

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02819

研究課題名(和文)3次元物体の質感が表現可能な体積型ホログラムプリンタの開発

研究課題名(英文)Development of volume hologram printer -Reconstruction of 3D objects texture-

研究代表者

山口 健(YAMAGUCHI, Takeshi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：90434125

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フルカラーの3次元像が再生可能な体積型ホログラムを直接出力可能なシステムの開発を行った。記録用の光学系として時分割記録方式と同時露光方式について検討を行った。時分割方式では、フルカラーの像を確認することはできたが、鮮明な像が得にくいという結果が得られた。同時露光方式については、現在も研究中である。次に、干渉縞計算の高速化のため、CPUを用いた方式からGPUを用いた方式に変更した。その結果、シングルGPUで約15倍、マルチGPUでは約27倍の計算の高速化を実現した。再生像の質の向上のため、記録位置を一部重ねる手法を提案し、シミュレーションによる効果を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発を行っている体積型ホログラムプリンタは、特別な技術を有していなくとも誰もが簡単にホログラムを出力できるシステムになる。我々の提案している体積型ホログラム物体波面を再生することが可能であるため、計算する際のデータがあれば物体の質感をそのまま再生することも可能である。計算に関しても、GPUを用いた計算を取り入れることで、これまでよりも数倍から数十倍の計算速度を実現することができた。また、記録する際の質についても、今回提案したフィルタをかけた一部を重ねる手法を用いることで、撮影時間をそこまで犠牲にすることなく、再生像の質を向上できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have been developing full-color volume hologram printer which can output volume hologram directly. We have investigated 2 types optical system which are time division recording and simultaneous exposure system. In case of the time division recording system, we can obtain full-color reconstructed image, but image quality is not good. Also, we are developing the simultaneous exposure system yet. As the fast calculation of interference fringe pattern, we have employed GPU calculation, instead of CPU calculation. As a result, we have achieved about 15 times faster calculation speed with the single GPU, and about 27 times faster calculation speed with multi GPUs. Also, to improve the quality of reconstructed image, we have proposed a part overlap recording method.

研究分野：情報学

キーワード：体積型ホログラム 出力装置 フルカラー 時分割露光 同時露光 露光の重ね合わせ 計算機合成ホログラム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当時、安価な 3D プリンタが発売されるようになり、誰もが比較的容易に 3 次元形状データから立体物を造形することができるようになった。3D プリンタは、立体物を造形することが可能なため、様々な分野への応用が期待されているが、使用する材料によって出力する立体物の質感が決定されてしまう。3 次元の形状データから立体物の映像を再生する手法として、計算機合成ホログラムがある。そもそもホログラムは、光の干渉・回折を利用して物体からの光波を再生できるものである。このホログラムの干渉現象を、計算機で計算しホログラムとして出力したものを計算機合成ホログラムという。計算機合成ホログラムの研究は、NiCT (情報通信研究機構) でもディスプレイの研究が行われるなど、未来のディスプレイ技術として注目されている。

