

## 京大 3.8m 新技術望遠鏡分割鏡制御のためのアクチュエータの特性評価

長友 竣 (京都大学大学院 理学研究科)

### Abstract

京大が現在計画中の 3.8m 新技術望遠鏡においては正確な分割鏡制御が必要なため、分割鏡を動かすアクチュエータの特性を知らなければならない。今回の実験では特性の 1 つである不感帯と時定数の概数を知る事を目的に、定電流回路によるステップ応答を測定した。得られた結果を、回転運動方程式を仮定してフィッティングすることにより、摩擦によるトルク・粘性によるトルクの係数を調べた。結果、摩擦は 0.1A の電流を逆向きに流したときに相当するトルクを生じることが分かった。したがって、このアクチュエータでは 0.1A 以下が不感帯である。また、時定数は  $\sim 0.1[s]$  であった。我々は将来的に 10Hz 程度のフィードバックを目標としているため、このアクチュエータを使用する場合、動的な制御が必要であることがわかった。

## 1 京大 3.8m 新技術望遠鏡について

京都大学では現在、岡山に 3.8m 口径の光学・近赤外望遠鏡 (図 1) を建設する計画を進めている。大口径望遠鏡がカバーしきれない観測 (突発天体観測など) を行うため中口径の望遠鏡が必要とされており、大口径の望遠鏡との協力によって天文学の新発見が次々となされている。しかし、日本周辺を見た場合 3m クラス以上の中口径望遠鏡はほとんどなく、突発的な天体現象が起きた場合には即座に観測できない可能性がある。3.8m 望遠鏡の建設により、こうした状況が改善され、国内をはじめとする天文学研究がより活発になることが期待される。加えて、中口径の専有望遠鏡は若手研究者の育成に大きな効果をもたらすと期待されていることから、我々大学院生にとっても関係が深い計画である。

この望遠鏡計画には以下の技術開発が盛り込まれている。

- 分割鏡方式 (次世代望遠鏡計画に不可欠)
- (研磨ではなく) 研削による鏡製作 (コストと製作時間の低減)
- 軽量架台 (機動性の向上、コスト削減)

世界では今、30m の超大口径の望遠鏡建設が計画されている。この望遠鏡には様々な新技術の開発が不可欠であり、今も技術開発が進められている。我々

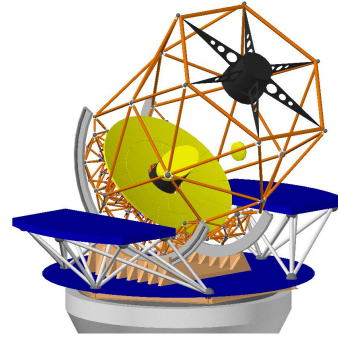


図 1: 京大 3.8m 新技術望遠鏡完成予想図

は、3.8m 望遠鏡の技術開発によって将来の超大口径望遠鏡計画に資することも目的としている。

## 2 分割鏡制御

分割鏡の正確な制御は、3.8m 望遠鏡や次世代の超大口径望遠鏡に不可欠な技術である。一般に、望遠鏡の波面収差は Rayleigh の判定条件

$$\Delta \leq \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

を満たせば許容される。波面誤差は鏡面形状誤差の 2 倍となること、及び副鏡・第 3 鏡による波面誤差が加算されることを考慮すると、分割鏡の位置合わせに許される位置誤差は  $d \sim \lambda/20$  となる。観測波長である  $\lambda \sim 1.65\mu\text{m}$  の近赤外線においては  $d \sim 80\text{nm}$  となる。

分割鏡は鏡の裏にあるアクチュエータを、隣接する鏡間の段差を測る変位センサによってフィードバックをかけながら動かすことにより制御する。これは、最初に行う位置合わせだけでは、重力変形や熱変形、風による変形（～数 Hz）などを取り除けないためである。3.8m 望遠鏡は 18 枚鏡構成であり 1 枚の鏡につき 3 個のアクチュエータを使用するため、変位センサからのデータを見ながら合計 54 個のアクチュエータを即座に制御して、上記精度を達成する必要がある。そのためには、アクチュエータのモータの特性や軸受けの摩擦なども測定し、それらも計算に入れた制御ソフトウェアの開発が必要となる。

