

特集 産業応用ライダー

光コム干渉による高機能光計測

今井 一宏^{*1}, マーク ジャボロンスキー¹, 興梠 元伸¹¹株式会社 XTIA (〒140-0002 東京都品川区東品川 3-32-42 IS ビル 2F)

Advanced optical measurements using optical frequency comb interferometry

Kazuhiro Imai^{*1}, Mark Jablonski¹, and Motonobu Kourogi¹¹XTIA Ltd., IS Building 2F, 3-32-42 Higashishinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0002

(Received June 7, 2022; revised July 13, 2022; accepted July 29, 2022)

Optical frequency comb technology bridges the gap between the optical domain and the microwave domain. The optical frequency comb enables rapid and precise ranging based on time-of-flight measurements in the optical band with interferometric analysis in the microwave band. In this paper, we introduce high-precision absolute distance and profile measurement systems using electro-optic modulator-based optical frequency combs. The accuracy and the reproducibility of the measurements are better than 1 μm . The repetition rate of the measurements is 500 kHz within the ambiguity-free measurement range and 1 kHz for longer distances.

キーワード：光コム，干渉計，絶対距離計，形状計測，デュアルコム距離計測

Key Words: Optical comb, Interferometer, Absolute distance meter, Profile Measurement, Dual comb ranging

1. はじめに

光波の飛行時間法 (Time of Flight: TOF) による距離計測は長さの定義に即した直接的な計測法であるが，電子回路の帯域制限があるためフェムト秒の時間分解能，またはマイクロメートルの距離分解能を達成することは困難である．精度が要求される場合，一般的には周波数安定化レーザーの波長を基準とするレーザー干渉計が用いられる．真空中のレーザー波長は光の速さを周波数で割った値であるので，周波数が安定ならば波長が高精度な物差しの役割をする．測定対象物までの距離が変化する際の反射光の位相変化を干渉として電気信号に変換するため，高速な信号処理を要せず高精度に距離を求められる．しかし，原点から変化の積算量として距離を求めるため，光線遮断時に原点復帰が必要であるなど実用上の課題がある．

光エレクトロニクスの研究開発が進展しているなかでも未だに高精度な TOF 距離計測が容易ではないことの要因はレーザー技術と電子回路技術の乖離にある．レーザー技術が光の周波数の高さを反映し，より広い帯域で高速な信号を扱えるように進化しているのに対して，光よりもはるかに周波数の低い電気信号にはそもそも光信号を十分に支えるだけの帯域がない．したがって高度な光技術を実用にするためには両周波数帯域を仲立ちする仕組み，融合する技術が必要である．

光コムは一定の周波数間隔で並び，位相同期された櫛状の周波数成分からなる光である¹⁾．隣接する成分との周波数差は高くてもギガヘルツ程度になっており，光コム帯域内の様々な計測が干渉を介して電氣的に実行できる．光コムはエレクトロニクスと光技術の橋渡しとして先駆的な役割を担ってきた．黎明期の光コムはマイクロ波帯の原子時計を基準にレーザー周波数を測定するために使用された¹⁻³⁾．光コムによるレーザー周波数計測は 2005 年ノーベル物理学賞にもつながった技術であるが，光コム関連技術の発展により現在では時間・周波数の研究分野で一般的に利用されている手段である．

光コムは線スペクトル由来の長い可干渉距離とスペクトル全体の広がりによって生じる短い可干渉距離が同居しているため、TOF 距離計測にも適性がある。光コムを干渉計の物体光と参照光として利用すると光コムが潜在的に持つ時間分解能を損なわず電子回路周波数帯域での処理が可能となって、高速、高精度の TOF 距離計測が可能となる。ここでは様々な光コム発生方式の中でも計測器への組み込みに適した電気光学変調方式の光コムと光コム干渉を用いる距離計測、形状計測について述べる。

2. 光コム発生器

Figure 1(a)は代表的な電気光学変調型光コム発生器であるファブリペロー電気光学変調器 (FP-EOM) の構成を示す。ファブリペロー共振器内に位相変調器が挿入されている。入力レーザー周波数と共振周波数が一致した状態で光共振器の自由スペクトル域 (Free Spectral Range: FSR) の整数倍に一致する変調周波数 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深い変調が得られる。Fig. 1(b)は入出力スペクトルの変化を示しており、単一周波数 ν の入射光が中心周波数 ν 、間隔 f_m のサイドバンド数百本に変換されて出力される。共振条件を大きく外さなければ光コムの中心周波数と周波数間隔を切り替えることができる。一般的な位相変調器ではベッセル関数の特性に応じた強度変化の大きいスペクト

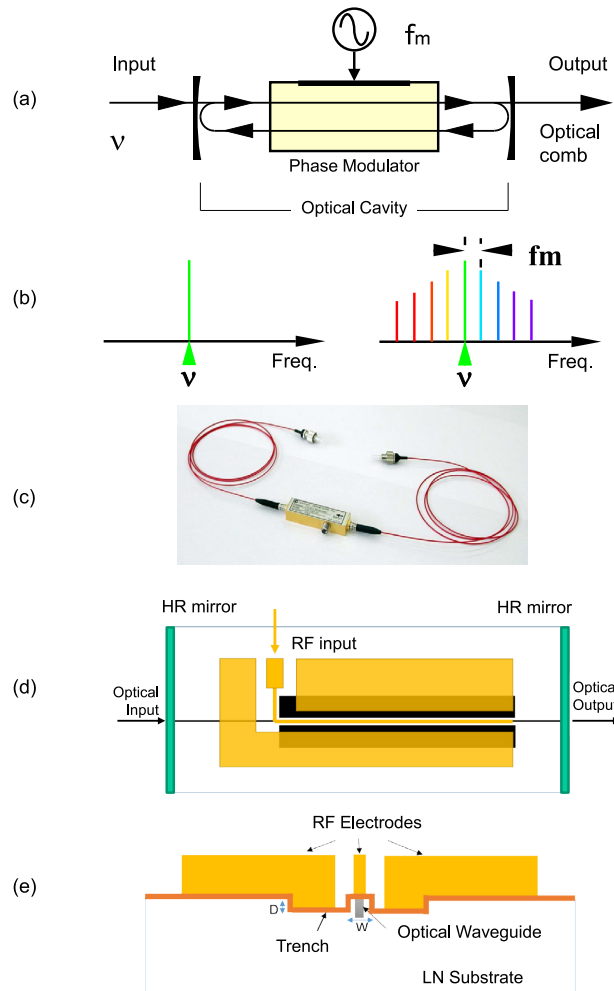


Fig. 1 (a) Operation principle of Fabry-Perot Electro-Optic modulator (FP-EOM). (b) Drawings of input (left) and output (right) spectrums, (c) FP-EOM module, (d) Top view of new chip design. The optical cavity is between the high reflection (HR) coated (highlighted in green) chip facet ends, (e) Cross section of the new chip design.

