研究論文

サブナノメータの分解能を持つ 反射光電式変位計の試作*

井 川 直 哉** 島 田 尚 一** 師 岡 英 行**

Development of Reflective Photoelectronic Displacement Sensor
with Subnanometer Resolution

Naoya IKAWA, Shoichi SHIMADA and Hideyuki MOROOKA

The design of an ultraprecision displacement sensor with subnanometer resolution is proposed for the use of ultraprecision technologies. The principle of the sensor is based on the high-sensitive detection of power change at a specific point in the light reflected from the object surface which is subject to a small displacement. The sensor consists of the single light source, the reflective object and reference surfaces, the optical fiber bundles for transmission of the illuminating and the reflected light and the photodiodes setup. In operation, the object and the reference surfaces are illuminated by the light transmitted through the optical fiber bundles from the single light source. Then, the reflected light from both surfaces are transmitted through the other optical fiber bundles to two separated but equivalent photodiodes respectively. By using the differential amplifier, the diodes enable to give a high-sensitive displacement signal which is included in the total signal of the reflected light. The sensor proposed here has some distinctive features such as the non-contact measurement, the high resolution of 0.5 nm, the wide working range of about 30 μm within the 5% linearity and the sufficient stability of 1 nm in 20 seconds for specific research purposes.

Key words : optical measurement, photoelectronic displacement sensor, non-contact measurement, nanometer resolution

1. 結 言

2 物体間の微小変位を高精度にしかも非接触で測定する技術は寸法や変形量の評価あるいは位置決めを必要とするあらゆる分野において要求される極めて重要な技術である。このような目的のために一般に用いられている非接触変位計には静電容量式、高周波渦損式、光電式等の種々の形式のものがあるが、現在のところ、その分解能はいずれも最高のもので 20 nm 程度である。一方、最近は、いわゆる超精密加工によって、形状精度 100 nm、表面粗さ 10 nm 台の加工が多くの光学部品や電子部品で多用される傾向にあるが、加工精度の評価、精度要因の解析を、それらよりも 1 けた高い精度で行う必要性が工作機械や計測機器の分野で急増してきた。

本研究は、それらの要求にこたえることのできる、

nm レベルの分解能を持った非接触変位計の開発を目的としたもので、その基本原理は被測定面に照射した光のある位置での反射光量が、物性値としての表面反射率、表面粗さおよび面の変位によって変化するという現象を利用するものである。この基本原理およびその測定への応用例は既にいくつか報告されている。例えば斎藤らは表面粗さを評価する光沢計としてこの原理を利用している¹⁾が、この場合は変位に対する感度が極めて低いことが条件となっている。一方、変位計としての利用については、Cook らの報告²⁾があり、また既に変位計として市販されているもの³⁾もあるが、その分解能は高いものでも数十 nm 程度である。

筆者らは被測定面と参照面からの反射光量を別々に検出し、それらを差動増幅することによって SN 比を高め、サブナノメータの分解能と 30 μm 程度の測定範囲を持つ高感度非接触変位計を開発したので報告する。

* 原稿受付 昭和 61 年 6 月 13 日、昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会（昭和 59 年 3 月 27 日）にて発表

** 正 会 員 大阪大学工学部（吹田市山田丘 2-1）

Fig. 1 Principle of reflective photo-electronic displacement sensor

2. 光反射強度変化を利用した非接触変位計の構造

2.1 原理

図1は受光用ファイバに入射される被測定面からの反射光量変化から面変位を測定する非接触変位計の基礎原理を示すものである。投光ファイバから、ある広がり角をもって被測定面に光が照射されるとき、その面からの反射光のうち実質的に受光ファイバへ入射される光量は、受光ファイバ端面とそこにおける反射光束断面が重なる部分の面積（図中の斜線部）とその部分の反射光強度との積に比例する。このため、一般にファイバ端面と反射面との距離と受光ファイバへ入射される光量との関係は図2に示すようになり、変位に対する光量の変化率が高い(1)の領域を用いれば微小な変位を高感度で検出しうる可能性がある²⁾³⁾。

