

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00175

研究課題名(和文) ホログラフィー技術を用いた三次元計測専用計算機システムの構築

研究課題名(英文) Special purpose computer system for three-dimensional measurement using digital holography technology

研究代表者

増田 信之 (MASUDA, Nobuyuki)

東京理科大学・基礎工学部電子応用工学科・准教授

研究者番号：60323333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：現在、様々な分野でデジタルホログラフィーを使用した三次元計測が行われている。しかしながら、これらの計測において、三次元空間再生の計算時間が問題となっている。

本研究では、デジタルホログラフィーを応用した三次元計測を支援する三次元空間再生専用計算機システムのFPGAを用いて構築した。構築したシステムでは、一台のPC上にFPGAボード2枚搭載し、16並列の計算が出来るようになり、9msecで16枚の再生像が得られた。

研究成果の概要(英文)：We have designed a special purpose computer boards for three-dimensional measurement using digital holography technology. In this board, there is a Field Programmable Gate Array (FPGA) chip in which is installed four pipelines for calculating the intensity of an object from a hologram by fast Fourier transform (FFT). In this computer system, there are two FPGA boards. This system can create 16 reconstructed images from a 128*128-grid hologram in about 9msec.

研究分野：計算機システム

キーワード：ハイパフォーマンスコンピューティング 専用計算機 デジタルホログラフィ

1. 研究開始当初の背景

ホログラフィを用いた三次元流体速度場可視化システムでは光学系を用いて対象となる流体にマーカとなる粒子を流し、その様子をホログラムとして CCD カメラで撮影する。ホログラムには対象となる流体中の粒子の三次元情報が含まれている。このホログラムから流体中のマーカの位置を再生し、解析を行うことで流体の三次元速度場の情報を得ることが出来る。デジタルホログラフィー技術は、微小な液滴・粒子・気泡群などの時間変化を三次元空間計測するのに適しており、空間位置計測、移動量(速度)計測、数密度計測、粒径等計測、形状・姿勢計測、高速度物体のイメージングなど今後工学的な応用範囲も一層広がりを見せるものと期待される。

デジタルホログラフィー技術を用いた三次元解析の研究は、1990 年台半ばから、海外では Katz (Johns Hopkins 大) らや Meng (Buffalo 大) ら、国内では岡本孝司教授(東京大学)ら、佐竹信一教授(東京理科大学)らのグループがそれぞれ独立に装置開発を含めた実験を始めている。また、デジタルホログラフィーを用いた高速イメージングの研究については、国内では粟辻安浩准教授(京都工芸繊維大学)や角江崇助教(千葉大学)のグループが研究を行っている。ただし、これまでの研究においては計算処理速度の問題が壁になって、実用化の道筋はたっていない。例えば、 $1,024 \times 1,024$ のホログラムから $1,024 \times 1,024 \times 1,024$ の再生空間を得るのに、FFT による高速アルゴリズムを用いても CPU が Intel 社の Core i7 の PC(Personal Computer)での計算時間は 15 秒程度であり、実用的な流速計測は困難である。

申請者は、現在までに FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた専用計算機システムを構築することで、この計算時間の削減をはかり、速度場の解析を高速に行う研究を行ってきた。FPGA は内部の論理回路をユーザーが自由に変更することが出来る LSI で、仕様の変更などに対応しやすいデバイスである。

2. 研究の目的

現在、様々な分野でデジタルホログラフィーを使用した三次元計測が行われている。特に生体内の物質を輸送する血液の動きと赤血球などの形状を計測することは、生体内の物質の輸送機構を解明するために非常に重要なことである。また、近年になって三次元高速度イメージングにおいても、デジタルホログラフィーを応用した計測が行われてきている。しかしながら、これらの計測において、撮影されたホログラムから三次元空間を再生するためには、膨大な計算時間を必要とする。本研究では、デジタルホログラフィー

を応用した三次元計測を支援する三次元空間再生専用計算機システムの構築し、それを様々な三次元計測に応用し、上記のような問題を解明することを最終的な目標としている。

3. 研究の方法

三次元計測専用計算機システム構築のために、以下の 5 のステップを踏んで計画を進めていく予定である。1) FPGA 評価ボードでの性能評価、2) 新システム用ボードの設計と開発、3) 新計算機システムの構築、4) 必要となる計算ごとに回路を動的に変更できるシステムの構築、5) 実験系への実装と性能評価。

