

# 高速自動干渉計の開発

Development of High Speed Automatic Interferometer

野崎 昭俊\*

Nozaki, Akitoshi

Interference measurement as one of useful technical means is used to evaluate the image performance of the highly accurate lens for the optical use. But its measurement process needs a certain level of skill, because the alignment of test lens was manually positioned and micrometer order adjustment. Moreover, the variety and production volume of the optical disk lens are rapidly increasing, so new type measurement system which were able to be measured at high speed was needed. To answer these demands, we developed "High Speed Automatic Interferometer" to which most of processes are done by automatic operation.

## 1 はじめに

高精度光ディスク用レンズの結像性能を評価する手法の一つとして、干渉計を用いた測定がある。位相シフト法により、干渉縞から被験レンズの透過波面を求め、その波面をZernikeの多項式近似を用いることで、球面収差・コマ収差・非点収差等の各収差に分類し、定量化を行っている。

この結像性能を評価する干渉計は既に導入され、長期にわたって使用されてきている。しかし、干渉縞の発生時の被験レンズの位置調整（アライメント）は手動で行われ、その位置決め精度はマイクロメートルオーダーを要求されるので、測定作業は熟練を必要としていた。

また、光ディスク用プラスチックレンズは多品種化・生産数量増加の傾向にあり、より多量に、より高速に測

定可能な装置が必要とされていた。この要求に答えるため、被験レンズを測定治具にセットすれば、干渉縞の発生・測定・解析の、全ての作業を自動で行う『高速自動干渉計』を開発した。

## 2 仕様とシステム構成

オプト事業部では、過去に自動干渉計の開発を行っているが、測定分解能が現状の要求精度を満足しない、異種レンズ測定時の段取り替えが難しい等の問題を抱えていた。そこで、新たな自動干渉計開発にあたり、前記の問題点の解決と次世代の測定仕様を考慮して、開発項目と仕様をTable 1のように決定した。

次に、Fig. 1に今回開発した装置のシステム構成を示し、装置の概略説明を行う。

トワイマングリーン型干渉計において、参照平面から

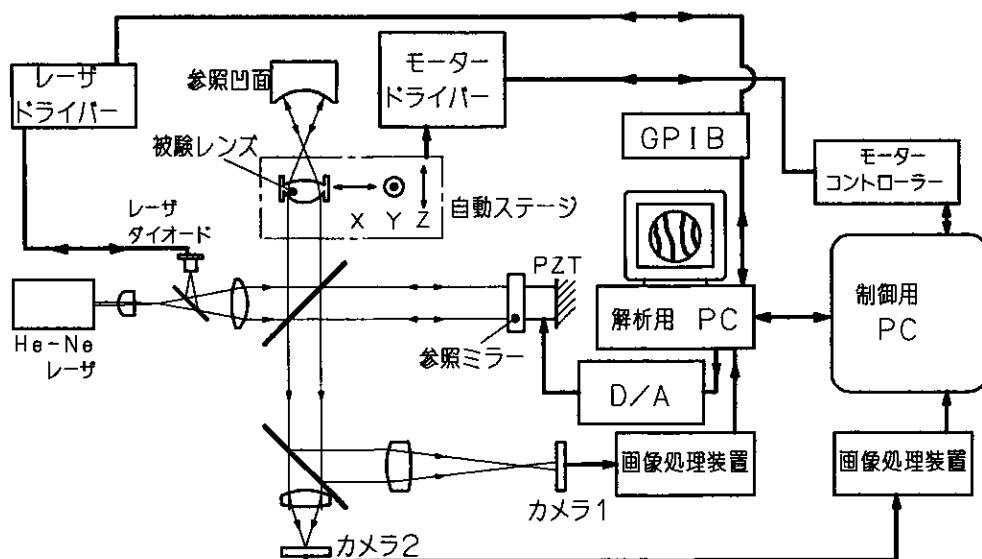


Fig. 1 System Layout of High Speed Automatic Interferometer

\* オプト事業部光学開発センター

反射した参照光と、被験レンズを二度透過した測定光が干渉してカメラ1で干渉縞として観察される。この干渉縞は解析用PC(パーソナルコンピュータ)で測定・解析される。ここで、被験レンズの位置は、測定治具の取付け部およびレンズ受け部の公差、レンズの外径公差等から、測定毎に同じとは限らず、被験レンズの位置調整が必要となる。カメラ2では被験レンズと参照平面の位置・フォーカス情報を含んだスポット像が観察される。この像情報は画像処理ボードを通じて制御用PCに送られて解析された後、制御データとして被験レンズのX, Y, Z各軸の自動ステージに送られ、干渉縞発生のアライメントが行われる。