そこで今回は、アクチュエータに 3 値矩形波の電流を流し、このときのステップ応答を測定した。この測定結果から、アクチュエータが持つ摩擦係数と粘性抵抗の係数を推定した。

### 3 実験の方法

評価したアクチュエータはハーモニックドライブシステムズ社の LAH-46-1002-F-L である。これは DC モータ式で、連続的なモータの回転をギアで減速し、その出力をボールねじに伝達することで軸方向の微小な変位を実現する。回転の角度は、軸に取り付けられたロータリーエンコーダで読み取ることができる。

測定システムの概要を図 2 に示す。測定ではまず、任意波形発生器から電圧の 3 値の矩形波 ( $0, +i, 0, -i$ ) を一区間 1 秒で 10 回出力した。電流値  $i$  は 0.4A、0.3A、0.2A、0.1A、0.05A、0.025A で測定を行った。出力された波形を電流の 3 値矩形波へと変換し、アクチュエータ内部のモータへ流した。電流計でモータに実際に流れた電流を測定し、エンコーダのカウント値、変位センサの出力値とともに 1kHz の sampling rate で取得した。なお、これらの 4 つの機器は、PC からのトリガ信号により同期するようにした。

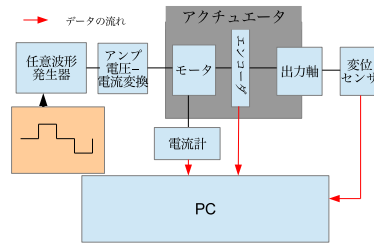


図 2: 測定システムの概略図。PC からの指令により 3 値矩形波状の電流をモータに流す。このとき、実際にモータに流れた電流値、内蔵エンコーダの値、出力軸の変位を測定した。

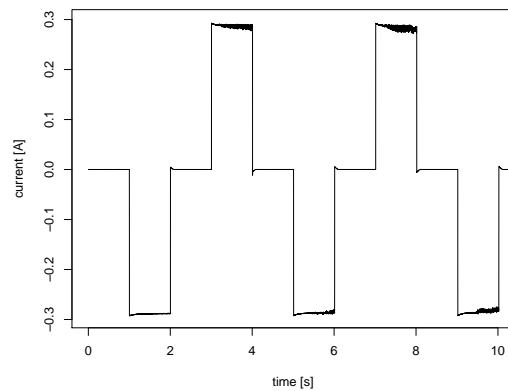


図 3: モータに流れた電流の時間変化 (2.5 周期分)。

### 4 結果・考察

測定した電流値、エンコーダ値、出力軸の変位を図 3～5 に示す。ここで、アクチュエータ出力軸の回転運動の方程式を考える。ギアやボールねじ部での摩擦などによる摩擦力によるトルクを  $N_{\text{fric}}$ 、角速度に比例して回転を妨げる方向に働くトルク（粘性トルク）を  $N_{\text{visc}}$  とすると、コイルの回転運動の方程式は以下のように表せる。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = N_{\text{Amp}} - N_{\text{fric}} + N_{\text{visc}} \quad (2)$$

$N_{\text{Amp}}$  はアンペール力によってコイルにかかるトルクであり電流に比例するから、モータコイルの慣性モーメントを  $I$ 、流れる電流を  $i(t)$  とすると、 $N_{\text{Amp}} = IBi(t)$  と表せる。また、 $N_{\text{fric}} = IC$ 、 $N_{\text{visc}} = ID\dot{\theta}(t)$

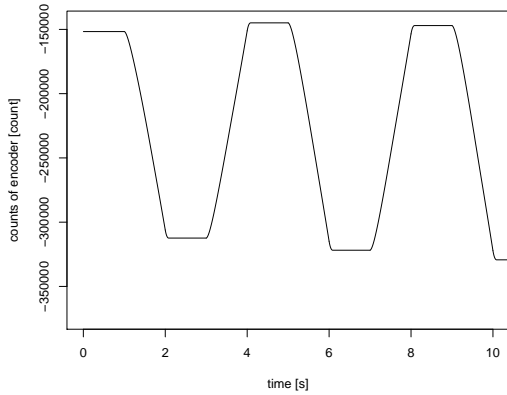


図 4: エンコーダの読み値の時間変化 (2.5 周期分)

