

THESIS

**A Study of Baseline Compensation  
System for Stable Operation of  
Gravitational-wave Telescope**

**Koseki Miyo**

*Department of Physics  
University of Tokyo*

MMM 2020



# Abstract

a



# 要旨

2015 年、ブラックホール連星合体からの重力波 GW150914 を LIGO の 2 台の検出器が直接検出することに成功した。また 2017 年には Virgo を加えた 3 台の重力波検出器で連星中性子合体からの重力波 GW170817 を検出し、さらにフォローアップ観測によって電磁波対応天体も同定され、マルチメッセンジャー観測が確立された。そして 2020 年には KAGRA も LIGO と Virgo の重力波観測ネットワークに加わることで、より多くの重力波イベントの観測が期待される。

しかしながら、重力波は地球のどこでも検出できて視界に左右されないはずだが、現在稼働している干渉計型重力波検出器の DutyCycle は 60 % 程度である。これは悪天候時の高波や遠地でおきた地震などによる地面振動によって、干渉計の腕が変動し、干渉しなくなるためである。これら地面振動はおよそ 1 Hz 以下で数 10 km 以上のスケールで地面を揺らすが、現状の防振装置ではこのような低周波地面振動は防振できない。これは、グローバルな低周波の地面揺れを測定できるセンサーがないためである。

本論文では、基線長補償システムについて書かれている。このシステムは、レーザーひずみ計と呼ばれる地殻変動計測用の 1.5 km のレーザー干渉計をもちいて KAGRA の基線長伸縮をモニターし、その信号で、メインの KAGRA の干渉計が揺れないように防振をする。

この論文では、地面振動が干渉計に与える影響について調べられており、そしてその影響を低減するための基線長補償システムの原理と、その理論的性能、既存のシステムと比較した利点が調べられている。そして、このシステムを実際に KAGRA に組み込んだ性能評価実験が述べられている。この実験では、もっとも地面振動の影響を受けやすい 3 km の Fabry-Perot 光共振器に基線長補償システムを組み込み、この腕共振器の長さ変動を測定した。その結果、



# Contents

<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>要旨</b>	<b>5</b>
<b>1 Geophysics Interferometer (GIF)</b>	<b>11</b>
1.1 Overview . . . . .	11
1.2 Working Principle . . . . .	11
1.2.1 Asymmetric Michelson Interferometer . . . . .	12
1.2.2 Seismic Strain Response . . . . .	13
1.2.3 Noise . . . . .	16
1.3 Optics . . . . .	16
1.3.1 Gaussian Beam . . . . .	16
1.3.2 Reflector Design . . . . .	17
1.3.3 Input Output Optics . . . . .	19
1.3.4 Core Optics . . . . .	19
1.3.5 Frequency Stabilized Laser . . . . .	19
1.4 Realtime Signal Aquisition System . . . . .	20
1.4.1 Quadrature Phase Fringe Detection . . . . .	20
1.4.2 Realtime Data Processing . . . . .	21
1.5 Summary of the Chapter . . . . .	22
<b>2 Baseline Compensation System</b>	<b>25</b>
2.1 Basics in Seismic Isolation . . . . .	25
2.1.1 Single Pendulum . . . . .	25

2.1.2	Multi-stage Pendulum . . . . .	26
2.2	Active Inertial Seismic Isolation . . . . .	26
2.2.1	Sensor Blending Technique . . . . .	27
2.2.2	Sensor Correction Technique . . . . .	29
2.2.3	Feedforward Technique . . . . .	31
2.2.4	Problem in Tilt-Horizontal Coupling . . . . .	32
2.3	Active Baseline Seismic Isolation . . . . .	33
2.3.1	Suspension Point Interferometer (SPI) . . . . .	33
2.3.2	Limitation due to CMRR . . . . .	35
2.3.3	差動能動防振システム . . . . .	37
2.3.4	RMS Reduction . . . . .	37
2.3.5	Some Difficulties . . . . .	39
2.4	Baseline Compensation System . . . . .	39
2.4.1	Concept . . . . .	39
2.4.2	Advantage of GIF . . . . .	39
2.4.3	GIF as SPI . . . . .	39
2.4.4	Control Scheme . . . . .	39
2.5	Summary of the Chapter . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Demonstration of Baseline Compensation</b>	<b>41</b>
3.1	Overview of KAGRA . . . . .	41
3.1.1	Status of KAGRA . . . . .	41
3.1.2	Main Interferometer . . . . .	42
3.1.3	Mirror Suspension System . . . . .	45
3.2	KAGRA Type-A Suspension . . . . .	45
3.2.1	Overview . . . . .	45
3.2.2	Mechanical design . . . . .	45
3.2.3	Sensors and Actuators . . . . .	45
3.3	Experimental Arrangement . . . . .	45
3.3.1	X-arm Cavity . . . . .	45
3.3.2	... . . . .	45
3.4	Results . . . . .	45



<i>CONTENTS</i>	9
3.4.1 ...	45
3.5 Discussion and Summary of the Chapter	45
3.5.1 Discussion	45
3.5.2 Summary	45
<b>4 Conculusion and Future Directions</b>	<b>47</b>
4.1 Conclusion	47
4.2 Future Directions	47



# Chapter 1

## Geophysics Interferometer (GIF)

KAGRA is the only GW detector, which has a strainmeter to monitor the baseline length changes. The strainmeter is named Geophysics interferometer.

Geophysics interferometer is a laser interferometric strainmeter, which developed by Earthquake Research Institute, University of Tokyo. The purpose of the strainmeter is observe the geophysical phenomena such as

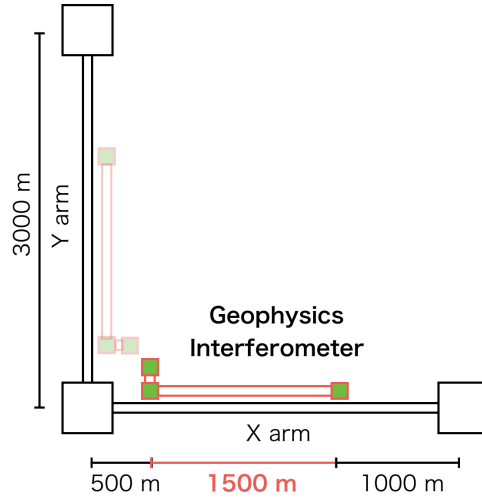
In this chapter, Geophysics interferometer (GIF) is described.

### 1.1 Overview

Geophysics interferometer (GIF) is a 1500 m laser strainmeter constructed along the X-arm baseline of KAGRA. As shown in Fig.1.1, GIF is an asymmetric Michelson interferometer unlike KAGRA interferometer. Moreover, mirrors of the interferometer of GIF are fixed on the ground to monitor the baseline length changes directly. GIF is now only installed on the X-arm. GIF have been observing the baseline changes for almost 3 years.

### 1.2 Working Principle

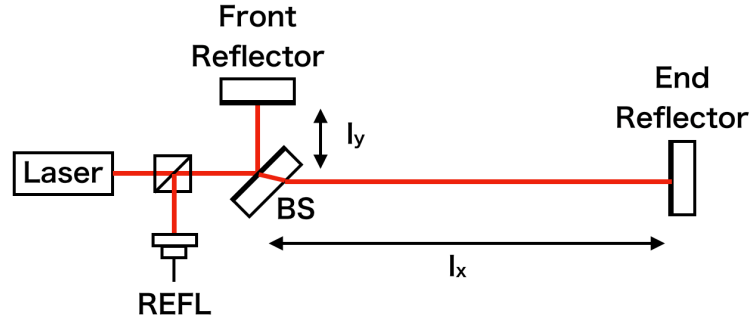
Section ?? で述べた Michelson 干渉計と同じであるので動作原理は同じであるが、GIF の場合、非対称 Michelson 干渉計なので周波数ノイズがひずみ計測の感度を



**Figure 1.1:** Location of geophysics interferometer (GIF).

制限する。

### 1.2.1 Asymmetric Michelson Interferometer



**Figure 1.2:** Asymmetric Michelson interferometer. Michelson interferometer which has two different arm length,  $l_x \gg l_y$ .

??で述べたとおり、マイケルソン干渉計の腕の差動成分  $L_-$  と位相  $\phi_-$  には、レーザーの波長を  $\lambda$  とすれば、 $\phi_- = 4\pi \frac{L_-}{\lambda}$  の関係があるので、それらの微小変化

には

$$|\Delta\phi_-| = \frac{4\pi L_-}{\lambda} \left( \left| \frac{\Delta L_-}{L_-} \right| + \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \right) \quad (1.1)$$

の関係がある。なお、 $f$  はレーザーの周波数であり、 $\Delta\lambda/\lambda = \Delta f/f$  の関係をつかった。

ここで、2つの腕の長さ  $L_x, L_y$  が十分に非対称、つまり  $L_x \gg L_y$  の場合を考える。また短い方の腕の長さ  $L_y$  の変動が無視できるとすると、腕の差動成分は  $L_- \sim L_x$  と表すことができる。したがって、Eq.(1.1) は、X腕のひずみ  $h = \Delta L_x/L_x$  をつかって

$$|\Delta\phi_-| = \frac{4\pi L_x}{\lambda} \left( |h| + \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \right) \quad (1.2)$$

