投影された光学的パターン像による表面粗さの測定[†]

稲 荷 隆 彦*

Surface Roughness Measurement by Optical Pattern Projection

Takahiko INARI*

This paper is concerned with the measurement method for surface roughness by optical pattern projection. This method can be classified into two fundamental configurations. The one has one imaging system including the sample surface placed on the way of the optical pathes, which the author calls "OTF method". The other has two step imaging systems. The first system projects the input image on the sample surface, and the second forms the output image from the reflected image on the sample surface. The author calls the second method "Re-imaging method". The author examined the contrasts of the output images by the OTF method experimentally, and found the correlation between the contrast data and calculated results of specular component e^{-g} expected from the scattering theory. The OTF method is restricted the range of measurement for the roughness Ra below about $0.1\mu\text{m}$. The possibility for larger range measurement by the Re-imaging method is examined experimentally in this paper.

Key Words: optical measurement, surface roughness, pattern projection

1. はじめに

金属等の表面粗さを非接触で計測することは、オンラインの表面性状の検査や、インプロセス計測による加工制御などにとって重要な課題である。表面を光学的に非接触計測する方法はいくつか知られている。大きく分けるとレーザの回折像を用いる方法^{1), 2)}と、ハロゲンランプ等のインコヒーレント光源による表面の反射特性を利用する方法とがある。後者の中にも表面からの正反射光成分 (Specular Component) と拡散反射光成分との比率を測定する方法³⁾や、それと基本的に同様であるが、スポット的な入射光に対する反射のひろがりやを、二次元的なセンサで計測する方法⁴⁾がある。もう1つの方法として、被測定面に何らかの光学的パターンを投影し、反射された像の歪みや解像度、コントラストなどの画質から表面の性状を計測する方法で、ここではこの方法をパターン投影法と呼ぶことにする⁵⁾。この報告ではパターン投影法をとりあげる。

パターン投影法は実用的な方面では塗装表面の光沢の計測⁶⁾や、表面上の突起や欠陥の検出等への応用⁷⁾が試みられてきた。これらのパターン投影法の研究例は特定の応用対象に限定されたものであり、画質と表面性状との関連の体系的

な研究はまだ十分行なわれているとはいえない。表面粗さはその中心線平均粗さ Ra で、ほぼ $0.1\mu\text{m}$ 付近を境として測定法が異なることは以前に報告した⁵⁾。本報告ではまず中心線平均粗さ Ra が $0.1\mu\text{m}$ より小さい場合の出力画像の画質について述べる。出力画像のコントラストが Ra の変化に依存し、散乱の理論から予想される正反射光成分の変化と相関性があることを実験的に示す。さらに Ra が大きい領域においては、以前に提案した2段階の結像方式により、表面粗さが計測できる可能性について論じる。

2. パターン投影法の原理

パターン投影法とは、特定の光学的パターンを被測定表面に投影し、結像系により形成された像の歪みや解像度、コントラストなどの画質の変化から表面状態を計測する方式を総称している。被測定面を含む結像光学系としては、基本的には Fig. 1、および Fig. 2 に示す光学系に大別される。Fig. 1 は光源からの光によりパターンスリットの像が1つの結像レンズにより観測面上に結ばれ、被測定表面はその光路の途中に置かれる。この場合は被測定表面は結像光学系の一部をなし、その光学的伝達関数 (OTF) を決める要素となる。したがって筆者はこの構成を仮に伝達関数法と呼ぶ⁵⁾。

もう1つの構成としては、Fig. 2 に示すように、2段階の結像光学系があり、最初のレンズによりパターンの像を被測定表面上に投影し、その反射像を第2のレンズで観測面上に結像する。結像された像の歪みやコントラストなどの画質は被測定表面により決定される。この画質から表面性状を計測

[†] 第34回計測自動制御学会学術講演会にて発表 (1995・7)

