

氏 名 奥富 弘基

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2058 号

学位授与の日付 平成 31年 3 月 22日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Development of 13.5-meter-tall Vibration Isolation
System for the Main Mirrors in KAGRA

論文審査委員 主 査 教授 高見 英樹
准教授 大石 雅壽
助教 辰巳 大輔
准教授 安東 正樹 東京大学大学院
理学系研究科
教授 川村 静児 名古屋大学大学院
理学研究科

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名

奥富 弘基

論文題目

Development of 13.5-meter-tall Vibration Isolation System for the Main Mirrors in KAGRA

The direct detection of gravitational waves by Advanced Laser Interferometer Gravitational wave Observatory (LIGO) has triggered the birth of a new window in astronomy. The number of detected events with enough confidence amounts to ten for binary black hole mergers and one for a binary neutron star merger. As for the binary neutron star merger GW170817, starting with the early alert of gravitational wave detection by LIGO and Virgo, follow-up observations of the source with multiband electromagnetic telescopes were performed which yielded novel information of astrophysics and cosmology. Now we are quite sure that gravitational wave observations will play an important role in revealing a hidden side of the universe in the future.

KAGRA is a 3-km interferometric gravitational wave telescope constructed in Japan. The KAGRA interferometer has two unique features among the current 2nd-generation advanced detectors which are that it is located at an underground site with lower seismic disturbance, and that it uses cryogenic sapphire mirrors in order to reduce thermal noise. Since the location of KAGRA is far from both LIGO and Virgo, the participation of KAGRA in the global observatory network can offer benefits of not only accurate false positive rejection but also better source localization, better sky coverage, and more precise parameter estimation. At present, KAGRA is in the process of completing full configuration of the interferometer toward the joint observation with the LIGO and Virgo detectors scheduled in 2019.

Vibration isolation systems are the key instruments to suppress mirror fluctuation introduced by continuous and random seismic motion. Even in a quiet underground environment, since gravitational wave observation with the KAGRA interferometer requires spectral displacement fluctuation of the mirror to be less than 10^{-19} m/Hz^{1/2} in its observational band above 10 Hz, one needs to attenuate the vibration transmission from the ground to the mirror by 8-10 orders of magnitude. This level of seismic attenuation can be acquired by suspending the mirror at the bottom of a multi-stage pendulum called suspension system, which provides vibration filtering at high frequencies above its mechanical resonances. The suspension system also serves as an interface of the interferometer control. The position and attitude of the mirror can be monitored and controlled with local sensors and actuators mounted on the suspension stages so that the optical cavities in the interferometer are kept in the resonant condition. Although the suspension system will enhance the amplitude of the mirror fluctuation at the mechanical resonant frequencies outside of the observation band (< 1 Hz), it can be also suppressed by active feedback control with the electric instruments.

The study in this thesis develops the vibration isolation system for the main mirrors (test masses) in KAGRA, which is so-called Type-A suspension. The Type-A suspension is the largest pendulum with totally nine stages and 13.5-meter tall. It consists of two primary compositions that are the tower part representing top five stages at room temperatures, and the cryogenic payload representing bottom four stages at cryogenic temperatures (~ 20 K). This study focuses on the tower part since the vibration isolation performance of whole the suspension system is determined by the installation and adjustments of the low-frequency oscillators such as inverted pendulums and geometric anti-springs (GASs) implemented at the top five stages.

The performance tests demonstrate that the installed Type-A tower system basically has the designed dynamic characteristics which satisfies the requirements. The frequency responses of the Type-A tower are measured and compared to the predictions of the nominal model. Although there is some amount of deviation, the obtained frequency responses can be regarded as acceptable to achieve the required vibration isolation performances except for the vertical direction. As for the vertical direction, the dynamics of the Type-A tower shows discrepancies between the measurement results and the model predictions, in particular in the mode shapes of its higher order resonances. It is suspected that the higher order oscillatory behavior has stronger dependence on the divergence of the mechanical parameters from the nominal values. However, due to the facts that the higher order modes have smaller impact on the RMS residual motion and that the measured mode frequencies are roughly distributed as expected, the discrepancies in the vertical mode dynamics seem to be within the permissible range. This tolerance is also plausible from the measured displacement spectrum at the dummy payload which is suspended instead of the actual cryogenic payload. One problem still remains is the effect of couplings from non-straightforwardly-controllable degrees of freedom such as a tilt of the middle GAS filter stages. The impact of the couplings on the test mass or the interferometer should be confirmed after integration with the cryogenic payload.

