

ヘテロ型マルチ GPU クラスタシステムによるリアルタイム電子ホログラフィ Real-time electroholography using heterogeneous multi-GPU cluster system

成島 佑華[†] 三谷 永久[†] 和田 翔夢[†] 高田 直樹[‡]
Yuuka Narishima Towa Mitani Shomu Wada Naoki Takada

1. はじめに

電子ホログラフィは、「究極の 3D テレビ」になると期待されている。しかし、計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) の計算は膨大であり、CGH 計算の高速化は電子ホログラフィの実用化において大きな課題となっている。

本研究では、物体点群で構成された三次元物体から CGH を計算する。この CGH 計算では、表示デバイスの画素ごとに計算を独立して行えるため、並列計算に向いている。また、計算された CGH は画像として電子表示デバイスに出力されることから Graphics Processing Unit (GPU) に適している。著者らは、更なる高速化のために、複数の GPU で構成されたマルチ GPU クラスタシステムを用いた CGH 計算の高速化を提案している [1-4]。

GPU は年々高性能化しており、世代によってアーキテクチャも変更されている。著者らは、NVIDIA 社の Ampere アーキテクチャ以降の GPU 向けに、三角関数の計算を低減させた CGH 計算アルゴリズムを提案し、同一の GPU で構成されたマルチ GPU クラスタシステムに実装し、顕著な高速化を実現した [5]。しかし、過去の計算資源を活用できれば、更なる計算高速化が可能となる。そこで、本研究では、GPU の性能に合わせて CGH 計算の負荷を分散し、異なる GPU で構成されたヘテロ型マルチ GPU クラスタシステムの開発を行った。

2. 計算機合成ホログラム

2.1 従来の CGH 計算

三次元物体の点数を N_p とする。物体点を点光源とし、ホログラム面上の点 $(x_\alpha, y_\alpha, 0)$ における光の強度 $I(x_\alpha, y_\alpha, 0)$ は、フレネル近似により次式となる。

$$I(x_\alpha, y_\alpha, 0) = \sum_{j=1}^{N_p} A_j \cos \left[\frac{\pi}{\lambda z_i} \left\{ (x_\alpha - x_j)^2 + (y_\alpha - y_j)^2 \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、三次元物体上の点 j の座標を (x_j, y_j) とした。 A_j は j 番目の物体点の光の強度を示す。 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。

2.2 三角関数の計算を低減させた CGH 計算 [5]

式 (1) の \cos 計算部分は、Ampere アーキテクチャに適用するために、加法定理を用いて次のようにする。

$$I(x_\alpha, y_\alpha, 0) = \sum_{j=1}^{N_p} A_j (\cos X \cos Y - \sin X \sin Y) \quad (2)$$

ただし、

[†] 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

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

これにより、式 (2) では、 x, y 方向それぞれであらかじめ三角関数の値を計算し、保持しておく。そして、加法定理により各画素での値を四則演算のみで導出することができる。そのため、式 (2) で三角関数の演算回数を低減することができる。

3. ヘテロ型マルチ GPU クラスタシステム

図 1 に従来のマルチ GPU クラスタシステムを示す [5]。GPU を 1 枚搭載した CGH 表示ノードと、GPU を 6 枚搭載した PC 台からなる CGH 計算ノードから構成される。CGH 計算ノードの各 GPU で動画の各フレームの CGH を計算し、計算された CGH を CGH 表示ノードへネットワークを介して転送する。CGH 表示ノードでは、CGH 計算ノードから転送された CGH 画像を順番に空間光変調器 (SLM) に表示する。図 1 のシステムに図 2 のパイプライン方式を用いることで、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。これまで、CGH 計算ノードでは、同じ速度で計算するために同じ GPU を用いていた。本研究では、過去の計算資源を活用することを想定し、3 種類の GPU (NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti, NVIDIA GeForce RTX 2080 SUPER, NVIDIA GeForce RTX 3080) で構成された CGH 計算ノードを用いてヘテロ型マルチ GPU クラスタシステムを構築した。なお、負荷分散を容易にするため、各 CGH 計算ノードでは、同じ GPU を用いた。まず、 $1,920 \times 1,080$ の解像度を持つ CGH を、NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti, RTX 2080 SUPER, RTX 3080 の GPU を 1 枚使用したときの計算時間を調べた。その結果、各 GPU の計算時間の比は、理論性能比とおおよそ等しいことが確認された。各計算ノードでは、同じ GPU を使用するため、NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti, RTX 2080 SUPER, RTX 3080 のそれぞれの GPU で構成された CGH 計算ノードの計算速度の比は、おおよそ各 GPU の理論性能比と等しい。これらの GPU のうち一番計算が速い RTX 3080 の GPU で構成された CGH 計算ノードでは、各 GPU