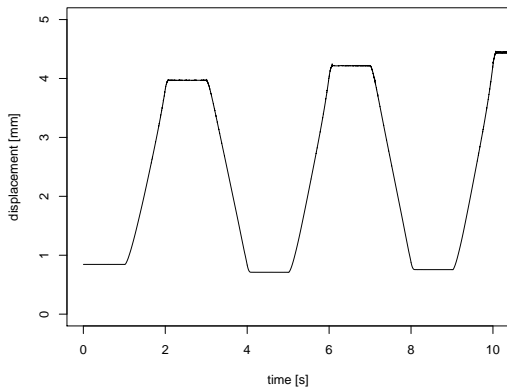


図 5: ボールねじ先端の変位の時間変化 (2.5 周期分)。変位センサーの読み値を変位に換算した。

(ただし  $\theta(t)$  はモータコイルの回転変位角) とし、(2) 式を整理すると

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = Bi(t) + C + D\dot{\theta}(t) \quad (3)$$

となる。突き出る or 縮む動作 1 回ごとのデータに対して最小二乗法によりフィッティングして、係数  $B$ 、 $C$ 、 $D$  の値を求めた。

各係数のフィッティングの結果を図 6~8 に示す。これらから求めた  $B$ 、 $C$ 、 $D$  の値を用いてモデル曲線を作り、 $\dot{\theta}$  の測定データ (1 回目の縮み時) と比較した図を図 9 に示す。

実際のモータの回転変位はデータと  $x$  軸とで囲ま

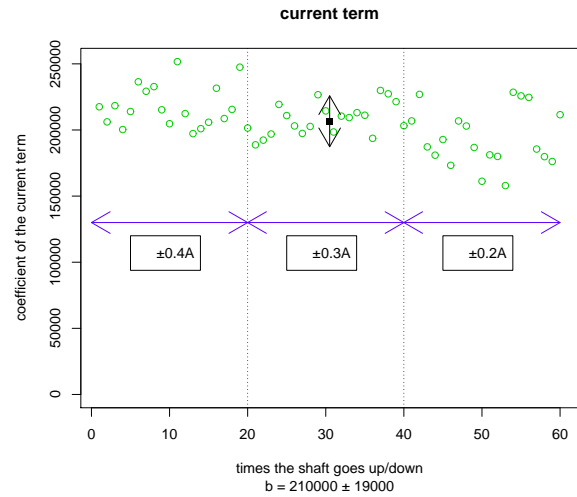


図 6: 電流の係数 ( $B$ ) の値。四角でプロットした点は平均値、矢印は  $\pm 1\sigma$  を表す。

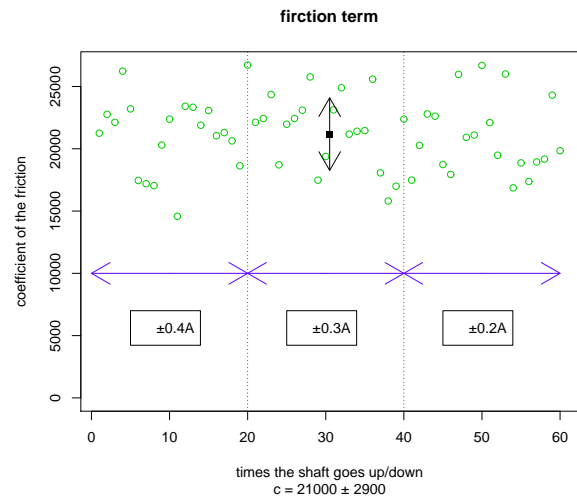


図 7: 摩擦項 ( $C$ ) の値。四角でプロットした点は平均値、矢印は  $\pm 1\sigma$  を表す。

れる面積であるが、モデル曲線は実際のデータより 10%弱大きい程度であるため、今回求めたモデルのパラメータはフィードバック制御を行う際にも問題のないものと思われる。

