光ファイバと結合した小形レーザ干渉計*

谷 村 吉 久** 黒 沢 俊 郎***

Small Laser Interferometer Linked to Laser Source
with an Optical Fiber

Yoshihisa TANIMURA and Toshiro KUROSAWA

In a present laser interferometer system it is necessary to adjust the alignment between a laser source and a laser interferometer. The laser source is a heat source to be a disturbance in a precise length measurement, while the laser interferometer itself is large and its setting lacks flexibility. This study is performed in order to solve the practical disadvantage mentioned above, in which the small laser interferometer is linked to the laser source with an optical fiber so as to give full play to the flexibility in the case of the precise length measurement. The results of this study are shown as follows. (1) The influence of the disturbance mixing into the optical fiber can be cancelled by making differential interference signals by means of an electronic instrument. As a result, the resolution of the interferometer becomes high and the length measurement stable. (2) A small laser interferometer with an optical fiber has been developed with 10 mm in measurable length and $0.05 \mu\text{m}$ in resolution as a kind of contact type indicator. The length measurement error of the present interferometer is $0.13 \mu\text{m}$ in 10 mm. Another non-contact type laser interferometer has also been developed for vacuum.

Key words: laser interferometer, laser source, optical fiber, flexibility, cosine error, length measurement error, differential interference signal

1. 緒 言

光の波長を利用して長さを測定するレーザ干渉測長器は、校正が不要で線形性の保証された高精度な測長器である¹⁾。しかし装置自体が大きく、光軸合わせが必要である。すなわちレーザ光源、干渉計本体、レーザ反射鏡の三つを空間で一直線上に並べて配置しなければならないという煩わしさがある。また一度設定してしまうと簡単に移動できないという欠点もある。さらに光源として使用する He-Ne レーザを長時間点灯すると発熱し、室温変化と共に機器の各部分を熱膨張させる。このようにレーザ光源は精密測定環境には馴染まない機器といえる。

これらの欠点を解決するため、干渉計本体の小形化と同時に、発熱源であるレーザ光源を干渉計本体から隔離する必要がある²⁾³⁾。そこで光源と干渉計本体の

間を“光ファイバの利用で柔らかく結合”し、光軸合わせの煩わしさを軽減すれば、干渉計本体へ自在にレーザが導入できる。また干渉計の小形化で狭い所や真空中などの特殊な環境下での使用も可能となる。

以上の背景と目的から本研究では、電気マイクロメータと同様な接触式直動形の光ファイバと結合した小形レーザ干渉計の開発を行った。さらにレーザを光ファイバで自在に干渉計へ導入できるという特長を生かし、応用範囲を広げるため、真空用小形レーザ干渉計の試作・開発を行った。これらのレーザ干渉計の測定原理と構成、基本的な性能について以下に述べる。

2. 測定原理と構成

図 1 (a) は本研究の光ファイバと結合した小形レーザ干渉計の全体構成図である。市販のレーザ光源から偏波面保存の光ファイバ⁴⁾でレーザを干渉計本体へ導く。同図 (b) はその干渉計本体部分の構造図である。スピンドル先端が測定対象物表面に接触し、直動するとき、干渉じまの移動数を計数して測長する一種の接触式測微器である。設計上の基本仕様は、測長範囲 10 mm、分解能 $\lambda/12$ ($\approx 0.05 \mu\text{m}$)、最大応答周波数 50 kHz である。光学系はマイケルソン形干渉計を基

* 原稿受付 平成元年 3 月 29 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) および昭和 62 年度精密工学会秋季大会学術講演会 (昭和 62 年 10 月 14 日) にて発表

** 正 会 員 計量研究所大阪計測システムセンター (大阪市北区扇町 2-6-20)

*** 正 会 員 (株)東京精密 (八王子市石川町 2968-2)

(a) Photograph to be assembled

(b) Illustration of the interferometer

Fig. 1 Small laser interferometer linked to laser source with an optical fiber (Contact type)

本とした構成であり、鏡2の移動量 d に対し、干渉じまの強度変化は $\cos(4\pi/\lambda \cdot d)$ となり、 d が $\lambda/2$ 変化するごとに1周期の強弱を繰り返す。

鏡1の裏面には直径2mmの小ねじ3個が120°間隔であり、それらの締め加減で干渉じまの幅と方向が

自在に微調整できる。この調整ねじで干渉じまの1周期を、並列に配置した3個のバー状フォトダイオードPD1~3の3ピッチ分(4.5mm)に相当する幅となるように調整する。そして10mmの全測長範囲で干渉じまの方向と幅が変化しないことを確かめ、3個のねじをエポキシ系接着剤で固定する。その結果、それぞれのフォトダイオードから $2/3\pi$ ずつ位相のずれた3系統の信号が得られ、 $\lambda/12$ の分解能が実現できる。

