低解像度スポット像を用いた収差解析手法の開発

岡田 和佳・天谷 賢治・大西 有希

東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

Development of Aberration Retrieval Method Using Low-Resolution Spot Images

Kazuyoshi OKADA, Kenji AMAYA and Yuki ONISHI

Department of Mechanical and Environmental Informatics, Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2–12–1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152–8550

In this study, aberration retrieval method using low-resolution spot images has been developed. The amplitude of the generalized pupil function and the wavefront aberration which is the phase of the generalized pupil function are expanded with the lower Zernike polynomials, respectively. The present aberration retrieval problem is reduced to the nonlinear least square problem minimizing the difference between the observed images on the imaging device and the corresponding model images which can be calculated by assuming these Zernike coefficients. In the mathematical model for calculating the captured spot images, the mathematical model considering the characteristics of the imaging device are applied to the current model. The overlapped frequency information of the spot images is separated by using the multiple spot images modulated differently. The effectiveness of this method was verified by the numerical simulation and the practical experiments.

Key words: optical engineering, aberration retrieval, Zernike polynomial, inverse problem, camera module

1. 緒 言

近年,携帯電話をはじめ多くのモバイル機器にカメラモ ジュールが搭載されるようになってきた.カメラモジュー ルは,結像レンズおよび CCD や CMOS などの固体撮像素 子から構成されている.これらの個々の部品の検査技術が 確立され,高い品質が保証されていても,結像レンズと撮 像素子の組み立て時における不整合があれば,カメラモ ジュールとしての品質は損なわれてしまう.最終的な光学 部品としての品質は,カメラモジュール全体がアセンブル された後決定される.このため,アセンブル後のカメラモ ジュールの品質を保証するための検査技術は重要である.

現状でのカメラモジュールの評価は、専用のテスト チャートをカメラモジュールで撮影し、MTF を評価す る¹⁾.しかし、チャート方式による検査では、チャートの 経年劣化や温度依存性、光源の特性の影響などが問題とな る.また、MTF は画像の解像力にのみ着目した評価であ り、不良原因の直接的な解明、修正にはつながりにくい. これに対して、波面収差測定は光学系による波面の歪み これに対して Dirksen らの手法⁶⁾,田中の手法^{7,8)} や上 島らの手法⁹⁾ では,撮影したスポット像から収差を解析す るため,レンズと撮像素子の間に特定の光学系を構成する 必要はない.しかし,カメラモジュールにより直接撮影さ れたスポット像は解像度が低く,これらの手法を適用する 場合,以下の2点の問題が生じる.1点目は,スポット像 の数理モデルにおいて撮像素子の特性を考慮していない点 である.撮像素子では強度分布の各セルごとの積分値が得 られる.低解像度の画像ではこの影響は大きく,これを考 慮しない場合,解析誤差が増大する.2点目は,撮像素子 のサンプリングにおけるナイキスト周波数によりスポット

を測定するため、不良原因の解明や修正に直接役に立つ²⁾. また、波面収差から MTF を計算することも可能である³⁾. 波面収差は干渉計⁴⁾ やシャック・ハルトマンセンサー⁵⁾ に より計測することができる.しかしこれらの手法では、レ ンズと撮像素子の間に特定の光学系を構成する必要があ り、カメラモジュールのようにレンズと撮像素子が組み上 げられた対象の計測は困難である.

E-mail: kamaya@a.mei.titech.ac.jp



Fig. 1 The set up of the optical system for the camera module aberration measurement and the definition of the coordinate system. a, a': Numerical aperture.

像のさまざまな周波数成分の情報が低周波帯域に重畳される.