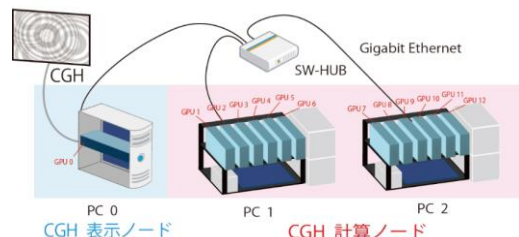


図 1 従来のマルチ GPU クラスタシステム

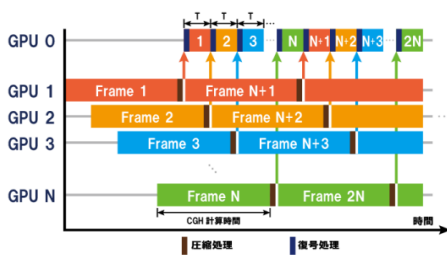


図 2 パイプライン方式

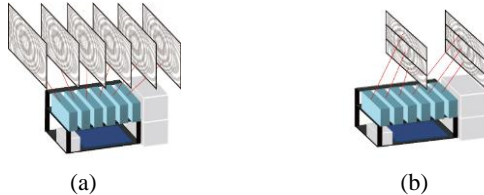


図 3 CGH 計算ノードの負荷分散

で動画の 1 フレームの CGH を計算させる(図 3(a)). 一方, RTX 3080 の GPU の理論性能は, GTX 1080 Ti, RTX 2080 SUPER の理論性能に比べて, それぞれ約 2.7 倍, 約 2.6 倍である. このことから, GTX 1080 Ti, RTX 2080 SUPER の CGH 計算ノードでは, 3 枚の GPU で動画の 1 フレームの CGH を計算するようにした(図 3(b)). このように, GPU の理論性能をもとにして, 性能の低い GPU では複数枚で動画の 1 フレームの CGH を計算させ, 負荷分散を行った.

4. 結果

4.1 検証環境

本研究では, 図 4 に示すヘテロ型マルチ GPU クラスタシステムを使用して性能評価を行った. CGH 表示ノードでは, GPU に NVIDIA GeForce RTX 3070 Ti, CPU に Intel Core i9 11900K (クロック周波数 3.5GHz, 8 コア) を用いた. また, ソフトウェア環境としては, Linux (Ubuntu 20.04.5 LTS), CUDA 11.6, Intel MPI 2021.3 を使用した. そして, CGH 計算ノード A では, GPU に NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti (理論性能:11.34TFLOPS) を 12 枚, CPU に Intel Core i7 9700 (クロック周波数 3.0GHz, 8 コア) を用いた. ソフトウェア環境としては, Linux (CentOS 7.9 x86_64), CUDA 11.2, Intel MPI 2021.3 を使用した. 次に, 計算ノード B では, GPU に NVIDIA GeForce RTX 2080 SUPER (理論性能:11.24TFLOPS) を 6 枚, CPU に Intel Core i7 10700K (クロック周波数 3.8GHz, 8 コア) を用いた. ソフトウェア環境としては, Linux (Rocky Linux 8.7), CUDA 11.7, Intel MPI 2021.3 を使用した. 最後に, 計算ノード C は, GPU に NVIDIA GeForce RTX 3080 (理論性能:30.29TFLOPS) を 12 枚, CPU に Intel Core i7 7800X (クロック周波数 3.5GHz, 6 コア) を用いた. ソフトウェア環境としては, Linux (CentOS Stream 8), CUDA 11.6, Intel MPI 2021.3 を使用した.

4.2 性能評価

図 4 のシステムを使用したとき, $1,920 \times 1,080$ の解像度を持つ CGH の表示時間間隔の結果を図 5 に示す. 図 5 の結果より, 約 81 万点まで 30 fps でリアルタイム再生が可能であることが分かった. また, 各 CGH 転送データは $1,920 \times 1,024$ ビットであるため, 各 CGH 計算ノードから

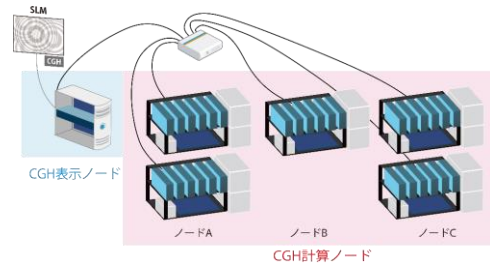


図 4 ヘテロ型マルチ GPU クラスタシステム

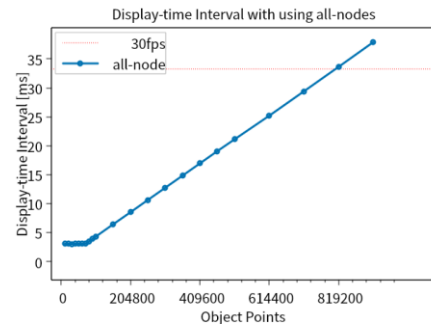


図 5 提案手法による CGH 表示時間間隔

CGH 表示ノードへの転送時間は約 2 ミリ秒である. よって, 図 5 より, 物体点数が 71,680 点以下の場合, 各 CGH 計算ノードから CGH 表示ノードへの CGH 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.

5. まとめ

ヘテロ型 GPU クラスタシステムを構成する GPU の中で一番理論性能が高い GPU では, 1 枚の GPU で 1 枚の CGH を計算し, 理論性能の低い GPU では, 複数枚で 1 枚の CGH を計算させる. これにより, GPU の理論性能に合わせた負荷分散を実現した. 最終的に, 3 種類の GPU を 30 枚搭載した CGH 計算ノードを用いたヘテロ型マルチ GPU クラスタシステムを構築し, 約 80 万点で構成された三次元物体のリアルタイム再生が可能となった.

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 21K11996) および競輪の補助によって行なわれた.

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] N.Takada et al, "Fast high-resolution computer-generated hologram computation using multiple graphics processing unit cluster system", Applied Optics 51, pp. 7303-7307 (2012).
- [3] H.Sannomiya et al, "Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography for 1,200,000 object points using multiple-graphics processing unit cluster", Chinese Optics Letters, Vol.18, Issue 7, pp.070901 (2020).
- [4] H.Sannomiya et al, "Ito,"Real-time electroholography using a single spatial light modulator and a cluster of graphics-processing units connected by a gigabit Ethernet network", Chinese Optics Letters, Vol.18, Issue 2, pp.020902 (2020).
- [5] T. Mitani et al, "Fast Calculation of Amplitude-modulated Computer Generated Hologram with Multiple Ampere-GPU Cluster System", Proc. of the International Display Workshop vol. 26, pp 498-499 (2021).