

実用的なスポット像からの収差解析手法の開発と精度向上

DEVELOPMENT OF PRACTICAL ABERRATION RETRIEVAL METHOD USING SPOT IMAGES AND ACCURACY IMPROVEMENT

上島 正史¹⁾, 天谷 賢治²⁾, 片岡 康生³⁾

Masashi UESHIMA, Kenji AMAYA, Kosei KATAOKA

- 1) 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)
2) 東京工業大学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)
3) 株式会社カツラ・オプト・システムズ (〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺 1-1-1)

The "practically applicable" spot images based aberration retrieval method was developed. The method was systemized with the following techniques. 1) The real part and imaginary part of the spatial spectrum of the focal plane were expanded with the finite lower Zernike polynomials, respectively. And the present method was reduced to the nonlinear least square problem which calculates these coefficients. The present method would identify both the aberration and the intensity distribution of the spatial spectrum. 2) The intensity distributions of spot images were calculated by using the Nijboer-Zernike polynomials in order to avoid the long calculation time and the numerical errors caused by Fourier transform or convolution. 3) The two noise reduction methods were applied to the present method. Some numerical and practical experiments were performed to demonstrate the effectiveness of the present method. Plus, the measurement conditions which reduce the identification error were obtained.

Key Words: Aberration Retrieval, Nijboer-Zernike Polynomial, Noise Reduction, Inverse Problem, Optimization

1. 緒言

顕微鏡用対物レンズ, 半導体製造用露光装置, 光ピックアップなどの結像光学系の製造において, その品質検査として収差を評価することは必須である. 特に近年の光ピックアップは構成の複雑さが増してきているため, 生産ライン上で収差解析を高精度かつ効率的に行いたいという要望が高まっている.

干渉計を用いた収差解析手法は現在最も信頼されている¹⁾. しかし干渉計は高価であり, 測定は非効率である.

一方で, 結像光学系のスポット像の強度分布は通常の顕微鏡で簡便に測定できる. もしスポット像からの収差解析が可能であれば, 低価格かつ高効率な光ピックアップの品質評価が可能となる. これまでに, スポット像からの収差解析手法は数多く提案されてきた²⁻⁷⁾. しかし, 既存の手法は様々な問題点を含んでいる. それらの問題点は主に三点にまとめられる.

一点目は多くの手法は空間スペクトル(≒瞳関数)の強度分布を既知量であると仮定し, 収差のみを同定する問題と

してきた点である. 実際の光ピックアップに用いられているレーザ光源の強度分布は大きな変化のある分布をしている. そして, その形状は個々の光ピックアップにおいてばらつきがある. それ故に, これらの評価を行う場合は上記の仮定が同定精度と安定性の劣化を招く.

二点目は収束計算時にフーリエ変換や畳み込み積分を行っているために計算時間が長く, 計算精度が悪いという点である. スポット像からの収差解析手法では収束計算中に仮定した空間スペクトルや収差からスポット像の強度分布を数値シミュレーションする必要がある. しかし, これまでの手法ではこの計算にフーリエ変換や畳み込み積分を用いている. その為, 解析に時間がかかる. また, 高速フーリエ変換を用いる場合, 円形の空間スペクトルを直交に離散化する必要がある. その為, 角度方向の計算精度の劣化を招き, 収差, 特に円形の収差である球面収差の同定精度が著しく劣化してしまう.

三点目は撮像素子によって発生する各種ノイズに対するロバスト性が低いという点である. 収差は高次成分であるほどスポット像の強度が微弱な領域への感度が高くなる. しかし

CCDで測定した画像にはブルーミングや量子化誤差、バックグラウンドレベルのオフセットなどの様々なノイズが含まれる。これらのノイズの影響で、収差の同定精度と安定性は低下する。この問題点はこれまでに広く認識されてきた事実であるが、この問題点の解決に取り組んだ研究例は存在しない。

本研究では、これらの三点の問題点を克服した新しいスポット像からの収差解析手法を開発する。開発する手法は以下のようにまとめられる。1) フォーカス面の空間スペクトルの実部と虚部をそれぞれ低次の有限個のZernike級数で展開する。そして本手法はそれらの展開係数を求める非線形最小二乗問題とする。これにより、本手法は収差と空間スペクトルの強度分布を同時に求めることになる。2) スポット像の強度分布はNijboer-Zernike級数を用いて計算する。これにより、収束計算中にフーリエ変換や畳み込み積分を行われないことになる。3) 以下の二個の撮像素子ノイズ低減手法を適用する。A) 測定画像にローパスフィルタを用いたノイズ除去を適用する。そのカットオフ周波数は光学系の開口数から決定する。B) 測定画像のモデルにバックグラウンドレベルのオフセットを考慮する。そしてバックグラウンドレベルも本手法の未知量とする。さらに、本手法の性能を向上させるために、4) 推定誤差を最小化する計測条件の最適化を行う。

