京大岡山3.8m新技術望遠鏡の開発XVI: 主鏡位置制御システム開発の進捗状況

○下農淳司(ナノオプト)、森谷友由希、岩室史英(京都大学)、他京大岡山3.8m新技術望遠鏡計画WG

18枚のセグメントにより構成されている京大岡山3.8m新技術望遠鏡の主鏡全体を1枚鏡として機能させるためには、各セグメントを理想的な配置に対して50nm程度の精度で制御し続ける必要があり、絶対位置と向きを測定し初期位置合わせを行うための機構と相対位置をリアルタイムにフィードバック制御する機構を開発している。これらの機構がセグメントに対する擾乱に対して安定的に制御可能であるためには、制御系への入力となるセグメント間相対位置を測定する非接触センサー出力値のノイズによる影響の見積もりと、制御可能性・容易性に直結する測定点のセグメント全体における配置が重要である。これらの点について、計算機モデルによるシミュレーターを構築し、実際に実現可能と考えられるさまざまな配置や測定系について検証を行っている。

前回まではすべてのセグメントが一つの平面状に存在するような近似を行ったシミュレータの開発・調査について発表していたが、セグメントの横ずれ(並進や回転)に対する影響をきちんと把握するためには近似を行わない完全な3次元のシミュレータが必要とされる。今回は、この3次元シミュレータによって判明したギャップセンサー配置への制限についての現状報告を行う。

分割主鏡制御シミュレーターの目的と概略

分割主鏡制御の観点からのギャップセンサーの最適配置の調査や、分割主鏡位相あわせの際のノイズに対する制御残差の把握などのため、分割主鏡3Dシミュレーターを作成している。

概念・アルゴリズム

ギャップセンサー・アクチュエーターの配置は決まっている
=> **アクチュエーター位置からギャップセンサー読み値は線形変換**で近似可能
全てのセンサーとアクチュエータの間の制御値を代表する線形変換行列
実機上ではアクチュエータを個々に駆動することにより行列を埋められる

ただし以下の点を仮定として近似し、これらについては擾乱解析を行わない
- 鏡材は変形しない平板であるとする
- アクチュエータは鏡材背面に対して垂直方向にのみ影響する (横ずれしない)
  実際にはホイッフルツリーと鏡材は完全固着でないので仮定は成立？
- ギャップセンサーの測定面はその中心を代表点として値が求まる (後述)

この変換行列はあるギャップセンサー配置に対する特性行列である
この行列の評価により、ある配置における制御のパフォーマンスが判断できる
評価は**SVD (特異値分解)** によって特異ベクトル・特異値を求めることで行う
- 行列形式であるので、行列の特異ベクトル・特異値で系を代表できる
- 特異値の絶対値がフィードバック時ゲイン、相対比が制御の容易さの指標
- 特異値が非常に小さい特異ベクトル(縮退)は補正制御が困難
- 特異値分解から逆変換行列も求まり、アクチュエーター制御量を計算可能

これらのことから、さまざまな配置を以下の点で評価する
- どのような制御モードが縮退しているのか
- どの程度の特異値のばらつきがあり、制御が容易となるのかどうなのか

ギャップセンサー読み出し量の算出アルゴリズム

ギャップセンサーを3D上で構成するため、読み出し値に以下の仮定を行う
- 測定ヘッドの中心点をヘッド代表点とし、その点に対しての距離が測定される
- 対抗板までの距離はヘッド代表点から最も近い対抗板平面上の点までとする
  対抗板に対する垂線ベクトルの方向での距離といえる

3Dシミュレータ向けにはすべての座標を望遠鏡全体の座標系で計算する必要
- セグメントの横ずれの影響は各セグメントのローカル座標系で計算
- 隣のセグメントの対抗板に対する距離計算は望遠鏡全体座標系で行う

ギャップセンサーの取り付け向き (測定の方向)

ギャップセンサーを3Dで構成したため、取り付け方向についても検証可能に
- 取り付け方向はセグメントの移動に対する測定感度にも影響する
- 取り付け方向によってはセグメント横ずれにも測定感度がでる

考えられる取り付け方向は以下のようなものがある (全て実装し選択可能にする)
- セグメント背面に平行にギャップセンサーを取り付ける
  対抗板の取り付けが最も簡単であり安定する
- セグメントの鏡面に平行にギャップセンサーを取り付ける
  横ずれによる鏡面位置変化に対してギャップセンサーの感度がでる
- 望遠鏡の主軸に垂直にギャップセンサーの対抗板を取り付ける