本研究では、カメラモジュールで直接撮影された解像度 の低いスポット像から波面収差を逆解析する手法を開発す る、本手法では、 瞳関数の振幅と瞳関数の位相成分である 波面収差をそれぞれ低次のツェルニケ多項式で展開する. 本手法における波面収差解析問題は、これらの展開係数を 仮定して計算されるスポット像と計測画像との残差を最小 化する非線形最小二乗問題に帰着される。カメラモジュー ルで撮影されたスポット像の計算において、撮像素子の特 性を考慮した2つのモデルを導入する。1つ目は、撮像素 子の受光窓の特性を考慮した窓関数によりスポット像を畳 み込むモデルである。2つ目はサンプリングされた強度分 布を所望のサンプリング間隔にリサンプリングするモデル である. また本手法では、撮像素子のサンプリングにおけ るナイキスト周波数により低周波帯域に重畳されたスポッ ト像の周波数成分を分離するために、さまざまな位相変調 を与えた入力光より得られるスポット像を用いる。本手法 の有効性を検証するために、数値シミュレーションおよび 実際の光学系における実験を実施する.数値シミュレー ションでは、本収差逆解析の安定性および適用限界の検討 を行う、実際の光学系における実験では、デフォーカス収 差の測定実験およびガラス板の傾きによって発生する収差 の測定実験を実施し、本収差解析手法の精度について検討 を行う.

2. 低解像度スポット像を用いた収差解析手法

2.1 スポット像の数理モデル

カメラモジュール収差計測のための光学系の構成図およ び座標系の定義を Fig. 1 に示す.カメラモジュールは開口

数 a の結像レンズと撮像素子で構成され、カメラモジュー ルの前に2つのレンズを配置する. 波長λのレーザー光を 開口数 a' の集光レンズに入射させ、コリメーターレンズ で再び平行光に戻す、ここで、コリメーターレンズの開口 数は集光レンズの開口数よりも大きいとする、すなわち、 コリメーターレンズの実効的な開口数は a' となる. コリ メーターレンズを測定基準位置 da からピエゾアクチュ エーターで2方向に d だけ移動させることにより、カメラ モジュールへの入射光に既知の位相変調を与える。このよ うな簡便な光学系により、容易にデフォーカスの位相変調 を与えることができる。さまざまな移動量 d で計測を行う ことにより、逆解析における情報量を増やすことで逆間題 を適切化し¹⁰⁾、撮像素子のナイキスト周波数により低周波 帯域に重畳されるスポット像の周波数成分を分離する。 撮像素子面上にx-y平面を取り、それに直交する軸をz軸 とする.

光学系全体の瞳関数 $g(\xi, \eta)$ と入射光に既知の位相変調 $h(\xi, \eta; d)$ を与えたスポット像の複素振幅分布f(x, y; d)と の間の関係は次式のように表される¹¹⁾.

$$F(\mathbf{x}, \mathbf{y}; d) = \int_{-1}^{1} \int_{-\sqrt{1-\xi^{2}}}^{\sqrt{1-\xi^{2}}} g(\xi, \eta) h(\xi, \eta; d)$$
$$\times \frac{e^{-i2\pi \frac{d}{\lambda}(x\xi + y\eta)}}{\sqrt{1-a^{2}(\xi^{2} + \eta^{2})}} d\eta d\xi$$
(1)

ここで, *a* は像側開口数である. また, 位相変調 *h*(ξ, η; *d*) は次式で与えられる¹²⁾.

$$h(\xi,\eta;d) = \exp\left[i2\pi \frac{d}{\lambda}\sqrt{1-a'^2(\xi^2+\eta^2)}\right] \quad (2)$$

ここで、a' は物体側開口数である.

f

次に, 瞳関数 g(ξ, η)をツェルニケ多項式¹³⁾を用いて表 現する. 振幅成分を低次の (*M*+1)項, 位相成分を 0 次成 分を除く低次の *N* 項を用いて, 次式のように展開する.

$$g(\xi, \eta) = A(\xi, \eta) e^{i2\pi\Phi(\xi, \eta)}$$
 (3)

$$A(\xi,\eta) = \sum_{i=0}^{M} \alpha_i Z_i(\xi,\eta) \tag{4}$$

$$\Phi\left(\xi,\eta\right) = \sum_{i=1}^{N} \beta_i Z_i\left(\xi,\eta\right) \tag{5}$$

ここで、関数 $Z_i(\xi, \eta)$ はツェルニケ基底関数である.また、 $\alpha = \{\alpha_i\}, \beta = \{\beta_i\}$ はツェルニケ係数である.通常、ツェ ルニケ係数はフリンジ・ツェルニケ多項式の順に並べる. ツェルニケ係数の添え字 *i* と収差の関係を Table 1 にまと める.

以上の定式化により, 瞳関数を表すツェルニケ係数 α,

 Table 1
 Relation between the Fringe Zernike index and the aberrations.

Index <i>i</i>	Aberration
0	Piston
1	X-Tilt
2	Y-Tilt
3	Defocus
4	3rd Astigmatism 0 degree
5	3rd Astigmatism 45 degree
6	3rd Coma 0 degree
7	3rd Coma 90 degree
8	3rd Spherical

β を仮定すれば,入射光に既知の位相変調 h(x, y; d) を与 えたスポット像,

$$I(x, y; d) = ||f(x, y; d)||^2$$
(6)

が計算される.

2.2 撮像素子の数理モデル

これまでの定式化により,撮像素子面上におけるスポット像の強度分布 I(x, y; d) が計算される.実際の撮像素子では,この強度分布が各セルごとに積分された値,

$$I_{i,j}(d) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y; d) \operatorname{rect}\left(\frac{x_i - x}{s}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y_j - y}{t}\right) \mathrm{d}x \mathrm{d}y$$
(7)

が得られ、さらに所望のサンプリング間隔になるように電 子的にリサンプリングされる.このような撮像素子による サンプリングによって、スポット像の高周波成分が低周波 帯域に重畳される.リサンプリングでは電気的な信号処理 などが含まれるが、ここでは第一近似として画像の線形補 間モデルを用いる.すなわち、

$$I'_{i',j'}(d) = \sum_{i,j} I_{i,j}(d) w(x'_{i'} - x_i + \delta_x, y'_{j'} - y_j + \delta_y) + c \qquad (8)$$

$$w(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect}\left(\frac{x'}{s}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y'}{t}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{x-x'}{s'}\right) \\ \times \operatorname{rect}\left(\frac{y-y'}{t'}\right) dx' dy' \qquad (9)$$

ここで, (s, t) は撮像素子のセルサイズ, (s', t') はリサン プリングの間隔, (x_i , y_j) は撮像素子の各セルの中心位置, (x'_i , y'_j) はリサンプリング時の各画素の中心位置である. また, (δ_x , δ_y) はリサンプリング時の中心のシフト量, c は 暗電流により発生する画像のオフセットであり,本手法で はツェルニケ係数 α , β に加え,これらの量 δ_x , δ_y , c も逆 解析における未知量とする.

2.3 逆問題の定式化

撮影した画像から収差係数を推定する逆問題を定式化す

る. コリメーターの変位 $d = d_k$ における撮影画像を並べた ベクトル \bar{I}_k と計算により得られる画像 $I'_{i',j'}(d_k)$ を並べた ベクトル I_k の二乗残差 J は次式である.

$$J(\boldsymbol{\gamma}) = \sum_{k} \| (\boldsymbol{I}_{k}(\boldsymbol{\gamma}) - \bar{\boldsymbol{I}}_{k}) \|^{2}$$
(10)

ここで、 $\gamma = \{\alpha^{T}, \beta^{T}, \delta_{x}, \delta_{y}, c\}^{T}$ は本収差逆解析における未 知量を成分とするベクトルであり、本問題における未知量 の数はM+N+4である.式(10)を最小化することで、 収差係数を成分とするベクトル β を含むベクトル γ の最小 二乗解 γ^{\star} が得られる.

$$\boldsymbol{\gamma^{\star}} = \arg_{\boldsymbol{\gamma}} \min J(\boldsymbol{\gamma}) \tag{11}$$

この最小二乗問題は, Gauss-Newton 法や Levenberg-Marquardt 法などの非線形最小二乗法¹⁴⁾ により解くこと ができる.

以上の収差逆解析の結果得られる収差には、レーザーや コリメーターレンズなど検査対象以外の光学系に起因する 収差が含まれる.あらかじめ、検査対象となる光学系以外 の収差を計測しておき、その収差を計算により除去するこ とで、検査対象の光学系の収差を得ることができる.

3. 数値シミュレーションによる収差逆解析の安定性 の検討

本章では、数値シミュレーションにより本手法による収 差逆解析の安定性を検討した結果を示す.すなわち、あら かじめ本収差逆解析における未知量ベクトルγに既知の値 を与えて模擬測定画像を作成し、収差を解析する.模擬測 定画像を作成する際に実際の光学系と同定度のランダムノ イズを与える.このランダムノイズのシードを変更しなが ら数値実験を繰り返し行い、本収差逆解析手法の安定性を 検証する.

3.1 解析条件

本数値実験におけるレーザーの波長は 650 [nm],光学 系の物体側開口数,すなわちレーザーの集光レンズの開口 数は 0.36,像側開口数は 0.09 とする.撮像素子のセルサイ ズは 7.40 [μ m]×6.35 [μ m] であり,これを画素サイズ 7.40 [μ m]×7.40 [μ m]にリサンプリングした画像が得られ る.入射光に位相変調を与えるためのコリメーターレンズ の測定基準位置からの移動量 dは,著者らの経験に基づき 12.5 [μ m]から22.5 [μ m]まで2 [μ m]ずつ, -12.5 [μ m]か ら-22.5 [μ m]まで2 [μ m]ずつ変化させ,計 12 枚の画像 を撮影して解析を行う.以上の移動量 dの設定は,dを大 きくすることにより画像がぼやけて広がるために解像度が 改善されるが,大きくし過ぎると収差の情報が失われてし



Fig. 2 The histogram of the dark image captured by the actual imaging device.



Fig. 3 The spot images at $d = 22.5 \ [\mu m]$. (a) The phantom spot image, (b) the fitted spot image.

まうことを考慮して行った.また、ツェルニケ多項式は振幅成分 α で低次の 9 項、位相成分 β で 0 次を除く低次の 8 項を用いる (M = N = 8).以上の条件のもと、適当な ツェルニケ係数を与えて 13×13 画素の画像を計算し、これに適当なランダムノイズを与え、整数値に丸め込み模擬 測定画像とする.このとき与えるランダムノイズは、実際 の撮像素子で真暗な画像を撮影して決定する.実際の撮像 素子で撮影した真暗な画像のヒストグラムを Fig. 2 に示す. Fig. 2 より、計算画像に与えるランダムノイズは、平 均値 14.8、標準偏差 0.707 のガウス性ランダムノイズとす る.また、リサンプリング時の中心のシフト量はないもの とする ((δ_x, δ_y) = (0, 0)).

以上の手順により作成された模擬測定画像を用いて収差 逆解析を行う.非線形最小二乗問題の解法にはLevenberg-Marquardt 法を用いる.また,Jacobi 行列の計算を効率化 するためにBroydenの更新式を用いる.この数値実験を乱 数のシードを変更しながら 500 回実施し、本収差逆解析手 法の安定性を検証する.

3.2 解析結果

模擬的に作成した画像の一例 (*d* = 22.5 [μm]) および, これに対応する計算画像を Fig. 3 に示す. Fig. 4 にあらか



Fig. 4 The prescribed Zernike coefficients. (a) The amplitude coefficients, (b) the wavefront aberration coefficients.

じめ与えたツェルニケ係数を示す. 振幅係数は 8 bit の CCD における最大強度の平方根 ($\sqrt{255}$) で正規化した. Fig. 5 に 500 回の数値実験における推定した未知量の最大 誤差を示す.

