

光学方式による多次元変位計測に関する研究

田中 義人・石井 純子

A Multi-Dimensional Displacement Measurement Based on the Differential Optics

Yoshito TANAKA and Junko ISHII

Abstract

According to the increasing of recording density of optical disks, it is widely demanded a multi-dimensional displacement sensor which can measure in-process a mechanical characteristics of the optical disk such as displacement and inclination. The astigmatic focus error detection is a conventional and typical method to measure the characteristics; however it can measure only one dimension of the displacement. In this study, it is examined that the measuring method of the multi-dimensional displacement, which can measure not only horizontal displacement, but also tangential and radial inclinations of the specimen surface simultaneously. Also it is invented the differential optical detection method that uses a pair of quadrant optoelectronic detectors placed at the conjugate positions of the focal plane of the detection lens. In the body of the text, the measurement principles and the basic analysis of the optical system with ray tracing are described first, then the effectiveness of this principle and method are confirmed with the results of simulations.

Key words: Optical Measurement, Laser, Optical Instruments, Multi-Dimensional Displacement, Ray Tracing, Differential Optical Detection

1. 緒 言

光ディスクの記録密度の向上に伴い、記録媒体の機械特性の仕様が厳しくなっている。このためには、光ディスク記録媒体の面変位や面傾き角の機械特性の改善が必要であり、また品質管理の面から上記特性をインプロセスで計測できる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になってきている。

従来、被測定面の微小変位を非接触で測定可能な光学方式による測定方法は、三角測距方式、非点収差方式等がある⁽¹⁾⁽²⁾。三角測距方式は、光の散乱を利用するために光ディスク等の鏡面体の測定ができず測定面の傾きの影響を受けやすい。また、非点収差方式は、測定面に傾きや傷がある場合にその影響を受けやすい。これらは、いずれも被測定面の一方向のみの面変位を測定するものであった。

本研究では、被測定面の面変位だけでなく、周方向と半径方向の二方向の面傾きをも同時に検出可能な光学式による非接触な多次元変位計測法について検討した。検出レンズの焦点面に対し、前後の共役の位置に一對の四分割光検出器を配置した光学式による多次元変位計測方式を提案した。筆者等は、光学方式、検出器の構成、信号の演算方式を述べるとともに、光線追跡による光学系のシミュレーションによって、本測定原理が有効であることを確認した。

2. 多次元変位の測定原理

2.1 測定原理

非接触多次元変位測定の光学系の構成を図1に示す。半導体レーザから発射されたレーザ光は、コリメータレンズにより平行光に変換され、開口絞りで絞込まれた後、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。測定面で反射された光は、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構成にする。本報では、この光学方式を前後差動方式と呼ぶ。

測定物が対物レンズの焦点位置から変位した場合や対物レンズの光軸に対して傾いたとき、光検出器1, 2の受光面上の光スポット形状と位置が変化し、光検出器1, 2の検出光量に変化する。この二つの光検出器の検出光量を検出回路で演算することにより、測定物の面変位や面傾き角を求める。

2.2 光検出器

前後差動方式に用いる光検出器1, 2の受光面の構成を図2に示す。光検出器1, 2とも同一形状の受光面である。この光検出器は、受光面の中心点に対して、左右対称に二分割した長方形の要素a, b (e, f) と、これら要素の暗線幅の間に、上下対称に二分割した長方形の

