

# 光コムによる表面形状計測技術

Surface Profilometry using Optical Frequency Comb

非接触インライン全数検査を目指して

埼玉大学 塩田 達俊

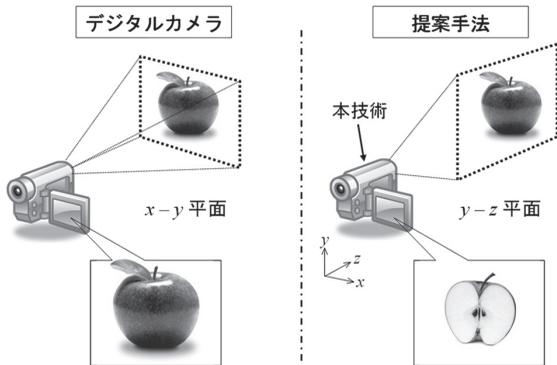
## 1. はじめに

高い信頼性をもって加工・成型品を製造する産業界では、物体形状や表面の欠陥の検査技術に高い性能が求められ、その製造工程や設備、環境の維持と管理以外に、高性能な検査機器が必要となる。例えば加工分野では、表面の凹凸やキズ・ブツなどの欠陥を監視する検査システムがあり、これまでも多くの検査方法が開発されている。以前は接触式の検査が主流であった時期もあったが、近年では光を用いた非接触式の検査装置が主流となり、製造ラインへの導入も進んでいる。しかし、医療用品や自動車部品など高速に多数の製品を製造する量産型の製造ラインでは、全ての製品を検査対象とすることは難しく、抜き取り検査をすることが多い。ここで、抜き取り検査では不良が発見された際にはそれ以前に製造された製品を一つ一つ調査するなど膨大なコストを要したり、品質保証の質を上げることはできないといった問題がある。そこで、低コストに社会実装できるインライン全数検査が可能な検査装置の実現が期待されている。

加工・成型品の形状検査装置に求められる性能として、分解能、計測範囲、検査速度、計測対象の物性や形状の制限などが挙げられる。光周波数コムは高度に制御された周波数精度を有

し、時間や周波数領域での高い制御性を持つので、高付加価値な製品や競争力が高い製品を生むと期待されている。その高いレベルの光周波数コム（光コム）技術の応用範囲に柔軟性を持たせるために、筆者は光コムの性能を適度な制御性に抑えて“いいところ”をとることが重要と考えている。例えば周波数制御回路を省略した光コム干渉技術を製造ライン上の製品検査へ応用することを検討している。

次にその背景を説明する。製品表面のインライン全数検査を実現するためには、検査スピードを表す体積サンプリング速度（Voxel/sec）とロバスト性の2点を考慮しなければならない。ライン上を流れる製品表面の凹凸を検査するためには、単位時間あたりのサンプリング点数を多く測定する必要がある。同時に、製造ラインはそれ自身が振動しているため検査機と製品の間には絶えず距離変動が生じ、ゆっくりサンプリングしては検査エラーが増える。例えばある瞬間に物体の1点に照射されたレーザー光を空間走査するラスタースキャン法では、走査中の距離変動が表面形状に重畳され、本来の表面構造と振動による変位の区別ができなくなる。そのうえ測定点ごとに距離を導出するための機器の走査や解析をするための時間の浪費により、ミリメートルを切るような細かい構造をインラインで計測することができない。そこ



第1図 筆者が目指す手法と汎用のデジタルカメラの差を表すイメージ図  
提案手法は測定対象を切らずに奥行断面像を取得する。

で、筆者はポイントスキャンから逃れて第1図のように奥行方向の2次元断層像を、2次元イメージセンサーを用いて演算なしにシングルショット撮像する研究を進めてきた。製品の不良検査は2次元断面像の積み重ねで可能であるから、2次元断層画像をシングルショットで撮像できると、忽ちロバスト性が上がり、インライン全数検査の実現へ近づける。ただし、せっかく2次元断層をシングルショットで取得しても、シャッタースピードが振動の周期より十分速くないと、画像にブレが生じて検査の質が低下する。つまり、ロバスト性を向上するためには、2次元シングルショット断層像を高速なシャッタースピードで撮像することが重要である。

ここで、既存の非接触式の光形状計測技術を俯瞰する。近年広角な視野を一度に観察できるカメラを用いた手法が製造現場では急速に普及拡大している。産業用カメラを応用したマシンビジョンは、高速に撮像した画像をもとに直ちに合否検査を行って製造ラインにフィードバックするシステムとして広く普及している。より微細な表面形状検査を求める場合には、段差の上下関係やキズが凹みなのか膨らみなのかを判定するために、二眼式のカメラや、光切断法または三角測量法<sup>(1)(2)</sup>が採用される場合が多い。

