Fiber Optic Interferometer Based on Triangular Wave Phase Modulation for Dynamic Displacement Measurement of Small Amplitude High Frequency Vibrations



田中 洋介 (Yosuke TANAKA, Dr. Eng.) 東京農工大学 大学院工学研究院 教授 (Professor, Tokyo University of Agriculture and Technology, Graduate School of Engineering) 著書:プラスチックオプティカルファイバの基礎と実際(第1編 第2章、 第1編 第3章), エヌ・ティー・エス(2000 年) 研究専門分野: 光エレクトロニクス 光計測 光ファイバセンサ

あらまし

マイクロマシンや超音波振動デバイス等の微細化、 高速化に伴い、微弱で高周波な振動の動的変位計測へ の期待が高まっている。また、生体科学や医用デバイ ス分野においても、振動現象に対する関心は高い。エ レクトロニクス技術や光デバイス技術が発展する中で、 複雑で高価なシステムを許容すれば、要求に応える微 弱高周波振動変位計測は十分に実現できる。しかし、 産業応用、医用応用を考える場合、将来広く普及し、 利用される技術となるには、低コストと高コストパフ ォーマンスとの両立が求められる。この観点から、我々 は光通信用デバイスを用いたシンプルな光ファイバ干 渉計による微弱高周波振動に対する動的変位計測を提 案してきた。これまでの研究は1点計測が中心であっ たが、本研究では、面上での多点計測ができ、かつ数 10 ナノワット程度の微弱な反射光にも対応可能なシ ステムの検討を行い、実証実験を行った。同時に、新 たな光変調方式の考案により、一点受光型のシンプル な干渉計でありながら、向きも含めた動的変位計測が 容易に行えるようになった。

1.研究の目的

本研究では、可能な限りシンプルな構成の光干渉計 を用い、振幅が数10 ナノメートル、基本周波数が100 kHz 以上の微弱高周波振動に対する動的変位計測の 実現を目的とした。以前の研究が、主に対象物体の一 点計測が中心であったのに対し、本研究では以前のシ ステムを発展させ、面上の多点計測を実現することを 目標とした。更に、生体器官のような低反射物体の振 動計測ができるよう、数 10 ナノワット程度の微弱な 反射光にも対応可能なシステムを目指した。上記の目 標値は、内耳等の生体器官や先進的なマイクロマシン デバイス、超音波振動素子の計測、評価を念頭に置い ている。これらの分野では、より高周波な振動に対す る動的変位計測への期待が高まっている。研究目標の 達成により、従来見落とされていた短時間領域での微 弱な変化が捉えられ、医用分野やデバイス分野発展に 貢献することが期待される。

2. 研究の背景

レーザ光を用いた動的変位計測は非接触、高感度、 高空間分解能であることから、超音波デバイス、マイ クロマシン、生体組織等の評価に有効である。皮下組 織、筋肉、筋膜、腱をはじめとする軟部組織をモニタ ーするエラストグラフィのような応用では、振幅が数 10 ナノメートル程度の振動に対する動的変位計測が 必要になる。このような計測では、光のドップラー効 果を利用したレーザドップラー速度計(LDV: Laser Doppler Velocimeter) が広く利用されている[1]。しか し、LDV による変位導出には計測速度の積分が必要と なり、積分過程で誤差を生じる可能性がある。LDV の 他には、白色光干渉計による光コヒーレンストモグラ フィ (OCT: Optical Coherence Tomography) を使用 する振動変位計測が検討されている[2]。しかし、標準 的な OCT ベースの動的変位計測は、一般に計測速度 が制限される。更に、超広帯域光源を用いた高分解能 OCT でも、その分解能は数マイクロメートルであり [3]、数 10 ナノメートルの変位計測は非常に難しい。 これらに対し、レーザ干渉計は微小振幅で高周波な振 動変位に対して高速で正確な計測が可能である。しか し、一般に高精度なレーザ干渉計は、システム構成が 複雑になりがちであった。

Fiber Optic Interferometer Based on Triangular Wave Phase Modulation for Dynamic Displacement Measurement of Small Amplitude High Frequency Vibrations

我々はこれまで、簡単な構成で高精度な動的変位計 測システムを実現する位相変調型光ファイバ干渉計の 研究を進めてきた。空間光学系による干渉計の場合は、 光学系の精密な調整が必要になるのに対し、光ファイ バ干渉計は、光を空間に出射する箇所以外は、光ファ イバ部品をつなげるだけで構築できる。計測対象が高 周波な振動変位であるため、周囲の温度変化等に伴う 光ファイバ長変化が引き起こす緩やかな干渉信号の変 化は無視できる。先行する類似研究には、正弦波位相 変調を加えた光ファイバ干渉計を用い、干渉信号の特 定の変調周波数成分を取り出して信号処理を行う手法 がある[4]。提案手法はこれとは異なり、主に三角波で 位相変調を行う光ファイバ干渉計であり、干渉信号の 時間波形データから簡単な計算により動的変位を導出 する[5-12]。

