

分割主鏡シミュレーター 第3版バージョン6 Result 3 並進・回転による特異ベクトルの変化の影響についての考察 II

岡山新技術望遠鏡グループ

平成 23 年 2 月 22 日

目次

1 概要	1
2 特異ベクトルの変動の把握	2
2.1 変動のサンプル	2
2.2 サンプルから判明する特徴	2
2.3 評価の方法	3
3 全セグメントを並進・回転させたときの影響	3
3.1 基準配置における結果	3
3.2 基準配置でギャップセンサーを背面に垂直に定義した場合	4
3.3 ずらしたギャップセンサー配置 (c12) に対する確認	5
3.4 ずらしたギャップセンサー配置に対して回転角のみ変化させた場合 (c12a)	5
4 まとめ	12

1 概要

分割主鏡の各セグメントにおける基準位置からの併進・回転による制御量への影響について、前の検討 (Result 2) ではセグメント 1 枚もしくは隣り合う 2 枚などの少数のセグメントに対しての変化を調べたが、実際の望遠鏡では全セグメントに対して望遠鏡の AZ/EL の駆動による変動が加わると想定される。変換行列の要素をそれぞれ測定していく方法で代用できるギャップセンサー配置位置の測定とは異なり、実機上ではセグメントの並進・回転の状況は特別なセンサーや測定工具を利用しないと把握できない。また、変動は AZ/EL の状態に対して規則的である可能性もあるが、状態の過去の履歴に影響されることも考えられ、実際の制御の上ではランダムに変動する値と認識しておくことが望ましいといえる。このため、セグメントの並進・回転の影響がどの程度であるかを把握し、制御能力に影響が有意に及ばないようにするためにはどのような条件が必要であるかを把握しておくことが重要となる。

シミュレータに対し、さまざまな並進・回転のモードを試験できるように改造を加え、全セグメントに変動を加えた場合にどうなるかについての試験を行った。この結果、ある変動方向に対して完全に理想的な位置にいる場合を除いて、セグメント並進の変動の影響はほとんど見られず、セグメント回転方向の変動は制御に利用する特異ベクトルに対して影響を及ぼすことが判明した。また、その影響について、30 度 (60 度) 回転対称となるギャップセンサー配置を維持している限りはペアとなる特異ベクトルはペアのまま変化することもわかり、この関係を制御方式の検討に利用することが可能であるといえる。

2 特異ベクトルの変動の把握

まず、特異ベクトルの変動を把握する方法を検討する。

2.1 変動のサンプル

いま、簡単に影響を判別するために特殊な例として、セグメント回転を理想的な 0.0 状態に固定したまま、セグメント並進量を回転変化させたときについて調べる。このセグメント並進量の変化は、初期値を移動距離が同じ ($0.2\mu\text{m}$) で方向がセグメントごとにランダムに異なるような値に設定し、その方向を全セグメントに対して 5° ずつずらしていくような変化を加える。つまり、ある j 回目の試行でのある i 番目セグメントに対する並進変化量は、距離 $0.2\mu\text{m}$ 、方向 $\text{random}_i + 5 \times j$ であらわされるような量として定義する。また、ギャップセンサー配置は全てのギャップセンサーがセグメント間の中央にくる基準配置とし、ランダム分布には一様分布を適用する。

ある試行における特異ベクトルの変化の指標としては、最初の特異ベクトル分布を基準分布とし、その特異ベクトルとの間で内積値最大の条件の元¹で対応する特異ベクトルとの内積値を利用する。また、全体での追加の指標として、全特異ベクトルに対してある 1 回の試行での内積値の平均も計算する。なお、一つの連続した試行における変化は、初期配置がランダムであることから試行によって変化すると考えられるため、全体的な変動の様子のみに着目する必要がある。

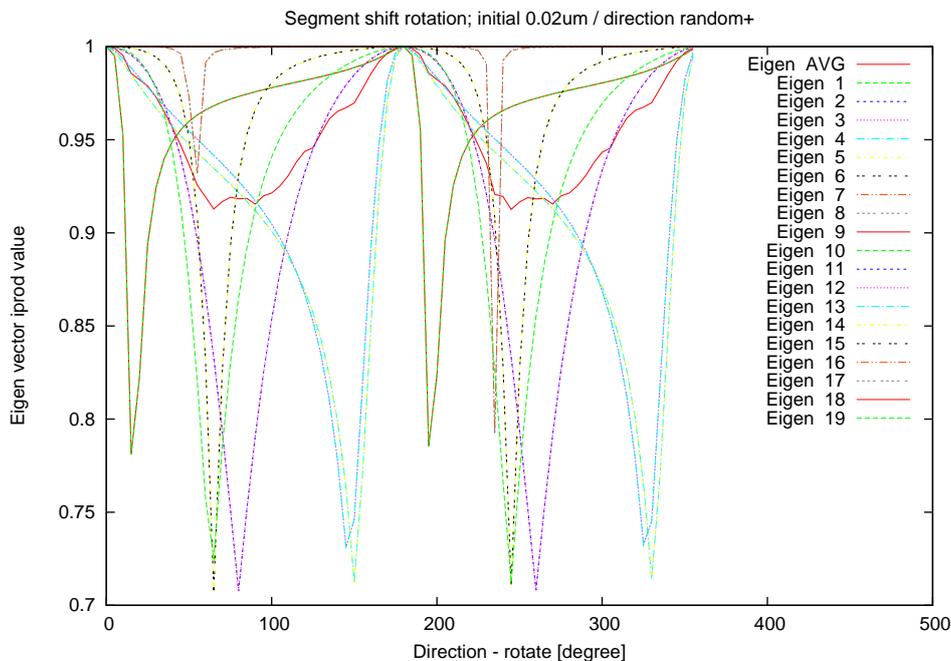


図 1: 特異ベクトルの内積値変化 (def-0) : AVG, 1 – 19

2.2 サンプルから判明する特徴

グラフから、内積値の変化について以下のような特徴があることがわかる。

- ペアとなる特異値は同じ値の変動を示している
- ペア間での変動の様子や底を示す位置はまったく異なり、平均では量の変動は代表できない
- 底における特異値は特異ベクトルのペアによって異なる (が、 5° 単位で動かしていることが原因の可能性もある)

