

分割主鏡シミュレーター (第3版バージョン8) — 変換行列測定試験

岡山新技術望遠鏡グループ

平成23年6月1日

目次

1 概要	1
2 検証内容の検討	2
2.1 行列の測定方法	2
2.2 内環の扱い	2
2.3 行列の評価	2
2.4 測定条件	3
3 測定結果 I – 理想的な配置データの場合の擾乱・誤差の影響	3
4 測定結果 II – 角度に誤差をつけた場合の擾乱・誤差の影響	8
5 測定結果 III – z_s 距離に誤差をつけた場合の擾乱・誤差の影響	13
6 結論	18

1 概要

ギャップセンサーの読み出し値からアクチュエータの制御量を求める際の変換に利用する行列について、明示的に行列を定義するためのギャップセンサーとアクチュエータの配置についての情報(位置・方向)を与える代わりに、実際の望遠鏡に載せたときと同じくアクチュエータを動かしたときのギャップセンサーの読み出し値のみから生成する方法が実装された。しかしながら、この方法では行列の中には含まれているが実際には存在しない内環に配置された3点の仮想アクチュエータについて、仮想アクチュエータを動かす代わりに内周セグメントを動かすことによりアクチュエータ制御量とギャップセンサー読み出し値の対応(行列要素)を決定している。このため、内周セグメントと内環の間のギャップセンサーについての正確な位置と取り付け角度を与える必要があるが、位置を3次元レーザー測定器で測定するとしても完全に正確な測定は不可能であり、これによる影響を把握する必要がある。また、理想シミュレーターではアクチュエータの制御位置やギャップセンサーの読み出し値は理想値として与えられるが、実際の望遠鏡では望遠鏡架台トラスの機械的ゆがみや風などによる擾乱、ギャップセンサーの読み出しノイズなどが加算されるため、測定された行列の要素は理想値からずれる。

これらの実際の望遠鏡で運用する際に発生する、理想的に計算された変換行列と測定された変換行列の違いの影響を検証する。

2 検証内容の検討

2.1 行列の測定方法

行列要素の測定は、以下の手順で行う。ギャップセンサーの値を読み出す場合には、通常のステップシミュレーションと同じく、アクチュエータ制御量への各ステップでの擾乱とギャップセンサー読み出し値へのノイズ加算は指定された値で行う。

- 指定された回数だけギャップセンサーの値を読み出し平均化する (- 積算)
- 指定された距離だけアクチュエータを動かす
- アクチュエータが動作停止するのを待つ (シミュレータでは時定数をなくす)
- 指定された回数だけギャップセンサーの値を読み出し平均化する (+ 積算)
- 指定された距離だけアクチュエータを戻す
- アクチュエータが動作停止するのを待つ (シミュレータでは時定数をなくす)
- 一つのアクチュエータに対して測定が完了

なお、あるギャップセンサーがどのセグメント間に配置されているかという情報は既知であることから、あるアクチュエータを駆動した場合に測定されたギャップセンサー読み出し値のうち、配置情報から値が出力されないはずの要素については全てノイズの影響と考えて0とする。これにより、最終的な測定した変換行列においても、理想的な変換行列でゼロでない要素にのみ値が入るような行列が得られる。

2.2 内環の扱い

内環は一体の構造物であり、内環側に取り付けるギャップセンサーの面を含めて、機械的精度で望遠鏡に取り付けられる。そして、その取り付け位置については、内環を望遠鏡に取り付けた後、3次元レーザー測定器で望遠鏡のリファレンス位置に対する相対位置測定を行うことで $\sim 10\mu\text{m}$ のレベル¹での実測が可能であるといえる。また、望遠鏡が回転することによる重力方向の変化によるゆがみについても、ギャップセンサーが取り付け部分なるべく変形しないよう最適化した支持を行うことが検討されており、かつ、その構造をシミュレーションすることである程度正確な変化のを事前に補正テーブルのような形で把握することは可能であると考えられている。

このため、行列測定時に与える内環と内周セグメント間のギャップセンサーの取り付け位置・角度については、取り付け角度についてのみ目標とする取り付け角度誤差 (0.1°) ずれた場合の解析を行うこととする。

2.3 行列の評価

以前のレポートにおいて、セグメントの横ずれなどが発生した場合に特異値・特異ベクトルの変化が2種類(ペアを構成するものと単独のもの)に分かれ、そのそれぞれにおいて特徴的な変化をすることが判明している。これは、ペアを構成するものはそのペアが構成する平面の中で特異ベクトルが変化(回転)するというものであり、望遠鏡の分割主鏡制御において、この特異ベクトルのペアというものは重要な鍵になると考えられている。

このため、今回の行列測定における擾乱や測定誤差の影響の考察においても行列をそのまま評価するのではなく、一度特異値分解した特異値と特異ベクトルの形で評価することが望ましいといえる。よって、行列の評価においては、あるリファレンスとなるセットに対して対象となるセットの中で最も近い特異ベクトルを選びだすアルゴリズムを利用し、対応付けられた中での特異値の比と特異ベクトル同士の内積値を利用して評価することとする。

¹要確認、影響がありそうならこの部分についても追加のレポートで検証する。

2.4 測定条件

全てに共通となる部分の測定条件は以下のようにする。

- ステップごとでのアクチュエータへの擾乱・ギャップセンサーノイズは 10nm 一様乱数
- 行列測定時にはアクチュエータを連続 10 回サンプリングし単純平均を取る
- アクチュエータ駆動量は 1,10,100 μm の 3 種類について試行する
- ギャップセンサー配置は図 1 とする
- ギャップセンサーの向きは定義位置での鏡面に垂直方向 (ID:3)、セグメント背面から 40mm 下とする

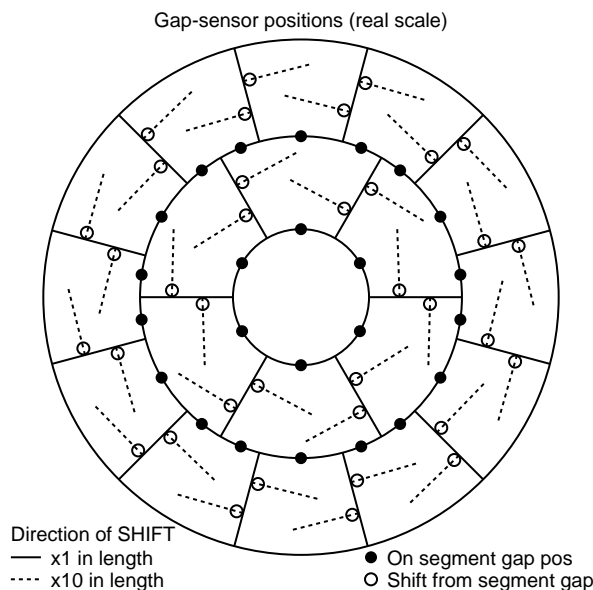


図 1: ギャップセンサー配置

測定データの再現性を考え、行列測定開始時点で乱数生成器は初期化する²。測定直前のアクチュエータの駆動位置の分布は各測定の目的に従う。この分布は、鏡面が理想状態である場合 (簡単のために全アクチュエータの制御量が 0 であると定義する) や、なんらかの制御が行われた後の理想状態であるかどうかは不明である状態が考えられる。

3 測定結果 I – 理想的な配置データの場合の擾乱・誤差の影響

内環・内周セグメント間のギャップセンサーについて、シミュレータにおいて定義したのとまったく同じ配置データを利用して行列を測定した。

シミュレータ上の全てのアクチュエータの制御量を 0 に初期化した状態から測定を行ったのが表 1、アクチュエータにある程度の残差が乗っている状態から測定を行ったのが表 2 である。ただし、ある程度の残差は Zernike 0,1 次モードを除いたアクチュエータの理想状態からの制御残差が 10 ~ 20nm 程度となっている状態で行列を測定した。

