

分割鏡制御系 — システム構成 I — 制御システム全体構成

岡山新技術望遠鏡グループ

平成 23 年 7 月 1 日

目次

1 概要	1
2 システム全体の分割	1
3 ノイズの波及	3
3.1 エッジセンサー読み出しノイズの影響の把握	3
3.2 制御におけるエッジセンサーノイズの感度	3
4 まとめ	4

1 概要

分割主鏡制御システムは、望遠鏡上のさまざまな情報を参照しながら 54 軸のアクチュエーターをリアルタイム制御する、多点入力・多点出力の制御系であり、このままでは取り扱いが難しい。このため、これらのシステムを各種の解析により分解することで、より構築しやすく現実的なシステムとなる (全体) 構成を検討する。

これまでの解析により、セグメント間の位置の差を測定するエッジセンサーを入力とし、各アクチュエーターへ与える制御量を導出する解析系は、実際の望遠鏡上での制御パラメータ測定方法を含めた形で求められている。このため、これを中心として、それ以外の部分の導入を行うという方針で検討を行う。

2 システム全体の分割

制御系は、60 点前後になるエッジセンサーを入力データとして、54 点のアクチュエータへ出力する機構になる。機械系を含むこれらの制御系のシステムは図 1 と表される。このうち、制御系で実際に取り扱う (取り扱える) 範囲は、"Sensor read" で読み出されるエッジセンサーの読み出し値を入力とし、"Actuator" を制御するための制御位置を出力とする部分までとなる。

ここで、アクチュエータの駆動に制御系で通常行われるような PID 制御のような方式を採用することを考えた場合、センサーの読み出し値からアクチュエータ制御量への変換と合わせて行おうとすると、次のような行列方程式を扱うことになる。

$$\text{pos}_{\text{actu}} = \left((u_1(t), \dots, u_n(t))^T I \right) \cdot V \cdot \left(\text{eigen_value}^{-1} \cdot P(t)^T \cdot I \right) U^* \cdot \text{pos}_{\text{gapsns}}$$

ただし、 U は SVD の U 行列、 $P(t)$ は特異ベクトルごとに導入する制御 (応答) 関数、 V は SVD の V 行列とし、 $u_i(t)$ はアクチュエータごとの応答関数とする。いま、全ての軸に対して $u_i(t)$ が同じ関数形で同じパラメータを持つ場合には、この行列方程式の時間に依存する部分はまとめて表記でき

$$P'_i(t) = P_i(t) \cdot u_i(t)$$

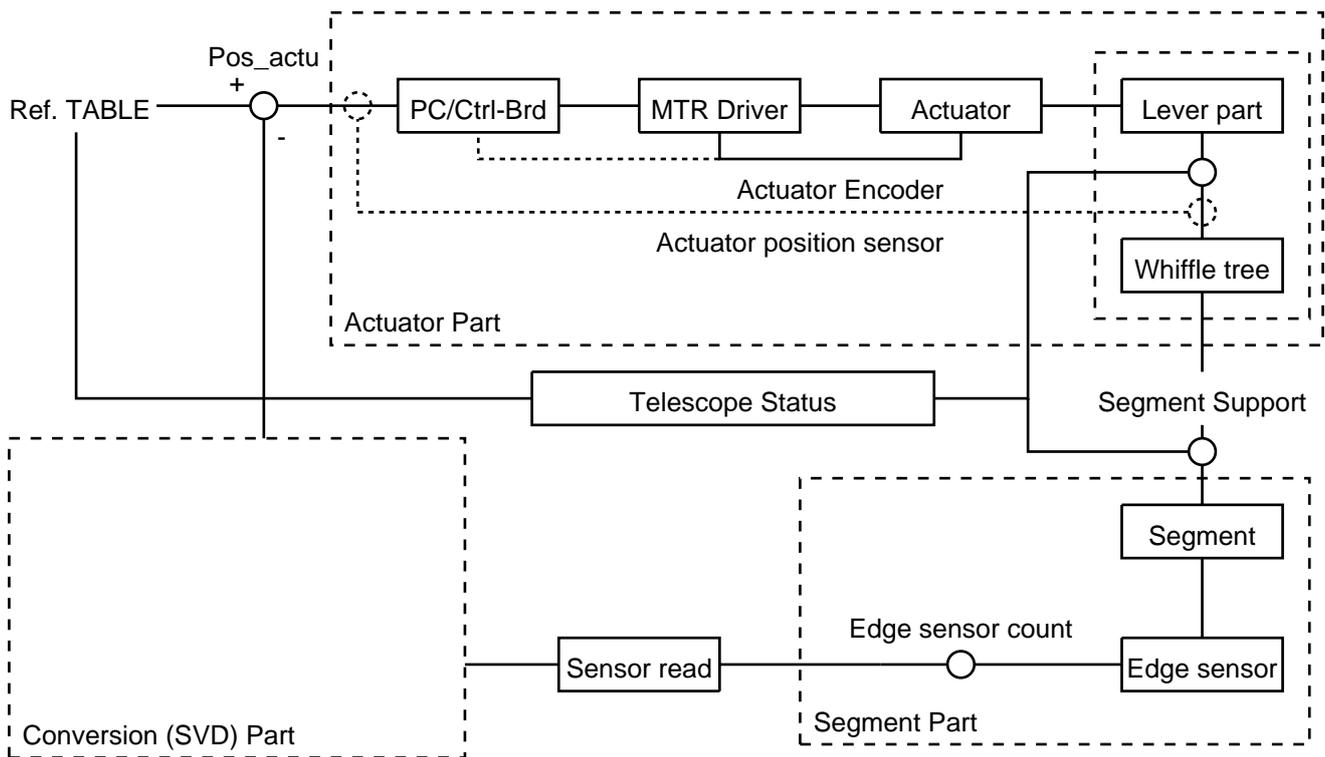


図 1: 制御システム全体の構成

を利用して

$$\text{pos}_{\text{actu}} = U \cdot \text{eigen_value} \cdot P'(t) \cdot V$$

$$\text{pos}_{\text{actu}} = V \cdot (\text{eigen_value}^{-1} \cdot P'(t)^T \cdot I) U^* \cdot \text{pos}_{\text{gapsns}}$$