3. 研究方法と成果

3-1. 微弱反射光への対応[12]

最初に、これまでに構築した光ファイバ干渉計の信 号検出感度を向上させるため、受光部にバランス検波 を導入した。図1に実験系を示す。波長1537 nmの レーザ光源(LD)からのレーザ光が、光ファイバ干渉計 に入射する。干渉系の参照光路(Reference)にはニオブ 酸リチウム位相変調器(LNPM: LiNbO₃ Phase Modulator)が挿入されており、参照光は 20 MHz の三 角波により位相変調が加えられる。一方、プローブ光 はプローブ光路(Probe)が図 1(a)の場合は、サーキュレ ータを介して空間に出射し、測定対象の物体表面で反 射され、ファイバ内に戻る。最終的に、参照光とプロ ーブ光による干渉信号がバランス検波器で検出され、 その時間波形変化の解析により、物体の動的変位が計 測される。プローブ光路が図1(b)の場合は、プローブ 光は光位相変調器(LNPM)と可変光減衰器(ATT: Attenuator)を伝搬する。LNPM は電圧に比例した伝 搬光路長変化を与えることができるため、LNPM を交 流信号で駆動すれば、振動変位と同等の効果が得られ る。

まず図 1(b)の系を用いて、周波数 100 kHz、振幅 60 nm に相当する光路長変化をプローブ光に与えた。その上で、可変光減衰器により光パワーを-20 dBm(10

µW)から-50 dBm(10 nW)まで変化させ、微弱光に対 する 30 回以上の計測に対する計測成功率を調べた。

図2に反射光が微弱な領域における動的変位計測の 成功率を示す。比較のため、これまで使用した通常の 受光器を用いた場合の結果を併せて示してある。通常 の受光器では-30 dBm(1 µW)以下のプローブ光パワ ーでは計測ができなくなっているが、バランス検波器 を用いた系では-45 dBm(32 nW)のプローブ光パワ ーでも 90%の確率で計測に成功している。

続いて、図3のようにゴムシートやマウス内耳骨を PZTに取り付けた振動サンプルを用意し、図1(a)のプ ローブ光路に配置した。図4に PZTを100 kHz で駆 動した際の振動変位計測結果を示す。反射光がそれぞ れ45 nW、20 nW と非常に微弱でも、動的変位が計測 できている。



図 2 微弱光領域における測定成功率の比較 (a)バラン ス検波器 (●)、(b)通常の受光器 (■)



図 3 PZT 板に取り付けた振動サンプル. (a)ゴムシー ト、(b)マウス内耳骨

Fiber Optic Interferometer Based on Triangular Wave Phase Modulation for Dynamic Displacement Measurement of Small Amplitude High Frequency Vibrations



図 4 動的変位計測結果 (a) ゴムシート (反射光 45 nW)、(b)マウス内耳骨(反射光 20 nW)

3-2. 表面光吸収が大きい物体の動的変位計測[13]

これまでの研究では、波長 1.55 µm 帯のレーザ光源 を使用していたが、表面に水分を多く含む生体組織に 対しては水の吸収による光損失が問題となる。そこで、 水の吸収係数が比較的小さい波長 1.3 µm 帯のレーザ 光源と波長 1.3 µm 帯に対応するデバイスからなる新 たなファイバ干渉計を構築し、水分を多く含むサンプ ルの振動変位計測を行った。

本研究では、ゼラチン膜を貼り付けた PZT ミラーを サンプルとして使用した(図5)。このサンプルの動的 変位計測を波長 1.55 µm 帯のレーザ光源による従来の 系で試みたところ、光の減衰が大きく、計測ができな かった。これに対し、波長 1.3 µm 帯のレーザ光源を 用いた新たな系では、膜厚 3 mm のゼラチンで PZT ミ ラーが覆われている場合にも振動変位計測に成功した (図 6)。



図5 ゼラチン膜を貼り付けた PZT ミラー



図 6 膜厚 3 mm のゼラチン膜を貼り付けた PZT ミラ ーの動的変位計測結果

3-3. 変位方向が容易に検出可能なシステム [14]

