ggゼミ

Calibration Uncertainty for Advanced LIGO’s First and Second Observing Runs

arXiv : 1708.03023

2017/09/01

Takaai Yokozawa

キャリブレーションに関する基礎知識

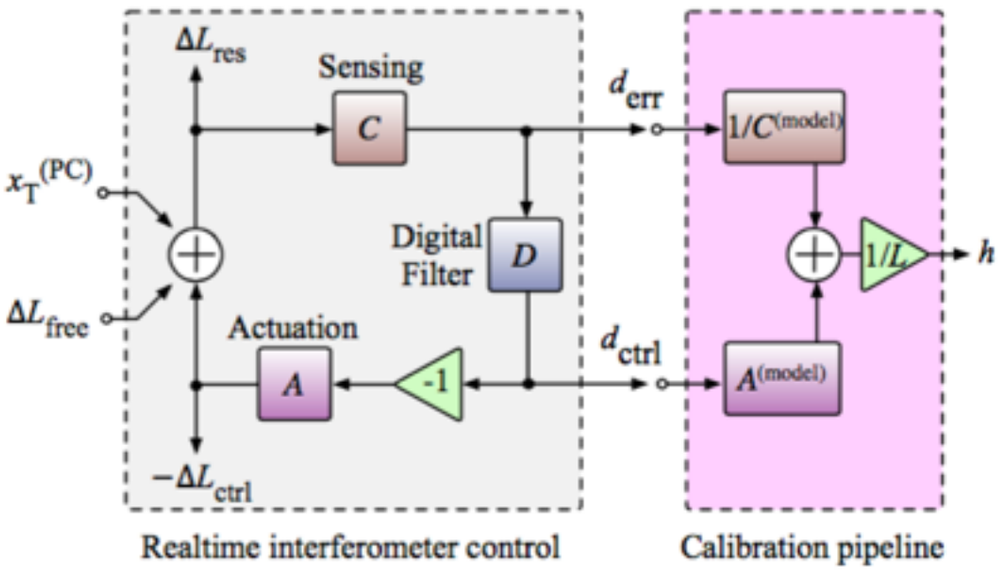
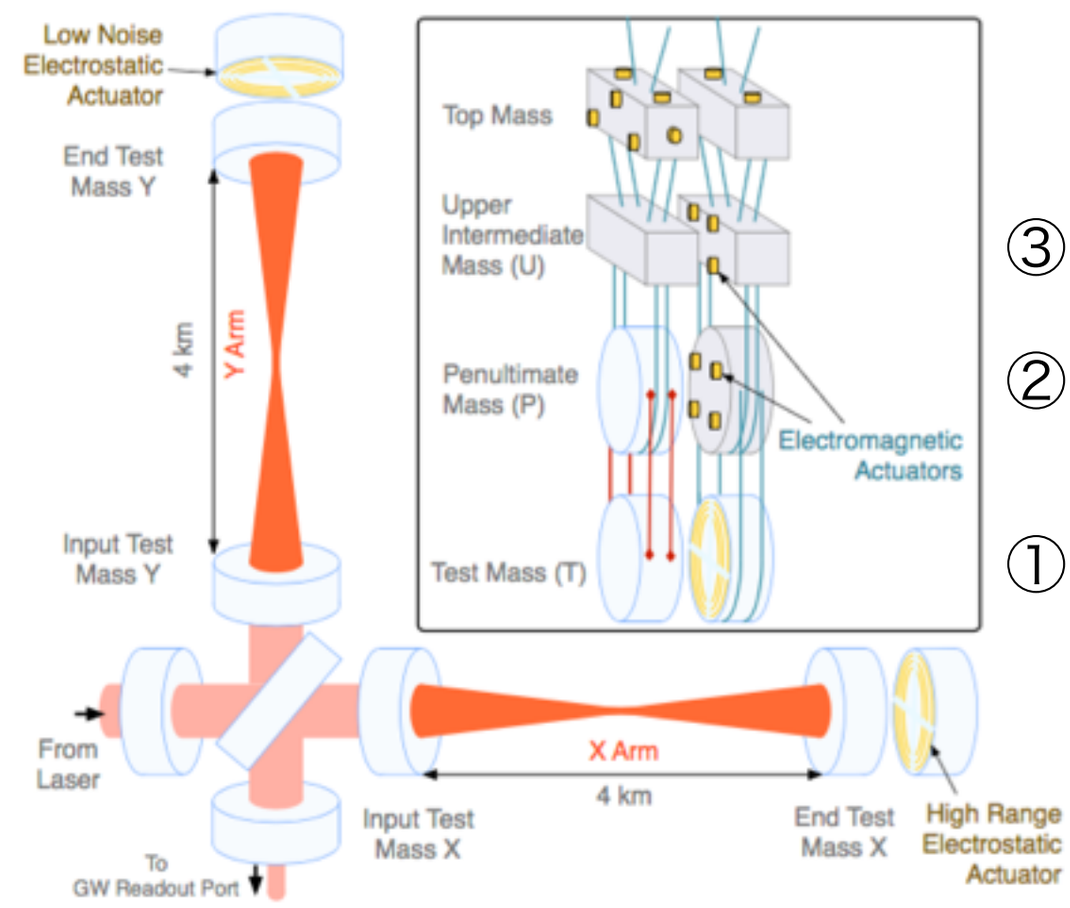


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$

C : Sensing function
検出器レスポンスやデータ取得など
D : Digital Filter
フィードバック信号を作成するフィルタ。近年は計算機制御をおこなっているのでこのdigital filterによる系統誤差は生じない。
A : Actuation function
鏡にフィードバック信号を返すときのレスポンス。LIGO(KAGRAでも)3段の振り子にフィードバックする。



キャリブレーション系統誤差

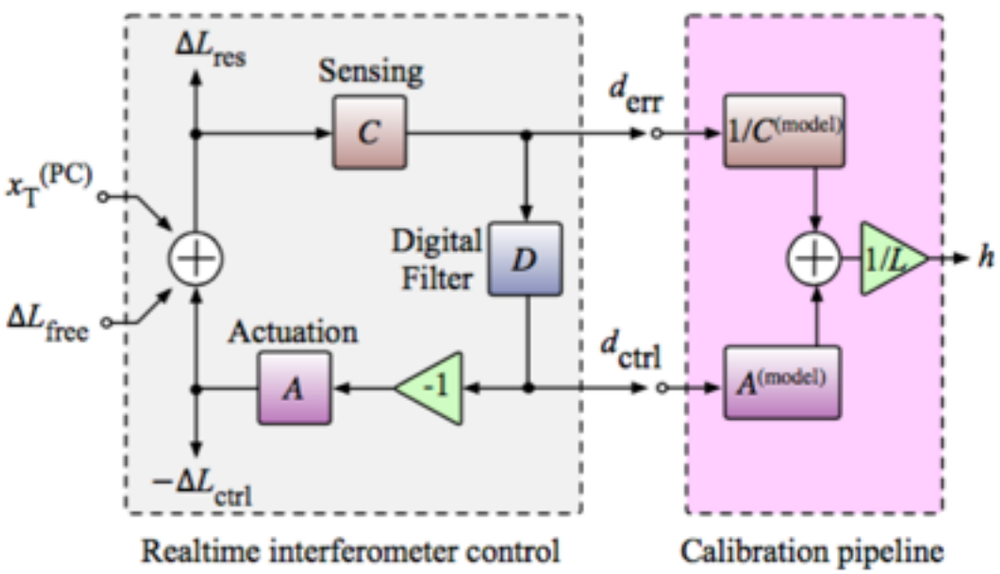


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$

$$hL = \Delta L_{\rm free} = \Delta L_{\rm res} - \Delta L_{\rm ctrl} = \frac{1}{C} * d_{\rm err} + A * d_{\rm ctrl} \;\; \Rightarrow \qquad h = \frac{1}{L}\left[\frac{1}{C^{(\rm model)}} * d_{\rm err} + A^{(\rm model)} * d_{\rm ctrl}\right], \qquad (3)$$

