

重力波望遠鏡KAGRAのための 地殻変動モニターの開発

三代浩世希

2016/1/05

目次

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 第1章 地上重力波望遠鏡 | 3 |
| 1.1 重力波 | 3 |
| 1.1.1 基本的性質 | 3 |
| 1.1.2 重力波源 | 3 |
| 1.1.3 レーザ干渉計による地上検出 | 3 |
| 1.2 検出原理 | 3 |
| 1.2.1 Fabry-Perot Michelson 干渉計 | 3 |
| 1.2.2 重力波信号の取得 | 3 |
| 1.3 検出器の安定性 | 5 |
| 1.3.1 安定性 | 5 |
| 1.3.2 地殻変動補償の必要性 | 5 |
| 1.3.3 地球潮汐による腕の長さ変化 | 6 |
| 第2章 レーザ歪み計 | 9 |
| 2.1 観測対象 | 10 |
| 2.2 原理 | 11 |
| 2.2.1 歪みに対する応答（すこし間違ってる） | 11 |
| 2.2.2 信号取得 | 12 |
| 2.2.3 位相カウンター | 18 |
| 2.3 構成 | 19 |
| 2.3.1 光学系概要 | 19 |
| 2.3.2 モードマッチ | 20 |
| 2.3.3 周波数安定化レーザ | 23 |
| 2.3.4 データ取得系 | 27 |
| 第3章 地殻変動モニター | 29 |
| 3.1 レーザ歪み計の利点 | 29 |
| 3.2 低周波地殻歪みの補償 | 29 |
| 3.2.1 目的 | 29 |

| | | |
|--------------|----------------------|-----------|
| 3.2.2 | 脈動 | 30 |
| 3.2.3 | 地球潮汐 | 30 |
| 3.2.4 | 補償システム | 30 |
| 3.2.5 | 保証システム | 30 |
| 3.3 | まとめ | 30 |
| 第 4 章 | Appendix | 33 |
| 4.1 | 空間モードの変換計算 | 33 |

第1章 地上重力波望遠鏡

1.1 重力波

1.1.1 基本的性質

1.1.2 重力波源

1.1.3 レーザ干渉計による地上検出

1.2 検出原理

1.2.1 Fabry-Perot Michelson 干渉計

Michelson 干渉計

Fabry-Perot 共振器

1.2.2 重力波信号の取得

フィードバック制御

干渉計は歪みをレーザの強度変化に変換する装置だが，その応答を線形に保つためには鏡の位置をロック (固定) しなければならない。そこで，フィードバック制御を行う。フィードバック制御は，ある動作点に対してのエラー信号を戻す制御のことを意味するが，戻すときにマイナスの符号をつけて戻すとき，ネガティブフィードバック制御と呼ぶ。

フィードバック制御を行う理由は，動作点にロックするだけではない。以下に示すような利点がある。

-

さて、実際の重力波望遠鏡はショットノイズを抑えるために、ダークフリンジにロックしている。ミッドフリンジと違い、ダークフリンジでは位置変化に対して干渉信号が線形応答ではないので、エラー信号に単純な差分信号をつかうことはできない。そのため、ヘテロダイン検波と呼ばれる手法を用いて微分信号を取得している。

ヘテロダイン検波

ヘテロダイン検波は、周波数の異なる信号を用いてビート信号をつくりだし、適当なフィルター処理をして目的の信号を取得する方法である。一方1つの周波数だけで検波する場合はホモダイン検波と呼ばれている。

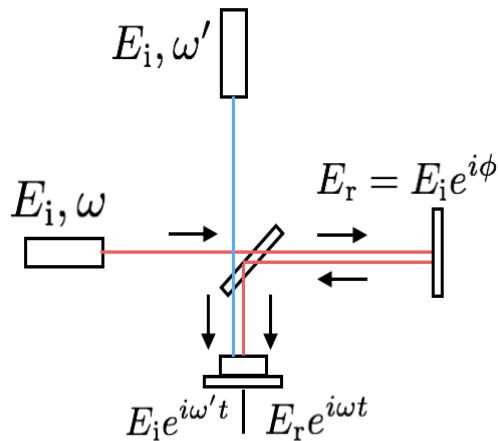


図. 1.1. ヘテロダイン干渉計。ヘテロダイン検波は

重力波望遠鏡の干渉計では、入射レーザに位相変調をかけて元の周波数とはべつにサイドバンドと呼ばれる周波数のことなるビームを用意している。

制御自由度とそのエラー信号

干渉計を制御するために必要な信号の取得には、Schnupp Asymmetryを施した干渉計に Frontal Modulation 法を用いて行う。Frontal Modulation 法は干渉計への入射ビームに位相変調をかけて復調して各制御自由度

の微分信号をとるための方法で、ヘテロダイン検波となっている。しかし単純に干渉計の腕の長さが同じで対称だった場合、 ω の自由度が ω と区別つかない。そのため、Schnupp Asymmetry と呼ばれる、非対称な長さにすることでそれを回避し、すべての自由度の微分信号を取得できる。

1.3 検出器の安定性

1.3.1 安定性

望遠鏡として稼働させるためには感度のほかに安定性が重要である。微小な制御をしているシステムに大きな外乱がやってくると、ダイナミックレンジが足りない場合、ロック状態を維持できない状態になってしまう。これをロックロス状態とよぶ。

安定に稼働できる時間は、ダイナミックレンジと変位雑音で見積もることができる。 f^{-2} で落ちていく変位雑音にたいして、ダイナミックレンジに収まる振幅であれば制御が効いてロックロスにならない。したがってギリギリの周波数の逆数がおよその安定稼働時間を決める。つまり典型的な地面雑音 [?] を仮定すると、およそ〇〇秒は安定することになる。

しかし、その周波数付近には脈動と呼ばれる、海が岩盤を叩きつけることが原因とされる、0.1-0.3Hz 付近にピークをもった振動が存在している。この振動は天候が悪くなるとレベルが上がりロックロスに繋がる。

□は、脈動による影響をおさえるために、共振器の腕の長さを補償するためのシステムを開発している。脈動のピークを潰すために、腕の両端に地震計を用いて腕の長さ変化をもとめ、FeedFoward している。このシステムのおかげで1桁ほどの低減につながっている。

現在、一方 KAGRA は他の地上大型重力波望遠鏡とくらべて1-2桁ほど地面雑音レベルの小さい環境に建設しているため、雑音低減もさることながら、さらなる安定稼働も期待できる。

