

令和元年6月7日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17743

研究課題名（和文）計測要求に能動的なインライン絶対測長器の開発

研究課題名（英文）Development of in-line absolute length measuring device active to measurement requirements

研究代表者

韋冬 (WEI, DONG)

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：70610418

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：光周波数コムは「隣接したパルス繰返し間隔長」（以下ではAPRIL）という物差を持っている。APRILによる長さ計測を実現するには、変形マイケルソン干渉計を提案している。両物体鏡からの反射光による干渉縞をそれぞれ取得できる。これまでは、干渉縞を線形検出していたが、干渉縞の非線形検出を試みた。

干渉縞から距離情報を特定するために、フーリエ変換法を利用し、包絡線を再建する。この再建にフーリエ変換法が使われる。その中で周波数領域に置いて、信号とノイズを区別するためにフィルタリングという操作がある。どのようにフィルタを選択するのか、明確な基準はなかった。周波数ペアモデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2009年、フェムト秒レーザーによるフェムト秒光周波数コム（以下では光コム）が計量法の特定標準器（長さ）として採用された。光コムの中心波長は通信用の光ファイバーの波長帯Cバンドと一致する。そのため、光コムが光ファイバー中を伝搬した時、光の損失が少ない。レーザー光がより長距離に伝搬できる。本研究はこのようなシステムができた時、送られた光信号から、どのように長さ計測を実現するのかを研究している。すべての長さ計測とそのトレサビリティは光ファイバーを介して、光コムによりリアルタイムで統一されることにつながる。

研究成果の概要（英文）：A nonlinear detector yields the interference fringes of the fundamental and high-harmonic waves in different frequency regions. We analyze the formation of nonlinearly detected interference fringes. We demonstrate, for the first time, that the interference fringes of high-harmonic waves can also be used to determine the position of zero optical path length difference between reference and object mirrors.

High-accuracy measurement using phase information of fringe patterns, that is not much affected by amplitude noises than amplitude information, in a pulse-train interferometer is demonstrated in this study. However, the selection criteria for spectral components of the measured interferogram for regeneration of phase information are not obvious. In this work, a frequency pair model is proposed.

研究分野：精密計測

キーワード：信号処理 測長 干渉縞解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2009年、フェムト秒レーザーによるフェムト秒光周波数コム (以下では光コム femtosecond optical frequency comb, FOFC) が計量法の特定標準器 (長さ) として採用された。光コムの中心波長は  $1.5 \mu\text{m}$  である。この中心波長は通信用の光ファイバーの波長帯 C バンド (Conventional-band 1530 - 1565 nm) と一致する。そのため、光コムが光ファイバー中を伝搬した時、光の損失が少ない。レーザー光がより長距離に伝搬できる。これは光コムから出た光信号を光ファイバーに通して、高精度測長を必要とする場所に配信できることを意味する。すべての長さ計測とそのトレサビリティは光ファイバーを介して、光コムによりリアルタイムで統一されることが可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究はこのようなシステムができた時、送られた光信号から、どのように長さ計測を実現するのか (光周波数コムのどのパラメータを長さの「ものさし」として用いるべきか) を研究している。メートルは真空中の光速で定義されている。ヘリウムネオン (He-Ne) は周波数が安定しているために、波長がメートルの実現手段に使われた。光周波数コムはコヒーレントな多色光である。波長以外に複数の波長のコヒーレントな集合である「隣接したパルス繰返し間隔長」 (以下では adjacent pulse repetition interval length: APRIL) という物差を持っている。我々は、波長の代わりに、APRIL を用いた長さ計測を一つのメートルの実現手段として提案している。

### 3. 研究の方法

(1) APRIL による長さ計測を実現するには、変形マイケルソン干渉計を提案している。それは重なった二つの干渉計である。それぞれ、バランスしたマイケルソン干渉計とアンバランスしたマイケルソン干渉計である。両干渉計が物体鏡以外は共通する。両物体鏡間の距離は計測したい長さである。両物体鏡からの反射光による干渉縞をそれぞれ取得できる。これまでは、干渉縞を線形検出していたが、干渉縞の非線形検出を試みた。

例えば、バランスしたマイケルソン干渉計において、光路差がゼロの時、パルス列が自分自身と重なる。その時、線形光検出器を使えば、パルス列による干渉縞  $|E_{obj} + E_{ref}|^2$  ( $E_{obj}$  と  $E_{ref}$  はそれぞれ、物体光と参照光とする) を観察することができる。その干渉縞は個々の周波数による干渉縞のインコヒーレントな重ね合わせである。光路差がゼロの時、パルス列が自分自身と重なるため、パルス列による自己相関値が最大となる。包絡線を再生し、自己相関を評価する。包絡線のピーク位置がゼロ光路差になる位置と対応する。

