 枚のレンズを用いて再生像を拡大している。図 3-19 に装置の外観を、図 3-20 に再生像を示す。再生像は、大型のレンズを通して見る事ができる。

さらに、両眼での像の観察を実現するため、左右独立した光学系を用いた装置も開発した。しかし、ユーザごとに瞳の間隔が異なるため、従来方式では 2 台の装置の間隔を物理的に変更する必要があった。そこで本研究では、電子的に再生照明光を切り替え、視域を変更する方式を採用した。瞳の位置はアイトラッカーより検出し、個人差のある瞳孔間距離や、わずかな顔位置の変動にも柔軟に対応することが可能である。

広視域装置

図 3-22 に示す装置は、視域を拡大したベンチトップ型ホログラフィック表示装置であり、 32° の視域を有している [2, 17, 33, 35]。この広い視域により、観察者はさまざまな方向から再生像を観察することが可能となり、回り込み特性を有する立体映像を提示できる。また、再生像は図 3-21 に示すように、指で触れられる位置に空中像として知覚され、将来的には指によるインタラクションへの応用も期待される。

本システムでは、アイトラッカーによって観察者の視点を検出し、再生照明光アレーの光源を切り替えることで視域の拡大を実現している。さらに、本方式ではコストの高い SLM を 1 枚のみ用いて構成し、装置構成の簡素化と大幅なコスト削減を同時に実現している。

3-3-e. スペックルノイズの削減

スペックルノイズはホログラフィの表示におけ

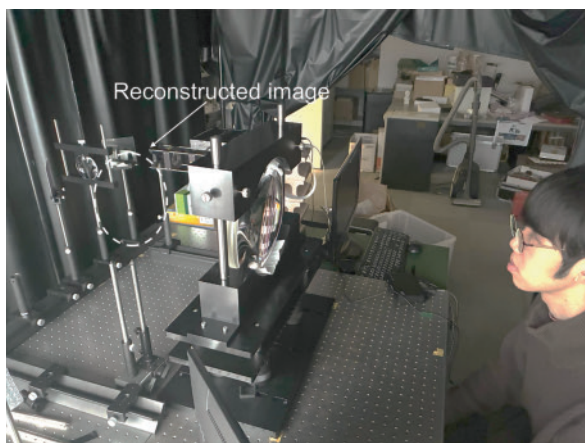


図 3-19 広視野装置の外観

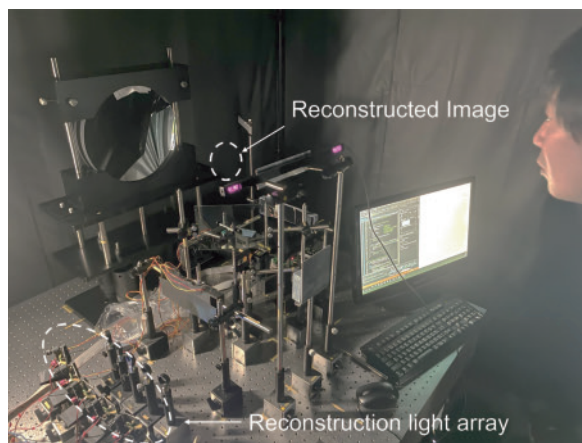


図 3-21 広視域装置の装置外観

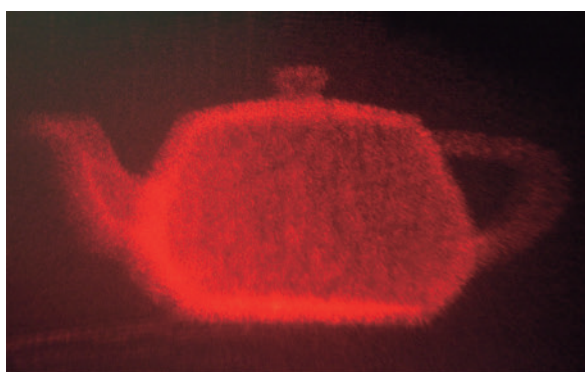


図 3-20 広視野装置の再生像



図 3-22 広視域装置で表示された空中再生像

る特有のノイズで、再生像に粒状ノイズとして現れる。ホログラフィック表示装置を実用化するには、このスペックルノイズの低減が不可欠である。特殊な SLM を用いる、スペックルノイズが発生しにくいホログラムデータを生成するなど、さまざまな方法が提案されている。本研究においては、ホログラムデータや SLM の構成を変更することなく、再生照明光のみを変更する方法でスペックルノイズの削減を検討した。

