

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13996

研究課題名（和文）GHz三角波位相変調光による超高速変位の精密測定

研究課題名（英文）Precision measurement of high-frequency displacement based on GHz phase modulation with triangular waveform

研究代表者

田中 洋介（Tanaka, Yosuke）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20283343

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、繰り返し測定をすることなく、一回で高速かつ微小な変位を精密測定できる手法として、高周波位相変調をかけたレーザ光を利用した干渉計測を提案し、実験による検証を行った。実験系は光通信で用いられる変調器や、光ファイバからなるもので、シンプルな構成で実現した。研究期間に、当初考案した三角波位相変調法のみならず、高周波正弦波位相変調の利用による手法も新たに発案し、50 MHz振動による動的変位の瞬時測定が可能なことを実証した。

研究成果の概要（英文）：We proposed and experimentally investigated an optical interferometry using laser light with high-frequency phase modulation in order to achieve single precision measurement of high-speed and minute displacement. A simple experimental setup composed of optical modulators and optical fibers used in optical communications systems was realized. We newly developed a method using high-frequency sinusoidal phase modulation in addition to the initially proposed method that uses triangular phase modulation, and proved that single measurement of the dynamic displacement for 50-MHz vibration is possible.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：振動変位計測 光計測システム

1. 研究開始当初の背景

本研究の背景には高速マイクロマシンや超音波デバイスの発展がある。これらの中には、基本振動数が 100MHz、振動変位振幅が数 10nm ~ 数 100nm に達するデバイスがある。一方、これまで、ドップラー法やホモダイン干渉法を利用したレーザ干渉系による振動変位計測が数多く検討されている。しかし、ドップラー法は測定レンジが広いが、原理的に速度計測であるため、高速変位の測定に対し、積分計算に伴う誤差が指摘されている。また、ホモダイン干渉法は大変位に対する出力が非線形なため、補償手段が必要となる。このような技術的背景から、申請者は、1ns にせまる短時間測定分解能をもつレーザ振動変位測定手法を開発することを計画した。

2. 研究の目的

本研究は、最大瞬時振動数 100 MHz、変位振幅数 10 nm ~ 数 100 nm の高速で非正常な振動の精密変位測定が可能な簡易なレーザ振動変位測定システムを構築することを目標として検討を進めた。

3. 研究の方法

本研究では、目的の達成に向け、偏波保持ファイバによる Mach-Zehnder 干渉計からなり、LiNbO<sub>3</sub>(LN)位相変調器により、参照光に対して高速な位相変調を加えるシステムを構築した。提案手法は、干渉信号の最小出力となる時刻の追跡だけで、簡単に変位の時間変化を測定できるという特徴がある。

我々は(1)位相変調に三角波を用いる手法と、(2)正弦波を利用する手法の2つを検討した。前者は、精度よく MHz オーダーの振動変位を測定出来る。当初、三角波の変調周波数を更に高くすることで、測定可能な振動周波数の向上を目指していたが、研究を続ける中で、後者の正弦波位相変調を利用する手法を新たに着想した。この手法は三角波を利用する場合よりも誤差が若干大きい、オーダー的には大差ないことがわかり、簡易なシステムで非常に高周波な非正常振動に対して、高精度測定を行う目標が実現できた。

4. 研究成果

(1) 参照光に三角波位相変調を加えた干渉計による振動変位測定

図1に本研究で提案した振動測定装置の基本構成を示す。半導体レーザからの出射光が、偏波保持光ファイバで構成された Mach-Zehnder 干渉計に入射し、参照光とプローブ光に分けられる。プローブ光は、サーキュレータとレンズを介して、振動物体に照射され、その反射光が再びサーキュレータを介して、干渉計に戻る。参照光は、LN 位相変調器により、物体の振動周波数より十分高周波な三角波で位相変調される。参照光とプローブ光が、カプラで合波された後、干渉光が