Table 1 Comparison of Interferometers

機種	高速自動機	手動機	旧自動機
アライメント	自動	手動	自動
1ルーチン測定回数	5	1	1
測定時間	高速	低速	中速
測定範囲	<NA0.7	<NA0.6	<NA0.6
光源(多波長化)	633~780nm	633nm(He-Ne)	633nm(He-Ne)
位相シフト	有	有	無
分解能(r.m.s)	$\lambda/1000$	$\lambda/1000$	$\lambda/100$
機差補正	収差分類前	収差分類後	無

### 3 高速化達成手法

#### 3.1 連続測定

従来のレンズ1個ごとの測定に対し、今回は連続して5個のレンズが測定できる仕様とした。これにより、測定者は連続測定時に次の測定準備など他の作業に従事でき、作業の効率化がはかれる。

#### 3.2 PCの分離

干渉縞の測定・解析を行う解析用PCと、干渉縞の調整を行う制御用PCに分離して、各々の情報は通信により共有した。これにより、干渉縞アライメント・測定・解析の作業が一部平行して実行可能となり、測定時間の短縮がはかれる。

#### 3.3 高速ステージ

今回の測定時間を満足するためには、X軸の最高移動速度は10mm/s以上が必要であり、この性能を実現するため、超音波モーターを用いた高速ステージを開発した。Y軸は移動距離が数100 $\mu$ m、Z軸は数10 $\mu$ mと小さいため、高速性はあまり問題とならない。

### 4 自動化開発要素技術

#### 4.1 アライメント情報検出素子

従来の自動干渉計では、被験レンズのX, Y方向の位置検出には二次元のPSD(Position Sensitive Diode)を、フォーカス位置検出には4分割PD(Photo Diode)を使

用した非点収差法を用いていた。この手法では、レンズの小径化に伴って、これらのセンサーへの入射光量が少なくなり、信号の検出が困難になる。この光量不足を解決するために高出力レーザを使用した場合、初期投資・ランニングコストの増加・装置の大型化は避けられない。また、異種レンズ測定の際にセンサーの位置や電気的な調整を行わなければならない、多品種測定には不向きであった。

今回の開発では、Fig.1のカメラ2で観察される測定光のスポット像を利用することとした。理想的な被験レンズの場合、被験レンズの焦点位置と参照凹面ミラーの曲率中心が一致した場合、観察される干渉縞は一色(縞間隔が広がった状態)になり、測定光のスポット像の位置は参照光のそれと一致し、スポット像の面積は最小になる。(Fig.2)すなわち、測定光スポット像と参照光スポット像の光軸に垂直な面内(X-Y)の位置ズレ量(偏差)は干渉縞の本数に関係し、光軸方向(Z方向)の偏差はスポット面積の大小となり干渉縞の曲がり(フォーカス情報)に関係してくる。そこで、この関係を利用し、カメラ2のみを用いて被験レンズのX-Y位置とフォーカス情報を検出することとした。この場合、異種レンズ測定毎のカメラの位置調整や電気的調整は不要となる。

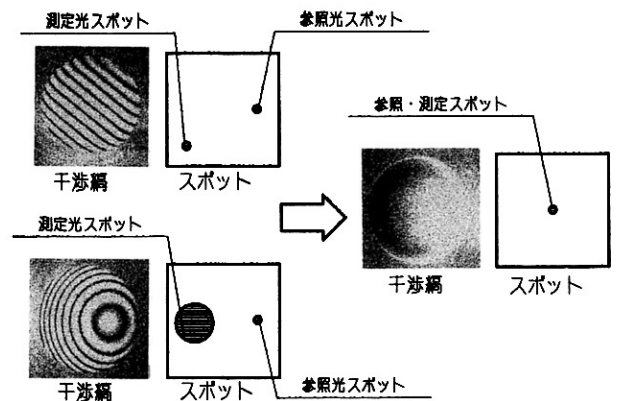


Fig. 2 Relation between Spot and Fringe

#### 4.2 高速薄型X-Yステージ

干渉縞の本数・曲がり画像解析により補正可能ではあるが、元情報として一色である方が望ましい。

今回の測定機では、従来機と同等に、縞の本数を $3 \pm 2$ 本以内、縞の曲がり、隣あう縞と縞の間隔を1とした場合に $\pm 1/4$ 本以内と規定した。被験レンズを動かすステージの許容値は、X-Y方向は $4 \times NA$ (開口数)に、Z方向は $NA^2$ に反比例する。被験レンズを無限共役タイプ(平行光入射)、NAを0.6とした場合、許容値は各々X-Y軸1.0 $\mu$ m、Z軸0.8 $\mu$ mとなる。これらの許容値から、ステージの必要位置決め分解能を決定した。