* 近畿大学生物理工学部 和歌山県那賀郡打田町西三谷 930

* Faculty of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University, Naka-gun, Wakayama
(Received November 19, 1997)

(Revised July 2, 1998)

Fig. 1 Optical configuration of the method using the sample surface as a factor of OTF

Fig. 2 Optical configuration of the method using re-imaging optics

する。この構成を筆者は再結像法と呼んでいる⁵⁾。

伝達関数法は中心線平均粗さ Ra にしては $0.1\mu\text{m}$ 以上の表面粗さでは明確な像が形成されず、計測に限界があることは実験的に知られている⁵⁾。1つの結像系において、座標系として光軸の方向を z 、それに垂直の面の2軸を x, y とする。結像系の光学的伝達関数 (OTF) を $H(s, t)$ とし、入力パターンと観測面上での出力パターンの光強度分布をそれぞれ $i_i(x, y)$, $i_o(x, y)$ 、それぞれのスペクトルを $I_i(s, t)$, $I_o(s, t)$ とすると、結像の特性は一般的に、

$$I_o(s, t) = H(s, t)I_i(s, t) \quad (1)$$

で表される。ここで s, t は光学系における空間周波数である。

この式で伝達関数 $H(s, t)$ は結像系の瞳関数 $h(x, y)$ の自己相関関数で与えられる。 $h(x, y)$ は次式で表される。

$$h(x, y) = r(x, y) \exp[jkw(x, y)] \quad (2)$$

ここで $r(x, y)$ は結像系の透過率分布、 k は波数、 $w(x, y)$ は結像系の波面収差に相当する量で、結像系を出てくる光の位相を決める。この場合は被測定表面上での反射によって生じる光の光路差が含まれる。

この光路差は実際には被反射表面の粗さの振幅により決まる。したがって被測定表面から反射された光が大きな位相のずれを持たず、進行波とみなせるためには、 $w \ll \lambda$ 、したがって表面粗さの振幅としては $0.1\mu\text{m}$ 以下であることが必要であり、これ以上の表面粗さをもつ被測定表面が結像系内にあるときは、像の形成は困難になると考えられる。

3. 伝達関数法における表面粗さと散乱光

いま被測定表面からの反射光のパワーを、正反射成分 R_s と拡散反射光成分 R_d の和、

$$R = R_s + R_d \quad (3)$$

で表すことができるとする。伝達関数法において観測可能な像が形成されるためには $R_s \gg R_d$ でなければならず、これは上に述べた $w \ll \lambda$ に対応する。したがって観測される像の画質は R_s の表面粗さによる変化と何らかの関連があるものと考えられる。

この散乱のパワーについては散乱の理論としてよく知られている⁸⁾。簡単のため、表面の構造の振幅と光の入射、反射が同一平面内にあるとする。まず下記のようにパラメータ g を導入する。

$$\sqrt{g} = 2\pi \frac{\sigma}{\lambda} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (4)$$

ここで σ は表面粗さの振幅の標準偏差、 λ は光の波長、 θ_1 , θ_2 はそれぞれ被測定表面に対する入射角と反射角である。散乱光のパワーの平均 $\bar{R}$ は次式で与えられる。

$$\bar{R} = \left(\rho_0^2 + \frac{\sqrt{\pi} F^2 T}{2L} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! \sqrt{m}} e^{-v_x^2 T^2 / 4m} \right) e^{-g} \quad (5)$$

ここで L は光の照射範囲、 T は表面粗さの相関長、 v_x は波数に関する項で、

$$v_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)$$

である。 F は入射角と反射角に関するパラメータで、

$$F = \sec \theta_1 \cdot \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}$$

で与えられる。(5) 式の第1項は正反射に対応する項であり、 ρ_0 は散乱係数で、次式で与えられる。

$$\rho_0 = \text{sinc } v_x L$$

いま $g \ll 1$ である場合、(5) 式は、 $\sum$ の中の第1項のみとって、以下のように近似される。

$$\bar{R} = e^{-g} \left(\rho_0^2 + \frac{\sqrt{\pi} F^2 T g}{2L} e^{-v_x^2 T^2 / 4} \right) \quad (6)$$