現システムから移行するために、市販の評価用ボードを使用して、新システムの中核となる計算機回路の評価を行う。次に、評価ボードの結果から、新しい計算機ボードの仕様を作成し、ボードの設計、作成を行う。最後にこのボードに計算回路を実装し、専用計算機システムを構築し、その性能の評価を行う。また、計算機システムを実験系に接続し、実際のデータを用いた性能評価を行い、このシステムの有効性を判断する。

現在までの研究で流体などの流れ場解析と高速度イメージングでは以下の違いがあることがわかっている。流体解析の場合、出来るだけ広い視野が必要となるため、ホログラムの画像サイズが大きくなり、その結果として、計算時間が膨大になっている。一方高速度イメージングにおいては、ホログラムの画像サイズはそれほど大きくはないが、一秒間に撮影される枚数が非常に多いために、計算時間が膨大になっている。どちらも再生像を求めるための計算式は同じため、同一の計算回路でどちらの計算も出来るがそれぞれに特化した回路を使用した方が効率よく高速化が出来る。FPGA は内部の回路を変更できるので、この点に関しても有用である。そのため、まず、流体解析用の専用計算回路を利用して、高速度イメージング用の計算回路を作成する。ホログラムからの三次元空間の再生は非常に並列化に向いていることがわかっている。特に再生空間を再生面の集まりとして、扱う場合は、その一つの面を一つの計算ユニットに担当させることで、容易に並列計算を行うことが出来る(図 1)。

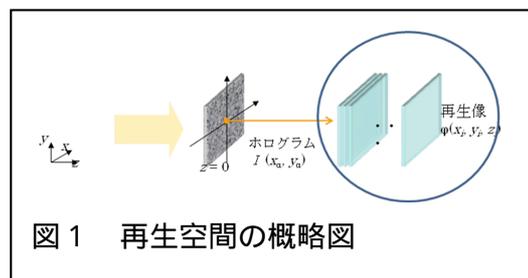


図 1 再生空間の概略図

そこで、FPGA 評価ボードを用いて、FPGA 内に複数の計算回路を実装し並列計算を行

うことを検証する。新しい FPGA を用いることで、計算パイプラインの動作周波数を約 1.5 倍にすることが期待できる。よって、この評価ボードでは、FPGA 一個あたりの速度を現在の約 3.0 倍の高速化が期待できる。また、通信速度も現在のボードの 5 倍程度の高速化が期待できる。

現在のシステムでは、一枚の再生面の通信時間が 0.45ms で、計算時間が 25ms になっている。これが、新しい評価ボードでは、通信時間が 0.09ms に、計算時間が 8.3ms になると考えられる。再生面一枚あたりの高速化は、約 3 倍になる。また、通信時間と計算時間の比は約 90 になり、理論的には、計算の並列化が 90 面までは、通信時間がボトルネックにならないことになる。これらの回路を実装した評価用 FPGA ボードを PC に二枚さしたシステムを用いて、並列化の評価を行う。また、速度場解析を行う回路の実装も行い、三次元空間再生計算との動的な変更が可能かどうかの検証も行う。

高速度イメージングに関しては、回路規模が小さいため、より多くの計算ユニットを一つの FPGA に実装出来る。並列化の手法としては、一枚のホログラムから複数枚の再生像を同時に作成する方法と複数枚のホログラムを同時に再生する方法の二つがある。これらについて、理論的解析と実際の回路を動作させ検証することで、どちらの方法がより有効的であるかを検証する。

平成 27 年度の結果を元に、専用計算機用新ボードの設計を行う。ここでは、一枚の専用計算機ボードに二個の計算用 FPGA を搭載し、それぞれの FPGA には一個の外部 RAM ユニートを接続する予定である。専用計算機ボードの設計は、専用の CAD を用いて行い、専用計算機ボード上に実装する電子部品の配線情報だけを作成し、あとは基板作成業者に発注する予定である。その後作成された専用計算機ボードを用いて、平成 27 年度に作成した計算回路を実装し、性能の評価を行う。この専用計算機ボードでは、流体解析用計算パイプラインを四本搭載する予定なので、現在のシステムに対して、1 ボードあたり約 3 倍の高速化が期待される。また、高速イメージング用計算パイプラインは八本実装する予定である。