これらの手法を用いる際には計測原理上物体を斜め方向から覗くので、死角が生じる欠点を併せ持つことに注意が必要である。一方で、ミクロン以下の分解能を持つ光学顕微鏡は照射光と観察する光の光学軸を同一にできる利点はあるが、深さ方向に走査が求められる。

光干渉断層法 (OCT: Optical Coherence Tomography)<sup>(3)~(8)</sup>は、サンプルへの入出射光を同一の光学軸に設計でき、深さ方向にマイクロメートル領域の分解能を有す。さらに、医療応用を目指したOCT開発では多数のサンプルを連続して検査する必要がないため測定時間の高速化よりも感度向上や検査領域に力が注がれてきた。そのために空間的な検査領域が狭く高速な体積サンプリング速度での計測は今のところ実現できていない。例えば、毎秒製品表面10cm四方にあるミクロン単位のキズを検査しようとする、3次元空間を $10^{11}$ 点 (Voxel/s) 以上の速度でサンプリングする必要がある。しかし、エレクトロニクスによる画像情報の伝送・処理では、強度情報 (10bit程度) を考慮してせいぜい $10^9$ Voxel/s程度が限界である。この課題を克服するために、筆者はマイクロメートル分解能を持つ光コム干渉の高次干渉信号まで用いることで、広い深さ範囲をもつ2次元断層像を高速測定する装置の実現を目指してきた。本稿では、筆者が開発してきたエタロンで発生する低コヒーレンス光周波数コム光や疑似的な光周波数コムである離散光周波数走査レーザー光を紹介しながら、空間位相変調器 (SPM: Spatial Phase Modulator) を組み合わせたシングルショット光コム干渉計<sup>(9)~(15)</sup>で計測範囲を拡大する手法<sup>(14)</sup>や、イメージセンサーや光源の設定を最適化して振動ロバスト性を向上した結果を紹介する。いずれも時間領域または周波数領域の低コヒーレンス干渉<sup>(16)</sup>を空間並列で行い、高速化と振動ロバスト性の向上を可能にする。また、SPMのステップより細かい分解能で表面位置計測が可能である<sup>(15)</sup>。

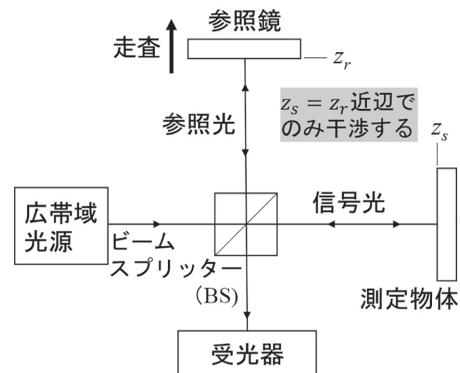
ここで、いずれの手法においてもインライン全数検査に応用する際には、解析のスループットもサンプリング速度以上の速度で行うべきであることも忘れてはならない。例えば、体積サンプリング速度 $10^9$  Voxel/sを得る際に、100万画素のカメラを用いるとすると、1kfpsで画像取得する必要がある。ここに、2次元画像を得るために時間コストがかかる解析プロセスが必要な計測方法を使用する場合解析の処理速度がデータ取得速度より遅くなり、処理データは溜まり続けることになる。2次元断層画像をできるだけ演算なく取得できる技術は、全数検査の実現に極めて要素となる。

OCTに話を戻す。時間領域 (TD: Time-domain)<sup>(3)~(5)(5)</sup> または周波数領域 (FD: Fourier-domain)<sup>(6)~(8)</sup> のOCTは、雑音に強い。1990年代から光散乱による強度減衰を伴う生体試料の非侵襲計測への適用と方向性を一致させ、高感度化するための研究がされてきた。そのためOCTはプローブ光を1点に集光したラスタースキャンで空間走査する。結局、既存の形態では機械的または周波数掃引、もしくはデータ取得後のフーリエ変換等の演算が必要であるために振動ロバスト性に乏しく、そのままインライン全数検査へ展開することは難しい。そこで筆者らは、敢えて感度を後回しにして2次元断層画像をシングルショットで測定することで、これまで不可能であった条件でのインライン全数検査の実現を目指してきた。まず現状の体積サンプリング速度を決めるエレクトロニクスの応答速度制限を実質的に突破するためにTD法を2次元シングルショット計測へ拡張し、TD法の2次元シングルショット計測の実現のためにエタロンを用いて発生した低コヒーレンス光コム光を光源とした干渉計を構築して複数次数の干渉を利用する方式を考案した<sup>(10)~(14)</sup>。本稿では、計測原理を述べたのちに、その原理を実証する実験結果を紹介する。

