

分割主鏡シミュレータ ver 3-X PCS — 位相差が加わる場合のPCS画像の変化

岡山新技術望遠鏡グループ

平成 23 年 7 月 13 日

目次

1 概要	1
2 必要な機能と仕様	1
2.1 正確なセグメント境界判定	2
2.2 セグメント境界より一定範囲を無効領域としてマスク	2
2.3 指示点を周囲のセグメント境界の中央に移動	2
2.4 任意点の位相を 0 にする	3
2.5 片側のセグメントに任意の位相差を追加	3
3 PSF 像の統計データの出力	3
3.1 PSF の中心点	3
3.2 中心モーメント	3
3.3 慣性主軸	4
3.4 干渉度合い	4

1 概要

PCS はセグメントの端同士の狭い領域を利用し、その二つの領域の干渉像により隣り合うセグメントの位相差を判定する機構である。狭い領域を利用するため領域内の鏡面形状に大きな影響を受け、かつ領域（開口）の形状に依存して得られる干渉像の形状も大きく変化する。

これらのさまざまな要素を実際の干渉像を作成して確認するとともに、得られた干渉像についてどのような指標を適用すれば位相差の判定が可能と考えられるかにも示唆を与えることを目標として、PCS 干渉像を作成する機能をシミュレータに追加する。

2 必要な機能と仕様

分割主鏡シミュレータに組み込むため、これまでの分割主鏡シミュレータでセグメント鏡に対して実現されているアクチュエータによる駆動、セグメントの横ずれなどはそのまま利用可能である。その上で、次のような機能を PCS のシミュレーションとして追加する。

- より正確なセグメント境界判定 (~0.1mm 程度以上)
- セグメント境界より一定範囲を無効領域としてマスク

- 任意の開口形状を簡単に追加できるシミュレータ構成にする

これ以外に、シミュレーションおよびその結果の検討を簡単にするため、以下の機能を追加する。

- 指示点周囲のセグメント境界位置を求めて境界の中央に位置を移動させる
- 任意点の位相を 0 にするようにセグメントを主軸方向に動かす
- 片側セグメントに任意の位相差を加える

なお、上記以外の、実際の PCS CCD 画像に合わせるために必要となる、バックグラウンドレベルのかさ上げや、ランダムノイズなどの加算は行っていない。

2.1 正確なセグメント境界判定

セグメント全体のシミュレーションでは、セグメント上での空間分解能はメッシュの細かい位相差計算の空間分解能でも数 mm 程度であったため、グローバル系・セグメント系を変換する上でのセグメント境界の影響はある程度無視できた¹。

しかしながら、PCS では一つの PCS で利用する鏡面の領域が数 cm 程度の領域であるため、0.1mm 程度の正確さで境界判定を行う必要がある。このため、ターゲットとなる領域に対してグローバル系の (x,y) 座標で与えられる計算領域のメッシュを、それぞれに対応するセグメント系の座標に変換し判定する。このとき、計算を正確に行うため、(初期位置となるグローバル系での) z 方向の座標は理想鏡面で与える。ただし、セグメントの横ずれについては、判定を行うのに必要となる計算量の観点からセグメント境界の判定には利用せず²、位相差にのみ反映させる。

2.2 セグメント境界より一定範囲を無効領域としてマスク

セグメントの端について、 $\sim 1\text{mm}$ にわたって 45 度切り落としの処理を行うことが検討されている³。PCS はセグメントの境界付近に設置するためこの影響を受ける可能性があり、かつ、切り落としの幅は PCS のシミュレーションで考慮しているより大きな長さになっている。このため、次の領域⁴を無効領域としてマスクする。

- セグメントの両脇の辺については辺に垂直な長さ
- セグメントの円弧についてはセグメント端の曲率を設定された長さだけずらす

2.3 指示点を周囲のセグメント境界の中央に移動

内周間や外周間の場合は、セグメント境界の中心線は円周方向の回転対称性からちょうど 15° もしくは 30° ごとにセグメント境界の中心線がくることになる。しかしながら、内外周間のセグメント境界では、セグメントの境界が円ではなくなるため、方向によって望遠鏡主軸から境界までの半径が異なる。このため、シミュレーターでは、PCS を設置する位置を指定する際に、この効果を考えて境界中央に来るように指定する必要がある、この部分の位置微調整を PCS シミュレーター側で行う。

具体的には、主軸周りのある基準方向からの角度が決まれば、内周・外周間の PCS は一意に定まるので、角度を与えると PCS の位置 (もしくは PCS までの主軸からの半径) を計算するようなメソッドを提供する。境界位置の計算については、セグメント境界判定と同じくセグメントの z 方向位置については、ずれの影響は微小と考えて次のような近似を行う⁵。

