



観察面の上下振動の影響を受けない光を用いた 超精密面の全方向粗さ測定

安達 正明*・八坂 勝彦**・川口 格***

*兵庫県立工業試験場機械電子部 〒654 神戸市須磨区平町 3-1-12

** (株)コーガク 〒561 豊中市名神口 3-8-2

***大阪府立大学工学部機械工学科 〒591 堺市百舌鳥梅町 4-804

(1987年7月13日受理)

Optical Measurement Method of RMS Roughness on All the Directions of Super Smooth Surfaces Independent of Vertical Vibrations of Measuring Surface

Masaaki ADACHI,* Kathuhiko YASAKA** and Itaru KAWAGUCHI***

*Industrial Research Institute of Hyogo Prefecture,
3-1-12, Yukihiro-cho, Suma-ku, Kobe 654

**Kogaku Co., 3-8-2, Meishinguchi, Toyonaka 561

***University of Osaka Prefecture, 4-804, Mozu-Umemachi, Sakai 591

A shearing interference microscope has high image stability even under vertical vibrations. This paper proposes a simple measurement method of rms roughness on all the directions of super smooth surfaces. Using this microscope, 2-10 nm rms specimens are measured. Measurement system with 32 bit workstation can measure the roughness on all the directions (2 degree step) of one specimen within 180 s.

1. はじめに

金属ミラー面や磁気テープ面、そして磁気ディスク面等の超精密な軟質加工面の評価を非接触にかつ正確に行なう方法として、光を用いる粗さ測定法が注目されている。しかしこれまでに開発されている方法のうち、光干渉や臨界角反射、そして焦点はずれ等を用いる profilometer と呼ぶことのできる方法は¹⁻⁴⁾、ほとんどが床振動等の全くない環境下で用いることが望ましく、そのため振動環境となる加工現場等での計測への応用はむずかしい。加えて、加工面の方向性の評価を行なう場合には、一部のものを除き¹⁾、測定面を実際に回転させながら2~3の方向で粗さ測定を行ない、得られたデータを通して面の方向性を把握する必要があり、方向性の定量的評価に用いる場合は不十分な機能のものが多い。また、測定面の振動の影響をあまり受けないレーザー光の

鏡面反射成分を利用する方法は^{5,6)}、光の反射領域の平均粗さを測定するものであり、面の方向性の定量的評価法として確立されるに至っていない。このため軟質材料の超精密加工技術の研究開発を進めるうえで、超精密面のため目視では判別しにくい加工面の方向性や粗さを、微小振動を伴う環境下においても、簡単に定量化できる新たな方法の開発が必要となっている。

微小な上下振動を伴う環境下でも粗さの評価を可能にする方法として、われわれはシャーリング干渉顕微鏡画像をコンピュータ処理することによる、一方向の粗さ測定法をこれまで研究してきた^{7,8)}。シャーリング干渉であるため、原理的に干渉画像は観察面の微小な上下振動の影響をほとんど受けない。これまでに得られた結果から、干渉させる二つの波面を平行とする条件を用いる方法は、2~10 nm の RMS 粗さをもつ超精密加工面の測定が可能であり、0.5 nm 以下の繰返し精度をもつもの

であることがわかった⁹⁾。

ここでは、用いているシャーリング干渉画像が基本的に凹凸の3次元情報をもつことに着目した。そしてこれまでの方法を発展させ、加工面の粗さならびに方向性の評価が測定面の回転を伴わないで簡単に行ないうる、微小な上下振動の影響を受けない超精密加工面の全方向粗さ測定法について、原理と実験結果を述べる。