正反射方向を取ると、(4) 式で実際の装置構成から、 $\theta_1 \approx \theta_2 \approx 30^\circ$ であるから、 $g \approx (4\pi\sigma/\lambda)^2$ としてよい。また $v_x \approx 0$ であり、したがって $\rho_0 \approx 1$ となる。

したがって正反射光成分の平均値 $\bar{R}_s$ は

$$\bar{R}_s \doteq e^{-g} \quad (7)$$

で近似される。(6) 式の第2項は拡散光成分に相当し、 $v_x \approx 0$, $T \ll L$ であり、 F はほぼ1に近い値を持つから、第1項に比べて非常に小さい値となる。すなわち R_s の R_d に対する比率はきわめて大きい。ここで $\sigma \approx Ra$ とすると、 Ra の変化に対する正反射光の関係が求められる。

結像系によって形成される画像のコントラストなどの画質は、上に述べた散乱光の正反射成分の変化となんらかの相関関係があるのではないかと予想される。(6) 式では第1項が第2項に比べ十分大きいので、コントラストが第1項と第2項の比で表されると想定すると、ほぼ1となる。しかし $g \approx 1$ に近い領域になると、1から下がってくると予想される。こ

Table 1 Samples used in the experiments
upper: Sample NO, lower: $Ra(\times 10^{-2}\mu m)$

Mirror	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	2.9	3.0	3.1	3.3	4.1	4.4	5.5	6.5	7.7

の相関関係を求めることは実用上重要であり、ここでは実験的に上記の正反射成分の減衰との関連を求めた。

4. 伝達関数法の実験

中心線平均粗さ Ra が $0.1\mu m$ 以下になる表面試料を用意し、表面粗さと画質の関連を実験で求めた。画質を表すパラメータとして像のコントラストを用いた。実際のコントラストは観測する光学系により影響を受ける。入力のパターンスリットとして格子状のスリットとナイフエッジの双方について実験し、その相違についても考察した。

4.1 表面粗さ試料

使用した表面粗さの試料を **Table 1** に示す。材料はステンレス鋼板で、 $50 \times 50mm$ の平板の表面をペーパーで研磨して作成した。表面上での粗さのばらつきはおおきく、測定に使用する試料中央部分での Ra でおおよそ $0.01\mu m$ 程度のばらつきがあった。Table 1 に示した値はそれらの測定値の平均である。今回はこの値を試料の代表値とした。したがって Ra の差が $0.01\mu m$ 以下の試料間のデータの差は誤差の範囲に入ると考えられる。鏡の Ra は一応 0 とした。

4.2 実験装置の構成

伝達関数法の実験装置の構成は基本的には Fig. 1 と同じである。Fig. 3 に結像系の観測面上での像の光強度分布を測定する構成を示す。入力のスリットパターンとして格子スリットとナイフエッジを用いた。いずれも光の透過部には、拡散光とするため光拡散用テープをはり付けた。光源として $Ra < 0.1\mu m$ の測定範囲を対象とするため、波長 $0.4 \sim 0.8\mu m$ の可視光を含むハロゲンランプを用いた。格子スリットパターンの形状は Fig. 4 に示す。外形はほぼ $25 \times 14mm$ で、4 本のスリットがある。格子の遮断部（暗部）はほぼ $1.2mm$ 、透過部（明部）は $1.8mm$ の幅を持っている。結像レンズの口径は入力像に対し十分大きくとるため、 $80mm$ とした。また使用する光束を近軸光線とするため、 $20 \times 20mm$ の開口をレンズの中心部に設けた。この開口の大きさは像のコントラストに大きく影響する。

