

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500056

研究課題名(和文)ホログラフィー技術を用いた三次元流体速度場及び形状解析専用計算機システムの構築

研究課題名(英文)Special purpose computer system for 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・准教授

研究者番号：60323333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：流体速度場可視化の技術であるPTV(Particle Tracking Velocimetry)にデジタルホログラフィーを応用したDHPTV(Digital Holographic PTV)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た。  
FPGAボード内に四つの計算パイプラインを実装し、その計算速度の評価を行ったところ、ほぼ四倍の高速化が実現でき、理論値に近い結果を得ることが出来た。また、このFPGAボードを一台のPCに複数枚搭載し、並列計算を行うことに成功した。さらに、FPGAボードを複数枚搭載したPCを用いて、専用計算機クラスタシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：We have designed a PC cluster system with special purpose computer boards for visualization of fluid flow using digital holographic particle tracking velocimetry (DHPTV).  
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). This board can create 4 reconstructed images from a 256 × 256 -grid hologram in 2.6msec. Hence, the calculation speed of the FFT-HORN board is about 126 times faster than that of PC.

研究分野：計算機システム

キーワード：専用計算機 可視化 ホログラフィー

## 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。また、撮影に使用している CCD カメラは、一秒間に 1,000 枚の撮影が可能となっている。

このように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。

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。ホログラムの情報量は膨大であり、今日の計算機環境でも実用に耐え得る計算速度は得られていない。

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 Core2Duo の PC での計算時間は 85 秒程度であり、実用的な流速計測は困難である。

## 2. 研究の目的

現在、様々な分野で流体の三次元速度場の計測と三次元物体の形状解析が必要とされてきている。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。本研究では、流体速度場可視化の技術である PTV (Particle Tracking Velocimetry) にデジタルホログラフィーを応用した DHPTV (Digital Holographic PTV) 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、それを三次元流体速度場解析及び三次元物体の形状解析に応用し、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

三次元流体速度場及び形状解析専用計算機システム構築のために、以下の四つのステ

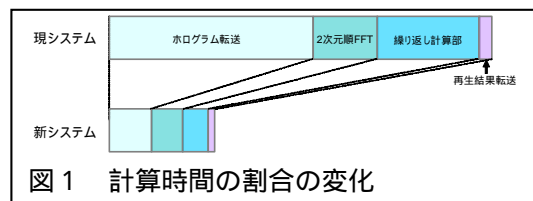
ップを踏んで計画を進めていく。

- 1) FPGA 評価ボードでの性能評価
- 2) 新計算機システムの構築
- 3) 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
- 4) 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、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おり、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する。

また、ホログラムからの再生を行うときに、ホログラムの二次元 FFT の結果が必要となるが、これはどの再生面を再生するときにも共通に使用するので、あらかじめ計算した結果を FPGA の外部の RAM に保存することで、複数の計算パイプラインで、その値を共有することが出来る。ここでは、二本の計算パイプライン (FFT-HORN パイプライン) を実装することにしている。二本の計算パイプラインは制御ユニット (FFT-HORN コントローラ) によって制御され、同様に制御されている外部記憶ユニット (DDR3SDRAM ユニット) から必要なデータを取得して再生に必要な計算を行う。

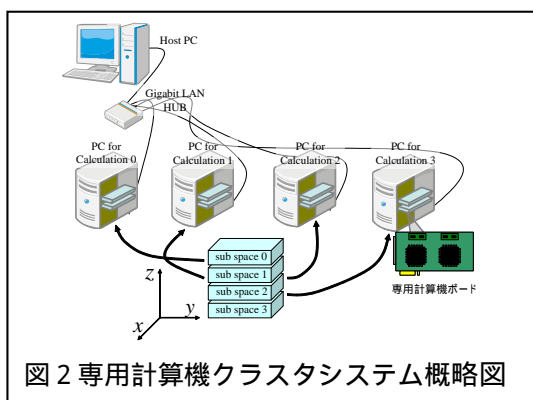


また、このボードの FPGA は現在使用しているものに比べて全てにおいて性能が上がっている。そのため、計算パイプラインの動作周波数を約 1.5 倍にすることが期待できる。よって、この評価ボードでは、FPGA 一個あたりの速度を現在の約 3.0 倍の高速化が期待できる。また、通信速度も現在のボードの 5 倍程度の高速化が期待できる(図1)。現在のシステムでは、一枚の再生面の通信時間が 0.45ms で、計算時間が 25ms になっている。これが、新しい評価ボードでは、通信時間が 0.09ms に、計算時間が 8.3ms になると考えられる。再生面一枚あたりの高速化は、約 3 倍になる。また、通信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。