¹条件の定義と判定アルゴリズムは前回のレポートを参照。

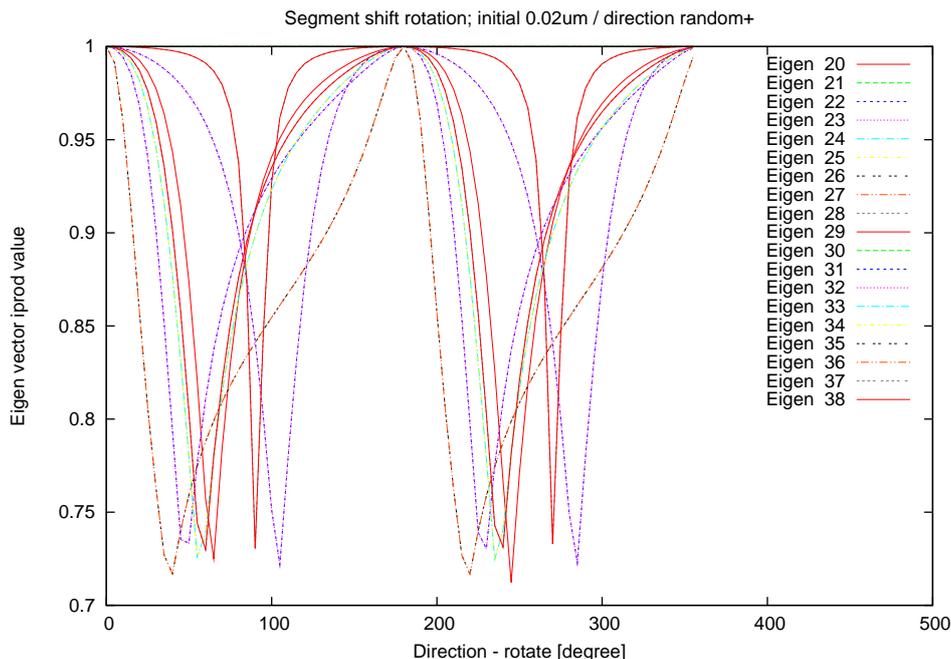


図 2: 特異ベクトルの内積値変化 (def-0): 20 – 38

なお、急な"底"がほぼ全てのグラフに出現するが、これは三角関数 $\cos \theta$ を 45° のところで折り返したグラフと類似するものであると考えると理解できる。

2.3 評価の方法

前節の結果から、各特異ベクトルのペアにおける値の変化を追跡するよりは、内積値全体の平均を単一の指標とする方が便利であるといえる。特異ベクトルに大きな変化がない場合は、内積値の平均は 1.0 からほぼ変化しないが、変化がある場合は図 1 のように平均値も変化する。

内積値と特異ベクトルの変化の対応関係は前出の内積値グラフを参照しても判断がつかない。このため、別途テストコードには GIF 画像で特異ベクトルの図を出力するオプションをつけ、そこからアニメーションを生成することで確認できるようにした。前出のサンプルによる結果では、並進方向の回転に従って図示した特異ベクトルが回転するようなアニメーションとなっていた。

3 全セグメントを並進・回転させたときの影響

3.1 基準配置における結果

全セグメントに対してランダムな初期値を与えた後、そこから変動させたときの内積値の変化をみる。初期値と変動のパターンについては以下のものを適用する。並進方向やセグメント回転の回転角を変化させていく試行については、以下のパターンについて試した。

ランダム分布を採用する場合の並進変化量と回転変化量の関係について、回転させた場合のセグメント端における移動量が並進移動量に対して同程度になるように設定する。セグメントの最端はセグメント中心から 600~700mm 程度の距離となり、 0.1° 回転した場合の移動量は 1.0mm 程度である。よって、ランダム分布における並進・回転変化量について、 $\pm 400\mu\text{m}$ と $\pm 0.04^\circ$ を採用する。なお、試行 0 は前節でのサンプルである。

