

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月10日現在

機関番号：12601  
 研究種目：研究活動スタート支援  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23860013  
 研究課題名（和文） 光周波数コム長さ校正ネットのための実時間・高精度空気揺らぎ補正システムの開発  
 研究課題名（英文） Development of real-time, high-precision air fluctuation correction system for length calibration via net using optical frequency comb  
 研究代表者  
 章 冬 (WEI DONG)  
 東京大学・大学院工学系研究科・特任研究員  
 研究者番号：70610418

研究成果の概要（和文）：計測現場における計測精度の向上を図るためには、光周波数コムに直接リンクした長さ計測技術を開発する必要がある。光周波数コムを用いた長さ計測の精度を向上させるために不可欠な空気の揺らぎ補正を取り上げ、構築した光学システムを用いて空気の揺らぎによる誤差を補正する技術要件を検討し、高精度で絶対的長さを計測できる方法を用いて提案法の検証を目標に研究を進めた。

研究成果の概要（英文）：The possibility of using an adjacent pulse repetition interval length (APRIL) as a scale is investigated. In an experiment, an APRIL was measured by using a Helium-Neon interferometer, and the measurement was compared with the result of a direct frequency count. The difference was a few hundred nanometers, and thus the APRIL's effectiveness as a length scale was confirmed. The present concept and analysis pave the way for the development of the remote transfer of APRIL as a length standard via fiber networks.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：光学計測、長さ計測、標準、フェムト秒光周波数コム、トレーサビリティ、校正システム、光ファイバー、ネットワーク

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 研究の背景

2009年7月、日本における長さの国家標準はヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーからフェムト秒光周波数コム（光周波数コム）へと変わった。計測現場における計測精度の向上を図るためには、光周波数コムに直接リンクした長さ計測技術を開発する必要がある。

る。

#### (2) 国内・国外の研究動向

##### ① 国外の研究動向

近年、米国や欧州などでは空気中における長さ計測技術を向上させるために光周波数コムを用いた高精密度な長さ計測に関する研究が進められている[M. G. Zeitouny, M. Cui,

A. J. Janssen, N. Bhattacharya, S. A. van den Berg, and H. P. Urbach, "Time-frequency distribution of interferograms from a frequency comb in dispersive media," *Opt. Express* 19, 3406-3417 (2011).、J. Lee, Y.-J. Kim, K. Lee, S. Lee, and S.-W. Kim, "Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses," *Nat Photon* 4, 716-720 (2010).、Coddington I, W. C. Swann, Nenadovic L, and N. R. Newbury, "Rapid and precise absolute distance measurements at long range," *Nat Photon* 3, 351-356 (2009). ]。例えば、2008年に、国際プロジェクト「Absolute Long-distance Measurement in Air」はヨーロッパ測定研究プログラムの一部として始められた[M. G. Zeitouny, M. Cui, A. J. Janssen, N. Bhattacharya, S. A. van den Berg, and H. P. Urbach, "Time-frequency distribution of interferograms from a frequency comb in dispersive media," *Opt. Express* 19, 3406-3417 (2011).]。

## ② 国内の研究動向

日本でも、2000年以後、光周波数コムを用いた長さ計測の研究が進められている[K. Minoshima and H. Matsumoto, "High-Accuracy Measurement of 240-m Distance in an Optical Tunnel by Use of a Compact Femtosecond Laser," *Appl. Opt.* 39, 5512-5517 (2000).]。最近では、高エネルギー加速器研究機構が中心に進められている国際リニアコライダープロジェクトにおいて、数百メートル以上となる次世代線形加速器の全長にわたり、数マイクロメートルの測定誤差が保証できるような高精度な計測法の開発が期待される。[H. Matsumoto, X. Wang, K. Takamasu, and T. Aoto, "Absolute Measurement of Baselines up to 403 m Using Heterodyne Temporal Coherence Interferometer with Optical Frequency Comb," *Applied Physics Express* 5, 046601 (2012).]