となる。つまり非対称マイケルソン干渉計の場合、周波数ゆらぎ  $|\Delta f/f|$  はそのままひずみ計速のノイズとなる。

### 1.2.2 Seismic Strain Response

In order to calculate the response from the seismic strain to the optical phase of the GIF interferometer, the same as the Fig.(??), it is assumed that the plane seismic waves which displacement  $u(t, x)$  is represented as  $u(t, x) = u_0 e^{i(\omega t - kx)}$  with angular frequency of  $\omega$  and wave number of  $k$ , which propagates along with the direction of the baseline of the strainmeter (right direction in this figure). First, because the length fluctuation between two mirrors sparated with  $L$  can be expressed as

$$\Delta L(t) \equiv u(t, 0) - u(t, L) \quad (1.3)$$

$$= u(t, 0) - u(t - \tau, 0), \quad (1.4)$$

where  $\tau = L/v$  is the time delay, the transfer function from the displacement to the length fluctuation is given by Laplace transform as

$$H_{\text{disp}}(s) \equiv \frac{\Delta L(s)}{u(s)} = \frac{u(s) [1 - \exp(-\tau s)]}{u(s)} = 1 - \exp(-\tau s) \quad (1.5)$$

Moreover, because the strain amplitude  $\epsilon(x, t)$  is defined as  $\epsilon(x, t) \equiv \frac{du}{dx}$ , the seismic strain is represented as

$$\epsilon(x, t) \equiv \frac{du}{dx} = \frac{du}{dt} \frac{dt}{dx} = \frac{du}{dt} \frac{1}{v} \quad (1.6)$$

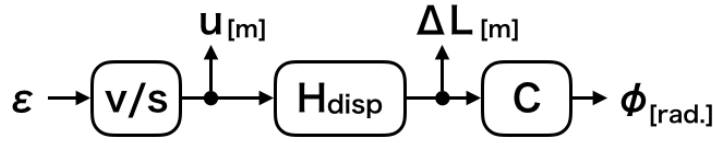
Therefore, similarly, the transfer function from the seismic strain to the displacement is given as

$$u(s) = \frac{v}{s} \epsilon(s). \quad (1.7)$$

Finally, because the transfer function from the length change of the baseline to the optical phase is given as  $4\pi/\lambda_{\text{opt}}$ , the transfer function from the seismic strain to the optical phase is represented as

$$H_{\text{strain}}(s) = 4\pi \frac{1}{\lambda_{\text{opt}}} [1 - \exp(-\tau s)] \frac{v}{s}. \quad (1.8)$$

Here, as a summary of these transfer function, these are related with each other as shown in Fig.(1.3).



**Figure 1.3:** The response from seismic strain to optical phase.  $\epsilon$  is the seismic strain,  $u$  is the displacement,  $\Delta L$  is the length change of the X-arm baseline, and  $\phi$  is the optical phase of the GIF interferometer.  $C$  is the optical gain of the GIF interferometer given in Eq.(??).  $H_{\text{disp}}$  is the transfer function from the displacement to the length change given in Eq.(1.5).  $v/s$  is the transfer function from the seismic strain to the displacement given in Eq.(1.6).

Eq.(1.8) で表される、基線長の異なる 2 つの Michelson 干渉計のひずみから位相への伝達関数のボード図を Fig.1.4 に示す。長さが倍になると DC でのゲインも 2 倍になる。コーナー周波数  $f_0 \equiv \frac{1}{\tau}$  は

$$f_0 = \frac{v}{L} \quad (1.9)$$

で表せるので、長さが二倍になるとコーナー周波数は半分になり、帯域が減ることもわかる。基線長が1500 m の GIF の場合、弾性波速度を 5.5 km とすれば、コーナー周波数は  $f_0 \sim 3.7$  Hz である。つまりそれ以下の帯域では GIF は歪に対して平坦な応答を示す。

### 1.2.3 Noise

#### Frequency Noise

先述したように、GIF のような 1500m と 70cm の腕を持つ非対称マイケルソン干渉計は、腕の同相雑音除去が効かない。周波数ノイズは

$$h = \frac{\Delta f}{f} \sim 7 \times 10^{-13} [1/\text{Hz}] \quad (1.10)$$

になる [1]。

#### Residual Gas Noise

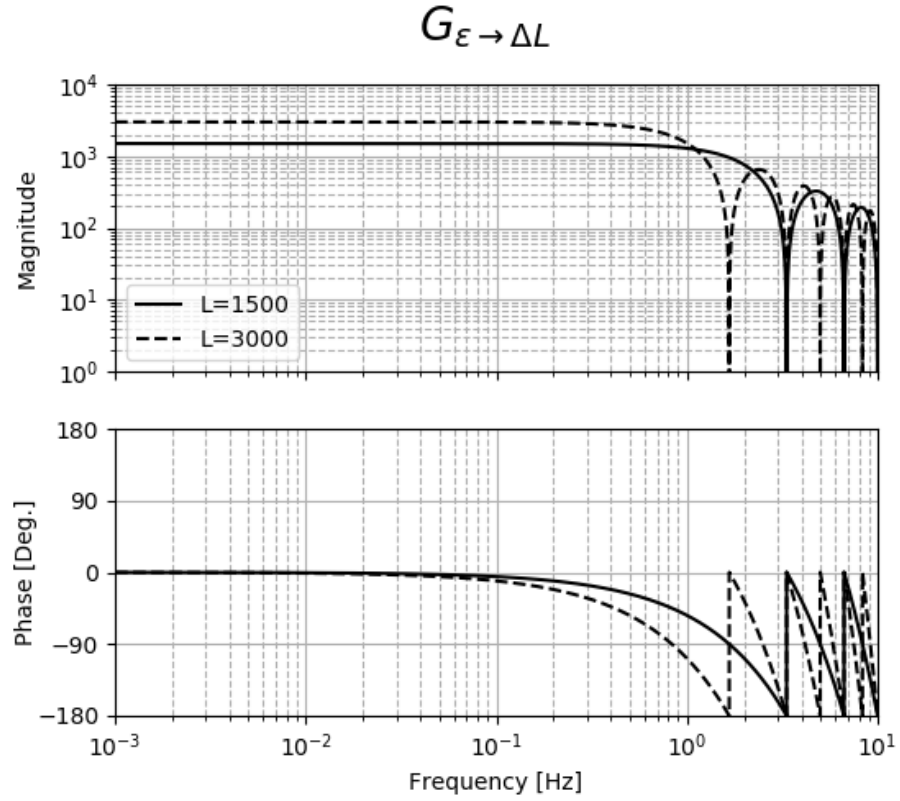
Because residual gas fluctuates the optical path, length measured by interferometer is also fluctuates. The optical path  $L_{\text{opt}}$  is given by  $L_{\text{opt}} = nL$ , where  $L$  is the length of the baseline and  $n$  is the refraction index in the optical path relative to the path in the vacuum. Under the pressure of  $p$  in vacuum, the index  $n$  is approximated as  $n = 1 + c_0(p/p_0)$ , where  $c_0$  denotes the relative refractive index,  $p_0$  is pressure in standard air at 1 atm. The apparent strain due to the residual pressure is given as [2];

$$h = (L_{\text{opt}} - L)/L = c_0(p/p_0) \sim 3 \times 10^{-9} p. \quad (1.11)$$

In order to maintain the strain sensitivity;  $3 \times 10^{-13}$ , the vacuum pressure should be below  $1 \times 10^{-4}$  [Pa]. However, actual vacuum pressure is  $1 \times 10^{-2}$  [Pa], then strain is  $\sim \times 10^{-12}$ .

#### Thermal fluctuation of the reference arm

AAAAAAA



**Figure 1.4:** Comparison of the transfer function from strain of the baseline  $\epsilon$  to the length change of that  $\Delta L$  in the different baseline length. 3000 m の基線長ではその半分の 1500 Hz よりも、DC ゲインは二倍大きい一方で、コーナー周波数は A になり帯域が減る。また、周波数が B の条件を満たすとき、ゲインはゼロになる。なぜならば、このときひずみは基線を同相で動かし、基線長伸縮として現れないためである。



## 1.3 Optics

### 1.3.1 Gaussian Beam

理想的なレーザー光は  $\text{TEM}_{00}$  と呼ばれる空間モードをもち、電場の位相は距離に応じて変化する。この空間モードをもつビームのことをガウシアンビームと呼ぶ。このガウシアンビームが  $z$  軸に伝搬する場合を考える。この電場は

$$u(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi w^2(z)}} \exp\left(i\zeta(z) - ik\frac{x^2 + y^2}{2R(z)} - i\frac{2\pi}{\lambda}z\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right) \quad (1.12)$$

とかける [3, 4]。ここで、 $\lambda$ ,  $w_0$  はそれぞれレーザーの波長、 $z = 0$  でのビーム径である。また

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (1.13)$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}, \quad (1.14)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2\right], \quad (1.15)$$

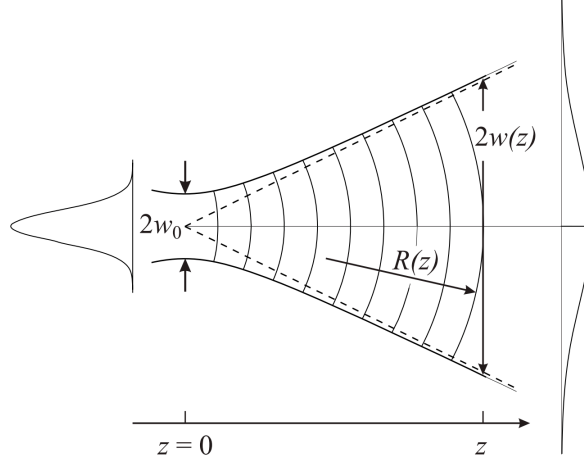
$$\phi(z) = \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1.16)$$

はそれぞれ、Reyleigh length、 $z$  でのビーム径、曲率、Gouy 位相である。このとき Eq.(??) から、Fig.1.5a にしめすように、ガウシアンビームのパワー  $P = |u|^2$  はガウス分布をもつことがわかる。さらにビーム径はビーム強度が  $1/e^2$  になるときの半径とわかる。

