実用的なスポット像からの波面収差解析手法の開発*

上島正史^{*1}, 天谷賢治^{*2}, 片岡康生^{*3}Development of the Practical Aberration Retrieval Method from
Spot Intensity ImagesMasashi UESHIMA, Kenji AMAYA^{*4} and Kosei KATAOKA^{**} 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 Japan

Aberration retrieval is an important technology for evaluation of quality of imaging optics. In this study, a practical system that identifies the aberration of imaging optics from spot intensity images has been developed. The complex amplitude distribution of spot on defocus plane is expanded to Nijboer-Zernike series and neglect higher order terms. Then the identification problem is reduced to the non-linear optimization problem whose design variables are Nijboer-Zernike coefficients. This problem is solved by the quasi Newton method. In addition, some accuracy improvement techniques have been applied to this method. These techniques are summarized as follows. (1) The captured spot intensity images are filtered with low-pass filter whose cutoff frequency is decided from the numerical aperture of imaging optics. (2) The background level is taking account for numerical model of intensity image, and background level is also identified during the optimization process. Some numerical experiments and practical ones were performed to demonstrate the effectiveness of the present method. In addition, four kinds of practical experiment based on theories were performed, and all of these experiment got high correlation between input parameter and measurement result and high consistency with theoretical forecast. These results proved that this aberration retrieval method have enough capability to be used practically.

Key Words: Aberration Retrieval, Optical Measurement, Spot Intensity Image, Nijboer-Zernike Polynomial, Inverse Problem, Laser, Numerical Analysis, Image Processing

1. 緒 言

1.1 研究背景と目的 顕微鏡用対物レンズや光ピックアップなどの回折限界の性能が要求される結像光学系の生産において、集光性能評価、すなわち収差解析を欠かすことはできない。特に近年の光ピックアップはその高性能化から構成の複雑さが増してきており、製品の調整と品質管理のために収差を高精度にモニタリングしたいという要望が高まっている。

収差解析手法は、スポット像を平行光分布(≡空間スペクトル)に変換してから波面収差(位相分布)を測定する手法と、スポット像から直接収差解析を行う手法の二種類に大別することができる。

前者の代表的な例として、干渉計により被測定光と参照光との相対的な位相分布を求める方法⁽¹⁾が挙げられる。この手法は従来から信頼されており、光学部品の品質管理の基準として広く用いられている。しかし干渉計は精密な光学機器で構成されているため、装置が高価である。また、装置の微調整を測定ごとに行う必要があり、非効率である。

一方、スポット像から収差解析を行う手法で用いる装置、顕微鏡と CCD などの撮像素子を組み合わせたものと簡便な構成となる。測定はこの装置を用いてスポット像を撮影するだけですみ。その為、干渉計より安価であり、効率的な測定が可能である。これまでに、スポット像からの収差解析手法は多く提案されてきた。しかし、それらを実用的に用いるには様々な問題を含んでいる。現在、光ピックアップの生産ライン上での収差評価手法として実用的に用いられている手法は田中らの開発した手法⁽²⁾のみである。この手法は三次収

* 原稿受付 2008 年 5 月 26 日。

^{*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} 正員、東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻。^{*3} (株)カツラ・オプト・システムズ(〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-1-1)。

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

差と相関のある指標を積分計算を算出するのみである。しかし近年の光ピックアップの生産においては五次収差成分の評価も不可欠である。

そこで本研究は、従来のスポット像からの波面収差解析研究を基礎として、光ピックアップの生産ライン上で実用的に用いることができるスポット像からの波面収差解析手法の開発を目的とする。

1.2 スポット像からの収差解析手法の従来研究とその問題点 スポット像からの収差解析手法は収束型と積分型の二種類に大別することができる。

収束型の代表的な手法としては R.W.Gerchberg らが提案した位相回復法⁽³⁾が挙げられる。これは光の物理的な Fourier 変換作用に注目し、波面収差を収束計算により同定する手法である。この他にも同様な研究例は多い⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、収差関数を Zernike 級数⁽⁶⁾で展開し、その係数を同定する問題とすることで、解析の安定性と精度向上を行った研究も J.R.Fienup をはじめとして多くなされている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

積分型の手法では先述の田中らの手法が挙げられる。最近の研究では P.Dirksen らがデフォーカス面における複素振幅分布を直接級数表現できる Nijboer-Zernike の基底関数⁽⁶⁾と測定したデフォーカス面のスポット像との内積を積分計算することで収差係数を同定する手法を開発している⁽⁹⁾。

スポット像からの波面収差手法を生産ライン上で実用的に用いる場合、以下に示す三つの問題点を全て克服している必要がある。

一点目は計算精度と計算時間の両立である。光ピックアップの生産においては $2[\text{m}\lambda]$ の精度での収差評価を $1[\text{sec}]$ 以内に行うことが望まれる。収束型の手法は Fourier 変換や畳み込み積分を収束計算中に多数回行う必要がある。これらの計算を精密に計算した場合、波面収差同定に多くの時間を要し、高速に解析することが困難となる。高速 Fourier 変換を用いて計算時間の短縮を図った場合、円形の空間スペクトルを直交に離散化して計算する必要がある。この影響により、角度方向の計算精度の劣化を招き、収差の同定精度、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する。積分型は収束型よりも高速に解析がすることが可能であるが精度を確保することが難しい。それは残りの二つの問題点を克服していないからである。

二点目は空間スペクトルの強度分布が任意の分布であっても波面収差を正しく同定できるかという点である。過去の研究の多くは空間スペクトルの強度分布は一様、もしくは既知という仮定を行い、波面収差のみを未知数としている。前述の R.W.Gerchberg

や J.R.Fienup, P.Dirksen らの手法もこの仮定を含む。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一様ではない。その分布も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、上記の仮定が同定精度の劣化を招く。また、純粋な顕微鏡ではスポット像と空間スペクトルの強度分布を同時に測定することは不可能であり、両者を同時に計測できる装置の開発はコストがかかる。

三点目は CCD 等の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の問題である。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様々なノイズが含まれている。スポット像には強度の強い領域と微弱な領域とが併存しているうえ、高次の収差成分になるほど強度が微弱な領域への感度が高くなる。そのため、スポット像からの収差解析手法は一般的にノイズに対するロバスト性が低い。この問題点は広く認識されてきた事実であるが、これらのノイズへの対策について論じた研究例は見受けられない。

このような背景により、上記の三点の問題点を全て克服した高性能な手法の開発が望まれている。

1.3 本研究で開発する手法 本研究では収束型の収差解析手法を基礎とし、光ピックアップの生産ライン上で実的に適用できる新しいスポット像からの波面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 Fourier 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。

1.4 本論文の構成 本論文ではまず本手法の概要について述べる。次に、本手法の数値実験による結果、ならびに実際の DVD ピックアップを解析した例を示す。最後に DVD ピックアップを用いた四種類の収差変化実験を行い、理論的予測と実験結果とを比較した結果を示す。

2. 収差解析手法の原理

2.1 問題設定 結像側のフォーカス面における複素振幅分布⁽⁶⁾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. また, 波面収差を ϕ とする. これらの間で成立する関係式は以下のよう示すことができる.

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

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

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する. 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⁽¹⁰⁾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.

ベクトル v の離散表現を $\{v\}$ とし, $\{v\}$ の絶対値の分布 (振幅分布) を $|\{v\}|$, 絶対値の二乗の分布 (強度分布) を $|\{v\}|^2$, と書くものとする. この時, CCD など撮影したデフォーカス面の離散強度分布を $|\{f_i\}|^2$ とすると, 次式の関係が得られる.

$$|\{f_i\}|^2 = |\{f_i\}|^2 \quad (4)$$

本問題では以上の関係式と観測量 $|\{f_i\}|^2$ よりフォーカス面の空間スペクトル g^* を同定する. これは, 波面収差 ϕ だけでなく空間スペクトルの強度分布も未知数と設定していることと同義である.

2.2 Nijboer-Zernike 理論によるデフォーカス面のモデル化 Zernike 級数⁽⁶⁾は次式の変数分離形で与えられる.

$$R_n^m(u, \psi) = U_n^m(u) V^m(\psi) \quad (5)$$

ここで, U_n^m 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.

