高速波面収差検出による DVD 光ヘッドアライメント*

高田和政** 平田展章*** 中城正裕*** 笠澄研一*** 西井完治***

DVD Optical-head Alignment Using Fast Measurement of Wave Aberration

Kazumasa TAKADA, Nobuaki HIRATA, Masahiro NAKAJO, Kenichi KASAZUMI and Kanji NISHII

The objective lens for DVD optical-heads must have high optical performance, being aligned in high accuracy on the optical head. For high speed of this alignment process, a method based on wave aberration included in exit light from the objective lens on the optical head has been studied. An optical system based on stable shearing interference with diffraction grating has been devised, as well as algorithm that can detect coma aberration from fringe patterns formed in this optical system. This algorithm processes divisional area of patterns therefore this algorithm can detect coma at high speed, besides independently of spherical aberration or astigmatism. Alignment system of the objective lens on DVD optical head based on these optical system and algorithm has been developed. This system detects coma at 0.5s intervals and repeatability of tilt measurement is 0.01° . This alignment system has achieved high-accuracy alignment of 0.14° at 3σ that is enough for DVD optical-heads, attaining 1/3 to 1/4 alignment time of conventional jitter method or spot method.

Key words: optical-head alignment, diffraction grating, coma aberration, shearing interference, fringe pattern, curve fitting algorithm

1. 緒 言

CD から DVD へと光ディスクの市場拡大は急速に進展している。そのため、要素ユニットである光ヘッドの生産性を飛躍的に高める技術が強く望まれている。DVD 光ヘッドは、出射光に含まれる波面収差を RMS で数十 $m\lambda$ 程度に抑えなければ必要な特性が得られない。そのため、高精度な光学部品が必要であるうえ、それらを高精度に取り付けることが要求される。中でも対物レンズは出射光特性を決める重要なデバイスの一つであり、レンズチルトで生じるコマ収差を小さく抑さえ込まなければならず、 0.2° の精度でチルトアライメントする必要がある。なお、このチルトアライメントの精度が低ければ、ディスク面でのコマ収差を抑えて所望の出力信号特性が得られるように、光ヘッド全体をチルト調整する必要が生じる。この場合、光ヘッド出射光軸をディスクに対してチルトさせることになるため、ディスクからの反射戻り光が対物レンズ開口でけられてしまい、誤差を含んだ制御信号となる。制御信号の誤差を小さくするチルト方向とコマ収差を小さくするチルト方向は多くの場合一致しないためそれぞれが残留する。チルト量が多い場合は、この残留が大きくなって必要な特性が得られなくなる。このように、光ヘッド上で対物レンズを高精度に調整する必要がある。

従来、DVD 光ヘッド上で対物レンズのチルトアライメントは、光ヘッド出力信号特性であるジッタ¹⁾を測定しながら、これが最小になるように行っている。ジッタの最小値は光ヘッド固有のものであるので、この方法では少しずつチルトアライメントしてジッタが最小になる状態を探す必要がある。そのためアライメントに時間がかかるという課題がある。これに対し、光ヘッドがつくる集光スポットを光学顕微鏡で拡大観察して、スポットの形状(強度分布)からコマ収差を検出し、コマ収差ゼロをめざしてチルトアライメントする、いわゆるスポット法²⁾が提案され実用化されている。しかし、この方法は光の強度分

布解析のため一般に感度が低く、高精度な収差検出が困難である。また、スポット観察時のデフォーカス量が検出結果に大きく影響するため、フォーカスを正確にあわせる必要がある。デフォーカス検出には所定量だけデフォーカスさせたときの集光スポットの形状変化を計測する必要がある、静止状態で測定できないためフォーカス制御に時間がかかってしまうという課題もある。また、対物レンズをチルトアライメントするとスポット位置が移動するが、高倍率観察のため頻繁に視野から外れて連続的に調整できず、調整に時間がかかってしまう課題もある。これに対し、本研究では、光ヘッド上での対物レンズのチルトアライメントを高速化することを目的とする。そこで、干渉計を利用してインラインで高速に光ヘッド出射光のコマ収差を検出することを提案し³⁾、位相回折格子を用いた干渉光学系と、干渉パターンから収差を高速に抽出するアルゴリズムを考案した。以下に、開発した収差検出光学系と収差抽出アルゴリズム、および試作した DVD 光ヘッドアライメントシステムについて報告する。