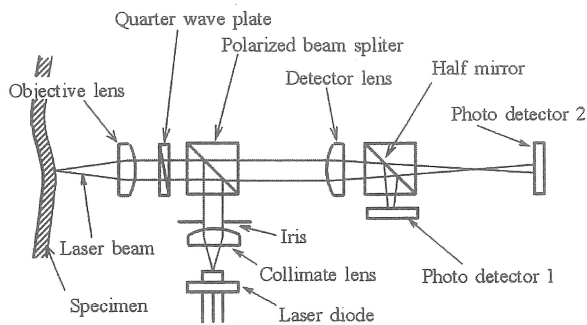


Fig.1 Construction of the optical system

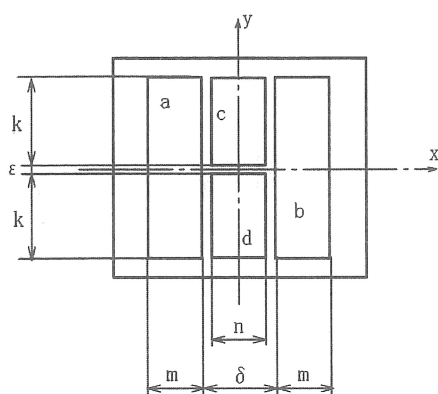


Fig.2 Dimension and shape of the photo detector

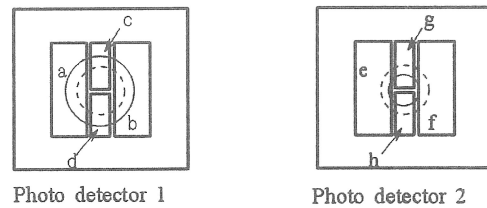
要素 c, d (g, h) を有する四分割構造にした。

ここに、上述の記号は光検出器 1 の受光面の各要素、
() 内の記号は、光検出器 2 の受光面の各要素を表す。

図 3 に光検出器 1, 2 の受光面上の光スポットの形状と位置の関係を示す。測定物の位置が対物レンズの焦点位置と一致する場合は、光検出器 1, 2 の受光面の中心に、それぞれ同じ大きさの点線で示した円形の光スポットが形成される。

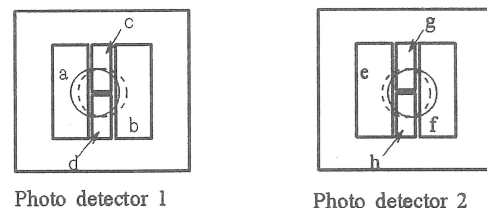
2.3 測定物の面変位検出

図 3(a) は、測定物の変位と光検出器受光面上の光スポット形状の関係を示す。測定物の位置が対物レンズの焦点位置から前後にずれて変位した場合は、光検出器受光面上の光スポットの中心位置は移動せず、実線で示すように円形の光スポットの大きさが変化する。測定物が対物レンズの焦点位置より対物レンズ側に近づくと、光検出器 1 上の光スポット径は大きくなり、光検出器 2 上の光スポット径は小さくなる。逆に測定物が対物レンズ側と反対側に離れると、光検出器 1 上の光スポット径は小さくなり、光検出器 2 上の光スポット径は大きくなる。したがって、測定物の面変位信号 I_D は、式 (1) に示すように、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 の検出光量の差によって求めることができる。



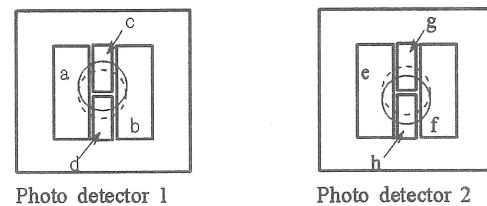
(a) Influence of displacement

(Solid line circle : out of focus
Broken line circle : in focus)



(b) Influence of tangential tilt

(Solid line circle : with tangential tilt
Broken line circle : without tilt)



(c) Influence of radial tilt

(Solid line circle : with radial tilt
Broken line circle : without tilt)

Fig.3 Image of laser beam spot on photo detectors

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

ここに、

I_a, I_b : 検出器 1 の左右方向に配置された受光面要素 a, b の検出光量

I_e, I_f : 検出器 2 の左右方向に配置された受光面要素 e, f の検出光量

I_s : 検出器 1 と 2 による総受光量

とおいている。

式 (1) では、光学系の外乱等の影響を補償するために、検出光量の差を総受光量 I_s で正規化している。

次に、測定物が周方向、または半径方向に傾いたとき、これら面傾きが面変位信号に及ぼす影響を検討した。測定物が対物レンズの焦点位置から変位している状態において、これら面傾きが生じた場合、光スポットの形状とその大きさは変化しないが、光スポットの受光位置が受光面の中心点から移動する。光検出器 1, 2 は、検出レン

