広視野レーザ顕微鏡による円筒面全面のナノスケール計測*

月 山 陽 介** 福 島 直 幸*** 新 田 勇**

Nanoscale measurement of whole cylinder surface using a laser microscope with a wide field of view

Yosuke TSUKIYAMA, Naoyuki FUKUSHIMA and Isami NITTA

In a previous study, we developed a new method for observation of the whole cylindrical surface in a very short time, using a laser microscope with a wide field of view. When cylindrical specimens were rotated by a motor-driven rotary table, the focused laser light was scanned along a generatrix of the cylinder surface. Thus, the whole cylinder surface could be observed easily even over a very short time. As the obtained image was a developed view of the cylinder surface, it was easy to measure the distance between any two points on the cylindrical surface. In this study, we acquired interference images of the whole cylinder surface with the aid of a reference plane. As a result, fringe patterns over the whole cylinder surface could be obtained. From image processing of the fringe patterns, we calculated the nanoscale surface profile of the cylinder.

Key words: nano-level, cylinder surface, laser interferometry, laser microscope, wide field of view

1. 緒 言

機械加工面などを観察する際には、その目的に応じて光学顕微鏡やレーザ顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)が用いられる。超精密な加工面になるほど観察倍率が高くなるので、観察視野は狭くなる。そのため、高倍率では観察したい領域の一部しか見ることができない場合もある¹⁾。観察したい領域全体の画像を取得するためには、観察場所を変えて必要な画像を撮影した後に、それらをつなぎ合わせるスティッチング操作が必要となる。しかし、これらの操作は非常に手間がかかり、特にナノレベルでは位置合わせが難しく、実際にはなかなか行われていないのが現状である。しかしながら、機械加工面を広く捉えることは、接触や摩擦および摩耗などのトライボロジー現象をより深く理解する上で重要である。

著者らはこれまで広視野レーザ顕微鏡の研究開発を行ってきた。この顕微鏡は、光学顕微鏡と同程度の解像度を持ち、かつ視野が格段に広いといった特徴がある。

図1は様々な観察装置の視野と解像度の関係を示したものである¹⁾。光学顕微鏡を用いると数十 μm 程度の広さの観察を行うことができる。さらに解像度の高い観察はSEMを用いることにより行えるが、その反面視野は狭くなる。このように、解像度と視野の間にはトレードオフの関係がある。ここで、図1のハッチングを施した領域は著者らが開発している広視野レーザ顕微鏡の守備範囲で、同倍率の光学顕微鏡と比較した場合、視野はおよそ400倍広い。

これまで、視野幅10mmまたは50mmの広視野レーザ顕微鏡を用いて、図2に示すような円筒面の観察を行う手法を開発した²⁾。ここでのキーテクノロジーはレーザ走査用のf θ レンズである^{1,2)}。結像面上の広い走査幅にわたりレーザ光を数 μm に集光する必要がある。レーザ走査幅の中心であればレーザを細く集光することは容易であるが、広い走査幅の両端までレー

ザを細く絞ることは困難である。広視野化のためには、全てのレンズの光軸を一致させる必要がある。特に、環境温度が変化してもレンズの光軸は一致している必要がある³⁾。

Fig.1 Relationship between resolution and field of view of various microscopes¹⁾

Fig.2 Schematic diagram of the new type of laser microscope for measurement of cylindrical objects²⁾

* 原稿受付 平成26年12月20日

掲載決定 平成27年4月3日

** 正会員 新潟大学(新潟市西区五十嵐二の町8050)

*** 新潟大学(新潟市西区五十嵐二の町8050)

観察対象の円筒試験片が回転ステージにより回転するとき、集光レーザは円筒試験片の母線方向に走査される。このようにすることで集光レーザは円筒全面にわたり走査することが可能となり、結果的に短時間で円筒全面の観察が可能となる。