2. 検 出 原 理

2.1 検出光学系

通常、実験室などでは、マイケルソンタイプやフィゾータイプに代表される一般的な干渉光学系を使った波面収差計測が行われる。しかし、これらの計測はパスが数百 mm 程度以上と長いので、空気のじょう乱など環境変化が大きい一般的な生産ラインでは安定した干渉計測が困難である。また、光ヘッド出射光は集光光であるため、一般的な干渉系を利用するには出射光をコリメートする必要がある。ここで、光ヘッドの光学調整時に集光スポット位置が移動するため、それに合わせてコリメート光学系と光ヘッドの相対位置調整をミクロンオーダーで行う必要がある。この調整に時間がかかってしまうという欠点がある。

そこで、図 1 に示すように、光ヘッドの焦点位置に透過型位相回折格子を設置することにより、コリメートせずに極めて短いパスで干渉可能なシェアリング干渉光学系とした。光ヘッドからの光は集光しながら焦点位置に達し、球面波として出射し

* 原稿受付 平成 13 年 1 月 31 日

** 正 会 員 松下電器産業(株)(門真市松葉町 2-7)

*** 松下電器産業(株)

Fig.1 Schematic of optical system for Coma detection

Fig.2 Scheme of interference by grating

ていく。このとき、焦点位置に設置した位相回折格子によって 0 次, ± 1 次, ..., の回折光が生じる。これらは、互いにある角度をもって進行し、各波面が部分的に重なって干渉する。このように、位相回折格子によって球面波のシェアリング干渉が得られる。この波面を集光レンズで平行にすることで、平面状の干渉パターンが得られる。

ここで、格子面が焦点と一致すれば、各回折光は同心の球面波となる。この場合、格子面で回折干渉して以降、干渉光同士は全く同じ光路を経る。そのため、格子から観測面に至るまでの空気じょう乱などは干渉パターンそのものには影響しない。このように、干渉光の光路長差は極めて短く空気じょう乱に強い構成であるといえる。また、光ヘッドの調整時に集光スポット位置が移動するが、集光レンズに到達する前に干渉しているためスポット位置と集光レンズの位置ずれ裕度は大きくとれる。

なお、シェア量を最適化するために回折格子のピッチを最適化する。波長 λ 、開口数 NA、ピッチ p が以下の式 (1) の関係を満たすとき ± 1 次回折光の輪郭が接し、0 次と ± 1 次、あるいは 0 次と -1 次の干渉領域を最大にできる。

$$p = \lambda / NA \quad (1)$$

また、回折格子を、溝を横断する方向へ面内で移動させることで ± 1 次回折光の位相を変化させることができる⁴⁾。そのため、フリンジスキャンによる高精度なシマ解析が可能となる。

Fig.3 Simulated interference fringes

このように、回折格子と 1 軸の微動機構というシンプルな構成でシェアリング干渉系を実現している。

2.2 干渉パターンと収差抽出アルゴリズム

この干渉系で得られる干渉パターンからコマ収差を測定するが、コマ収差を独立に且つ高速に抽出できるような方法について検討する。

まず、収差によって生じるパターンを明確にする。簡単のため球面波を平面波として扱う。円形開口内でフラットな強度分布を持つ波面に、基本的な収差であるデフォーカス (Defocus)、非点収差 (Astigmatism)、コマ収差 (Coma)、球面収差 (SA3) の各収差を Zernike 級数展開の各項から xy 座標系で以下のように与える。

$$\begin{aligned} \phi_{\text{Defocus}} &= \sqrt{3} \cdot (2x^2 + 2y^2 - 1) \\ \phi_{\text{Astigmatism}} &= \sqrt{6} \cdot (2xy) \\ \phi_{\text{Coma}_y} &= \sqrt{8} \cdot (3x^3 + 3xy^2 - 2x) \\ \phi_{\text{Coma}_x} &= \sqrt{8} \cdot (3y^3 + 3x^2y - 2y) \\ \phi_{\text{SA3}} &= \sqrt{5} \cdot (6x^4 + 6y^4 - 6x^2 - 6y^2 + 12x^2y^2 + 1) \end{aligned} \quad (2)$$

この波面をシェアリングして重ねる。結果の一例を図 3 に示す。なお、回折格子の溝方向を y 方向、溝と直交する方向を x 方向とし、コマ収差の y 方向成分、 x 方向成分をそれぞれ Coma_y , Coma_x と表す。図 3 は各収差が単独で生じた場合を示しているが、実際には各収差が単独で生じるのではなく複合して生じるため干渉パターンは複雑なものとなる。この複雑なパターンから、各収差を独立にしかも高速に抽出する必要がある。従来から、シェアリング干渉シマの解析法として Zonal な方法^{5)~9)}や Modal な方法^{10)~12)}など多く提案されている。これらによればすべての収差成分を算出することができるが、それ故にパターン面内のすべてのデータを扱わなければならないためデータが多くなり、長い処理時間を必要としてしまう。

