

シャック・ハルトマンセンサーの適用による宇宙望遠鏡の高精度アライメント手法の検討

鈴木 二郎*・安藤 俊行*・鈴木 浩志*・平野 嘉仁*・和高 修三*・松下 匡**・三神 泉**

*三菱電機(株)情報技術総合研究所 〒247-8501 鎌倉市大船 5-1-1

**三菱電機(株)通信機製作所 〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

Highly Precise Alignment Method for a Space Telescope Using Shack-Hartmann Sensor

Jiro SUZUKI*, Toshiyuki ANDO*, Hiroshi SUZUKI*, Yoshihito HIRANO*, Shuzou WADAKA*,
Tadashi MATSUSHITA** and Izumi MIKAMI**

*Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1 Ofuna, Kamakura
247-8501

**Communication Systems Center, Mitsubishi Electric Corporation, 8-1-1 Tsukaguchihonmachi,
Amagasaki 661-8661

Shack-Hartmann wavefront sensors (SHSs) are insensitive to environmental vibration and air turbulence, thus they have good advantage over general phase shift interferometers (PSIs). We have developed a SHS applied to highly precise alignment of a space telescope, named SOT, on board SOLAR-B satellite. One of features of the SHS is frame accumulation and averaging operation for suppressing fluctuation caused by vibration and air turbulence. Performance verification tests for measurement accuracy of the SHS independently on bench top have been done. From results on the bench top test, the accuracy of the SHS has been comparable to PSIs. The SHS have been applied to alignment test for the space telescope SOT. The measured data of wavefront passed through SOT have showed good repeatable accuracy using frame accumulating and averaging. The results of these tests suggest that SHSs are applicable to wavefront metrology of large optical systems like space telescopes.

Key words: space telescopes, optical testing, Shack-Hartmann wavefront sensor, alignment

1. はじめに

大気ゆらぎや、塵による散乱の影響のない高品質な観測が期待される宇宙望遠鏡において、その高い結像性能要求から、光学アライメントの保証が非常に重要である。宇宙空間における光学アライメント補正装置が搭載できない場合、激しい温度変化や打ち上げ時の振動・衝撃で見込まれる光学性能劣化分を考慮すると、結像性能保証上光学アライメントに許容される許容誤差配分は非常に厳しいものとなる¹⁾。このため、宇宙望遠鏡の組立て調整工程の最終段階では、光学系の波面誤差が所定の目標値以下となるまで、波面誤差計測と光学アライメント修正を多数回繰り返す。

波面誤差計測手法として、位相シフト干渉計 (PSI:

phase shift interferometer) が広く一般に用いられている²⁾。PSI においては、1 回の波面誤差計測に必要な複数フレームの位相シフト画像を取得する時間中に、計測光路の光路長が安定している必要がある。宇宙望遠鏡のように開口径が大きく、光学系全長の長い光学系の波面誤差を評価する場合、寸法の小さな光学系と比較して大気ゆらぎ、および光学架台の振動に起因する計測光路における光路長変動が大きくなりやすい。したがって、計測対象となる光学系の大型化とともに、PSI に適合した計測環境条件を用意することが難しくなる。このような計測環境に対する制約を緩和するため、1 計測あたりの位相シフト画像が少数ですむ PSI が考案されている^{3,4)}が、1 フレーム露光時間中に生じる外乱に悪影響を受けやすい特性に変わりはない。

E-mail: Suzuki.Jiro@cb.MitsubishiElectric.co.jp

Table 1 Specification of HPSHS.

Item	Performance
Accuracy	<5 nm RMS
Wavefront mode (Zernike mode)	$A_{20}, A_{22}, B_{22}, A_{31}, A_{33}, B_{33}, B_{31},$ $A_{44}, A_{42}, A_{40}, B_{42}, B_{44}$
Dynamic range	12λ ($\lambda=632.8$ nm, peak to valley)
Pupil diameter	30 mm
Wavelength of light source	679 nm
Repetition measuring speed	7 Hz (170 ms per frame)
Dimension	122×141×355 mm
Weight	2.9 kg
Power of light source	<1 mW
Sub-aperture pitch	3 mm
Number of sub-apertures across the pupil diameter	10
Reducing magnification of afocal optical system	0.2
Pixel pitch of CCD	$7.5\ \mu\text{m}$

一方、光波干渉を用いない波面計測装置として、シャック・ハルトマンセンサー (SHS) がある。SHS の計測メカニズムは、第1に開口全体における波面を lenslet array によって部分開口波面に分割集光して集光スポット像 (Hartmanngram) を生成し CCD など検出する。この Hartmanngram の集光スポットの結像位置は部分開口における波面傾斜の量と方位に依存して変位するので、Hartmanngram から開口全体の波面傾斜のベクトル分布を得ることができる。次に、この波面傾斜のベクトル分布から波面形状を演算処理により再生する。SHS の PSI に対する優位性のひとつは、露光時間中に光路長ゆらぎが生じた場合、PSI においては干渉画像のコントラスト低下として検出されるのに対し、SHS の Hartmanngram は波面傾斜に対して感度をもつが、光路長変化に対して不感である点にある⁵⁾。

