研究論文

光ファイバを利用した干渉計による熱変形計測*

木村 秀行** 赤津 利雄** 森 貞雄**

Measurement of Thermal Deformation by Interferometer Utilizing Optical Fiber

Hideyuki KIMURA, Toshio AKATSU and Sadao MORI

This paper describes a study of an interferometer utilizing an optical fiber for highly accurate measurement of thermal deformation of a mechanical part in out-of-plane direction. This interferometer utilizes a polarization-preserving optical fiber. Two signal lights pass the same optical paths of the fiber, and the influence of the external disturbance (for example, temperature changes) to the optical paths of the fiber can be cancelled by the differential detection of the interference signals of these lights. A reference plane is set near an object plane, and an optical probe with the reference plane is composed of the materials with small thermal expansion coefficient. The experiment verified that the present interferometer worked in the same way as the theory. The present interferometer was applied to a measurement of thermal expansion, and its measuring dispersion of this interferometer was within ± 60 nm.

Key words: interferometer, optical fiber, differential interference signal, thermal deformation, external disturbance

1. 緒 言

光ディスク装置、磁気ディスク装置などの記憶装置およびプリンタ、ファックスなどの記録装置では、部品の熱変形を微小にすることが高精度・高密度化達成の重要課題であり、微小な熱変形の高精度計測技術の確立が必須となってきた。すでに、筆者は補正台による干渉じま補償法を利用したホログラフィ干渉計により熱変形を精度良く計測する装置を開発した¹⁾。

本報告では別の計測法として、前記ホログラフィ干渉計のようなパターン計測ではなくワンポイント計測であるが、面外方向の熱変形をより高精度に計測できる「光ファイバを利用した干渉計」について検討した。光ファイバを利用した干渉計は、光ファイバを用いない干渉計の問題点である、光学系を常に一直線上に配置しなければならないというアライメントの難しさを解消するもので、光を任意の場所に容易に伝播することができる。

光ファイバを利用した変位計測用の干渉計としては、①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²⁾がある。これは、往路の光のみを偏波面保存光ファイバ³⁾に通

し、3つの干渉信号の差信号により光ファイバの外乱が発生する雑音を相殺するもので、安定した変位計測を可能にしている。また、②周波数変調された2光波を用いるナノメータ変位計測用光ファイバヘテロダイン干渉計プローブ⁴⁾がある。これは、2本のシングルモード光ファイバを用い、二つの信号が同一の光路を経るようにし、その差信号により光ファイバの外乱の影響を相殺してナノメータ変位の計測を可能にしている。

これらの変位計測法を熱変形計測に応用しようとすると、光ファイバの外乱の影響は相殺されるが、前記①の干渉計では基準面を有する部分にねじや接着剤が用いられており、また②の干渉計では基準面を有する光ファイバプローブが異種材料により構成されているため、温度変化により基準面が熱変形する恐れがある。熱変形計測の場合、光ファイバ以外にも計測の基準面等の光学系が受ける温度変化の影響も考慮する必要がある。以上のことから、熱変形計測用の「光ファイバを利用した干渉計」は1本の偏波面保存光ファイバを用い、光は往路復路ともこの光ファイバ内を通るようにし、光ファイバ内の同一経路を通る二つの光の差信号により光ファイバの外乱の影響を相殺した。また、基準面を有する光プローブは熱変形しないように熱膨張率の小さい石英ガラスで構成し、測定面近傍に設けて温度変化時の空気の屈折率変化による変

* 原稿受付 平成3年4月10日。1991年度精密工学会春季大会学術講演会(平成3年3月26日)にて発表

** 正会員 (株)日立製作所(土浦市神立町502)

Fig. 1 System of interferometer utilizing optical fiber

路長の補正量をできる限り少なくした。本報告では、この干渉計の動作原理の実験による検証と熱膨張計測への応用について検討する。

2. 光ファイバを利用した干渉計

2.1 干渉計の光学系と動作原理

図1は光ファイバを利用した干渉計の光学系で、この図により本干渉計の動作原理を説明する。レーザ光(He-Ne; 波長632.8 nm)は光アイソレータによりX軸またはY軸に対して45°の方向に振動する直線偏光となって電気光学結晶⁵⁾に入射する。電気光学結晶は互いに直交する3つの結晶軸を有しており、図のようにX, Y, Z軸と定義する。これは結晶本来の軸名と異なるが、以後の説明をわかりやすくするため、このように定義する。入射した光の偏光方向を結晶のX軸またはY軸に対して45°の方向に一致させると、光はX軸およびY軸方向にそれぞれ振動する2種類の光に分かれて結晶内をZ軸方向に伝播する。ここで、結晶のY軸方向に高周波電圧を印加すると、2種類の光に対する屈折率が違った割合で変化する。結晶を出射した2種類の光はビームスプリッタ(BS1)を透過し、レンズで集光されて1本の偏波面保存光ファイバに至る。偏波面保存光ファイバは直交するX軸, Y軸を有し、その軸方向に入射した光は偏光面を保って光ファイバ内を伝播する。光ファイバを出射した2種類の光はレンズを経て光プローブに至り、各光はBS2により2分割されて基準面と測定面でそれぞれ反射し、光ファイバには合計4種類の光が