2. 粗さ測定の原理

シャーリング干渉顕微鏡は Fig. 1 に示すように、二次元平面内の点 r において高さ関数 $h(r)$ をもつ一つの超精密な観察面に関して二つの拡大像 $Im\ 1$, $Im\ 2$ を作る。そして干渉顕微鏡の調整ノブを回転することにより、拡大像 $Im\ 2$ だけを水平方向にずらすことができる。Fig. 1 ではこのずらし量をシャーリングベクトル x で表す。いま、シャーリングベクトルの大きさ $|x|$ を観察面の自己相関長に比べて十分に大きく設定する。そうすると、干渉する二つの光を反射している2点の高さの相関はほとんどゼロとなる。ゆえに、拡大像間の光路差を $g(r)$ とすると $g(r)$ は観察面の上下振動 $v(t)$ の影響を受けず、また面内での $g(r)$ の RMS 変動 σ_g は、観察面の高さ関数 $h(r)$ の RMS 変動 σ_h と統計的に密接に関係づけられ、以下の関係をもつ⁹⁾。

$$\sigma_g = \sqrt{2} \sigma_h \quad (1)$$

シャーリング干渉顕微鏡では違う調整ノブにより二つの拡大像間の x 方向の平均光路差も任意の値に設定が可能である。そこで $g(r)$ が干渉光強度の変化として最も敏感に現われるように、拡大像の平均間隔を干渉光の波長 λ の $1/8$ 倍 (反射型であるため光路差は $\lambda/4$ 倍となる) に調整すると、干渉画像を用いて $g(r)$ を感度よく観察できる。この干渉画像の光強度は $g(r)$ だけでなく、光の振幅やコヒーレント長の関数でもある。ここで干渉

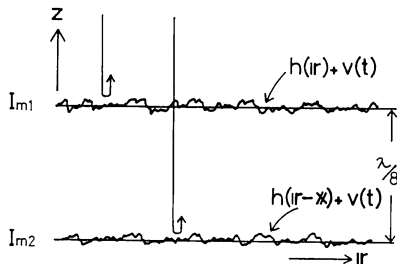


Fig. 1 Two enlarged images obtained of one rough surface through a shearing interference microscope: $h(r)$ is the surface profile, x is the shearing vector, and λ is wave length of interference light.

光強度から求めたいのは $g(r)$ である。そこで $g(r)$ の測定に先立って、二つの拡大像の平均光路差を $\lambda/8$ から強制的に一定微小量だけ変化させ、そのときの干渉光強度の平均変化分を求め、単位光路差の変化に対する干渉光強度の変化を計算する。この計算値を用いると干渉画像から $g(r)$ が求まる⁹⁾。

ところで、このようにして干渉画像の全面にわたって $g(r)$ を求め、ある測定方向に沿っての RMS 変動値 σ_g を計算すると、この値は統計的には場所だけでなく測定方向にも独立となってしまう。しかし一般に $h(r)$ の変動値である RMS 粗さ σ_h の測定を行なう場合は、通常、うねり成分を除くために cutoff 波長を特定の値に選び測定を行なう。このため測定面に方向性がある場合、測定方向により cutoff される粗さの割合が異なり、粗さが測定方向により違う。このことは粗さ測定では馴染みの深い現象でもある。そこで本報告における加工面の方向性の評価でも同じように cutoff 処理後の光路差変動 σ_g を用いる方法を採用した。そして(1)式を用い、 σ_g より方向別の RMS 粗さ σ_h を求めた。

ただし以上の原理では、観察面は超精密面であり、光の振幅やコヒーレント長は干渉画像内で一定あり、観察面の上下振動の振幅は顕微鏡の焦点深度以下だと仮定している。

3. 測定装置と測定方法

シャーリング干渉顕微鏡を用いた測定装置を Fig. 2 に示す。照明光には 500 W の超高压水銀照明装置からの光を 574 nm の干渉フィルターに通して準単色光にしたものを用いた。顕微鏡はカールツァイス社製インターファコー型シャーリング干渉顕微鏡である。シャーリング干渉計はマッハツェンダー型である。対物レンズは 25 倍 (NA=0.5) であり、干渉光の波長は 574 nm であるため、分解能は約 $0.7\ \mu\text{m}$ となっている。また、シャーリング長はこのレンズを用いたとき、観察面の自己相関長より大きくなるように試料面上で約 $50\ \mu\text{m}$ に設定した。

