

# 分割主鏡シミュレーター (第3版バージョン6) — 原案・設計

岡山新技術望遠鏡グループ

平成 23 年 1 月 6 日

## 目次

1	概要	2
2	必要な機能	2
3	ギャップセンサーの取り扱い	2
3.1	実際の運用時に発生する可能性のある傾き	2
3.2	シミュレータでの取り扱い	3
4	PSF の導出 — フーリエ光学	4
4.1	開口の扱い	4
4.1.1	位相なし開口から出る球面波	4
4.1.2	波面における位相差	4
4.2	回折現象	4
4.2.1	近距離近似 — Fresnel 回折	5
4.2.2	遠距離近似 — Fraunhofer 回折	5
4.3	レンズ系の取り扱い	5
4.4	PSF の導出方法の検討	6
4.4.1	2次元離散フーリエ変換	6
4.4.2	位相差の導出	7
5	セグメントの基準位置からのずれによる影響	7
5.1	鏡面形状の取り扱い	7
5.2	鏡材平面形状の定義	7
5.3	理想鏡面形状の定義	7
5.4	座標系の定義と関係	8
5.5	鏡材背面と平行な面上の移動による影響	9
5.5.1	ギャップセンサー読み出し値	10
5.5.2	鏡面の位置・位相	10
5.6	内環の取り扱い	11
5.7	セグメントのアクチュエーターによる移動	12
5.7.1	アクチュエータによる駆動位置の定義	12
5.7.2	ギャップセンサー読み出し値	12
5.7.3	鏡面の位置・位相	13
5.8	SH への影響	14
5.9	鏡面上にあるかないかの確認	14

6	シミュレータでの試験	14
6.1	行列近似演算の妥当性 I — 変換の非線形性	14
6.2	行列近似演算の妥当性 II — セグメントの並進・回転	15
6.3	ギャップセンサー配置に対する特異値の評価	15
6.4	ギャップセンサー配置の最適化	15
7	実装	16
7.1	PSF 分解能	16
7.2	セグメントギャップの反映	16
7.3	開口面での位相変動量の導出	17
7.4	class method	17
7.4.1	class Segment	17
7.4.2	class Gapsensor	17
7.5	入出力ファイル仕様	17
7.5.1	ギャップセンサー配置データ	18
7.5.2	セグメント・アクチュエータ定義ファイル	19

## 1 概要

鏡材の回転やギャップセンサーの取り付け傾きなどの影響の評価を導入するため、これまで平面で近似していた部分を全て三次元化する。それ以外の機能としては、これまでの PSF 出力機能などを含めて維持する。

## 2 必要な機能

- ギャップセンサーのヘッド側面・対向板の 3 次元位置評価
- 鏡材の背面の平面上での並進・回転を入れた評価
- ギャップセンサー測定面の取り付け傾きを入れた評価
- PSF 導出機能
- SH 移動量出力機能

## 3 ギャップセンサーの取り扱い

ギャップセンサーのセンシング回路が入っているヘッド側は点ではなく、ヘッド側・対向板側の相対角度が測定結果に影響してくると考えられる。シミュレーターでギャップセンサー部分を 3 次元的に取り扱った場合、ヘッド側・対向板側のそれぞれに対して中心点<sup>1</sup>と垂線ベクトルを考えることになる。

ギャップセンサー測定面の直径は 8mm であるので、測定面内の最大のギャップの差は  $1^\circ(0.01745329 \text{ rad})$  傾いた場合に 0.139619251 mm である。

### 3.1 実際の運用時に発生する可能性のある傾き

セグメントの背面の平面上での並進では背面に取り付けている面の向きは変化しないが、背面に垂直な軸<sup>2</sup>周りでの回転では取り付け面と背面との傾きがある場合に影響がある。背面に対する取り付け面の傾き角が  $\alpha$ 、セグメントの背面

<sup>1</sup>対向板側にはセンシング回路としての中心点はないので、対向板の場所を決定する基準点と考える。

<sup>2</sup>定義から、セグメント中心点として定義している場所での鏡面側の法線ベクトルの向きに一致する。

に垂直な軸での回転角が $\beta$ とすると、取り付け面の法線ベクトルの元の取り付け面に対する傾き $\gamma$ は<sup>3</sup>

$$\cos \gamma = \sin^2 \alpha \cos \beta + \cos^2 \alpha$$

$$\sin \frac{\gamma}{2} = \sin \alpha \sin \frac{\beta}{2}$$

とあらわされる。つまり、 $\alpha, \beta, \gamma \ll 1$ と近似が行える場合、

$$\gamma \sim \alpha\beta$$

となり、傾き・回転の影響は掛け算程度の小さい量になる。同一セグメント内の鏡面の法線ベクトルの最大傾きは $2^\circ$ 程度であるので、セグメントの回転角 $0.1^\circ$ である場合は最大で $0.0035^\circ$ 程度で測定面内の最大ギャップ差で $487\text{nm}$ 、セグメントの回転角 $1^\circ$ である場合は最大で $0.035^\circ$ 程度で測定面内の最大ギャップ差で $4.9\mu\text{m}$ となる。

セグメントをアクチュエーターで押し引きした際の傾きは、セグメントの背面のある点を押し引きする(回転駆動)ではなく、セグメントの背面に対して3つの垂直な軸を既定して、その軸の上での支持点の移動(傾きの変化による駆動)と考える。この場合、セグメントの背面の位置は、アクチュエータの駆動位置の軸方向の移動量3つによって記述される平面となる。実際のセグメントでは、各点の最大駆動量が $1\text{mm}$ 、点間距離は約 $500\text{mm}$ であるので、傾きは $0.004\text{rad}$ ( $0.229^\circ$ )程度といえる。ただし、通常の運用時で想定される駆動量 $\sim 100\mu\text{m}$ <sup>4</sup>ではこの $1/10$ の $0.0004\text{rad}$ ( $0.0229^\circ$ )程度といえる。

トラスの変形によるグローブの相対位置変動は、アクチュエーターでの押し引き量として考えることができ、また鏡面の位相をそろえる駆動をセグメントに行った場合は、アクチュエーター先端では同じ相対位置に来ているはずであるので、独立な傾きへの変化量として考える必要はない。

なお、最終的な制御された状態においては、アクチュエータ・グローブの相対位置変動が0になるように制御されるはずであるので、制御が効いているときのギャップセンサーの相対面の傾きはほぼセグメントの回転によるもののみであるといえる。たとえば、アクチュエータ先端での相対位置変化が $100\text{nm}$ に抑えられたときの相対面の傾きは $2.29\text{e-}5^\circ$ であるのに対し、 $0.1^\circ$ 回転した場合の相対面の傾きへの影響は $3.5\text{e-}3^\circ$ と2桁大きい。

### 3.2 シミュレータでの取り扱い

シミュレータでの取り扱いを考える場合には、相対面が傾いていた場合にどの点で代表させてギャップセンサー測定値とするかと、傾きの影響をどう考慮するか、の2つの点を考える必要がある。これは、相対する2つのセンシング面と対向板上のどの2点を利用するかということに言い換えることができる。

センシング面側のある点に対して対向面側のどの点までの距離が測定されるかを考えた場合、最も近くなる点との距離を測定していると考えるのが自然である。この場合、センシング面上のある点から対向板上の測定対象の点までのベクトルと、対向板面は垂直であり、対向板上のある点と対向板に対する垂線ベクトルが求まっていると、任意の点に対するこの意味での距離は導出できる<sup>5</sup>。また、センシング面も対向板面も平面であると想定できるので、測定される領域に対してのギャップ距離での平均という意味での代表点はセンシング面の中心といえる<sup>6</sup>。

よって、シミュレータでは、ギャップセンサーヘッド側のセンシング面の中心位置(定義ファイルではこの位置を与える)から最も近い対向板上の点までの距離として定義する。これは、ある3次元座標上でのセンシング面中心位置から対向板上のある点までのベクトルと、対向板の垂線ベクトルの二つの内積として求められる。