この計算機合成ホログラムは、高分解能・高解像度の出力装置を必要とするため、大型のものはほとんど報告されていない。我々の研究グループではこれまでに計算機合成ホログラムの出力装置として、高分解能のホログラム用プリンタの開発を行ってきた。このプリンタは、画素ピッチが $0.44 \mu\text{m}$ 、1 Mpixel あたりの描画時間も 0.8 秒と、他に研究されているホログラム用プリンタと比較しても高速に出力することが可能であった。しかし、このプリンタで出力可能なホログラムは、干渉縞が平面方向に形成されるホログラムであるため、再生時に単色のレーザや LED などを用いることが多い。平面型のホログラムは白色で再生すると、波長ごとに回折する角度が変わってしまい、再生される像がぼやけてしまう。これに対して、光学撮影されるホログラムでは多くの場合白色光でも記録時の波長だけが再生される体積型のホログラムを製作している。また、体積型ホログラムでは赤、緑、青などの異なる波長のレーザの再生像を合成することで、フルカラーの再生像を得ることができる。体積型ホログラムを直接出力するシステムとしては、これまでも東京工業大学の山口^①や Zebra 社^②などが装置や出力するホログラムの計算手法などの提案を行ってきた。しかし、これらのホログラムは奥行き情報を持たない 2 次元の画像群を基に記録し再生するため、ホログラム本来の特徴である、奥行きのある像を精密に表示できるという性質が失われてしまう。我々の研究グループも、体積型のホログラムを出力する装置に関する研究を行ってきた^③。この出力装置は、計算した干渉縞を利用することで 3 次元形状データからの波面を再生し、体積ホログラムとして記録することができる。しかし、これまでの装置は単色 (緑色) の再生像の出力にとどまっておらず、体積型ホログラムの利点を十分に活かされていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで我々の研究グループが開発を行ってきた体積型ホログラムプリンタを改良し、フルカラーの体積型ホログラムを直接出力することが可能なシステムを作ることである。この実現のためには、現在の単色型の記録光学系を改良しなければならない。図 1 に申請時の体積型ホログラムプリンタを示す。これまでは、1 つのレーザを使用した光学系であったため、赤・緑・青の 3 色のレーザを取り入れた光学系の構築を行う。この変更に伴い、出力装置の制御システムを更新を行う。我々の出力システムはコンピュータを用いて、X-Y ステージ、シャッタ、空間光変調器 (LCoS) の制御を行っている。体積型ホログラムの出力時間は数時間～数十時間になるため、自動制御は欠かせない。そのため、3 色のレーザ光を用いたシステムに対応した、制御システムに変更し自動でフルカラーの体積型ホログラムを出力できるようにする。

次に、LCoS に表示する干渉縞 (要素ホログラム) の計算の高速化のため、GPU (グラフィックスプロセッシングユニット) を利用した計算プログラムの開発を行う。これまでの体積型ホログラムの干渉縞計算では、CPU を利用した計算を行ってきた。要素ホログラムの計算には、計算範囲を決めるための条件分岐があるため GPU 計算との相性はあまりよくないが、同様に条件分岐のあるイメージ型ホログラムにおいても一定の高速化の成果が得られている^④。このため、体積型ホログラムにおいても GPU を用いた計算プログラムの構築を行う。CPU を用いた計算は、高速化のため差分近似を用いているが、GPU を用いた計算では近似計算ではなく原理通りの計算であるため、ノイズの低減なども期待することができる。

最後に、再生される像の質を向上させるため、出力時に記録領域の重ね合わせを行う。図 2 に図 1 の光学系で出力した体積型ホログラムの再生像を示す。図に示すように鮮明な再生像は得られているが、像を拡大してみるとタイル状の模様が見えてしまっている。これは、要素ホログラムで記録される像が正確に露光されていないためである。しかし、正確に露光するには光学系の各素子の位

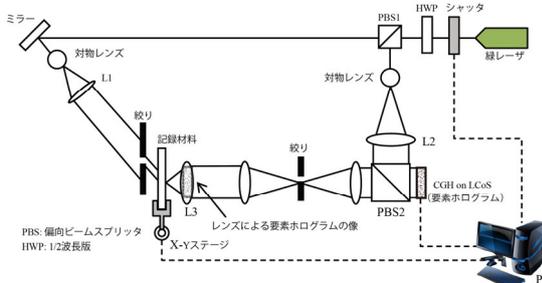


図 1 申請時の体積型ホログラムプリンタ

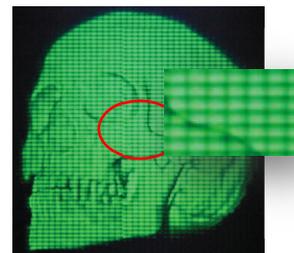


図 2 再生像 (申請時)

置が正しいこと、X-Y ステージの移動量が正確であることが条件であるため非常に難しい。そこで涌波らは記録領域を重ねることで再生像の質の向上ができることを報告した^⑤が、全領域を4回露光することになるため、撮影時間が4倍になってしまうという問題点がある。そこで、我々は重ねる領域の一部を変更する手法を提案することで、再生像の質の向上と質の維持が行えるかを検証した。

3. 研究の方法

(1) フルカラー撮影光学系の構築

フルカラーの体積型ホログラムを出力することを可能にするため、図2のような再生光学系の構築を行う。図3の光学系では、新たに赤と青のレーザを追加している。また、図1との違いとしてアイソレータ、AOM(音響光学素子) シャッタを導入している。アイソレータはレーザへの戻り光の影響を少なくするもので、今回使用するレーザのパワーが100 mWを超えるため、レーザの保護のために導入した。また、シャッタを機械式のものからAOM式のものに変更した理由として、体積型ホログラムでは1度の撮影でシャッタを切る回数が数千回から数万回必要であり、機械式のものでは数度の撮影で金属疲労を起こしてしまい撮影失敗の要因となるからである。本光学系では、1枚のLCoSに3色のレーザ光が照射されるシステムであり、直前のレンズやLCoS以降の光学素子に関しては、色収差の補正されたレンズを用いる必要がある。実際の撮影では、赤・緑・青の干渉縞を順次LCoSに表示し、シャッタを開いて露光する、一か所での露光終了後、次の露光位置にX-Yステージを利用して移動させる、を繰り返すことで大型のフルカラー体積型ホログラムを出力可能になる。

研究を進めていく中で、図3の光学系を用いた手法では、鮮明な再生像が得られなかった。そこで、光学系を図4のように変更することにした。体積型ホログラムを記録する感光材料の特性として、後に露光する色の回折効率が落ちてしまう。図4のようにLCoSを3枚利用する光学系に変更することで、3色同時に露光することが可能となる。図4の光学系に変更する際に問題となることとして、まず初めにLCoSから次のレンズまでの距離がレンズの焦点距離と決まっているため、光学部品配置が窮屈になることである。レンズの焦点距離を長くしてしまうと、LCoSに表示した要素ホログラムの回折像がレンズの口径に入らなくなってしまい、正しく像を記録することができない。また、使用するレンズには色収差補正のあるものが必要であるため、本研究では最終的に焦点距離300 mmのレンズを用いることとした。さらに、光学部品を効率的に配置するため、LCoSとPBSが一体となるような治具を設計することで、光学系を組めるようにした。次にシステムの制御の変更が必要となる。図4のような光学系にすることで、各LCoSに異なる干渉縞を同時に表示し、露光開始タイミングをそろえ、レーザパワーに応じてシャッタを閉じるタイミングを制御する必要がある。

(2) 撮影制御システムの構築

図3,4の光学系において、コンピュータ制御しなければならぬ機器はシャッタ、LCoS、X-Yステージである。体積型ホログラムプリンタの撮影の1サイクルは、図5のような流れである。図3の光学系では、1色の露光後に他の色成分の要素ホログラムの記録が行われるため、さらに2回干渉縞の読み込みと露光時間が増える。図4の光学系では、それぞれのレーザパワーに従った露光時間となる。これらの機器を制御するため、我々のグループでは独自のプログラムを作製している。構成としては、パソコン側で動作するC#で書かれたプログラムとシングルボードコンピュータ側で動作するPythonで書かれたプログラムである。パソコン側では干渉縞の表示とステージを制御し、シングルボードコンピュータ側ではシャッタの制御を行っている。2つの機器はネットワークでつながっており、各動作の同期が取得可能なように作製した。

