

光散乱法を用いた加工面の識別

Identification of Machined Surfaces Applying Light Scattering

邱 暁明*・谷 泰弘*

Xiaoming QIU and Yasuhiro TANI

1. はじめに

工業製品の製造技術に関する特許侵害の防衛や、工芸品の考古学的見地からの製造技術の推定および発掘等のためには、工業製品や工芸品の表面観察によりその表面の製造方法や製造条件の推定を行う技術が重要となる。そして、この技術の確立のためには、対象とする表面の特徴を抽出することが必要となる。

表面の特徴を抽出する技術として従来用いられてきた方法は、触針式粗さ計により二次元的に走査を行って得た三次元データを用いて、二次元フーリエ解析や自己相関解析を行う方法である。しかし、これらの方法では、①測定に長時間を要す、②触針により表面が傷つく、③データが離散的であるため、サンプリング点間の情報が欠落し、解析誤差が生じるなどの問題を抱えている。

そこで、本研究ではこれらの問題点を解決する方法として、表面形状のフーリエ変換を光学的に行うことを意図して、光散乱法を適用することにした。これまで、光散乱法は種々の加工面の表面粗さを評価する一方法として研究が進められてきているが^{1~3)}、本研究のように加工面の識別に適用した例はいまだ報告されていない。

様々な加工面を対象として、光散乱法で得られた散乱光強度分布から加工面の識別を試みた。

2. 散乱光の測定装置

本研究で使用した測定装置の概略を図1に示す。光源には、波長 632.8 nm、出力 1 mW の周波数安定化 He-Ne レーザを用いた。平均化効果による表面形状に対する感度の低下を抑えるために、レーザ光のビーム径をビームエキスパンダにより $\phi 2$ mm にまで絞った。試料表面で反射・散乱した光の検出は、正反射光強度の 10^{-8} 程度まで

*東京大学生産技術研究所 第2部

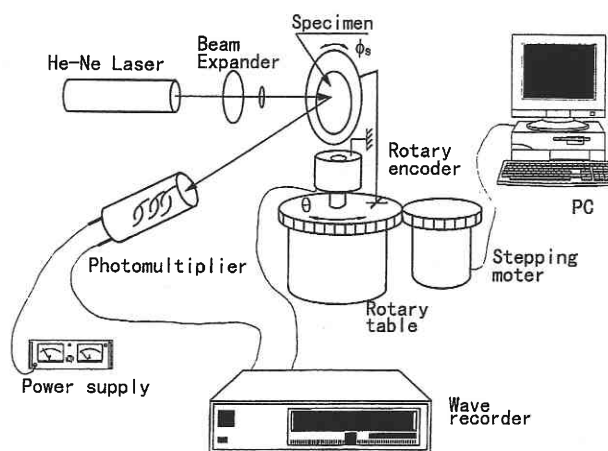


Fig. 1 Schematic diagram of measuring system

の微弱な光の検出が可能な光電子増倍管により行った。この光電子増倍管は電源電圧によりその感度を変化させることができ、このことにより非常に広いダイナミックレンジでの測定が可能となっている。

試料はロータリエアテーブル上に垂直に設置し、測定点がロータリテーブルの軸上にくるようにした。初期状態では試料への入射角が 45° となるようにレーザ光源を設置し、その正反射光が光電子増倍管に入射するようにした。パーソナルコンピュータの指令によりステッピングモータを駆動し、ロータリテーブルを回転させることで入射角を変化させた。この時入射角の変化量の倍に等しい散乱角を持つ散乱光が光電子増倍管に入射することになる。実際のロータリテーブルの回転角はロータリテーブルの中心軸に直結したロータリエンコーダで検出し、その値と光電子増倍管からの出力を同時にウェーブレコーダに記録した。

3. 測定試料の準備

本研究には、識別の対象として5種類の加工面を用意した。これらはダイヤモンド切削面、研削面、エッチング面、ラップ面とポリシング面である。各試料の表面粗さを表1示す。また、微分干渉の写真を図2に示す。