1.3.2 地殻変動補償の必要性

そしてさらに安定した稼働をおこなうためには、ダイナミックレンジを大きくしなければならない。しかし、鏡の近くに取り付けられるアクチュエータは、その効率を上げてしまうと感度を汚してしまうので、上

段に取り付けることが望ましい。そこでLVDTと呼ばれるダイナミックレンジが1mmほどのアクチュエータを取り付けている。

そしてさらにその周波数付近には地球潮汐による地殻変動のピークが存在しており、その補償システムを考える必要がある。

LIGOでは、 \square は、モデル計算のみで得られた信号をもちいてFeedforwardしている。

VIRGOでは、 \square は、FeedForwardをせずに制御信号のみで、低周波成分をFeedBackしている。

しかしこれらの補償の仕方について、以下のようにいくつかの問題をあげることが出来る。

- モデル計算では、気圧変化などのローカルな地殻歪みを知ることはできない。iKAGRAでは、干渉計の構成はMichelson干渉計だったので制御信号から地球潮汐の波形を確認することができたが、あきらかにトレンドをもっていた。 \square は周辺の気圧変化と相関があると示唆している。
- モデル計算をせずに干渉計の制御信号をつかう場合、SNが悪い。(ここをもう少し定量的にはなさないと。)

以上のように、安定稼働のためには腕の長さを補償するシステムを必要としている。KAGRAでは両腕にレーザ歪み計を併設しており、直接腕の変位をみることができ、SNの良い信号を用いて安定化ができると期待している。レーザ歪み計の説明は??章で述べ、残りの節では地球潮汐について述べることにする。

1.3.3 地球潮汐による腕の長さ変化

地球潮汐は、潮汐力によって引き起こされる地殻変動のことである。潮汐力は、地球からみる他の天体との引力のことである。周期は、地球の自転による半日と月が地球の周りを自転することによるおよそ一ヶ月が主である。

潮汐に依る歪みを求める前に、議論を簡単にするために以下の条件のみについて計算する。

- 海洋の効果は無視する。

先に述べた??LIGO の地球潮汐のモデルには海洋は含まれていない。海洋を含めたモデルの計算は [] が開発した GOTIC2 によって計算をすることにする。

以下では、地球潮汐による差動と同相の変化を求めることにする。

潮汐による歪み

図??のように、月と地球の潮汐ポテンシャルは、

$$F = \quad (1.1)$$

で表される。これを展開すると、 $\circ\circ$ が残り、最終的に

$$F = \quad (1.2)$$

と表すことができる。第一項は $\circ\circ$ を表し、第二項は..を表している。

ここで、各歪み成分は式 (??) で表すことが出来る。

$$h = \quad (1.3)$$

$$\theta = \quad (1.4)$$

$$\phi = \quad (1.5)$$

$$(1.6)$$

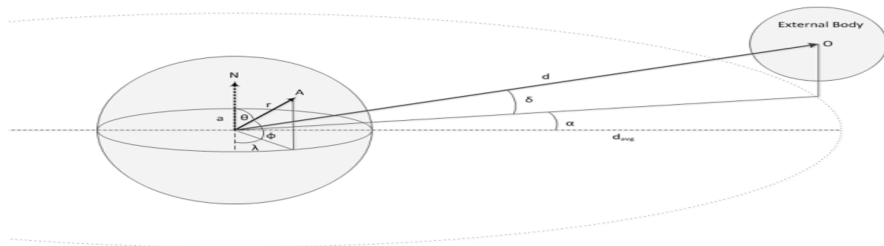


図. 1.2. 月と地球の関係。(LIGO から拝借しているので書き直す。雰囲気これ。)

同相成分

差動成分は,

$$dL_- = \quad (1.7)$$

となり, プロットしたものは図??のようになる。

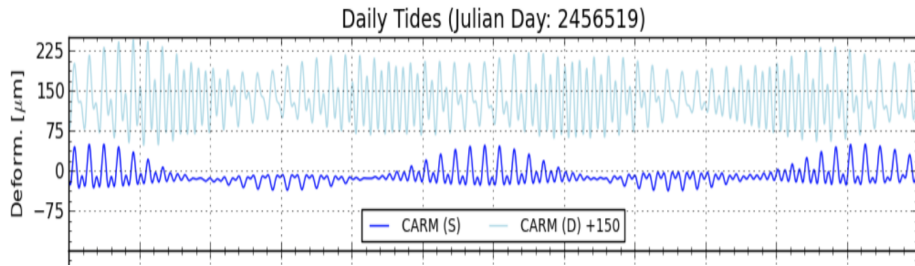


図. 1.3. 剛体モデルを仮定したときの歪みの同相信号。(LIGO から拝借しているので書き直す。雰囲気これ。)

差動成分

差動成分は,

$$dL_- = \quad (1.8)$$

となり, プロットしたものは図??のようになる。

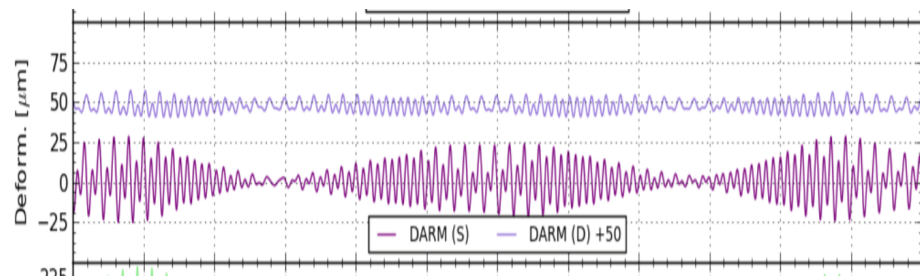


図. 1.4. 剛体モデルを仮定したときの歪みの差動信号。(LIGO から拝借しているので書き直す。雰囲気これ。)

第2章 レーザ歪み計

KAGRA には地殻変動を観測することのできるレーザ歪み計を併設している (図??)。このレーザ歪み計は東大地震研究所が地球物理のさまざまな現象を精密観測するために開発しているものであり、KAGRA ではこのレーザ歪み計を地物干渉計と呼んでおり、地殻変動のモニターとして利用する計画である (??)。

本章では、レーザ歪み計の原理??と構成??を述べる。計測原理は基本的に、変位に比例したレーザの位相変化を干渉信号に乗せてフォトディテクタで検出するだけだが、実際に検出する場合はいくつかの工夫がなされている。

