

## 組み込みシステム向け位相変調型電子ホログラフィ専用計算機の開発

Development of special-purpose computer for phase type electroholography on embedded system

山本 洋太\*

Yota Yamamoto

増田 信之†

Nobuyuki Masuda

下馬場 朋禄\*

Tomoyoshi Shimobaba

角江 崇\*

Takashi Kakue

伊藤 智義\*

Tomoyoshi Ito

## 1. まえがき

近年、Head Mounted Display (HMD) を利用した Virtual Reality (VR) 技術が急速に普及しており、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。現在の VR でよく使われている技術は両眼視差方式である。システム開発が容易という大きな利点を有している。ただし、奥行きを知覚するために必要な奥行き手がかりが一部欠如する「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 [1]。

すべての奥行き手がかりを再現可能な技術として電子ホログラフィ [2] がある。物体からの光の波面をそのまま復元するため、物体そのものを見ていることと同じになる。輻輳調節矛盾が起こることもなく、究極の3次元映像技術ともいわれている。ただし、システム開発が難しく、電子ホログラフィでインタラクティブな VR を実現するのは困難な状況が続いている [3]。

電子ホログラフィでは、3次元情報が記録された干渉縞である Computer-Generated Hologram (CGH) の計算が必要であるが、その計算量が膨大であり、実現への大きな障壁となっている。本研究では、ARM CPU と FPGA をワンチップに搭載した Xilinx Zynq UltraScale+ MPSoC シリーズを利用し、小型なホログラフィ専用計算機の開発を行ってきた [4]。本稿では、振幅変調型の電子ホログラフィに比べ、回折効率に優れ、良質な再生像を得られる位相変調型の電子ホログラフィ向けの専用計算回路を開発した。CGH を計算する計算機システムのパフォーマンスについて紹介する。

## 2. 原理

## 2.1 CGH

3次元物体を  $M$  個の点群で表現すると、CGH 上の位相分布  $\Phi$  は、 $z_j \gg x_j, y_j$  の条件下において、式 (1)、式 (2) で表される。

$$\Phi(x_a, y_a) = \arctan \frac{\sum_{j=1}^M \sin(2\pi\theta_{aj})}{\sum_{j=1}^M \cos(2\pi\theta_{aj})} \quad (1)$$

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

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。 $\lambda$  は参照光の波長である。CGH の画素数を  $K$

とすると、 $KM$  に比例する計算量が必要になることがわかる。

## 2.2 漸化式

CGH を表示する Spatial Light Modulator (SLM) の画素間隔は非常に細かく ( $5 \mu\text{m}$  程度)、均等に並んでいる。そのことを利用し、隣接する画素に関し、差分式を適応し、効率的に計算を行う手法に漸化式法がある [5]。ここで、新たな変数として、

$$\Delta_{0j} = \rho_j(2x_{0j} + 1) \quad (3)$$

$$\Gamma_j = \frac{1}{\lambda z_j} = 2\rho_j \quad (4)$$

を導入する。 $\theta_{0j}$  を利用し、 $x$  軸方向の  $n$  番目の  $\theta_{nj}$  を求めるとき、隣り合う画素に関して、式 (5) により  $\Delta_{nj}$  の更新を繰り返すことにより、

$$\Delta_{nj} = \Delta_{(n-1)j} + \Gamma_j \quad (5)$$

$\theta_{nj}$  は、式 (6) で求めることが可能である。

$$\theta_{nj} = \theta_{(n-1)j} + \Delta_{(n-1)j} \quad (6)$$

式 (5) と式 (6) は加算のみで計算可能であるため、FPGA 実装したときに、リソースの消費を抑え、並列数を増加させ、高速化できる利点がある。

## 3. FPGA を用いた専用計算機システム

## 3.1 使用ハードウェア

専用計算機システムのプロトタイプとして、Xilinx が提供する Zynq UltraScale+ MPSoC ZCU102 評価キット (以下、ZCU102 と呼ぶ) を用いた。ZCU102 は、ARM CPU と FPGA をワンチップに搭載搭載した System-on-a-chip (SoC) である。ZU9EG-2FFB1156I を搭載している。搭載されている論理 FPGA の仕様 (表 1) を示す。

