

マルチ FPGA による位相型電子ホログラフィ専用計算機の開発 Special-purpose computer for phase-based electroholography using multiple FPGAs

山本 洋太*
Yota Yamamoto

1 はじめに

3次元映像技術は観察者へ高い臨場感を与え、複雑な現象への理解を助ける。教育・工学・医学・娯楽など様々な分野での応用が期待されている。両眼視差方式は、ヘッドマウントディスプレイで利用されている主要な立体映像提示手法ではあるが、人間が3次元物体を認識するために必要な奥行き手がかりをすべて再現できていない。奥行き手がかりの欠如は、吐き気や眠気といった3D酔いの原因となり、3次元映像技術実用化への大きな障壁となっている[1]。

電子ホログラフィ (EH: electroholography) [2] は、すべての奥行き手がかりを再現でき、理想的な3次元提示手法として注目を集めている[3]。光の回折を利用して光の波面を再現するEH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合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) を利用する。一方で、CGHの計算に必要な膨大な計算量を一因として、実用化には至っていない。様々なアルゴリズムの提案が行われているが、リアルタイム処理に十分な性能は得られていない[4]。

我々はこれまでに、Field-Programmable Gate Array (FPGA) を用いて、専用計算機によるEH計算の高速化を目指してきた。本稿では、EH向け専用計算回路を実装したマルチFPGAシステムを構築した。4台のFPGAボードを利用したEH向けの8万並列計算コアの実装に成功し、40万点の点群をリアルタイムに表示することに成功した。開発したシステムのアーキテクチャについて紹介する。

2 アルゴリズム

点群モデルを利用したCGHの計算式は、式(1)、式(2)で表される。

$$u_c(x_a, y_a) = \sum_{j=1}^M A_j \exp(i2\pi\theta_{aj}) \quad (1)$$

$$\theta_{aj} = \rho_j (x_{aj}^2 + y_{aj}^2) \quad (2)$$

ここで、 $\rho_j = 1/(2\lambda|z_j|)$ 、 $x_{aj} = x_a - x_j$ 、 $y_{aj} = y_a - y_j$ である。 λ は光波長、 x_a 、 y_a はCGH上の座標、 x_j 、 y_j 、 z_j は点群の座標、 M は点群の総数、 A_j は点群の振幅強度(本研究では1に固定)を表す。この式は $z_j \gg x_j, y_j$ の条件下で成り立つ。

式(1)で得られるCGHは複素ホログラムと呼ばれる。現状のディスプレイでは、複素ホログラムをそのまま表示することはできず、位相分布か振幅分布をとり出して表示する必要がある。位相型ホログラムの場合は式(3)を用いて位相分布をとり出す。

$$u_p(x_a, y_a) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{u_c\}}{\text{Re}\{u_c\}} \quad (3)$$

ここで、 $\text{Re}\{u_c\}$ 、 $\text{Im}\{u_c\}$ は複素分布から実部と虚部をそれぞれとり出す関数である。振幅型ホログラムは $\text{Re}\{u_c\}$ を用いて実部をとり出すことで作成できるが、計算コストの関係から式(1)ではなく、式(4)を用いて直接計算可能である。

$$u_a(x_a, y_a) = \sum_{j=1}^M A_j \cos[2\pi\theta_{aj}] \quad (4)$$

2.1 漸化式

ハードウェア実装向けに計算フローを改良した計算手法に漸化式法がある[5]。ここで新たな変数として、式(5)、式(6)を導入する。

$$\Delta_{0j} = \rho_j(2x_{0j} + 1) \quad (5)$$

$$\Gamma_j = \frac{1}{\lambda z_j} = 2\rho_j \quad (6)$$

はじめに式(2)を θ_{0j} すると、CGH上のx軸方向のn番目の θ_{nj} は式(7)で表される。

$$\theta_{nj} = \theta_{(n-1)j} + \Delta_{(n-1)j} \quad (7)$$

ここで、 Δ_{nj} を式(8)により更新する。

$$\Delta_{nj} = \Delta_{(n-1)j} + \Gamma_j \quad (8)$$

x軸方向の隣り合う θ_{nj} に関して、式(7)と式(8)の計算を繰り返すことで、高速に計算可能である。

2.2 ヒルベルト変換

ヒルベルト変換を利用して、位相型CGH計算を高速化する取り組みが行われている。1次元Fast Fourier Transform (FFT)を用いたヒルベルト変換は式(9)、式(10)で表される[6]。

$$\hat{h}(x) = \text{FFT}^{-1}[\text{FFT}[u_a(x)]H(f)] \quad (9)$$

$$H(f) = \begin{cases} 1 & (f = 0) \\ 1/2 & (f < W) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (10)$$

FFT、 FFT^{-1} は1次元FFTの順方向と逆方向の変換を表す。 W は画像の横幅を表す。ヒルベルト変換を用いることで、振幅型CGHから複素ホログラムを生成することができる。複素ホログラムから式(3)を用いて位相分布をとり出すことで、位相型CGHを計算可能である。

3 ハードウェアデザイン

専用回路実装には、Xilinx Alveo U250 データセンターアクセラレータボード (U250) を利用した。図1に示すようにU250を4台PCに接続したシステムを構築した。位相型CGHのEH専用計算機として、漸化式法[5]とヒルベルト変換[6]をベースとした回路実装を行った。