<sup>3</sup>球面三角法での、隣接する二つの頂角が両方 $\alpha$ で、その間の大円の弧が $\beta$ のときの $\beta$ に対応する頂角が $\gamma$ である。

<sup>4</sup>トラスの変形による最大変動量が $100\mu\text{m}$ 程度であることから。

<sup>5</sup>2点間のベクトルと垂線ベクトルの内積である。

<sup>6</sup>ただし、実際に読み出される値はギャップ距離ではなくそれに対して対数的な振る舞いをするカウントであるのでカウントの値での平均を出す値は中心からずれるが、傾斜は $1\mu\text{m}$ 変わってもそれほど変化しないのでセンシング領域の中心で代表させることはそれほどずれているわけではない。

## 4 PSFの導出 — フーリエ光学

### 4.1 開口の扱い

#### 4.1.1 位相なし開口から出る球面波

球面波は  $A$  を複素振幅、 $r$  を球面波射出点からの距離、 $k$  を波数 ( $k\lambda = 2\pi$ ) とすると

$$\Psi = \frac{A}{r} \exp(ikr)$$

とあらわされる。

いま、ある平面  $(\xi, \eta)$  上 (の各点) で球面波が射出 (出射面) されているとする。このとき、垂線が一致し、原点が出射面の原点を通る垂線に乗るようなイメージ面上にある点  $(x, y)$  での波面は、 $(\xi, \eta)$  と  $(x, y)$  の距離を  $r$  として

$$u(x, y) = \frac{1}{i\lambda} A \iint_{\mathcal{V}} \frac{1}{r} \exp(ikr) d\xi d\eta$$

とあらわされる。

これに対して、射出されている部分だけで 1 となる  $G(\xi, \eta)$  を開口関数と定義すると

$$u(x, y) = \frac{1}{i\lambda} A \iint_{\mathcal{V}} \frac{1}{r} G(\xi, \eta) \exp(ikr) d\xi d\eta$$

である。

#### 4.1.2 波面における位相差

位相  $l$  だけずれた球面波は

$$\Psi = \frac{A}{r} \exp(i(kr + l)) = \frac{A}{r} \exp(ikr) \exp(il)$$

とあらわされる。よって、この球面波による  $(x, y)$  での波面は

$$u(x, y) = \frac{1}{i\lambda} A \iint_{\mathcal{V}} \frac{1}{r} (G(\xi, \eta) \exp(il)) \exp(ikr) d\xi d\eta$$

である。出射面で位相が異なる波面の場合、開口関数を変えるとよい。この場合、開口関数は複素値を取る。

### 4.2 回折現象

いま、2 平面間の距離を  $R$  とする。すると  $r$  は

$$r^2 = R^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2$$

である。これを利用すると、上述の式は

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \frac{A}{i\lambda} \iint_{\mathcal{V}} \frac{1}{r} G(\xi, \eta) \exp\left(ik\left(R^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2\right)^{1/2}\right) d\xi d\eta \\ &= \frac{A}{i\lambda} \iint_{\mathcal{V}} \frac{1}{r} G(\xi, \eta) \exp\left(ikR\left(1 + \left(\frac{x - \xi}{R}\right)^2 + \left(\frac{y - \eta}{R}\right)^2\right)^{1/2}\right) d\xi d\eta \end{aligned}$$

となる。

#### 4.2.1 近距離近似 — Fresnel 回折

開口サイズに比べて平面間距離が十分長く、かつ  $(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \sim R\lambda$  程度であるとする。この場合、 $r \sim R$  と近似できる。

このとき

$$\begin{aligned} u(x, y) &\sim \frac{A}{iR\lambda} \iint_V G(\xi, \eta) \exp\left(ikR + \frac{ik}{2R} \left((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2\right)\right) d\xi d\eta \\ &= -\frac{iA}{R\lambda} \exp(ikR) \iint_V G(\xi, \eta) \exp\left(i\frac{\pi}{R\lambda} \left((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2\right)\right) d\xi d\eta \end{aligned}$$

と近似される。

#### 4.2.2 遠距離近似 — Fraunhofer 回折

平面間距離が十分離れていて  $\xi^2 + \eta^2 \ll R\lambda$  である場合、イメージ面での分布は

$$\begin{aligned} u(x, y) &\sim -\frac{iA}{R\lambda} \exp(ikR) \iint_V G(\xi, \eta) \exp\left(i\frac{\pi}{R\lambda} \left((x^2 + y^2) - 2(x\xi + y\eta)\right)\right) d\xi d\eta \\ &= -\frac{iA}{R\lambda} \exp(ikR(x^2 + y^2)) \iint_V G(\xi, \eta) \exp\left(-i\frac{2\pi}{R\lambda} (x\xi + y\eta)\right) d\xi d\eta \end{aligned}$$

となる。

いま、 $u(x, y)$  と  $G(\xi, \eta)$  はそれぞれ 2 次元ユークリッド空間  $(x, y), (\xi, \eta)$  での可積分関数であるといえ、内積  $\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\xi} = x\xi + y\eta$  が成立することから、この積分は 2 空間の間のフーリエ変換であるといえる。よって、遠方場における回折光パターンは、開口関数のフーリエ変換で表される。

### 4.3 レンズ系の取り扱い

薄肉・両球面のレンズを考え、開口・イメージ面について近軸近似が成立すると仮定する。レンズ系を図 1 と定義する。また、入射側の面を  $E_I$  レンズ R を  $R_1$ 、出射側の面を  $E_I'$  レンズ R を  $R_2$ 、レンズの焦点距離を  $f$  とする。

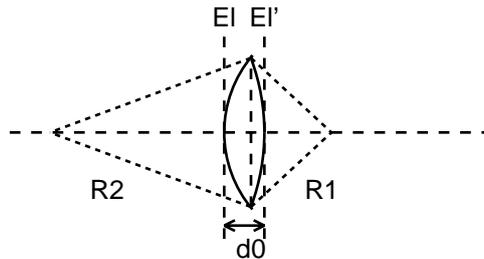


図 1: レンズ系概念図

任意  $(x, y)$  におけるレンズ肉厚を  $\Delta(x, y)$  であらわし、 $(0, 0)$  での値を  $\Delta_0 = \Delta(0, 0)$  とあらわすことにする。また、レンズの材質 (屈折率) を  $n$  とする。この場合の入射  $E_I$  と出射  $E_I'$  間の位相遅れ  $\Phi_{(x, y)}$  は

$$\Phi_{(x, y)} = kn\Delta(x, y) + k(\Delta_0 - \Delta(x, y)) = k\Delta_0 + k(n - 1)\Delta(x, y)$$

となる。つまり

$$E_I' = E_I \exp(ikn\Delta_0) \exp(ik(n - 1)\Delta(x, y))$$

とあらわされる。

球面レンズを仮定しているので

$$\begin{aligned}\Delta(x, y) &= \Delta_0 - R_1 \left( 1 - \left( 1 - \frac{x^2 + y^2}{R_1^2} \right)^{1/2} \right) + R_2 \left( 1 - \left( 1 - \frac{x^2 + y^2}{R_2^2} \right)^{1/2} \right) \\ &\sim \Delta_0 - R_1 \cdot \frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2}{R_1^2} + R_2 \cdot \frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2}{R_2^2} = \Delta_0 - \frac{x^2 + y^2}{2f(n-1)}\end{aligned}$$

である。つまり、レンズ系は位相遅れとして

$$E'_l = E_l \exp(ikn\Delta_0) \exp\left(-i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right)$$

と働く。

入射開口  $G(\xi, \eta)$  の場所に焦点距離  $f$  レンズがある場合を考える。この場合のイメージ面での像は

$$\begin{aligned}u(x, y) &= \frac{A}{i\lambda} \iint_{\mathcal{V}} G(\xi, \eta) \exp\left(ik(R^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2)^{1/2}\right) \cdot \text{const} \cdot \exp\left(-i\frac{k}{2f}(\xi^2 + \eta^2)\right) d\xi d\eta \\ &\sim \frac{A}{i\lambda} \iint_{\mathcal{V}} G(\xi, \eta) \exp(ikR) \exp\left(\frac{ik}{2R}((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2) - i\frac{k}{2f}(\xi^2 + \eta^2)\right) d\xi d\eta\end{aligned}$$

