

## 三次元計測システムのためのデジタルホログラフィ専用計算機の開発 Special Purpose Computer for 3D measurement system using digital holography

山形 健太\* 山本 洋太\* 廣田 祐輔\* 難波 慎太郎\* 増田 信之\* 阿比留 慎† 角江 崇†  
下馬場 朋禄† 伊藤 智義†

Kenta Yamagata

Youta Yamamoto

Yusuke Hirota

Nobuyuki Masuda

Shin Abiru

Takashi Kakue

Tomoyoshi Shimobaba

Tomoyoshi Ito

### 1. まえがき

近年、デジタルホログラフィ顕微鏡に代表されるように、デジタルホログラフィの三次元計測への応用が進み、盛んに研究されている。デジタルホログラフィはその性質から動体の撮影にも適用可能であるが、高速な現象の記録ではフレームレートが数千から数万に及び、再生像の計算には膨大な時間が必要となるため、計算時間の削減が求められている。

この問題を解決するために、本研究では書き換え可能なLSIであるFPGA(Field Programmable Gate Array)を搭載した評価ボードを用いて、再生像計算を高速化のために専用計算機の開発を行っている。本計算システムでは、汎用PCからPCIexpressを介してFPGA内のRAMへホログラムを送信し、FPGA内の計算部で再生像の計算を行い、RAMへ計算結果を格納し、汎用PCへ計算結果を返すことで高速に計算を行うことが可能となる。

本研究では、4枚のホログラムからそれぞれ8枚ずつ、計32枚のホログラムを並列に計算するシステムを開発し、システム全体の計算時間について検証を行った。

### 2. 再生像の計算手法

ホログラムによる再生像の強度 $\phi(x_i, y_i, z_i)$ は次式のように表される。

$$\phi(x_i, y_i, z_i) = \frac{1}{i\lambda} \int_{-N/2}^{N/2} \int_{-N/2}^{N/2} I_\alpha \frac{\exp(ikr_{\alpha i})}{r_{\alpha i}} dx_\alpha dy_\alpha \quad (1)$$

$$r_{\alpha i} = \sqrt{(x_\alpha - x_i)^2 + (y_\alpha - y_i)^2 + z_i^2} \quad (2)$$

ここで、フレネル近似を用いると再生計算式は、

$$\begin{aligned} \phi(x_i, y_i, z_i) &= \frac{\exp(ikz_i)}{i\lambda z_i} \int_{-N/2}^{N/2} \int_{-N/2}^{N/2} I_\alpha \\ &\times \exp\left[\frac{ik}{2z_i} \{(x_\alpha - x_i)^2 + (y_\alpha - y_i)^2\}\right] dx_\alpha dy_\alpha \quad (3) \end{aligned}$$

と表される。ここで、

$$\begin{aligned} g(x_i - x_\alpha, y_i - y_\alpha) &= \frac{\exp(ikz_i)}{i\lambda z_i} \exp\left[\frac{ik}{2z_i} \{(x_\alpha - x_i)^2 + (y_\alpha - y_i)^2\}\right] \quad (4) \end{aligned}$$

とおくと、式(4)は、

$$\begin{aligned} \phi(n, m) &= \int_{-N/2}^{N/2} \int_{-N/2}^{N/2} I(x_\alpha, y_\alpha) g(x_i - x_\alpha, y_i - y_\alpha) dx_\alpha dy_\alpha \quad (5) \end{aligned}$$

の畳み込み積分の形となる。この畳み込み積分に2次元フーリエ変換を適用すると、

$$\Phi(n, m) = \hat{I}(n, m) G(n, m) \quad (6)$$

を得る。ただし、 $g(x_i - x_\alpha, y_i - y_\alpha)$ のフーリエ変換である $G(n, m)$ は、

$$\begin{aligned} G(n, m) &= \exp\left[ i\pi z_i \left\{ \frac{2}{\lambda} - \lambda \left( \frac{n}{N\Delta x_\alpha} + \frac{N\Delta x_\alpha}{2z_i\lambda} \right)^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \lambda \left( \frac{m}{N\Delta y_\alpha} + \frac{N\Delta y_\alpha}{2z_i\lambda} \right)^2 \right\} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

である。したがって、次の手順のように計算することで、計算量を減らすことができる。まず、 $I_\alpha$ から $\hat{I}(n, m)$ を求める。次に、式(7)より $G(n, m)$ を計算する。そして、 $\Phi(n, m)$ を $\hat{I}(n, m)$ と $G(n, m)$ の積から計算し、逆フーリエ変換により $\phi(x_i, y_i, z_i)$ を求める。