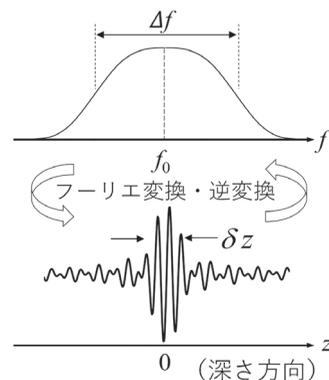
## 2. 低コヒーレンス 光コム干渉計測法の原理

### 2-1 シングルショット2次元断層計測法

光学干渉計の構成として、第2図のように分波と合波素子を共通の素子とするマイケルソン干渉計を例に低コヒーレンス干渉を説明する。ここで、受光器は、分波した二つの光路長差に依存して、光波の強め合いと弱め合いを干渉として検出することができる。この干渉の波形は光源の種類に依存し、可干渉性が低い広帯域光 (低コヒーレンス光) を光源とすれば、干渉波形が現れる光路長差の範囲は狭くなる (第3図)。この性質を利用して、分波した2光路の光路長が等しい、またはそのごく近辺マイクロ



第2図 低コヒーレンス干渉を利用した距離計測の装置構成

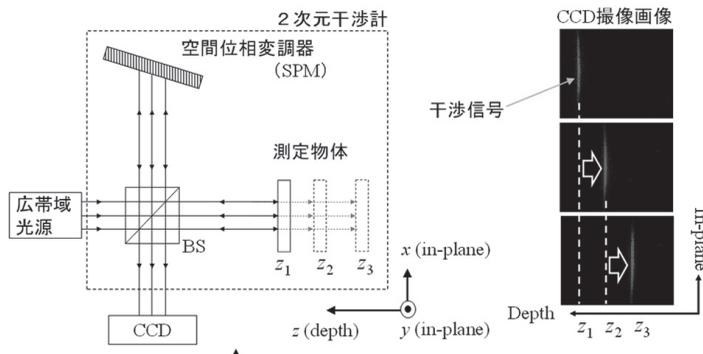


第3図 光源のスペクトルと干渉信号の関係  
光源のスペクトル帯域が広いほど距離計測の分解能が高くなる。

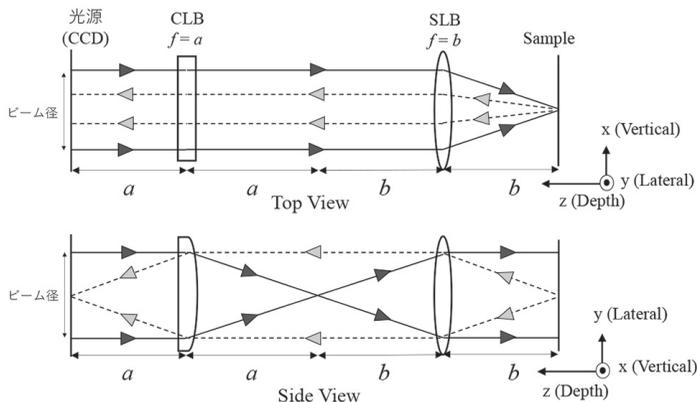
メートル以内でのみ干渉して光強度の変動を見ることが出来る。つまり、二つの光路の片方を測りたい物体に照射し、他方を位置が制御された参照鏡に照射して参照鏡の位置（参照光路長）を走査すれば、参照光路長の位置を根拠にして測定したい物体の分波器（BS）からの距離を知ることが出来る。なお、干渉が生じる領域の幅は光源スペクトルの周波数帯域に反比例するので、光源のスペクトル帯域を広げるほど、距離測定の精度を高くすることができる。

第2図の低コヒーレンス干渉計は参照鏡の位置を走査することで測定対象物体の位置を計測するが、参照鏡の位置を時間的に走査する時間的コストがかかる。シングルショット2次元断層形状計測法では、参照鏡を空間的に走査するのでその分の時間的コストを抑える。具体的に

は、第4図のように参照鏡を傾けてその表面形状を階段状にすることで、反射位置ごとに異なる遅延時間を光に与えるようにする。ここで、表面に階段状構造を持ったこのデバイスを空間位相変調器（SPM）と呼ぶ。SPMに入射した光は位置ごとに時間が走査されて、測定物体からの反射光と合波されることで2次元イメージセンサー（CCD）表面で干渉波形が位置情報として検出される。このとき、SPMにより時間傾斜を与えた軸方向に沿ったCCD表面上の1次元方向が測定物体の奥行（z軸）方向となる。さらに、他方の1次元方向を測定物体の水平（y軸）方向に充てることで、測定物体の奥行方向の2次元断層像のイメージングが可能になる。実験では、第5図のようにレンズ系を工夫して測定物体表面に線状に光を照射すること



