シャックハルトマンセンサの画像による波面収差繋ぎ測定技術*

吉 武 康 裕** 吉 田 実*** 針 山 達 雄***

Wave Aberration Stitching Measurement Technology using Images of a Shack-Hartmann Sensor

Yasuhiro YOSHITAKE, Minoru YOSHIDA and Tatsuo HARIYAMA

We have developed a stitching wavefront measurement system using a Shack-Hartmann sensor for a lens of a pupil larger than the CCD camera fields. This system has the following features; (a) algorithms for the stitching error compensation using the stage position data obtained with the laser interferometers, and (b) calibration for the lens array errors of the sensor. Experiments confirmed that the difference of the root-mean-square value of wavefronts measured with 1 shot and 3X3 shots is 0.0013 of a wavelength (355nm). We evaluated the stability of the wavefront measurement against the point source mis-adjustment from 0 to 1μm in the direction of the optical axis. The fluctuation of the wavefront rms is found to be 0.0086 (2σ). Finally, a Fourier transform lens of a pupil diameter of 40mm is measured using the stitching technique. It is confirmed that the stitched boundaries are smoothly connected.

Key words: Shack-Hartmann sensor, wave aberration, calibration, stitching measurement, pupil

1. 緒 言

レンズを用いる光学応用装置ではレンズ収差の低減が重要であり、そのためには収差測定技術の開発が課題となっている。干渉計は収差測定手段の一つであるが、参照光路に対し被検レンズの光路を安定に保つ必要があり、振動、温度変化に対して敏感である。一方、Shack-Hartmann センサ^{1)~4)}（以下 SH センサと記す）は、波面をアレイレンズで分割し、カメラ上で集光位置のずれの分布を測定する方式であり、干渉計に比べると環境変化に強い。ただし、測定可能な波面は干渉計と同様、カメラの撮像面の大きさで制約される。このため、大きな波面はリレー系で縮小する必要がある。しかし、追加したリレー系単独の収差を被検査レンズの各像高で測定して補正する必要がある、実施は困難である。

一方、大きな波面を直接測定する方法として、撮像範囲をオーバーラップさせながら繋いでいく stitching 法^{5)~8)}が主に干渉計用途に開発されている。これらは測定した小波面を多項式で近似し、重なり部が整合するようにオフセットおよびチルト係数を最小 2 乗法で補正するものである。しかし、多項式化により波面の局所的成分での精度が低下する問題がある。また、重なり部の画像マッチングで補正する方法⁹⁾もあるが、SH センサでは画像が離散的なためマッチング誤差が大きくなる。

そこで、本研究では多項式近似は使わず、SH センサの画像をベースに、撮像時のステージ姿勢誤差をレーザ測長器で直接測定し、設計上のサンプリング点を補間によって求める方法を開発した。また、SH センサのアレイレンズ配列誤差起因の波面収差を測定し、この値により測定結果を補正した。目標精度は、収差影響が顕著になる $\lambda/10$ (λ : 波長)¹⁰⁾ の $1/10$ を目標に、 $\lambda/100$ ($\lambda=355\text{nm}$) とした。本手法の精度検証のため、カメラ視野でカバーできる小さな波面を用い、 3×3 ショットでの stitching 測定と 1 ショット測定での波面収差の比較を行った。また、こ

の手法を用いて、 $\phi 40$ の大瞳孔径レンズの波面を直接測定した。本研究の結果により、環境ロバスト性の高い SH センサによる、大波面の stitching 測定の基礎データが得られた。

2. 収差測定装置の構成

SH センサは図 1 に示すように、レンズアレイとカメラによって構成される。波面はレンズアレイによって分割され、スポット状に集光される。図 2 にスポット像の例を示す。各スポット像の位置ずれは、レンズアレイ面における波面の傾きに比例する。この関係を次式に示す。

$$\tan \alpha = -\frac{\Delta X(\xi, \eta)}{f} = \frac{\partial W(\xi, \eta)}{\partial \xi} \quad (1)$$

