

機関番号： 12501  
 研究種目： 基盤研究（C）  
 研究期間： 2008年～2010年  
 課題番号： 20500048  
 研究課題名（和文） デジタルホログラフィー技術を用いた流体速度場可視化専用計算機システムの構築  
 研究課題名（英文） Special purpose computer system for flow visualization using digital holography technology  
 研究代表者  
 増田 信之（MASUDA NOBUYUKI）  
 千葉大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号： 60323333

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) を用いた速度場可視化システムのための高速演算システムを構築した。

通信時間の短縮を行うことで、理論上 55 個の計算チップを並列に使用することが出来、時間をロスすることなく計算を行うことが出来るようになった。そこで、専用計算機ボードを 3 枚搭載した PC でクラスターを構成することで、48 個の計算チップを使用した計算を行うようなシステムを構築し、1 チップのシステムの約 30 倍（PC に対して約 110 倍）の高速化された計算機システムを構築することに成功した。

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 a pipeline for calculating the intensity of an object from a hologram by fast Fourier transform (FFT). This cluster system can create 1,024 reconstructed images from a 1024 × 1024 grid hologram in 0.77 sec. Hence, the calculation speed of the FFT-HORN cluster system is about 110 times faster than that of PC.

It is expected that this system will contribute to the analysis of fluid flow using DHPTV.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 20 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
平成 21 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
平成 22 年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野： 計算機システム・ネットワーク

科研費の分科・細目：

キーワード：可視化 流体 計算機システム

#### 1. 研究開始当初の背景

様々な分野において、三次元的な流れを可視化する技術が注目されている。この流れの可視化技術にデジタル画像処理技術を加え、

流れ場の瞬時・多点の速度情報を抽出する方法の一つに粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry: PIV)がある。この PIV の一種である PTV(Particle Tracking

Velocimetry)にホログラフィー技術を応用させた手法をホログラフィックPTV(Holographic PTV: HPTV)と呼び、奥行き幅広い三次元測定、多粒子像の同時撮影、複数の撮影物体の多重記録などが可能となる。

現在、高精細化が進む CCD カメラや性能の向上が著しい計算機パワーを利用したデジタル処理による HPTV(DHPTV)の研究が始まりつつある。

ただし、ホログラフィー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。このことを解消するために、三次元情報が記録されたホログラムからの再生計算アルゴリズム専用計算ハードウェアの設計・開発を行い、計算速度の高速化を試みた。

## 2. 研究の目的

現在、様々な分野で流体の速度場の計測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)を用いた速度場可視化システムの構築することで、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。

しかしながら、この手法で情報を記録するホログラムから三次元情報を再生するには非常に計算時間がかかるために、本研究では、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた専用計算機システム (FFT-HORN 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ことが目的となっている。

## 3. 研究の方法

(1) ホログラム再生は再生面ごとに独立して計算が出来るので、並列処理に適していることから、並列度を上げて計算時間をさらに短縮することを行う(図1)。計算回路を最適化することで、専用計算機チップの動作周波数を試作1号機の133MHzから200MHzにまであげることが出来る。使用する大規模FPGAボードには、FPGAが4チップ搭載しており、各チップに計算回路を実装することで、1枚のボードで4つの面の再生を同時に行うことが出来る。また、大規模FPGAボードはPCIバスで接続される仕様になっているため、PCのマザーボードに複数枚搭載することが出来、さらにPCのクラスタ化することで、計算の並列度を上げることが出来、計算時間を短縮することが出来る。

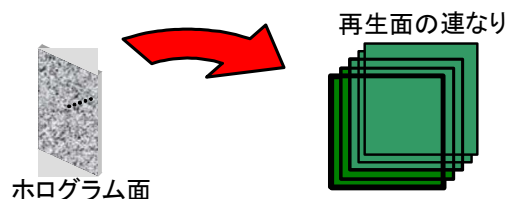


図1 再生空間

(2) ホログラムの再生計算は断面ごとに計算を分割すると、それぞれの計算に依存関係がないため、完全に並列して計算を行うことが出来る。この特性は並列化やクラスタ化には非常に有利な点となる。ただし、計算結果を一度PCに集める必要があるため、そのPCと専用計算機ボードとの間の通信時間とのかねあいを調べる事が重要である。現在、計算時間全体の割合は図2のようになっている。

