Photosensor を用いた、SAS 内部トーションモードのダンピング制御

理学系研究科天文学専攻　修士２年　荒瀬 勇太

2007 年 5 月

目 次

第 1 章　はじめに **3**

第 2 章　SAS の構造 **4**
2.1 SAS の構造 4
2.2 SAS の問題点：トーションモード 5
2.3 モデル計算 5
2.3.1 力学モデル 5
2.3.2 運動方程式 6
2.3.3 減衰の効果 7

第 3 章　Anguler Sensor の製作 **10**
3.1 Anguler Sensor の設計概念 10
3.2 Anguler Sensor の製作 11
3.3 ドライバー回路 11
3.4 Photosensor の Calibration 12
3.5 Anguler Sensor の性能評価 13
3.5.1 ２組の Photosensor によるのノイズレベルの評価 13
3.5.2 ノイズ原因の同定 14
3.5.3 レンジ 15

第 4 章　SAS での実験 I：非制御実験 **16**
4.1 インストール 16
4.2 gain の調整 16
4.3 伝達関数の測定 18
4.4 Q 値の測定 21
4.5 角度揺れパワースペクトル密度の測定 23

第 5 章　制御フィルターの設計 **24**
5.1 制御の目的 24
5.2 サーボの設計思想 24
5.3 オープンループ伝達関数 26
5.3.1 計算 26
5.3.2 実測 27

第 6 章　SAS での実験 II:制御実験 **30**
6.1　Q 値の測定 30
6.2　角度揺れパワースペクトル密度と RMS 振幅 31

第 7 章　まとめ **34**
7.1　まとめ 34
7.2　今後 34

付 録 A　TAMA300 における Photosensor 制御の使用方法 **35**
A.1　LabView 上での操作 35
A.1.1　プログラム 35
A.1.2　gain の設定 35
A.1.3　制御後 36
A.2　Photosensor 回路の設定 36
A.2.1　ダイアルの調整 36
A.2.2　配線 37

第1章　はじめに

現在、TAMA300 では４つのテストマスへの低周波防振装置 (Seismic Attenuation System:SAS) の導入を終え、それらの最終的な調整を行っている。

SAS はその構造的特性として、二段振り子の部分が SAS 上部より重心一点で吊り下げられているために、ミラーの Yaw モードを含む、トーションモードが大きく、またその Q 値も高い。このモード (共振周波数約 30mHz と約 80mHz) は一度励起されるとなかなか揺れが減衰せず、このような大きな揺れがあると、光てこのセンサーのレンジや制御レンジを超えてしまい、干渉計が動作できなくなるおそれがある。

これを制御するために、光てこでの制御に加え、角度揺れセンサーでの制御を行うことが考えられた。ミラーを二段振り子で吊り下げている上部 (「フィルター 1」と呼ばれる) の側面に 2 つのフォトセンサーを互いに離して取り付け、Yaw 回転の角度揺れを距離の差動変位として測定し、倒立振り子頭頂部に取り付けられたアクチュエーターに返すという制御系を構成した。

上記の角度揺れセンサーによる制御を４台それぞれの SAS で行い、ミラーの角度揺れの減衰の早急化に成功した。その一連の実験について本稿で報告する。

第2章　SASの構造

まず、SAS の構造について説明し、それに起因した回転方向の角度揺れの問題について言及する。

2.1　SAS の構造

SAS は、まず、地面からの振動を３本倒立振り子 (Inverted Pendulum:IP) とそれらを支える働きをしている MGAS filter（「フィルター 0」と呼ばれている）により防振を行っている。そのフィルター０から、一つ下段の MGAS filter（「フィルター１」と呼ばれている)、さらにもう一つ下段であるプラットフォームと呼ばれる部分までが、１本のワイヤーにより重心一点で吊り下げられている。

一方、プラットフォームから中段マス、そして中段マスからテストマス、及びリコイルマスへはそれぞれ４本のワイヤーで吊り下げられている。

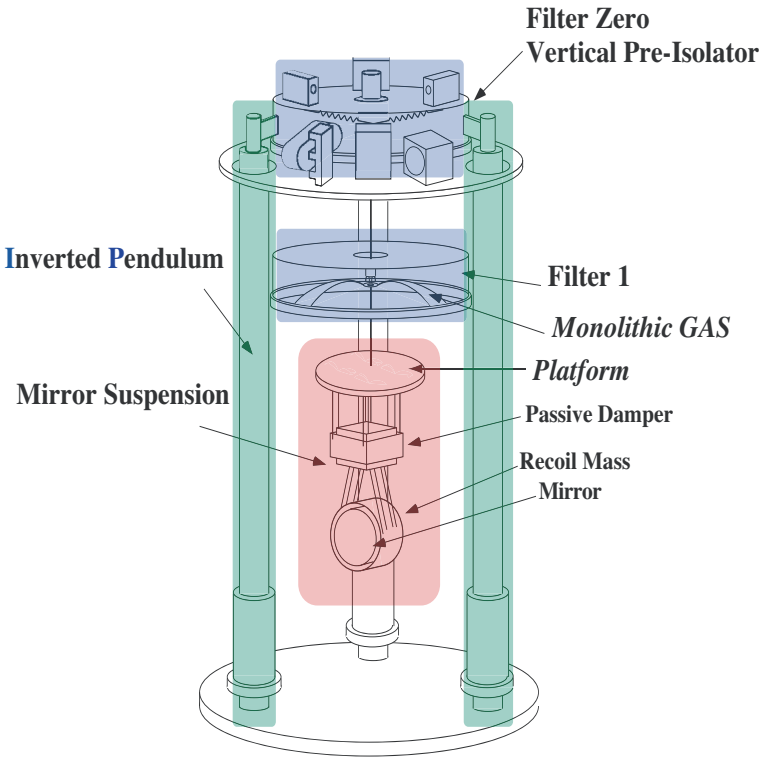


図 2.1: SAS のモデル

2.2 SAS の問題点：トーションモード

フィルター１、プラットフォームが重心一点で支えられているため、SAS 内部にはトーションモードと呼ばれる、Yaw 方向モードのねじれが大きく、またその Q 値も高い。

このモードには「同相」と「逆相」の２つのモードが存在する。

同相モード (共振周波数約 30mHz) IP からフィルター 0 に伝わったねじれが、フィルター 0 より下の部分全体、最下段であるミラーまで一体となって同相にゆれるモードである。これが SAS 内部のトーションモードで最低次の角度揺れである。共振周波数は約 30mHz。Q 値が 150 から 1000 近くある。

逆相モード (共振周波数約 80mHz) IP からフィルター 0 に伝わったねじれが、フィルター 1 からプラットフォームへ１本のロッドを通して伝わる際に、位相が反転し、フィルター 1 とプラットフォームは互いに逆相に回転する。これが SAS 内部のトーションモードの二次の角度揺れである。共振周波数は約 80mHz。Q 値は 150 から 1000 ほどである。

それぞれの揺れは一度大きく揺れ始めてしまうと、Q 値が高いためなかなか減衰しない。しかしながら、トーションモードが大きく揺れてしまっている状態では鏡の Yaw 方向の角度揺れが光てこ (Optical Lever:OL) の制御レンジを大きく超えてしまい、OL を用いた制御を効率的にかけることができない。また IP がそれよりも下の部分に対し、十分に重いため、また θ 方向の共振周波数が大きく異なるために、IP 頭頂部はそれより下のトーションモードとはデカップルしており、そこに取り付けられている LVDT と呼ばれる変位センサーではフィルター 0 以下が揺れているトーションモードを感知することができない。このモードが地震、もしくは突発的な激力が IP に加わるなどにより一度励起されると、長い時間干渉計を動作させることが難しく、観測時間の大幅なロスにつながる。

2.3 モデル計算

前節で提示した問題点について、モデル計算を行う。

2.3.1 力学モデル

SAS は前述したように、IP 頭頂部から１本のワイヤーにより重心一点で吊られている部分が存在する。この事に起因されるトーションモードの Yaw 方向回転角度揺れを取り扱うにあたり、その力学モデルをまず構築する。

本質的な部分を見落とさないために、以下のような近似を行い、計算を簡単にする。

- 剛体６自由度のうち、重心を中心とした水平面内だけの回転運動１次元だけを考え、その他の次元の運動の影響を無視する。
- プラットフォームより下段（中段質量、試験質量）は４本のワイヤーで吊られているために、トーションモードに対して一緒に運動する事から、一体となった剛体として扱う。

- 地面を固定端とみなし、IP 頭頂部はそこから外乱を受け、回転運動するものとする。

これらの近似による力学モデルが図.**??**である。
この図において、それぞれの文字、及び添字は

$$\phi_1 = \text{Angler fluctuation(the top of IP)}$$
$$\phi_2 = \text{Angler fluctuation(Filter1)}$$
$$\phi_3 = \text{Angler fluctuation(under tne Platform)}$$
$$I_1 = \text{Moment of inertia(the top of IP)}$$
$$I_2 = \text{Moment of inertia(Filter0)}$$
$$I_3 = \text{Moment of inertia(Under the Platform)}$$
$$k_1 = \text{Torsion spring factor(between ground and the top IP)}$$
$$k_2 = \text{Torsion spring factor(between the top IP and Filter0)}$$
$$k_3 = \text{Torsion spring factor(between Filter0 and under tne Platform)}$$

を表している。

2.3.2 運動方程式

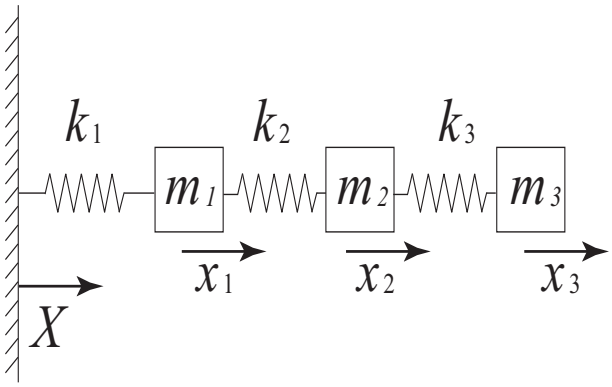


図 2.2: 1 次元中でのバネに繋がれた 3 質点の運動のモデル

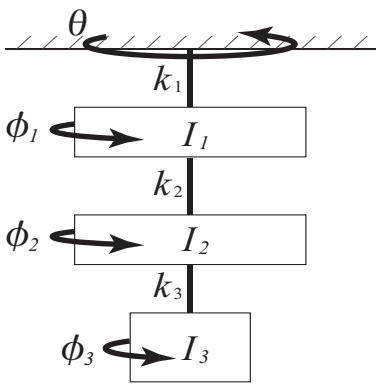


図 2.3: θ 回転 1 次元中でのバネに繋がれた 3 質点の運動のモデル

運動方程式を立てるにあたり、図 2.2 のような並進運動の運動方程式との対応を考える。
図.2.2 は 3 つの質点 m_1, m_2, m_3 が固定端からそれぞれバネ定数 k_1, k_2, k_3 のバネで繋がれてい

る。この系の各質点の運動方程式は各質点の変位を x_1, x_2, x_3 とし、外乱を X とすると、

$$m_1 \frac{\mathrm{d}^2 x_1}{\mathrm{d}t^2} = -k_1(x_1 - X) + k_2(x_2 - x_1) \tag{2.3.1a}$$

$$m_2 \frac{\mathrm{d}^2 x_2}{\mathrm{d}t^2} = -k_2(x_2 - x_1) + k_3(x_3 - x_2) \tag{2.3.1b}$$

$$m_3 \frac{\mathrm{d}^2 x_3}{\mathrm{d}t^2} = -k_3(x_3 - x_2) \tag{2.3.1c}$$

と表せる。

図 2.3 の水平方向の回転の角運動量の方程式は式.(2.3.1a) ,(2.3.1b) ,(2.3.1c) の対応として書き下せるので、

$$I_1 \frac{\mathrm{d}^2 \phi_1}{\mathrm{d}t^2} = -k_1(\phi_1 - \theta) + k_2(\phi_2 - \phi_1) \tag{2.3.2a}$$

$$I_2 \frac{\mathrm{d}^2 \phi_2}{\mathrm{d}t^2} = -k_2(\phi_2 - \phi_1) + k_3(\phi_3 - \phi_2) \tag{2.3.2b}$$

$$I_3 \frac{\mathrm{d}^2 \phi_3}{\mathrm{d}t^2} = -k_3(\phi_3 - \phi_2) \tag{2.3.2c}$$