本論文では、始めに本手法について説明する。次に、本手法による数値検証結果、ならびに実際のDVDピックアップを解析した結果を示す。最後に計測条件の最適化を行った結果を示す。

2. スポット像からの収差解析手法

2.1. Nijboer-Zernike理論によるスポット像のモデル化

フォーカス面における複素振幅分布⁸を g 、それに対する任意のデフォーカス面の複素振幅分布を f_i と表すものとする。 i はデフォーカス面に対する添え字とする。波面収差を ϕ とする。これらの中で成立する関係式は以下ようになる。

$$g^*(u, \psi) = |g^*(u, \psi)| \cdot \exp(i2\pi\phi(u, \psi)) \quad (1)$$

$$f_i^*(u, \psi) = h_i(u) \cdot g^*(u, \psi) \quad (2)$$

ここで、 g^* 、 f_i^* はそれぞれ g 、 f_i の空間スペクトルとする。また、 (u, ψ) は空間周波数の極座標系とし、 u は空間周波数の次元を最大空間周波数(= $\frac{NA}{\lambda}$, NAは開口数, λ は波長)で正規化した無次元量とする。式(2)の光伝播を表す式は厳密にHelmholtz方程式を満足する角度スペクトル伝播モデルである。 $h_i(u)$ は次式で与えられる。

$$h_i(u) = \exp(i2\pi \frac{D_i}{\lambda} \sqrt{1 - (NAu)^2}) \quad (3)$$

ここで、 D_i は f_i のデフォーカス距離を表す。

フォーカス面の空間スペクトル分布 g^* はZernike級数⁸を用いて次式のように展開できる。

$$g^*(u, \psi) = \sum_{m,n} (i\alpha^{m,n} + \beta^{m,n}) R^{m,n}(u, \psi) \quad (4)$$

ここで、Zernike級数は次式の変数分離形で与えられる。

$$R^{m,n}(u, \psi) = U^{m,n}(u) V^m(\psi) \quad (5)$$

$U^{m,n}$ は半径方向項、 V^m が角度方向項、 m 、 n はそれぞれ角度方向、半径方向への次元に相当する値である。なお、Zernike多項式は各基底が互いに直交しており、単位円内において完全系を成すという性質を持つ。そのため円形である空間スペクトル分布 g^* の表現に適している。

式(2)(4)より、次式が得られる。

$$f_i^*(u, \psi) = \sum_{m,n} (i\alpha^{m,n} + \beta^{m,n}) h_i(u) R^{m,n}(u, \psi) \quad (6)$$

f_i^* のFourier変換である f_i はNijboerにより次式で表されることが示されている⁸。

$$f_i(r, \theta) = \sum_{m,n} (i\alpha^{m,n} + \beta^{m,n}) A_i^{m,n}(r, \theta) \quad (7)$$

$$A_i^{m,n}(r, \theta) = \int_0^1 2\pi i^m J_m(2\pi \frac{NA}{\lambda} ur) h(u) U^{m,n}(u) V^m(\theta) u du \quad (8)$$

$\alpha^{m,n}$ と $\beta^{m,n}$ 低次の係数を並べたベクトルを $\{K\}$ 、それに対応する $iA_i^{m,n}(r, \theta)$ 、 $A_i^{m,n}(r, \theta)$ を並べて離散表現したものを $\{A_i\}$ とすれば、式(7)の離散表現は次式で表すことができる。

$$\{f_i\} = \{A_i\} \{K\} \quad (9)$$

ここで、分布 v を離散化して並べたベクトルを $\{v\}$ とする。

一方、 f_i とデフォーカス面におけるスポット像 I_i との関係は次式で表される。

$$I_i(r, \theta) = |f_i(r, \theta)|^2 \quad (10)$$

ここで、 (r, θ) は空間の極座標系である。従って、スポット像の離散分布 $\{I_i\}$ と $\{f_i\}$ との関係は次式となる。

$$I_i^M = |f_i^M|^2 \quad (11)$$

ここで、 I_i^M, f_i^M はそれぞれ $\{I_i\}, \{f_i\}$ のM番目成分とする。

2.2. スポット像からの収差解析手法

本研究におけるスポット像からの収差解析手法では、CCDなどで撮影したスポット像 $\{\bar{I}_i\}$ とNijboer-Zernike係数 $\{K\}$ から式(9)(11)を用いて計算されるスポット像 $\{I(K)\}$ との差分残差を計算し、それを最小化する $\{K\}$ を同定する。残差関数 $\mathfrak{R}(K)$ は次式で与えられる。

$$\mathfrak{R}(K) = \sum_i \left\| [W_i] (\{I_i(K)\} - \{\bar{I}_i\}) \right\|^2 \rightarrow \min \quad (12)$$

ここで、 $\|\{v\}\|^2$ は $\{v\}$ の二乗ノルムを表すものとする。また、 $[W_i]$ は分布に対する重み行列である。上式をBFGS法¹⁰等の非線形最適化手法を用いて最小化することにより $\{K\}$ を求める。

最後に、求めた $\{K\}$ 、すなわち $\alpha^{m,n}$ と $\beta^{m,n}$ より次式の関係式から波面収差 ϕ および、波面収差係数 z^k を求める。

$$\phi(u, \psi) = \text{Arg} \left(\sum_{m,n} (i\alpha^{m,n} + \beta^{m,n}) R^{m,n}(u, \psi) \right) \quad (13)$$

$$\sum_k z^k R^k(u, \psi) = \phi(u, \psi) \quad (14)$$

ここで、 k は m, n の組み合わせを適当な順番に並べた添え字とする。収差係数 z^k は FringeZernike 係数¹¹ として定められた順番に並べるのが一般的である。以下、本論文でも z^k は FringeZernike 係数の順番に並べられているものとする。

本手法の独創性の一つは収差関数 ϕ ではなく空間スペクトル \mathbf{g}^* を直接識別するという点である。その為、本手法は空間スペクトルや瞳関数の強度分布が一様では無い場合においても適用可能である。二点目は、Zernike 多項式に高速 Fourier 変換 (FFT) を適用する一般的な従来のアプローチの代わりに Nijboer-Zernike 多項式を解析的に使用している点である。これにより、従来の手法に対して効率と精度が大きく改善する。

2.3. 撮像素子ノイズ低減手法

2.3.1. 測定したスポット像へのローパスフィルタとカットオフ周波数の設定法

CCD などの撮像素子を用いてデジタル画像解析を行う場合、測定した画像には高周波な信号ノイズや階調誤差を多く含む。そのため、本研究では観測したスポット像にローパスフィルタ (LPF) を適用する。

スポット像に物理的に含まれる最大空間周波数は $\nu_{max} = 2\frac{NA}{\lambda}$ であり¹²、これより大きい周波数成分は測定ノイズと考えられる。そこで ν_{max} を LPF のカットオフ周波数とする。これにより、測定したスポット像の物理情報と高周波ノイズとを合理的に分離できる。例えば、像のピクセル数が 512×512 、1 ピクセルのスポット面での実寸が $15[\text{nm}]$ 、波長が $650[\text{nm}]$ 、NA が 0.6 とした場合、フィルタリングは半径 $30[\text{pixel}]$ 程度の円形領域内部のみを残す様にすればよく、大半の高周波成分を除去することができる。

実際に 8bit の CCD で撮影した DVD ピックアップのスポット像に対して本 LPF を適用した例を Fig.1(a) に示す。量子化誤差等の測定ノイズが効率的に除去されている。また、スポット像の強度ピーク付近における分布を Fig.1(b) に示す。LPF を施すことにより強度ピークの位置が明確に判別できる。

2.3.2. バックグラウンドレベルを未知数とした評価関数の改良

スポット像を CCD 等の撮像素子で撮影した場合、強度分布にバックグラウンドレベル (BG 値) のオフセットが乗ってしまう。通常このノイズの除去は、撮像素子に光を入射させずに撮像した空画像を測定画像から引くことにより行われる。しかし、空画像は時間的に一定なのに対し、オフセット量は安定していない。そこで、本手法におけるスポット像のモデルを BG 値を考慮したものとする。そして $\{K\}$ とともに BG 値もまた未知数とすることによりこの問題点を克服す

