

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286076

研究課題名(和文)光コムによる環境自己補正型の精密長さ計測工コ技術の開発

研究課題名(英文) High-accuracy length metrology with self-correction of environmental fluctuation using optical frequency combs.

研究代表者

美濃島 薫 (MINOSHIMA, Kaoru)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：20358112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：高精度長さ計測において主要な誤差要因である空気屈折率の環境変動に対し、光コムを用いて光学距離測定の高精度化を図り、空気屈折率補正の大幅な高精度化を実現した。多波長光コムの周波数制御による干渉計測により、空気屈折率の波長分散関係を高精度に測定し、目的の光学的距離測定のみで高精度かつリアルタイムに自己補正するための基礎技術を開発した。特に、空気屈折率の経験式との比較を用いない自己評価手法の開発を行い、式の精度に制限されない高精度な空気屈折率補正法を実証した。実用的環境の高精度長さ測定の実現により、エネルギー消費低減の道を拓くと同時に、空気屈折率の経験式自体の書き換えにもつながると期待される。

研究成果の概要(英文)：Air refractive index correction is one of the major sources of uncertainty in length metrology. In this study, high-accuracy length measurement method by use of optical frequency combs was developed and significant improvement in the accuracy of air refractive index correction was achieved. High-precision interferometric measurement method of dispersion relation of air refractive index was developed by using precise frequency control of multi-color combs. Basic technologies for high-accuracy and real-time self-correction by direct use of target optical measurement results has been developed. Ultrahigh-accuracy correction was actually demonstrated by developing the self-evaluation method without relying on the accuracy of air refractive index equation. This study opens up the high-accuracy energy-saving length measurement methods under practical environmental conditions. Developed technique can improve the accuracy of well-established empirical equations for air refractive index.

研究分野：超高速光科学

キーワード：光コム 距離計測 干渉計測 空気屈折率 超短パルスレーザー ファイバレーザー 精密計測 省エネ

1. 研究開始当初の背景

位置、寸法、距離など長さの精密測定は、ナノテクノロジーから自動車・航空産業まで、科学技術・産業の基盤技術であり、光技術は非接触性、高速性、高機能性などの優れた特長から広く利用されている。一般に光学測定においては、空気屈折率の気温、気圧、湿度等の環境パラメータによる変動の精密補正が必須となる。しかし、環境パラメータには空間分布や時間変動があるため、実際の長さ計測への寄与を高精度補正することは困難である。これは、測定距離の長短に関わらず要求される相対精度に依存する本質的課題で、単なる温度測定の高精度化等では解決しえない。そのため精密産業では、精密空調による環境制御が必要であり、エネルギー負荷が大きいという課題がある。本研究では、光コム(図1)の持つ光周波数成分どうしの位相精密関係を利用した測定基準を用い、長さ測定において環境変動を高精度にリアルタイム補正する技術の開発を目指した。

光コム技術は20世紀末の出現後革命的に発展し[1,2]、2005年にはノーベル物理学賞が授与されている。我々はそれに先立ち、光コムを長さ計測へと世界に先駆けて応用してきた[3,4]。追従する研究プロジェクトも諸外国で次々と開始され、特に空気屈折率の影響のない宇宙利用に注目が集まっている[5]。しかし、空気屈折率の高精度補正技術が実現されれば、産業や大型科学施設などでの長距離計測や、逆に精密産業のナノ・ピコメートル微小長さ計測において強力なツールとなり、適用範囲が画期的に拡大する。

これまでに我々は、光コムを用いたコム距離計によって、安定環境において距離200mを $2\mu\text{m}$ 精度で測定し、空気屈折率分散の関係を利用して空気屈折率を高精度補正する基礎技術(「2色法」)を実現した[3]。分散を用いた補正法は、気温・気圧センサによる環境測定ではなく実際の距離測定データから自己補正を行うもので、強力な手法である。しかし、2色法は古くから提案されていたが[6]、測定値の差から値を算出するために、桁落ちによって精度が劣化する(補正係数倍の劣化)という、本質的課題があり、その高精度化にはさらなる高精度な距離測定技術が必要という課題があった。また、その実証においては、実際に光学測定に寄与する環境パラメータの測定精度、および究極的には空気屈折率の経験式[7]自体の精度限界 10^{-8} があり、それらが高精度化の限界となっていた。

