光学式簡易変位センサの試作開発*

三 好 隆 志** 近 藤 司** 斎 藤 勝 政**
足 立 哲 朗*** 加 藤 英 昭*** 小 里 隆 昭***

Development of a Simple Displacement Sensor by means of Optical Method

Takashi MIYOSHI, Tsukasa KONDO, Katsumasa SAITO,
Tetsuo ADACHI, Hideaki KATO and Takaaki ORI

The purpose of this paper is to describe a simple non-contact displacement sensor by means of optical method. Scattered light from rough work surface is separated into two light spots by passing through two apertures. The spots are detected with two photo-electric devices shifted by its radius of detecting area to the aperture axis. Intensity ratio, $\rho = (I_b - I_a) / (I_b + I_a)$, is proportional to the displacement of work surface. The displacement sensor with this principle has been developed. The sensor is 70 mm in height and 54 mm in diameter. The sensor consists of two photodiodes, two quartz glass bars, one LED as a light source and one condensing lens. It is effective for many kinds of work materials having the surface roughness of more than $1 \mu\text{m} R_z$. The sensor measures 8 mm of range and the resolution for 5 mm range is approximately $2 \mu\text{m}$ with $\pm 2 \mu\text{m}$ repeatability. The sensor also measures the tilted work surface displacement up to 6 degree from the optical axis.

Key words: optical measurement, non-contact measurement, optical sensor, displacement sensor

1. 結 論

物体表面の変位を測定する方法は大きく分けて接触式と非接触式があり、それぞれ長所、短所を持っている。接触式は一般に信頼性、取扱いの容易さ、価格などの点で非接触式に比べ、優れているが、高速性や寿命の点では劣り、また接触圧力による変形や摩擦、摩耗の問題が生じる。一方、非接触式においても、電気式は紙、ゴム、プラスチックのような非金属材料や複合材料の変位測定は困難であるため、これらの材料に対しても有効である信頼性の高い簡易な光学式変位センサの開発が望まれている。従来から被測定物に照射した光の散乱光から物体表面の変位（距離）を検出する方法が数多く提案されている。最も単純な方法は、反射光量が変位に対して比例関係にあることを利用するもので、直接反射光量を測定¹⁾²⁾するため安価なシステムで構成することが出来るが、被測定面の性状や環境のわずかな変化で反射光量は影響を受け、信頼性の

ある高精度な測定は難しい。一方、被測定物の変位と比例関係にある反射光の光点位置を検出する測定法^{3)~5)}（例えば三角測量）においては、光点位置を直接測定するため、比較的高価な光位置検出素子と信号処理回路等が必要となり全体として高価な測定システムとなる。そこで本研究は、被測定面で反射した散乱光と2つの小さな円開口を通して、光スポットとし、その2光点の位置と光量の関係から、容易に変位を測定する方法を提案した。そして安価な信頼性の高い、しかも小型・軽量の光学式簡易変位センサの試作開発を行ったので報告する。

2. 非接触変位センサの開発意義

これまでに数多くの寸法、変位検出用センサが開発され⁶⁾利用されている。表1にこれまでに開発されている非接触を中心とした代表的な変位検出用センサとその特徴を示す。

PSD (Position Sensitive Detector) と呼ばれるシリコンフォトダイオードを応用した半導体位置検出器は連続した位置検出が可能であり、高速で移動する光点の動きを高精度で検出できる。このPSDは投光部に半導体レーザーやLEDの光源を必要とし、三角測量

* 原稿受付 昭和62年3月11日。昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会（昭和61年10月10日）にて発表

** 正 会 員 北海道大学工学部（札幌市北区北13条西8丁目）

*** 正 会 員 日本電装（株）（刈谷市昭和町1-1）

Table 1 Properties of typical displacement sensors

Type	Measuring range	Resolution	Response time
Photoelectric current (Position Sensitive Detector)	30 mm(line) 10 mm(area)	5 μ m	20 μ s
Electric capacity	1-10 mm	1-10 μ m	1 ms
Eddy current	1-50 mm	1-50 μ m	0.1 ms
Ultrasonic wave	1-200 mm	10 μ m-2 mm	10 ms
Differential transformer	50 μ m-200 mm	0.01 μ m-0.5 mm	2 ms