と表せる。

2.3.3 減衰の効果

前節で導いた運動方程式に対して、減衰の効果を加える事を考える。今、各バネにおいてその上下の段における早退速度に比例した抵抗が存在すると仮定し、その減衰率を Γ_i $(\imath = 1, 2, 3)$ とすると、式 (2.3.2a) (2.3.2c) は、

$$I_1 \frac{\mathrm{d}^2 \phi_1}{\mathrm{d}t^2} = -k_1(\phi_1 - \theta) + k_2(\phi_2 - \phi_1) - \Gamma_1 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\phi_1 - \theta) + \Gamma_2 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\phi_2 - \phi_1) \tag{2.3.3a}$$

$$I_2 \frac{\mathrm{d}^2 \phi_2}{\mathrm{d}t^2} = -k_2(\phi_2 - \phi_1) + k_3(\phi_3 - \phi_2) - \Gamma_2 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\phi_2 - \phi_1) + \Gamma_3 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\phi_3 - \phi_2) \tag{2.3.3b}$$

$$I_3 \frac{\mathrm{d}^2 \phi_3}{\mathrm{d}t^2} = -k_3(\phi_3 - \phi_2) - \Gamma_3 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\phi_3 - \phi_2) \tag{2.3.3c}$$

と書き換えられる。これを、周波数空間で解くと事を考える。フーリエ変換を

$$\phi_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\phi_j}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (j = 1, 2, 3) \tag{2.3.4}$$

$$\theta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\theta}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \tag{2.3.5}$$

と定義すると、簡単な計算から、式 (2.3.3a) (2.3.3c) は

$$-\omega^2 I_1 \tilde{\phi_1} = -k_1(\tilde{\phi_1} - \tilde{\theta}) + k_2(\tilde{\phi_2} - \tilde{\phi_1}) - i\omega\Gamma_1(\tilde{\phi_1} - \tilde{\theta}) + i\omega\Gamma_2(\tilde{\phi_2} - \tilde{\phi_1}) \tag{2.3.6}$$

$$-\omega^2 I_2 \tilde{\phi_2} = -k_2(\tilde{\phi_2} - \tilde{\phi_1}) + k_3(\tilde{\phi_3} - \tilde{\phi_2}) - i\omega\Gamma_2(\tilde{\phi_2} - \tilde{\phi_1}) + i\omega\Gamma_3(\tilde{\phi_3} - \tilde{\phi_2}) \tag{2.3.7}$$

$$-\omega^2 I_3 \tilde{\phi_3} = -k_3(\tilde{\phi_3} - \tilde{\phi_2}) - i\omega\Gamma_3(\tilde{\phi_3} - \tilde{\phi_2}) \tag{2.3.8}$$

$$\tag{2.3.9}$$

これをまず、ϕ_1, ϕ_3 について整理すると、

$$\tilde{\phi_1} = \frac{\tilde{\theta}(k_1 + i\omega\Gamma_1) + \tilde{\phi_2}(k_2 + i\omega\Gamma_2)}{k_1 + k_2 + i\omega\Gamma_1 + i\omega\Gamma_2 - \omega^2 I_1} \tag{2.3.10}$$

$$\tilde{\phi_3} = \frac{\tilde{\phi_2}(k_3 + i\omega\Gamma_3)}{k_3 + i\omega\Gamma_3 - \omega^2 I_3} \tag{2.3.11}$$

これを式 (2.3.7) に代入して、減衰比 $\frac{\tilde{\phi_2}}{\tilde{\theta}}$ は、

$$\begin{aligned}
-i\omega I_2\tilde{\phi_2} &= \tilde{\phi_2}(-k_2 - k_3 - \omega\Gamma_2 - i\omega\Gamma_3) + \tilde{\phi_1}(k_2 + i\omega\Gamma_2) + \tilde{\phi_3}(k_3 + i\omega\Gamma_3) \qquad (2.3.12)\\
&= \tilde{\phi_2}\Big(-k_2 - k_3 - i\omega\Gamma_2 - i\omega\Gamma_3\Big)\\
&\qquad + \frac{\tilde{\theta}(k_1 + i\omega\Gamma_1) + \tilde{\phi_2}(k_2 + i\omega\Gamma_2)}{k_1 + k_2 + i\omega\Gamma_1 + i\omega\Gamma_2 - \omega^2 I_1}(k_2 + i\omega\Gamma_2)\\
&\qquad + \frac{\tilde{\phi_2}(k_3 + i\omega\Gamma_3)}{k_3 + i\omega\Gamma_3 - \omega^2 I_3}(k_3 + i\omega\Gamma_3)\\
&= \tilde{\phi_2}\Bigg(-k_2 - k_3 - i\omega\Gamma_2 - i\omega\Gamma_3\\
&\qquad + \frac{(k_2 + i\omega\Gamma_2)^2}{k_1 + k_2 + i\omega\Gamma_1 + i\omega\Gamma_2 - \omega^2 I_1} + \frac{(k_3 + i\omega\Gamma_3)^2}{k_3 + i\omega\Gamma_3 - \omega^2 I_3}\Bigg)\\
&\quad + \tilde{\theta}\left(\frac{(k_1 i\omega\Gamma_1)(k_2 + i\omega\Gamma_2)}{k_1 + k_2 + i\omega\Gamma_1 + i\omega\Gamma_2 - \omega^2 I_1}\right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\therefore \frac{\tilde{\phi_2}}{\tilde{\theta}} &= \frac{\left(\frac{(k_1 + i\omega\Gamma_1)(k_2 + i\omega\Gamma_2)}{k_1 + k_2 + i\omega\Gamma_1 + i\omega\Gamma_2 - \omega^2 I_1}\right)}{k_2 + k_3 + i\omega\Gamma_2 + i\omega\Gamma_3 - \omega^2 I_1 - A - B}\\
A &= \frac{(k_2 + i\omega\Gamma_2)^2}{k_1 + k_2 + i\omega\Gamma_1 + i\omega\Gamma_2 - \omega^2 I_1} \qquad (2.3.13)\\
B &= \frac{(k_3 + i\omega\Gamma_3)^2}{k_3 + i\omega\Gamma_3 - \omega^2 I_3}
\end{aligned}$$

と表せる。これが、角度揺れの外乱 θ からフィルター 0 に置ける角度揺れまでの伝達関数である。この関数はこのままでは露ではないが、３つの pole と２つの zero を持ち、パラメータにそれぞれ適当な値を入力しプロットすると、図 2.4 のような形となる。

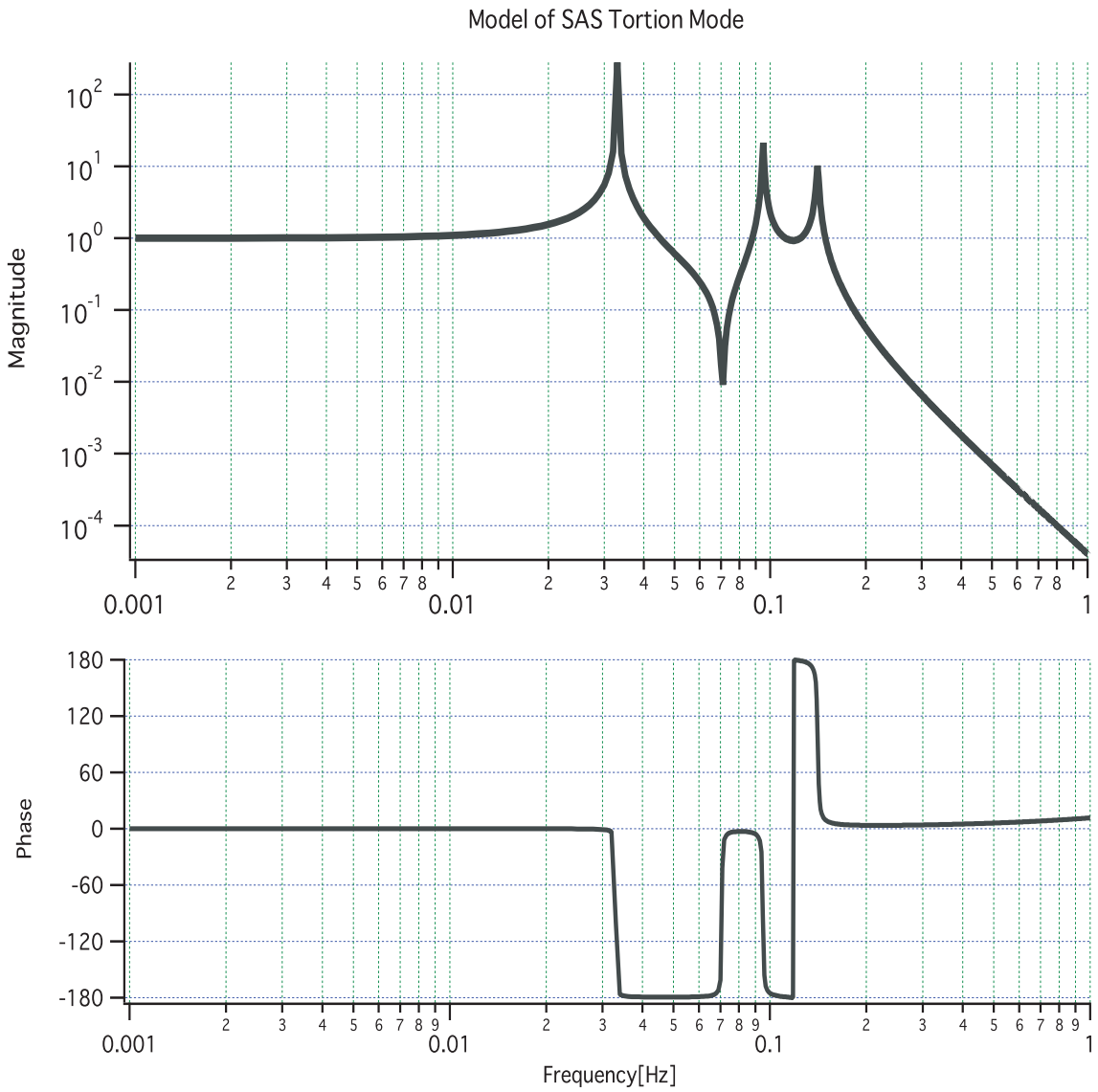


図 2.4: モデル計算による、SAS 内部のトーションモードの地面からフィルター 0 までの伝達関数

第3章　Anguler Sensorの製作

前章で述べたSAS内部のトーションモードの問題点に対して、実効的なQ値を下げ、減衰までの時間を短くするためのダンピング制御を行うことが考えられた。そのダンピング制御に用いるためのAnguler Sensorの製作を行った。本節では、Anguler Sensorの設計概念、センサーに用いたフォトセンサー(Photosensor:PS)の素子、ドライバー回路、性能評価について述べる。

3.1　Anguler Sensorの設計概念

SAS内部の２つのトーションモードに対するアクティブなダンピング制御を行うための信号と、アクチュエーターには以下のような要請があった。

- IP頭頂部よりも下の段におけるθ方向の角度揺れの情報を含むエラーシグナル。
- SASに取り付けられたアクチューエーターは1)IP頭頂部、2)プラットフォーム、3)リコイルマスの三カ所である。これらのアクチュエーターによって２つのトーションモードをダンピングさせるが、そのようなフィードバック信号を返す事のできる角度揺れ信号。
- 大きな揺れ(十数mrad程度)に対応できる制御レンジを持つ。

