

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740171

研究課題名(和文) デジタルシステムを利用した重力波データ取得システムの開発

研究課題名(英文) Development of data acquisition system for gravitational wave using digital system

研究代表者

宮川 治 (Miyakawa, Osamu)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：90532680

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)：本研究では、重力波検出のための100mプロトタイプCL10を使い、干渉計の制御、データ取得、調整等の一連の操作を計算機を使って実現するための基礎技術を確立した。本システムの稼働にともない、重力波観測に必要なシステムの時刻同期や重力波データフォーマットの定義やデータの低遅延転送等に関し、将来システムが大型化された際にも有用な知見を得ることができた。当初のKAGRAへの応用と言う目的はほぼ達成できたと言え、本研究の成果は将来の重力波の直接検出時のための安定な観測体制を築く技術に直接結びつくものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study used a 100 meter prototype gravitational wave detector called CL10, and established basic technologies for control, data acquisition, diagnostic of interferometers using computers with real time operating system. We obtained some prospects for a definition of gravitational wave data format, low latency data transfer, and other useful techniques for future large scale interferometers. We believe that results of this study will be directly used as technologies for a direct detection of gravitational wave when the observation starts by the KAGRA, 3km interferometer.

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：重力波 干渉計 リアルタイム制御 精密計測

1. 研究開始当初の背景

1916年にA. Einsteinの一般相対性理論の中で予測された重力波であるが、重力波と物質との相互作用は非常に微小であると考えられるため、1960年代の共振型検出器の実験から、現在主流のレーザー干渉計型検出器に至るまで、これまでのところ未だに直接検出には至っていない。重力波の直接検出はこれまでの電磁波による天文学では得ることのできなかつた宇宙からの様々な情報をもたらすと考えられ、新たな重力波天文学という分野を創設する可能性を持っている。近年、大型レーザー干渉計を用い重力波を直接検証を試みようという気運が国際的に高まっていて、米国、仏伊ではそれぞれ数kmの干渉計が稼働し、日本でもTAMA及びCLIOと呼ばれる基線長がそれぞれ300mと100mの2台の干渉計が建設された。2001年にはTAMAが世界最高感度を出し、またCLIOでは2009年度に干渉計の低温動作に成功するなど、非常に優れた成果をあげてきたが、海外でkmクラスが稼働している現在では、国内の100mクラスの干渉計では感度の点で欧米に到底太刀打ちできなかった。このような状況の中、2010年度ついに155億円のプロジェクトとして基線長3kmの大型低温干渉計LCGT(当時の名称、現在はKAGRA)計画が認可され、岐阜県神岡鉱山内に本格的な重力波検出器が建設されることが決定した。

大型干渉計を建設する際、近年急速に重要度を増してきて、かつ日本のグループが手つかずになっていた要素技術の一つが、計算機を利用したデジタルシステムによる干渉計の制御及び、それを用いたデータ取得と解析である。米国LIGOグループでは、早くからその重要性を認識し、デジタル制御を導入することで世界最高感度の干渉計を計3台有し、データ取得まで含めてその運用に当たっている。

本研究のきっかけとなった2009年度からの「デジタル制御を利用した重力波検出器の開発」において、LIGOグループとの国際共同開発によって整備してきたデジタルシステムが、基線長100mのプロトタイプ干渉計CLIOに導入された。その中で、デジタル制御を使った干渉計の動作が確認され、CLIOにおけるデジタル固有のノイズハンティングを経て、デジタル化以前に達成されたアナログ制御での感度に迫る性能を実現してきた。次のステップとして、基本性能の優位性を利用した、データ取得、及び観測、解析システムの検証が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2010年度に建設が決定された日本の大型重力波検出器計画KAGRAのプロトタイプである、100m干渉計CLIOにおいて、干渉計制御のための動作確認が完了したデジタルシステムを用い、重力波信号のデータ取得及び観測システムを構築する