真円度や円筒度は触針式のプローブを用いて計測されるのが普通である^{4)~6)}。一度の測定、すなわち一周分の測定では、プローブが接する円筒の一部の真円度しか測定できず、円筒全面の測定には時間がかかることが問題となっている。円筒面形状の非接触測定に関して、Andre et al.⁷⁾ らや Viottia et al.^{8,9)} らは、白色光干渉法 (White-light interferometry, WLI) を利用して2つの計測方法を報告している。円筒面よりさらに形状が複雑な球面観察に関しては、人工関節の硬質球と硬質カップの組合せにおいて非常に小さな摩耗深さと摩耗体積が測定されている¹⁰⁾。Bills et al.¹¹⁾ は置換された人工関節の寿命向上を目的に、新規開発の測定装置とナノレベルの3次元測定機を組み合わせで硬質球の摩耗量を測定した。いずれにしても、円筒面形状など複雑形状についての非接触測定法はまだ研究の余地がある。

ここで、広視野レーザ顕微鏡により円筒全面の円筒度が測定できれば、新しい有益な測定装置になると考えられる。しかし、広視野化と深さ方向の解像度にはトレードオフの関係があるので、広い円筒表面の画像が得られる反面、高さ方向の解像度は数 μm にとどまっていた。

本研究では、上記の観察装置に参照板を配置することで円筒全面の干渉縞像を一度の観察で取得することを試みた。回転ステージを空気静圧軸受に代えるなど装置を改良した結果、円筒

全面の干渉縞像を取得することが可能となった。得られた干渉縞を画像処理することで、円筒全面の nm レベルの形状計測を行う手法が開発できた。

2. 広視野レーザ顕微鏡の概要

図2に、これまでに開発した広視野レーザ顕微鏡³⁾の光路の概略を示す。レーザ半導体から射出されたレーザ光はコリメータレンズで平行光束に変換される。この平行光束のレーザは直線偏光であり、ビームスプリッタを通過した後に1/4波長板により円偏光に変換される。平面回転ミラーでレーザは水平方向に偏光され f0 レンズを経て結像面上を10 mm幅にわたって移動する。このときのスポット径は約2 μm 一定である。平面ミラーの回転速度は9000 rpm であり、結像面上でのビームスポットの走査速度は約50 m/s となるので、走査幅10 mmの走査時間は0.2 ms である。結像面上で反射したレーザ光は位相が反転するので、ビームスプリッタを通過するときにレーザ半導体に戻らずに受光素子の方に向かう。最終的に反射光はピンホールを通り受光素子に到達する。反射光強度は AD 変換器でデジタルデータに変換されて PC に取り込まれる。

平面ミラーによりレーザ光は観察円筒面の母線方向に走査される。これに加えて、観察円筒は回転ステージにより一定速度で円筒軸周りに回転している。したがって、円筒面上のすべての点の反射光強度が測定できることになる。各点の反射光強度をディスプレイ上に並べることで、円筒面の観察画像が構成できる。

この f0 レンズはテレセントリック性を有している。すなわち、主光線が光軸に対して平行なレンズ、つまり画角が0°となるレンズである。したがって、どの位置でも f0 レンズから結像面に射出されるレーザ光は光軸と平行を保つ。テレセントリック性を有していないレンズでは、物体が光軸方向に移動すると像の大きさが変わるために測定誤差が発生するが、この特性によりテレセントリックレンズでは物体の位置が移動しても像の大きさが変わらない。すなわち、ピントが多少前後しても像の大きさが変わらないことから、観察面上の距離の計測に向いている。

図3には広視野レーザ顕微鏡の外観写真を示す。固体レーザの波長は488 nm であり、解像力テストチャートによって評価した解像度は約2 μm である。視野は10 mm×8 mm である。広視野レーザ顕微鏡を用いたこれまでの観察においては、電動の直動ステージを使って試験片を垂直方向に移動させる。しかし、図2に示すように、直動ステージの代わりに回転ステージを使うことにより、円筒面の観察が容易に行えるようになる。他の観察方法に比べても、円筒全面の観察を短時間で行うことができる。このような観察方法では円筒面の表面画像をひずみなく展開図に変換できる。したがって、円筒面上に形成されたひっかき傷などの長さや面積を計測することも容易になる。