A, Cには周波数依存した時間変化があることがわかっている。
レスポンス関数(R)への誤差伝搬を考慮した系統誤差の評価を行ったというのが本論文の主旨

$$h = R * d_{\rm err} = \frac{1}{L}\left(\frac{1+G}{C}\right) d_{\rm err} \qquad (4)$$

$$\frac{\delta C(f,t)}{C^{(\rm model)}} = \frac{C(f,t)}{C^{(\rm model)}} - 1, \qquad \frac{\delta A(f,t)}{A^{(\rm model)}} = \frac{A(f,t)}{A^{(\rm model)}} - 1, \qquad (6)$$

$$\frac{\sigma_R(f,t)}{R^{(\rm model)}} = \frac{1}{R^{(\rm model)}} \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial C}\right)^2 \sigma_C^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2}$$
$$= \frac{C^{(\rm model)}}{1+G^{(\rm model)}} \sqrt{\frac{1}{C(f,t)^4}\sigma_C(f,t)^2 + D(f)^2 \sigma_A(f,t)^2}. \qquad (8)$$

ここから、AやCのモデルと系統誤差の測定の話に移っていく。

Sensing Model C

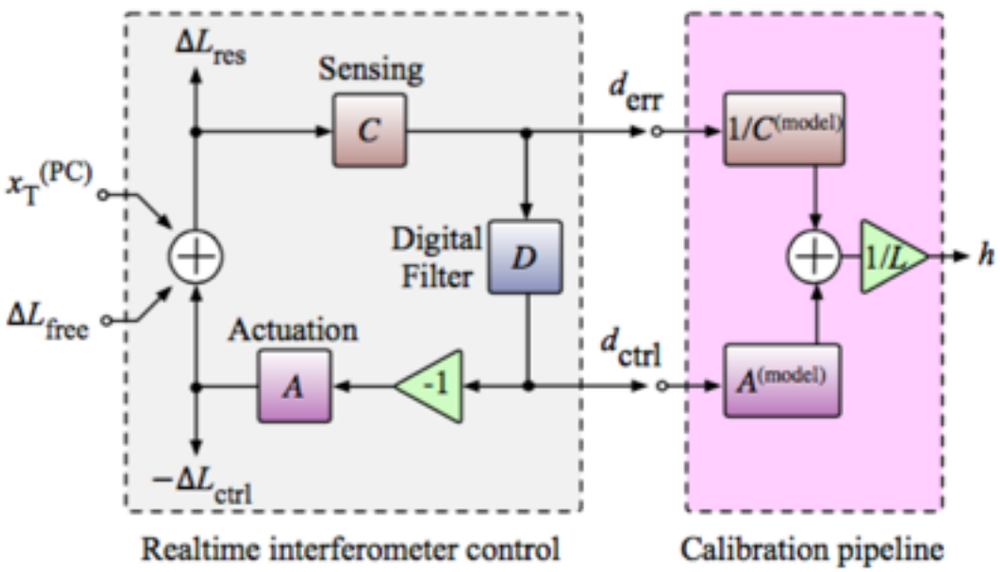


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$

Sensing function Cのモデルと測定するべきパラメータ

$$C^{(model)}(f, t, \vec{\lambda}_C) = \frac{\kappa_C(t)\, H_C}{1 + if/f_{CC}}\, C_R(f)\, e^{-2\pi i f \tau_c} \times \frac{f^2}{f^2 + f_S^2 - i f f_S Q_S^{-1}} \qquad (9)$$

Sensing Model C

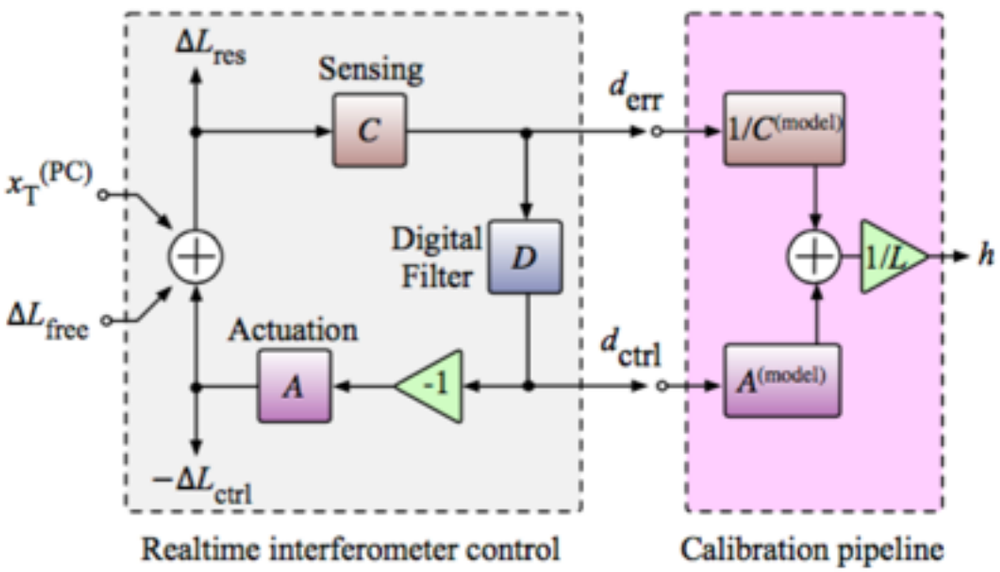


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$

Sensing function Cのモデルと測定するべきパラメータ

optical gainの時間変化(モデルは1)　optical gainの変換係数[count/m]　データ取得系のレスポンス関数+遅延

$$C^{(model)}(f,t,\vec{\lambda}_C) = \frac{\kappa_C(t) H_C}{1 + if/f_{CC}} C_R(f) e^{-2\pi i f \tau_C} \times \frac{f^2}{f^2 + f_S^2 - i f f_S Q_S^{-1}} \qquad (9)$$

cavityのレスポンス関数　detuningのレスポンス関数

$$\vec{\lambda}_C = \left(H_C \;\; f_{CC} \;\; \delta\tau_C \;\; f_S \;\; Q_S^{-1}\right)^T,$$

<=MCMCでモデルの値と誤差を評価している。

κc(t)は時間変化を測定できてリアルタイムキャリブレーションで考慮することができる。
fcc, fs, Qs-1は時間変化があり測定も行うことはしているが、モデルに入れるのが難しいため、その変化はsystemeatic errorに入れている。

$$\frac{\delta C(f,t)}{C^{(model)}} = \left(\frac{1 + if/f_{CC}}{1 + if/f_{CC}(t)}\right) \frac{\delta C^{GP}(f)}{C^{(model)}} e^{-2\pi i f \delta\tau_C}. \qquad (10)$$