ズの焦点面に対して、それぞれ共役の位置に配置されているので、光スポットが光検出器1, 2の受光面の中心から外れて移動する量は同じで、移動方向が逆となる。したがって、光検出器1, 2の受光量の変化量は等しくなるために、式(1)を計算することにより、これら面傾き信号成分は除去され、面変位信号のみを求めることができる。すなわち、前後作動方式による面変位の測定は、測定物の面傾きの影響を受けにくい検出方式である。

2.4 測定物の面傾きの検出

測定物が対物レンズの光軸に対して、測定物の周方向、または半径方向に傾いた場合、光検出器1, 2の各受光面要素の検出光量は、これら面傾きに対応して変化する。

測定物が周方向に傾いた場合は、図3(b)に示すように、光検出器1, 2の受光面上の光スポット位置は、各受光面上の中心位置から左右方向に互いに反対方向に移動するが、光スポット形状は変化しない。

したがって、測定物の周方向の面傾き信号 I_T は、各検出器受光面上の左右方向に配置された受光面要素 a , b と e , f を用いて、式(2)によって求めることができる。

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

同様にして、測定物が半径方向に傾いた場合は、光検出器1, 2の受光面上の光スポット位置は、図3(c)に示すように各受光面上の中心位置から上下方向に互いに反対方向に移動するが、光スポット形状は変化しない。したがって、測定物の半径方向の面傾き信号 I_R は、各光検出器受光面上の上下方向に配置された受光面要素 c , d と g , h を用いて、式(3)によって求めることができる。

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

ここに、

I_c , I_d : 検出器1の上下方向に配置された受光面要素 c , d の検出光量

I_g , I_h : 検出器2の上下方向に配置された受光面要素 g , h の検出光量

とされている。

また、式(2), (3)では、式(1)と同様に計算結果を総受光量 I_s で正規化している。

次に、面変位が面傾き信号に及ぼす影響を検討した。測定物が周方向、または半径方向に傾いている状態において、面変位が生じた場合、測定物からの反射光による光スポットの大きさは変化するが、受光面上の光スポットの受光位置は移動しない。したがって、式(2), (3)を計算することにより、面変位信号成分は除去され、周方向、および半径方向の面傾き信号のみをそれぞれ独立に求めることができる。

上述の式(1)~(3)の演算は、図4に示す検出回路のブロック図によって行った。

3. 光学系の解析

3.1 解析モデル

図1に示した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1を簡略化した光学系の解析モデルを図5に示す。半導体レーザから出射される光源から測定物間までのコリメートレンズ、開口絞り、偏光ビームスプリッタ、 $\lambda/4$ 波長板、対物レンズからなる光学系の構成を、対物レンズのみとし、測定物から検出器間までの対物レンズ、 $\lambda/4$ 波長板、偏光ビームスプリッタ、検出レンズ、ハーフミラーからなる光学系の構成を、対物レンズと検出レンズのみの構成として検討する。また、検出レンズの焦点面に対して、前側、および後側の共役の位置に光検出器1, 2をそれぞれ配置する簡略化した解析モデルにした。