となるが、現実にはそういう状態になることはありえず異なる関数形で表記されることが考えられる。この場合、このように単純な式変形はできず、SVDのV行列の表式を考慮に入れた応答関数の行列を取り扱う必要があり、かつ縮退した特異値に対応する特異ベクトルについては特別な取り扱いが必要である。よって、このような応答関数込みの行列方程式を利用した制御は実際は非常に困難であり、この二つを統合することは避けることが望ましいといえる¹。

よって、今回の制御では

- エッジセンサー読み出し値からアクチュエータ(理想)制御位置への変換
- 54本独立なアクチュエータの(理想)制御位置を参照しながらのアクチュエータ制御

の二つに完全に分離し、それぞれの中で制御方式を最適化することを検討する。前者については特異ベクトルに分解したパラメータ空間上での最適化を検討し、後者については通常のモーター制御などと同じくPID制御方式などを適用することを検討する。

¹一般的に行われている多点入力・出力の制御においては、多点入力を多点出力にあう形でできるだけ変換を掛けてから、出力の各軸に対してPID制御を行うという方式が採用されていることが多いようである。

3 ノイズの波及

3.1 エッジセンサー読み出しノイズの影響の把握

エッジセンサーの読み出しノイズがどのように特異ベクトルや特異値による変換を経由してアクチュエータに伝播するかの情報は、アクチュエータの制御の参照値となる(理想)制御位置の誤差を最小化するために非常に重要となる。

まず、エッジセンサーの読み出しノイズが正規分布に従うと仮定し、それぞれ分散が σ_i^2 となる正規分布で表されているとする。この場合、エッジセンサー読み出し値を特異ベクトルに分解した各パラメータごとの分布は

$$(\text{err})^T = (G_1(t), G_2(t), \dots, G_n(t))^T \cdot U^{-1}$$

と記述される。つまり、ある特異ベクトル i に対して

$$\text{err}_i = \sum_{\forall j} G_j(t) U^{-1}_{ij}$$

である。いま、全てのエッジセンサーについてノイズの分布が同じパラメータ σ で表される $G(t)$ であるとする、 err の分散 $V(\text{err})$ は

$$V\left(\sum_{\forall j} G_j(t) U^{-1}_{ij}\right) = \sum_{\forall j} V(U^{-1}_{ij} G_j(t)) = \sum_{\forall j} (U^{-1}_{ij})^2 V(G_j(t))$$

となり、特異ベクトルの定義から単位ベクトルでありノルムは1であるので

$$V\left(\sum_{\forall j} G_j(t) U^{-1}_{ij}\right) = V(G(t)) = \sigma^2$$

と表される。つまり、全てのエッジセンサーの読み出しノイズが均質であり、同じ分散を持つ場合、特異ベクトルに分解した各特異ベクトルのパラメータにおいてもノイズは均質となる。よって、アクチュエータ制御量の出力においては、制御量への変換の係数である特異値の逆数だけウェイトがかかったノイズ分布となる。

つまり、低い特異値を持つモードはその逆数だけ大きなエラーを最終的なアクチュエータ制御量に及ぼすといえる。ここから、時間平均項²を入れて全体の制御エラーを最小化するためには、各特異ベクトルのパラメータに分解された段階で、その後のアクチュエータ制御量への変換の前に特異値の逆二乗に比例するサンプリング分だけ時間平均(もしくは移動平均)を行うと、ノイズの完全均質化が可能であるといえる³。

3.2 制御におけるエッジセンサーノイズの感度

アクチュエータごとの制御量について、理想制御量からの分布の分散を均質化するようなエッジセンサー読み出し値への要求について考える。つまり、あるエッジセンサーについてアクチュエータの制御量へのノイズとしての影響が小さいことがわかっていれば、多数のエッジセンサーのうちで精度が悪いものを利用するような最適配置が可能になると考えられ、この影響について調査する。

まず、前節と同じくアクチュエータの制御量から特異ベクトルごとのパラメータへの変換は、特異ベクトルが単位ベクトルでありノルムが1である。つまり、均質なアクチュエータ制御量の誤差を実現するためには、各特異ベクトルについて、その特異値に比例したノイズが許容される。この許容度の分布を U 行列で変換することで、エッジセンサーごとのノイズについての感度を求めることが可能になると考えられる。

²たとえば、エッジセンサーの読み出し部分で行うようなある一定の時間平均や移動平均値を出力とするような項。

³ただし、特異値が小さな特異ベクトルのモードはアクチュエータの分布上で Zernike の低次項となり、PSF への影響は小さいと考えられる。このため、単純にノイズを完全均質化するような操作をここで行うべき下は十分に議論・検討をすべきである。

4 まとめ

分割主鏡制御においては、その制御システム全体を

- エッジセンサー読み出し値からアクチュエータ (理想) 制御位置への変換
- 54 本独立なアクチュエータの (理想) 制御位置を参照しながらのアクチュエータ制御

の二つに完全に分離し、それぞれにおいて制御方式を最適化する。前者については特異ベクトルに分解したパラメータ空間上で、対応する特異値を指標とした誤差に対する反応を考慮した時間平均、もしくは移動平均処理を行い、後者については通常のモーター制御などと同じく PID 制御方式などを適用することを検討する。