また、一台の PC に二枚の専用計算機ボードを搭載し、並列計算による高速化の検証を行う。並列の仕方は前述したとおり、再生面をそれぞれの計算 FPGA に割り当てて行う。ここでは、計算結果の転送と計算時間の割合が期待したものになっているかも検証する。

並列に計算できる再生面の数は 16 面（高速イメージングの場合は 32 面）であるので、FPGA が計算を次の面の計算を行っているうちに計算結果の通信を終わらせることが出来る。このことにより、通信時間がボトルネックにならないことがわかる。

さらに、二枚の専用計算機ボードを搭載し

た PC、四台と制御用 PC(Host PC)一台の専用計算機クラスタシステムを構築する。PC クラスタシステムの制御には MPI(Message Passing Interface)を使用する。このシステムでは、専用計算機ボードが八枚、計算用 FPGA が十六個となり、流体計算用パイプラインが 64 個並列に、高速イメージング計算用パイプラインが 128 個並列に動作することになる。ここでは、まず、それぞれの計算パイプラインが担当している再生面の計算を正確に行っているかを、検証する。

引き続き、専用計算機クラスタシステムの性能評価を行う。PC クラスタでの計算の場合、通信時間が全体のボトルネックとなる可能性が高い。本システムにおいては PC と専用計算機ボード間の通信時間と計算時間の割合から理論的には 90 並列が最高となり、64 個の計算パイプラインを動作させ、通信と計算を同時に行った場合、通信時間がキャンセルできると考えられる。実際は一台の PC では並列数は 16 並列、または 32 並列なので、通信時間がボトルネックになることはないと期待できる。

また、平成 27 年度の結果をもとに、三次元空間再生計算部分と二次元 FFT を用いた速度場解析処理部分を動的に変更し、計算する三次元流体速度場可視化システム構築し、その性能を検証する。計算用 FPGA の動的な変更は、計算時間のロスや、書き換えが正確に行われるかどうかの検証などが必要となるが、それについては、平成 27 年度の結果と、この時点での結果をふまえ、回路情報の動的変更がうまくいかない場合は、四台の PC を二台ずつにわけ、三次元空間再生と速度場解析を同時に行うシステムに変更する予定である。この場合、計算の高速化については、若干の性能低下が起きるが、三次元空間の再生と速度場の解析は、最初の三次元空間再生計算以外は、同時に処理することが出来る。高速イメージングに関しては、この問題はないと推測できる。

さらに、実験系の研究室と協力して、実際の撮影系に専用計算機クラスタシステムを導入して、性能評価を行う。まずは、模擬的な構造物を流体の中に流し、その形状の解析を行うことで、形状解析について評価・検証を行う。また、それぞれの問題で予想される理論値との比較を行うことで検証し、その有効性を確かめる。

4. 研究成果

平成 27 年度においては、流体解析用の専用計算回路を利用して、高速度イメージング用の計算回路を作成した。また、ホログラムからの三次元空間の再生は非常に並列化に向いていることがわかっているため、特に再生空間を再生面の集まりとして扱う場合は、その一つの面を一つの計算ユニットに担当させることで、容易に並列計算を行うことが

出来る．そこで，FPGA 評価ボードを用いて，FPGA 内に複数の計算回路を実装し並列計算を行うことを検証した．その結果，FPGA 一個あたりの速度を以前の約 3.0 倍の高速化ができ，また，通信速度についても高速化のめどがたった．

平成 28 年度においては，市販の FPGA 評価ボードを用いて，平成 27 年度に作成した計算回路を実装し，性能の評価を行った．この専用計算機ボードには，流体解析用計算パイプラインを四本搭載し，高速イメージング用計算パイプラインは八本実装した．並列に計算できる再生面の数は 16 面（高速イメージングの場合は 32 面）になったが，FPGA ボードとの通信時間が予定よりかかることになり，通信時間がボトルネックになっていることが確認出来た．

平成 29 年度においては，専用計算機クラスシステムの性能評価を行った．PC クラスタでの計算の場合，通信時間が全体のボトルネックとなる可能性が高い．

本システムにおいては PC と専用計算機ボード間の通信時間と計算時間の割合から理論的には 90 並列が最高となり，64 個の計算パイプラインを動作させ，通信と計算を同時に行った場合，通信時間がキャンセルできると考えられる．実際に一台の PC では並列数を 16 並列としたところ，通信時間がボトルネックになることはなく計算できることが確認できた．