ことである。

最近の感度向上に貢献している技術や、重力波データを解析するソフト等の開発はデジタルシステムを前提にした物がほとんどであるのが現状で、これまでの日本のシステムではそれらを使いたくても使えない状況が続いていた。デジタルシステムを導入することにより世界で標準の技術を使用するための足がかりとなるだけでなく、開発、及び感度向上への時間短縮へつながることが期待される。またKAGRAにおいて、データ取得システム及び、データ解析システムの早期立ち上げは極めて重要であり、そのプロトタイプ干渉計であるCLIOを使い、稼働中の実測データを用いてシステムを構築することは、実際の重力波を検出する際のKAGRAの導入及びテストに向けて、極めて有利である。

今回開発する重力波観測システムの中で、重要なアイテムとして、タイミングシステム、リアルタイムデータ解析システムの構築と検証を目指す。これらは重力波の到着時間、重力波振幅の時間変化、その他の各種信号データの精度、信頼性を格段に高める事が出来ると予想される。それに基づき、欧米の検出器とも協力して重力波発生源の位置決定精度の向上の一端を担うことはもちろん、重力波発生源である天体の研究、強い重力場での一般相対性理論の検証も含めて、新しい重力波天文学の創出へ貢献する。

3. 研究の方法

この研究の特色の一つは、大型重力波検出器KAGRAのプロトタイプである岐阜県神岡鉱山内にある低温干渉計型重力波検出器CLIOを利用することである。CLIOの感度は常温での熱雑音に到達後、鏡冷却実験においてついに常温熱雑音を超えた感度を実現しており、KAGRAで実現される高感度な状況下でのデジタルシステムのテスト環境としては最適である。またCLIOは制御すべき自由度が2つと少なく、これはデジタルシステムを利用した重力波観測システムを組む際の最初の試験としては非常に適しており、デジタルシステム固有の問題を評価する際にごく少数の信号のみに集中すればよく、ほかの様々な要因から問題を分離できる。

データ解析他のためのシステム構築として、複数システム間のデータの同期を取るためのタイミングシステムを米国LIGOグループと国際協力で開発し、それら機器から得られる重力波及び各種データの信頼性を評価する。最初は限られたチャンネル数でデータ取得のテストを行い、その後多チャンネルへと展開する。データ取得確認後は、検出器サイトでの解析のためのデータ整形を国際基準に合わせて行い、最終段階では検出器の感度評価も含めたリアルタイム解析、モニタリングシステムの試験を現在日本最高感度を有するCLIOサイトで、実際の稼働データを使用して行い、KAGRAへとつなげていく。



4. 研究成果

KAGRA では計算機を用いて干渉計を制御するため、制御のための信号がそのまま重力波のデータ信号となる。このようなシステムを構築するためのテストの一環として、CLIO において、米国 LIGO グループとの国際共同開発によって整備してきたデジタル制御システムを使い、干渉計の一部自由度を計算機を使い直接制御し、同時にそこから得られたフレームデータを取得するような、一連のデータパイプラインを本研究において構築した。その中でも特に、重力波データフォーマットの標準化や、リアルタイムデータ解析システムの構築等の、CLIO での重力波観測体制の整備に引き続き、これらシステムを利用して一週間程度の試験観測が出来たことと、取得したデータをもとに重力波信号へとキャリブレーションをして常時モニタするようなシステムが構築できたことは大きな成果であると言える。本デジタルシステムの稼働にともない、リモート制御で必要な ADC や DAC の時刻同期や重力波データの低遅延転送に関しても、将来システムが大型化された際の汎用性に関する知見を得る等、プロトタイプとしては十分な成果を得ることができた。特に、干渉計の要素雑音を評価するための標準的なソフトを動かすプラットフォームとして十分使用できることを示すなど、目的の一つとして掲げていた世界標準の技術を使用する見通しがついたことも成果の一つとして挙げることができる。

計算機を用いた本研究の成果は、別システムへの適用が非常に楽なため、現在同神岡坑内に建築中の 3km の大型低温干渉計 KAGRA のデータ取得及び解析システムの一部にそのまま流用でき、リモートによる操作手法は KAGRA の初期観測時にそのまま適用できるなど、当初の KAGRA への応用と言う目的はほぼ達成できたと言え、将来の大型干渉計での重力波データ取得時に、冗長性も含めた安定な観測体制を敷くことに直結できると考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

Yoichi Aso, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Osamu Miyakawa,



図 1: CLIO において実装されたデジタルシステム(下)と解析システム(上)。

Takanori Sekiguchi, Daisuke Tatsumi, and Hiroaki Yamamoto (The KAGRA Collaboration), Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector, 査読有, Phys. Rev.D, 88, 43007(2013), DOI:10.1103/PhysRevD.88.043007

Osamu Miyakawa and KAGRA collaboration, Real Time Control for KAGRA 3km Cryogenic Gravitational Wave Detector, 査読無, Proceedings of ICALPECS 2013, 23 (2013)

Takashi Uchiyama, Shinji Miyoki, Souichi Telada, Kazuhiro Yamamoto, Masatake Ohashi, Kazuhiro Agatsuma, Koji Arai, Masa-Katsu Fujimoto, Tomiyoshi Haruyama, Seiji Kawamura, Osamu Miyakawa, Naoko Ohishi, Takanori Saito, Takakazu Shintomi, Toshikazu Suzuki, Ryutaro Takahashi, and Daisuke Tatsumi, Reduction of Thermal Fluctuations in a Cryogenic Laser Interferometric Gravitational Wave Detector, 査読有, Phys. Rev. Lett., 108, 141101(2012), DOI:10.1103/PhysRevLett.108.141101

Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa, Length sensing and control strategies

for the LCGT interferometer, 査読有, Class. Quantum Grav., 29 124008 (2012), DOI:10.1088/0264-9381/29/12/124008

T. Saito, S. Telada, T. Uchiyama, S. Miyoki, O. Miyakawa and M. Ohashi, Developments of Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO) and Local Suspension Point Interferometer (LSPI) in Kamioka, 査読有, J. Vac. Soc. Jpn. Vol. 54, No. 12 pp.614-620 (2011), DOI:10.3131/jvsj2.54.614

[学会発表](計 11 件)

“ 計算機を利用した KAGRA の制御 (V) ”
宮川治, 日本物理学会, 2013 年 09 月 22 日, 高知大学

“ 計算機を利用した KAGRA の制御 () ”
宮川治, 日本物理学会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学

“ Lessons from commissioning cryogenic systems underground ”, Osamu Miyakawa and CLIO collaboration, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (GWADW) 2013(invited talk), May 21, 2013, Elba, Italy

“ 低温重力波検出器 CLIO におけるプロトタイプ開発 ”, 宮川治, ガンマ線バースト研究会 2012、2012 年 11 月 29 日, 金沢大学

“ 大型重力波検出器 KAGRA における計測と制御 ”, 宮川治, 計測システム研究会 2012、2011 年 11 月 25 日、東京大学

“ 計算機を利用した KAGRA の制御 () ”
宮川治, 日本物理学会, 2012 年 9 月 11 日, 京都産業大学

“ 計算機を利用した LCGT の制御 () ”
宮川治, 日本物理学会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学

“ 低温重力波検出器 KAGRA の制御 ”, 宮川治, グローバルな宇宙天文観測研究会、2012 年 2 月 21 日、国立天文台

“ 重力波検出のための計算機を使った大型干渉計リアルタイム制御 ”, 宮川治, 計測システム研究会 2011、2011 年 11 月 25 日、京都大学

“ 計算機を利用した LCGT の制御 ”, 宮川治, 日本物理学会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学

“ CLIO から LCGT へ ”, 宮川治, 日本物理学会シンポジウム, 2011 年 9 月 17 日, 弘前大学

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

KAGRA 大型低温重力波望遠鏡

<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>

KAGRA Wiki

<http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGwwiki/KAGRA>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮川 治 (MIYAKAWA, Osamu)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号: 90532680