光源である半導体レーザから放射される光ビームの光強度 I は、式(4)のようにガウス分布するとして、

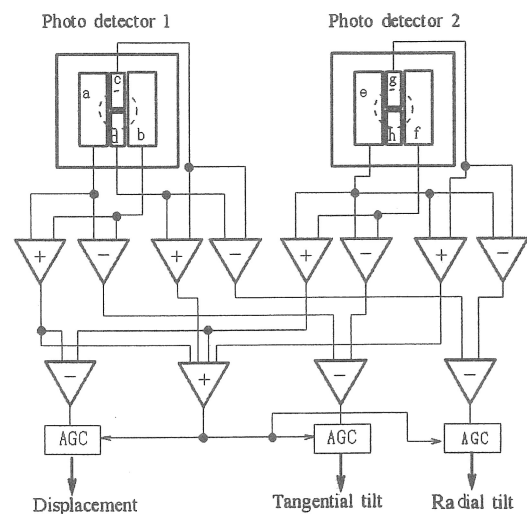


Fig.4 Block diagram of the detection circuit

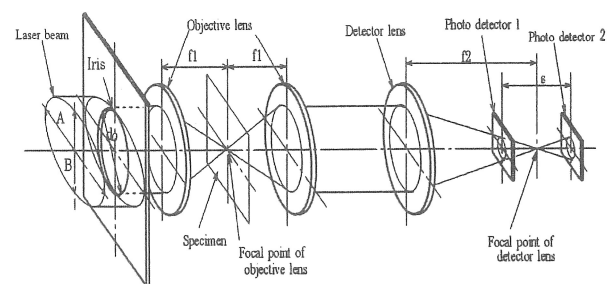


Fig.5 Simulation model of the optical sensor

$$I = EXP \left\{ - \left(\frac{2x_0}{A} \right)^2 - \left(\frac{2y_0}{B} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots (4)$$

ここに,

A : 水平方向ビーム直径

B : 垂直方向ビーム直径

(x_0, y_0) : 半導体レーザ放出面の2次元座標とした.

用いる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出射した 1087 個の要素の光線の強度は, 式(4)の分布をするものとして, 幾何光学による光線追跡を行った⁽³⁾. 光線追跡法により, 光学系を構成する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求めていった. 最終的には, 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 , 周方向の面傾き角 θ_T , および半径方向の面傾き角 θ_R に対応する信号 I_D, I_T , および I_R を求めた. シミュレーションに用いた各光学部品の仕様を表 1 に示す.

以下に示すシミュレーション結果では, 式(1)~(3)で得られる正規化した値 I_D, I_T , および I_R を各々 1000 倍して求めた.

3.2 シミュレーション結果

3.2.1 面変位特性

測定物の面変位 d に対する面変位の出力特性を求めた.

図 6~8 にシミュレーション結果を示す. 図 6, 7 は測定物が対物レンズの光軸に対して周方向に θ_T 傾いている状態における面変位特性である. 図 6 は $|\theta_T| \leq 0.0044\text{rad}$ (0.25°), $\theta_R = 0\text{rad}$ の状態を, 図 7 は $|\theta_T| \leq 0.0088$

$\text{rad}(0.50^\circ)$, $\theta_R = 0\text{rad}$ の状態を示す. 直線性が保たれる面変位の検出範囲は, 図 6 では $|d| \leq 0.2\text{mm}$ であるが, θ_T の大きさが倍になると, 図 7 のように $|d| \leq 0.1\text{mm}$ に低下する.

図 8 は測定物が対物レンズの光軸に対して半径方向のみに $|\theta_R| \leq 0.0088\text{rad}$ 傾いている状態における面変位の出力特性である. 直線性が保たれる面変位の検出範囲は, $|d| \leq 0.2\text{mm}$ となる.

上記のシミュレーション結果より, 面傾き $\pm 0.0088\text{rad}$ の範囲内では, 面変位は $|d| \leq 0.1\text{mm}$ の検出範囲で直線性を得られることがわかった.

また, 図 6, 8 より, 同じ大きさの面変位に対して, 周方向面傾きは, 半径方向面傾きよりも直線性の範囲が狭くなることがわかった. これは, 図 2 の光検出器の受光面の構成に示したように, 受光面要素 $c(g), d(h)$ 間の暗線幅 ε が 0.04mm に対して, 受光面要素 $a(e), b(f)$ 間の暗線幅 δ が 0.4mm と大きいためである. すなわち, 周方向と半径方向の面傾きは同じでも, これら面