4. 散乱光強度分布の測定

散乱光強度分布を散乱角 θ と試料回転角 ϕ_s の関数として三次元的に表す。一般に散乱光強度は散乱角 θ の増加に従って急激に弱くなる。直観的に比較できるようにするために、散乱光強度を正反射光強度で正規化して対数の形で表す。4種の試料の散乱光強度分布の測定結果を図3に示す。ここで、切削面のような異方性のある面では、レーザ光の入射方向と加工の送り方向が一致するときの試料回転角を0度と設定する。一方、エッチング面のような等方的な加工面の場合には、任意の位置を0度設定する。

Table 1. Surface finishes of specimens

Specimens	Symbol	Ra(nm)	Rp (nm)
Turned aluminum disk	TD	160	650
Ground aluminum disk	GD	20	170
Etched silicon wafer	EW	100	1220
Lapped aluminum disk	LD	65	588
Polished silicon wafer	PW	3	28

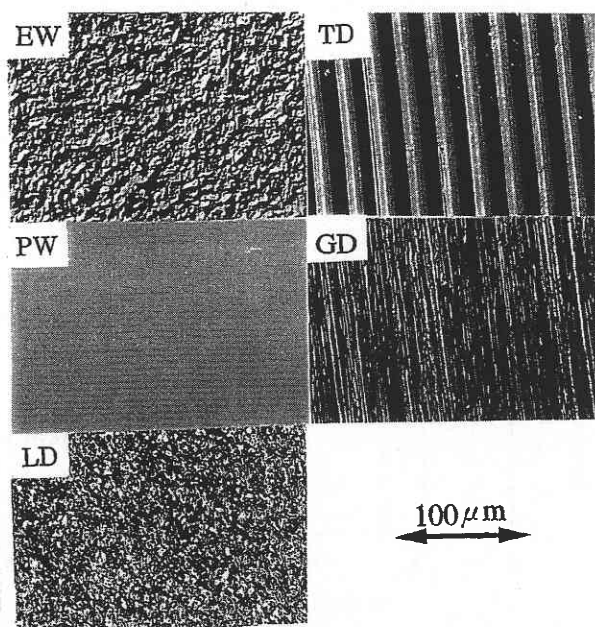


Fig. 2 Nomarski photographs of the specimen surfaces

図3に散乱光強度分布の主な特徴が現れている。この図の(a)から見られるように、試料回転角 ϕ_s が0度のとき、散乱角 θ に対する散乱光強度分布は非常に周期的で、高いピークがあり、減衰が小さい。試料回転角 ϕ_s が変わると、ピークが少なくなり、減衰が大きくなる。 $\phi_s = 90$ 度のとき、すなわち、レーザの入射方向と加工の切削方向とが一致する際、 $\phi_s = 0$ 度の分布と最も異なる。以上の現象は切削加工面の特性によるものと考えられる。切削加工では、切削バイトによって、異方性のある面になる。この面では加工の送り方向に周期的な加工マークが残っている。上述の散乱光強度分布に見られる現象は加工面形状を反映したものと考えられる。

(b)の研削面の散乱光強度分布を観察すると、 ϕ_s によって、切削面のように散乱光強度分布が変わるが、切削面ほど顕著ではない。これは工具としての砥石が多くの砥粒によって作られていることに起因すると考える。

一方、(c)(d)面の散乱光強度分布を見ると、試料回転角 ϕ_s に対してほとんど変化が見られない。これはエッチング、ラップ面の等方性を示すと考えられる。しかし、この二種類の加工面では散乱角 θ に対する減衰が異なる。これはこの両加工面の加工法、加工条件が違い、作られた表面の空間波長成分が異なるためと考えられる。

