

直径 1.5 mm で実現する内視鏡型デジタル顕微鏡

— 微細OCTプローブでナノメートル精度のデジタル化技術 —

古川 祐光^{1*}、野口 尚美¹、山崎 大志²、浅田 隆文²

20 nmの精度で内部を非接触で計測可能な直径1.5 mmの内視鏡型の顕微鏡を製作した。眼科等で生体計測に利用される光干渉断層法 (OCT: Optical Coherence Tomography) の光源を高安定化し、工業用に精度を高めた。プローブ直径が1.5 mm以下で、内蔵された微小径モーター2個により軸方向スキヤニングと回転方向スキヤニングとを行い、試料内筒に挿入することで、内側を全周計測することが可能となった。光はプローブ挿入方向に対して側射されており、測定更新レートは毎秒60フレームである。わずかな隙間から挿入することで高精度計測が可能となる装置は、分解点検の負担が減少させられ、日常点検管理を信頼の高いものにすることができる。

キーワード: 内視鏡、ファイバースコープ、光干渉断層法、OCT、超解像、内径測定

High-accuracy endoscopic microscopy using a thin, 1.5 mm diameter probe with optical coherence tomography

Hiromitsu FURUKAWA^{1*}, Naomi NOGUCHI¹, Hiroshi YAMAZAKI² and Takafumi ASADA²

We developed an endoscopic microscopy system with 20 nm accuracy that affords inspection through narrow gaps using a thin, 1.5 mm diameter probe. Accuracy was improved using Optical Coherence Tomography (OCT). The frequency modulated light source is stabilized with closed control from self-interference measurement. The probe is driven by two miniature motors, which allow three-dimensional scanning of an internal surface. Imaging performance is 60 frames per second. The high accuracy with narrow clearance capabilities of this system reduces the need for machine overhauls, which affords trustworthy daily inspections and hence greater machine reliability.

Keywords: Endoscope, fiber scope, Optical Coherence Tomography (OCT), super resolution, internal diameter measurement

1 機械加工技術とイノベーション

機械加工技術はどこまで進展していくのだろうか。精度に関しては、精密加工分野で有名な図1に示すロードマップがある^[1]。機械加工では原子の加工はできないため、原子サイズに近づく1 nmを限界点として、さまざまな方法でその領域へアプローチしていくのがナノテクノロジー技術である。その意味では、すでに原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope) 等を用いた原子マニピュレーション^[2]、分子マニピュレーション^[3]が実現されており、それ以上の進展は理論的には望めない。機械加工技術は終わったのだろうか。

しかし、超高精度の加工技術であるAFM操作、集束イオンビーム等がすぐに個人ユースでの立体造形 (3Dプリンター) やコンピュータ数値制御 (CNC: Computer

Numerical Control) フライスに搭載されるわけでもなく、コスト・時間も見合わない。近年、生産技術の革新として3DプリンターやCNCフライスが取り上げられることが多くなり、これらが生産技術を根本から変えるかもしれないと言われているが、実はともに35年以上前に発明されている。CNCは1952年からマサチューセッツ工科大学 (MIT) のプロジェクトで開発され^[4]、3Dプリンターは1980年には小玉秀男氏によって発明された技術である^{[5][6]}。余談になるが、小玉氏は開発機や造形した試作品を発表したが、サブミクロンレベルの加工精度を競っている技術者たちに全く相手にされなかったそうである^[7]。最高のクオリティー技術もごく一部の人しか使えなければ、世界は変わらない。研究分野や大型の生産現場だけにしか利用できなかった技術が個人ユースレベルにまで普及することで、改めて「革

1. 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 〒305-8565 つくば市東1-1-1 中央第5、2. アダマンド並木精密宝石株式会社 〒036-0539 黒石市大字下目内沢字小屋敷添5-1

1. Electronics and Photonics Research Institute, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan * E-mail: h-furukawa@aist.go.jp, 2. Adamant Namiki Precision Jewel Co., Ltd., 5-1 Koyashikizoe, Shimomenaisawa, Kuroishi 036-0539, Japan

Original manuscript received November 2, 2017, Revisions received January 19, 2018, Accepted January 19, 2018

新」や「イノベーション」という評価が与えられるのだと感じている。この意味でこれまでに発明されたものを使いやすい形にし、コストダウンしていくことは、極めて重要なイノベーションである。制御技術・測定技術を含めて、ほとんどのものづくり技術は、まだ原子精度に至っていないため、発展の余地が大きい。

我々が着目しているのは、内筒を高精度に測定する技術である。内筒は、エンジン、発電タービン等の内燃機関としての利用だけでなく、その精度が軸受け、ベアリング等でもエネルギー効率を左右する重要な部分である。それにも関わらず、高精度測定に適した技術はいずれも顕微鏡技術から発展してくるためか、薄い平面試料向けに限られることが多く、内径検査には適していない。このため、内筒検査では従来から用いられている真円度測定機をいかに高精度化するかという方向に進んでいるのが現状となっている。現状の最高精度は 0.05 μm 程度であり、真円度測定機の延長である限りは、心出し・水平出しなど測定者にも職人技が求められる。

このように内径測定技術は、精度・手間・測定可能な大

きさ・形状等の制限が多く、利便性や適用範囲が低いことが問題となっている。部品製造時の品質管理だけでなく、日常点検・負荷試験等においても摩耗状態・交換時期の見極めなどに使用されるので、PC で管理できるデジタルデータが高精度で誰でも得られることが必要である。

この目的に適した技術は内視鏡であるが、多くの場合では写真・ビデオを撮って診断の目安にするいわゆる図 2 左のようなビデオスコープであり、図 2 右のような計測技術には至っていない。写真では対象の微小な形状変化を検出することが難しいので、デジタル化されたデータでの比較が望ましい。この点において、従来の内視鏡というよりは、狭い空間に入り込む内視鏡型のプローブを有しながらも、機能的には微小な形状を検知し、測定や比較に便利なデジタル顕微鏡に相当する技術が求められている。