表 1: ZCU102 の論理回路リソース。

Resource	Available
FF	548160
LUT	274080
Block RAM	912

\* 千葉大学大学院工学研究科

† 東京理科大学基礎工学部

### 3.2 専用計算回路のアーキテクチャ

専用計算回路のアーキテクチャを図 1 に示す。漸化式法を利用し、CGH の位相分布を求める計算回路となっている。図 1 中、Basic Phase Unit (BPU) は、式 (2) の計算を行うユニットである。Additional Phase Unit (APU) は、式 (5) と式 (6) の計算を行うユニットである。1 個の BPU と 15 個の APU を BA16 としてまとめた。16 個の APU を AA16 としてまとめた。BA16 が 1 個、AA16 が 119 個、すなわち 1,920 画素が一度に計算可能な並列システムである。BA16, AA16 としてまとめているのは、FPGA 内の信号遅延対策である。小分けにし、1 度計算結果をキャッシュすることにより、動作周波数の向上を図っている。

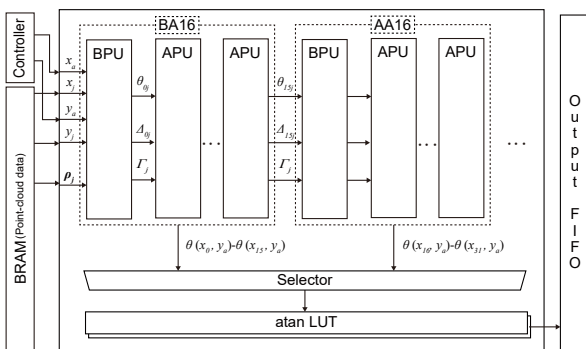


図 1: 専用計算機のアーキテクチャ。

## 4. 評価

### 4.1 計算時間

計算時間比較のため、デスクトップ PC の CPU (Intel Xeon) と組み込み機器向けの GPU (NVIDIA Jetson TX1) において CGH を求めるプログラムを作成し、計算時間の比較を行った。32,500 点の点群から 1,920×1,080 画素のホログラム面を計算するのにかかった時間を表 2 に示した。

表 2: 計算時間の比較。

計算ハード	計算時間 [s]	理論値性能 [TFLOPS]	fps	高速化比 [倍]
FPGA	0.100	-	10	197.66
NVIDIA Jetson TX1	6.593	1.0	0.152	3.00
Intel Xeon	19.766	0.518	0.051	1.00

比較対象の CPU は Intel Xeon CPU E5-2697 v2 2.70GHz、メインメモリ 64GB の CentOS Linux release 7.1.1503 (Core) redhat が動作するシステムである。コンパイラは、Intel C compiler 16.0.1.150 を用い、

すべてのコアを利用し、並列で実行した。GPU 環境は、組み込み機器向けの GPU である NVIDIA Jetson TX1 を利用し、CUDA 8.0 を用いて実装した。

表 2 より、CPU と比較して 200 倍、GPU と比較して 66 倍の高速化を達成した。

リソースの使用率について表 3 に示した。

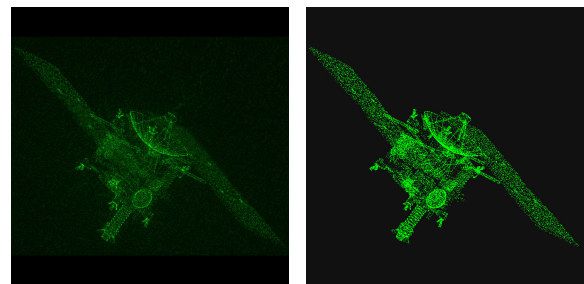
表 3: システム全体のリソースの使用率 (%)。

	FF	LUT	BRAM
Total [%]	45.43	64.80	8.99

動作周波数は 375MHz である。

### 4.2 再生像の様子

開発した専用計算機を光学系に接続し、32,500 点の点群で表した 3 次元データから CGH を計算し、立体映像を表示している様子を図 2 に示した。



(a) 再生像の様子。

(b) 点群データ。

図 2: 再生像の様子。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、小型な位相変調型電子ホログラフィ専用計算機の開発を行った。その結果、32,500 点の点群を 10fps で計算可能なシステムの開発に成功した。

今後は、光学系と計算システムが一体化したシステムの開発を行い、HMD としての性能の評価を行っていきたい。

### 参考文献

- [1] Kramida, Y. *et al.*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 22, pp. 1912 - 1931, 2016.
- [2] Hilaire, P. S. *et al.*, Proc. SPIE, Vol.1212, pp. 174 - 182, 1990.
- [3] Lucente, M., Comp. Graph., Vol.31, pp. 63 - 67, 1997.
- [4] Yamamoto, Y. *et al.*, OSA Continuum, Vol. 2, pp. 1166-1173, 2019.
- [5] Shimobaba, T. *et al.*, Computer Physics Communications, Vol. 138, pp. 44-52, 2001