* 東京理科大学工学部

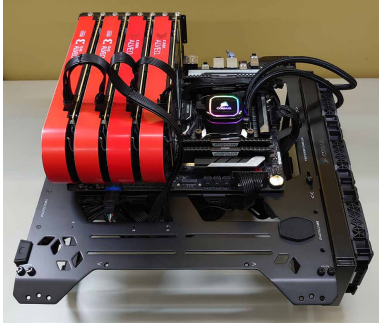


図 1 EH 専用計算機システムの外観。赤いカードが U250 である。

漸化式法の計算量は、点群数を M 、CGH の縦の画素数を N_x 、横の画素数を N_y とおくと、 $O(MN_x N_y)$ 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。二つの計算量の特性が異なるアルゴリズムを組み合わせることにより、一方にかかる計算時間を隠蔽し、高速な計算が可能である。

図 2 に専用計算回路のブロック図を示す。Recurrence relation unit (RRU) は漸化式を計算するユニット、Hilbert transform unit (HTU) はヒルベルト変換と位相変換 (式 (3)) を行うユニットである。RRU と HTU をひと組として、十組搭載した。ひと組で 1,920 画素を一度に計算可能であり、1 台の U250 で 19,200 画素、4 台で 76,800 画素を一度に計算可能である。

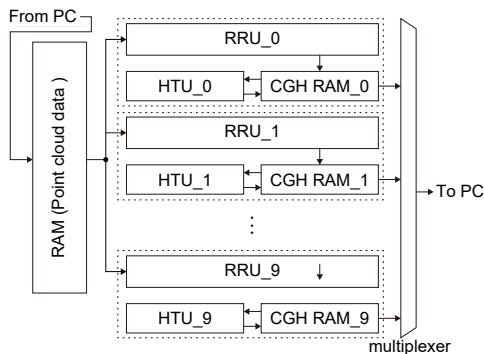


図 2 EH 専用計算回路のブロック図 (1 台)。

4 計算パフォーマンス

CPU (Intel i9-10980XE, 18 cores), GPU (NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti, 10240 CUDA cores) と位相型 CGH 計算時間の比較を行った。その結果、提案専用計算機は、シングルノード比較で GPU と比べ 7 倍、CPU と比べて 170 倍の高速化を達成した。1,920 × 1,080 画素の CGH 計算にかかる時間と点群数の関係を図 3 に示す。

図 3 より、提案システムは、CPU や GPU と異なり線形の計算時間になっていない。これは、専用計算回路のアーキテクチャが原因である。1 台の場合、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。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、本稿のアーキテクチャ

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る。

65,000 点の点群から 1,920 × 1,080 画素にかかる時間は、U250 1 台で 30.0 ms (33 fps), U250 2 台で 15.1 ms (66 fps), 4 台で 7.6 ms (132 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。

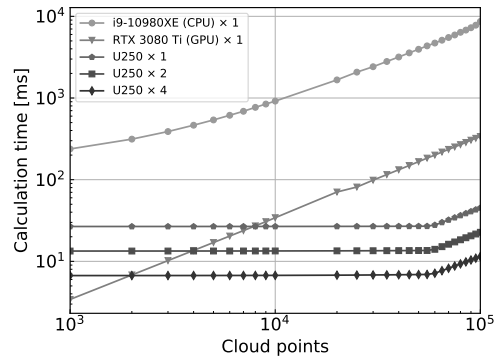


図 3 位相型 CGH 計算にかかる点群数ごとの計算時間。

開発した専用計算機システムを用いて計算した 40 万点の CGH の再生像を図 4 に図示する。

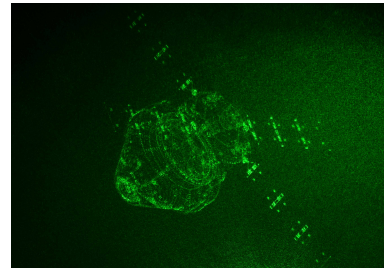


図 4 40 万点のリアルタイム 3 次元再生像の様子。

5 おわりに

本稿では、EH 計算高速化のための専用計算機システムの開発を行った。専用計算機を 4 台搭載したシステムは、65,000 点の点群から 1,920 × 1,080 画素の CGH を 7.6 ms (132 fps) で計算可能である。シングルノードの比較で、GPU と比べ 7 倍、CPU と比べて 170 倍高速化を達成した。また、CPU 単体と比べ、4 台構成で最大 600 倍高速化し、40 万点の点群のリアルタイム再生に成功した。

今後は計算ユニットの比率の最適化、より高速なディスプレイを利用した大規模点群の再生を行いたい。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 21K21294 により行われました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] G. Kramida, *IEEE Transactions on Vis. Comput. Graph.*, 22, 1912–1931, 2016.
- [2] P. St-Hilaire, et al., *Proc. SPIE*, 1212, 174–183, 1990.
- [3] S. Reichelt, et al., *Proc. SPIE*, 92–103, 2010.
- [4] P. W. M. Tsang, T.-C. Poon, and Y. M. Wu, *Photonics Res.*, 6, 837–846, 2018.
- [5] T. Shimobaba, et al., *Comput. Phys. Commun.*, 138, 44–52, 2001.
- [6] T. Shimobaba, et al., *OSA Continuum*, 3, 1498–1503, 2020.