¹具体的には、変換時に z の値が正確でなければ対象の位置が x,y 座標についてもずれる影響がある。これを単純化し、かつ座標変換を利用することでの計算量を削減するために、グローバル系に投影したセグメント形状を数 mm 精度で近似した扇形でセグメント境界を近似していた。しかしながら、厳密には、セグメント系で扇形になるセグメントは、グローバル系では円弧上の中央が主軸寄り、両端が主軸から離れる形状になる。

²反映させようとする、いったん位相差を求めるための計算過程を通してから再度セグメント系に戻してセグメント境界との判定をする必要がある、はず。

³セグメントのふちに起因するクラックを防止するなどの安全上の理由などから。

⁴基本的には、ある点についてその点から最も近いセグメント端までの距離として定義する。

⁵厳密な計算を行うなら、セグメント系での鏡面位置の計算式をまじめに実装するのが望ましいところではあるが。

- セグメント系での境界の半径の長さをグローバル系での位置として z を計算
- z をセグメント系に変換しセグメント系での鏡面の 3 次元位置を確定
- グローバル系に変換し、XY 平面内での主軸からの距離を算出
- 内周・外周それぞれに行い、求めた主軸からの距離の中間を返す

2.4 任意点の位相を 0 にする

PCS シミュレーションでは、干渉縞での 1 波長分の中での位相ずれによる影響を評価するために、位相があった状態での PCS 像の評価や、位相があった状態から片側のセグメントを細かくずらした各段階での PCS 像の評価を行う必要がある。ただし、PCS の主鏡面上の定義領域の中でも位相分布は一樣ではないため、独立した 1 点における位相差を逆補正することを考える。このため、PCS の定義領域の中の任意の点の位相を理想的な 0 にするようなアクチュエータ逆補正を行えるようなメソッドを提供する。

なお、現状の実装は簡略化されたものになっており、あまりまじめに利用することは考えられていないため、より複雑なシミュレーションのためには再実装する必要がある⁶。

- アクチュエータ駆動による鏡面の移動しか考えていない
- 位相を 0 にする点は PCS の中心 (セグメント境界の中心) に固定

2.5 片側のセグメントに任意の位相差を追加

PCS が載っているセグメントの片方に任意の位相差を加えるようなアクチュエータ駆動を行えるようにする。これは、位相差分布に Zernie 0 次のモードの成分を加えることに相当し、内部的な処理としても任意量の Zernike 0 次モードに対応するアクチュエータ駆動量を求め、その分のオフセットを加える処理を行っている。

3 PSF 像の統計データの出力

各種のモーメントなどの統計データを出力可能な機能を実装する。

3.1 PSF の中心点

PSF の像ができる位置は (平均的な) ローカルな鏡面の傾きの影響を受けて移動する。このため、統計データを計算するための中心点は PSF 像それ自身から求める必要がある。

この PSF の中心点については、画像データの X,Y の 1 次のモーメントを採用する。なお、実際の PCS CCD 画像では、バックグラウンドやノイズなどの影響を減らすためにある範囲内のデータのみに適用すべきであるが、現在の PSF にノイズを付加する機能が実装されていないシミュレータでは、外側のデータは理想的な 0 に近づくことになるため、領域クリッピングなどは行っていない。

3.2 中心モーメント

中心モーメントは、PSF の中心点を原点とした広がりで見えたモーメントで

$$\mu_{mn} = \sum_{x,y} x^m y^n i(x,y)$$

で定義される。べき乗の次数により $m+n$ 次中心モーメントと呼ばれる。

⁶最終的には PSF を計算するための位相差分布のデータの段階で補正するのが一番直接的ではあるが、制御ではアクチュエータでしか鏡面を動かさないことを考えると、アクチュエータの補正量として求めておくほうが便利にも思える。また、位相差分布のデータはセグメントごとに別れていないため、別途計算領域に対するセグメント ID の分布データも保存しておく必要があり、このためには PSF のベースクラスを書き換える必要がある。

3.3 慣性主軸

慣性主軸は画像の重心周りの2次中心モーメントで表され、重心周りの楕円型広がりの主軸方向(θ)の指標といえる。

$$\tan 2\theta = \frac{2\mu_{1,1}}{\mu_{2,0} - \mu_{0,2}}$$

数学的には、慣性主軸周りの中心モーメントは平行移動に対し不変で、中心モーメントを全データの平均で割った値は拡大・縮小に対して不変となり、PSFの状態に対する指標となりえる。

3.4 干渉度合い

中心モーメントでは座標のべき乗であったが、 \sin, \cos などといった周期関数を利用することにより、中心に対して周期を持ったデータについての対象・非対称度を判定できる。

$$\sum_{\forall x,y} \cos\left(\frac{x}{\sigma}\right) i(x,y)$$

などで、PCSの全体が円形開口である場合には σ に第一暗環の半径を採用するとよい指標となる可能性がある。