これに対し、注目する収差を高速に抽出するため、干渉パターンからの収差抽出を特定部分のライン状データから検出する方法を提案する。扱うデータ量は面状データよりもライン状

Fig.4 Line area for processing

Fig.5 Coordinate system for analysis

ータの方が少なく、計算時間を短縮できる。処理領域を図4に示す。コマ収差検出用に3ライン(A, B, C)、デフォーカス検出用に1ライン(D)の計4ラインである。

まず、各ライン上の位相分布が各収差によってどのようなかを示しておく。x方向へ±aだけ移動させた2光束($\phi(x+a, y)$, $\phi(x-a, y)$)を干渉させるとし、波面の差分を $\Delta\phi$ で表す。座標系を図5に示す。

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{Defocus}} &= \sqrt{3} \cdot 8ax \\ \Delta\phi_{\text{Astigmatism}} &= \sqrt{6} \cdot 4ay \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_y} &= \sqrt{8} \cdot (18ax^2 + 6ay^2 + 6a^3 - 4a) \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_x} &= \sqrt{8} \cdot (12axy) \\ \Delta\phi_{\text{SA3}} &= \sqrt{5} \cdot (48ax^3 + 48a^3x - 24ax + 48axy^2)\end{aligned}\quad (3)$$

ラインAは $x=0$ であり、このライン上での各収差による位相分布は次のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{Defocus}} &= 0 \\ \Delta\phi_{\text{Astigmatism}} &= \sqrt{6} \cdot 4ay \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_y} &= \sqrt{8} \cdot (6ay^2 + 6a^3 - 4a) \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_x} &= 0 \\ \Delta\phi_{\text{SA3}} &= 0\end{aligned}\quad (4)$$

ラインBは $y=x$ であり、このライン上では次のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{Defocus}} &= \sqrt{3} \cdot 8ax \\ \Delta\phi_{\text{Astigmatism}} &= \sqrt{6} \cdot 4ax \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_y} &= \sqrt{8} \cdot (24ax^2 + 6a^3 - 4a) \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_x} &= \sqrt{8} \cdot 12ax^2 \\ \Delta\phi_{\text{SA3}} &= \sqrt{5} \cdot (96ax^3 + 48a^3x - 24ax)\end{aligned}\quad (5)$$

ラインCは $y=-x$ であり、このライン上では次のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{Defocus}} &= \sqrt{3} \cdot 8ax \\ \Delta\phi_{\text{Astigmatism}} &= -\sqrt{6} \cdot 4ax \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_y} &= \sqrt{8} \cdot (24ax^2 + 6a^3 - 4a) \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_x} &= -\sqrt{8} \cdot 12ax^2 \\ \Delta\phi_{\text{SA3}} &= \sqrt{5} \cdot (96ax^3 + 48a^3x - 24ax)\end{aligned}\quad (6)$$

ラインDは $y=0$ であって、このライン上では次のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{Defocus}} &= \sqrt{3} \cdot 8ax \\ \Delta\phi_{\text{Astigmatism}} &= 0 \\ \Delta\phi_{\text{Coma}_y} &= \sqrt{8} \cdot (18ax^2 + 6a^3 - 4a)\end{aligned}\quad (7)$$

Fig.6 Simulation result of tilt measurement
a: Relation between added Coma and detected Coma
b: Effect of the other aberration on Coma detection

$$\Delta\phi_{\text{Coma}_x} = 0$$

$$\Delta\phi_{\text{SA3}} = \sqrt{5} \cdot (48ax^3 + 48a^3x - 24ax)$$

以上の各収差と各ライン上位相分布との関係から以下のことが言える。Coma_y成分はこのライン上で2次関数成分として現れる。このライン上では、非点収差は2次関数成分を持たず、また、Coma_x成分、SA3成分はゼロである。そのため、 $x=0$ のライン上において位相分布の2次関数成分を検出することでコマ収差のy成分を他から独立して検出することができる。具体的には、 $x=0$ のライン上に測定点を並べて配置して各点での位置と位相を求め、これらを2次関数でフィッティングして得られる2次係数の大きさで評価する。これを以下で表す。