セグメントの横ずれ(並進・回転)の取り扱い

セグメントの理想位置からの横ずれは最終のPSFやギャップセンサーによる制御量測定に影響が出る。実装上の評価は以下のように行った。
- アクチュエータによる制御点はセグメントから見ると移動する
- ギャップセンサーはセグメントにしたがって移動する

内環の取り扱い

内周セグメントの内縁に沿って、リング状の構造物(内環)を設置する計画への対応
内周セグメントのみによる駆動試験時には測定点を増やすのに必須
内・外周そろったとしても設置している利点がある可能性

内環の実装は次のような仮定を置くことにした
- 内環は”solid”なもので、センサー固定点間の相対位置変化は発生しない
  6点の場所に対して保持方式を最適化することにより実現できるはず
- 内環は3点でトラスに固定されている
  この3点に仮想的なアクチュエータがあるとして取り扱う

ステップシミュレータ (時間発展シミュレータ) 機能

ギャップセンサーやアクチュエータなどの各種の応答時間は考慮しない時間発展を追いかけられるようなステップシミュレーターの機能を追加する

目的には以下のようなものがある
- 複数回の補正動作を経た後で擾乱の発展の様子を調べる (時間安定性)
- 大規模変形が入った後の補正の収束を調べる (指向方向移動時の収束性)

擾乱としては次のようなものを入れたシミュレートを行うことを目標とする
- ギャップセンサー読み出し値にランダム成分 (読み出しノイズ)
- アクチュエータ制御値にランダム成分
- ランダムに選択されたアクチュエータに何らかの値を加える (トラス変形など)

なお、シミュレータでは実機と異なり、理想形 = “変形成分を含めた全アクチュエータ現在制御位置が0”となる。

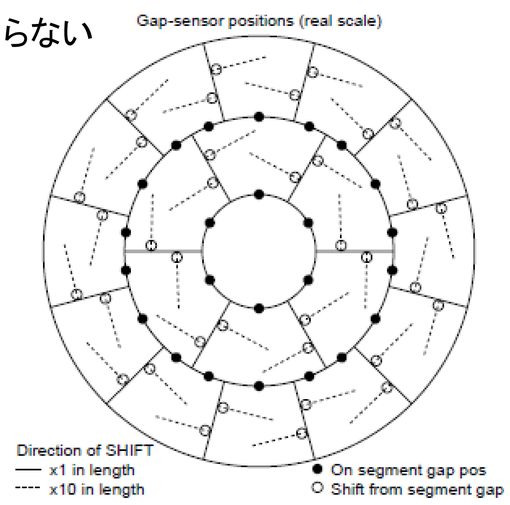
最適なギャップセンサー配置

以下の条件を満たすことが望ましいと判明した

- **60度・120度ごとの回転対称配置 (内周・外周各々ですべて同じ配置)**
- **内周間・外周間はセグメント間中央でなくセグメントの内側に配置**
- **同じ辺上のセンサーは違うセグメント内に入るように配置**
- **内環はあったほうが望ましい (内周セグメントに対して1つずつ配置)**
- **内・外周間は一つのセグメントペアに対して一つずつ配置**
- **ギャップセンサーの測定面は鏡面に平行に配置**