ここに、 $\tan \alpha$ は X 方向の波面の傾き、 (ξ, η) はレンズアレイの座標、 ΔX は CCD 面上での X 方向のスポット像のずれ、 f はレンズアレイの焦点距離、 $W(\xi, \eta)$ は波面収差である。

(1) 式よりスポット像の位置ずれ ΔX 、 ΔY から波面の微分値が求まるので、これを画面全体で積算することにより、波面収差 $W(\xi, \eta)$ を算出することができる⁹⁾。また、 $W(\xi, \eta)$ は Zernike 収差関数の和として表すこともでき、各収差の係数は、収差関数の 1 次微分の和とスポット像の位置ずれ ΔX 、 ΔY から最小 2 乗法で算出される^{9), 10)}。

本研究で開発した収差測定装置を図 3 に、主要光学系の外観を図 4 示す。YAG レーザ(第 3 高調波波長 355nm)を出射した光は、ビームエキスパンダで拡大され、移動ステージ上の対物レンズで $\phi 1\mu\text{m}$ 以下に集光される。この点光源を出た光は、被検レンズであるフーリエ変換レンズにより平行光となり、SH セン

Fig.1 Schematic view of the lens array and the CCD plane

* 原稿受付 平成 22 年 12 月 20 日

** 正 会 員 (株)日立ハイテクノロジー ファインテックシステム事業統括本部
(埼玉県児玉郡上里町嘉美 1600 番地)

*** (株)日立製作所 横浜研究所
(神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292 番地)

サ (Optocraft 社: SHScam UHR 116x116 アレイ, 130 μ m ピッチ) に入射する. センサ内のレンズアレイは, 被検レンズの射出瞳 (フーリエ変換面) 位置に設置されている. センサステージ (TOTO 社) のガイドはエアベアリング方式であり, 位置と回転はレーザ測長器 (Renishaw 社 RLU10) で計測される. この値は 4 章で説明する繋ぎ補正処理に使用される.

SH センサは干渉計に比べると振動には強いが, 波面自体は振動の影響を受けるので, チャンバと定盤下の空気ばねで防振対

Fig.2 Image of the spots focused with the lens array

Fig.3 Schematic view of the wave aberration measurement system

Fig.4 Optical setup of the wave aberration measurement system

策を行った. 図 5 に装置外観を示す. 壁面はアルミと吸音材 (VIC インターナショナル社) で構成され, 外音を 31.5Hz で 1/3.5, 63Hz で 1/12.6 に減衰させる性能をもつ. 床から伝わる振動は, 空気ばね (明立精機社) で減衰され, 30Hz で 1/14 の減衰性能がある.

3. 検出性能の基礎検討

3.1 スポット像位置の検出誤差

スポット像の中心位置は画像処理による単純な重心計算で算出されるが, カメラ画素による離散化やノイズにより誤差が発生する. この値を数値シミュレーションにより検討した. アレイレンズの焦点距離 f が 10mm, 径 D が 130 μ m, 波長 λ が 355nm の時, CCD センサ上のスポット径 ϕ は,

$$\phi = 1.22 \frac{\lambda}{D/2f} \quad (2)$$

より, 64.6 μ m となる. スポット像を, この径の位置で $1/e^2$ となるガウス分布でモデル化し, CCD 画素のピッチ 7.4 μ m でサンプリングした. CCD センサ (2048 $\times$ 2048 画素) には約 1 μ W が照射されており, スポット像の画素あたりの光子数は約 97,000 となる. この光強度においてノイズは殆どショットノイズであり, フォトン数の平方根となるため, 信号に対するノイズの比は, 0.32% となる.