²同じシードで初期化すると同じ乱数列が得られる乱数生成器を利用していることは確認済み。

表 1: 測定結果 Ia - 理想的な配置データの場​​合の擾乱・誤差の影響

ID	初期特異値		1μm		10μm		100μm	
	特異値	特異値比	特異値	特異値比	特異値	特異値比	特異値	特異値比
1	3.5125593	1.0043903	-0.85325447	1.0001374	0.99589167	3.5125912	1.0000091	-0.99995661
2	3.4931074	1.0008855	+0.89128566	1.0001336	+0.83305941	3.4931585	1.0000146	+0.80866438
3	3.4931074	0.99622404	+0.84185556	0.99970864	-0.83108768	3.4930116	0.9999726	-0.80864274
4	3.348889	0.99621432	-0.94252284	0.99964794	-0.96176274	3.3487724	0.99996517	-0.96303046
5	3.348889	1.0007577	-0.94673755	1.0000085	-0.9618203	3.3488896	1.0000002	-0.96303105
6	3.1751247	0.99800491	-0.71120012	0.99988148	+0.99739156	3.1750837	0.99998709	-0.99997658
7	3.1696391	1.0019069	+0.71132111	1.0000039	-0.99737317	3.1696407	1.0000005	-0.99997636
8	3.1508721	0.99701099	-0.96548643	0.99961608	+0.99957585	3.1507489	0.99996089	+0.99999564
9	3.0963133	0.99753039	-0.96003451	0.99983513	-0.9962294	3.0962648	0.99998433	-0.99667801
10	3.0963133	0.99370632	+0.98731291	0.99932779	+0.99647553	3.0961041	0.99993243	+0.99966804
11	2.9706138	0.99721602	+0.99173985	0.99971218	+0.99992069	2.9705281	0.99997115	+0.99999921
12	2.9081655	0.99493992	-0.88889157	0.99949189	-0.99980755	2.9080184	0.99994939	-0.99992968
13	2.9081655	0.99467797	-0.70888385	0.99966235	+0.99888133	2.9080641	0.99996514	+0.99992217
14	2.8899977	1.0059129	+0.74677472	1.0003076	+0.9769351	2.8900881	1.0000313	+0.98086982
15	2.8899977	0.99898584	+0.77908486	0.9997043	-0.97789949	2.88999	0.99999734	-0.98087766
16	2.7621252	0.99394461	-0.78608403	0.99937688	-0.79898444	2.761953	0.99993764	-0.80002737
17	2.7621252	1.0044123	-0.78218363	1.0003978	-0.79896067	2.7622335	1.0000392	+0.80002713
18	2.7302841	0.99713621	-0.96995114	0.99959935	-0.99973883	2.7301728	0.9999592	-0.9999974
19	2.6335328	1.0040448	+0.73752568	1.0005731	-0.7927743	2.6336883	1.0000591	+0.79557714
20	2.6335328	0.99436163	+0.74663068	0.9994106	-0.79283213	2.6333787	0.9999415	-0.7955777
21	2.5804478	0.99876256	+0.97561253	1.0000211	+0.99976841	2.5804588	1.0000043	+0.99999769
22	2.3805535	1.0051522	+0.73682028	1.0004921	+0.73627321	2.38067	1.0000489	+0.73598725
23	2.3805535	0.99719424	+0.73853982	0.99970329	-0.73630111	2.3804825	0.99997018	-0.73598754
24	2.3002318	0.99666352	-0.99610062	0.99969089	+0.999994911	2.3001613	0.99996937	+0.999999948
25	2.1527796	0.99992087	+0.9967621	0.99996265	-0.9996896	2.1527709	0.99999595	+0.99999969
26	2.0170977	1.0006803	+0.87506193	1.0000699	+0.87300905	2.0171119	1.0000007	+0.87260324
27	2.0170977	0.99355736	-0.8741275	0.99933567	-0.87300347	2.0169634	0.99993341	+0.87260519
28	1.8864321	0.99865932	-0.82384468	0.99983603	-0.79748083	1.8864124	0.99998952	+0.7940585
29	1.8864321	1.0052589	-0.82323216	1.0005289	+0.79747348	1.8865439	1.0000592	-0.79405842
30	1.8223296	1.00236	+0.98282626	1.0003591	+0.99983307	1.8224174	1.0000482	-0.99999835

表 1: 測定結果 Ia - 理想的な配置データの乱れの擾乱・誤差の影響

ID	初期特異値			1 μ m			10 μ m			100 μ m		
	特異値	特異値比	内積値	特異値	特異値比	内積値	特異値	特異値比	内積値	特異値	特異値比	内積値
31	1.3741005	1.3790113	1.0035738	-0.98473579	1.3745197	1.000305	-0.99001928	1.3741429	1.0000308	-0.98924018		
32	1.3741005	1.37105	0.99777997	-0.99084131	1.3737833	0.99976915	+0.99010234	1.3740699	0.9999777	+0.98924103		
33	1.339993	1.3351763	0.99640545	-0.99157612	1.3395457	0.99966623	+0.99399982	1.3399487	0.99996695	+0.9936898		
34	1.339993	1.3485284	1.0063697	+0.98512375	1.3409206	1.0006923	-0.99399382	1.3400863	1.0000697	-0.9936898		
35	1.23383	1.2350947	1.0010251	-0.98805468	1.2339361	1.000086	+0.99990963	1.2338405	1.0000086	-0.99999913		
36	1.2122004	1.2167397	1.0037447	+0.98701141	1.2127381	1.0004436	+0.99989935	1.2122549	1.000045	-0.99999902		
37	0.70589589	0.70374569	0.99695395	+0.90952341	0.70565911	0.99966458	+0.92985054	0.70587606	0.99997192	-0.93172418		
38	0.70589589	0.70649644	1.0008508	-0.90951764	0.70592823	1.0000458	+0.92985012	0.70590292	1.00001	-0.93172418		
39	0.61221207	0.61099341	0.99800942	+0.99854673	0.6120633	0.999757	-0.99998604	0.61219693	0.99997528	-0.99999986		
40	0.49970017	0.50501882	1.0106437	+0.93477263	0.50021135	1.001023	+0.94897642	0.49975091	1.0001016	+0.9493749		
41	0.49970017	0.49948303	0.99956547	-0.94775179	0.49966995	0.99993953	+0.94929192	0.49969706	0.99999379	-0.94937844		
42	0.49342193	0.49378739	1.0007407	+0.98569232	0.49347041	1.0000983	+0.99965827	0.49342717	1.0000106	-0.99999617		
43	0.29901739	0.29849014	0.9982367	+0.94393063	0.29894106	0.99974471	-0.94028571	0.29900983	0.99997471	+0.93974119		
44	0.29901739	0.30626329	1.0242324	-0.94327759	0.29971553	1.0023348	-0.94027405	0.29908722	1.0002335	-0.93974108		
45	0.25312641	0.25011918	0.98811966	-0.79479284	0.25280906	0.9987463	+0.79728419	0.25309455	0.99987415	+0.79745829		
46	0.25312641	0.25562548	1.0098728	-0.79454268	0.25336283	1.000934	-0.79728424	0.25314992	1.0000929	-0.79745829		
47	0.20386415	0.20444277	1.0028383	+0.96753267	0.20386742	1.0000161	+0.7132152	0.20386026	0.99998094	+0.75059573		
48	0.20386415	0.20386419	1.0000002	-0.98416885	0.20382755	0.99982052	-0.71333504	0.2038644	1.0000013	-0.75059746		
49	0.19719728	0.19852125	1.0067139	-0.97930497	0.19731515	1.0005977	-0.99979116	0.19721009	1.0000649	-0.99999793		
50	0.1724863	0.17168647	0.99536297	-0.9908801	0.17243242	0.99968764	+0.99991125	0.17248116	0.99997023	+0.99999912		
51	0.069032863	0.074315428	1.0765225	-0.99006336	0.069478606	1.006457	+0.9997245	0.069076592	1.0006335	-0.99999664		
52	0.065915478	0.065329514	0.99111037	+0.97212969	0.065803822	0.99830607	-0.99973129	0.065903958	0.99982522	-0.99999684		
53	0.054883117	0.056864485	1.0361016	-0.76901271	0.055044002	1.0029314	+0.72888562	0.054898841	1.0002865	-0.72271438		
54	0.054883117	0.059179295	1.0782787	+0.75201587	0.055242567	1.0065494	+0.72887788	0.054918276	1.0006406	-0.7227144		
55	1.7328945e-05	0.0089365535	515.70097	-0.90845659	0.00089905255	51.881553	+0.9406354	9.5715284e-05	5.5234341	+0.9868311		
56	1.7328945e-05	0.014447584	833.72554	-0.75345757	0.0014884117	85.891656	+0.750825	0.0001578415	9.1085469	+0.78060401		
57	7.1984282e-07	0.006370874	8850.3682	-0.66765204	0.0006440217	894.66989	-0.69165121	6.4001701e-05	88.910661	-0.77040588		

表 2: 測定結果 Ib – 理想的な配置データの乱れ・誤差の影響

ID	初期特異値		1 μ m		10 μ m		100 μ m	
	特異値	特異値比	内積値	特異値比	特異値	特異値比	特異値	特異値比
31	1.3741005	1.0020974	-0.98006262	1.3745197	1.000305	-0.99001962	1.3741429	1.0000308
32	1.3741005	0.99237353	-0.98674741	1.3737833	0.99976915	+0.99010267	1.3740699	0.9999777
33	1.339993	0.99419218	-0.83968367	1.3395457	0.99966622	+0.99399818	1.3399487	0.99996695
34	1.339993	0.99511724	-0.85990332	1.3409206	1.0006923	-0.9939938	1.3400863	1.0000697
35	1.23383	0.99298866	+0.99526993	1.2339361	1.000086	+0.99990963	1.2338406	1.0000086
36	1.2122004	0.99604755	+0.99681256	1.2127381	1.0004436	+0.99989935	1.2122549	1.000045
37	0.70589589	1.0020764	-0.99856644	0.70565911	0.99966458	+0.92985085	0.70587606	0.9997192
38	0.70589589	0.99172221	+0.99906172	0.70592823	1.0000458	+0.92985042	0.70590292	1.00001
39	0.61221207	0.99296085	-0.99917168	0.6120633	0.999757	-0.99998604	0.61219693	0.9997528
40	0.49970017	0.99605823	+0.9150394	0.50021135	1.001023	+0.9489766	0.49975091	1.0001016
41	0.49970017	1.0034329	+0.91247202	0.49966995	0.9993953	+0.94929209	0.49969706	0.9999379
42	0.49342193	0.99251843	-0.93306547	0.49347041	1.0000983	+0.99965826	0.49342717	1.0000106
43	0.29901739	1.0034902	+0.92810418	0.29894106	0.99974471	-0.94028588	0.29900983	0.9997472
44	0.29901739	0.99457505	+0.92754967	0.29971553	1.0023348	-0.94027422	0.29908722	1.0002335
45	0.25312641	0.99336873	+0.9704959	0.25280906	0.9987463	+0.79728442	0.25309455	0.99987415
46	0.25312641	1.0075355	-0.97199339	0.25336283	1.000934	-0.79728447	0.25314992	1.0000929
47	0.20386415	0.99252518	+0.92636692	0.20386742	1.0000161	+0.71321195	0.20386026	0.9998094
48	0.20386415	1.0007927	+0.92968302	0.20382755	0.99982052	-0.71333179	0.2038644	1.0000013
49	0.19719728	1.0034552	+0.99488966	0.19731515	1.0005977	-0.99979116	0.19721009	1.0000649
50	0.1724863	1.0104265	+0.98612917	0.17243242	0.99968764	+0.99991125	0.17248117	0.99997024
51	0.069032863	1.0292412	+0.943535	0.069478606	1.006457	+0.9997245	0.069076593	1.0006335
52	0.065915478	0.97902266	-0.99134587	0.065803822	0.99830607	-0.99973129	0.065903958	0.99982523
53	0.054883117	1.0216515	-0.74803398	0.055044002	1.0029314	+0.72888572	0.054898842	1.0002865
54	0.054883117	1.0599024	+0.79376066	0.055242567	1.0065494	+0.72887797	0.054918276	1.0006406
55	1.7328945e-05	449.52824	+0.82380924	0.00089905244	51.881546	+0.94063534	9.5715271e-05	5.5234334
56	1.7328945e-05	249.97099	-0.60544849	0.0014884118	85.891658	+0.75082504	0.00015784142	9.108542
57	7.1984282e-07	14182.238	-0.77205117	0.00064402163	894.66979	-0.6916512	6.4001695e-05	88.910652
								-0.77040631

特異値・特異ベクトルの比を見ると、ノイズ値 10nm に³対して 100 倍でしかない $1\mu\text{m}$ での測定では特異値が 1%程度変化しているが、測定での制御量を $10\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ とすると変化割合(ノイズの影響)がほぼ同じ率で減少していくような値となっている。これは、行列測定の際の各要素について、制御量と測定ノイズの関係がそのまま要素の値に影響するからと考えると妥当といえる結果である。

また、特に ID 55~57 の低次の特異ベクトルについて、もともと低かった特異値が測定した行列では大きくなっている。これは、数学的に厳密な場合は縮退するモードがノイズの影響で縮退が解けてきたことを意味すると考えられ、現実の望遠鏡ではこれらのモードは特異値で判定するよりは今回の方法と同様に何らかの理想的な特異ベクトルのセットとの比較によって判別することが望ましいといえる。

また、二つの表を比較すると、 $1\mu\text{m}$ では特異値・特異ベクトル内積に影響がでているが、 $10,100\mu\text{m}$ ではほとんど変化していない。今回は制御残差がある状態からはじめたほうについても、残差が Zernike 0,1 次モードを除いたアクチュエータの理想状態からの量で $10\sim 20\text{nm}$ 程度となっている状態としたため、前述の制御量と測定ノイズと同様な影響しか及ぼしていない可能性がある⁴。

4 測定結果 II – 角度に誤差をつけた場合の擾乱・誤差の影響

次に、実際の取り付け角度(シミュレータ上ではギャップセンサーの定義ファイルでの ID に対応する)と、変換行列を測定する際の角度の設定値に違いがある場合について調査を行う。

実際の望遠鏡(セグメント)にエッジセンサーを取り付ける際の想定している(目標)取り付け誤差は 0.1° 程度であるため、 0.1° から 2° (セグメント鏡面に垂直な方向は望遠鏡光軸に対して $\sim 2.88^\circ$ 傾いている)までの角度で変換行列の変化を調べる。なお、取り付け角の指定値を変化させる以外は、取り付け位置については理想値を与え、行列要素の測定は毎回アクチュエータの制御位置を理想位置に戻した上で、アクチュエータを $10\mu\text{m}$ 制御し 10 回平均で測定する。また、表 6 中の 0.0° 変化の分は前節での測定時のアクチュエータ制御量のみを変化させた場合に相当する。

³実際には 10 回平均を取っており、ギャップセンサー読み出し値の分散としてはより小さい値を示すはずである。

⁴各測定ステップにてトラスへの擾乱としてアクチュエータ制御量にノイズを与えているため、それに埋もれたともいえる可能性はある。

表 3: 測定結果 II - 角度に誤差をつけた場合の擾乱・誤差の影響 1

ID	初期特異値			0.0°			0.1°			0.2°		
	特異値	特異値比	内積値	特異値	特異値比	内積値	特異値	特異値比	内積値	特異値	特異値比	内積値
1	3.5125593	1.0001374	-0.99589167	3.5130418	1.0001374	-0.99589286	3.5130418	1.0001374	-0.99589286	3.5130418	1.0001374	-0.99589404
2	3.4931074	1.0001336	+0.83305941	3.493571	1.0001327	+0.83306051	3.493571	1.0001327	+0.83306051	3.4935681	1.0001319	+0.83306161
3	3.4931074	0.99970864	-0.83108768	3.4920867	0.99970781	-0.83108931	3.4920867	0.99970781	-0.83108931	3.4920838	0.99970698	-0.83109095
4	3.34889	0.99964794	-0.96176274	3.34771	0.99964794	-0.96176273	3.34771	0.99964794	-0.96176273	3.34771	0.99964794	-0.96176273
5	3.34889	1.0000085	-0.9618203	3.3489176	1.0000085	-0.9618203	3.3489176	1.0000085	-0.9618203	3.3489176	1.0000085	-0.9618203
6	3.1751247	0.99988148	+0.99739156	3.1747484	0.99988147	+0.99739667	3.1747484	0.99988147	+0.99739667	3.1747484	0.99988146	+0.99740176
7	3.1696391	1.0000039	-0.99737317	3.1696459	1.0000022	-0.99737808	3.1696459	1.0000022	-0.99737808	3.1696405	1.0000005	-0.99738297
8	3.1508721	0.99961608	+0.99957585	3.1496624	0.99961607	+0.99957566	3.1496624	0.99961607	+0.99957566	3.1496624	0.99961607	+0.99957547
9	3.0963133	0.99983513	-0.9962294	3.0958015	0.9998347	-0.99622909	3.0958015	0.9998347	-0.99622909	3.0958001	0.99983426	-0.99622878
10	3.0963133	0.99932779	+0.99647553	3.0942305	0.99932734	+0.99647521	3.0942305	0.99932734	+0.99647521	3.0942292	0.9993269	+0.99647489
11	2.9706138	0.99971218	+0.99992069	2.9697588	0.99971218	+0.99992069	2.9697588	0.99971218	+0.99992069	2.9697588	0.99971218	+0.99992069
12	2.9081655	0.99949189	-0.99980755	2.9066879	0.99949189	-0.99980755	2.9066879	0.99949189	-0.99980755	2.9066879	0.99949189	-0.99980756
13	2.9081655	0.99966235	+0.99888133	2.9071836	0.99966235	+0.99888158	2.9071836	0.99966235	+0.99888158	2.9071836	0.99966235	+0.99888183
14	2.8899977	1.0003076	+0.9769351	2.8908867	1.000307	+0.97693259	2.8908867	1.000307	+0.97693259	2.8908832	1.0003064	+0.97693009
15	2.8899977	0.99997043	-0.97789949	2.8899105	0.99996983	-0.97789671	2.8899105	0.99996983	-0.97789671	2.8899088	0.99996923	-0.97789393
16	2.7621252	0.99937688	-0.79898444	2.7604041	0.99937687	-0.79898435	2.7604041	0.99937687	-0.79898435	2.7604041	0.99937687	-0.79898426
17	2.7621252	1.0003978	-0.79896067	2.7632241	1.0003978	-0.79896058	2.7632241	1.0003978	-0.79896049	2.763224	1.0003978	-0.79896049
18	2.7302841	0.99959935	-0.99973883	2.7291902	0.99959934	-0.99973888	2.7291902	0.99959934	-0.99973882	2.7291902	0.99959934	-0.99973892
19	2.6335328	1.0005731	-0.7927743	2.6350284	1.0005679	-0.79277366	2.6350284	1.0005679	-0.79277366	2.6350146	1.0005627	-0.79277302
20	2.6335328	0.9994106	-0.79283213	2.6319667	0.99940533	-0.79283148	2.6319667	0.99940533	-0.79283148	2.6319529	0.99940007	-0.79283082
21	2.5804478	1.0000211	+0.99976841	2.5805022	1.0000165	+0.99976841	2.5804903	1.0000165	+0.99976841	2.5804784	1.0000119	+0.99976841
22	2.3805535	1.0004921	+0.73627321	2.381725	1.0004921	+0.7362732	2.381725	1.0004921	+0.7362732	2.381725	1.0004921	+0.73627319
23	2.3805535	0.99970329	-0.73630111	2.3798471	0.99970329	-0.7363011	2.3798471	0.99970329	-0.7363011	2.3798471	0.99970329	-0.73630109
24	2.3002318	0.99969089	+0.99994911	2.2995207	0.99969088	+0.99994911	2.2995207	0.99969088	+0.99994911	2.2995207	0.99969088	+0.99994911
25	2.1527796	0.99996265	-0.99996896	2.1526992	0.99996265	-0.99996897	2.1526992	0.99996265	-0.99996897	2.1526992	0.99996265	-0.99996898
26	2.0170977	1.0000699	+0.87300905	2.0172387	1.0000699	+0.87300933	2.0172387	1.0000699	+0.87300933	2.0172387	1.0000699	+0.87300961
27	2.0170977	0.99933567	-0.87300347	2.0157577	0.99933567	-0.87300376	2.0157577	0.99933567	-0.87300376	2.0157577	0.99933567	-0.87300405
28	1.8864321	0.99983603	-0.79748083	1.8861228	0.99977975	-0.79746388	1.8860166	0.99977975	-0.79746388	1.8859105	0.99972348	-0.79744689
29	1.8864321	1.0005289	+0.79747348	1.8874298	1.0004725	+0.79745657	1.8873235	1.0004725	+0.79745657	1.8872172	1.0004162	+0.79743963
30	1.8223296	1.0003591	+0.99983307	1.822984	1.0002864	+0.99983323	1.8228515	1.0002864	+0.99983323	1.8227189	1.0002137	+0.99983339

表 3: 測定結果 II - 角度に誤差をつけた場合の擾乱・誤差の影響 1

ID	初期特異値		0.0°		0.1°		0.2°	
	特異値	内積値	特異値比	内積値	特異値	内積値	特異値	内積値
31	1.3741005	1.3745197	1.000305	-0.99001928	1.3745092	-0.99001362	1.3744988	-0.99000795
32	1.3741005	1.3737833	0.99976915	+0.99010234	1.3737729	+0.99009677	1.3737625	+0.99009119
33	1.339993	1.3395457	0.99966623	+0.9939982	1.3395457	+0.99399828	1.3395457	+0.99399836
34	1.339993	1.3409206	1.0006923	-0.99399382	1.3409206	-0.99399391	1.3409206	-0.9939994
35	1.23383	1.2339361	1.000086	+0.99990963	1.2339353	+0.99990962	1.2339346	+0.99990961
36	1.2122004	1.2127381	1.0004436	+0.99989935	1.2127381	+0.99989934	1.2127381	+0.99989932
37	0.70589589	0.70565911	0.99966458	+0.92985054	0.70562274	+0.92988827	0.70558636	+0.92992596
38	0.70589589	0.70592823	1.0000458	+0.92985012	0.7058919	+0.92988784	0.70585557	+0.92992552
39	0.61221207	0.6120633	0.999757	-0.99998604	0.6120633	-0.99998604	0.6120633	-0.99998604
40	0.49970017	0.50021135	1.001023	+0.94897642	0.50021135	+0.94897647	0.50021135	+0.94897652
41	0.49970017	0.49966995	0.99939953	+0.94929192	0.49966995	-0.94929188	0.49966995	-0.94929185
42	0.49342193	0.49347041	1.0000983	+0.99965827	0.49346948	-0.99965836	0.49346856	-0.99965845
43	0.29901739	0.29894106	0.99974471	-0.94028571	0.29893827	-0.94029122	0.29893548	-0.94029672
44	0.29901739	0.29971553	1.0023348	-0.94027405	0.29971274	-0.94027942	0.29970995	-0.94028478
45	0.25312641	0.25280906	0.9987463	+0.79728419	0.25280906	+0.79728407	0.25280906	+0.79728395
46	0.25312641	0.25336283	1.000934	-0.79728424	0.25336283	-0.79728412	0.25336283	-0.797284
47	0.20386415	0.20386742	1.0000161	+0.7132152	0.20386466	+0.7133069	0.20386189	+0.71339862
48	0.20386415	0.20382755	0.99982052	-0.71333504	0.20382479	-0.71342652	0.20382202	-0.71351803
49	0.19719728	0.19731515	1.0005977	-0.99979116	0.19730759	-0.99979146	0.19730002	-0.99979175
50	0.1724863	0.17243242	0.99968764	+0.99991125	0.17243242	+0.99991123	0.17243242	-0.9999112
51	0.069032863	0.069478606	1.006457	+0.9997245	0.069477298	+0.99972446	0.06947599	+0.99972442
52	0.065915478	0.065803822	0.99830607	-0.99973129	0.065803822	-0.99973129	0.065803822	-0.99973128
53	0.054883117	0.055044002	1.0029314	+0.72888562	0.055044002	+0.72888667	0.055044001	+0.72888772
54	0.054883117	0.055242567	1.0065494	+0.72887788	0.055242567	+0.72887897	0.055242566	+0.72888006
55	1.7328945e-05	0.000899052	51.881553	+0.9406354	0.00089905	+0.94063678	0.00089905	+0.94063817
56	1.7328945e-05	0.0014884117	85.891656	+0.750825	0.0014884068	+0.75082859	0.0014884019	+0.75083219
57	7.1984282e-07	0.0006440217	894.66989	-0.69165121	0.0006440197	-0.6916561	0.0006440177	+0.691661

表 4: 測定結果 II - 角度に誤差をつけた場合の擾乱・誤差の影響 2

ID	初期特異値			0.5°			1.0°			2.0°		
	特異値	内積値	特異値比	特異値	内積値	特異値比	特異値	内積値	特異値比	特異値	内積値	特異値比
1	3.5125593	3.5130417	1.0001373	3.5130415	-0.99589759	1.0001373	3.5130413	-0.99590348	1.0001372	3.5130413	-0.99591521	1.0001372
2	3.4931074	3.4935593	1.0001294	3.4935447	+0.83306491	1.0001252	3.4935157	+0.83307041	1.0001169	3.4935157	+0.83308147	1.0001169
3	3.4931074	3.4920751	0.99970448	3.4920605	-0.83109585	0.99970032	3.4920316	-0.83110402	0.99969202	3.4920316	-0.83112037	0.99969202
4	3.348889	3.34771	0.99964794	3.34771	-0.96176271	0.99964794	3.34771	-0.96176268	0.99964794	3.34771	-0.96176263	0.99964794
5	3.348889	3.3489176	1.0000085	3.3489176	-0.9618203	1.0000085	3.3489176	-0.96182029	1.0000085	3.3489176	-0.96182027	1.0000085
6	3.1751247	3.1747483	0.99988143	3.1747481	+0.99741692	0.99988139	3.1747479	+0.99744184	0.99988132	3.1747479	+0.99749039	0.99988132
7	3.1696391	3.1696244	0.99999538	3.1695976	-0.99739752	0.99998693	3.1695442	-0.99742141	0.99997008	3.1695442	-0.99746782	0.99997008
8	3.1508721	3.1496624	0.99961606	3.1496623	+0.9995749	0.99961604	3.1496622	+0.99957395	0.999616	3.1496622	-0.99957203	0.999616
9	3.0963133	3.0957961	0.99983296	3.0957894	-0.99622784	0.99983079	3.095776	-0.99622628	0.99982646	3.095776	-0.99622313	0.99982646
10	3.0963133	3.0942251	0.99932557	3.0942182	+0.99647391	0.99932337	3.0942046	+0.99647229	0.99931896	3.0942046	+0.99646902	0.99931896
11	2.9706138	2.9697588	0.99971218	2.9697588	+0.99992069	0.99971218	2.9697588	+0.9999207	0.99971218	2.9697588	+0.99992071	0.99971218
12	2.9081655	2.9066879	0.99949189	2.9066879	-0.99980757	0.99949189	2.9066879	-0.99980758	0.99949189	2.9066879	-0.99980761	0.99949189
13	2.9081655	2.9071836	0.99966234	2.9071835	+0.99888258	0.99966233	2.9071835	+0.99888383	0.99966232	2.9071835	+0.9988863	0.99966232
14	2.8899977	2.890878	1.0003046	2.8908693	+0.97692257	1.0003016	2.890852	+0.97691004	1.0002956	2.890852	-0.97688496	1.0002956
15	2.8899977	2.8899036	0.99996745	2.889895	-0.97788559	0.99996448	2.8898779	-0.97787169	0.99995856	2.8898779	-0.9778439	0.99995856
16	2.7621252	2.7604041	0.99937687	2.7604041	-0.79898399	0.99937687	2.7604041	-0.79898353	0.99937687	2.7604041	-0.79898264	0.99937687
17	2.7621252	2.763224	1.0003978	2.763224	-0.79896023	1.0003978	2.763224	-0.79895979	1.0003978	2.763224	-0.79895891	1.0003978
18	2.7302841	2.7291902	0.99959934	2.7291902	-0.99973905	0.99959933	2.7291901	-0.99973926	0.99959931	2.7291901	-0.99973969	0.99959931
19	2.6353328	2.6349732	1.000547	2.6349045	-0.79277106	1.0005209	2.6347674	-0.79276774	1.0004688	2.6347674	-0.79276082	1.0004688
20	2.6353328	2.6319113	0.99938431	2.6318423	-0.79282884	0.99935809	2.6317046	-0.79282547	0.99930581	2.6317046	-0.79281846	0.99930581
21	2.5804478	2.5804429	0.99999811	2.5803837	+0.99976839	0.99997519	2.5802659	+0.99976827	0.99992952	2.5802659	+0.99976779	0.99992952
22	2.3805535	2.381725	1.0004921	2.381725	+0.73627317	1.0004921	2.381725	+0.73627313	1.0004921	2.381725	+0.73627306	1.0004921
23	2.3805535	2.3798471	0.99970329	2.3798471	-0.73630107	0.99970329	2.3798471	-0.73630103	0.99970329	2.3798471	-0.73630096	0.99970329
24	2.3002318	2.2995207	0.99969088	2.2995207	+0.99994911	0.99969088	2.2995207	+0.99994911	0.99969088	2.2995207	+0.99994911	0.99969088
25	2.1527796	2.1526992	0.99996264	2.1526991	-0.99996901	0.99996264	2.1526991	-0.99996906	0.99996262	2.1526991	-0.99996917	0.99996262
26	2.0170977	2.0172387	1.0000699	2.0172387	+0.87301045	1.0000699	2.0172387	+0.87301183	1.0000699	2.0172387	+0.87301455	1.0000699
27	2.0170977	2.0157577	0.99933567	2.0157577	-0.87300491	0.99933566	2.0157577	-0.87300634	0.99933564	2.0157577	-0.87300916	0.99933564
28	1.8864321	1.8855922	0.9995474	1.885062	-0.79739577	0.99927372	1.884003	-0.79731007	0.99871231	1.884003	-0.79713667	0.99871231
29	1.8864321	1.8868984	1.0002472	1.8863675	+0.79738867	0.99996572	1.8853068	+0.79730323	0.99940347	1.8853068	+0.79713035	0.99940347
30	1.8223296	1.8223214	0.9999955	1.8216591	+0.99983382	0.99963209	1.8203354	+0.99983434	0.9989057	1.8203354	+0.99983472	0.9989057

