

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540346

研究課題名(和文) GPGPUによる重力波ラジオメトリ計算の高速化

研究課題名(英文) Development of High-Speed Processing of Gravitational Wave Radiometry using GPGPU

研究代表者

神田 展行 (Kanda, Nobuyuki)

大阪市立大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50251484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：重力波ラジオメトリとは、複数台の検出器の同時観測データを用いて天球上のある決まった位置から到来する微弱な重力波信号を抽出する方法である。天体起源の背景重力波や原始重力波の異方性などの検出が期待できる。

本研究では、この計算をGPGPUを用いて、最終的に計算工程全体をCPUを用いた場合に比較して100倍近くの高速化を達成した。また、高速化を利用して、波源弁別性をもたせたフィルタの開発などに成功した。

研究成果の概要(英文)：The global gravitational wave observation network is expected to start around year 2017 or 2018. Gravitational wave radiometry is a method which will make possible to extract gravitational signal from certain direction of the sky using multi-detectors and long duration integration, even if waves are incoherent and weak. However, the radiometry calculation requires verbose calculations such as iteration for sky positions and of short chunks for long observation. Thus, the aim of our research program is high-speed up of radiometry calculation using GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units).

We achieved about 100 times faster calculation with GPGPU comparing with previous CPU. It is not straightforward to compare GPU and CPU in equal condition, but the result is derived on same cost-performance. Using this speed-up, we studied the variation of application of radiometry, e.g. source separate filter using different waveband.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：相対論・重力(実験)

1. 研究開始当初の背景

重力波の直接検出を目指す高感度のレーザー干渉計検出器による観測ネットワークがごく近い将来に(2017~2018年)その稼働を期待されている。そこではいくつかの重力波源が期待されているが、背景重力波の類いは複数台の検出器の観測データを長時間使用して探索を行う。銀河団に内包される多数の重力波源の重ね合わせのような天体起源の背景重力波や、宇宙論的な源による原始重力波の異方性などに有感な解析として、「ラジオメトリ計算」が考案されていた。

本研究の申請時点では、数本の専攻研究論文が存在したが、実際のデータでの結果やシミュレーションについてはまだ数が少なかった。(報告書時点では、我々のものも含めて論文が増えてきている。また感度は不十分であるが、現行の検出器での解析結果も成果公表されている。) 2台の検出器に到来する重力波は、重力波源の方向によって時間差が生じる。重力波源と検出器の相対配置は地球の自転・公転によって変化するので、これを考慮した積分フィルタで連続的な重力波を探索し、天球上にマッピングが可能である。これが重力波ラジオメトリであり、波形を仮定せずに連続的な波源を全天で探索できる優れた解析手法である。

しかし、この解析手法では、長いデータの積分を仮定する方向毎に繰り返す冗長な計算が必要であり、背景重力波を異方性や局所波源をもたせてシミュレーションで生成すると、複数台の検出器の同時観測の再現には多くの演算を必要とする。そのため、ラジオメトリ解析の研究を進めるためには、高速化が必要であった。

2. 研究の目的

ラジオメトリ計算をGPGPU(画像処理演算装置による汎目的計算)を用いて高速化するのが、本研究の第1の目的である。

また、高速化に成功すれば、将来の観測実験での実用はいうまでもなく、さらにいろいろな重力波源を想定してのシミュレーションや、探索フィルタの最適化といった研究の応用変化生むことができる。これを第2の目的とした。我々自身の研究でもあった「乙女座銀河団からの重力波」についての数値シミュレーションについても、計算の高速化に期待した。

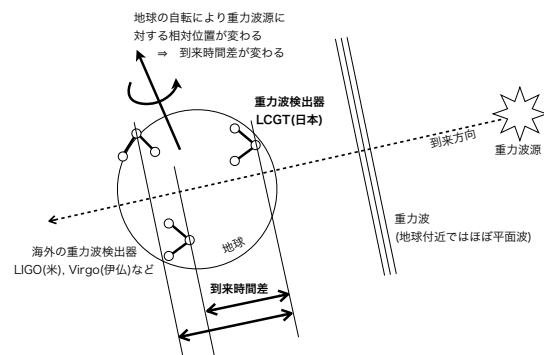
第1の目的「高速化」には、GPU(Graphics Processing Unit: 画像処理演算装置)を用いて高速化や負荷分散を達成する方法(GPGPU: 画像処理演算装置による汎目的計算)が有望であった。GPGPUによる処理で、数倍~数十倍の速度改善が期待できる。これは、ラジオメトリの計算が、究極的には時間差を変化させながらの信号相関計

算であるからであり、このような比較的単純な信号処理にはGPGPUが有効であると思われた。ただし、開始時点では我々にはGPGPUを用いた開発のノウハウがなく、重力波のデータ解析にGPGPUを使えるようにするところから始める必要があった。