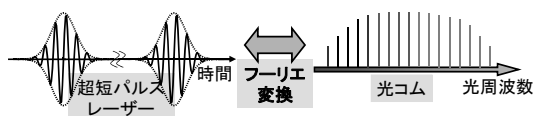


図1 光コムと超短パルス

2. 研究の目的

本研究では、高精度長さ計測において主要な誤差要因である空気屈折率の環境変動に対し、光コムを用いて光学距離測定の高精度化を図り、空気屈折率補正の大幅な高精度化を実現することを目指した。高精度に周波数制御された多波長光コムを開発し、その周波数制御による干渉計測の高精度・高ダイナミックレンジ・高制御性の実現により、空気屈折率の波長分散関係を高精度に測定することで、高精度かつリアルタイムに自己補正するための基礎技術を開発することを目的とした。同時に、空気屈折率の補正経験式との比較を用いない自己評価手法の開発を行い、高精度な空気屈折率補正法の実証を目指した。

3. 研究の方法

2色法は、光路中の屈折率変化を実際の光学距離測定結果から直接補正するため、実用的な高精度空気屈折率補正を実現できる。一般に、測定対象となる幾何学長 D は、2色の光路長の定義式 $D_1=n_1D$ 、 $D_2=n_2D$ の変形により、

$$D = D_1 - A(D_2 - D_1) \quad (1)$$

$$A = (n_1 - 1)/(n_2 - n_1) \quad (2)$$

で与えられる。係数 A は2波長の屈折率 n_1 、 n_2 の間の分散関係を表す。ここで、2色法においては、係数 A を一定とみなすことが本質である。それは、実用的な環境変化では分散関係が一定とみなせるためであり、乾燥空気においては常に正しい。結果的に D は2波長の光路長測定のみによって決定できるため、環境パラメータの高精度測定が不要となり、実用的に大きな意義を持つ。しかし、一般に A は100程度の大きな値なので、式(1)の第2項の屈折率補正項において、光学測定 $D_2 - D_1$ の不確かさが増大してしまうという本質的課題がある。本研究では、光コムを用いた2色干渉計を用いて精密な距離計測法を開発し、それを解決した。

そのために、まず、長期安定で実用上優れた性質を持つモード同期ファイバレーザーによる光コムを構築し[8]、周波数の全パラメータが高精度に制御された上に、高精度・広範囲可変で制御性の高い光コムを開発した。そして、光路長のアンバランスなパルス間ヘテロダイン干渉計を構築し、そのうち基準波長の干渉信号を制御し、光コムモードが等間隔を保つ性質を利用して、測定光路内大気環境変動に対して、空気波長が一定制御された「波長コム」を構築した[9]。さらに、基準波長から大きく離れた波長を加えて同時に干渉計測を行い、波長間の屈折率分散効果を直接、かつ高感度に検出する手法[10]を用いて、高精度な光学的距離測定法を実現した。

これらの手法を用いて、空気屈折率の高精度な自己補正法を実証した。さらに、開発された空気屈折率補正法の精度評価において、環境パラメータの測定と経験式によって計

算した空気屈折率との比較ではなく、低熱膨張ブロードボード上の遅延光路を測定対象とし、補正距離結果の安定性のみによる評価手法を開発し、より高精度な実証を目指した。

4. 研究成果

(1) ファイバ・コム光源の開発

まず、エルビウムドープ・モード同期ファイバレーザ(中心波長 $1.5\mu\text{m}$ 、繰り返し周波数 f_{rep} 54 MHz)を作成し、干渉計測に適した光源を作成した。共振器のトータル分散を調整して、共振器出力やスペクトル波形との相関を調べた結果、干渉計測に適したスムーズなスペクトル波形を持ち、数 mW のパワーをもつ出力を得られた。エルビウムファイバによる安定な光増幅器を作成し、非線形光学結晶を用いて第2高調波を発生した。次に、 f_{rep} とキャリアエンベロープ周波数 f_{ceo} をマイクロ波周波数基準に対して制御し[8]、周波数絶対値の制御された光コムを構築した。

次に、干渉縞制御に必要な繰り返し周波数 f_{rep} の広範囲な粗調と、高精度な微調手法を開発した。ファイバベースの可変範囲の広い移動ステージをレーザ共振器に組込むことにより、 $f_{\text{rep}}=54$ MHz の光コムにおいて 1 MHz 以上の間隔周波数可変を実現した。共振器の偏波条件を調整することにより、すべての可変領域において安定なモード同期を実現する領域を見つけることができた。コムの間隔とオフセット周波数を、Rb クロックを周波数標準として同期・制御した。制御の電気系の改良により、長期安定な制御を実現した。

(2) 長光路ファイバを用いた繰り返し周波数による干渉光路長の走査量拡大

光コムを用いたパルス間干渉計(光コム干渉計)は、モード同期パルス列内の異なるパルス間の干渉信号の発生位置から、絶対距離を高精度に測定できる手法である。このとき、異なるパルス同士が重なりあうには、参照光路と測定光路の光路差がパルス間隔距離 $L = cf_{\text{rep}}$ の(c : 真空の光速)整数倍になる必要があり、広範囲の光路長走査が不可欠である。従来は、 L に相当する長行路移動ステージを用いるため機械的非直線性や空気揺らぎにより干渉信号の劣化が生じてしまっていた。これに対し光コム干渉計では、 f_{rep} を変化させることで精密な光路長走査ができる[11]。一方で、 f_{rep} の可変範囲(Δf_{rep})には限界があり、広範囲の光路長走査は一般に難しい。

これに対して、光コム干渉計の参照光路と測定光路の光路長差を大きくした「アンバランス干渉計」では、個数の離れたパルスを干渉させるため、わずかな Δf_{rep} でも、パルス個数(m)倍の「増倍効果」による光路長走査の可変範囲拡大が可能となる(図2)。光路長差がパルス間隔の m 倍に相当する場合、光路長の走査範囲($n\Delta L$; n : 媒質の屈折率)は m 倍され、

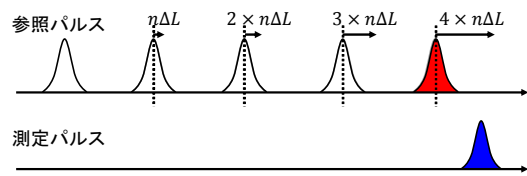


図2 f_{rep} 走査による増倍効果

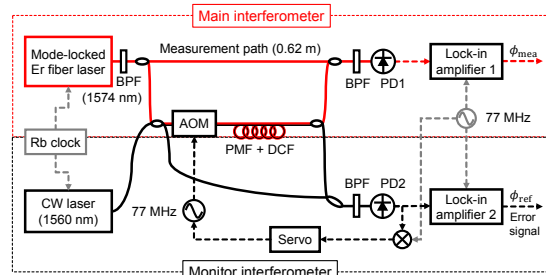


図3 周波数安定化手法を適用した光コム干渉計

$n\Delta L = mc\Delta f_{\text{rep}}/f_{\text{rep}}^2$ となる。しかしながら、この効果が適用できる測定距離には制限があり、例えば $f_{\text{rep}} = 100$ MHz の場合、 $L = 3$ m であるのでパルス同士を重ねるには $n\Delta L = 1.5$ m 必要である。ここで $\Delta f_{\text{rep}} = 1$ MHz であるならば、最低でも $m = 50$ が必要になり、測定距離は 150 m 以上でなければならない。一方、産業応用等に重要な距離は数 m から数 10 m 程度であり、このような距離に対して増倍効果を適用するのは難しい。

