

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21294

研究課題名（和文）ホログラフィ向けドメイン特化型プロセッサの開発

研究課題名（英文）Development of Domain-Specific Processors for Holography

研究代表者

山本 洋太（Yamamoto, Yota）

東京理科大学・工学部情報工学科・助教

研究者番号：50906740

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：電子ホログラフィは3次元情報再生の究極の手法とも呼ばれるが、計算機ホログラム（CGH: Computer-Generated Hologram）の計算が複雑でリアルタイム処理が難しく、実用化への目処が立っていない。電子ホログラフィ計算の方式の内、位相型CGHの計算は複雑だが、良質な再生像が得られるため実用が望まれている。本研究では、FPGAを活用して、専用プロセッサを開発することで、電子ホログラフィ計算を高速化した。比較的計算負荷の低い振幅型CGHから位相型CGHを計算する新たな専用計算機を開発することで、位相型CGHの計算時間を半減させ、リアルタイム3次元映像再生に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元映像技術への注目が高まっているが、現在市販されている映像提示装置は、人間が奥行きを知覚するために必要な奥行き情報を完全には再現できていない。そのため、長時間の使用には適さず、3D酔いと呼ばれる吐き気や眠気を感じるなど応用への大きな障壁となっている。

電子ホログラフィは理想的な3次元映像提示手法と呼ばれている。しかし、必要とされる計算量が実用化を困難にしている。本研究では、より実用化が困難とされてきた位相型電子ホログラフィ計算の高速化に成功した。より良質な再生像が得られる位相型での電子ホログラフィ実用化への新たな指針を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：Electroholography is called the ultimate method of reproducing three-dimensional information. However, the computational complexity of computer-generated holograms (CGH) makes them difficult to process in real-time, and their practical application is not yet in sight. Among the electroholography calculation methods, phase-based CGH calculation is complicated. However, it is expected to be put to practical use because of its ability to produce high-quality reproduced images. In this study, we developed a dedicated processor using an FPGA to accelerate electroholography calculations. By developing a new special-purpose computer that calculates phase-type CGH from amplitude-type CGH with a relatively low computational load, the computation time for phase-type CGH was reduced by half, and real-time 3D image reproduction was successfully achieved.

研究分野：高性能計算

キーワード：3次元映像 高性能計算 ホログラフィ FPGA ハイパフォーマンスコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

電子ホログラフィは、3次元情報を忠実に再生可能な唯一知られた方式である。究極の3次元映像提示手法とも呼ばれ、注目を集めている。近年、Head Mounted Display (HMD) を中心として利用されている両眼視差方式は、システム構築が容易という大きな利点を持ち、Virtual Reality (VR) の要素技術として、エンターテインメントや教育、医療など様々な分野で活用され始めている。一方で、目のピント調節距離と眼球の回転から得られる輻輳距離により脳が認識する奥行きがずれてしまう「輻輳調節矛盾」という問題点があり、目(知覚)への負担は大きい。3D酔いと呼ばれる症状を起こすなど、長時間の使用には適していない。また、子どもの使用は制限されるなど3次元映像技術発展への大きな障壁となっている。

電子ホログラフィでは完全な3次元映像を再生可能であるため、物体そのものを見ていることと同じ効果が得られる。輻輳調節矛盾が起こることもなく、理想的な3次元映像技術ともいわれている。この方式では、光の振る舞いをコンピュータでシミュレーションすることで得られる計算機ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) を計算する必要があるが、非常に高い計算機性能を必要とする。様々な計算アルゴリズムの提案がされているが、現状の計算機性能では十分な性能を得られておらず、電子ホログラフィの実用化は困難な状況が続いている。

2. 研究の目的

本研究では、読み書き可能な Field Programmable Gate Array (FPGA) にホログラフィ計算に特化した回路を実装し、高速な専用プロセッサを開発することで実用化への指針を示す。特に、位相型電子ホログラフィ計算の高速化に着目する。

電子ホログラフィで計算する CGH には位相型と振幅型の2種類が存在する。位相型は、振幅型と比べ、回折効率に優れ良質な再生像を得られるため、より実用化が望まれている。一方で、計算の複雑さが増すため、一層実用化は困難とされてきた。