また，平成 27 年度の結果をもとに，三次元空間再生計算部分と二次元 FFT を用いた速度場解析処理部分を動的に変更し，計算する三次元流体速度場可視化システム構築した．その結果，計算用 FPGA の動的な変更，計算時間のロス，書き換えが正確に行われるかどうかの検証が出来，構築した計算機システムの有用性が確認できた．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Kakue Takashi ,Endo Yutaka ,Nishitsuji Takashi , Shimobaba Tomoyoshi , Masuda Nobuyuki , Ito Tomoyoshi , Digital holographic high-speed 3D imaging for the vibrometry of fast-occurring phenomena, Scientific Reports, 査読有, VOL. 7, 2017, 10413, DOI: 10.1038/s41598-017-10919-5

Arai Daisuke , Shimobaba Tomoyoshi , Nishitsuji Takashi , Kakue Takashi , Masuda Nobuyuki , Ito Tomoyoshi , An accelerated hologram calculation using the wavefront recording plane method and wavelet transform, OPTICS COMMUNICATIONS, 査読有, VOL. 393 , 2017, 107-112 , DOI:

10.1016/j.optcom.2017.02.038

Shimobaba Tomoyoshi , Endo Yutaka , Hirayama Ryuji , Nagahama Yuki , Takahashi Takayuki , Nishitsuji Takashi , Kakue Takashi , Shiraki Atsushi , Takada Naoki , Masuda Nobuyuki , Ito Tomoyoshi , Autoencoder-based holographic image restoration, Applied Optics, 査読有, VOL. 56 , 2017, F27, DOI: 10.1364/AO.56.000F27

Nagahama Yuki , Shimobaba Tomoyoshi , Kakue Takashi , Masuda Nobuyuki , Ito Tomoyoshi , Speeding up image quality improvement in random phase-free holograms using ringing artifact characteristics, Applied Optics, 査読有, VOL. 56 , 2017, F61 , DOI: 10.1364/AO.56.000F61

〔学会発表〕(計 9 件)

山本洋太，山形健太，廣田祐輔，増田信之，原田哲也，組み込みシステム向けホログラフィ専用計算機の開発，第 16 回情報科学技術フォーラム，2017 年 9 月，東京大学(東京都文京区)

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，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，第 16 回情報科学技術フォーラム，2017 年 9 月，東京大学(東京都文京区)

廣田祐輔，山形健太，山本洋太，山本未来呂，南 昇吾，増田信之，パーシャルリコンフィギュレーションを用いた専用計算機システムの開発，第 16 回情報科学技術フォーラム，2017 年 9 月，東京大学(東京都文京区)

増田信之，難波慎太郎，白倉圭亮，山形健太，山本未来呂，角江崇，下馬場朋禄，伊藤智義，パーシャルリコンフィギュレーションを用いた専用計算機システムの開発，第 15 回情報科学技術フォーラム，2016 年 9 月，富山大学(富山県富山市)

難波慎太郎，増田信之，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，2016 年 9 月，富山大学(富山県富山市)

白倉圭亮，山形健太，山本未来呂，増田信之，GPGPU における条件分岐処理を含む数値計算の高速化についての検討，第 15 回情報科学技術フォーラム，2016 年 9 月，富山大学(富山県富山市)

武口恵太,小柳潤,古江広和,増田信之,
モンテカルロ法を用いた液晶ブルー相の構
造解析,第7回日本複合材料会議,2016年3
月,京都テルサ(京都府京都市)

増田信之,松田美由妃,臼倉圭亮,難波
慎太郎,的場駿介,角江崇,下馬場朋禄,伊
藤智義,高速度デジタルホログラフィのため
の専用計算回路の並列化,第14回情報科学
技術フォーラム,2015年9月,愛媛大学(愛
媛県松山市)

的場駿介,亀谷和樹,増田信之,角江崇,
下馬場朋禄,伊藤智義,並列位相ソフトデ
ジタルホログラフィ専用計算機的设计,3次
元画像コンファレンス,2015年7月,海洋開
発機構(神奈川県横浜市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 信之 (MASUDA, Nobuyuki)
東京理科大学・基礎工学部・准教授
研究者番号: 60323333