本論文では、筆者らの開発した高精度シャック・ハルトマンセンサー (HPSHS: highly precise Shack-Hartmann sensor) を太陽観測衛星 SOLAR-B に搭載される可視光宇宙望遠鏡 SOT⁶⁾ の主鏡、副鏡間光学アライメント調整へ適用した結果を検証し、SHS の精度と有効性を議論する。本論文では、第1に HPSHS の構成と特徴を説明し、ベンチトップ試験において HPSHS と PSI とで同一サンプルを計測し、比較した結果から計測精度を検証する。第2に HPSHS を SOT の主鏡、副鏡の光学アライメントに適用した結果について考察する。SOT の主鏡に対する副鏡のずれを波面誤差計測結果から検出するためには、計測装置自体が所定の精度性能要件を満たしているだけでなく、計測結果から振動、自重変形、研磨誤差などの影響を除去する必要がある、これらの誤差の除去方法とその効果について解析した結果を述べる。

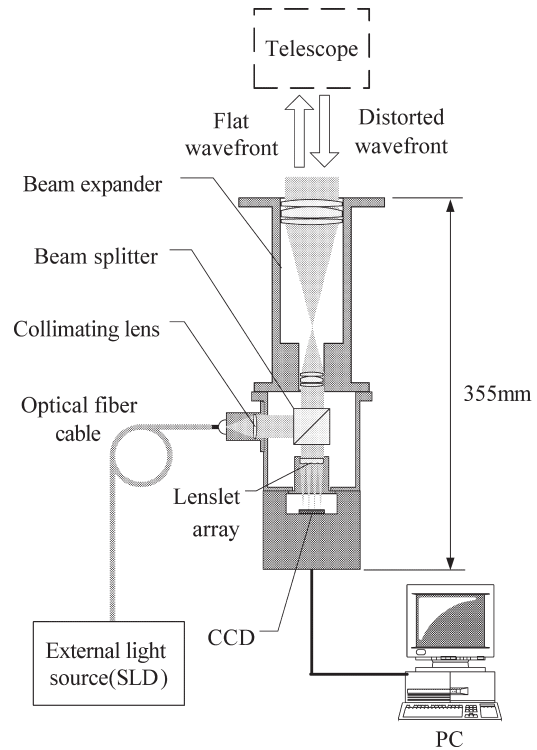


Fig. 1 Schematic diagram of HPSHS.

2. 高精度シャック・ハルトマンセンサー (HPSHS) の構成と性能

2.1 HPSHS の構成と特徴

筆者らの開発した、HPSHS の主要性能を Table 1 に、装置構成を Fig. 1 に示す。HPSHS の特徴を以下に示す。

2.1.1 フレーム積算平均による計測時間の短縮

SOT の波面誤差計測においては、10 m 以上に及ぶ計測光路における大気擾乱や振動に由来する計測値の変動成分が目標精度に対し十分小さくなるように、時間平均化処理を行う。このとき、計測環境に依存して変化する計測ばらつきを実測により定量評価し、最短の平均化時間を決定することが望ましいが、低輝度光源と長時間露光によりこれを行う場合、露光時間をパラメータとして計測を繰り返さなければならず、容易ではない。HPSHS では、短時間露光で繰り返し連続計測を行い、フレーム積算平均を行う方式とした。これにより、1組の連続計測結果を取得すれば、積算フレーム数をパラメータとして計測ばらつきの評価を行えるため、手間と時間が削減できる。一方、このフレーム積算平均を行うためには、短時間露光で十分な S/N 比が得られる高輝度な光源を必要とする。また、別の要件として、波長が SOT の設計波長範囲であること、回折限界の波面を発生できること、ハードエッジでの回折などによる干渉ノイズを避けるため低コヒーレンスであることなどを必要とする。これらの条件を満足する光源とし

て、光ファイバー出力であることから高輝度で、かつ回折限界の球面波が容易に得られる、波長 679 nm, 出力 1 mW の SLD (super luminescent diode) を採用した。

2.1.2 小型軽量化

SOT の評価において、HPSHS は SOT との相対位置関係を保証するために SOT の筐体に直接ボルトで固定する。HPSHS の質量で SOT に不要な歪みを生じさせないため、小型軽量である必要がある。このため、光源である SLD を装置外部に設置し、光ファイバー I/F で光を供給するようにした。この構成は同時に、光源からの熱の流入によって計測光学系が歪む可能性を排除する効果を企図している。また、高輝度光源の採用により 10 ms 以下の露光時間で十分な S/N 比が得られることから、長時間露光時に問題となる暗電流低減を目的とした冷却の必要のない非冷却 CCD カメラ (Adimec 社 MX-12P) を採用し、冷却装置分の重量と寸法を削減した。

2.1.3 部分開口分割数の最適化

SHS のダイナミックレンジは、Hartmanngram の個々の集光スポットと、部分開口との対応づけができる範囲に制限される。この範囲は、一般的には lenslet 間の境界線を Hartmanngram 検出面に投影した枠内から集光スポットが越えない範囲で決定される。したがって、隣接する lenslet 間の間隔が大きいほど、広いダイナミックレンジが得られる。ところが、lenslet 間の間隔を大きくすると、部分開口分割数が減少するので空間分解能が低下する。このように、SHS においては広いダイナミックレンジと高い空間分解能とは相反する要素であり、部分開口分割数 (lenslet ピッチ) はこれらの要素を考慮して決定する必要がある。