法を利用した変位センサの光点位置検出器として用いられており、比較的高価なセンサである。静電容量センサはコンデンサの静電容量を検出することによって被測定面とセンサ端面のギャップを測定するものであるが、誘電率の変化する材質やセンサ面積以下の小型部品や丸棒の変位検出は困難である。渦電流センサは被測定面と検出コイルのインダクタンスの変化を検出する方法であるが、被測定物は金属に限定され、また静電容量センサ同様、材質やセンサ面積によって影響を受ける。超音波センサは超音波トランスデューサから超音波を発射し、被測定面からの反射波を再びトランスデューサで受信するまでの時間を測定し、変位を求める方法であるが、音の減衰の大きい測定物には困難であり、また光とは異なり応答時間が遅く、分解能も低いという欠点を持っている。差動トランスは2次コイルの間の電圧差がコアの変化に比例することを利用したセンサであり、構造が簡単で比較的安価で小型であるが、安定した交流電源を必要とし、温度ドリフトが問題となり、応答時間も遅い。以上のように従来の変位検出に用いられるセンサはそれぞれ利点、欠点を持っており、また必ずしも単体で変位センサを構成しているわけではなく、電源（または光源）、検出器、

信号処理回路などを含めた小型で高性能な変位センサの開発が望まれている。そこで筆者らは応答時間が早く、電気量への変換が容易な光学式を採用し、しかも被測定物の材質に影響されことなく測定原理が簡単で、多方面の工業分野で利用が考え

られる高性能（測定範囲 5 mm、分解能 5 μ m）な非接触変位センサの開発を行った。

3. 測定原理

提案した変位センサの測定原理の概略を図1示す。入射光軸に対称な位置に2つの開口があり、その開口を通過する反射光の光スポットと同じ大きさの2つの円形をした受光素子（A, B）が、原点 P と開口の中心を通る軸に対して、素子半径分だけ一方方向にシフトした状態で置かれている。このような構成において、被測定面は拡散反射面で、反射光は散乱する場合を考える。被測定面が原点 P の位置にある場合（図1(2)）、開口を通過した反射光は受光素子に等しく入り、その光量は素子の受光面積に等価である。一方、原点 P より上下に変位した場合（図1(3), (1)）、光量は下方臨界位置では A 素子、上方臨界位置では B 素子のみで検出され A, B 両素子の光量差は変位を表すことになる。図2に光学系の概略図を示す。入射光軸（Z 軸）上の原点 P から d 離れた位置に2つの開口があり、その間隔を $2c$ とする。また原点 P から l 離れ、原点と開口の中心を結ぶ受光軸上にある点 O_A, O_B の間隔を $2b$ とする。いま、点 O_A, O_B を通り、受光軸上に垂直な軸

Fig. 1 Principle of displacement measurement by detecting intensity difference between two light spots

Fig. 2 Schematic diagram of optical geometry for measuring displacement

をそれぞれ ξ_A, ξ_B とし、この ξ_A, ξ_B 軸に中心を持つ半径 r の受光素子 A, B がその半径分だけ一方にシフトした状態で置かれている。ここで原点 P から下方への変位 z を正とし、光スポットの中心が点 O_A, O_B から時計回りの方向へ変化するときを正とする。このような光学系において、被測定面の変位に対し 2 光点の移動量はお互いに等しく、また方向は逆になるのである z の位置に対して光点位置 ξ は正、負 2 つ求まることになる。

変位 z と光点位置 ξ の関係は入射光軸と受光軸のなす角(受光角)を θ_0 とし、図 2 の $\triangle EFH$ と $\triangle CDH$ の相似形から、

$$c(\xi \cdot \sin \theta_0 + l + z) = (d + z)(b - \xi \cdot \cos \theta_0) \quad (1)$$