GP : Gaussian process, 測定における統計誤差を超えて観測されたモデルとの相違を定量的評価した結果

Sensing Model C

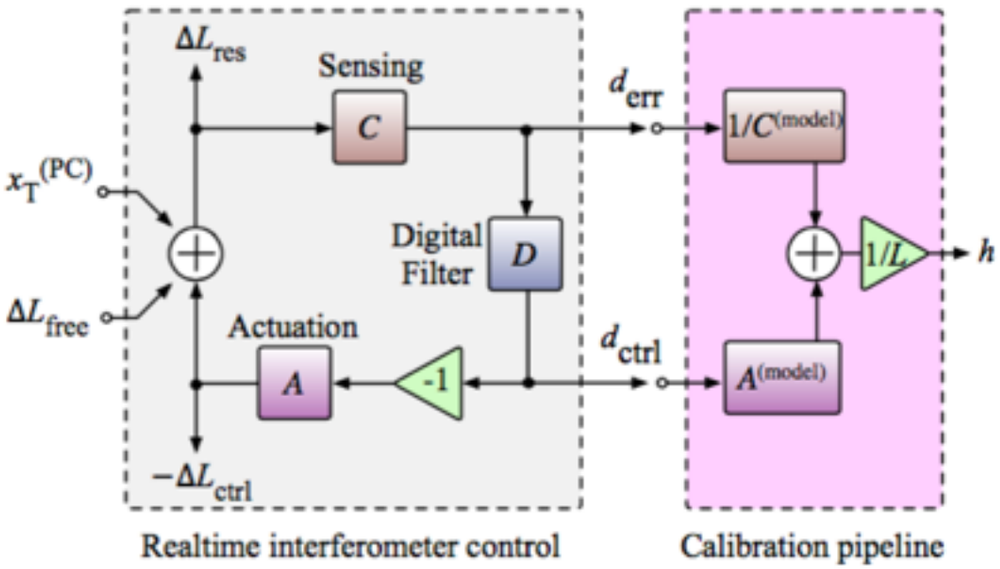


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$

Sensing function Cのモデルと測定するべきパラメータ

optical gainの時間変化(モデルは1)　optical gainの変換係数[　+遅延

$$C^{(model)}(f,t,\vec{\lambda}_C) = \frac{\kappa_C(t) H_C}{1 + if/f_{CC}} C_R(f) e^{-2\pi i f \tau_C} \times \frac{f^2}{f^2 + f_S^2 - i f f_S Q_S^{-1}} \qquad (9)$$

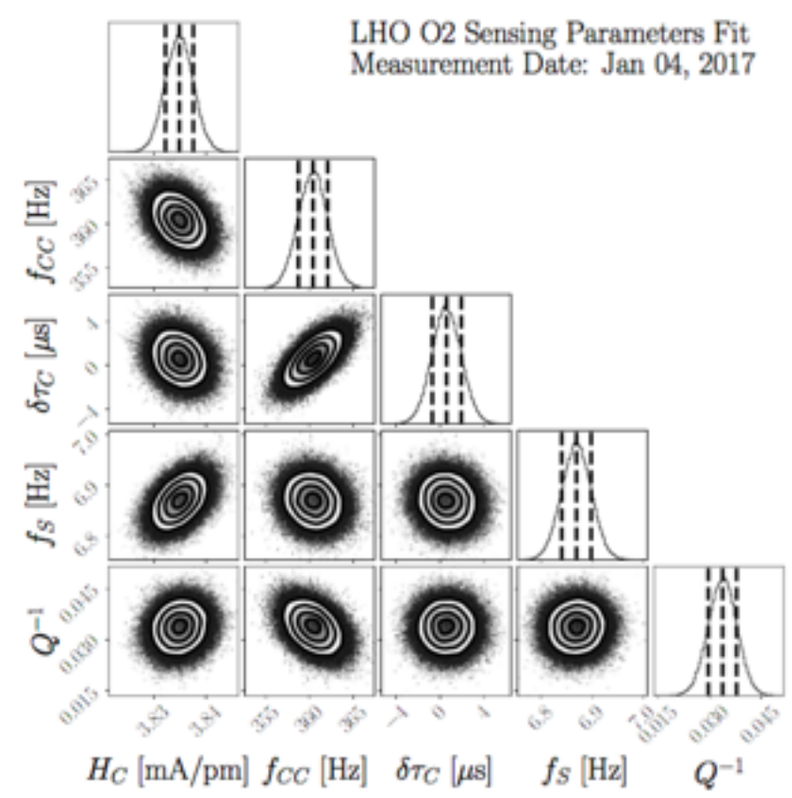
スポンス関数

$$\vec{\lambda}_C = \left(H_C \;\; f_{CC} \;\; \delta\tau_C \;\; f_S \;\; Q_S^{-1}\right)^T,$$ <=MCMCでモデルの値と誤差を

κc(t)は時間変化を測定できてリアルタイムキャリブレーション
fcc, fs, Qs-1は時間変化があり測定も行うことはしているが、モ
systemeatic errorに入れている。

$$\frac{\delta C(f,t)}{C^{(model)}} = \left(\frac{1 + if/f_{CC}}{1 + if/f_{CC}(t)}\right) \frac{\delta C^{GP}(f)}{C^{(model)}} e^{-2\pi i f \delta\tau_C}. \qquad (10)$$

GP : Gaussian pr
されたモデルとの



Sensing Model C

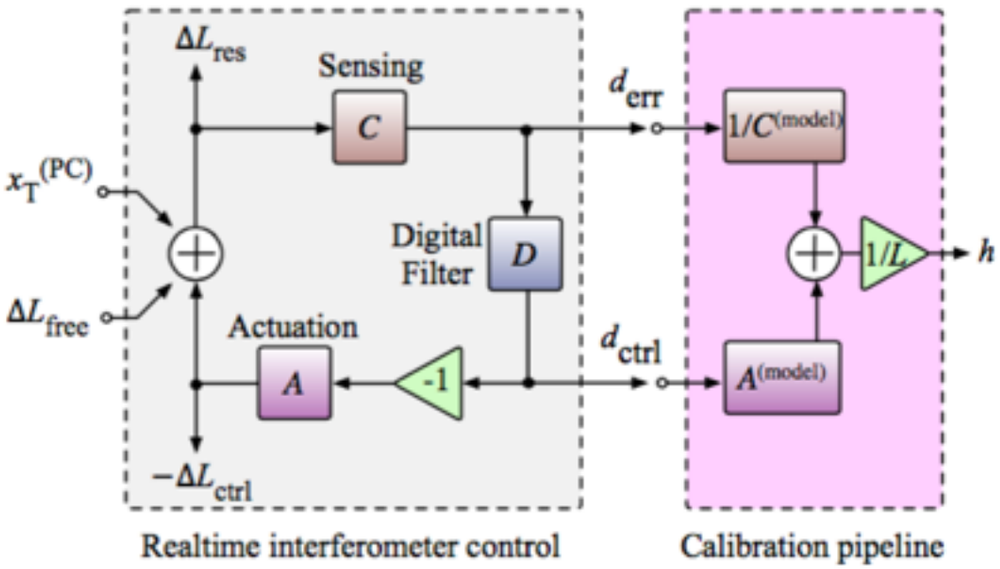


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$

Sensing function Cのモデルと測定するべきパラメータ

optical gainの時間変化(モデルは1)　optical gainの変換係数[count/m]　データ取得系のレスポンス関数+遅延

$$C^{(model)}(f,t,\vec{\lambda}_C) = \frac{\kappa_C(t) H_C}{1 + if/f_{CC}} C_R(f)\, e^{-2\pi i f \tau_C} \times \frac{f^2}{f^2 + f_S^2 - i f f_S Q_S^{-1}} \qquad (9)$$