0 並進は距離一定のランダム初期回転角に対して同方向に回転させ、回転は 0.0 に固定

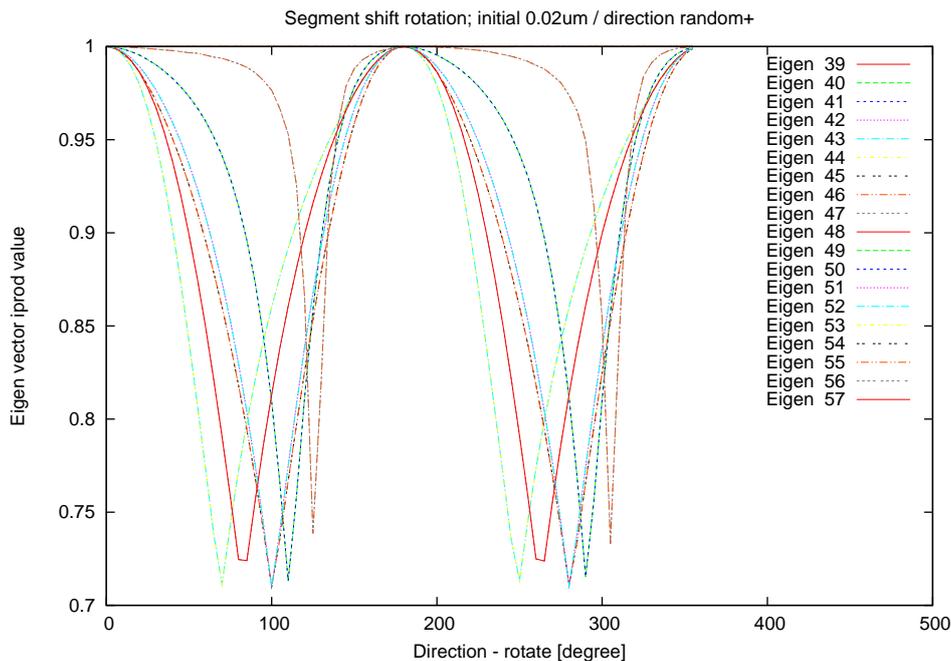


図 3: 特異ベクトルの内積値変化 (def-0): 39 – 57

- 1 並進は距離一定のランダム初期回転角に対して同方向に回転させ、回転はあるランダム値に固定
- 2 並進は距離一定のランダム初期回転角に対して同方向に回転させ、回転は毎回ランダム値を生成
- 3 並進は毎回ランダム値を生成し、回転はあるランダム値に固定
- 4 並進はあるランダム値に固定し、回転は毎回ランダム値を生成

これらの具体的な値の分布にはあまり意味が無いため、分布を表で載せることは割愛する。これらの結果は以下のようになった。

- 0 内積値は並進の回転にしたがって変化し、特異値は 0.1% レベルで変化しない
- 1 内積値・特異値ともに 0.1% レベルで変化しない
- 2 内積値はランダムに変化し、特異値は最大 1 ~ 2% レベルで変化する
- 3 内積値・特異値ともに 0.1% レベルで変化しない
- 4 内積値はランダムに変化し、特異値は最大 1 ~ 2% レベルで変化する

ここから得られる結論として、並進・回転のずれが理想的に 0.0 となっていない限り、並進による変動は無視できる量で、回転による変動は大きいといえる。また、制御量に効く特異値についてはどの試行でも 1% 程度しか変化しない結果となっているため、制御絶対量については並進・回転の両方について変動は無視できる程度であると考えられる。これらから、並進・回転によるギャップセンサー読み出し値の変化が、アクチュエータの駆動による補正で補正できるものであるかどうかに関係する可能性が示唆される。

なお、ペアを作らない特異ベクトルについては、試行 2 の変化においても内積値は変化しなかった。

3.2 基準配置でギャップセンサーを背面に垂直に定義した場合

セグメント回転が発生した場合もギャップセンサーの読み出し量に変化が起こらないようにするためには、鏡面での変化を追跡しなくなるようにするため、ギャップセンサーを鏡面に垂直でなくセグメント背面に対して垂直に配置するとよいと考えられる。

結果は前節と変わらなかった。理由としては、実際にはシミュレータは3次元化されているので、隣り合うセグメントの背面同士が同じ平面に載らないためセグメントの並進・回転ずれはギャップセンサーの読み出し値に影響するという3D化の影響や、セグメント(ギャップセンサー)とアクチュエータでの制御点間の相対位置関係が変化することなどがあると考えられる。

3.3 ずらしたギャップセンサー配置 (c12) に対する確認

30/60度対称を保ったままのずらしたギャップセンサー配置(図4; c12)に対して試験を行った。

全体の平均の結果は前出と変化しなかったが、この試行ではこれまでとは異なり単独の特異ベクトルについても少し変化が見られた(図8²; グラフはモード0に対するもの)。回転方向がランダム分布を取るモード2に対してグラフを作成すると図9のようになり、影響は無視できない程度に拡大する。このような効果はギャップセンサーがセグメント間中央にある場合には発生しなかったため、これについて次の節でより詳細に検証する。