また、モータに流れる電流によるトルクと、摩擦

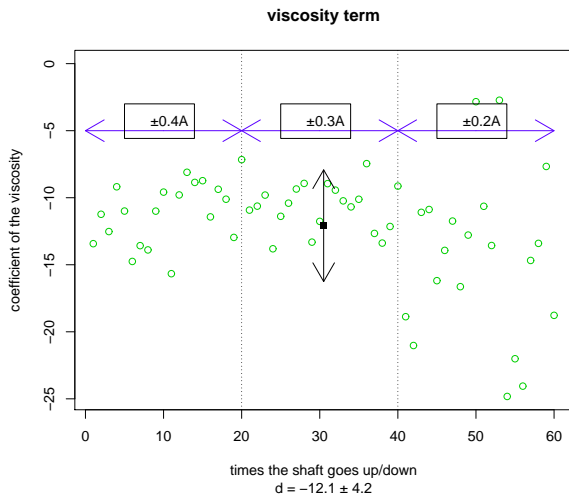


図 8: 粘性項の係数 ( $D$ ) の値。四角でプロットした点は平均値、矢印は  $\pm 1\sigma$  を表す。

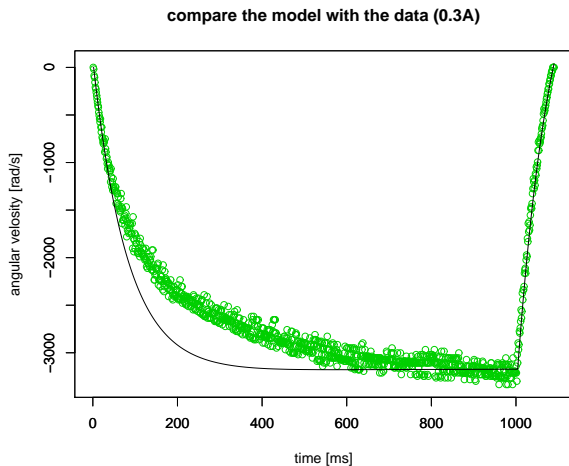


図 9: モデル (曲線) と測定で得た  $\theta$  のデータ (緑の丸) との比較。

によるトルクの比は

$$\frac{C}{Bi(t)} \sim 0.1 \quad (4)$$

よって、摩擦によるトルクは  $i(t) \sim 0.1[\text{A}]$  のときの駆動トルクに相当する。これは、 $0.1[\text{A}]$  以下の電流値ではモータは静止摩擦に妨げられて回転できないこと (=  $0.1\text{A}$  以下は不感帯であること) を意味する。

角加速度は  $\exp(tD)$  で減衰していく。ちょうど初期値の  $\frac{1}{e}$  になる時間は、 $\tau = |1/D| \sim 1/12.1[\text{s}]$  であった。制御対象の一つである風による振動は数 Hz ほどの周波数である。アクチュエータの時定数はこれと近い値となることから、動的な制御が必須となることが分かった。周波数応答などの測定により、さらに正確なモデルの構築が要求される。

## 5 まとめ

アクチュエータの定電流回路によるステップ応答を見るために、モータに流れる電流、エンコーダの読み値、出力軸の変位を測定した。そのデータをもとに、アクチュエータの特性の一つであるボールねじなどによる摩擦抵抗、および粘性抵抗をアクチュエータの出力軸の回転運動方程式を用いて求め、不感帯と時定数を求めた。結果、不感帯は  $\sim 0.1\text{A}$  以下、時定数は  $\sim 0.1[\text{s}]$  であると分かった。したがって、 $10\text{Hz}$  程度のフィードバックで制御するには、より正確にアクチュエータの特性を知っておく必要がある。

今後、周波数応答を調べて、より正確なモデルを構築することが課題である。

## Reference

望遠鏡ワーキンググループ. 2010. 岡山 3.8m 新技術光学赤外線望遠鏡計画書