3. 広視野レーザ顕微鏡の深さ方向の測定精度改善

前述のとおり顕微鏡の視野と解像度の間にはトレードオフの関係がある。広視野レーザ顕微鏡の場合は、深さ方向の解像度を犠牲にして、広視野化を達成している。そこで、円筒面観察において深さ方向にナノレベルの表面形状観察を行うために、2光束干渉技術を導入した。種々提案されている干渉法の中でも、2光束干渉は原理が簡潔であり、実用面でも様々な応用がなされている。

Laser microscope with wide field of view

Fig.3 Overview of the laser microscope with wide field of view. The wavelength is 488 nm, the resolution is about 2.0 μm , and the field of view is 10 × 8 mm² when the flat plane is observed.

Intensity of reflected laser light : I

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \pi \frac{4h - (2n+1)\lambda}{\lambda}$$

Intensity reflected at cylinder surface : I_1

Intensity reflected at reference plate : I_2

Gap between two surfaces : h , Fringe order : n , Wavelength : λ

Fig.4 Principles of two beam interferometry, two laser beams reflected at both the reference plate, and the cylindrical surface interfere with each other, and the intensity of the interfering laser beam changes according with the gap between the two planes.

図 4 に示すように観察対象の円筒面の近くに参照板を設置する。レーザ光は参照板と円筒表面の 2 箇所反射される。参照板と円筒面のすきま h がレーザ半波長 $\lambda/2$ の整数倍に等しければ暗い干渉縞が出現する。干渉した結果としての反射レーザ光の強度は、すきま h により式(1)にしたがって変化する。

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \pi \frac{4h - (2n+1)\lambda}{\lambda} \quad (1)$$

ここで、 I は干渉後の合成されたレーザ光の強度、 I_1 と I_2 はそれぞれ参照板と観察円筒面で反射されたレーザ光の強度、 λ は使用したレーザ光の波長、 h は参照板と観察円筒面のすきま、 n は対応するフリンジナンバーである。

図 5 は鏡面研磨された SiC 平板をわずかにウェットブラストで加工した表面である。4 mm 四方の領域が加工されており、その領域の表面は砥粒加工により削り取られてわずかに窪んでいる。平面参照板を使用していない図 5(a)では、加工痕が不明瞭である。これは、広視野レーザ顕微鏡の深さ方向の分解能が不十分で表面高さを十分に識別できないからである。画像の下部中央右に見える太い線は場所を示すために書いたマーカである。一方、カバーガラスを参照板として観察面に接して置いたときの観察画像を図 5(b)に示す。明瞭な干渉縞が加工痕の上に生じていることが分かる。干渉縞の生成密度は非常に高く、縞間隔は狭くなっている。これより、干渉技術の導入により広視野レーザ顕微鏡の深さ方向の解像度が向上したことが分かる。このときの干渉縞本数は 17 本で、レーザ光の半波長は 244 nm である。したがって、両者を掛け合わせると加工痕の中心部の概略の深さが 5.53 μm と評価できる。触針式粗さ計でこの凹み中心深さを測定したところ 5.5 μm であった。したがって、干渉技術を組み込んで広視野レーザ顕微鏡の深さ方向の解像度を向上させる考え方は妥当であることがわかった。

図 5(c) はアルミ基材の表面に TiN コーティングを施した表面を、図 5(b)に示したのと同様にウェットブラスト加工したものである。ウェットブラスト加工前に TiN コーティング表面は研磨されているので、研磨傷が上下方向に確認できる。参照板を用いることで 7 本の干渉縞を確認することができた。顕微タイプではない干渉計を使った場合は、参照面と観察面の間の隙間に対応した干渉縞を得ることはできるが、表面の細かい傷が写っている表面画像を得ることはできない。しかし、図 5(c)では干渉縞の他に表面画像も取得することができた。これは、広

Table 1 Mechanical properties of the static pressure air-bearing spindle

Bearing stiffness	Radial	Over 25 N/ μm
	Axial	Over 121 N/ μm
Load carrying capacity	Radial	Over 60 N
	Axial	Over 289 N
Running accuracy	Radial	Under 20 nm
	Axial	Under 20 nm