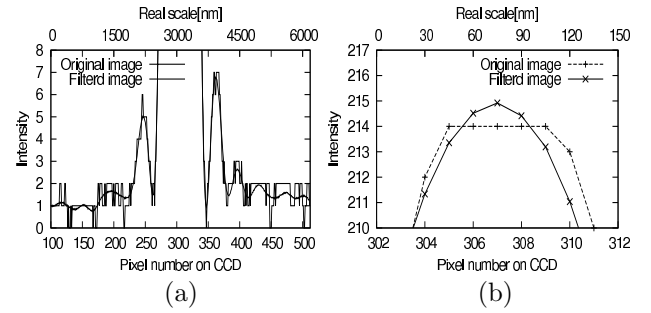


Fig. 1 The low-pass filtered DVD spot image captured with 8bit CCD

る。残差関数 $\mathfrak{R}(K)$ は以下の様に改良される。

$$\mathfrak{R}(K) = \sum_i \left\| [\mathbf{W}_i] (\{I_i(K)\} - \{\bar{I}_i\} - \{BG\}) \right\|^2 + p(BG) \rightarrow \min \quad (15)$$

ここで、 $\{BG\}$ は全ての成分が BG 値で構成されるベクトル、 $p(BG)$ は BG 値が適切な値域に入るようにするための制約項である。

これらの改良により、解の精度・安定性は十分高まるが、もし安定性が不足していると思われる場合は、Tikhonov の手法¹³ を用いて $\mathfrak{R}(K)$ に $w \|\{K\}\|^2$ (w は重み値) という制約項を加えることも有効である。

3. 数値実験

3.1. 数値解析例と手法の改良点の評価

数値実験により本手法の有効性、ならびに本手法の改良点の有効性の検証を行う。解析対象は実際の DVD ピックアップと同様に、 $NA=0.6$ 、 $\lambda=650[\text{nm}]$ とする。正解のスポット像の空間スペクトル \mathbf{g}^* の強度分布 \mathbf{P} は一様とし、波面収差として収差係数のうち五次収差までのもの ($z_1 \sim z_{15}$) に値を与えた。これらの量より仮想的に撮影したスポット像を作成する。像の作成の際には CCD で 256 階調に量子化されることを想定し、以下の手順で測定ノイズを与える。始めに ± 0.5 階調の範囲でのランダムノイズを与える。次に $+0.2$ 階調分の BG 値のオフセットを与える。最後に像を 256 階調に丸める。用いるスポット像はデフォーカス距離 $D_1=-1300[\text{nm}]$ と $D_2=600[\text{nm}]$ の二枚とし、同じ感度、露光時間 (等スケール) で撮影したものとする。解析領域は一次リングをおおよそカバーできる $2400[\text{nm}] \times 2400[\text{nm}]$ の領域とし、これを 41×41 点に離散化する。また、本手法の重み行列 $[\mathbf{W}_i]$ の M 行 N 列成分 W_i^{MN} は著者らの経験に基づき以下のように設定する。

$$W_i^{MN} = \begin{cases} (\bar{I}_i^M)^{-0.5} & (M = N) \\ 0 & (M \neq N) \end{cases} \quad (16)$$

本手法の未知量は $\alpha^{m,n}$ の低次の 15 項、 $\beta^{m,n}$ の低次の 16 項とする。2.3 節の改良点の効果を確認するために、以下の 4 つのケースで解析を実行する。

- CaseA: BG 値は未知数とせず。LPF を適用せず。

- CaseB: BG 値は未知数とせず. LPF を適用.
- CaseC: BG 値は未知数. LPF を適用せず.
- CaseD: BG 値は未知数. LPF を適用.

収差係数 z^k と正解と各ケースの解析結果を Fig.2(a) に、正解との誤差量を Fig.2(b) の右に示す. 両者は良く合致した. 二点の改良点を両方適用した caseD が最も精度が良く、全部の収差係数の誤差が $0.54[m\lambda]$ 以下に抑えられている. これは実用上十分な精度である.

3.2. 空間スペクトルの強度分布が非一様な場合の解析例

前節では \mathbf{P} が一様と仮定した. 本節ではこれが非一様と仮定して本手法を適用する. 解析条件は前節と同様とする.