この研究では光干渉断層法 (OCT: Optical Coherence Tomography) をベースにして、高精度計測を試み、デジタル化する技術を目指している。OCT に用いられている光干渉計測は、古くから白色干渉測定技術として工業的な表面形状計測に用いられていたが、山形大学の丹野教授と

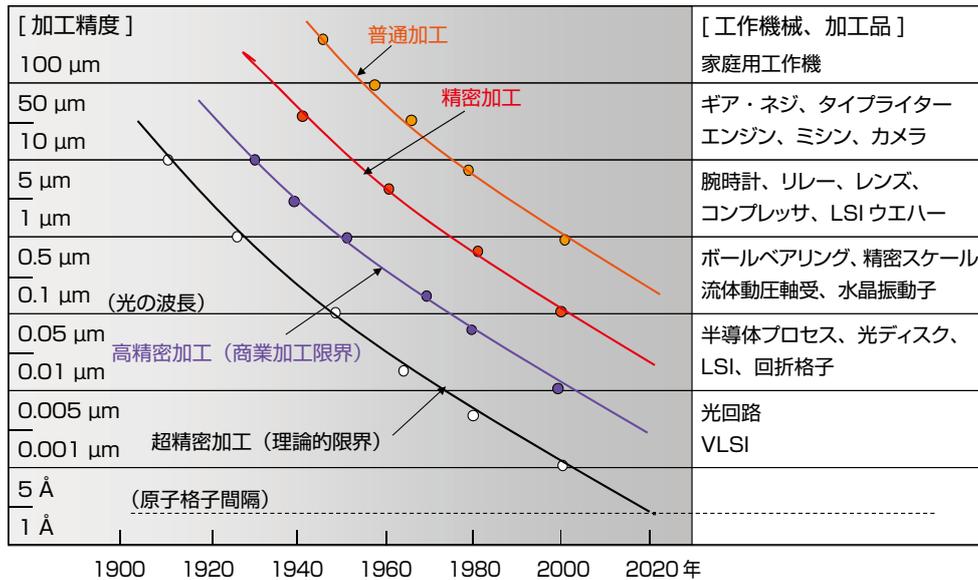


図1 機械加工精度のトレンド

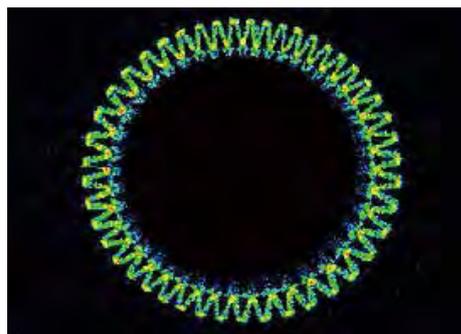
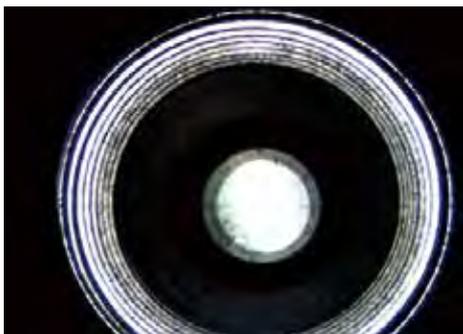


図2 アナログ内視鏡とデジタル内視鏡の例
それぞれ試料は異なるが、管内の内視鏡写真(左：従来)とデジタル化データ(右：本技術)とを示したものである。

マサチューセッツ工科大学 (MIT) の J. Fujimoto らがほぼ同時期に眼底網膜の断層計測^{[8]-[10]}ができることを示したことによって眼科応用が急速に進み、現在では世界中のほぼすべての眼科医療機器メーカーから製品が出ている。人の網膜の断層像が得られることによって、眼科診断は革新的な変革もたらされた。

元々、OCT 技術は当初から光ファイバーを用いて構成されており、微小プローブの製作に適合しやすい技術であるが、内視鏡としての利用はやや遅れている。OCT を利用した内視鏡は、医療分野には限定的に応用されており、血管を内側から描出する血管 OCT が着目されている。一方で、血管内に挿入されたプローブから血管壁に測定光を放射する際に、血液が OCT の光路の妨げとなる。このため、バルーンカテーテル等で短時間だけ血管を塞ぐことにより血液の流れを遮断し、生理食塩水注入による血液のフラッシュを行ったうえで血管を観察する必要がある。手技として、従来の超音波を利用した血管内超音波装置 (IVUS: Intravascular Ultrasound) に比べて手間がかかり、置き換えには至っていない。簡便に使えるイノベーションが必要である。

一方で、工業応用はほとんど行われていない。次節で述べるが、医療応用とは求められるスペックが異なっており、この溝を埋めるには異分野となる光学技術と機械技術との両方の技術が必要である。我々は、光学技術を専門とする産業技術総合研究所電子光技術研究部門 (以下、産総研) と、精密機械技術を専門とするアダマンド並木精密宝石株式会社 (以下、並木精密) とが組んで両方を高度化するというアプローチを取った。並木精密は、プローブのキーパーツであるマイクロモーター製作技術において世界一であり、大変高い目標値を設定することになった。我々が目標としているのは、直径 1.5 mm のプローブを用いて、表面形状を 20 nm 精度で測定することである。このような計測器はこれまで無かったため、応用分野は未知数だが、発電所や自動車・航空機等回転摩耗する機械を分解することなく、隙間から点検・データ蓄積したいという用途は必ずあると考える。

例えば、精密測定機の国内出荷額は日本精密測定機器工業会の資料^[11]によれば、2016 年において約 1100 億円 / 年である。この研究の用途は従来の真円度測定機 (160 億円 / 年)、表面粗さ計 (90 億円 / 年)、三次元測定機 (50 億円 / 年)、および工業用 CCD カメラ内視鏡では測定できない深穴内径測定用であり、従来のそれら用途向け装置生産額 (約 300 億円) の 30 % 以上と仮定すると、100 億円 / 年程度の新たな市場が形成されるものと考えられる。