第4図 シングルショット2次元断層計測システムの概要と実際に観測された2次元断層像



第5図 測定物体に照射する光学系

シリンドリカルレンズ（CLB）と球面レンズ（SLB）を組み合わせることで測定物体表面に線状に光を照射する。

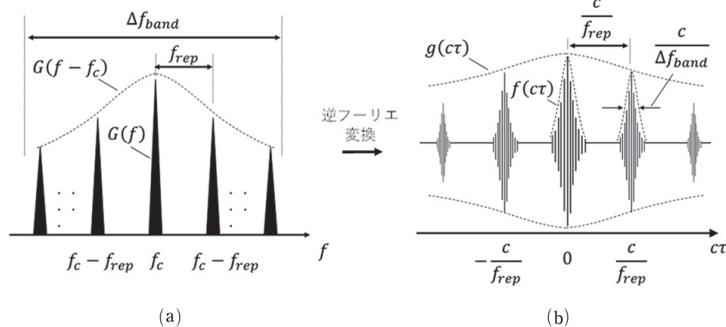
で、2次元断層像を撮像した。

## 2-2 低コヒーレンス光コム干渉による計測範囲の拡大

イメージセンサーを用いて2次元断層像を計測する際に、測定物体の設置位置に気を付ける必要がある。たとえば、奥行分解能が $1\mu\text{m}$ でイメージセンサーの奥行方向のピクセル数が1,000であれば、計測レンジは1mmとなる。このとき、検査される測定物体の表面はその1mm範囲内に設置しされなければならないが、インライン検査に適用するに1mmというのはやや狭い。ところが、光周波数コム（光コム）を広帯域光源とすると、物体の設置範囲を10倍以上に拡大することができる。以下にその原理を次に述べる。

光源のスペクトルを逆フーリエ変換すると干渉波形が得られる（ウィナー・キンチンの定理）。ここで、 $f_{rep}$ をコム間隔、 $f_c$ を中心周波数、 $\Delta f_{band}$ を光周波数コムスペクトルの半値幅、 $F(f-f_c)$ を包絡線、 $G(f)$ をコムスペクトルの縦モードの形状としよう（第6図）。このとき、光周波数コムによって得られる干渉信号 $\Gamma(c\tau)$ は次のように表される<sup>(6)</sup>。

$$\begin{aligned} \Gamma(c\tau) &= IFT \left[ F\left(\frac{f-f_c}{c}\right) \cdot \left\{ G\left(\frac{f}{c}\right) * \sum_{p=-\infty}^{\infty} \delta\left(\frac{f-pf_{rep}}{c}\right) \right\} \right] \\ &\cong c \cdot g(c\tau) e^{i2\pi f_c c\tau} \left\{ f(c\tau) * \sum_{p=-\infty}^{\infty} \delta\left(c\tau - p \frac{c}{f_{rep}}\right) \right\} \end{aligned} \quad \dots(1)$$



第6図 (a)光コム光源のスペクトルと(b)干渉出力の距離依存性の関係

ここで、 $IFT[\dots]$  は逆フーリエ変換、 $c$ は光速を表し、 $f(c\tau)$ 、 $g(c\tau)$  は $F(f/c)$ 、 $G(f/c)$ を逆フーリエ変換した関数である。

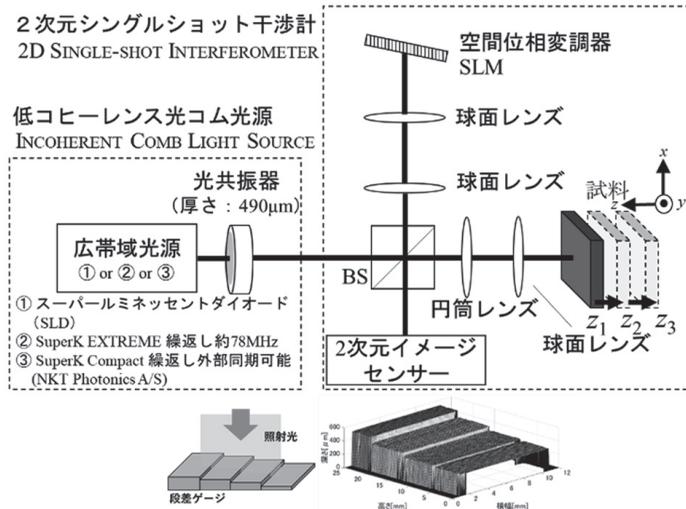
その干渉信号は時間軸上で光周波数コムと同様に周期的に干渉ピークが現れる。干渉ピークの光路差は $c/f_{rep}$ と表すことができる。これにより、2次元断層像がイメージセンサーからフレームアウトしても、次の干渉次数 ( $p$ ) による同様の画像が出現するようになる。つまり測定物体の設置位置の範囲が実質的に広がり、イメージセンサーのピクセル数に制限を受けなくなる。