なお図1の接触式小形レーザ干渉計の光源として出力4mWのHe-Neレーザを用いた。レーザの発振利得は約1GHzといわれ、最大周波数変動率は $\Delta\nu/\nu = 2 \times 10^{-6}$ 程度である⁵⁾。これは10mmの測長で0.02 μm の誤差となるが、本研究の目的には高価な安

定化レーザでなくても十分な精度である。

図2は用いた電子回路の構成である。3つの差信号を作る目的は干渉計の分解能を3倍高めるだけでなく、光ファイバの曲げ、変位、熱膨張といった外乱で発生する雑音を相殺し、結果として干渉じま信号の

Fig. 2 Block diagram of electronic circuits

(a) Construction to be assembled

(b) Illustration of the interferometer for vacuum

Fig. 3 Small laser interferometer for vacuum with an optical fiber (Non-contact type)

バックグラウンドにあるレーザの強度変化を除去し、安定な測長を実現するためである。

一方、光ファイバと結合した真空用小形レーザ干渉計を真空槽内に設置するときの全体構成を図3(a)に示す。レーザは光ファイバにより真空用フランジを介して真空槽内に導入される。真空槽内にあるファイバ部分は、小形レーザ干渉計を 10^{-5} Pa オーダの真空中で使用するため、放出ガスの少ないテフロンチューブ(1 m)で被覆してある。また図3(b)に干渉計本体部分の光学系を示す。図1(b)と同様に光学系の構成はマイケルソン形であるが、測定対象となる移動台に反射鏡2を載せ、非接触式測長を実現している点が異なる。また干渉じまの1周期間をフォトダイオード4個で検出する点も先の干渉計と異なる。

いま移動台に取り付けた反射鏡2の移動距離 X に対して干渉強度 $I(X)$ は、

$$I(X) = 1 + \cos\left[\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \cdot X + \alpha\right]$$

で表される。ただし、 α : 初期位相。

反射鏡1をわずかに傾け、並列した4個のフォトダイオードPD1~4の上に干渉じまを作る。干渉じま

のしま間隔は各フォトダイオード間の初期位相が $\pi/2$ だけ異なるように調整する。それぞれ 180° ずれた逆相のPD出力信号を減算すると、

$$\cos\left\{\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \cdot X\right\}, \quad \sin\left\{\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \cdot X\right\}$$

となり、DC成分が除去され、かつ位相が $\pi/2$ ずれた2つの干渉じま信号を得る。この2つの干渉じま信号はその振幅強度が原波形の2倍であり、S/N比が高いという利点も同時に発揮する。ここで分解能を高める目的から、この信号の1周期を電氣的に16分割する。すなわち $\lambda/32$ ($0.02 \mu\text{m}$)の分解能が実現できる。これに用いた電子回路も互いの差信号を検出する機能を有し、外乱による信号の振幅変動は図2の電子回路と同様に相殺される。

3. 性能実験

3.1 表示値の安定性

表示値の安定性を調べるため、小形レーザ干渉計の姿勢変化と時間経過によるカウント数の内容変化を調べた。

まず干渉計本体部を横にして熱容量の大きな定盤上に固定し、スピンドルに鉄ブロックを接触させ、1 mm 程度押し込む。この状態で電源投入後、10 min ごとにカウント数の変化を記録し、図4(a)の結果を得た。その後レーザを十分に予熱したのち、10 min ごとのカウント数の変化を15 h にわたって記録し、図4(b)の結果を得た。1パルスが0.05

(a) After turned on laser

(b) Fluctuation for long time

Fig. 4 Stability of a displayed value of the interferometer

Fig. 5 Experimental instruments for checking a cosine error and a length measurement error

μm であるから 15 h で $0.1 \mu\text{m}$ の表示値の安定性といえる。なおファイバに曲げ、力、変位などの外乱を与えても表示値の変化はなかった。

3.2 コサイン誤差と測長精度

試作した小形レーザ干渉計は干渉計の光軸とスピンドル軸が一直線上に配置され、アップの原理を順守した構造である。しかしスピンドルの移動軸方向と干渉計の光軸方向の軸合わせが十分でなければコサイン誤差が生じ、干渉計自身の組立上の誤差となる。すなわちコサイン誤差は、測定長さを L 、レーザビームのずれ量を a とすると、 $a^2/2L$ で与えられる。例えば $a=0.4 \text{ mm}$ のとき、 $L=500 \text{ mm}$ でコサイン誤差は $0.16 \mu\text{m}$ にすぎないが、 $L=10 \text{ mm}$ に短くなると、この誤差は $8 \mu\text{m}$ にもなる。