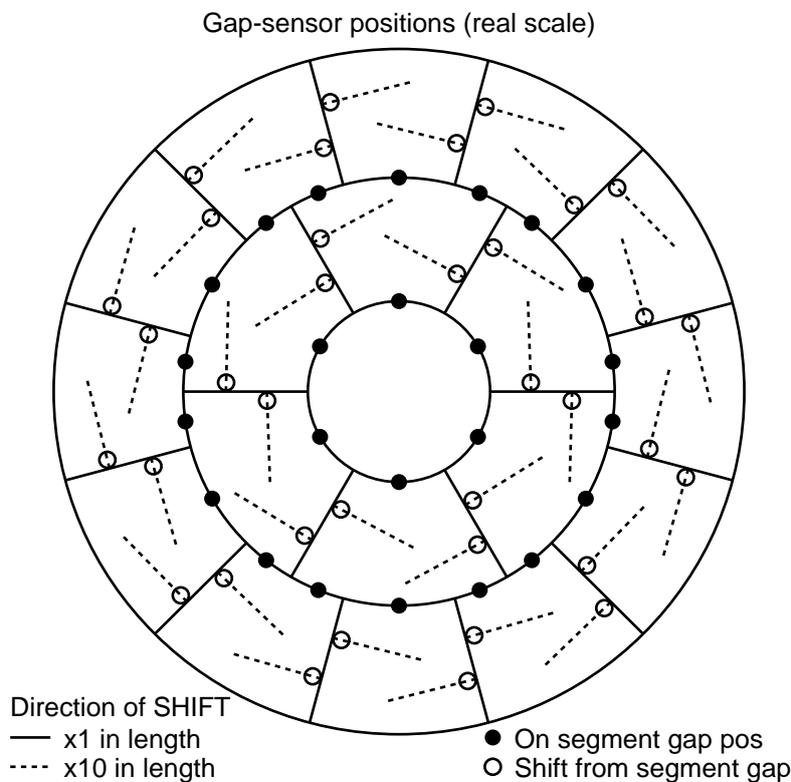


図4: ギャップセンサー配置 (c12)

3.4 ずらしたギャップセンサー配置に対して回転角のみ変化させた場合 (c12a)

前節でのずらしたギャップセンサー配置(c12)に対して、セグメント回転角のみ変化させるが、回転角についてはあるシーケンスに載った値を取った変化を加えたときの回転角に対する内積値の変化を調べる。

0.0という特異な値を持つ回転角への依存性は回転角を線形に変化させてもわからない可能性があるため、0.0に近いところではべきに近い変化をさせる。これを実現するためにランダム性を犠牲にし、以下のような値を与えた。

²が、いわゆるペアが存在しない特異ベクトルに対して、この配置での特異ベクトルは他のモードが多少混じった分布になっていることにより、その混じった部分が変化していると考えたと納得できるレベルではある。

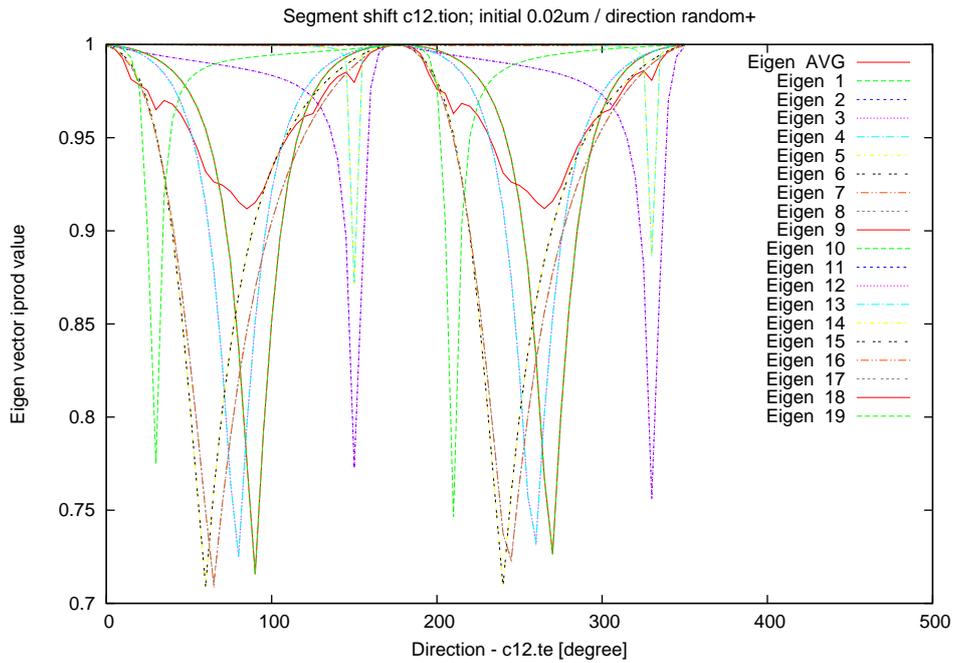


図 5: 特異ベクトルの内積値変化 (c12-0): AVG, 1 - 19

- 並進は初期値を ± 0.4 のランダム値とし、試行内では固定
- 回転は初期値を $1e - 4 * (1.0 + random(\pm 0.1))$ とし、全てを 2.0 倍

この結果、ペアにならない特異ベクトルを含む全ての特異値・特異ベクトルが回転の影響を受け変化することが判明した。また、今回の結果では前述とは異なり特異値に大きな変化が見られたが、これは回転角が小さく（いわゆる理想的な配置からのずれが微小に）なることによる影響であると考えられ、完全ランダム分布に取ったシミュレーションではそのような値に落ちる確率が非常に低いため出現しなかつただけ、と考えるとつじつまはあう³。