数値実験の結果より、本収差解析手法は発散せずに安定 して収差を推定できることが確認できた. 乱数のシードを 変更しても、推定した収差係数は 0.02 [λ] 以内に収まって おり発散していないので、本手法により安定して収差係数 を推定できることが確認できた.

4. 数値シミュレーションによる提案手法の適用限界 の検討

4.1 解析条件

本数値実験におけるレーザーの波長は 650 [nm], 光学 系の物体側開口数, すなわちレーザーの集光レンズの開口 数は 0.36, 像側開口数は 0.09 とする. 撮像素子のセルサイ ズを s [µm]×0.858 s [µm], リサンプリング時の画素サイ ズを s [µm]×s [µm] とし, s を 0.74, 1.48, 2.22, 2.96, 7.4, 14.8, 22.2, 29.6, 74 [µm] と変化させることで画像 の解像度を変更しながら数値実験を行う. 入射光に位相変 調を与えるためのコリメーターレンズの測定基準位置から の移動量 *d* は, 著者らの経験に基づき 12.5 [µm] から 22.5



Fig. 5 The maximum error of the Zernike coefficients. (a) The amplitude coefficients, (b) the wavefront aberration coefficients.

[μ m]まで2[μ m]ずつ, -12.5[μ m]から-22.5[μ m]まで 2[μ m]ずつ変化させ,計12枚の画像を撮影して解析を行 う.また、ツェルニケ多項式は振幅成分αで低次の9項、 位相成分 β で0次を除く低次の8項を用いる(M=N=8).以上の条件のもと、前章と同様なツェルニケ係数を与 えて13×13 画素の画像を計算し、これに適当なランダム ノイズを与え、整数値に丸め込み模擬測定画像とする.こ のとき与えるランダムノイズは、前章と同様とする.ま た、リサンプリング時の中心のシフト量はないものとする ((δ_x, δ_y) = (0,0)).

以上の手順により作成された模擬測定画像を用いて収差 逆解析を行う.非線形最小二乗問題の解法にはLevenberg-Marquardt 法を用いる.また,Jacobi 行列の計算を効率化 するために Broyden の更新式を用いる.

4.2 解析結果

Fig. 6 に画素サイズs に対する収差係数の二乗平均誤差の変化を示す.

数値実験の結果より,画素サイズ10[µm]を超えると急 激に誤差が増大していることが確認できる.スポット像の



Fig. 6 The change of the root mean square of the aberration coefficients with respect to the cell size.

大きさが λ/a で正規化できることを考慮すると, sa/λ を 適用限界の指標と考えることができ,これが1.38を超える と誤差が急激に増大することがわかる.

5. デフォーカス収差測定実験

Fig. 1 におけるコリメーターレンズの測定基準位置を変 化させることにより,既知のデフォーカス収差 z₃を与える. 本収差解析手法により測定される収差と比較を行い,本手 法の有効性を検証する.

5.1 実験条件

本実験では低倍率顕微鏡用カメラモジュールを用いて実 験を行う、使用するレーザーの波長は650 nm、顕微鏡の 物体側開口数、すなわちレーザーの集光レンズの開口数は 0.36であり、像側開口数は0.09である。撮像素子は8 bitの CCD である。そのセルサイズは 7.40 [μm]×6.35 [μm] で あり、これを画素サイズ7.40 [µm]×7.40 [µm]にリサンプ リングした画像が得られる。解析に用いるツェルニケ多項 式は振幅成分αで低次の9項、位相成分βで0次を除く 低次の8項を用いる(M=N=8).入射光に位相変調を与 えるためのコリメーターレンズの測定基準位置からの移動 量 d は, 著者らの経験に基づき 15 [µm] から 20 [µm] まで ずつ変化させ、計22枚の画像を撮影して解析を行う。撮 影した画像から13×13画素を切り出し収差逆解析を行う. 非線形最小二乗問題の解法には Levenberg-Marquardt 法を 用いる. また, Jacobi 行列の計算を効率化するために Broyden の更新式を用いる.

以上の実験をコリメーターレンズの測定基準位置を変化 させながら行い,理論的な収差変化と本手法により計測さ れる収差変化を比較する.コリメーターレンズの測定基準 位置の変化量 Δd₀とデフォーカス収差の変化量 Δβ₃の関係 は,式(2)の位相成分とデフォーカス収差を表すツェル



Fig. 7 The spot images at $d = 20.0 \ [\mu m]$, $\Delta d_0 = -2.5 \ [\mu m]$. (a) The observed spot image, (b) the fitted spot image.



Fig. 8 The residual of the non-linear least square problem in the defocus aberration measurement.

ニケ基底関数 Z₃ との内積を計算することで得られる.

$$\Delta\beta_{3} = \left[\frac{2\{-1+(1-a'^{2})^{\frac{3}{2}}\}}{a'^{2}} + \frac{4\{2+(3a'^{4}-a'^{2}-2)(1-a'^{2})^{\frac{1}{2}}\}}{a'^{4}}\right]\Delta d_{0} \qquad (12)$$

コリメーターレンズの測定基準位置は-2.5 [μm] から 2.5 [μm] まで 0.5 [μm] ずつ変化させて実験を行う.

5.2 実験結果

2

撮影した画像の一例 ($d = 20.0 [\mu m]$, $\Delta d_0 = -2.5 [\mu m]$) および,これに対応する計算画像を Fig. 7 に示す. Fig. 8 にコリメーターレンズの基準位置の変化に対する残差の変 化を示す.実験結果を Fig. 9 に示す. Fig. 9 はコリメー ターレンズの基準位置の変化に対するデフォーカス収差の 変化を表している.グラフ上にプロットした点は推定値を 表し,曲線は理論値を表している.

Fig. 8 より,提案した撮像素子によるサンプリングモデ ルを導入することによって残差が減少していることが確認 できる.Fig. 9 より,本収差解析手法によりデフォーカス 収差が精度よく推定されていることが確認できる.



Fig. 9 The estimated and the theoretical change of the defocus aberration coefficients β_3 given by the reference position displacement of the collimator.

6. ガラス板の傾きによって発生する収差の測定実験

本実験では、結像レンズと撮像素子との間にガラス板を 挿入し、この傾きを変化させることによって既知の収差を 発生させる。本収差解析手法により測定される収差と比較 を行い、本手法の有効性を検証する。

6.1 実験条件

本実験では低倍率顕微鏡用カメラモジュールを用いて実 験を行う.使用するレーザーの波長は650 nm,顕微鏡の 物体側開口数、すなわちレーザーの集光レンズの開口数は 0.36であり、像側開口数は0.09である。結像レンズと撮像 素子との間に厚さ $\tau = 1$ [mm], 屈折率n = 1.51509のガラ ス板を挿入する. 撮像素子は8 bit の CCD である. そのセ ルサイズは 7.40 $[\mu m] \times 6.35 [\mu m]$ であり, これを 7.40 $[\mu m] \times 7.40 [\mu m] にリサンプリングした画像が得られる.$ 解析に用いるツェルニケ多項式は振幅成分 α で低次の9 項,位相成分 β で 0 次を除く低次の 8 項を用いる (M= N=8). 入射光に位相変調を与えるためのコリメーター レンズの測定基準位置からの移動量*d*は、著者らの経験に 基づき 12.5 $[\mu m]$ から 22.5 $[\mu m]$ まで 2 $[\mu m]$ ずつ, -12.5 [µm]から-22.5 [µm]まで2 [µm]ずつ変化させ,計12枚 の画像を撮影して解析を行う. 撮影した画像から 13×13 画素を切り出し収差逆解析を行う. 非線形最小二乗問題の 解法には Levenberg-Marquardt 法を用いる. また, Jacobi 行列の計算を効率化するために Broyden の更新式を用 いる.