これらの要請を満たすために、Filter1と呼ばれる部分の角度揺れを感知することが考えられた。Filter1に取り付けられるセンサーには以下のような要請がある。

1. Filter1の角度揺れに感知し、並進揺れに対してできる限り感度を持たない。
2. 十数mradのレンジ
3. 定常的な鏡のYaw方向のゆれである$10^{(}-7)$rad/rtHz@1Hz程度以上の感度。

三番目の要請は定常的な制御を行う際に制御ノイズを混入させないと言う観点からの要請である。

これらの要請に対して、

- 「Photosensorを二つ組とし、それらを互いに離して部材に固定する。」
- 「その２つのPhotosensorからの差動出力を読み取ることにより、回転揺れのみに感知する。」

というAnguler Sensorを開発した。

この開発の詳細について以下の節で述べる。

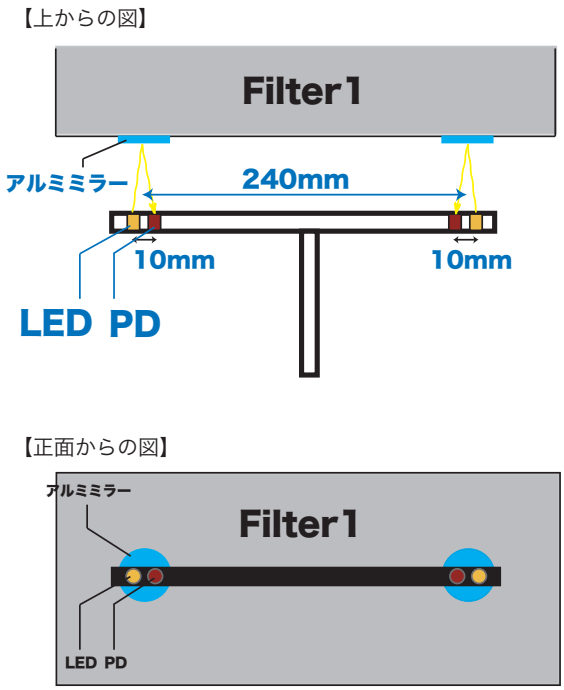


図 3.1: Photosensor の取り付け方：２つの Photosensor を互いに 24cm 離して、アルミ材に取り付ける。Filter1 にはアルミコーティングミラーを耐真空接着剤で貼付けてある。

3.2 Anguler Sensor の製作

Photosensor の素子 Anguler Sensor の製作にあたり、２組の Photosensor を製作した。Photosensor に用いた光学素子としては

- [LED]Honeywell SE3470
- [PhotoDiode] 浜松ホトニクス S5821

を使用した。両点とも耐真空素子である。

取り付け LED と PD(PhotoDiode) を互いの中心が 10mm 離れるように、アルミ材に平行に開けられた穴に、M2 のねじではさみ込み固定した。このとき、アルミ材と素子との間にはテフロンシートをはさみ、絶縁した。

このような Photosensor ２組が互いに 24cm 離れるように、長さ 26cm のアルミ製の固定材を製作し、その両端に平行に取り付けた。

3.3 ドライバー回路

Anguler Sensor 駆動回路を製作するにあたっての要請は以下のようである。

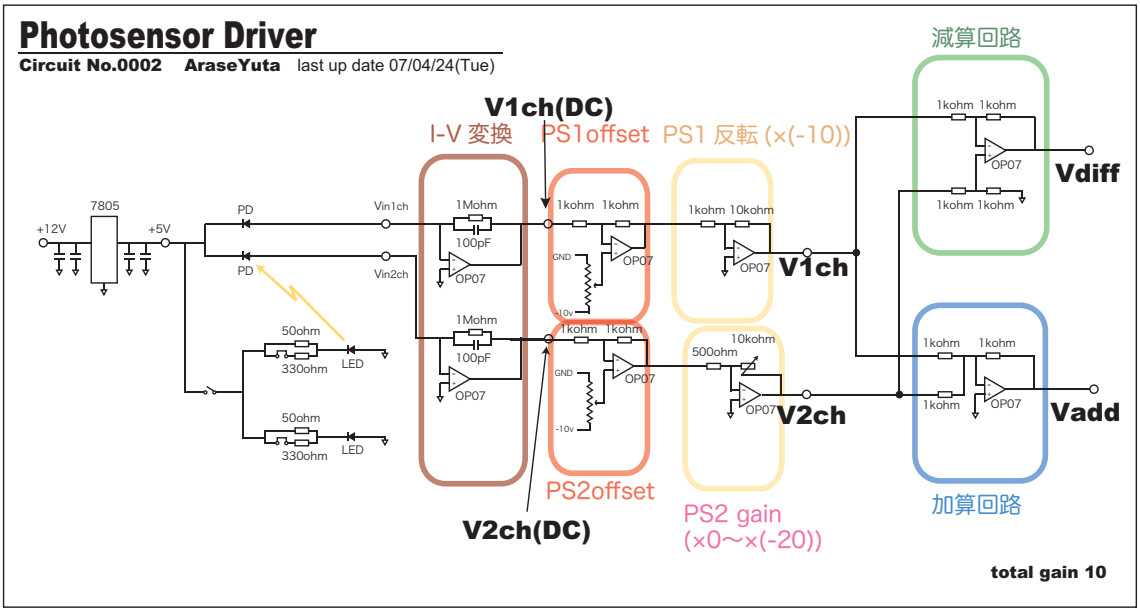


図 3.2: Anguler SensorDriver Circuit

- 各 Photosensor の素子による個体差、及び動作点の違いによる感度の違いを、回路内部でゲイン調整する。
- 各 Photosensor の DC 出力をオフセットにより調整する。
- 制御はデジタルフィルターを用いるため、AD ノイズ以上の信号のトータルゲインを得る。

これらの要請のもと製作された回路は図 3.1 の様である。回路製作にあたっての詳細な方針は以下のようである。

- 初段の IV 変換回路に、100pF のコンデンサーを 1MΩ の抵抗器と並列に配置する事によりローパス filter の役割を果たす。
- 二段目の OP アンプ回路で 0V から-10V のオフセットを持たせる。
- 三段目の OP アンプ回路で CH1 には 10 倍の固定 gain を、CH2 には 0 倍から 20 倍までの可変 gain を持たせる。
- 最終段の OP アンプ回路で、gain 1 倍の減算回路、加算回路を構成する。

3.4 Photosensor の Calibration

実験方法 以下の実験手順に従い、Anguler Sensor に用いる Photosensor 単体の Calibration を行った。

1. Photosensor をマイクロメーターの上にのせる。

2. Photosensor と鏡（アルミコーティングミラー）とを正対させ、マイクロメーターのダイアルをねじることにより、Photosensor とアルミミラーとの相対距離を変化させる。
3. それぞれの相対距離における、Photosensor の DC 出力を測定する。

結果　Photosensor との距離が変化すると図 3.2 のように出力電圧が変化することが確かめられた。出力が最大値の 80 %に相当する 6.8V の点を中心に直線近似し、その線形領域において 788V/m の換算係数が得られた。この線形領域のレンジについては後述する。

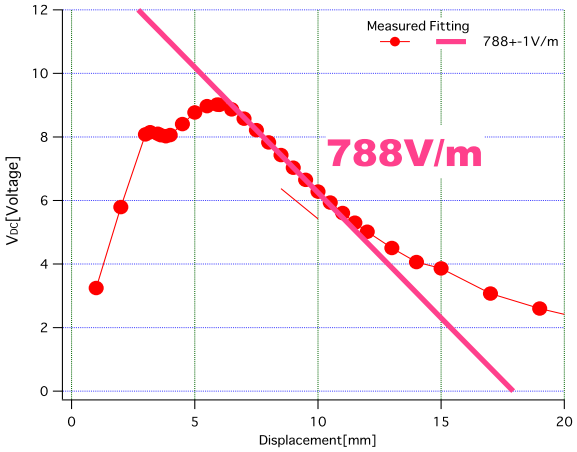


図 3.3: Photosensor の較正：横軸は反射体と Photosensor の間の相対距離、単位は mm。縦軸は Photosensor の DC 出力、単位は volt。

3.5 Anguler Sensor の性能評価

上記のように製作された Anguler Sensor の感度の評価を行った。

3.5.1 ２組の Photosensor によるのノイズレベルの評価

この Photosensor を２組用いた Anguler Sensor の感度評価を以下の様にして行った。

実験方法

1. ２組の Photosensor をそれぞれ、反射体（アルミ製 L 字材）と相対させ、動作点にしっかりと固定する。
2. ２組の Photosensor からの信号の差動信号を読み取る。
3. 差動出力のパワースペクトル密度をスペクトルアナライザを用いて計測する。

差動信号出力の DC 値はゼロになるように回路内部のオフセットにより調整した。

結果　フォトセンサーの感度は $1.05*10^{(}-7)$rad/rtHz@1Hz であった。(Filter1 での角度揺れ相当)。

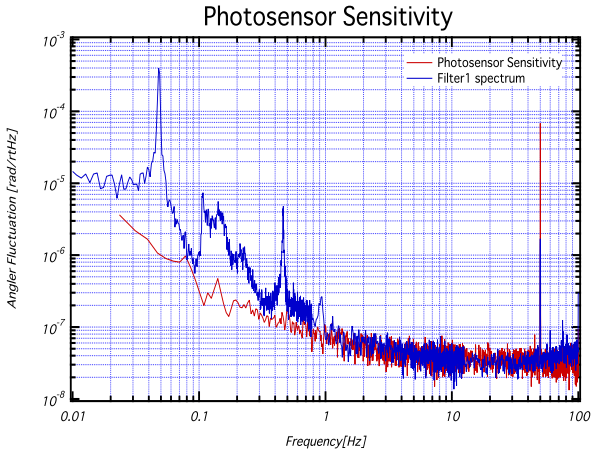


図 3.4: フォトセンサー感度測定：横軸は周波数。縦軸：角度揺れ相当でフォトセンサー出力のパワースペクトル

3.5.2　ノイズ原因の同定

このフォトセンサーのフロアレベルを決めている雑音を特定するため以下のような測定を行った。

LED 強度雑音　本研究で使用している LED を、今回使用しているものとは別の PD と、その間の距離が 2mm 程になるように対向させ、しっかりと光学台に固定する。その状態での出力のパワースペクトル密度を計測し、LED の強度雑音を測定した。

LED 電源雑音　LED に供給している 5V 電源のパワースペクトル密度を計測し、LED の電源雑音を測定した。

それぞれのパワースペクトル密度と固定鏡測定でのパワースペクトル密度をそれぞれの DC 値で割る事により規格化し、相対電圧変動として比較する事を考える。その結果、4Hz 以下の帯域において、フォトセンサーの感度と、LED の強度雑音がほお同じレベルとなっていることがわかった。このことから、4Hz 以下の帯域において、Photosensor の感度は LED 強度雑音により制限されていることがわかった。また 4Hz 以上の帯域ではフォトセンサーの感度はフラットになっているが、このノイズの原因は特定されていない。

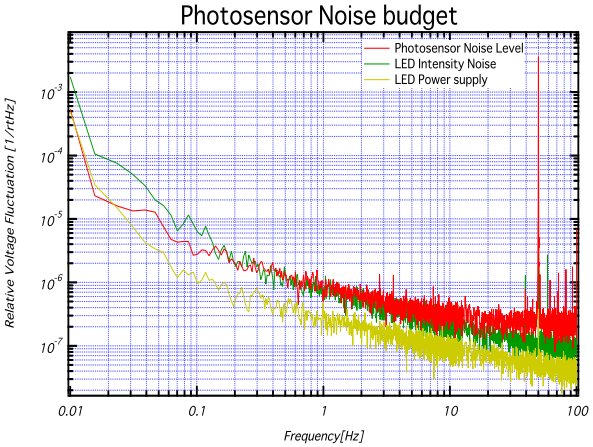


図 3.5: フォトセンサー感度測定：横軸は周波数。縦軸：相対電圧変動。グラフ赤色が固定鏡実験で測定したフォトセンサーの感度を、グラフ緑色が LED と PD を対向させて設置し、測定した LED 強度雑音を、グラフ黄色が LED の電源電圧の変動を、ぞれぞれ規格化したもの。