Fig. 2 Polarization states of light in optical probe

戻る。

図2は光プローブにおける4種類の光の偏光状態を示す図であり、光ファイバを出射する光①に付記した棒印がX軸方向に振動する光、②に付記した点印がY軸方向に振動する光を表している。1/4波長板は光が往復するとその光の振動面を90°回転させる。①の光に注目すると、光ファイバを出射したX軸方向に振動する光はBS2により2分割される。一つの光はBS2で反射し、そのまま偏光面を保って基準面を往復し、再びBS2で反射して光ファイバに戻る。もう一つの光はBS2を透過して測定面を往復するが、その間に1/4波長板を往復するため、光の振動面が90°回転し、Y軸方向に振動する光となって光ファイバに戻る。別の光②についても同様である。

光ファイバに戻る4種類の光が伝播経路中で受ける

位相変化は、次のように表される。光が基準面または測定面に到達するまでを往路とする。

$$(\text{往路: X, 復路: X}) \quad \phi_{xx} = \phi_{cx} + 2\phi_{fx} + \phi_1 \quad (1)$$

$$(\text{往路: X, 復路: Y}) \quad \phi_{xy} = \phi_{cx} + \phi_{fx} + \phi_{fy} + \phi_2 \quad (2)$$

$$(\text{往路: Y, 復路: Y}) \quad \phi_{yy} = \phi_{cy} + 2\phi_{fy} + \phi_1 \quad (3)$$

$$(\text{往路: Y, 復路: X}) \quad \phi_{yx} = \phi_{cy} + \phi_{fy} + \phi_{fx} + \phi_2 \quad (4)$$

ここで、 ϕ_c は電気光学結晶内での位相変化、 ϕ_f は光ファイバ内での位相変化、 ϕ_1 はBS 2の中心と基準面を往復する間に受ける位相変化、 ϕ_2 はBS 2の中心と測定面を往復する間に受ける位相変化であり、4種類の光が共通して受ける位相変化は便宜上省略した。位相変化 2π rad は変位量 316 nm (1/2 波長) に相当する。また、添字 x, y は光が振動する方向の軸を表す。

この4種類の光は光ファイバを出射後、BS 1 で反射して偏光ビームスプリッタ PBS に入射し、X 軸方向に振動する光は透過し、Y 軸方向に振動する光は反射し、それぞれの光は干渉する。その干渉信号は受光器 X, Y で検出され、X 軸方向および Y 軸方向に振動する光の強度 I_x, I_y は式 (5), (6) により表される。このときの位相差 ϕ_x, ϕ_y は、式 (1)~(4) より式 (7), (8) のように表される。

$$I_x = I_{xx} + I_{yx} + 2\sqrt{I_{xx} \cdot I_{yx}} \cos \phi_x \quad (5)$$

$$I_y = I_{yy} + I_{xy} + 2\sqrt{I_{yy} \cdot I_{xy}} \cos \phi_y \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \phi_x &= \phi_{yx} - \phi_{xx} \\ &= \phi_{cy} - \phi_{cx} + \phi_{fy} - \phi_{fx} + \phi_m \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \phi_y &= \phi_{xy} - \phi_{yy} \\ &= \phi_{cx} - \phi_{cy} + \phi_{fx} - \phi_{fy} - \phi_m \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 ϕ_m は求める熱変形等の変位量に相当する位相差で、式 (9) である。

$$\phi_m = \phi_2 - \phi_1 \quad (9)$$

上記二つの位相差の式 (7), (8) を引き算すると、差信号 ϕ は式 (10) のようになり、電気光学結晶および光ファイバ内で受ける位相変化 ϕ_c, ϕ_f に関する項がすべて相殺され、求めたい変位量に相当する位相差 ϕ_m のみが2倍の感度で計測できる。

$$\phi = \phi_x - \phi_y = 2\phi_m \quad (10)$$

これは、それぞれの光が往路、復路の違いはあっても、偏波面保存光ファイバ内の同一の経路を通るからである。

2.2 実験による干渉計の検証

2.2.1 光ファイバの消光比

干渉計の動作原理を実験で検証する前に、干渉計測の性能を左右すると考えられる光ファイバの消光比について検討する。消光比 Ψ は偏波面保存光ファイバの偏光特性の劣化度を表し⁶⁾、次式で定義される。

$$\Psi = 10 \log_{10}(P_y/P_x) \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