観測面（結像面）では受光面積 $0.5mm^2$ のフォトダイオードを格子、またはナイフエッジを横切る方向に移動させて走査し、光強度分布を測定した。今回の測定ではスリットパターンと結像レンズの距離を $395mm$ 、レンズと試料表面の距離を $115mm$ 、試料表面から観測面までを $290mm$ にとっている。

4.3 格子パターンによる実験と結果

観測される格子像の例を Photo. 1 に示す。写真の (a) は鏡の場合の像で、(b) は Ra が $0.041\mu m$ の試料からの像である。見たところの明瞭度に大きな差があることがわかる。

Fig. 3 Configuration of detection system for intensity distribution of the output image in OTF method **Fig. 4** Lattice slit pattern

格子像の観測面上での光強度分布の測定例を Fig. 5 に示す。図の (a) は鏡の場合の測定結果で、(b) は Ra が $0.03\mu m$ の試料の場合である。

このような光強度の測定結果から画質のパラメータとしてのコントラストを下記のようにして求めた。格子像の各縞の明部と暗部の光強度は測定光学系の特性のため一様でなく、また試料表面の設定のしかたによって変化する。ここでは Fig. 5 の左側から第 1 ピークの最高値と、その次の暗部の最低値とで、下記の式によりコントラストを計算し、これを Contrast 1 とし、第 2 のピークの最高値とその次の暗部の最低値との間で計算したコントラストを Contrast 2 とする。最後に Contrast 1 と Contrast 2 の平均値をとり、これをコントラストのデータとした。コントラスト C は

$$C = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}} \quad (8)$$

で定義する。ピークの最高値を I_{MAX} 、最低値を I_{MIN} とした。このような最高値、最低値のとりかたはあくまで仮の

Photo. 1 Examples of lattice images
(a) from mirror, (b) from $0.041\mu m$ Ra sample

Fig. 5 Examples of optical intensity distribution of the lattice images
(a) from mirror (b) from 0.03 μm R_a sample

選択である。他のとりかたを選択しても、傾向としては大きな差はみられなかった。

上に述べたコントラストの測定結果を Fig. 6 に示す。図では測定結果と (7) 式で示した e^{-g} の計算結果も同時に示す。ここで $g \approx (4\pi\sigma/\lambda)^2$ の関係を用い、 $\lambda = 1\mu\text{m}$ として計算した。この λ の値は実験に使用した光の波長のオーダーで、実験結果にはほぼ合致する値を選択した。 $\sigma = R_a$ として実験データと同じ図の上にプロットしたものである。一部のデータを除いて実験結果と正反射光成分 $\bar{R}_s$ の R_a に対する傾向がほぼ一致することがわかる。ただし R_a が $0.06\mu\text{m}$ 付近になるとやや乖離してくる傾向が見られる。

4.4 開口のコントラストに対する影響

格子像による実験で、近軸光線以外の光線の回り込みや散乱が、コントラストのデータに及ぼす影響をみるため、Fig. 3 の光学系の開口として、直径 44mm の円形開口を設置して、同様な実験を行ない、コントラストデータへの影響を調べた。

実験方法は上で述べたのと同様である。実験結果を Fig. 7 に示す。図から明らかなように、コントラストと R_a の間での相関はほとんど見られない。このように同じ入力スリットパターンを用いている場合でも、光学系の設定条件により大きく変化が生じていることがわかる。

4.5 エッジパターンによる実験と結果

上に述べた格子像の実験では、コントラストのデータは結像光学系の設定、特にレンズの口径や開口の大きさ等により必ずしも一定の傾向を示さない場合がある。また用いた格子は暗部が明部に比べ小さく、大きな R_a に対しコントラスト

