

# FPGA を用いた高速 3 次元超音波撮像演算

和田 裕人<sup>†</sup> 田村 安孝<sup>†</sup> 柳田 裕隆<sup>†</sup>

<sup>†</sup>山形大学大学院 理工学研究科 情報科学専攻

## 1. はじめに

超音波 3 次元撮像システムにおいて、単位時間あたりの画像再生数（スループット）を増やすことは演算システムにとって主要な課題である。演算システムを専用ハードウェア化して FPGA

(Field Programmable Gate Array) 上に実装することにより、同じ LSI 規模ならば CPU や GPU のようなある程度の汎用性を持ったプロセッサより高速化を見込める<sup>[1]</sup>。しかし、ハードウェアである FPGA 上の演算システムの設計と実装には、低水準のハードウェア記述言語 (HDL) のコーディングが必要であり、開発効率やソフトウェアとの連携の点で問題があった。

本研究では C 言語により記述したアルゴリズムを HDL に変換することで FPGA 用の 3 次元撮像演算専用回路を設計し、プログラムの実行速度を評価した。演算回路の設計に際し、予め並列化可能部分の把握が重要となる。そこで、C 言語コードを OpenMP により並列化し、これを HDL に変換して FPGA に実装する。また、OpenCL を用いたコードを準備し、GPGPU との実行時間の比較を行った。

## 2. 3 次元超音波撮像

今回使用する超音波 3 次元像再生システムのプログラムは大きく分けて相互相関と遅延加算の 2 つのプロセスがある。センサアレイから全ての超音波照射回数分のデータを受け取り、相互相関関数の積算をした後に遅延加算を行って 1 つの 3 次元画像を得る。高速化を行うにあたって、並列化されていない場合について 2 つのプロセスの時間を測定し、どの部分を FPGA によるアクセラレートを行うか決定した。時間測定を行った結果、演算時間の 99.977% を相互相関の計算で費やしていることが分かった。そこで、相互相関のプロセスの高速化を試みた。

## 3. 3 次元像再生の原理

### 相互相関

撮像に用いる超音波の反射波を受信し、その

High-performance computing for volumetric ultrasound imaging using FPGAs

Hiroto Wada<sup>†</sup>, Yasutaka Tamura<sup>†</sup> and Hiroataka Yanagida<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Informatics, Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

データをフーリエ変換した値、サンプリング周波数や物体までの距離などの情報から計算した参照波形データをフーリエ変換した値を用いて、相互相関の式は(1)のように表される。

$$\Phi(\omega) = H(\omega)^* R(\omega) \quad (1)$$

(\*は複素共役)

この式によって求められた実部値と虚部値に逆フーリエ変換を行うことによって画像化の元となるデータを生成する。

## 4. 撮像対象

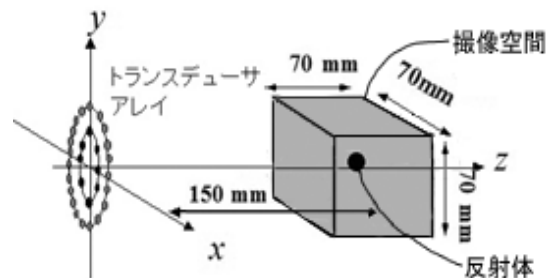


図1 アレイのシミュレーションの配置

図1のように座標系を設定し、アレイは平面上に配置しているものとする。画像データは、立方体の撮像領域内においてこの格子点上での画素の配列となる。

シミュレーションは、以下のような設定で行った。

- 画像サイズ 64×64×256 ピクセル
- トランスミッタ数 32 個
- レシーバ数 32 個
- 送信回数 1 回
- 反射体 点物体 1 個
- データ長 2048
- 反射体までの距離 150mm
- 送信波の中心周波数 2.0MHz
- サンプリング周波数 16.0MHz

今回の実験で使用した開発環境は以下である。

- 高位合成ツール Impulse C/CoDeveloper 3.7
- 論理合成ツール Quartus II 13.1
- FPGA ボード DE2-115

### 5. 実験

C言語で書かれたプログラムをHDLに変換してFPGAに移植し実行時間の比較を行う。C言語によるプログラム記述とHDL変換にはImpulse C/CoDeveloper<sup>[2]</sup>を使用した。これを用いて元のプログラム及びCPU(シングルスレッド)、OpenMP、OpenCL、FPGAについて、相互相関プロセスの実行時間の比較を行う。