本研究では増倍効果を任意距離に適用するために、参照光路を長尺光ファイバで構成する光コム干渉計を開発した。ファイバ光路によりコンパクト化が可能となるが、光路長変動や位相雑音による干渉信号の安定性低下を招く。これに対して、周波数安定化手法を参照光路に適用した光コム干渉計を開発し、 f_{rep} 走査による光路長可変範囲 $n\Delta L$ をパルス間隔距離 L 程度に拡大した。

図3に、ファイバノイズキャンセル手法による周波数安定化を適用した光コム干渉計の構成を示す。光コムは光ファイバによる測定光路(光路長: 0.6 m)と参照光路(光路長: 167 m 及び 342 m)に分岐される。参照光路では AOM による周波数シフト(77 MHz)を受け、測定光路を伝搬した光コムとヘテロダイン干渉計を構成する。一方、参照光路の安定化のために CW レーザを導入し、AOM 入射前と、参照光路伝搬後のビームを重ね合わせ干渉させる。この信号を基に AOM の周波数シフト量を制御し、参照光路を安定化する。

図4に、周波数安定化時の参照光路(φ_{ref})と干渉信号(φ_{mea})の位相変動を示す。 φ_{ref} の標準偏差は参照光路長 167 m および 342 m に対して、それぞれ 0.9 nm および 1.0 nm であるこ

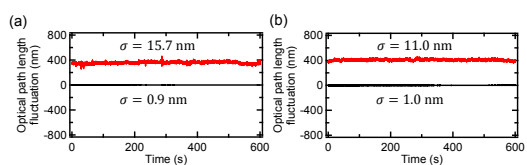


図4 ファイバ光路安定化効果。参照光路のファイバ長(a)168 m、(b) 342 m の場合。 φ_{ref} (黒線): 参照光路の安定性、 φ_{mea} (赤線): 測定光路の安定性。

とから、 10^{-12} で高安定化されている。 ϕ_{mea} の標準偏差はそれぞれ 15.7 nm および 11.0 nm である。これは参照光路長に無依存なことからわかるように、測定光路付近の温度変動によるものであり、逆に、光コム位相情報を用いて温度変動を高感度に検出できた。

次に、 $\Delta f_{\text{rep}} = 0.02$ Hz ずつ変化させて干渉位相変化を測定し、その依存性を測定した。その結果、参照光路長 167 m および 342 m に対して、それぞれ 30 倍および 60 倍の増倍効果が確認された(図 5)。本実験で用いた光コム位相の Δf_{rep} は最大 1 MHz であるため、増倍効果による光路長走査範囲は 3.2 m および 6.4 m となり、パルス間隔距離の半分である 2.5 m 以上に拡大することができた。これにより、任意の光路差でパルスの包絡線どうしの重なりが得られる。また、傾きからパルス数 m を $m = 30.2 \pm 0.3$ および $m = 60.8 \pm 0.2$ と、整数次の不確かさ無しに決定できた。これらにより、パルスの包絡線を用いた任意距離の絶対距離測定が可能であることを示した。さらに、超短パルスのタイミングジッター検出法を用いて、パルス包絡線位置の高感度検出法を開発し、内部位相とのリンクによる超高精度絶対距離測定の基礎技術を開発した。

一方、干渉計の光路差が一定であっても、光源の繰り返し周波数を高くすることによって、同様の増倍効果を得ることができる。これは、光コム位相の繰り返し周波数の逆数であるパルス間隔距離が小さくなるために、同じ光路差であってもパルス個数が大きくなるためである。以上から、光コム位相の高繰り返し化を行い、さらなる増倍効果の実証を行った。

ここでは前述の光コムに比して繰り返し周波数が 2 倍となる高繰り返し 108 MHz のエルビウムモード同期ファイバレーザーを構築した。同様のファイバベースの遅延光路をレーザー共振器に挿入したところ、共振器長の可変のみで繰り返し 54 MHz の光コムの場合の 4 倍に相当する 3.8 MHz の周波数走査が可能となった。この光源を用いて、実際にパルス間干渉計を構築した。このときには、後述する 2 色干渉計で用いる空間光路を構築し、光路長差は 61 m であった。その結果、繰り返し周波数走査による光路長走査量は 2 m となり、機械的ステージを走査することなく、パルス間隔 2.8 m の半分以上にあたる光路長変化を実現でき、任意の距離でパルス間干渉縞を取得できた。さらに、周波数走査量と干渉位相変化の傾きからパルス個数を求めた

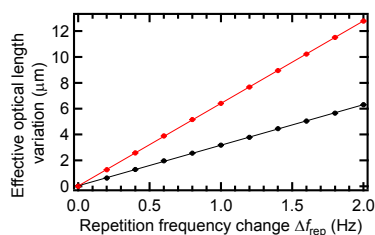


図 5 繰り返し周波数 f_{rep} 走査時の光路長変化。黒線：参照ファイバ長 167-m、傾き： $m = 30.2 \pm 0.3$ 。赤線：参照ファイバ長 342-m、傾き： $m = 60.8 \pm 0.2$ 。

結果、 $m=22$ を整数次の不確かさなく決定できた。逆に、 m とパルス間隔 2.8 m を用いて、実際に光路差距離の絶対測定を実証できた。

(3) 空気屈折率自己補正法の開発

最後に、基本波と第 2 高調波の 2 色干渉計を用いて空気屈折率の自己補正を行った。

実験配置を図 6 に示す。光源には Er モード同期ファイバレーザーの基本波と第 2 高調波(波長 1.5 μm と 780 nm、繰り返し $f_{\text{rep}} = 54$ MHz)を用いた。これらを同軸に光学系に入射し、各々ヘテロダイン干渉計を構築した。測定光路は対向する凹面鏡を低熱膨張ブレッドボード上に構築されており、幾何学長一定の 61 m のアンバランスなパルス間干渉計を実現した。これにより幾何学長 D は定数となり、 D の相対変化量 $\Delta D/D$ を示す下式、

$$\Delta D/D = \Delta D_1/D - A\Delta(D_2 - D_1)/D \quad (3)$$

によって屈折率補正精度を評価できる。

このとき、1 色の空気屈折率変化によって生じた光路長変動を打ち消すように、パルス間隔(f_{rep})を制御すると、他方の干渉縞の位相は、空気屈折率の波長分散の効果を直接反映し、位相差測定の高精度化が実現する。光コム位相のオフセット周波数は Rb 原子時計に安定化し、 f_{rep} を変化させて基本波の干渉縞信号の位相を一定に制御し、同時に第 2 高調波の干渉位相変化を測定することで、2 色の光路長差 $D_2 - D_1$ の直接かつ高精度測定を行った。その結果、500 秒間の測定において標準偏差 0.3 nm で一定となり、光路長 61 m に対し 4×10^{-12} に相当する、2 色の光路長差 $D_2 - D_1$ の高精度測定が実現された。

さらに、空気屈折率が大きく変動する長時間評価のために、干渉信号、 f_{rep} と同時に環境パラメータ(気温・気圧・湿度)を測定し、Ciddor の経験式[7]を用いて、2 波長の空気屈折率を算出した。そして、幾何学長が一定であると仮定し、測定した 2 色の屈折率差と計算値を比較した結果、それらの差の 10 時間連続測定の標準偏差が 2.6×10^{-11} となった。これは式(2)第 2 項の屈折率補正項にして 3.7×10^{-9} に相当し、本手法の有効性が確認された。しかし、この評価法においては、屈折率経験式との比較を用いており、その精度限界 10^{-8} を超えることはできない。

そこで、実際に、光学距離測定結果のみを用い、2 色法による空気屈折率補正を行った。その結果得られた幾何学長は一定となり(図 7)、10 時間の補正精度 7.3×10^{-9} が実現された。これは、低熱膨張材料から構成される測定光路を用いて幾何学長 D を高安定に保つことによって、式(3)を用いて D の一定性から評価したものであり、経験式に依存しない評価となっている。この時、屈折率変化自体は $\Delta n_1 = 0.4 \times 10^{-6}$ であったのに対し、光学測定のみを用いた自己補正によって、経験式の精度を凌駕する 10^{-9} 台の高精度補正が実証された。

以上の測定においては、幾何学長を一定と

して高精度に評価するため、低熱膨張材料による測定光路を用いた上、環境の温度を 0.01°C 程度に安定化していた。しかし、実際の測定応用においては、幾何学長が一定である必要はない。そこで、空気屈折率自己補正による距離測定の実証のために、より大きな温度変化 0.6°C を与えた上に、熱膨張係数の大きな測定光路を用いて実用的な測定への適用を行った。その結果、求められた幾何学距離の時間変化は、測定光路を設置した台の熱膨張の様子とよく一致しており、その結果から熱膨張係数の値を見積もったところ、ブレッドボードの材質の値と一致した。以上から、実際に空気屈折率自己補正による高精度な幾何学距離測定が示されたといえる。

以上のように、本研究では、精密な周波数基準として知られる光コムを、環境変動の高感度検出ツールとして用いる新しい技術原理に基づき、高精度な空気屈折率自己補正法を実証した。空気屈折率補正は、あらゆるレンジの長さ測定において、主要な精度の制限要因となる普遍的課題である。本研究は、空気屈折率を目的の光学的距離測定のみでリアルタイムに高精度自己補正するもので、空気屈折率の経験式自体の書き換えにもつながり学術的インパクトが大きい。また、科学・技術、社会・産業の基盤である長さ計測を実用的環境で実現し、エネルギー消費を大きく低減する道を拓くもので、その意義は大きい。

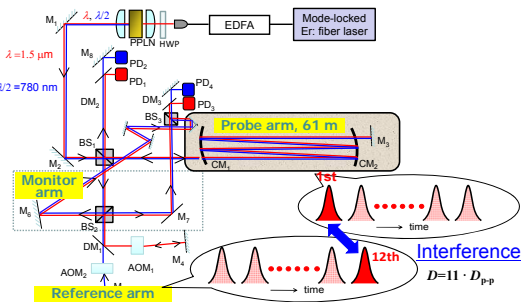


図6 空気屈折率の高精度自己補正のための2色光コム干渉計の実験配置

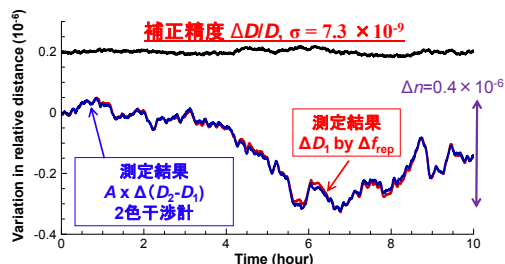


図7 2色法による空気屈折率自己補正

<引用文献>

[1] T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Haensch, PRL. 82, 3568-3571 (1999).
 [2] D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff, Science 288, 635-639 (2000).
 [3] K. Minoshima and H. Matsumoto, Applied Optics 39, 5512 (2000).
 [4] 美濃島薫, 光学 37, 576-582 (2008).

[5] J. Ye, Opt. Lett., 29, 1153-1155 (2004).
 [6] P. Bender, J. Geophys. Res. 70, 2461 (1965).
 [7] P. E. Ciddor, Appl. Opt. 35, 1566 (1996).
 [8] H. Inaba, Y. Daimon, F. L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R. Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi, and M. Nakazawa, Opt. Exp. 14, 5223-5231 (2006).
 [9] T. R. Schibli, K. Minoshima, Y. Bitou, F. L. Hong, H. Inaba, A. Onae, and H. Matsumoto, Opt. Exp. 14, 5984-5993 (2006).
 [10] K. Minoshima, K. Arai, and H. Inaba, Optics Express 19, 26095-26105 (2011).
 [11] Y. Yamaoka, K. Minoshima, and H. Matsumoto, Appl. Opt. 41, 4318 (2002).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

① Y. Nakajima and K. Minoshima, Highly stabilized optical frequency comb interferometer with a long fiber-based reference path towards arbitrary distance measurement, Opt. Exp., 査読有, 23, 2015, 25979-25987, DOI:10.1364/OE.23.025979
 ② T. Yasui, K. Hayashi, R. Ichikawa, H. Cahyadi, Y.-D. Hsieh, Y. Mizutani, H. Yamamoto, T. Iwata, H. Inaba, and K. Minoshima, Real-time absolute frequency measurement of continuous-wave terahertz radiation based on dual terahertz combs of photocarriers with different frequency spacings, Opt. Exp., 査読有, 23, 2015, 11367-11377, DOI:10.1364/OE.23.011367
 ③ K. Minoshima, G. Wu, Y. Nakajima, Ultra-precision optical metrology using highly controlled fiber-based frequency combs, Proc. SPIE, 査読無, 9525, 2015, 9525-1
 ④ Y. Nakajima and K. Minoshima, Fiber-based optical frequency comb interferometer with nm-stability and meters-wide scanning range, CLEO2015, 査読無, SI, 2015, SF2L.1-1-2
 ⑤ G. Wu, M. Takahashi, H. Inaba, K. Minoshima, Pulse-to-pulse alignment technique based on synthetic-wavelength interferometry of optical frequency combs for distance measurement, Opt. Lett., 査読有, 38, 2013, 2140-2143, DOI:10.1364/OL.38.002140
 ⑥ G. Wu, M. Takahashi, K. Arai, H. Inaba, K. Minoshima, Extremely high-accuracy correction of air refractive index using two-colour optical frequency combs, Scientific Report, 査読有, 3, 2013, 1894 1-5, DOI:10.1038/srep01894

[学会発表] (計25件)

① 宮野皓貴, 牧野智大, Wu Guanhao, 美濃島薫, 光コム2色干渉計による空気屈折率の経験式精度を超える自己補正, 応用物理学会学術講演会, 2016年3月20日, 東京

- ② 中嶋善晶, Schibli Thomas, 美濃島薫, フェムト秒パルスの高感度タイミングジッター検出方法を適用した光コム干渉計の開発, 応用物理学会学術講演会, 2016年03月20日, 東京
- ③ 美濃島薫, 高精度に位相制御された超高速ファイバレーザによる光コムとその応用, 超高速光エレクトロニクス研究会(招待講演), 2015年11月25日, 東京
- ④ 安井武史, テラヘルツ計測の基礎と各種応用, 情報機構セミナー (招待講演), 2015年09月29日, 大田区
- ⑤ 美濃島薫, 光波の超精密制御が拓く応用の世界, 応用物理学会学術講演会(招待講演), 2015年09月14日, 名古屋
- ⑥ 安井武史, 知的テラヘルツ計測, 応用物理学会学術講演会 (招待講演), 2015年09月13日, 名古屋
- ⑦ 宮野皓貴, 中嶋善晶, Wu Guanhao, 美濃島薫, 高繰り返し光コムによる広範囲縞走査パルス間干渉計, 応用物理学会学術講演会, 2015年09月14日, 名古屋
- ⑧ Kaoru Minoshima, Length metrology with ultra-high precision using fiber-based frequency combs, CLEO-PR(招待講演) (国際学会), 2015年08月25日, Busan, Korea
- ⑨ Kaoru Minoshima, Ultra-precision optical metrology using fiber-based frequency combs, ISUPT/EXAT (招待講演) (国際学会), 2015年07月13日, Kyoto
- ⑩ Kaoru Minoshima, Ultra-precision optical metrology using highly controlled fiber-based frequency combs, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX (招待講演) (国際学会), 2015年06月22日, Munich, Germany
- ⑪ Kaoru Minoshima, Development of fiber-based frequency combs and their application in precision metrology, China-Korea-Japan Joint Workshop for Ultrafast Photonics Technology (招待講演), 2015年03月22日, 北京
- ⑫ 中嶋善晶, 美濃島薫, 稲場肇, 高速制御ファイバコムと応用技術, 第15回電位学会光・量子デバイス研究会 (招待講演), 2015年03月05日, 東京
- ⑬ 中嶋善晶, 美濃島薫, ファイバ型光コム干渉計による光路長走査範囲の拡大, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年03月11日~14日, 東京
- ⑭ 小倉隆志, 中嶋善晶, 山岡禎久, 美濃島薫, 安井武史, ファイバー光コム共振器の外乱/RF周波数変換機能を用いたひずみ計測に関する基礎研究, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年03月11日~14日, 東京
- ⑮ 美濃島薫, 光コムの超精密ものさしと応用展開, 第6回超高速光エレクトロニクス研究会 (基調講演), 2015年01月16日, 東京大学柏キャンパス
- ⑯ 中嶋善晶, 美濃島薫, 周波数安定化手法を適用した光コム干渉計の開発, レーザー学会, 2015年01月11日, 筑波大学文京キャンパス
- ⑰ 美濃島薫, 超高精度の光のものさし:光コム, 第4回先端フォトニクスシンポジウム (招待講演), 2014年08月08日, 日本学術会議
- ⑱ 中嶋善晶, 美濃島薫, 狭線幅光コムの開発と光シンセサイザの研究, 第4回先端フォトニクスシンポジウム, 2014年08月08日, 日本学術会議
- ⑲ Kaoru Minoshima, Ultrahigh-accuracy optical metrology using fiber-based frequency combs, International Workshop, Ultrafast Lasers and Applications (招待講演), 2014年08月05日, Taiwan
- ⑳ 美濃島薫, 光コムの作る超精密ひかりのものさし, 応用光学懇談会第148回講演会(招待講演), 2014年07月02日, 大阪
- ㉑ Y.-D. Hsieh, H. Kimura, H. Inaba, K. Minoshima, T. Araki, and T. Yasui, Low-pressure gas spectroscopy using terahertz frequency synthesizer traceable to microwave frequency standard via dual optical combs, CLEO:2014, 2014年06月12日, San Jose
- ㉒ 美濃島薫, 光周波数コムを用いた高精度光計測, 電子情報通信学会総会 (招待講演), 2014年03月21日, 新潟市
- ㉓ 稲場肇, 光の周波数と位相を自由に制御できる光シンセサイザ: 光コム-概要と計測への応用-, 中部レーザ応用技術研究会第89回研究会 (招待講演), 2014年02月21日, 名古屋
- ㉔ 美濃島薫, 光周波数コムを用いた精密計測, 電気学会先端光・量子発生利用技術調査専門委員会 (招待講演), 2013年07月31日, 調布市
- ㉕ 美濃島薫, ファイバレーザ光周波数コムと計測応用, レーザー学会第5回ファイバレーザ技術専門委員会 (招待講演), 2013年07月19日, 調布市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

美濃島 薫 (MINOSHIMA, Kaoru)
電気通信大学・情報理工学研究所・教授
研究者番号: 20358112

(2) 研究分担者

安井 武史 (YASUI, Takeshi)
徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授
研究者番号: 70314408

稲場 肇 (INABA, Hajime)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・研究グループ長
研究者番号: 70356492