

平成22年 6月21日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20700053
 研究課題名（和文） GPU クラスタを用いた分散並列処理による科学技術計算の高速化に関する研究
 研究課題名（英文） A Study of the high-speed distributed and parallel computing with GPU cluster for scientific application
 研究代表者
 高田 直樹（TAKADA NAOKI）
 湘北短期大学・情報メディア学科・准教授
 研究者番号：50290713

研究成果の概要（和文）：画像処理を行う部品である GPU を複数のコンピュータに搭載（GPU クラスタ）し、科学技術計算の計算高速化に関する研究を行った。主に、電磁波シミュレーションと計算機合成ホログラム（CGH）を扱った。ホログラフィとは究極の3次元映像技術と呼ばれている。国際会議の招待講演を依頼され、CGH の本研究論文は Optics Express 誌において、2ヶ月連続でダウンロードランキング1位を達成するなど高い評価を得た。

研究成果の概要（英文）：A GPU cluster composed of many PC with several graphics boards equipped with a GPU. The high-speed computation using GPU cluster for scientific application, electromagnetic simulation and computer-generated hologram (CGH), was studied. Holography is called as an ultimate three-dimensional television. The result of this study was invited to make presentations in several international conferences. The paper about CGH was published in Optics Express, and was at the top of the download ranking in the journal for two months in a row.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2009年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：Graphics Processing Unit, General Purpose on GPU, GPU クラスタ, FDTD 法, 計算機合成ホログラム, High-Performance Computing, 分散並列計算, 計算機システム

1. 研究開始当初の背景

近年、3次元コンピュータグラフィックス(CG)を高速処理する必要性から GPU (Graphics Processing Unit) の計算性能は著しく向上している。GPU はコンピュータに

標準的に装備されたグラフィックスボード上に搭載されている。現在、GPU は単精度浮動小数点演算ユニットを複数持ち、ベクトル演算が可能となっている。理論性能においてもコンピュータに搭載されている中央処理

演算装置 (CPU) よりも非常に高速なものとなっている。これにより、GPU を CG 処理以外の汎用的な数値計算に利用することを目的とした研究が盛んとなっている。この研究は GPGPU (General purpose computation on GPU) と呼ばれている。

GPGPU の研究において、主なものにカリフォルニア工科大 J. Bolz らのグループによる Matrix 計算による流体シミュレーション (2003 年 SIGGRAPH) が報告されている。しかし、科学技術計算というよりも CG による利用を主眼においており、厳密性を考慮しておらず、自然現象を再現することを目的としている。ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) 分野では、IEEE/ACM Supercomputing 2005 においてノースカロライナ大学 N. Galoppo らのグループにより Matrix 計算の効率的なアルゴリズムが報告されている。

研究開始当初、最新の GPU で 500Gflops 以上の理論性能を持っていた。コストパフォーマンスに優れていることから、HPC において GPGPU に関する研究は重要となると考えた。

Matrix 計算以外の数値計算において、本研究の研究協力者である千葉大学伊藤智義教授らのグループにより行われた計算機合成ホログラム (CGH) の高速化が報告されている。CPU に対して 47 倍の計算高速化を達成している。また、本研究の代表者を含むグループは、フレネル回折積分の計算において、CPU に対し約 30 倍計算高速化を達成している。CGH はメモリアクセス量に比べ演算量が多く、GPU 向きの数値計算である。本研究の研究代表者は、電磁界シミュレーション手法として、最も利用されている FDTD 法の計算高速化に関する研究を行った。2 次元 FDTD 法の差分計算を、マイクロソフト社の HLSL を用いて GPU (NVIDIA Geforce 7800 GTX) に実装し、CPU (Intel Pentium4 3.4GHz) に比べ約 11 倍の計算高速化を実現した。さらに計算精度についても検討したところ、GPU による計算結果は単精度を保持した。FDTD 法の場合、演算量に比べメモリアクセス量が増えることから、一般的に計算高速化が難しい問題である。しかし、グラフィックスボードにおいて、デバイスメモリと GPU チップ間のメモリバンド幅は広帯域のため、CPU よりも計算高速化が実現できる可能性がある。

GPU のアーキテクチャのみならずプログラム開発環境も急速に発展している時期であった。2007 年 7 月に NVIDIA 社より CUDA (Compute Unified Device Architecture) と呼ばれる新しいソフトウェア開発環境が提供され、MPI (Message Passing Interface)、スレ