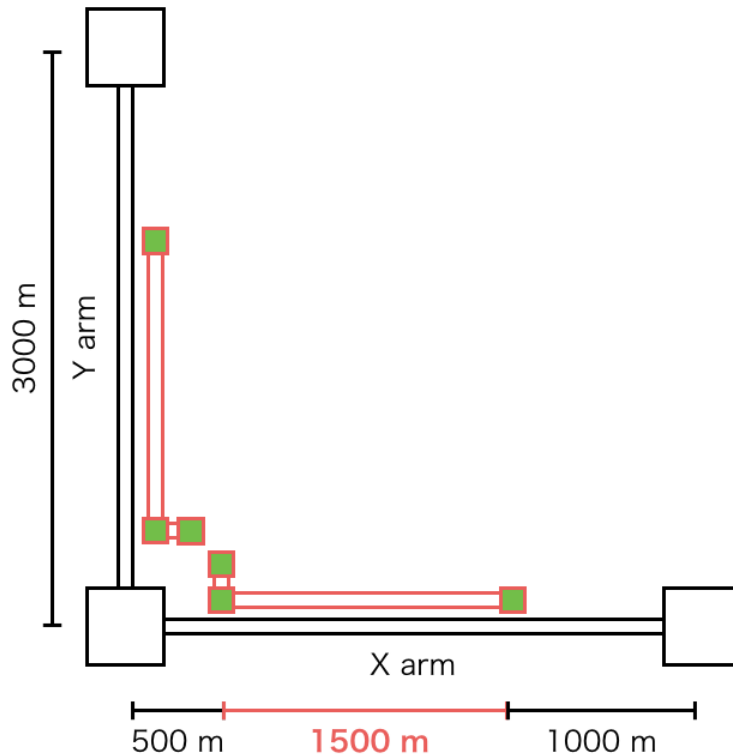


図. 2.1. 地物干渉計の位置。KAGRA は地物干渉と呼ばれるレーザ歪み計を併設している。地物干渉計は KAGRA の腕の中腹に位置しており基線長が 1500m の Michelson 干渉計である。干渉計は微小な変位を干渉信号に変換する装置と言え、基線長が長ければ長いほど小さな歪みを観測することができる。もともとは地球物理の現象を精密に観測することを目的に開発されてきたものだが、その性能は KAGRA の基線長をモニターすることにも十分応用可能である。

2.1 観測対象

レーザ歪み計は、地球の自由振動や地球潮汐、地震による歪みステップの観測まで多岐にわたる。

レーザ歪み計歪み計の特徴は観測できる周波数帯域が広くダイナミックレンジが大きいことである。??で詳細を述べるが、地物干渉計は数 Hz

まで感度があり、原理的にはいくらでも大きな変位をみることができる。

2.2 原理

2.2.1 歪みに対する応答（すこし間違ってる）

Michelson 干渉計の地殻歪みに対する周波数伝達関数を考える。Michelson 干渉計は参照鏡と試験鏡の間の相対距離を測るので、両方の鏡が同相か逆相に動くとき（歪の波長が腕の整数/2 倍のとき）は感度がない。

まず、干渉する2つの光の位相差 Φ_- を求める。地殻歪みを $h(t)$ とすれば、干渉計の腕を往復して戻ってきた光の位相遅れ Φ_x は、

$$\Phi_x = 2L_x k \left[1 + \int_{t-\tau}^t h(t') dt' \right], \quad \tau := \frac{2L_x}{c} \quad (2.1)$$

となる。また参照鏡はスーパーインバー合金で固定されているので、ここでの歪みは無視できるとして、2つの光の位相差 Φ_- は

$$\Phi_- = 2L_x k + \delta\Phi_{move} \quad (2.2)$$

$$\delta\Phi_{move} := 2L_x k \int_{t-\tau}^t h(t') dt' \quad (2.3)$$

となる。式 (2.2) の第一項は静的な位相差を表し、第二項は地殻歪みの影響による位相変化を表している。

次に、式 (2.3) をフーリエ変換して整理すると、Michelson 干渉計のち各歪に対する周波数伝達関数が

$$\delta\Phi_{move}(w) = 2L_x k \int_{t-\tau}^t \int_{-\infty}^{infy} h(\omega) e^{-i\omega t'} d\omega dt' \quad (2.4)$$

$$= 2L_x k \int_{-\infty}^{infy} H_{MI}(w) h(\omega) e^{-i\omega t'} d\omega dt' \quad (2.5)$$

$$H_{MI}(\omega) := \frac{2L_x k}{\omega} \sin\left(\frac{l_c}{\omega}\right) e^{-i\frac{l_c}{\omega}} \quad (2.6)$$

として得られる。式 (2.6) は図??のように、ある周波数以上で f^{-1} の幂で落ちている。

2.2.2 信号取得

地物干渉計はレンジを広くするために干渉信号をロックしない。??で述べたように重力波望遠鏡の干渉計は、動作点に保つようフィードバック制御をしている。これは重力波望遠鏡がレーザー波長よりもさらに微小な歪みをみようとしているからであり、地物干渉計はそうではない。観測対象の1つである、地球潮汐の p-p 振幅はレーザー波長の数十倍にもなる。このように何回もフリンジを越えるような大きな変位はロックをしまうと連続的に観測することができない。そのため地物干渉計はロックをせずに、Quadrature Phase と呼ばれる、90 度位相が異なる干渉信号を用意して連続的に変位を観測することができている。

位相が 90 度異なる光は $1/4$ 波長板で片腕だけ円偏光にすれば作ることができる。予め p 偏光と s 偏光が 1 : 1 に分かれた状態（偏光面が 45 度傾いた直線偏光）にしておけば、片腕だけ円偏光にしているおかげで、p 偏光と s 偏光の 2 つの光でそれぞれ干渉信号を得ることが可能になる。その光を PBS でそれぞれの偏光に分けて PD で受光すれば、位相が 90 度異なる 2 つの干渉信号を得ることが可能である。

地物干渉計では Quadrature Phase 信号を得るために、図??のように光学系を構成している。p 偏光と s 偏光は互いに干渉しない性質を利用して、片腕の s 偏光だけを 90 度位相をずらし、2 つの直交した干渉信号を得ることができる。この干渉計はホモダイン干渉計であり、ヘテロダイン干渉計とくらべてアクティブに制御する構造を必要としないので、長期的に観測することに適している。