また第2の目的については、高速化が成功すれば、さまざまなアイデアを試験することが期待できた。

3. 研究の方法

ラジオメトリ計算では、図のように、複数台の検出器に時間差をもって到来する信号を処理する。そのため、地球の自転、信号到来、雑音を再現するシミュレーションをおこない、さらにそれを計算処理することをおこなった。



図：重力波ラジオメトリの原理

まずは自前でGPGPU開発環境を構築した。ラジオメトリ計算で多くの計算時間をついやすのは、高速フーリエ演算と乱数生成である。最初はこれらを中心に、ラジオメトリ計算に必要な各段階での計算をGPGPU上で動作させた。

次の段階は、以前にCPUで開発したラジオメトリ計算を、GPGPUに移植することである。移植が成功した段階で、内部的な計算の改善と、全体を高速化するための問題点がすこしずつ明らかとなった。まず、GPUの性能を發揮できるようになると、CPU側とのデータI/O速度が律速段階となる。このため、データのやりとりを最小限にすること、一度に多くのデータをやり取りしないこと、ある決まったデータの塊に対して多くのコアを使った並行演算を行うようなアルゴリズムが必要とわかってきた。すなわち、先にCPUで開発したプログラムとは、異なる最適化が必要であることが明らかになった。また、GPUの初期化が必要とする処理時間があり、毎回の計算ではなく、ラジオメトリ計算全体で1回の初期化で済むような工夫が必要であった。

プログラムの工夫と並行して、GPUを増設して計算全体の高速化についてのスケラビリティのテストも行った。並行化や、データの扱いの分散化が可能になれば、増設メ

リットは線形となる。ラジオメトリはデータ処理を時間的にさかのぼって繰り返したり、条件分岐が少ない故、こうした並列化や分散化がうまく進められた。

こうした計算機やプログラムの技術的な開発において、大学院生（田中一幸氏、大阪市立大学、2013年度に修士号、現博士後期課程在学）が多大な貢献をおこなった。

ラジオメトリの基礎的な理論や技術的な問題について、以前から共同研究を行っていたインドの研究者と交流を続けられたことも、本研究について役に立った。



図：開発用の GPGPU ワークステーション
CPU：Intel Xeon X5650 2.67GHz (6 cores)
GPU：Nvidia Tesla C2075 1.15GHz (448 cores) 本研究の2年目にさらに GPU を増設、計3基の GPU を用いた。
OS：Scientific Linux ver.2.6

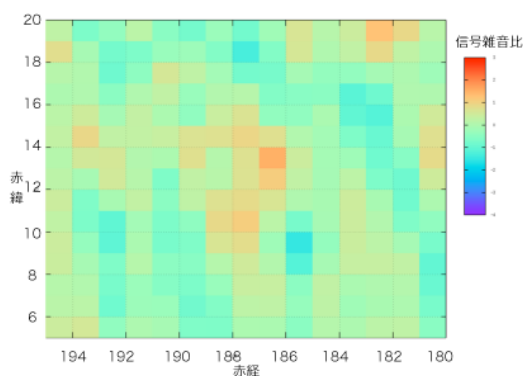
4. 研究成果

研究期間全体を通じての大きな成果は、GPGPU を用いたことでシミュレーションを含むラジオメトリ計算工程全体を CPU を用いた場合に比較して 100 倍近く高速化できたことである。コア数やメモリサイズといった CPU, GPGPU の条件が違うので、一概に高速化を「何倍」とすることはやや乱暴な比較ではあるが、今回の研究で導入した Linux ワークステーションの環境化での比較であり、対費用効果的には数十倍程度の高速化に成功したといっただらう。すなわち、本研究の最大の目的である GPGPU による高速化が達成され、研究課題は成功した。

2011-2012 年度は、導入した GPGPU 環境でのプログラム開発や FFT 動作をもとに、ラジオメトリフィルタの実装をすすめた。一部（アンテナ応答補正の部分）を除いて、ラジオメトリを GPU 上で動作させ、シミュレーションデータではあるが観測データ相当を GPU に渡して処理する計算工程の実装が進んだ。この結果、GPU により FFT 処理部分では数倍の高速化を確認した。一方で、GPU と CPU/メモリ間でのデータの受け渡しを工夫しなければ全体としての高速化のメリットが少なくなる。このため、より効率的なデータ分割のしかたや、GPU の 1 ユニットに行わさせる

計算内容や処理フローの見直しを進めた。また複数の GPU ユニットを同時に使用する場合のスケーリングメリットを評価するために、2 ユニットの GPU を追加した。これらでも FFT 等の動作を確認した。最終 2013 年度は、ここまで組上げた計算機環境を活かして、ラジオメトリ計算の GPGPU コアにおける並列化や、CPU 側とのデータ受け渡し、全体の処理フローの最適化等を行い、上述の通り約 2 桁の計算速度改善が達成された。

