

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04103

研究課題名(和文)パルス列間隔長を用いた実時間高精度光ゲージの開発

研究課題名(英文)Development of real-time high-precision optical gauge using pulse train spacing length

研究代表者

韋 冬 (WEI, DONG)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70610418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：光周波数コム(光コム)は安定した光源として注目されている。本研究は隣接したパルス列の繰返し間隔長を用いた測長法を開発している。これまでの干渉縞処理は離散フーリエ変換と逆離散フーリエ変換を利用して、全ての包絡線が再建されていた。必要なデータは包絡線ピークを判別するために、その近傍の包絡線のみである。本研究では非線形離散フーリエ変換である歪みのある離散フーリエ変換やチャープZ変換などによる干渉縞の包絡線再建に関する内容を研究した。例えば、離散フーリエ変換の代わりに、チャープZ変換を使って、包絡線ピーク近傍の包絡線のみを選択し再建する方法を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光周波数コム(光コム)は安定した光源として注目されている。安定した光コムは、波長と隣接したパルス列の繰返し間隔長が長さの物差しとして使える。本研究はこの繰返し間隔長を用いた測長法を開発している。これまでは、パルス列による干渉縞の再建に離散フーリエ変換が使われていた。非線形離散フーリエ変換を使えば、干渉縞包絡線のピークに応じてその位置分解能を増強できる。本研究では歪みのある離散フーリエ変換を用いた干渉縞包絡線再建を試みる。また、チャープZ変換により、一部の包絡線のみを再建する方法も検討した。これらの研究成果は長さ計測に必要な包絡線ピークの高速度・高精度検出に役立つ。

研究成果の概要(英文)：Optical frequency combs (optical combs) are attracting attention as stable light sources. This study is developing a length measurement method using the repetition interval length of adjacent pulse trains. In the conventional method, by using interference fringe processing, all envelopes were reconstructed using the discrete Fourier transform and the inverse discrete Fourier transform. The data needed is the envelopes around its peak to determine the position of envelope peak. In this study, we studied the contents related to the reconstruction of an warped envelope of the interference fringes by the warped discrete Fourier transform, which are non-linear discrete Fourier transforms. Instead of the discrete Fourier transform, we used the chirp Z-transform to verify how to select and reconstruct only the envelope near the envelope peak.

研究分野：精密計測

キーワード：精密計測 応用光学 測長 分解能 干渉縞解析

1. 研究開始当初の背景

2009年7月、日本の計量法に定められた長さの国家標準(特定標準器)がフェムト秒光周波数コム(以下、光周波数コム)へと変わった。光周波数コム[1]は安定した光源として注目されている。安定した光周波数コムは、波長と隣接したパルス列の繰返し間隔長が長さの物差として使える。本研究はこの繰返し間隔長を用いた測長法を開発している[2]。

2. 研究の目的

これまで、パルス列による干渉縞の再建に離散フーリエ変換が使われていた。本研究では離散フーリエ変換の代わりに、チャープZ変換を使って、包絡線ピーク近傍の包絡線のみを選択し再建する方法を検証した。計測の高速化を目指した。

非線形離散フーリエ変換を使えば、干渉縞包絡線のピークに応じてその位置分解能を増強できる。研究の成果は長さ計測における位置検出の高精度化に役立つ。本研究では非線形離散フーリエ変換である歪みのある離散フーリエ変換(warped discrete Fourier transform、WDFT)[3]、による干渉縞の包絡線再建に関する内容[4]を行った。

本研究では周波数領域において、干渉縞の信号スペクトルとノイズスペクトルを自動的に分離する手法を検討し、計測精度の向上を目指した。

3. 研究の方法

時間領域で見ると、光周波数コムは安定したパルス列である。周波数領域で見ると、光周波数コムは離散した複数(100万も)の周波数成分を持つ。光周波数コムを光源としたマイケルソン干渉計を考える。マイケルソン干渉計を構成する物体鏡と参照鏡がある。その両者間にある光路差がパルス列の繰返し間隔長の整数倍になると、異なるパルス列が重なる。例えば、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。