が過大に低下する傾向があると考えられる。そこで入力像としてナイフエッジを用いた実験を行ない、格子像の場合と比較することにした。

用いた実験光学系は格子像の場合と同じで、入力パターンの光の透過部には拡散光源とするため、スコッチテープを取付けた。格子像の実験の場合と同様に、フォトダイオードを観測面上でエッジ像を横切る方向に走査し、像の光強度分布を測定した。光強度分布の測定結果の一部を Fig. 8 に示す。図の縦軸は観測された光強度で、横軸はフォトダイオードの位置を示す。データ曲線は各試料の R_a 値に対応して示してある。

エッジ像の場合のコントラストデータは次のようにして求めた。まず光強度分布のデータで、0.2mm ごとの各隣接データ間の差を求め、この差分の最も大きいところを中央値とし、中央値の前後 1.6mm ずつ変位したところを、最高値 I_{MAX} 、最小値 I_{MIN} とした。コントラスト C は (8) 式により計算した。

R_a に対するコントラストのデータを Fig. 9 に示す。また R_a に対する e^{-g} の計算値も同図に示す。この計算値は格子像の場合と同じである。

Fig. 6 と Fig. 9 を比較すると、エッジ像の場合の方がコントラストのデータのばらつきも少なく、 e^{-g} の計算値ともよく一致していることがわかる。またコントラストのデータは散乱光の回り込みの少ない入力パターンを用い、注意深く近軸光線を用いる必要があることがわかる。

4.6 実験結果に対する考察

実験の結果、観測された像のコントラストと R_a との関係は、 $g \ll 1$ の場合の正反射光の R_a による減衰曲線 e^{-g} にほぼ一致する傾向を持つことがわかった。これは実用に用いる場合の有用な関係式を与えてくれる。

しかしこれは実験による関係式であり、像のコントラストと正反射光の減衰との関係が理論的に明らかになったとはい

Fig. 6 Contrast data of the lattice pattern and calculated results for R_a

Fig. 7 Contrast data of the lattice pattern obtained by the optics with the large aperture and calculated results for R_a

えない。(6)式が成り立つ範囲では、明部が第1項、暗部が第2項と想定した場合、コントラストはほぼ1となり、大きな減衰は現われないことになる。本実験では g が1に近づいた範囲を扱っており、コントラストは1から大きく低下してくると思われる。この範囲での理論的明確化は今後の課題である。

5. 再結像法での実験

OTF法での実験で明らかになったとおり、 R_a がほぼ $0.07 \sim 0.08 \mu\text{m}$ 以上の試料では像のコントラストが劣化して、測定が困難になる。そこでこれまでの試料に加えて R_a のやや大きい試料を準備し、2章で触れた再結像法による測定の可能性の実験的な確認を行なった。

5.1 再結像法の原理

再結像法は基本的には Fig. 2 に示したように、第1のレンズで入力パターンの像を被測定表面上に結像し、その反射像を第2のレンズで観測面上に結像させる。レンズが大きな歪曲収差を持つ場合、被測定面上に投影される像は、近軸を通る光線による像以外は、2つのレンズによる結像のため大きな歪みを持つ像となる。被測定面が鏡面である場合、光線は結像系内を進み、収差は2重結像系のため増幅されて測定面に現われる。一方被測定面の表面粗さが大きく、被測定面からの反射の大部分が拡散反射成分になると、第1のレンズを通った光線はその位相情報を失い、これを新しい入力像として第2のレンズによる像のみを観測面に結像する。このため歪みの小さい、本来の入力パターンに近い像が得られる。したがって観測される像の歪みの程度から、表面粗さが計測できると考えられる。またこの方式では OTF 法での R_a に対する制約に対し、さらに大きい表面粗さを計測できる可能性があると考えられる⁵⁾。