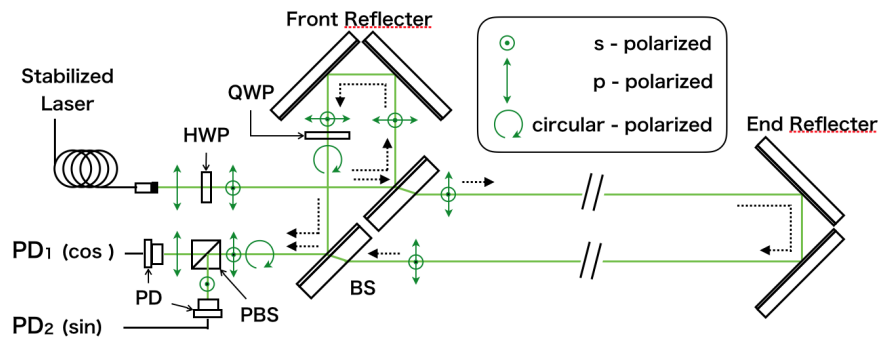


図. 2.2. 地物干渉計の信号取得用光学系。地物干渉計はホモダイン干渉計を QuadraturePhase 信号を用いて干渉信号を取得している。まず、入射光は p 偏光と s 偏光両方を 1:1 になるように 1/2 波長板で偏光面を 45 度傾ける。そのあとビームスプリッタでフロントリフレクタとエンドリフレクタに光が別れるが、フロントの方だけに 1/4 波長板を通して s 偏光だけ位相を 90 度ズラす。そして、再度ビームスプリッタで再結合した光は偏光ビームスプリッタで p 偏光と s 偏光に分けてそれぞれをフォトディテクタで受光する。受光した信号はそれぞれの偏波での干渉信号を表しており、互いに 90 度位相がズレた信号同士になっている。これにより QuadraturePhase 信号を取り出している。これら 2 つの直交下信号をもちいて、連続的に干渉信号を観測することができる。(??)

さて Quadrature Phase 信号を用いると、位相変化がリサージュ図形内のデータ点の回転変化として理解することができる。

まず、フォトディテクタの信号それぞれを、

$$PD_1 = A_0 + A_1 \cos \phi \quad (2.7)$$

$$PD_Q = B_0 + B_1 \sin \phi + \delta \quad (2.8)$$

$$(2.9)$$

と定義すると、図??のようにデータ点はリサージュ図形でフィッティングすることができる。

図??にあるように、多数のデータ点はリサージュ図形を描く。このデータ点を時系列で追うと、位相角の変化が図形内を動くデータ点の回転運

動としてみてとれる。位相角は式 (2.7) の各パラメータ $A_0, A_1, B_0, B_1, \delta$ をつかって表すと式 (2.10) のようになる。

$$\phi = \quad (2.10)$$

$$zabs = \quad (2.11)$$

$$(2.12)$$

ここで、 $zabs$ は規格化され円になったリサージュ図形から、データ点がどれほどズレているかを表す量で、パラメータがふらつた場合 1 から離れた値をとり、データの質を示す。



NO IMAGE

図. 2.3. Quadrature Phase 信号を用いたリサージュ図形。元の信号 PD_1 に対して 90 度位相が異なる信号である Quadrature Phase 信号 PD_Q を使うと、位相変化をリサージュ図形内を動くデータの回転変化として試みる事ができる。図は実際の計測データに対してフィッティングしたリサージュ図形である。ひとまずフィッティングができれば、そのパラメータを使って式 (2.10) のとおりに位相角を求めることができる。しかし、フィッティングパラメータは常に一定とは限らず、式 (2.10) 中の z_{abs} で表されるデータの質が悪い場合、フィッティングの頻度を多くしなければならない。さらに求めた位相角の時系列データは逆正接関数の atan2 を用いると、 $[-\pi, \pi]$ の範囲でしか得られないので、*unwrap* と呼ばれる、位相角を連続量に直す操作が必要である。(??) そして連続した位相角が求まれば、変位 x は $x = 2\pi(2x)/\lambda$ となる。

この式 (2.10) において位相角は逆正接関数 \tan で計算されるが、一価関数ではない。位相角の計算には atan2 という戻り値が $[-\pi, \pi]$ の関数を使うことで一価関数にできるが、連続的に変動している位相角を表現することはできない。

そこで、さらに unwrap と呼ばれる処理をし、 $[-\pi, \pi]$ の範囲でしか値を取れなかった位相角を連続角として表現する。 unwrap の手順は図??に記している。

図??のように、基本的には、 π と $-\pi$ を越えるときに 360 度分ズレた値を atan2 は返してしまうので、ズレを引けば良い。そして、超えるときにその回数を数えておけばいくらズレを引いたところからの角度なのかを知ることができる。この操作をして $[-\pi, \pi]$ 度以上の範囲で角度を測ることを位相カウントと呼び、それをするものを位相カウンタと呼ぶことにする。ただし、この通り位相カウンタをつくと、一気に 360 度分ずれた場合と区別がつかない問題が生じてしまう。詳細はフィッティングの方法と合わせて、次節 (??) で述べる。



図. 2.4. unwrap の仕方。atan2 関数は tan を一価関数にするが，戻り値は $[-\pi, \pi]$ の範囲のみなので，この範囲以上の位相角の変化は不連続になってしまう。基本的には，戻り値の上限と下限をまたぐときにそれぞれ，360 度減り，360 度増える動作を見せる。そのため，このズレをを適切に直しておけば，連続した位相角を知ることができる。この方法は， π を超えるときは '+1 回'， $-\pi$ を超えるときは '-1 回' として回数を数えておけば，atan2 の戻り値に '回数 $\times 2\pi$ ' を加えることで，いくらでも連続値を求めることができる。

これら処理をしてやっと連続した位相角を求めることができ，最終的に変位としてデータを得ることができる。以上のとおり，連続した位相角を求める方法を述べたが，実際に求めるときにはいくつか注意すべき

ことがある。

注意すべき1つ目はフィッティングの頻度である。理想的には、パラメータが変化しなければ、一回のフィッティングでパラメータを求めておけば良いが、実際は変化する。そのため、光の強度が変化しないようにゆらぎを抑える必要がある。フィッティングの頻度は、光量変化のゆらぎで z_{abs} が小さくならないような時間間隔を取ればよい。そうすることでゆらぎによる変化を受ける前にフィッティングを終えて位相角を求めることができる。しかし一方で、頻度を多くするとサンプリング周波数が小さいとフィッティングに必要なデータ数が確保できない。したがって、フィッティングの頻度を多くしないためにも、光の強度ゆらぎをおさえる工夫は必要である。