受光器(PD: Photodetector)で検出される。

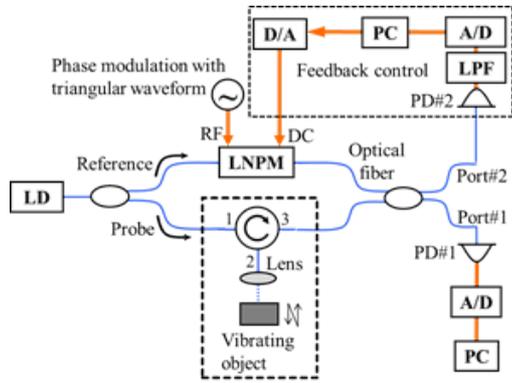


図1 三角波位相変調を利用した振動変位測定系

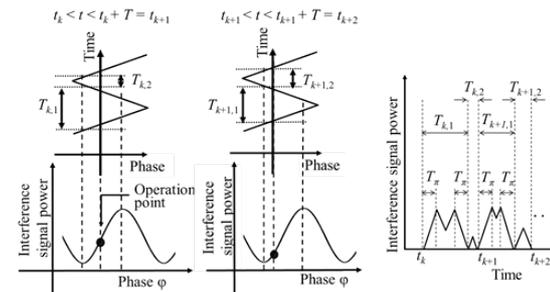


図2 三角波位相変調と干渉出力信号

図2に参照光路に印加する三角波位相変調とPDで観測される干渉信号の関係を示す。出力される干渉信号波形は、山形波形のピーク付近で必ず折り返しによる凹みが生じる。凹み(極小値)に隣接する最大値から、直近の最小値まで干渉信号が変化する時間に、プローブ光と参照光の位相差はπだけシフトする。この時間をT<sub>π</sub>とする。いま参照光の位相変調周期がTで、時間t<sub>k</sub> < t < t<sub>k</sub> + Tにおいて物体の反射点がZ = Z<sub>1</sub>にあり、それが時間t<sub>k</sub> + T = t<sub>k+1</sub> < t < t<sub>k+1</sub> + TでZ = Z<sub>2</sub>に移動したとする。このとき、それぞれの時間における一対の山形干渉波形の持続時間をT<sub>k,1</sub>、T<sub>k,2</sub>、T<sub>k+1,1</sub>、T<sub>k+1,2</sub>とする。変位ΔL<sub>k</sub>は、

$$\Delta L_k = \frac{\lambda}{16nT\pi} \left\{ (T_{k,1} - T_{k,2}) - (T_{k+1,1} - T_{k+1,2}) \right\} \quad (1)$$

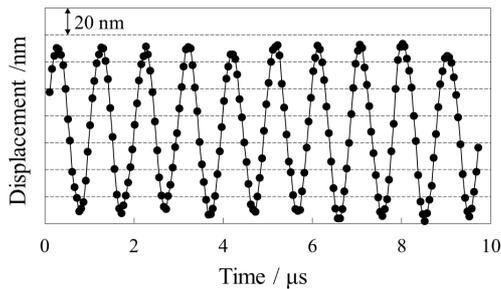
で与えられる。但し、λは光源波長、nは振動物体近傍の屈折率である。

変位ΔL<sub>k</sub> (k = 0, 1, 2)を順次求めることで、変位の時間変化を正確に測定できる。この手法では、LN位相変調器の半波長電圧Vも、変調信号の電圧振幅も事前の正確な測定が不要となる。

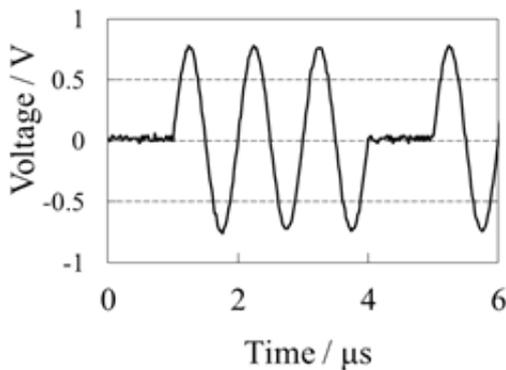
図3に測定結果の一例としてピエゾミラーの瞬時変位を時間と共に測定した結果を示す。MHzオーダーの振動数、~100 nmの振動変位の精密測定に成功している。

また、実際の振動物体の代わりにLN位相変調器による位相変化を変位に見立て、非正常振動測定についての性能評価を行った。図4

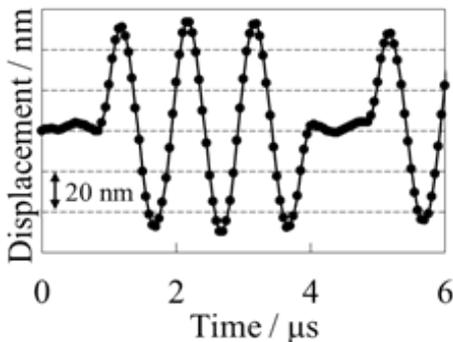
に LN 位相変調器への印加電圧と、**図 1** の測定系で物体の代わりに LN 位相変調器を挿入して行った測定結果の関係を示す。**図 4** から非定常で高速な変位が、提案手法により測定可能なことがわかる。