また、以下のことも判明した
- 円周状の辺上での位置はどこでもあまり変わらない

これらの条件を図示すると右図のようになる。

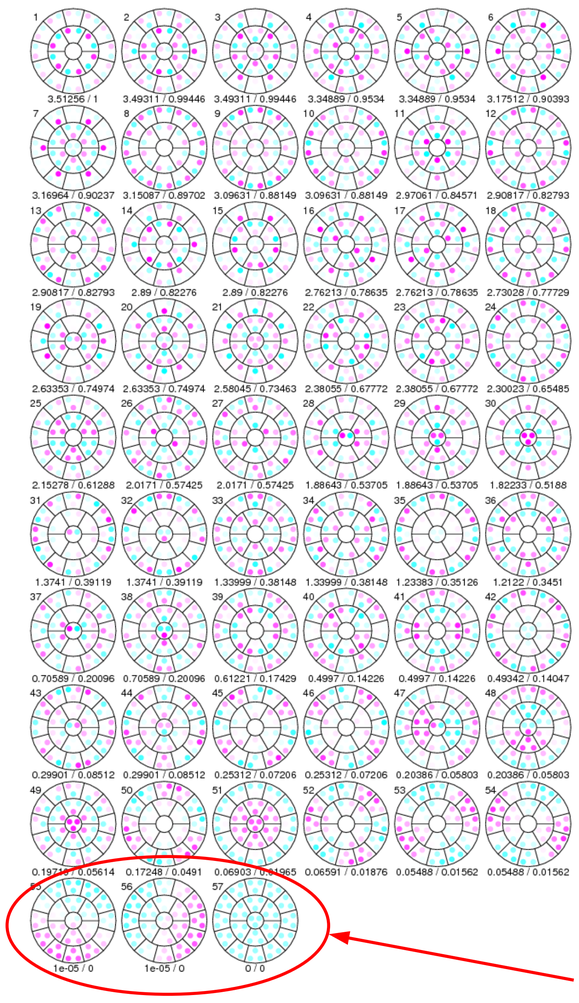


上: ギャップセンサー配置図
丸が一つのギャップセンサーの配置場所を示す。黒丸はセグメント間中央点、白丸は中央からずれたものを示す。

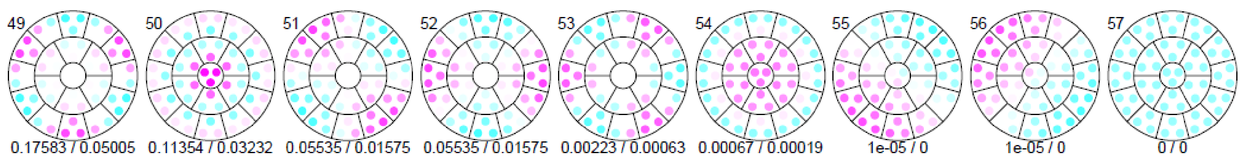
左: 上の配置に対する特異ベクトル・特異値ペアの図示

小さい分割主鏡の図がそれぞれ一つの特異ベクトルを示し、小さい赤・青はアクチュエーターの駆動量(3倍スケールで表示)を示す。各ベクトルは正規直交ベクトルなので、ベクトルノルムは1.0である。下の数字は左が特異値、右が最大特異値との比で、1e-5以下は0であらわしている。

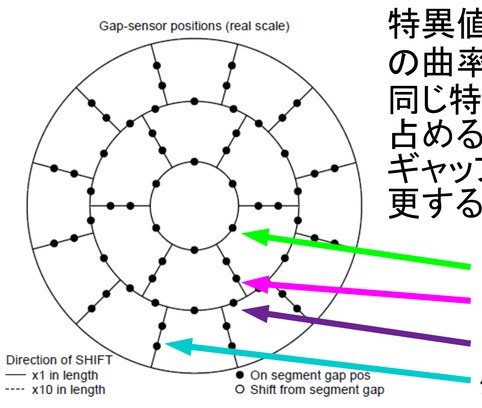
配置に対する特異ベクトルの例



ギャップセンサー配置場所による変換行列への影響



特異値が小さな制御しにくいモードはZernike多項式展開の曲率・4次・6次の形状に似た形状を取り、2,4次などの同じ特異値を示すペアが全特異ベクトルの大きな割合を占める
ギャップセンサー配置場所により以下のように配置を変更することにより影響するモードが異なる

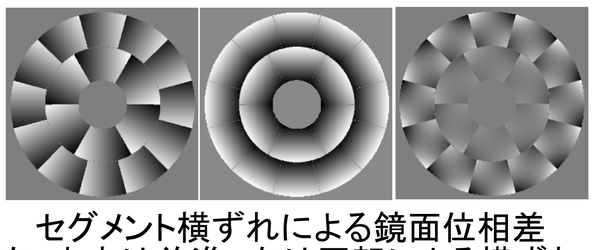


内環：中央点からずらす = 6次 (微小)
内周間：辺上からずらす = 曲率・6次
内・外周間：中央点からずらす = 6次 (微小)
外周間：辺上からずらす = 曲率・6次

セグメントに対する配置を回転対称から崩していくと、ペアとなっている特異ベクトルの特異値が異なる値になりペアが崩れる傾向が見られた
=> 以下の横ずれの議論からも**回転対称を崩す配置は望ましくない**といえる

セグメントの横ずれによる影響

セグメントの横ずれは、PSFに影響を及ぼす鏡面位相差の変化(左下図)を引き起こすだけでなく、ギャップセンサーにも影響を及ぼし特異ベクトル・特異値の分布を変える結果になる。この横ずれによる影響を特異ベクトルの観点から検証した。



セグメント横ずれによる鏡面位相差
左・中央は並進、右は回転による横ずれ

1. 特異ベクトルペアについては2つのベクトルによる平面内で変化するだけで特異値はほぼ変化しない
2. 並進が変化しても影響は小さい
3. 回転の変化は特異ベクトルに大きく影響し、大きな回転角では特異値も変化