³ 図 13 などのグラフで特異値の変化が大きい領域は最初の最大値 ± 0.04 でのランダム値の領域より大きい値の部分である。

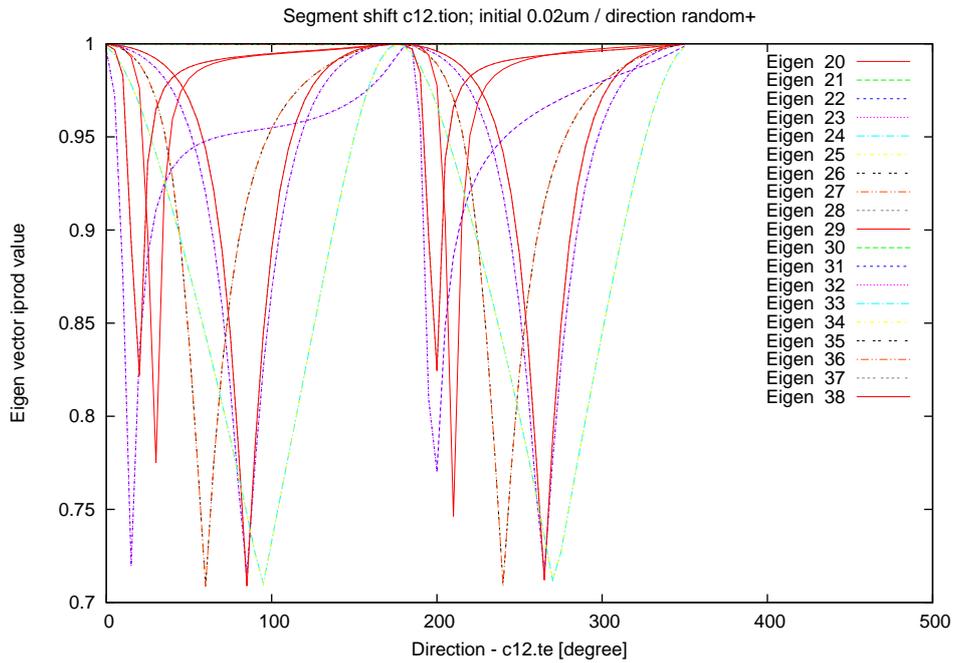


図 6: 特異ベクトルの内積値変化 (c12-0) : 20 – 38

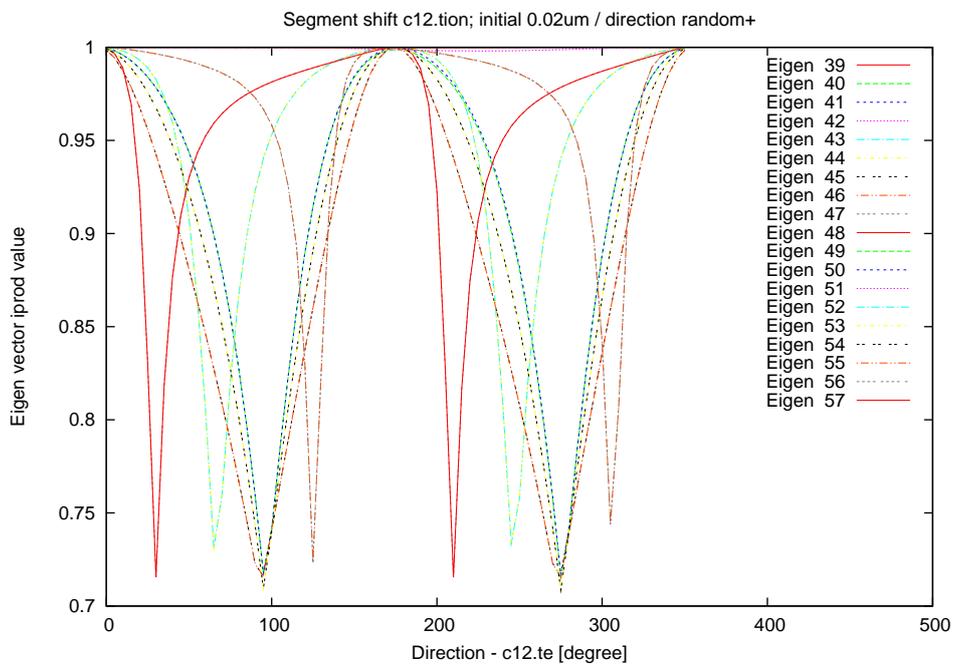


図 7: 特異ベクトルの内積値変化 (c12-0) : 39 – 57

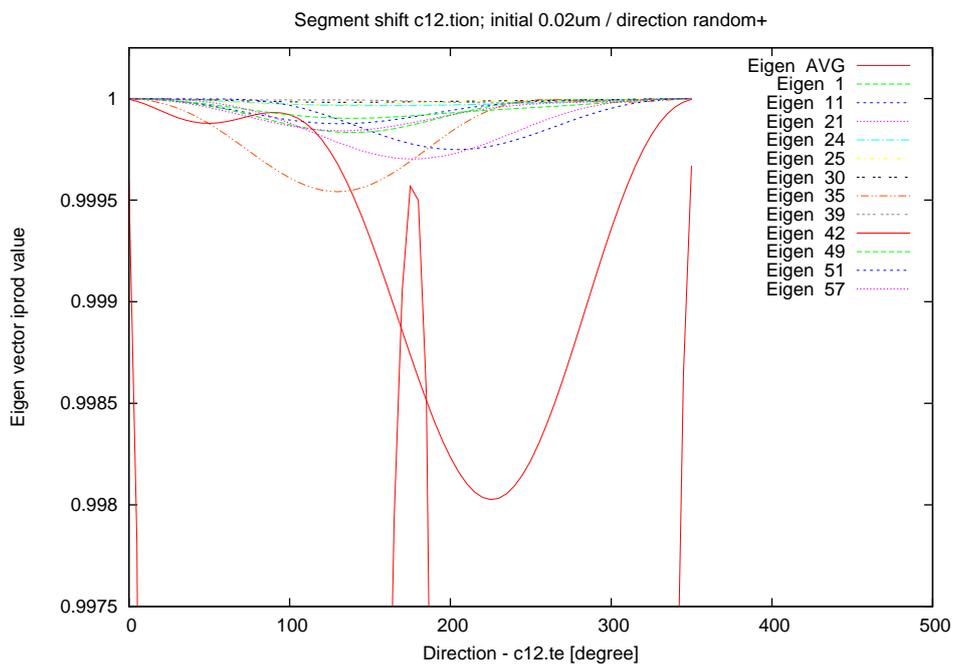


図 8: 特異ベクトルのペアにならない特異ベクトルの内積値変化 (c12-0)