Fig. 3 Extinction ratio of optical fiber

ここで、 P_x, P_y は光ファイバ内に X 軸方向に振動する光を入射したとき、光ファイバの出射端で検出される X 軸方向に振動する光および Y 軸方向に振動する光の強度 (W) である。Y 軸方向に振動する光を入射したときの消光比も同様の式で表され、計測においても同じ消光比が得られた。

計測は次のように行った。図 1 において BS 1 とレンズの間に 1/2 波長板を挿入し、偏波面保存光ファイバの偏光軸に対して入射する光の偏光軸を若干ずらせて、その角度の消光比に与える影響を調べた。出射光の強度は、光ファイバの出射端に回転可能な偏光板を設け、その直後のパワーメータにより計測した。

図 3 はその結果で、横軸は 1/2 波長板を回転させた角度である。1/2 波長板により入射する光の偏光軸を光ファイバの偏光軸にきちんと合わせる ($\pm 0^\circ$) と、消光比は -28 dB 得られるが、偏光軸が少しでもずれると消光比は極端に悪くなる。このことから、偏波面保存光ファイバの軸合わせには細心の注意を払う必要がある。また、消光比が -28 dB ($P_y/P_x \approx 1/650$) 程度であれば、偏光特性の劣化度も少なく、本干渉計に用いる光ファイバの性能としては良好と考える。

2.2.2 光ファイバの性能検証

はじめに、光ファイバにのみ外乱を加え、前述した動作原理を実験的に検証する。熱変形計測を考えて、外乱として温度変化を選んだ。図 1 の干渉計において、偏波面保存光ファイバを箔状のヒータに載せ、その周囲を断熱材で覆い、その他の部分には外乱が加わらないよう注意した。また光ファイバ端面からの反射

Fig. 4 Measurement error by change of typical properties of optical fiber

光を防止するため、ファイバ端面を斜めに切断して反射光がファイバ内に戻らないようにした。位相差に相当する干渉計の出力 (Ch. 1~Ch. 3) は、計測回路から引き出される。偏波面保存光ファイバの温度は、0.2 mm 径の銅・コンスタンタン熱電対をファイバの側面に貼り付けて計測した。

図4は光ファイバの温度を 25°C 加熱および冷却したときの干渉計の出力結果で、出力 1, 2, 3 はそれぞれ式 (7), (8), (10) に相当する。この検証から、出力 1, 2 は温度変化による光ファイバの特性変化 (屈折率変化等) により大きく変化するが、その差の出力 3 は ± 15 nm 以内の誤差で変動する程度で、出力 1, 2 の差信号により光ファイバの外乱の影響がうまく相殺されていることがわかる。また、光ファイバの温度変化の大小にかかわらず、生じる誤差の大きさは ± 15 nm 以内で一定であった。

2.2.3 干渉計全体の性能検証

次に、干渉計全体の性能を実験的に検証する。図5は計測の基準となる基準面を有する光プローブの構成図で、15 mm 角のビームスプリッタ BS2 (石) に基準面としてコーナキューブ (石) を光学接着したものである。測定面側には、1/4 波長板 (水)、レンズ (石) が同様に光学接着されている。ここで、(石) は材質が石英ガラス、(水) は水晶を表す。検証のための変位として、積層形圧電素子アクチュエータにより測定面を一定周期で微小振動させた。このとき、測定面以外には外乱が加わらないよう注意した。その結果、レーザ光の 2 波長分に相当する与えた振動変位 $1.270 \mu\text{m}(\text{p-p})$ に対して、本干渉計による計測値 (出力 3) は $1.271 \mu\text{m}(\text{p-p})$ となり、良好な一致が得られた。ここで、与えた振動変位は電気光学結晶に電圧を印加しないで、単なるマイケルソン干渉計としてその干渉

Fig. 5 Composition of optical probe

信号波形から求め、計測値は出力 1, 2 および 3 のデジタル信号から求めた。

以上の光ファイバおよび干渉計全体の実験的検証より、本光ファイバを利用した干渉計は理論通りに作動する高精度な計測装置であることを確認した。なお、本干渉計の応答周波数は 10 kHz 程度、最小位相検出分解能はアナログ/デジタル変換の分解能から $1/512$ 波長に相当する約 1.24 nm ($\pi/128 \text{ rad}$) である。