3.5.3 レンジ

次に、Photosensor の使用可能な範囲について述べる。前述したように Photosensor の反射体までの距離に対する DC 出力は図 3.1 のような特性曲線をもっている。この特性曲線において動作点の変化にともなうの線形性について見てみることにする。DC 出力がピーク値の 90%、80%、70%である動作点周辺でのそれぞれの近似直線の傾きの求めると、互いに 21% の差が生じた。

この事は、動作点が 6.83mm から 9.21mm まで変化したとき、校正値の誤差は 21 %程度あるという事を表している。

この動作点の範囲を、Filter1 の角度揺れ相当の範囲に修正して考えると、$2.0 * 10^{(} - 2)$rad 程度に対応する。この範囲において、Photosensor の線形性は 20% 程度の範囲内で保たれる。

この領域を Photosensor の線形領域として認めれば、今回製作された Anguler Sensor のセンサーレンジは、$2.0 * 10^{-2}$rad であると言える。

第4章　SASでの実験I：非制御実験

2007年5月に前章で製作したAnguler Sensorを、4台全てのSASにインストールした。これらのAnguler Sensorを用いての制御を構築するために、まず非制御時における測定を行った。この章では、非制御時における測定について報告する。

4.1　インストール

Anguler Sensorは試験質量が収められている４つの真空槽(EM1.NM1,EM2,NM2)の懸架装置全てにインストールされた。

Anguler Sensor はIP頭頂部からMGAS Filter(このMGAS filterはFilter0と呼ばれている）によって、重心一点で吊り下げれられているFilter1と呼ばれている部分のYaw方向の角度揺れを感知できるように設置された。

これは、Filter1から一つ下の段であるプラットフォームを囲っている枠が、Filter1に固定されているためFilter1と同様に揺れることを利用し、その枠にアルミコーティングミラーをとりつけ、そこのYaw方向の角度揺れを差動信号として２組のPhotosensorで測定している。

4.2　gainの調整

Photosensorは動作点によって、その感度が変化する。また、素子の違いによる感度の違いも存在する。これらをキャンセルし、同相信号の影響を小さくするために、各チャンネルでのゲインの調整が必要である。

下記の方法を用いて、インストールされた２つのPhotosensorのゲインの調整を行った。

1. IP頭頂部に取り付けられたアクチュエーターにスペクトルアナライザから信号を注入し（RandomNize 100mVpk)、IPをYaw方向に加振する。

2. IP Actuator input -Filter1-Photosensor outputまでの伝達関数をPS1、PS2の各チャンネルで取得する。

3. その伝達関数の比から、適切なゲインを計算する。

この用にして得られた伝達関数が図4.1である。

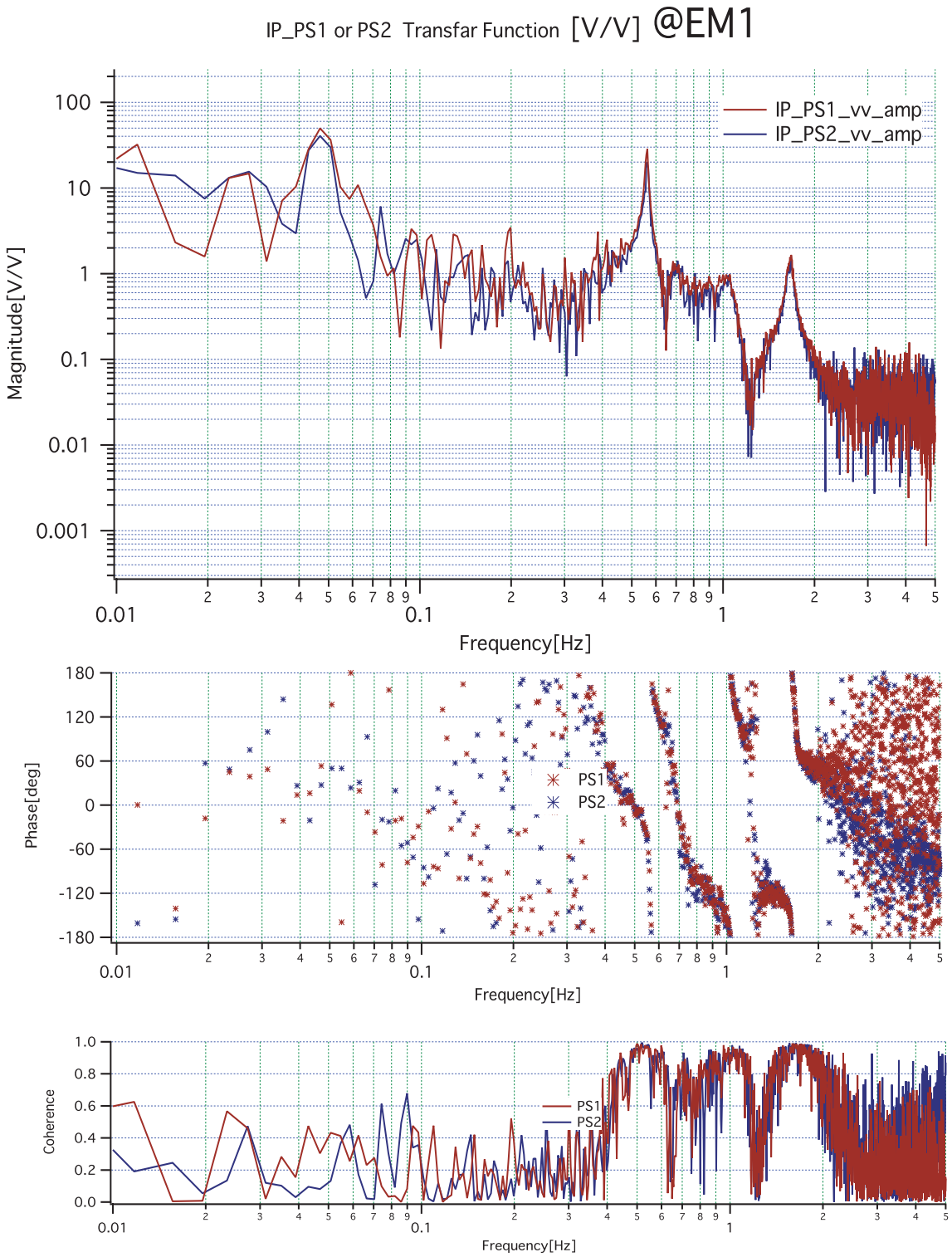


図 4.1: Anguler SensorDriver Circuit

100mHz から 500mHz あたりの帯域において、コヒーレンスが悪くなっているのは、Yaw 方向の加振が x 方向、若しくは y 方向へのカップリングとして現れて、PS1、PS2 に対して、同相に揺れているためである。

この帯域での同相信号の除去がおこなえるように、PS1、PS2 を以下の方法でゲインを調整する。があり、ここでの感度を比較する。

PS1,PS2 それぞれへの伝達関数の振幅の比をとる。550mHz には IP の θ 方向の共振があり、ここでのコヒーレンスがよいので、２つの振幅を比較する。以下の実験ではこの方法で得られたゲインを用いて実験を使った。

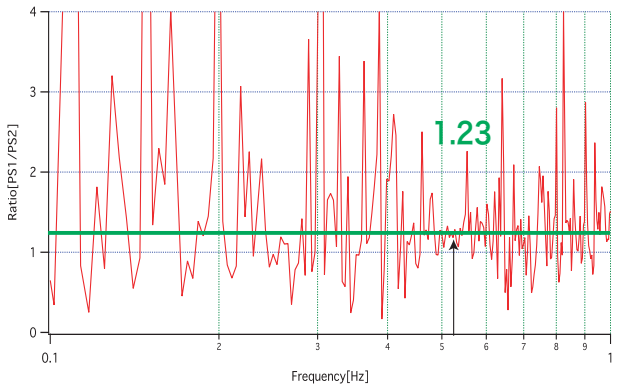


図 4.2: 伝達関数の比：横軸は周波数、Hz。縦軸は図.4.1 で表した IP-PS 伝達関数の振幅において、PS1 ／ PS2 の比をとった。

4.3 伝達関数の測定

前節で設定したゲインを用いて、差動信号を用いての IP から Anguler Sensor までの伝達関数を取得する。測定の方法は以下の様である。

1. CH2 の gain を設定する。
2. IP 頭頂部に取り付けられたアクチュエーターにスペクトルアナライザから信号を注入し（RandomNize 100mVpk）、IP を Yaw 方向に加振する。
3. PS1 と PS2 の差動信号を読み取ることにより、IP-Filter1-Photosensor までの周波数応答関数を測定する。

また、このとき IP の制御は LVDT のみを用い、加速度計による制御は行わなかった。

この測定によって得られた伝達関数が図 4.3 から、図 4.6 である。

これと第２章で示されたモデルから得られた伝達関数を比較する。測定データとモデルとのフィッティングを行った。各モードの共振周波数、Q 値は以下の表のようであると推定された。