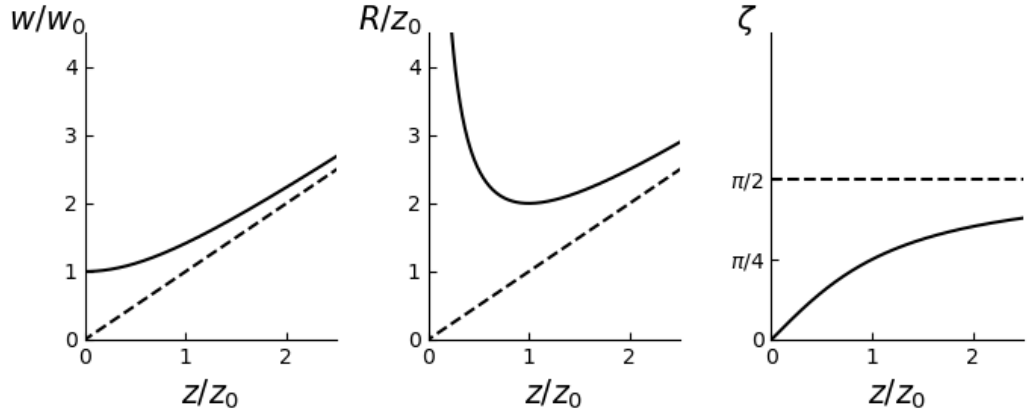
ガウシアンビームを特徴づける  $z$  の関数であるパラメータ Eq.(??) を Fig.1.5b に示す。 $z = 0$  のとき、ビーム径は最も小さく Eq.(1.12) の位相は 0 であるため、ガウシアンビームは平面波とみなせる。一方で、 $z \gg z_0$  のときレーザー光源は点光源とみなせ、球面波としてふるまう。

### 1.3.2 Reflector Design

リフレクタの大きさを最小限にするために、GIF の干渉計はエンドミラーでビーム直径が最も小さくなるビームウエストがくるようにしている。この場合、ビー



(a) Evolution of a Gaussian beam propagating along the  $z$ -axis[5]  
 $w_0$  denotes a beam radius at beam waist, where  $z = 0$ .  $w(z)$  and  $R(z)$  are the beam radius and curvature at  $z$ . Gouy phase is not shown in here.



(b) Beam profile

(left) Beam radius normalized by  $w_0$  as a function of  $z/z_0$ , where  $z_0$  is Rayleigh length. (Middle) Beam curvature normalized by  $z_0$ . (right) Gouy phase.

**Figure 1.5:** Gaussian beam.

ムウエスト  $w_0$  を小さくしたいが、小さくしすぎると  $L = 1500 \text{ m}$  離れた BS とフロントリフレクタで大きくなるので、できるだけフロントでのビーム径  $w(L)$  はエンドのビーム径  $w_0$  に対してできる限り小さくしたい。つまりこれを式で表すと、

$$\arg \min_{w_0} \left[ w_0 \times \frac{w(L)}{w_0} \right] \quad (1.17)$$

となるような  $w_0$  を探せばよい。Eq.(1.15) を Eq.(1.17) に代入して解けば

$$w_0 = \sqrt{\frac{L\lambda}{\pi}} \quad (1.18)$$

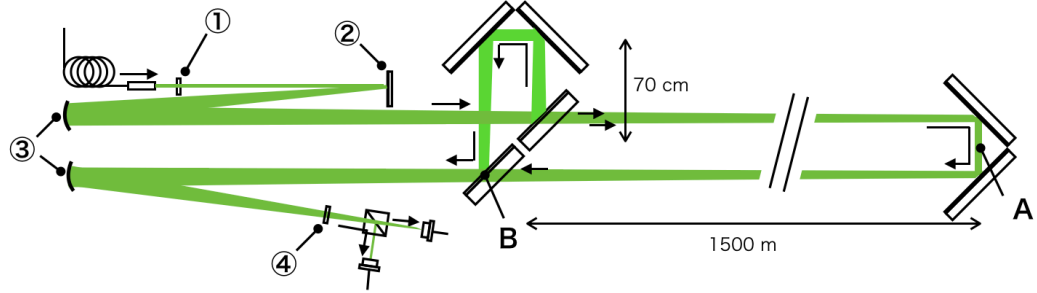
を得る。つまりビームウエストサイズ  $w_0 = \sqrt{1500 [\text{m}] \times 532 [\text{nm}] / \pi} = 16 \text{ mm}$  となる。このときのフロントリフレクタでのビーム径は  $w(L) = \sqrt{2}w_0$  になる。ちなみに、リフレクタの大きさはフロントリフレクタでのビーム径の3倍の大きさを往復できるようにするには、最低限必要なリフレクタの aperture diameter は  $2 \times 3 \times \sqrt{2}w_0 \sim 270 \text{ mm}$  となる。

### 1.3.3 Input Output Optics

レーザー光源から出射されたビームを適当な大きさにして干渉計へ入射するために、input output optics と呼ばれる光学系を構築している。Fig(1.6) に GIF の input output optics と干渉計を示す。光源からの出射ビームは、エンドリフレクタの位置 A でビームウエストになるように、コリメータ (1) とステアリングミラー (2)、凹面鏡 (3) を経て BS へと入射される。2つのリフレクタから反射してきたビームは地点 B で再結合し、2つ目の凹面鏡とコリメータ (4) をへて PD に入射する。これら optics の調整をおこない干渉信号を得ている [6]。

### 1.3.4 Core Optics

The core optics of the Michelson interferometer are composed of two reflectors and beam splitter (BS).



**Figure 1.6:** Schematic optics layout

(1) A collimator lens for input beam. (2) A flat mirror for steering mirror. (3) Two concave mirrors with a radius of curvature of 9.8 m for mode matching. (4) A collimator lens for output beam. The waist of the beam is at the end reflector at point A. Two reflected on the reflectors are combined at point B.

### 1.3.5 Frequency Stabilized Laser

Because GIF is an asymmetric Michelson interferometer, the frequency stability of the laser would limit the sensitivity of the strain, and we use the frequency stabilized laser, which is stabilized the laser frequency to the iodine absorption line [7]. The control diagram of the frequency stabilization system is shown in Fig.1.8. このシステムはヨウ素分子の吸収スペクトル線の周波数とレーザーの周波数との差を利用したフィードバック制御である。エラー信号は、ポンプ光とプローブ光をつかったドップラーフリーな吸収線信号 [8] を PDH 法をつかって取得する。

## 1.4 Realtime Signal Aquisition System

### 1.4.1 Quadrature Phase Fringe Detection

We use the quadrature phase fringe detection to measure the length change of the baseline with wide dynamic range [9]. The optical layout for the detection is shown in Fig.(1.9).



(a) Core optics in the front vacuum chamber. (b) Core optics in the end vacuum chamber.

**Figure 1.7**

The quadrature phase fringes are detected by two photo detectors, these can be represented as

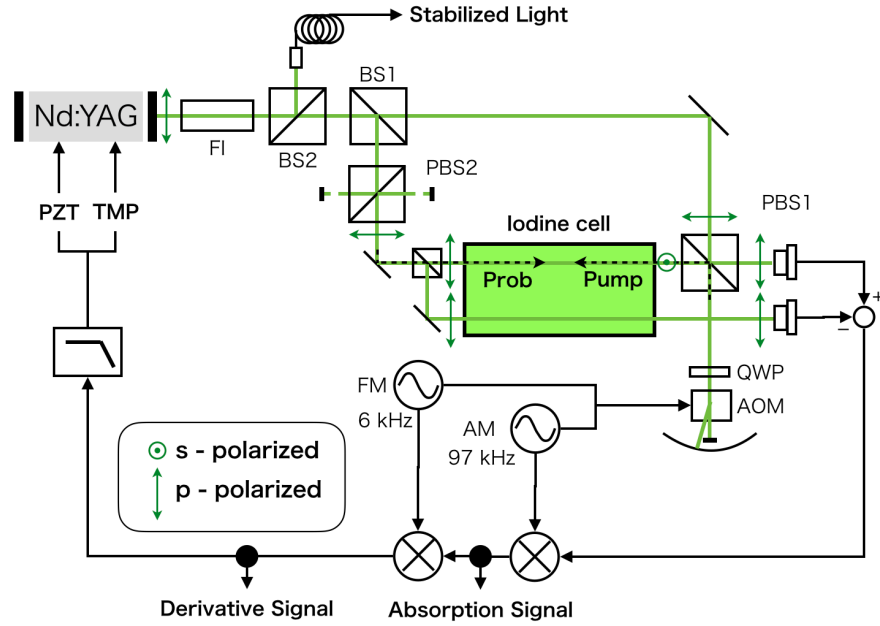
$$x(t) = x_0 + a \sin(\phi(t) + \phi_0), \quad (1.19)$$

$$y(t) = y_0 + b \cos(\phi(t)), \quad (1.20)$$

where  $x$  and  $y$  are the two voltage outputs from the detectors,  $a$  and  $b$  are the amplitudes of these fringe signals,  $x_0$  and  $y_0$  are the offsets,  $\phi$  is optical phase, and  $\phi_0$  is the phase offsets from imperfections [10]. このとき、位相角  $\phi$  は

$$\tan \phi(t) = \frac{1}{\cos(\phi_0)} \left( \frac{b x(t) - x_0}{a y(t) - y_0} - \sin(\phi_0) \right) \quad (1.21)$$

で表される。つまりある時刻  $t$  のときに、パラメーター  $x_0, y_0, a, b, \phi_0$  が与えられれば、そのときの位相  $\phi(t)$  は求まる。