干渉画像のコンピュータへの取込みは池上通信機社製計測用 TV カメラ CTC-2600 (740×560 画素) を用いた。カメラコントローラにはコントラスト増強回路が装着されている。25 倍の対物レンズを用いたとき、このカメラを用いて、観測面上で $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ の領域を 512×512 点に分けてサンプリングが可能となる。約 $0.6\ \mu\text{m}$ 間隔となるサンプリング長で読み込んだ光強度信号は 8 bit A/D 変換を行ない 256 階調に量子

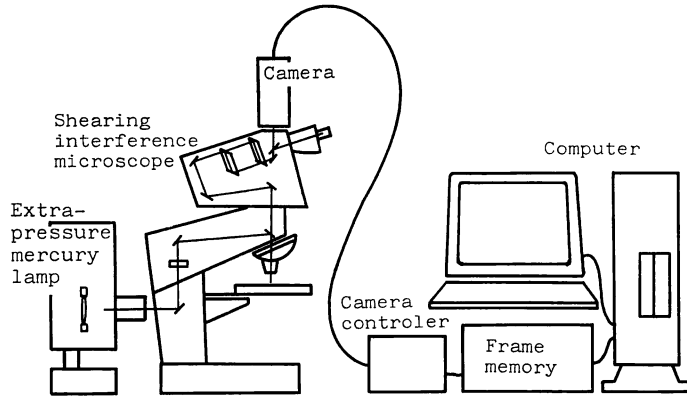


Fig. 2 Measurement system of rms roughness on all the directions of super smooth surfaces.

化し、コンピュータに取り込んでいる。

ところで、取り込んだ二次元画像から任意方向の粗さの測定を行なう場合、一般に測定方向はカメラの画素の並びの方向とは異なる。その結果、光強度測定に必要な座標のすべてが、読取り画素の一つの座標に対応するとは限らない。この場合、測定したい座標 (x, y) の干渉光強度 $I(x, y)$ は、点 (x, y) に最も近接している周囲の4画素の光強度 $I(i, j)$, $I(i, j+1)$, $I(i+1, j)$, $I(i+1, j+1)$ に4画素への距離に応じた重みを掛けて、その期待値を次のように計算した。

$$\begin{aligned}
 I(x, y) = & (i+1-x) \cdot (j+1-y) \cdot I(i, j) \\
 & + (x-i) \cdot (j+1-y) \cdot I(i+1, j) \\
 & + (i+1-x) \cdot (y-j) \cdot I(i, j+1) \\
 & + (x-i) \cdot (y-j) \cdot I(i+1, j+1) \quad (2)
 \end{aligned}$$

これらの演算ならびに cutoff 波長処理に関しては、1 MIPS の計算スピードをもつ 32 bit エンジニアリングワークステーション上で、FFT (fast Fourier transform) を中心とする演算を行なって粗さデータを求めた。

4. 測定結果

最初に、シャーリング方向と測定方向を平行とする場合の干渉画像を用いて一方向での粗さ測定を行なった。結果を Fig. 3 に示す。単位光路差当たりの干渉光強度変化を求めると、光路差の強制変化量は 10 nm とした。測定値は5か所の平均であり、A~Hは研磨試料、Iは切削試料である。測定性能の評価のため、触針粗さ測定装置を用いて測定した結果を比較のため X 座標値として示した。

次に研磨試料Fに関して、干渉画像から全方向 (2° ごと 360° まで) の粗さ測定を行なった。結果を Fig. 4 に

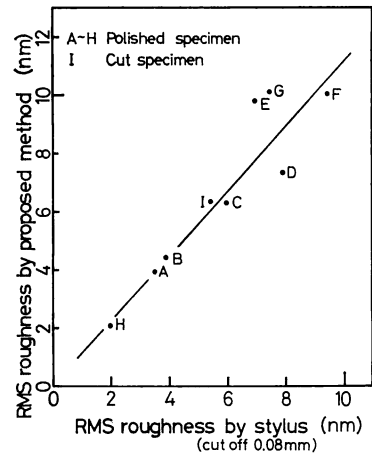


Fig. 3 Comparison of the rms roughness by a stylus and by a shearing interference microscope with the measuring direction parallel to a shearing direction.