干渉光を線形光検出器で検出する場合、パルス列の電場による干渉縞しか検出できない。干渉光を非線形光検出器で検出する場合、 $|E_{obj} + E_{ref}|^2$  を得る。パルス列の電場による干渉縞

$|E_{obj} + E_{ref}|^2$  以外に、パルス列が持つ強度による干渉縞  $|E_{obj}^2 + E_{ref}^2|$  も検出できる。光路差がゼロの時、両パルス列が持つ電場が完全に重なる。その時、その二乗、つまり、両パルス列が持つ強度も完全に重なる。その意味で、電場による干渉縞と強度による干渉縞、両干渉縞の包絡線ピークが一致する。電場による干渉縞ピークがこれまでにゼロ光路差の位置検出に使われてきた。ならば、強度による干渉縞ピークもゼロ光路差の位置検出に使える。

(2) 干渉縞から距離情報を特定するために、フーリエ変換法を利用し、包絡線を再建する。この再建にフーリエ変換法が使われる。その中で周波数領域に置いて、信号とノイズを区別するためにフィルタリングという操作がある。どのようにフィルタを選択するのか、明確な基準はなかった。周波数ペアモデルを提案した。

### 4. 研究成果

(1) 強度による干渉縞ピークからゼロ光路差の位置を検出する必要性について述べる。両方法を比較した場合、それぞれにメリットとデメリットがある。強度による干渉縞の包絡線ピークが電場による干渉縞の包絡線ピークと比べて、よりとんがっている。よりシャープになっていることはピークを検出しやすくなっていることを意味する。一方、一般に非線形電気感受率は線形電気感受率と比べると十分小さい。電場による干渉縞は線形電気感受率に比例して、検出する。強度による干渉縞は非線形電気感受率に比例し、検出する。前者の包絡線は後者の包絡線と比べると十分大きい。別の視点から考える。従来にある電場による干渉縞のみを使って包絡線ピークを検出する方法と、提案法はノイズに応じて、処理する干渉縞を選択できることに意味がある。

(2) 干渉縞を離散フーリエ変換すると、離散した周波数成分が得られる。包絡線を得るには、すくなくとも二つの周波数が必要である。ノイズが完全にランダムであることと仮定する。スペクトルが大きい周波数成分の信号雑音比が良い。なぜなら、全ての周波数に様にノイズが分布するからだ。周波数スペクトルがつよい信号のみを包絡線再建に選択すればよい。しかし、包絡線再建に複数の周波数を選択すれば、平均に使う周波数が増える。変調・復調という観点

からは、より広い周波数成分を選択すれば、元の信号が再建される。測長を実現するためには、正しい包絡線ピークの位置だけを得ればよい。正しい包絡線を再現されなくても、包絡線ピークがしかるべき位置にあればよい。周波数ペアモデルを用いて、選択した周波数成分によって再建した包絡線に及ぼす影響を調べた。

(3) 空气中で計測した長さから空気屈折率による影響をなくすために、計測値を真空中の長さに変換する必要がある。この変換を実現するには、経験式がよく使われる。経験式では、空気屈折率を変数(波長、温度、湿度と気圧)の関数としている。これまでの議論は温度、湿度と気圧についてのみだった。本研究では波長の変動によって、不確かさはどのくらい変動するのかを確認した。計算の結果は長さ計測における不確かさ推定に役立つ。

(4) 本研究はランダム雑音を上記の距離情報特定点(つまり、包絡線ピーク点と位相クロス点)に及ぼす影響を調べた。周波数領域で信号成分を選択する際、包絡線ピークと相クロス点との一致を用いて、周波数領域に置けるフィルタを決定することを提案した。

#### <引用文献>

J. Ye and S. T. Cundiff, *Femtosecond optical frequency comb : principle, operation, and applications* (Springer, 2005).

D. Wei, K. Takamasu, and H. Matsumoto, "A study of the possibility of using an adjacent pulse repetition interval length as a scale using a Helium-Neon interferometer," *Precis. Eng.* 37, 694-698 (2013).

D. Wei, S. Takahashi, K. Takamasu and H. Matsumoto, "Time-of-flight method using multiple pulse train interference as a time recorder," *Opt. Express* 19(6), 4881-4889 (2011).