そこで, モデル波形に 0.32% のノイズを加え, 波形と画素の相対位置が変化した場合の重心検出のシミュレーションを行った. 図 6 に波形のシフト量が 0 μ m と 5 μ m の場合の例を示す. ノイズとシフトによるサンプリングずれで波形が変形していることが分かる. 同様にノイズを乱数で 20 回与え, シフト量を 0.2 μ m ピッチ, 1 画素相当の 7.4 μ m までシフトさせ, 重心位置検出誤差を算出した. 図 7 に検出誤差のヒストグラムを示す. この結果, 検出誤差は 30nm 程度まで発生し, 平均 2 乗偏差 X_{rms} は 10.1nm となることが分かった. (1) 式より検出誤差は波面傾斜誤差に換算される. 誤差は各スポットで独立に発生すると仮定すると, 波面の凹凸誤差の rms (root mean square) 値: ε (単位: 波長) は, 波面傾斜誤差にアレイレンズのピッチ P を掛けることにより,

Fig.5 Chamber of the wave aberration measurement system

$$\varepsilon = \frac{X_{rms} P}{f \lambda} = \frac{10.1(\text{nm}) \cdot 130 \times 10^3 (\text{nm})}{10.0 \times 10^6 (\text{nm}) \cdot 355(\text{nm})} = 3.71 \times 10^{-4} \quad (3)$$

と算出される。この値は 1/1,000 波長より小さな値であり、4 章の測定誤差に対しては影響を与えないことが確認できた。

3.2 フォーカス設定誤差の影響

フォーカス設定誤差の影響を評価するため、点光源を作る対物レンズを上下したときの Zernike 多項式近似波面収差の Z3 係数(デフォーカス成分)変化の直線性を評価した¹¹⁾。対物レンズはピエゾステージ(日本セラテック社 MS13: 静電容量センサフィードバック型)により駆動される。

Fig.6 Profiles of the spot images modeled with additional noise

Fig.7 Histogram of position detection errors of the modeled spot images

Fig.8 Linearity of the defocus coefficient of the Zernike polynomial

Fig.9 Wavefront after removal of the defocus component rms

図 8 に 0~1μm 移動時の Z3 係数の変化を示す。近似直線からの乖離は 0.0100(2σ)である。図 9 は各位置において、波面収差からデフォーカス成分を除いた残差の rms を示す。デフォーカス時の波面収差の変動を評価したもので、0.0086 (2σ)である。これにより、対物レンズの高さ設定が 1 μm ずれたとしても、1/100 波長以下の精度で波面収差が計測可能であることが確認できた。なお、図 9 のフォーカス位置、0.0 μm、0.3 μm、0.6 μm で突発的な変動が見られるが、位置での再現がないことから、振動、空気揺らぎ等の環境変動起因によるものと推定する。

3.3 SH センサの誤差測定

測定値にはレンズアレイの配列誤差起因の収差が含まれるため、これを単独に測定する必要がある¹⁾。図 10 に測定光学系を示す。光源は波長 405nm の半導体レーザであり、これをシングルモードファイバで導光する。出射端のコア径は 3 μm であり、1 m 離れたセンサ位置では、ほぼ点光源とみなせる。光源の波長は 405nm であり測定装置の波長 355nm と異なる。レンズアレイの材質(合成石英)の屈折率分散によるスポット像のずれが懸念されるため、SH センサの許容傾斜角である 5 度で光線追跡

Fig.10 Setup for measuring the lens array errors of the SH sensor

Fig.11 Chromatic lateral shift of the chief ray of the array lens

Fig.12 Wavefront map of the correction data of the SH sensor

を行った。図 11 に示すように、CCD センサ上でのずれは 4nm であり、3.1 節で示した重心検出誤差 30nm に比べて十分小さな値であり、波長 405nm の測定で代用できることが確認できた。

ファイバ端を出射する球面波の光軸上にセンサを配置し、撮像されたスポット像の座標配列と各点での球面波の微分値から最小 2 乗法で球面波の曲率半径（ファイバ端とセンサ間距離）を求めた。これにより、球面波起因の位置ずれを差し引いたスポット像のずれが、レンズアレイ配列誤差を表すキャリブレーションデータとして得られる。図 12 に算出されたセンサ収差のマップを示す。rms 値が 0.0178λ (6.32nm)、最大値： 0.0698λ (24.8nm)、最小値： -0.0525λ (-18.6nm) である。