仮定した強度分布を Fig.3 に示す. ただし図中において, $\xi = u \cdot \cos(\psi)$, $\eta = u \cdot \sin(\psi)$ とする. 収差係数 z^k の正解と本手法での解析結果を Fig.4(a) に、解析の誤差量を Fig.4(b) に示す. \mathbf{P} が非一様な場合でも十分な精度で解析することが可能であることが確認された.

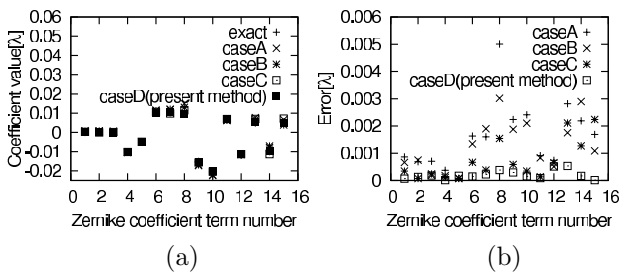


Fig. 2 Result of numerical experiment (Intensity distribution of spectrum is constant)

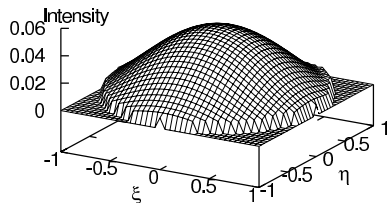


Fig. 3 Power spectrum

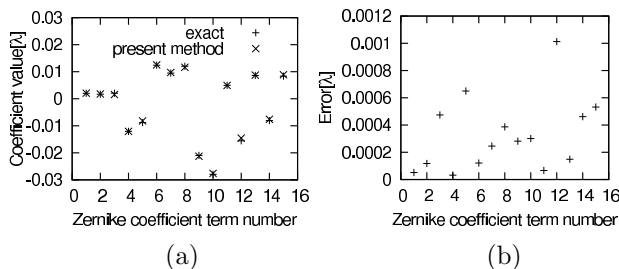


Fig. 4 Result of numerical experiment (Intensity distribution of spectrum is variable slope)

4. 本手法による解析例

4.1. 実験条件

実験装置の模式図をおよび写真を Fig.5 に示す. 装置は光学倍率 500 倍の顕微鏡光学系となっている. 対物レンズは

ピエゾ素子 (分解能 $10[nm]$) に取り付けられており, これの電圧を制御することで任意のデフォーカス面のスポット像を観測できる. 撮像素子は CCD であり, スポット像は 256 階調で撮影される. また, 対物レンズと測定対象の光ピックアップの間には DVD のディスクの設計値と同じである厚み $600[\mu m]$, 屈折率 1.52 のガラス板 (BK7) が挿入されている. 測定対象は $NA=0.55$, $\lambda=650[nm]$ の DVD ピックアップである. 撮影したスポット像はデフォーカス距離 $D_1=-1300[nm]$ と $D_2=600[nm]$ の二枚である. これらは全て同じ露光時間で撮影し, 2.3.1 節の LPF を施した. 解析領域はスポット像の一次リングをカバーする約 $2400[nm] \times 2400[nm]$ の領域である. 解析領域は 41×41 点に離散化した. 観測したスポット像 $\{\bar{I}_i\}$ を Fig.7 に示す. 本手法の未知数は $\alpha^{m,n}$ の低次の 8 個, $\beta^{m,n}$ の低次の 8 個, BG 値の計 17 個とする. また, 本手法の重み行列 $[\mathbf{W}_i]$ の作成方法は 3 節と同様とする.

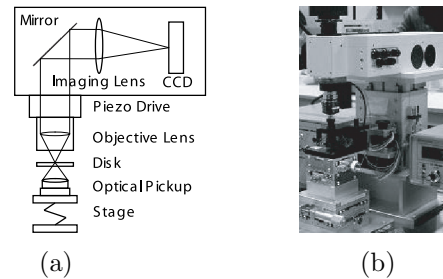


Fig. 5 Measuring system ((a)Image of the system (b)Photo of the system)