2 コア技術の研究開発

2.1 自己位相検出による高精度 OCT: 20 nm

OCT は医療技術として発展したことにより、技術普及初期に付きものとなっている高価な装置価格の時期を乗り越えており、現在では各パーツが比較的安価に入手できる。この恩恵を活かして、工業用途での普及の準備は整っているが、医療と工業とで異なる指標が、再現性の問題である。

医療 OCT に求められる性能は、ある患者の網膜各層の像を綺麗に得ることであり、指標としては奥行分解能と深達性が主なものとなる。この医療で用いられている内視鏡型 OCT として血管 OCT^[12]がある。一方、工業 OCT に求められる性能は、被測定物の表面を精度よく描画することであり、指標としては距離精度と再現性が主なものとなる。特に工業用途で、金属表面を対象とする場合には、奥行分解能と深達性とはほとんど不要な指標となるため、目指す方向性が異なっている。この問題に対処するため、我々は以下のような手法を用いた。

我々の用いた光学系は、主として光ファイバー干渉計からなっており、波長走査光源を用いた OCT (SS-OCT: Swept source OCT) と呼ばれるタイプのものである。その概要図を図 3 に示す。光源は、波長 1240-1400 nm の波長走査光源 (Santec HSL-2100) である。光源は、光ファイバーカプラ 1 において 95:5 の割合で分割され、それぞれ距離計測のためのマイケルソン干渉計と補正のための自己干渉計に導かれる。

マイケルソン干渉計では、光ファイバーカプラ 2 で 95:5 に分割され、それぞれ被測定試料の反射面と参照反射面へ向かう。それぞれの反射面からの反射光は、光ファイバーカプラ 3 で結合され、干渉信号が検出器で測定される。この干渉計においては、光ファイバー 2 で分割された位置から、被測定試料の反射面までの距離と参照反射面までの距離との差が、光源波長の整数倍となるときに干渉信号が強くなるため、光源波長を走査することでそれぞれの距離の差 (距離差) が計測できる。つまり、試料反射面がある基準位置 (参照反射面までと同一距離) に置かれたとき、波長に依存することなく干渉信号が強くなるが、その基準位置から離れると光源スペクトルに強弱の縞 (スペクトル干渉縞) が発生する。スペクトル干渉縞の周期は、距離差が大きくなるにしたがって、より短くなっていくため、基準位置に対する試料反射面までの距離差が判る。

ここで、距離差を決めるのはスペクトル干渉縞の周期であるため、精度の高い距離測定を行うためには、スペクトル干渉縞の周期が安定していることが必要である。ところが、波長走査光源では、時間に対して一定の波数変化を保

つのが難しい。走査機構にもよるが、一般には走査の始めと終わりは波数変化が遅くなることが多く、時間に対する光源波数は非線形になっている。この様子を図 4 左（改良前）に示す。実験では試料反射面としてミラーを用いたので、走査速度が一定の時には等間隔のスペクトル干渉が見られるはずであるが、波長走査開始・終了の 1240 nm 付近と 1400 nm 付近ではスペクトル干渉縞が広く、中間の

1320 nm 付近では狭いことが判る。一般に、光源メーカーは検出ソフトと連携してこれを一定の走査速度と同等になるよう補正している。大まかな補正はこれで可能であるが、走査ごとのブレは残るため、我々は光源の一部を自己干渉計に導き、リアルタイムに走査速度をモニタリングすることによって補正する改良を行った。自己干渉計では二つに分割された光の光路長が 2 本のファイバーの長さの差だけ異