4. 波面収差の繋ぎ測定

4.1 格子点でのスポット像ずれ量の補間算出

大波面は SH センサをステージでステップ送りし、各スポット像を合成して波面収差を算出する。図 13 に 3×3 の画像を合成する例を示す。各画像の位置は、レーザ測長器 LX, LY1, LY2 により、それぞれ X, Y 座標、回転量として計測される。LY1 と LY2 のレーザ間隔は 60mm、レーザ測長器の再現性は 15nm であるため、回転計測精度は $2.5 \times 10^{-7} \text{rad}$ となり、ステージのヨーイング誤差 $1.4 \times 10^{-6} \text{rad}$ が計測可能である。各スポット像は同一座標系にマッピングされ、メカ的な回転、オフセット起因の誤差は次に示す基準格子点への補間処理によって補正される。

合成画像における基準格子点位置とスポット像の関係を図 14 に、これを部分拡大した、格子点と隣接するスポット像の関係を図 15 に示す。図 15 において、注目格子点が含まれる四角形を構成する 4 頂点のスポット像のずれ量から、(4) (5) 式で示されるバイリニア補間で格子点 (x, y) でのずれ量 $(\Delta x_{xy}, \Delta y_{xy})$ を算出する。

$$\Delta x_{xy} = ([X]+1-x)([Y]+1-y)\Delta x_{i,j} + ([X]-x)([Y]+1-y)\Delta x_{i+1,j} \\ + ([X]+1-x)([Y]-y)\Delta x_{i,j+1} + ([X]-x)([Y]-y)\Delta x_{i+1,j+1} \quad (4)$$

$$\Delta y_{xy} = ([X]+1-x)([Y]+1-y)\Delta y_{i,j} + ([X]-x)([Y]+1-y)\Delta y_{i+1,j} \\ + ([X]+1-x)([Y]-y)\Delta y_{i,j+1} + ([X]-x)([Y]-y)\Delta y_{i+1,j+1} \quad (5)$$

外周で内挿補間ができない格子点の値は、図 16 に示すように、直線上にある内側 2 点を内挿で求め、これらの値を外挿する。

上記の処理により 3×3 画像の格子点でのスポット像のずれ量が得られ、これらの値から収差係数が算出される。

4.2 繋ぎ測定の精度検証

3×3 画像による繋ぎ測定の精度検証を行うため、被検レンズの絞り ($\phi 40$) をセンサ視野 (15mm 角) でカバーできる 13.5mm 角に限定し、補正有無での測定波面 rms の比較を行った。各ショットの視野は 5mm、移動量は 4.5mm とした。オーバーラップ部を 0.5mm 設けることで、ステージ誤差起因でショット境界のスポット像が疎らとなる問題を防いだ。図 17 に 3×3 画像繋ぎ測定における補正有無の違いを示す。一括測定での波面収差の rms 値 (5 回測定の平均値) を基準とした偏差 (差分) で評価を行った。単位は波長 ($\lambda=355\text{nm}$) である。5 回測定の平均値は、補正無しで 0.0065λ 、補正ありで 0.0013λ 、 2σ は補正無しで 0.0021λ 、補正ありで 0.0017λ であった。図 18、図 19 に一括測定と繋ぎ測定での波面収差のマップを、図 20 に $Y=12\text{mm}$ での断面を示す。分布の傾向は良く一致している。

なお、繋ぎ精度検証には、3.3 で述べた理想球面波を用いる方法も考えられるが、装置上での点光源の発散角が大きく、SH セ

Fig.13 3x3 shot spot array image

Fig.14 Overlay image of the spot array and the grid points

Fig.15 Schematic diagram of a bi-linear interpolation for the inner grid points

Fig.16 Schematic diagram of an extrapolation for the outer grid points

Fig.17 Wavefront deviation(rms, unit:λ) of the 3x3 shot measurement to the 1 shot measurement

Fig.18 Wavefront map of the 1 shot measurement

Fig.19 Wavefront map of the 3X3 shot measurement

Fig.20 Cross section at Y=12mm of the wavefront map of the 1 shot and the 3X3 shot measurement

