

光学方式による多次元変位計測に関する研究 (第2報：前後作動による測定面分離方式)

田中 義人・石井 純子

A Multi-Dimensional Displacement Measurement Based on the Differential Optics (Part2 : Measurement of Recording Layer)

Yoshito TANAKA and Junko ISHII

Abstract

Because of the increased recording density of optical disks, it is widely demanded methods for estimating mechanical characteristics of the optical disk such as displacement and inclination. This study relates to a method for measuring a multi-dimensional displacement that measures not only displacement, but also tangential and radial inclinations of the optical disk transmitting laser light simultaneously. We propose a differential optical detection method using a pair of quadrant opto-electronic detectors placed at the conjugate positions of the focal plane of a detection lens, and an optical system using a spatial filter for splitting reflection from a surface of a recording layer and a surface of a transparent substrate of the optical disk. The optical system is not effected on a defect of the substrate surface. The optical head for an experiment was prepared in a simulation of the optical system with ray tracing.

Key Words: Optical Measurement, Laser, Optical Instruments, Optical Disk, Ray Tracing, Differential Optical Detection

1. 緒 言

光・磁気による種々の方式の大容量リムーバブルディスクによるマルチメディアとして、規格が統一されたDVDが普及してきている。光ディスクの記録密度の向上に伴い、光記録媒体の機械特性の仕様は厳しくなっている。これら機械特性を同時に計測できる多次元の非接触センサに対する要求は高く、高分解能で評価、測定する手法が重要となってきた。

従来、測定物の面変位を測定する方法は、三角測距方式、非点収差方式等があるが⁽¹⁾⁽²⁾、これらはいずれも一方の面変位のみを測定するものであることや、測定面に傾きや傷がある場合にその影響を受けやすい問題などがあつた。

筆者らは、測定物の表面上で光が透過せずに反射するミラーによる鏡面体の場合について、測定面の面変位と面傾きを独立に同時に検出する多次元変位計測法を先に報告した⁽³⁾。これは測定面の表面の影響を受けやすい方式である。

本研究では、測定物の表面の影響を受けにくい方式を検討した。測定物として測定面の手前に光が透過する透明基板が存在するような光ディスクを扱う。光ディスク基板表面の傷等の影響をなくし、基板裏面の反射膜面の機械特性が測定可能な測定面分離方式と前後差動方式を組み合わせた多次元変位計測法を提案する。光線追跡による光学系のシミュレーションによって、本測定原理の妥当性を確認する。

2. 光ディスクの機械特性

2.1 光ディスクの高密度化

光ディスクの高密度化は、ディスク基板の薄型化、

記録波長の短波長化、記録変調方式、トラック密度の向上、超解像技術等に依存するところが多い。

対物レンズの開口数を大きくすれば記録密度を高められるが、ディスク回転時の面振れ許容度が小さくなり、安定性に欠ける問題が生じる。またディスク基板の傾きが大きくなるとコマ収差が増加し、信号のS/N比(信号対雑音比)が悪くなる。

光ディスク媒体の機械特性は、図1に示すようにディスク上下方向軸(Z軸)の面振れ(以下面変位) d 、ディスク半径方向軸(R軸)回りの周方向面傾き θ_r 、およびディスク周方向軸(T軸)回りの半径方向面傾き θ_R の機械特性は、ISO(国際標準化機構)において規格化されており、記録容量の増大とともにこれら機械特性は厳しくなってきた⁽⁴⁾。これら高密度光ディスクを開発するためには、光ディスク媒体の多次元の機械特性を同時に測定できる高精度な多次元変位計測方法が必要である。

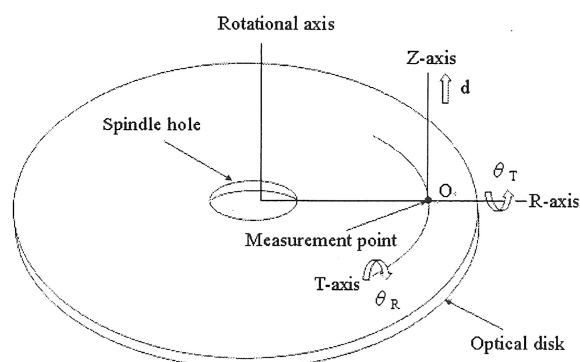


Fig.1 Definition of the multi-dimensional displacement of an optical disk

2.2 光ディスク媒体の機械特性

前報⁽³⁾で報告した多次元変位測定法を用いて、光ディスク媒体の機械特性を測定した。図2は、 50 s^{-1} で定常回転中における光ディスク媒体の上下方向の面変位を測定した例を示す。実験の結果、ディスク回転にともなうディスク面振れによる面変位の信号に、他の信号が重畳する現象が生じた。また、図示していないが、光ディスクの半径、および周方向面傾き信号にも、面変位信号と同様な現象が生じることがわかった。この現象を調べるために、測定に用いた光磁気ディスク