**Figure 1.8:** Schematic diagram of the frequency-stabilization system of the GIF main laser.

### 1.4.2 Realtime Data Processing

KAGRA のデジタルシステムをつかってリアルタイムで楕円パラメータを取得する。KAGRA のデジタルシステムでは

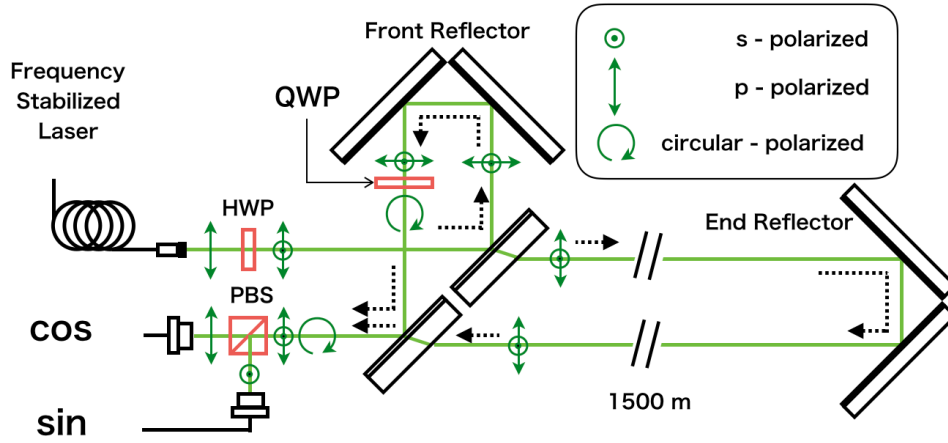
[11]

GIF からの 2 つの干渉信号を

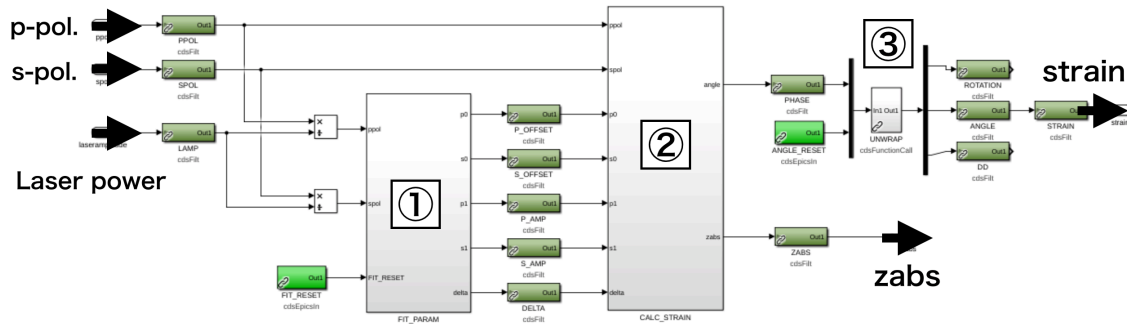
Fig.1.10 にひずみ変換の Matlab の Simlink モデルを示す。

## 1.5 Summary of the Chapter

本章で述べたパラメータを表にまとめる。



**Figure 1.9:** Quadrature interferometer used in the GIF strainmeter. A half-wave plate (HWP) produces a p-polarization and s-polarization. A quarter-wave plate (QWP) delay the optical phase of the s-polarized light with 90 degree against to the another. As a result, one can obtain the quadrature phase fringe.



**Figure 1.10**





# Chapter 2

## Baseline Compensation System

### 2.1 Basics in Seismic Isolation

重力波望遠鏡における地面振動防振の基本は振り子である。より防振比を高めるために、低共振周波数かつ多段振り子をもちいている。

#### 2.1.1 Single Pendulum

For simple example, as shown in left figure in Fig.(2.1), consider a one-dimensional harmonic oscillator consisting of a spring with a spring constant  $k$  and mass  $M$ . The displacement of the suspension point and the mass are  $x_0$  and  $x$ , respectively. Because the equation of the motion is written as

$$M\ddot{x} = -k(x - x_0), \quad (2.1)$$

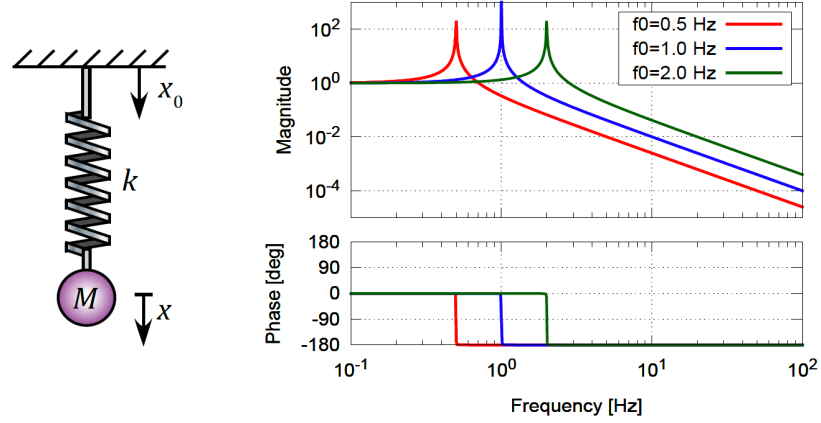
the frequency transfer function from the displacement of the suspension point to the mass displacement  $H(f)$  is given by the Fourier transform from the equation and represented as

$$H(f) \equiv \frac{1}{1 - (f/f_0)^2}, \quad (2.2)$$

where  $f_0 = (k/M)^{1/2}$  is the resonant angular frequency of the oscillator.

According to Eq.(2.2), the amplitude of  $H(f)$  is unity below the resonant frequency, the amplitude is approximately propotional to  $(f/f_0)^{-2}$  above resonance

frequency. The bode plot of  $H(f)$  with various resonance frequencies are plotted in right figure in Fig. 2.1. One finds that it is better to make a low-resonance frequency oscillator in order to attenuate the seismic noise broadly.



**Figure 2.1:** Single pendulum as a mechanical filter and its transfer function with various resonant frequencies. This figure is cited from Fig.(2.3) in [12].

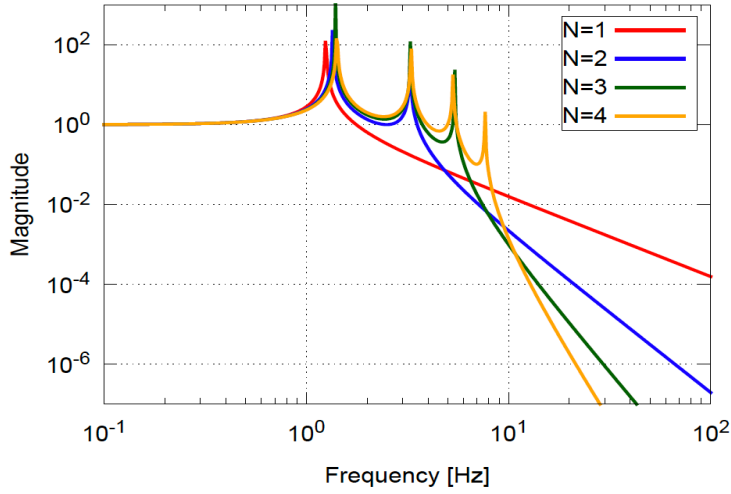
### 2.1.2 Multi-stage Pendulum

In order to increase the order of the seismic isolation, multi-stage pendulum is effective. In case of an  $N$ -stage pendulum, the transfer function from the ground to the suspended mass is proportional to  $f^{-2N}$  above the resonance frequency of the pendulum as shown in Fig. 2.2.

## 2.2 Active Inertial Seismic Isolation

振り子をもちいた受動防振ではその共振周波数以下の地面振動は防振できない。さらに低周波で防振するために、広帯域地震計をもちいた能動防振が開発されてきた [13]。

The active isolation system is shown in Fig. 2.3(a). A platform is suspended from the ground with transmissivity  $H_s$ . This platform is fed back both signal



**Figure 2.2:** The amplitude of the transfer function of the N-stage pendulum. This figure is cited from Fig. 2.4 in [12].

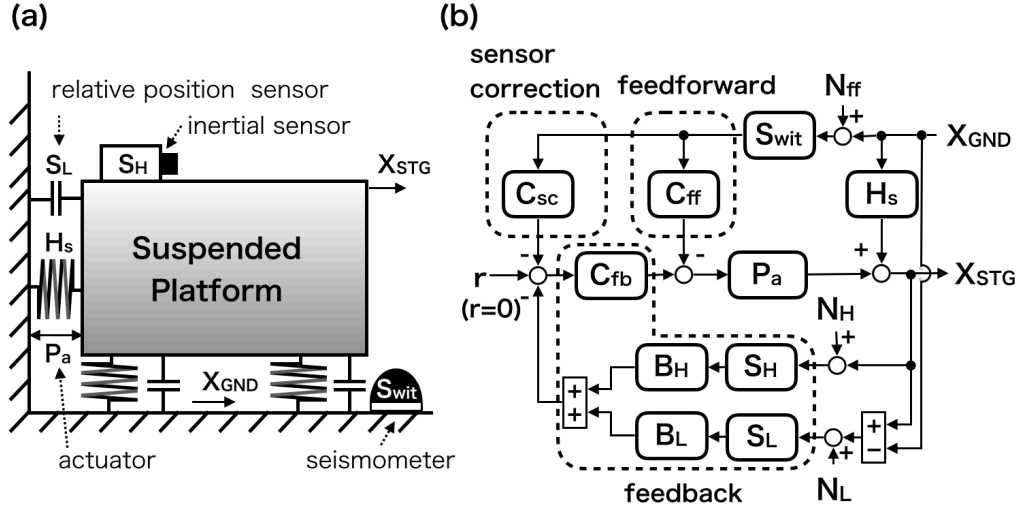
of a inertial sensor with calibration factor  $S_H$  and signal of a relative position sensor with calibration factor  $S_L$ , to the platform using actuator with actuator efficiency  $P_a$ . This feedback control actively decouple the platform from the seismic disturbance from 0.1 Hz to a few Hz. Moreover, the platform is controlled with feedforward using a seismometer with calibration factor  $S_{wit}$  installed on the local ground.