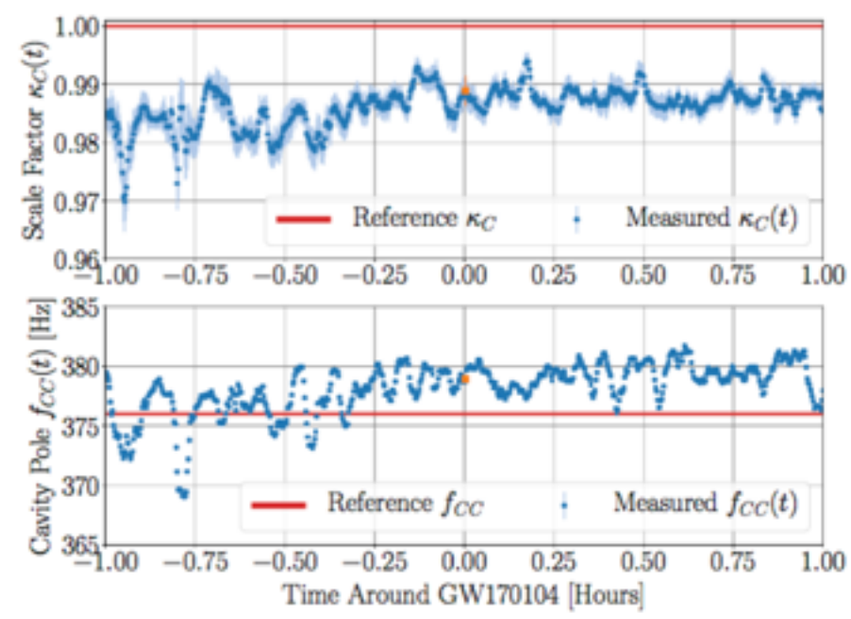
cavityのレスポンス関数　detuningのレスポンス関数

$$\vec{\lambda}_C = \left(H_C \;\; f_{CC} \;\; \delta\tau_C \;\; f_S \;\; Q_S^{-1}\right)^T,$$ <=MCMCでモデルの値

κc(t)は時間変化を測定できてリアルタイムキャリブレー
fcc, fs, Qs-1は時間変化があり測定も行うことはしてい
systemeatic errorに入れている。

$$\frac{\delta C(f,t)}{C^{(model)}} = \left(\frac{1 + if/f_{CC}}{1 + if/f_{CC}(t)}\right) \frac{\delta C^{GP}(f)}{C^{(model)}} e^{-2\pi i f \delta\tau_C}. \qquad (10)$$

GP : Gaus
されたモデ



変化は

て観測

Actuation Model A

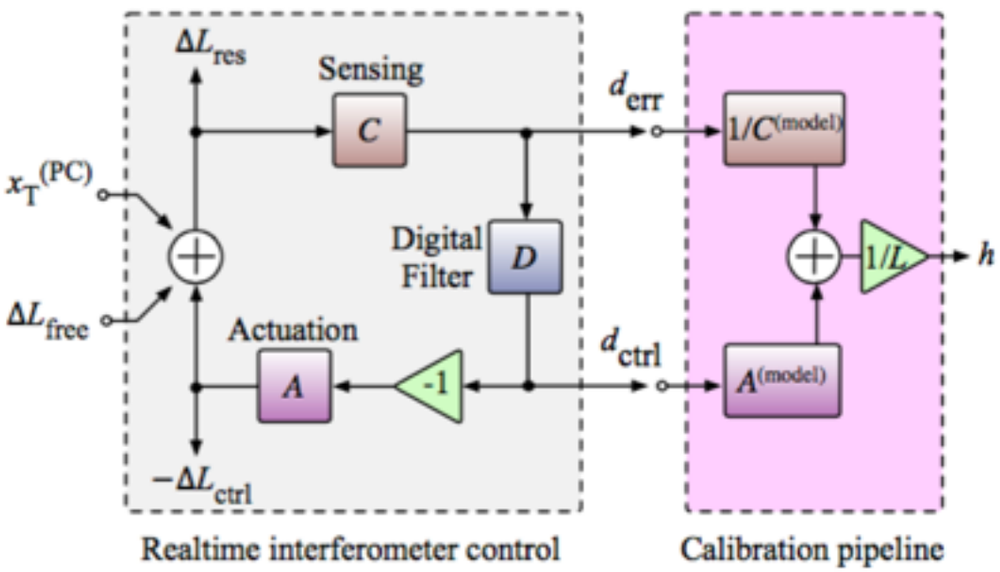
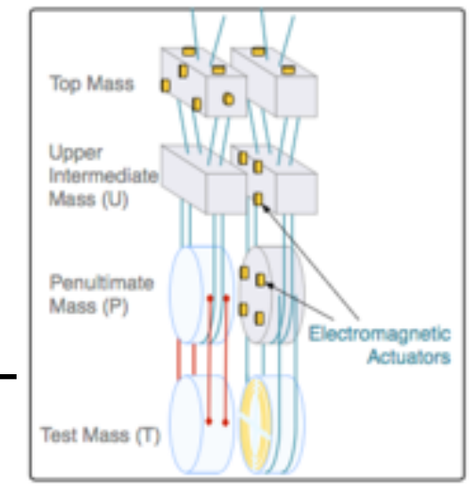


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$



Actuation function Aのモデルと測定するべきパラメータ

$$A^{(\mathrm{model})}(f,t,\vec{\lambda}_A) = \Big[\kappa_T(t)\,F_T(f)\,H_T\,A_T(f) \;+\; \kappa_{PU}(t)\Big(F_P(f)\,H_P\,A_P(f) \;+\; F_U(f)\,H_U\,A_U(f)\Big)\Big]\,e^{-2\pi i f \tau_A} \quad (11)$$

Actuation Model A

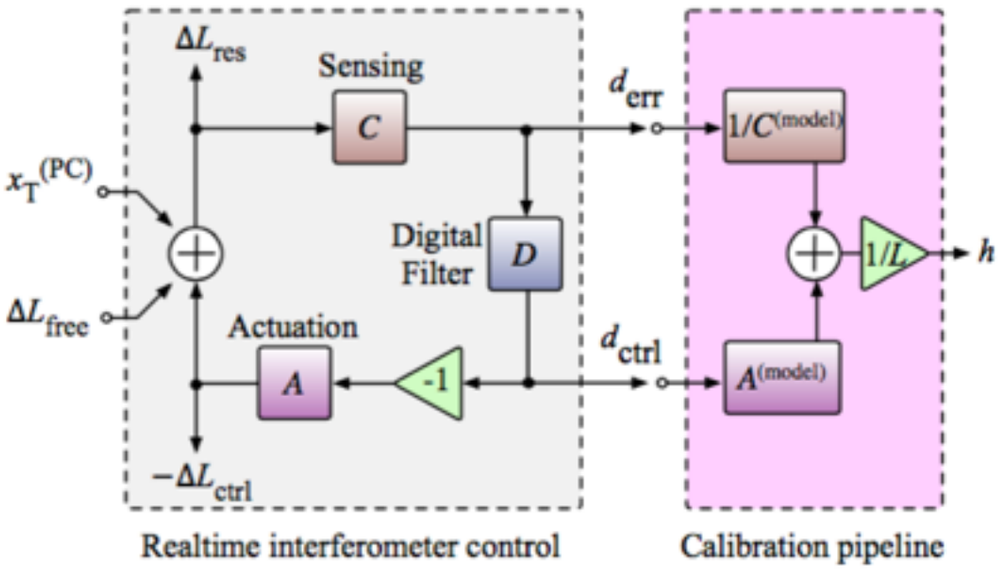
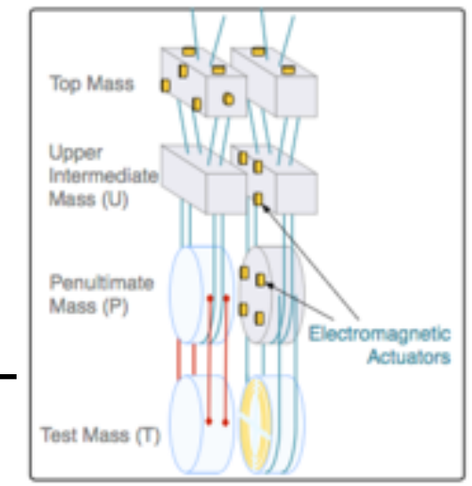


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$



Actuation function Aのモデルと測定するべきパラメータ

actuation efficiencyの時間変化(モデルは1)

digital distribution filter(?)