ッドも使用できるようになった。しかし、研究当初、CUDA 開発環境を含めプログラムの最適化に関する研究例は少なく今後の研究課題であった。また、GPGPU の研究は 1 台のコンピュータに GPU を搭載したものが主流であった。CUDA により GPU クラスタを用いた数値計算の高速化に関する研究が重要となると考えられ、本研究を行うこととした。

2. 研究の目的

GPU クラスタを用いて大規模な計算資源を必要とする科学技術計算を行い、計算高速化について検討することを目的とする。GPU クラスタで行う科学技術計算として、主に、計算機合成ホログラム (CGH) と FDTD 法による電磁界シミュレーションを扱う。

CGH とは、仮想的な 3 次元物体を点光源の集合体と考え、各光源からの光の伝播をコンピュータ上で計算し、ホログラム面上での干渉縞のデータを作製することである。CGH による動画の再生技術は電子ホログラフィと呼ばれ、究極の立体テレビになりえるものと考えられている。立体テレビの実現をめざす研究であり、リアルタイム処理が必要である。しかし、計算量が膨大であるため実用化までには至っていない。GPU を用いて計算した場合、CPU を介さず直接液晶ディスプレイに表示することができる。よって、GPU 向きの科学技術計算である。

FDTD 法は、電磁界シミュレーションとして最も利用されている手法である。しかし、実際の空間を離散化し計算するため、シミュレーションに使用する計算機メモリは膨大となる。この問題を打開する方法として、PC クラスタを用いた FDTD 法のアルゴリズムが提案されている。これは、解析領域を複数に分割し、各ノードに分割した領域を割り当て並列計算する方法である。各時刻の電磁界成分計算にはノード間通信を用いる。従来の方法と計算精度は変わらず計算高速化がなされるため、最も有力な手法となっている。本研究の研究代表者が提案したアルゴリズムを GPU クラスタに適用する。GPU により、計算高速化のみならず、CPU を介さず計算結果を直接ディスプレイに表示することができる。電磁波は目に見えないことから、現象を視覚的に把握できるため電磁波機器の開発に役立つ。しかし、FDTD 法は演算量に比べ計算に用いるデータ量が多く、クラスタ化するにあたりノード間通信のデータ量が多く、計算高速化しにくい科学技術計算である。

研究開始当初、GPU 用のプログラム開発環境は発展段階にあり複数存在し、プログラムの最適化についても重要な研究課題であっ

た。そのため、単にGPU クラスタへ実装することを目的とせず、シングルGPUにおけるプログラムの最適化について十分検討した上でGPU クラスタへ実装し、計算高速化について検討することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で構築するGPU クラスタを図1に示す。ノード間のネットワークとして汎用的なギガビットイーサネットを使用した。本研究では、コストパフォーマンスを考慮しているため、各ノードは汎用的なパソコンの部品で構成し、CPUにIntel Core2Duo E8400（クロック：3.0GHz）、メモリは2GB（DDR3-1333MHz）を搭載し、当時の最新GPU（NVIDIA社 GeForce GTX 280）を各ノードに2枚搭載した。

オペレーティングシステムとしてLinux（Fedora）を使用し、1つのノードをNetwork File System（NFS）サーバとし、その他の8ノードをNFSクライアントとした。プログラムはC言語をベースとして作製した。コンパイラにはGNU CとIntel Cコンパイラを使用し、Message Passing Interface（MPI）ライブラリ及びOpen MPが使用できる環境とした。

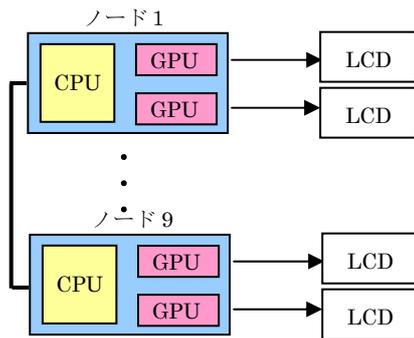


図1 GPU クラスタシステム

CGHでは、計算機上でホログラムを生成する際、負荷が大きくなるのは式(1)のホログラム面上の光の強度 I を求める光の重ね合わせ計算である。

$$I_i = \sum_j A_j \cos(kR_{ij})/R_{ij} \quad (1)$$

ここで、 i はホログラム点、 j は物体点を表し、 A_j は j 点における光の強度、 R_{ij} は ij 間の距離、 k は照射する参照光の波数である。GPUを搭載したグラフィックスボードに液晶ディスプレイ（LCD）を接続する（図1）。GPUにおいて、式(1)の計算を行い、計算されたホログラム面上の光の強度を2値化し、CPUを介さず、直接、LCDに表示する。並列化する場合、ホログラム面を分割し各ノードに割り当てる。ノード間通信は物体点データのみであり、演算時間に比べて極めて少ない。よって、GPUクラスタ向きの数値計算である。