5. 散乱光強度分布特徴パラメータの抽出

前節から分かるように、加工面に異方性があるかないか、また断面曲線の周期性の強さ、波長成分の分布などの加工面形状の特性は、散乱光強度分布に現れる。したがって、散乱光強度分布からこれらの特徴を抽出すれば、加工法の識別することができる。

本研究では、散乱光強度分布から加工面の特性を抽出するために、二種類の特徴パラメータを提案する。一種類は一方向の散乱光強度分布から抽出した一次元特徴パラメータで、もう一種類は試料回転角の変化に伴う一次元特徴パラメータの変化を表す二次元特徴パラメータである。二次元特徴パラメータは試料の異方性を表す。

まず一次元特徴パラメータを定義し、そして異なる方向の一次元パラメータの比を二次元特徴パラメータとして定義する。

散乱光強度分布は加工面形状のフーリエ変換像だと言われている^{4,5)}。このフーリエ変換の様子を図4に示す。すなわち、光が加工面に入射されると、加工面から散乱された光は加工面の断面曲線中の短波長成分に起因する散乱光は角度が大きく、長波長成分に起因する散乱光の角度は正反射に近くなる。散乱角 θ による散乱光強度の変化は加工面の断面曲線中の空間波長成分の分布を表し

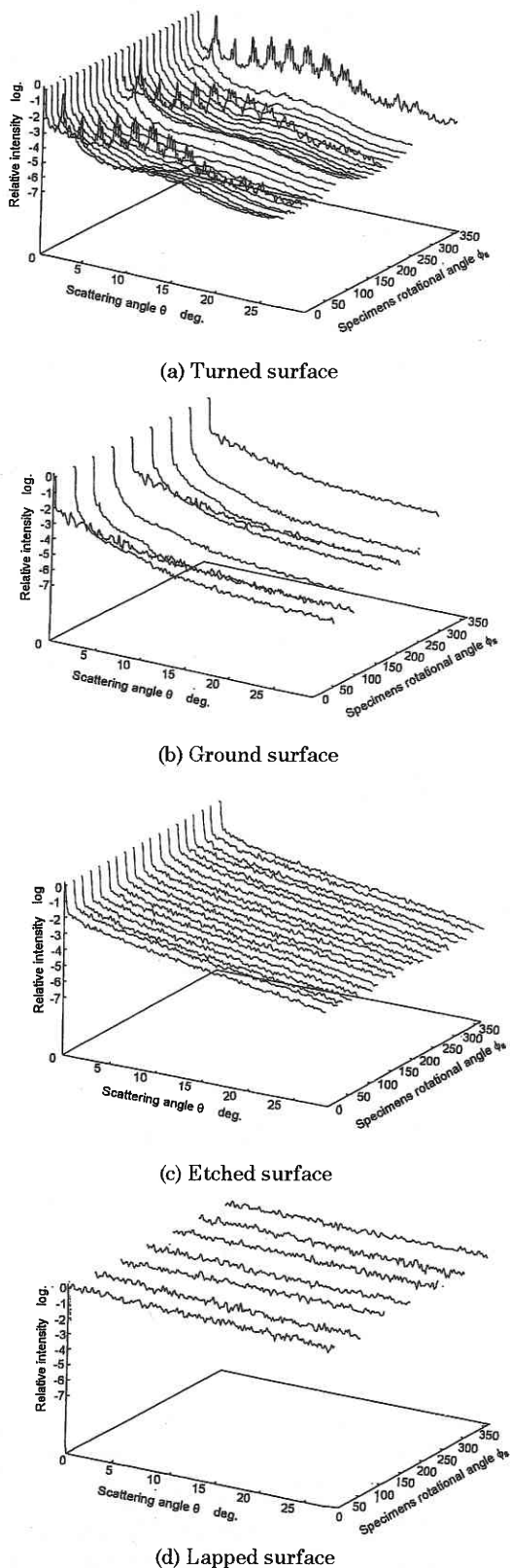


Fig. 3. Intensity distribution of scattered light

ていることになる。したがって、この表面の空間波長成分の違いは散乱光強度分布の減衰に影響を与える。

散乱光強度の減衰を定量的に表すために、加工面上の一方向の散乱光強度分布を用いる散乱光強度減衰特徴パラメータ A_h を提案する。 A_h は式 (1) のように定義する、

$$A_h = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} \dots \dots \dots (1)$$