フォーカス面の空間スペクトル分布 g^* は Zernike 級数を用いて次式で表せる.

$$g^*(u, \psi) = \sum_{n,m} (i\alpha_n^m + \beta_n^m) R_n^m(u, \psi) \quad (6)$$

上式と式 (2) より, 次式が得られる.

$$f_i^*(u, \psi) = \sum_{n,m} (i\alpha_n^m + \beta_n^m) h_i(u) R_n^m(u, \psi) \quad (7)$$

上式の Fourier 変換である f は Nijboer により次式で表されることが示されている.

$$f(r, \theta) = \sum_{n,m} (i\alpha_n^m + \beta_n^m) A_n^m(r, \theta) \quad (8)$$

$$A_n^m(r, \theta) = \int_0^1 2\pi i^m J_m(2\pi \frac{NA}{\lambda} ur) h(u) U_n^m(u) V^m(\theta) u du \quad (9)$$

α_n^m と β_n^m 低次の係数を並べたベクトルを $\{K\}$, それに対応する $iA_n^m(r, \theta)$, $A_n^m(r, \theta)$ を並べて離散表現したものを $[A]$ とすれば, 式 (8) の離散表現は次式で表せる.

$$\{f\} = [A]\{K\} \quad (10)$$

2.3 解析手法 観測方程式 (4) および式 (10) より, フォーカス面の空間スペクトル g^* を表す低次の係数を求める逆問題を無制約最適化問題として定式化する. すなわち, 設計変数を $\{K\}$ とし, 次式のような非線形の評価関数を設定する.

$$\sum_i \left\| [W_i] (|[A_i]\{K\}|^2 - |\{f_i\}|^2) \right\|^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

ここで, $\|\dots\|^2$ は二乗ノルムを表すものとする. また, $[W_i]$ は重み行列である. 上式を, BFGS 法⁽¹¹⁾等の非線形最適化手法を用いて評価関数の最小化を行うことで $\{K\}$ を求める. 最後に, 求めた $\{K\}$, すなわち α_n^m と β_n^m より次式の方程式を最小二乗法などを用いて解くことで波面収差係数 z_k を求める.

$$\sum_k z_k R_k(u, \psi) = \text{Arg} \left(\sum_{n,m} (i\alpha_n^m + \beta_n^m) R_n^m(u, \psi) \right) \quad (12)$$

ここで, k は n, m の組み合わせを適当な順番に並べた添え字とする. 収差計数 z_k は FringeZernike 係数⁽¹²⁾として定められた順番に並べるのが一般的である. z_k の m, n との対応例を表 1 に示す. 以下, 本論文でも z_k はこの順番に並べられているものとする.

本手法では式 (8) で表される Nijboer-Zernike の基底関数を用いている. これを離散化したマトリックス $[A_i]$ は収束計算を行う前に精度良く計算・作成することができる. 特に, θ 方向の積分は解析的に行われているため, θ 方向の精度劣化はほぼ皆無である.

また, スポット像の離散点数を n とした場合, 従来研究で高速 Fourier 変換を用いた場合の計算量は $O(n \log_2 n)$ となるのに対し, 本手法は $O(n)$ の計算量であるため, 収束計算中に Fourier 変換や畳み込み積分の演算を要する従来研究よりも高速な解析が可能となる. 実際の問題での n は 1600 ほどとなるので, 概算で 10 倍以上の計算の効率化がなされている.

評価関数を BFGS 法などで解く際には勾配の計算が必要となる。これは通常多くの計算量を要すが、評価関数を計算する際に途中の計算結果を保存することで計算量を減らせる。また、本手法は行列演算が多く、計算の並列化をできる部分が多いため、BLAS⁽¹³⁾や LAPACK⁽¹⁴⁾などの線形計算ライブラリを利用し、OpenMP⁽¹⁵⁾などで計算を積極的に並列化することで計算速度は格段に向上する。

過去のスポット像からの位相回復問題研究において、正しく位相分布を求めるにはフォーカス面を挟んだ二枚のデフォーカス面の強度分布を用いることが最低限必要であることが議論されている。本手法においてもそれは例外では無く、正しく収差解析を行うには正負二枚のデフォーカス面のスポット像を用いる必要がある。