In two kinds of damping control implemented in the performance tests, torsion mode damping is firstly engaged at the bottom stage of the Type-A tower. Since a major fraction of the height of the Type-A suspension is accounted by a series of single suspension wires, the system possesses a behavior of a torsion pendulum with extremely low stiffness and then have a long duration of the torsional modes which turns to an issue in stabilizing alignment of the mirror. The Type-A tower is responsible to address this issue by providing a function of active damping control at the tower's bottom stage. The test of torsion mode damping proves that the long exponential decay time of the resonances can be successfully reduced to less than 1 minute by the active feedback control. In addition, the in-loop sensor indicates that the RMS residual angular fluctuation in torsion is suppressed sufficiently to a level of acquiring arm cavity lock. Therefore, it is concluded that the Type-A tower has satisfactory performance of the torsion mode damping.

This study also presents an advanced control scheme called modal damping. The modal damping processes feedback signals in a decoupled modal basis instead of a conventional Cartesian basis, allowing us to simplify the servo design optimization and to access efficient actuation for a coupled oscillatory system. The control test demonstrates feasibility of modal

damping for the coupled vertical modes of the Type-A suspension. Deriving a conversion law between the Cartesian basis and the modal basis from the mathematical model, coupled signals of the vertical modes can be decomposed into those of each orthogonal eigenmode. Moreover, the result of the modal damping shows that the eigenmodes can be damped independently of other modes. Although the availability of modal controllers is validated only for the vertical modes in this test, one can expect to apply this technique to other stages having less-powerful actuators such as the cryogenic payload.

After the sequence of those tower test, the installed Type-A tower was integrated with the cryogenic payload and incorporated into a global system of the KAGRA interferometer. This thesis includes the measurement of the vibration isolation ratio from the ground to the test mass. During the first cryogenic test operation of the simplified 3-km Michelson interferometer, we measured the vibration transmissivity from the top stage to the error signals of the interferometer output. Combining the measured result with a model prediction of the transmissibility from the ground to the top stage derived from the tuned mathematical model, the total vibration isolation ratio of the Type-A suspension is estimated as 9×10^{-22} for the pure longitudinal contribution at 10 Hz. Although the estimated result is pursued by some amount of mismatch with respect to the nominal model prediction, the seismic attenuation performance of the real system seems to be a reasonable level to achieve the design sensitivity of KAGRA.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 奥富 弘基

Title
論文題目 Development of 13.5-meter-tall Vibration Isolation System for the Main Mirrors in KAGRA

2015年のAdvanced LIGOによる重力波の直接検出は天文学に新しい窓をもたらした。すでに10を超える連星ブラックホール合体からの重力波が検出されている。連星中性子星合体GW170817はLIGOとVirgoによる初期アラートによって検出され、それに基づいた多波長に渡る電磁波望遠鏡による観測が行われ、極めて重要な天文学的情報が得られた。将来、重力波天文学はこれまで知られていなかった宇宙に謎の解明に大きな役割を果たすことは間違いない。

KAGRAは現在日本国内に建設されている重力波検出のための3km長の干渉計である。KAGRA干渉計は、現在の第二世代の重力波干渉計のなかでも2つのユニークな特徴をもつ。1つは、地面の振動が極めて少ない地下に建設されていること、2つめは、冷却したサファイア鏡を使うことによって熱雑音を低減していることである。また、KAGRAの位置は、現在世界で稼働中のLIGO(米国)、Virgo(欧州)から離れていることから、KAGRAが加わることにより、より広い天域をカバーできることと、より正確な重力波源の位置決定ができるようになる。KAGRAは現在、その建設の最終段階であり、2019年中にLIGOとVirgoと合わせた共同観測を目指している。