となり、A, B 両受光面に対して次式

$$\xi = \left| \frac{d \cdot b - c(l + z) + z \cdot b}{c \cdot \sin \theta_0 + d \cdot \cos \theta_0 + z \cdot \cos \theta_0} \right| \quad (2)$$

が与えられる。また簡単な幾何学から $c = d \cdot \tan \theta_0$, $b = l \cdot \tan \theta_0$, $b \cdot d = l \cdot c$ の関係を式 (2) に代入し、整理すると、

$$\xi = \left| \frac{(l - d) \cdot z \cdot \sin \theta_0}{d + z \cdot \cos^2 \theta_0} \right| \quad (3)$$

と表される。したがって受光角 θ_0 、原点 P からの開口および受光素子の位置 d, l が決まると光点位置 ξ は変位 z によって与えられることになる。

次に光スポットの大きさは受光素子と同じである場

合、半径 r の円がお互いに重なる受光量と等価な面積 S (図 2 (b) における斜線部) は

$$S = 2 \cdot r^2 \cdot (\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、

$$\sin \alpha = \frac{1}{r} \sqrt{r^2 - \left(\frac{r - \xi}{2} \right)^2}, \quad \cos \alpha = \frac{r - \xi}{2r}$$

であるから、式 (4) に代入すると、受光面積 S は

$$S = 2r^2 \cos^{-1} \left(\frac{r - \xi}{2r} \right) - (r - \xi) \sqrt{r^2 - \left(\frac{r - \xi}{2} \right)^2} \quad (5)$$

となる。受光素子の面積 (πr^2) で正規化すると

$$I = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{r - \xi}{2r} \right) - \frac{r - \xi}{\pi r^2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{r - \xi}{2} \right)^2} \quad (6)$$

のように表され、受光量を与える等価式を得ることができる。

上式 (6) のように表すと A, B 受光素子に入る光量 I_a, I_b は変位 z に比例して 0~1 まで変化することになる。ここで、被測定面の反射率や外乱光の影響を極力避けるために、次式のような対比光束 ρ を評価値としてとった。

$$\rho = \frac{I_b - I_a}{I_b + I_a} \quad (7)$$

上式 (3), (6), (7) から、一例として $r = 2 \text{ mm}$, $\theta_0 = 22^\circ$, $l = 20 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ mm}$ のときの、受光量 I_a, I_b および対比光束 ρ と変位 z の関係を解析的に求め図 3

Fig. 3 Intensity (I) accepted by each detector A, B and intensity ratio (ρ) obtained from theoretical analysis

に示す。 I_a は被測定面が遠ざかるに従い指数関数的に増加し、一方 I_b は減少している。対比受光束は $z = -3.66 \sim 9.87$ mm の約 13 mm の範囲において $\rho = -1 \sim 1$ の値を持ち直線性を示す範囲は約 8 mm である。以上の理論解析から r, θ_0, l, d を適当に設定することにより、要求する測定範囲、分解能を持つ変位センサを設計、開発することが可能となる。

Fig. 4 Structure and dimension of optical displacement sensor

4. 実験と検討

4.1 変位センサの試作

図4に試作した変位センサの構造図(a)と設計主要寸法(b)を示す。2個の円開口マスク(φ2 mm)①, 2本の石英ガラス棒(φ4 mm×20 mm)⑥, 2個の受光素子(シリコンフォトダイオード)⑦, 点光源(φ0.4 mm)を持つ発光素子(LED)⑧, 集光レンズ(φ10 mm, $f=10$ mm)⑨, からなる外径54 mm, 長さ70 mmのコンパクトな設計となっている。LEDの光源から発した光は集光レンズによってレンズから50 mmの位置に結像し、結像点近傍に置かれた被測定面から反射した光は円開口マスクを通り2つの光点に分離され、受光面におかれた石英ガラス棒を通過する際に繰り返し反射して、受光素子の検出面全体にわたって入射し、光電変換される。そして電気量に変換されたA, Bの受光量はデジタルボルトメータで電圧値として読み取られる。実験手順は図5に示すような試作した変位センサを2 μ mの分解能を持つ3次元座標測定器のZ軸に取り付け、まずA, B両受光素子に入る光量が等しくなるように($\rho=0$)被測定面と変位センサの位置決めを行い、その位置を原点とした($z=0$)。次にセンサを上下に移動させ、変位 z と光量 I_a, I_b を読み取り対比受光束 ρ の計算を行った。