示す。図は測定方向を角度に、また得られた粗さを半径として全方向測定結果を描画している。各方向の値は5か所での測定値の平均を示しており、シャーリング方向は 90° の方向である。干渉画像の取込みは、単位光路差当たりの干渉光の強度変化をを求める場合も含めて2回である。計算スピードを速くするため、各方向における測定領域は画像の中心部の $150 \mu\text{m}$ に限定し、約 $0.6 \mu\text{m}$ 間隔で 256 点のサンプリングを行なっている。測定時間は干渉画像の取込みに 10 s、またコンピュータによる計算は約 3 min であった。

ところで測定方向別の全方向粗さ測定を測定面の回転を行なわないで求めたわけだが、このような測定では入力データと出力結果の間に介在する測定装置は測定方向に対し機能的に回転対称であることが一般的に必要である。ここで用いたシャーリング干渉顕微鏡は、特定のシ

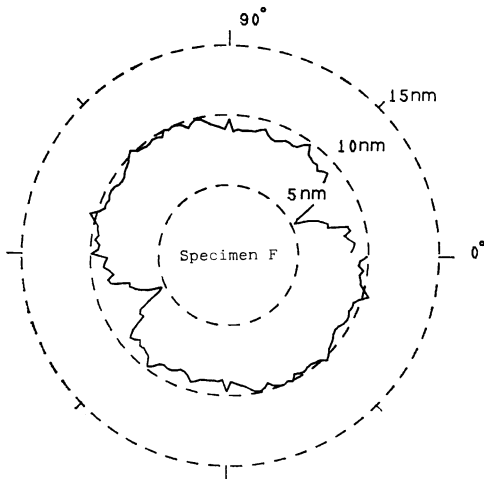


Fig. 4 Roughness measurement on all the directions of specimen F.

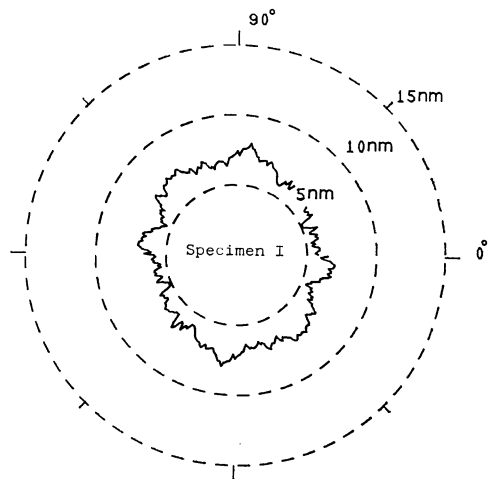


Fig. 6 Roughness measurement on all the direction of cut specimen I.

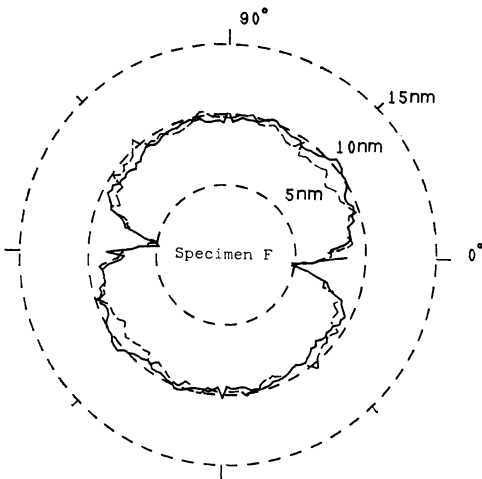


Fig. 5 Roughness measurement on all the directions of specimen F with a different shearing direction from that of Fig. 4. Dotted line is the rotated shape showed in Fig. 4.