能動防振の制御方法は Fig.2.3(b) に示しているとおり、フィードバック制御、センサーコレクション制御、フィードフォワード制御、が組み合わされている。順番にそれらを説明する。

### 2.2.1 Sensor Blending Technique

Fig.2.4 に示すように、制御信号には慣性センサーと相対位置センサーをブレンドした信号を使う。慣性センサーは低周波で感度が悪くなるので慣性センサーにはハイパスフィルター  $B_H$  をかけ、これに対して相対位置センサーには、

$$B_H S_H + B_L S_L = 1 \quad (2.3)$$



**Figure 2.3:** (a) Schematic drawing of an active seismic isolation system for platform.  
(b) Block diagram of the active control scheme.

となるような相補的なローパスフィルター  $B_L$  をかける。

このようにブレンドされた制御信号をつかってフィードバック制御した場合での、プラットフォームのステージの変位を考える。まず、platform のステージの変位  $X_{STG}$  は地面振動  $X_{GND}$ 、慣性センサーノイズ  $N_H$ 、相対位置センサーのノイズ  $N_L$  で表すと

$$X_{STG} = \frac{G}{1+G} L X_{GND} + \frac{1}{1+G} H_s X_{GND} + \frac{G}{1+G} (H N_H + L N_L) \quad (2.4)$$

のようになる。ここで、ループゲインを  $G = C_{fb} P_a$ 、相補フィルターとそれぞれのセンサー効率の積を  $L = B_H S_H$ 、 $H = B_L S_L$  として、さらに計算の途中で Eq.(2.3) をつけた。すなわち、フィードバック制御が十分に働いている場合、つまりループゲインの値が十分に大きいときのステージの変位は

$$\lim_{G \rightarrow \infty} X_{STG} = L X_{GND} + (H N_H + L N_L) \quad (2.5)$$

である。

Eq.(2.5) によれば、ステージの変位を慣性系に対して防振させるためには伝達関数  $L$  を小さくすればよいが、これは同時に相補フィルターである  $H$  を大きく

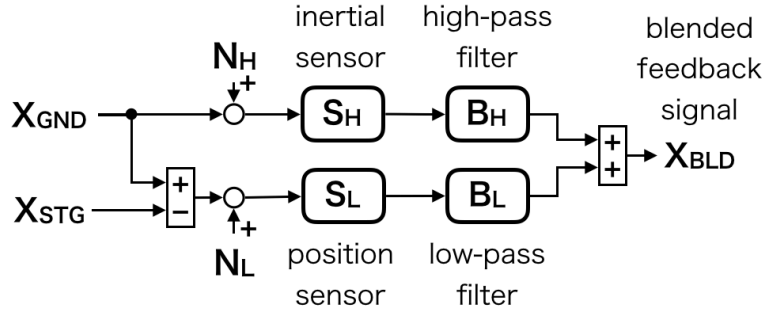


Figure 2.4: Sensor Blending.

することを意味し、かえって慣性センサーのノイズをステージに流入させてしまう。現実的には、ローパスフィルター  $B_L$  のカットオフ周波数は 100 mHz が限界であり、それ以下の周波数では地面振動は防振されない。別の言い方をすれば、慣性センサーをつかったフィードバック制御は、ブレンディングフィルター  $L$  で地面振動からステージへの応答を整えることができる一方で、低周波の感度不足によって防振できる帯域が制限される。

### 2.2.2 Sensor Correction Technique

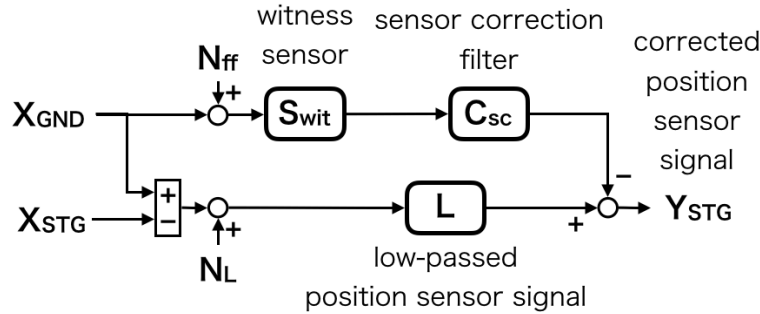


Figure 2.5: Sensor correction scheme.

センサーコレクション制御は相対位置センサーを慣性センサーに修正するための方法である。[14]。上述したとおり、Eq.(2.3) の関係をもつ相補フィルターでブレンドされた制御信号をつかうと、慣性センサーの感度が足りない低周波帯域

では、相対位置センサーの信号をつかってフィードバック制御をしなければならない。この相対位置センサーは地面からのステージの変位を測るので、低周波帯域では、ステージは地面に対して同じに動くことを意味する。そこで Fig.2.5 に示すように、もう一つ別の地面においた感度の良い地震計で測定した地面振動をつかって、変位センサーの信号から地面振動成分を取り除く。この修正された相対位置センサーの信号を制御信号につかえば、ステージに置いた慣性センサーの感度不足を補うことができる。

センサーコレクションをつかった場合のステージの変位を考える。Fig.2.3 に示すように、センサーコレクションの信号は制御フィルター  $C_{sc}$  を経てセットポイントで制御信号から地面振動成分を取り除く。この修正によって、ステージの変位は

$$\begin{aligned} X_{STG} = & \frac{G}{1+G}L \left( 1 - C_{sc} \frac{S_{wit}}{L} \right) X_{GND} + \frac{1}{1+G} H_s X_{GND} \\ & + \frac{G}{1+G} (H N_H + L N_L) + \frac{G}{1+G} C_{sc} S_{wit} N_{ff} \end{aligned} \quad (2.6)$$

のように与えられる。フィードバックが働くようにループゲインを十分大きくすると、

$$\lim_{G \rightarrow \infty} X_{STG} = L \Delta_{sc} X_{GND} + (H N_H + L N_L) + L N_{ff} \quad (2.7)$$

になる。ここでゲインマッチ誤差を

$$\Delta_{sc} \equiv \left( 1 - C_{sc} \frac{S_{wit}}{L} \right) \quad (2.8)$$

とした。したがって Eq.(2.7) は Eq.(2.5) と比較すると、ステージの変位はゲインマッチ  $\Delta_{sc}$  によって地面振動の寄与を低減できることがわかる。

このゲインマッチは、Eq.(2.8) によれば  $C_{sc} = B_L(S_{wit}/S_L)$  のときゼロになるが、実際は Witness センサーとステージに置いた慣性センサーのキャリブレーションエラーで制限される。現実的にはキャリブレーションエラーはすくなくとも 5% 程度になるので、センサーコレクションのみで防振比を 20 以上にするのは難しい [14]。

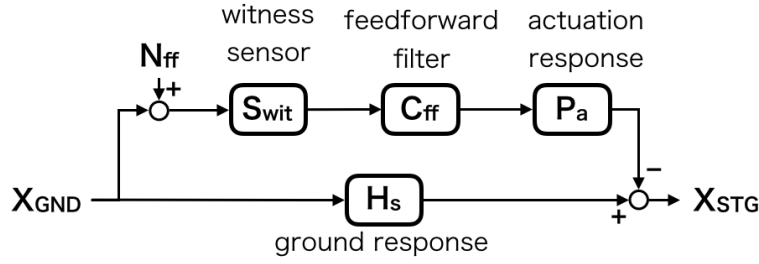


Figure 2.6: Sensor correction scheme.

### 2.2.3 Feedforward Technique

センサーコレクションに似た方法として feedforward 制御がある。これはステージの地面振動揺れを直接取り除く方法である。Fig.2.6 に示すように、地面からのステージへの伝達関数  $H_s$  で伝わるステージの揺れを、地面においた Witness センサーで測った地面振動の信号をつかってステージを  $P_s$  で動かす。このフィードフォワード制御はフィードバック制御に依らない。つまり、フィードフォワード制御はフィードバックループが小さい帯域で働き、一方でセンサーコレクション制御はフィードバックループが大きい帯域ではたらく。このような2つの制御をフィードバック制御に組み合わせることで、地面振動ノイズを低減する。

フィードフォワード制御、センサーコレクション制御、フィードフォワード制御で制御されている状態での、ステージの変位を考える。Fig.2.3 にしめすとおり、エラーポイントにフィードフォワード信号を、セットポイントにセンサーコレクション信号を入れる。このときのステージの変位は、

$$\begin{aligned}
 X_{STG} &= \frac{G}{1+G} L \Delta_{sc} X_{GND} + \frac{1}{1+G} \Delta_{ff} X_{GND} \\
 &+ \frac{G}{1+G} (H N_H + L N_L) + \frac{G}{1+G} C_{sc} S_{wit} N_{ff} \\
 &+ \frac{1}{1+G} P_a C_{ff} S_{wit} N_{ff}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

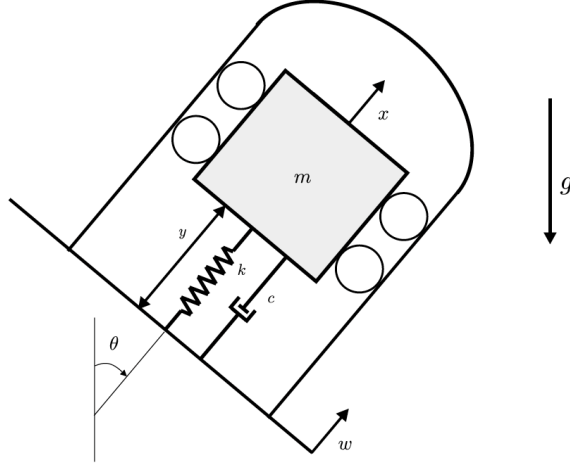
となる。ここで新たにフィードフォワード制御でのゲインマッチ誤差

$$\Delta_{ff} \equiv (H_s - P_a C_{ff} S_{wit}) \tag{2.10}$$

を導入した。Eq.(2.9) において、地面振動からの寄与を表す第一項と第二項はそ

れぞれ、ループゲイン  $G$  とは独立して、 $\Delta_{sc}$  と  $\Delta_{ff}$  をつかって低減できることがわかる。

#### 2.2.4 Problem in Tilt-Horizontal Coupling



**Figure 2.7:** Tilted inertial sensor. Cited from Fig.12 in [15]

慣性センサーは慣性系からみた見かけの力を測るので、地面の加速度運動と傾斜による重力加速度の変化を区別することはできない。これは Tilt-Horizontal カップリングとして知られ、次式のように、センサー信号は地面振動と傾斜の両方に応答してしまう [15]。

$$Y(s) = \frac{-ms^2}{ms^2 + cs + k} \left[ W(s) + \frac{g \sin(\theta_0)}{s^2} \Theta(s) \right] \quad (2.11)$$