FDTD法は、計算に用いるデータ量に比べ計算量が少なく高速化がしにくい。GPUはCPUに比べメモリバンド幅が広いため、CPUよりも計算高速化できる可能性が高い。GPUにより計算高速化を実現するには、メモリアクセス時間を可能な限り短縮する必要がある。最初に、シングルGPUにおいて最適化の方法を検討する。本研究で使用するGPU（NVIDIA GeForce GTX 280）を搭載したグラフィックスボードは、1GBのデバイスメモリを持つ。FDTD法では、大きな計算領域において計算高速化がなされることが望ましい。よって、計算に使用するメモリ量と計算速度について検討し、計算に使用するメモリ量が増えても計算速度が低下しない方法について検討する。その後、計算領域を分割し、各領域をGPUクラスタの各ノードに割り当て実装し、計算高速化について検討する。

4. 研究成果

プログラム開発環境（マイクロソフト社のHLSL、NVIDIA社のCg、CUDA）による差異を調べるため、NVIDIA社 GeForce GTX 280を用いてシングルGPUで性能評価を行った。HLSL及びCgは、CG処理用プログラム開発言語である。GPUで行わせる処理の自由度が少なく、特定の科学技術計算に限られる。FDTD法の計算においては、Cgの場合、若干ではあるが計算誤差が多くなることが確認された。HLSLの場合、GPUで計算した結果とCPUのみで行った結果とを比較したところ単精度の誤差にとどまっていた。一方、CUDAにおいては、CG処理を意識することなくプログラムを開発することができる。CPUからGPUへのデータ転送を初め、GPU側のプログラムにおいてもより細かな処理を指示することが可能である。しかし、CUDAを用いてプログラムを開発する場合、GPUのアーキテクチャを考慮してコーディングする必要である。今後のドライバ及び開発環境のアップグレードを考慮し、本研究ではCUDAを使用した。

NVIDIA社製GPUアーキテクチャは2次元問題向きの構成となっている。よって、FDTD法においてシングルGPU用2次元FDTD法のプログラム開発を行った。グラフィックスボードには、大容量のデバイスメモリが搭載されている。しかし、メモリアクセス速度は低速である。GPUチップ内に共有メモリが搭載されている。容量は少ないがアクセス速度は高速である。本研究では、計算領域の電磁界成分をグラフィックスボードのデバイスメモリ上のグローバルメモリに格納した。メモリアクセス時間を短縮するため、計算領域を分割し、その領域（副領域）内の電磁界成分データをGPUの共有メモリに格納した。FDTD法の場合、副領域

において隣接する副領域と重複する領域が必要になる。本来、1つの副領域に対し4つの副領域と隣接することになる。しかし、重複領域が大きすぎるとグローバルメモリ-共有メモリ間のデータ転送時間が増加するため計算速度が低下する。重複領域を減らすため、電界及び磁界計算において異なる副領域を使用し、1つの副領域に対して2つの重複領域とした(図2)。CUDAを用いた数値計算では1ブロックあたりの2次元スレッド数を 16×16 とする場合が一般的となっていた。本研究において、