3. 研究の方法

先行研究では、振幅型と位相型の CGH を計算する専用計算機を開発した。電子ホログラフィ計算では専用計算機による計算高速化の効率は高いとされてきたが、位相型の電子ホログラフィ専用計算機の計算性能は振幅型に比べ半分まで低下していた。これは、位相型計算のためにメモリや計算回路が振幅型に比べ2倍近く増加し、その分、並列数が半減したためであった。CPU や Graphics Processing Unit (GPU) の計算時間は、振幅型を1とした場合、位相型計算に必要な時間は1.1~1.5倍増加する程度であるため、専用計算機では位相型の計算は不利であった。先行研究で開発された位相型電子ホログラフィ専用計算機の計算性能は、GPU (NVIDIA GeForce GTX 1080Ti) と同等の計算パフォーマンスであった。

本研究では、位相型 CGH 計算にヒルベルト変換を新たに採用した電子ホログラフィ専用計算機「HORN-9」の開発を行った。HORN-9 実装には、Xilinx Alveo データセンターアクセラレータボードを利用した。Alveo は Xilinx 社がリリースする FPGA ボードであり、拡張ボードとして、PC に接続して利用する。図1に示すように FPGA ボードを4台 PC に接続したシステムを構築した。計算機の一部は支援費により購入した。

電子ホログラフィ専用計算回路が各 FPGA ボードに実装されており、4台が並列に1フレームの CGH を計算する。それぞれの FPGA ボードに実装された専用計算回路は、振幅型 CGH の計算回路 (図2中 RRU: Recurrence Relation Unit) と振幅型 CGH からヒルベルト変換を利用して位相型 CGH を計算する回路 (図2中 HTU: Hilbert Transform Unit) から構成する (図2)。

図2中の RRU と HTU はひと組で CGH の1列を計算する。さらに、ひと組で1,920画素の計算が可能であり、全体で10組搭載したため、一度に19,200画素を計算可能な並列計算機である。

回路構成の特徴として、RRU と HTU が CGH を一時保存する RAM (CGH RAM) を挟んだ構成となっている。ここで、振幅型 CGH 計算 (RRU) に必要な計算量は、CGH の横と縦の画素数をそれぞれ



図1 電子ホログラフィ専用計算機システムの全容。

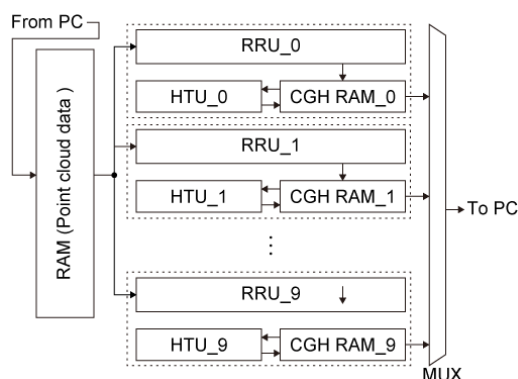


図2 専用計算回路のトップブロック図。

N_x, N_y , 点群数を M とすると, 計算量は $O(N_x N_y M)$ と表される. 一方で, ヒルベルト変換は $O(N_y \times N_x \log N_x)$ となり, 点群数に依存しない計算量となる. 本研究では, 計算量の性質が異なる 2 つの回路を同時に動作させることで, ヒルベルト変換にかかる計算時間を遮蔽可能な回路を開発した. すなわち, RRU の計算にかかる時間が HTU で計算にかかる時間よりも大きい場合, HTU (位相型 CGH 生成) にかかる計算時間は遮蔽され, RRU のみにかかる計算時間で位相型 CGH が計算可能となる. (1), (2) に振幅型 CGH を計算する回路の構成と位相型 CGH を生成する回路の構成をそれぞれ示す.

(1) 振幅型 CGH 計算には漸化式法と呼ばれる FPGA 実装向けの計算アルゴリズムを採用した回路を実装した. 図 3 に示すように, CGH の座標値である x_a, y_a と点群データである x_j, y_j, ρ_j を入力として CGH の x 軸方向に関して計算を行う. 本研究では, $1,920 \times 1,080$ 画素の CGH 向けに, 一度に 1,920 画素の計算を行う構成とした.

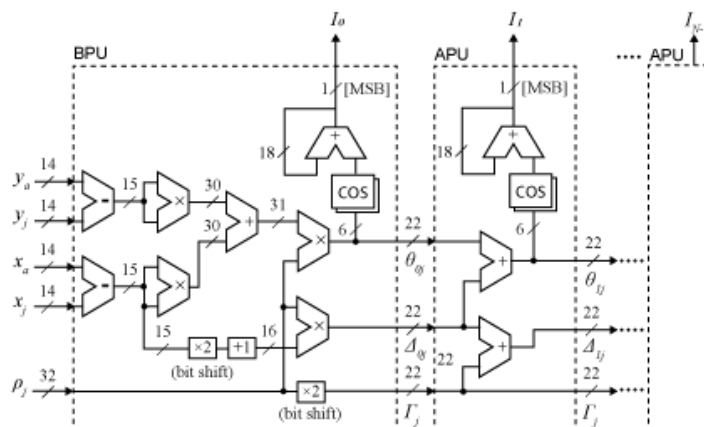


図 3 振幅型 CGH を計算する回路 (RRU) のブロック図.