Actuation効率[V/count]*[A/V]*[N/A]

$$A^{(model)}(f,t,\vec{\lambda}_A) = \left[\kappa_T(t) F_T(f) H_T A_T(f) + \kappa_{PU}(t)\left(F_P(f) H_P A_P(f) + F_U(f) H_U A_U(f)\right)\right] e^{-2\pi i f \tau_A} \qquad (11)$$

Actuatorのレスポンス関数+遅延

$\vec{\lambda}_A = \left(H_U \;\; \delta\tau_U \;\; H_P \;\; \delta\tau_P \;\; H_T \;\; \delta\tau_T\right)^T.$ <=MCMCでモデルの値と誤差を評価している。

κT(t), κPU(t)は時間変化を測定できてリアルタイムキャリブレーションで考慮することができる。
その他、モデルで追いきれていない部分をsystemeatic errorに入れている。

$$\frac{\delta A_i(f)}{A_i^{(\mathrm{model})}} = \frac{\delta A_i^{GP}(f)}{A_i^{(\mathrm{model})}} e^{-2\pi i f \delta\tau_i} \qquad (12)$$

モデルパラメータと系統誤差の測定

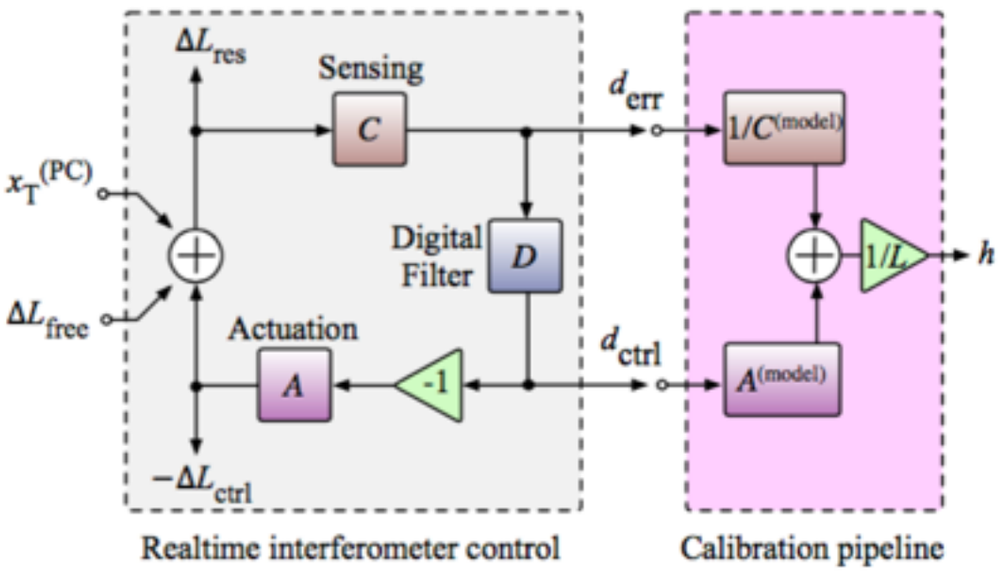
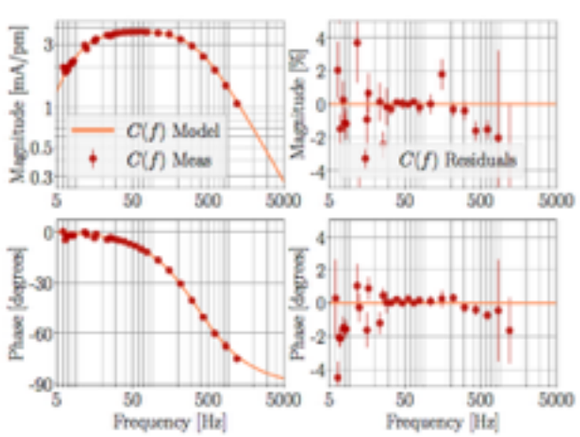


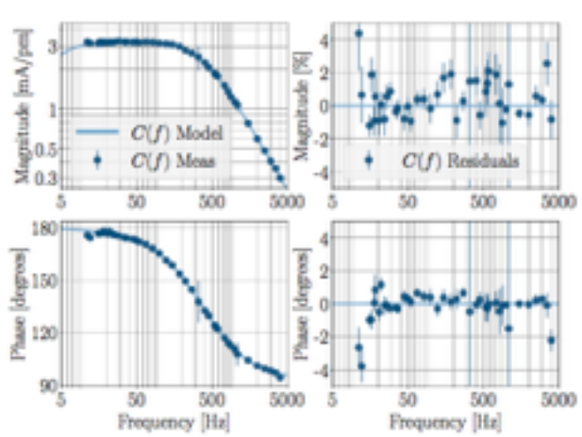
Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

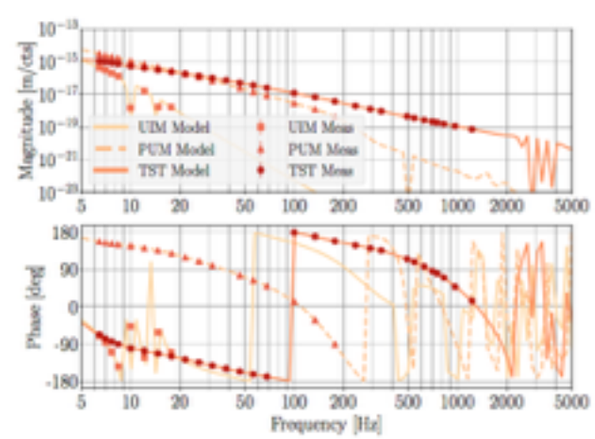
$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$

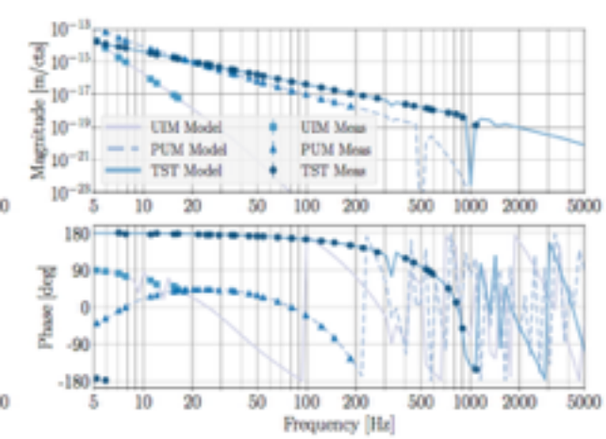
Photon calibratorを用いてx_T(PC)を注入し、d_errで観測されたレスポンスでパラメータを測定していく。
(以前の測定では、コントロール信号にも信号を注入してレスポンスを測定していたが、今回の論文ではその部分がなくなっている。測定が不必要になったのか、省略したのかは今度聞いてみます。)

Photon calibratorによるabsolute laser powerの系統誤差、excitationとreadoutのコヒーレントパラメータを含めて丁寧に測定と測定誤差を評価している。まだ読み切れていませんが、かなりマニアックな領域になってきますのでここでの説明は省略させてください。。。