式中、 \bar{I}_1 、 \bar{I}_2 は図 5 に示す。散乱光強度分布を $I(\theta)$ とすると、 \bar{I}_1 、 \bar{I}_2 は次式のように表す、

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta) d\theta \dots \dots \dots (2)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{\theta_4 - \theta_3} \int_{\theta_3}^{\theta_4} I(\theta) d\theta \dots \dots \dots (3)$$

式中 (θ_1, θ_2) 、 (θ_3, θ_4) はそれぞれ表面長空間波長成分と短空間波長成分の散乱光の範囲である。ここで、 \bar{I}_1 、 \bar{I}_2 は試料回転角 ϕ_s が 0 の時の散乱光強度分布から算出される。

加工面によって、散乱光強度分布のピークの高さ、す

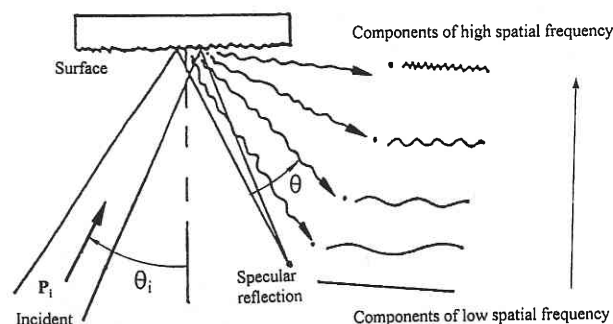
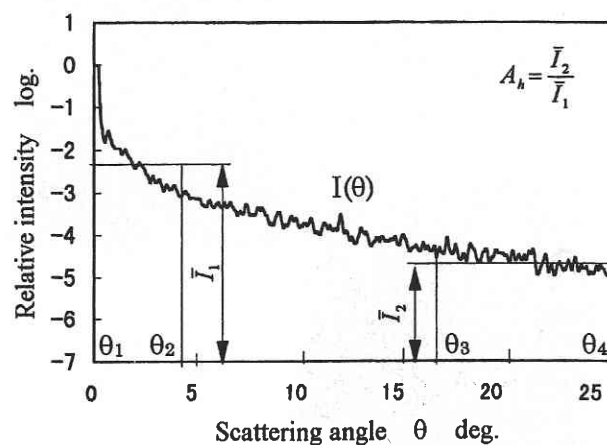


Fig. 4 Schematic illustration of scattered light from a surface having different spatial wavelengths

Fig. 5. Display of \bar{I}_1 , \bar{I}_2

なわち、高周波成分の振幅の平均値 A_p が異なる。 A_p は次式で定義する、

$$A_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{pi} \quad \dots\dots\dots (4)$$

A_{pi} は図6に示すようなピークの高さで、 n はピークの数である。 A_p は加工面上の空間波長成分の周期性に関係がある。切削面のような空間波長成分の周期性が強い面は A_p が大きい。

試料回転角 ϕ_s による、散乱光強度分布の変化を定量的に表すために二次元特徴パラメータ A_r を提案する。 A_r は式 (5) のように定義する、

$$A_r = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここでは、 P は一次元特徴パラメータである。 P_{\max} 、 P_{\min} は試料回転角 ϕ_s が $0^\circ \sim 360^\circ$ の間に、一次元特徴パラメータの最大値と最小値である。

6. 加工面識別の一例と考察

加工面識別の一例として、提案した一次元特徴パラメータと二次元特徴パラメータを用いて、3節で述べた加工面の識別を試みた。ここで、一次元特徴パラメータとしての A_h と、 A_h を用いて作った二次元特徴パラメータ A_r での加工面の識別を試みた。この識別マップを図7に示す。