SOT の光学アライメントにおける波面計測では、打ち上げ後には存在しない重力変形依存の系統誤差が重畳された波面を計測し、ツェルニケ多項式によるモード解析によりアライメント依存成分のみを分離抽出する。重力変形を考慮して計算した SOT のダブルパス波面誤差を Fig. 2 に示す。鏡面円周上 3 点に存在する固定支持点の間が重力に

より撓み、約 2λ ($\lambda=632.8$ nm, peak to valley) の波面誤差が生じる。これに加えてアライメントずれ依存の収差成分、振動・大気ゆらぎ依存の波面変動成分を含めて計測できるダイナミックレンジを必要とする。一方、空間分解能については、副鏡のアライメントずれで生じる波面誤差の波面モード、および Fig. 2 に示す自重変形は最大で 3 次までのツェルニケモードで表すことができる。アライメントずれ、および自重変形由来の波面モードとツェルニケ多項式のモードとの関係を Table 2 に示す。これに加えて、装置内のレンズ系で生じる収差の補正を考慮し、最高次数を 4 次に制限し、部分開口分割数を 10 とした。これによって、目的に対し十分に広い 12λ ($\lambda=632.8$ nm, peak to valley) のダイナミックレンジを得た。

2.2 単体評価試験

HPSHS 単体での計測精度の検証を目的とし、サンプル平面鏡の反射波面を PSI (Zygo 社 GPI-XP), および HPSHS で計測し計測値の比較を行った。計測の前に、波面傾斜に対する Hartmanngram の集光スポット変位の感度校正を行った。感度校正における装置構成を Fig. 3 に示す。頂角 30° のウェッジプリズム 2 枚を往復透過させたときの合成偏角を、ウェッジプリズムの方位角をパルスモーター駆動回転ステージで回転させることで制御した。ウ

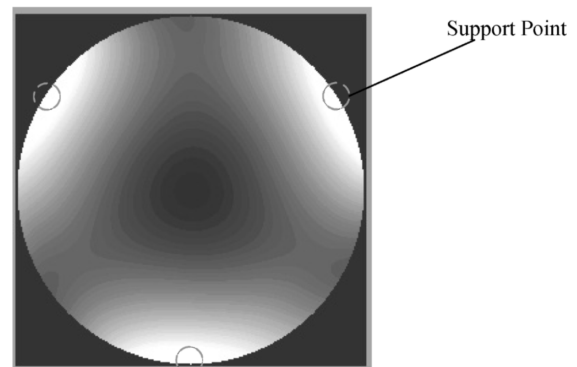


Fig. 2 Simulated wavefront error on SOT caused by gravity deformation of the primary mirror. Peak to valley = 2λ , $\lambda=632.8$ nm.

Table 2 Relation between Zernike modes and alignment parameters.

Zernike mode	Polynomial	Related parameter
A_{11}	X_p	Decenter and tilt of M2* ¹
B_{11}	Y_p	Decenter and tilt of M2
A_{20}	$-1+2(X_p^2+Y_p^2)$	Displacement along optical axis of M2
A_{31}	$X_p\{-2+3(X_p^2+Y_p^2)\}$	Decenter and tilt of M2
B_{31}	$Y_p\{-2+3(X_p^2+Y_p^2)\}$	Decenter and tilt of M2
A_{33}	$X_p^3-3X_pY_p^2$	Gravity deformation of M1* ²
B_{33}	$-Y_p^3+3X_p^2Y_p$	Gravity deformation of M1

*¹ M2: secondary mirror, *² M1: primary mirror.

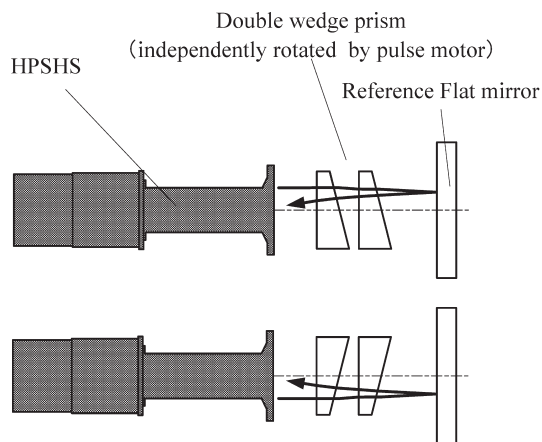


Fig. 3 Experimental setup for calibration about tilted wavefront.