2つ目は、リサージュ図形が円ではなく楕円になっていた場合、位相角の変化は線形にはならないことである。これに関しては、[?,] 詳しく計算している。非線形にならないよう、2つのフォトディテクタの信号はできる限り 90 度に直交しているのが望ましい。

これらのことに注意して位相変換を行えば、原理的には、地物干渉計はいくらでも広い範囲の変位を計測することができる。

2.2.3 位相カウンタ

前節では、Quadrature Phase 信号を用いた連続位相角の取得を述べた。本節では、実際に地物干渉計で行われているフィッティングと `unwrap` の方法を述べる。

フィッティングの方法

フィッティングは最小二乗法を用いておこなう。[?,] の方法によれば式 (??) のように各フィッティングパラメータは 5×5 の行列の逆行列をとけば求まる。

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_0 \\ B_1 \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & a & a & a & a \\ a & a & a & a & a \\ a & a & a & a & a \\ a & a & a & a & a \\ a & a & a & a & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_0 \\ B_1 \\ \delta \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

この方法は、予めパラメータを与える式が求まるので、イテレーションを最小限にすることができる利点をもつ。

unwrap の方法

unwrap の基本的な方法は図??に記している。atan2 によって戻り値が $[-\pi, \pi]$ の一価関数になってしまうので、値が戻り値の範囲を超えた場合には 360 度分だけずれる。式に表すと、位相角 ϕ は

$$\phi = \text{回転回数} \times 2\pi \quad (2.14)$$

と表せる。なのでこのズレを数えておけば、いくらでも大きな位相角を知ることができる。

しかし、360 度以上の変化が次のデータ点で起きた場合、区別することができない。一般的に図??の方法だけでは、ズレのオフセットには 360 度の整数倍だけ不定性が残る。

(解決方法は?)

2.3 構成

2.3.1 光学系概要

地物干渉計の光学系は大きく、モードマッチ用と干渉信号の取得用に分けることができる。モードマッチは干渉計として干渉縞を効率よく干渉させるために必要であり、基線長が 1500m にも及ぶのでビームサイズは大きくならざるを得ず、それにともなって光学素子も巨大になってしまう。干渉信号の取得用の光学系は??で述べたように、ホモダイン干渉計に Quadrature Phase を用いるための、偏光用の光学素子が占める。

また、地物干渉計は非対称なマイケルソン干渉計なので、周波数雑音がレーザの感度を制限する。

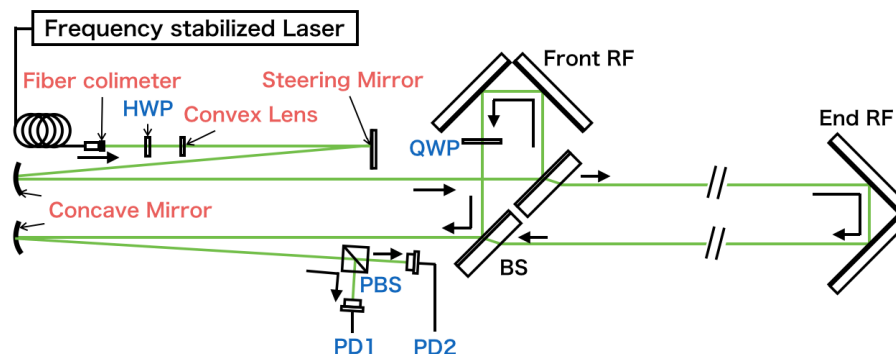


図. 2.5. 光学系の概略図。周波数安定化されたレーザは二枚のビームスプリッタで分かれて再結合し、干渉する。光学系はおもにモードマッチ用のもの (赤色のラベル) と信号取得用のもの (青色でラベル) に分けることができる。赤色の光学素子：モードマッチは、ファイバコリメータからのビームのビームウエストがエンドリフレクタ付近になるように、凸レンズと凹面鏡で調整している。ステアリングミラーは光軸調整用につかっている。青色の光学素子：信号取得するために位相が互いに直交した (90 度ずれている) 信号をつかう。そのために、p と s 偏光を 1:1 で含むように 1/2 波長板をつかって偏光面を 45 度に傾け干渉計に入射したのち、フロントのリフレクタの方だけ 1/4 波長板をつかって 90 度位相を遅らせている。そして、干渉光を PBS で偏波ごとにわけて受光している。このような信号取得を Quadrature Phase 法という。

2.3.2 モードマッチ

干渉信号のコントラストを大きくするために、フロントとエンドリフレクタからの戻り光の空間モードをあわせる必要があり、これをモードマッチと呼んでいる。地物干渉計のモードマッチは、図??に示すように曲率半径が 10m の凹面鏡で 1500m 先のエンドリフレクタに打ち込んでいる。打ち込むときにはエンドリフレクタ付近でビームウエストになるよう、入射用の凹面鏡の前に凸レンズでも調整する。光軸方向に凹面鏡を移動させればある程度の調整が効くが、間にさらに凸レンズを置くことで調整の幅が効く。そして、光軸の位置と方向を調整するためにステア

リングミラーを用いている。これは、坑内の限られた空間で有効に光路長を稼ぐことができる利点を持つ。



図. 2.6. モードマッチ用光学素子の配置。エンドリフレクタ付近でビームウエストになるように、入射用の曲率半径 10m の凹面鏡をつかってファイバーからのビームを広げる。入射ビームからの光路差をかえることで、さまざまにビームプロファイルを調整できるが、足りない場合は凸レンズを入れることで無理なく光学定盤におくことができるよう、選んでいる。さらに、坑内という限られた空間で、光路長を確保するためにステアリングミラーをつかっている。図中のように凹面鏡の手前に配置して折り返すことで有効的に光路長を伸ばすほか、光軸の位置と方向を調整することができる。

モードマッチは、別の言い方をすれば、ビームの q パラメータをあわせることでもあり、 q パラメータはレンズや鏡などの光学素子によって値を変えて伝播していく。具体的な計算方法は付録に載せるとして、本節では結果を述べることにする。

地物干渉計のモードマッチは大きく分けて4回行われた。初期設計のときのビームプロファイルを表 2.1 と図??に、最終的なビームプロファイルを表 2.2 と図??に示す。表 2.1 と表 2.2 はバーコリメータからの距離に応じて変化するビームのサイズと曲率を表している。ファイバーコリメータからの距離は、ファイバーコリメータを原点にして、光軸方向に向いているものとする。したがって、議論を簡単にするために z 軸を一直線にとり、モードマッチングを図った。図??と図??は一直線に並べたときのビームのサイズと曲率の様子を表している。