### (1) ステージの構成

今回開発したX-Yステージの仕様をTable 2に示す。前述の高速化と、高精度位置決めをはかるため、X-YステージのX軸には圧電素子を使用した超精密セラミックモーター（超音波モーター）を採用した。Fig. 3に示される超音波モーター（圧電素子の組み合わせ）に超音波領域の交流電圧を加えると、その周波数に共振した縦方向と横方向の共振運動が合成され、フィンガーチップ先端が楕円運動する。このフィンガーチップをステージに取付けたプレートに接触させることで、直線運動を得ている。従来のステッピングモーター駆動と比較した場合、①高速駆動と高精度位置決めが両立可能 ②伝達要素にボールネジを使わないので低騒音・低振動 ③小型・軽量、の長所があるが、①推力が小さい ②微小な送りを行った場合に移動量が安定しない、の短所がある。①は精密クロスローラーをステージガイドに使用することで、②は後述する制御手法の工夫により対処できた。

Y軸は、小型のDCモーターとリードスクリューを組み合わせた、エンコーダー内蔵のリニアアクチュエーターを使用した。

Table 2 Specification of X-Y Stage

	X軸	Y軸
アクチュエーター	超音波モーター	DCモーター+ボールネジ
ストローク(mm)	50	5
最高速度(mm/s)	50	5
位置決め分解能( $\mu\text{m}$ )	0.8	0.25
フィードバックセンサー	リニアスケール CCDカメラ	ロータリー エンコーダー
ガイド	クロスローラー	
XY運動の平行度( $\mu\text{m}$ )	5	
XY運動の直角度( $\mu\text{m}$ )	10	
外形寸法	W150×D166×H24.5mm	

### (2) X-Y制御手法

ここでは、主にX軸の制御について説明を行う。X軸のレンズ間移動は、ステージに搭載しているリニアスケールを用いたクローズドループ制御で行われる。レンズ間移動後、測定光スポット像はカメラ2で観察される。ここで、スポット像のX-Y方向の射影を求め、各々の重心を算出して参照光スポット像の重心との偏差を求める。これを移動量に換算して、再びX-Y軸ステージをクローズドループ制御で駆動する。測定光スポット像の重心と参照光のそれが $10\mu\text{m}$ 以内に入ったら、X軸の超音波モーターは微小パルス送り制御となる。前述した、超音波モーターの欠点である微小送り時の動作不安定は、超音波モーターへ正弦波状のパルス電圧を供給することで改善した。さらに光学系の拡大率を利用し、リニアスケールの分解能以上の位置決めが達成できることを、実験を通じて確認した。本装置では、パルス幅1msの変形正弦波電圧を超音波モーターへ供給している。微小パルス送り後に再び偏差を求めて、偏差が $1\mu\text{m}$ 以下に入った段階でX-Y軸の制御を完了する。

### 4.3 フォーカスステージ

#### (1) ステージの構成

Z軸ステージは、被験レンズのX軸まわり・Y軸まわりの傾きを補正する機能も兼ね備えている。(Fig. 4) 従って、本装置では従来必要とした二軸のゴニオステージなどの傾き補正機構が不要となり、装置の飛躍的な小型化がはかれた。台形ブロックはリニアアクチュエーターの変位を $1/10$ に縮小し、X方向の変位をZ方向の変位に変換している。ここで使用されているリニアアクチュエーターはY軸のそれと同一である。Z軸方向を変位させる場合はFig. 4中のA・B・C3本のアクチュエーターを同時に、X軸まわりの傾きの場合Aのみを、Y軸まわりの傾きの場合Bのみを、それぞれ駆動する。これにより、予め測定器具内の個々のレンズ受け部の傾きを求めておけば、測定中に自動で傾きの修正が可能である。

#### (2) 制御手法

測定光スポット像の最大強度が最適となるようにゲイン調整を行う。ゲインが既定値以上の場合（フォーカスが大きくズレている時）は、スポット像の平均強度情報を、以下の場合（フォーカスがほぼ合っている）は面積情報を用いてフォーカス制御を行う。

まず始めに移動方向判別を行う。ゲインを固定して、Z軸の一方向に被験レンズを動かす。ここで再びスポット像を取り込み、スポット像の平均強度が前回より大きくなるか、もしくは面積が小さくなった場合、この移動方向をフォーカスの合う方向と判断する。ゲインが既定値以下、すなわち、ほぼフォーカスの合う状態まで被験レンズをこの方向に動かす。次に、微調整は面積情報を用いる。(Fig. 5) スポット像の面積が前回のそれより(Point. 1) 大きくなるまで、Z軸を駆動する (Point. 2)。