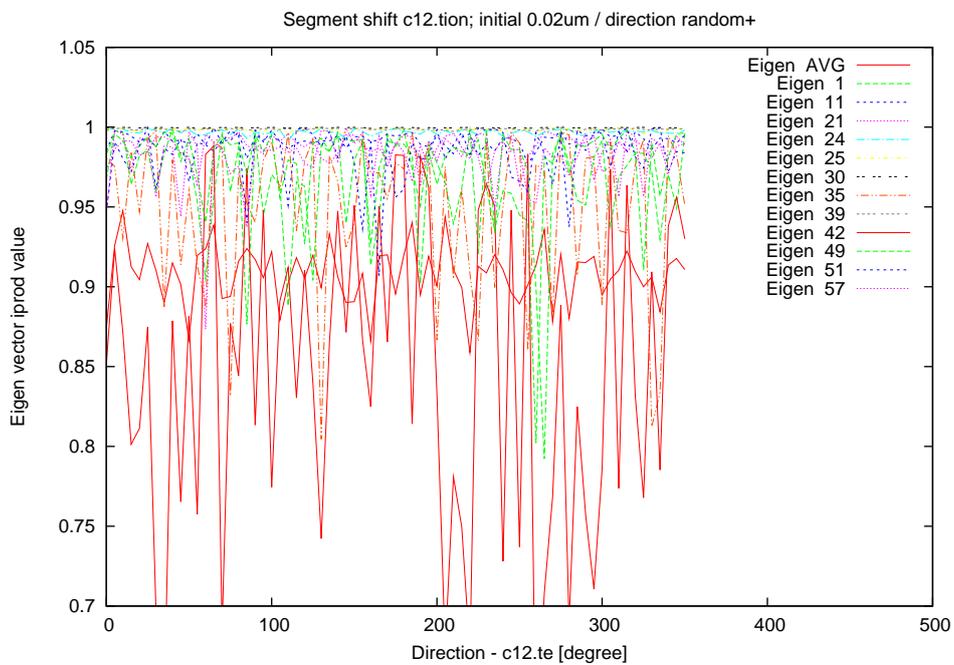


図 9: 特異ベクトルのペアにならない特異ベクトルの内積値変化 (c12-2)