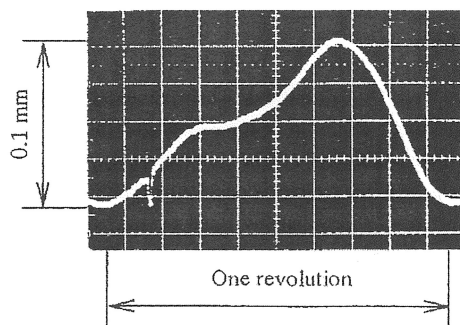


Fig.2 The axial deflection of an optical disk

媒体の構造と多次元変位測定的光ヘッドとの配置関係を図3に示す。ディスク媒体は厚さ 1.2 mm の透明なポリカーボネート樹脂（以下PC）からなるディスク基板上に光磁気記録層からなる薄膜と、この薄膜上に反射膜がスパッタリングにより積層され、さらにこの上に保護膜がコーティングされている。図示していないが、光磁気ヘッドからのレーザ光は、ディスク基板面側から入射し、基板面を透過して光磁気記録膜に情報を記録する。実験では図3に示すように多次元変位測定的光ヘッドをディスク基板面側に配置し、ディスク基板面側からレーザ光を入射した。ディスク媒体は、スピンドルモータによって定常回転するようにした。また直線移動と傾きを可変できる移動ステージ上に光ヘッドを設置し、ディスク上下方向、およびディスク周方向と半径方向の面傾きの調整ができるようにした。図3に示すように、レーザ光がディスク基板面に入射されると、入射光の一部はディスク基板面上で反射されるとともに、残りの入射光はディスク基板、記録膜

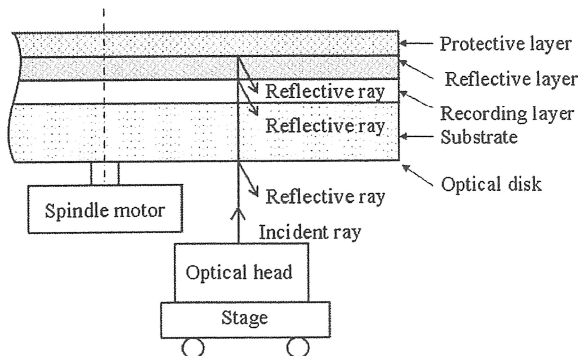


Fig.3 Mechanical characteristics measurement of an optical disk medium.

面を透過し、反射膜上で反射する。多次元変位測定的光ヘッドは、これらディスク基板表面、記録膜面、および反射膜面からの反射光を受光することになる。したがって、図2の実験で生じた現象は、ディスク基板表面の反射光によりディスク基板表面の傷や基板の厚さむら等をも検出したものと考えられる。そこで本研究では、光ディスク基板表面、記録膜面、および反射膜面上とからの反射光を分離し、ディスク基板表面の影響をなくして、反射膜面上の反射光のみを検出する測定面分離方式を検討した。

3. 測定原理

3.1 装置構成

光ディスク媒体の機械特性測定のために、今回検討した光学系的光ヘッドの構成を図4に示す。半導体レーザから出射したレーザ光は、コリメータレンズにより平行光に変換され、開口絞りで光束径を制限した後、偏光ビームスプリッタにより反射される。 $\lambda/4$ 波長板を透過した後、対物レンズにて測定面に集光される。測定面で反射した光は、再び対物レンズ、 $\lambda/4$ 波長板を透過し、さらに、偏光ビームスプリッタを通過する。その後、検出レンズで集光され、ハーフミラーにより直進方向と直角方向に分けられる。検出レンズの焦点面に対し、前側、および後側の共役の位置に光検出器1, 2をそれぞれ配置して、光スポットを受光する前後差動検出法の構成にする。

上記光学系において、偏光ビームスプリッタと検出レンズの間にはリレーレンズとピンホールからなる光学的な空間フィルターを設ける。これにより、検出レンズの焦点面から大きく外れた位置からの反射光を空間フィルターのピンホール上で遮光させ、ほとんどピンホールを透過しないようにする。対物レンズの焦点位置に光ディスクの反射膜面が位置するように光学系を配置し、ディスク基板表面、記録膜面からの反射光を遮光させ、光検出器1と2が受光しないようにする。この構成により、ディスク基板表面からの反射光の影響を受けずに反射膜面からの反射光のみを抽出できるようにする。

3.2 多次元変位検出方法⁽³⁾

光ヘッドに設けられる光検出器の構成を図5に示す。光検出器1, 2は同一形状で、受光面は四分分割構造にし

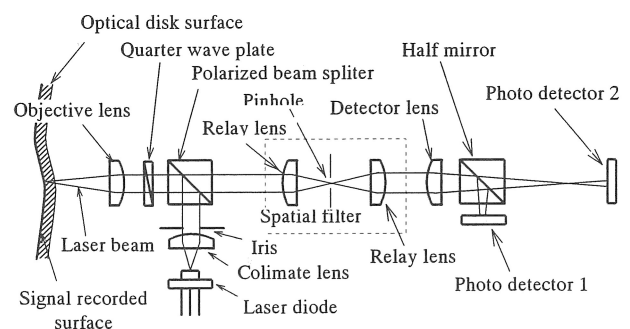


Fig.4 Construction of the optical head

た. 光検出器 1, 2 の各分割要素 a, b, c, d , および e, f, g, h の検出光量をそれぞれ I_a, I_b, I_c, I_d , および I_e, I_f, I_g, I_h とする. 光ディスクが図 1 に示した多次元方向に変位した場合の変位信号を求める.

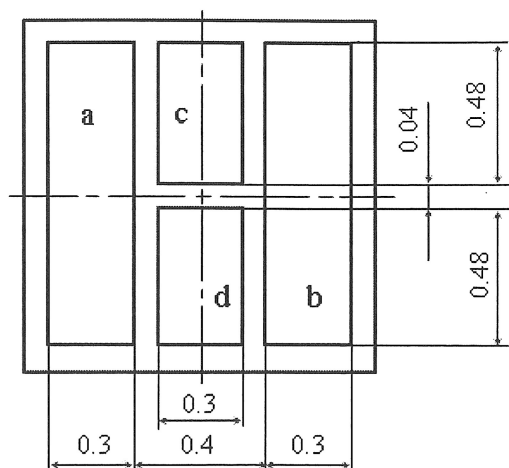


Fig.5 Dimension and shape of the photo detector

光ディスクの測定面の位置が対物レンズの焦点位置に対して, 前後にずれて面変位した場合, 光ディスク反射膜面の面変位信号 I_D は, 光検出器 1, 2 の左右方向に配置された受光面要素 a, b と e, f の検出光量の差として式 (1) によって求めることができる.

$$I_D = \{(I_a + I_b) - (I_e + I_f)\} / I_S \dots \dots \dots (1)$$

一方, 光ディスクの測定面が対物レンズの光軸に対して, 周方向面傾き θ_T を生じた場合, 周方向面傾き信号 I_T は, 式 (2) によって求めることができる.

$$I_T = \{(I_a - I_b) - (I_e - I_f)\} / I_S \dots \dots \dots (2)$$

また, 光ディスクの測定面が対物レンズの光軸に対して, 半径方向面傾き θ_R を生じた場合, 半径方向面傾き信号 I_R は, 式 (3) によって求めることができる.

$$I_R = \{(I_c - I_d) - (I_g - I_h)\} / I_S \dots \dots \dots (3)$$

式 (1) ~ (3) では, 光学系の外乱等の影響を補償するために, 各検出光量を式 (4) で表わされる光検出器 1 と 2 による総受光量 I_S で正規化している.

$$I_S = I_a + I_b + I_e + I_f + I_c + I_d + I_g + I_h \dots \dots \dots (4)$$

4. 測定面分離の解析

4・1 光学系の解析モデル

図 4 に示した光ヘッドの光学系の構成に対して, 光線追跡による光学系の解析を行う. 図 4 を簡略化した光学系の解析モデルを図 6 に示す. 半導体レーザの開口絞り前のビーム直径は水平方向 8mm, 垂直方向 4mm とし, 開口絞りで 4mm の直径に絞った. 半導体レーザの光軸に直行する水平 ± 2 mm, 垂直 ± 2 mm の 2 次元平面の放射面を 1087 個の要素に均一に細分割し, レーザ光軸上, および軸外物点から射出した各要素の光線の強度は, ガウス分布をすることで計算した⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

PC 樹脂のディスク基板の厚さは 1.2mm, 反射率は 4%, 屈折率は 1.58, ディスク反射膜面の反射率は 15% として, 幾何光学による光線追跡を行なった. 各光学部品が受光する光強度を電子計算機によって逐次計算し, 空間フィルターの最適なピンホール径を求めた.