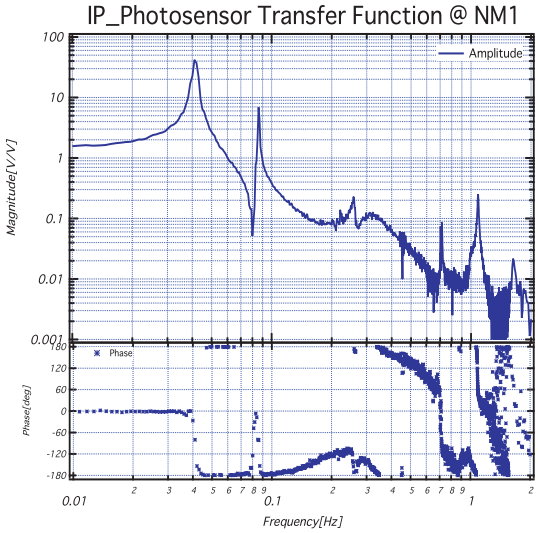


図 4.3: NM1 の伝達関数

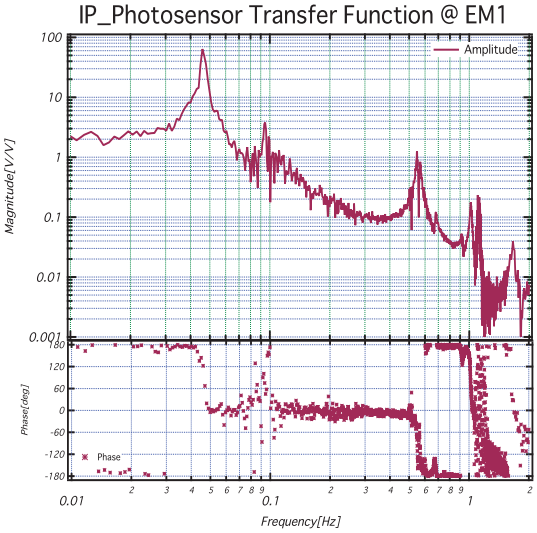


図 4.4: EM1 の伝達関数

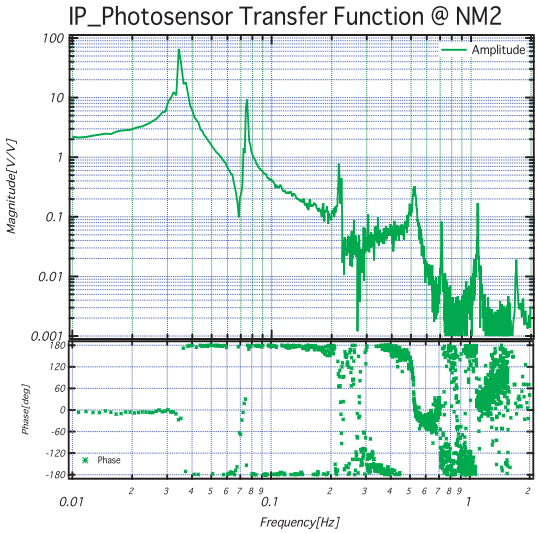


図 4.5: NM2 の伝達関数

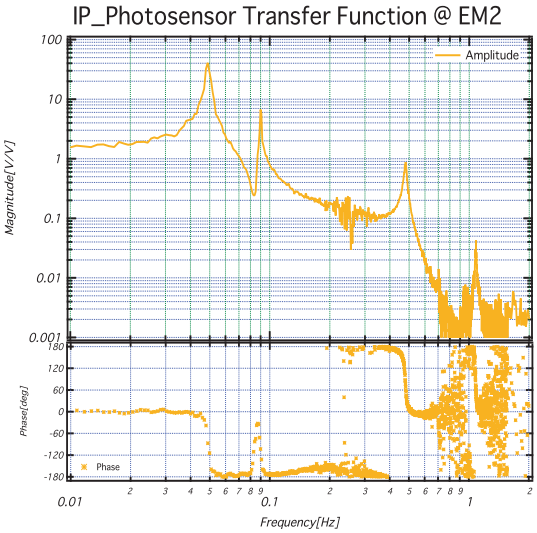
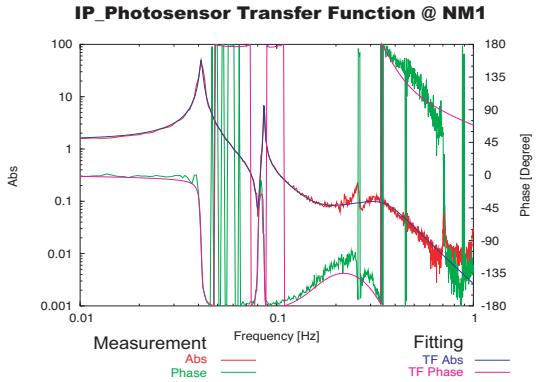


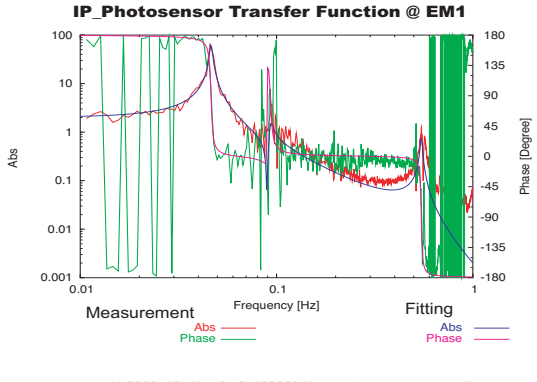
図 4.6: EM2 の伝達関数



pole 41.2363607325m 35.6776415805 ### fitted (name = pole0)
zero 80.0627635112m 50.9206467364 ### fitted (name = zero0)
pole 86.0876818774m 115.5998852797 ### fitted (name = pole1)
pole 357.0152345670m 1.7337870029 ### fitted (name = pole2)
zero 159.4959787971m 1.3411047642 ### fitted (name = zero1)
pole 504.2535459534m 353.5701841473m ### fitted (name = pole3)

factor 1.5458914362 ### fitted

図 4.7: NM1 の伝達関数のフィッティング

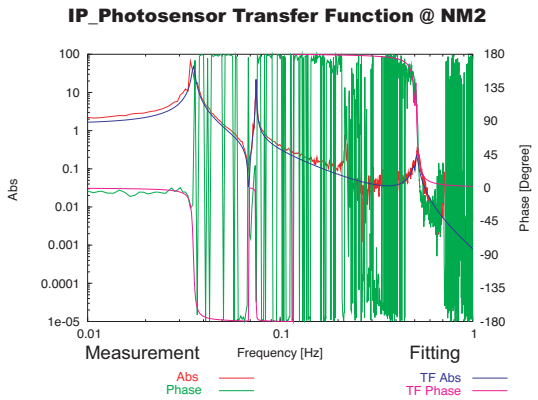


pole 46.3893402761m 31.3563302350 ### fitted (name = pole0)
zero 89.6650320314m 395.1270972905 ### fitted (name = zero0)
pole 93.0510524898m 30.3512149335 ### fitted (name = pole1)
pole 546.5054720025m 52.9230656660 ### fitted (name = pole2)
#pole 550.4169018982m 12.7864190997 ### fitted (name = pole1)
#zero 550.4169018982m 12.7864190997 ### fitted (name = pole1)
factor -2.0223351873 ### fitted

param factor 0.0001 100000

fit IP_PS_TF_EM1.txt absdeg semi

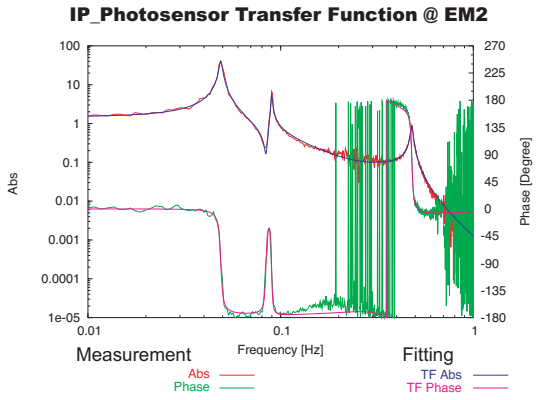
図 4.8: EM1 の伝達関数のフィッティング



pole 35.4460707215m 32.9782576146 ### fitted (name = pole0)
zero 68.7195427742m 4.9778950089k ### fitted (name = zero0)
pole 74.8623583566m 517.4903022365 ### fitted (name = pole1)
pole 507.5689460347m 26.7433284563 ### fitted (name = pole2)
zero 503.5290223394m 159.3598550268 ### fitted (name = zero1)
pole 505.5108139515m 53.6121773004 ### fitted (name = pole3)

factor 1.5349228630 ### fitted

図 4.9: NM2 の伝達関数のフィッティング



pole 48.8976758575m 28.1604924862 ### fitted (name = pole0)
zero 83.9347218705m 37.1668549701 ### fitted (name = zero0)
pole 89.7690112390m 54.3275062542 ### fitted (name = pole1)
pole 479.8576665246m 37.4832179172 ### fitted (name = pole2)
zero 369.5814768562m 1.2252159784 ### fitted (name = zero1)
pole 369.6446268067m 1.7864955064 ### fitted (name = pole3)

factor 1.4812612669 ### fitted

図 4.10: EM2 の伝達関数のフィッティング

表 4.1: 各 SAS の Torsion mode の共振周波数

	$Mode$	$Frecuency[mHz]$	$Qfactor$
$NM1$	$LowestTorsionmode$	41.2	35
	$Node$	80.0	$---$
	$SecondTorsionmode$	86.0	116
$EM1$	$LowestTorsionmode$	46.3	31
	$Node$	89.6	$---$
	$SecondTorsionmode$	93.1	30
$NM2$	$LowestTorsionmode$	35.4	33
	$Node$	68.7	$---$
	$SecondTorsionmode$	74.9	517
$EM2$	$LowestTorsionmode$	89.8	28
	$Node$	83.9	$---$
	$SecondTorsionmode$	89.8	54

4.4 Q 値の測定

実験方法 前節で推定された Q 値が実現されているか、どうか確認するために、次のような実験を行った。

1. IP 頭頂部の θ 方向に、デルタ関数的な激力を与え、十分大きく加振する。
2. その後の Filter1 での Yaw 方向角度揺れの減衰振動の様子を、Photosensor を用いて、時系列データとして取得する。

解析方法 この実験から得られたデータを以下の用に解析し、Q 値を求めた。

1. 得られたデータを 100 秒ずつのデータに分ける。
2. Torsion mode 分けられたデータの各セクションにおいて、最低次の共振周波数の振幅をフーリエ変換から求める。
3. ２で得られた振幅をつなぎ、式 (4.4.1) の減衰振動のモデルを用いて Fitting を行う。

fitting に用いた減衰モデルは以下のような式で表される。

$$\phi \quad = A\, e^{-\zeta 2\pi f_0 t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} 2\pi f_0 t + \phi_0) \tag{4.4.1}$$

where　A：初期振幅
ζ：減衰比
f_0：共振周波数
ϕ_0：初期位相

結果　この結果で得られた減衰比と、Q 値には

$$Q = \frac{1}{2\zeta} \tag{4.4.2}$$

という関係があることから、各 SAS における Torsion mode 最低次の Q 値は以下である事が分かった。

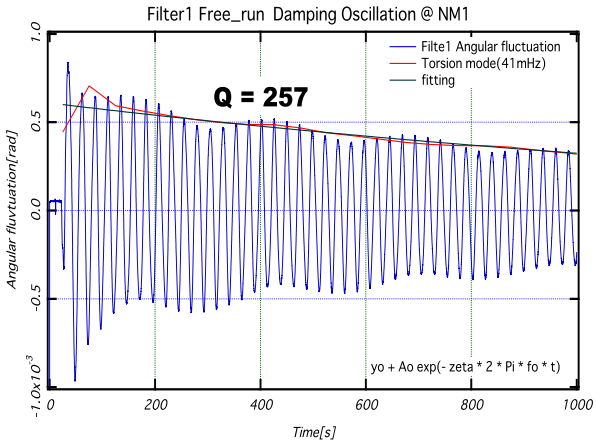


図 4.11: NM1 の減衰振動の様子

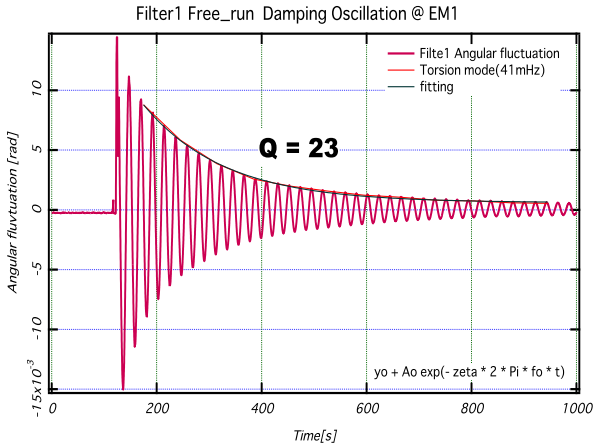


図 4.12: EM1 の減衰振動の様子

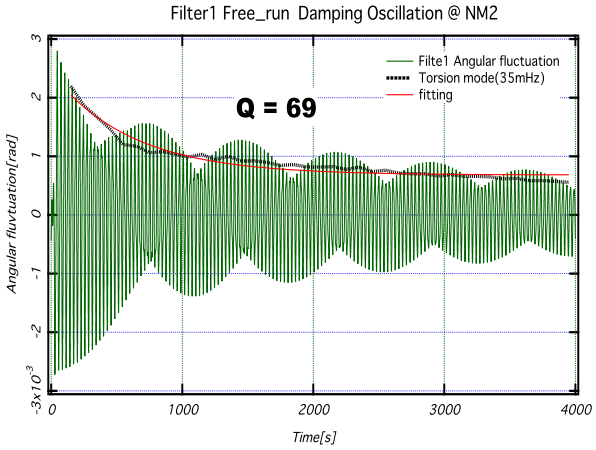


図 4.13: NM2 の減衰振動の様子

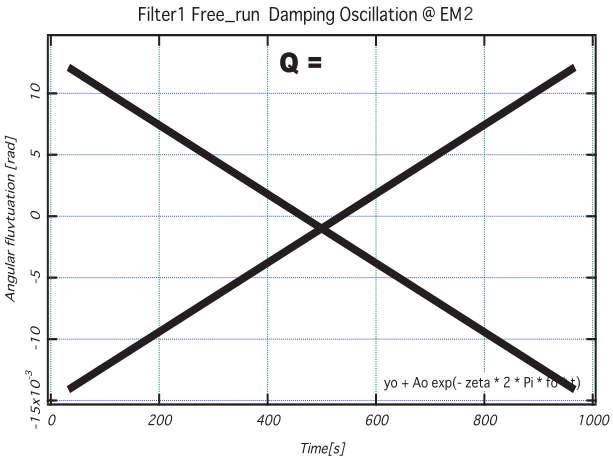


図 4.14: EM2 の減衰振動の様子

表 4.2: 各 SAS の最低次の Torsion mode の減衰率と Q 値

	減衰比ζ	$Qfactor$
$NM1$	0.005	257
$EM1$	0.022	23
$NM2$	0.016	69
$EM2$	xxx	qqq

4.5 角度揺れパワースペクトル密度の測定

定常的の Filter1、及び、試験質量の Yaw 方向角度揺れのパワースペクトル密度をそれぞれ、Photosensor、Optical Lever を用いて測定した。尚、それぞれの較正値は