Table 1 Correspondence of Fringe Zernike coefficient and parameter n, m

	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}
n	0	1	1	2	2	2	3	3	4	3	3
m	0	1	-1	0	2	-2	1	-1	0	3	-3

2.4 撮像素子の各種ノイズに対するロバスト性を向上させるための改良

2.4.1 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、測定画像に何かしらのフィルタリングを施すことが考えられるが、スポット像を撮影対象とした場合にはローパスフィルタが最も効果的である。

ローパスフィルタを用いる場合、適切なカットオフ周波数を設定する必要がある。ここで、スポット像に含まれる最大空間周波数は $\nu_{max} = 2 \frac{NA}{\lambda}$ であるので⁽¹⁶⁾、 ν_{max} をカットオフ周波数としてローパスフィルタを施すことにより、測定したスポット像の高周波ノイズとスポットの物理情報を合理的に分離し、ノイズを除去することができる。

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[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。

本ローパスフィルタの本手法に対する直接的な効果は主に二点ある。一点目は高次の波面収差成分同定の精度と安定性の向上である。図 1 は実際に 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

本ローパスフィルタを適用した例である。収差解析において実際に評価対象となるのは z_4 以降の収差成分であるが、これらの成分がスポット像に影響を与える領域は所謂一次リングの外側であり、図 1 上図の強度 7 以下の強度が微弱な領域となる。これらの領域の物理情報を抽出できる本ローパスフィルタは波面収差同定の精度と安定性の向上に大きく貢献する。

二点目はスポット像の強度ピーク位置、すなわち光軸中心同定の精度と安定性の向上である。本手法では距離の離れたスポット像を二枚以上用いる必要があるが、光軸中心の同定精度と安定性の向上は二面間の位置関係の安定性に繋がり、本手法の向上に繋がる。図 1 下図において、測定画像は強度ピーク付近が丸め誤差やブルーミングなどの CCD 特性によって平坦化されてしまっているが、本ローパスフィルタ適用後はピーク位置が明確であり、CCD 1 セルの分解能で判別できるようになる。

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

2.4.2 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 などの撮像素子で撮影した場合、強度分布にオフセットが乗り誤差の原因となる。この問題を克服するために、評価関数を次式の様にし、BG(バックグラウンドレベル) 値も未知数とする。これにより、BG 値を CCD 1 階調分以下の分解能で求めることができ、解の精度と安定性が大きく向上する。ここで、 $P(BG)$ は BG 値がある程度の範

囲に入るようにするためのペナルティ項である。

$$\sum_i \left\| [W_i] (|A_i| \{K\}^2 - |\bar{f}_i|^2 + BG) \right\|^2 + P(BG) \rightarrow \min \quad (13)$$

これらの改良により、解の精度・安定性は十分高まる。しかしもし安定性が不足していると思われる場合は、Tikhonov の手法⁽¹⁷⁾を用いて評価関数に $w||\{K\}|^2$ (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 ピックアップを想定し、 $\lambda=650[\text{nm}]$, $\text{NA}=0.6$ とする。正解のスポット像の空間スペクトルの強度分布は一樣とし、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。用いるデフォーカス面は $1300[\text{nm}]$ と $600[\text{nm}]$ 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。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 256 階調 (8bit) の CCD で撮影することを想定し、以下の手順でノイズを与える。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 $+0.2$ 階調分のバックグラウンドレベルのオフセットを与える。最後に像を 256 階調に丸める。また、本手法の重み行列 $[W_i]$ 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。ただし、 $|\bar{f}_i^M|^2$ は $|\bar{f}_i|^2$ の M 番目成分とする。

$$W_i^{MN} = \begin{cases} 1/\sqrt{|\bar{f}_i^M|^2} & (M=N) \\ 0 & (M \neq N) \end{cases} \quad (14)$$

本手法の未知量は α_n^m の低次の 15 項、 β_n^m の低次の 16 項する。2.4 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 値は未知数としない。ローパスフィルタを用いない。
- CaseB: BG 値は未知数としない。ローパスフィルタを用いる。
- CaseC: BG 値は未知数とする。ローパスフィルタを用いない。
- CaseD: BG 値は未知数とする。ローパスフィルタを用いる。