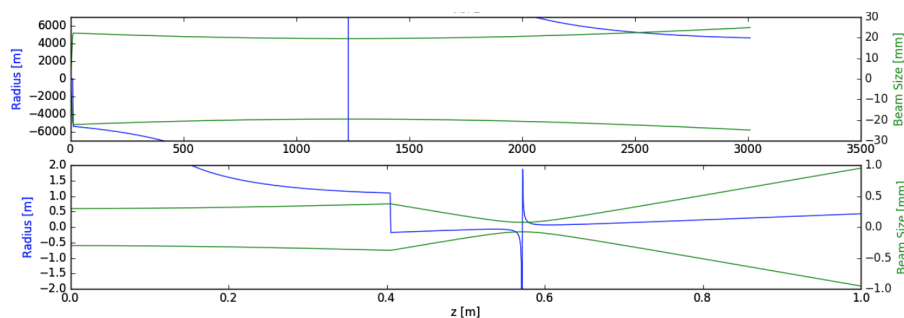


図. 2.7

表. 2.1. 初期設計のビームプロファイル

| 名称 | z [m] | ビーム半径 [mm] | ビーム曲率 [m] |
|------------|---------|------------|-----------|
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |

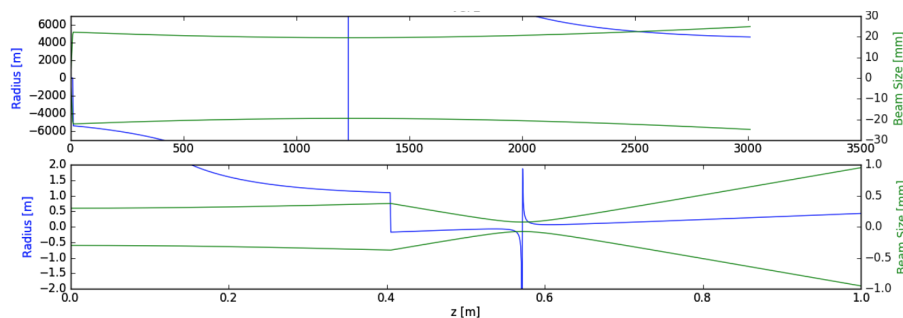


図. 2.8

表. 2.2. 最終的なビームプロファイル

| 名称 | z [m] | ビーム半径 [mm] | ビーム曲率 [m] |
|------------|-------|------------|-----------|
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |
| ファイバーコリメータ | 0.000 | 0.300 | inf |

2.3.3 周波数安定化レーザ

構成

レーザの周波数はヨウ素の吸収線にフィードバックして安定化している (図??)。吸収線信号は、ヨウ素セル中の透過光信号 (Probe ビームの信号) だけを見ると、ガスの速度分布はマクスウェル分布をもつので、吸収線の周波数がドップラーシフトしてしまい、急峻なピーク信号にはならない。広がった信号の場合、ロックすべきポイントも広がってしまい安定化が難しい。そこで、ドップラーシフトしていない信号を得ようとするれば、Probe ビームの真正面から Pump ビームと呼ばれる飽和吸収をさせておくためのビームを入射すればよい。つまり両方のビームにとって静止したガスで大きく吸収が生じ、Probe ビームはその周波数のときに急激に信号が減る。

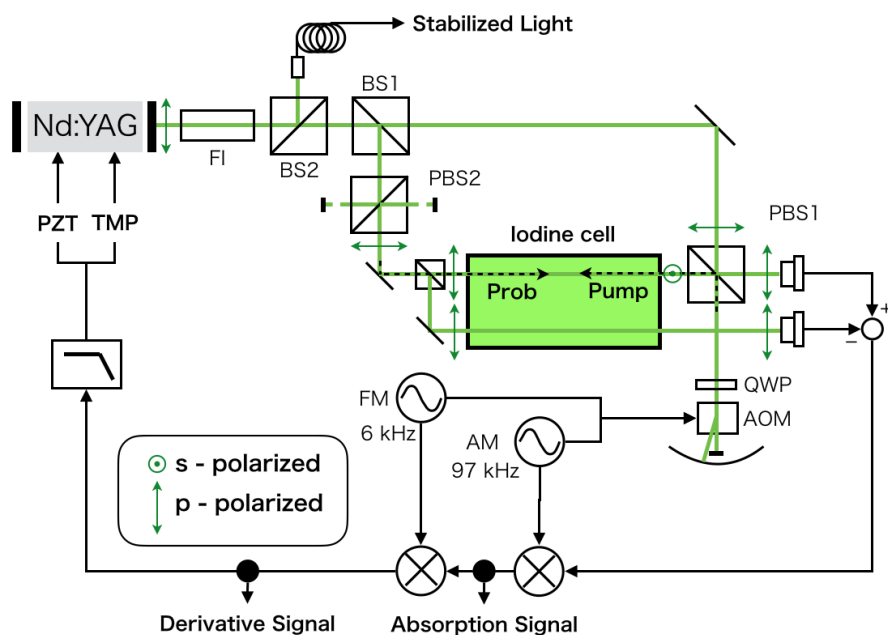


図. 2.9. 周波数安定化レーザの制御ループ。Probe ビームの透過光は、ヨウ素ガスの速度分布がマクスウェル分布であるために、ドップラーシフトして広がりをもった吸収線信号になってしまう。ドップラーシフトしていない信号を得るために Probe ビームの真正面から Pump ビームを入射して飽和吸収状態にする。つまり、ビームの周波数が吸収線の周波数と一致したときに Pump ビームでも吸収されるので、Probe ビームの信号は減る。このピーク吸収線信号を SN 良くするために強度の変調復調 (ロックインアンプ法) をし、フィードバックするために必要な微分信号を得るために位相の変調復調 (PDH 法) をしている。さらに、Pump ビームで飽和されていないガスの Probe ビームの透過光をつかうことで強度雑音を減らしている。そしてフィードバック信号はレーザの温度とピエゾに戻すことで Open Loop の Unity Gain Frequency を上げて、Open Loop Gain を大きくし、安定化の向上を図っている。

Pump ビームをつかってドップラーシフトしていない吸収線の信号が得られるが、SN は小さいので強度の変調とロックインアンプで SN を上げ、フィードバックするために必要な微分信号は位相の変調と復調で得