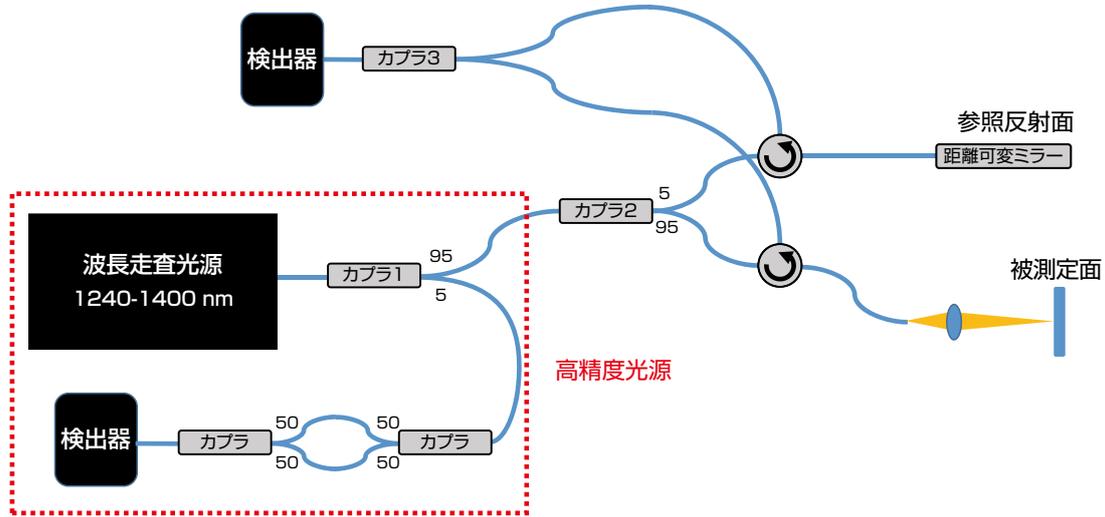


図3 高精度OCTの光学系の概要図

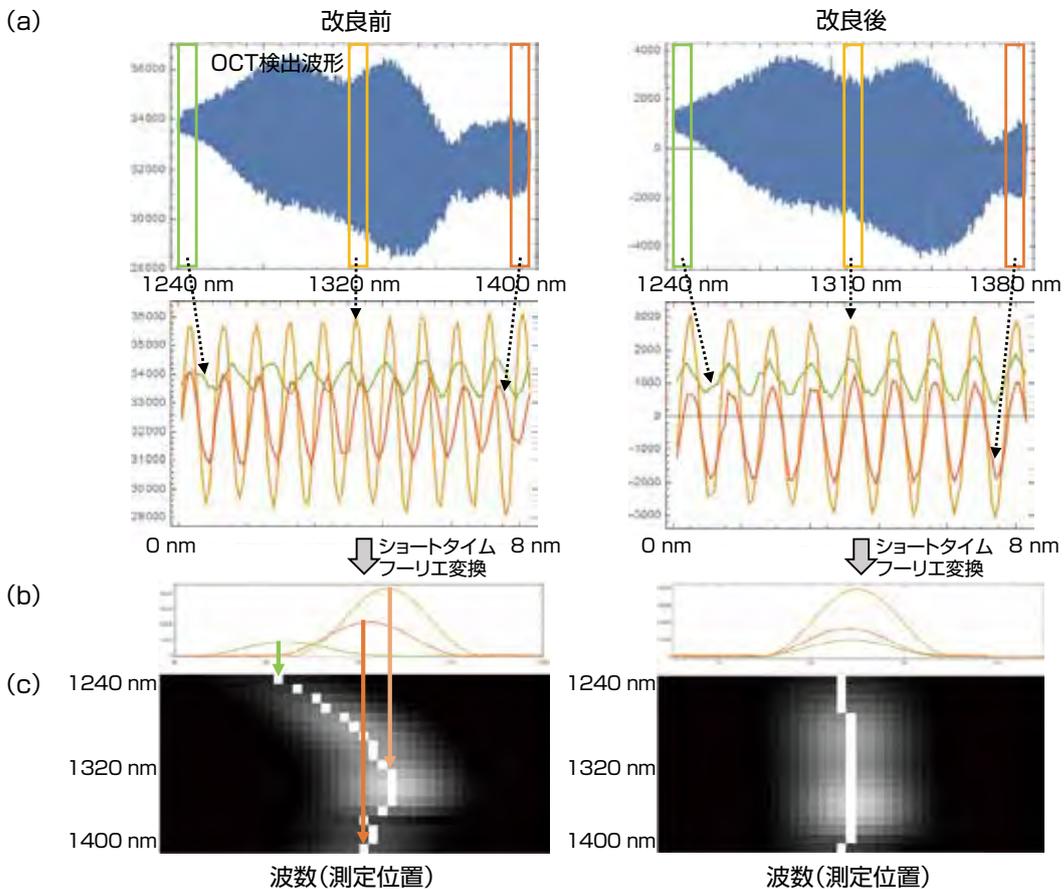


図4 既存光源に見られる干渉波形の非線形性（左側）と、自己干渉計による補正後（右側）の比較

なっているため、もし一定の速度で波長走査すると、等間隔でのスペクトル干渉が生じるはずである。波長走査速度にムラがあれば、それがスペクトル干渉の縞間隔に反映されるため、この情報を元に、試料検出信号の間隔も補正することができる。この原理によって、波長走査速度にムラがあっても、一定速度での波長走査を再現できる。この結果、図 4 右 (改良後) のように、波長走査の開始から終了まで一定の測定が可能となり、測定位置の安定性が高まる。図 5 に改良前後での OCT 位置測定結果を示す。改良前は、500 回繰り返し計測時の標準偏差が 380 nm であったのに対して、改良後は 22 nm へと約 17 倍の向上が得られた。

この高精度位置計測技術を適用して図 6 左に示すとおり、10 円玉の形状計測を行った。10 円玉の凹凸は約 100 μm であり、検証としてはやや大きすぎるため、段差のない部分 (フラット面) の測定も行った。図 6 右は高さ方向を 100 倍に強調表示したものであり、表面形状計測結果

より表面粗さ $Ra=0.31 \mu\text{m}$ と求められた。詳細な表面形状計測が行えるため、工業計測で重要な表面加工精度 Ra を求めることが可能となる。

2.2 直径 1.5 mm の回転プローブ^[13]

並木精密では、2005 年に世界初の直径 1.5 mm のマイクロモーターを開発し、さらに小型化を目指して直径 0.9 ~ 2.0 mm のモーターの開発に成功してきている。

この技術では、直径 1.5 mm の 3D スキャニング OCT プローブを作製するため、直径 1.5 mm の第 1 マイクロモーターと直径 0.9 mm の第 2 マイクロモーターを利用した。図 7a に示したように OCT プローブ先端に内蔵された第 1 マイクロモーターは直径 1.5 mm のモーターでミラーを回転駆動している。これにより光ファイバーからの光は 90 度折り返された側面照射 (側射ビーム) となり、360 度の回転方向スキャニングが行える。第 2 モーターは直径 0.9 mm のモーターであり、側射ビームの角度を変える役割をしており、前方から後方の軸方向スキャニングを行う。具体的に

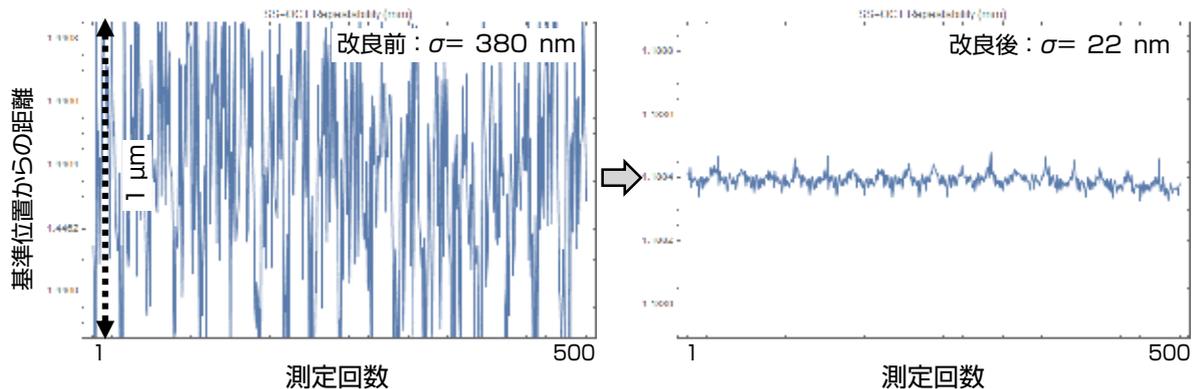


図5 改良前後での距離測定精度の比較

縦軸は測定された試料面の位置、横軸は測定回数を示している。500回繰り返し測定において、標準偏差 $\sigma=380 \text{ nm}$ から 22 nm へと向上した。