いま、 $R = f$  のところのイメージを考えると

$$= \frac{A}{i\lambda} \iint_{\mathcal{V}} G(\xi, \eta) \exp(ikR) \exp\left(-\frac{ik}{2f}(x\xi + y\eta)\right) d\xi d\eta$$

となり、frounhofer 回折での  $R$  を  $f$  とした表式と同じ。つまり、レンズ系での点像の分布関数は、瞳の分布関数のフーリエ変換である。

#### 4.4 PSF の導出方法の検討

仮定として、光学系の設計及び製造は完全であるとする。設計における像の広がり収差の影響が回折限界 PSF よりも小さくなるように光学設計されているはずであり、製造のほうについても各素子に要求される製造誤差の仕様は同様に小さくなるように定められているので、これら仮定は問題ない。

ここで、簡単化のために光学系を M1 だけで代表させる。実際には M3 は単純な平面鏡であるので M1+M2 を代表させることになる。このとき、M1 への入射光は十分遠方からの波面で、それを焦点位置に結像させる光学系となる。反射系と透過系は前節の薄肉レンズを仮定している場合、場所により異なる位相遅れを引き起こす系として同じと解釈できるので置換可能である。(また、これは表式の上では単なる円形開口とした場合の frounhofer 回折と同じ。)

いま、M1 のある場所  $(\xi, \eta)$  における鏡面誤差が  $\tau(\xi, \eta)$  であったとする。これに対応する位相遅れ量は波長  $\lambda$  を利用して  $4\pi\tau(\xi, \eta)/\lambda$  である。

まとめると、位相がずれた分割主鏡を持つ望遠鏡の PSF は、主鏡の投影像と同じ開口における、分割主鏡の位相ずれ分を反映させた入射光に対する、望遠鏡の合成焦点距離だけ離れた位置での frounhofer 回折の PSF ということができる。

##### 4.4.1 2次元離散フーリエ変換

2次元フーリエ変換は

$$F(u, v) = \iint_{\mathcal{V}} f(x, y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

とあらわされ、離散化すると

$$\begin{aligned}F(u, v) &= \sum_{\mathcal{V}_x} \sum_{\mathcal{V}_y} f(x, y) \exp\left(-i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right) \\ &= \sum_{\mathcal{V}_y} \left( \exp\left(-i2\pi\frac{vy}{N}\right) \sum_{\mathcal{V}_x} f(x, y) \exp\left(-i2\pi\frac{ux}{M}\right) \right)\end{aligned}$$

となる。

つまり、次元ごとに離散フーリエ変換をかければよい。<sup>7</sup>

#### 4.4.2 位相差の導出

PSF を求める際の鏡面の位置変化量 (位相差) を導出する際の基準軸について検討する。ここで、鏡面の位置変化量は主軸上での (入射光) 変動量を主軸と垂直な面内で求めた分布、ある位置で鏡面に垂直な直線に対して主軸と対称な直線上での (出射光) 変動量を主軸と垂直な曲面内で求めた分布など、いくつかの定義が考えられる。なお、これらの定義同士では、鏡面の主軸からの距離によって基準とする軸の方向が変化するため、定義を入れ替えることは単に PSF 変換前の位相差の分布関数に定数をかけるのではなく、分布関数からある曲面を引くような変換を行うことを意味する。

いま、レンズ系の取り扱いの定義から、鏡面の位相差の導入、つまりレンズ系の瞳の分布関数への位相差の導入は、主軸に垂直な面内でのずれとして計算すべき値であると考えられる。つまり、上に挙げたうちの、主軸上での変動量を主軸と垂直な面内で求めた分布を位相差として計算すべきであると考えられる。

## 5 セグメントの基準位置からのずれによる影響

### 5.1 鏡面形状の取り扱い

セグメントには、背面がなす平面を基準とした支持が行われる。つまり、セグメントの位置を決定するアクチュエータは鏡面の主軸方向ではなく、各セグメントにおける背面と垂直な方向に駆動される。よって、セグメントに対してさまざまな位置を考える場合は、できる限り背面がなす平面を基準とするのが望ましいといえる。

### 5.2 鏡材平面形状の定義

セグメントの平面形状は、ある中心を持つ扇形 (図 2) であり、セグメントの中央点 (X 軸方向中心点、Y 軸方向は  $x = 0$  上の内縁・外縁の中央点) がセグメント中心と定義されている。つまり、内周セグメントの中心点は  $r_c = 841$ 、外周セグメントの中心点は  $r_c = 1539$  である。これらをまとめると表 1 となる。ただし、() 付きの値で表示されている扇形開き角は定義値ではなく計算値なので注意。

表 1: セグメント平面形状

	内縁 R	外縁 R	中心点の R	扇形開き角
内周	500.000	1182.000	841.000	(59.57)
外周	1184.000	1894.000	1539.000	(29.79)

### 5.3 理想鏡面形状の定義

鏡面は、主軸を Z 軸とし主軸に垂直な平面内での半径 R、主軸と垂直な X,Y 軸について  $r^2 = x^2 + y^2$  と定義した r を利用して

$$(1+k)z^2 - 2Rz + r^2 = 0, \quad R = 10000[\text{mm}], \quad k = -1.034609$$

で定義されている。ただし、原点は主軸と鏡面の交点である。

各セグメントは、セグメント中心点において鏡面に対する垂線が背面に対する垂線に平行になるような傾きを持つように配置される (図 4)。つまり、セグメントの平面形状は主軸方向から見た平面形状でなく、セグメント中心点において鏡面に対する垂線方向から見た平面形状であることに注意。

<sup>7</sup>離散フーリエ変換が直交基底をなしていることから当然とは言える。

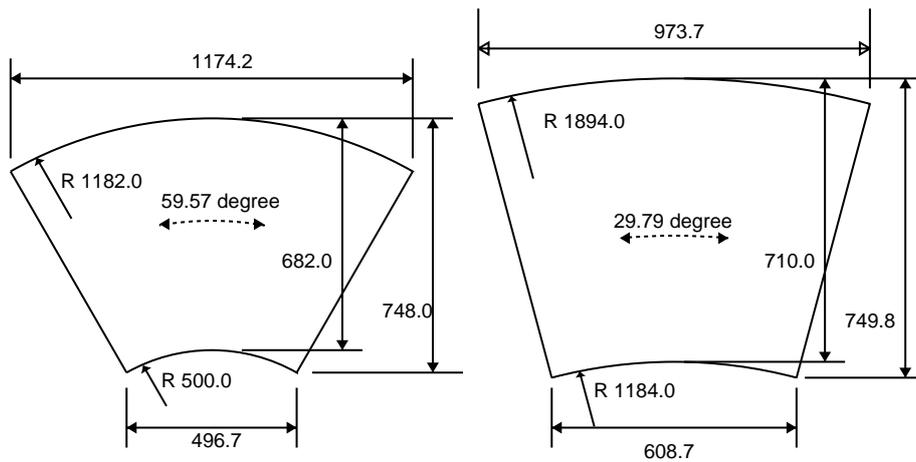


図 2: セグメント平面サイズ

## 5.4 座標系の定義と関係

(注: この節における表の値は実際のシミュレーション時の計算有効桁数から多少はみ出たところまで記載している。)  
望遠鏡における座標系としては、それぞれのセグメントに対してのローカル座標系と、望遠鏡全体についてのグローバルな座標系の 2 種類を取ることができる。

ここで、各セグメントにローカルな座標系を  $s$  (Segment) 座標系とし、座標原点をセグメント中心点における鏡面、 $Y$  軸を平面形状の半径方向、 $Z$  軸を原点における鏡面に対する垂線と定義する。また、望遠鏡全体のグローバルな座標系を  $g$  (Global) 座標系とし、座標原点を理想鏡面のパラボラ中心点、パラボラの主軸を  $Z$  軸とし、セグメント 1 と 7 が内周・外周それぞれでの配置原点 ( $Y$  軸正、 $X$  軸上) にくるような座標系 (図 3) と定義する。グローバル座標において、内周セグメントは  $Z$  軸周りに  $(ID-1) \times 60^\circ$  だけ反時計回りに回転すると、外周セグメントは  $Z$  軸周りに  $(ID-7) \times 30^\circ$  だけ反時計回りに回転すると、それぞれ配置原点のセグメント 1 もしくは 7 と同じ配置になる。これらの座標系の位置関係は図 4 となる。