実際の応用を考えると、光コムを光源として干渉計に応用する場合、レーザーコムは高価なため、広帯域光源の出力側に光共振器を設置する形式がよいと思われる。光共振器はガラス板の両面に金属蒸着するなどすれば研究室でも簡単に製作できる。光源は市販のLEDのように入手しやすい安価なものでも計測は可能である。もしより高感度な計測実験をしたければ、スーパーコンティニウム光を光源に用いるとよい（第7図）。

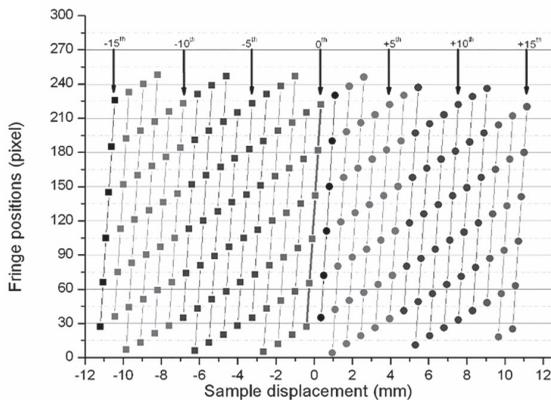
## 3. 応用実験

### 3-1 干渉次数の判別と計測範囲の拡大

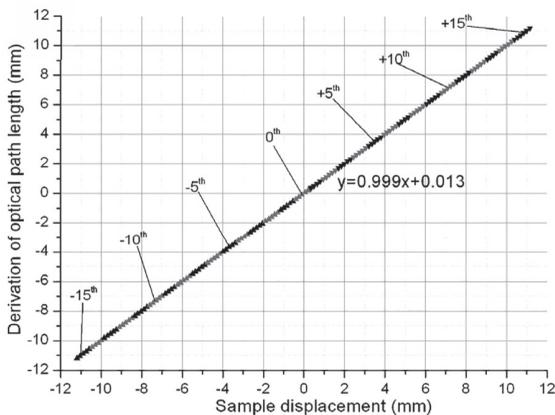
第7図のように、光源を①のSLD (Super luminescent diode) として直後にエタロンを配置した構成で、サンプルの位置を光軸方向に



第7図 2次元シングルショット断層計測装置の概要と実際に観測された2次元断層像



(a)



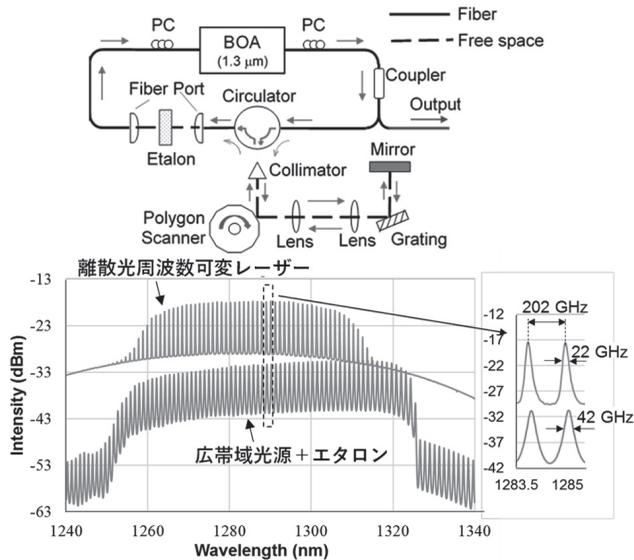
(b)

第8図 (a)繰返し現れる高次干渉と(b)干渉次数を判別し計測レンジを拡大した結果

徐々に変化させて干渉が現れる奥行方向の位置をプロットすると第8図が得られた。干渉波形がカメラからフレームアウトしても異なる次数が得られることがわかる<sup>(11)(14)</sup>。この時、エタロンの入射角を少し変えて、つまりコム間隔を変えて干渉の位置の変化量をみればその干渉の干渉次数を知ることができる。つまり次数判別することができる。これを利用して第8図(b)では少なくとも計測範囲を30倍に拡大できることを示している。これは、画素数 $10^6$ pix/frame、フレームレート $10^3$ frame/sec、強度分解能12bitのイメージセンサーを用いた場合に、実質数 $10^{11}$ bit/secの体積サンプリング速度を達成したことを意味する。ところでコム間隔を変える方式として、エタロンの内部にネマティック液晶を注入し電気的に制御する方式も提案している<sup>(12)</sup>。