また, 光検出器 1, 2 の各受光面要素が受光する光強度から式 (1) ~ (3) の演算を行い, 測定物の面変位 d , 周方向面傾き θ_T , および半径方向面傾き θ_R に対応する信号 I_D, I_T , および I_R を求めた. 計算に用いた光学部品の仕様を表 1 に示す. 以下に示す結果では, 式 (1) ~ (3) で得られる I_D, I_T , および I_R を 1000 倍して求めた.

多次元方向の測定範囲は, 光検出器やピンホール径の大きさに依存する. そこで, 本報では図 5 に示した

Table 1 Specifications of optical parts used for simulation

Symbol	Value(mm)
Focal length of objective lens	f1 25.6
Focal length of detector lens	f2 48.0
Distance between optical detectors 1 and 2	s 15.0
Diameter of Iris	d0 4.0
Diameter of horizontal Gaussian beam	dx 8.0
Diameter of vertical Gaussian beam	dy 4.0
Diameter of piholl in spatial filter	dp 0.1

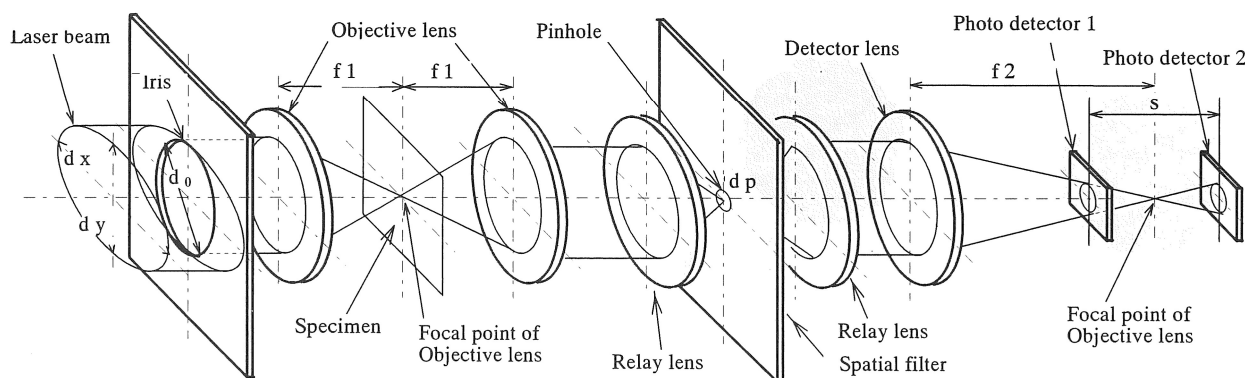


Fig.6 Simulation model of the optical head

大きさの光検出器，ピンホール径，光スポット形状から測定範囲の目標値を決定する。

4.2 光スポット形状

空間フィルターのピンホール径 dp を 0.1mm とした場合，光線追跡により求めた光検出器 1, 2 の受光面上での光スポットの形状を図 7 に示す．図 7 (a) は面変位 $d=0.2\text{mm}$ の場合，(b) は周方向面傾き $\theta_T=0.015\text{rad}$ の場合，(c) は半径方向面傾き $\theta_R=0.015\text{rad}$ の場合である．いずれの場合も，前報⁽⁴⁾では光スポット形状の変化と受光面の中心位置からの光スポットが移動する現象を概念的に説明したが，本報では，この現象をシミュレーションによって明らかにし，測定原理の妥当性を確認した．

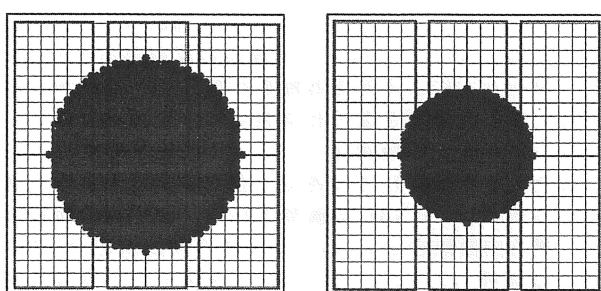


Photo detector 1 Photo detector 2
(a) Influence of displacement ($d=0.2\text{mm}$)