黄色蛍光体励と周波数フィルタによる 時間的コヒーレンスの低減

再生照明光の時間コヒーレンスを下げる方法を検討した[1]。黄色蛍光体励により白色光を発生させ、これに周波数フィルタを適応することで波長幅を制御する。波長幅が広がるほど、時間コヒーレンスが下がり、それに伴いスペックルノイズも減少する。実験の結果、約 30% の減少を確

認した。また本光源は、発光ダイオードなどの時間コヒーレンスの低い光源に比べて高い輝度を有しており、ホログラフィック表示装置の再生照明光源として有効であることが示された。

ファイバ振動による空間コヒーレンスの低減

光源の空間コヒーレンスを低減する方法として、マルチモードファイバを振動させる方法を検討した[3]。この方法で、スペックルノイズを 43% 低減できることを確認した。一方で、マルチモードファイバーの開口が広いことに起因して、再生像の解像度の低下が見られた。

3-4. 視覚系を用いたホログラムデータの生成

ホログラムデータはデータ量が多く、ホログラムサイズが 4K で 6 Gbps の通信帯域が必要とされる。実用的にはさらに大きなデータ量が想定さ

れ、伝送ではデータ圧縮が不可欠である。また、前述のとおり、ホログラムデータの生成には多くの計算時間を要するという課題も存在する。

この課題を解決するため、本研究ではヒトの視覚特性を利用した圧縮手法について検討した。ヒトは水平 160° 、垂直 135° の視野を有しているが、高い視力を有する領域は中心窩に相当する約 3° の範囲に限られているとされている。この特性に着目し、現在の VR や AR の分野では、高速レンダリング手法として中心窩レンダリングが提案されている。図 3-23 に示すように観察者の視線の中心は高解像度、周囲は低解像度に描画することで、見かけ上高解像度なレンダリングを実現している。

本研究ではこの特性を用いて、周辺には周辺領域用の再生像の解像度の低いホログラム、中心には中心窩領域の解像度の高いホログラムを用いる方式を検討した。この方式のメリットには、ホログラムデータの圧縮効率の向上と、計算時間の短縮の二つがある。

このため、本研究では周辺領域の解像度の低い再生像を表示するホログラムデータを生成するアルゴリズムを開発した。本アルゴリズムでは、物体の点光源から発せられ、ホログラム面に記録される光波面データの計算領域を、「サブホログラム」と呼ぶ限定された領域に制限することで、再生像の解像度を低下させる。ここで、サブホログラムのサイズを $N[\text{pixel}]$ とすると、 $N=250$ のときの分解能は 0.0564 deg 、 $N=500$ のときの分解能は 0.0282 deg 、 $N=1000$ のときの分解能は 0.0141 deg 、 $N=2000$ のときの分解能は 0.0071 deg に相当する。

3-4-a. 周辺視用再生像の感性評価

本研究では、ヒト機能を考慮した、汎用的な表示装置かつ簡易な計算手法で実現可能な CGH の中心窩レンダリングを行うため、23 名の実験対象者に対し、感性評価実験を行った。CGH 再生のための光学系にはさまざまな種類があるが、本