4.2 変位センサの特性

図6に実験で使用した試料表面(鋼, ゴム, プラスチック, 紙)の粗さ断面曲線を示す。これらの試料の粗さ(R_z), 表面色, 粗さの方向, 傾きなどが測定値に与える影響を実験的に検討し、提案した変位センサの特性を明らかにした。まず最初に、白紙(8 μ m R_z)を例にとり、A, B両受光素子に入った光量 I_a, I_b (mV)および、対比受光束 ρ と変位 z の関係を求めた(図7)。 I_a は変位が大きくなるに従って増加し、ほぼ $z=4$ mmで最大となり、それ以上の変位では減少する傾向を示している。一方、 I_b は I_a とは逆に変位が大きくなるに従い減少し、 $z=4$ mm以上になると一定値に近づく傾向にある。このような I_a, I_b の特性は図3の解析結果と基本的によく一致している。しかし $z \geq 4$ mmにおける I_b の特性は

Fig. 5 A view of optical displacement sensor

Fig. 6 Surface roughness profiles in some kinds of workpieces

Fig. 7 Variation of intensity (I) and intensity ratio (ρ) with displacement (z)

解析結果と異なっている。この原因は $z=0$ mm 近傍で照射光はほぼ点と見なすことができ、また受光面における光点の広がり円形となるが、被測定面が原点より遠ざかると照射光点は大きくなり、受光面では楕円に近くなり、さらに光量が弱くなるために生じたものと考えられる。しかし、対比受光束は $z=-3\sim 6$ mm の範囲で $\rho=-0.85\sim 0.7$ まで変化し、約 8 mm の測定範囲を持っており、解析結果に近い特性を示している。図 8 は表面が白色で材質及び表面粗さが異なる試料の対比受光束 ρ と変位 z の関係を示したものである。比較的滑らかな表面 ($1\mu\text{mR}_z$) のプラスチック部品、うねりに近い粗さを持つゴム製品 ($3\mu\text{mR}_z$)、そして粗い ($8\mu\text{mR}_z$) 紙片にいたるまで、表面色が同じであれば材質や粗さの大きさの影響は無視できる。この原因は表面色が同じであれば、光に対する物性値（吸収率、反射率）がほぼ同程度であり、また表面粗さが $1\mu\text{mR}_z$ 以上の面は拡散反射面に近いためと考えられる。したがって表面色が同程度で $1\mu\text{mR}_z$ 以上の粗さであれば材質とは無関係に高精度な変位測定が可能となる。次に研削仕上をしたステンレス鋼 ($0.5\mu\text{mR}_z$)

Fig. 8 Relation between intensity ratio (ρ) and displacement (z) in different workpieces with white color