正解の収差係数と各ケースの解析結果を図 2 の左に、正解との誤差量を図 2 の右に示す。

二点の改良点を適用していない本手法を用いた caseA でもまずまずの結果が得られた。さらに、各改良点が精度の向上に効果的に機能していることが確認された。また、二点の改良点を両方適用した caseD では全部の収差係数の誤差が $0.54[\text{m}\lambda]$ 以下に抑えられている。

3.2 空間スペクトルの強度分布が大きく変化する場合の解析例 前節では空間スペクトルの強度分布が一樣であると仮定した。本節ではこれに大きな分布があるものを解析対象とした場合の本手法の有効性を検証する。空間スペクトルの強度分布以外の解析条件は前節と同様とする。

仮定した強度分布を図 3 に、正解の収差係数と本手法での解析結果を図 4 の左に、解析の誤差量を図 4 の右に示す。空間スペクトルの強度分布に変化がある場合でも十分な精度で解析でき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 実験装置の模式図および写真を図 5 に示す。光学系は倍率 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 $10[\text{nm}]$) に取り付けられており、こ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撮影できる。像は

CCDで256階調(8bit)で撮影することができる。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[μm]、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、波長650[nm]のDVDピックアップ用対物レンズである。撮影したスポット像のデフォーカス距離は-1300[nm]と、600[nm]である。これらは全て同じ露光時間で撮影し、2.4.1節のローパスフィルタを施している。デフォーカス距離の設定精度はピエゾの分解能と同値の10[nm]程と考えられる。解析領域は一次リングをカバーできる約2400[nm]×2400[nm]の領域とし、これを41×41点に離散化して切り出した。測定した強度分布の平方根分布(振幅分布)を図7に示す。本手法の未知数は α_n^m の低次の8個、虚部(β_n^m)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 $[W_i]$ の作成方法は第3節と同様とする。

Fig. 5 Measurement system

4.2 実験結果 得られた収差係数 z_k と本計測を10回繰り返して得られた結果の標準偏差を図6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[λ]のばらつきであり、. 実用上十分な繰り返し精度で解析できた。また、収束時の $||A||\{K\}$ の分布を図8に、得られた解より推測されるフォーカス面の空間周波数分布(強度分布 $|g^*|^2$ と波面収差 ϕ)を図9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。さらに、本手法により推測された空間スペクトルの強度分布と実際の射出瞳の強度分布を実測したものとの比較を行った。その結果を図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を用いており、IntelCore2Duoに最適コンパイルを行った。尚、行列 $[A]$ を二つ作成

するのに要した時間は2.0[sec]程であった。

4.3 スポット像の位置決め精度と測定精度に関する補足 本実験結果において、 z_1, z_2 は他の収差係数に比べて測定結果の標準偏差が大きい。スポット像の光軸中心は強度ピークのXY位置であるが、この位置の測定分解能が z_1, z_2 の標準偏差に現れていると考えられる。本実験における z_2 の標準偏差は0.0042[λ]である。これをフォーカス面上での位置ずれ量に換算すると、 $0.0042[\lambda] \cdot \frac{\lambda}{NA} = 4.96[\text{nm}]$ となる。さらに、実験装置の光学倍率が500倍なので、CCD上での位置ずれ量の標準偏差 σ_{xy} は2.48[μm]、そして $3\sigma_{xy}$ は7.45[μm]となる。この値はCCDの1セルの一边の大きさ7.40[μm]とほぼ同値である。この精度はローパスフィルタにより強度ピークの同定精度がCCD1セルの分解能で得られることに起因していると考えられる。

z_1, z_2 に次いで測定結果の標準偏差が大きいのは z_3 である。これは一般にデフォーカス項と呼ばれており、その同定精度はフォーカス面のZ方向の位置決め精度に起因している。本実験における z_3 の標準偏差は0.0016[λ]であり、これをZ方向の位置のずれ量の標準偏差 σ_z に換算すると、 $\sigma_z = 0.0016[\lambda] \cdot \frac{4\lambda}{NA^2} = 13.8[\text{nm}]$ となり、 $3\sigma_z = 41.4[\text{nm}]$ となる。これはピエゾの分解能である10[nm]より大きく、測定時の振動などの影響に起因していると考えられる。