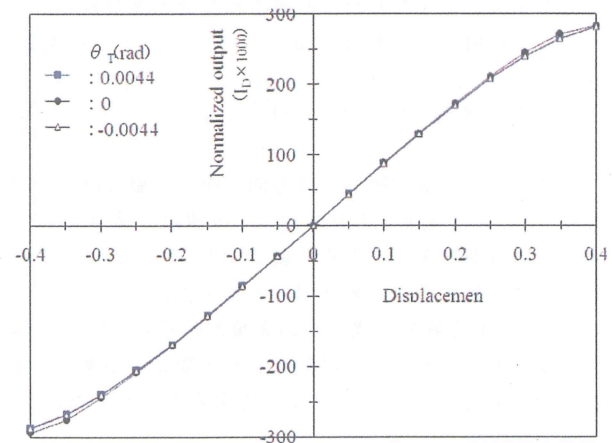


Fig.6 Displacement characteristics
($\theta_T = \pm 0.0044\text{rad}$, $\theta_R = 0\text{rad}$)

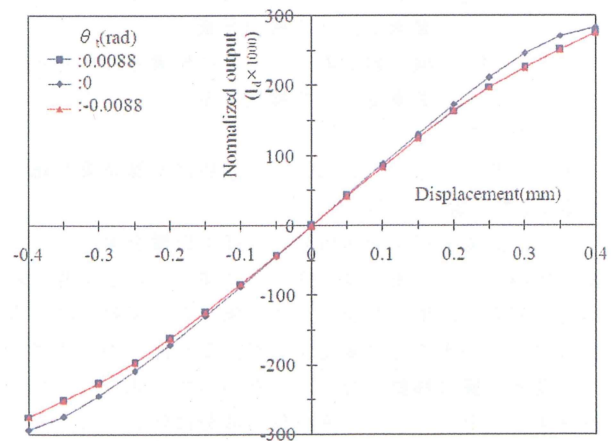


Fig.7 Displacement characteristics
($\theta_T = \pm 0.0088\text{rad}$, $\theta_R = 0\text{rad}$)

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	: do	4.0
Diameter of horizontal Gaussian beam	: A	8.0
Diameter of vertical Gaussian beam	: B	4.0
Width of photo detector elements a and b	: m	0.3
Width of dark line between photo detector elements a and b	: δ	0.4
Width of photo detector elements c and d	: n	0.3
Length of photo detector elements c and d	: k	0.48
Width of dark line between photo detector elements c and d	: ε	0.04

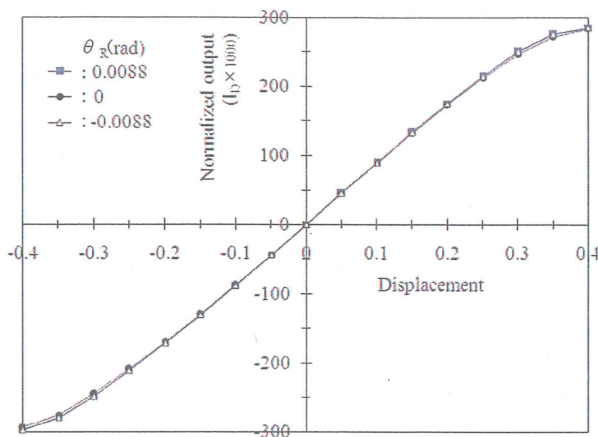


Fig.8 Displacement characteristics
($\theta_T = 0\text{rad}$, $\theta_R = \pm 0.0088\text{rad}$)

傾きが大きくなると、先に、周方向面傾きによって、光スポットが受光面要素 a (e), b (f) の領域から外れ始めるためである。

3.2.2 周方向面傾きの特性

測定物の周方向面傾き θ_T に対する面傾きの出力特性を求めた。

図 9, 10 にシミュレーション結果を示す。図 9 は測定面が半径方向のみに θ_R 傾いている状態で、 $d = 0\text{mm}$, $|\theta_R| \leq 0.0088\text{rad}$ の状態における周方向面傾きの出力特性を示す。直線性が保たれる周方向面傾きの検出範囲は、 $|\theta_T| \leq 0.015\text{rad}$ となる。

図 10 は測定面が半径方向に $\theta_R = 0.0088\text{rad}$ 傾いているとともに、さらに $|d| \leq 0.1\text{mm}$ の範囲で変位している状態での周方向面傾きの出力特性を示す。直線性が保たれる周方向面傾きの検出範囲は、 $|\theta_T| \leq 0.0088\text{rad}$ となることがわかった。