一般的な光干渉計においては、1個の受光器から得 られる干渉光強度の変化から変位の向きを検出するこ とは難しい。これは、変位の向きが同じでもプローブ 光と参照光の初期状態での位相差によって、干渉光強 度が増加する場合と減少する場合があるためである。 多くの場合、2個かそれ以上の受光素子の使用によ り、向きも含めた変位計測が可能になる。一方、我々 は過去に簡単なフィードバック制御系により、向きを 含めた動的変位計測を実現したことがある[5]。今回 の研究では、参照光の三角波位相変調信号の形状を非 対称にすることで、フィードバック制御を用いること なく、向きを含めた動的変位計測が可能なことを実証 した。

図7に原理確認のための実験系を示す。レーザダイ オードからの出射光がカプラにより参照光路とプロー ブ光路に分岐される。参照光には、周波数10 MHz、 対称度70%の三角波による位相変調をLN位相変調器 (LNPM#1)によって加えた。提案手法は非対称三角波 で参照光を位相変調することにより、干渉波形の極値 が現れるタイミングに偏りが生じることを利用して振 動の向きを求める。プローブ光路には実際の振動物体 ではなく、LN 位相変調器(LNPM#2)を挿入し、

Fiber Optic Interferometer Based on Triangular Wave Phase Modulation for Dynamic Displacement Measurement of Small Amplitude High Frequency Vibrations

LNPM#2 による位相変化を疑似的に振動変位とみな した。振動の向きが明確に判別できるように、 LNPM#2 には正弦波の正の部分だけ切り出した信号 (100 kHz)を印加した。

図8に干渉波形とLNPM#2による疑似振動の計測 結果を示す。この実験では、20回行った計測すべて において振動変位計測に成功した。図8(a)のように 変位に対する干渉光強度の変化が負である場合も、図 8(b)のようにプローブ側の位相変調器に印加した信号 と同じ形状と向きの振動変位波形が得られた。このこ とから、本手法により向きを含めて振動の動的変位が 正しく計測されることが確認できた。



(b)



3-4. 空間波長分割多重による多点変位計測 [15]

ここでは干渉計のプローブ光路にガルバノスキャナ を組み込み、サンプル面上の任意の点の振動変位計測 が容易に行えるようにした(図10)。その上で、サン プルに外部から一定の周波数で振動を加え、サンプル 面上の任意の点における振動変位を計測することを考 えた。定常状態であれば、計測される振動と加振用の 信号との位相差は一定になる。このことに注意し、加 振用の信号と取得する干渉信号が同期をとれるように した。これにより、サンプル面上の複数の点の振動に ついて、それぞれの振動振幅と互いの位相関係が計測 できるようになり、サンプル面の振動状態がわかるよ うになった。



図 11 定常状態における複数点の(a)振動振幅、(b)振動の相対位相の計測結果

Fiber Optic Interferometer Based on Triangular Wave Phase Modulation for Dynamic Displacement Measurement of Small Amplitude High Frequency Vibrations

原理確認実験として、サンプル面にとった直線上の 3点(0mm,1mm,2mm)における振動振幅、およ び加振信号に対する相対位相を計測した。図11から、 振幅、相対位相が時間経過によらず一定であり、定常 状態の振動が正しく計測ができていることがわかる。 今後、より多くの点数に対して計測を行うことで、振 動モードが可視化できると期待できる。

4. 将来展望

微弱で高周波な振動現象の精密な動的変位の多点計 測が、定常状態であれば光ファイバ型のシンプルな干 渉計により、計測点相互の相対位相差を含めて実現可 能になった。今後は、多点計測を一括して行えるよう、 多波長レーザ光の利用や、異なる波長の光をサンプル 上の異なる点に照射する空間波長分割多重構成への展 開を進める。現在、本構成については2波長光による 原理確認が完了している[16]。

おわりに

本研究では、参照光に三角波で位相変調を加えた光 ファイバ干渉計による動的振動変位計測手法について、 システム改良と新規信号処理手法の開発を進め、高感 度高性能化を行った。具体的には、振幅が数10ナノメ ートル、振動数が100kHz程度で振動するサンプルか らの数 10 ナノワット程度の微弱な反射光にも対応可 能な感度達成、干渉計自体のシンプルさを失うことな く変位の向きも含めた精密計測の実現、定常状態にお ける相対位相を含めた多点振動変位計測の実現までを 行った。提案システムは、光位相変調器をはじめとす るハードウェアの制御に高い自由度を備えており、シ ステム自体を大きく変えることなく、信号処理の変更 で柔軟に対応できる透明性の高い構成であることから、 今後も引き続き発展すると見込まれる。将来的には、 マイクロマシンや超音波振動デバイスの評価、微弱な 高周波振動を伴う生体現象の観測等での利用により、 デバイス分野や医用計測分野の発展に貢献すると期待 される。

参考文献

[1] N. Donnelly, A. Bibas, D. Jiang, D. Bamiou,

C. Santulli, G. Jeronimidis, and A. Fitzgerald O'Connor, "Effect of cochlear implant electrode insertion on middle-ear function as measured by intra-operative laser Doppler vibrometry." The Journal of Laryngology & Otology, 123(7), 723-729 (2009).