表 4: 測定結果 II - 角度に誤差をつけた場合の擾乱・誤差の影響 2

ID	初期特異値			0.5°			1.0°			2.0°		
	特異値	内積値	特異値比	特異値	内積値	特異値比	特異値	内積値	特異値比	特異値	内積値	特異値比
31	1.3741005	1.3744675	1.000267	1.3744152	1.3744152	1.000229	1.3744152	-0.98996225	1.000229	1.3743105	-0.98996225	1.0001528
32	1.3741005	1.3737313	0.99973128	1.3736792	1.3736792	0.99969336	1.3736792	+0.9900744	0.99969336	1.3735748	+0.9900744	0.99961739
33	1.339993	1.3395457	0.99966622	1.3395457	1.3395457	0.99966621	1.3395457	+0.99399861	0.99966621	1.3395457	+0.99399861	0.99966619
34	1.339993	1.3409206	1.0006922	1.3409206	1.3409206	1.0006922	1.3409206	-0.99399428	1.0006922	1.3409206	-0.99399428	1.0006922
35	1.23383	1.2339324	1.000083	1.2339287	1.2339287	1.00008	1.2339287	+0.99990958	1.00008	1.2339214	+0.99990951	1.0000741
36	1.2122004	1.2127381	1.0004436	1.2127381	1.2127381	1.0004436	1.2127381	+0.99989928	1.0004436	1.2127381	+0.99989921	1.0004436
37	0.70589589	0.70547721	0.99940688	0.70529517	0.70529517	0.99914901	0.70529517	+0.93003889	0.99914901	0.70493062	+0.93022659	0.99863256
38	0.70589589	0.70574656	0.99978847	0.70556478	0.70556478	0.99953094	0.70556478	+0.93003842	0.99953094	0.70520071	+0.93022608	0.99901519
39	0.61221207	0.6120633	0.999757	0.6120633	0.6120633	0.999757	0.6120633	-0.9998604	0.999757	0.6120633	-0.9998604	0.999757
40	0.49970017	0.50021135	1.001023	0.50021134	0.50021134	1.001023	0.50021134	+0.94897666	1.001023	0.50021133	+0.9489769	1.001023
41	0.49970017	0.49966995	0.99993953	0.49966995	0.49966995	0.99993953	0.49966995	+0.94929174	0.99993953	0.49966995	-0.94929156	0.99993953
42	0.49342193	0.49346578	1.0000889	0.49346116	0.49346116	1.0000795	0.49346116	+0.99965873	1.0000795	0.49345191	-0.99965918	1.0000608
43	0.29901739	0.29892712	0.99969812	0.29891317	0.29891317	0.99965146	0.29891317	-0.94031324	0.99965146	0.2988852	-0.94034074	0.99955792
44	0.29901739	0.29970157	1.0022881	0.2996876	0.2996876	1.0022414	0.2996876	-0.94030086	1.0022414	0.2996596	-0.94032764	1.0021477
45	0.25312641	0.25280906	0.9987463	0.25280906	0.25280906	0.9987463	0.25280906	+0.79728359	0.9987463	0.25280906	+0.79728299	0.9987463
46	0.25312641	0.25336283	1.000934	0.25336283	0.25336283	1.000934	0.25336283	-0.79728365	1.000934	0.25336282	+0.79728305	1.000934
47	0.20386415	0.2038536	0.99994825	0.20383974	0.20383974	0.99988031	0.20383974	+0.71367382	0.99988031	0.20381196	+0.71413268	0.99974401
48	0.20386415	0.20381372	0.99975266	0.20379986	0.20379986	0.99968467	0.20379986	-0.7137926	0.99968467	0.20377206	-0.7142504	0.99954829
49	0.19719728	0.19727731	1.0004058	0.19723945	0.19723945	1.0002138	0.19723945	-0.99979258	1.0002138	0.19716363	-0.99979387	0.99982935
50	0.1724863	0.17243242	0.99968761	0.17243241	0.17243241	0.99968759	0.17243241	-0.99991112	0.99968759	0.1724324	-0.99991099	0.99968753
51	0.069032863	0.069472062	1.0063622	0.069465509	0.069465509	1.0062672	0.069465509	+0.99972428	1.0062672	0.06945237	-0.999724	1.0060769
52	0.065915478	0.065803823	0.99830609	0.065803823	0.065803824	0.99830611	0.065803824	-0.99973128	0.99830611	0.065803827	-0.99973127	0.99830615
53	0.054883117	0.055044	1.0029314	0.055043999	0.055043999	1.0029314	0.055043999	-0.72889087	1.0029314	0.055043995	-0.72889614	1.0029313
54	0.054883117	0.055242566	1.0065493	0.055242564	0.055242564	1.0065493	0.055242564	+0.72888333	1.0065493	0.055242561	+0.72888879	1.0065493
55	1.7328945e-05	0.0008990431	51.881007	0.00089903	0.00089903	51.880461	0.00089903	+0.94064234	51.880461	0.00089901	+0.94064929	51.879366
56	1.7328945e-05	0.0014883871	85.890233	0.0014883624	0.0014883624	85.888807	0.0014883624	+0.75084298	85.888807	0.00148831	+0.75086098	85.885947
57	7.1984282e-07	0.00064401	894.65598	0.00064400	0.00064400	894.64203	0.00064400	-0.69167568	894.64203	0.00064398	+0.69170018	894.61405

結果として、 2° 変化しても変化させない場合とオーダーでは似たようなレベルの変化に収まっている。ただし、この特異値・特異ベクトルを利用して制御した場合、Zernike 0,1 次モードを除いたアクチュエータ制御量残差がそれぞれのアクチュエータで振動するような様子もみられ⁵、あまり大きなずれは望ましくない可能性がある。

5 測定結果 III – z_s 距離に誤差をつけた場合の擾乱・誤差の影響

セグメント背面からギャップセンサー測定面までの距離が、実際の値と実測設定値で誤差がある場合を考える。これについては、実際の望遠鏡 (セグメント) では、アクチュエータにより駆動される基準面からギャップセンサー測定面までの距離として定義されるもので、アクチュエータによる駆動系とセグメントの間にはにはホイップルツリーなどの機構が入っていることから基準面をどこに取るかは非常に微妙な問題である。内環・内周セグメント間以外のギャップセンサーについては、変換行列の要素を実際の望遠鏡を測定する際にこのパラメータを含めて測定することになるため、 z_s の基準面がどこであるかを厳密に考える必要はないといえるが、内環・内周セグメント間については厳密に値を与える必要がある。

このため、 z_s を理想位置 (-40mm) からずらして試験を行う。なお、 z_s を変化させる以外は、取り付け位置・角度については理想値を与え、行列要素の測定は毎回アクチュエータの制御位置を理想位置に戻した上で、アクチュエータを $10\mu\text{m}$ 制御し 10 回平均で測定する。

⁵ 定量的に調査したわけではないので、何らかの指標を定義して測定すると理想的な状態でもアクチュエータへの擾乱やギャップセンサーのノイズにより発生するものである可能性は残っている。