モデルパラメータと系統誤差の測定

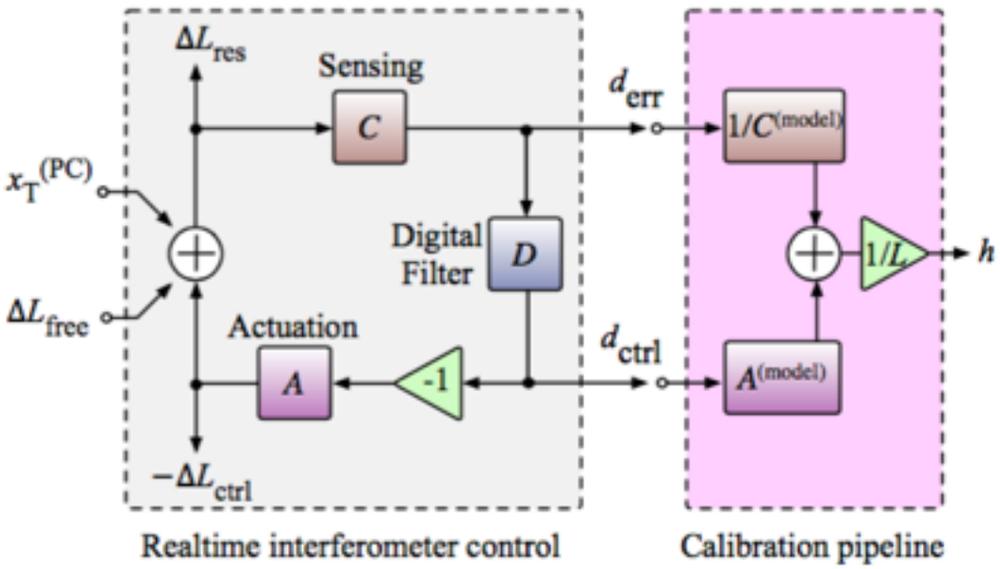
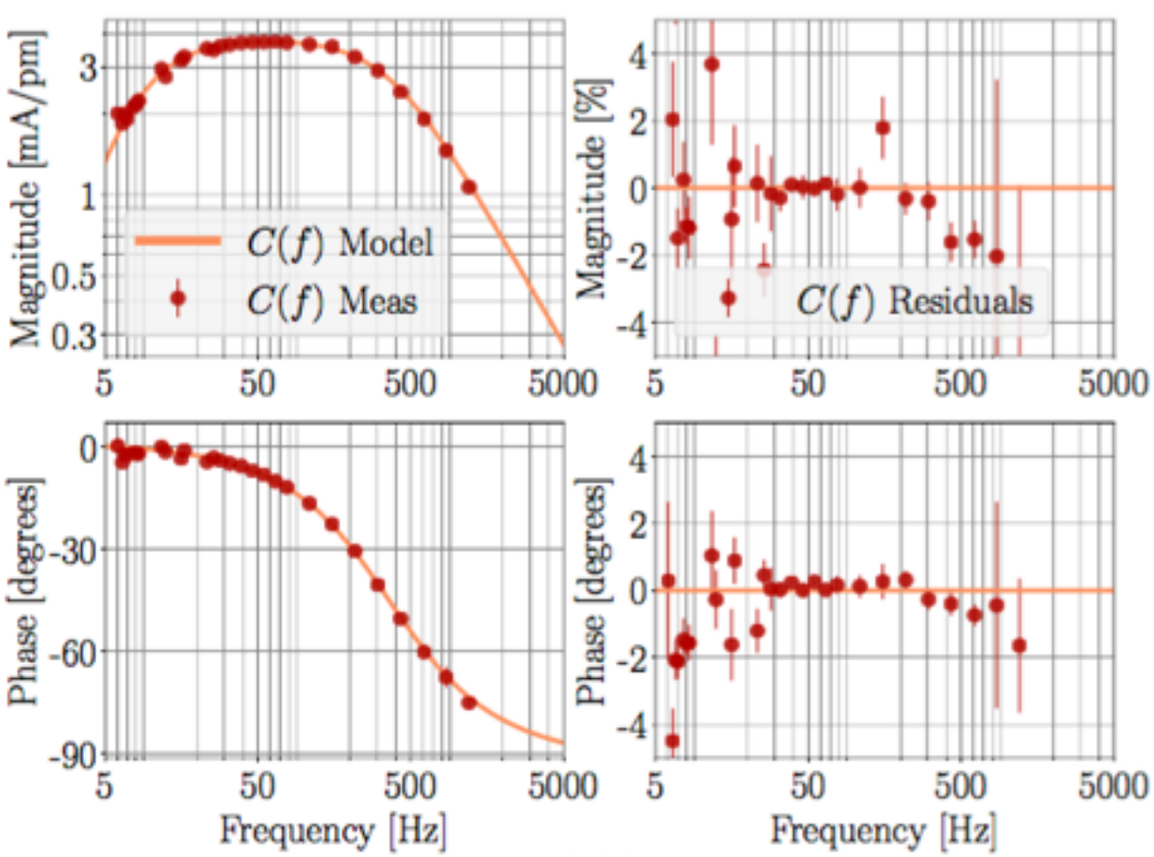
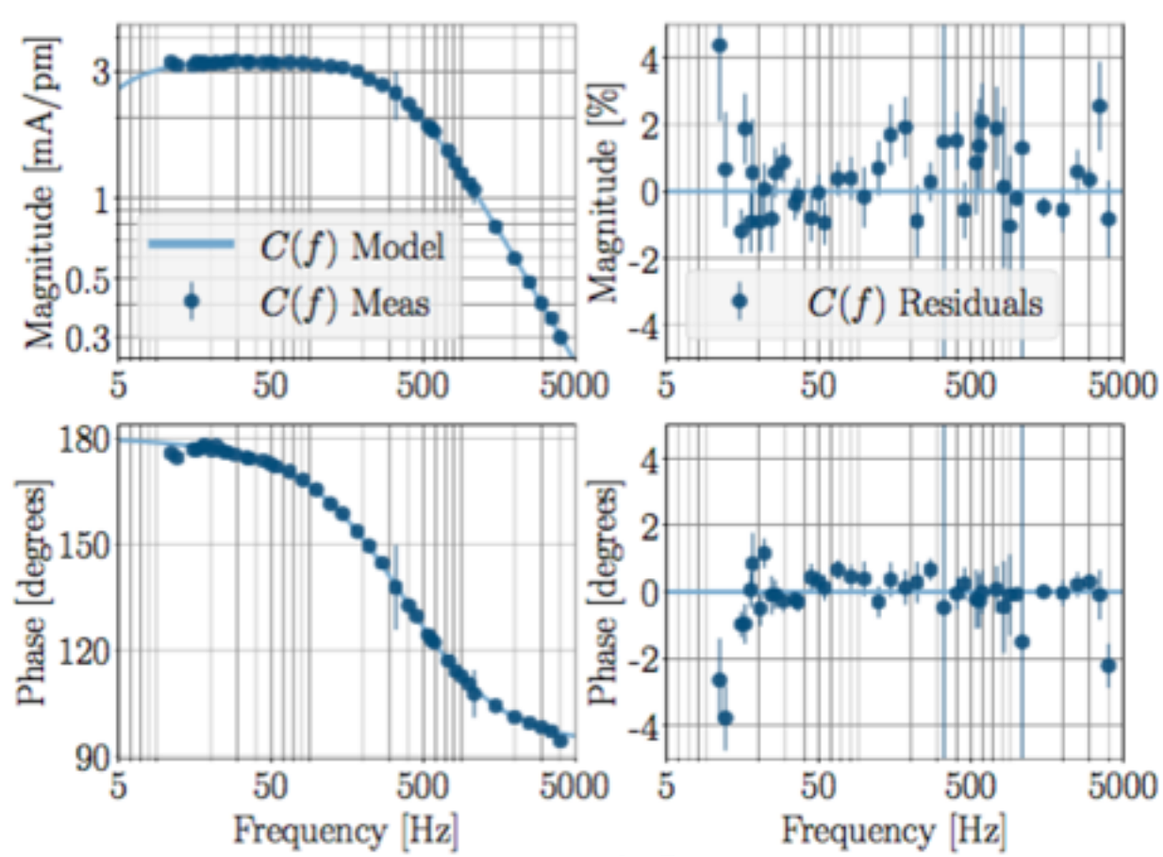