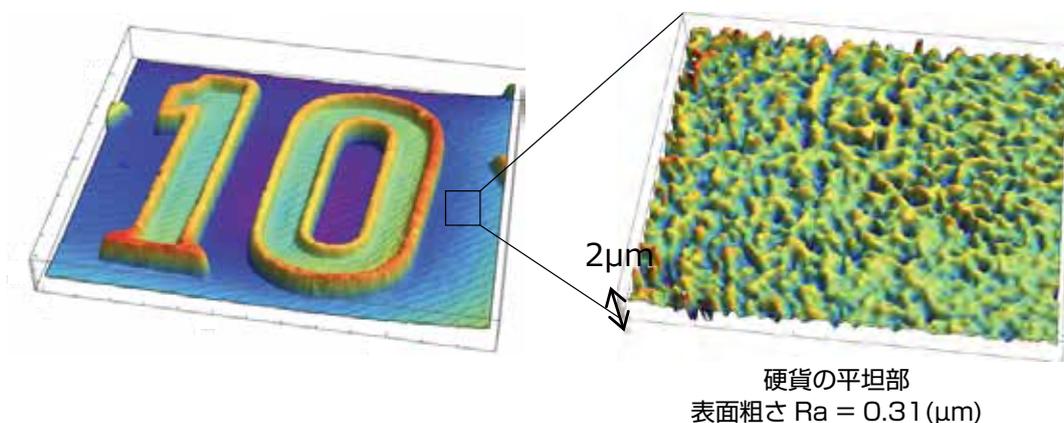


図6 高精度OCTによる10円玉の高さ計測 (左: 10 mm四方) および10円玉のフラットな面を高さ計測した結果 (右: 1 mm四方)

は、第 2 モーターでは、先端が斜めに切れた光ファイバーを回転させており、光ファイバーからの射出される光の方向が中心からずれる。これにより第 1 マイクロモーターに駆動されたミラーの上側や下側にビーム位置を制御することが可能となり、側射ビームの角度を変えられる。これら 2 個のモーターを同期回転させ、例えば第 1 モーターを 3600 rpm、第 2 モーターを 3540 rpm に設定し、わずかに回転数差を与えることで回転位相が生まれ、光ビームは 1 分間に 3600 回転しながら、軸方向に 60 回の往復運動を行うというヘリカルスキニングが実現される。

図 7a に示した第 2 モーターは直径 0.9 mm と極細のため、ブラシレスコアレス方式を採用している。これに使われる回転シャフト、軸受、コイル、マグネット等の各部品は図 7b に示すように微細に作られる。回転シャフトの直径は 0.2 mm でその中心には光ファイバーが挿通されるため直径 0.125 mm の貫通穴が設けられている。コイルは線径 0.024 mm のワイヤを専用巻線機により高密度にコイルングすることにより回転トルクを確保している。また軸受は内径 0.2 mm であり、内周面には図 7c に示すヘリングボーン動圧発生溝がレーザー加工で施されている。これにより、回転が始まるとオイルが溝に沿って軸受け内に流れ込み、オイル圧力に支えられて、回転シャフトが軸受けから浮き上がる。これは動圧軸受けと呼ばれ、回転で発生するオイル動

圧を利用した非接触回転により回転中心が安定し、精度を高めることができる。これらの大変微細で芸術的とも思える製造技術がマイクロモーターの特性を向上させている。

図 8 のように、この高精度 1.5 mm 内視鏡を、六角ネジの内部測定に適用した。結果を図 9 に示す。1 秒当たり 60 フレームでの安定したデジタル化が可能であった。

3 Discussion (ブレイクスルー、インパクト)

本装置では、非接触で 20 nm 精度の形状計測を行う技術と、直径 1.5 mm の全周回転プローブ製作技術とを融合して、新しい内視鏡を実現する。隙間から内部を高精度でデジタル化するという用途は、文字通りスキマ産業かもしれないが、隙間から高精度デジタル化が可能になるならば、図 10 のように分解せずに点検業務を行うことができ、休止期間や日常管理のコストを下げる。

- (ア) 光学技術（非接触）を用いながら、ナノメートルでの形状計測
- (イ) 隙間から計測できる回転プローブの実現（撮影だけではないデジタル化）

この二つの技術を一つに統合したことで、隙間からの検査が容易に行え、分解検査が不要となる。特に本装置のターゲットと想定しているのは、回転駆動装置への適用である。例えば、摩耗しやすいジェットエンジン、発電タービ