- OpticalLever Calibration factor 2499V/rad
- Photosensor Calibration factor 1200V/rad

であった。

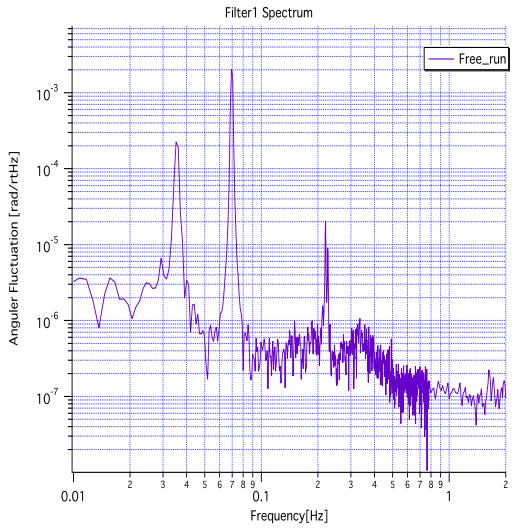


図 4.15: 非制御時の Filter1 のスペクトル

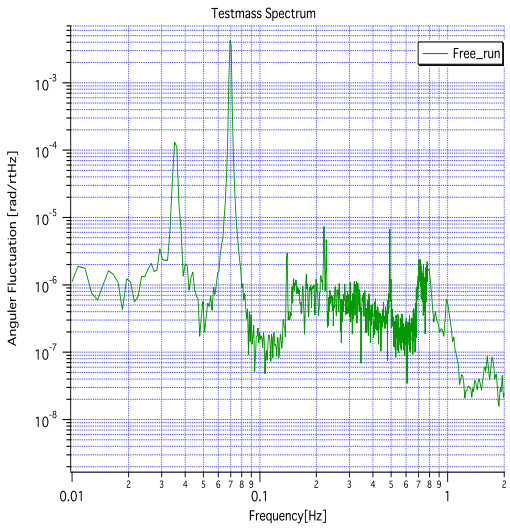


図 4.16: 非制御時の試験質量のスペクトル

第5章　制御フィルターの設計

前章の実験で得られたIPからプォトセンサーまでの伝達関数を用いて、制御サーボ構築のためのフィルターを設計する。

5.1　制御の目的

前章で述べたSAS内部のトーションモードの問題点に対して、実効的なQ値を下げ、減衰までの時間を短くするためのダンピング制御を行う。

5.2　サーボの設計思想

設計するにあたっての制御の基本方針は以下のようなものであった。

1. 最低次のモード (共振周波数約40mHz) におけるダンピングを行うことを第一優先とし、そこで十分なゲインを得る。
2. 下から２番目のモード（共振周波数約85mHz）におけるダンピングを行うよう、そこでゲインを得る。
3. 85mHzのピーク周辺よりも高周波側では制御をかけない。
4. 500mHz周辺にある並進方向へのカップリングが影響しないよう、そこで十分にゲインを落とす。

これらの方針のもとに設計されたフィルターは図.5.1のようなものである。

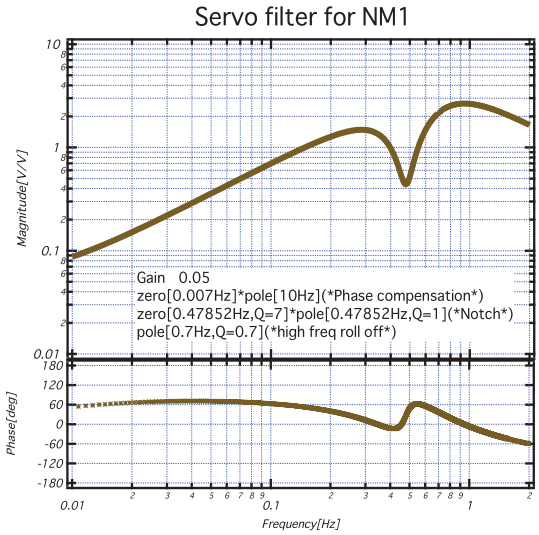


図 5.1: NM1 のフィルター

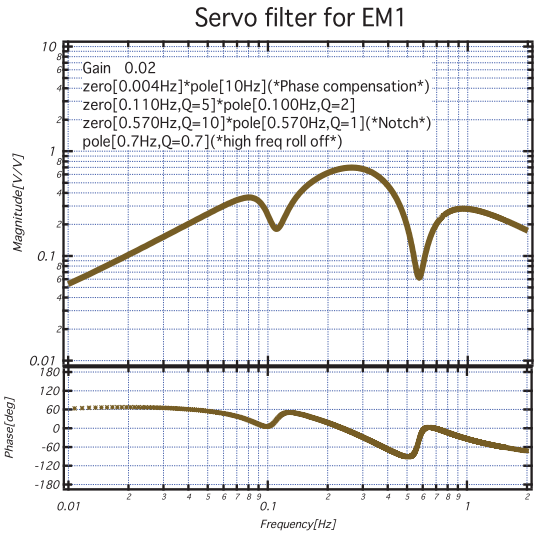


図 5.2: EM1 のフィルター

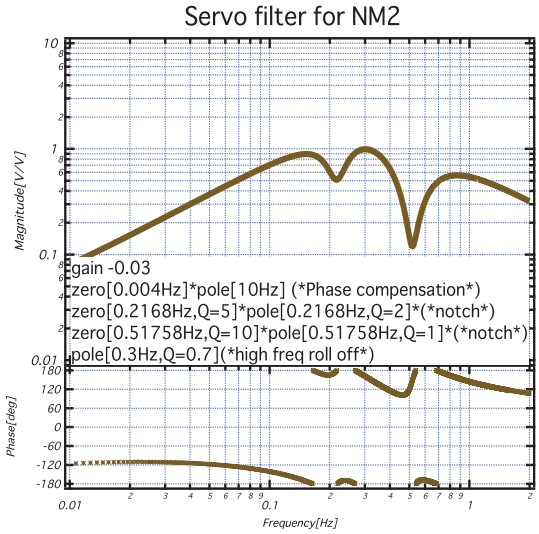


図 5.3: NM2 のフィルター

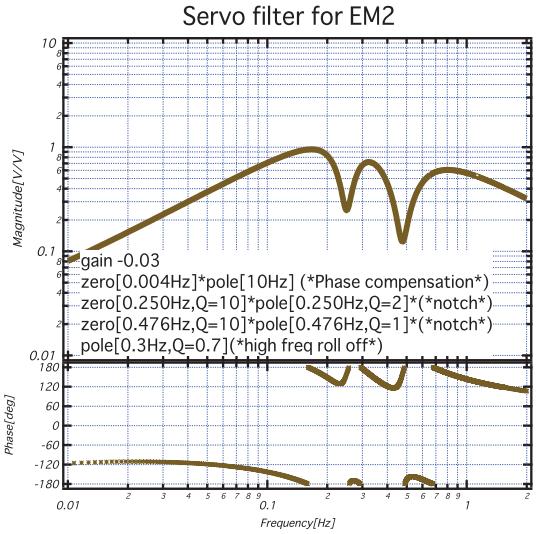


図 5.4: EM2 のフィルター

表 5.1: それぞれのフィルターの pole と zero(frequency の単位は mHz)

$NM1$			$EM1$			$NM2$			$EM2$		
	$freq$	Q		$freq$	Q		$freq$	Q		$freq$	Q
$zero$	7	$---$	$zero$	4	$---$	$zero$	4	$---$	$zero$	4	$---$
$zero$	478.52	7	$zero$	110	5	$zero$	216.8	5	$zero$	250	10
$pole$	478.52	1	$pole$	100	2	$pole$	216.8	2	$pole$	250	2
$pole$	700	0.7	$zero$	570	10	$zero$	517.58	10	$zero$	476	10
$pole$	$10Hz$	$---$	$pole$	570	1	$pole$	517.58	1	$pole$	476	1
			$pole$	700	1	$pole$	300	0.7	$pole$	300	0.7
			$pole$	$10Hz$	$---$	$pole$	$10Hx$	$---$	$pole$	$10Hz$	$---$

5.3 オープンループ伝達関数

5.3.1 計算

前節で設計されたフィルターと IP からプォトセンサーまでの伝達関数とを用いて、予測されるオープンループ伝達関数を計算した。

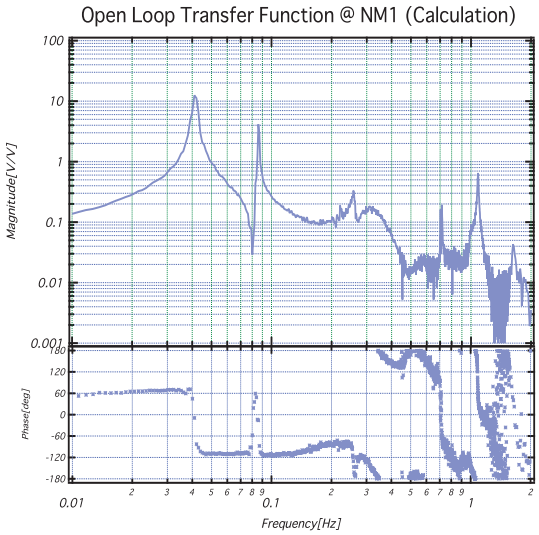


図 5.5: NM1 で予想されるオープンループ伝達関数

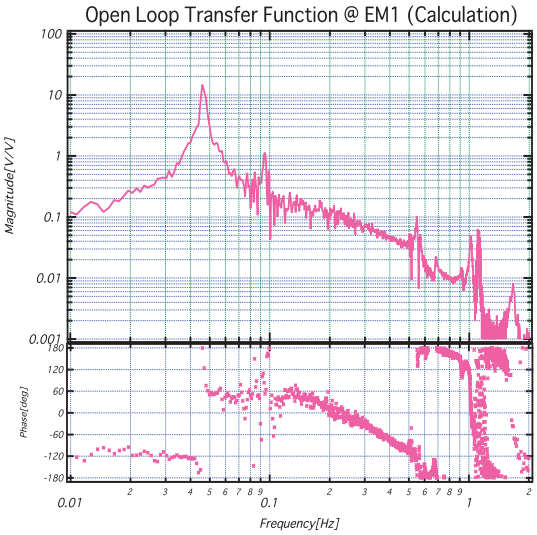


図 5.6: EM1 で予想されるオープンループ伝達関数

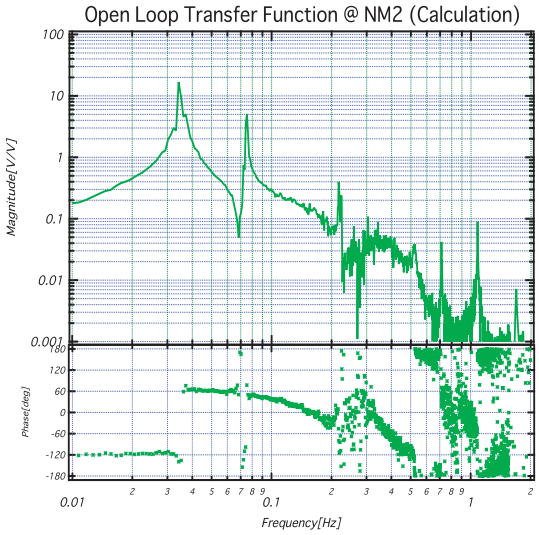


図 5.7: NM2 で予想されるオープンループ伝達関数

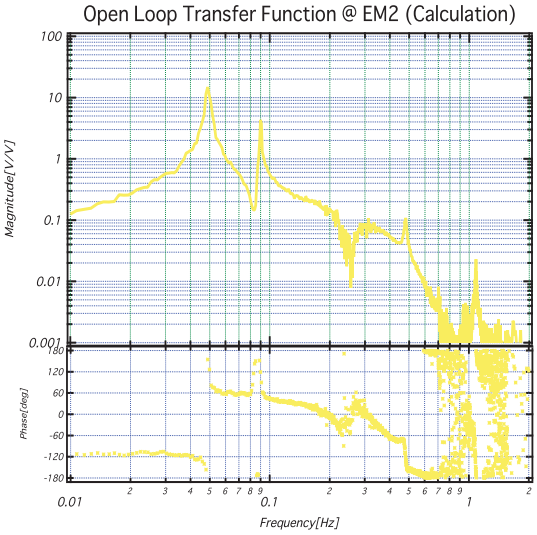


図 5.8: EM2 で予想されるオープンループ伝達関数

5.3.2 実測

上記のようなオープンループゲインが実現されているか、以下のような実験を行い検証した。

実験方法　制御ループの中の error シグナルの部分にスペクトルアナライザからの信号（Random-Noise 3Vpk）を注入し、AD 変換の前から Photosensor の差動出力までの openloop 伝達関数を測定する。