ャーリング方向を有する。しかし、シャーリングベクトルの大きさを測定面の自己相関長より大きくすることにより、粗さ測定における機能は回転対称になると考えられる。シャーリング方向が実際の測定結果に影響しないことを実験的にも再確認するため、同じ試料を回転させて再度測定した結果を Fig. 5 に示す。結果は Fig. 4 に示したものを回転した結果（図中の破線）とほぼ同じであり、シャーリング方向は測定結果にほとんど影響していないことがわかる。

次に切削試料 I の測定結果を Fig. 6 に示す。切削面

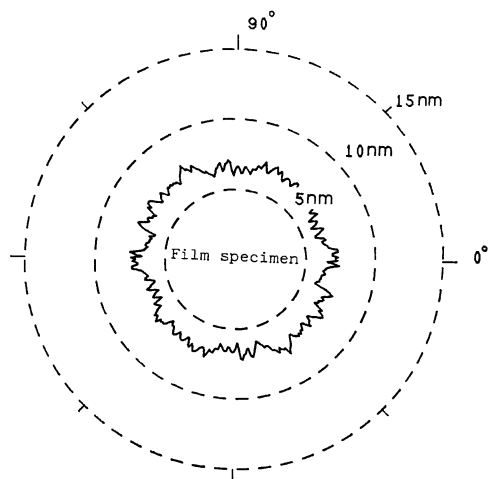


Fig. 7 Roughness measurement on all the directions of an isotropic film specimen.

の方向性および、方向性をもった成分と方向性をもっていない成分の強度比が簡単に識別できる。また、上述の A~I の試料以外に、方向性の少ない磁気フィルム面の測定結果を Fig. 7 に、また方向性のある磁気フィルム面の測定結果を Fig. 8 に示す。ただし、磁気テープ面は光反射率をあげるため、金属を約 $1\mu\text{m}$ 蒸着してある。

5. 考 察

本方法の測定誤差について簡単に評価する。測定誤差に最も大きく影響する可能性をもつものに、仮定した条件と実際の測定条件とのずれがある。しかし、測定原理で用いた仮定、すなわち光の振幅やコヒーレント長が画

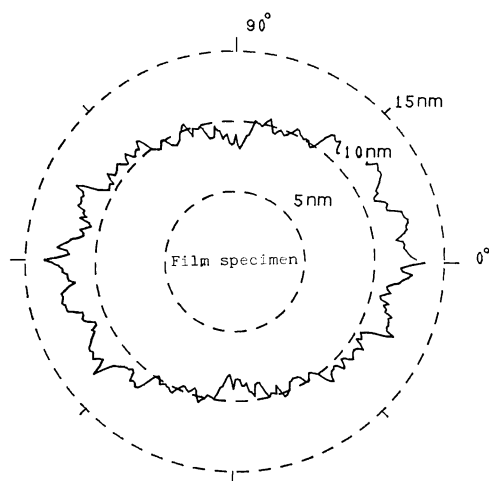


Fig. 8 Roughness measurement on all the directions of an aeolotropic film specimen.