エッジプリズムの頂角はPSIで正確に校正し、合成偏角の絶対量はこのウェッジプリズムの頂角、屈折率、および方位角度から計算により求め、集光スポット変位と波面傾斜との換算係数を決定した。

次に、HPSHSとPSIによるサンプル平面鏡の反射波面計測結果について、等高線図による比較をFig. 4に示す。図において、円形の枠は $\phi 60$ mmのサンプル平面鏡上の $\phi 30$ mmの部分を示し、等高線の間隔は 0.1λ ($\lambda = 632.8$ nm)、開口内の波面誤差は約 2λ ($\lambda = 632.8$ nm, peak to valley)である。図の上から1, 2列目はPSIによる計測波面について、ツェルニケモードの最大8次までの成分、および4次までの成分を比較しており、最下列は

HPSHSによる計測波面である。また、(b)は(a)と同じ部分鏡面について、SOTの開口絞りと同じの遮蔽板を通して計測した場合、(c), (d)は(a), (b)とは異なる部分鏡面を計測した場合を示す。

Fig. 4において、PSIによる計測波面の最大次数8次までの成分と、HPSHSによる計測波面を比較すると、等高線パターンの相違が確認できる。この相違は、HPSHSの計測分解能が最大次数4次までであることに起因する。PSIの計測波面の最大次数4次までの成分と比較すると、計測波面の等高線パターンは非常によく一致しており、両者の差は鏡面形状換算で最大7.4 nm RMSであった。さらに、SOTの副鏡のアライメントずれで生じるコマ成分に相当するツェルニケモードのみについてHPSHSとPSIの計測値の差を求めると、両者の差は2.6 nm RMSであった。

以上の結果は、HPSHSによってSOTの重力変形依存の波面誤差と同等の約 2λ ($\lambda = 632.8$ nm, peak to valley)の波面を計測し、SOTの副鏡のアライメントずれで生じるコマ成分に相当する波面モードを、波面誤差の許容誤差配分(5 nm RMS)よりも高い分解能2.6 nm RMSで検出可能であることを示している。

3. 宇宙望遠鏡の光学アライメントへの適用結果

3.1 宇宙望遠鏡の構成とアライメント要素

光学アライメントの対象とした可視光宇宙望遠鏡 SOT

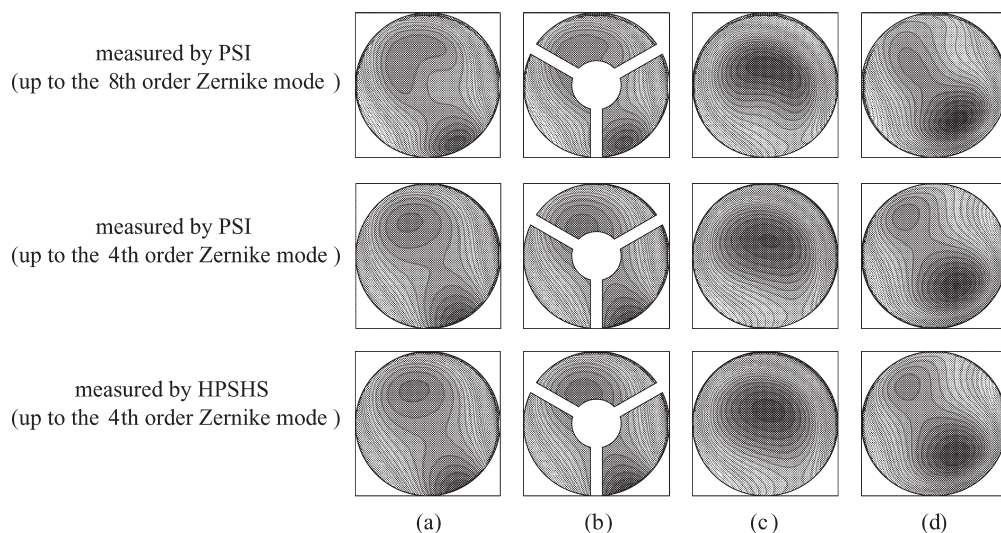


Fig. 4 Comparison of wavefront contour maps measured by HPSHS and PSI. All data were measured when the wavefront was reflected by a part of a sample mirror, and pupil diameter = 30 mm, gaps between contour lines = 0.1λ , $\lambda = 632.8$ nm. (a), (b): Each data were measured when the wavefront was reflected by same part of the mirror, but (b) was applied pupil obscuration mask. (c), (d): Each data were measured when the wavefront was reflected by different part of the mirror from (a), (b).

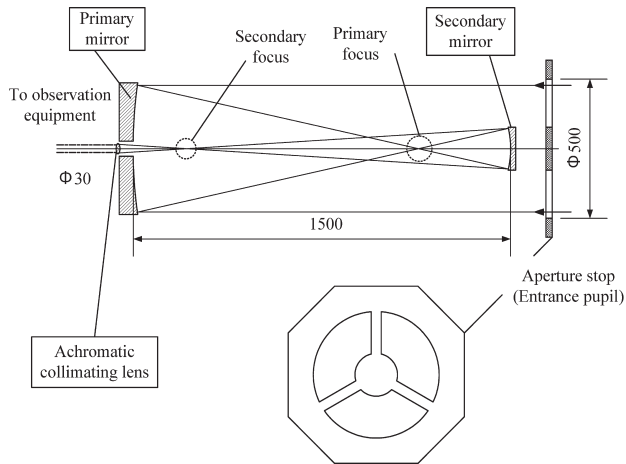


Fig. 5 Configuration of space telescope SOT, the figures are given in mm.