P_0 : D.C. component

ΔP : Variable component corresponding to displacement

y_0 : Offset

Fig. 2 Relation between power of reflected light and displacement

しかし、この基本構成のみではセンサに入る光量が少なく、かつ変位に無関係な直流成分によって信号の増幅率が制限されてしまい、微小変位成分を高感度で検出することは極めて困難である。このため、光ファイバを多数束ねた光ファイバ束を用いて光量を増大させてSN比を向上させるとともに、直流成分を除いて反射面変位に対する純粋な信号成分のみを増幅することが必要である。

2.2 試作変位計の構成

図3に筆者らの試作した高感度非接触変位計の構成を示す。同一光源より投光用光ファイバ束を介して被

Fig. 3 Scheme of reflected photo-electronic displacement sensor with subnanometer resolution

Fig. 4 A set of optical fiber bundles

Fig. 5 A cross section of optical fiber bundle

測定面および堅固に固定された参照面に光を照射し、それぞれの面からの反射光を受光用ファイバ束を通じて、別々のほぼ同等の特性を持つフォトダイオード（浜松フォトリクス，S 1336-5 BQ）に導く。差動増幅回路を用いて、測定用のフォトダイオード（1）と参照用のフォトダイオード（2）からの出力を差し引けば、図2に示した直流成分 P_0 は相殺され、微小変位に対する信号成分 ΔP のみを増幅することができ、高感度な変位測定が可能となる。ここで用いられている光ファイバ束は直径 $25\mu\text{m}$ の光ファイバを、投光用と受光用にそれぞれ1200本ずつランダムに束ねた（直径約2mm）測定用と参照用の2本のファイバ束をさらに1本化したもので、同一光源からの光を、それぞれの面に同時に照射できる構造となっている。このため光源の光量変動による感度変化は著しく軽減され、また、被測定面と参照面を近い位置に置くことで振動や温度等外部環境の変化に対しても鈍感であるという特徴を持つ。このファイバ束の外観を図4に、またその断面の一部を図5に示す。

変位の測定にあたっては、測定用プローブを図2における測定可能な高感度直線領域における適当な位置 y_0 （通常はピーク光量 P_{max} の1/2を与える位置）にセットし、さらにその時の差動出力がゼロとなるように参照面と参照用プローブとの距離を調整しておけば、以後変位計からは被測定面の初期位置からの変位

Fig. 6 Sensitivity calibration of the sensor by piezo-element

のみに対応した出力電圧が得られることになる。

なお、商用電源を用いた場合には、信号中に商用周波数の脈動分が含まれ、SN比を低下させるので、光源および電子回路用電源にはすべて電池を使用し、またタングステンランプからの発熱に基づく各部の熱変形を抑制するため、ランプおよびレンズ系を鉄製ケースで覆い、これを水冷している。

3. 試作変位計の性能

3.1 感度

感度の検定は図6に示すように、鏡面仕上したシリコン板にアルミニウムを蒸着したものを被測定面とし、方形波状に伸縮するピエゾ素子に接着して変位を与え、この変位を上記非接触変位計で測定することによって行った。実験に使用したピエゾ素子の実際の変位量については、微小段差測定器（タリステップ）を用いて校正した。図7(a)は15 Hz、0.5 nmの面変位に対応する本変位計からの出力波形である。ここでSN比が1となる状態をもって分解能を定義すれば、本変位計は数百Hz以上の高い周波数領域においても0.5 nm程度の分解能を持っているものと判断できる。図7(b)は、1 Hz、0.5 nmの変位に対する変位計出力を10 Hzのローパスフィルタを通して観測したもので、低い周波数領域に限定すれば、さらに分解能は向上することがわかる。なお図7(a)に見られるノイズは、フォトダイオード、電子回路および検定を行った防振台の防振特性等に起因するものと考えられるが、それぞれの大ききの程度は今のところ明らかではない。

また、本変位計を使用する際、プローブが被測定面に対して直角にセットされていない場合が考えられるが、 $\pm 3^\circ$ 以内の傾きであれば測定上全く問題ないことを実験的に確認した。

Fig. 7 Resolution of the sensor
(*LPF; low pass filter)