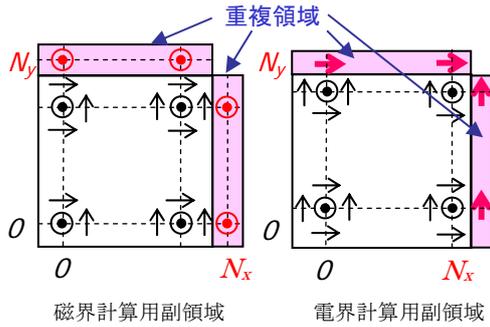


図2 提案したGPU用副領域

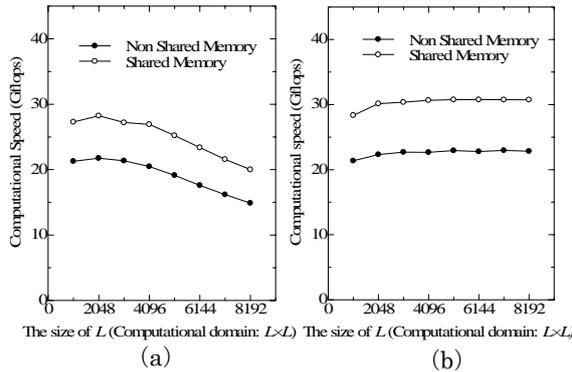


図3 計算領域に対する計算速度

2次元スレッド数を同様にし、計算領域の大きさに対するGPUの計算速度について検討した。なお、グローバルメモリにおいてCoalesced memory accessを使用している。しかし、計算領域が大きくなると計算速度が低下する問題が生じた(図3(a)の“Shared Memory”)。本手法及び共有メモリを使用しない場合(図3(a)の“Non Shared Memory”)においても同様の結果となった。メモリアドレスの連続性を考慮し、2次元スレッド数を変更して計算速度を計測したところ、計算領域 $8,192 \times 8,192$ において“Shared Memory”の場合、2次元スレッド数(32×4)において最速となった。なお、“Non Shared Memory”の場合、最速となる2次元スレッド数は(64×4)であった。この2次元スレッド数を用いたときの計算領域に対する計算速度の結果が図3(b)である。計算領

域の大きさに関わらず計算速度が一定となった。図4(a)はCPUに対する本手法による計算高速化を示す。なお、CPUはIntel Core2Duo 3.0GHzを使用し、1コアを用いて計算を行った。その結果、CPUに対して約100倍の計算高速化を達成した。実測したメモリバンド幅より導出したGPUのピーク性能に対して、本手法を評価したところ約80%の性能を引き出していることが確認された(図4(b))。本研究により、IEEE AP-S, ACESの国際会議において招待講演の依頼を受け、国外においてインパクトのある研究であったことを示している。

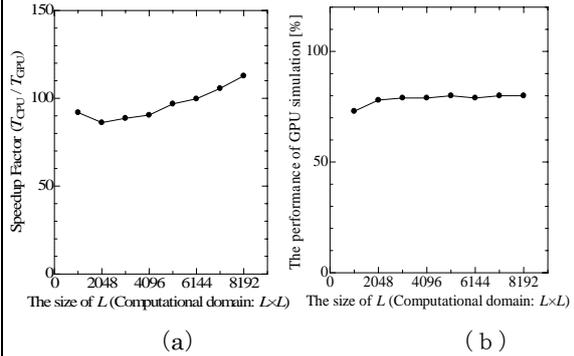


図4 本手法の計算性能

GPUクラスタを用いたFDTD法の計算高速化の研究は現在も引き続き行っている。しかし、グラフィックスボード上のメモリ(ビデオメモリ)からホストPCのメインメモリへのデータ転送時間が遅いといった問題がある。また、本研究で使用したGPUクラスタはノード間通信がギガビットイーサであり低速であるため、本システムによる計算高速化は難しい。前者の問題は、GPUのドライバ、もしくはハードウェアのアーキテクチャに依存するため、改善が容易ではない。後者の問題は、コストパフォーマンスに優れているとはいえないが、Infinibandのような高速なネットワークを使用することにより改善できる可能性がある。

CGHの研究において、最初、シングルGPUにおけるGPU用プログラムを開発し、計算高速化について検討をした。物体点データをグローバルメモリに格納した。CGHの計算では、物体点データに比べ演算量が格段に大きくなる。よって、物体点データをCPUからグラフィックスボード上のデバイスメモリへ転送する時間は演算時間に比べ無視できるほど小さくなる。しかし、CGHではリアルタイム処理が要求されるため、メモリアクセス時間を短縮させる必要がある。そのため、グローバルメモリにおいてCoalesced memory accessを使用し、GPUで計算する際、共有メモリに格納した。さらに、計算高速化におけるプログラミング手法であるループアンローリングを使用し、GPU

内の1スレッドにおける演算量などをチューニングし、計算時間を大幅に短縮させた。最終的に、物体点数1,024点、ホログラムを表示する液晶ディスプレイの解像度が1,400×1,050のとき、単色で計算時間31.02msecを達成した。CPU (Intel Core2Duo 2.66GHz) に対して約1,500倍の計算高速化を実現した。本研究で開発したプログラムを用いて、赤、緑、青の3枚のホログラムをシングルGPUで計算し、カラー再生を行った (図5)。この研究論文は、光学分野のトップジャーナルである Optics Express誌に掲載され、当論文のWebサイトにおいて2009年10, 11月と2ヶ月連続で論文ダウンロード件数1位を達成した。また、本論文はNVIDIA社のGPUに関するWebサイト「CUDA ZONE」においても紹介された。このように、国外において、非常にインパクトのある研究であったことが示された。