### 3-2 離散波長可変レーザー (疑似コム干渉)

前項までに光コム干渉の単一の干渉次数で撮像されるシングルショット計測範囲を $500\mu\text{m}$ 前後に設定して10mm程度へ範囲拡大を実証した。ここで次数あたりの計測範囲 $500\mu\text{m}$ を与える光コム間隔は200GHz程度であり、これをレーザーコムで発振させることは容易ではな



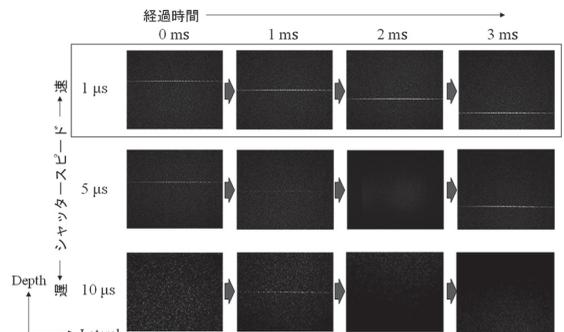
第9図 離散光周波数可変レーザーの構成概要と発振スペクトル (上のスペクトル)

光源の平均出力が同じ場合には、広帯域光源とエタロンの組み合わせでは問題となる損失の影響を受けず高出力な光源となる。

い。そこで、前項では低コヒーレンス光コム光を広帯域光から光フィルタ（ミラー間隔約 $500\ \mu\text{m}$ のエタロン）で抜き出す構成を紹介した。ここでは光源による検出感度の最適化を目指して、第9図のようにエタロンと、ポリゴンミラーと回折格子を有す光周波数走査部をレーザー共振器内に設置してエネルギー利用効率の向上を目指した結果を示す。外部共振器型のリングレーザーとエタロンを組み合わせると周波数ステップ $200\text{GHz}$ で $30\text{nm}$ の帯域を $42\text{kHz}$ の繰返し周波数で離散的に光周波数が走査されることと、2次元シングルショット距離計測に適用できることを実験的に確認した<sup>(4)</sup>。光源の光パワーの比較としては、第9図の通り前項の方式に比べて $10\text{dB}$ 以上エネルギー利用効率が向上することを確認できた。

### 3-3 表面検査の原理確認実験

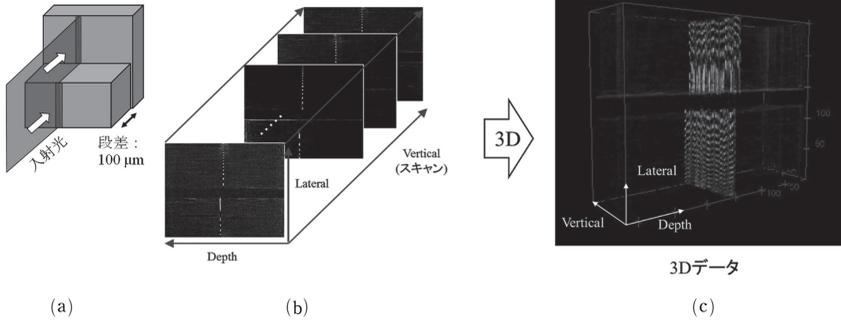
耐振動としてのロバスト性を検証するために、測定物体を鏡として鏡をピエゾ素子に設置して、鏡面鉛直方向に $100\text{Hz}$ の振動数で振動を印加した。その際の振動の振幅は大よそ $100\ \mu\text{m}$ であった。シャッタースピードを変えて $1\text{ms}$ 毎



第10図 振動ロバスト性の検証結果 (100Hz)

カメラのシャッタースピードを上げるほど常に鮮明に撮像される様子がわかる。

に撮像した断面画像を第10図に示す。シャッタースピードが遅いほど、線状に移る鏡面の断層像がボケる様子が見て取れる。ピエゾ素子には正弦波を印加しているため、正弦波の腹付近（経過時間 $2\text{ms}$ 前後）では表面の移動速度が高速であるため顕著にボケが観測されることが考えられる。しかし、シャッタースピードが $1\ \mu\text{s}$ ではいずれの経過時間においても鮮明に鏡面画像が撮像されている様子がわかる。つまり、シングルショット2次元断層計測システムのシャッター