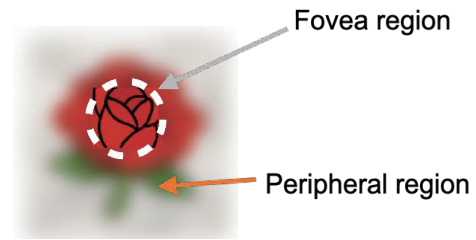


図 3-23 中心視と周辺視の解像度

研究では、3-3-d 節の広視野装置を本研究向けに改良した光学系に対し、中心窩レンダリングを試みた[37, 38]。

本実験で用いた光学装置の視野は $15.8^\circ \times 7.9^\circ$ であるため、ヒト中心窩に対応する視野 3° に対し十分である。また、最大解像度は $0.0037^\circ \times 0.0074^\circ$ であり、これは解像限界が主観評価に及ぼす影響はない。

本実験では、中心窩レンダリングの 2 個のパラメータについて着目した。第 1 は、中心窩レンダリングの大きさである。第 2 は周辺領域の pixel 数である。実験は、全体が最高解像度にレンダリングされた再生像と、中心窩レンダリングを任意の割合で施した再生像とを比較し、評価にはウィルコクソンの符号順位和検定法を用いた。

実験対象者に提示した刺激は 3 つの物体像で構成されている。いずれの物体像も視点から距離 1 m の位置に存在し、ドーナツ型の物体が中央に 1 つと、その両端に星型の物体を左右 1 つずつ配置した。ドーナツ型の物体をすべての場合で最高解像度 (FULL) に設定した。星型の物体は、配置位置と pixel 数を実験の目的により任意に変化させた。

星型画像 (B) をドーナツ型画像 (A) から 3, 5, 7, 9 deg の間隔に、pixel 数についてはサブホログラムサイズを $N=250, 500, 1000, 2000 \text{ pixel}$ と変化させた。

本計測実験では、全体が最高解像度 (分解能 0.0037 deg) でレンダリングされた再生画像 A に対して、参照提示ホログラム B の中心窩レンダリングされた画像パラメータを、中心領域 3, 5, 7, 9 deg の 4 通り、pixel 数 $N=250, 500, 1000, 2000$ の 4

通りの合計 16 通りの組み合わせがある。

全体が最高解像度の再生像を A，中心窩レンダリングを施した再生像を B と呼称し，実験対象者に「A に比べて B はどうだったか」という質問を行った。刺激は A と B だけを提示するだけでなく，A の提示前，A から B へ，B の提示後の 3 つの時間に，ドーナツ型の物体のみを提示し，刺激をリセットするための時間とした。具体的な刺激提示実験の手順については表 1 に示す。ドーナツ型のみを提示した状態から再生像 A を提示し，実験対象者には A を記憶するように促した。再びドーナツ型のみを提示し，カウントダウンの「3, 2, 1,」という掛け声の後，再生像 B を提示した。実験対象者は B を 5 秒間観察し，再度ドーナツ型のみが提示されると観察を終了し，質問への回答を行った。評価は，比較対象画像 A に対して，提示画像 B の主観的な解像度がどのように変化を，1 (1)：悪くなった（変化した），2 (2)：少し悪くなった（少し変化した），3 (3)：変化なし，4 (2)：少し良くなった（少し変化した），5 (1)：良くなった（変化した）の 5 段階で回答を得た。この評価実験を 4×4 の 16 の組み合わせすべてで繰り返した。提示順序はランダムとした。その後，実験対象者の評価点と結果の検定のために 3 段階評価に修正した（図 3-24）。評価点の対応をカッコ内に示した。

中心領域の大きさに関しては，位置 3, 5, 7, 9 deg のいずれの場合も同様の傾向を示すが，9 deg の場合は，ほぼ線形の傾向である。サブホログラムサイズが小さくなればなるほど点数が低くなり，感性評価でも解像度制御が適確に行われていることが確認された。

中心領域の変化による評価点の推移はほぼ同じ， $N \leq 1000$ のとき， N を小さくすると評価点が下がった。主観評価でも，解像度制御が有効であることが確認された。 $N = 2000$ のとき，解像度を下げたはずが「少し良くなった」の評価が多かった。これは，刺激切り替わりの際の誤認識が考えられる。