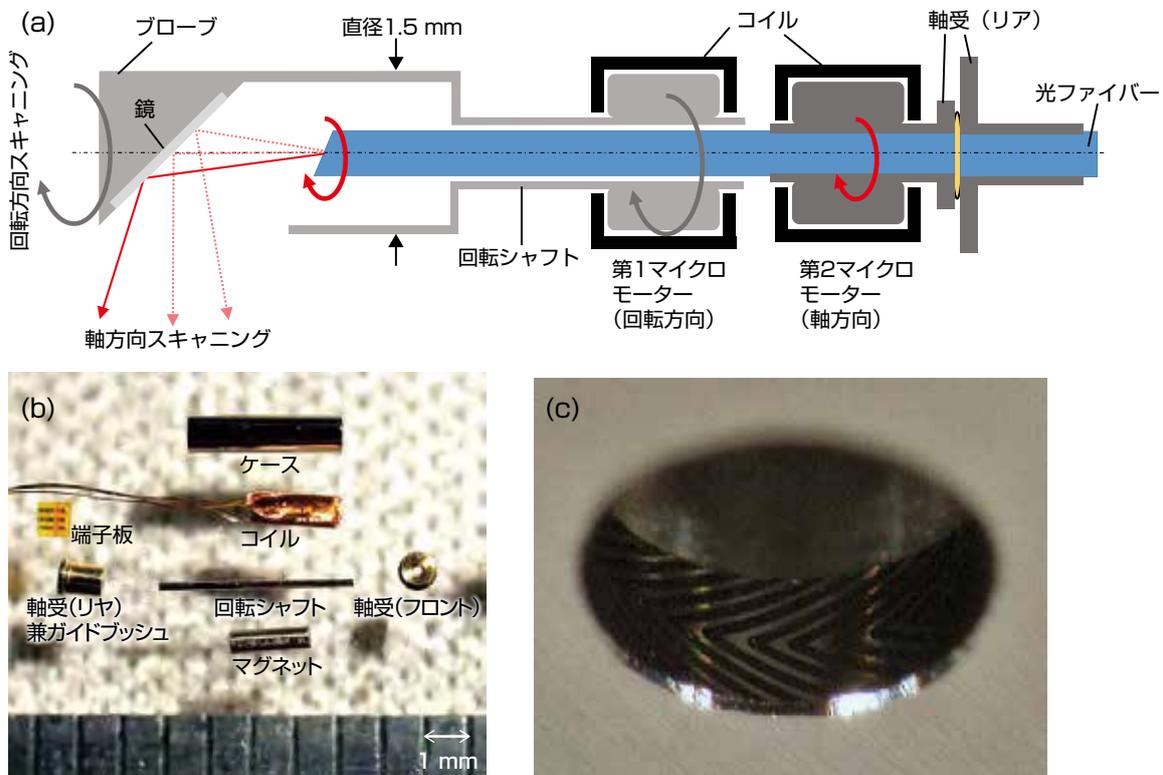


図7 微細径プローブ先端の制御機構

(a) 回転プローブ断面構造、(b) 第 2 マイクロモーター部品、(c) 動圧軸受内部のヘリングボーン動圧発生溝

ンの日常管理や、自動車等の小型エンジンの内筒検査等がある。エンジンをはじめとする回転駆動装置では、内筒研磨の形と研磨精度が燃費向上に大きくかわる。外形を測定できる機器は多いが、内筒を測定できる機器はほとんどない。高精度デジタル化により、摩耗状態や付着物を管理することで、短時間で精度の高い品質管理が行える。日常管理はもとより、開発研究や生産ラインにおいても有用な技術となると考えている。

4 今後の課題、展望

この論文では、精度評価のために同じ試料を繰り返し測定する円形スキャンを用いて検証を進めた。プローブ構造の箇所ですべて述べたように、本プローブは第2モーターによる軸方向へのスキャンを組み合わせ、ヘリカルスキャンを行えるため、3D形状の測定も容易である。しかし、3D デジタルデータを再構成するには、図 11 のように軸方

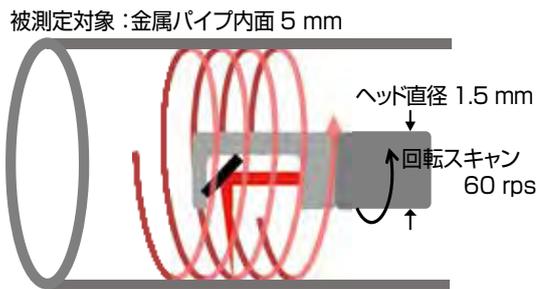
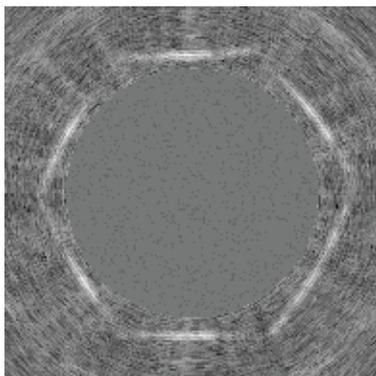


図8 直径1.5 mmの回転プローブ外観図(左)と試料(M6ネジのヘッド部分)測定の様子(右)



内径測定結果
60 fps



被測定物(ワーク)

図9 直径1.5 mm回転プローブによる試料内径測定

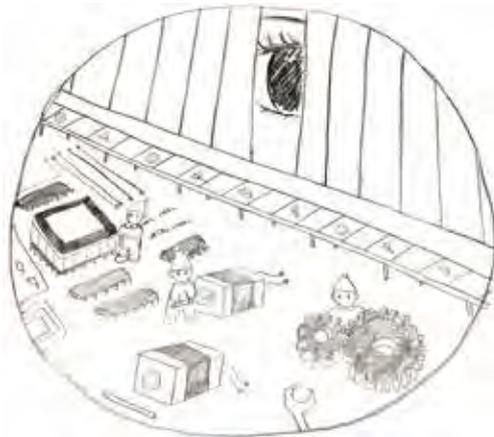


図10 スキマ計測イメージ

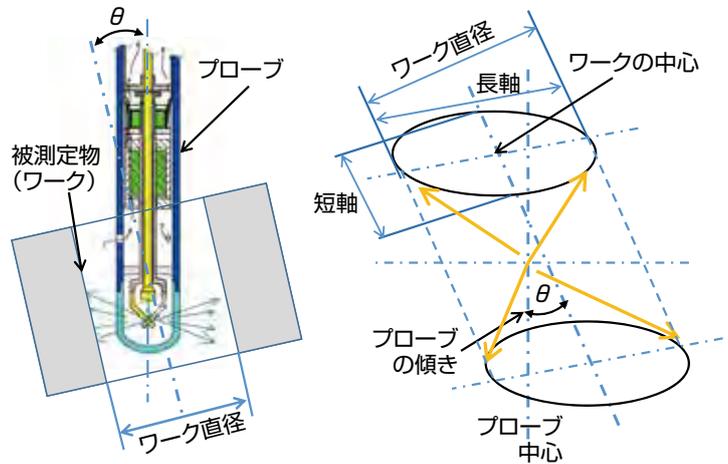


図11 傾斜自動補正アルゴリズム

向スキャンニングをナノメートル精度で補正する必要がある。今後はこの課題に取り組むことを考えている。回転スキャンニングだけでは、例えば円筒試料へプローブを挿入したときに円筒軸に対してプローブが傾いていると楕円形になるため、正しく測れない。3D 形状であれば、どのように挿入しても正しく測れるため、利便性は格段に向上するだろう。