この二つの座標系の関係は、グローバル座標系で配置原点と定義したセグメント 1 と 7 について、ある点を通る  $X$  軸に平行な線周りに回転し、 $YZ$  平面内で並進させる関係で表すことができる。なお、2 座標系間をつなぐ値として定義されているのは、セグメント中心点についての  $r_c$  のみであり、ここに出てくる他の値は全て定義値を利用して計算された値である。取り扱いしやすい座標変換は  $X$  軸に平行な回転変換の軸をどう取るかによって 2 種類あり、一つは  $y = 0$  の軸を利用する変換、もう一つはセグメント中心点を通る軸を利用する変換である。回転角はセグメント中心点における鏡面への垂線とグローバル座標系での  $Z_g$  軸のなす角であり、グローバル座標系でのセグメント中心における鏡面への垂線ベクトルは陰関数定理により

$$\mathbf{n} = \frac{1}{|\nabla|} \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \Bigg|_{(0, r_c, z_{gs})} \left( (1+k)z^2 - 2Rz + y^2 \right) = \left( r_c^2 + ((1+k)z_{gs} - R)^2 \right)^{-1/2} (0, r_c, (1+k)z_{gs} - R)$$

となり、内周・外周についての角度  $\theta_{gs}$  と三角関数の値は表 2 のようになる。

表 2: セグメントの傾き

	$r_c$	$z_{gs}$	$\sin \theta_{gs}$	$\cos \theta_{gs}$	$\theta_{gs}$
内周	841.0	35.3618861363	0.08379397373	0.9964831007	4.8066772322
外周	1539.0	118.4017908490	0.15204830855	0.9883730631	8.7456477394

一つ目の  $y = 0$  の軸を利用する変換は、グローバル座標系でセグメント中心点を通る鏡面に垂直な線と  $Z_g$  軸の交点

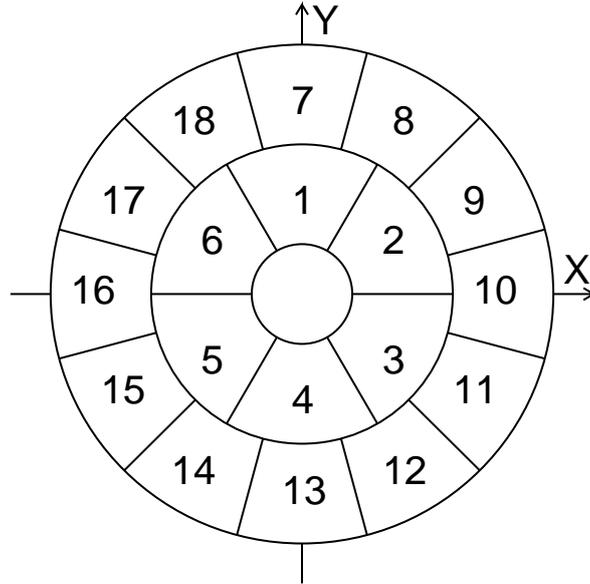


図 3: グローバル座標系におけるセグメント配置

( $z = z_c$ ) を通る  $Y_g$  軸に平行な直線周りに  $\theta_{gs}$  回転させ、鏡面定義が球面から外れている分  $-z_d$  だけ  $Z_s$  軸方向に移動させるという変換となる。二つ目のセグメント中心点を通る軸を利用する変換は、セグメント中心点  $(0, r_c, z_{gs})$  を通る  $Y_g$  軸に平行な直線周りに  $\theta_{gs}$  回転させ、原点を合わせる分  $(0, r_c, z_{gs})$  だけ  $YZ_s$  平面上で平行移動させるという変換になる。これらの座標変換のパラメータは表 3 のようになる。

表 3: 座標変換パラメータ

	$r_c$	$\theta_{gs}$	$z_c$	$z_d$	$z_{gs}$
内周	841.0	4.8066772322	10036.58572580	0.0644514212393	35.3618861363
外周	1539.0	8.7456477394	10122.49955831	0.7164574468548	118.4017908490

## 5.5 鏡材背面と平行な面上の移動による影響

鏡材の取り付け時の不完全さや望遠鏡が傾いたときのセグメントのずれは、セグメントのラテラル支持の固定面での位置ずれと考えることができる。つまり、鏡材の背面に平行な面上での並進・回転運動と読み替えることができる。これに対するギャップセンサーの読みと PSF に影響する鏡面の位置変化について検討する。

また、回転の中心軸が変化した場合の影響について考える。回転中心  $(x_0, y_0)$  の場合に並進・回転のパラメータが  $(\delta x_0, \delta y_0, \theta)$  であるとする、変換後の座標は

$$((x - x_0) \cos \theta - (y - y_0) \sin \theta + \delta x_0 + x_0, (x - x_0) \sin \theta - (y - y_0) \cos \theta + \delta y_0 + y_0)$$

となるので、回転軸中心  $(x_1, y_1)$  の場合に並進・回転のパラメータが  $(\delta x_1, \delta y_1, \theta)$  であるとする  $\delta x_1 - \delta x_0$  は

$$(x - x_0) \cos \theta - (y - y_0) \sin \theta + \delta x_0 + x_0 = (x - x_1) \cos \theta - (y - y_1) \sin \theta + \delta x_1 + x_1$$

$$\delta x_1 - \delta x_0 = (x_0 - x_1)(1 - \cos \theta) + (y_0 - y_1) \sin \theta$$

となり、回転中心のずれは並進移動距離の変化として線形対応で吸収できる。よって、回転の中心軸はセグメント系での  $Z_s$  軸に一致するとしてかまわない。

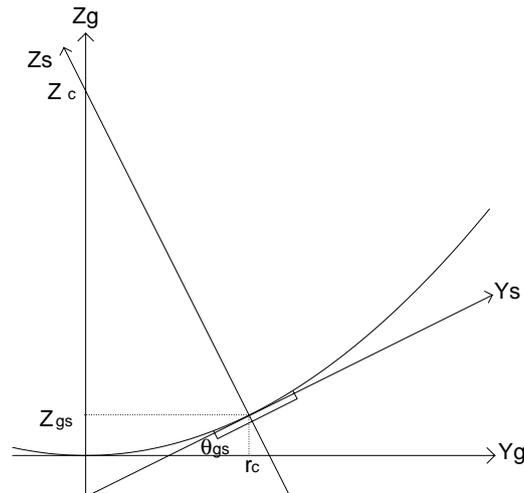


図 4: 座標系の定義とその関係

### 5.5.1 ギャップセンサー読み出し値

鏡材が背面に平行な面上で並進・回転移動したときのギャップセンサーの読みへの影響を考える。この場合、関係する鏡材は 2 枚存在し、この二つの相対位置関係を求める必要がある。いま、センシング面側は中心点の 3 次元座標が、対向板側は対向板上の点<sup>8</sup>と対向板に対する垂線ベクトルの二つがあればよい。

ここで、計算を簡単にするために、センシング面側の中心点の 3 次元座標を座標変換を行うことで、理想状態にある対向板側セグメントに対する位置を導出し、2 つのベクトルの内積を求める<sup>9</sup>ことにする。

このための操作は次のようになる。

- センシング面中心点の座標をセンシング面側セグメントの並進・回転で変換
- センシング面側セグメントの座標系をセグメント系からグローバル系に変換
- グローバル系上で対向板側のセグメントに移す (セグメント ID のみ変更)
- 対向板側セグメントをグローバル系からセグメント系に座標変換
- 対向板側セグメントの並進・回転を戻す変換を行う
- 対向板の基準点・垂線ベクトル (不変) から距離を導出