CPU(シングルスレッド)、OpenMP、OpenCL、FPGAそれぞれの実行時間の比較が表1となる。

FPGA化を行うことによりCPUの2490倍、OpenMPの260倍の速度にすることが可能である。

表1 相互相関プロセスの実行時間

CPU	OpenMP	OpenCL	FPGA
7.455(s)	0.779(s)	2.215(s)	0.003(s)

FPGAを行う際は通信によるオーバーヘッドが生じる。接続にUSBを用いた場合通信時間が145[ms]程度必要となる。これはFPGAでの処理プロセスの約50倍の時間を消費しており、大きなボトルネックとなっている。

レーザの数を増やし相互相関プロセスの処理時間を増加させると、レーザ個数8192個までは転送の方が演算より時間を消費している。しかし、レーザ個数がそれ以上の数になると相互相関プロセスの時間が転送時間を上回る。また、並列化を行ったことにより相互相関とそれ以外の処理部分の実行時間の割合が逆転している。転送時間の短縮は通信用回路の制約上困難であるため、システム全体のさらなる高速化には相互相関以外のプロセスの効率化が必要となる。

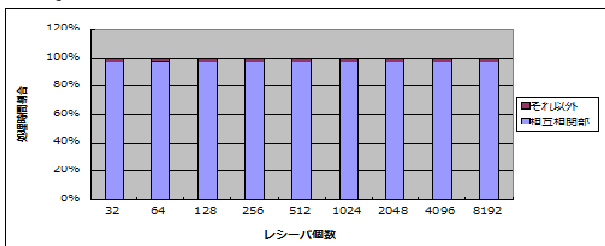


図2 元のプログラムの実行時間割合

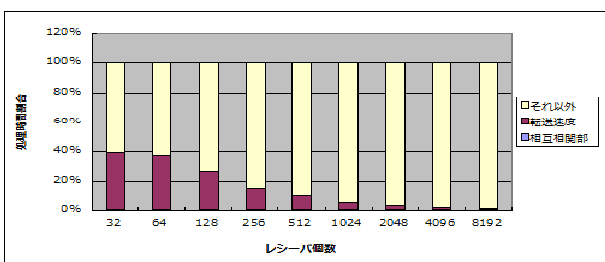


図3 FPGA化後の実行時間の割合

### 6. 生成画像

図4は元のプログラムで生成した図であり、図5はFPGAで実行したプログラムの図である。同等の結果を得られていることが確認できた。

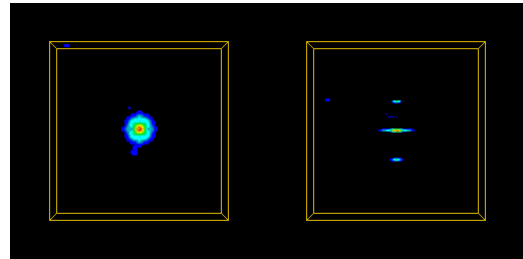


図4 元のプログラムでの生成画像 (-20[dB]以上を表示)

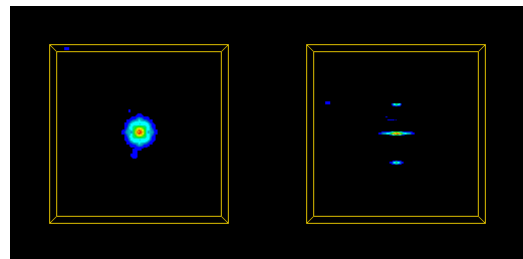


図5 FPGAでの生成画像 (-20[dB]以上を表示)

### 7. まとめ

3次元超音波撮像の演算をC言語記述からHDLに変換してFPGAに実装した。シミュレーションと実測の結果、GPGPU以上の速度が期待できることを確認した。

Impulse C/CoDeveloperを使用してHDLコードを生成したが、今回はハードウェア化で一般的に行われる固定小数点化等の効率化を行っていない<sup>[3]</sup>。このため、現在FPGA上に実装してある相互相関プロセスより高速に動作する回路が作成可能であると考えられる。

また、FPGA上のメモリの制約からパイプラインは構成していない。メモリを節約しながら深いパイプラインを構成することが今後の課題となる。

### 8. 参考文献

- [1] K. Satoh, J. Tada, H. Yanagida and Y. Tamura. Parallel image reconstruction operation by dedicated hardware for three-dimensional ultrasound imaging. Proc. of IEEE UFFC, (2007): 1522-1525
- [2] Impulse Accelerated Technologies, <http://www.impulseaccelerated.com/>
- [3] デビッド・ペレルン, スコット・ティボー, “C言語による実践的FPGAプログラミング”, (2011)