Fig.21 Aberration map of the Fourier transform lens of a pupil diameter of 40mm measured using the 3X3 shot stitching technique

ンサ上での光強度が感度を下回るため用いなかった。

5. 大波面の測定

CCD センサの視野 15mm 角を超える $\phi 40\text{mm}$ の瞳径をもつフーリエ変換レンズに対し 3×3 画像の繋ぎ波面測定を実施した。測定結果を図 21 に示す。点線の矢印はセンサステージの動きを示す。マップは(1)式の関係を用い、スポット像移動値から各位置での波面の微分を算出し、これらを積分して繋ぐことにより作成した。補正が旨く行かない場合 3×3 画像間境界の不連続が発生し得るが、連続性のある測定ができており、ステージ誤差の補正が機能している。

6. 結 言

カメラ視野を超える大きな瞳径をもつレンズの波面収差を直接測定するため、Shack-Hartmann センサを用いた stitching 測定法を開発した。本方式の特徴は、(a) レーザ測長器でステージ誤差を測定し、姿勢誤差のある画像から固定の格子点上のスポット像の位置ずれを算出する点と、(b) 格子点上でのセンサ起因の位置ずれを測定し減算することにより被検レンズのみの波面収差を算出する点にある。本測定法により以下の結果を得た。

- (1) $0 \sim 1\mu\text{m}$ でデフォーカスさせた時のデフォーカス係数の近似直線からの乖離は 2σ で 0.0100λ ($\lambda=355\text{nm}$) であり、デフォーカス成分を除いた波面の変動は 0.0086λ (2σ) 波長であった。
- (2) 13.5mm 角の撮像範囲において、 3×3 shot 撮像の一括撮像に対する波面収差の誤差は、補正によって 0.0065λ から 0.0013λ に低減される (5 回平均の rms 値) ことを確認した。
- (3) $\phi 40\text{mm}$ の瞳径のフーリエ変換レンズを 3×3 shot で繋ぎ測定し、境界が滑らかに接続されることを確認した。

以上により、カメラ視野を超える大きな波面を $1/100\lambda$ ($\lambda=355\text{nm}$) の精度で測定できる見通しを得た。露光、検査用途の光学装置では短波長化で解像度が向上する。今後は、さらなる短波長において高精度を得るための改良を進めていく。

参 考 文 献

- 1) J.E.Greivenkamp et al, " Calibration issues with Shack-Hartmann sensors for metrology applications", SPIE, **5252**, (2004) 372.
- 2) A.Chernyshov et al, " Calibration of a Shack-Hartmann sensor for absolute measurements of wavefronts", Applied Optics, **44**, 30, (2005) 6419.
- 3) J.Pfund et al, " Absolute sphericity measurement: a comparative study of the use of interferometry and a Shack-Hartmann sensor", Optics Letters, **23**, 10, (1998) 742.
- 4) N.Lindlein et al, " Expansion of the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using astigmatic micro lenses", Opt. Eng., **39**, 8, (2000) 2220.
- 5) M.Otsubo et al, " Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms", Opt. Eng., **33**, (1994) 608.
- 6) S.Chen et al, " Iterative algorithm for subaperture stitching interferometry for general surfaces", J. Opt. Soc. Am. A, **22**, 9, (2005) 1929.
- 7) Z.Xu et al, " Three-dimensional profile stitching based on the fiducial markers for microfluidic devices", Optics Communications, **282**, (2009) 493.
- 8) 吉武康裕ほか, 露光装置の収差データ活用技術の研究, 精密工学会誌, **76**, 1, (2010) 69.
- 9) W.H.Southwell, " Wave-front estimation from wave-front slope measurement", J. Opt. Soc. Am., **70**, 8, (1980) 998.
- 10) S.Groening et al, " Wave-front reconstruction with a Shack-Hartmann sensor with an iterative spline fitting method", Applied Optics, **39**, 4, (2000) 561.
- 11) N.R.Farrar et al, " In-situ measurement of lens aberrations", SPIE, **4000**, (2000) 18.