間隔長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、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。位置情報を干渉縞で記録している。

バランスしたマイケルソン干渉計において、物体鏡と参照鏡の位置が一致すれば、時間コヒーレンスが最大となる。時間コヒーレンス関数は包絡線で評価できる。包絡線ピークの位置を検出すれば、対象点の位置を得ることができる。これまでの干渉縞処理は離散フーリエ変換と逆離散フーリエ変換を利用して、全ての包絡線が再建されていた[5]。必要なデータは包絡線ピークを判別するために、その近傍の包絡線のみである。そのため、離散フーリエ変換の代わりに、チャープZ変換[6]を使って、包絡線ピーク近傍の包絡線のみを選択し再建する方法[7]を検証した。

干渉光から包絡線を検出する場合、これまで、離散フーリエ変換(Discrete Fourier transform、DFT)と離散逆フーリエ変換(Discrete inverse Fourier transform、IDFT)のペアが使われている。再建した包絡線の分解能を上げたいとき、周波数領域において、スペクトルの両側にゼロをつめることが考えられる。擬似的に、周波数領域の最高周波数帯域を高めることができる。処理すべきデータ量が増えるというコストを支払う。最近では、眼底構造に習った非線形処理、つまり、見たいところに高い分解能で処理する手法[8]が提案されている。この考え方が本研究に適している。なぜなら、我々は包絡線ピークの位置のみを詳しく知りたい。これを実現するには、包絡線のピーク近くのみを高い分解能で調査すればよい。従来法では、DFTは時間領域から周波数領域への線形マッピングを実現する。IDFTは周波数領域から時間領域への線形マッピングを実現する。何らかの方法で、周波数領域から時間領域への非線形マッピングを実現すればよい。非線形マッピングはWDFTを用いたことで実現できる方法を提案した。

すでに述べたように干渉縞からその包絡線を再建するには、一般に、離散フーリエ変換とその逆フーリエ変換が使われる。周波数領域で信号スペクトルのみを取り出すことで、干渉縞信号の包絡線を再建できる。

実際、周波数領域で信号スペクトルとノイズスペクトルが混ざり合っているため、完全に信号スペクトルのみを取り出すことが困難である。何らかの方法で、ノイズスペクトルを包絡線の再建にできるだけ少なく取り込む必要がある。そのため、設定するバンドパスフィルタで行うノイズ除去が適切でないと、再建した包絡線にノイズが乗りピーク位置を正しく推定できない。従来法では、干渉縞に対して離散フーリエ変換を行い、周波数領域では経験則でフィルタを設定していた。本研究では、干渉縞信号に含まれる信号スペクトルとノイズスペクトルの周波数分布の違い[9]に注目した。両者のスペクトルの分布特徴を活用することでフィルタの自動決定手法を提案した。

4. 研究成果

まずは、チャープ Z 変換を使って、包絡線ピーク近傍の包絡線のみを選択し再建できた。

次に、本研究は歪みのある離散フーリエ変換を用いた干渉縞包絡線再建を試みた。その結果、包絡線ピークに対応した包絡線の高分解能再建につながった内容を報告できた。

また、本研究では、信号スペクトルとノイズスペクトルの違いから信号スペクトルのみを特定できるか検討した。周波数領域において、信号スペクトルから十分に離れた周波数領域で、統計的に得られたノイズスペクトルパラメータを用いる。ノイズスペクトルの特徴値によって信号スペクトルとノイズスペクトルの判別に使える可能性があることが分かった。推定した結果の信頼性を高めるため、複数の分散値を検討した。実際の光学系で得られた干渉縞に対して、提案法を検証した。