図 9 の結果より、面変位が存在しない場合は、周方向

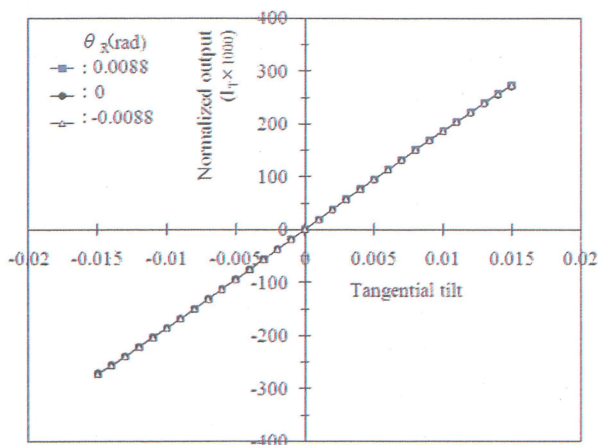


Fig.9 Tangential tilt characteristics
($d = 0\text{mm}$, $\theta_R = \pm 0.0088\text{rad}$)

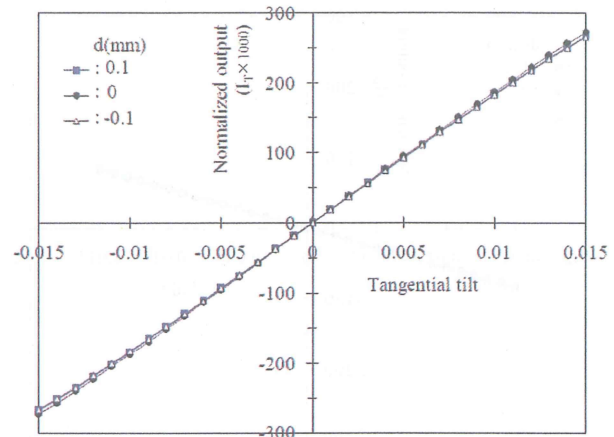


Fig.10 Tangential tilt characteristics
($d = \pm 0.1\text{mm}$, $\theta_R = 0.0088\text{rad}$)

面傾きの直線性の範囲は広く、周方向面傾きは、半径方向面傾きの影響を受けにくいことがわかった。これは、半径方向面傾きが存在している場合、光スポットは検出器受光面上を上下方向に移動した状態にある。これに周方向面傾きが生じても光スポットは左右方向のみに移動するだけであり、式(2)の計算では、周方向面傾きは、半径方向面傾きの影響を受けないためである。

また、図 10 の結果より、面変位が存在すると、光スポットは $d = 0\text{mm}$ での状態よりも拡大、または縮小され、受光面要素 a (e), または b (f) の境界近くの位置までくる。この状態で周方向面傾きが生じると、光スポットが受光面要素 a (e), または b (f) の領域から外れるために、面変位の影響を受けて周方向面傾きの検出範囲が狭くなることがわかった。

3.2.3 半径方向面傾きの特性

測定物の半径方向面傾き θ_R に対する面傾きの出力特性を求めた。図 11, 12 にシミュレーション結果を示す。

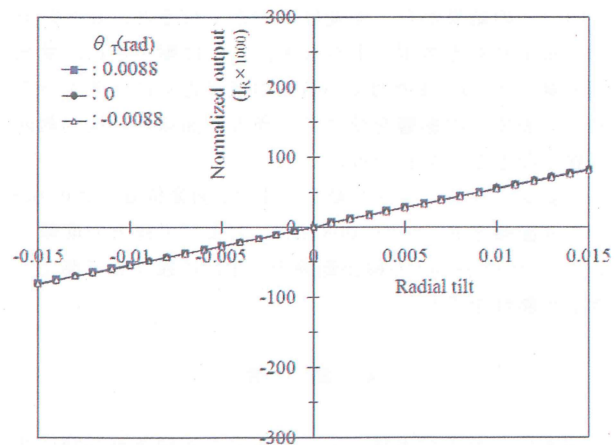


Fig.11 Radial tilt characteristics
($d = 0\text{mm}$, $\theta_T = \pm 0.0088\text{rad}$)