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$



H1



L1

モデルパラメータと系統誤差の測定

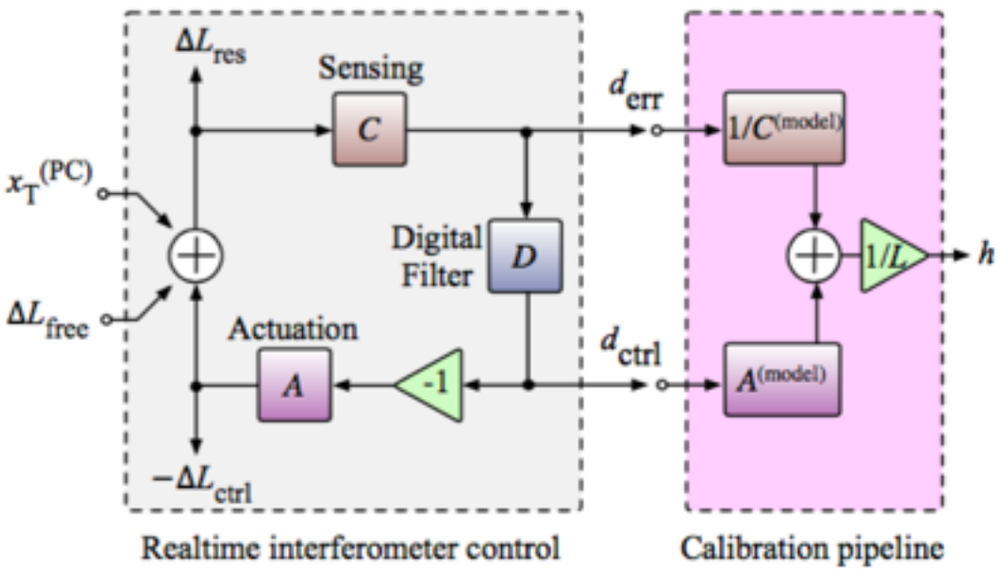
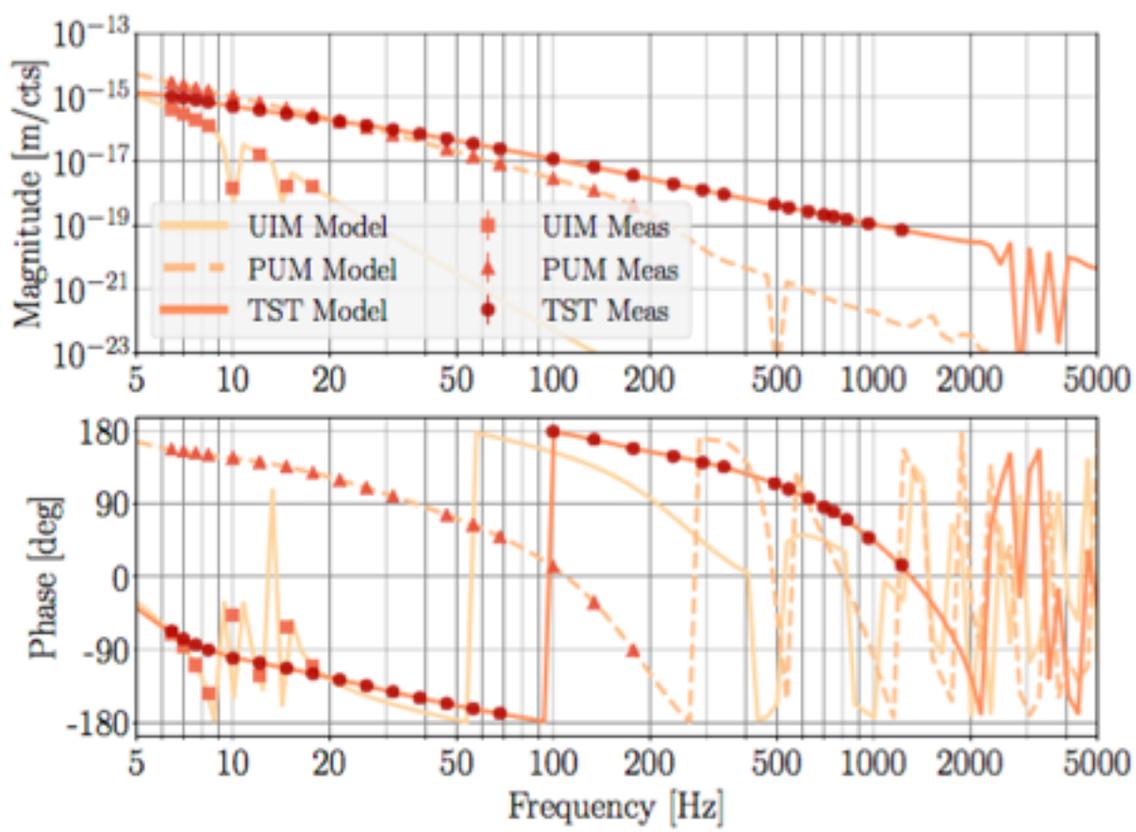
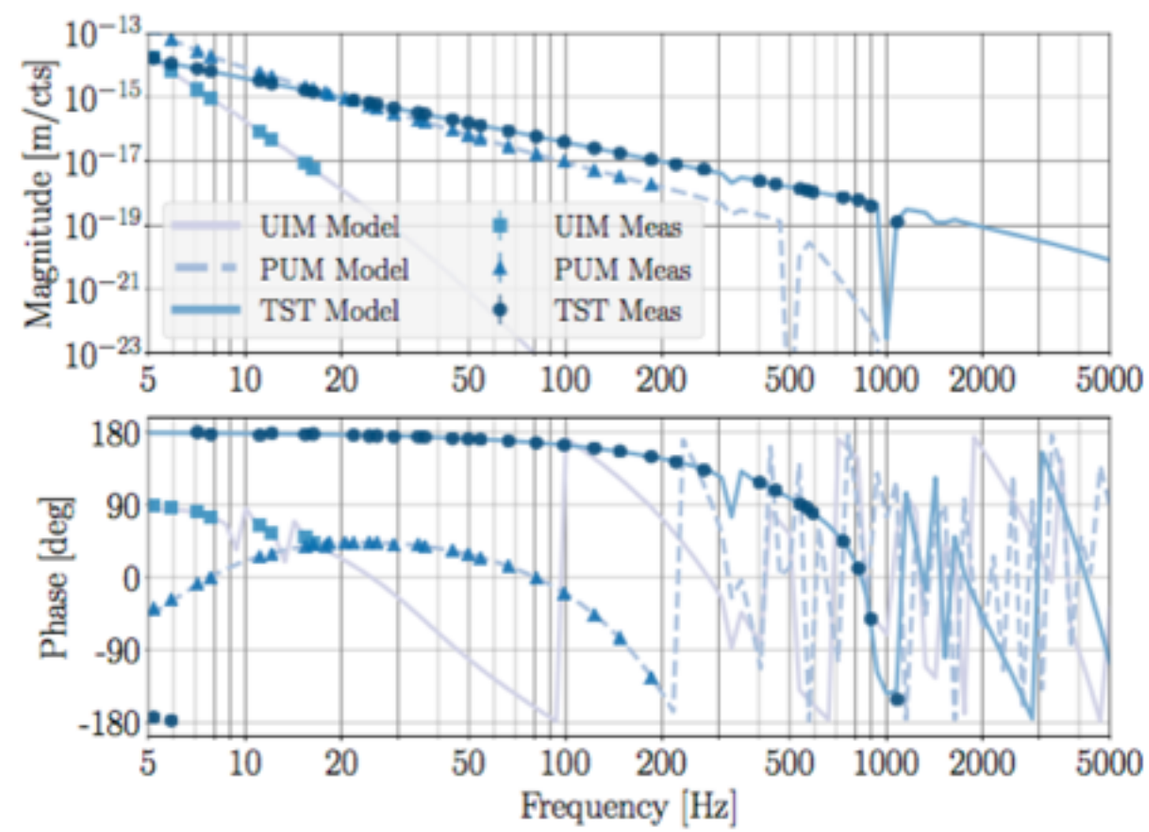


