変調型光コムを用いた精密距離計測器

今井 一宏¹, 興梠 元伸¹, 寺田 聡一²

¹(株)光コム (〒226-8510 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-3 中小機構・東工大横浜ベンチャープラザE206号室)

²独立行政法人 産業技術総合研究所 (〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第3)

Precise Absolute Distance Meter Using EO-Modulator-Based Optical Frequency Comb

Kazuhiro IMAI,¹ Motonobu KOUROGI,¹ and Souichi TERADA²

¹Optical Comb, Inc., YVP E206, 4259-3 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8510

²Advanced Industrial Science and Technology, AIST Tsukuba Central3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563

(Received May 30, 2014)

Using two electro-optic modulator-based optical frequency comb sources, we demonstrate an optical frequency comb interferometer that enables rapid and precise measurement of over long distances. 500 kHz is the repetition rate of the relative measurement of a 6-mm ambiguity range. The repetition rate of an absolute distance measurement is about 15 Hz with switching modulation frequencies. The optical frequency comb interferometer yields 0.4- μm precision at 5.2 m in 2 μs . The improved precision exceeded 30 nm in 1 ms.

Key Words: Optical frequency comb, Interferometer, Distance measurement

1. はじめに

光コムは、一定周波数間隔で狭いスペクトル線幅の光が多数並んでおり、広いスペクトル包絡線幅を有する光である¹⁾。一本の線スペクトルで決まる長い可干渉距離と全体のスペクトル幅で決まる短い可干渉距離が混在しているため、距離計に応用すると長距離と高分解能という相反する性能を両立する可能性を持っている。

一般にレーザー光路の絶対距離は、飛行時間法のようにパルスや正弦波など強度変調を受けた光が測定対象にあたって戻ってくるまでの遅延時間から計測される。その分解能はどこまで高い周波数成分を遅延時間計測に利用できるかで決まる。ところが発振器、変調器、検出器など素子の動作周波数の上限は～数十GHzであり、光強度の直接検出では周波数を上げて分解能を上げることは容易ではない。計測距離数十メートル以上の実用的なレーザー距離計で得られる分解能は周期誤差も考慮に入れると比較的性能の高いもので50～100 μm 程度である^{2,3)}。この分解能はレーザー干渉計がナノメートルの分解能を達成できることと比較して低い。

光コム干渉は、測定対象に照射される物体光と基準となる参照光がそれぞれ光コムであり、物体光と参照光の周波数が一対一に対応した多波長干渉のことを表す⁴⁻⁶⁾。光コム干渉はピコ秒の時間をマイクロ秒に拡大する特徴があるため、素子の動作周波数の制約を受けず

に飛行時間計測の分解能を高めることができる。

変調型光コムは電気光学変調によるサイドバンドからなる光コムであって、その周波数と位相は入力されたレーザー光と変調信号だけで決まる。我々は、中心周波数とモード間隔を独立に調整できる変調型光コムの制御性の高さに着目し、変調型光コムの干渉を利用する高精度距離計、形状計測機の開発を進めている^{4,7)}。モード同期レーザー型のコム光源を二台使用しても光コムの1本を選択して互いに光位相同期をかければ同様な干渉計を組むことが可能であるが⁸⁾、変調型光コム発生器を使用すると光位相同期なしに共通の狭スペクトル線幅レーザーに由来する長い可干渉距離をとれる利点がある。計測の繰り返しが高く、高速な距離計として液体金属の厚み計測へ応用された例もある⁸⁾。本稿では、我々が開発した光コム干渉計の原理と距離計、形状計測機への応用と関連する研究の動向について報告する。

2. 光コム干渉計

2.1 光コム発生器

Fig. 1は、我々が光コム発生器と呼ぶファブリペロー電気光学変調器の概念図である¹⁹⁾。光位相変調器がファブリペロー共振器に挿入された構造である。入力は一単一周波数 ν のレーザー光である。入力光の周波数を共振器透過モードの一つに合わせ、自由スペクトルレンジ

Fig. 1 Schematic of optical frequency comb generator (OFCG) using Fabry-Perot electro-optic modulator.