この最後の距離の導出の際、センシング面中心点座標は、移動前の対向板側セグメントの座標系まで変換されてきているので、対向板側セグメントがセグメント内での回転角を持っているかどうかに関係なく、垂線ベクトルを変換せずに適用できる。

### 5.5.2 鏡面の位置・位相

鏡面の位置変化 (位相差) の計算は、主軸つまり  $Z_g$  軸上での変化で評価するため、セグメント座標系における鏡面の  $z_s$  変化ではなくそれから  $\theta_{gs}$  傾いた方向での変化を求めるべきである。

**Method I** ここで、グローバル系だけでセグメントの並進・回転を計算するのではなく、セグメント系・グローバル系の間で座標変換を介して計算するとこの傾き分の影響を消すのが難しい<sup>10</sup>。このため、並進・回転を合わせてグローバル系だけで計算する方法を考える。

この場合の計算過程は以下ようになる。

<sup>8</sup>仮想的なもので、計算上は理想状態 (原点) でのセンシング面中心点に対向する点と仮定してよい。

<sup>9</sup>この場合、対向板側では座標変換を行わなくてよいので、一つの点を座標変換するだけですみ、演算が簡単になる。

<sup>10</sup>傾きを考慮したセグメント系での鏡面の表式が複雑になるため。

- グローバル系での入力位置  $(x_1, y_1)_g$  に対する鏡面  $z_1^g$  を求める
- $(x, y)$  のみをセグメント系に変換した座標  $(x_1, (y_1 - r_c) \cos^{-1} \theta_{sg})$  に対して並進・回転を行う
- 同じく  $(x, y)$  のみをグローバル系に戻し鏡面の座標を求める  $(x_2, y_2, z_2)$
- 背面のかさ上げ分を除いた変化量を求める  $(z_2 - z_1) - (y_2 - y_1) \tan \theta_{sg}$

この計算方法での誤差要因としては、セグメントの回転軸がセグメント中心における鏡面への垂線であることにより、ある点における鏡面への垂線が回転することによるグローバル系での鏡面の移動を無視している点である。これは、鏡材の高さに対する 2 次の微量であり、ギャップセンサーの取り扱いで検討したように最大でも  $0.0035^\circ$  程度となる。

**Method II** セグメント・グローバル系の間で座標変換を介して計算する方法を考えると、与えられたグローバル系の  $(x, y)_g$  に対して鏡面  $z$  を求めた後、 $(x, y, z)_g$  をセグメント系に移動の変換をかけ、それに対して並進・回転した位置の鏡面高さを求め、もう一度セグメント系で逆移動させたものをグローバル系に戻す操作を行う。

計算過程としては以下のようなになる。

- グローバル系での入力位置  $(x_1^g, y_1^g)_g$  に対する鏡面  $z_1^g$  を求める
- セグメント系に変換した  $(x_1^s, y_1^s, z_1^s)_s$  に並進・回転を行う： $(x_2^s, y_2^s, z_1^s)_s$
- それをグローバル系に変換した  $(x_2^g, y_2^g, z_1^g)_g$  に対する鏡面  $z_2^g$  を求める
- セグメント系に戻し並進・回転の逆変換を行う
- 逆変換を行った座標をグローバル系に変換して鏡面の高さとする

この計算方法の誤差要因としては、セグメントの回転軸が回転中心における鏡面への垂線であることにより、ある点における鏡面への垂線が回転することによるグローバル系での鏡面の移動を無視しているのと、並進では影響がないが回転の場合に 1 回目の変換と 2 回目の変換で  $z_1^g$  と  $z_2^g$  の差に相当するセグメント系での距離  $(z_1^s - z_2^s) \sin \theta_{gs}$  だけ回転半径がずれることによる影響 (図 5) の二つがある。

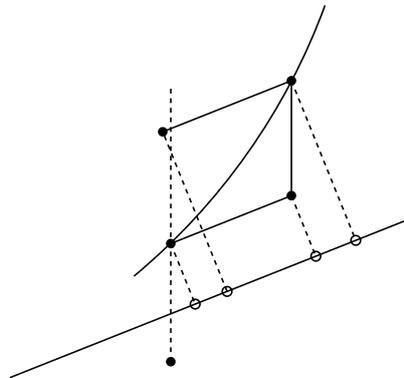


図 5: Method II での回転誤差

比較 誤差量を比較すると Method I の方が少なくなる？

## 5.6 内環の取り扱い

セグメントの移動に関する状態をより把握しやすくするために、内周セグメントの内側に環状構造物 (内環) を設置することを検討している。

この内環の物理的な配置については次のような要件がつけられている。

- セグメントに対する面は理想的な平面になると想定する

- 十分に剛性のある変形が少ない素材で製作する
- 荷重受けでの保持を行い、支持点数は自重変形が条件より小さくなる点数 (~100nm 以下など)
- 能動的な駆動はせず支持点はトラスに対して固定する

支持方式 (の支持点数・固定方法) にかかわらず、最終的な内環は自重による変形が小さいとみなせるような状態で維持されることになる。これは、ある理想平面をトラスの上に実現していることになり、理想的なトラス位置に対しての内環は任意の 3 点で駆動される平面であるとしても実質的には同等<sup>11</sup>といえる。

理想平面に対する実際の内環の変形は実機では測定不能であり、制御において変形を取り扱う場合には FEM などでのシミュレーション値などの外部で求めた値を利用するしかない。また、ギャップセンサーによる測定点の近くに支持点を配置するなどの対策をとることで、測定点における自重変形は小さくできる。よって、ギャップセンサー取り付け位置における自重変形の変動は無いものとしてシミュレータでは内環を取り扱う<sup>12</sup>。

上記より、シミュレータでの内環の実装は次のように行うことにする。

- 仮想的なアクチュエータ制御点として 120 度ごとに 3 点を定義する
- ギャップセンサーヘッドはセグメント側にもみ配置し、対向板 (内環側) での垂線ベクトルで鏡面を参照する場合はグローバル系での  $(x, y)_g$  に対応する鏡面とする
- 内環でのセグメント系とグローバル系の座標系は完全一致とする

仮想的なアクチュエータ制御点は、内周・外周セグメントでの定義に近い配置とするため、3 点とも中心から 500mm の円周上で P1 が  $x = 0, y < 0$  の点、P2/3 は時計回りに 120 度ごと離れた点として定義する。(座標は表 4)

## 5.7 セグメントのアクチュエータによる移動

セグメントのピストン移動は、セグメントの背面上の 3 点を背面に垂直な軸方向に移動させるものである。

### 5.7.1 アクチュエータによる駆動位置の定義

アクチュエータはセグメント座標系で図 6 のように配置され、位置は表 4 と定義されている。

表 4: アクチュエータ軸の座標

セグメント	$(x, y)_1$		$(x, y)_2$		$(x, y)_3$	
内周	0.0000	-210.0000	-275.5556	116.3889	275.5556	116.3889
外周	0.0000	-193.7778	-251.6667	110.9444	251.6667	110.9444
内環	0.0000	-500.0000	-433.0127	250.0000	433.0127	250.0000

### 5.7.2 ギャップセンサー読み出し値

ギャップセンサー読み出し値への変換は、前節での変換の流れの最最後にアクチュエータ駆動量分の移動を行うことで対応できる。

セグメント系ではアクチュエータ駆動により背面が押し引きされ、アクチュエータの影響が加わる  $(x, y)_s$  の 3 点を基準にした平面上になるような  $\delta z_s$  を加える。セグメントの傾きについてはアクチュエータ駆動による傾きは微小であるため無視できると考え、垂線 (もしくは測定方向) ベクトルの向きは変化しないとする。

<sup>11</sup>理想的なトラス位置と実機でのトラス位置の差は、他のアクチュエータによる制御点と同じくアクチュエータ制御値へのバイアスとして取り扱うことが可能である。