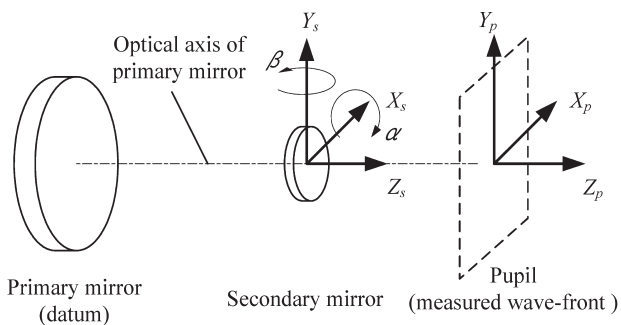


Fig. 6 Coordinates for alignment test.

の光学系構成を Fig. 5 に示す。SOT は、主鏡および副鏡からなる反射望遠鏡と、色消しコリメートレンズとで構成される。反射望遠鏡のタイプは、2 回焦点を結ぶ aplanatic Gregorian であり、開口径は 500 mm、射出瞳径は 30 mm、主鏡、副鏡間距離は 1500 mm である。SOT の開発において、実際に宇宙に打ち上げて観測に使用する FM (flight model) のほかに、中間的な開発段階での評価試験に用いる MTM (mechanical test model) を製作しており、光学アライメント試験には MTM を使用した。MTM と FM との相違点は、主鏡と副鏡の鏡面誤差が FM と比較し 1 桁大きいこと、およびコリメートレンズの色消しを行っていないことである。

光学アライメントの対象は、主鏡に対する副鏡の相対配置である。副鏡のアライメント誤差と波面誤差との相関解析に用いる座標系定義を Fig. 6 に示す。高精度調整を要するアライメントパラメーターは、副鏡反射面の頂点を原点とした直交座標系で定義した X_s 軸、 Y_s 軸方向への変位、および、 X_s 軸、 Y_s 軸まわりの回転 α 、 β の計 4 パラメーターである。さらに、Table 2 に示したように、副鏡

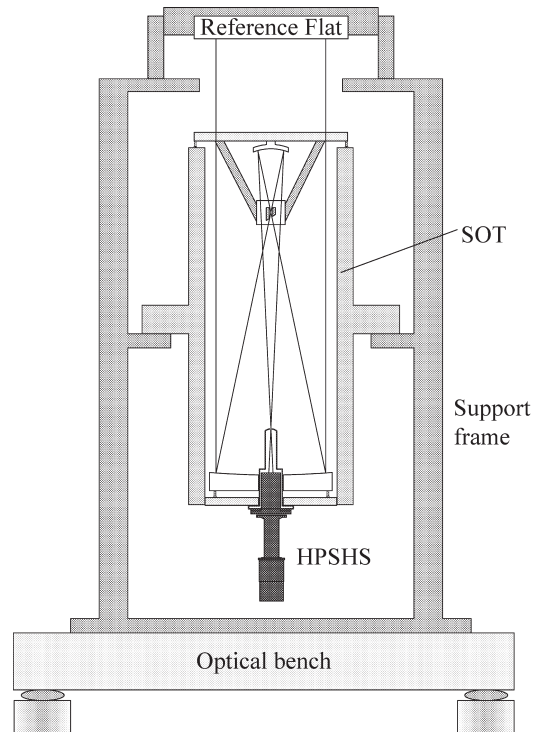


Fig. 7 Geometrical setup in alignment test for SOT with HPSHS.

の偏心 (X_s , Y_s) と傾斜 (α , β) は同じツェルニケモード (A_{31} , B_{31}) の波面誤差を生じさせる点で、偏心の調整と傾斜の調整は等価と考えられる。 α , β の調整方法は、 X_s , Y_s の調整方法と基本は同じであるので、本論文では X_s , Y_s に関する調整についてのみ説明する。なお、副鏡の Z_s 軸方向への変位はデフォーカス波面誤差を生じさせるが、デフォーカス成分は打ち上げ後観測装置によって補正可能であること、 Z_s 軸まわりの回転ずれは共軸光学系であるため無視できることから高精度の調整を必要としない。

3.2 計測系の構成

SOT の光学アライメントにおける装置構成を Fig. 7 に示す。主鏡・副鏡間を連結するフレーム構造の重力変形を最小限とするため、SOT は光学ベンチ上に組んだ専用の架台に開口を鉛直上向きに設置する。SOT の開口側には平面原器をセットし、HPSHS は主鏡ミラーセルにじかに固定し、平面原器によって往復させた計測ビームの波面を計測した。

計測の前に、HPSHS の光学系とコリメートレンズで生じる系統誤差を除去するため、コリメートレンズの焦点付近に置いた参照球面で折り返した波面を計測し、以後の計測結果から差し引く処理を行った。校正時と、SOT 計測時の Hartmanngram を Fig. 8 に示す。SOT 計測時には

