

レーザー歪み計を用いた基線長安定化制御の提案

三代浩世希

2019 年 3 月 8 日

概要

目次

1	GIF をつかった能動防振	1
1.1	能動防振	1
1.2	LIGO の能動防振	2
1.3	KAGRA の能動防振	3
付録 A	2 自由度制御	4
付録 B	式置き場	4

1 GIF をつかった能動防振

1.1 能動防振

能動防振システムの性能は以下の 3 つで評価できる

1. **外乱抑制性能** ステージへの地面振動の流入をどれぐら抑えられるか
2. **即応性能** RMS をどれぐらい小さく抑えられるか
3. **目標値追従性能** 干渉計からの制御信号にどれぐらい追従させられるか

ダンピング制御のような DC に FeedBack ゲインをもつ必要がない制御の場合、FeedBack 制御だけで外乱抑制と即応性を向上するように最適なパラメータを設計できるが、目標値への追従性能は返って悪くなる。防振装置はテストマスのダンピング制御だけではなく位置制御も必要であるので、2 自由度制御 [1] とよばれる、目標追従性能も同時に向上させることのできる制御をもちいなければならない。

1.2 LIGO の能動防振

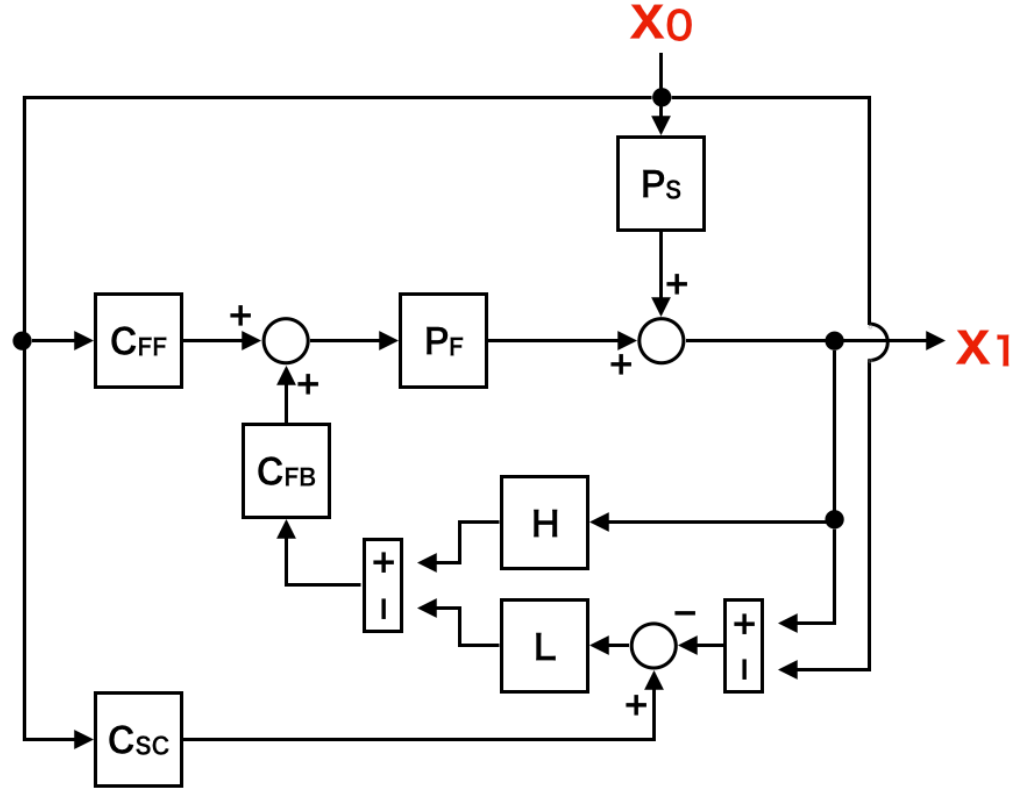


図1 Preisolator で用いている能動防振のブロック図。ここで、 P_s は地面振動の変位 x_0 からステージの変位 x_1 への伝達関数である。 C_{fb} , C_{ff} , C_{sc} はそれぞれ feedback、feedforward、sensor correction の制御フィルターである。さらに H , L は super sensor のための相補フィルターであり、それぞれ慣性センサーのためのハイパスフィルターと変位センサーのためのローパスフィルターである。また N_{ff} , N_{sc} , N_H , N_L はそれぞれのセンサーのノイズとなっている。そして G はループゲインをあらわしており $G = C_{fb}P_f$ という関係であり、このときの P_f はステージのアクチュエータからステージの変位への伝達関数である。

Preisolator の目的はステージの変位を慣性系に対して静止させることであるため、FeedBack で用いるセンサーには慣性センサーを用いなければならない。しかし一般的に慣性センサーは低周波でノイズが大きい。そのため DC でループゲインをもたせることができず、ダンピングをするためにしか使うことができない (Inertial Damping)。