Fig.2
DARM Control Loop and Calibration Procedure
DARM : differential arm length
ΔL_free : 重力波andノイズ

$$\Delta L_{free} = \Delta L_x - \Delta L_y \equiv hL, \qquad (1)$$



H1



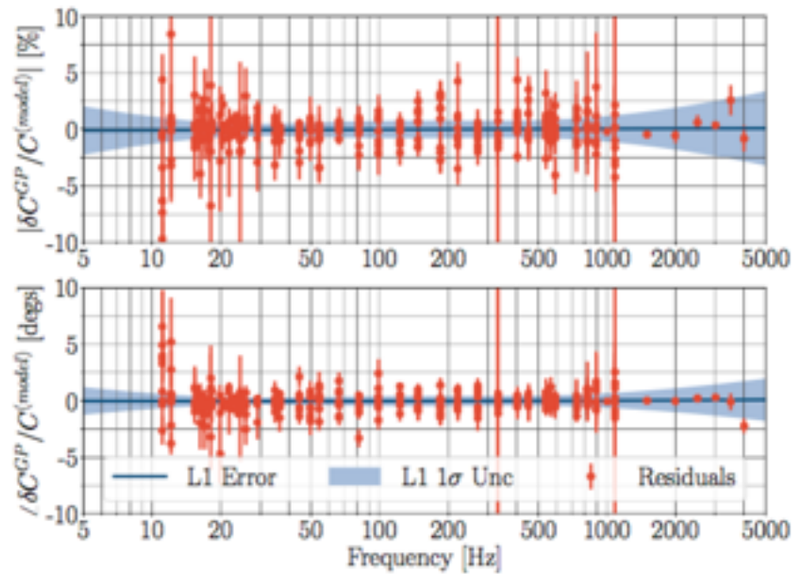
L1

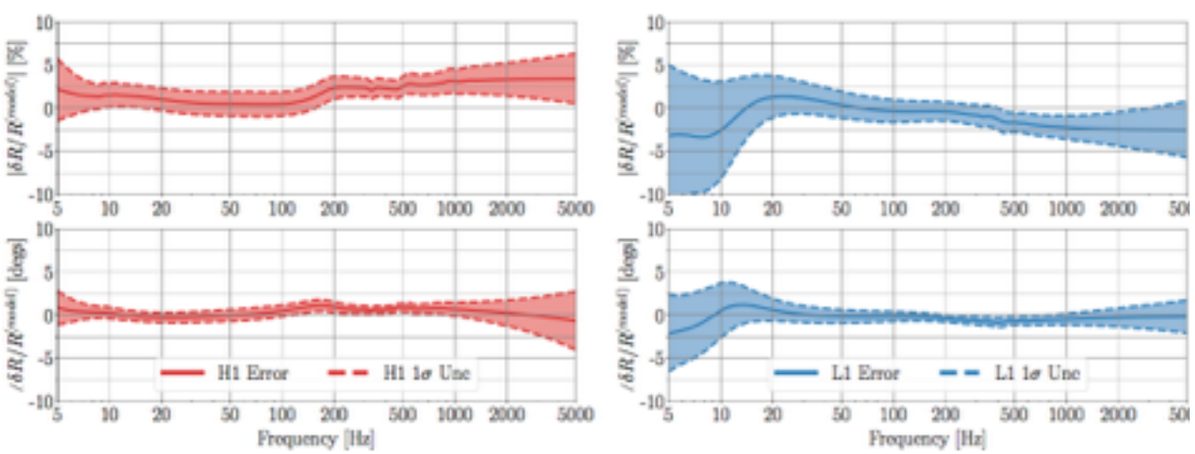
系統誤差の周波数依存性

$$h = R * d_{\mathrm{err}} = \frac{1}{L}\left(\frac{1+G}{C}\right) d_{\mathrm{err}} \qquad (4)$$

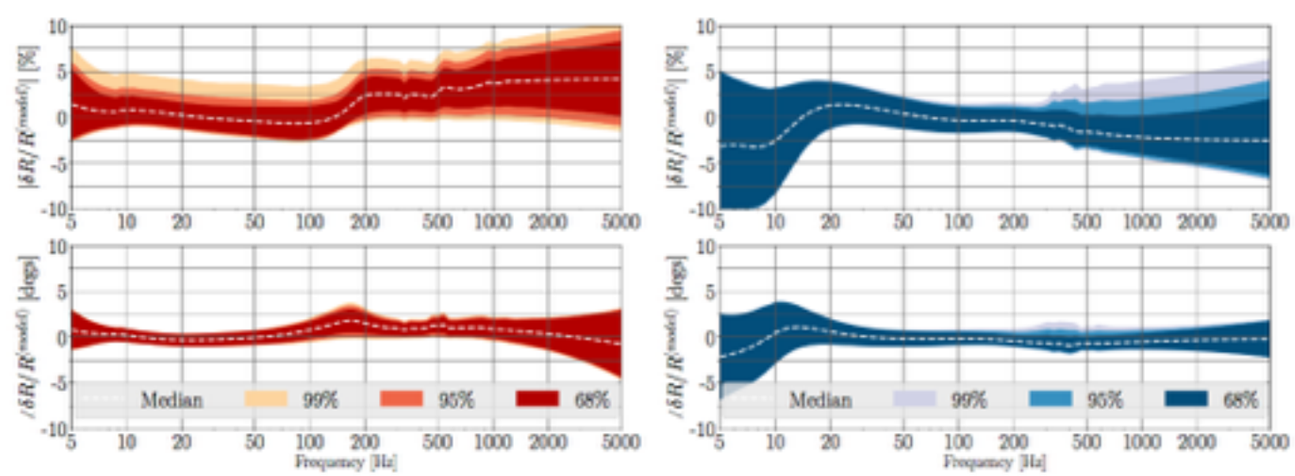
レスポンス関数Rを何度も測定し、そのresidualと求めた1σ系統誤差を評価している。

1. The sensing DARM model parameters:
$$\vec{\lambda}_C = \left\{H_C, f_{CC}, \delta\tau_C, f_S, Q_S^{-1}\right\}$$
2. The actuation DARM model parameters:
$$\vec{\lambda}_A = \{H_U, \delta\tau_U, H_P, \delta\tau_P, H_T, \delta\tau_T\}$$
3. The sensing Gaussian process systematic error:
$$\delta C^{GP}(f)$$
4. The actuation Gaussian process systematic errors:
$$\delta A_U^{GP}(f), \delta A_P^{GP}(f), \delta A_T^{GP}(f)$$
5. The time dependent parameters:
$$\kappa_T(t), \kappa_{PU}(t), \kappa_C(t), f_{CC}(t)$$
6. The photon calibrator radiation pressure strength:
$$H_{PCAL}$$





GW170104時のエラー



O2のエラー