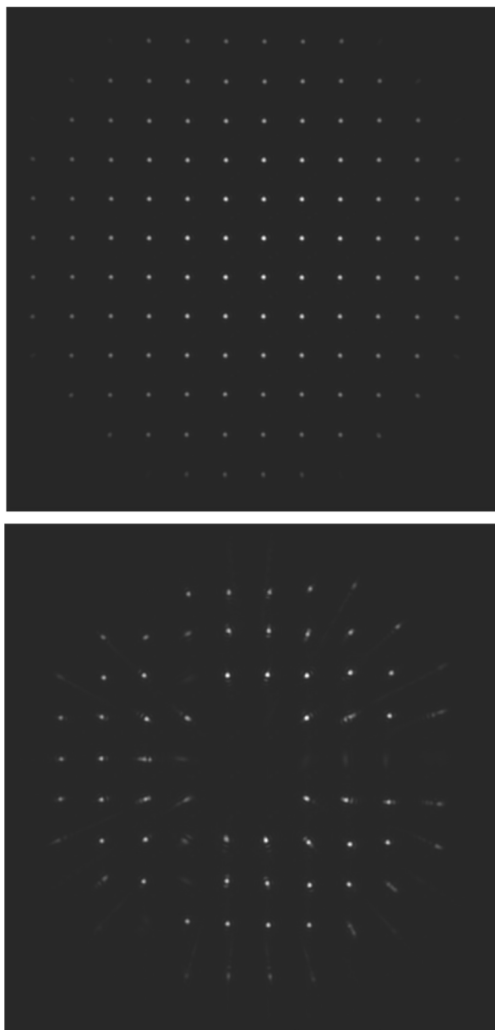


Fig. 8 Hartmanngrams measured by HPSHS. Upper: reference wavefront, Lower: after double passed through SOT.

副鏡，および3本のスパイダー部の Hartmanngram が遮蔽され消えているのがわかる。また，いくつかの集光スポットの分布が崩れているが，部分開口内の鏡面のうねりや，ビネッティングで生じたものである。明らかに部分開口のビネッティングが大きい集光スポットは，波面再生信号処理の対象から除外した。

3.3 計測再現性の評価

定常状態で波面計測を50分間10000フレーム連続で行い，振動，大気ゆらぎ依存の計測ばらつきの評価を行った。ツェルニケモード別の時系列ばらつきを Fig. 9 に，アライメントパラメーターに關係するコマ成分 (A_{31} , B_{31}) について，積算回数と計測ばらつきを評価した結果を Fig. 10 に示す。図から，計測再現性 5 nm RMS 以下を満足するためには，90 フレーム以上の積算平均を行えばよいことがわかる。この結果から，以後の計測は100フレームの積算平均を毎回行った。100 フレーム積算に必要な計測時間は 33 s である。

3.4 系統誤差の除去

計測結果には，鏡面の研磨誤差や，意図せぬ応力変形によって想定外のモードの波面誤差が同時に計測された。これらの波面誤差成分は，重力変形と異なり宇宙空間へ打ち上げ後においても存在し続ける現実の物理量であり，系統誤差ではない。しかしながら，これらの波面誤差成分のモードがアライメントパラメーターと相關のあるコマ成分よりも高次モードであり，かつツェルニケモードへの展開における座標系原点が望遠鏡光軸からずれがある場合，高次

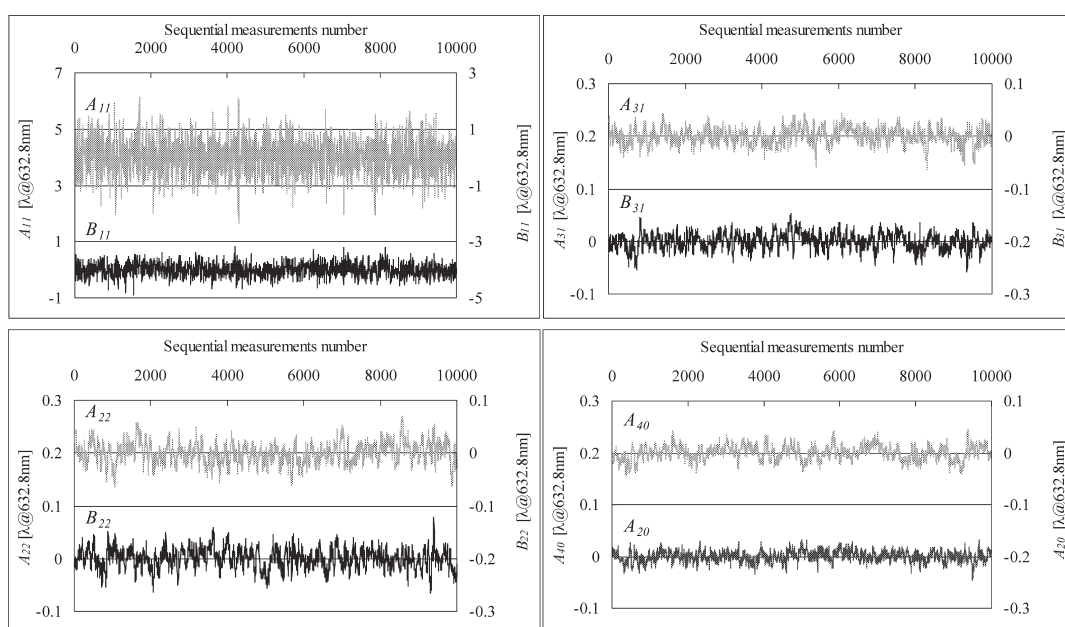


Fig. 9 Temporal fluctuation of measured wavefront mode (in 50 min).