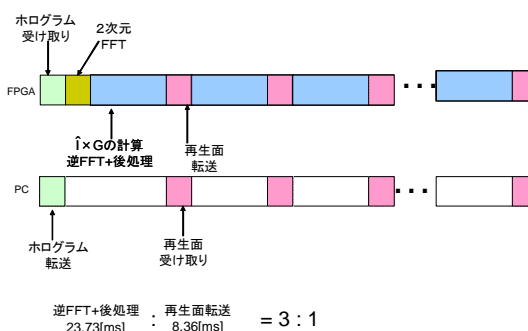


図2 計算時間の割合

これは試作機を使用して実測した処理時間で、専用計算機は133MHzの動作周波数で動作している。ホログラム再生のアルゴリズムには、再生像の光の強度を表す、フレネル-キルヒホッフの回折積分公式を、二次元FFTを用いて計算する手法を採用している。共通部分(ホログラム受け取り+二次元FFT)はどの断面図を計算するときも同じなので、最初の一回目だけ計算し、その結果をRAMに保存しておくことで、計算量を減らすことが出来る。PCとの通信と逆FFT計算については、時間が8.36msと23.73msで、約1:3の比率になっている。そのため図3のように四つの計算チップを使用することで、時間をロスすることなく計算を行うことが出来るようになる。そこで、図3のような計算を行うようなシステムを構築することで、試作システムの約四倍(PCに対して約28倍)の高速化が期待される計算機システムを構築する。

(3) 専用計算機ボードはPCIバスでPCと接続されているので、一台のPCに複数枚の専用計算機ボードを実装することが出来る。そこで、まず、二枚の専用計算機ボード

をPCに実装し、さらなる高速化をはかる。しかし、(2)に述べたように、現在の通信時間では、四並列がもっとも効率の良い状態である。

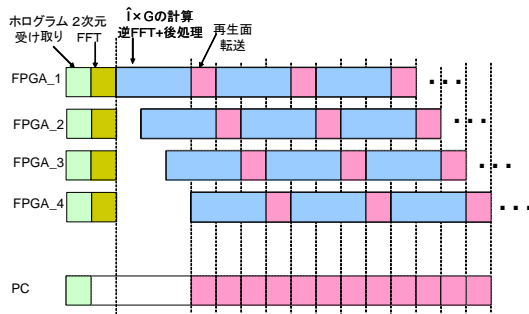


図3 4チップ並列計算

そのため、専用計算機ボードを増設しても、実行能力は、その分増加されるわけではない。そこで、ここでは通信時間を減らすことで並列度をさらに上げることにする。現在の通信方法は、1データごとに通信の前処理、後処理を行っているが、これをアドレスの連続する複数のデータを一度に送るようにする(図4)。こうすることで、通信時間を平均で約八分の一にすることが出来る。そのため、二枚の専用計算機ボードを同時に使用しても、その計算効率が落ちずにすむことになる。

また、二枚のボードで同じプログラムデータを使用するため、このデータをPCからボードに転送するとき、ブロードキャストな転送を行うことで、一度の転送命令で二枚のボード両方にデータを転送できるようになり、通信時間の短縮につながることになる。現時点での計算の高速化の見積もりだと、二枚の専用計算機ボードをPCに実装することで、PCに比べて約50倍の高速化が期待される。

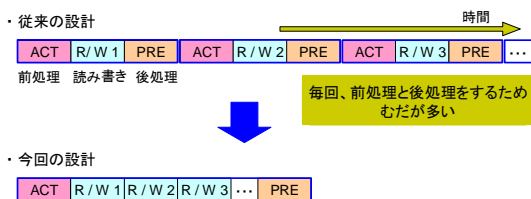


図4 データ転送の効率化

(4) 専用計算機システムを実際の実験系でのテストを行い、その有効性を判断する。また、FPGA内部の計算回路の最適化を行うことで、FPGAの動作周波数を現在の133MHzから200MHzにあげる予定である。さらに、実験によって得られた結果をもとに、計算回路の変更を行うことで、実際の実験にあった専用計算機システムの構築を行う。特に、再生像の光の強度はマーカとなる粒子の

位置を決めるのに不可欠なデータで、この値の閾値をどのくらいの値にするかで、速度場可視化の精度が決定される。そのため、実験データから、この閾値を決める必要がある。また、専用計算機ボードを搭載したPCのクラスタ化による高速化についても、研究を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 通信時間と計算時間の比から、四つの計算チップを使用することで、時間をロスすることなく計算を行うことが出来るようになる。そこで、四つの計算チップを使用した計算を行うようなシステムを構築し、試作システムの約四倍(PCに対して約28倍)の高速化された計算機システムを構築することに成功した。