$$|\text{Coma}_y| \propto \phi[A][2] \quad (8)$$

コマ収差のx成分も同様に次式として求めることができる。

$$|\text{Coma}_x| \propto \phi[B][2] - \phi[C][2] \quad (9)$$

また、デフォーカス成分は以下の式で求められる。

$$|\text{Defocus}| \propto \phi[D][1] \quad (10)$$

2.3 収差検出シミュレーション

上記の検出方法でのコマ収差検出感度と、他の収差がある場合のコマ収差検出への影響についてシミュレーション検討を行った。結果の一例を図6に示す。(a)は、与えたy方向のコマ収差の大きさに対する、ラインAでの位相分布の2次係数から求めたコマ収差の検出値を表す。(b)は、y方向コマ収差はゼロとしておき、デフォーカス、球面、非点収差を印加したときのy方向コマ収差の検出値を表す。この図に示されるとおり、ラインデータの関数フィッティング処理はリニアリティよく且つ他の収差の影響を受けずにコマ収差を検出できる方法であるといえる。

3. 試作機による評価

上記の干渉光学系とコマ収差抽出アルゴリズムに基づいたDVD光ヘッド調整装置を試作し、コマ収差検出精度、調整時間

Fig.7 Schematic of prototype system for DVD optical-head alignment

Fig.8 Image plane of control equipment on prototype system

などの評価を行った。

3.1 装置構成

装置の概略構成を図7に示す。光ヘッドからの出射光は透過型回折格子に入射して回折光を生じる。この回折光を集光して結像レンズで受像素子へ導き干渉パターンを得る。回折格子はx軸ピエゾステージで駆動され、フリンジスキンの手法により干渉パターンの強度分布を位相分布へ変換する。干渉パターンの外形から抽出した中心座標を基準にして図4に示す所定の処理ラインを設定し、このライン上の各点の位相データから、式(8)~(10)に基づいてコマ収差、デフォーカスを検出し、検出したコマ収差量に基づいて光ヘッド対物レンズのチルトアライメントを行うことができる。位相データを処理する点数は約1000である。なお、格子面と光ヘッド集光スポットの光軸方向の位置ずれは、図2(b)に示すデフォーカスパターンとして現れる。図6に示すようにこの成分はコマ検出に影響しないが、式(10)で検出した量を透過型回折格子と集光レンズが設置されたZ軸ステージへフィードバックしてフォーカス制御を行い、干渉パターンからデフォーカス成分を除去したうえでコマ検出

Fig.9 Relation between added tilt and detected Coma

Fig.10 Effect of optical axis offset on tilt measurement

る。ここで、集光レンズと格子面との光軸方向の位置ずれがある場合、結像倍率のため受像素子で得られる干渉パターンの寸法が変化し、所定領域以外を処理して測定誤差を生じる。これを防ぐため、装置の光学調整時に干渉パターンの寸法に合わせて処理する点を設定する。また、集光スポット位置検出用の光学系を設けるとともに、光ヘッドをXYステージ上に設置している。これにより、光ヘッドと検出系集光レンズのxy方向の相対位置を調整することができる。

3.2 評価

試作した装置により得られる干渉パターンの一例を図8に示す。制御画面の右上部分がカメラ画像である。円形の0次光に+1次、-1次光が左右方向にずれて重なることで2個のラグビーボール状の干渉領域ができ、これらが接した状態になっていることが確認できる。収差検出に要する時間は、画像取込みから収差表示までの1サイクルで約0.5sである。うち約0.3sがフリンジスキンの画像取込み、約0.1sがフォーカス制御、約0.1sが約1000点の位相データ処理にかかる時間であり、収差検

Fig.11 Misalignment of tilt

出時間の半分以上を画像取込み時間が占める。

この装置により、まずコマ収差の検出リニアリティの評価を行った。チルトステージで光ヘッド全体をチルトさせることにより、回折格子面でコマ収差を発生させながら検出量の変化を測定している。なお、装置の光ヘッド対物レンズ調整機構は使用せず収差検出のみを行う状態で測定している。結果を図9に示す。直線からのずれは 3σ で 0.02° であり、手動チルトステージにより与えたチルト量に含まれる約 0.01° の読取誤差を考慮すれば、チルト量検出自体のノンリニアリティは 0.01° 程度に抑えられているといえる。

次に、光ヘッドと試作装置の検出光学系との光軸ずれの影響を調べた。図7中の最下部にあるXYステージにより、光ヘッドをxy方向に変位させながらチルト測定を行っている。評価結果を図10に示す。 $\pm 100\mu\text{m}$ 以下の光軸ずれによる測定値の変化は、表1に示す 0.01° の測定再現性と同等である。このことから、光軸ずれは $\pm 100\mu\text{m}$ 程度許容できるといえる。前述した一般の干渉系を使う場合に光ヘッドとコリメート光学系との位置決めに要求されるミクロンオーダの精度と比較すると、1けた以上大きな位置決め裕度が得られるといえる。