5 最後に

この研究の一部は、戦略的基盤技術高度化支援事業(サポイン)の補助を受けて行われた。事業開始を審査するヒアリングは通常厳しいものであるが、この事業の審査ヒアリングでは、審査員に感心していただいた。いや、むしろ目標が高すぎて心配されたのである。「たとえ測定精度 20 nm が達成できず、1 桁悪くても十分に役に立つのですよね。」と、目標達成が至上命題とされる公的研究予算において、管理・審査の側から達成目標を下げたときの算段を提案されて恐縮した。それも尤もな話であり、実は我々の中でも議論となって、他の光学計測専門家の意見でも、この目標設定はかなり厳しいという意見が大勢を占めていた。

それでも我々がこの目標設定を掲げた理由は三つあり、一つにこの研究の主眼である円筒内径計測の既存製品の精度が低いことであり、審査員の言葉通り、目標より1桁落としても世界トップになることが見込めるためであった。二つ目は、並木精密の機械技術レベルとこの技術実現への意識が高く、光学技術についても短期間での向上が見込めたことである。産総研で協力できそうな話を伺ったときには、並木精密では自己流ではあったと思うが、すでにある程度の OCT ベース技術を持っていた。それでも教を乞うという姿は新鮮に映った。そして、産総研ではさまざまな企業との共同研究を行っているが、並木精密の実現への意気込みは特に異色であることが印象的であった。青森工場を訪れたときにはさらに驚くこととなり、他の開発メンバーにもお会いしたが、言葉だけでは知っていた「全員が一丸となって開発に取り組む」という言葉が具現化された姿があった。渋谷工場長を筆頭に、パーツ製作のメンバーに至るまで全員が専門性高く、プロの仕事である。正しく他人の教を受けるが、そのまま頼ろうとはせずに、自らで実現しようと取り組む姿があることに気づき、大変に感銘を受けた。三つ目に、研究分野とメーカーとの見解の違いを考慮したことにある。研究では多くの場合、試作機は1台しか製作しないので、精度といえば「repeatability」のことであり、つまり計測値の標準偏差と同等という感覚がある。ところが、メーカーは多数の生産を想定しているため、標準誤差を重視しており、品質管理上重要とされているようである。標準誤差であれば、少し気楽に取り組むことが

できる。

このように高い目標と強い意志、そして少しの逃げ場を作って採択され、研究を開始することとなった。結果はこの論文で示したように、逃げることなく repeatability で評価を行っても目標が達成できており、さらに冒頭で述べた意味でのイノベーションを目指して、利便性を高める技術開発を行っている。

参考文献

- [1] 谷口紀男: 超精密加工技術の発達と今後の課題-ナノテクノロジーとの関連, *日本機械学会誌*, 87 (791), 1101-1108 (1984).
- [2] D. M. Eigler and E. K. Schweizer: Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope, *Nature*, 344, 524-526 (1990).
- [3] D. G. de Oteyza, P. Gorman, YC Chen, S. Wickenburg, A. Riss, D. J. Mowbray, G. Etkin, Z. Pedramrazi, HZ Tsai, A. Rubio, M. F. Crommie and F. R. Fischer: Direct imaging of covalent bond structure in single-molecule chemical reactions, *Science*, 340 (6139), 1434-1437 (2013).
- [4] W. Pease: An automatic machine tool, *Scientific American*, 187 (3), 101-112 (1952).
- [5] H. Kodama: A scheme for three-dimensional display by automatic fabrication of three-dimensional model, *IEICE Transactions on Electronics (Japanese edition)*, J64-C (4), 237-241 (1981).
- [6] H. Kodama: Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, *Review of Scientific Instruments*, 52 (11), 1770-1773 (1981).
- [7] 日経オンライン: 3Dプリンターで特許を逃した僕の「失策と教訓」発明者・小玉秀男氏が次世代に贈る言葉, <http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/16/063000051/070500003/>, 閲覧日2017-11-02.
- [8] 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*, 254 (5035), 1178-1181 (1991).
- [9] 丹野直弘, 市村 勉, 佐伯昭雄: 光波反射像測定装置, 特許第2010042号 (特公平6-35946).
- [10] J. G. Fujimoto, D. Han, C. A. Puliafito, C. P. Lin, J. S. Schuman and E. A. Swanson: 光学的イメージ形成および測定の方法および装置, 特許第3479069 (B2); 光学的イメージを形成するシステム、方法および装置, 特許第3692131(B2).
- [11] 日本精密測定機器工業会: 生産販売統計, <http://www.jpma.gr.jp/statistics/>, 閲覧日2017-11-02.
- [12] G. J. Tearney, M. E. Brezinski, B. E. Bonma, S. A. Boppart, C. Pitris, J. F. Southern and J. G. Fujimoto: In vivo endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography, *Science*, 276 (5321), 2037-2039 (1997).
- [13] 浅田隆文, 山崎大志: 3D内視鏡光プローブ式精密測定方法の開発, *日本機械学会論文集*, doi:10.1299/transjsme.16-00492, (2017).