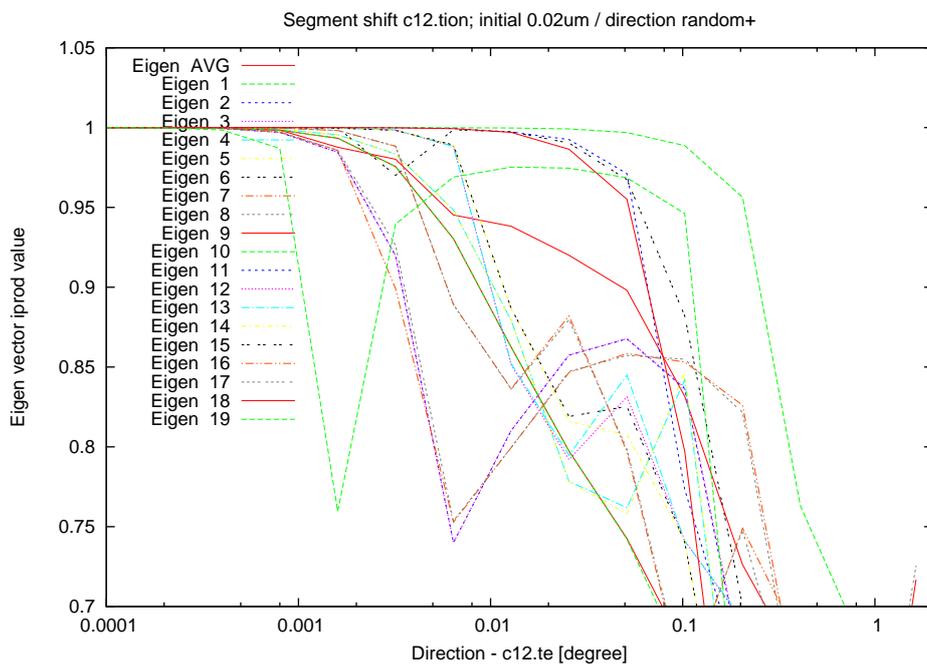


図 10: 特異ベクトルの内積値変化 (c12a-0) : AVG, 1 – 19

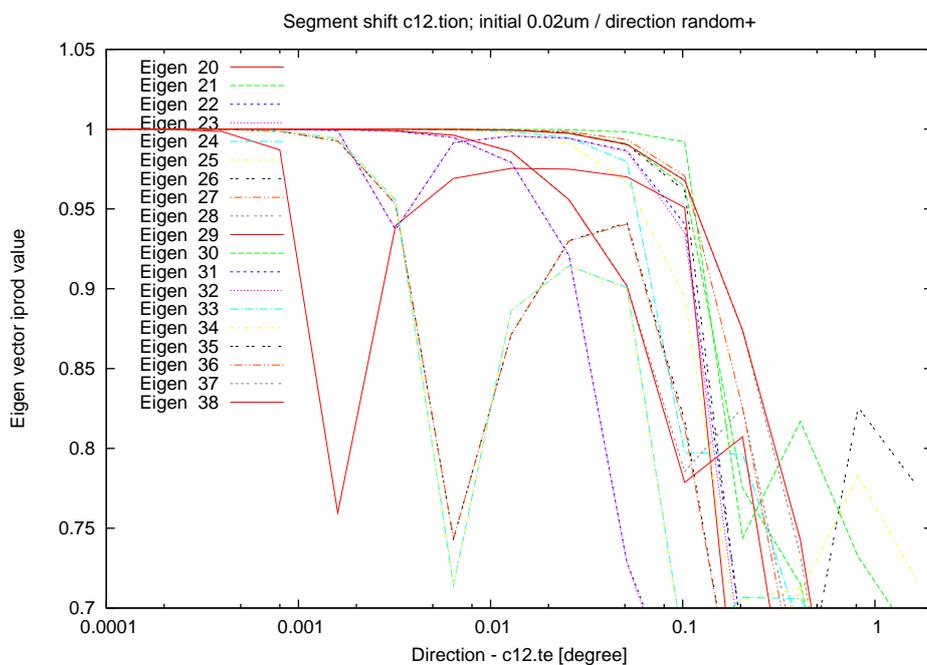


図 11: 特異ベクトルの内積値変化 (c12a-0) : 20 – 38

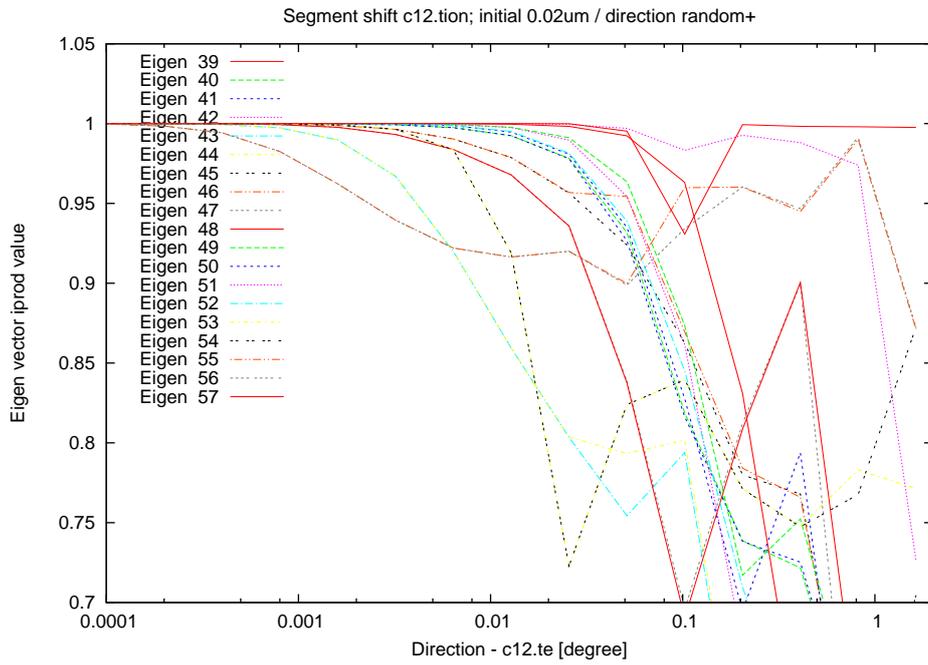


図 12: 特異ベクトルの内積値変化 (c12a-0) : 39 – 57

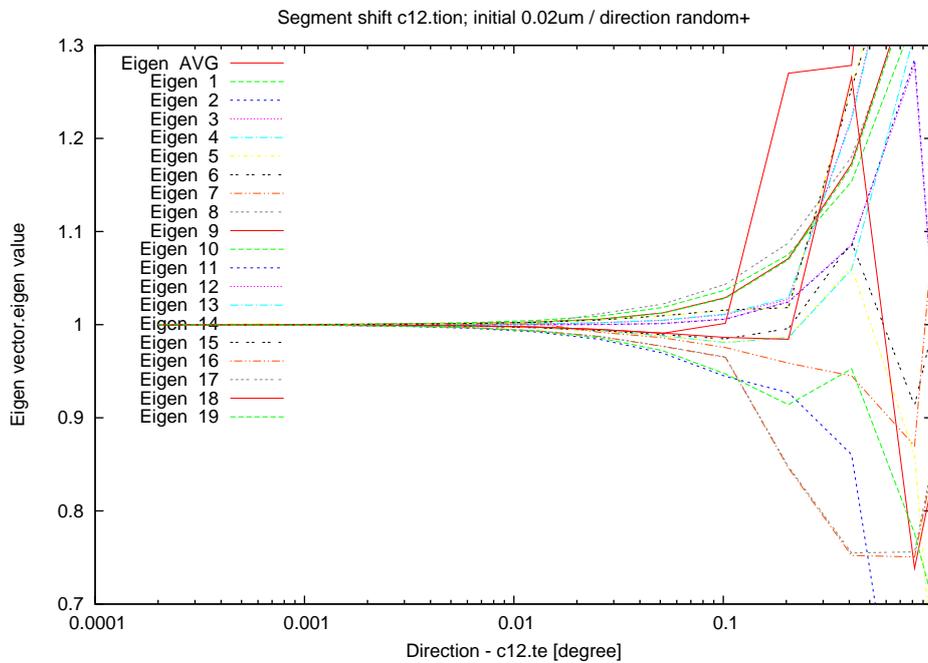


図 13: 特異値変化 (初期値との比; c12a) : AVG, 1 – 19

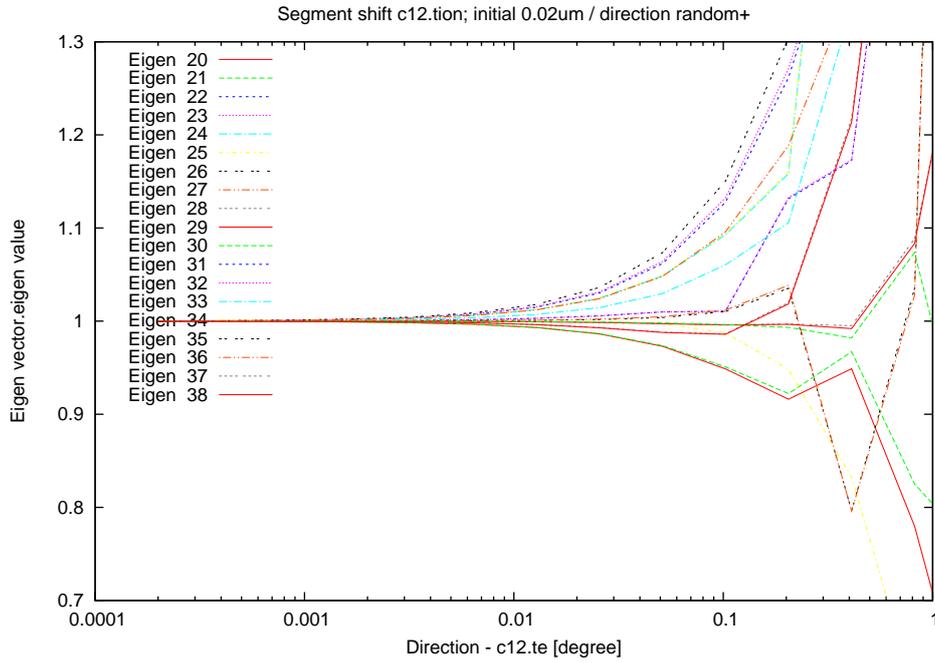


図 14: 特異値変化 (初期値との比; c12a) : 20 – 38

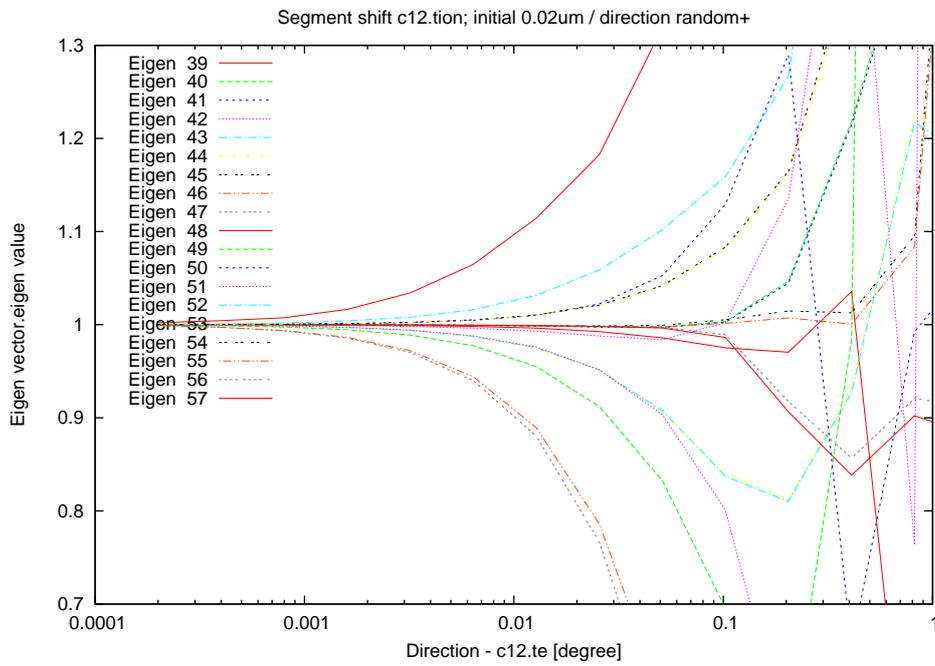


図 15: 特異値変化 (初期値との比; c12a) : 39 – 57

4 まとめ

分割主鏡制御時に重要となるギャップセンサー読み出し値からセグメントのアクチュエータ制御量への変換の際の変換行列の特異値・特異ベクトルに対し、セグメントに並進・回転が発生した場合にどのような影響が及ぼされるかについて検証した。

この結果、以下のようなことが判明した。

- 完全理想状態 (並進量 0、回転量 0) とその付近では特異な状態を示すので避けるべき
- セグメントの並進状態が変化しても特異ベクトル・特異値への影響は小さい
- セグメント回転状態が変化した場合、特異ベクトルは回転角が 0.001° などの小さな値でも変化する
- ペアをなす特異ベクトルについてはそのペアの中で閉じた影響が発生する (特異値は同じ、特異ベクトルは 2 つがなす平面内で変化)
- ペアを作らない特異ベクトルについてもセグメント回転の変化で特異ベクトルは変化する
- セグメント回転が 0.1° など大きくなると特異値にも影響が出る
- セグメント間中央でなくセグメント内に配置した場合はペアを作らない特異ベクトルの内積値の変化が大きく発生する
- ギャップセンサー配置による特異ベクトルの縮退改善とセグメントの並進・回転による特異ベクトルへの影響は独立事象である