

ヘテロ型マルチ GPU クラスタシステムによる
4K 解像度位相型実時間電子ホログラフィ
Real-time 4K-resolution phase-type electroholography
using heterogeneous multi-GPU cluster system

土居 明可[†]
Haruka Doi

中谷 優月[‡]
Yuzuki Nakatani

高田 直樹[‡]
Naoki Takada

1. はじめに

電子ホログラフィは、次世代の立体映像技術として期待されている [1]。計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) には振幅型と位相型がある。振幅型 CGH は位相型 CGH の計算量の半分である。しかし、CGH に対して再生像と面対称の位置にある共役像が再生される。そのため、鮮明な再生像を得るためには、共役像と重ならないようにする必要があり、再生できる領域が狭くなる。一方、位相型 CGH は計算量が多くなるが、再生像が振幅型 CGH より明るくなる。さらに、位相型 CGH を用いることで共役像が再生されないため、再生像を大きく表示できる。振幅型 CGH および位相型 CGH は共に計算量が膨大で実時間表示は困難となり、未だ実用化されていない。

本研究では、三次元物体を点群で表現したポイントクラウドモデルを用いる。この CGH 計算は画素ごとに計算を独立させることが可能であり、並列化に向いている。また、計算された CGH は画像として出力されることから Graphics Processing Unit (GPU) に適している。これらより、GPU を用いた CGH の研究は盛んに行われている。

近年急速な AI 技術の発展に伴い、GPU の開発スパンは短くなり、世代交代が早まっている。また、GPU の供給量不足や消費電力の増大が問題となっている。そのため、旧世代の GPU の有効活用が望まれる。そこで、本研究では GPU の性能に合わせて CGH 計算処理を分散し、異なる GPU で構成されたヘテロ型マルチ GPU クラスタシステムによる 4K 解像度位相型実時間電子ホログラフィを提案する。さらに、タブレット端末からリアルタイムで像を描画するシステムを実装した。最終的に、約 35 万点からなる三次元物体を 30fps で実時間再生することに成功した。

2. 計算機合成ホログラム (CGH) [2]

三次元物体を構成する点数を N_p 、物体点を点光源とする。フレネル近似を用いて、位相型ホログラム面上の点 $(x_\alpha, y_\alpha, 0)$ における位相 $\phi(x_\alpha, y_\alpha, 0)$ は次式となる。

$$\phi(x_\alpha, y_\alpha, 0) = \tan^{-1} \frac{\sum_{j=1}^{N_p} A_j (\sin X \cos Y + \cos X \sin Y)}{\sum_{j=1}^{N_p} A_j (\cos X \cos Y - \sin X \sin Y)}$$

$$Z = \frac{\pi}{\lambda z_j}, \quad X = Z(x_\alpha - x_j)^2, \quad Y = (y_\alpha - y_j)^2.$$

ここで、三次元物体上の点 j の座標を (x_j, y_j, z_j) とした。 A_j は j 番目の物体点の光強度を示す。 λ は三次元情報の記録に使用される参照光の波長である。