Fig. 10 Influence of inclination angle on intensity ratio

Fig. 9 Influence of grinding direction on intensity ratio

を例にとり、粗さの方向性が対比受光束 ρ に与える影響を調べたのが図9である。砥石送り方向に対し直角方向 (crossfeed) の対比受光束曲線は図8に示した特性と同様に $z = -3 \sim 5$ mm の範囲で $\rho = -0.85 \sim 0.7$ と同じ値を示している。しかし砥石送り方向 (feed) の特性は異なり、測定範囲は $z = -3 \sim 5$ mm であるが $\rho = -0.7 \sim 0.05$ となり、 ρ の範囲は減少している。これは粗さが小さくても直角方向ではほぼランダム表面、すなわち拡散反射面に近いためと考えられるが、送り方向ではうねりに近い粗さ曲線となり、正反射光成分が多くなり開口を通過する光量が極端に減少するためと考えられる。図10は試料の傾きの影響を調べたものである。変位 z が -2 mm よりも小さくなると傾きによって対比受光束 ρ は異なるが、 $z = -2 \sim 5$ mm の範囲であれば、傾きに関係なく測定点は一致している。このことから、試料表面が光軸に対し 6° 程度傾いていても平面と同様に高精度な測定が可能となる。図11はゴムを例にとり表面色の違いが測定値に与える影響を調べたものである。黒色になると対比受光束は $\rho = -0.6 \sim 0.1$ に減少し、図9の砥石送り方向の対比受光束曲線とよく似た傾向を示している。このことは黒色による反射率の減少を意味しており、反射光量が極端に減少したために生じたものと考えられる。

Fig. 11 Influence of surface color on intensity ratio

以上のように提案した変位センサは比較的反射率の高い表面で拡散反射面に近ければ対比受光束 ρ から材質、粗さに関係なく最大 8 mm の変位まで測定が可能である。なお対比受光束 ρ の最小読取り値を $\Delta\rho$ とすると分解能 K は $\Delta\rho |dz/d\rho|$ で与えられる。 ρ は 3 けたまで読み取ることができることから、 $\Delta\rho=0.001$ とおき、図 8 に示された ρ - z 曲線において、その傾きから分解能 K を求めると $z=0, -2, 3$ mm 近傍で $K=4, 5, 6 \mu\text{m}$ 程度となり、 $z=-2\sim 3$ mm の 5 mm の測定範囲において約 $5 \mu\text{m}$ の分解能を持っている。次に繰返し精度を求めるために $z=-2, 0, 2$ mm の各 3 か所の位置で 40 回、位置決め測定実験を行った結果が図 12 である。いずれの位置においても誤差の標準偏差 (S. D.) は $1 \mu\text{m}$ 以下で、 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内の位置決めが保証されており、信頼性の高い測定が可能である。

5. 結 論

次のような特徴を持った光学式簡易変位センサを試作開発することができた。

- (1) 本変位センサは反射光を 2 光点に分離しその 2 光点の位置を光量に変換し差と和の比、すなわち対比受光束をとることによって容易に信頼性の高い変位測定を実現することが可能である。
- (2) 受光素子 2 個、石英ガラス棒 2 本、発光素子 1 個、集光レンズ 1 枚の安価な少数部品からなる外径 54 mm、長さ 70 mm の小型軽量な変位センサ

Fig. 12 Histogram for checking repeatability

である。

- (3) 表面粗さ $1 \mu\text{m}R_z$ 以上で比較的反射率の高い面であれば、材質、粗さに関係なく、また、試料面が 6° 程度光軸に対し傾いていても、測定範囲 5 mm を分解能 $5 \mu\text{m}$ 、繰返し精度 $\pm 2 \mu\text{m}$ で変位を測定することが可能である。

参 考 文 献

- 1) K. Yanagi, T. Miyoshi and K. Saito: Development of the Displacement Sensor by Fiber Optics, Bull. JSPE, 14, 3, (1980) 175.
- 2) 三好隆志, 斎藤勝政: SELFOC マイクロレンズを用いた光ファイバ変位センサの開発, 応用物理学会・光ファイバセンサ研究会, WOFS 2-1 (1985) 1.
- 3) M. Rioux: Laser Range Finder Based on Synchronized Scanners, Appl. Opt., 23, 21, (1984) 3837.
- 4) 早川 勝: センサ調査会事例集「レーザ光による走行物の厚さ検出」, 情報調査会 (1986) 66.
- 5) 日経メカニカル, 1-27 (1986) 66.
- 6) 倉沢一男, 山本晃永: 非走査形状ポジショニングセンサ, O plus E, 16 (1981) 79.