視野レーザ顕微鏡の横方向の空間分解能が視野幅 10 mm にわたり 2 μm と高いためである。また、TiN コーティング表面がフレイク状にはく離している様子や細かな傷が存在している様子が分かる。したがって、これまで開発してきた広視野レーザ顕微鏡は、広視野レーザ干渉計としても十分に使用できる計測装置と考えることができる。

4. 実験方法

4.1 実験装置 (広視野レーザ顕微鏡)

図 6 には空気静圧軸受に取り付けられた円筒試験片と参照板を示す。参照板は、合成石英の平行平面基板(面精度 $\lambda/20$ 、平行度 2 秒以内、5 mm 厚)であり、円筒試験片近傍に円筒軸と並行に設置した。具体的には、直動ステージに固定したレーザ変位

Fig.6 Schematic diagram of the static pressure air-bearing spindle for the observing shaft and the interference plate, and their posture adjustment mechanism

Fig.5 Observed images of a mirror-finished flat surface of SiC that was lightly processed by wet blasting. The processed area measured about 4 mm $\times$ 4 mm. (a) without the interference plate (b) with the interference plate (c) polished surface of TiN coating on aluminum substrate with the interference plate.

Fig.7 Photograph of the static pressure air-bearing

計で、円筒試験片の母線方向形状を測定し、参照板を取り付けた後、先に測定した円筒試験片の形状に倣うようにレーザ変位計で計測しながら参照板の姿勢を調整した。干渉縞を観察するために円筒表面には高い回転精度が要求される。このために空気静圧軸受を用いた。表 1 には空気静圧軸受の機械的特性を示した。エンコーダの分解能は 4.36×10^{-6} rad である。画像計測中は連続して 1.66 rpm の回転速度で空気静圧軸受が回転している。空気静圧軸受の姿勢は、z 軸周りに回転でき、傾斜ステージにより x 軸と y 軸周りに傾斜させることができる。参照板の姿勢も同様に x 軸と y 軸および z 軸周りに回転させることができる。

図 7 は、空気静圧軸受と観察用の円筒および参照板の外観写真である。装置中央上部の黒いチューブは圧縮空気を空気静圧軸受に送るためのパイプである。

4.2 円筒試験片

図 8 は本研究で用いた 2 種類の試験片である。一つは、直径 10 mm のステンレス円柱である。円柱の外周は電解複合研磨を施して鏡面状態にしている。この試験片は段がついており、直

Fig.8 Two types of specimen: SUS 304 stainless steel shaft with mirror finish and cylindrical lens attached to a special jig

Fig.9 Observed image of the stainless steel shaft corresponding to the orange square in the specimen photo, measuring 10 mm wide and 31.4 mm long. The interference fringes are arranged in an array in the longitudinal direction, like a wood grain pattern.

径の太い部分が空気静圧軸受に固定される。

もう一つの試験片は曲率半径 12.9 mm のシリンドリカルレンズである。このレンズは、円形レンズと異なり一方向に光を集光したり拡大したりするために用いられる。このシリンドリカルレンズの表面形状は一般的な測定装置では計測が難しいとされている。シリンドリカルレンズの取り付けには特別な円筒治具を準備した。シリンドリカルレンズと曲率半径が同じ円筒を準備し、その一部を切り欠いて、そこにレンズを接着した。

5. ステンレス円柱の測定結果

5.1 測定画像

図 9 には、試験円筒の四角で囲んだ部分の表面観察画像を示す。この領域のサイズは、幅 10 mm で、周長が 31.4 mm である。円筒一周分の画像取得に要した時間は約 100 秒であった。得られた画素は、軸方向には 20000 画素、円周方向には 16000 画素となる。干渉縞は縦方向に並んでおり、木の年輪のような模様になった。この画像で、干渉縞密度が小さい場所は表面高さの変化が少ないところであり、逆に干渉縞密度が高いところは表面高さの変化が大きいところになっている。