あらかじめ x, y 方向のそれぞれで三角関数の値を保持し、各画素の値を四則演算のみで計算する。

3. ヘテロ型マルチ GPU クラスタシステム

本論文で使用するヘテロ型マルチ GPU クラスタシステムを図 1 に示す。GPU を 1 枚搭載した CGH 表示ノードと、GPU を 6 枚搭載した PC が 4 台からなる CGH 計算ノードで構成される。過去の計算資源を活用するため、計算ノードは 2 種類の GPU (NVIDIA GeForce RTX 3080, NVIDIA GeForce RTX 4090) で構成する。CGH 計算ノードの負荷分散を容易にするため、計算ノードの PC 内は同一 GPU を搭載する。まず、4K 解像度 (3,840 × 2,048) をもつ位相型 CGH における、各 GPU を 1 枚使用したときの計算時間を調べた。その結果、2 種類の GPU の計算時間比は理論性能比と同等であることが確認された。GPU の理論性能をもとに、性能の低い GPU では複数枚の GPU で 1 フレームの CGH を計算させ、負荷分散を行う。RTX 4090 の GPU の理論性能は、RTX 3080 の約 2.8 倍である。このことより、RTX 3080 の CGH 計算ノードでは、3 枚の GPU で 1 枚の CGH を計算するようにグループ化させる。図 1 のシステムに図 2 のパイプライン計算を用いることで、1 枚の GPU を用いた CGH 計算時間よりも短い間隔で表示することが可能となる。GPU 計算ノードの各 GPU グループで動画の各フレームの CGH を計算し、計算された CGH はネットワークを介して表示ノードへ転送する。CGH 表示ノードでは、受け取った CGH 画像を順次空間光変調器 (SLM) に表示する。

256 階調を持つ 4K 解像度 (3,840 × 2,048) の位相型 CGH のデータ量は約 63Mbit である。一般的な 1 Gigabit Ethernet (GbE) を用いる場合、転送時間は 63ms となる。表示時間間隔がリアルタイム再生可能な 30fps (33.3ms) より大きくなり、実現できない。そこで 10 GbE を用いることで、CGH 転送時間によって生じるボトルネックを解消する。

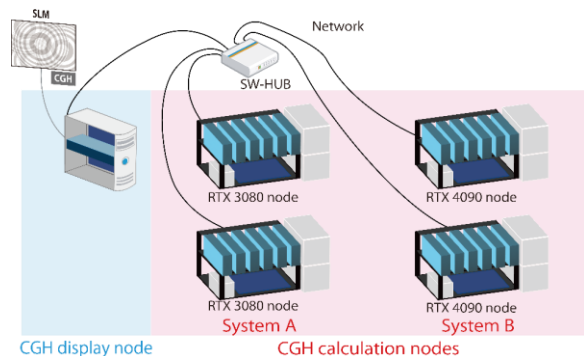


図 1 ヘテロ型マルチ GPU クラスタシステム

[†] 高知大学大学院総合人間自然科学研究科

[‡] 高知大学教育研究部自然科学系理工学部部門

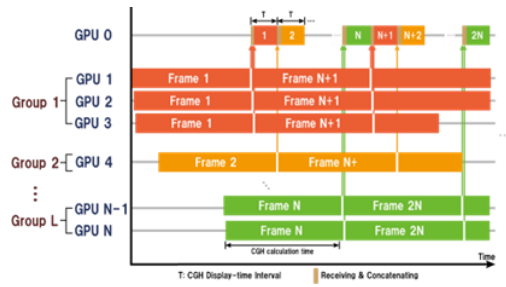


図2 パイプライン方式

4. 結果

4.1 検証環境

図1に示すヘテロ型マルチGPUクラスタシステムを用いて性能評価を行った。CGH表示ノードでは、GPUにNVIDIA GeForce GTX 1080Ti、CPUにIntel Core i7 7800X(クロック周波数 3.5GHz, 6コア)、メモリにDDR4-3200を16GB用いた。また、ソフトウェア環境としては、Linux(Ubuntu 22.04.5 LTS)、CUDA 12.2、Intel MPI 2021.3を使用した。System Aの各ノードでは、GPUにNVIDIA GeForce 3080(理論性能:30.29TFLOPS)を6枚、CPUにIntel Core i7 7800X(クロック周波数 3.5GHz, 6コア)、メモリにDDR4-3200を64GB用いた。ソフトウェア環境としては、Linux(Cent OS Stream 8)、CUDA 11.6、Intel MPI 2021.3を使用した。System Bの各ノードでは、GPUにNVIDIA GeForce RTX 4090(理論性能:85.03TFLOPS)を6枚、CPUにIntel Core i7 7800X(クロック周波数 3.5GHz, 6コア)、メモリにDDR4-3200を128GB用いた。ソフトウェア環境はCGH表示ノードと同様のものを使用した。