結果　図 5.9 からの４つの図のような結果が得られた。共振部分での測定がうまくいっていない点を除けば、全ての真空槽において、計算から推定されたオープンループゲインを得ることができた。

表 5.2: トーションモードの共振周波数における、オープンループゲイン

Vacuum chamber	Primary mode		Secondary mode	
	Frequency	Open loop gain	Frequency	Open loop gain
NM1	41.2 mHz	12.432	86.1 mHz	4.2
EM1	46.3 mHz	14.779	93.1 mHz	1.1
NM2	35.5 mHz	16.854	74.9 mHz	5.1
EM2	48.9 mHz	14.827	89.7 mHz	4.3

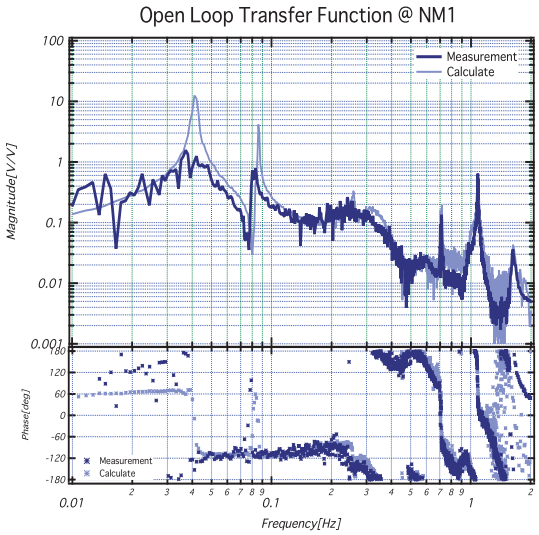


図 5.9: NM1 で実測されたオープンループ伝達関数

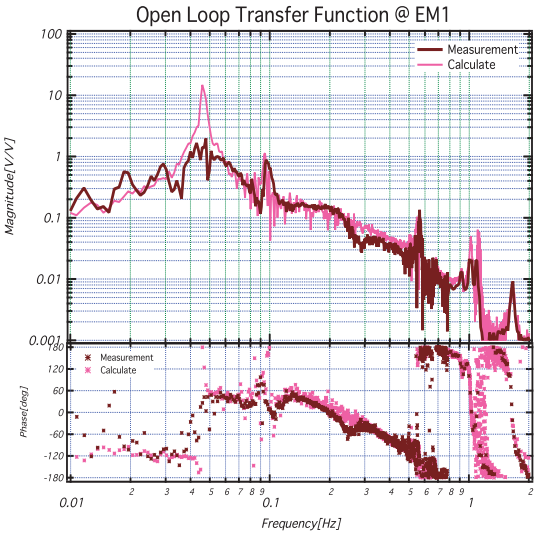


図 5.10: EM1 で実測されたオープンループ伝達関数

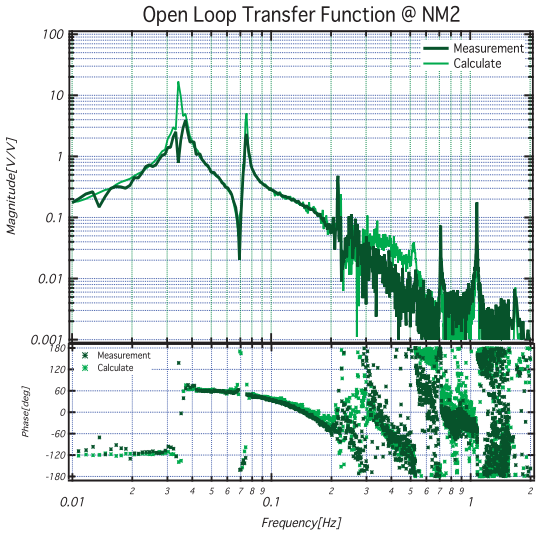


図 5.11: NM2 で実測されたオープンループ伝達関数

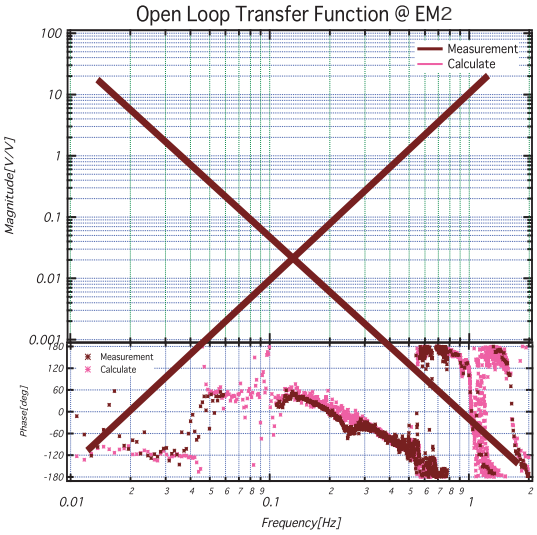


図 5.12: EM2 で実測されたオープンループ伝達関数

第6章　SASでの実験II:制御実験

今回の制御の目的は

実効的な Q 値を下げ、減衰までの時間を短くするためのダンピング制御を行う

ことである。この章では、前章で設計された制御の評価を行い、この目的が達成されているかを確認する。

6.1　Q 値の測定

上記の目的を達成しているかどうかを確認するために、制御時における大振幅からの減衰時間を測定し、実効的な Q 値を測定した。

実験方法　IP 頭頂部の θ 方向に、デルタ関数的な激力を与え、十分大きく加振する。その後の Filter1 での Yaw 方向角度揺れの減衰振動の様子を、Photosensor を用いて、時系列データとして取得した。また、データの解析方法は 4 章の 4.4 節と同様に行った。

結果　各 SAS における、それぞれの実効的 Q 値は以下の様であった。

表 6.1: 各 SAS の Torsion mode の共振周波数

	Mode	Frecuency[Hz]	effective Q factor	original Q factoor
NM1	Lowest Torsion mode	41.2	5.21	257
EM1	Lowest Torsion mode	46.3	5.29	23
NM2	Lowest Torsion mode	35.5	1.99	69
EM2	Lowest Torsion mode	48.9	qqq	27

このように、実効的 Q 値を下げ、減衰時間の短縮に成功した。

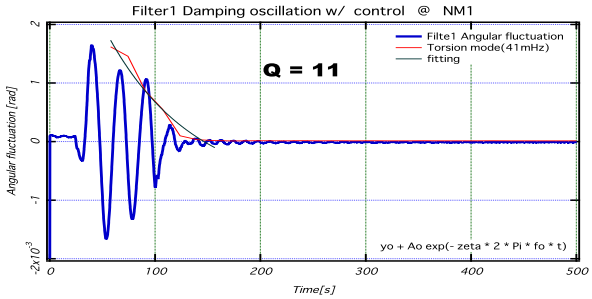


図 6.1: NM1 の減衰振動の様子

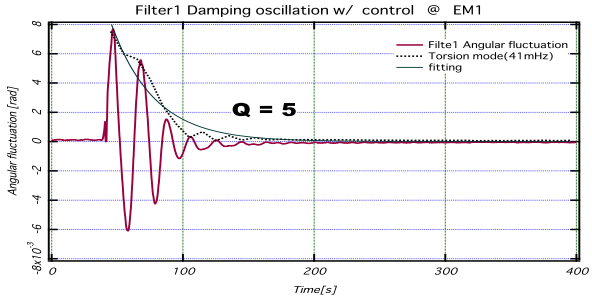


図 6.2: EM1 の減衰振動の様子

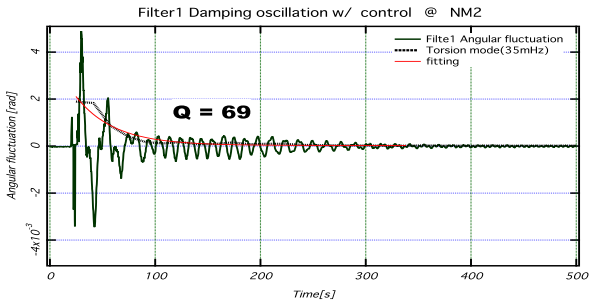


図 6.3: NM2 の減衰振動の様子

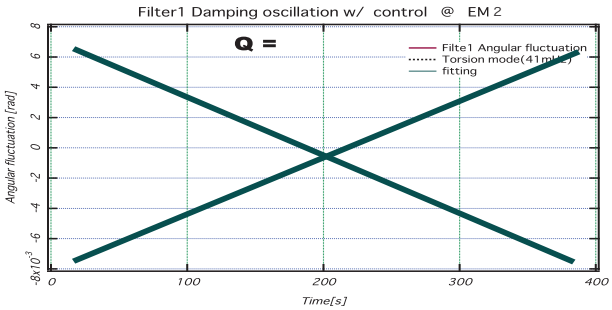


図 6.4: EM2 の減衰振動の様子

6.2 角度揺れパワースペクトル密度と RMS 振幅

制御をかけて十分に時間が経過し、定常状態になったことを確認してからの Filter1 及び、試験質量の Yaw 方向角度揺れパワースペクトル密度を測定し、その揺れの RMS が低減されたかを確認する。

実験方法　前章までで構築したサーボシステムでの制御をかけ、十分に時間が経過してから Filter1 の Yaw 方向角度揺れのスペクトルとして、error シグナルのパワースペクトル密度を測定した。試験質量の Yaw 方向角度揺れの測定には光テコを用いて測定を行った。尚、この際、IP は LVDT、及び、加速度計の両方を用いて制御した状態で行った。

結果　この結果が図 6.5 以下の 8 つのグラフである。全ての真空槽において、目的周波数帯より低周波側での RMS の低減に成功した。これにより、ダンピング制御を行うことにより、非制御時よりも十分静かな状態にまで振動を押さえることができることが確かめられた。