表 5: 測定結果 III — z_s を誤差を与えた場合の擾乱・誤差の影響 I

ID	初期特異値		0mm (-40mm)		+10mm (-30mm)		-10mm (-50mm)	
	特異値	内積値	特異値比	内積値	特異値	内積値	特異値	内積値
1	3.5125593	3.5130418	1.0001374	-0.99589167	3.5130415	1.0001373	3.5130421	1.0001375
2	3.4931074	3.4935739	1.0001336	+0.83305941	3.4935408	1.0001241	3.4936071	1.0001431
3	3.4931074	3.4920896	0.99970864	-0.83108768	3.4920567	0.99969921	3.4921227	0.99971811
4	3.348889	3.34771	0.99964794	-0.96176274	3.34771	0.99964794	3.34771	0.99964794
5	3.348889	3.3489176	1.0000085	-0.9618203	3.3489176	1.0000085	3.3489176	1.0000085
6	3.1751247	3.1747484	0.99988148	+0.99739156	3.1747484	0.99988148	3.1747484	0.99988148
7	3.1696391	3.1696513	1.0000039	-0.99737317	3.1696513	1.0000039	3.1696513	1.0000039
8	3.1508721	3.1496624	0.99961608	+0.99957585	3.1496624	0.99961607	3.1496624	0.99961608
9	3.0963133	3.0958028	0.99983513	-0.9962294	3.0957876	0.99983021	3.0958181	0.99984008
10	3.0963133	3.0942319	0.99932779	+0.99647553	3.0942164	0.99932277	3.0942475	0.99933282
11	2.9706138	2.9697588	0.99971218	+0.99992069	2.9697588	0.99971218	2.9697588	0.99971218
12	2.9081655	2.9066879	0.99949189	-0.99980755	2.9066879	0.99949189	2.9066879	0.99949189
13	2.9081655	2.9071836	0.99966235	+0.99888133	2.9071835	0.99966233	2.9071836	0.99966237
14	2.8899977	2.8908867	1.0003076	+0.9769351	2.890867	1.0003008	2.8909065	1.0003145
15	2.8899977	2.8899122	0.99997043	-0.97789949	2.8898927	0.99996368	2.8899318	0.9999772
16	2.7621252	2.7604041	0.99937688	-0.79898444	2.7604041	0.99937687	2.7604041	0.99937688
17	2.7621252	2.7632241	1.0003978	-0.79896067	2.7632241	1.0003978	2.7632241	1.0003978
18	2.7302841	2.7291902	0.99959935	-0.99973883	2.7291902	0.99959933	2.7291903	0.99959936
19	2.6335328	2.6350422	1.0005731	-0.7927743	2.6348861	1.0005139	2.6351989	1.0006327
20	2.6335328	2.6319806	0.9994106	-0.79283213	2.6318238	0.99935107	2.632138	0.99947038
21	2.5804478	2.5805022	1.0000211	+0.99976841	2.5805021	1.0000211	2.5805022	1.0000211
22	2.3805535	2.381725	1.0004921	+0.73627321	2.381725	1.0004921	2.381725	1.0004921
23	2.3805535	2.3798471	0.99970329	-0.73630111	2.3798471	0.99970329	2.3798471	0.99970329
24	2.3002318	2.2995207	0.99969089	+0.99994911	2.2995207	0.99969088	2.2995207	0.99969089
25	2.1527796	2.1526992	0.99996265	-0.99996896	2.1526992	0.99996264	2.1526992	0.99996266
26	2.0170977	2.0172387	1.0000699	+0.87300905	2.0172387	1.0000699	2.0172387	1.0000699
27	2.0170977	2.0157577	0.99933567	-0.87300347	2.0157577	0.99933566	2.0157578	0.99933568
28	1.8864321	1.8861228	0.99983603	-0.79748083	1.8849203	0.99919857	1.8873268	1.0004742
29	1.8864321	1.8874298	1.0005289	+0.79747348	1.8862252	0.99989033	1.8886358	1.0011682
30	1.8223296	1.822984	1.0003591	+0.99983307	1.8229837	1.0003589	1.8229844	1.0003593

表 5: 測定結果 III — z_s を誤差を与えた場合の擾乱・誤差の影響 I

ID	初期特異値	0mm (-40mm)		+10mm (-30mm)		-10mm (-50mm)	
		特異値	内積値	特異値	内積値	特異値	内積値
31	1.3741005	1.3745197	-0.99001928	1.3744012	-0.98995464	1.3746378	-0.99008264
32	1.3741005	1.3737833	+0.99010234	1.3736652	+0.9903874	1.373901	-0.99016465
33	1.339993	1.3395457	+0.9939982	1.3395457	+0.9939914	1.3395457	+0.99399726
34	1.339993	1.3409206	-0.99399382	1.3409206	-0.99399488	1.3409206	-0.99399277
35	1.23383	1.2339361	+0.99990963	1.2339361	+0.99990963	1.2339361	+0.99990963
36	1.2122004	1.2127381	+0.99989935	1.2127381	+0.99989934	1.2127381	+0.99989936
37	0.70589589	0.70565911	+0.92985054	0.70524632	+0.93027828	0.70607084	+0.92941991
38	0.70589589	0.70592823	+0.92985012	0.70551599	+0.93027776	0.70633941	+0.92941958
39	0.61221207	0.6120633	-0.99998604	0.6120633	-0.99998604	0.6120633	-0.99998605
40	0.49970017	0.50021135	+0.94897642	0.50021135	+0.94897631	0.50021135	+0.94897653
41	0.49970017	0.49966995	+0.94929192	0.49966995	-0.94929182	0.49966995	+0.94929201
42	0.49342193	0.49347041	+0.99965827	0.4934704	-0.99965827	0.49347041	-0.99965827
43	0.29901739	0.29894106	-0.94028571	0.29890943	-0.94034799	0.29897256	-0.94022337
44	0.29901739	0.29971553	-0.94027405	0.29968385	-0.94033469	0.29974707	-0.94021335
45	0.25312641	0.25280906	+0.79728419	0.25280906	+0.79728357	0.25280906	+0.7972848
46	0.25312641	0.25336283	-0.79728424	0.25336283	+0.79728362	0.25336283	-0.79728486
47	0.20386415	0.20386742	+0.7132152	0.20383604	+0.71449138	0.20389865	+0.71193947
48	0.20386415	0.20382755	-0.71333504	0.20379615	-0.71461201	0.2038588	-0.71205855
49	0.19719728	0.19731515	-0.99979116	0.19731514	-0.99978948	0.19731516	-0.99979281
50	0.1724863	0.17243242	+0.99991125	0.17243241	-0.99991107	0.17243243	-0.99991143
51	0.069032863	0.069478606	+0.9997245	0.069478606	-0.99972449	0.069478606	+0.9997245
52	0.065915478	0.065803822	-0.99973129	0.065803821	-0.9997313	0.065803823	-0.99973128
53	0.054883117	0.055044002	+0.72888562	0.055044001	-0.7288847	0.055044003	-0.72888655
54	0.054883117	0.055242567	+0.72887788	0.055242567	+0.72887695	0.055242567	+0.7288788
55	1.7328945e-05	0.000899053	+0.9406354	0.000899042	+0.94063096	0.000899063	+0.9406398
56	1.7328945e-05	0.0014884117	+0.750825	0.001488406	+0.75082448	0.0014884174	+0.75082549
57	7.1984282e-07	0.0006440217	-0.69165121	0.000644029	+0.69164654	0.000644014	-0.69165585