る。強度と位相の変調を Pump ビームにすることで、Probe ビームの周波数が吸収線のものと一致したときに、Probe ビームはそれぞれの変調が乗った信号となる。さらに、Pump ビームで飽和させていない、ガス中を透過しただけの Probe ビームで引き算をしておけば、Probe ビームの強度雑音を減らすことができる。

フィードバック信号は、レーザ内の結晶の温度とピエゾに戻している。温度は低周波、ピエゾは高周波で戻すために使っているが、温度だけでもどすよりもピエゾと一緒に戻すほうが、Unity Gain Frequency が大きくなり、Loop Gain も大きくすることができる。なお今回使用した周波数安定化ループは過去のものとは比べて変調周波数を大きくしたおかげで、Unity Gain Frequency を 50 Hz から 100 Hz にしている (図??)。



図. 2.10

制御

周波数安定化レーザの制御回路は図??の通りである。PZT と TMP に戻すためのフィルター回路が入っている。さらに、PXI と呼ばれる DAQ システムから各フィルタの ONOFF を制御するために、リレーを入れている。さらに、ロックが外れたときに吸収線の周波数を探すために TMP に信号を振るが、その信号をファンクションジェネレータから出力して、リレーの入れ替えで自動で再度ロックするように構築している。

歪み変換プログラム

第3章 地殻変動モニター

3.1 レーザ歪み計の利点

レーザ歪み計は歪み量を直接測ることができるため、地震計のような速度出力のセンサとくらべ、低周波に感度がある。

数 km の規模だと、およそ数 Hz 付近を境目にして高周波には感度がなくなっていく。これは2つの鏡の相対位置をみているレーザ歪み計にとって、高周波ほど信号が平均化されていくからである。

逆に数 Hz 以下の歪みの場合、数 km と同程度かそれ以上のスケールで起きており、実験室のスケール規模で起きるローカルな歪みではない。

3.2 低周波地殻歪みの補償

3.2.1 目的

干渉計の制御信号には地殻歪みによる大きく低周波なドリフトが存在し、アクチュエータのレンジを超えてしまうので、補償が必要である。とくに 0.1-0.3Hz に脈動と呼ばれる、海洋が岩盤を叩きつけることで生じる地面振動は、鏡のアクチュエータレンジを超えてしまう。またさらに $1e^{-4}Hz$ 程度の周波数には地球潮汐による地殻歪みがある。これは、鏡のアクチュエータでは制御できないことがわかっているので、上段に取り付けられる LVDT と呼ばれる 1mm 程度のアクチュエータで制御することが必要になる。

制御には、主干渉計信号から得られる差動信号と同相信号をつかう Feed-Back 制御、もしくは、地物干渉計から得られる両腕の歪み信号から得られる差動信号と同相信号をつかう FeedFoward 制御の2つを考えることができる。とくに低周波の地面振動は、重力波望遠鏡のターゲット周波数の信号の上にドリフトとして現れるので、予め FeedFoward 制御でドリフト制御をして主干渉計の制御と区別すると、煩雑にならなくて済む。

3.2.2 脈動

脈動は海洋が岩盤を叩きつけることで生じる 0.1-0.3 Hz 地面振動のことで、地中でもつねに観測することが出来る。

LIGO では脈動による腕の長さ変化を両脇に置いた地震計で計算して、FeedForward 制御している。これにより、1桁ほど脈動による腕の長さ変化を抑えることができています。

一方地物干渉計では、地震計よりも低周波側に感度があるので、脈動をさらに抑えることができると思われる。

3.2.3 地球潮汐

地球潮汐は月による潮汐が顕著であり、数 100 μ m 程度の P-P の歪みとして干渉計の腕の長さを変えてしまう。周期は大きく分けて半日と 1ヶ月が含まれる。半日は地球の自転によるもので、潮汐による歪みがもっとも大きい場所は、地球の中心と月を結んだときに 90 度に位置

3.2.4 補償システム

3.2.5 保証システム

3.3 まとめ

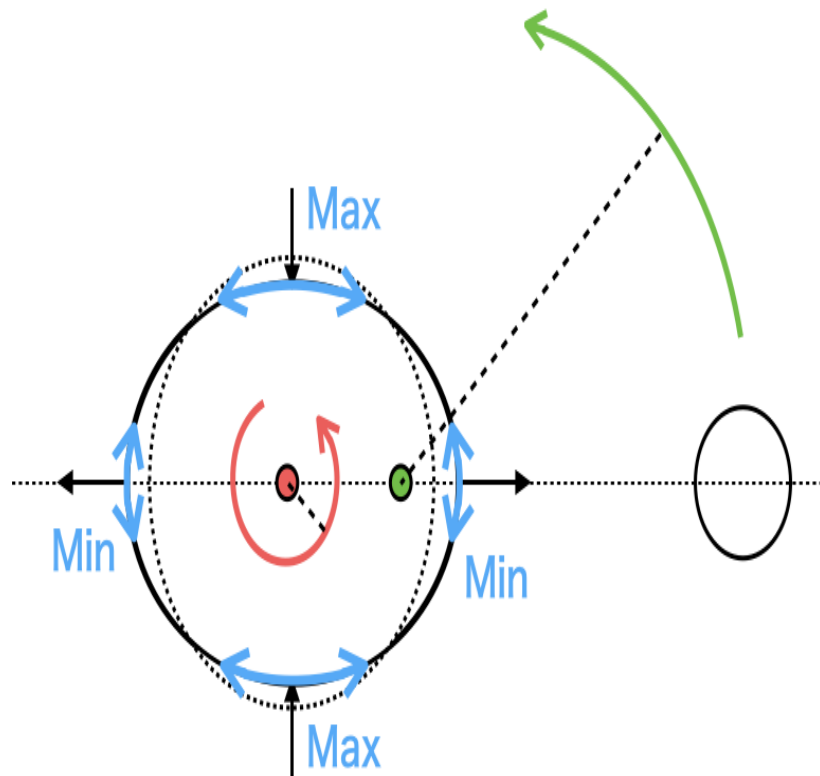


図. 3.1. 月による地球潮汐は、月からの引力と、月―地球の重心回転運動の地球の遠心力との合力として理解することができる。地球の歪み方は、月に対して90度の位置で最も強く歪み、0度と180度では最も弱く歪む。この歪みの状態で地球は自転するので、半日周期の変動となる。そして月は地球の周りを公転しているので、およそ一月程度の変動も現れる。