ルとなるがFP-EOMでは共振器の効果により滑らかなスペクトル形状となる。時間的には繰り返し周波数 f_m の光パルス列である。ただし、位相変調が変調の周期内で瞬時周波数の高い領域と低い領域を生むことに対応して入力周波数に対して高周波数側、低周波数側に別れた2種類の光パルスが変調の一周期に交互に出力される。

この変調器は1970年代に大阪大学の小林らによって光パルス発生器として提案されたものである⁴⁾。それを1990年代にかけて東京工業大学の興梧らが改良して光コム発生器として光周波数の計測に利用した¹⁾。我々はFig. 1(c)のように光通信で用いられるLiNbO₃光導波路型変調器の技術を応用して装置組み込み可能な光ファイバピグテイル付小型モジュール構造のデバイスを製品化した⁵⁾。光共振器はFig. 1(d)のように光導波路が形成された基板の両端面に直接高反射ミラーが取り付けられた一体型構造になっており、振動に影響されにくい。またFig. 1(e)に示した変調器断面のような溝を光導波路に沿って作製して光導波路に電界を集中する効果を高め、溝がない場合と比べて1/2~1/3のRFパワーで駆動する省電力型コム発生器も開発している。光共振器のFSRは温度調節によって2.5 GHzに設定される。動作波長は1.55 μm 帯で、周波数間隔25 GHz、スペクトル幅10 THz以上の光コムを発生する。

様々な光コム発生方式の中でスペクトル幅に着目すると、1オクターブのスペンを持つモード同期レーザー方式の性能が電気光学変調方式を上回っている。自己参照方式の光周波数測定など時間・周波数応用にはモード同期レーザー方式が利用されることが多い。しかし光コムを空間距離の正確さに展開することを考えた場合、数THzの発生スペンでもエレクトロニクスとの親和性の良い高度な活用ができるならば技術的には飛躍的な前進となる。また計測機器、システムへの組み込みや製造現場での利用など電気光学変調方式の持つ制御性の良さ、高い堅牢度、小型軽量といった特徴が優位に働く。

3. 光コム干渉計

3.1 構成

光コムが経験した位相遅れを電気信号に変換し、スペクトル帯域幅の有効活用をもたらす技術が光コム干渉計である^{6,7)}。Figure 2にその構成を示す。1台のレーザー光源(周波数 ν)の出力が分割され2台の電気光学変調型光コム発生器(OFCG1, OFCG2)に入力されている。OFCG1, OFCG2は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。単一周波数発振のレーザー光源を使用しており、スペクトル線幅15 kHz以下、発振波長1554.94 nm、出力約20 mWである。ビート周波数帯域の重なりを避けることが可能なヘテロダイン検出の構成とするため、OFCG2側の経路に音響光学周波数シフタを挿入し

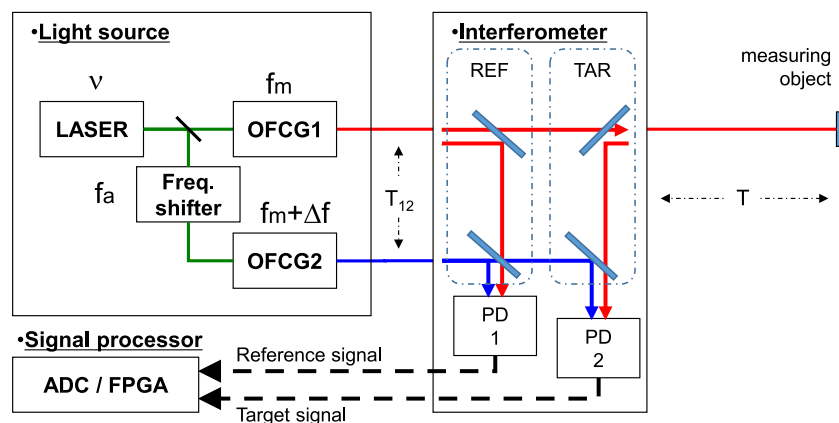


Fig. 2 Optical comb interferometer. LASER: Narrow linewidth laser diode; ν , Freq. shifter: Acousto-optic frequency shifter; f_a , OFCG1: Optical frequency comb generator (objective light; f_m), OFCG2: Optical frequency comb generator (reference light; $f_m + \Delta f$), PD1: Photo detector (reference interferometer: REF), PD2: Photo detector (target interferometer: TAR). Signal processor includes A/D converters (ADC) and a field-programmable gate array device (FPGA). T_{12} : Group Delay difference between OFCG1 and OFCG2. T : Group delay due to the round trip between the interferometer and a measuring object.

て OFCG2 への入力光の周波数を $f_a (=40 \text{ MHz})$ だけずらしている. OFCG1, OFCG2 を駆動する変調周波数はそれぞれ f_m と $f_m + \Delta f$ で表されているが, f_m が 25 GHz 帯であるのに対して Δf は 500 kHz であり, f_m と比べて周波数差 Δf が桁違いに小さい. OFCG1, OFCG2 はそれぞれ出力の一部を検出する光検出器と制御回路が内蔵されており, 共振周波数がレーザー周波数に追従するような制御が行われている. また光増幅器, 可変減衰器が内蔵されていて, 光コム出力は物体光である COMB1 出力が 10 mW 以下, 参照光である COMB2 出力が 3 mW 以下に調整されている.

光コム干渉計には参照用干渉計と測定用干渉計が光路を共有する形で含まれている. PD1, PD2 はそれぞれの干渉計の光検出器である. 物体光の一部は PD1 に入力され, 残りは測定対象物に照射される. 反射光は干渉計に戻されて PD2 に入る. 光コムの時間波形は変調周波数の逆数に一致する周期の光パルス列である. 測定区間を往復せず PD1 で検出される光パルスと比較して PD2 で検出される光パルスには群遅延または周期パルスの位相遅れが含まれる. 直接検波では検出器や信号処理の帯域制限を受けるため短い光パルス幅から期待されるほどの時間分解能は得られない. 光コム干渉計では PD1, PD2 の前で物体光を参照光と重ね合わせて, それぞれ参照光に対する物体光の群遅延を含む干渉信号として検出することで帯域の問題を回避している. 物体光と参照光は周波数間隔がわずかに異なっており, 周波数帯域を圧縮しながら多波長の位相を一括検出できる. 光コムを発生してから干渉計に入るまでの遅延時間差 (T_{12}) は, PD1, PD2 に共通である. PD2 の干渉信号には, その遅延時間差に加えて物体光が測定対象物を往復する時間と参照光が参照面を往復する時間の差 (T) が含まれる. 二つの干渉信号は信号処理ユニットのアナログ/デジタル (AD) 変換器でデジタル信号に変換され, Field Programmable Gate Array (FPGA) で実時間のデジタル処理を経て干渉信号間の位相差が求められる.

光コム干渉計は光コヒーレンストモグラフィー (Optical coherence tomography: OCT) 用に開発された干渉計⁸⁾を基本に距離計測用の改良を加えたものである. 原理的には様々な光コム発生方法に対して同様な測距が可能であり報告例もある^{9, 10, 11)}. モード同期レーザー方式など 2 台の独立した光コム光源で同様な計測性能を実現するには, レーザー発振モードと繰り返し周波数の両方を広帯域かつ高精度に位相同期する必要がある. 特に繰り返し周波数については 2 台の繰り返し周波数にわずかな差を与えることと広帯域位相同期の両立が求められるため難易度が高い. FP-EOM は一台のレーザー光源から周波数間隔のわずかに異なる複数の光コムを生成するため, 高精度な位相同期を行わなくても干渉の過程でレーザー光源や変調信号に含まれる位相雑音を相殺する効果がある. 短期的な計測精度向上に適した一組の光コムを生成できる.

3.2 干渉信号周波数

Figure 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. キャリア周波数と $N = \pm 2$ 次までの周波数成分だけ図示されている. 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 ν や f_m に関係なく $f_a + N\Delta f$ であり, 次数ごとに周波数分離された状態で検出される. 25 GHz の間隔で数 THz の周波数帯域に並んでいた光

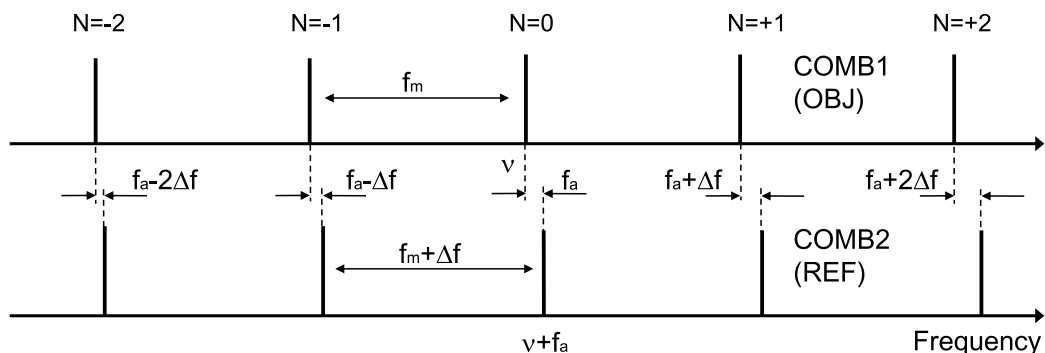


Fig. 3 Schematic drawings of the beat signal frequencies in the optical comb interferometer. Carrier frequencies ($N=0$) and sidebands up to second order ($N=\pm 2$) are shown. f_m : frequency separation of COMB1 for object light, $f_m + \Delta f$: frequency separation of COMB2 for reference light, f_a : shift frequency at the acousto-optic frequency shifter.

コムが 40 MHz を中心とする 500 kHz 間隔のコム状干渉信号に変換され、100 MHz 程度の電気信号帯域に圧縮される。その他の組み合わせは周波数が 25 GHz 以上になり光検出器の帯域外となる。干渉信号には光パルスが経験した位相遅れが光周波数の検出感度で保存される。N 次干渉信号の位相遅れは PD1 側： $2\pi(\nu + Nf_m)T_{12}$ 、PD2 側： $2\pi(\nu + Nf_m)(T_{12} + T)$ となり、光周波数に比例した形式である。信号処理演算で PD1 と PD2 の位相差と次数依存性を求めることによって光パルスの位相遅れ $2\pi f_m T$ が抽出される。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帯域幅 1 THz の検出と等価になる。

3.3 干渉信号波形

Figure 4 は干渉信号発生過程の模式図である。Fig. 4(a) は参照光パルス波形の包絡線、(b) は物体光パルス波形の包絡線を表している。参照光と物体光の間で繰り返し周波数がわずかに異なっているためパルスの周期にわずかなずれがある。 Δf が 500 kHz の場合、 $2 \mu\text{s} (= T_B)$ 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。Fig. 4(c) は重なり合いの強い部分を色の濃淡で示している。物体光と参照光には周波数シフトによる 40 MHz の周波数差が与えられている。光パルスが重なり合う時間帯のみ光電流に 40 MHz のうなり波形が生成され、重ならない時間帯では検出される光パワーの平均に比例した直流電流が出力される。交流成分だけを見ると Fig. 4(d) の包絡線パルス状信号が $2 \mu\text{s}$ に 1 回生成される。測定用干渉計で物体光に遅延が加わると干渉信号の発生時刻はノギスのバーニア効果のように大きく拡大されて観測される。光パルスの遅延を T 、干渉信号の発生時刻の変化を Δt とすると、 $|\Delta t| = (f_m / \Delta f) T$ となる。 $f_m = 25 \text{ GHz}$ 、 $\Delta f = 500 \text{ kHz}$ の場合、変調周波数の一周期 40 ps の変化が干渉信号の一周期 $2 \mu\text{s}$ の変化として 50,000 倍に拡大されて観測される。 Δt の符号は Δf および f_a の符号に依存する。

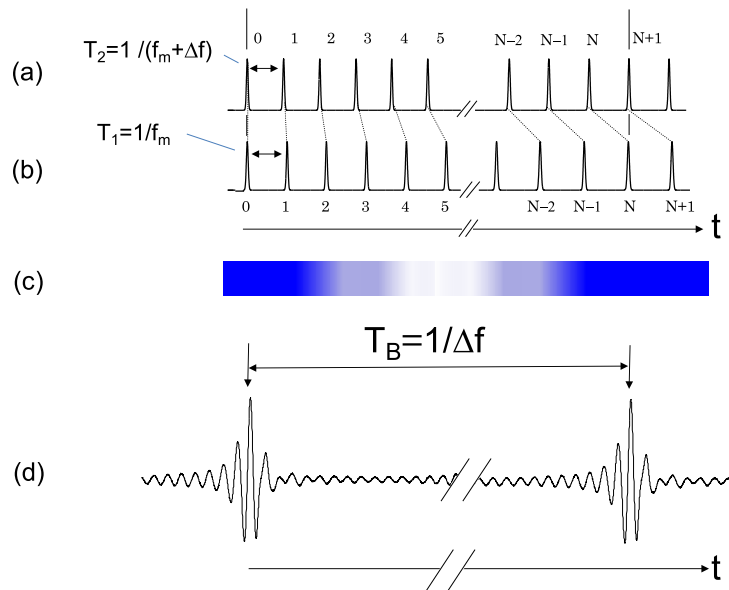


Fig. 4 Schematic drawings of the beat signal generation in the optical comb interferometer. (a) Reference light pulses (COMB2) at a repetition rate of $f_m + \Delta f$ and period of $T_2 = 1/(f_m + \Delta f)$. (b) Object light pulses (COMB1) at a repetition rate of f_m and period of $T_1 = 1/f_m$. (c) The blue color gradient rectangle shows the durations of overlap between the reference light pulse and the object light pulse. (d) The beat signal waveform emitted from the photo detector after low-pass filtering.

Figure 5 は時間波形の一例である。(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。参照信号の周期 T_B に対する測定信号の遅れ Δt から変調周波数の半波長以内の距離が求められる。信号処理では周期信号である参照信号と測定信号をフーリエ変換して周波数解析により位相差

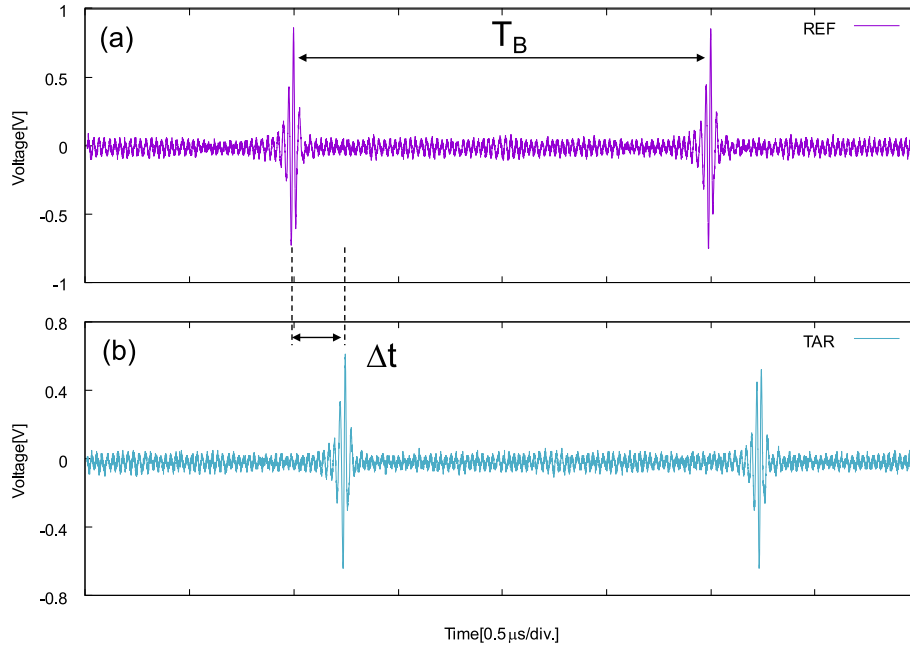


Fig. 5 Beat signal waveforms in the optical comb interferometer. (a) The reference beat signal from PD1 in the reference interferometer. (b) The target beat signal from PD2 in the target interferometer. T_B is a period of the beat signals ($2 \mu\text{s}$). Δt is a delay of the target beat signal.

$2\pi\Delta f\Delta t$ を求め、それを $2\pi f_m T$ と読み替えて物体光の遅延時間 T を求める。変調信号 25 GHz の半波長は約 6 mm であり、その距離は多義性距離 (ambiguity-free measurement range, 以下 L_a) などと呼ばれる。1 回の計測ではその範囲内の距離が得られるのみである。光コム距離計に应用する場合は変調周波数を切り替えながらそれぞれの位相を計測し、それらの相対値から L_a の整数倍の距離を算出して絶対距離を求める。

3.4 駆動信号発生部

Figure 6 は FP-EOM 駆動信号発生回路の構成である。振幅調整のための増幅器、減衰器については記載を除いてある。主となる発振器 1 台と副発振器 4 台が含まれており、主発振器と副発振器のミキシングにより駆動信号を生成する。主発振器の周波数 F_0 は 24 GHz、副発振器の周波数 $F_1 \sim F_4$ は 1 GHz 帯で 1 GHz, 1.010 GHz, 1.0005 GHz, 1.0105 GHz である。すべての発振器は同一の参照発振器 (OCXO, 10 MHz) に位相同期されている。主発振器の出力は 2 つに分割され、アイソレータを介してミキサの LO ポートに入る。副発振器はそれぞれアイソレータを介して 4 入力 2 出力の RF スイッチに接続される。RF スイッチは 500 kHz 離れた 2 つの周波数を選択して、それぞれミキサの IF ポートに入力する。24 GHz と 1 GHz 帯の混合により周波数変換された RF 出力のうち 25 GHz 帯のみバンドパスフィルタ (BPF) で切り出して光コム発生器に供給する。

光コム干渉計は変調信号の周期を基準に位相の遅れを求めているため、駆動信号源の位相雑音が計測精度の限界を与える。周波数混合により駆動信号を生成すると共通する発振器の位相雑音が光コム干渉の位相差計算過程で相殺され、短期的な計測精度の向上が見込める。測定光の遅延時間 T は位相揺らぎも含む形で

$$2\pi f_m T + \phi(\Delta t, T) = 2\pi\Delta f\Delta t + \{\phi_1(t_1) - \phi_1(t_1 + \Delta t + T)\} - \{\phi_2(t_1) - \phi_2(t_1 + \Delta t)\} \quad (1)$$

と表すことができる。ある参照信号の発生時刻を t_1 とし、 Δt は t_1 を基準にした測定信号の遅延時間である。右辺カッコ内の位相雑音を表す部分を $\phi(\Delta t, T)$ と表した。 $\phi_1(t)$, $\phi_2(t)$ はそれぞれ COMB1, COMB2 を駆動する信号源の位相雑音を表す。 $\phi_1(t)$, $\phi_2(t)$ を混合前の 24 GHz 発振器と 2 台の 1 GHz 発振器の位相雑音 $\phi_A(t)$, $\phi_{B1}(t)$, $\phi_{B2}(t)$ で表すと $\phi_A(t)$ の一部は相殺されて、

$$\phi(\Delta t, T) = \{\phi_{B1}(t_1) - \phi_{B1}(t_1 + \Delta t + T)\} - \{\phi_{B2}(t_1) - \phi_{B2}(t_1 + \Delta t)\} + \{\phi_A(t_1 + \Delta t) - \phi_A(t_1 + \Delta t + T)\} \quad (2)$$

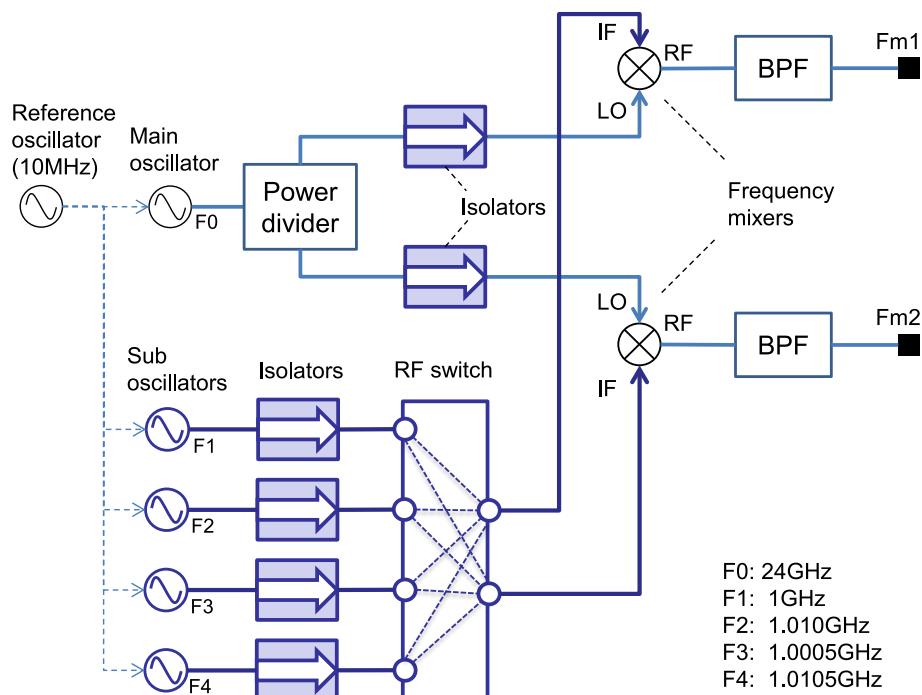


Fig. 6 Schematic of the modulation signal generation unit. Amplifiers and attenuators for amplitude adjustments are not shown. BPF: 25 GHz Bandpass filters, F0: Frequency of the main oscillator, F1-F4: Frequencies of the sub oscillators.

となる。 $\phi_A(t)$, $\phi_{B1}(t)$, $\phi_{B2}(t)$ は互いに独立した発振器の位相雑音であって基準発振器への位相同期帯域外において無相関である。それぞれ時間差をつけた引き算の形である。時間差が大きいほど引き算の相殺効果が失われ計測ばらつきが増える。 $\phi_{B1}(t)$, $\phi_{B2}(t)$ の時間差はそれぞれ $\Delta t + T$ 及び Δt であり、 $\phi_A(t)$ の時間差は T である。 T は光が測定対象区間を往復する時間であって、往復 10 m としても約 33 ns 程度であるのに比べ、 Δt は干渉信号の時間軸での遅れ時間であり最大 1 μ s になる。使用した発振器の位相雑音を Table 1 に示す。オフセット周波数 100 kHz の位相雑音は 1 GHz 帯発振器で -143 dBc/Hz、24 GHz 帯の発振器で -110 dBc/Hz となっている。比較的位相雑音の大きい 24 GHz 発振器をミキシングの共通信号としておくことでその位相雑音が Δt に依存する計測ばらつきを生まないようになっている。

Table 1 Typical SSB phase noise of oscillators used in the optical comb interferometer.

SSB phase noise [dBc/Hz]			
Offset frequency	10kHz	100kHz	1MHz
F0 (24GHz)	-107	-110	-125
F1~F4 (~1GHz)	-123	-143	-160

4. 計測精度

Figure 7 は物体光の駆動周波数 25 GHz における光コム干渉計の計測精度を表す⁷⁾。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。無駄時間なく連続データ収集されているため平均時間と計測周期は一致している。(a) は距離 24 mm と 27 mm における平均時間と精度の関係をプロットした図である。24 mm は $\Delta t = 0$ の状態、27 mm は $|\Delta t| = 1 \mu$ s の状態に対応す

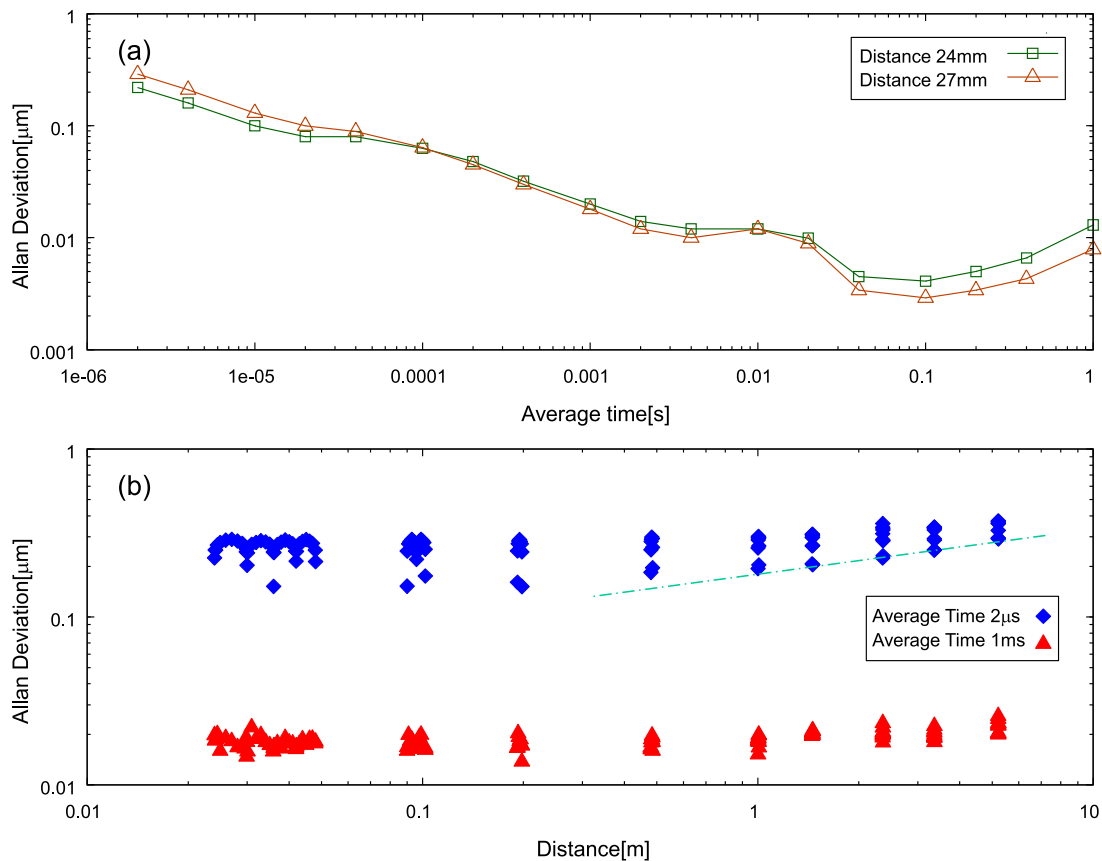


Fig. 7 Precision of the distance measurement. (a) Allan deviation versus averaging time. Distances are $\square$: 24 mm and $\triangle$: 27 mm. (b) Allan deviation versus distance. $\blacklozenge$, averaging time 2 μs ; $\blacktriangle$, averaging time 1 ms.

る。計測の精度は、測定周期 2 μs において 0.3 μm 程度、測定周期 1 ms の時におよそ 20 nm であった。短期的には距離 27 mm の条件のほうが計測のばらつきが大きい。100 ms $\sim$ 1 s あたりの差異はアラン分散の評価に使えるデータが少ないことや測定場所の振動や空気屈折率変動の影響である。

Figure 7(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。計測周期は四角の点が 2 μs 、三角の点が 1 ms である。近距離での精度は計測周期 2 μs で 0.2 μm と 0.3 μm の間、計測周期 1 ms では 20 nm 程度であった。距離 5.2 m でも計測周期 2 μs で 0.4 μm 以下である。近距離においては半波長 L_a (≈ 6 mm) の周期で $|\Delta t|$ の増減に合わせてアラン分散値の極大、極小の繰り返しが現れる特性となっている。また、長距離ほどアラン分散の極小値が大きくなる傾向もみられる。それぞれ干渉信号の遅れ Δt に依存する副発振器の位相雑音、物体光の飛行時間 T に依存する主発振器の位相雑音の影響が表れていると考えている。

5. 距離計

電気光学変調方式の光コムは変調周波数の切り替えによって周波数間隔を素早く変更できる。光コム距離計ではその特徴が生かされている。光コム距離計は変調周波数を切り替えながら複数の距離を計測し、それらの相対値から L_a の整数倍の距離を算出して絶対距離を求めている。主発振器の周波数 F_0 と副発振器の周波数 $F_1 \sim F_4$ の加算で発生できる 4 つの周波数、25 GHz、25.010 GHz、25.0005 GHz、25.0105 GHz で順次 COMB1 を駆動する。COMB2 側は常に COMB1 側と 500 kHz 違いの周波数で駆動される。駆動周波数の差 10 MHz で約 15 m まで、さらに差 500 kHz で約 300 m までの距離測定ができる。信号の切り替えが速いため、大気揺らぎ、空間振動の影響を受けにくく、絶対距離を求めるために要する時間は切り替えと信号処理を含めて約 1 ms である。連続的に繰り返し約 1 kHz のリアルタイム計測が可能である。

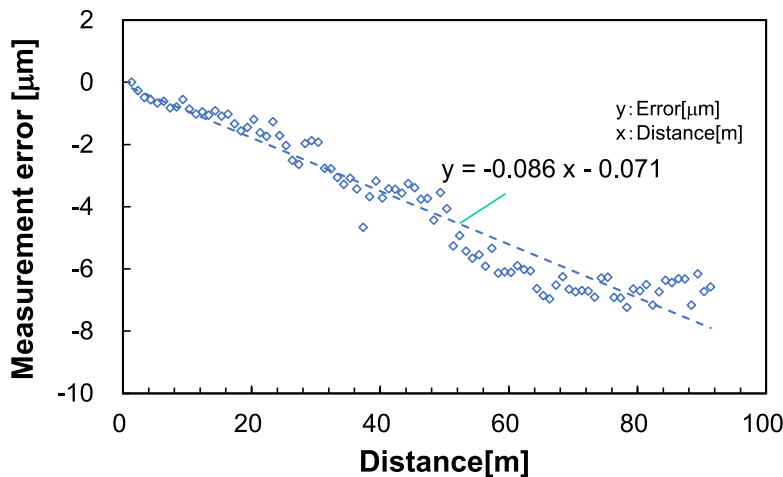


Fig. 8 Measurement error of Optical comb absolute distance meter (ADM). Averaging time for distance measurements is 100 ms. Distance error shows the difference between an optical comb ADM and a standard laser interferometer at National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

Figure 8 は光コム距離計を産業技術総合研究所の光学トンネルに持ち込んで干渉測長器との比較評価を行った結果である。干渉計出力のビームを直接、反射体であるリトロリフレクタに照射した。干渉計出力のビーム径は強度 $1/e^2$ の全幅で約 3.6 mm である。距離が遠いほどビーム径の拡大により反射光強度が低下した。90 m を超えて反射強度不足により測定困難となったところで評価を打ち切った。Fig. 8 の誤差はレーザー測長器の測定値から光コム距離計の測定値を差し引いた値である。光コム距離計はレーザー測長器と比べて長めに計測されている。距離に比例して誤差の絶対値が大きくなる傾向がみられ、比例係数の大きさは 1 m あたり 0.086 μm 程度であった。10 m 程度までは誤差がおおよそ 1 μm 以内に収まっており、90 m 以上の距離でも誤差は最大 7 μm 程度であることが確認された。評価した距離計の光源に搭載された OCO の発振周波数の誤差は 1×10^{-8} であった。また距離補正に使用した屈折率の近似式は $\sim 10^{-8}$ 程度の不確かさとされる¹²⁾。それらも誤差の要因と考えられる。

6. 形状計測器

6.1 構成

光コム干渉計とスキャナによる照射位置の走査を組み合わせたものが光コム形状計測器である。Figure 9 (a) はその外観写真を示す。高速でレーザービームをスキャンしながら L_a の範囲の高さ分布を求めて三次元形状を得ている。 f_m が 25 GHz の場合、 L_a に相当する高さ約 6 mm を超える対象物を計測すると計測結果は高さ L_a の範囲に折り畳まれてしまう。大型部品の計測に対応するため、計測精度が犠牲になるが f_m が 1 GHz で L_a が約 150 mm となる光源も開発した。 f_m が 1 GHz の場合、計測のばらつきは、 f_m が 25 GHz の場合と比較して約 10 倍の数 μm である。

測定対象物に合わせて Fig. 9(b) のように複数のスキャナを提供している。ビーム直径が 100 μm で 1 軸 90 mm 幅の光学スキャナと直線ステージを組み合わせた L90、40 mm 角の 2 軸光学スキャナでビーム直径 60 μm を走査する S40、走査エリアが 5 mm 角でビーム直径が 22 μm である高解像型の M5 というのが主な形式である。L90 は比較的大きな部品を対象と考えており、主に f_m が 1 GHz の光源を組み合わせている。どのスキャナもテレセントリック光学系が用いられておりスキャナ側から測定対象物に向かって鉛直に集光ビームを照射するようになっている。他にビーム進路を 90 度折り曲げるミラーを回転させて円筒内面をなぞるようにスキャンする装置や S40 と直角プリズムミラーを組み合わせで円筒内径を計測する光学系なども提供している。レンズ、スキャナやステージ等に起因する歪みに対しては、キャリブレーションによる補正を行っている。インラインの検査器として使用する場合にはステージ以外の部分を工場側の設備に接続して搬送機に連動した計測が行われる。生産ライン制御機器とのインターフェイスを経由して指令を受けて計測を実行、三次元形状データまたは OK/NG 判定結果を返す。標準的な測定時間は、S40 の場合、縦横

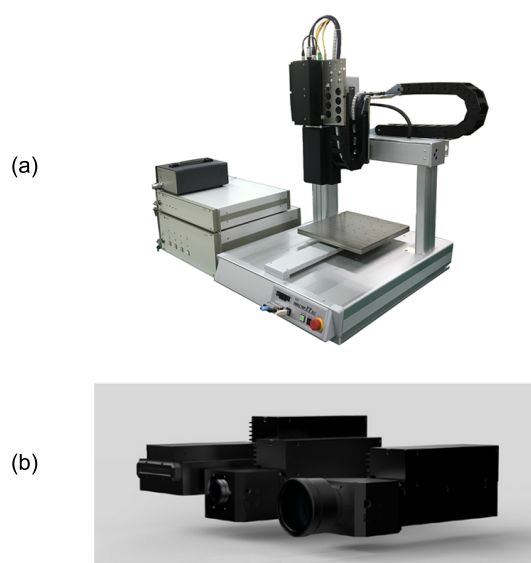


Fig. 9 (a) Optical Comb 3D profile measurement system (L90), (b) Scanning heads. (Left) L90, (Middle) M5, (Right) S40.

40 mm×40 mm の範囲，測定ピッチ 50 μm ，平均数 4 の条件で 8.6 秒，L90 の場合，縦横 90 mm×200 mm の範囲，測定ピッチ 100 μm ，平均数 4 の条件で 27.6 秒である。

6.2 測定例

ステレオ法，共焦点，TOF カメラなど様々な光学式三次元計測技術が成熟しつつある中で光コム干渉を用いた計測の特徴は同軸，高速及び高精度である。同軸計測ゆえに光学系の設計次第で作動距離（Working distance）を大きくとれて，深い穴の底や穴の側面形状も計測できる。Figure 10(a)は自社で行った自動車エンジンのシリンダーヘッドの燃焼室の形状測定例である。使用した形状計測器は L90 システムである。測

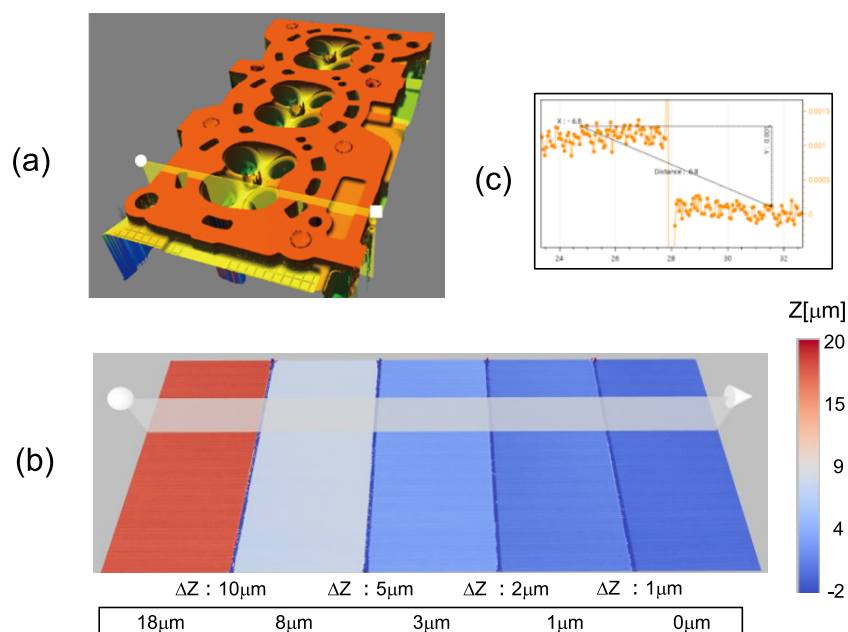


Fig. 10 (a) Measurement example of cylinder head using L90 system. (b) Measurement example of a step master using S40 system. Color bar shows the height along Z-axis. (c) The cross section of the step master measurement example (b) at the 1 μm step.

定された形状から燃焼室部分を抽出して容積を計算できる。燃焼室容積の繰り返し測定において標準偏差が0.01 ccを切る事例もある。Figure 10(b)はS40システムによる段差マスタの表面形状測定例である。Figure 10(c)に段差マスタ測定結果の段差1 μm 部分の断面図を示す。1 μm の段差まで明確に分解できていることがわかる。

また少し特殊ではあるが、日本原子力研究開発機構（現在の量子科学技術研究開発機構：QST）で核融合中性子源用の高速液体リチウム流の長期安定性実証実験が行われ、光コム距離計が応用されている¹³⁾。従来の接触式の波高計測法に比べて精度の1桁向上となる0.02 mmの精度が達成された。

光三次元計測に共通な特徴であるが、機械加工された金属表面のように浸み込みのない適度な拡散反射面は最も計測しやすい対象である。塗装面、プラスチックなどの金属以外の場合は材料の光学特性に依存する。計測誤差を減らすためには表面からの反射光を選択的に取得するような条件を作る必要がある。鏡面反射体の場合、正対した条件ならば精度よく測定できるが傾斜や湾曲の大きな鏡面は反射光が得られないので測定が難しい。また光コム干渉信号の処理が単一距離からの反射を仮定したアルゴリズムであるため、多重反射を発生する膜状の半透過性材料や可干渉性を大きく低下させる多孔質などは誤差が大きくなる傾向がある。光コム干渉計はOCTの新技术として提案された技術が基になっているので複数反射の情報がすべて干渉信号に含まれる。測定対象や内容拡充の為に光コムからの情報取得機能の向上が望まれる。

7. まとめと展望

電気光学変調型光コム発生器とその光コム光源を用いる距離計、形状計測機について、動作原理と測定例を紹介した。飛行時間計測（TOF）を原理とする光学式距離計としては、光強度変調の直接検波を利用する従来方式と比べて速度と精度が大幅に向上している。計測再現性と正確さが1 μm で、多義性距離（ L_a ）以内の計測は500 kHzの繰り返し周波数で実行される。長距離でも約1 kHzで測定できる。光コム形状計測機は同軸光学系での計測、長い作動距離、高速なデータ取得、高精度などの特長を有しており、自動車関連の中大型部品、精密加工部品のインライン自動検査での利用が始まっている。

中大型部品は画像検査で対応できない複雑形状などが要因となって未だ人の官能検査に依存している例が多い。また従来の高精度非接触形状検査は長い測定時間を要するためオフラインの抜き取りで行われることが一般的だった。光コム技術による三次元形状計測は計測精度と速度を両立することによりそれら問題を解消し、検査自動化を推進するものと期待している。今後は、より一層の速度と精度の向上、自動車部品以外の分野・用途の開拓、現時点で測定困難な材料に対する適用範囲の拡大などが課題である。

非接触・非破壊での高精度三次元形状計測は、検査自動化だけでなく、加工精度の向上にも付加価値を提供できる。加工プロセスの合間に当技術を導入することで設計値と実形状の差が求められる。補正加工により不良率の低下、生産工程の効率化にもつながる。ノーベル物理学賞を支えた光コム技術が広く社会実装され、環境・経済・社会への負荷軽減に貢献するという日が一日でも早く到来することを願っている。

引用文献

- 1) M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu, "Wide-Span Optical Frequency Comb Generator for Accurate Optical Frequency Difference Measurement," IEEE J. Quantum Electron. **29** (10), 2693–2701 (1993).
- 2) J. L. Hall, "Nobel Lecture: Defining and measuring optical frequencies," Rev. Mod. Phys. **78** (4), 1279–1295 (2006).
- 3) T. W. Hänsch, "Nobel lecture passion for precision," Rev. Mod. Phys. **78** (4), 1170–1187 (2006).
- 4) T. Kobayashi, T. Sueta, and Y. Matsuo, "High-repetition-rate optical pulse generator using a Fabry-Perot electro-optic modulator," Appl. Phys. Lett. **21** (8), 341–343 (1972).
- 5) K. Imai, B. Widiyatmoko, and M. Kourogi, "High finesse waveguide cavity optical frequency comb generator," Proc. the 30th European Conf. on Opt. Commun., We4. PP. 044, (2004).
- 6) 国内特許，特許第5231883号。(2008)。
- 7) 今井一宏，興梠元伸，寺田聡一，"変調型光コムを用いた精密距離計測器，" レーザー研究. **42** (9), 716–721 (2014)。
- 8) S. J. Lee, B. Widiyatmoko, M. Kourogi, and M. Ohtsu, "Ultrahigh Scanning Speed Optical Coherence Tomography," Japan J. Appl. Phys. **40** (8B), L878–880 (2001)。
- 9) O. P. Lay, S. Dubovitsky, R. D. Peters, J. P. Burger, S.-W. Ahn, W. H. Steier, H. R. Fetterman, and Y. Chang, "MSTAR: a sub micrometer absolute metrology system," Opt. Lett. **28** (11), 890–892 (2003)。

- 10) I. Coddington, W. C. Swann, L. Nenadovic, and N. R. Newbury, "Rapid and precise absolute distance measurements at long range," *Nature Photonics*. **3**, 351–356 (2009).
- 11) P. Trocha, M. Karpov, D. Ganin, M. H. P. Pfeiffer, A. Kordts, S. Wolf, J. Krockenberger, P. Marin-Palomo, C. Weimann, S. Randel, W. Freude, T. J. Kippenberg, and C. Koos, "Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs," *Science*. **359** (6378), 887–891 (2018).
- 12) P. E. Ciddor, "Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared," *Appl. Opt.* **35** (9), 1566–1573 (1996).
- 13) T. Kanemura, H. Kondo, T. Furukawa, Y. Hirakawa, E. Hoashi, S. Yoshihashi, H. Horiike, and E. Wakaia, "Measurement of Li target thickness in the EVEDA Li Test Loop," *Fusion Engineering and Design*. **98–99**, 1991–1997 (2015).



今井一宏

1971 年 12 月生。1994 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。1999 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程終了。工学博士。1999 年(独)理化学研究所フォトダイナミクス研究センターフロンティア研究員, 01 年(独)理化学研究所基礎科学特別研究員。03 年(株)光コム研究所(現 株式会社 XTIA)入社。08 年同取締役。光コム応用製品の研究開発に従事。応用物理学会会員。