以上の実験をガラス板の傾きを変化させながら行い,理 論的な収差変化と本手法により計測される収差変化を比較 する. x-y平面上でy軸を ϕ だけ回転させた軸周りに,ガラ ス板を θ だけ傾けた際に発生する理論的な収差 β_i は次式 である¹⁵⁾.



Fig. 10 The spot images at $d = 22.5 \ [\mu m]$, $\theta_y = 0.577 \ [rad]$. (a) The observed spot image, (b) the fitted spot image.



Fig. 11 The residual of the non-linear least square problem in the measurement of the aberration generated by the glass tilt.

$$\beta_3(\theta,\phi) = a^2 \frac{\tau}{\lambda} \frac{n^2 - 1}{8n^3} \theta^2 \tag{13}$$

$$\beta_4(\theta,\phi) = a^2 \frac{\tau}{\lambda} \frac{n^2 - 1}{4n^3} \theta^2 \cos 2\phi \qquad (14)$$

$$\beta_5(\theta,\phi) = a^2 \frac{\tau}{\lambda} \frac{n^2 - 1}{4n^3} \theta^2 \sin 2\phi \qquad (15)$$

$$\beta_6(\theta,\phi) = a^3 \frac{\tau}{\lambda} \frac{n^2 - 1}{6n^3} \theta \cos\phi \qquad (16)$$

$$\beta_7(\theta,\phi) = a^3 \frac{\tau}{\lambda} \frac{n^2 - 1}{6n^3} \theta \sin\phi \qquad (17)$$

$$\beta_8(\theta,\phi) = \text{const} \tag{18}$$

ガラス板の傾きは *x* 軸周りに 0.0175 [rad] 傾け, *y* 軸周り に-0.577 [rad] から 0.577 [rad] までの範囲で適当な角度に 傾けて実験を行う.

6.2 実験結果

撮影した画像の一例 ($d = 22.5 [\mu m]$, $\theta_y = 0.577 [rad]$) および,これに対応する計算画像を Fig. 10 に示す. Fig. 11 にガラス板傾角 θ_y に対する残差の変化を示す.実験結 果を Fig. 12 から Fig. 15 に示す. Fig. 12 は y 軸周りのガラ ス板傾角 θ_y に対するデフォーカス収差係数 β_3 の変化を, Fig. 13 は y 軸周りのガラス板傾角 θ_y に対する非点収差係数



Fig. 12 The estimated and the theoretical defocus aberration coefficients β_3 given by the glass tilt.



Fig. 13 The estimated and the theoretical astigmatism aberration coefficients β_4 , β_5 given by the glass tilt.



Fig. 14 The estimated and the theoretical comatic aberration coefficients β_6 , β_7 given by the glass tilt.

 β_4 , β_5 の変化を, Fig. 14 は y 軸周りのガラス板傾角 θ_y に対 するコマ収差係数 β_6 , β_7 の変化を, Fig. 15 は y 軸周りのガ ラス板傾角 θ_y に対する球面収差係数 β_8 の変化を表してい る. グラフ上にプロットした点は推定値を表し,曲線は理 論値を表している.

Fig. 11 より,提案した撮像素子によるサンプリングモ デルを導入することによって残差が減少していることが確 認できる. Fig. 12 から Fig. 15 より,本収差解析手法によ りガラス板によって発生する収差を精度よく推定できてい ることが確認できる.



Fig. 15 The estimated and the theoretical spherical aberration coefficients β_8 given by the glass tilt.