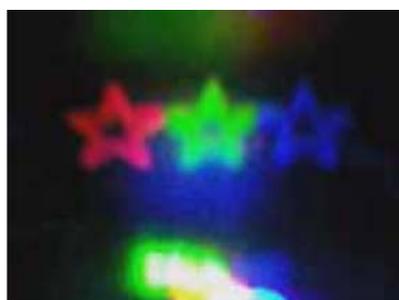


図5 GPUによるCGHの再生像

CGHのカラー再生では、光学系が必要なため、コンパクトな計算機システムが便利である。そのため、1台のPCに3枚のグラフィックスボードを搭載し、マルチGPU環境を用いて行った。各グラフィックスボードで、赤・青・緑のCGH計算を並列に行わせた。なお、3個のGPU計算の同期処理を行うためMPI(Message Passing Interface)を使用した。その結果、物体点数1024点、液晶ディスプレイの解像度1,920×1080において、1枚のホログラムあたりのGPU処理時間は45.27msecであった。つまり、1秒間に約22枚のホログラムを再生できることを意味し、物体点数1,024点においてリアルタイム再生が実現できたこととなる (図6)。さらに、本研究で開発したCGH計算用プログラムを並列化し、GPUクラスタに実装した。GPUクラスタにおいて、ノード間物体点データ通信、及び、GPUの同期処理のためにMPIライブラリを使用した。現在、各ノードに1枚のグラフィックスボードを搭載し、8ノードにおける計算高速化について検討した。その結果、8ノードまで増やしても顕著な計算速度の低下はなく、十分な計算高速化を実現することができた。

FDTD法では、CPU-GPU間、及び、ノード間通

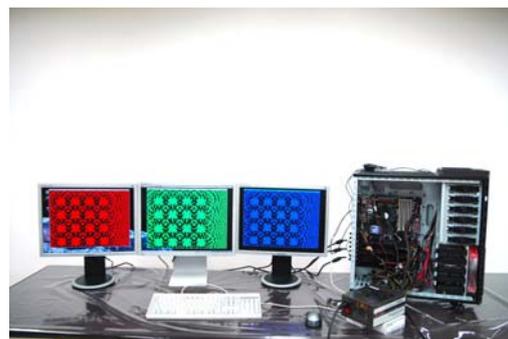


図6 マルチGPU環境によるCGH計算

信がボトルネックとなる。高速なネットワークを用いたマルチGPUクラスタにより、ノード間通信のボトルネックを克服できる可能性がある。また、CGHでは、マルチGPUクラスタにより、少ないノード数でもより多くの物体点数においてリアルタイム再生ができる可能性がある。さらに、NVIDIA社の次世代GPUは倍精度浮動小数点演算性能を向上させている。電磁界問題では位相誤差が重要であり、FDTD法においても倍精度が必要である。今後、本研究を発展させ、マルチGPUクラスタを用いたCGH、及び、FDTD法の倍精度における計算高速化の研究を行う予定である。

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5件)

- ① Tomoyoshi Simobaba, Tomoyoshi. Ito, Nobuyuki Masuda, Yasuyuki. Ichihashi, Naoki Takada, Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL, Optics Express, Vol. 18, 2010, pp.5-9960.
- ② Atsushi. Shiraki, Naoki Takada, Masashi Niwa, Y. Ichihashi, T. Shimobaba, N. Masuda, Tomoyoshi Ito, Simplified Electro-holographic Color Reconstruction System Using Graphics Processing Unit and Liquid Crystal Display Projector, Optics Express, Vol. 17, 2009, pp. 16038-16045.
- ③ Naoki Takada, Nobuyuki Masuda, Takashi Tanaka, Yukio Abe, Tomoyoshi Ito, A GPU Implementation of the 2-D Finite-Difference Time-Domain Code using High Level Shader Language, Applied Computational Electromagnetics Society Journal, VOL.23, No.4, 2008, pp. 309-316.
- ④ 高田直樹, 滝沢努, 宮兆喆, 増田信之, 伊藤智義, 下馬場朋祿, 統合型シェーダを搭載したGPUによる2次元FDTD法差分計算の高速化, 電子情報通信学会誌,

Vol. J91-D, No.10, pp.2562-2564.