解析では，中心領域の 4 種類ごとに比較し統計

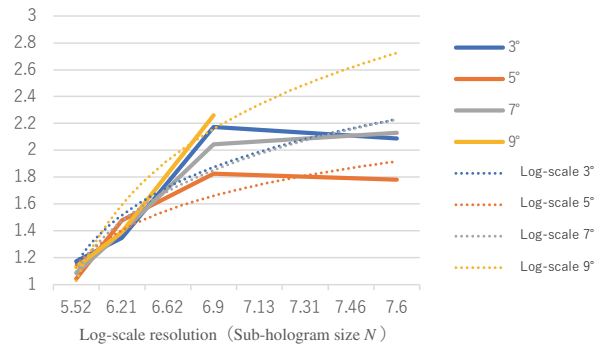


図 3-24 3 段階評価修正の平均値とその対数

的検定を試みた。中心領域 3 deg の場合，サブホログラムサイズ N を 1000 から 500 に下げると危険率 1% で有意差があった。5 deg の場合，サブホログラムサイズ N を 1000 pixel から 250 pixel に下げると危険率 1% で有意差があり，500 pixel から 250 pixel に下げると危険率 5% で有意差があった。7 deg の場合，サブホログラムサイズ N を 1000 から 500 に下げると危険率 1% で有意差があった。なお 9 deg のデータにはばらつきが見られたが，9 deg はヒトの中心視野領域 3 deg を大きく超えて周辺視の範囲を含むため，傾向が見えなかった可能性がある。

この実験によって，ホログラフィの再生像においても，中心窩レンダリングが有効であることが確かめられた。

3-4-b. ホログラムデータ計算の高速化

このアルゴリズムではサブホログラムにより点光源あたりの計算領域が制限されているため，解像度を下げるほど，計算量が少なくなり，高速な計算が可能である。図 3-25 に示すように，高解像度の計算に比較して 8 倍以上の高速化が実現できた。

実際は中心領域の計算も必要となるが，領域は 5 度程度しかないため，ホログラムのほとんどが低解像度になり，ホログラム全体として高解像度のホログラムの生成を含めても高速となる。

3-4-c. 高い圧縮率の実現

サブホログラムによりホログラムのデータの情

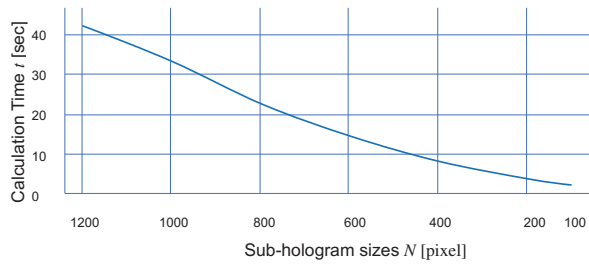


図 3-25 周辺視の解像度による
ホログラムデータの計算時間

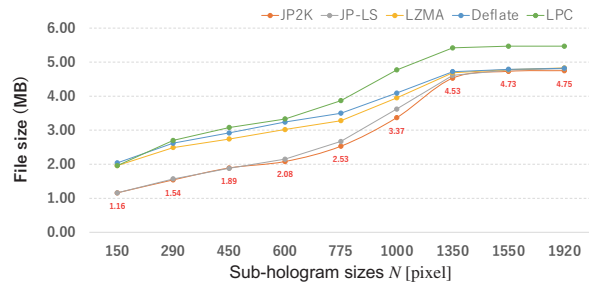


図 3-26 周辺視の解像度によるホログラムデータの圧縮

報量が低減されるため、一般的なホログラムデータと比較して高い圧縮率を得ることが可能である[14, 32]。図 3-26 に、従来からある可逆圧縮法で圧縮したファイルサイズとサブホログラムサイズ N との関係を示す。解像度を低下させることで、圧縮率を 3 倍以上に向上できることが確認された。