5.2 実験試料

実験用の試料として、Table 1 に示した試料のほかに、 R_a

Fig. 8 Light intensity distribution of the observed edge pattern

Fig. 9 Contrast data of the edge pattern and calculated results for R_a

が $0.19, 0.20, 0.27 \mu\text{m}$ の3個の試料を追加した。

5.3 再結像法実験装置の構成

実験用の光学系の構成を Fig. 10 に示す。入力パターンは OTF 法で用いた格子状パターンを使用した。使用したレンズは第1, 第2共に口径 50 mm 、焦点距離 100 mm を用いた。開口は設けず、レンズ全体で受光している。これは像の歪みを大きく取るためである。スリットパターンと第1レンズの距離を 200 mm 、第1レンズと被測定表面の距離を 200 mm 、被測定表面と第2レンズの距離を 180 mm 、第2レンズと観測面の距離を 225 mm とした。観測面上での光強度分布の測定は、OTF 法の場合と同様、フォトダイオードを走査して行なった。格子像に対するフォトダイオードの走査の関係を Fig. 11 に示す。光学系の光軸の方向を z 軸、格子の長手方向を y 軸、それに垂直の方向を x 軸とし、 y 軸方向にフォトダイオードを、距離 a だけ離れて2個配置し、1個のフォトダイオードが像の中心部を走査するように設置して、

Fig. 10 Experimental configuration for intensity distribution of the output image in re-imaging method

Fig. 11 Relation between the lattice images and the scanning of photodiodes
(a) for regular image (b) for deformed images

x 方向に移動走査を行なった。今回の実験では a は 30mm であった。

5.4 再結像法による実験の結果

再結像法で得られた像の例を Photo. 2 に示す。 Ra の小さい場合は大きな歪みが観測され、大きい Ra の試料の場合には本来の格子パターンの像が観測され、試料表面上での拡散反射による像が形成されていることがわかる。

格子像の歪みを表すパラメータとして、像を横切って走査した場合に得られる 2 つの明部のピーク部の間隔を用いた。 Fig. 11 での 2 つのフォトダイオードの走査で、像の中央部 ($y = 0$) の走査線上のピーク間隔と、像の周辺部 ($y = a$) の走査線上でのピーク間隔の差を求め、これを歪みを表すデータとした。

上記のピーク間隔の差のデータを、用いた試料の Ra に対してプロットしたのが Fig. 12 である。 Ra の小さい領域ではきわめて大きなばらつきを示している。しかしおおむね Ra が大きくなるに従い、ピーク間隔の差は小さくなる傾向が見られる。

5.5 再結像法実験の考察

格子像の歪みと表面からの反射特性の関連につき、若干の検討を試みる。 Fig. 11 の x 軸上に適当に原点を取り、 $y = a$ の走査線上で、ミラー表面からの反射のように完全な正反射成分のみの場合の、ある明部のピーク位置を d_1 とする。また完全拡散反射面からの像での同じピーク位置を d_2 と

Fig. 12 Relation between the deformation of the images and the roughness Ra in the re-imaging method

する。すなわち実際に観測される反射光は、(3) 式に示すように、正反射光成分と拡散反射光成分との和で表されたとすると、 Ra の小さな表面から大きな表面に変わるに従い、上記の明部のピーク位置は d_1 から d_2 に近づいてくることになる。

いま中間的な Ra を持つ試料で観測されるピーク位置 d_i は、上記の d_1 と d_2 加重平均で表されると仮定すると、

$$d_i = w_1 d_1 + w_2 d_2 \quad (9)$$

で表される。ここで w_1 , w_2 は正反射成分と拡散反射成分の比率を表す係数で、

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (10)$$

の関係がある。今回の実験で用いたレンズでは、歪みは x, y 両方向に同じように広がる。したがって x と y が共に大きくなるに従いピーク位置は変化するが、 $y = 0$ の線上ではピーク位置は変動しないと仮定してよい。このピーク位置を原点とすると、(9) 式で $d_2 = 0$ と置けるので、観測されるピーク位置 d_i は

$$d_i = w_1 d_1 \quad (11)$$

Photo. 2 Examples of images formed with the re-imaging method
(a) from mirror (b) $Ra : 0.055 \mu m$