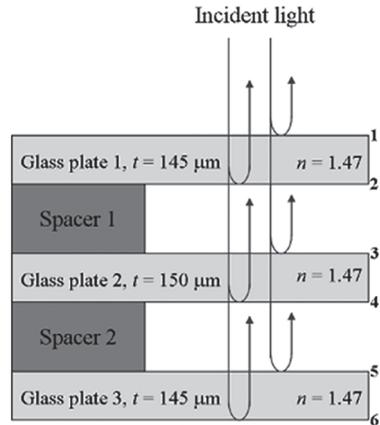


第11図 100 μmの段差がある試料の表面形状

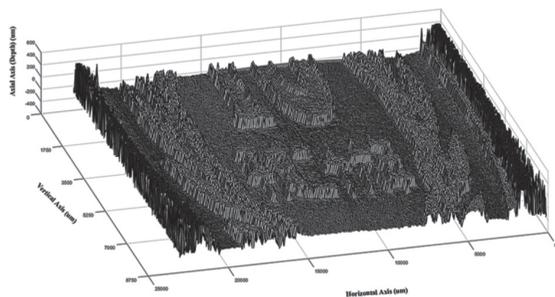
スピードを高速にすることで、ロバスト性が向上することを示している。製造ライン上の振動成分は最高で100Hz台であるため、シャッタースピードを1 μsまたはサブ μs程度に設定することで、実用に耐える振動のロバスト性が得られる。

さらに表面に構造を有するサンプルへの適用性を調査するために、第11図(a)のような表面に段差100 μmを持った物体を測定した。その測定結果を第11図(b)に示す。干渉の線幅から分解能は1~2 μm程度だった。シングルショット2次元断層像と直交した方向にサンプルを走査して測定した複数の画像を示している。さらに、これらの結果を元に3次元画像を構成した結果が第11図(c)である。3次元画像内に100 μmの明らかな段差が見られる。また、十円硬貨の測定結果から(第12図)、複雑な表面構造の計測も可能であることがわかる。

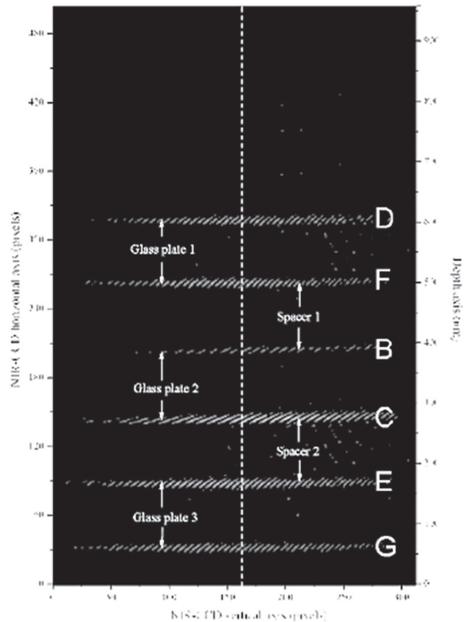
最後に断層計測への適用性を調べるために、第13図のように100 μm台の薄板ガラスを、空



第13図 積層薄板ガラス (各層150 μm程度)



第12図 十円硬貨の表面形状を測定した結果

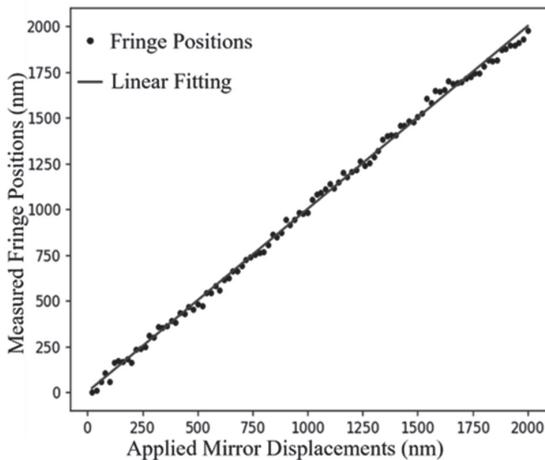


第14図 測定した積層薄板ガラスの断層像

気層を介して3枚積層した多層膜試料を測定した。その結果、第14図のように各薄板ガラスの表面と裏面に相当する6界面の断層像が観測された。光が侵入する透明物体であれば、塗装のような多層膜の構造検査を非接触に行えることが分かる。

### 3-4 分解能の追及

干渉波形の奥行方向の1次元の断面波形を抜き出してピーク検出することで実験的に分解能を導出することを試みた。測定対象を平面鏡としてその表面の位置を奥行方向に20nmステップで走査し100枚の2次元断層像を取得した。取得画像から表面位置に相当するピーク位置を導出して、走査距離に対してプロットした結果を第15図に示す。



第15図 平面鏡の相対移動量と測定結果の関係

与えた位置に対して測定された結果は比例し、そのフィッティング結果との間隔の標準偏差は26.4nmとなった。SPMが持つ離散的な段差(494nm)の18分の1の精度であり、走査ステップとほぼ同じ値となった。つまり、提案した2次元シングルショット断層計測法の奥行方向の分解能はSPMの離散的高さにより制限されず、ナノメートルの検出精度を実現できることが実験的に確認された。