3-5. 実世界データを用いた自由視点実験

システムのテストとして、実世界の実物体をキャプチャした 3D データを、ホロ HMD で視点を動かしながら表示実験を行った[26, 27]。システムの構成図を図 3-27 に示す。3D データの撮影は本プロジェクトの共同研究組織であるクレセント(株)の 4D VIEWS を用いて行われ、ポ

リゴンデータおよび点群データとして取得した。ホロ HMD の頭部のモーションセンサの情報に基づき、取得した 3D データの点群に対して視点に応じた物体の回転処理および隠面消去を行った。これにより、観察者の頭部運動に追従した再生像の提示を実現している。

図 3-28 には撮影した女性のデータを用い、周囲から観察した際の再生像を示す。視点位置の変化に応じて、物体の側面方向まで観察可能となる回り込み特性が確認できる。

以上の結果より、実世界の実データを用いた場合においても、ホログラム表示により 6DoF に対応した自由視点表示が可能であることを確認した。

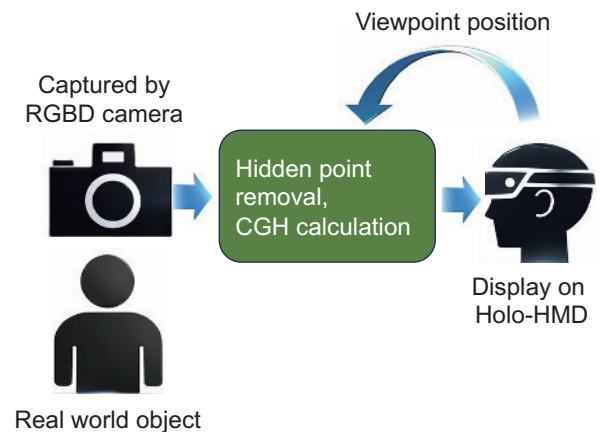


図 3-27 実世界データからホロ HMD での表示



図 3-28 実世界データを異なる方向から見た再生像

4. まとめ

ホロ TV は立体テレビとして、長年にわたり実用化が期待されてきた。しかし、その実現には解決すべき多くの技術的課題が存在し、難易度の高さから実用化は遠い将来のものと考えられてきた。本研究で提案した HVS は、放送型ホログラフィック通信において有効な方式であり、複数のユーザがそれぞれ独立した自由視点から 3D 映像を鑑賞できる点に加え、異なるホログラフィック表示装置に対応可能であるという特徴を有している。

本研究では、HVS の実現に必要なとされる各要素技術について検討を行い、放送型ホログラフィック通信に向けた有効な基礎技術を確立することができた。これにより、HVS によるホログラフィック通信の実現可能性を示すことができた。

一方で、本研究は要素技術ごとの検討を中心としたものであり、今後は各技術を統合した End-to-End システムによる実証実験が必要である。また、さらなる計算の高速化やデータ圧縮率の向上についても、引き続き検討を進める必要がある。

5. 社会的インパクト・実用化展開

本研究の成果は、立体情報をより自然に共有できる新しい情報提示手段を提供するものである。教育分野や医療分野では、立体構造を直感的に理解できる遠隔教材や診断支援への応用が考えられる。また、製造業においては、設計情報や作業手順を分かりやすく可視化することで、作業効率の向上に寄与することが期待される。さらに、本研究は Beyond 5G 網など、将来の超大容量・低遅延通信を前提としたサービスの一例として、次世代通信インフラの活用や社会実装に向けた検討に貢献するものと考えられる。

6. 本プロジェクトの沿革

2023 年 1 月 プロジェクトの開始

開始時のグループは坂本雄児（北大代表者）・山ノ井高洋・姜錫（いずれも北海道大学）

2024 年 12 月 坂本の退職に伴い姜が北大代表者に

2025 年 4 月 土橋宜典、山本学、日景隆（いずれも北海道大学）が研究者に参加

2026 年 3 月 プロジェクト終了予定

謝辞

本受託研究を遂行する機会を与えてくださった国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）に感謝の意を表します。併せて、各共同研究機関の研究者の方々および関係者の方々、多くの助言をいただいた研究開発運営委員会の委員長並びに委員の皆様へ感謝の言葉を申し上げます。

最後に、北海道大学情報科学研究院旧メディア創生学研究室の学生の皆様と卒業生（新井大也さん、飯沼愁人君、岩井蒼空君、梅内飛翔君、小川泰世君、小野紘大君、柏木暁史さん、菊地夏さん、金恵炫さん、近凌太郎さん、榊原汰一さん、西田爽汰君、松野巧希さん、宮原毅仁君、村本安里紗さん、山内啓瑚さん、吉岡稜央君、渡部理久さん）に深く感謝いたします。

本出版物は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（JPJ012368C06801）により得られたものである。

研究業績

特許

- 発明等名称：ホログラム演算装置，ホログラム演算方法，及び，ホログラム映像表示システム
- 出願番号：特願 2024-190104
- 出願日：2024 年 10 月 29 日

展示

- 発表先：IDW'24 大学展示
- タイトル：Holometric video streaming: Holographic shooting booth
- 開催期間：2024 年 12 月 4 日～12 月 6 日
- 場所：札幌コンベンションセンター
- 概要：ホログラフィック・ヘッドマウント・ディスプレイ（ホロ HMD）を用いたデモ

報道

- 発表先：北海道放送株式会社 WEB マガジン「Sitakke（したっけ）」
- タイトル：SF の世界が現実！？ 北大が究極の 3D 映像技術「電子ホログラフィ」の開発に挑戦中！
- 発表日：2024 年 3 月 26 日
- URL：<https://sitakke.jp/post/9882/>

受賞

- 主催機関：OPTICA
- 受賞タイトル：The 2024 Best Paper Prize for *Applied Optics*
- 受賞日：2025 年 10 月

論文・口頭発表

令和 5 年度（2023 年度）

〔学術論文〕

- [1] T. Yoneyama and Y. Sakamoto, "Speckle control for electro-holographic display using high-brightness yellow phosphor light source in projector," *Opt. Eng.*, vol. 62, no. 8, p. 083103, Aug. 2023.
- [2] R. Watanabe and Y. Sakamoto, "Enlargement of the viewing zone and size of a reconstructed image in electro-holography using multiple reconstruction lights by eye-tracking," *Appl. Opt.*, vol. 63, no. 7, pp. B76-B84, Mar. 2024.

〔国際学会〕

- [3] K. Matsuno, Y. Ito, and Y. Sakamoto, "Controlling Speckle and Resolution of Reconstructed Images by Vibrating Multimode Optical Fiber with a Cylindrical Piezoelectric Transducer in Electro-Holography," *Proc. IDW '23*, p. 711, Dec. 2023.
- [4] T. Sakakihara and Y. Sakamoto, "3DoF holographic head-mounted display with motion sensor based on fast calculation algorithm for CGH," *Proc. SPIE*, vol. 12910, pp. 126-131, Jan. 2024.
- [5] N. Kikuchi and Y. Sakamoto, "Proposal of head-mounted projector for field of view enlargement in electro-holography," *Proc. SPIE*, vol. 12910, p. 129100L, Jan. 2024.