4.2. 実験結果

得られた収差係数 z^k を Fig.6(a) に、本計測を 10 回繰り返して得られた結果の標準偏差を Fig.6(b) に示す. 収差係数の同定結果の標準偏差は十分小さかった. 特に評価の指標として重要な z_4 以降の係数は標準偏差で $0.001[\lambda]$ のばらつき量であった. これは実用上十分な繰り返し精度である. また, 収束時の $\{I_i(K)\}$ の分布を Fig.8 に示す. 二枚のデフォーカス像のどちらも分布全体にわたりよく収束している. 得られた解より推測される空間スペクトル \mathbf{g}^* (強度分布 \mathbf{P} と波面収差 ϕ) を Fig.9 に示す. さらに, 本手法により推測された \mathbf{P} と実際の射出瞳の強度分布を実測したものととの比較を行った結果を Fig.10 に示す. 両者は良く合致していることが確認された. 測定時間は像の撮影に $0.2[sec]$, 演算に $0.3[sec]$ の計 $0.5[sec]$ と十分高速であった. 尚, 解析用の PC のスペックは, CPU が Pentium Core2Duo 2.6GHz, メインメモリが 2GB, となっている. また, 数値計算ライブラリに IntelMathKernelLibrary9.0 を, コンパイラには IntelC++Compiler9.0 を用いている.

5. 測定条件の最適化

本収差解析手法において, $\Re(K) < \epsilon$ を満たす領域を推定誤差を最小化する解空間とする. ϵ は測定誤差やモデル化誤差に起因する二乗残差である. 本節はこの解空間を最小化する測定条件を決定することを目的とする.

残差 $\Re(K)$ を最小化する正解値を $\{K_{ans}\}$ とする. $\Re(K)$

を $\{K_{ans}\}$ まわりで二次近似すると、解空間は超楕円体となる。 $\Re(K)$ の Hessian 行列¹⁰ を $\nabla\nabla^T\Re(K)$ とすると、 $\nabla\nabla^T\Re(K_{ans})$ の固有値の集合 $\mathbf{w}(K_{ans})$ の中での最小値 $w_{\min}(K_{ans})$ は解空間を表す超楕円体の最大主軸の長さを表す。そこで、 $w_{\min}(K_{ans})$ を解空間最小化のための指標とする。

5.1. デフォーカス距離の最適化

二枚のスポット像のデフォーカス距離 D_1, D_2 における $w_{\min}(K_{ans})$ を $w_{\min}(D_1, D_2; K_{ans})$ とする。本研究では、評価関数を $w_{\min}(D_1, D_2; K_{ans}) \rightarrow \max$, 設計変数をデフォーカス距離 D_1, D_2 とする非線形最適化問題を解くことにより、解空間を最小化するデフォーカス距離 D_1, D_2 を決定する。

5.2. 重み行列の最適化

重み行列 $[W_i]$ を以下の式で構成する。

$$W_i^{MN} = \begin{cases} (\bar{\mathbf{I}}_i^M)^\gamma & (M = N) \\ 0 & (M \neq N) \end{cases} \quad (17)$$

ここで、 γ を重み係数とする。ここで、 W_i^{MN} は $[W_i]$ の M 行 N 列の成分、 $\bar{\mathbf{I}}_i^M$ は $\{\bar{\mathbf{I}}_i\}$ の M 番目成分とする。

γ に対する $w_{\min}(K_{ans})$ を $w_{\min}(\gamma; K_{ans})$ とする。本研究では評価関数を $w_{\min}(\gamma; K_{ans}) \rightarrow \max$, 設計変数を γ とする非線形最適化問題を解くことにより、解空間を最小化する重み係数 γ を決定する。

5.3. 数値実験による有効性の検証

従来まで用いていた測定条件と最適化された測定条件の各々において収差解析の数値実験を行い、精度比較を行う。

解析対象は NA=0.6, $\lambda=650[\text{nm}]$ の DVD ピックアップを想定する。 $\{K\}$ は $\alpha^{m,n}$ の低次の 15 項、 $\beta^{m,n}$ の低次の 16 項で構成されるものとする。測定条件を最適化するにあたり、 $\{K_{ans}\}$ はスポット像が理想的な分布 (\mathbf{P} が一様、 ϕ が無収差) であることを表す係数とした。

最初にデフォーカス距離を最適化した。 $w_{\min}(D_1, D_2; K_{ans})$ の分布を Fig.11 に示す。 $w_{\min}(D_1, D_2; K_{ans})$ を最大化する D_1, D_2 の組み合わせが二点あることが確認できる。この二点は D_1 と D_2 の値を入れ替えた同一値である。最適化には大域収束性・局所収束性の両方に優れている BFGS 法を用いた。収束過程を Fig.11 に同時に示す。BFGS 法の初期値は $D_1^{\text{init}}=180[\text{nm}]$, $D_2^{\text{init}}=-180[\text{nm}]$ とした。6 回の反復計算の後、 $D_1=1850[\text{nm}]$, $D_2=-1850[\text{nm}]$ が得られた。