像内で一定であるとした条件、と実際の測定条件との違いは本方法では測定値に影響しない⁷⁾。一方、シャーリング長が十分でないときは、見かけの粗さを小さくする影響を与えるが、これまでのわれわれのデータから RMS 粗さが 10 nm 以下の試料では 50 μm のシャーリング長は十分である⁸⁾。

そこで次に、全方向測定結果のなかによく見られる測定誤差についてその原因を検討した。Fig. 4~8 は測定試料が異なるため数値的な比較はむずかしいが、ほとんどの測定結果において測定方向が 0° と 90° のところに小さな突起がみられる。これは Fig. 4 と Fig. 5 の結果を比較すれば試料の方向性から生じるものでないことは明らかである。この原因は、結論を先に述べると、(2)式を用いたためとわかった。(2)式では求めたい点がカメラの画素の位置に対応していない場合、その点の光強度をその周囲の4点の光強度から計算している。この処理は結果として、周囲の4点の凹凸の平均化に似た操作を行なって、必要な点の光強度を求めることとなっている。0° と 90° の場合はこの計算が必要とならない。そのため、0° と 90° 以外の方向では 0° と 90° の測定値に比べ粗さが見かけ上小さくなったのである。しかし、これは固定されたカメラを用いて全方向の測定をする場合、現在のところ避けようのない計算である。カメラの分解能がより上がっていけば、この種の処理による誤差は減るだろう。ただし、現在の測定結果でも面性状の評価には十分有用であると考えられる。

ところで、得られた全方向粗さ測定結果を用い、試料の方向性の強弱のより簡単な定量的比較を行なう方法と

して、われわれは現在次のようなものを検討中である。全方向の粗さデータを2回の回転対称成分、3回の回転対称成分、4回の回転対称成分、…とその粗さ強度を回転対称の次数別成分に分けて考えるのである。そして、それらの成分の相対比率を定量的比較データとする方法である。この手法に関しては、データの蓄積を含めて今後積極的に開発に取り組みたいと考える。

6. ま と め

シャーリング干渉顕微鏡は、観察面の微小凹凸を微小な上下振動の伴う環境下においても安定よく観察できるという特徴をもつ。加えて、この顕微鏡画像は基本的に観察面の3次元情報をもっており、このため、面の情報を簡単に取り込めるという長所をもつ。そこでこれらの長所をいかし、2~10 nm RMS の試料を対象とする、観察面の上下振動の影響を受けない全方向の粗さ測定法について原理ならびに実験結果を述べた。

切削試料、研磨試料ならびに磁気フィルム試料についての全方向の粗さ測定結果から、試料による方向性の強さの違いが簡単に評価でき、本方法の有用性を確認できた。

これらの測定結果に関しては、その粗さ強度を2回の回転対称成分、3回の回転対称成分、4回の回転対称成分、…と分けて分類を行なうことにより、より簡単な定量的比較を行なう方法の開発を、今後予定している。

文 献

- 1) B. Bhushan, J.C. Wyant and C.L. Koliopoulos: "Measurement of surface topography of magnetic tape by Mirau interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 1489-1497.
- 2) 小沢則光, 河野嗣男, 三井公之, 武者 徹, 宮本紘三: "非接触光学式微細形状測定ヘッド (HIPOSS-1)," *精密工学会誌*, **52** (1986) 2080-2086.
- 3) 三井公之, 坂井 誠, 木塚慶次, 小沢則光, 河野嗣男: "高感度非接触粗さ計の開発," *精密工学会誌*, **53** (1987) 328-333.
- 4) J.W. Buechele and N.B. Seebe: "Electro-optic surface profiler," *IBM Tech. Disclosure Bull.*, **26** (1983) 1528-1530.
- 5) T.V. Vorburger and E.C. Teague: "Optical techniques for on-line measurement of surface topography," *Precis. Eng.*, **3** (1981) 61-83.
- 6) T. Horiuchi, Y. Tomita and R. Kammel: "Surface roughness measurement with speckle intensity distribution detected using a linear image-sensor," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21** (1982) L743-L745.
- 7) M. Adachi and K. Yasaka: "Roughness measurement using a shearing interference microscope," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 764-768.
- 8) 安達正明, 八坂勝彦: "シャーリング干渉顕微鏡を用いた超精密加工面の RMS 粗さと自己相関関数の測定," *精密工学会誌*, **53** (1987) 65-70.