〔国内学会〕

- [6] 山内啓瑚，柏木暁史，坂本雄児，「計算機合成ホログラムにおけるクラウドサーバ群を用いた計算負荷の分散および処理時間に対する効果の測定」，*映情学技報*，vol. 47，pp. 29-32，Sep. 2023.
- [7] 飯沼愁人，坂本雄児，「FPGA を用いたヘッドマウントディスプレイのためのホログラム生成の高速化の検討」，令和 5 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会，pp. 163-164，Oct. 2023.
- [8] 小野紘大，坂本雄児，「CUDA におけるプログラマブルメモリの違いによる計算機合成ホログラムの計算時間の比較」，令和 5 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会，pp. 161-162，Oct. 2023.
- [9] 榊原汰一，坂本雄児，「電子ホログラフィを用いたヘッドマウントディスプレイの実用化に向けた取り組み」，令和 5 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会，pp. 144-145，Oct. 2023.
- [10] 山内啓瑚，柏木暁史，坂本雄児，「クラウドサーバ群による写実的なホログラフィック動画の生成」，*映情学技報*，vol. 47，no. 38，pp. 37-40，Dec. 2023.
- [11] 山内啓瑚，柏木暁史，坂本雄児，「クラウドサーバ群によるホログラフィック動画生成を用いたゲームシステムの提案」，*映情学技報*，vol. 48，no. 1，pp. 45-48，Jan. 2024.
- [12] 飯沼愁人，坂本雄児，「FPGA を用いたヘッドマウントディスプレイのためのホログラム計算回路の検証」，HODIC 学生シンポジウム 2024，pp. 1-4，Feb. 2024.
- [13] 小野紘大，坂本雄児，「計算機合成ホログラムにおけるベジェ曲面の鏡像の実装とその高速化」，HODIC 学生シンポジウム 2024，pp. 5-8，Feb. 2024.
- [14] 金恵炫，坂本雄児，「Sub-hologram に対する無損失圧縮の検討」，HODIC 学生シンポジウム 2024，pp. 47-50，Feb. 2024.

令和6年度（2024年度）

【学術論文】

- [15] R. Kon and Y. Sakamoto, “Real-time generation of computer-generated hologram for 360-degree panoramic views using cylindrical object light,” *Opt. Eng.*, vol. 63, no. 6, p. 065101, June 2024.
- [16] H. Arai, K. Ono, and Y. Sakamoto, “CGH calculation algorithm for expressing reflection on a curved mirror surface,” *Opt. Express*, vol. 32, no. 21, pp. 36469–36488, Oct. 2024.
- [17] R. Watanabe, S. Kang, and Y. Sakamoto, “Binocular holographic display with a wide viewing zone using eye-tracking and multiple reconstruction lights,” *Appl. Opt.*, vol. 64, no. 4, pp. 984–994, Feb. 2025.
- [18] A. Kashiwagi, K. Ono, and Y. Sakamoto, “Fast calculation method for CCGHs applicable to various planar computer-generated hologram computation methods,” *Appl. Opt.*, vol. 64, no. 7, pp. B38–B48, Mar. 2025.
- [19] N. Kikuchi, S. Kang, and Y. Sakamoto, “Head-mounted projector with a wide visual-field and three degrees of freedom in electro-holography,” *Appl. Opt.*, vol. 64, no. 7, pp. B58–B64, Mar. 2025.

【国際学会】

- [20] T. Sakakihara and Y. Sakamoto, “Holographic Head-mounted Display Capable of Displaying AR in accordance with User’s Attitude Angle,” *DH 2024*, p. W4A.4, June 2024.
- [21] S. Iinuma and Y. Sakamoto, “Design of calculation circuit of computer-generated hologram for holographic head-mounted display,” *IMID 2024*, p. 600, Aug. 2024.
- [22] K. Ono, H. Arai, and Y. Sakamoto, “Generation of Mirror Images of Bézier Surfaces in Computer-generated Hologram,” *IMID 2024*, p. 594, Aug. 2024.
- [23] N. Kikuchi and Y. Sakamoto, “Head-Mounted Projector for Enlarging Field-of-View Corresponding to User’s Attitude Angle in Electronic Holography,” *IMID 2024*, p. 681, Aug. 2024.
- [24] T. Sakakihara and Y. Sakamoto, “Holographic Head-mounted Display with Real-time Calculation using Fast Calculation Algorithm for Computer-generated Hologram,” *IWH 2024*, Paper S3–3, Dec. 2024.
- [25] K. Ono, S. Kang, and Y. Sakamoto, “Fast calculation method for curved surface mirror reflections using subdivision in computer-generated hologram,” *Proc. SPIE*, vol. 13390, p. 133900L, Jan. 2025.
- [26] S. Nishita et al., “Display method of real-world data captured by an RGBD camera on a holographic head-mounted display reacting to viewpoint movement,” *Proc. SPIE*, vol. 13390, p. 133900M, Jan. 2025.