執筆者略歴

古川 祐光 (ふるかわ ひろみつ)

産総研電子光技術研究部門光センシンググループ上級主任研究員。工学博士。大阪市出身。1997年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了後、理化学研究所、医薬品医療機器総合機構等を経て、現在は産業技術総合研究所。レーザー光学・分光学を基礎とした医用イメージングに関する研究に従事している。薬機法(薬事法)にも対応できる光学技術ベースの装置開発を得意としている。



野口 尚美 (のぐち なおみ)

産総研電子光技術研究部門光センシンググループテクニカルスタッフ。茨城県土浦市出身。2007年より眼底計測プロジェクトに従事。2010年バイオフォトニクスグループにてプラズモンフォトニクスに要するナノ加工・ナノ計測技術開発を行い、2014年より光センシンググループにおいて分光装置開発プロジェクトの主力を務める。光技術をベースにした社会インフラ・医療計測等の分野に貢献している。



浅田 隆文 (あさだ たかふみ)

アダマンド並木精密宝石株式会社青森工場技術顧問。工学博士(動圧軸受)。京都市出身。1973年国立舞鶴工業高専修了、2004年放送大学修了、2010年金沢大学自然科学研究科博士後期課程修了。1973年松下電器産業株式会社入社、2010年日本電産株式会社入社、2012年より現職。1973年より2011まで一貫して精密動圧軸受の設計、加工法開発および多くの軸受応用製品の量産化を担当。2012年より光学式精密測定機の開発に従事。1993年第25回市村産業賞貢献賞、2002年大河内記念生産賞、2010年日本設計工業会論文MIR賞受賞。



山崎 大志 (やまざき ひろし)

アダマンド並木精密宝石株式会社研究開発本部モータ開発部課長。1999年国立八戸工業高等専門学校修了後、並木精密宝石株式会社に入社。一貫して、光学部品およびマイクロモーターの開発設計に従事。2012年より固有技術である光学部品加工、マイクロモーター加工・組立技術を融合・応用し、細径OCTプローブおよびそれらを適用した精密測定機の開発に従事。現在に至る。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(赤松 幹之、藤井 賢一:産業技術総合研究所)

この論文では、光断層計測法(OCT)と超小型モーターを統合することで、直径1.5mmという狭い隙間から内視鏡型の顕微鏡を挿入することによって、円筒内の内面を20nmの精度で評価できるようにした画期的な開発です。OCTは光ファイバーを用いた技術として始まっており、光ファイバーを用いた内視鏡型装置との相性が良いことから、世界トップクラスのマイクロモーターによって駆動するプローブ

に組み込み、自己位相検出技術を開発してOCTを高精度化することで、世界最高の精度の内視顕微鏡を実現できた。分解することなしに機器の内部を日常点検できるようになるので、品質管理の短時間化等に加え、将来は血管の内壁を検査する血管OCT等の医療応用も考えられるので、今後も発展性のある計測評価技術であると言えます。

議論2 コア技術の研究開発について

質問(藤井 賢一)

従来は380nm程度であった内面の距離(凹凸)測定精度を22nmまで飛躍的に向上させることに成功した要因として、光源の一部を自己干渉計に導き、波長走査速度をリアルタイムでモニタリングできるようにしたことが挙げられています。これがスペクトル干渉縞の周期の安定化に繋がり、距離測定の安定性が高まったということが述べてありますが、具体的にはphase-shifting method等を用いて距離計測を行っているのでしょうか。光学的な位相測定方法等について、もう少し詳しく記述して、表面形状測定原理等についても説明すると、読者の理解が深まると思います。

回答(古川 祐光)

具体的には、自己干渉計を用いて光源の波長走査速度をモニタリングしておき、あたかも走査速度を一定にしたときのように、検出光を補正しております。これが理解しやすいように図4を変更し、説明文もこの図を元にして技術内容が判りやすいように記載しました。

議論3 内視鏡型デジタル顕微鏡の応用について

コメント(藤井 賢一)

ジェットエンジンやタービンの日常点検等、1.5mmの隙間から挿入できることの利点を生かした応用例が挙げられていますが、さらなる小型化が実現できれば血管内壁や生体組織の観察への応用も考えられるのではないかと思います。機器以外への応用等についても検討されているものがあれば紹介してください。

回答(古川 祐光)

ご指摘のように、医療応用の方が早く実現されており、応用例として、血管OCTについて記載しました。コメントいただいたように、我々も生体組織の観察への応用も考えることが可能です。すでに、並木精密のモーターは血管OCTの論文に利用されており、我々も今後その分野での展開も視野に入れる必要があると考えています。

しかし、工業応用も重要にもかかわらず、あまり用いられることはありません。工業応用の方が、医療応用よりも求められるスペックが高く、コストは低くなければならぬためです。このため、この研究では血管OCTとは異なる性能を高め、工業応用に適したOCT内視鏡となるように努めました。

議論4 微細径プローブ先端の制御機構について

質問(藤井 賢一)

図7に並木精密が開発した直径0.9mmと1.5mmのモーターを用いた微細径プローブの説明があります。このような小型モーターの動作原理や機構についても説明があれば、モーター単体での応用も広がるのではないかと思います。

回答(古川 祐光)

図7に、マイクロモーターの構造写真(図7b、7c)を追加し、この論文に機構の説明と、動圧軸受けの説明を追加しました。

議論5 技術の統合について

質問(赤松 幹之)

OCT技術とマイクロモーターによるプローブ技術を組み合わせることで、高精度の内径を実現できたことは分かりますが、そもそもなぜこの技術に取り組むことになったのでしょうか。OCT技術は最初から

使うことになっていたのか、OCT 技術の応用を探していたのか、など色々な経緯が考えられますが、実際はどのようになっていたのでしょうか。その出会い自体も読者の参考になると思います。

回答（古川 祐光）

産総研へ訪ねてこられたときには、すでに OCT 基本技術は製作しており、自社のみで完成できるだけの技術はあったと考えます。通

常なら、自社で完結させようとすると思いますが、それでも産総研を頼ろうとする姿が、立派であると同時にやや疑問でもありました。青森工場に訪問したとき、その疑問がとけたので、その様子を、第 5 節「最後に」に記載させていただきました。出会いとは少し違うかもしれませんが、ものづくりをはぐくむ社風という意味で読者の参考になれば幸いです。