一方で、上記のフォーカス面のスポット像のXYの位置ずれは理論的には z_1, z_2 のみにしか影響を与えない。また、Z方向の位置ずれも理論的には z_3 以外にはほとんど影響を与えない(この点に関する詳細は5.1節に示す)。そのため、 z_4 以降の収差成分はスポット像の位置決め誤差に対して安定な測定が可能である。また、レンズや光ピックアップの生産において評価される収差は非点収差、コマ収差、球面収差などの z_4 以降の係数であり、 $z_1 \sim z_3$ は注目されていない。以上のことから、本手法はスポット像の位置決めを多少粗くても十分な解析が行える手法であると見なせる。これは、スポット像の位置決めに大きな労力を要する干渉計に対する本手法の優位性の一つと言える。

5. 収差変化の理論予測との比較実験

理論に基づく収差感度実験を行い、その収差変化量の理論予測と実験結果の比較を行った。本節ではその結果を示す。注目する収差量は、デフォーカス項(z_3)と三次収差であるコマ収差(z_6, z_7)、球面収差(z_8)、非点収差(z_4, z_5)である。

実験の概念図を図11に示す。解析対象は $\lambda = 650[\text{nm}]$ 、NA=0.635のDVDピックアップを用いる。

Fig. 6 Identified Zernike coefficients(left:identified value, right:standard deviation of identified value)

Fig. 7 Observed amplitude distribution on defocus plane (left:-1300[nm], right:600[nm])

Fig. 8 Calculated amplitude distribution on defocus plane (left:-1300[nm], right:600[nm])

Fig. 9 Identified spectrum (left:Wavefront, right:Intensity distribution)

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

その他の条件や実験装置は4節と同じである。

5.1 光ピックアップの位置をZ方向に変化させたときのデフォーカス項の変化 光ピックアップの

Fig. 11 Image of experiment using DVD optical pickup

位置をZ方向に変化させたとき(デフォーカスさせたとき)の収差変化を測定する。フォーカス面に対して1波長分Z方向に動かしたときの波面収差の変化量 $d\phi(u, \psi)$ は角度スペクトル伝播モデル⁽¹⁰⁾より、 $d\phi(u, \psi) = \sqrt{1 - (NAu)^2}$ と表せる。これは軸対象の分布であるので、収差係数の内の軸対象のモードの係数のみが変わる。特に大きく変化するのはデフォーカス係数と呼ばれる z_3 であり、変化量 $dz_3(D)$ はZernike基底関数 $R_3(u, \psi)$ と $d\phi(u, \psi)$ との内積をとることにより求まる。これを $\langle R_3 \cdot d\phi \rangle$ と表記すれば、Z方向の移動量 F に対する z_3 の変化量 $dz_3(F)$ は次式となる。

$$dz_3(F) = F/\lambda \cdot \langle R_3 \cdot d\phi \rangle \quad (15)$$

非点収差(z_4, z_5)やコマ収差(z_6, z_7)等の非軸対象の収差成分は理論上一切変化しない。

解析対象のDVDピックアップを用いた場合の理論式(15)は $dz_3(F) = -0.1295[\lambda/\mu\text{m}] \cdot F$ となる。始めにスポットの強度ピークの位置を探し、およそのフォーカス面を探す。これを基準とし、デフォーカス量として $-0.6[\mu\text{m}] \leq F \leq +0.6[\mu\text{m}]$ の範囲内を $0.2[\mu\text{m}]$ 置きに動かして、本手法で解析を行う。

本実験の結果と z_3 の回帰直線、理論式(15)のグラフを図12に示す。フォーカス面の位置に対して、 z_3 のみが大きく線形に変化した。 z_3 の直線回帰式は $dz_3(F) = -0.1343[\lambda/\mu\text{m}] \cdot F + 0.0002[\lambda]$ となり、回帰直線と理論式(15)の傾きの誤差は3.7%であるため、理論通りの結果が得られたと言える。フォーカス面の位置と z_3 の直線回帰による相関係数も0.997と十分高い。また、他の収差係数はほとんど変化しないという理論通りの結果が得られた。本手法がフォーカス面の位置決めに対してロバストな測定であることが言える。