レーザー干渉計型重力波望遠鏡の構成要素のなかで、「防振系」は地球、地面の動きによる鏡の揺れを低減するためのカギとなる装置である。KAGRA干渉計で要求される揺れの程度は、10Hz以上の観測周波数域で、 $10^{-19}\text{m/Hz}^{1/2}$ 以下という値であり、このためには地面の振動の影響を8-10桁低減させる必要がある。これは、干渉計の鏡を多段振り子によって吊り下げ、その振り子の固有振動数よりも高い周波数の振動を急激に低減させることによって実現される。また、この「防振系」は、多段振り子の位置をモニターし、かつ動的に制御することによって、反射鏡が常に干渉状態にあるように保つ役目も果たしている。この「防振系」の振り子では、観測周波数より低い($< 1\text{ Hz}$)固有振動数付近では振動が励起されてしまうので、動的な制御によってこの励起を抑える機能も有している。

本論文は、KAGRAにおける主干渉鏡の「防振系」であるType-Aサスペンションにおける振り子制御の性能向上のための開発に関するものである。Type-Aサスペンションは9段のステージからなる高さ13.5mの多段振り子である。この振り子は、常温である上部の5段ステージと絶対温度20Kに冷却した下部の4段ステージからなるが、本研究では、上部のステージにある「倒立振り子」と「Geometric Anti-spring: GAS」が全体の性能を決めるために、上部ステージの性能実現に注力した。

「防振系」の鏡の揺れの低減は、振り子の固有振動数とそこからどれだけの次数で振動が抑制されるかで決まり、基本的には多段振り子の長さや段数による。一方、そのような

振り子をいかに安定して制御するかが、「防振系」システムとして実現する上で大きなカギとなる。そのために、多段ステージ部に揺れを測定するセンサーとそれを動的に駆動する電磁アクチュエーターを構成する制御系が用いられている。これまでのシステムでは、ステージ部に取り付けられたセンサー信号から直接その場所のアクチュエーターを駆動する一入力出力 (SISO) の制御が行われていた。しかし、現実には、複数のステージの動きは独立しておらず、1つのアクチュエーターを駆動すると別のステージの動きに影響がでる。そのため、干渉計の安定動作のための静定に時間がかかってしまうなどの問題があった。

奥富氏は本研究において、多段ステージのセンサーとアクチュエーターによる多入力多出力制御 (MIMO) を効率よく行うためのモーダル制御をKAGRA重力波望遠鏡に初めて導入した。奥富氏は、Type-Aサスペンションの機械的モデルおよびセンサー、アクチュエーターを含めた制御モデルを構築し、それに基づいてモーダル制御におけるモードパラメーターを導き出した。まずシミュレーションにおいてSISO制御とモード制御の性能の比較を行い、モード制御によってステージ間のカップリングを抑制することによって、いままでの制御と比較して遥かに短時間で振動がダンピングできることを見出した。

また、この制御システムを完成間近のKAGRA実機に導入して、制御性能を確かめる測定を実施した。実機においてアクチュエーターに信号を与え、それに対するセンサーの反応を計測し、多入力多出力制御のカップリング行列を求めモデルと実システムのパラメーターのずれを補正した。計測した制御周波数特性も、パラメーターをチューニングすることによってモデルと極めて良く一致することがわかった。それをもとに実施した動的制御の性能実験では、モードによるが、例としては、 158.6 ± 4.6 秒が 43.9 ± 0.5 秒へ、 1155.5 ± 1.9 秒が 9.5 ± 0.1 秒へと、モーダル制御によるダンピング性能の大幅な改善を見出した。これは、KAGRAで要求されているダンピング性能の60秒以下を満たしており、KAGRA防振系の性能向上に大きく寄与する。

本論文は、KAGRA重力波望遠鏡の運用において、MIMO制御におけるモード制御の導入によってロバストな制御を達成し、MIMO制御が干渉計制御の最適化や、制御破綻による観測時間のロスを抑えることに貢献することを理論的、実験的に明らかにしたものである。特に、これをKAGRA実機に組み込んで実証したことは高く評価される。さらに、この防振系の制御性能は、重力波望遠鏡の低周波側の感度を決めており、この感度改善によって、コンパクト連星合体のパラメータ決定推定精度の向上、非対称な中性子星の自転、中間質量ブラックホール連星の合体など、将来の重力波天文学へ大きく寄与すると期待される。

以上のことから、審査員全員一致で本論文は博士論文として合格であると判断した。