3. 干渉計による熱膨張計測

3.1 実験方法

第2章で検証した光ファイバを利用した干渉計により、試料の最も単純な熱変形である面外方向の熱膨張を計測する。試料は熱膨張率の比較的大きいアルミニウム (A 5052), BK 7 および熱膨張率の小さい石英ガラスで、寸法はいずれも長さ 50 mm, 幅 20 mm, 厚さ 3 mm である。図6は光プローブおよび試料を保持する石英ガラス製の保持台で、図1の空気槽¹⁾内に置く。保持台は 45° の傾斜部を有し、光プローブをそこに光学接着し、試料をそこに静置する。試料は自重の分力により保持台に押し付け固定されているだけである。温度変化は、10°C, 20°C 加熱および冷却である。熱膨張の計測においては、温度変化による光プローブと測定面間の空気屈折率変化、光プローブ内に生じる光路長差および保持台の熱膨張を補正した。空気、光プローブおよび保持台の温度は、それぞれ 0.2 mm 径の銅・コンスタンタン熱電対により計測するが、これらの温度分布は空気槽内の空気温度に対して、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に制御した¹⁾。空気の屈折率補正は桜井の式⁷⁾により行ったが、温度以外の湿度、気圧等は計測中に変化しなかったため、温度の補正のみ行い、その他の補正は行わなかった。

Fig. 6 Holder with 45 deg-slope

Fig. 7 Thermal expansion of specimens

3.2 実験結果および検討

図7は計測結果で、3種類の試料とも直線状によく載っており、これを平均値と計測のばらつきとして表すと表1のようになる。試料はアルミニウムと石英ガラスで、数値はそれぞれ10回の計測における「平均値±ばらつき(μm)」を表している。いずれも、ばらつきは $\pm 0.06 \mu\text{m}$ (60 nm) 以内で、平均値に対する割合はアルミニウムが約0.3%、石英ガラスが約9%となり、熱膨張量が多い程精度良く計測できることがわかる。表1の右欄は前記計測した熱膨張量から求めた熱膨張率(線膨張率)で、ハンドブック等に表示される公称値と良く一致している。

Table 1 Mean thermal expansion of specimens and dispersion of data μm

Specimens	Temperature difference		Thermal expansion coefficient $1/^\circ\text{C}$
	10°C	20°C	
Aluminum (A 5052)	11.67 ± 0.05	23.36 ± 0.06	$23.35 E-6$
Fused silica	0.228 ± 0.02	0.452 ± 0.03	$0.454 E-6$

4. 結 論

本研究は、面外方向の高精度な熱変形計測に適した「光ファイバを利用した干渉計」の動作原理の検証およびその熱膨張計測への応用について検討したもので、以下の結論を得た。

- (1) 1本の偏波面保存光ファイバを用い、光は往路復路ともこの光ファイバ内を通るようにし、光ファイバ内の同一経路を通る二つの光の差信号により光ファイバの外乱の影響を相殺する「光ファイバを利用した干渉計」を考案した。
- (2) 温度変化等の外乱により光ファイバの特性が変化しても、干渉計に与える計測誤差は $\pm 15 \text{ nm}$ 以内であり、上記(1)の干渉計の動作原理を実験的に検証した。
- (3) 温度変化 20°C 以内の熱膨張計測において、光ファイバを利用した干渉計全体の計測のばらつきは $\pm 60 \text{ nm}$ 以内である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な御指導、御助言をいただきました東京大学工学部精密機械工学科大園成夫教授に心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 木村秀行, 高橋 毅: ホログラフィ干渉法を利用した熱変形計測(補正台による干渉補償法), 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, A 51, (1990) 595.
- 2) 谷村吉久, 黒沢俊郎: 光ファイバと結合した小形レーザ干渉計, 精密工学会誌, 55, 12 (1989) 2157.
- 3) 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) 477.
- 4) 中谷 登, 山田朝治, 阪部俊也: ナノメートル変位計測光ファイバヘテロダイン干渉計プローブ, 計測自動制御学会論文集, 25, 8 (1989) 841.
- 5) 大野 豊, 渡辺 栄: 光変調に利用される結晶, センサ技術, 7, 5 (1987) 38.
- 6) 梶岡 博: 偏波面保存光ファイバの種類と特長, 光技術活用ハンドブック, オプトロニクス社, (1989) 348.
- 7) 桜井好正: レーザ応用計測, 日本機械学会誌, 74, 624 (1971) 82.