(3) 干渉縞計算の高速化

これまでの干渉縞計算はCPUを用いて計算を行っていた。また、計算の高速化のため近い画

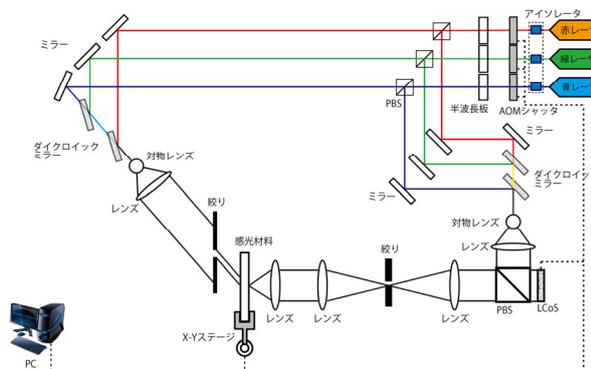


図3 フルカラー体積型ホログラムプリンタ 1

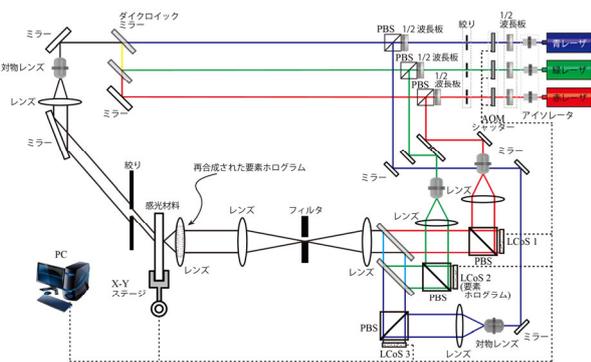


図4 フルカラー体積型ホログラムプリンタ 2

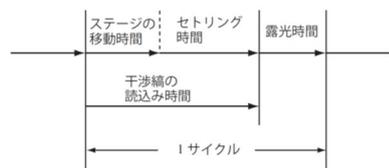


図5 撮影の1サイクル

素との差分を用いる手法を用いているため、多少ではあるが計算誤差が生じてしまっていた。そこで、GPUを利用した計算プログラムに変更を行う。体積型ホログラムでは要素ホログラムの干渉縞を計算するが、一般的なフレネルホログラムと異なり、各要素ホログラムが常に中心に来るように計算を行う。これは、使用するSLM（空間光変調器）の空間分解能が低いためである。そのため、計算するには物体データの位置を調整しながら計算する必要がある。本研究では、3色の要素ホログラムが必要であるため、物体データについてもフルカラーのデータを生成する必要がある。フルカラーの3次元データから各波長に対応した、要素ホログラム用の干渉縞をGPUを利用して計算できるようにプログラムを作製する。

(4) 質の高い再生像の出力のための記録領域の重ね合わせ

これまでの出力結果では、図1のようなタイル状の模様が再生像に生じていた。これは、撮影時のX-Yステージの移動誤差や光学系の調整の不十分さからくるものであるが、正確に合わせることは困難である。そこで、図6のようなフィルタ処理を施し、再生像の一部を重ねることでタイル状の模様を抑制できると考えた。実際の計算処理では、計算された干渉縞にフーリエ変換を施し、空間周波数領域にて重ねる領域の外側に従い線形に輝度を低下させるようなフィルタ処理を施す。フィルタ処理を施した後にフーリエ逆変換を施し、空間領域の干渉縞に戻す。この干渉縞を使用して体積型ホログラムの出力を行う。

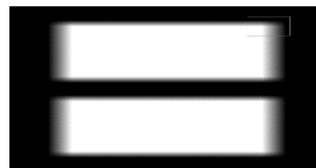


図6 フィルタ

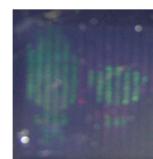
4. 研究成果

(1) フルカラー撮影システムの構築

初めに既存の光学系に赤レーザを組み込んで、緑と赤のマルチカラーのホログラムの記録・再生を行った。図7に記録使用したCG物体と再生像を示す。再生された像を見ると中間色である黄色も出ており、マルチカラーの像を出力することはできた。しかし、像の回折効率が悪く鮮明な像が出たとは言えない。これは、シャッタが不安定な挙動をしており、露光量を安定させることができなかったことが要因と考えている。シャッタについては、その後修理を行い安定した動作ができるようになった。



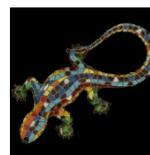
(a) 記録物体



(b) 再生像

図7 マルチカラーホログラム

次に、図3の光学系の構築を行いフルカラーの像の記録・再生を行った。図8に記録使用したCG物体と再生像を示す。再生された像を見るとフルカラーの像は出ているが、鮮明な像とは言えない。元の記録物体に対しても正しく色が再現されているとは言えない。これは、原理で述べたように時分割で記録した際の記録材料の特性や、使用した青レーザのパワーが一定ではなく不安定な状態になっており最適な露光量で記録できなかったことが原因であると考えている。青レーザについては、その後修理を行い安定した出力が得られるようになっていく。