次に重み係数を最適化した。 $w_{\min}(\gamma; K_{ans})$ の分布を Fig.12 に示す。最大値が一つに定まることが確認できる。最適化には黄金分割法を用いた。その結果、 $\gamma=-0.05$ が得られた。

従来までの測定条件は $D_1=-1300[\text{nm}]$, $D_2=600[\text{nm}]$, $\gamma=-0.5$ である。これらの測定条件と仮定した正解の収差係数からスポット像を模擬的に作成し、各々に本収差解析手法を適用した。スポット像には 3 節と同様に測定ノイズを含ませる。

従来の測定条件で解析したときの収差係数の正解との誤差、および最適化された測定条件で解析したときの収差係数の正解との誤差を Fig.13 に示す。最適化された測定条件を用いることにより従来よりも精度が向上した。従って、本測定条件最適化手法の有効性が確認された。

6. 結言

実用的なスポット像からの収差解析手法を開発した。本手法は以下のまとめられる。1) 空間スペクトルの実部と虚部をそれぞれ低次の Zernike 級数で展開した。そして本手法をそれらの係数を求める非線形最小二乗問題へと帰着した。2) フーリエ変換や畳み込み積分による多大な計算時間と計算誤差を低減するため、スポット像を Nijboer-Zernike 級数を用いて計算した。3) 二種類の測定ノイズ低減手法を本手法に適用した。本手法が実用上十分な性能を持つことを数値実験により示した。実際の DVD ピックアップの収差解析を行い、その波面収差を 0.5[sec] で同定した。また、本手法は収差係数を $\pm 0.001[\lambda]$ の繰り返し精度で得られることを実証した。本手法の推定誤差を最小化する測定条件の最適化を行った。最適化された測定条件を用いることで収差解析精度が向上することを数値実験により示した。

参考文献

- (1) 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, **2**(2001), pp. 19–22.
- (2) R.W.Gerchberg and W.O.Saxton: A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures, *Optik*, **35**(1972), pp. 237–246.
- (3) J.R.Fienup: Phase retrieval algorithms: a comparison, *Applied Optik*, **21**(1982), pp. 2758–2769.
- (4) D.L.Misell: An examination of an iterative method for the solution of the phase problem in optics and electron optics: I. Test calculations, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **6**(1973), pp. 2200–2217.
- (5) J.R.Fienup: Phase-retrieval algorithms for a complicated optical system, *Applied Optik*, **32**(1993), pp. 1737–1746.
- (6) G.R.Brady and J.R.Fienup: Measurement of an Optical Surface using Phase Retrieval, 2006 Topical Meeting on Optical Fabrication and Testing, (2006).
- (7) P.Dirksen, J.Brast, A.Janssen, and C.Juffermans: Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach, *J.Microlith.,Microfab.,Microsyst*, **2**(2003), pp. 61–68.
- (8) Max.Born and Emil.Wolf, 草川, 横田 訳: 光学の原理 2, (1974), 東海大学出版会.
- (9) Earl G. Williams: フーリエ音響学, (1999), Springer-Verlag Tokyo.
- (10) 矢部博著, 八巻直一: 非線形計画法, (1999), 朝倉書店.
- (11) Chris A.Mack: Inside PROLTH: A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation, (1997), FINLE Technologies.
- (12) 渋谷真人, 大木裕史: 光学ライブラリー 1 回折と結像の光学, (2005), 朝倉書店.
- (13) 久保司郎: 計算力学と CAE シリーズ 10 逆問題, (1992), 培風館.

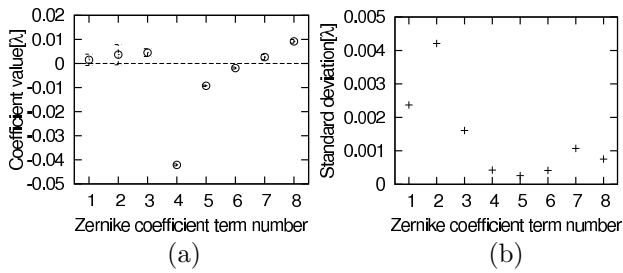


Fig. 6 Identified Zernike coefficients ((a):identified value (b):standard deviation of identified value)