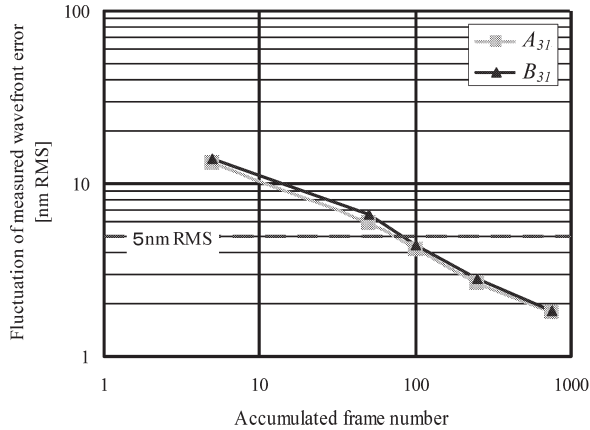


Fig. 10 Relation between number of accumulated frames and repetition accuracy about coma wavefront mode.

モードが低次モードにまぎれこむ高次から低次へのもれこみ（エイリアシング）による系統誤差が生じる。したがって、望遠鏡とツェルニケ多項式の座標系原点を一致させる必要があるが、今回複数の計測データから座標系偏心を正確に検出する方式を考案し適用した。

副鏡偏心 X_s , Y_s に依存性のあるコマ収差のモード A_{31} , B_{31} も、エイリアシングにより低次の非点収差モード A_{22} , B_{22} に重畳されて計測される。このエイリアシング成分は、次式で表される。

$$\begin{cases} A_{22} = -3\Delta X_p \cdot A_{31}(X_s) + 3\Delta Y_p \cdot B_{31}(Y_s) \\ B_{22} = -3\Delta Y_p \cdot A_{31}(X_s) - 3\Delta X_p \cdot B_{31}(Y_s) \end{cases} \quad (1)$$

ΔX_p , ΔY_p は未知の座標系偏心である。副鏡偏心 X_s , Y_s は、アライメントを意図的にずらすことで任意に操作可能であり、副鏡を偏心させれば式 (1) からコマ成分の変化に対する非点成分へのエイリアシングの変化感度を計測することができる。このエイリアシングの変化感度は、次式で表される。

$$\begin{cases} \partial A_{22} / \partial A_{31} = -3\Delta X_p \\ \partial B_{22} / \partial A_{31} = -3\Delta Y_p \\ \partial A_{22} / \partial B_{31} = 3\Delta Y_p \\ \partial B_{22} / \partial B_{31} = -3\Delta X_p \end{cases} \quad (2)$$

この関係を用いて、実際に副鏡を偏心させて座標系偏心の推定を行った。副鏡を X_s 方向に少しずつ偏心させたときの、非点とコマ係数 (A_{31}) の変化を Fig. 11 に示す。Fig. 11 からコマに対する非点の微係数を読み取り、式 (2) を適用すると、座標系偏心は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \Delta X_p &= -0.009 \\ \Delta Y_p &= -0.069 \end{aligned}$$

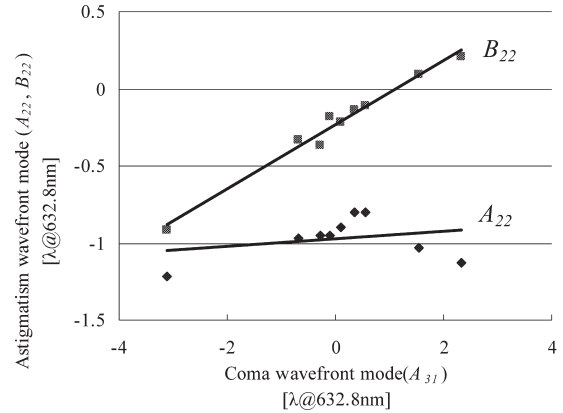


Fig. 11 Astigmatism response to coma when the secondary mirror was decentered.

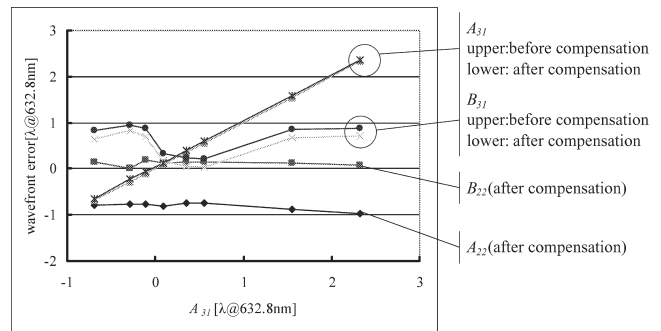


Fig. 12 Comparison of measured coma wavefront mode before (upper line) and after (lower line) compensation about coordinates decenter of Zernike polynomials.