(2) 通信時間の短縮を行うことで、理論上55個の計算チップを並列に使用することが出来、時間をロスすることなく計算を行うことが出来るようになる。そこで、専用計算機ボードを3枚搭載したPCでクラスタを構成することで、48個の計算チップを使用した計算を行うようなシステムを構築し、試作システムの約30倍(PCに対して約110倍)の高速化された計算機システムを構築することに成功した(図5)。

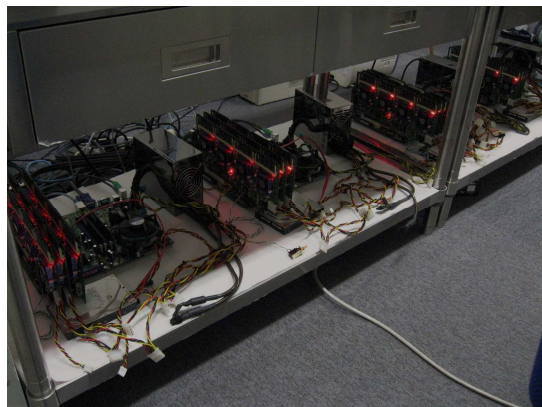


図5 専用計算機クラスタシステム

(3) また、更なる高速化のために、通信時間の短縮を行った。具体的には、通信されているデータのフォーマットの変更である。これにより、時間をロスすることなく計算を行うことが出来るようになった。

#### 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3件)

① Nobuyuki Masuda, Takashige Sugie, Tomoyoshi Ito, Shinjiro Tanaka, Yu Hamada, Shin-ichi Satake, Tomoaki

Kunugi and Kazuho Sato, Special purpose computer system with highly parallel pipelines for flow visualization using holography technology  
Computer Physics Communications, 181, 1986-1989 (2010)

② Yukio Abe, Nobuyuki Masuda, Yu Hamada, Tomoyoshi Ito, Shin-ich Satake, Tomoaki Kunnugi and Kazuho Sato, Highly Parallelized Special-Purpose Computer System for Flow Velocity Measurement by Digital Holography, The 15th International Display Workshops (IDW '08), December 3-5, Niigata, Japan (2008)

③ Yukio Abe, Nobuyuki Masuda, Hideaki Wakabayashi, Yuta Kazo, Tomoyoshi Ito, Shin-ichi Satake, Tomoaki Kunugi, and Kazuho Sato, Special purpose computer system for flow visualization using holography technology  
Optics Express, Vol.16, pp 7686-7692 (2008)

[学会発表] (計6件)

① 増田信之, 伊藤智義, 佐竹信一, 功刀資彰, 佐藤一穂, ホログラフィを用いた三次元流速計測専用計算システム, 第9回情報科学技術フォーラム, 2010年9月, 福岡

② Shin-ichi Satake, Tomoaki Kunugi, Kazuho Sato, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, High performance computing of Digital-Holographic PTV, The 9th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS2010), 2010.08, Yamagata Kaminoyama, Japan

③ 増田信之, 下馬場朋禄, 伊藤智義, マルチコア・プロセッサによるホログラフィ計算—FPGA及びGPUによる高速化例, 第8回デジタルホログラフィック応用計測研究会, 2010年3月, 東京

④ 増田信之, 伊藤智義, 田中慎治郎, 阿部幸男, 佐竹信一, 功刀資彰, 佐藤一穂, ホログラフィを用いた三次元流速計測専用計算機システムの並列化による高速化, 第8回情報科学技術フォーラム, 2009年9月, 仙台

⑤ 増田信之, 伊藤智義, デジタルホログラフィ再生専用回路による実時間流速計測, Optics & Photonics Japan 2008 (シンポジウム デジタルホログラフィの新展開),

2008年11月, つくば

⑥ 阿部幸男, 増田信之, 伊藤智義, 濱田悠, 佐竹信一, 功刀資彰, 佐藤一穂, DHPTV専用計算機システムの並列化による高速化, 第7回情報科学技術フォーラム, 2008年9月, 藤沢

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 信之 (MASUDA NOBUYUKI)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60323333