## 2. 研究の目的

これまでの、パルス列間干渉現象の基本である光周波数コムの時間コヒーレンス関数に関する研究を取り上げ、それに基づいて新たな計測法などを提案した[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, 4881-4889 (2011).]。

これまでの研究で分かった問題点は空気中での高精度の長さ計測を実現するには空気の揺らぎを補正する必要がある。光が真空中での伝搬速度は正確に 299792458 m/s

である。空気中で長さを計測するには、空気中における光速度を求める必要がある。空気中の光速度に影響するパラメータは空気の屈折率とその揺らぎである。空気の屈折率は Edlén の式を用いて、 $10^{-8}$  オーダーで補正できる。空気の揺らぎをどのように補正するかは残された問題である。

## 3. 研究の方法

これまでの経緯を踏まえて、光周波数コムを用いた長さ計測の精度を向上させるために不可欠な空気の揺らぎ補正を取り上げ、そのモデルを構築し、構築した光学システムを用いて空気の揺らぎによる誤差を補正する技術要件を検討し、高精度で絶対的長さを計測できる方法を用いて提案法の検証を目標に研究を進めた。

実験に用いた光周波数コム光源を安定性させるために、図1に示すような周波数装置を用いた。

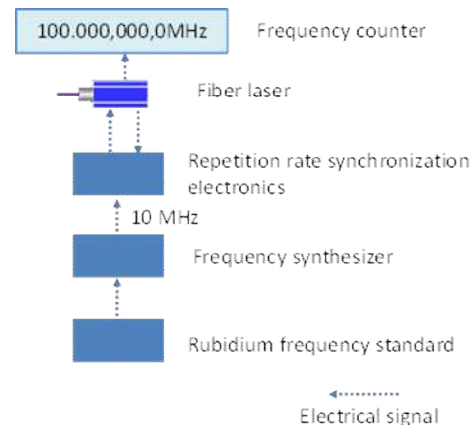


図1、光源の安定化

実験に利用した構築した一つの光学系を図1に示す。

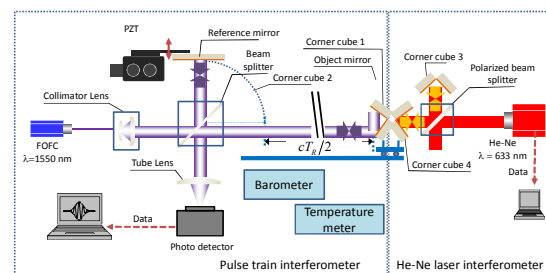


図2、長さを比較する光学系

(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, *Precision Engineering*,

37 卷, 2013、 694-698 より引用)

具体的には、以下のことを目的として研究を行った。(1) 生産環境におけるメートルオーダーに渡って空気の揺らぎに関するモデルについて、調査・考案した。(2) 補償光学に基づいた空気揺らぎの補正に関する技術要件を検討した。(3) 補正システムの高精度での補正を活かした長さ計測を試みた。

変更した光学系を利用し、引き続き、実験部品のスペックを見積もって、調達し、高精度な補正機能を活かした長さ比較計測実験を行った。

長さ計測部分は光周波数コムを用いて参照鏡を基準に物体鏡までの長さ計測をし、計測した長さデータが得られる。異なる干渉計を用いて、揺らぎを含んだ変位データが得られる。計測した長さデータから検出された揺らぎ成分を引くことにより、補正された長さを得た。

連携研究者の高増は、計測のモデル化や誤差分析に経験が豊富で、数値解析・誤差解析[高増潔、"巻頭言 光計測を工場で使うために、" 光学 39、113、(2010)。]に関して連携研究体制をとる。連携研究者の松本は、長年にわたり計測標準[松本弘一、"総合報告 計量標準とトレーサビリティ、" 光学 39、114-121、(2010)。]に携わり、計測法体系化や実験において連携研究を行った。

得られた結果を国外・国内学会で成果を報告した。

#### 4. 研究成果

発表された論文[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, Precision Engineering, 37 卷, 2013、 694-698]の内容をメインに説明する。

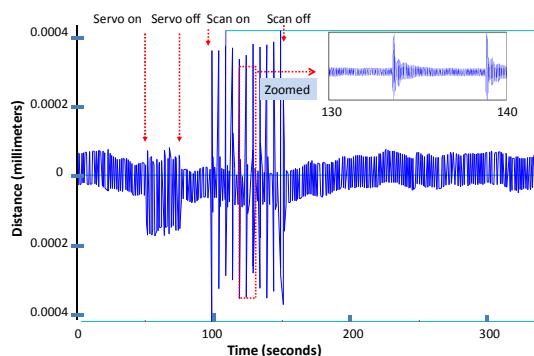


図 3. 実験環境の確認

(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, Precision Engineering, 37 卷, 2013、 694-698 より引用)

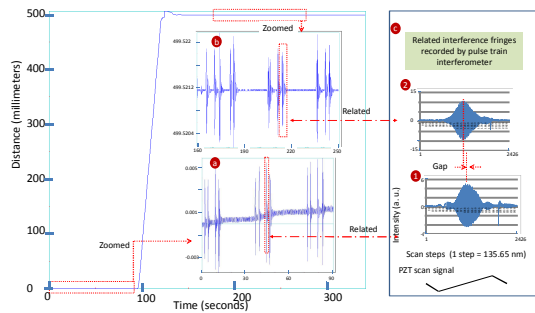


図 4. 計測した長さを示すデータ

(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, Precision Engineering, 37 卷, 2013、 694-698 より引用)

長さ計測を実施する前に、ミラー走査とステージ走査が発する振動が干渉系にどの程度の影響を与えるかを調べた。図 3 にその実験結果を示す。この結果から、長さ計測を実施して、有意な計測結果が得られることを確認した。

図 4 に計測した長さデータを示す。ある長さを計測するために、それより精度のよい比較対象が必要となる。本研究はヘリウムネオンレーザを比較対象としている。図 4 の左側にヘリウムネオンレーザで得られた長さデータを示している。図 4 の右側にパルス列干渉系で得られた長さデータを示している。両干渉系で得られたデータを比較することによって、有意な長さ計測実験が実施したことを確認した。

本研究は空気中でメートルオーダーの長さに対して、数百ナノメートルの精度で長さ計測を実施した。

#### 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)

①D. 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, Precision Engineering、査読有、37 卷, 2013、 694-698

(10.1016/j.precisioneng.2013.02.001)

[学会発表] (計 6 件)

①韋 冬、高増潔、松本弘一、フェムト秒光周波数コム<sub>の時間コヒーレンス</sub>応用計測の研究(第5報)ー既存法との類似性より提案法が持つ計測精度の見積ー、2013年度精密工学会春季大会、2013年03月13日～2013年03月15日、東京工業大学、東京

②D. Wei, K. Takamasu, and H. Matsumoto, Length measurement based on Pulse repetition interval of a femtosecond optical frequency comb, 12th euspen International Conference, 2012年06月04日～2012年06月08日、ストックホルム、スウェーデン

③ D. Wei and H. Matsumoto, Using an adjacent pulse repetition interval length as a scale for length measurement directly linked to a femtosecond optical frequency comb, FiO (Frontiers in Optics)/LS (Laser Science) 2012, 2012年10月14日～2012年10月18日、ロチェスター、米国

④韋 冬、高増潔、松本弘一、Development of real time and highly accurate air turbulence correction system、東京大学第4回GMSI国際シンポジウム、2012年3月2日、東京大学、東京

⑤韋 冬、高増潔、松本弘一、フェムト秒光周波数コムによる多パルス列干渉を合致法に適用した任意かつ絶対的測長、2011年日本光学会年次学術講演会、2011年11月29日、大阪大学、大阪

⑥D. Wei, K. Takamasu, and H. Matsumoto, Pulse repetition interval-based Excess Fraction method for an arbitrary and absolute distance measurement using a femtosecond optical frequency comb, SPIE Photonics West, 2012年1月22日、サンフランシスコ、カリフォルニア州、アメリカ合衆国

[その他]

ホームページ等

高増・高橋研究室 最新情報

<http://www.nanolab.t.u-tokyo.ac.jp/>

高増・高橋研究室 論文・業績などのリスト

<http://www.nanolab.t.u-tokyo.ac.jp/ronbun.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

韋 冬 (WEI DONG)

東京大学・大学院工学系研究科・特任研究

員

研究者番号：70610418

### (2) 連携研究者

高増 潔 (TAKAMASU KIYOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：70154896

松本 弘一 (HIROKAZU MATSUMOTO)

東京大学・大学院工学系研究科・特任教授

研究者番号：00358045