一方で共振器長制御のためにステージの位置制御をしなければならないため、妥協案として低周波ではローカルな変位センサーをつかって低周波では地面にロックしている。これは比較的小さいスケールの腕共振器であれば、ITM と ETM は同相で地面に揺らされて、低周波地面振動は同相雑音として除去されるので問題とならない。しかし km スケールの腕共振器では、RMS の大きな脈動の帯域では、逆相成分である基線長伸縮は同相成分とくらべて 1/4 程度にしか低減できない。このような問題を解決するために LIGO では sensor correction と呼ばれる feed forward 制御を用いて脈動の補償をしている [2]。

図1に示した LIGO の能動防振のブロック図において、ステージの変位 x_1 を地面振動 x_0 と目標値 r で表すと式 (1) の通りである。

$$x_1 = \frac{1}{1+G} \left[(P_s + P_f C_{ff}) x_0 \right] + \frac{G}{1+G} \left[L(1 + C_{sc}) x_0 \right] \quad (1)$$

ここで外乱抑制を高めるためにゲインを十分におおきくすると式 (2) になる。式 (3) のとおり feed back のみの場合はステージの変位 x_1 はローパスフィルター L に沿って地面振動 x_0 を流入させるが、sensor correction を加えて適当な C_{sc} と目標値 r を選べばゼロにすることが

できる。

$$\lim_{G \rightarrow \infty} x_1 = L(x_0 + C_{sc}r) \quad (2)$$

$$= \begin{cases} Lx_0 & (C_{sc} = 0) \\ 0 & (-C_{sc}r = x_0) \end{cases} \quad (3)$$

LIGO の場合、目標値 r に、地面に設置した地震計の信号を入れている。

さらに高周波帯域のステージの要求値を満たすために、sensor correction とは別の feed forward のパスを用意している。式 (4) にゲインを小さくした場合のステージの変位 x_1 を示す。このとき、式 (5) のとおり、feed forward がない場合は地面振動でステージの変位は制限されるが、sensor correction と同様に、適当な C_{ff} と r を選べば、地面振動からの寄与を減らすことができる。

$$\lim_{G \rightarrow 0} x_1 = P_s x_0 + P_f C_{ff} r \quad (4)$$

$$= \begin{cases} P_s x_0 & (C_{ff} = 0) \\ 0 & (-P_f C_{ff} r = P_s x_0) \end{cases} \quad (5)$$