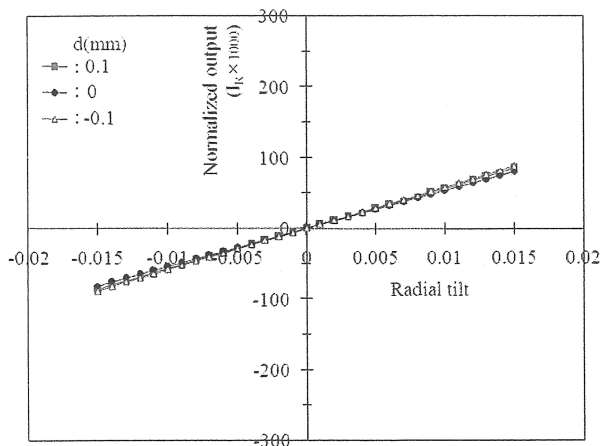


Fig.12 Radial tilt characteristics
($d = \pm 0.1\text{mm}$, $\theta_r = 0.0088\text{rad}$)

図 11 は測定面が周方向のみに θ_r 傾いている状態で、 $d = 0\text{mm}$ 、 $|\theta_r| \leq 0.0088\text{rad}$ の状態の半径方向面傾きの出力特性を示す。直線性が保たれる周方向面傾きの検出範囲は、 $|\theta_r| \leq 0.015\text{rad}$ となる。

図 12 は測定面が周方向に $\theta_r = 0.0088\text{rad}$ 傾くとともに、さらに $|d| \leq 0.1\text{mm}$ の範囲で変位している状態での半径方向面傾きの出力特性を示す。直線性が保たれる半径方向面傾きの検出範囲は、 $|\theta_r| \leq 0.0088\text{rad}$ となることがわかった。

図 11 の結果より、面変位が存在しない場合は、半径方向面傾きは直線性の範囲が広くなり、周方向面傾きの影響を受けにくいことがわかった。これは周方向面傾きが存在している場合、光スポットは検出器受光面上を左右に移動した状態にある。この状態から測定物が半径方向に傾いても、光スポットは上下方向のみに移動し、式 (3) の計算では、半径方向面傾きは、周方向面傾きの影響を受けないためである。

図 12 の結果から、面変位が大きくなると、 $d = 0\text{mm}$ の状態よりも光スポットが拡大、または縮小され、受光面要素 $c(g)$ 、または $d(h)$ の境界近くに位置するために、面変位の影響を受けて半径方向面傾きの検出範囲が狭くなることがわかった。

上記シミュレーション結果により、面変位 $d = \pm 0.1\text{mm}$ 、周方向面傾き $\theta_r = \pm 0.0088\text{rad}$ 、および半径方向面傾き $\theta_r = \pm 0.0088\text{rad}$ の検出範囲を、互いに独立して測定できる可能性を得た。

4. 結 言

面変位、および半径方向と周方向の面傾きが同時に測定可能な非接触な多次元変位検出法を提案し、解析と光

線追跡による光学系のシミュレーションにより以下の結論を得た。

- (1) 前後差動方式を採用した光学系を提案し、光線追跡による解析を行った。
- (2) 光ビームスポット形状変化と検出範囲との関連により、多次元変位検出法の原理を明らかにした。
- (3) 鏡面体の被測定面に対するシミュレーション結果、面変位 $\pm 0.1\text{mm}$ 、周方向面傾き $\pm 0.0088\text{rad}$ 、および半径方向面傾き $\pm 0.0088\text{rad}$ の範囲を、それぞれ独立に測定できることがわかった。

文 献

- (1) J. R. Vyce, An Optical Noncontacting Surface Sensor, Appl. Opt., 2301(1969), pp. 8-11.
- (2) 小池誠・ほか 3 名, 非点収差方式による超音波変位計測法に関する研究, 機論, 51-584 (1995), pp. 1728-1733.
- (3) 松居吉哉, レンズ設計法, 共立出版(1987), pp. 68-69.

(2007年10月4日 受理)