### 3. FPGAを用いた専用計算機システム

高速度デジタルホログラフィでは、計算速度の向上が課題となっている。ホログラムの再生において、計算負荷の大きい高速フーリエ変換は、バタフライ演算を繰り返す単純な計算のため、FPGAでのハードウェア化に適している。

昨年度までに、4枚のホログラムからそれぞれ1枚ずつの再生面を計算する回路の開発を行い、正常に動作することが確認されている[1]。本研究では、さらに各ホログラムにつき奥行き方向に8枚を並列に再生することで、計32枚の再生像の計算を行った。専用計算回路での計算は全て固定小数点演算とし、FFTの計算には、Xilinx社のIPコアを使用している。

\*東京理科大学基礎工学部

†千葉大学大学院工学研究院

## 4. 実験結果

### 4.1 実験環境

専用計算機には、Xilinx 社製の FPGA 評価ボード VC707 を使用した (搭載 FPGA Virtex7 XC7VX485T-2FFG1761)。また、計算機の動作検証を行った環境を表 1 に示す。ソフトウェア単体での計算に用いた計算機も表 1 と同じである。表 2 には開発した専用計算機の回路規模などの概要を示す。

表 1: ソフトウェア開発環境

CPU	Intel Core i7-5820K 3.30 GHz
メモリ	16 GB (8GB × 2)
OS	Windows 7 Professional SP1 64bit
開発環境	Microsoft Visual Studio 2013

表 2: 計算機システム概要

通信アーキテクチャ	PCI Express Gen2×8
最大通信速度	4 Gbyte/sec
FPGA 回路情報	
デバイス名	Xilinx 社 Virtex7
Register(使用率)	16,460 / 607,200 (2%)
LUT(使用率)	13,283 / 303,600 (4%)
Block RAM(使用率)	695 / 130,800 (67%)
最大動作周波数	277.362 MHz
動作周波数	250MHz

### 4.2 再生像計算時間

ソフトウェアにおける FFT は、オープンソースの FFT ライブラリである FFTW3.3.4 を利用した [2]。ソフトウェア単体、専用計算機システムのいずれの計算においても 128 × 128 画素の 4 枚のホログラムに対し、ある断面での光の複素振幅 (アドレス幅 14bit: データ幅 32bit) をそれぞれ 8 枚計算した。また、専用計算機システムの場合はホスト PC のメモリに転送するまでの時間を計測時間とした。表 3 にソフトウェアと計算機システムでの計算時間を示す。また速度のばらつきを考慮して、100 回行った計算の平均時間を結果とした。

表 3: 計算時間の比較

計測部分	計算時間 [msec]	高速化比
ソフトウェア単体	45.20	1
専用計算機 (全体処理)	29.84	3.19
専用計算機 (内部処理)	0.69	137.99

表 4: 計算時間の割合

	計算時間 [msec]	割合 [%]
計算時間	0.69	2.31
書き込み時間	1.46	4.90
読み込み時間	27.69	92.78
合計時間	29.84	

表 3 より、通信部を含めたシステム全体の処理時間はソフトウェア単体と比較したとき、およそ 3 倍になっている。また、専用計算機の内部処理 (通信部を除く) においては、およそ 138 倍の高速化を実現している。次に、専用計算機システムの時間割合を表 4 に示す。表 4 を見ると、ホスト PC と計算機との通信が約 98% を占めている。

## 5. まとめと今後の課題

Xilinx 社が提供する FPGA 評価ボードを用いて、高速度デジタルホログラフィのための専用計算機の開発を行った。本研究において、1 度の通信で 4 枚のホログラムの撮影データを送信しそれぞれから 8 枚ずつ、計 32 枚の再生像を計算することに成功した。表 2 から、計算リソースに余裕があることが分かる。

今後は、より上位の評価ボードである、VCU108 評価ボードへ実装し、リソースの使用率から並列数の検討を行い、更なる並列化を目指す。また、表 4 より、処理時間のうち通信の占める割合がほとんどであることから、DMA (Direct Memory Access) 回路を追加することで、計算機システム全体の高速化が望める。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K00175 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] 増田信之, 難波慎太郎, 角江崇, 下馬場 朋禄, 伊藤智義, "3 次元計測システムのためのデジタルホログラフィ専用計算機の開発", 第 15 回情報科学技術フォーラム講演論文集第 1 分冊, p295-p296, 2016.
- [2] "FFTW Home Page", <http://www.fftw.org/>