また、試作した装置のチルトアライメント精度、およびアライメント時間を評価した。未調整のDVD光ヘッドを複数個用意し、半数を試作した装置で調整し、残りを市販のスポット装置で調整する。追い込み精度はともに $\pm 0.03^\circ$ である。調整精度の評価を、チルト調整した光ヘッドのチルト残差で行っている。チルト残差とは、出力信号特性である信号ジッタが最小になるために必要となるディスクチルトの大きさを表す。チルト残差が小さいほど精度良くチルト調整できていることを示す。評価結果を図11および表1に示す。なお、表1には従来のジッタ法に基づくチルトアライメント時間も記載している。チルト残差は従来のスポット法による調整よりも十分小さく 3σ で 0.14° であり、DVD光ヘッドに必要とされる 0.2° のアライメント精度を十分に満たしている。そのうえで、アライメント時間を従来のジッタ法と比較して1/4以下に、またスポット法と比較しても1/3に高速化できているといえる。

Table 1 Comparison between fringe method and conventional methods

	Jitter method	Spot method	Fringe method
Repeatability of tilt measurement (σ)	—	0.02°	0.01°
Misalignment of tilt (3σ)	x-dir.	0.22°	0.10°
	y-dir.	0.20°	0.14°
Tact time	80 s	60 s	30 s
Alignment time	65 s	45 s	15 s

4. 結 言

本研究で得られた結論を要約して以下に列挙する。

- (1) 光ヘッドからの出射光を回折格子を用いてシェアリング干渉させることで、極めて短い光路長差で干渉じまが得られる。
- (2) 得られた干渉じまの特定ライン上に測定点を配置し、各測定点の位置と、位相シフトで得られる各測定点の位相情報との関係関数フィッティングして得られる2次係数から、コマ収差を0.5sごとに高速に計測できる。
- (3) 出射光に含まれるコマ収差に基づいて対物レンズをチルトアライメントすることで、ジッタ最小までのチルト残差は 0.14° (3σ)となる。この値は一般にDVD光ヘッドに要求されるチルト精度 0.2° より小さい。
- (4) この検出光学系と収差抽出アルゴリズムによって、DVD光ヘッド対物レンズのチルトアライメントを、従来のスポット法やジッタ法と比較して1/3から1/4の時間で行うことができることを、試作したアライメントシステムによって示した。

参 考 文 献

- 1) 尾上守夫：光ディスク技術，ラジオ技術社，(1989) 212.
- 2) 石島 薫，加瀬秀樹：ピックアップレンズの評価，光アライアンス，5, 6 (1994) 34.
- 3) 高田和政，中城正裕，西井完治，笠澄研一：波面収差のインライン高速計測技術—コマ検出による光ピックアップアライメント—，2000年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2000) 549.
- 4) 高田和政，福井厚司，西井完治：回折光干渉方式小型エンコーダ，1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1996) 779.
- 5) G. Harbers, P. K. Kunst and G. W. R. Leibbrandt : Analysis of Lateral Shearing Interferograms by Use of Zernike Polynomials, Appl. Opt., 35, 31 (1996) 6162.
- 6) D. L. Freid : Least-square Fitting a Wave-front Distortion Estimate to an Array of Phase-difference Measurements, J. Opt. Soc. Am., 67 (1977) 370.
- 7) R. H. Hudgin : Wave-front Reconstruction for Compensating Imaging, J. Opt. Soc. Am., 67 (1977) 375.
- 8) R. J. Noll : Phase Estimates from Slope-type Wave-front Sensors, J. Opt. Soc. Am., 68 (1978) 139.
- 9) B. R. Hunt : Matrix Formulation of the Reconstruction of Phase Values from Phase Differences, J. Opt. Soc. Am., 69 (1979) 393.
- 10) J. Herrmann : Least-squares Wave Front Errors of Minimum Norm, J. Opt. Soc. Am., 70 (1980) 28.
- 11) R. Cubachini : Modal Wave-front Estimation from Phase Derivative Measurements, J. Opt. Soc. Am., 69 (1979) 972.
- 12) J. Herrmann : Cross Coupling and Aliasing in Modal Wave-front Estimation, J. Opt. Soc. Am., 71 (1981) 989.