5.2 光ピックアップを傾けたときのコマ収差変化 光ピックアップをディスクに対して傾けて収差解析を行った場合の傾斜角度に対する三次コマ収差の変化を測定する。光ピックアップのX方向への傾き角度を T とすると、三次コマ収差係数 z_6 の T に対する変化量

Fig. 12 Result of defocus experiment using DVD optical pickup

$dz_6(T)$ の理論式は次式となる⁽¹⁸⁾.

$$dz_6(T) = -T \left(D/\lambda \cdot \text{asin}^3(\text{NA}) \left(\frac{N^2 - 1}{6N^3} \right) + C_{dev} \right) \quad (16)$$

ここで、 C_{dev} は測定装置側、特に対物レンズへのスポット像の入射角度によって発生するコマ収差の比例係数であり、対物レンズの設計によって決定される。 C_{dev} より手前の項はディスクへの入射角度によるコマ収差への影響を表している。コマ収差への影響の大きさはディスクによるものの方が圧倒的に大きい、 C_{dev} の影響は無視できるものではない。

解析対象のDVDピックアップを用いた場合の理論式(16)は $dz_6(T) = (-14.70[\lambda/\text{rad}] + C_{dev})T$ となる。実験の傾け量はX方向に $-10[\text{min}] \leq T \leq 10[\text{min}]$ の範囲内で5[min]刻みに動かす。

本実験による結果とその回帰直線、 $C_{dev} = 0$ とした場合の理論式(16)のグラフを図13に示す。理論通りの結果が得られた。直線の回帰式は $y = -15.26[\lambda/\text{rad}]T + 0.00304[\lambda]$ となり、回帰直線と理論式(16)の傾きの誤差は11%であるため、 C_{dev} の影響が含まれていると考えられる。また、傾け量と z_6 の直線回帰による相関係数は1.000と十分高い値が得られた。

5.3 ディスクの厚みを変化させた時の球面収差変化
実験装置の対物レンズに張られているディスクの厚みを変化させたときの、厚み変化量に対する三次球面収差の変化を測定する。ディスクの厚み D の設計値からの差分量を dD としたとき、三次球面収差計数 z_8 の dD に対する変化量 $dz_8(dD)$ の理論式は次式となる⁽¹⁸⁾。

$$dz_8(dD) = -\frac{dD/\lambda \cdot \text{asin}^4(\text{NA})(N^2 - 1)}{48N^3} \quad (17)$$

解析対象のDVDピックアップを用いた場合の理論式(17)は $dz_8(dD) = -0.00268[\lambda/\mu\text{m}] \cdot dD$ となる。デ

Fig. 13 Third order coma change for tilting a DVD optical pickup

ィスクの厚みは $570[\mu\text{m}] \leq dD \leq 620[\mu\text{m}]$ の範囲内で10[μm]ずつ変化させる。

本実験による結果とその回帰直線、理論式(17)のグラフを図14に示す。横軸はディスクの設計値である600[μm]からの差をとっている。直線の回帰式は $dz_8(dD) = -0.00265[\lambda/\mu\text{m}] \cdot dD + 0.00364[\lambda]$ となり、回帰直線と理論式(17)の傾きの誤差は1.1%であるため、理論通りの結果が得られたと言える。また、ディスクの厚みと z_8 の直線回帰による相関係数は0.999と十分高い値が得られた。

Fig. 14 Third order spherical change for error of disk thickness using DVD optical pickup

5.4 光ピックアップを光軸周りで回転させたときの非点収差変化
光ピックアップを光軸周りで回転させたときの三次非点収差(z_4, z_5)の変化を測定する。横軸に回転量、縦軸に収差量としたとき、理論上、どちらも同じ振幅と周期(180[deg])のサインカーブとなり、位相差が45[deg]となる。その振幅が光ピックアップに含まれる非点収差量となり、平均値が装置側となる。