(a) 記録物体



(b) 再生像

図8 マルチカラーホログラム

最後に、図4の光学系であるがLCoS部分の光学系を決まった範囲に収める設計を行い、3つのLCoSを問題なく配置できることを確認した。また、新しい光学系で単色ではあるが再生像を得られることを確認した。研究期間終了後引き続き光学系構築を行い、鮮明なフルカラーの再生像を得られるよう実験を続けていく予定である。

(2) GPUを利用した計算の高速化

干渉縞計算の速度を測定するにあたり、総点光源数428,887点の物体データを使用し、要素ホログラムの数が 40×57 、解像度が $1,920 \times 1,080$ のホログラム計算した。また、計算機として、CPU: Corei7-4770, GPU: GTX1080, GTX1070を使用して計算を行った。近似なしのCPU計算では約430分、近似有のものでは約90分となった。これに対して、GPUを用いた計算では、GTX1080一台を使用した場合は、約6.0分、マルチGPUを設定し、GTX1070とGTX1080を計算に用いた場合は約3.3分計算に要した。この結果、既存研究の近似計算を使用するものに比較しても、シングルGPUで約15倍、マルチGPUで約27倍の計算の高速化を実現することができた。

(3) 質の高い再生像の出力のための記録領域の重ね合わせ

フィルタ処理を施した干渉縞を用いて再生像のシミュレーションを行った(図9)。図からもわかるように重なっている部分が滑らかに変化しており、この要素ホログラムを使用することで、再生像の質の向上が見込めると考えられる。現在光学系を構築中であり、光学系が組みあがり次第実際の再生像で効果を検証する予定である。



図9 フィルタ処理を施した要素ホログラムを使用した再生像シミュレーション

<引用文献>

- ① 山口雅浩:「ホログラムプリンターの基礎」, HODIC (2007)
- ② M. A. Klug et al.“ Method and apparatus for recording one-step, full-color , full-parallax, holographic stereograms,” U.S.Patent (2001)
- ③ 山口, 宮本, 吉川:「Volume hologram printer to record the wavefront of three-dimensional objects」, Optical Engineering (2012)
- ④ 神代, 山口, 吉川:「GPU を用いた計算機合成フルカラーイメージホログラムの高速計算」, 映像情報メディア学会技術報告 (2013)
- ⑤ K. Wakunami et al. “Wavefront printing technique with overlapping approach toward high denition holographic image reconstruction,” SPIE (2016)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hangbo Hua, Takeshi Yamaguchi, and Hiroshi Yoshikawa
2. 発表標題 Partially Overlapping Printing to Improve Image Quality of Volume Hologram Printer - Numerical Simulation -
3. 学会等名 OSA Digital Holography and 3-D Imaging (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣橋美葵, 山口健, 吉川浩
2. 発表標題 波面再生型フルカラー体積ホログラムプリンタの作製
3. 学会等名 ホログラフィックディスプレイ研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 廣橋美葵, 山口健, 吉川浩
2. 発表標題 露光量特性に基づく波面再生型フルカラー体積ホログラムの出力
3. 学会等名 映像情報メディア学会技術報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口健, 吉川浩
2. 発表標題 2種類のCGH用プリンタの開発と種々のCGHの出力例
3. 学会等名 ホログラフィックディスプレイ研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Miki Hirohashi, Takeshi Yamaguchi, Hiroshi Yoshikawa
2. 発表標題 Development of Color Volume Hologram Printer
3. 学会等名 IWAIT 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齋藤正輝, 廣橋美葵, 山口健, 吉川浩
2. 発表標題 マルチカラー体積型ホログラムのマルチGPUを用いた高速計算
3. 学会等名 映像表現・芸術科学フォーラム2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	吉川 浩 (YOSHIKAWA Hiroshi) (20182735)	日本大学・理工学部・教授 (32665)	