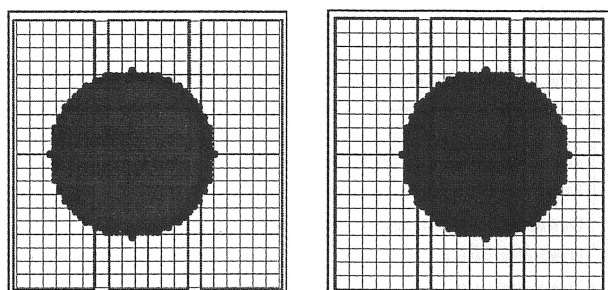


Photo detector 1 Photo detector 2
(b) Influence of tangential tilt ($\theta_T=0.015\text{rad}$)

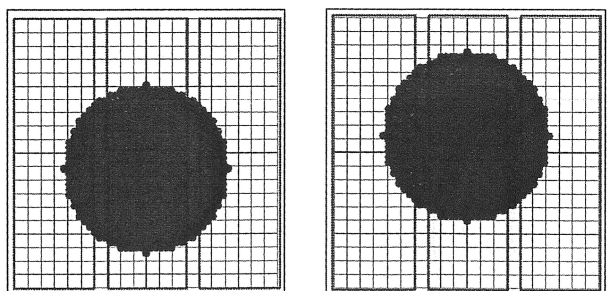


Photo detector 1 Photo detector 2
(c) Influence of radial tilt ($\theta_R=0.015\text{rad}$)

Fig.7 Image of laser beam spots on photo detectors

4.3 測定面分離特性

光ディスクが面変位したときに，ディスク基板表面からの反射光が反射膜面からの反射光による面変位特性に及ぼす影響を検討した．

光ディスクが 0.01mm 面変位したときに，空間フィルターのピンホール径 dp に対する反射膜面，およびディスク基板表面の面変位を求めた．計算結果を図 8 に示す．ピンホール径が 0.1mm 以下の場合には，ディスク基板表面からの反射光による面変位は空間フィルターにより完全に遮光され，反射膜面による面変位のみを抽出できる．ピンホール径が 0.1mm より大きくなるとともに，ディスク基板表面からの反射光が空間フィルターを通過するようになり，通過量は増えてくるが，ピンホール径が 0.29mm 以上で通過量は一定となっている．したがって，ピンホール径が 0.1mm より大きくなるとディスク基板表面の反射光が反射膜面の面変位信号に影響してくるようになることがわかった．

4.4 ピンホール径の影響

空間フィルターのピンホール径 dp の大きさが反射膜面の面変位，および面傾き特性に及ぼす影響を検討した．図 9 は $\theta_T=\theta_R=0\text{rad}$ の場合の面変位特性を示す．ピンホール径が 0.1mm より小さい場合は，面変位が大きくなると反射膜面からの反射光も空間フィルターにより遮光されるために，面変位の検出範囲は狭くなっている．また，ピンホール径が 0.1mm より大きい場合は，面変位の検出範囲は広がっているが，図 8 に説明したようにディスク基板表面からの反射光が空間フィルターを通過するようになるために，ディスク基板表面の影響が出てくる．これにより，ピンホール径の大きさはディスクの面変位特性に大きく影響を及ぼすことがわかった．図 10 は $d=0\text{mm}$ ， $\theta_R=0\text{rad}$ の場合の周方向面傾き特性を示す．ピンホール径の大きさに影響されず検出範囲は $\pm 0.015\text{rad}$ 以上になることがわかった．図示していないが，同様に半径方向面傾き

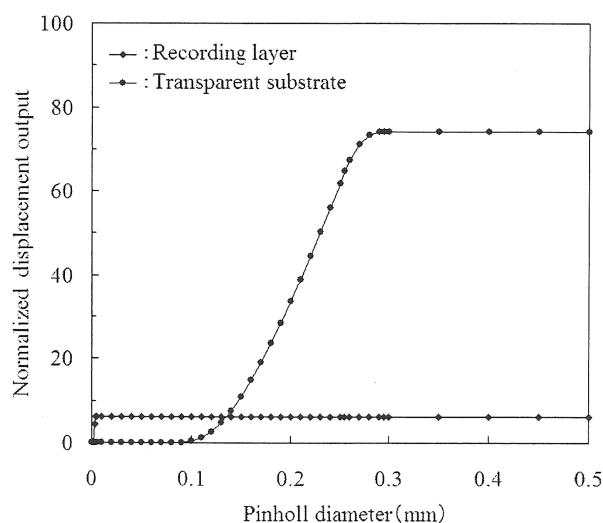


Fig.8 Displacements of recording layer and transparent substrate versus pinhole diameter