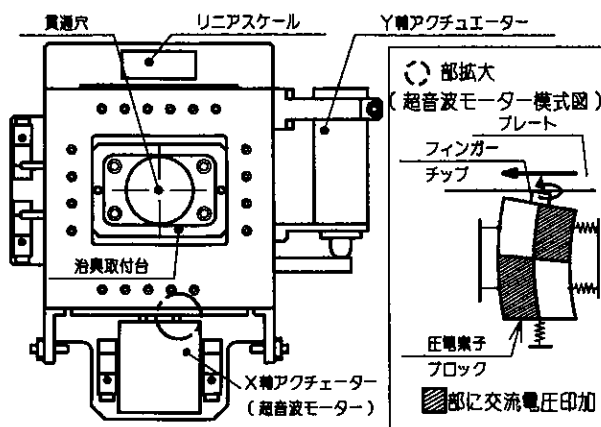


Fig. 3 Design of X-Y Stage

Point. 2 から既定値ぶん Z 軸を上下に駆動し、それぞれ面積を取得する (Point. 3, 4)。Point. 2, 3, 4 の 3 点で放物線近似を行い、面積の最小位置 (フォーカス位置) を算出する。Z 軸をフォーカス位置まで駆動して、被験レンズのフォーカス制御は完了する。

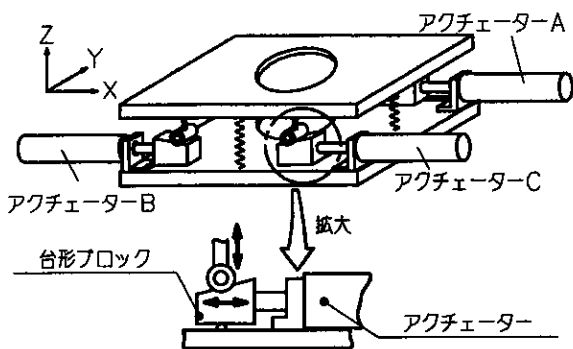


Fig. 4 Structure of Z Stage

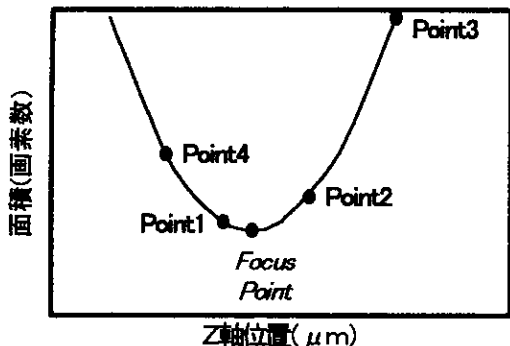


Fig. 5 Relation between Z axis and Spot Area

## 5 次世代測定仕様

### 5.1 多波長対応

本装置では、He-Ne レーザ (波長 633nm)、半導体レーザー (LD) を光源とし、光学系は 633~780nm まで色消し、および無偏光・無位相として、実使用波長での測定・評価が可能となっている。光源として He-Ne レーザを使用した場合は、位相シフト手法として参照平面ミラーを光軸方向にナノメートルオーダーで微小送りする変位機構が必要となる。一方、光源として LD を用いた場合は、LD の注入電流変調による周波数変調特性を利用し、この変位機構を用いることなく、容易に位相シフト測定を可能とした。

### 5.2 高 NA 対応

光ディスクの高密度化によりレンズの NA はますます高くなっている。本装置では、被験光路中の参照凹面ミラー

を大口径化することと、デストーションの発生しない光学系を用いることで NA 0.7 まで対応可能とした。

### 5.3 干渉計間の機差補正

レンズの高性能化に伴い、測定装置単体の測定精度を上げることはもちろんであるが、装置間の機差を補正する事も重要となる。従来の機差補正は、基準レンズを各々の装置で測定して得られた Zernike の多項式近似の係数で数値演算補正を行っていたが、全ての収差補正をする事はできなかった。そこで、基準レンズで装置間の透過波面の差 (Zernike の多項式近似前) で補正を行うことで、全ての収差に対応し、かつ機差補正の確度を高めた。

## 6 おわりに

今回の開発で、被験レンズを測定治具にセットすれば、干渉縞の発生・測定・解析の、全ての作業を自動で行う『高速自動干渉計』の開発に成功した。この開発で、被験レンズのハンドリングの自動化を含めた、完全自動干渉計開発のめどがたった。

また、次世代測定仕様に向けた様々な検討を行ったことで、今後の干渉計開発の指針となる装置となった。今後もこのような測定機の開発を通じて、光ディスク用レンズの品質向上・高精度化に貢献していく所存である。

### ●参考文献

- 1) 石井：“半導体レーザーの周波数変調特性を用いた干渉法”、光学 5 (1991)、265-270
- 2) Nanomotion, Ltd.：“物体を移動させるマイクロモーター” 特開平 7 -184382