図 9 の広域表示の画像では、干渉縞密度が高い領域では個々の干渉縞が識別できずに灰色に見える。そこで、表面画像の四角で囲んだ領域を拡大表示した。この拡大画像では、個々の干渉縞を明瞭に識別できることが分かる。また、拡大画像の中央には傷が存在することが確認できる。このように、傷の存在により干渉縞が影響を受けていることから、傷が近隣の表面高さをわずかに変えていることが分かる。

5.2 干渉縞の解析

広視野レーザ干渉計で得られた干渉縞の原画像を 2 値化したものを図 10 に示す。2 値化の処理において閾値はモード法により求めた（輝度のヒストグラムの 2 つのピークの間の値を採用

■ Flow chart of image processing

①thresholding → ②thinning → ③numbering → ④interpolating

③numbering

Height of ① is considered to be 0

④interpolating between fringes

$$Z = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + \dots + a_{2(n+1)-3}x^3y^{n-3} + a_{2(n+1)-2}x^2y^{n-2} + a_{2(n+1)-1}xy^{n-1} + a_{2(n+1)}y^n$$

In this work, $n=12$

Fig.10 Image processing procedures to analyze the interference fringe and obtain the surface height over the whole cylindrical object, thresholding, thinning, numbering, and interpolating.

する)。次に、2値化画像に細線化処理を施した¹²⁾。この処理により、干渉縞の太さは1ピクセルまで減じられる。次に、細線に番号を付けた。すなわちこの細線は、表面高さの等高線であるので、高さが異なる順に番号を付ける処理である。隣り合う等高線の高さは使用レーザ半波長の244 nmだけ異なっている。等高線相互の高さ評価法は考察に記載する。番号付けを誤ると正確な表面形状を得ることができなくなる。

最後に、全ての等高線高さデータを基に、等高線間の高さを補間した。画像の縦横方向の画素位置を x, y という2つの変数で表し、式(2)に示す2変数多項式近似を行った。各項の定数は最小二乗法を用いて求めた。

$$f(x, y) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5xy + a_6y^2 + \dots + a_{\Sigma(i+1)-2}x^2y^{i-2} + a_{\Sigma(i+1)-1}xy^{i-1} + a_{\Sigma(i+1)}y^i \quad (2)$$

円筒の全領域を近似することを目的に、最適な多項式の次数を50次まで変化させて調べた。その結果12次が干渉縞の高さデータとの誤差が最も小さくなる結果になった。しかし、全領域にわたり詳細に見た場合、必ずしも良い近似を示さない領域も存在するので、今後改善策を考える必要がある。

5.3 円筒表面の高さ分布

Fig.11 Surface height distribution analyzed from interference fringes obtained with the laser microscope with wide field of view. A deep valley along the y-axis is clearly seen.

Fig.12 Height distribution attached to the geometrically perfect cylinder from (a) front view and (b) back view. Positional relationships of the valleys and peaks to the cylinder can be understood intuitively.

図11は、ステンレス円筒試験片の表面高さ分布である。 x 軸は円筒の母線方向に対応し、 y 軸は円周方向に対応する。 z 軸は円筒の半径方向の位置、すなわち高さに対応する。 x 軸の中央では y 軸に沿って深い谷部が存在することが分かる。谷の左側にはやはり y 軸に沿って山の頂上がある。これは、円筒試験片を準備するときの切削時に形成されたものが、複合電解研磨を経ても残ったものと考えられる。円筒全面にわたり高い山と低い谷の差は約12 μm であった。図9には、木目状の干渉縞パターンが見られた。これらの領域は、干渉縞の密度が低いところであり、図11でいえば山の山頂や峠および谷部など高さ変化の少ない場所に対応する。

図12は、幾何学的に完全な仮想円筒面に図11のカラーチャートを巻付けその(a)前方および(b)後方を表示したものである。谷と山が円周方向に配向している様子がよく分かる。円筒面の谷と山の位置的な関係が直感的に理解できる図となっており、有用な表示方法であることが分かる。