(Free Spectral Range: FSR)の整数倍に一致する周波数 f_m の電気信号を位相変調器に与えると、変調された光が共振器を往復する周期と電気信号の周期が一致する。被変調光は共振器を多重往復する間、毎回同じ位相で電気光学変調を受けるため、一台の変調器で数十台の位相変調器を直列に接続するのと同等の効果が得られる。通常の駆動レベルでは数本しか発生しないサイドバンドが数百本発生して中心周波数 ν 、間隔 f_m のコム状出力となる。時間的には繰り返し周波数 f_m の光パルスとなる。

2.2 光コム干渉計の構成

光コム干渉では一つの干渉信号に多数モードの位相情報が混在するため、それらの分離が課題となる。Fig. 2は我々が開発した光コム干渉計の構成例である。駆動周波数の異なる2台の光コム発生器(OFCG1, OFCG2)と周波数シフタ(AOFS)を使用して干渉信号の周波数軸でモードの分離を行うことが特徴である。光コム発生器の入力光源は発振波長は1554.94 nm、出力約20 mW、スペクトル線幅15 kHz以下の単一周波数発振レーザーである。レーザーの出力光は第一のビームスプリッタ(BS1)で分割されてOFCG1, OFCG2へ入力される。それぞれ測定対象に照射される物体光と参照面に照射される参照光を出力する。AOFSはOFCG2への入力光の周波数を40 MHz(f_a)ずらし、干渉信号の中心周波数にオフセットを与える。

OFCG1, OFCG2はLiNbO₃光導波路型の光コム発生器で、光ファイバピグテイル付のモジュールになっている¹⁰⁾。FSRは25 GHz帯の変調周波数に合わせて2.5 GHzに調整されている。変調周波数には共振器のフィネスと変調指数で許容される幅があり、25~25.0105 GHzまでの変調周波数に対応している。また共振周波数と光コム周波数を一致させるため電子回路による低速な共振器制御を行っている¹¹⁾。光コム出力は、光増幅器、可変減衰器により物体光~10 mW、参照光3 mW程度に調整されている。入力レーザー光源からOFCG1, OFCG2の出力までの光学系は光ファイバで接続されており、幅19インチ高さ4 U(約18 cm)の一筐体に収納されている。駆動周波数は外部のPCや筐体フロントパネルのボタンから変更できるようになっている。

物体光と参照光を第一の偏光ビームスプリッタ(PBS1)で直交した偏光で重ねてからそれぞれ出力の一部を第二のビームスプリッタ(BS2)で分岐して偏光素子(POL)で偏光を調整してから参照信号を出力する差動光

Fig. 2 Schematic of the optical frequency comb interferometer. LASER: laser light source, AOFS: acousto-optic frequency shifter, OFCG1 (OBJ): object OFCG, OFCG2 (REF): reference OFCG, REF: reference mirror, OBJ: measurement target, PD1: balanced photo receiver 1, PD2: balanced photo receiver 2, 2ch ADC: 2 channel analog-to-digital converter, CPU: signal processor, BS1, BS2: beamsplitters, PBS1, PBS2: polarizing beamsplitters, POL: polarization control, $\lambda/2$: half wave plate, ν : laser frequency (~ 193 THz), f_a : 40 MHz, f_m : modulation frequency for object light, $f_m \pm \Delta f$: modulation frequency for reference light, L : distance between the OBJ and the REF ($L = L1 - L2$).

検出器1(PD1)に入力する。PD1へ向かわず、BS2を通過した物体光、参照光はその先の第二の偏光ビームスプリッタ(PBS2)で物体光は測定対象へ、参照光は参照面へ向けて分離される。それぞれ反射された光はPD1と同じ構成を有し測定信号を出力する差動光検出器2(PD2)に入力される。PD1, PD2の帯域は1~100 MHz程度である。干渉計は超高速光コヒーレンストモグラフィーとして提案された干渉計⁴⁾を二重化した構造である。OFCG1, OFCG2を除いた構成の機能は一般的なレーザー干渉計と同等である。

PD1, PD2から出力された干渉信号は同軸ケーブルでAD変換器に入力され、2チャンネル同時にサンプリングされる。光コム駆動周波数やサンプリング周波数など光コム干渉計内部のすべての周波数は共通の恒温槽付水晶発振器(OCXO)に同期されている。周波数の長期安定度は1年間で最大 $\pm 1 \times 10^{-7}$ である。距離計測の安定度はOCXO周波数の安定度に一致する。

測定距離が f_m の半波長を超えると物体光の周期性によりその半波長の整数倍の距離が不明となって一義的に距離を求められない。その半波長相当の距離はambiguity range(多義性距離、以下 L_a と表記)などと呼ばれる。 $f_m = 25$ GHzの場合、 $L_a (= c/2f_m, c: \text{光速})$ は約6 mmである。Fig. 2の干渉計では10 MHz異なる f_m の計測を組み合わせることにより L_a より長い絶対距離を測定するような仕組みになっている。駆動周波数の差 Δf の絶対値は常に500 kHzである。

2.3 光コム干渉の周波数関係

Fig. 3は光コム干渉の周波数関係を表す。Nは光コムの中心周波数から数えたモード番号である。物体光と参照光のN次モード周波数はそれぞれ $\nu + Nf_m$, $\nu + f_a + N(f_m + \Delta f)$ である。N次モード間干渉信号の周波数は f_m に関係なく $f_a + N\Delta f$ であり、40 MHzを中心とする500 kHz間

Fig. 3 The frequency relation between the object light and the reference light. Comb (OBJ): object light, Comb (REF): reference light, N: sideband order number, v : input laser frequency, f_a : offset frequency, f_m : comb frequency separation for the object light, $f_m + \Delta f$: comb frequency separation for the reference light.

隔のコム状スペクトルとなる。その他の干渉の組み合わせは光検出器の帯域外となる。参照光と物体光の位相差で駆動される干渉信号には参照光に対する物体光の位相遅れ情報がすべて含まれる。検出系の帯域に合わせ、入力波長を中心にスペクトル幅1~2 THzを残す急峻な特性の光フィルタで干渉信号のエイリアスの要因となりうる高次モードを除去している。物体光の周波数間隔 f_m が25 GHzの場合、 ± 20 次までの光コム干渉は光スペクトル幅1 THzの位相、振幅情報取得と等価になる。経験的には数百GHz以上の光スペクトル幅があれば1 μm 程度の分解能が得られる。

2.4 干渉信号波形

光コム干渉では時間的に Δf の周期2 μs に1回の割合で物体光と参照光の光パルスの重なりが起こる。光パルスが重なり合う時間だけ干渉信号が生成されるためパルス状の信号になる。Fig. 4 (a)はPD1から出力される参照信号波形、(b)はPD2から出力される測定信号波形である。干渉信号はそれぞれ40 MHzを搬送波とする2 μs の周期の包絡線パルスである。物体光がBS2と測定対象を往復する遅延時間と参照光がBS2と参照鏡を往復する遅延時間の差 T のため、測定信号パルスと参照信号パルスの発生時刻には時間差が生じる。 $f_m = 25 \text{ GHz}$ の場合、2 μs は L_a の一区間を物体光が往復する時間40 psに相当し、干渉信号は T を50,000倍に拡大して観測させる。測

Fig. 4 Waveforms of the interference signals. (a) PD1: reference signal, (b) PD2: object signal.

定信号パルスは原理的に入力レーザーの可干渉距離まで6 mmあたり2 μs の割合で時刻を変えながら発生を続ける。周期信号である参照信号と測定信号の間で信号パルスの位相差を求めることにより共通に含まれる遅延時間差は相殺されて T が求められる。

2.5 信号処理

AD変換器で参照信号と測定信号の一周期をサンプリングして周波数解析を実行する。参照信号と測定信号のN次モード同士の位相差を計算してOFCG1、OFCG2からBS2までの光コム生成、伝送過程の光位相差を相殺した後、周波数軸で次数1あたりの位相差の増分を計算して信号パルスの位相差を求める。 L_a を超える距離を算出するため4通りの周波数設定で同じ処理を行う。それぞれ物体光(OFCG1)と参照光(OFCG2)の変調周波数と信号パルスの位相差の関係はTable 1の通りである。信号パルスの位相差は T と物体光の変調周波数の積で表される。参照信号と測定信号がそれぞれサンプリングされるまでのケーブル長の差は真空中の距離換算1 mあたり20 μm のオフセットを計測値に与えるが、絶対距離計算の過程で相殺できるため省略した。

2.6 絶対距離計算

Table 1の#1の位相差は、計測する距離が f_m の半波長より長い場合、 m を整数として $\phi + 2m\pi$ の形である。計算では ϕ の部分だけが求められるが、整数値 m は不明である。一方、#1と#2の差または#3と#4の差を計算すると $2\pi\Delta f_m T$ が得られる。 $\Delta f_m = 10 \text{ MHz}$ なので L_a は約15 mとなり、この距離までならば一義的に位相が決まる。この位相を $f_m/\Delta f_m$ 倍して#1の位相差との比較により整数 m を判定する。 Δf_m の位相から整数 m を ± 0.1 の精度で決定するためには、15 mの距離を誤差0.6 mm以内で計測できる 4×10^{-5} の精度が必要である。相対的には $L_a = 6 \text{ mm}$ を誤差 $\pm 240 \text{ nm}$ 以内で計測する精度が要求される。平均時間を長くしても信号のスプリアスや干渉計内部の残留反射光による周期誤差の影響が残る、静止状態で整数値からの誤差は概ね ± 0.15 の範囲である。誤差はレーザー光の半波長($\sim 775 \text{ nm}$)より小さいため、安定化光源を入力とすればレーザー波長の整数倍を判定することも可能である⁷⁾。

さらにTable 1の#1と#3の差から $2\pi\Delta f T$ が得られる。 $\Delta f = 500 \text{ kHz}$ であるから L_a は300 mとなり、その距離までの

Table 1 Modulation frequencies and numerical expressions of the phase difference between reference signal and object signal. $f_m = 25 \text{ GHz}$, $\Delta f = 500 \text{ kHz}$, $\Delta f_m = 10 \text{ MHz}$. T , Time of flight.

#	OFCG1/OFCG2	Signal phase difference
1	$f_m / (f_m + \Delta f)$	$-2\pi f_m T$
2	$(f_m + \Delta f_m) / (f_m + \Delta f_m + \Delta f)$	$-2\pi (f_m + \Delta f_m) T$
3	$(f_m + \Delta f) / f_m$	$-2\pi (f_m + \Delta f) T$
4	$(f_m + \Delta f_m + \Delta f) / (f_m + \Delta f_m)$	$-2\pi (f_m + \Delta f_m + \Delta f) T$

絶対距離計算が可能である。精度 ± 0.1 の整数値判別に必要とされる正確さは300 mの距離を誤差1.5 m以内で計測できる 5×10^{-3} 程度であり、 Δf_m の位相から整数 m を決定できる精度があれば十分である。

計測の速度は、6 mm以内の相対距離測定では Δf に等しく500 kHzである。周波数の切り替えを要する絶対距離測定は切り替え時間と絶対距離計算時間を含めて現時点で15 Hz程度である。また、信号を切り替える代わりに光スイッチで物体光と参照光を入れ替えて照射する方法でも同様な計算が実行できる。

3. 計測精度

干渉信号が低速で周波数が低いことは信号処理の面で有利であるが、発振器の位相雑音の影響を低い周波数から受けやすいという性質もある。物体光を駆動するマイクロ波の位相ゆらぎを $\phi_0(t)$ 、参照光のそれを $\phi_1(t)$ とすると信号パルスの位相差 $2\pi f_m T$ は

$$2\pi f_m T = 2\pi \Delta f \Delta t + 2m\pi + \{\phi_0(t) - \phi_0(t + \Delta t + T)\} - \{\phi_1(t) - \phi_1(t + \Delta t)\} \quad (1)$$

の形式で干渉信号の位相遅れ $2\pi \Delta f \Delta t$ として計測される。 m は絶対距離を計算する際に必要な整数である。 Δt は、もっとも近い参照信号パルス発生時刻から計測した測定信号パルス発生までの時間である。右辺、二行目以降は変調信号の位相雑音である。 Δt や T の増加により相関が失われたマイクロ波の位相揺らぎが距離のばらつきとして出力される。 T が、光パルスが測定距離を往復する飛行時間(5 mで約33 ns)程度の値であるのに対して Δt は、 $\Delta f = 500$ kHzの場合、最大1 μ sに達する。このため近距離では Δt は T に比べてより広い周波数帯域の位相揺らぎを計測値のばらつきとして出現させ、計測精度の低下を招く。 Δt の影響は参照信号と測定信号のパルスの時刻が一致している条件 $\Delta t = 0$ では少なく、時刻差の絶対値が $\Delta t = 1$ μ sのときに最大となる。これは周期的な精度の低下として観測される。2台の駆動信号の位相同期を広帯域で行うと $\phi_0(t)$ と $\phi_1(t)$ で位相揺らぎが相殺されるため Δt の影響を減らすことができる。

二台の光コム発生器の駆動信号はオフセット周波数1 MHzにおける位相雑音レベルはそれぞれ-120 dBc/Hz以下であるが、相対的には-150 dBc/Hz以下になっており極大 Δt の影響を受けないように配慮されている。Fig. 5は距離計の計測精度を表す。精度は測定周期2 μ sで連続10秒間取得した距離データから計算したアラン分散の平方根で表示されている。(a)は距離24 mmと27 mmにおける精度である。24 mmは $\Delta t = 0$ の状態、27 mmでは $\Delta t = 1$ μ sの状態である。データの出力周期は2 μ sに固定されているため、連続する2 μ s間隔の複数データを平均して長い周期のデータとみなした。測定時間2 μ sでの計測精度は、距離24 mmにおいて0.22 μ mであり、距離27 mmでは0.3 μ mにまで低下した。測定時間1 msの時に両者の差はなくなり20 nm以下に達した。さ

Fig. 5 Precision of the distance measurement. (a) Allan deviation versus averaging time. □, 24 mm distance; △, 27 mm distance. (b) Allan deviation versus distance. ■, averaging time 2 μ s; ▲, averaging time 1 ms.

らに計測時間0.1 sで5 nmに達したが、1 sで10 nmに増加した。10 msや1 sあたりの精度の低下傾向は評価の度に変化があり、測定場所の振動や空気屈折率の変動の影響を受けていると推測している。Fig. 5 (b)は測定距離と精度の関係を示している。横軸は距離、縦軸はアラン分散の平方根である。計測時間は■が2 μ s、▲が1 msである。計測時の物体光の駆動周波数は25 GHzであり、その半波長6 mmの周期で分散値の極大、極小の繰り返しが現れる特性となっている。近距離での精度は計測時間2 μ sで0.2 μ mと0.3 μ mの間、計測時間1 msでは20 nm程度であった。距離5.2 mでも計測時間2 μ sで0.4 μ m以下、計測時間1 msでは30 nm以下であった。また、長距離ほど分散値の極小値、極大値ともに大きくなるのは、光パルスが測定対象を往復する時間遅延 T の増大による位相雑音の影響が距離に応じて単調増加するためである。

4. 計測誤差

光コム距離計の測定誤差を評価するため、産業技術総合研究所(AIST)つくばセンターの光学トンネルで干渉測長器との比較測定を行った。光学トンネルは気温が安定しており、空気屈折率の影響が大きい距離測定で有利な施設である。光学トンネル内には全長100 mの直進ステージが設置されており、ステージの移動距離は干渉測長器というHe-Neレーザーを光源とする干渉計で測定している。干渉測長器本体を固定の台座に設置し、ステージ上に反射鏡を設置して移動距離を測っているが、ステージのヨーイングやピッチングの影響を低減するために、2台の干渉測長器を用い測定している。2台のレーザービームは水平方向に25 cm離れている。その中心を光コム距離計のビームで測定し、2台の干渉測長器の平均値と比較する。光コム距離計の代わりに、He-Neを光源とする別の干渉測長器の校正を行った場合、空気屈折率が同じになるため、測定の不確かさは1.7 μ mである。

Fig. 6 Residuals of the measured distance versus truth data from c.w interferometers. The measurements were performed in the optical tunnel of the AIST. (a) 1.7 m~3.7 m, 5 cm apart; (b) 1.7 m~32 m, 1 m apart; (c) 20 m~80 m, 1 m apart.

光コム距離計ヘッドの射出ビームの直径は強度 $1/e^2$ の全幅でおよそ3.6 mmである。射出ビームの設計において想定した距離計測範囲は5 mであるが、約30 mまでは反射強度低下があるものの光コム距離計の設定を変えずに絶対距離計測が可能であった。PC制御でヘッド内蔵の光減衰器を抜去すると20 mから78 mまで連続的に測定できた。78 m以上では、極度の反射光強度低下と空気の揺らぎが原因とみられる反射強度の大振幅変動により絶対距離計測が不能となった。

Fig. 6 (a)~(c)は3回に分けて行われた比較測定の結果である。それぞれ(a)距離1.7~3.7 mを5 cmの間隔、(b)距離1.7~32 mを1 mの間隔、(c)距離20 m~80 mを1 mの間隔で直進ステージを移動させた場合の干涉測長器を基準とした光コム距離計の誤差を表している。ここでの誤差は測定距離範囲のうちヘッドから反射体までの距離が最も近い測定点での距離計測値の差を差し引いた相対距離の差を表している。距離1.7~3.7 mでの誤差は $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以内であり、評価装置側の精度と比較して有意な誤差は見られなかった。測定開始距離から終了距離まで積算された誤差は、距離1.7~32 mまでがおよそ $1.5 \mu\text{m}$ 、距離20~78 mまでが $4 \mu\text{m}$ であった。最悪値として距離1.7~78 mまで誤差を積算するとおよそ $5.5 \mu\text{m}$ であり $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の変動を考慮しても誤差は $6 \mu\text{m}$ 以内であると推定され、相対誤差はおよそ 7×10^{-8} となる。周波数カウンタによりOCXOの発振周波数の誤差は 1×10^{-8} であると確認されている。屈折率補正に使用した屈折率の近似式は350~1300 nmで有効であるとされており、1550 nm帯における屈折率補正の精度が誤差要因の一つと考えられる¹²⁾。

5. 表面形状計測

Fig. 7は呼び段差 $10 \sim 1 \mu\text{m}$ の段差マスタの表面形状を計測した結果である。焦点距離100 mm相当の組み合わせレンズと二次元ビームスキャナでテレセントリックf- θ 光学系を組んでいる。焦点位置でのビームスポット系は約 $60 \mu\text{m}$ である。計測時間は周波数切り替えなしで500点 $\times$ 500行のスキャン1回あたり約2秒である。Fig. 7は10回計測の平均値を表示している。 $1 \mu\text{m}$ の段差も判別できていることがわかる。1回計測でも画像処理を行えば $1 \mu\text{m}$ の段差の判別は可能であった。鏡面反射体以外に機械加工された拡散反射面、塗装面、プラスチックなどの表面形状を計測することができる。傾斜や湾曲の大きな鏡面、多重反射を発生する半透過性を持つフィルム、可干渉性を低下させる多孔質などは誤差が大きい。

6. 研究の動向

二台の光コム光源の干渉を応用した距離計として他に、周波数間隔のわずかに異なるモード同期レーザー型のコム発生器を二台使用した例が報告されている。1台の連続発振レーザーに位相同期された2台の光コムで L_a が1.5 mの装置を構成し、平均時間200 μs において精度3 μm 、平均時間60 msにおいて精度5 nmが報告されている⁶⁾。また位相同期を行わなくてもコムの繰り返し周波数を監視することで L_a を1 mとして平均時間140 μs において精度2 μm 、平均時間20 msにおいて精度200 nmを達成したとの報告もある¹³⁾。モード同期レーザーの構造上、変調型光コムほどの動的な周波数間隔切り替えは難しいが、物体光と参照光を入れ替えることで原理的に数十kmの距離測定が可能とされる。これらの干涉計は干涉検出器が1台で構成されており、ここで紹介した変調型光コムの干涉計と構成が異なっている。一つの干涉信号に参照面と測定対象からの反射信号が含まれるため、両信号が重なる距離が計測の不感帯となる。

MSTARと呼ばれる位相変調器型の二波長干涉計は、二つの干涉検出器を持ち不感帯のない距離測定が可能で

Fig. 7 Surface profile measurement of a step gauge block. Upper figure: three-dimensional display, lower figure: a cross section. Nominal steps are 10 μm , 5 μm , 2 μm , 1 μm from left to right.

ある点で変調型光コム干渉計に類似している⁵⁾。サイドバンドの次数は ± 1 次までであるが、40 GHz帯の位相変調器2台を使って $L_a = 1.875$ mmの距離計を構成して計測時間120 msにおいてレーザー光の半波長より高い120 nmの精度を得ている。変調周波数を下げることで L_a の整数倍の距離を判別できるため、原理的に数kmの距離測定も応用可能とされている。

モード同期レーザー型、MSTARともに人工衛星間など宇宙空間における位置決めが想定された研究であるのに対して、ここで紹介した変調型光コム干渉計はその制御性を生かした実用機器開発に重点が置かれている。高精度と高速性を両立したことが特徴で、 $L_a = 6$ mmであるが、距離5.2 mの計測精度が計測時間2 μ sで0.4 μ m、1 msで30 nmに達する。 L_a を超える距離測定であっても電気的な周波数の切り替えのみで整数値を自動判別するシステムとなっている。今後は、 L_a 以内の相対距離測定の速度向上や絶対距離計測の繰り返し周波数1 kHzの達成が目標となる。

7. まとめ

変調型光コムを使う干渉計の原理、距離計、形状計測機のパフォーマンスについて報告した。光強度変調の検出を利用する従来型距離計に比べて大幅な速度と精度の向上が可能となった。また複数光コム干渉を使用する距離計の研究動向を紹介した。どの方式もある平均時間以上では距

離計としての計測精度はレーザー光源の半波長に達している。長距離計測とレーザー干渉計によるナノメートル計測が一連の計測として実行できる環境が整いつつある。

参考文献

- 1) M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu: IEEE J. Quantum Electronics **29** (1993) 2693.
- 2) W. Estler, K. Edmundson, G. Peggs, and D. Parker: {CIRP} Annals-Manufacturing Technology **51** (2002) 587.
- 3) K. Minoshima and H. Matsumoto: Appl. Opt. **39** (2000) 5512.
- 4) S.-J. Lee, B. Widiyatmoko, M. Kourogi, and M. Ohtsu: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) L878.
- 5) O. P. Lay, S. Dubovitsky, R. D. Peters, J. P. Burger, S.-W. Ahn, W. H. Steier, H. R. Fetterman, and Y. Chang: Opt. Lett. **28** (2003) 890.
- 6) I. Coddington, W. C. Swann, L. Nenadovic, and N. R. Newbury: Nature Photon. **3** (2009) 351.
- 7) 今井 一宏, 興梠 元伸: 計測と制御 **50** (2011) 112.
- 8) T. Kanemura, H. Kondo, E. Hoashi, S. Yoshihashi-Suzuki, N. Yamaoka, H. Horiike, T. Furukawa, Y. Hirakawa, and E. Wakai: Fusion Eng. Des. (2014) in press.
- 9) T. Kobayashi, T. Sueta, Y. Cho, and Y. Matsuo: Appl. Phys. Lett. **21** (1972) 341.
- 10) K. Imai, B. Widiyatmoko, and M. Kourogi: Proc. 30th European Conference on Optical Communication (2004) p. We4. P. 044.
- 11) M. Kourogi, B. Widiyatmoko, Y. Takeuchi, and M. Ohtsu: IEEE J. Quantum Electronics **31** (1995) 2120.
- 12) P. E. Ciddor: Appl. Opt. **35** (1996) 1566.
- 13) T.-A. Liu, N. R. Newbury, and I. Coddington: Opt. Express **19** (2011) 18501.

レーザーワード

変調型光コム (EO-modulator-based optical frequency comb)

電気光学変調で生成される光コム。大振幅変調や光共振器による多重往復変調など、単一周波数発振のレーザー光に深い変調を加える方式で高次のサイドバンドを発生してコム状スペクトルを得る。光コムを中心周波数と周波数間隔はそれぞれ入力レーザー周波数と変調周波数に一致する。周波数の高速切り替えや調整が容易であ

るなど、周波数や位相の制御性の良さが特徴である。変調器の性能次第で変調周波数を1 GHz以上に上げられるため、周波数間隔の広い光コム生成に向いている。1台のレーザー光源から周波数間隔の異なる複数の光コムを生成することも可能である。光差周波数測定、光波形生成、光コム干渉計測などへ応用される。(今井 一宏)