(2) 図 4 はヒルベルト変換を利用して振幅型の CGH から位相型の CGH を計算する回路のブロック図である. 図 4 中の FFT/IFFT は fast Fourier transform (FFT) と inverse fast Fourier transform (逆 FFT) を行うユニットである. FFT 計算された振幅分布は図 4 の回路内部で生成されるヒルベルト変換 $H(f)$ を乗算し, すべての行に関して逆 FFT を実行する. その後, 値の正規化を行い, arctangent を求めるテーブル (atan) により, 位相型 CGH が求まる.

このとき, 図 4 が占める図 3 の振幅型 CGH を計算する回路 (RRU) に対するリソース使用割合は 1% 以下である. RRU のリソースが支配的であり, HTU 実装のためのリソースはほぼ無視できるため, 振幅型 CGH 計算回路の並列数は HTU が無い場合と比べ, 低下しない.

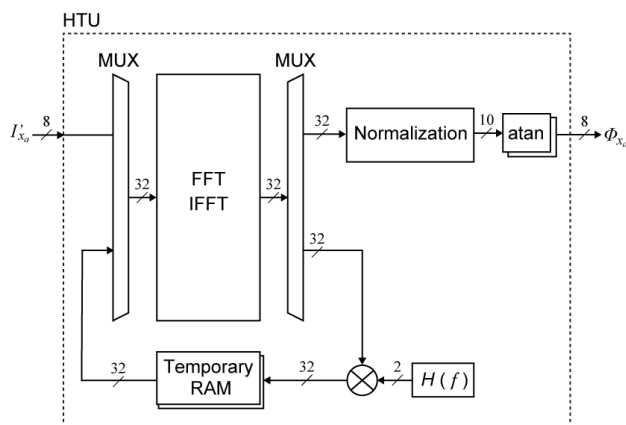


図 4 位相型 CGH 生成回路 (HTU) のブロック図.

4. 研究成果

研究成果は大きく 2 つに分けられる. (1) より計算負荷が高く, 計算時間削減が困難とされてきた位相型 CGH を振幅型 CGH と同等の計算時間 (計算時間では半減) で計算可能であることを示した. (2) 2K, 4K 画質の CGH で, 40 万点の点光源モデルをリアルタイムで 3 次元映像再生可能であることを示した. (1), (2) それぞれの成果に関して以下に述べる.

(1) 本研究では, 振幅型 CGH の計算と位相型 CGH 生成に必要な計算量の性質の違いに着目し, 専用計算回路を構成することで, 振幅型 CGH 計算と同等の計算時間で位相型計算を可能にした. さらに, 振幅型 CGH の計算回路の集積度を改良により向上することで, 先行研究の HORN-8 に比べ, 位相型 CGH 生成回路による改良により 2 倍, 振幅型 CGH 計算回路の改良により 4 倍, 全体で 8 倍の高速化に成功した. これは, 単体 (チップ・ボード) 比較で, GPU (NVIDIA GeForce RTX 3080Ti) と

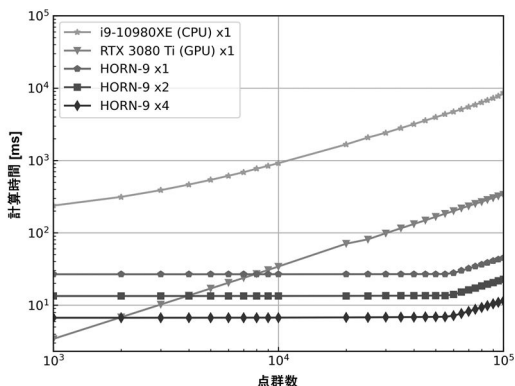


図 5 CPU・GPU・FPGA (HORN-9) の 1920×1080 pixel の位相型 CGH 計算にかかる点群数ごとの計算時間比較.