ここで、 $W(s)$ ,  $Y(s)$ ,  $\Theta(s)$  はそれぞれラプラス空間での、振動子の変位、センサーが測る筐体と振動子との相対変位、筐体の傾斜角である。また  $m$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $g$ ,  $\theta_0$  はそれぞれ、振動子の質量、粘性減衰係数、ばね定数、重力加速度、つりあいの状態での角度である。Eq.(2.12) によれば、

$$f < \sqrt{\frac{g \sin(\theta_0)}{(2\pi)^2}} \text{ [Hz]} \quad (2.12)$$

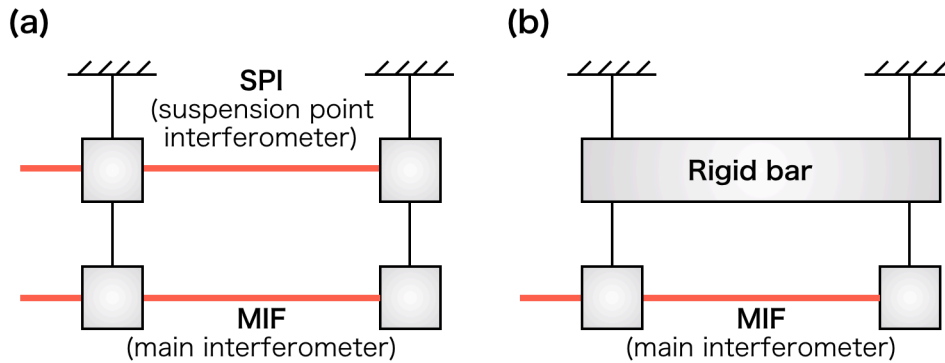


のとき傾斜成分が卓越してくる。たとえば最も傾斜からのカップリングが大きい  $\theta_0 = \pi/2$  のとき、つまり地面振動の並進成分は  $f < 0.5$  [Hz] のとき傾斜成分に埋もれてしまう。

このように低周波では傾斜計として振る舞う慣性センサーを能動防振につかうことはできない。したがって傾斜成分を別の慣性センサーで測定して、制御信号から傾斜成分を取り除くことが必要となり制御が複雑になってしまう [16]。

## 2.3 Active Baseline Seismic Isolation

レーザー干渉計型重力波望遠鏡にとって防振すべきは基線長であり、必ずしも個々のステージを慣性系に防振する必要はない。このことに着目して、Suspension Point Interferometer (SPI) と呼ばれる干渉計をつかう基線長能動防振が開発されてきた。



**Figure 2.8:** Schematic arrangement for one arm of SPI.

### 2.3.1 Suspension Point Interferometer (SPI)

基線長能動防振のアイデアは Drever によっておよそ 30 年前に考案された。このアイデアは、腕共振器の懸架点間の長さを Suspension point interferometer (SPI) と呼ばれる補助光学系をつかって測り、その信号で懸架点間の距離を一定に保つように制御するというものであった [17]。慣性センサーをもちいた能動防振とは異なり、低周波で感度が良いので、SPI をもちいた能動防振は DC まで防振する

ことができ、最大の利点である。そしてこれまでに次に述べるようなさまざまな SPI が開発されてきた。

### Fabry-Perot Optical Cavity Type

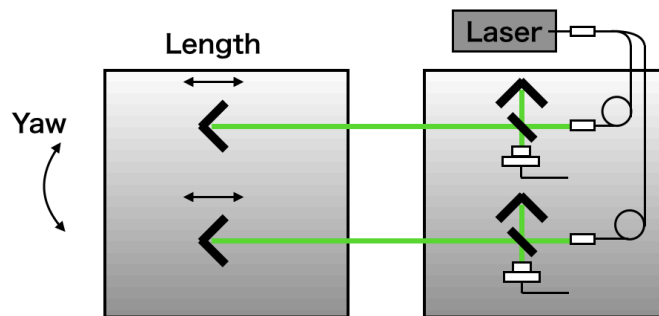
まずはじめに考案されたのが、Fig.2.8(a) のように主干渉計の腕共振器のすぐ上の段をつかって Fabry-Perot 共振器をつくるアイデアである [18]。このアイデアの優れた点は、テストマスのすぐ近くで腕共振器長を測りフィードバック制御できるので、ゲインを十分に大きくすれば Fig.2.8(b) のように剛体棒として上段は振る舞う。これはつまり、一切基線長変動しない地面振動から単振り子で腕共振器が懸架されていることを意味し、究極的な防振である。そして程なくして、2m の大きさのプロトタイプが開発され、主干渉計の腕共振器長変動を 1 Hz 以下で 40 dB 低減することが実証された [19]。

しかしながら、section 2.3.2 で後述する通り、SPI は共振器長変動のみをモニターしてフィードバック制御するので、腕共振器全体が動くような地面振動の同相成分を低減することができない。言い換えると、SPI 以下の振り子の対称性が悪く CMRR が悪いと地面振動の同相成分は共振器長変動にカップリングしてしまう。このことから振り子の共振周波数以上では CMRR によって能動防振の性能は制限される。

さらに Fabry-Perot 光共振器型の SPI だと線形レンジが小さいため、SPI 自身が共振するために RMS をおさえるための防振が必要であり、SPI 自身の動作が不安定である。2m のプロトタイプでは基線長が短いため、section ?? で述べたように、地面振動の逆相成分は十分小さく低減されているが、km スケールの Fabry-Perot 光共振器型の SPI を安定して動作させるには、1000 倍条件が厳しくなる。また長期線になれば角度制御に対する要求値も厳しくなるため、Fabry-Perot 光共振器型の SPI は問題をかかえてしまう。

### Homodyne Michelson Interferometer Type

測定のレンジが非常に狭い Fabry-Perot 光共振器の問題を解決するために、Michelson 干渉計を SPI に使った能動防振が開発された [20]。この Michelson 干渉計は GIF と同じ構成となっており、1m 離れたステージ間の距離を一定にたもつようフィードバック制御した。その結果、数時間以上にわたって数 nm スケールで基



**Figure 2.9:** Active baseline seismic isolation system using Michelson Type SPI [20]. 2つのSPIで基線方向とYaw方向の制御をしている。それぞれのSPIはエンド鏡にコーナーキューブを使用している非対称マイケルソン干渉計であり、干渉信号はホモダイン検波で取得している [7]。コーナーキューブは干渉させるためのアライメント調整を必要としないが、その反面、角度変化と基線変化を区別できないので、SPIが2台必要になる。

線長を防振することを実証した。

しかしながら、エンドミラーにコーナーキューブを使用しており、角度変化と基線長変化を区別できないため、それらを分離するためにさらに余分にSPIを必要とする。この研究では、YAW方向のみ制御するために合計で2台のSPIをつかっていたが、PIT成分も分離するためには合計で3台のSPIが必要である。実際、彼らの能動防振ではPITの角度揺れからのカップリングが低周波の防振を制限していたため、3台目のSPIが必要である。

### Heterodyne Mach-Zehnder Interferometer Type

SPIで角度制御するために

[21, 22]

### 2.3.2 Limitation due to CMRR

Section 2.2 で述べた能動防振は同相成分と逆相成分の両方を防振していたのに対して、SPIを使う能動防振では同相成分は防振しない。つまり同相雑音除去比が

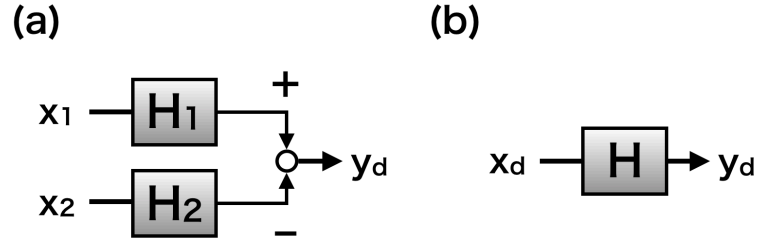


Figure 2.10: ...