特に本研究の干渉計のように調整に必要な空間が狭い場合、スピンドルの移動軸方向と干渉計の光軸方向を一致させることは実際上不可能である。そのため互いに狂った状態のまま組立てられる。

そこで試作した干渉計について軸合わせの狂いによるコサイン誤差を調べるため、外部に市販のレーザ干渉測長器 (HPL) を組み立てることとした。図 5 はそのための測定光学系である。

図 5 において小形レーザ干渉計のスピンドル先端にコーナキューブプリズムを取り付け、HPL からのレーザを入射させ、 0.5 mm 間隔でスピンドルを動かし、それぞれの干渉計のカウント数を比較する。この実験ではスピンドルの移動軸方向と HPL の光軸方向と

の狂いもコサイン誤差として重畳する。そこで以下の解析を行った。

いまスピンドルの移動軸と HPL の光軸が互いに θ_1 狂っていると仮定すると、スピンドルの移動量 D と HPL で測定する長さ X_1 との関係は、図 6 (a) より、

$$X_1 = D \cdot \cos \theta_1 \quad (1)$$

と書ける。

次に、図 6 (b) のようにスピンドルの移動軸と小形レーザ干渉計の光軸との狂いを θ_2 、スピンドルの移動軸と反射鏡 2 の法線方向 n との狂いを θ_3 と仮定すると、小形レーザ干渉計で測定される長さ X_2 は、二次元近似で、

$$X_2 = \frac{D \cdot \cos^2(\theta_2 + \theta_3)}{\cos \theta_2 - \sin \theta_2 \cdot \tan \theta_3}$$

と与えられる。

ここで鏡 2 及びそれを接着・固定するスピンドル部品の加工精度を考えれば、 θ_3 をほぼ 0 としてさしつかえない。したがって、

$$X_2 = D \cdot \cos \theta_2 \quad (2)$$

と近似できる。

式 (1) と (2) より、次の関係式が得られる。

(a) Alignment angle θ_1 between the optical axis of a laser interferometer (HPL) on the market and the spindle axis

(b) Alignment angles θ_2 between the spindle axis and the optical axis of the laser interferometer, and θ_3 the normal direction of a moving mirror 2

Fig. 6 Analytical illustration of a cosine error

Fig. 7 Relation between θ_1 and θ_2

$$X_2 = X_1 \cdot \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} \quad (3)$$

式(3)は、

(a) $\theta_1 > \theta_2$ のとき、 $X_2 > X_1$

(b) $\theta_1 = \theta_2$ のとき、 $X_2 = X_1$

(c) $\theta_1 < \theta_2$ のとき、 $X_2 < X_1$

となることを表している。

以上の関係は、スピンドルの移動軸の方向を基準として、HPLの光軸の狂いを θ_1 、小形レーザ干渉計の光軸の狂いを θ_2 として図7に図示できる。 θ_1 は、コーナキューブから戻った光のずれ量が a のとき、 $\theta_1 = \tan^{-1}(a/2X_1)$ で求められるので、 X_1 と X_2 の値及び式(3)の関係から θ_2 が算出できる。実際にHPLの光軸を故意に傾け、 $a=0.4$ mmとし、 $\theta_1=1.2^\circ$ を求めた。このときの X_1 と X_2 の値から θ_2 を算出すると、 $\theta_2=0.85^\circ$ が得られた。したがって試作した小形レーザ干渉計のコサイン誤差は、スピンドルの移動軸方向を基準にした場合、式 $\theta_2^2 \cdot L/2$ に $L=10$ mmを代入し、 -1.10 μm と求められる。

しかしながら、求めたコサイン誤差がそのまま「物」を測る場合の測長誤差になるわけではない。測長精度は、測られる「物」の測定方向の代役をつとめるHPLの光軸方向との関係で決まる。図7において、一般に $\theta_1 = \theta_2$ となった場合を測長誤差0(最小)と評価し、最も精度よく「物」が測れる場合とする。

試作したレーザ干渉計の測長精度を求めるため、測長誤差($X_2 - X_1$)を最小にする条件($\theta_1 = \theta_2 = 0.85^\circ$)に θ_1 を調整し、図8(b)の結果を得た。この結果より、試作したレーザ干渉計の測長精度はP-P値で 0.13 $\mu\text{m}/10$ mmといえる。なお図8(a)は $\theta_1 > \theta_2$ に対応する測長誤差の例、同図(c)は $\theta_1 < \theta_2$ に対応す

Fig. 8 Length measurement error ($X_2 - X_1$) depending on the alignment angles θ_1 and θ_2