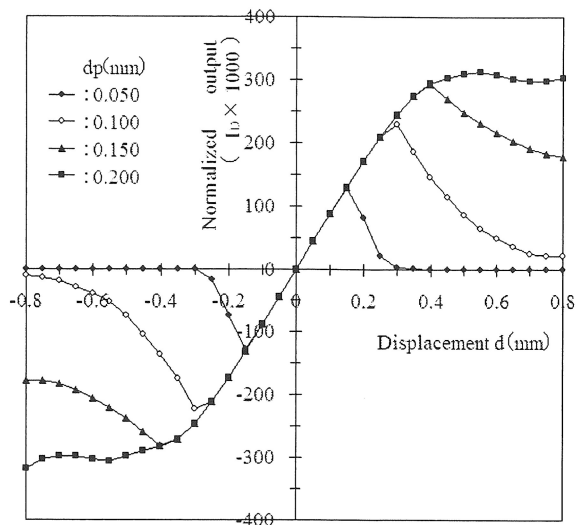


Fig.9 Displacement characteristics versus pinhole diameter
($\theta_T = \theta_R = 0 \text{ rad}$)

特性も、ピンホール径の大きさに影響されず検出範囲は $\pm 0.015 \text{ rad}$ 以上になることを確認しており、ピンホール径の大きさが面傾き特性に及ぼす影響は小さいことがわかった。

以上の結果、ピンホール径が 0.1 mm より大きい場合は、ディスク基板表面の影響が生じ、小さい場合は面傾きの検出範囲は変化しないが、面変位の検出範囲は狭くなることから、ピンホール径は 0.1 mm が最適であることがわかった。

4.5 多次元変位の静特性

4.5.1 面変位特性

ディスク反射膜面の面変位 d に対する面変位の出力特性を求めた。図 11 は測定面が周方向に $|\theta_T| \leq$

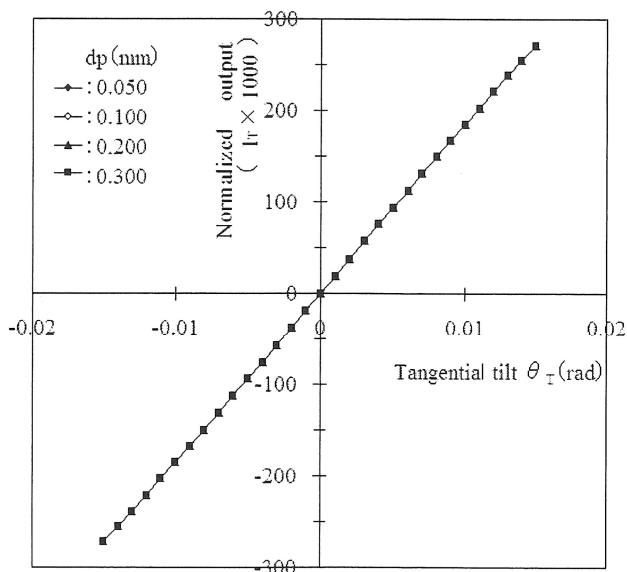


Fig.10 Tangential tilt characteristics versus pinhole diameter
($d = 0 \text{ mm}$, $\theta_R = 0 \text{ rad}$)

0.0088 rad の範囲で傾いている状態における面変位特性を示す。面変位の直線性の範囲は $|d| \leq 0.1 \text{ mm}$ となる。図 12 は測定面が半径方向に $|\theta_R| \leq 0.0088 \text{ rad}$ の範囲で傾いている状態における面変位特性である。

面変位の直線性の範囲は $|d| \leq 0.2 \text{ mm}$ となる。上記シミュレーション結果より、周方向と半径方向の面傾き $\pm 0.0088 \text{ rad}$ の範囲内では、面変位は $|d| \leq 0.1 \text{ mm}$ の範囲で直線性を得られることがわかった。

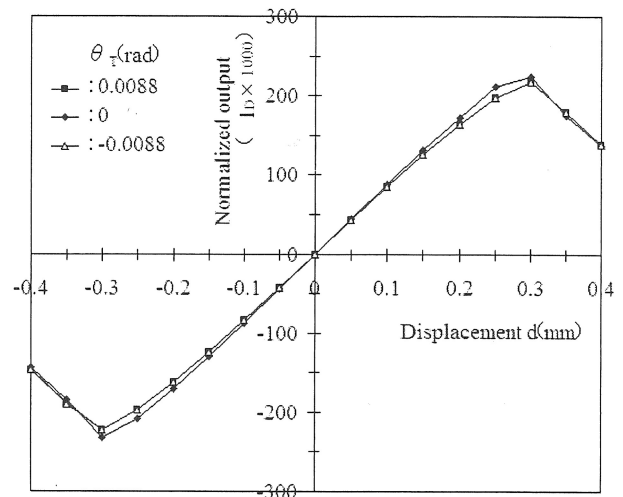


Fig.11 Displacement characteristics
($\theta_T = \pm 0.0088 \text{ rad}$, $\theta_R = 0 \text{ rad}$)

4.5.2 面傾き特性

ディスク反射膜面の周方向の面傾き θ_T に対する面傾きの出力特性を求めた。図 12 は反射膜面が半径方向に $\theta_R = 0.0088 \text{ rad}$ 傾き、さらに $|d| \leq 0.1 \text{ mm}$ の範囲で面変位している状態での周方向面傾き特性を示す。 $|\theta_T| \leq 0.0088 \text{ rad}$ の範囲において直線性が得られている。図示していないが、同様に測定面が周方向に $\theta_T = 0.0088 \text{ rad}$ 傾くとともに、さらに $|d| \leq 0.1 \text{ mm}$

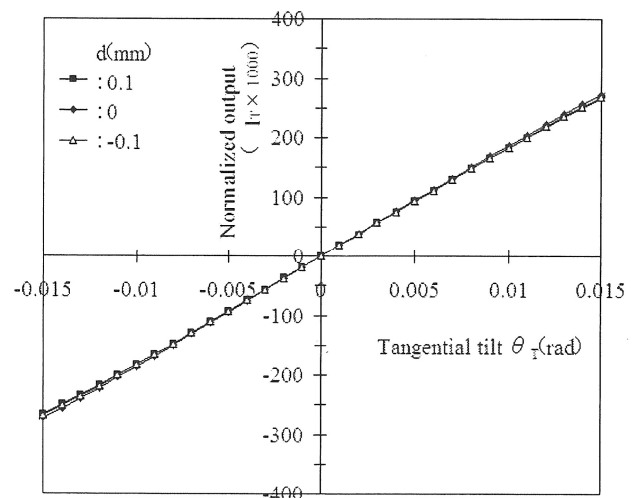


Fig.12 Tangential tilt characteristics
($d = \pm 0.1 \text{ mm}$, $\theta_R = 0.0088 \text{ rad}$)

の範囲で面変位している状態での半径方向面傾きは、 $|\theta_R| \leq 0.0088\text{rad}$ の範囲において直線性が得られることを確認した。

以上の検討結果から、光ヘッドの光学系に測定面分離方式を組み入れた多次元変位測定方式においても、前報⁽³⁾で述べた測定物が Al ミラー鏡面体の場合と同じ検出範囲が得られることがわかった。そこで、本報では、代表的な計算例のみを図 11, 12 に示した。上記シミュレーション結果により、ピンホール径が 0.1mm の場合、面変位 $|d| \leq 0.1\text{mm}$ 、周方向面傾き $|\theta_T| \leq 0.0088\text{rad}$ 、および半径方向面傾き $|\theta_R| \leq 0.0088\text{rad}$ の範囲を独立して測定できる可能性を得た。

5. 実験結果

5.1 測定面分離の光学系

光ディスクの測定面分離に用いる空間フィルターの効果を実験的に検討するために、図 13 に示す方法でディスク基板表面からの反射光が反射膜面からの反射光による面変位信号に及ぼす影響を評価した。

5.2 測定面分離の実験

実験は多次元変位測定光学系の対物レンズの焦点位置に、Al ミラーを配置固定した。この位置は、光ディスクの反射膜面に相当する位置でもある。さらに、Al ミラーの位置に対して、対物レンズ側へ 0.79mm 離れた位置(PC 樹脂のディスク基板の屈折率 $n=1.58$ として、PC の光ディスク基板厚み 1.2mm に相当)に厚さ 3mm のガラス板を配置した。またガラス板の対物レンズ側の面には、反射率 0.2% 以下の AR コートを施し、他方の Al ミラー側の面は AR コートなしで、反射率は約 4% である。ディスク基板表面に相当する AR コートなしのガラス面を Al ミラーに対して左右に $\pm 0.2\text{mm}$ の範囲、変位させて、Al ミラーの反射光による面変位信号の変化を測定した。実験結果を図 14 に示す。空間フィルターがない場合、面変位信号は $\pm 10\mu\text{m}$ 変動するのに対して、空間フィルターがある場合は、 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 程度しか変動していない。この実験により、空間フィルターは

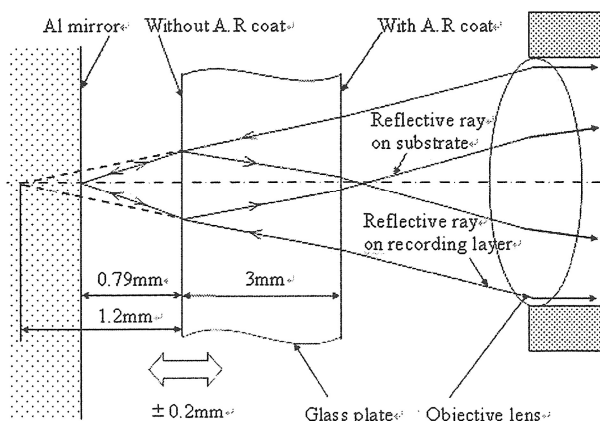


Fig.13 Experimental system testing the separate method of reflective ray on the optical disk

基板表面と反射膜面との反射光を分離するのに有効であることを実験でも確認できた。

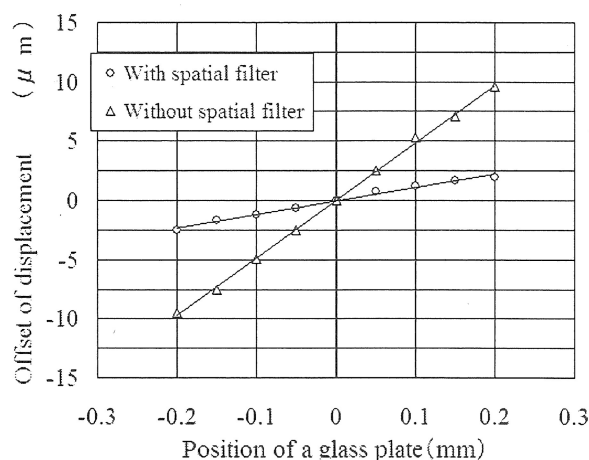


Fig.14 Effect of the spatial filter

6. 結 言

(1) 測定面の手前に光が透過する透明な基板を有する測定物に対し、前後差動検出方式と空間フィルターによる測定面分離方式を提案し、基板表面の傷等の影響が生じない多次元変位計測方法を開発した。本手法により基板膜面機械特性の多次元評価が可能になった。

(2) 光線追跡による光学解析を行い、透明基板面と測定面の反射光による測定面分離特性、および多次元変位特性を明らかにし、その妥当性を検証できた。

(3) 測定面の多次元変位の変化に対して、光検出器上での光スポットの移動と光スポット形状変化の関係をシミュレーションにより明確にした。

(4) 測定面分離に用いる空間フィルターのピンホール径の最適な大きさを決定した。ピンホール径の大きさは測定面の面変位特性に大きく影響し、面傾き特性に及ぼす影響は小さいことがわかった。

本研究は科研費「20500500」の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- (1) Vyce, J.R., An Optical Noncontacting Surface Sensor, Appl.Opt., 8-11(1969), 2301.
- (2) 山内良明・ほか 2 名, 結像型変位計の開発, 機講論, 303 (1988), 73-75.
- (3) 田中義人・石井純子, 光学方式による多次元変位計測に関する研究, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.41, (2007), 41-46
- (4) ISO/IEC JTC 1, Information Technology -130 mm Optical Disk Cartridges-Capacity:5.2Gbytes per Cartridge-For Information Interchange, ISO/IEC DIS15286, (1998), 21-22.
- (5) Francis A.Jenkins, Fundamental Optics, (1981), 3-23, McGRAW-HILL
- (6) 鈴木達郎, 応用光学 I, (1985), 51-52, 朝倉書店

(2008年10月7日 受理)