- ⑤ 高田直樹, 滝沢努, 増田信之, 伊藤智義, GPUを用いた2次元定常熱伝導方程式の数値計算高速化, 第7回情報科学技術フォーラム講演論文集, 第1分冊, pp.23-24.

[学会発表] (計12件)

- ① [Invited] Naoki Takada, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda, Tomoyoshi Ito, The Performance Evaluation of CUDA Implementation for Fast FDTD Computation Using a Single GPU, The 26th International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, 2010年4月27日, Tampere Hall (フィンランドタンペレ市).
- ② 高田直樹, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, シングルGPUによるFDTD法の計算高速化に関する検討, 電子情報通信学会2010年総合大会, 2010年3月16日, 東北大学(宮城県).
- ③ 下馬場朋祿, 三瓶卓方, 市橋保之, 高田直樹, 白木厚司, 中山弘敬, 杉江崇繁, 増田信之, 伊藤智義, GPUクラスタと波面記録法によるフレネル計算機合成ホログラムの高速生成とスケラビリティの評価, ホログラフィックディスプレイ研究会会報, 2009年9月4日, 日本大学(千葉県).
- ④ 高田直樹, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, GPUによる共有メモリを効率的に用いたFDTD法差分計算の高速化, 第8回情報科学技術フォーラム, 2009年9月2日, 東北工業大学(宮城県).
- ⑤ 下馬場朋祿, 市橋保之, 高田直樹, 白木厚司, 杉江崇繁, 増田信之, 伊藤智義, 波面記録面を導入した計算機合成ホログラムのGPUによる高速化, 2009年映像情報メディア学会年次大会, 2009年8月27日, 工学院大学(東京都).
- ⑥ 三瓶卓方, 下馬場朋祿, 市橋保之, 白木厚司, 中山弘敬, 杉江崇繁, 高田直樹, 増田信之, 伊藤智義, GPUクラスタを用いた1800万画素電子ホログラフィシステム, 3次元画像コンファレンス, 2009年7月10日, 東京大学(東京都).
- ⑦ [Invited] Naoki Takada, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda, Tomoyoshi Ito, High-Speed FDTD Simulation Algorithm for GPU with Compute Unified Device Architecture, 2009 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2009年6月1日, Embassy Suites Convention Center (アメリカ合衆国サウスカロライナ州).
- ⑧ 丹羽雅史, 岡田直久, 荒井大輔, 増田信之, 伊藤智義, 白木厚司, 高田直樹, 下馬場朋祿, GPUによる計算機合成ホロ

グラムの高速化, 2009年3月9日, 山形大学工学部(山形県).

- ⑨ 佐々木昇平, 下馬場朋祿, 市橋保之, 白木厚司, 中山弘敬, 杉江崇繁, 高田直樹, 増田信之, 伊藤智義, GPUクラスタを用いた回折計算の高速並列計算システム, 2009年3月9日, 山形大学工学部(山形県).
- ⑩ Tomoyoshi Shimobaba, Tsubasa Nakajima, Atsushi Urayama, Takuho Sanbei, Yasuyuki Ichihashi, Yukio Abe, Hiroataka Nakayama, Nobuyuki Masuda, Atsushi Shiraki, Naoki Takada, Tomoyoshi Ito, A real-time color electroholographic display system using the space-division method and the GPU cluster, The 15th International Display Workshop, 2008年12月4日, 朱鷺メッセ(新潟県).
- ⑪ Syohei Sasaki, Tomoyoshi Shimobaba, Yukio Abe, Atsushi Shiraki, Yasuyuki Ichihashi, Hiroataka Nakayama, Nobuyuki Masuda, Takashige Sugie, Naoki Takada, Tomoyoshi Ito, Fast calculation system for diffraction integrals using a GPU cluster and the GWO library, 2008 Tohoku-Section Joint Convention of Institutes of Electrical and Information Engineers, 2008年8月21日, 日本大学工学部(福島県).
- ⑫ 下馬場朋祿, 三浦潤也, 佐藤芳邦, 阿部幸男, 白木厚司, 市橋保之, 中山弘敬, 増田信之, 杉江崇繁, 高田直樹, 伊藤智義, GPUを用いた波動光学計算用ライブラリGWOライブラリの開発とその応用, 3次元画像コンファレンス, 2008年7月11日, 東京大学(東京都).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 直樹 (TAKADA NAOKI)

湘北短期大学・情報メディア学科・准教授
研究者番号: 50290713

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: