

OFDRによる3次元形状測定

斎藤 崇記 Takanori Saitoh

[要旨]

物体の形状測定は、ノギス等の接触方式から、光を使った非接触方式に移行している。光の方法として TOF 方式や干渉方式があるが、それぞれ精度や測定範囲に問題があり、“数 cm から数 m の常用的な範囲の高精度測定”の要求を満足することは困難であった。そこで、これらの方法に替わって常用的範囲をシームレスに μm のオーダーで測定できる OFDR 方式距離計測システムを開発した。OFDR 方式には、波長を位相連続に掃引可能な光源が不可欠であるが、これには、アンリツデバイスで新開発した高コヒーレンス波長掃引光源を採用した。この波長掃引光源の利点を生かし、コリメータレンズ位置を原点として、0 m から 3 m の範囲の絶対距離を $0.2 \mu\text{m}$ の精度で測定可能となった。さらに、コリメータレンズの向きを上下左右に走査して対象物の形状を測定する、3 次元形状測定システムを構築した。本論文では、形状測定の結果を示し、応用用途等についても言及する。

1 まえがき

物体形状測定は、さまざまな分野に需要があり、鋳型の形状測定、加工製品の外観検査、プリント基板上の半田形状検査等に応用されている。また、車の自動運転に利用される LiDAR(Laser Imaging Detection and Ranging)も、道路形状を測定しており、物体形状測定の一種である。

従来の測定手段としては、ノギスやマイクロメータを使った接触測定法が多く用いられていたが、超音波や光を使った非接触方式に移行しつつある。

超音波や光を物体に当てて、帰ってくるまでの時間から距離を測定する TOF(Time of Flight)法は、自動運転用 LiDAR の重要な技術であり、世界中で開発が進められている。しかしながら、100 m 以上の範囲を 10 cm 程度の精度で測定できるこの方法は、道路形状や大規模構造物測定には有用であるが、製品の外観検査等、mm 以下の精度を要求される分野では利用できない。

物体に光を当てて、干渉縞から距離を測定する干渉法は、nm オーダーの測定精度を実現でき、平面上の小さな凹凸や傷の発見等には有効であるが、被写体深度が数 mm 以下であることから、測定対象は、小さいものに限定される。

上記に示したように従来困難であった数 cm から数 m 程度の距離の高精度測定を可能とする方法として、近年、OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)法が注目されている。

OFDR は、ファイバ中の伝搬ロスや反射点の分布測定に以前から利用されていた。伝搬ロス等の分布測定をする方法としては、TOF と同じくする OTDR(Optical Time Domain Reflectometry)もあるが、距離分解能は 1 m 程度であり、ファイバ長が短

い光デバイスや、光デバイスそのものの反射を観測することは不可能である。それに対して OFDR では、数十 μm の距離分解能を実現できるため、光デバイスの内部の伝搬ロス分布も測定可能となる。

OFDR では、波長掃引光源が使われるが、それには測定距離に匹敵するコヒーレンス長が必要となる。また、距離分解能は波長掃引幅に反比例するため、より広い波長掃引幅が要求される。さらに測定結果の信頼性を確保するためには、位相連続に波長掃引する必要がある。つまり、広い波長域をモードホップなしに、高コヒーレンスを維持したまま波長掃引可能な光源が必要となる。

これらの要件を満たす波長掃引光源は従来からあったが、波長掃引速度は 100 nm/s 程度であり¹⁾、掃引周波数は 1 Hz 前後であった。このような掃引周波数の遅い光源を利用した OFDR では、振動等の動的な変化を観測することは不可能であった。

アンリツデバイスでは、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いた高速な波長掃引光源を開発し、製品化している^{2), 3)}。図 1 に光源の外観を示した。この光源は、波長掃引用の可動ミラーとして MEMS ミラーを採用することにより、高速、長寿命の長所を有する。また、掃引のほぼ全域にわたってモードホップなしで波長掃引が可能となっている。表 1 に光源の主な仕様を示した。



図 1 MEMS 波長掃引光源

表 1 MEMS 波長掃引光源仕様

中心波長 λ_c	1060 nm, 1550 nm
波長掃引幅 W	15 nm~50 nm(λ_c : 1060 nm) 30 nm~110 nm(λ_c : 1550 nm)
掃引周波数 f_R	150 Hz, 1250 Hz
光出力パワー	>10 dBm
コヒーレンス長	>100 m(f_R : 150 Hz, W: 40 nm) >10 m(f_R : 1250 Hz, W: 40 nm)

OFDR では、光源から測定対象点まで光を往復させるため、コヒーレンス長の半分が測定範囲となる。MEMS 波長掃引光源は、掃引周波数が、150 Hz の低速タイプと 1250 Hz の高速タイプがある。低速タイプではコヒーレンス長は 100 m 以上であることから測定範囲は 50 m 以上となり、同様に高速タイプでは、測定範囲は 5 m 以上となる。

従来の OFDR では、ファイバ中の反射分布測定に利用されていたが、空間に光を伝搬させれば、空間中の反射点の分布を測定することができる。例えば、測定対象物の表面からの反射光を観測すれば対象物までの距離が測定され、測定対象物を透過して裏面から反射された光を観測すれば、表面と裏面の距離差から測定対象物の厚みも測定できる。さらに、光を出射する方向を走査すれば、対象物の 3D 形状を測定することが可能となる。ただし、500×500 画素程度の画像を得るためにには、250000 回の測定が必要となる。もちろん、これらは、従来の機械的な光源でも実行は可能であったが、測定時間が膨大となり現実的ではなかった。

この論文では、掃引周波数 1250 Hz の高速波長掃引光源による 800×800 画素の 3D 形状測定が 12 分で実現できた結果と、掃引周波数 150 Hz の低速波長掃引光源による遠距離測定の結果を報告する。

2 OFDR の概要

2.1 OFDR の原理

図 2 に OFDR による距離測定の原理図を示した。掃引光源、干渉計、コリメータレンズ、受光器から構成される。

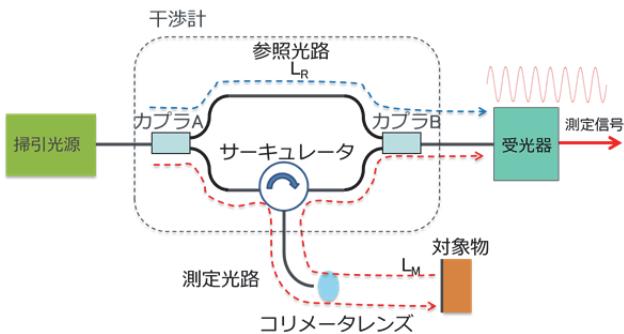


図 2 OFDR による距離測定の原理図

掃引光源から出射された光はカプラ A で 2 分岐され、一方はそのままカプラ B に向かい(参照光路)、もう一方は、サーキュレータを透過後、コリメータレンズから空中に出射され、対象物に照射される。照射された光は、対象物で反射され、再びコリメータレンズ、サーキュレータを透過して、カプラ B に向かう(測定光路)。参照光路と測定光路を伝搬したそれぞれの光は、カプラ B で合波されたのち、受光器で電気信号に変換される。

上記までは、“波長”と記述しているが、干渉を考察する上では、“光周波数”を用いた方が式の記述が簡易になるため、以降“波長”に替え“光周波数”を用いて理論的考察を行う。

掃引光源から出射された光周波数が、時間に線形に変化しているとすると、時刻 t での光周波数 v(t) は、

$$v(t) = v_0 + k \cdot t \quad (1)$$

と表せる。ここで v_0 は、時刻 0 での光周波数であり、 k は掃引速度 [Hz/s] である。屈折率を含めた参考光路の光路長 L_R と測定光路の光路長 L_M との差を $\Delta L = |L_M - L_R|$ とすれば、掃引光源から受光器までのそれぞれの伝搬時間の差 τ は、

$$\tau = \frac{\Delta L}{c} \quad (2)$$

となる。ここで c は真空中の光速度である。

参考光路を通った光と測定光路を通った光の電界強度をそれぞれ E_R, E_M とすれば、受光器で検出される干渉強度 P は、

$$\begin{aligned} P &= |\vec{E}_R + \vec{E}_M|^2 \\ &= |E_R e^{i2\pi v(t)t} + E_M e^{i2\pi v(t-\tau)t}|^2 \\ &= |E_R|^2 + |E_M|^2 + 2\cos\left(2\pi \frac{k\Delta L}{c}t\right) \end{aligned} \quad (3)$$

と表せる。干渉信号の DC 成分をカットすれば、式(3)最終式の第 3 項のみが観測される。つまり、式(1)に、線形に光周波数を掃引させれば、受光器からは、

$$f_I = \frac{k\Delta L}{c} \quad (4)$$

の周波数の電気信号が出力される。従って、電気信号をサンプリング後、FFT(Fast Fourier Transform)を行えば、FFT スペクトラム上の Δf の位置に、鋭いピークが検出され、式(4)から、光路差 ΔL が計算される。

また、反射点が複数ある場合には、FFT スペクトラム上に、反射点と同数のピークが検出される。コリメータレンズ端面の反射と、対象物の反射に対応するピークの間隔を測定すれば、コリメータレンズから対象物までの距離が分かる。これが、OFDR による距離計測の原理である。

式(4)から、光周波数を掃引中に掃引速度が 1% 変動すると、FFT のピークは 1% の幅を持つことになる。ピークの広がりは、測定精度を著しく低下させることから、掃引速度を一定に保つ

ことは、高精度な測定には不可避である。しかしながら、実際の光源の掃引速度は、掃引中に大きく変化している。**図 1**に紹介したアンリツデバイス製掃引光源の場合、**図 3**に示すように掃引時の時間に対する波長変化は正弦波状である。掃引速度は波長変化の時間微分であるため余弦波状に変化する。そのため比較的線形に見える掃引の中央 50% (図中青線、 $\lambda_c - W/4 < \lambda < \lambda_c + W/4$) であっても、掃引速度は 13% 变化する。

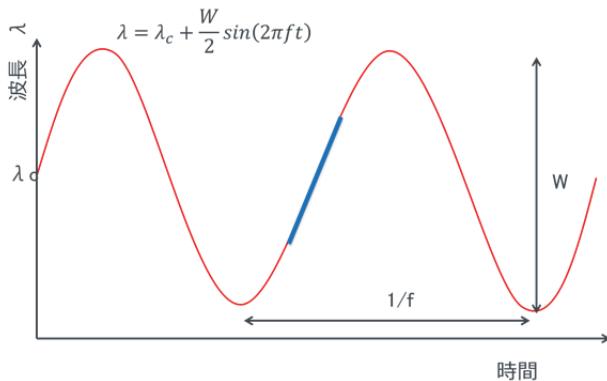


図 3 掃引時の波長変化

掃引光源の掃引速度を光周波数が線形に変化するように制御することは困難であるが、サンプリング方法やソフトウェア処理によって、線形に光周波数を変化させた測定結果、すなわち光周波数間隔が一定の測定結果と同じ結果を得ることができる。この処理はリニアライズと呼ばれている。

リニアライズにはソフトウェアリニアライズとハードウェアリニアライズの 2 つの方法がある。

2.2 リニアライズ光学系

図 4 にリニアライズ系を含んだ OFDR 光学系を示した。

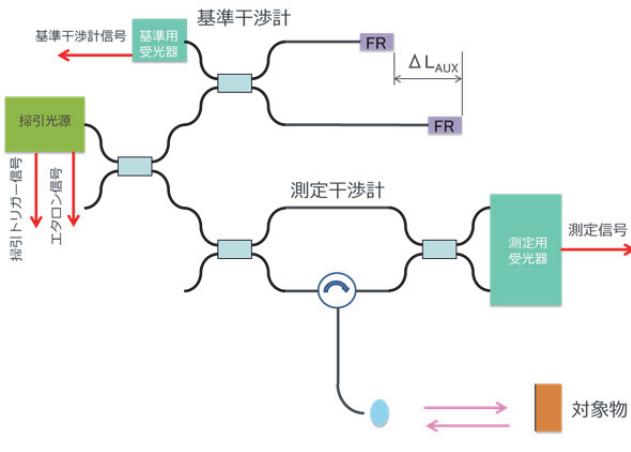


図 4 リニアライズ系を含んだ OFDR 光学系

掃引光源からの光をカプラで 2 分岐し、一方を**図 2** と同様の測定干渉計に、もう一方を補償用の基準干渉計に入射する。この例での基準干渉計はマイケルソン型である。マイケルソン型では、反

射鏡としてファラデーミラー(FR)を使用することにより、それぞれの反射鏡からの光は、遅延によらず同じ偏波状態で受光器に入射されるため、偏波変動による干渉信号の変動を除去することができる利点がある。

基準干渉計信号は、式(4)から、

$$f_{AUX} = \frac{2k\Delta L_{AUX}}{c} \quad (5)$$

の周波数を持つ。 ΔL_{AUX} は、ファイバの屈折率を含んだ光路長差である。式(4)と比べて 2 倍となっているのは、 ΔL_{AUX} を往復しているためである。また、干渉計の FSR(Free Spectrum Range)，つまり干渉信号が正弦波 1 波分変化するために必要な光周波数は

$$FSR = \frac{c}{2\Delta L_{AUX}} \quad (6)$$

と表せることから、式(5)は、

$$f_{AUX} = \frac{k}{FSR} \quad (7)$$

と表せる。右辺は、「掃引速度 k は FSR の何倍に相当するか」を表しており、言い換えれば、 f_{AUX} とは、“光周波数が FSR 掃引されたたびに極大となる干渉信号”の周波数と言える。

2.3 ハードウェアリニアライズ

干渉信号が極大となるたびに、測定信号をサンプリングすれば、測定信号は、光周波数が FSR だけ掃引されるたびにサンプリングされたデータとなり、一定の光周波数間隔でサンプリングしたことにはかならない。

これは、基準干渉信号を測定信号用の A/D コンバータのサンプリングクロックに入力すれば、実現できる。この方法はハードウェアリニアライズと呼ばれ、システムが単純で高速化が容易であることから、OCT(Optical Coherent Tomography)に利用されている(**図 5** 参照)。

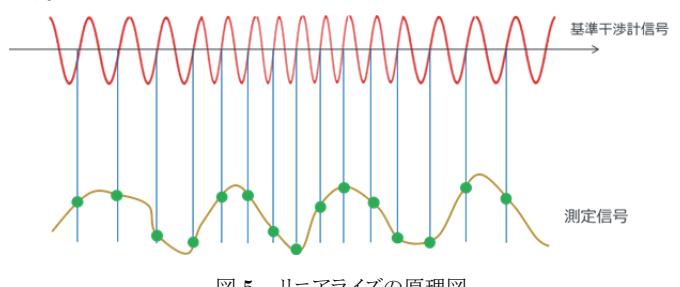


図 5 リニアライズの原理図

光周波数 v_1 (波長 λ_1) から光周波数 v_2 (波長 λ_2) まで光周波数を掃引させた際に、基準用受光器から出力された波の数を N とすれば、

$$N = \frac{(v_1-v_2)}{FSR} = \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \frac{c}{FSR} \quad (8)$$

となる。光源は、光周波数基準のエタロンを有しており、エタロンの信号も基準干渉計信号を用いて同時にサンプリングすることにより、掃引中の光周波数を正確に測定することが可能となる。

従って、 v_1, v_2 も正確に測定でき、式(8)、(6)から ΔL_{AUX} を

$$\Delta L_{AUX} = \frac{cN}{2(v_1-v_2)} = \frac{N\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_2-\lambda_1)} \quad (9)$$

と算出することができる。また、サンプリングされたデータを FFT した際の最大周波数が ΔL_{AUX} に相当し、反射点の位置は、ピークが検出された周波数位置から比例計算で求めることができる。反射点位置の測定分解能 Δz は、式(9)から、

$$\Delta z = \frac{c}{2(v_1-v_2)} = \frac{1}{2} \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1} \cong \frac{1}{2} \frac{\lambda_c^2}{\Delta\lambda} \quad (10)$$

となる。ここで λ_c は掃引の中心波長、 $\Delta\lambda$ は波長掃引幅である。

2.4 ソフトウェアリニアライズ

次に、ソフトウェアリニアライズについて説明する。この方法では、基準干渉信号と測定干渉信号を同時に A/D コンバータで等時間間隔にサンプリングする。そして、光周波数の物差しとなる基準干渉信号を元に、測定干渉信号が光周波数に対して線形になるように、測定干渉信号をリニアライズする。以下に具体的方法を記述する。

まず基準干渉計信号のヒルベルト変換を併用することで、基準干渉計信号の位相情報を計算する。計算された位相は、 $-\pi$ から $+\pi$ の間に繰り返し変化しているので、位相が $+π$ から $-π$ に飛びたびに位相に 2π を加えて連続した位相 P_R を計算する(図 6 参照)。連続位相は、光周波数が基準干渉計の FSR 分、掃引されるたびに 2π 増加する量であり、光周波数に比例している。

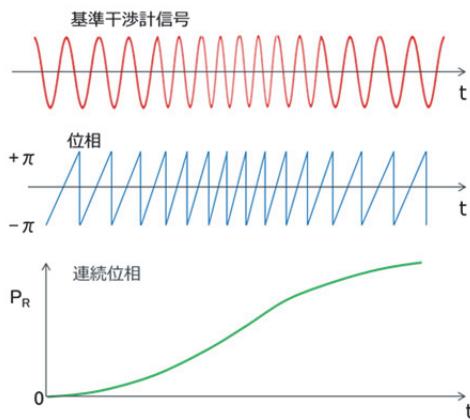


図 6 基準干渉計信号の位相計算

次に連続位相を等分割し、分割点での測定干渉計信号の強度を抽出する(図 7 中央の緑丸)。抽出されたデータは、時間軸上では、等間隔ではないが、光周波数軸上では、等間隔にサンプリングされたデータとなる。このデータを FFT すれば、反射点に対応する周波数位置に鋭いピークが観測される。

ハードウェアリニアライズとソフトウェアリニアライズでは、それぞれ長所と短所があり、一般的には、高精度を追求する用途ではソフトウェアリニアライズ、高速性を重視する用途では、ハードウェアリニアライズが利用されている。

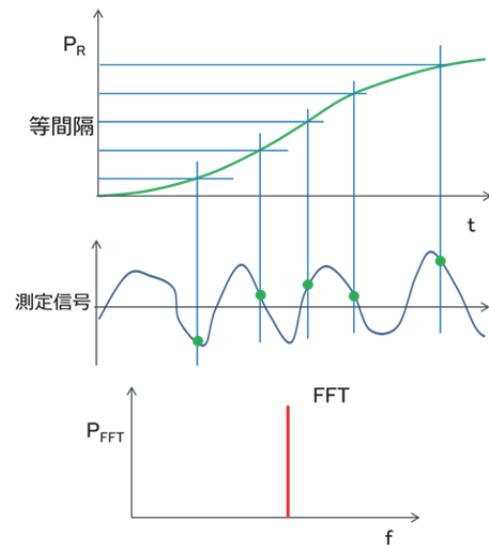


図 7 データ抽出

図 8 に等時間間隔で、図 9 にハードウェアリニアライズでサンプリングしたエタロン信号と干渉信号を示した。等時間間隔で測定した場合、掃引の中央から遠ざかるに従って、掃引速度が低下するために、エタロン間隔が広がっている。一方、ハードウェアリニアライズは、等光周波数間隔でサンプリングのため、測定したエタロン信号は、ほぼ等間隔となっている。

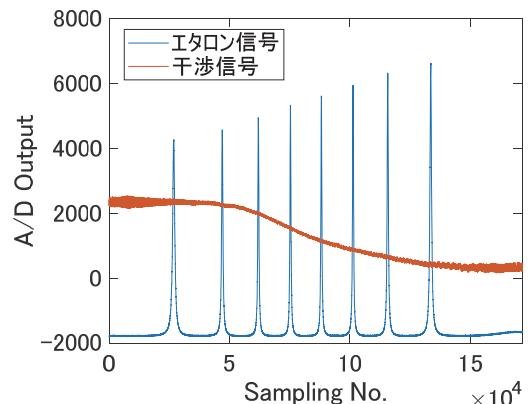


図 8 等時間間隔でサンプリングした信号

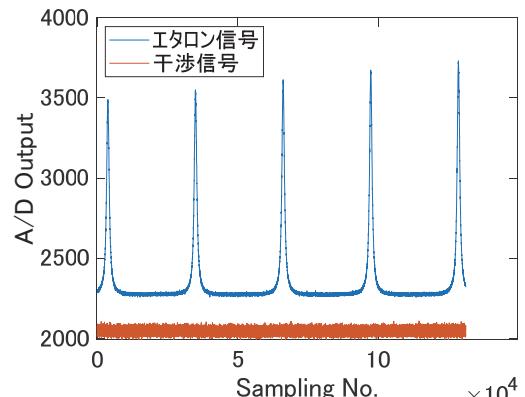


図 9 ハードウェアリニアライズ系でサンプリングした信号

図 10 にハードウェアリニアライズ系で観測した干渉信号を FFT した結果を示した。コリメータレンズに接続するファイバの APC(Angled Physical Contact)端面、コリメータレンズ面、対象物からの反射ピークが観測されている。

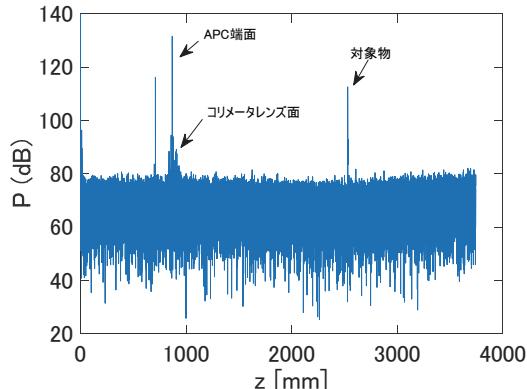


図 10 FFT スペクトラム

3 3D 形状測定

3.1 デモ機外観

図 11 に試作した 3D 形状測定器の外観を示した。より遠方も計測可能とするために、ハードウェアリニアライズを採用した。コリメータレンズから光を出射させて物体に当て、その反射光を再びコリメータレンズで集光すれば、物体までの距離を測定することができる。コリメータレンズの出射方向を上下左右に振りながら逐次測定すれば、物体の形状を測定できる。そのため、2 軸の自動回転ステージを使用している(図 11 右側)。

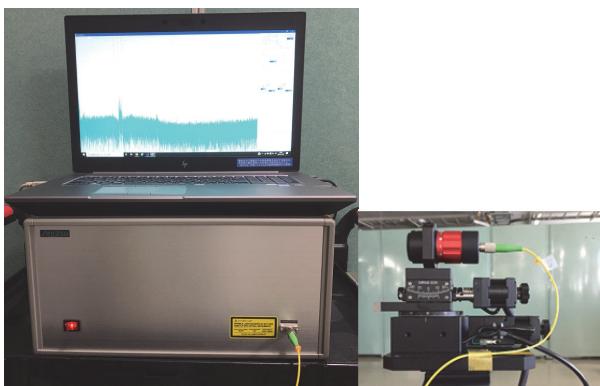


図 11 3D 形状測定器

FFT の結果から計算された距離の原点(周波数 0)は、参照光路長と測定光路長が同じとなる位置であるが、その位置はファイバの温度等の外部環境影響で変動する。そこで、より精度向上させるために、コリメータレンズに接続するファイバの端面(APC 端面)の反射ピークも観測し、その位置を原点として対象物までの距離を測定している。

掃引光源は、波長 1550 nm、掃引周波数 1250 Hz であり、波長掃引幅 40 nm とした。その内中央付近の 20 nm の範囲をサンプリングした。

距離測定精度を評価するために、コリメータレンズから約 50 cm の位置に、表面を黒色アルマイト処理されたアルミブロックを置き、コリメータレンズーアルミブロック間距離の時間変化を観測した。測定結果とそのヒストグラムを図 12 に示した。式(10)から計算される距離分解能は 60 μm であるが、FFT スペクトラム上に現れる反射ピーク(図 10 参照)の位置検出精度は、それを大きく上回る。約 10 秒(≈ 13000 回)測定した際の距離測定ばらつきの標準偏差 σ は 0.2 μm であった。つまりこの 3D 形状測定器の距離測定精度は 0.2 μm と言える。50 cm 以上の距離を測定できる市販の変位センサの測定精度は 5 μm 程度であり、この 3D 形状測定器はそれを大幅に上回っている。

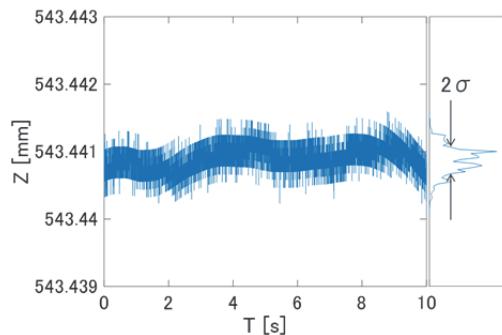


図 12 距離測定結果の時間変動とヒストグラム

3.2 形状測定結果

図 13 に約 2 m の距離に置いた航空機模型の測定結果を示した。測定範囲は縦方向 18 度、横方向 18 度、画素数は、縦 800 × 横 800 とした。縦に 800 回測定するたびに、横方向を 1 つずつずらしている。画素数 800 × 800 の高精細な 3D 形状測定を 12 分の短時間で完了できた。測定時間には、縦方向自動ステージを原点に戻すための時間が含まれており、これを短縮させるか、あるいは往復で測定すれば、理論的には、 $800 \times 800 \div 1250 \text{ Hz} = 512$ 秒まで短縮できる。

分かりやすくするために、等距離線表示とした。床の凹凸も含めて模型の形状を高精度に測定できていることがわかる。

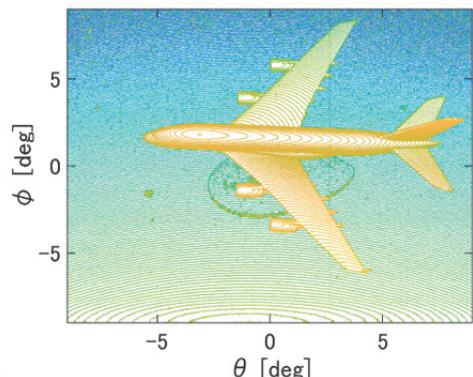


図 13 航空機模型の測定結果

次に、100円硬貨の表面を測定した結果を図14に示した。画素数は 400×400 である。断面を図15に示した。100円硬貨の表面は、中央付近ほど深くなっていることが分かる。「1」「0」「0」の刻印の高さは、約 $100\mu\text{m}$ であった。

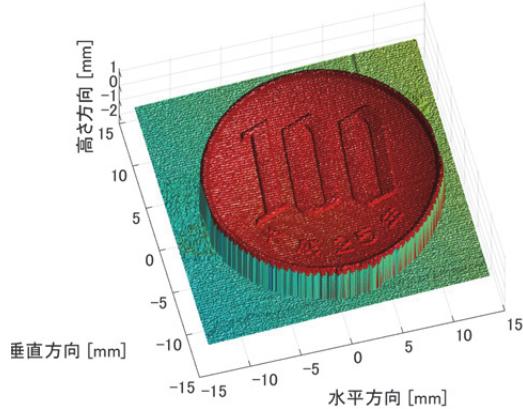


図14 100円硬貨の測定結果

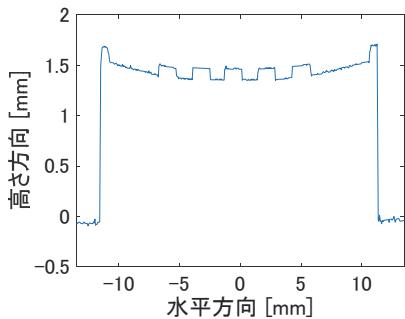


図15 100円硬貨断面

文化財の保護や修復のために、壁画や仏像などの精密なレプリカを作成する場合がある。このような場合、対象物の傷や凹凸を精密に測定する必要がある。そのデモンストレーションとして、絵画の表面形状を測定した。図16が測定したアクリル画である。



図16 測定したアクリル画

この絵画を画素数 800×800 で測定した結果を図17に示した。コリメータレンズから遠方ほど青色、近いほど赤色となるように表示した。一見平面に見える絵画も、そりがあり、中央付近が凹んでいることがわかる。

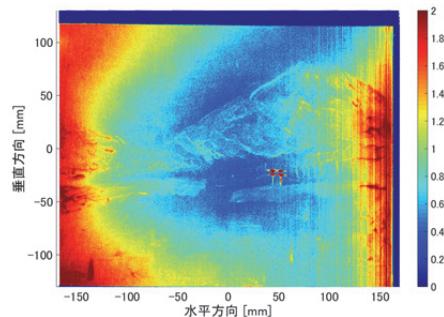


図17 アクリル画表面測定結果

図18に鳥居付近の拡大図を示した。ほぼ 3cm 四方の鳥居は約 1mm の高さがあることがわかる。この測定結果と3Dプリンタを使用すれば、精細なレプリカの作成も可能となる。

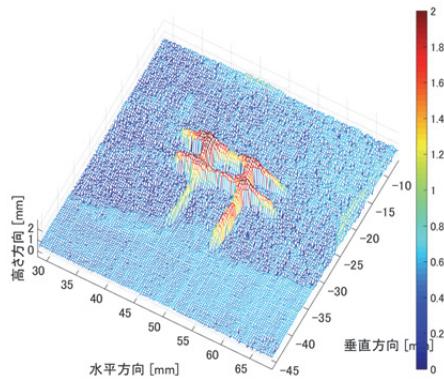


図18 鳥居部分拡大図

次に実験室の一角を測定した。距離は、およそ 2m である。画素数は 800×800 で、縦18度、横24度の範囲を測定している。最近と最遠の距離差は 1m 程度であり、 2m の距離に対して 1m の被写体深度を実現している。

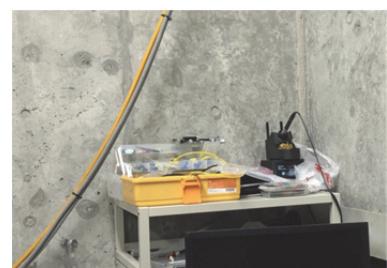


図19 実験室一角

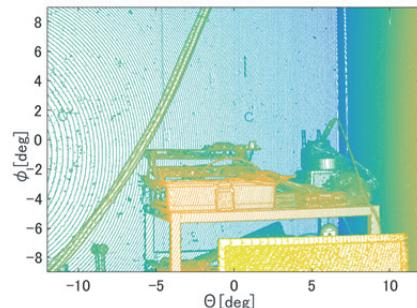


図20 実験室一角測定結果

4 遠距離測定

さらに遠方の距離測定として、南北方向に 20 m 離れて隣立した 2 つの建物間の距離を測定した。北側の建物の室内から窓ガラス越しに南側の建物の壁面に光を照射し、その反射光を再び窓ガラス越しに観測した。光源には、コヒーレンス長の長い掃引周波数 150 Hz の掃引光源を使用した。

45 分間の距離変動を測定した結果を図 22 の青線で示した。反射点までの距離が大きい場合、コリメータレンズで集光できる光量が低下するため、反射ピーク強度の S/N(Signal to Noise)比が小さくなり、測定精度が劣化する。しかしながら、今回の測定では、20 m の距離を標準偏差 $\sigma=23 \mu\text{m}$ の精度で測定できることを確認した。距離の変化を明確にするために、100 回ごとの平均距離を赤線で示した。45 分間に建物間距離が 200 μm 遠ざかったことが分かる。気温が降下している夕刻の時間帯での測定だったため、建物の南側と北側の温度差から、建物が南北方向に傾いたのではないかと推測した。

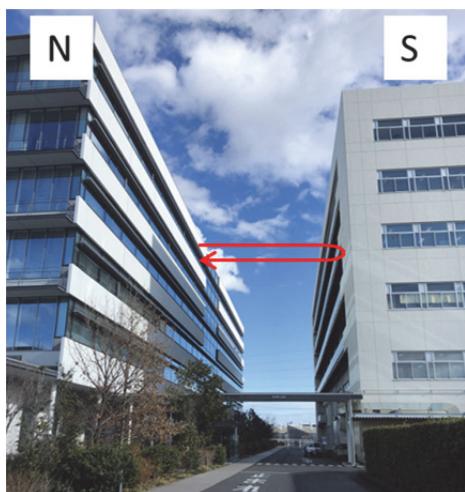


図 21 建物間距離測定現場

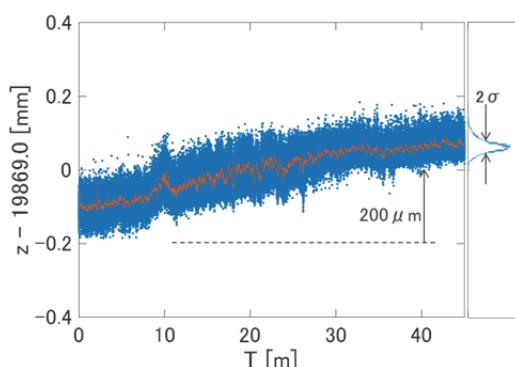


図 22 建物間距離測定結果

固定点から、ビル、橋、崖の法面などの距離を高精度に測定すれば、地盤沈下や建造物の傾斜の度合いを精密に知ることができます。また、150 Hz の測定は、建造物の固有振動数も測定可能であり、老朽化の度合いも検知可能である。これらのことから、OFDR による長距離測定は、防災にも活用できると思われる。

まとめ

“数 cm から数 m の常用的な距離の高精度測定”を可能とする、OFDR 方式距離計測システムを開発した。OFDR に不可欠な光源には、アンリツデバイスで開発した高コヒーレンス波長掃引光源を利用した。この波長掃引光源のコヒーレンス長を生かし、0 mm から数 m の範囲の絶対距離を測定周波 1250 Hz にて 0.2 μm の精度で測定可能とした。また、低速版の波長掃引光源を利用することにより、20 m の距離を 150 Hz にて 23 μm の精度で測定できることを確認した。この OFDR 方式距離計測システムに、測定方向をスキャンできる機構を付加することによって、3 次元形状測定システムを構築し、800 × 800 画素の高精度 3D 形状を 12 分で測定できることを実証した。

参考文献

- 1) T. Tanimoto, S. Mattori, H. Kameyama, F. Otagaki, and H. Otateme, “Wavelength tunable laser,” Japanese Patent No. 3069643
- 2) K. Nakamura, S. Morimoto, and T. Nakayama, “Single-Mode and Mode-Hop-Free Wavelength Sweep Light Source with Range of Over 160 nm and High Swept Frequency,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, No. 19, Oct. 2010.
- 3) 中村賢一, 腰原 勝, 斎藤崇記, 川北浩二, “高コヒーレンス波長掃引光源”, アンリツテクニカル, No.92
- 4) Optical Coherence Tomography, Technology and Applications, Second Edition, W. Drexler, J. G. Fujimoto, Eds., Springer Reference (2015).

執筆者



斎藤 崇記
デバイス開発センター
応用光源開発部

公知