悪いと同相成分の地面振動がステージ間の相対変位にカップルしてしまう。

同相成分から差動成分への寄与を考える。Fig.2.10(a)のように、2つの場所での地面振動  $x_1, x_2$  がそれぞれの防振ステージの伝達関数  $H_1, H_2$  を経て、ステージの相対変位  $y_d$  として出力される、2入力1出力のシステムを考える。それぞれのステージと地面振動の変位を  $X_i, x_i$  とし、地面からステージへの伝達関数を  $H_i$  とする。ここで添字は  $i = 1, 2$  であり、それぞれ ITMX と ETMX を表す。つまりステージの相対変位  $X_d$  は

$$y_d = H_1 x_1 - H_2 x_2 \quad (2.13)$$

である。ここでこれら伝達関数と地面振動について差動成分と同相成分を

$$x_d = x_1 - x_2, \quad x_c = x_1 + x_2 \quad (2.14)$$

$$H_d = \frac{H_1 - H_2}{2}, \quad H_c = \frac{H_1 + H_2}{2} \quad (2.15)$$

のように定義し、Eq.(2.13) を新しく書き下せば、

$$y_d = H_1 x_1 - H_2 x_2 \quad (2.16)$$

$$= H_c x_d + H_d x_c \quad (2.17)$$

のようにステージの差動信号は地面振動の差動信号と同相信号で表すことができるが、ここでこの差動システムの CMRR を

$$H_{\text{CMRR}} \equiv \frac{H_1 + H_2}{H_1 - H_2} = \frac{H_c}{H_d} \quad (2.18)$$

と定義すれば、差動システムは

$$y_d = H_c \left( x_d + \frac{1}{H_{\text{CMRR}}} x_c \right) \quad (2.19)$$

となる。つまり Eq.(2.19) は、CMRR を十分おおきくすれば地面振動の同相成分からの寄与を小さくできることを意味している。言い換えると CMRR の逆比は地面の同相成分から差動成分へのカップリングをあらわしている。

この CMRR は 2 つの防振装置の差に敏感であるため、共振周波数がわずかにずれると共振周波数以上では CMRR は悪化する。たとえば Eq.(2.2) のように単振り子だとした場合、高周波では  $H \sim (f_0/f)^2$  の伝達関数をもつ。このとき共振周波数が  $\Delta f_0$  ずれると、高周波では  $2f_0\Delta f_0$  ほどゲインに違いが生じる。これはそのまま CMRR を悪化させ、高周波での防振比を制限する。

### 2.3.3 差動能動防振システム

Fig.2.11 に示すような制御で SPI をつかってステージの差動成分  $Y_d$  を防振する。このときの差動成分は、

$$Y_d = \frac{1}{1+G} (H_c X_d + H_d X_c) + \frac{G}{1+G} N_{SPI} \quad (2.20)$$

となる。ここでループゲインを  $G = S_{SPI} C_{fb} P$  とした。

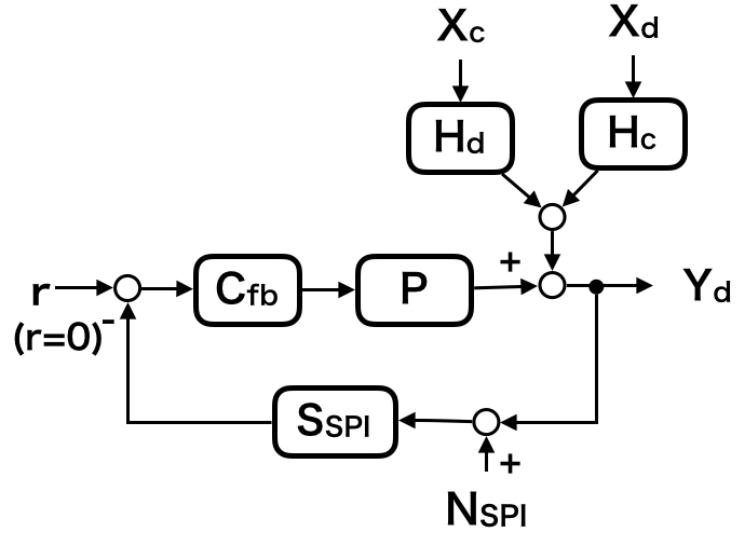
### 2.3.4 RMS Reduction

SPI をつかえば腕共振器長の RMS を低減することができる。

腕共振器の RMS が小さくなれば後述するとおり、重力波望遠鏡にとってさまざまな利点を与える。

#### Improvement of Actuator Noise

腕共振器の RMS が小さくなることで、テストマスのアクチュエータ効率を小さくでき、アクチュエータ雑音を小さくすることができる。



**Figure 2.11:** SPIをつかったステージの相対変位の能動防振。  $X_d$ ,  $X_c$  [m] はそれぞれ地面振動の差動成分と同相成分である。  $H_d$ ,  $H_c$  [m/m] は Eq.(2.15) で定義される伝達関数である。  $S_{SPI}$  [V/m],  $C_f$  [V/V],  $P$  [m/V]  $N_{SPI}$  [m] はそれぞれ、SPI のセンサー効率、フィードバックフィルター、アクチュエータからステージの差動揺れへの伝達関数、SPI のセンサーノイズである。

### Improvement of Glitch Noise

腕共振器の RMS が小さくなることで、アクチュエータにかかる電圧値を小さくでき、バルクハウゼンノイズを低減することが期待できる。

[23] [24] [25]

### Facilitation of Lock Acquisition

腕共振器の RMS が小さくなることで、ロックアクイジションが容易になる。

### 2.3.5 Some Difficulties

#### Difficulty due to Asymmetry of the Suspensions

SPIをつかった能動防振は共振器長さを一定にたもつように制御するので、腕共振の同相の動きは防振できない。このとき、サスペンションの非対称性から同相雑音除去比が悪いと、この同相成分が腕共振器長にカップルしてしまう。

#### Difficulty in Large Scale GW detectors

SPIの欠点は、建設のコストとアラインメントの難しさにある。

## 2.4 Baseline Compensation System

### 2.4.1 Concept

SPIをつかった能動防振の防振性能はCMRRで決まるため、CMRRが悪くなる共振周波数以上の帯域では能動防振をしない。

### 2.4.2 Advanatge of GIF

### 2.4.3 GIF as SPI

### 2.4.4 Control Scheme

## 2.5 Summary of the Chapter





# Chapter 3

## Demonstration of Baseline Compensation

基線長補償システムの性能評価をするために、KAAGRA の X アームキャビティを防振した。

### 3.1 Overview of KAGRA

#### 3.1.1 Status of KAGRA

KAGRA is a 3km laser interferometer, constructed in Kamioka, Gifu, Japan, and is now in its final commissioning phase. The KAGRA project はこれまでに 2 つの試験運転を経て、今は LIGO と Virgo との第三次共同観測 (O3) にむけた phase にいる。Table??に KAGRA の phase をまとめる。1 つめの試験運転は initial KAGRA (iKAGRA) と呼ばれる、2016 年の 3 月から 4 月に行われた、3km の Michelson interferometer の試験運転である。このとき、テストマスは低温ではなく常温ではなかったが、3km の長期線干渉計を地下で可動させることを実証した。そして次に 2 つ目の試験運転である、baseline KAGRA (bKAGRA) とよばれる、低温鏡をつかった Michelson 干渉計の試験運転である。この運転では低温干渉計稼働させることを実証した。そして 2019 年 12 月現在、LIGO と Virgo との第三次共同観測 (O3) にむけて、低温鏡を使用した Fabry-Perot Michelson interferometer (FPMI) のコミッショニングをおこなっており、中性子連星合体を

1 Mpc で観測できる感度まで向上させるノイズハンティングを行っている。

**Table 3.1:** Summary of the phases of KAGRA. MI: Michelson Interferometer, FPMI: Fabry-Perot Michelson Interferometer, DRFPMI: Dual-Recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer, RSE: resonant sideband extraction

	iKAGRA	bKAGRA Phase1	bKAGRA for O3	bKAGRA (final)
Year	2016 Mar - Apr	2018 Apr - May	2019 Dec -	2020 - (planned)
Configuration	MI	MI	FPMI	DRFPMI (RSE)
Test mass temperature	room temp.	18K room temp.	18K room temp.	22K

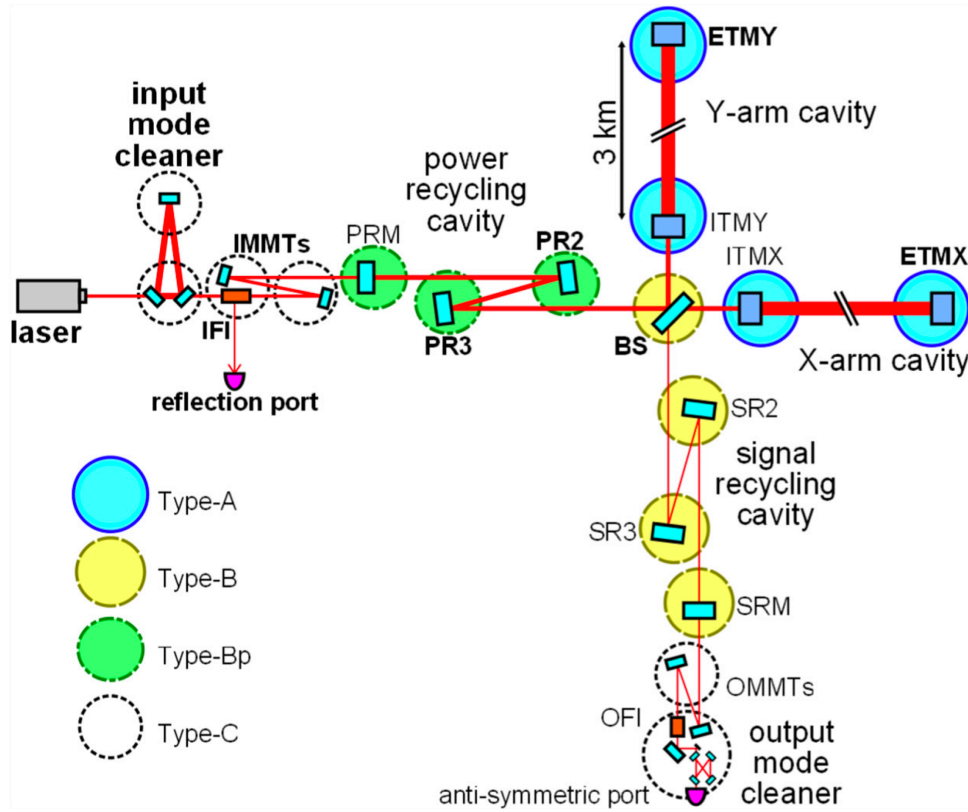
### 3.1.2 Main Interferometer

KAGRA のメイン干渉計の図を Fig.3.1a に示す。KAGRA は他の LIGO や Virgo と同様に、腕に Fabry-Perot 光共振器とリサイクリング光共振器をもつマイケルソン干渉計である。ただし他とことなるのは、腕共振器の鏡は 22 K まで冷却されていることである。この鏡にはサファイヤを使用している。なぜならば極低温下でも高い thermal conductivity と高い Q 値を持ち、それぞれの特徴が熱レンズ効果と熱雑音を低減できるためである。また KAGRA その他の鏡はすべて常温の fused silica 鏡である。