<sup>12</sup>セグメントのほうでもギャップセンサー取り付け位置における自重変形は無視しており、それと同じ事を行っていると考えてよい。また、検討されている腕付き内環などで 500mm 程度の棒状構造体の先端にギャップセンサーを取り付けるなどの場合は自重変形の影響を無視できるくらいにするのは困難であると考えられるが、この変形量は FEM などによる値で事前に補正可能である。

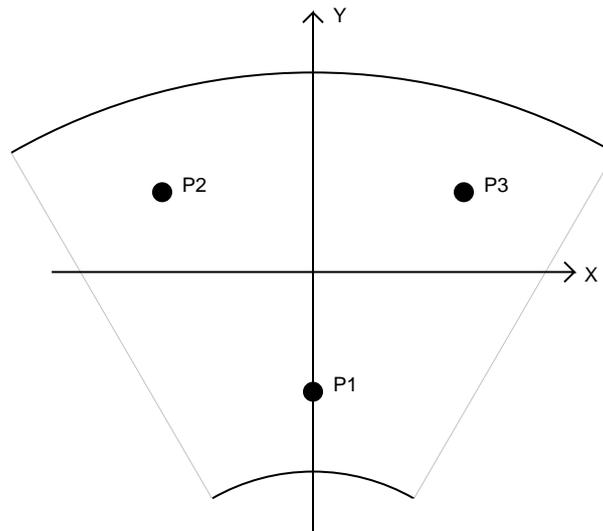


図 6: アクチュエーター定義

あるセグメントのアクチュエータについて、アクチュエータ間距離 500mm に対して相対高さが  $100\mu\text{m}$  変化した場合、変化角度は  $\sim 2\text{e-}4$  [rad] ( $\sim 41''$ ) である。ギャップセンサーのヘッド側と対向板側の相対距離が変わらず測定角度がこの分変化した場合の測定値変化はこの変化角度の  $\sin$  分で近似できるので、相対距離  $100\mu\text{m}$  の場合に 20nm 変化となる。実際の制御では、理想状態に近いところでのより微小な量の変化<sup>13</sup>と考えるとよいので、ギャップセンサーの測定分解能より十分小さな変化量といえ、無視できる。

### 5.7.3 鏡面の位置・位相

厳密には、アクチュエータでの駆動後の鏡面は、理想鏡面をセグメント系に変換した鏡面  $(x_s, y_s, z_s)$  について 3 点を基準にしたピストン傾きで移動させた鏡面  $(x_s, y_s, z_s + \delta(x_s, y_s))$  をグローバル系に変換したものとなり、ある駆動後のグローバル系での鏡面位置に対応する駆動前の座標は  $(x, y)$  も異なる。しかしながら、X,Y 座標変化量は  $\delta(x_s, y_s) \sin \theta_{sg}$  程度であり、それによる鏡面のセグメント背面の変化を除いた Z 座標変化量<sup>14</sup>は 2 次の微量としてよい。よって、 $(x, y)$  座標はセグメント系で計算する必要があるが、これをグローバル系で(前節のセグメントの並進・回転の際と同様に)簡易に計算するものとする。

基準位置におけるピストン移動の支持面(背面)の傾きは、内周で  $4.8067^\circ$ 、外周で  $8.7456^\circ$  である。位相に直結する主軸方向の移動量の減少は内周で 0.4%、外周で 1.1% であり、これは  $\cos \theta_{sg}$  をかけることで考慮する。

最終的に、セグメントの背面と平行な面内での移動の影響と同じく、 $(x, y)$  のみをセグメント系に変換した  $(x, (y - r_c) \cos^{-1} \theta_{gs})$  に対してのピストン移動量  $\delta z_s$  に対し、

$$\delta z_s \left( x, (y - r_c) \cos^{-1} \theta_{gs} \right) \cdot \cos \theta_{gs}$$

を求めることになる。

<sup>13</sup> トラスの最大変形量が  $100\mu\text{m}$  程度、現実的なアクチュエータ駆動速度での 1 回の制御ループでの駆動量は  $< 1\mu\text{m}$  であるのでこの仮定はそれほど外れていない。

<sup>14</sup> そのまま  $(x, y)$  のみ変化させると鏡面位置は大きく変化するが、実際の Z 座標変化は背面に対する厚みの変化として計算する必要があるため。

## 5.8 SH への影響

SH ではセグメント中心における鏡面への垂線ベクトルの傾き (セグメントの回転の影響もこれに含まれる) と、セグメントの並進の両方が加算された出力が得られる。SH の原点は理想状態でのセグメントによる出力で規定され、この状態でのセグメント中心での垂線ベクトルに対する差分が SH の出力である。

セグメント中心における鏡面への垂線ベクトルは、アクチュエータによる駆動量による変化は 3 支持点間の 2 ベクトルの外積であらわせる。また、セグメントの回転は、すでに述べたように並進量を変化させることで常にセグメント中心を通る背面に垂直な軸周りでの回転に置き換えられることから、この外積ベクトルを回転量だけまわしたベクトルが垂線ベクトル<sup>15</sup>である。

## 5.9 鏡面上にあるかないかの確認

ある  $(x, y)_p$  が鏡面上にあるかないかの確認について、簡単化のために内縁・外縁ともに円であると近似する。また、へりの辺については主軸を通る半径方向であると近似する。内縁・外縁について、内周と外周それぞれの 4 端点で  $R$  を求めると表 5 のようになる。よって、内周を  $R = 501.2 \sim 1181.4$ 、外周を  $R = 1188.3 \sim 1890.3$  と近似する。

表 5: セグメントの投影半径

		$(x, y)_s$	$(x, y)_g$	$R$	$\theta$
内周	内縁中央	(0.0, -341.0)	(0.0, 501.1993)	501.1993	
	内縁端	(248.35, -407.0389)	(248.35, 435.3927)	501.2430	29.700633
	外縁中央	(0.0, 341.0)	(0.0, 1180.8007)	1180.8007	
	外縁端	(587.1, 184.8838)	(587.1, 1025.2336)	1182.0000	29.781946
外周	内縁中央	(0.0, -355.0)	(0.0, 1188.1275)	1188.1274	
	内縁端	(304.35, -394.7854)	(304.35, 1148.8047)	1188.4364	14.838348
	外縁中央	(0.0, 355.0)	(0.0, 1889.8725)	1889.8725	
	外縁端	(486.85, 291.3587)	(486.85, 1826.9711)	1890.7264	14.921395

## 6 シミュレータでの試験

### 6.1 行列近似演算の妥当性 I — 変換の非線形性

シミュレータでのアクチュエータ駆動量とギャップセンサー読み出し値の相互変換は、ある駆動量においてそれぞれのアクチュエータごとに値を与えたときのギャップセンサー読み出し値を並べた形で得られる変換行列 (とその SVD 展開形式) による行列演算を利用している。実際のギャップセンサー読み出し値の駆動量に対する変化は、対象となるギャップセンサーの分布が三次元であることによる回転変換があることや、ギャップセンサーの読み出し値が 2 点間の単純な距離ではなく、片側の点ともう一方が載る平面間の距離で定義されているなど、非線形性があると考えられる。この非線形性が大きい場合、つまりこの望遠鏡のセグメントのアクチュエータによる駆動量の範囲内で、ギャップセンサーで有意に検出できるほどの非線形性がある場合、線形近似による行列変換の適用はうまくいかない可能性があるため、調査が必要といえる。

これは、ある駆動量によって得られた変換行列に対し、いくつかのアクチュエータ駆動量を与えたときの変換誤差、つまり行列変換で得たギャップセンサー読み出し値と実際に全てのギャップセンサーについて計算した値の間の差によって評価することができる<sup>16</sup>。また、この与えるアクチュエータ駆動量については以下のようなパターンで評価する。

<sup>15</sup>SH の出力としては、セグメント座標系での垂線ベクトルの XY 成分である。

<sup>16</sup>全ギャップセンサーに対する値のノルムは、絶対値の総和や単純なユークリッドノルムによる評価で問題ないはず。微量計算の計算誤差という観点からは絶対値総和が望ましい?