これらの研究の成果は長さ計測に必要な包絡線ピークの高速度・高精度検出に役立つ。

参考文献

- 1) J. Ye and S. T. Cundiff, Femtosecond optical frequency comb : principle, operation, and applications (Springer, 2005).
- 2) D. Wei and M. Aketagawa, Opt. Comm. 382 (2), 604-609 (2017).
- 3) A. Makur and S. K. Mitra, IEEE T CIRCUITS-I 48, 1086-1093 (2001).
- 4) D. Wei, Y. Nagata, and M. Aketagawa, Optics Communications 472, 125870 (2020).
- 5) M. Takeda, "Fourier Fringe Demodulation," in Phase Estimation in Optical Interferometry (CRC Press, 2014), pp. 1-30.
- 6) J. G. Proakis and D. G. Manolakis, Digital signal processing (3rd ed.): principles, algorithms, and applications (Prentice-Hall, Inc., 1996).
- 7) D. Wei and C. Meiyun, Optics Express 27(10), 13803-13808 (2019)
- 8) C. L. Chen, A. Mahjoubfar, and B. Jalali, PLOS ONE 10, e0125106 (2015).
- 9) J. Yamauchi and T. Shimamura, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences E85A, 723-727 (2002).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Wei Dong, Nagata Yusuke, Aketagawa Masato	4. 巻 472
2. 論文標題 Envelope peak-adaptive resolution enhancement of interference fringes using a nonlinear frequency-to-time mapping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 125870 ~ 125870
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2020.125870	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wei Dong, Nagata Yusuke, Aketagawa Masato	4. 巻 475
2. 論文標題 Suppression of noise in modulation frequency range of interferometer using spectral subtraction method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 126294 ~ 126294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2020.126294	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wei Dong, Nagata Yusuke, Sano Motohisa, Aketagawa Masato	4. 巻 483
2. 論文標題 Cluster analysis based fringe-activity range detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 126626 ~ 126626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2020.126626	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wei Dong, Nagata Yusuke, Sano Motohisa, Aketagawa Masato	4. 巻 488
2. 論文標題 A scanner error discriminator based on short-time Fourier transform in pulse train interferometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 126816 ~ 126816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2021.126816	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wei Dong, Nagata Yusuke, Sano Motohisa, Aketagawa Masato	4. 巻 60
2. 論文標題 Determining a bandpass filter for interfering fringe spectrum extraction using clustering analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Engineering	6. 最初と最後の頁 034105-034105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.OE.60.3.034105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wei Dong, Meiyun Chen	4. 巻 27
2. 論文標題 Reconstruction of partial envelope of interference pattern based on chirp Z-transform	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 13803 ~ 13803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.013803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wei Dong, Nagata Yusuke, Aketagawa Masato	4. 巻 472
2. 論文標題 Envelope peak-adaptive resolution enhancement of interference fringes using a nonlinear frequency-to-time mapping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 125870 ~ 125870
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2020.125870	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wei Dong, Takeuchi Keitaro	4. 巻 510
2. 論文標題 Application of two-dimensional warped discrete Fourier transform to nonlinear two-dimensional amplitude demodulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 127972 ~ 127972
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2022.127972	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wei Dong, Fujiyama Taiga, Aketagawa Masato	4. 巻 6
2. 論文標題 High-resolution demodulation of interference envelope peak at arbitrary positions by warped discrete Fourier transform	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Results in Optics	6. 最初と最後の頁 100218 ~ 100218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rio.2022.100218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 長田 悠佑, 韋 冬, 明田川 正人, 藤山 大雅
2. 発表標題 干渉縞信号の形成特徴に注目した信号 処理によるパルス列干渉計における変位測定の高精度化
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 韋 冬, 長田 悠佑, 明田川 正人
2. 発表標題 歪みのある離散フーリエ変換による干渉縞包絡線再建
3. 学会等名 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 韋 冬, 陳 梅雲
2. 発表標題 包絡線ピーク近傍の干渉縞包絡線の選択再建
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Dong Wei and Meiyun Chen
2. 発表標題 Partial reconstruction of phase of interference pattern based on a generalized discrete Fourier transform
3. 学会等名 SPIE/COS Photonics Asia, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤山大雅 章冬, 明田川正人
2. 発表標題 フェムト秒パルスレーザを光源とするパルス列干渉計の干渉縞包絡線ピークの高分解能検出
3. 学会等名 2022年精密工学会春季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>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 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 研究室ホームページ https://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~weidong/index.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	明田川 正人 (Aketagawa Masato) (10231854)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------