**図 3** ピエゾミラー(1.03 MHz)の振動変位測定結果



(a) LN 位相変調器による疑似振動



(b) 振動変位測定結果

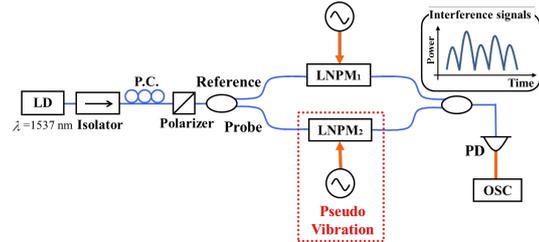
**図 4** 非定常振動変位測定の評価

以上の検討により、MHz オーダーの非定常振動変位の精密測定が実証された。多くの研究では、高周波振動に対しては、定常振動変位を求めているのに対し、我々は非定常な変位の測定に成功した。その意味で、当該分野に与えるインパクトは大きい。

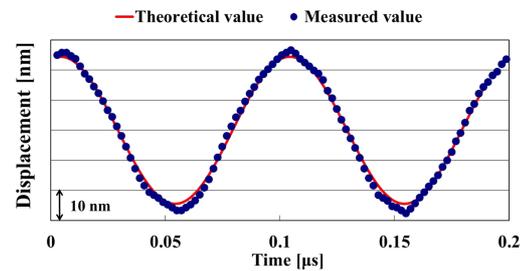
(2) 参照光に正弦波位相変調を加えた干渉計による振動変位測定

より高い瞬時振動周波数を持つような動きを捉えるため、新たに正弦波位相変調を参

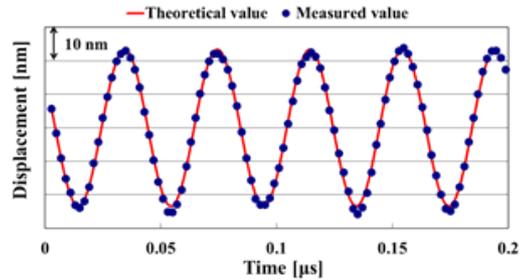
照光に加え、出力干渉波形の時間変化から測定対象の振動変位を逐次観測する手法を考案した。数 10 MHz の振動変位を正確に測定する他の手法がないため、**図 5** のように、この検討でもプローブ光路には実際の物体の代わりに、LN 位相変調器を挿入し、擬似的に高周波な振動を模擬した。



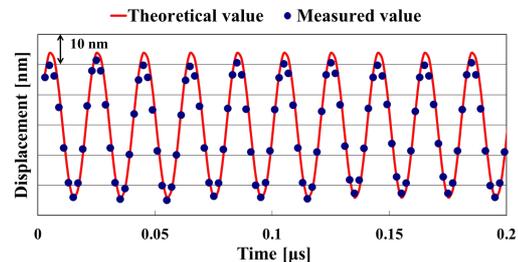
**図 5** 正弦波位相変調による振動変位測定の評価 (測定光路に LN 位相変調器による疑似振動を印加)



(a) 10 MHz



(b) 25 MHz



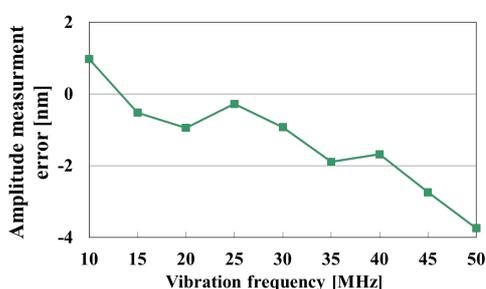
(c) 50 MHz

**図 6** 10-50 MHz 振動変位測定

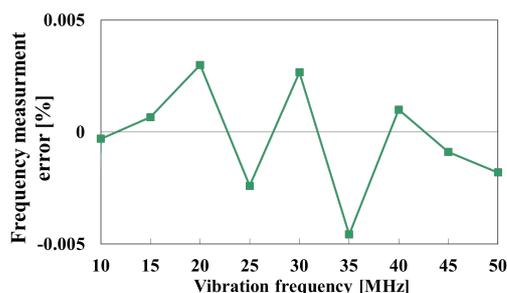
正弦波位相変調法では、三角波に較べ大幅に参照光の位相変調を高周波化できるため、少なくとも 50 MHz までの振動変位測定に成