- [2] S. Kim, J. S. Oghalai, and B. E. Applegate, "Noise and sensitivity in optical coherence tomography based vibrometry," Opt. Express 27, 33333-33350 (2019).
- [3] L. Bernstein, A. Ramier, J. Wu, V. D. Aiello, M. J. Béland, C. P. Lin, and S.-H. Yun, "Ultrahigh resolution spectral-domain optical coherence tomography using the 1000-1600 nm spectral band," Biomed. Opt. Express 13, 1939-1947 (2022).
- [5] O. Sasaki and K. Takahashi, "Sinusoidal phase modulating interferometer using optical fibers for displacement measurement," Appl. Opt. 27, 4139-4142 (1988).
- [4] Y. Tanaka, N. Miyata, T. Kurokawa, "Measurement of high-frequency dynamic displacement using light phase-modulated with triangle waveform," Measurement Science and Technology, 25, 025202 (2014).
- [5] Y. Tanaka, R. Kimura, T. Ito, T. Kurokawa, "Dynamic displacement measurement based on triangle phase modulation without preliminary measurement of half-wave voltage for phase modulator," Measurement Science and Technology, 28 045207 (2017).
- [6] O. Furukawa, Y. Tanaka, "Interference signal processing for dynamic displacement measurement with 1-ns time resolution" Appl. Phys. Express, 11(1) 012501 (2018).
- [7] O. Furukawa, Y. Tanaka, "Error dependence on operating point for phase modulation in dynamic displacement measurement using interference signal envelope," Japanese Journal of Applied Physics, 57 08PE05 (2018).

Fiber Optic Interferometer Based on Triangular Wave Phase Modulation for Dynamic Displacement Measurement of Small Amplitude High Frequency Vibrations

- [8] Y. Tanaka, K. Ueda, "Interferometric dynamic displacement measurement using phase modulated light along with stepwise control of operation point," Appl. Phys. Express, 11(11) 112501 (2018).
- [9] Y. Tanaka, O. Furukawa, K. Tsuchiya, "Data compensation and fiber optic probe for dynamic displacement measurement system with sinusoidally phase modulated reference light," Japanese Journal of Applied Physics, 58, 122001, (2019).
- [10] O. Furukawa, Y. Tanaka, "Time division multiplexing for multipoint measurement of dynamic displacement using interferometer with phase-modulated reference light," Japanese Journal of Applied Physics, 58, 050902 (2019).
- [11] O. Furukawa, S. Takemae, Y. Tanaka, "Dynamic displacement measurement beyond halfwavelength in phase-modulated optical interferometer," J. Opt. Soc. Am. A, 37, B78-B86 (2020).
- [12] M. Fujimori, S. Takemae, Y. Tanaka, "Sensitivity improvement of submicron dynamic displacement measurement system composed of phase-modulated fiber optic interferometer," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 61, SK1007, 2022.
- [13] Y. Noda, S. Matsumoto, M. Fujimori, Y. Tanaka, "Phase-modulated optical interferometer with time-domain analysis and its application to dynamic displacement measurement of soft tissue," Conference on Laser and Electro-Optics Pacific Rim 2022 (CLEO-PR2022), CFP6J-02, Sapporo, Hokkaido & Online, Japan, Aug. 5, 2022.
- [14] 松本 空、田中 洋介、「非対称三角波位相変調干 渉計による絶対方向検出が容易な動的変位計測」第
 70回応用物理学会春季学術講演会、17p-A502-14、 2023年3月.
- [15] K. Asanuma, Y. Noda, S. Matsumoto, and

Y. Tanaka, "Multi-point measurement of vibration displacements with their phase difference using phase-modulated interferometer," 28th Microoptics Conference (MOC2023), Tech. Digest pp.65-66, PO-20, Sept.25, 2023.

[16] 野田 優喜、田中 洋介、「空間波長分割多重によ る多点同時変位計測の基礎検討」第71回応用物理 学会春季学術講演会、25p-12B-8、2024年3月.

謝辞

この研究は、令和1年度SCAT研究助成の対象とし て採用され、令和2~5年度に実施されたものです。