比べ7倍，CPU (Intel i9-10980XE) と比べて170倍もの高速化に成功した．図5は，CPU・GPU向けの計算アルゴリズムのうち最も高速であった手法と，HORN-9の計算時間の比較である．図5より，HORN-9はCPUやGPUと異なり，線形の計算時間になっていない．これは，専用計算回路の工夫の結果である．点光源数が6万点まで一定で0.027 sかかっている．これは，ヒルベルト変換にかかる時間 (HTUの計算時間) と等価である．ヒルベルト変換の計算量は $O(N_y \times N_x \log N_x)$ であり，点群数によらず一定である．データ数 (点群数) が少ないときは，RRUの計算時間は短く，HTUの計算時間が隠蔽できず，HTUの計算時間がそのまま全体の計算時間となる．本研究のアーキテクチャでは，6万点以上でRRUにかかる時間がHTUにかかる時間を超えて，HTUの計算時間が隠蔽され，結果として，振幅型と位相型の計算にかかる時間が等価になる．

(2) 加えて，FPGAボードを4台利用することで，40万点の点光源モデルのリアルタイム3次元映像再生に成功した．図6は，40万点で表した衛星の3次元モデルの3次元再生像である．点光源モデルであるため，ガラス細工のような見た目であるが，高精細に表示できていることがわかる．

最終的に，65,000点の点群から 1920×1080 pixel にかかる時間は，FPGAボードが2台で0.015 (67 fps)，4台で0.008 (125 fps) である．CPU単体と比べ，4台構成で最大600倍の高速化を達成した．現在ホログラフィ向けに利用

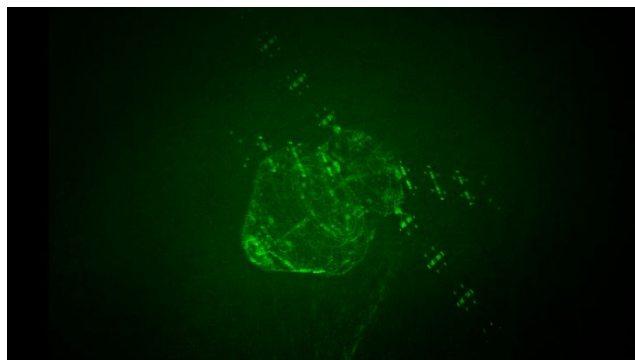


図6 40万点の点群の再生像例．

されているCGH表示デバイスの画素サイズである 1920×1080 pixel では上限を超えた性能を達成した．この性能は4K ($3,840 \times 2,160$ pixel) での表示であっても，30fpsを達成する．より困難とされてきた位相型電子ホログラフィ計算において，専用計算機の開発により実用に十分な性能が達成可能であることを示すことができた．これらの成果は，光学の分野で最も権威あるアメリカ光学会 (OPTICA) のトップジャーナル Optics Express に採択された [Y. Yamamoto, et al., Optics Express, 30(21), 2022]．また，関連して，1件の国内発表，1件の国際学会発表，2編の書籍で発表を行った．

専用計算機開発により，実用化がより望まれる位相型電子ホログラフィ実用化への指針を示すことができた．本研究では，基本原理を検証するために，比較の実装が容易な点光源モデルを利用した．そのため，3Dモデルとしては表現に限界がある．しかし，原理的にはポリゴンモデルといった一般的な3Dモデルにも利用可能であると考えられる．今後はより3D表現の幅が広いポリゴンモデルなどを利用した手法への適用を検討していきたい．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamamoto Yota, Shimobaba Tomoyoshi, Taniguchi Yukinobu, Ito Tomoyoshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Twenty Thousand Parallel Special-Purpose Computer for Phase-Type Electroholography Using the Hilbert Transform	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Display Workshops	6. 最初と最後の頁 428 ~ 428
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.36463/idw.2021.0428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Yota, Shimobaba Tomoyoshi, Ito Tomoyoshi	4. 巻 30
2. 論文標題 HORN-9: Special-purpose computer for electroholography with the Hilbert transform	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 38115 ~ 38115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.471720	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本洋太、下馬場朋禄、角江崇、伊藤智義
2. 発表標題 ヒルベルト変換を用いた位相型電子ホログラフィ専用計算機の開発
3. 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yamamoto Yota, Shimobaba Tomoyoshi, Taniguchi Yukinobu, Ito Tomoyoshi
2. 発表標題 Twenty Thousand Parallel Special-Purpose Computer for Phase-Type Electroholography Using the Hilbert Transform
3. 学会等名 International Display Workshops（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 執筆者:64名、技術情報協会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 576
3. 書名 VR / AR技術における感覚の提示、拡張技術と最新応用事例	

1. 著者名 分著	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 386
3. 書名 Hardware Acceleration of Computational Holography	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------