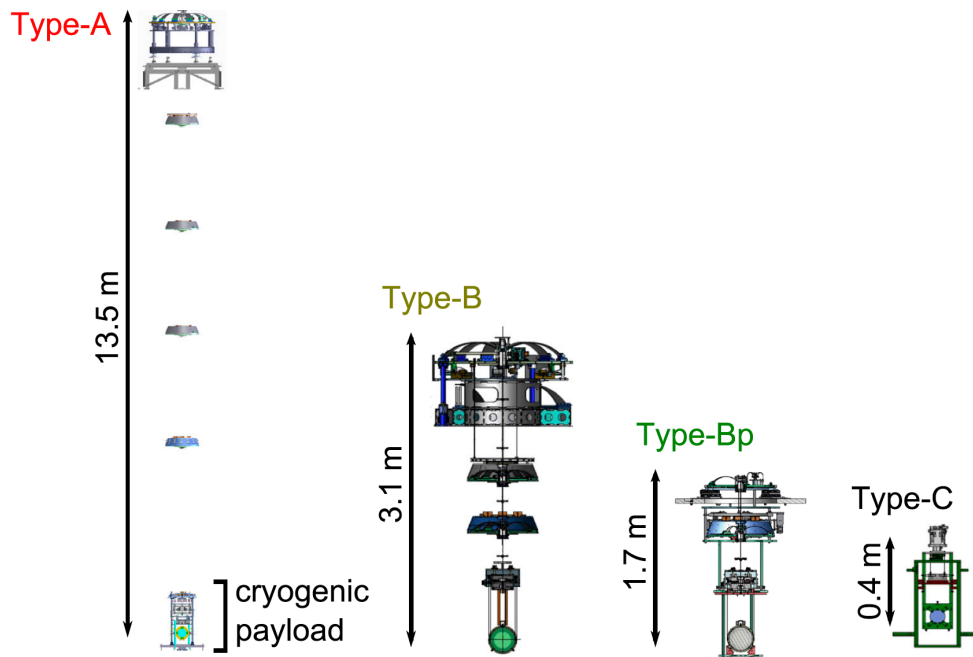
KAGRA の干渉計は、おもに 4 つに分けられる; arm cavities, input and output mode cleaners (IMC and OMC), power recycling cavities (PRC), and signal recycling cavities (SRC).

Arm cavities are composed of input test masses (ITMs) and end test masses (ETMs). また低温鏡である ITM 内部でのパワーをへらすために、フィネスは 1530 と他の検出器とくらべて高い。

IMC は入射光の空間モードの整形と周波数を安定化させるために使われ、OMC は出射光の unwanted higher-order spatial modes と frequency sideband を落とす



(a) Schematic interferometer configuration of KAGRA [26]



(b) KAGRA mirror suspension system [26]

**Figure 3.1:** Interferometer configuration and mirror suspension system

ためにある。IMC は 3 つの鏡で構成される三角共振器であり、およそ 1Hz 以上の周波数の pre-stabilization ができるように設計されている。また OMC は 4 つの鏡から構成される bow-tie cavity である。

PRC は BS と共振器をつくる PRM の他に PR2 と PR3 鏡で構成される。この共振器で入射光のパワーを 10 倍増幅させる。

SRC は SRM と SR2、SR3 で構成される。SRC は検出器を広帯域にして重力波信号を抜き出すために使われる。This technique is more important than Advanced LIGO and Advanced Virgo, because the bandwidth is narrower than other detectors due to a high finesse arm cavity of KAGRA.

### 3.1.3 Mirror Suspension System

## 3.2 KAGRA Type-A Suspension

### 3.2.1 Overview

### 3.2.2 Mechanical design

Pre-Isolator stage (PI)

### 3.2.3 Sensors and Actuators

Liner Variable Differential Transducer (LVDT)

Geophone

Coil-magnet actuator

## 3.3 Experimental Arrangement

### 3.3.1 X-arm Cavity

### 3.3.2 ...

## 3.4 Results

### 3.4.1 ...

## 3.5 Discussion and Summary of the Chapter

### 3.5.1 Discussion

### 3.5.2 Summary



## Chapter 4

# Conculusion and Future Directions

### 4.1 Conclusion

### 4.2 Future Directions





# Bibliography

- [1] Akito Araya, Akiteru Takamori, Wataru Morii, Kouseki Miyo, Masatake Ohashi, Kazuhiro Hayama, Takashi Uchiyama, Shinji Miyoki, and Yoshio Saito. Design and operation of a 1500-m laser strainmeter installed at an underground site in kamioka, japan. *Earth, Planets and Space (Online)*, 69(1):1, 2017.
- [2] Philip E Ciddor. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Applied optics*, 35(9):1566–1573, 1996.
- [3] Charlotte Bond, Daniel Brown, Andreas Freise, and Kenneth A Strain. Interferometer techniques for gravitational-wave detection. *Living reviews in relativity*, 19(1):3, 2016.
- [4] Orazio Svelto. *Principles of lasers*, volume 4. Springer.
- [5] Fritz Riehle. *Frequency standards: basics and applications*. John Wiley & Sons, 2006.
- [6] Kouseki Miyo. 重力波望遠鏡 kagra のための地殻変動モニターの開発. Master’s thesis, University of Tokyo, 2017.
- [7] Akito Araya, Takashi Kunugi, Yoshio Fukao, Isao Yamada, Naoki Suda, Sumitaka Maruyama, Norikatsu Mio, and Shigenori Moriwaki. Iodine-stabilized nd: Yag laser applied to a long-baseline interferometer for wide-band earth strain observations. *Review of scientific instruments*, 73(6):2434–2439, 2002.

- [8] James J Snyder, Rama K Raj, Daniel Bloch, and Martial Ducloy. High-sensitivity nonlinear spectroscopy using a frequency-offset pump. *Optics letters*, 5(4):163–165, 1980.
- [9] Norman Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry. *Measurement Science and Technology*, 4(9):907, 1993.
- [10] Mark A Zumberge, Jonathan Berger, Matthew A Dzieciuch, and Robert L Parker. Resolving quadrature fringes in real time. *Applied optics*, 43(4):771–775, 2004.
- [11] Rolf Bork, R Abbott, D Barker, and J Heefner. An overview of the ligo control and data acquisition system. *arXiv preprint physics/0111077*, 2001.
- [12] Takanori Sekiguchi. *A Study of Low Frequency Vibration Isolation System for Large Scale Gravitational Wave Detectors*. PhD thesis, Department of Physics School of Science, University of Tokyo, 2016.
- [13] F Matichard, B Lantz, R Mittleman, K Mason, J Kissel, B Abbott, S Biscans, J McIver, R Abbott, S Abbott, et al. Seismic isolation of advanced ligo: Review of strategy, instrumentation and performance. *Classical and Quantum Gravity*, 32(18):185003, 2015.
- [14] Wensheng Hua. *LOW FREQUENCY VIBRATION ISOLATION AND ALIGNMENT SYSTEM FOR ADVANCED LIGO*. PhD thesis, stanford university, 2005.
- [15] Christophe Collette, Stefan Janssens, Pablo Fernandez-Carmona, Kurt Artoos, Michael Guinchard, Claude Hauviller, and André Preumont. Inertial sensors for low-frequency seismic vibration measurement. *Bulletin of the seismological society of America*, 102(4):1289–1300, 2012.
- [16] Sebastien Biscans. Optimization of the advanced ligo gravitational-wave detectors duty cycle by reduction of parametric instabilities and environmental impacts, 2018.

- [17] Outline of a proposed design for a first receiver for installation in the long-baseline facilities, of fabry-perot type. Technical report.
- [18] Ronald WP Drever and Steven J Augst. Extension of gravity-wave interferometer operation to low frequencies. *Classical and Quantum Gravity*, 19(7):2005, 2002.
- [19] Y Aso, M Ando, K Kawabe, S Otsuka, and K Tsubono. Stabilization of a fabry-perot interferometer using a suspension-point interferometer. *Physics Letters A*, 327(1):1–8, 2004.
- [20] Kenji Numata and Jordan Camp. Interferometric testbed for nanometer level stabilization of environmental motion over long time scales. *Appl. Opt.*, 47(36):6832–6841, Dec 2008.
- [21] K Dahl, G Heinzl, B Willke, K A Strain, S Gößler, and K Danzmann. Suspension platform interferometer for the AEI 10 m prototype: concept, design and optical layout. *Classical and Quantum Gravity*, 29(9):095024, apr 2012.
- [22] PhD thesis.
- [23] G Manson and G Hoffmann de Visme. The frequency spectrum of barkhausen noise. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 5(8):1389, 1972.
- [24] J Aasi, J Abadie, BP Abbott, Robert Abbott, T Abbott, MR Abernathy, T Accadia, F Acernese, C Adams, T Adams, et al. Characterization of the ligo detectors during their sixth science run. *Classical and Quantum Gravity*, 32(11):115012, 2015.
- [25] PJ Cote and LV Meisel. Self-organized criticality and the barkhausen effect. *Physical review letters*, 67(10):1334, 1991.
- [26] T Akutsu, M Ando, K Arai, Y Arai, S Araki, A Araya, N Aritomi, H Asada, Y Aso, S Atsuta, et al. First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory kagra. *arXiv preprint arXiv:1901.03569*, 2019.