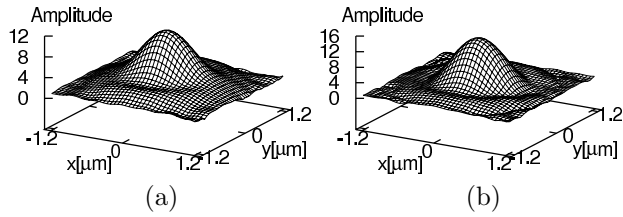


Fig. 7 Observed amplitude distribution on defocus plane ((a):-1300[nm] (b):600[nm])

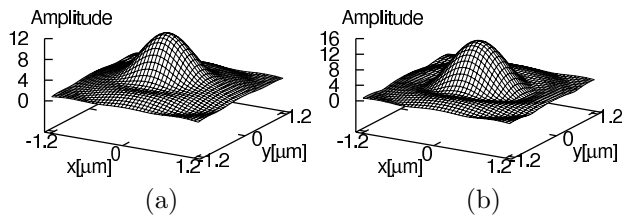


Fig. 8 Calculated amplitude distribution on defocus plane ((a):-1300[nm] (b):600[nm])

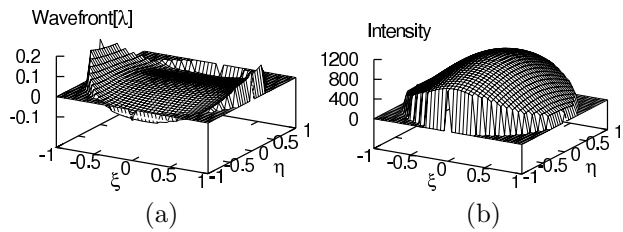


Fig. 9 Identified spectrum ((a):Wavefront (b):Intensity distribution)

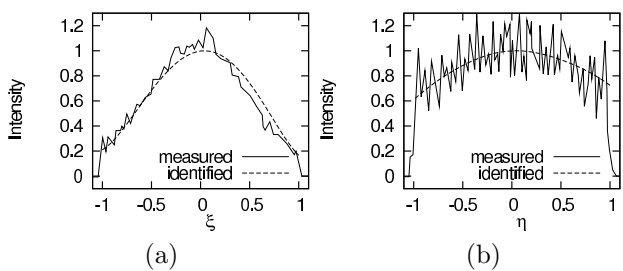


Fig. 10 Comparison between measured pupil intensity distribution and the one of identified spectrum ((a):cross-section X (b):cross-section Y)

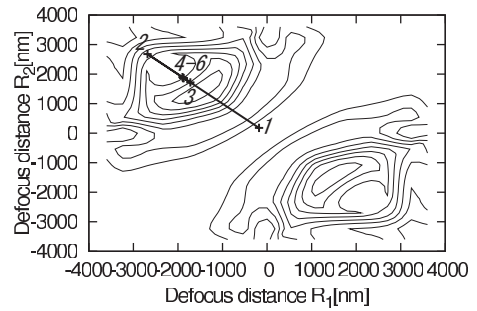


Fig. 11 Minimum eigen value of Hessian matrix for defocus distances

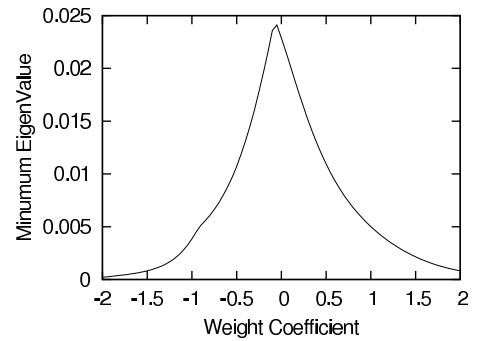


Fig. 12 Minimum eigen value of Hessian matrix for weight coefficient

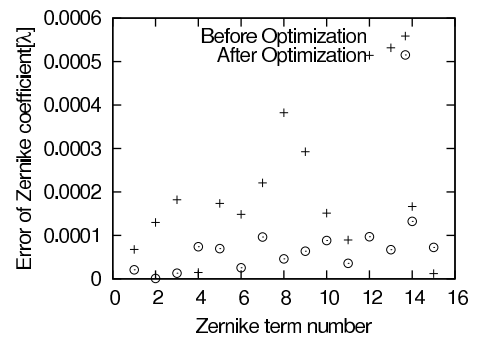


Fig. 13 Error of identified aberration coefficients using phantom spot images