### <参考文献>

- (1) V.Bodlaj and E.Klement, "Remote measurement of distance and thickness using a deflected laser beam", *Appl. Opt.*, Vol.15, No.6, pp.1432-1436 (1976)
- (2) M. Rioux, "Laser range finder based on synchronized scanners", *Appl. Opt.*, Vol.23, No.21, pp.3837-3844 (1984)
- (3) L.Deck and P.de Groot, "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry", *Appl. Opt.*, Vol.33, No.31, pp.7334-7338 (1994)
- (4) E.A.Swanson, D.Huang, M.R.Hee, J.G.Fujimoto, C.P.Lin and C.A.Puliafito, "High-speed optical coherence domain reflectometry", *Opt. Lett.*, Vol.17, No.2, pp.151-153 (1992)
- (5) M.D.Duncan, M.Bashkansky and J.Reintjes, "Subsurface defect detection in materials using optical coherence tomography", *Opt. Express*, Vol.2, No.13, pp.540-545 (1998)
- (6) R.Leitgeb, M.Wojtkowski, A.Kowalczyk, C.K.Hitzenberger, M.Sticker and A.F.Fercher, "Spectral measurement of absorption by spectroscopic frequency-domain optical coherence tomography", *Opt. Lett.*, Vol.25, No.11, pp.820-822 (2000)
- (7) S.R.Chinn, E.A.Swanson and J.G.Fujimoto, "Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source", *Opt. Lett.*, Vol.22, No.5, pp.340-342 (1997)
- (8) R.Huber, M.Wojtkowski and J.G.Fujimoto, "Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography", *Opt. Express*, Vol.14, No.8, pp.3225-3237 (2006)
- (9) T.Shioda, T.Morisaki, H.Ono, "Single-shot tomography by means of VIPA and spatial phase modulator installed optical interferometer", *Opt. Commun.*, Vol.284, pp.144-147 (2011)
- (10) T.Shioda, T.Morisaki, T.Q.Banh and K.Suzuki, "Two-dimensional single-shot tomography using a virtually imaged phased array and a spatial phase modulator", *Appl. Opt.*, Vol.51, No.21, pp.5224-5230 (2012)
- (11) T.Q.Banh, K.Suzuki and T.Shioda, "Development of an incoherent optical frequency comb interferometer for long-range and scanless profilometry and tomography", *Opt. Commun.*, Vol.296, pp.1-8 (2013)
- (12) T.Q.Banh, K.Suzuki, M.Kimura and T.Shioda, "Two-dimensional high-speed and long-range tomography and profilometry using liquid-crystal Fabry-Perot resonator", *Appl. Opt.* Vol.54, No.4, pp.912-918 (2015)
- (13) 塩田達俊: "インライン全数検査を目指す非接触光表面形状計測システム", *クリーンテクノロジー*, Vol.31, No.3, pp.45-50 (2021)
- (14) T.C.Truong, T.Q.Banh, H.Kim and T.Shioda, "Axial zoomable 2D single-shot comb interferometry using spatial phase modulator for profilometry and tomography", *Opt. Commun.*, Vol.349, pp.276-283 (2019)

(15) B.D.Thai, K.Chiba, T.T.Cong and T.Shioda, "Nanometer resolution of 2D single-shot low-coherence & comb-based profilometry based on the effect of discrete height of spatial phase modulator surface", Opt. Commun., Vol.546, 129802 (2023)

(16) D.Huang, E.A.Swanson, C.P.Lin, J.S.Schuman, W.G.Stinson, W.Chang, M.R.Hee, T.Flotte, K.Gregory, C.A.Puliafito and J.G.Fujimoto, "Optical Coherence Tomography", Science, Vol.254, No.5035, pp.1178-1181 (1991)

(17) S.Choi, M.Yamamoto, D.Moteki, T.Shioda, Y.Tanaka and T.Kurokawa, "Frequency-comb-based interferometer for profilometry and tomography", Opt. Lett., Vol.31, No.13, pp.1976-1978 (2006)

(18) T.Awane, T.Q.Banh and T.Shioda, "High-speed 2D Single-shot Surface Profilometry for Industrial Inspection

under Vibrational Environment", OSA Laser Congress, LM4B (2019)

【筆者紹介】

塩田 達俊

埼玉大学

大学院理工学研究科 准教授

<主なる業務歴および資格>

光周波数コム、レーザー、光通信デバイス／システム、光学干渉、イメージング、非線形光学、分光学などを基礎とした新規の光計測システムの開発に取り組んできた