Fig. 8 Invariability of sensitivity to the surfaces with different reflections

ところで、本変位計における出力電圧は、被測定面の変位以外に照射光量および被測定面の反射率によっても変わるが、図8に示すように被測定面の単位変位に対する反射光量の変化率 α は、特にピーク光量 $P_{\max}$ の1/2の光量を与える位置付近においては、 $P_{\max}$ の大きさに比例するため、それらの比 $k = \alpha / P_{\max}$ は被測定面によって $P_{\max}$ が変化しても一定である。このため測定に先立って反射ピーク光量 $P_{\max}$ を求めておき、プローブ先端の位置を $P_{\max}/2$ を与える位置にセットしておけば、検出される反射光量の変化 ΔP から被測定面の変位 Δy は $\Delta y = \Delta P / (kP_{\max})$ によって求めることができる。

試作した光ファイバ束に関して、種々の精密加工面を用いて実験したところ、1%以内の精度で上記の関係が満足されていることを確認した。なお $P_{\max}/2$ を与

えるプローブ先端の位置は、通常の精密加工面においては面から20~30 μm 程度離れた位置にあたる。

3.2 直線性

図6に示した方法および図9に示すような、片持ちばりに荷重を加えた時に生ずる弾性変形に基づく被測定面の微小変位を利用して、約3 μm の微小な測定範囲における直線性を調べた結果が図10である。この範囲では誤差1%以下の非常に良好な特性をもつことが明らかになった。さらに、図11に示すように測定用プローブの先端位置を平行板ばねを利用して変位させ、その時の変位量と測定用プローブへの反射光量(反射ピーク光量に対する反射光量の比)との関係を約30 μm の範囲にわたって調べた結果が図12である。これより本変位計は30

μm 程度の測定範囲にわたって5%以内の直線性を示すことが明らかになった。

3.3 安定性(ドリフト)

Fig. 9 Sensitivity calibration of the sensor by small elastic deflection of cantilever

Fig. 10 Short range linearity of the sensor
(*Relative value to that of maximum reflection)

Fig. 11 Calibration setup for large displacement

Fig. 12 Working range of the sensor

Fig. 13 Drift of the sensor

図13は被測定面と参照面を防振台上に堅固に固定された同一の固定体に取り付け、両面を無変位の状態にして置き、その時の出力信号を観測したもので、20

s間にわたり1nm以内の精度で安定であることがわかる。このドリフトは主としてタングステンランプの発熱による各部の熱変形が原因と考えられるが、詳細については今のところ明らかではない。

なお本変位計による測定においては、プローブ先端と被測定面の間隔は通常数十 μm であるため、測定値に対する空気流動等の影響はほとんど問題とならず、また周囲の温度変化に対しては、年間の使用を通じてその感度に変化が見られないことが実験的に確かめられており、本変位計は通常の環境下においては非常に対環境性に優れた特性を持っていると考えられる。

4. 結 言

同一光源からの光を分岐した2本の投光ファイバ束を通して、変位する被測定面と堅固に固定された参照面へ照射して、受光ファイバ束へ戻るそれらの面からの反射光量を別々のフォトダイオードによって検出し、両者の差動増幅を行うことで、構造は極めて簡単であるにもかかわらず、サブナノメータの分解能と30 μm 程度の測定範囲および1nm/20sの安定性を持った高感度非接触変位計を開発することができた。これは、その特性から見て、例えば軸の回転精度や機素の運動精度などの短時間（例えば1min以内）の超高精度測定に対して極めて有用であると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては、昭和58年度高度生産システム振興財団の研究助成を頂いた。また光ファイバ束の製作について多大のご協力を賜ったオリンパス光学工業(株)研究開発本部、洲脇利孝氏、佐藤千秋氏、実験にご協力を頂いた松原正二氏、平野均氏に深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 齊藤勝政, 三好隆志: ファイバオプティクス光沢計の原理——ファイバオプティクスによる金属鏡面の光沢測定に関する研究(第1報), 精密機械, 40, 2 (1974) 129.
- 2) R. O. Cook and C. W. Hamm: Fiber Optic Lever Displacement Transducer, Appl. Opt., 18, 19, (1979) 3230.
- 3) 例えば, EDDIO Corporation, EDDIOPT-MS カタログ.