6. シリンドリカルレンズの観察結果

図13はシリンドリカルレンズの幅10 mmの領域、すなわちオレンジの枠で囲まれたところを観察した画像である。専用治具の姿勢は参照板に対して調整されているので、干渉縞の密度は最小となっている。一方で、シリンドリカルレンズは専用治具に姿勢を合わせて接着されている。干渉縞の上部1/3は干渉縞生成密度が小さくなっている。これは、この部分の円弧が理想的な円筒曲面に非常に近いことを示している。残りの領域では、干渉縞生成密度が高くなっており、シリンドリカルレンズの円筒曲面が専用治具のものから遠ざかっていることが分かる。しかしながら、今回の干渉縞像で粗密に拘わらず全ての縞が確認

Fig.13 Measured image of the cylindrical lens and the magnified image of the orange square area, dense interference fringes are visible

できることが分かった。したがって、5.2 節で行ったような干渉縞解析を行うことでシリンドリカルレンズの円筒形状を求めることができる。

7. 考 察

緒言で述べたように、円筒面形状の非接触測定に関して、Andre et al.⁸⁾ らや Viottia et al.^{9,10)} らにより、WLI 法を利用した 2 つの計測方法が報告されている。それらは 45° 傾斜した円錐形のミラーを参照面として利用するものであり、既存の白色干渉計が使用できる反面、高精度な形状を持つ円錐ミラーを用意しなければならない不便がある。これに対して、本方法では単純形状の平面参照板を準備するだけで円筒面を計測できる利点がある。また、WLI などの既存の方法では、CCD 素子を用いているために撮像素子の画素数によって空間分解能に制限があり、また、原理的には形状測定を目的としたもので詳細な表面画像を測定することは難しい場合が多い。

広視野レーザ顕微鏡では、高い空間分解能を有することが特徴であるが、それゆえに難しい問題も生じる。この顕微鏡で計測した円筒面の 1 画面当たりの画像サイズは、20000 画素×16000 画素=3 億 2 千万画素である。1 画素は 8bit グレースケールとしているので、1 画像のファイルサイズは 320MB となる。干渉縞解析に 4 ステップの位相走査法を適用する場合、参照板をステップ移動させて 4 枚の画像を取得することになり、画像の取得時間だけでも 7 分弱を要する。その長い測定時間中には、装置の振動や熱変形が測定結果に影響を与えることが考えられる。また、画像ファイルが大きいため位相解析の演算時間も膨大なものになると予想できる。単純に考えて一般的な観察装置の 400 倍大きな画像を取得しているため、400 回の位相走査法演算と 400 回のステッチング作業時間を求められているのと同じである。広範囲な画像を取得できるのは良いが、その後の画像処理が負担となる。そのため、相互の干渉縞の高さ関係を 1 枚の観察画像から求める手法の開発が今後の課題と言える。今回の画像観察では、直動ステージに固定したレーザ変位計を使用して、円筒試験片の母線方向の形状を測定した。図 9 に示すように、干渉縞は円周方向に生じるために、上記の測定を一度行うことで、この円筒試験片については干渉縞相互の高さ関係を決定することができた。

そもそも、視野と深さ方向の分解能はトレードオフであるため、広視野レーザ顕微鏡では、視野を広くしたことに伴い深さ方向の分解能が低くなっている。すなわち、レーザを走査するために $f\theta$ レンズの NA は小さくせざるをえず、そのために深さ方向の分解能が低くなっている。この点を改善するために本研究では平面参照板を導入した。また、光源として用いている単色レーザ光は、WLI 法などの白色光と異なりコヒーレント長が長い。

$f\theta$ レンズの NA が小さいことは、一見 3 次元形状計測には短所に見える、しかし、このことは本手法において、ビームウェスト部が長くなり、ある程度デフォーカスの状態でも形状測定が影響を受けにくいことにつながる。すなわち、深さ方向に参照板を走査させなくても、数十～数百 μm の高低差において干渉縞を得ることができる¹³⁾。実際に図 5 および図 9 で示したように観察表面にうねりが存在し高さが一定でなくても、表面の凹凸、粗さ、傷などが鮮明に写っている。そのため、本装置はナノレベル 3 次元形状計測装置でありながら光軸方向の精密な走査機構が不要であるという大きな利点を有する。さらに、平面