並列に計算できる再生面の数は 16 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(図 2)。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、計算用パイプラインが 64 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、これまでの結果をもとに、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 24 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。

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、流体の速度場解析が予想される理論値どおりに動作を行うかを検証し、その有効性を確かめる。また、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、形状解析についても、評価・検証を行う。

#### 4. 研究成果

ホログラムからの三次元空間の再生計算の並列化について検証を行った。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、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。また、FPGA の変更により、FPGA 一個あたりの速度を現在の約 3 倍の高速化が出来た。

市販の FPGA ボードを搭載した PC による専用計算機クラスタの開発と動作確認を行った。並列計算においては、再生空間を分割し、それぞれを別の専用計算機に担当させる手法と、専用計算機に別々のホログラムを担当させ、再生空間全体を求めさせる手法の二通りについて検証を行った。その結果、どちらの場合でもほぼ理論値に近い高速化に成功した。

一台の PC に複数枚の FPGA ボードを搭載し、並列計算を行うことに成功した。高速化率はほぼ理論値に近い値となった。また、FPGA ボードを複数枚搭載した PC を用いて、専用計算機クラスタシステムを構築した。その結果、当初の予想以上に通信時間が高速化のネックになっていることが確認された。

#### 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 1 件)

N. Okada, D. Hirai, Y. Ichihashi, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito, Special-purpose computer HORN-7 with FPGA technology for phase modulation type electro-holography, 19th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2012 (IDW/AD'12), 査読有, 3Dp-26, Kyoto, Japan, Dec. 2012.

〔学会発表〕(計 1 1 件)

Shunsuke Matoba, Takashi Kakue, Nobuyuki Masuda, Tomoyoshi Shimobaba, and

Tomoyoshi Ito, "Design of Computational Circuit for Calculation of Parallel Phase-Shifting Digital Holography", 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits & Systems, 17-20 November, Okinawa Japan (2014)

増田信之, 高橋慶, 亀谷和樹, 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機の開発, 第13回情報科学技術フォーラム, 2014年9月, 筑波大学(茨城県つくば市)

S. Matoba, N. Masuda, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, Development of Computational Circuit for Calculation of Phase-Shift Method in Parallel Phase-Shifting Digital Holography, International Symposium on Three Dimensional systems and Applications (3DSA) 2014, Seoul, South Korea, May 2014

Takashi Kakue, Nobuyuki Masuda, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Naohisa Okada, Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, Special-purpose computer for real-time reconstruction of holographic motion picture, OIT'13, Beijing, China (2013.11.01-03)

増田信之, 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, 市橋保之, DVI出力をもつ位相ホログラフィ専用計算機の開発, 第12回情報科学技術フォーラム, 2013年9月, 鳥取大学(鳥取県鳥取市)

Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda, Tomoyoshi Ito, Fast Computation of Image-Reconstruction Process of High-Speed Parallel Phase-Shifting Digital Holography, WIO'2013, Spain(2013.07-15-19)

Yutaka Endo, Takehiko Kii, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Special-Purpose Computer for Phase Modulation Type Electro-Holography with DVI output, International Symposium on Three Dimensional systems and Applications (3DSA) 2013, Osaka, Japan, June 2013.

K. Kamegai, N. Masuda, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, Simulation of the special-purpose computer for high-speed imaging by digital holography, International Symposium on Three Dimensional systems and Applications (3DSA) 2013, P4-9, Osaka, Japan, June 2013.

Y. Endo, T. Kii, N. Masuda, N. Okada, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, Special-Purpose Computer for Phase Modulation Type Electro-Holography with DVI Output, International Symposium on Three Dimensional systems and Applications (3DSA) 2013, S4-2, Osaka, Japan, June 2013.

増田信之, 平井大智, 岡田直久, 紀井建彦, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, 市橋保之, FPGAを用いた位相ホログラム専用計算機HORN-7の開発, 第11回情報科学技術フォーラム, 2012年9月, 法政大学(東京都小金井市)

T. Shimobaba, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, Real-time computer holography, Symposium for Holographic Display Technology and Art (HODIC in TAIWAN), Taipei, Taiwan, Dec. 2012.

## 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