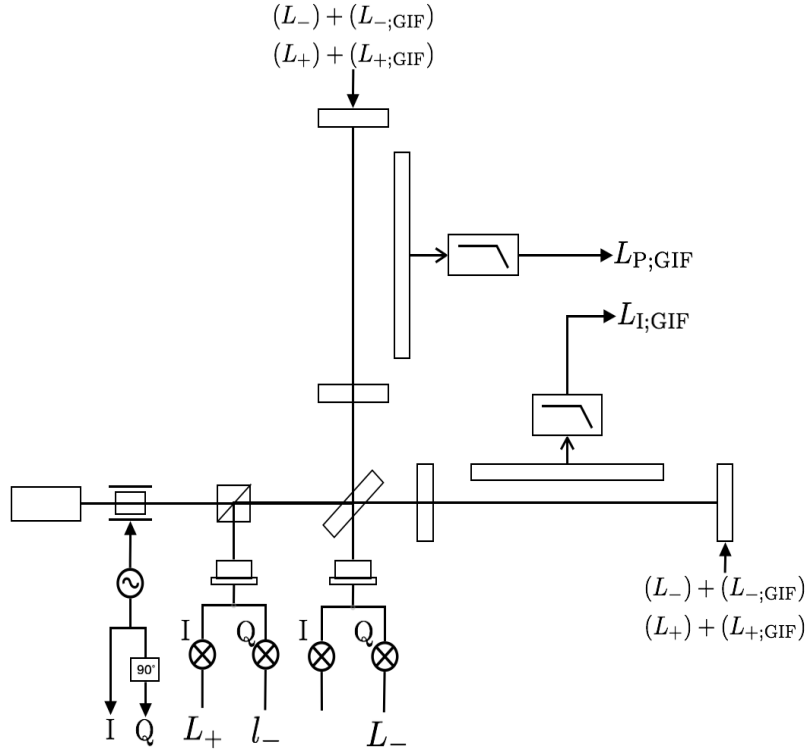
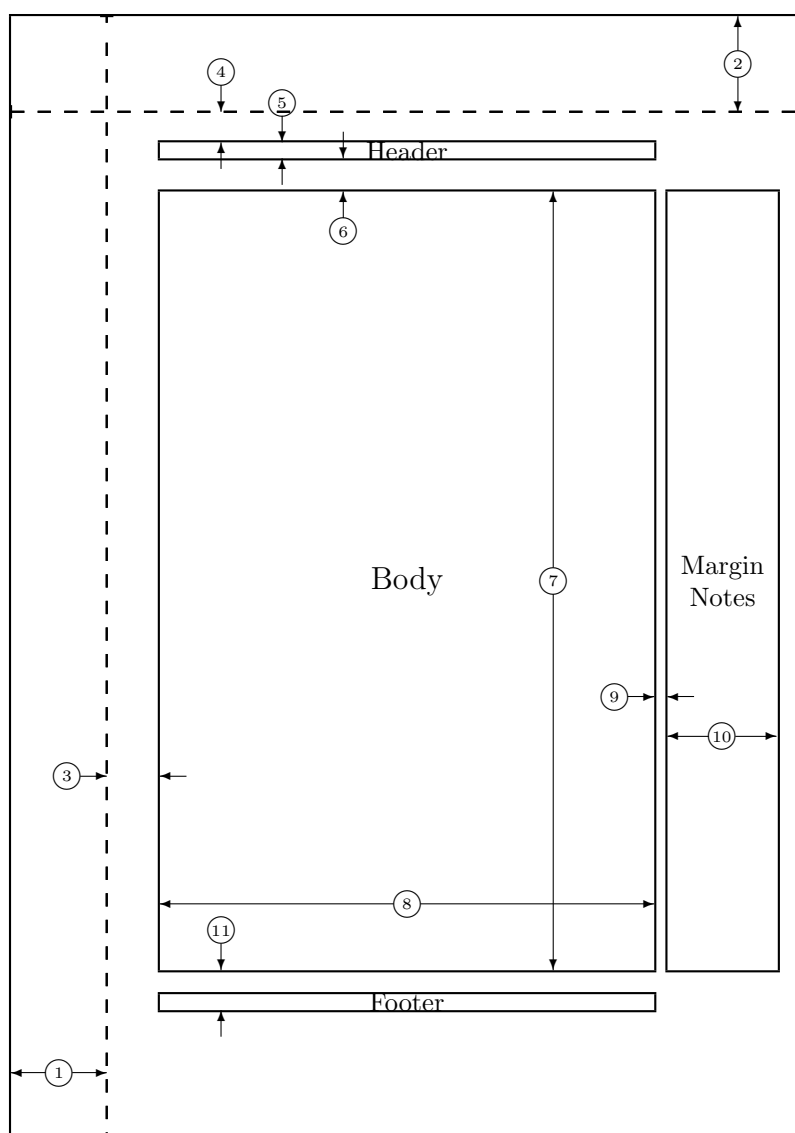


図. 3.2. 補償システムの全体。レーザ歪み計からの信号は、主干渉計からの信号と区別するために、添字に GIF と付けている。地殻変動による振子ドリフトを補償するために、主干渉計の制御信号をもちいた FeedBack 制御もしくは、地物干渉計のみ信号を用いた FeedFoward 制御を用意できる。主干渉計では、差動信号 L_- と同相信号 L_+ は、それぞれ Antisymmetric Port の光を Q Phase で復調し、Symmetric Port の光を I Phase で復調すれば取得することができる。一方、地物干渉計からは、両腕の歪み信号を差動信号と同相信号に計算し直して、適当なローパスフィルターをかけることで得られる。主干渉計と地物干渉計から得られる制御信号は、前者はロックしているときにしか得られないが、後者は常時得ることができる。そのため、後者の地物干渉計の FeedFoward 制御だと常時干渉計の地殻歪みによる主干渉計信号のドリフトを解消することができる。

第4章 Appendix

4.1 空間モードの変換計算



| | | | |
|----|-----------------------|----|----------------------------------|
| 1 | one inch + \hoffset | 2 | one inch + \voffset |
| 3 | \oddsidemargin = 40pt | 4 | \topmargin = 23pt |
| 5 | \headheight = 12pt | 6 | \headsep = 25pt |
| 7 | \textheight = 586pt | 8 | \textwidth = 372pt |
| 9 | \marginparsep = 10pt | 10 | \marginparwidth = 83pt |
| 11 | \footskip = 30pt | | \marginparpush = 7pt (not shown) |
| | \hoffset = 0pt | | \voffset = 0pt |
| | \paperwidth = 597pt | | \paperheight = 845pt |

関連図書