参照板なので市販品を使用できる利点がある。

今回は、広視野レーザ顕微鏡を用いて円筒面の形状を計測したが、将来的には球面の形状も測定できるようになると考えている。この場合、空気静圧軸受を 2 台使用することになると思われるが、将来的にこのような計測に挑戦していきたい。

8. 結 言

これまでの研究で、著者らが開発した広視野レーザ顕微鏡を用いることで円筒全面の表面画像が短時間で取得できることを示した。しかし、広視野化と深さ方向の解像度にはトレードオフの関係があり、広視野レーザ顕微鏡では深さ方向の解像度を犠牲にしていた。

本研究では円筒面観察において深さ方向の解像度をナノレベルに向上させるために、これまでの観察法に 2 光束干渉技術を導入した。

参照板を設置することで円筒全面の干渉縞を得ることに成功した。また、干渉縞を解析することにより円筒全面の表面形状をナノレベルで表示することが可能となった。

本測定方法には、装置振動などの影響が含まれるために、今後は測定装置の測定精度を調べていく予定である。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (23360075) で実施された。

参 考 文 献

- 1) 新田勇, 菅野明宏, 岡本倫哉, 長岡 泰: シュリンクフィックスを用いた広視野レーザ顕微鏡, 精密工学会誌, **73**, 11, (2007) 1226.
- 2) I. Nitta, R. Ebuchi and H. Huan: Observation of Cylindrical Surfaces by Laser Microscopy with a Wide Field of View, Journal of JSEM, **10**, Special Issue, (2010) 119.
- 3) P.R. Yoder: Opto-mechanical systems design, third edition, CRC Press, (2005) 202.
- 4) 塚田忠夫, 劉書桂, 笹島和幸, 金田徹: 円すいテーパ部品の形状誤差評価法—線形回帰手法を応用した反復アルゴリズム—, 精密工学会誌, **53**, 5, (1987) 762.
- 5) 加藤秀雄, 中野嘉邦, 野村雄二郎: 精密円筒研削における机上真円度測定システムの開発, 精密工学会誌, **56**, 5, (1990) 861.
- 6) 于大海, 塚田忠夫: 偏心軸の三次元形状測定と関連形体の精度評価 (第 1 報)—偏心円筒の形状把握—, 精密工学会誌, **61**, 7, (1995) 969.
- 7) A. R. Sousa, A. Albertazzi and A. Dal Pont: A radical white light interferometer for measurement of cylindrical geometries, ASPE Proceedings, October 9-14, 2005 Norfolk, ZA.
- 8) M.R. Viotti, A. Albertazzi, A.V. Fantin and A. Dal Pont: Comparison between a white-light interferometer and a tactile formtester for the measurement of long inner cylindrical surfaces, Optics and Lasers in Engineering, **46**, 5, (2008) 396.
- 9) M.R. Viottia, A. Albertazzia, A. Dal Pont and A.V. Fantin: Evaluation of a novel algorithm to align and stitch adjacent measurements of long inner cylindrical surfaces with white light interferometry, Optics and Lasers in Engineering, **45**, (2007) 852.
- 10) M. Tukea, A. Taylora, A. Roquesa and C. Maul: 3D linear and volumetric wear measurement on artificial hip joints—Validation of a new methodology, Precision Engineering, **34**, (2010) 777.
- 11) P. J. Bills, R. Racasan, R. J. Underwood, P. Cann, J. Skinner, A. J. Hart, X. Jiang and L. Blunt: Volumetric wear assessment of retrieved metal-on-metal hip prostheses and the impact of measurement uncertainty, Wear, **274–275**, (2012) 212.
- 12) 高井信勝: 2 値画像の細線化における連結数の役割の再検討, 北海学園大学工学部研究報告, **38**, (2011) 155.
- 13) 本合邦彦, 月山陽介, 鈴木天, 新田勇: レーザスポット走査型干渉計の開発—小型レンズ金型の形状計測, 精密工学会誌, **80**, 3, (2014) 302.