る測長誤差の例である。

真空用レーザ干渉計についても図7と同様な関係が図示できる。すなわち、図7でスピンドル部分を微動台の移動方向と移動量 D に対応させ、測長誤差を調べることができる。この場合、市販のレーザ干渉測長器(HPL)を真空槽内に持ち込むことは、脱ガスの問題と必要空間の不足から困難なため、実験を空気中で行った。

まず平行な板ばねで支持されたピエゾ駆動式の移動台の上に図3(b)で示した反射鏡2を固定する。この移動台を 20 μm 移動させ、本研究の真空用レーザ干渉計で測定した値 X_2 と市販のHPLで測定した値 X_1 との差を測長誤差として求めた。その結果、先の接触式小形レーザ干渉計に比べ、移動範囲が 20 μm と短かったせいで、測長誤差は高々 0.02 μm であった。

3.3 真空度試験

試作した光ファイバ結合の真空用小形レーザ干渉計は、ガス発生のない材料や接着剤を使用し、また電子顕微鏡下で使用することも想定して非磁性材料を使用して作った。しかし基本的性能の1つは、実際の真空槽内に納めたときの到達圧力である。そこで、槽内に

Fig. 9 Record of vacuum pressure

干渉計を置いた場合と真空槽だけの場合で到達圧力を比較する試験を行った。

真空槽の容積は $7.75 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 、主ポンプはターボ分子ポンプで排気速度 600 l/s の性能を持つ。2~3 日連続でポンプを運転した後、窒素ガスで大気圧まで戻し、真空槽内の圧力が 10^{-3} Pa になった時から 6 h の圧力変化を記録してみた。その結果、図 9 に示す通り真空槽が空のときは $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ まで到達したのに対し、いったん蓋を開けて小形レーザ干渉計を納めた場合には、 $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ の到達圧力であった。この原因として、小形干渉計を構成している各材料から放出するガスの存在、さらに干渉計設置の際に生じる真空槽内壁への種々のガス成分の付着、などがあげられる。

4. 結 言

光ファイバと結合した小形レーザ干渉計として、スピンドル直動形で測長範囲 10 mm 、分解能 $0.05 \mu\text{m}$ の接触式測微器を試作・開発した。さらに測定対象物と非接触で測長でき、 $0.02 \mu\text{m}$ の分解能をもつ真空用小形レーザ干渉計を試作・開発した。本研究の小形レーザ干渉計について次のことが言える。

- (1) 光ファイバに加えた温度変化、力、変位などの外乱で変動する干渉じまのバックグラウンドにあるレーザの強度変化を相殺するため、3 または 4 系統の干渉じま信号のそれぞれの差信号を用い

る方式を考案し、これによって分解能を高め、安定した測長を可能にした。また表示値の安定性は 15 時間で $0.1 \mu\text{m}$ であった。

- (2) 測長範囲が短い場合、コサイン誤差は試作した干渉計の組立上の誤差となる。実験によって干渉計の光軸方向の狂いを算出したところ 0.85° であった。その結果、本研究の小形レーザ干渉計のコサイン誤差は、スピンドルの移動軸方向を基準として、 $-1.10 \mu\text{m}$ となる。測長精度を調べるため試作した干渉計の光軸方向と測られる「物」の測定方向を一致 ($\theta_1 = \theta_2$) させたところ、測長精度 $0.13 \mu\text{m}/10 \text{ mm}$ を得た。
- (3) 真空用レーザ干渉計の真空度試験を行った。この干渉計を真空槽に納めたときの到達圧力は 6 時間で $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ であった。これは真空槽が空のときに比べ真空度が 3 倍低下した結果に相当する。

謝 辞

本研究の光ファイバと結合した小形レーザ干渉計の試作・開発にあたり、電子回路の製作について計量研究所量子部山田啓文氏より協力いただいた。また干渉計本体部の製作については(株)東京精密の方々の協力をいただいた。ここに各位に紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) HPL レーザ干渉測長器カタログ。
- 2) 堀 信男, 内山卓巳, 小林八郎: 半導体レーザ干渉測長器の開発, 昭和 62 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1987) 633。
- 3) 吉田宣昭, 久保田敏弘, 芳野俊彦: 光ファイバヘテロダイン干渉計による微小変位の遠隔測定, 応用物理前刷集, 31 a-p-7, (1985. 春) 100。
- 4) 松村宏善, 勝山俊夫, 菅沼庸雄: 偏波面保存光ファイバの開発, 日立評論, 63, 7 (1981) 35。
- 5) 田中敬一: He-Ne レーザの周波数安定化, 計量研究所報告, 24, 4 (1975) 226。