で与えられる。この結果により $y = a$ の線上での歪みの大きさは、正反射光成分の比率 w_1 の変化に比例して変化することが予想される。

実験方法で述べた実際のデータのとりかたは上記の考察とは若干異なっているが、 Ra と歪みの関連性は本質的には同じである。今回の実験で実測した光強度分布では、各ピークに幅があり、ピークの位置はかならずしも明確でない。画像に対するフォトダイオードの走査位置も、各試料の設置位置により若干の変化があり、明瞭な測定結果が得られたとはいえない。 Ra の変化が w_1 の変化に比例するとすると、(11) 式で示されるような比例関係が、Fig. 12 のデータで傾向として若干みられ、一つの可能性を示しているが、特に $0.08 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 付近の試料によるデータが不足しており、およその傾向を示すにとどまっている。今後より明瞭なデータが得られる光学系を検討し、 Ra との定量的な関連性を明確にしておく必要がある。

6. ま と め

非接触で金属等の表面粗さを計測する方法として、光学的にパターンスリットの像を投影し、非測定表面での反射を経由して結像された像の画質から、表面粗さを検出する方式を取り上げた。二つの方式のうち、まず一つの結像系の途中に非測定面を置く伝達関数方式につき、パターンスリットとして格子状のパターンとナイフエッジの2種類を用い、非測定表面の中心線平均粗さ Ra と出力像のコントラストの関連を実験により求めた。その結果、コントラストは散乱の理論から予想される正反射の変化の傾向と一致することがわかった。この結果により、観測される像のコントラストから、 Ra を求めることが可能である。またコントラストとして得られるデータは、光学系の設定や用いる入力パターンにより、その明瞭さが異なることもわかった。

一方この伝達関数法は、 Ra がおおむね $0.1 \mu\text{m}$ 以上の大きい表面粗さには適用できない問題がある。そのような表面粗さに対しては、二つの段階の結像光学系を用い、まずスリットパターンの像を非測定表面上に結像させ、つぎに第2の結像系で像を形成する再結像法を提案してきたが、この方法についても若干の実験を行なった。 Ra が $0.2 \mu\text{m}$ までの範囲において、出力像の歪みが表面粗さに依存する傾向が観測された。ただしこの方式については、さらに光学系の改良、より多くの試料を用いての詳細な研究が必要である。

参 考 文 献

- 1) T.Inari: Automatic detection and control of surface roughness by coherent diffraction pattern, Proc. 16th. SPIE Annual Meeting, 47/53(1972)
- 2) 安達, 稲荷, 亀井: 反射レーザ光拡がりによる金属表面粗さ形状のモニタリング, 計測自動制御学会論文集, 20-6, 536/541 (1984)
- 3) 酒井, 沢辺: 光学的反射方式による表面粗さ測定の研究, 精密機械, 48-11, 1478/1483 (1982)
- 4) 原田, 樋口, 野田: 表面粗さの光学的インプロセスセンサ, 計測自動制御学会学術講演予稿集, 983/984 (1995)

- 5) 稲荷: パターン投影方式による表面粗さの計測 (第1報), 計測自動制御学会学術講演予稿集, 245/246 (1995)
- 6) 松田, 鬼頭, 久保田: 塗膜の光沢測定, 計測自動制御学会論文集, 18-5, 471/475, (1982)
- 7) 亀井, 岩田, 橘: パターン化光源による光沢表面の欠陥検査, 計測自動制御学会学術講演予稿集, 699/700 (1991)
- 8) P.Beckmann & A.Spizzichino: The scattering of electromagnetic waves from rough surface, Pergamon Press, Oxford (1963)

[著 者 紹 介]

稲 荷 隆 彦 (正会員)

1961年京都大学理学部物理学科卒業。同年三菱電機(株)入社、主に産業分野における光応用計測技術の開発に従事。1994年より近畿大学生物理工学部機械制御工学科教授。センサー工学、光応用計測の研究を担当。工学博士。計測自動制御学会、電子情報通信学会などの会員。