D. Wei, S. Takahashi, K. Takamasu and H. Matsumoto, "Analysis of the temporal coherence function of a femtosecond optical frequency comb," *Opt. Express* 17(9), 7011-7018 (2009)

#### 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7件)

D. Wei, M. Xiao and P. Yang, "Determination of calculation parameters for difference approximation of group refractive index of air based on two-point central method," *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications* 14(1), 14 (2018)

<https://doi.org/10.1186/s41476-018-0083-y>

D. Wei and M. Aketagawa, "Automatic selection of frequency domain filter for interference fringe analysis in pulse-train interferometer," *Optics Communications* 425(113-117) (2018)

<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.04.080>

D. Wei and M. Aketagawa, "Securing noise-adaptive selection of interference signal by nonlinear detection," *Optics Express* 26(15), 19225-19234 (2018)

<https://doi.org/10.1364/oe.26.019225>

D. Wei, M. Xiao and P. Yang, "Do we need all the frequency components of a fringe signal to obtain position information in a vertical scanning wideband interferometer?," *Optics Communications* 430(234-237) (2018)

<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.08.056>

D. Wei, P. Yang and M. Xiao, "Frequency pair model for selection of signal spectral components to determine position of zero optical-path difference in a pulse-train interferometer," *Optics Communications* 434(124-127) (2019)

<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.10.059>

D. Wei, Y. Nagata and M. Aketagawa, "Phase information-assisted method to obtain position of zero optical path difference for a pulse-train interferometer," *Optical Engineering* 57(11), 114106 (2018)

<https://doi.org/10.1117/1.OE.57.11.114106>

D. Wei and M. Xiao, "Using phase of second-harmonic interference fringes as a position marker for detecting the zero optical path difference in a nonlinear pulse-train interferometer," *Optical Engineering* 58(3), 034106 (2019)

<https://doi.org/10.1117/1.OE.58.3.034106>

〔学会発表〕(計 8件)

平 諒生, 韋冬 and 明田川正人, "群分散遅延を利用した多パルス列干渉による絶対長さ計測—第2報 空間分割装置の構築と予備実験—," in *2018年度精密工学会春季大会学術講演会* pp. 169-170, 精密工学会, 中央大学、東京 (2018).

榎 健太, 韋冬 and 明田川正人, "パルス列干渉計における干渉信号抽出フィルタに関する提案—第1報: 原理の提案及び数値計算による検証—," in *2018年度精密工学会春季大会学術講演会* pp. 151-152, 精密工学会, 中央大学、東京 (2018).

D. Wei, K. Enoki and M. Aketagawa, "Selection of frequency domain filter based on match of different location specific points," in *Proc. SPIE 10819, Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications V*, p. 108191F, SPIE, Beijing, China (2018).

韋冬 and 明田川正人, "ランダム雑音が距離情報特定点に及ぼす影響," in *第65回応用物理学会春季学術講演会*, pp. 20p-P22-21, 東京、早稲田大学・西早稲田キャンパス (2018).

韋冬 and 明田川正人, "包絡線再建のための周波数選択に周波数ペアモデルの適用," in *第66回応用物理学会春季学術講演会*, pp. 11a-W935-938, 東京、東京工業大学 (2019).

韋冬 and 明田川正人, "非線形光検出器による干渉縞から位置計測に関する研究," in *日本光学会 Optics and Photonics Japan 2018 講演予稿集*, p. 1pB6, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京 (2018).

韋冬 and 明田川正人, "干渉縞包絡線ピーク検出用に周波数領域に置ける信号抽出フィルタ," in *第79回応用物理学会秋季講演会論文集*, pp. 18p-PA14-18, 名古屋国際会議場, 名古屋 (2018).

小野寺 充, 韋冬 and 明田川正人, "ゼロ詰め処理による干渉縞再建の高精度化—数値計算による原理確認—," in *2019年度精密工学会春季大会学術講演会* pp. 925-926, 精密工学会, 東京電機大学、東京 (2019).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

研究者詳細

<https://souran.nagaokaut.ac.jp/view?l=ja&u=100000303&a2=0000013&a3=0000032&sm=affiliation&sl=ja&sp=1>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：該当なし

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：明田川 正人

ローマ字氏名：( AKETAGAWA, Masato )

研究協力者氏名：楊 平

ローマ字氏名：( Yang, Ping )

研究協力者氏名：肖 木崢

ローマ字氏名：( Xiao, Muzheng )

研究協力者氏名：陳 梅雲

ローマ字氏名：( Chen, Meiyun )

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。