- それぞれのアクチュエータを一つずつ駆動したとき
- アクチュエータ全体を同じ量駆動したとき
- アクチュエータ全体をそれぞれにランダムな値で駆動したとき

## 6.2 行列近似演算の妥当性 II — セグメントの並進・回転

セグメントを並進・回転移動させたときのギャップセンサー読み出し値の変化について、近似的にはセグメントの並進・回転に対応するギャップセンサーの読み出し値といえるアクチュエータが全て理想位置 (0) である場合の値に、アクチュエータ駆動による値を足し合わせたものとしてあらわすことが可能であると考えられる。これは I でのギャップセンサーの読み出し値に線形性があるかどうかについて、セグメントを並進・回転させた場合にも成立するかどうかと言い換えることもできる。そして、このセグメントを並進・回転移動させたときの変換行列をどうするかについて、近似的に並進・回転がない場合と同じ変換行列で表す近似を適用すると、状況変化に応じて変換行列を作り直さなくてよいといえる。ここで、アクチュエータが理想位置にある状態での並進・回転のみに対するギャップセンサーの読み出し値は、並進・回転をセグメントのアクチュエータ駆動で補正する際の制御値に利用される量であるといえる。

現実の望遠鏡では、セグメントの並進・回転の状況がどうなっているかを測定することはほぼ不可能であることを考えると、シミュレータで上述のような近似的に常に同じ変換行列を利用して表せるかどうかを検証しておくことが重要といえる。

セグメント並進・回転におけるギャップセンサー読み出し値の線形性については、I と同様の調査を行うことで調べることができる。ただし、変換行列を作成する際や線形性を評価する際に、ギャップセンサーのゼロ点を考慮することに注意する必要がある。つまり、線形性評価は

- 各ギャップセンサーについて座標変換して出した値
- アクチュエータ原点でのギャップセンサー読み出し値 + 変換行列・アクチュエータ駆動量

の二つを比べることで行う必要がある。また、変換行列の変化については、セグメントの並進・回転を入れる・入れないについて同じアクチュエータ駆動量で求めた変換行列同士の差で評価する。

## 6.3 ギャップセンサー配置に対する特異値の評価

ギャップセンサー配置に対して出力された特異値の組の評価について、必ず縮退する M1 全体の並進・傾きの 3 モードを除いた 51 もしくは 54 特異値で評価する。小さな特異値を持つモードは制御しにくい傾向にあることから、評価対象の特異値全体を利用した指標ではなく、小さな特異値に重点を置いた指標の方が望ましいと考えられる。このような指標としては次のようなものが考えられる。

- 最大最小比
- 最小から 3 つの平均
- 逆数の全平均

## 6.4 ギャップセンサー配置の最適化

最適なギャップセンサー配置を自動的に導出する場合、モンテカルロ方式的にランダムな配置を試す、あるシーケンスに従った配置に対して総当り方式を試す、もしくはある初期値から非線形最小二乗などにより最適解に到達するなどの方法が考えうる。

ギャップセンサーのセンシング面は有限な大きさを持つため、微量ずらした配置はあまり有効ではなく、配置可能場所をギャップセンサーのサイズなどで離散化した点について考えることが望ましいといえる。いま、ギャップセンサーのセンシング面は直径 8mm 程度であるので、このサイズを離散化の最小間隔と考えると、配置可能な領域と点数は以下のようになる。

- 内周セグメント内側 (R500) : 524mm / 65 点
- 内周セグメント辺 (R500-R1183) : 683mm / 85 点
- 内周 - 外周セグメント間 / 分割なし部分 : 619mm / 77 点
- 内周 - 外周セグメント間 / 分割あり部分 : 310mm / 38 点
- 外周セグメント辺 : 711mm / 88 点

また、これは全てセグメント間の midpoint のみであるが、実際にはセグメント間の midpoint からセグメントに入ったところにもギャップセンサーは配置可能であり、各辺に対して配置可能な点数はこれの数倍の個数となる。これら全体に対してモンテカルロもしくは総当りを行うのは、計算時間の観点から現実的でない<sup>17</sup>。

非線形最小二乗法などの最適化を考えると、望遠鏡のセグメント配置が中心軸に対して回転対称であり 6 次の縮退となる配置であるので、最適化のための評価関数を定義することが困難である。(たとえば、6 分割した一つに対して定義し、全体は回転対称で相似変形させるという手はある。)

よって、とりあえずは、いくつかの特徴的な配置についてどういう特異値の変化を引き起こすかを調べることでよりよい配置を探すという手法をとることとする。

## 7 実装

### 7.1 PSF 分解能

実装上では、開口面にある空間分解能で離散化したデータを利用してフーリエ変換をかけることになる。逆にイメージ面上での像分解能は周波数の細かさ、つまり開口面で利用する面の広さに依存する。この分解能は、フーリエ変換の式の  $\exp(i \cdot 2\pi)$  の項に依存し、 $\exp(i \cdot 2\pi) = 1$  であることから

$$-i \frac{2\pi}{R\lambda} (x\xi + y\eta) = \pm i \cdot 2\pi$$

である。いま、平行な  $(x, y), (\xi, \eta)$  を考えると

$$\frac{|(x, y)| \cdot |(\xi, \eta)|}{R\lambda} = 1$$

と表すことができ、イメージ面での角度分解能  $\theta$  は  $\theta = |(\xi, \eta)| / R$  であるので

$$\theta = \frac{|(\xi, \eta)|}{R} = \frac{\lambda}{|(x, y)|}$$

となる。離散フーリエ変換の対応関係から、開口面での全サイズとイメージ面上での単位サイズ、開口面での単位サイズとイメージ面上での全サイズが対応する。つまり、波長  $\lambda$  を開口面の定義全領域サイズで割ったものがイメージ面での角度分解能になる。

5cm 分解能 1024x1024 の開口面の場合、イメージ面の分解能は波長 1 $\mu$ m で

$$\frac{1\mu\text{m}}{5\text{cm} \cdot 1024} \times (2.062648e + 8\text{mas/rad}) = 4.0286\text{mas}$$

となる。

### 7.2 セグメントギャップの反映

セグメントは理想状態の場合の一つの滑らかにつながる曲面を構成する。しかしながら、セグメントの間のギャップは入射開口に含まれない。この部分は入射開口に対してマスクをかけることで解決する。

セグメントギャップが 2 ~ 4[mm] であるので、開口面の空間分解能 5[cm] では一桁足りないため、開口面の位相分布を計算する際に少し (10 倍など) 細かいメッシュで計算し平均する処理を行う。

<sup>17</sup>なお、あまり辺の端すぎて実際にはギャップセンサーを配置できない点も存在するが、全体から考えると少数であるので無視する。

### 7.3 開口面での位相変動量の導出

開口面での位相変動量は、M1 をグローバル系での XY 平面に投影した面上のマップで求める。これまでの検討で挙げられた以下の値を積算して計算する。

アクチュエータ駆動 ピストン移動量  $\times \cos \theta_{sg}$

セグメント並進・回転  $(x, y)$  のみをセグメント系に変換しての変化量

### 7.4 class method

セグメントの座標を扱う Segment クラスと、ギャップセンサーの情報を扱う Gapsensor クラスの二つを定義する。また、セグメント上の座標を保持するデータ構造として position 構造体を以下のように定義する。

```
typedef struct {
    double x;    ///< x pos
    double y;    ///< y pos
    double z;    ///< z pos
    size_t id;   ///< segment ID (if undef == 0; 1-6 inner; 7-18 outer; 19 ring)
} position;
```

#### 7.4.1 class Segment

保持するデータは以下のとおり。

- 各セグメントに対する  $(\delta x, \delta y, \delta \theta)$
- 各セグメントに対するアクチュエータでの移動量

提供する変換用メソッドは以下のとおり。

- グローバル系・セグメント系の相互変換 (id を入力、 $x, y, z$  を入出力)
- セグメント並進・回転の変換 (id を入力、 $x, y$  を入出力)
- アクチュエータ駆動量導出 (id,  $x, y$  を入力、 $\delta z$  を出力)