【国内学会】

- [27] 西田爽汰ほか, 「実データを用いた CGH の生成及び Holographic head-mounted display での再生」, 令和6年度 北海道支部連合大会, pp. 99–100, Oct. 2024.
- [28] 梅内飛翔ほか, 「様々な電子ホログラフィ表示装置に対応するための物体光変換手法の提案」, HODIC 学生シンポジウム 2025, pp. 5–8, Mar. 2025.
- [29] 小川泰世ほか, 「視域拡大光学系における再生像の拡大及びフルカラー化の手法の提案」, HODIC 学生シンポジウム 2025, pp. 1–4, Mar. 2025.
- [30] 宮原毅仁ほか, 「複数 GPU と物理演算機能を持つ高速計算システムにおけるホログラフィック動画の生成」, HODIC 学生シンポジウム 2025, pp. 25–28, Mar. 2025.

令和7年度（2025年度）

【学術論文】

- [31] K. Ono et al., “Fast computer-generated hologram calculation algorithm for mirror images reflected on mirror surface of Bézier surfaces using subdivision,” *Opt. Eng.*, vol. 64, no. 7, p. 075102, July 2025.
- [32] D. Kim et al., “Lossless compression of CGH via resolution-controlled sub-hologram,” *Appl. Opt.*, vol. 64, no. 36, pp. 10678–10690, Dec. 2025.

【国際学会】

- [33] S. Iwai et al., “Enlargement of Viewing Zone by Multiple Light Sources in Holographic Display with Wide Field-of-View,” *IMID 2025*, p. 713, Aug. 2025.
- [34] A. Umenai et al., “Object Light Conversion Algorithm for Various Display Devices of Electro-holography using Backpropagation Calculation,” *IMID 2025*, p. 530, Aug. 2025.
- [35] T. Ogawa et al., “Enlargement of Reconstructed Image and Full-colorization in Holographic Display with Wide Viewing-zone,” *IMID 2025*, p. 532, Aug. 2025.
- [36] T. Miyahara et al., “Implementation of Holographic Video Game in High-Speed Generation System with Physical Simulation and GPU Cluster,” *IMID 2025*, p. 531, Aug. 2025.
- [37] T. Yamanoi et al., “Sensory Evaluation of Human Vision for Foveated Rendering of Computer-Generated Holograms,” *ISIS 2025*, pp. 526–531, Nov. 2025.

【国内学会】

- [38] 山ノ井高洋ほか, 「計算機合成ホログラムにおける中心窩レンダリングの感性評価」, *FSS 2025*, pp. 668–671, Sep. 2025.
- [39] 飯沼愁人ほか, 「Holometric Video Streaming の実現に向けた並列高速計算回路の設計」, 映像情報メディア学会 2025 年冬季大会, Dec. 2025.

【招待講演】

- [40] Y. Sakamoto, “Hologram Data Generation Method for Various Electro-Holography Displays from Common Object Light,” *IWH 2025*, Paper WII-I-04, Nov. 2025.
- [41] Y. Sakamoto, “Holometric Video Streaming for Multiple Users to Simultaneously Experience Free Viewpoints,” *IDW '25*, Paper 3D2-1, Dec. 2025.

【公開資料】

- [42] KODAI ONO et al., “A High-Speed CGH Calculation Method for Mirror Images on Bézier Surfaces using Optical Path Length Minimization,” *arXiv:2601.06459 [physics.optics]*, 2026.
- [43] Taichi Sakakihara et al., “Head-wearable Holographic Head-mounted Display with 6 Degrees of Freedom,” *arXiv:2601.15581 [physics.optics]*, 2026.

連絡先

住所：〒 060-0814
札幌市北区北 14 条西 9 丁目
北海道大学大学院 情報科学研究院

坂本 雄児
hologram.researcher.yuji@gmail.com

姜 錫
kssrh@ist.hokudai.ac.jp