この図から見られるように、提案したパラメータにより加工面の識別ができる。

減衰特徴パラメータ A_h を見ると、ポリシング面が一番小さく、ラップ面が一番大きい。これはポリシング面中に短波長成分が長波長成分に比べてとても少なく、またラップ面では短波長成分と長波長成分がほぼ同じということを示す。異方性特徴パラメータ A_r を見ると、切削面が一番大きい、次は研削面である。これは、切削面の異

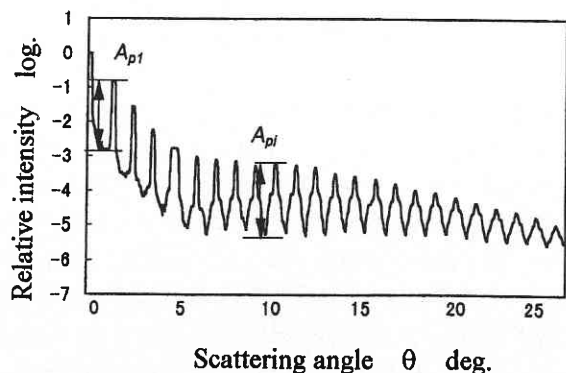


Fig. 6 Display of amplitude of high frequency components A_{pi}

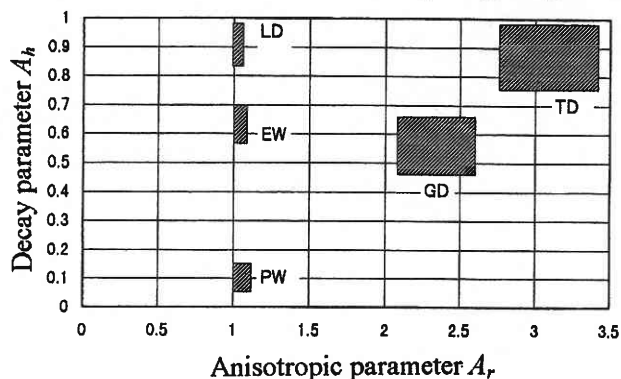


Fig. 7 Relationship between specimens and parameter A_r , A_h

方性が研削面より強いことを示す。エッチング面、ラップ面、ポリシング面は A_r 値がみなほぼ1である。これはこの3種類の試料が等方的な面であるということを示す。

7. 結 論

本研究では光散乱法を用いて、加工面の識別法を提案した。手法として、まず、加工面形状の特性の分析に基づいて、加工面形状の特性と散乱光強度分布の特徴とのつながりを明確にする。そして、散乱光強度分布の特徴をパラメータで表すことによって、加工面の識別を行った。

一例として加工面の空間波長成分を表す減衰特徴パラメータ A_h と加工面の異方性を表す特徴パラメータ A_r を提案した。この二つの特徴パラメータを用いると、加工面の識別が可能であることを示した。

(1997年6月9日受理)

参 考 文 献

- 1) D. J. Whitehouse, Handbook of Surface Metrology, (1994), 453, Rank Taylor Hoson.
- 2) J. C. Stover, Roughness Characterization of Smooth Machined Surfaces by Light Scattering, Applied Optics, 14-8. (1975-8), 1796.
- 3) L. H. Tanner, et al., A Study of the Surface Parameters of Ground and Lapped Metal Surfaces Using Specular and Diffuse Reflection of Laser Light, Wear, 57. (1979), 81.
- 4) E. L. Church, et al., Measurement of the Finish of Diamond Turned Surfaces By Differential Light Scattering, Optical Engineering, 16-4. (1977), 360.
- 5) M. Lars, et al., Assesment of Surface Finish on Bulk Scattering Materials: A Comparison Between Optical Laser Stylus and Mechanical Stylus Profilometers, Precision Engineering, 15-3 (1993-7), 141.