ただし、 ΔX_p , ΔY_p は瞳半径を 1 として規格化。

さらに、Fig. 11 に対して、上記で求めた座標系偏心を補正した結果を Fig. 12 に示す。Fig. 11 と比較し非点とコマの相関がほぼなくなっていることから、座標系偏心が補正されていることがわかる。また、補正前後のコマ成分の差を求めると約 38 nm RMS であり、この差はコマに含まれていたエイリアシングファクターが除去されたことを示している。以上から、座標系偏心補正の効果の有効性を確認できた。

3.5 絶対精度評価

最後に、HPSHS による SOT の波面誤差計測値が目標以下となる位置で副鏡を固定した。次に、PSI により SOT の波面誤差計測を行い、HPSHS の絶対精度を比較検証した。2 つの波面計測装置の計測波面において副鏡のアライメントずれに関係するコマ成分を比較すると、その差は 17 nm RMS であり、2 章 2 節に示した単体試験で検証された 2.6 nm RMS の精度は得られなかった。PSI の計測データを用いて原因の解析を行った結果、この計測値の差は、高次の研磨誤差に起因する高次の波面モードが低次モ

ードへまぎれこむエイリアシングによって生じていることを確認した。flight model への適用を想定すると、エイリアシングの原因となる主鏡、副鏡の研磨誤差が MTM の 5 分の 1 以下となることから、この系統誤差はほとんど問題とならない程度と見積もられる⁷⁾。

4. む す び

SHS は PSI に比較し、計測時の周囲環境からの外乱に影響されにくい特徴がある。本論文では、この特徴によるメリットが大きい応用として、宇宙望遠鏡の光学アライメントにおける波面計測へ SHS を適用した場合の有効性について述べた。2 章において、可視光宇宙望遠鏡 SOT のアライメント用途に特化して筆者らが開発した HPSHS の構成、および性能について述べた。PSI と HPSHS で同一の平面鏡を計測し比較した結果、2 つの波面計測装置の計測結果はよく一致しており、最大で 7.4 nm RMS であった。特に、SOT の副鏡のアライメントずれで生じる波面モードについて比較すると 2.6 nm RMS であった。3 章において、HPSHS を SOT の MTM の光学アライメントに適用した結果について述べた。周囲環境に依存する計測ばらつきの低減手法として、短時間露光、フレーム積算平均処理を採用したことにより、計測ばらつきを短時間(今回は 1 計測 33 s)で除去できること、副鏡のアライメントずれとツェルニケモードとの相関からツェルニケ多項式の座標系偏心を推定し、有害な系統誤差を除去できることを確認した。最後に、PSI によって SOT の波面誤差計測を行い、HPSHS による計測波面誤差と比較した結果、高次波面モードに起因するエイリアシングにより系統誤差

が確認されたが、高次波面モードが十分に小さい SOT を FM へ適用する場合には、問題とならない程度と見積もられる。

文 献

- 1) 常田佐久：“Solar-B 可視光望遠鏡”，国立天文台ニュース，2001 年 1/2 月合併号 (2001) 4-6.
- 2) D. Maracala: “Phase shifting interferometry,” *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (Wiley Interscience, New York, 1992) pp. 501-598.
- 3) C. Koliopolis: “Simultaneous phase shift interferometer,” *Advanced Optical Manufacturing and Testing II*, ed. V. J. Doherty, Proc. SPIE, **1531** (1991) 119-127.
- 4) 中盾末三, 喜入朋宏, 塩沢和則, 渋谷真人: “2 枚の位相シフトした干渉縞を用いる位相干渉計”, 光学, **33** (2004) 407-412.
- 5) J. A. Koch, W. Presta, R. A. Sacks, R. A. Zacharias, E. S. Bliss, M. J. Dailey, M. Feldman, A. A. Grey, F. R. Holdener, J. T. Salmon, L. G. Seppala, J. S. Topp, L. V. Atta, B. M. V. Wintergreen, W. T. Whistler, S. E. Winters and B. W. Woods: “Experimental comparison of a Shack-Hartmann sensor and a phase-shifting interferometer for large-optics metrology applications,” *Appl. Opt.*, **39** (2000) 4540-4546.
- 6) K. Ichimoto, S. Tsuneta, Y. Suematsu, T. Shimizu, M. Otsubo, Y. Kato, M. Noguchi, M. Nakagiri, T. Tamura, Y. Katsukawa, M. Kubo, Y. Sakamoto, H. Hara, K. Minesugi, A. Ohnishi, H. Saito, N. Kawaguchi, T. Matsushita, T. Nakaoji, K. Nagae, J. Sakamoto, Y. Hasuyama, I. Mikami, K. Miyawaki, Y. Sakurai, N. Kaido, T. Horiuchi, S. Shimada, T. Inoue, M. Mitsutake, N. Yoshida, O. Takahara, H. Takeyama, M. Suzuki and S. Abe: “The solar optical telescope onboard the Solar-B,” Proc. SPIE, **5487** (2004) 1142-1151.
- 7) 鈴木二郎, 遠藤貴雄, 松下 匡: “Shack-Hartmann 方式高精度波面センサーによる宇宙望遠鏡のアライメント実証試験結果”, 第 66 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 (2005) p. 877.