7. 結 言

本研究では、カメラモジュールで直接撮影された解像度 の低いスポット像から波面収差を逆解析する手法を開発し た。本手法では、瞳関数の振幅と瞳関数の位相成分である 波面収差をそれぞれ低次のツェルニケ多項式で展開した. 本手法における波面収差解析問題を、これらの展開係数を 仮定して計算されるスポット像と計測画像との残差を最小 化する非線形最小二乗問題に帰着した。カメラモジュール で撮影されたスポット像の計算において撮像素子の特性を 考慮した2つのモデルを導入した。1つ目は、撮像素子の 受光窓の特性を考慮した窓関数により計算されたスポット 像を畳み込むモデルである。2つ目は、サンプリングされ た強度分布を所望のサンプリング間隔にリサンプリングす るモデルである.また,撮像素子のサンプリングにおける ナイキスト周波数により低周波帯域に重畳されたスポット 像の周波数成分を分離するために、さまざまな位相変調を 与えた入力光より得られるスポット像を用いる手法を提案 した. 本手法の有効性を検証するために, 数値実験および 実際の光学系における実験を実施した.数値シミュレー ションでは、本収差逆解析の安定性および適用限界の検討 を行った、実際の光学系における実験では、デフォーカス 収差の測定実験およびガラス板の傾きによって発生する収 差の測定実験を実施し、本収差解析手法の精度について検 討を行った.

現状では位相変調を与えるためのコリメーターレンズの 変位は経験的に定めているが、今後、コリメーターレンズ の変位の最適化,あるいはこれ以外の位相変調の与え方に ついて検討することで、本手法の高精度化が期待できる. また撮像素子のモデルについても、受光窓の特性を考慮し た窓関数の設定や、リサンプリングにおける電気的な信号 処理などの影響を考慮するなど、より実際の現象を考慮し たモデル化をすることで手法の高精度化が期待できる.以 上の検討の後、本手法はアセンブル後のカメラモジュール の品質保証や、組み立て時の不整合の定量的な把握に基づ くフィードバックなどに応用できると考えられる.

文 献

- M. Estribeau and P. Magnan: "Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted-edge methodology," Proc. SPIE, 5251 (2004) 243–252.
- H. Gross, H. Zügge and M. Peschka: Aberration Theory and Correction of Optical Systems, Handbook of Optical Systems, Vol. 3 (Wiley-VCH, Weinheim, 2007).
- 3) 渋谷眞人, 大木裕史:光学ライブラリー1, 回折と結像の光学 (朝倉書店, 2005).
- 4) 高田元弘: "干渉計によるレーザ光の波面収差測定", 光アラ イアンス, 12, No. 2 (2001) 19-22.
- W. H. Southwell: "Wavefront estimation from wavefront slope measurements," J. Opt. Soc. Am, 70 (1980) 998–1006.
- P. Dirksen, J. Brast, A. J. E. M Janssen and C. Juffermans: "Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach," J. Microlith. Microfabr. Microsyst., 2 (2003) 61–68.
- Y. Tanaka and M. Yoshikawa: "Novel measuring technique of optical performance of objective lenses for optical disk systems," Appl. Opt., 31 (1992) 5305–5311.
- 8) 田中康弘: "スポット像の強度分布によるレーザー光学系の 収差評価",光学,22 (1993) 456-461.
- 9) M. Ueshima, K. Amaya and K. Kataoka: "Development of practical performance aberration retrieval method from spot intensity images using inverse analysis," Opt. Rev., 16 (2009) 141–148.
- 10) 久保司郎:逆問題.計算力学とCAEシリーズ(培風館, 1992).
- 11) 岡田和佳,天谷賢治,大西有希: "スポット像からの収差解析 のための軸外結像を考慮した数理モデルの構築",第61回理 論応用力学講演会講演論文集(2012).
- 12) E. G. Williams: Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography (Springer, 2005).
- M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon Press, New York, 1974).
- 14) K. Madsen, H. B. Nielsen and O. Tingleff: *Methods for Nonlinear Least Squares Problems* (Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2004).
- 15) J. C. Wyant: *Applied Optics and Optical Engineering, Vol. 11* (Academic Press, New York, 1992).