また高速化を利用してラジオメトリの可能性を探るためのシミュレーション研究を進め、複数周波数帯によって波源を弁別したり、数週間から数ヶ月で減衰するような重力波源に対しての応答などを見積もった。これらの研究結果は複数回の国際会議、国内学会、および投稿論文で発表された。また学位論文（田中一幸 2013）としても成果がまとめられた。（下図参照）



図：乙女座銀河団起源の重力波についてのシミュレーション解析結果（田中氏修士論文）KAGRA-advLIGO での 3 年間の観測で $S/N > 3$ 程度を得る。

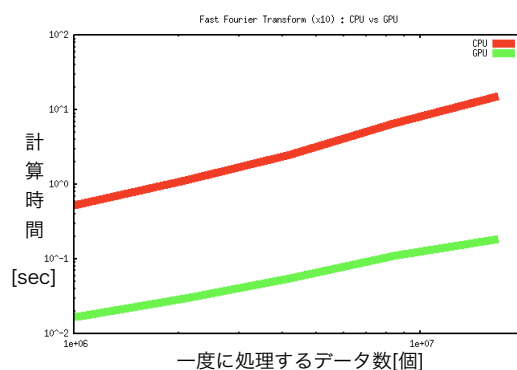


図 3.2 CPU と GPU での FFT の計算速度の比較、縦軸の値は低い程高速である
図：FFT 計算速度の比較（田中氏修士論文）CPU 赤、GPU 緑

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 2 件)

[1] Yuta Okada, Nobuyuki Kanda, Sanjeev Dhurandhar, Hideyuki Tagoshi and Hiroataka Takahashi,

“The cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves : Numerical study for point spread function”,
Journal of Physics : Conference Series 362 (2012) (査読有) 012040-1~9,
DOI:10.1088/1742-6596/363/1/012040

[2] Sanjeev Dhurandhar, Hideyuki Tagoshi, Yuta Okada, Nobuyuki Kanda, and Hiroataka Takahashi,

“Cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves”,
Phys. Rev. D 84 (2011) (査読有)083007-1/8
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.083007

[学会発表] (計 12 件)

[1] 田中一幸, 神田展行
GPGPUによる重力波ラジオメトリ天球マッピング
日本物理学会 第69回年次大会
2014/3/27 東海大学

[2] Kazuyuki Tanaka
“Gravitational Wave Radiometry : Numerical study and fast processing with GPGPU”
新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」A04/05 Joint Camp
2014/2/23 城崎

[3] Kazuyuki Tanaka, Nobuyuki Kanda
“Gravitational Wave Radiometry : Fast processing and large scale simulations with GPGPU”
Gravitational Wave and Astronomy Workshop 2013
2013/12/18 IUCAA, Pune, India

[4] 田中一幸, 神田展行, 田越秀行, KAGRA collaboration
“重力波ラジオメトリ : GPUを用いた計算の高速化と天球マッピング”
日本物理学会 2013年秋季大会
2013/9/23 高知大学

[5] 田中一幸
GPGPUを用いた重力波ラジオメトリ:シミュレーションと計算の高速化
日本物理学会第68回年次大会
2013/3/26-29 広島大学

[6] 神田展行
天球マップの畳み込み逆解きによる重力波源方向の決定精度
日本物理学会第68回年次大会
2013/3/26-29 広島大学

[7] 田中一幸
GPGPUの適用による重力波ラジオメトリ計算の高速化
日本物理学会 2012年秋季大会
2012/9/11-14 京都産業大

[8] Kazuyuki Tanaka
“GPGPU for rapidly processing of Gravitational Wave Radiometry and Prospects for Virgo-cluster Hotspot”
Gravitational Wave Physics & Astronomy Workshop (GWPAW) 2012
2012/6/4-7, Hannover, Germany

[9] Takahiro Yamamoto
“Seamless time series generator for KAGRA noise and GW numerical simulation”
Gravitational Wave Physics & Astronomy Workshop (GWPAW) 2012
2012/6/4-7, Hannover, Germany

[10] Hiroataka Yuzurihara
“Continuum, Grain and Burst Behaviors of Stochastic Gravitational Waves from Cosmic Strings by Numerical Simulation”
Gravitational Wave Physics & Astronomy Workshop (GWPAW) 2012
2012/6/4-7, Hannover, Germany

[11] 神田展行、田中一幸
GPGPUによる重力波ラジオメトリ計算の高速化
物理学会第67回年次大会
2012/3/24 関西学院大学

[12] Sanjeev Dhurandhar, Hideyuki Tagoshi, Yuta Okada, Nobuyuki Kanda and Hiroataka Takahashi,
“The cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves”,
The 9th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves
2011/6/13 カーディフ大学(英国、カーディフ) (plenary session)

〔図書〕（計 1 件）

[1] 「重力波とブラックホールの深い関係」,
神田展行 岩波書店・雑誌『科学』2011年
4月号 p. 338（3ページ）

〔その他〕

ホームページ等

大阪市立大学理学研究科 神田研究室ホーム
ページ

<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 展行 (KANDA, Nobuyuki)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50251484

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし