

組み込みシステム向けホログラフィ専用計算機の開発

Special purpose computer for holography on embedded system

山本 洋太[†] 増田 信之^{*} 角江 崇[†] 下馬場 朋禄[†] 伊藤 智義[†]
 Yota Yamamoto Nobuyuki Masuda Takashi Kakue Tomoyoshi Shimobaba Tomoyoshi Ito

1. まえがき

現在主流の3次元提示手法である両眼視差方式は、脳内で3次元像を復元するために必要な奥行き手がかりが一部欠如している。奥行き手がかりの欠如により、観察者に対して吐き気や眠気を感じさせる原因となっている[1]。

すべての奥行き手がかりを再現可能な3次元映像提示手法としてホログラフィ方式がある。ホログラフィ方式は、1947年にD.Gaborによって開発された技術である。当初は顕微鏡の精度向上のために開発された技術である。現在では計算機を用いて動画として応用可能な技術へと拡張されている。これを特に電子ホログラフィと呼ぶ。観察者に対して負担を掛けない理想的な3次元提示手法として、電子ホログラフィに対する期待が高まっている[2]。

しかし、電子ホログラムの計算量は膨大であり、動画として知覚される時間内に計算時間を抑えることが難しい。計算時間の削減を行ったシステムでも大型なものが多く[3][4]、小型なシステムが求められる。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た。その結果、動画として知覚可能な時間で計算可能なシステムを開発した。

2. 電子ホログラフィ

電子ホログラフィにおいて、3次元像を生成するために振幅分布と位相分布が保存されたホログラムを計算機上でシミュレーションする必要がある。計算機で生成したホログラムを特に計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)と呼ぶ。この時計算オーダーは O (ホログラムのサイズ×オブジェクトを表現する点群数)に比例して増加する。Head Mounted Display (HMD)といったリアルタイムシステムで電子ホログラフィを利用する際、CGHの計算時間を動画として知覚可能な時間内に抑える必要がある。膨大な計算量と計算時間の制限が、電子ホログラフィの実現を困難にしている。

あるホログラム面における強度 $I(x_i, y_i)$ は式(1)のように表される。

$$I(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^M A_j \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_j)^2} \right] \quad (1)$$

ここで、 $z_j \gg x_j, y_j$ の条件下において、式(1)を近似を行い、高速化を図った計算式として、式(2)がある。

$$I(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^M A_j \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}{z_j} \right] \quad (2)$$

ある振幅位相面 $I(x_i, y_i)$ において、 M 個の点群で表された各点からの光強度の足し合わせによって表現される。ここで、 A_j は、点群の振幅強度、 λ は参照光の波長である。式(2)には開平処理が含まれず、計算の高速化が可能である。また、各ホログラム面において、独立に計算可能であり、並列化により、高速化を実現しやすいという利点を持つ。

3. FPGAを用いた専用計算機システム

ホログラフィの計算時間削減のシステムとしては、FPGA[4]やGPGPU[3]を利用したものがある。しかし、どれも制御用のホストPCとFPGAやGPUといった計算アクセラレータを複数台搭載した大型なシステムである。電子ホログラフィをHMDで利用する際、身体的拘束が少ない方が応用の幅が広がる。大規模のクラスタシステムは、HMD用途として適していない。ホログラフィ式HMDの研究としては、光学系を小型に実装するなどの研究が行われている。しかし、リアルタイムシステムに向け大きな障壁となる計算時間を削減するために、計算機が小型に実装された例は少ない。特にSoCとして実装された例は無い。ホログラフィ式HMDの実現には、小型な専用計算機の実装が必要不可欠である。

本研究では、式(2)を用いて計算するホログラム1画素専用計算モジュールを図1に示したようにFPGA内に複数つくり、並列動作させることにより計算の高速化を図った。

4. 評価

4.1 評価環境

開発した専用計算機の環境を表1に示した。

表1: 評価環境。

ファミリ	ZU9EG-2FFB1156I
CPU	Quad Core Cortex-A53 1200MHz
Memory	4GB
OS	Ubuntu 16.04.4 LTS 64bit
Compiler	gcc (Ubuntu/Linaro 5.4.0)

本稿のシステムでは、ARM CPUでUbuntu 16.04.4 LTS 64bit (Linux Kernel 4.14.0)が動作している。OS

*東京理科大学基礎工学部
[†]千葉大学大学院工学研究科

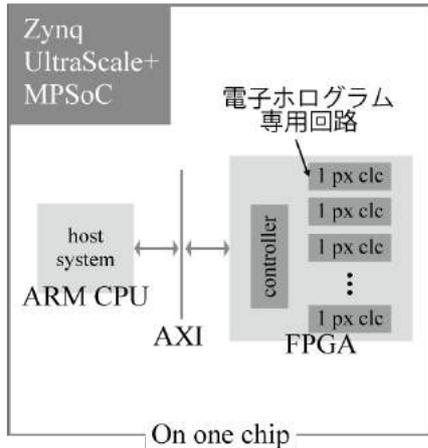


図1: 専用計算機のブロック図.

上では、点光源データの管理、FPGAの制御、CGHの画面出力といった役割を行う。ARM CPUは、一般的なPCに比べ処理性能は低いですが、汎用的に動作する環境となっている。OpenGLやOpenCV等とのフレームワークとの連携が容易であり、拡張性が期待できる。

4.2 計算時間

6,215点の点光源モデルから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]	理論性能 [TFLOPS]	高速化比 [倍]
FPGA	0.0646	-	33.7
GPU: GTX 1080	0.0793	8.873	27.5
CPU: Intel(R) Xeon(R)	2.1770	0.518	1.00

比較対象のCPUはIntel(R) Xeon(R) 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(R) 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、GeForce GTX 1080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33.7倍、GPUと比較して1.2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。

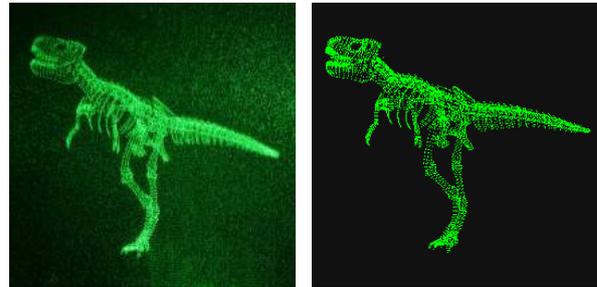
表3: システム全体のリソースの使用率 (%)。

	FF	LUT	BRAM	DSP48
Total [%]	47.48	77.26	45.94	95.28

DSPは、計算パイプラインの乗算に利用されている。光強度計算パイプライン1つあたり、乗算は3カ所あり、DSPが3つ利用されている。

4.3 再生像の評価

開発した専用計算機を光学系に接続し、6,215点の点光源で表した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.

100枚の点群データ表示にかかった時間は、6.6554sであり、15.0fpsで実際に表示できていた。

5. まとめと今後の課題

本研究の結果では、6,215点の点群モデルを15fpsで実行可能なシステムを開発した。

6,215点の点群では、図2に示した様に、ティラノサウルスの骨格標本といった複雑な図形も細かく表現することが可能であり、HMDで単純な情報を表示する性能としては十分であるといえる。

動画の表示フレームレートとしては15fpsとテレビのフレームレート(29.97 [fps]: NTSC方式テレビ放送のフレームレート)と比べると半分しかない。しかし、現状のフレームレートであっても、人間の目に対しては十分な速さであるといえる。今後は、評価目的で評価ボードを利用したが、そのままではHMDに搭載できないのでFPGAチップのみが搭載された専用ボードを開発し、HMDに搭載し評価を行いたい。

参考文献

- [1] Kramida, Y. *et al.*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 22, pp. 1912-1931, 2016.
- [2] Frauel, Y. *et al.*, Proceedings of the IEEE, Vol. 94, pp. 636-653, 2006.
- [3] Niwase, H. *et al.*, Opt. Express, Vol. 22, pp. 28052-28057, 2014.
- [4] Sugie, T. *et al.*, Nature Electronics, Vol. 1, pp. 254-259, 2018.