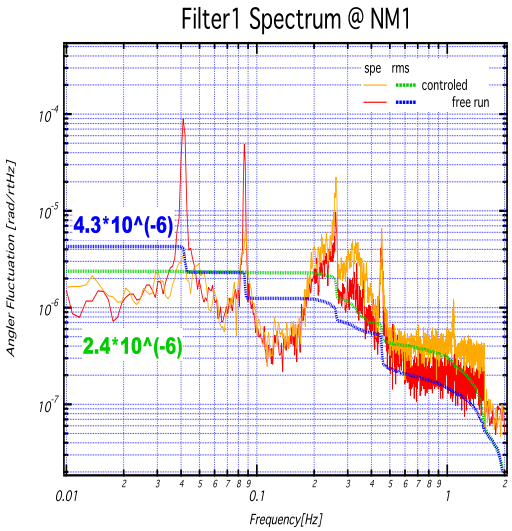


図 6.5: NM1 の制御時スペクトル

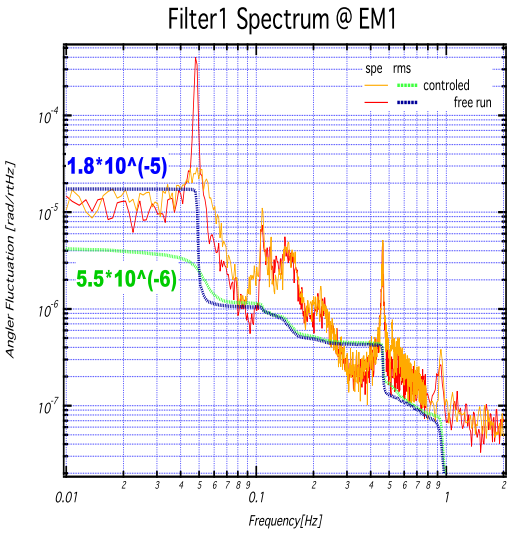


図 6.6: EM1 の制御時スペクトル

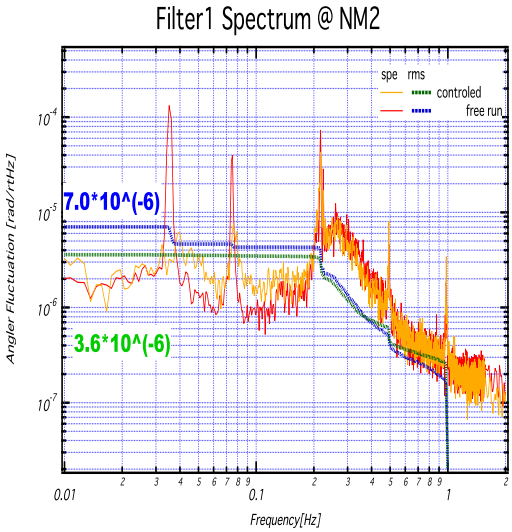


図 6.7: NM2 の制御時スペクトル

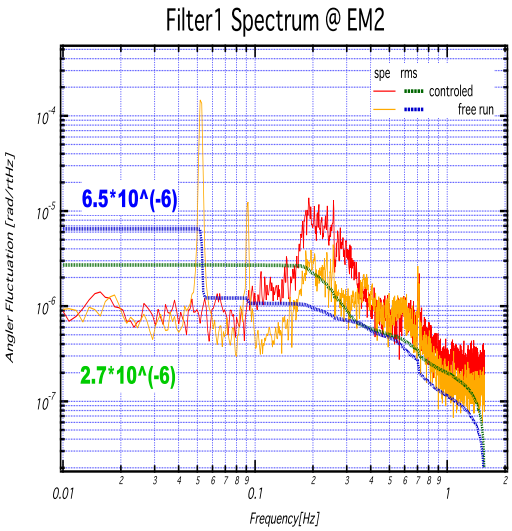


図 6.8: EM2 の制御時スペクトル

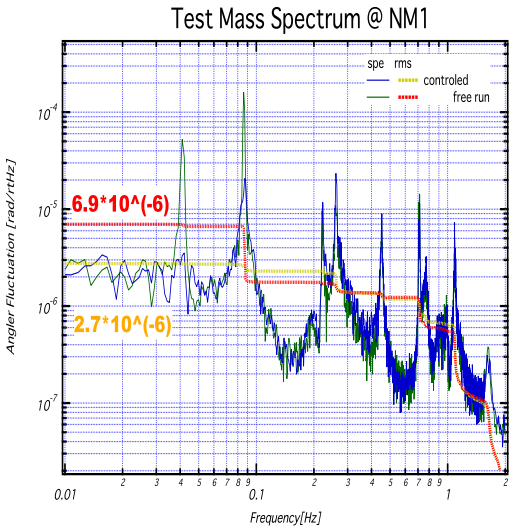


図 6.9: NM1 の制御時スペクトル

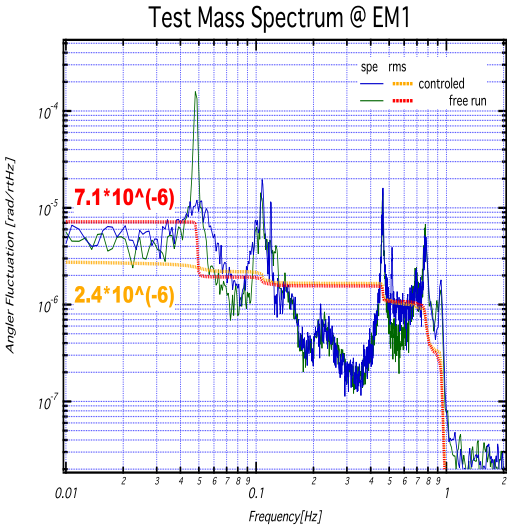


図 6.10: EM1 の制御時スペクトル

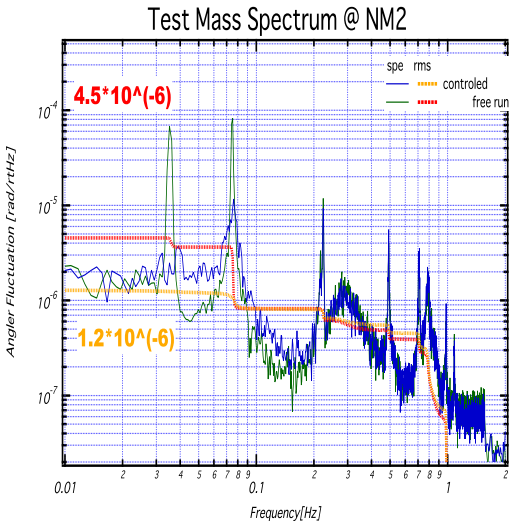


図 6.11: NM2 の制御時スペクトル

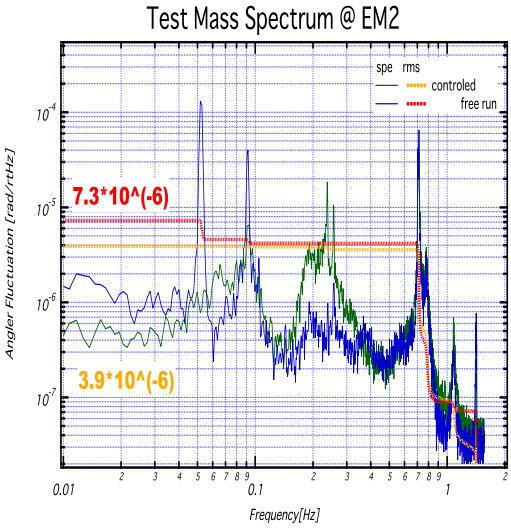


図 6.12: EM2 の制御時スペクトル

第7章　まとめ

7.1　まとめ

Anguler Sensor によるダンピング制御を行い、全ての真空槽において、SAS 内部のトーションモードの実効的な Q 値を一桁以上下げる事を実現できた。これにより、大振幅が発生した際、その振幅を光テコでの制御できる RMS 振幅に落ちつくまでの減衰時間を一桁以上短縮する事に成功した。

このことにより、この Anguler Sensor を用いた制御が、TAMA300 での連続観測において、その Duty Time の長期化への貢献が期待される。

7.2　今後

今回の Anguler Sensor での制御時の定常時スペクトルを見ると、Torsion mode 最低次の共振周波数より低周波側での RMS 振幅は低減されたが、Filter1、試験質量の両方のスペクトルにおいて、一部、非制御時よりも悪化している周波数帯域が見受けられた。

これは一つの理由として、Photosensor の感度のフロアレベルが試験質量の非制御時の定常状態のスペクトルよりも悪いことに起因していると思われる。この帯域の Photosensor のフロアレベルを決めているのは LED の強度雑音であり、本実験ではその向上に対しての工夫を特に行わなかった。[1]LED 駆動回路の工夫などを施すことによって、LED 強度雑音の低減を行えば、ダンピング制御だけではなく、Anguler Sensor の常時制御も可能かもしれない。

また、今回の制御信号は Filter1 と地面振動との間の相対的な Yaw 方向角度揺れを測定したが、Filter1 とプラットフォームとの間の相対的な角度揺れを制御信号として測定し、Filter1 とプラットフォームの間にとりつけられているアクチュエーターを用いての制御を行う事により、下から２番目の Torsion mode のダンピングを更に効率よく行う事ができる。

[1] これは、本実験の目的が Torsion mode のダンピングであり、この帯域に関しては考慮しなかったからである。

付 録A　TAMA300におけるPhotosensor制御の使用方法

TAMA300 の SAS に搭載されている Photosensor を用いて、大きな Torsion mode が発生した際に、ダンピング制御を実際にかけるための使用方法についてここで述べる。

A.1　LabView 上での操作

A.1.1　プログラム

Photosensor 制御を行うプログラムを LabView 上で実行する。

現状では、ダンピングを行う SAS の IP 制御を行うプログラムと Photosensor 制御を行う事ができるプログラムが異なる SAS が存在する[1]。そのような場合は、今実行中のプログラムを一度停止し、下記の表のプログラムを実行させる必要がある。

表 A.1: Photosensor 制御を行うプログラム

	プログラム名
NM1	TRF4
EM1	TRF4
NM2	TRF4
EM2	TRF4

A.1.2　gain の設定

Photosensor 制御サーボのゲインは、非制御時は 0 になっているので、下記のような値を入力する。変えるべきテキストボックスはそれぞれの SAS によって異なるので、写真を参照。

NM1 -0.05

EM1 +0.02

NM2 -0.03

[1] この記述は 2007 年 4 月のものであり、その後 SAS のプログラムが変更されている可能性がある。

EM2 -0.03

また、「PS」というボタンがテキストボックスの横についている SAS に関しては、そのボタンが True の時（緑色に光っているとき）に制御がかかるので、True にする。

A.1.3 制御後

上記の設定にすると、実効的 Q 値が 5 程度になるので、125 秒程で振幅が 2.7 分の 1 程度になる。十分光りテコのレンジ内に入ったならば、ゲインを 0 に戻し、ボタンを False に戻す。

A.2 Photosensor 回路の設定

前節は、Photosensor の回路のダイヤルが設定されていることが前提となっている。制御がうまくいかない場合は、ダイヤルの再設定が必要である。以下で、ダイアルの設定の方法について述べる。

A.2.1 ダイアルの調整

1. まず、Photosensor 駆動回路が NIM の電源に入っていることを確認する。
2. 太い４芯のケーブル（PS1,PS2 とラベルが貼ってある）が、回路の該当部分に接続されていることを確認する。
3. 一番したの「DC」とかかれている２つのレモのピンにレモのケーブルを配線する。
4. オシロスコープでそれぞれのチャンネルの DC 出力を確認し、以下と相違ないか確認する。

   NM1 PS1-5.8V : PS2 -5.7V

   EM1 PS1 7.0V : PS2 -6.1V

   NM2 —

   EM2 —

5. 次にレモのケーブルをその１つ上の段に接続する。
6. 一番上のダイアルを以下の用に設定する。

   NM1 4.25

   EM1 6.15

   NM2 3.71

   EM2 2.53

7. オシロスコープで信号を確認しながら、上から２番目、３番目のダイアルをねじり、オフセットが 0 になるように調整する。

8. 明らかに２つの信号の振幅が異なる場合は、それが等しくなるように、一番上のダイアルを調整する。

9. 最後に、diff と書かれたレモのピンに接続し、正しい差動信号がきているか確認する。

A.2.2 配線

正しい差動信号が得られたら、それをアクチュエーターに返すための AD 変換器に接続する。