実際の目標値には、sensor correction と同様に、地震計出力を入れている。2つの feed forward に用いる地震計には

1.3 KAGRA の能動防振

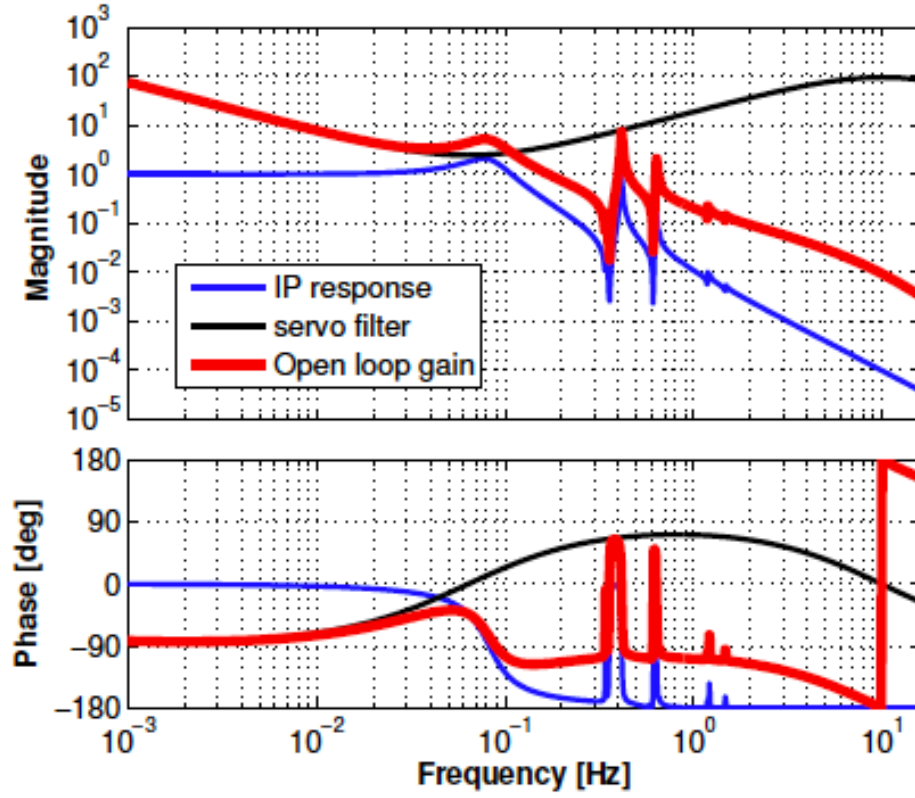


図 2

付録 A 2 自由度制御

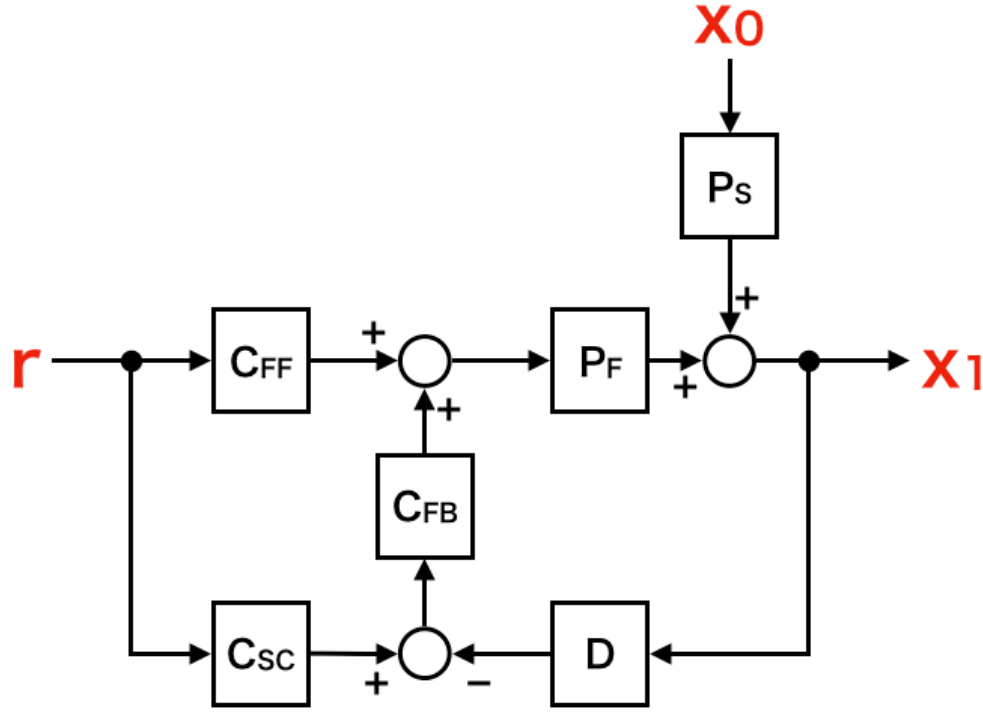


図 3

能動防振でつかわれている 2 自由度制御を説明するよりも先に、2 自由度制御のひな形を用いて、2 自由度制御の利点である、外乱抑制性能と目標追従性能の両方を向上できることを示しておかなければならない。まずステージの変位 x_1 を目標値 r と外乱 x_0 で表すと式 (6) のとおりになる。

$$x_1 = \frac{1}{1+G} \left[P_s x_0 + P_f C_{ff} r \right] + \frac{G}{1+G} \left[\frac{C_{sc}}{D} \right] r \quad (6)$$

もし $C_{ff} = 1$ かつ $C_{sc} = 0$ であれば一般的な FeedBack 制御になるが、2 自由度制御では式 (6) の第 2 項が加わるおかげで外乱抑制と目的値追従を両方とも良くすることができる。それはつまり外乱抑制をよくするために G を大きくとると、

$$\lim_{G \rightarrow \infty} x_1 = \frac{C_{sc}}{D} r \quad (7)$$

となり、適当な C_{sc} を選べば、 $x_1 = r$ となって、制御後の値 x_1 を目標値 r に一致させることができるためである。

付録 B 式置き場

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{1}{1+G} P_s d_0 \\ &+ \frac{G}{1+G} \left[L(1 - C_{sc}) - \frac{C_{ff} + C_{gif}}{C_{fb}} \right] d_0 \\ &- \frac{G}{1+G} \left[H N_H + L N_{sc} + L N_L + \frac{C_{ff}}{C_{fb}} N_{ff} + \frac{C_{gif}}{C_{fb}} N_{gif} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \lim_{G \rightarrow \infty} \langle |d_1|^2 \rangle &= \left\langle \left| \left[L(1 - C_{sc}) - \frac{C_{ff} + C_{gif}}{C_{fb}} \right] d_0 \right|^2 \right\rangle + \langle |N_{all}|^2 \rangle \\ N_{all} &\equiv H N_H + L N_{sc} + L N_L + \frac{C_{ff}}{C_{fb}} N_{ff} + \frac{C_{gif}}{C_{fb}} N_{gif} \end{aligned} \quad (9)$$

$$x_1 = \frac{1}{1+G} \left[(P_s + P_f C_{ff}) x_0 \right] + \frac{G}{1+G} \left[L(1 + C_{gif}) x_0 - L C_{gif} y_0 \right] \quad (10)$$

参考文献

- [1] Hidefumi Taguchi and Mituhiko Araki. Two-degree-of-freedom pid controllers—their functions and optimal tuning. *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 33, No. 4, pp. 91–96, 2000.
- [2] 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*, Vol. 32, No. 18, p. 185003, 2015.