本実験では光ピックアップを0[deg]~360[deg]の範囲内を30[deg]刻みで回転させた。実験結果とそれをサインカーブに回帰したグラフを図15に示す。 z_4, z_5 のサインカーブの振幅はそれぞれ0.0407[λ], 0.0408[λ]

と両者の振幅の誤差は0.25%と十分小さい。また位相差も44.8[deg]となったため、理論通りの結果が得られていると言える。測定器側の非点収差も0.009[λ]程とわかる。また、回転量と z_4 , z_5 のサインカーブ回帰による相関係数はどちらも0.999と十分高い値が得られた。

Fig. 15 Third order astigmatism change for rotating a DVD optical pickup

6. 結 言

従来の収束型の位相回復法を基礎として実用的に用いることができるスポット像からの波面収差解析手法を開発した。また、撮像素子の各種ノイズに対するロバスト性を向上させるための改良を本手法に施し、より実用に耐えうる手法とした。数値実験を行い、本手法が実用上十分な性能を持っている手法であることを示した。本手法で実際の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、本手法が収差係数を $\pm 0.001[\lambda]$ の繰り返し精度で得られる手法であることを実証した。実際のDVDピックアップを対象に理論と比較する複数の検証実験を行い、その結果から本手法の精度を定量的に評価できた。各実験結果において、入力パラメータと測定結果との間の相関係数はきわめて高い値が得られたとともに、測定結果が十分な理論との整合性が得られた。以上により、本収差解析手法は実用的であり高精度な収差解析が可能であることが実証された。

本論文における重み行列の決定方法やデフォーカス距離の選定方法は、筆者らの経験に基づく所が大きい。今後の課題はこれらの要素を適切に設定する方法の確立であると考えている。

文 献

- (1) Motohiro Takada, "Laser aberration measurement using interferometer (in Japanese)", Optical alliance 2, (2001) 19-22

- (2) Yasuhiro Tanaka and Motonobu Yoshikawa, "Novel measuring technique of the optical performance of objective lenses for optical disk systems", *Applied Optics*, **31**, 25 (1992) 5305-5311
- (3) R.W.Gerchberg and W.O.Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures", *Optik*, **35**, 2 (1972) 237-246
- (4) J.R.Fienup, "Phase retrieval algorithms : a comparison", *Applied Optics*, **21**, 15 (1982) 2758-2769
- (5) 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) 2200-2217
- (6) Max Born and Emil Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press (1974)
- (7) J.R.Fienup, "Phase-retrieval algorithms for a complicated optical system", *Applied Optics*, **32**, 10 (1993) 1737-1746
- (8) G.R.Brady and J.R.Fienup, "Measurement of an Optical Surface using Phase Retrieval", 2006 Topical Meeting on Optical Fabrication and Testing (2006)
- (9) Peter Dirksen, Joseph Brast, et al, "Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach", *J.Microlith., Microfab., Microsyst.*, Vol.2 No.1 (2003) 61-68
- (10) Earl G. Williams, "Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography", Springer-Verlag Tokyo (2005)
- (11) Hiroshi Yabe and Naomichi Yamaki, "Nonlinear programming (in Japanese)", Asakura shoten (1999)
- (12) Chris A.Mack, "Inside PROLTH: A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation", FINLE Technologies (1997)
- (13) Netlib Repository at UTK and ORNL. "BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms)". NETLIB. (online), available from < <http://www.netlib.org/blas> >, (accessed 2008-05-16).
- (14) Netlib Repository at UTK and ORNL. "LAPACK - Linear Algebra PACKage". NETLIB. (online), available from < <http://www.netlib.org/lapack> >, (accessed 2008-05-16).
- (15) OpenMP.org, "The OpenMP API specification for parallel programming". OpenMP.org. (online), available from < <http://openmp.org/wp/> >, (accessed 2008-05-16).
- (16) Masato Shibuya and Hiroshi Oki, "Optical library 1: Optics about diffraction and imaging (in Japanese)", Asakura shoten (2005)
- (17) Shirou Kubo, "Series of Computational Mechanics and CAE 10: Inverse Problem (in Japanese)", Baifukan Co., Ltd (1992)
- (18) James C. Wyant, "Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology", *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. XI (1992)