功した(図6)。今後、干渉信号データの処理方法の工夫により、十分100 MHzまでの振動数の測定が可能と考えられる。なお、測定誤差は、30 MHzまでの正弦波擬似振動周波数において、入力信号波形に対する振動振幅測定誤差が1 nm以下となった(図7(a))。非定常な振動変位の瞬時測定としては、非常に高い精度が得られている。周波数測定についても同様で、10~50 MHzにおいて0.005%以下の誤差であった(図7(b))。

非定常な振動変位について、瞬時周波数50 MHzまでもの変位の高精度測定が可能手法は、内外での検討があまり進んでおらず、今回の研究はその先駆けとなる。今後、本手法が、デバイス評価、生体観測を始め様々な場面に適用されれば、今まで見逃していた現象が観測されるようになる。それにより、当該分野に新たな発展がもたらされるようになることが期待される。



(a)振幅測定誤差



(b)周波数測定誤差

図7 測定誤差評価

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

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*, 査読有, Vol.28, 045207, 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5d4b>

〔学会発表〕(計11件)

K. Tsuchiya, R. Kimura, Y. Tanaka, T. Kurokawa, "Precision measurement of dynamic displacement for unsteady vibration up to 50 MHz using phase modulated light," The 24<sup>th</sup> congress of the international commission for optics (ICO-24), Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Tu2A-06, Aug 22, 2017.

木村 亮祐、土屋 光揮、田中 洋介、黒川 隆志、「高周波位相変調光を用いた動的変位計測 MHz振動PZTの瞬時変位測定」第64回応用物理学会春季学術講演会、16a-418-8、パシフィコ横浜、2017年3月16日。

土屋 光揮、木村 亮祐、田中 洋介、黒川 隆志、「高周波位相変調光を用いた動的変位測定 - 測定系の周波数特性を用いた誤差低減」2016年度日本光学会年次学術講演会、1pPD2、筑波大学東京キャンパス文教校舎、2016年11月1日。

木村 亮祐、土屋 光揮、田中 洋介、黒川 隆志、「高速位相変調光を用いた振動変位計測信号光強度変動の影響についての実験的検証」第77回応用物理学会秋季学術講演会、16a-C32-6、朱鷺メッセ、2016年9月16日。

土屋 光輝、木村 亮祐、伊藤 孝優、田中 洋介、黒川 隆志、「高周波位相変調光による高速変位の計測」、光波センシング技術研究会 LST57-7、東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.47-52、2016年6月14日。

Y. Tanaka, T. Ito, R. Kimura, K. Tsuchiya, T. Kurokawa, "Simple and precise measurement of dynamic displacement for more-than-10-MHz vibration," CLEO 2016, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, JTU5A.143, June 7, 2016.

土屋 光輝、木村 亮祐、伊藤 孝優、田中 洋介、黒川 隆志、「高周波位相変調光を用いた高速振動変位の精密測定」、第63回応用物理学会春季学術講演会、20p-H116-20、東京工業大学大岡山キャンパス、2016年3月20日。

Y. Tanaka, "High-precision and high-performance photonic sensing systems using nonlinear phenomenon, coherent interference, and optical power supply (Invited)," 2016 IEEE 6th International Conference on Photonics (ICP2016), Hilton Hotel, Sarawak, Malaysia, 14-16 March, 2016.

木村 亮祐、伊藤 孝優、田中 洋介、黒川 隆志、「三角波位相変調光による高速振動変位計測 動作点の安定化」、光波センシング技術研究会 LST56-29、東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.183-188、2015年12月9日。

伊藤 孝優、木村 亮祐、田中 洋介、黒川 隆志、「位相変調光による高速振動変位の単一ショット精密測定」2015年度日本光学会年次学術講演会、PD-2、筑波大学東京キャンパス文教校舎、2015年10月29日。

木村 亮祐、伊藤 孝優、田中 洋介、黒川 隆志、「三角波位相変調光による高速振動変位計

測 深い変調による自動較正」、光波センシング技術研究会 LST55-10, 東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.69-74、  
2015年6月9日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 洋介 (TANAKA, Yosuke)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20283343