#### 7.4.2 class Gapsensor

保持するデータは以下のとおり。

- セグメント座標系でのセンシング面中央点位置
- セグメント座標系での対向板基準位置と垂線ベクトル

提供する変換用メソッドは以下のとおり。

- 変換後のセンシング面中央点位置に対するギャップセンサー読みの値

### 7.5 入出力ファイル仕様

特にファイルの仕様に明記がない限り、空白行と '#' で始まる行は無視される。また、1 行の中における値の間の区切りは空白 (White space; ' ') のみが利用できる。

### 7.5.1 ギャップセンサー配置データ

ギャップセンサー配置は1行1ギャップセンサーの定義が並んだファイルであり、6つの値を並べる。値の意味は先頭から以下ようになる。

- セグメント ID (図 3; 1-18)
- ギャップセンサーが取り付く辺の ID (1,2,3)
- 辺上の位置 (セグメント座標系での)  $x$
- 辺からの距離 (図 7 の点線から)
- セグメント厚さ方向の位置 (セグメント中心点 = (0,0) での鏡面位置からの高さ、背面は約-43mm)
- ギャップセンサー取り付け角 ID

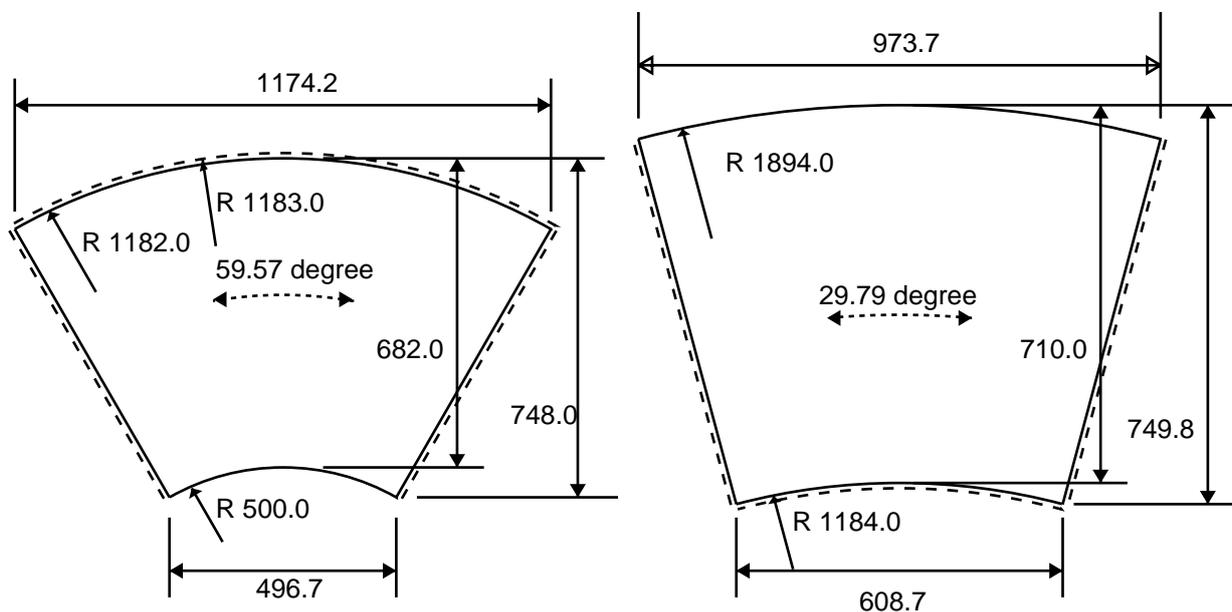


図 7: セグメントに対するギャップセンサー固定位置 (点線)

ID の定義は、セグメント ID は図 3 定義したもの、ギャップセンサーが取り付く辺の ID は

1. 内側の曲辺 (セグメント座標系で  $y < 0$ )
2. 両脇の直線辺 (辺上の位置の正負で左右を判定する)
3. 外側の曲辺 (セグメント座標系で  $y > 0$ )

とする。なお、外周セグメント (ID 7-18) の ID 3 は対固定点とし、内周セグメント (ID 1-6) の ID 1 は最内周に定義した内環との間のギャップセンサーとみなす。ただし、内環がない場合は対固定点とする。

指定された位置  $x$  がセグメントの辺よりも外を指示している場合、セグメントから何らかの固定ブロックを生やして保持している状態とし、無効とはしない。たとえば、セグメント ID 1 では辺 ID 2 の  $x < 0$  は ID 6 と接する側の辺、 $x > 0$  は ID 2 と接する側の辺である。

辺からの距離が 0 の場合、図 7 の点線上にギャップセンサーが配置されているものとする。距離が + の場合、辺に垂直な方向にセグメントの内側への距離を示すものとする。円状になっている辺 1,3 の場合は、ちょうどギャップセンサーの取り付け位置が半径方向に動くことを意味する。なお、辺からの距離 0 がセグメントのふちを意味するのではなく、隣り合ったセグメントとの中間点を示していることに注意。

セグメント厚さ方向の位置は、セグメント座標系での  $z$  座標に相当する。セグメント座標系での  $z$  座標原点は、セグメント中心点における鏡面位置で定義されている。

ギャップセンサー取り付け角の ID は、ギャップセンサーのセンシング面の向きを含めた ID が必要であり、次のようになる。なお、無効値を指定した場合は '0' に読み替える。

- 0 セグメント座標系での  $Z$  軸に平行 (セグメント背面に垂直) で上向き
- 1 セグメント座標系での  $Z$  軸に平行 (セグメント背面に垂直) で下向き
- 2 セグメント鏡面に垂直で上向き
- 3 セグメント鏡面に垂直で下向き
- 4 グローバル座標系での  $Z$  軸に平行で上向き
- 5 グローバル座標系での  $Z$  軸に平行で下向き

上向きは  $z > 0$ 、下向きは  $z < 0$  を示す。

### 7.5.2 セグメント・アクチュエータ定義ファイル

セグメントの水平ずれ量とシミュレーションにおけるアクチュエータの初期駆動量を定義するファイルになる。

```
# ID bias:random:fix? bias:random:fix? bias:random:fix? move_x move_y
#
# ID 1-6 = inner, 7-18 = outer, 19 = inner ring (if inner_ring is true)
# All values are in [mm]
#
1 0.0001:0.0001:0 0.0001:0.0001:0 0.0001:0.0001:0 0.0 0.0
```

各行が一つのセグメントを示し、空白 (またはタブ) 区切りのオプションを並べる。オプションは先頭から次のように並ぶ。オプションの個数が違っている場合などは行ごと無視されるので注意。

- セグメント ID
- セグメント中のアクチュエーター 1 の制御値 (内周側)
- セグメント中のアクチュエーター 2 の制御値 (外周側、上から見て左)
- セグメント中のアクチュエーター 3 の制御値 (外周側、上から見て右)
- セグメントの  $x$  方向 (動径方向) 横ずれ量
- セグメントの  $y$  方向 (半径方向) 横ずれ量

アクチュエーターの制御値は、':' で区切られた 3 つの値で構成され、それぞれ定数の固定バイアス、乱数をかけて加える固定バイアス、アクチュエーターを固定するかどうか、を示す。固定バイアスはシミュレーターのループ前に一度だけ初期化されるため、乱数値を指定しても、毎回のループで反映されるわけではない。3 つ目のアクチュエーターを固定するかどうかについてのフラグは、0 で制御に利用、1 で固定されることを示す。アクチュエーターの ID1-3 は図 6 で定義し、それぞれの位置は表 4 となる。

セグメントの横ずれ量は、鏡面の位置ずれを計算するときにはしか利用されないの、ギャップセンサー・アクチュエータ間みのランダムシミュレーションではなく、PSF 出力などにしか影響しない<sup>18</sup>。

このファイルで指定する数値の単位は全て mm 単位である。

セグメント ID は、1-18 はギャップセンサー定義と同じであるが、ID 19 は内環についての定義となる。ただし、内環の横ずれ量は利用されることはない。

<sup>18</sup>ギャップセンサー取り付け位置とアクチュエーター取り付け位置は、セグメントの背面であるので平面上であり横ずれの影響を (高さ方向では) 受けない。