4.2 性能評価

図1のシステムを用い、4K解像度(3,840×2,048)を持つCGHの表示時間間隔の結果を図3に示す。図3の結果より、約35万点までの物体点数で構成されたものを30fpsで実時間再生が可能であることがわかった。また、1枚の位相型CGHの転送データは約63Mbitである。10GbE(10 Gigabit Ethernet)を使用したとき、物体点数が71,680点以下においてはCGH計算ノードからCGH表示ノードへの転送時間がボトルネックとなり、表示時間間隔が一定となっている。

90,207点からなる三次元物体モデル「メリーゴーランド」を用いて、図1のヘテロ型マルチGPUクラスタシステムとCPU(Intel Core i7 7800X)による位相型CGH計算時間を比較した。CPUによる位相型CGHの計算では、コンパイラにIntel One API (icx -O3 -xCORE-AVX512)を用いた。CPUでは、1枚の位相型CGHの計算に355秒要した。一方、本システムでは約9.48ミリ秒であった。よって、CPUに比べ約37,450倍もの高速化がされていることがわかった。また、CPUによって作成した位相型CGHからフレネル回折計算によって求めた再生像の結果と、本システムのSystem Bのノードによって計算された位相型CGHから同様にして求めた再生像の結果を比較した。なお、CGHから再生像までの距離は1.5mとした。その結果、PSNRが71.4、SSIMが0.99と良好な結果となり、本手法の妥当性が示された。

5 インタラクティブな描画

図1のCGH表示ノードにタブレット端末を接続し、タブレット上のペンの動きに合わせて自由に描画できるように、ヘテロ型マルチGPUクラスタシステムに実装した。ペンの

位置座標データをCGH表示ノードのメモリ上に保存し、その位置座標データをCGH計算ノードからアクセスできるようにした。手書きで描画したデータとSSD上に保存されたメリーゴーランドの三次元物体点データからリアルタイムでCGHを計算し、三次元映像として表示した。

実際に行ったインタラクティブな実時間三次元動画のスナップショットを図4に示す。90,207点からなる三次元物体モデル「メリーゴーランド」の再生像の左上にタブレット端末からリアルタイムで入力された「merry」という文字が同時に映し出されていることが確認できる。

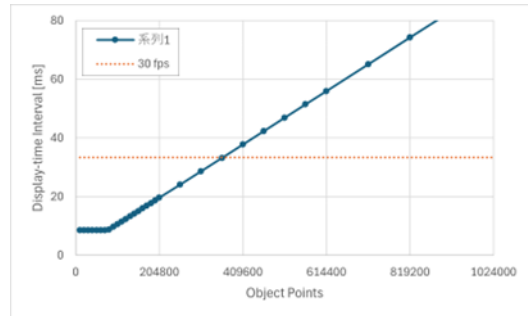


図3 測定結果



図4 インタラクティブな実時間三次元動画再生

6. まとめ

鮮明な再生像を得るために、4K解像度の位相型CGHによる実時間三次元動画再生を行った。リアルタイムで4K解像度の位相型CGHを計算するため、異なるGPUを搭載したヘテロ型マルチGPUクラスタシステムを使用した。搭載しているGPUの理論性能を基に負荷分散を行い、4K解像度の位相型CGHのリアルタイム計算を実現した。最終的に、35万点までの物体点数をリアルタイムで三次元動画再生することに成功した。さらに、タブレット端末を用いることで、リアルタイムで再生されている三次元動画上に、ペンの動きに合わせてインタラクティブに描画することにも成功した。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科研費・基盤研究(C)(課題番号24K15048)によって行われた。

参考文献

- [1] T.Sugie et al, "High-performance parallel computing for next generation holographic imaging", Nature Electron. 1, 254-259 (2018).
- [2] T. Mitani et al, "Fast Calculation of Amplitude-modulated Computer Generated Hologram with Multiple Ampere-GPU Cluster System", Proc. of the International Display Workshops vol. 28, pp.498-500 (2021).