表 6: 測定結果 III — z_s を誤差を与えた場合の擾乱・誤差の影響 2

ID	初期特異値		+50mm (+10mm)		-50mm (-90mm)		-100mm (-140mm)		
	特異値	特異値比	内積値	特異値比	特異値	特異値比	内積値	特異値	特異値比
1	3.5125593	1.000137	-0.99595764	3.5130432	1.0001378	-0.99582294	3.5130446	1.0001382	-0.99575128
2	3.4931074	1.0000866	+0.83312223	3.4937408	1.0001813	+0.83299861	3.4939105	1.0002299	+0.83294006
3	3.4931074	0.99966176	-0.83118033	3.4922561	0.9997563	-0.83099582	3.4924254	0.99980476	-0.83090492
4	3.348889	0.99964793	-0.96176167	3.3477101	0.99964795	-0.96176382	3.3477101	0.99964796	-0.96176492
5	3.348889	1.0000085	-0.96181946	3.3489176	1.0000085	-0.96182116	3.3489176	1.0000085	-0.96182203
6	3.1751247	0.99988147	+0.99739168	3.1747484	0.99988148	+0.99739145	3.1747484	0.99988148	+0.99739133
7	3.1696391	1.0000039	-0.99737316	3.1696513	1.0000039	-0.99737318	3.1696513	1.0000039	-0.99737319
8	3.1508721	0.99961606	-0.99957653	3.1496624	0.99961609	+0.99957514	3.1496625	0.9996161	+0.99957442
9	3.0963133	0.9998107	-0.9962114	3.09588	0.99986006	-0.99624665	3.09588	0.9998855	-0.9962631
10	3.0963133	0.99930292	+0.99645684	3.0943104	0.99935315	+0.99649348	3.0943906	0.99937903	+0.99651062
11	2.9706138	0.99971217	+0.99992079	2.9697589	0.99971219	+0.99992059	2.9697589	0.9997122	+0.99992048
12	2.9081655	0.99949189	-0.99980794	2.9066879	0.99949189	-0.99980715	2.9066879	0.99949189	-0.99980674
13	2.9081655	0.99966226	-0.99889542	2.9071839	0.99966244	+0.99886664	2.9071841	0.99966254	+0.99885131
14	2.8899977	1.0002738	+0.97679199	2.8909866	1.0003422	+0.97707731	2.891089	1.0003776	+0.97721842
15	2.8899977	0.99993702	-0.97774117	2.890011	1.0000046	-0.97805753	2.8901122	1.0000396	-0.97821517
16	2.7621252	0.99937686	-0.79898386	2.7604041	0.99937689	-0.79898504	2.7604041	0.9993769	-0.79898566
17	2.7621252	1.0003978	-0.79895979	2.7632241	1.0003978	-0.79896158	2.7632241	1.0003978	-0.79896251
18	2.7302841	0.99959925	-0.99974118	2.7291905	0.99959944	-0.99973638	2.7291908	0.99959954	-0.9997338
19	2.6335328	1.0002793	-0.79271554	2.6358327	1.0008733	-0.79282127	2.6366403	1.00118	-0.79285575
20	2.6335328	0.99911551	-0.79277031	2.6327746	0.99971209	-0.79288205	2.6335858	1.0000201	-0.79291939
21	2.5804478	1.000021	+0.99976371	2.5805024	1.0000212	+0.999773	2.5805027	1.0000213	+0.9997748
22	2.3805535	1.0004921	+0.73627266	2.381725	1.0004921	+0.73627377	2.381725	1.0004921	+0.73627435
23	2.3805535	0.99970329	-0.73630052	2.3798471	0.99970329	-0.73630172	2.3798471	0.99970329	-0.73630235
24	2.3002318	0.99969088	-0.99994912	2.2995207	0.99969089	+0.99994911	2.2995207	0.99969089	+0.9999491
25	2.1527796	0.9999626	-0.99996936	2.1526993	0.99996271	-0.99996852	2.1526994	0.99996277	-0.99996804
26	2.0170977	1.0000698	+0.87303153	2.0172388	1.0000699	+0.87298429	2.0172389	1.00007	+0.87295685
27	2.0170977	0.99933562	+0.87302635	2.0157578	0.99933573	+0.87297823	2.015758	0.99933578	+0.87295024
28	1.8864321	0.99665648	-0.79694317	1.8921568	1.0030346	-0.79799671	1.8982253	1.0062516	-0.79847623
29	1.8864321	0.9973438	+0.79693619	1.893474	1.0037329	+0.79798866	1.8995527	1.0069552	+0.7984673
30	1.8223296	1.0003581	-0.99980014	1.8229856	1.00036	-0.99985805	1.822987	1.0003608	-0.99987745

表 6: 測定結果 III — z_s を誤差を与えた場合の擾乱・誤差の影響 2

ID	初期特異値	+50mm (+10mm)		-50mm (-90mm)		-100mm (-140mm)				
		特異値	特異値比	特異値	特異値比	特異値	特異値比			
31	1.3741005	1.373923	0.99987083	+0.98968291	1.3751062	1.0007319	-0.99032337	1.375628	1.0011515	-0.99059651
32	1.3741005	1.3731886	0.99933638	-0.98977137	1.3743679	1.0001946	-0.99040131	1.3749425	1.0006127	+0.99066961
33	1.339993	1.3395456	0.99966614	+0.99400299	1.3395458	0.99966631	+0.99399358	1.3395459	0.99966639	+0.99398912
34	1.339993	1.3409205	1.0006922	+0.99399919	1.3409207	1.0006923	+0.99398866	1.3409208	1.0006924	+0.9939837
35	1.23383	1.2339361	1.000086	+0.99990963	1.2339361	1.000086	-0.99990963	1.2339361	1.000086	-0.99990964
36	1.2122004	1.2127381	1.0004436	+0.9998993	1.2127381	1.0004436	-0.9998994	1.2127381	1.0004436	-0.99989944
37	0.70589589	0.7035846	0.99672574	+0.93196011	0.70770726	1.0025661	-0.92766868	0.7097292	1.0054304	+0.92541595
38	0.70589589	0.70385651	0.99711094	+0.93195922	0.70797363	1.0029434	+0.92766872	0.7099929	1.005804	+0.92541645
39	0.61221207	0.6120633	0.99975699	-0.99998601	0.61206331	0.99975701	-0.99998607	0.61206331	0.99975702	-0.99998609
40	0.49970017	0.50021134	1.001023	-0.94897586	0.50021136	1.001023	+0.94897697	0.50021137	1.001023	+0.94897749
41	0.49970017	0.49966995	0.99993953	+0.94929142	0.49966995	0.99993952	+0.9492924	0.49966994	0.99993952	+0.94929287
42	0.49342193	0.4934704	1.0000982	+0.99965826	0.49347041	1.0000983	+0.99965828	0.49347041	1.0000983	+0.99965829
43	0.29901739	0.29878161	0.99921148	-0.94059651	0.29909729	1.0002672	-0.93997348	0.29925039	1.0007792	-0.93966012
44	0.29901739	0.29955586	1.0018008	+0.94057658	0.29987198	1.002858	-0.93996996	0.30002529	1.0033707	-0.93966459
45	0.25312641	0.25280906	0.9987463	+0.7972811	0.25280906	0.9987463	+0.79728723	0.25280907	0.99874631	+0.79729022
46	0.25312641	0.25336282	1.000934	-0.79728111	0.25336283	1.000934	-0.79728732	0.25336283	1.000934	+0.79729036
47	0.20386415	0.20370889	0.99923846	-0.71959966	0.20398219	1.0005791	+0.70705108	0.20413297	1.0013187	+0.7133386
48	0.20386415	0.20366892	0.9990424	-0.71972367	0.20402197	1.0007742	+0.70722032	0.20417268	1.0015134	+0.7135079
49	0.19719728	0.19731509	1.0005974	-0.9997824	0.19731521	1.000598	-0.99979912	0.19731526	1.0005982	-0.99980636
50	0.1724863	0.17243238	0.99968741	+0.99991034	0.17243246	0.99968787	-0.99991213	0.1724325	0.99968809	+0.99991296
51	0.069032863	0.069478606	1.006457	-0.99972449	0.069478607	1.006457	-0.9997245	0.069478607	1.006457	+0.99972451
52	0.065915478	0.065803816	0.99830598	+0.99973134	0.065803828	0.99830616	-0.99973123	0.065803834	0.99830625	-0.99973118
53	0.054883117	0.055043996	1.0029313	+0.72888095	0.055044008	1.0029315	-0.7288902	0.055044013	1.0029316	+0.7288947
54	0.054883117	0.055242566	1.0065494	+0.72887323	0.055242568	1.0065494	+0.72888244	0.055242569	1.0065494	+0.72888691
55	1.7328945e-05	0.000899000	51.878513	+0.94061283	0.00089910	51.88452	+0.94065705	0.000899154	51.887418	+0.94067784
56	1.7328945e-05	0.0014883828	85.889985	+0.75082214	0.0014884398	85.893276	+0.75082721	0.001488467	85.894846	+0.75082881
57	7.1984282e-07	0.000644059	894.72166	-0.69162759	0.00064398	894.61877	-0.69167414	0.000643949	894.56828	-0.6916964

これらの結果からは、-100mmのずれが発生してもペアを構成しない特異ベクトルでは内積値の変化は1%以下、ペアを構成する特異ベクトルのペア間での内積値の差も1%以下であり、かつ特異値の変化・ずれとも同様に小さいレベルに収まっているといえる。

つまり、 z_s の誤差は(セグメントの横ずれなどほどには)それほど大きな影響を及ぼさないと結論付けられる。

6 結論

ギャップセンサーの読み出しノイズが $\pm 10\text{nm}$ 一様乱数で表される場合において、アクチュエータを $10\mu\text{m}$ それぞれ駆動させて変換行列の要素を測定することで、制御に大きな影響を与えない特異値・特異ベクトルのセットを得ることが判明した。この駆動量はどの制御位置でも駆動可能な量であるので、この方法を実際の望遠鏡で実現することは可能と考えてよい。