

偏光状態変化を用いたスペックルパターンを用いた異方性表面の粗さ評価について

Roughness Evaluation of Anisotropic Surfaces Using Speckle Patterns
with Consideration of Polarization

東理大・工（学）*山崎 蓮 東理大・院（学）松田 航 東理大・工（正）佐藤 魁星

東理大・工（正）佐々木 信也

Ren Yamazaki*, Wataru Matsuda**, Kaisei Sato*, Shinya Sasaki*

*Tokyo University of Science, **Graduate School of Tokyo University of Science

1. 緒言

摩擦モニタリングは、機械しゅう動部品の表面設計や保守メンテナンスにおいて重要である。しかしながら、機械の稼働中に精度良く摩擦力を測定することは、センサの設置に伴う物理的な制約が存在するため、現実的に採用されているモニタリングシステムは少ないのが現状である。この課題を解決するため、近年ではアコースティックエミッション（AE）解析や加速度センサを用いた振動取得など、稼働中の機械の摩擦挙動を分析する手法が開発されてきた⁽¹⁾。これらの手法は一部で有用であるものの、環境ノイズの影響や表面情報を直接取得できない点が課題である。そこで、新たな摩擦モニタリングのために表面情報を直接取得できる手法としてスペックルパターンが注目されている。スペックルパターンとは、レーザ光の光が粗面で乱反射され、干渉することで生じる不規則な光の強度分布である。この手法は表面粗さを精密に測定することが可能であり、高い精度が達成されている⁽²⁾。また、スペックルパターンから得られる表面情報を摩擦係数と関連付けるために機械学習が適用されているものの、その精度は十分とは言えず、更なる精度向上が求められている。

偏光は、光学における重要な要素であり、光の波動が特定の方向に振動する現象を指す。自然光はすべての方向に均等に振動するが、偏光された光は特定の平面に限定された振動方向を持つ。この特性は、反射、屈折、散乱などの光学現象で顕著に現れる。特に、金属表面のような粗い表面では、入射光が散乱する際に偏光状態が変化し、解消されることが先行研究で示されている⁽³⁾。この現象は、表面の粗さや構造に敏感であるため、偏光の変化を利用することで表面特性の評価が可能となる。偏光特性の解明は、表面粗さや摩擦挙動の解析において有用であることが示されている。

本研究では、新たに偏光を取り入れた試験装置を開発し、偏光を適用しない場合と適用した場合で取得したスペックルパターンを比較することで、偏光が表面粗さの検出精度に与える影響を調査することを目的としている。本報では、自作の試験機を用いて、偏光なしおよび異なる偏光条件（P 偏光、S 偏光）下でスペックルパターンを取得し、偏光条件と表面粗さパラメータとの関連性を評価する。さらに、各偏光条件下におけるスペックルパターンの特徴を数値的に定量化し、決定係数を用いて表面粗さとの相関性を解析することで、偏光の有無や異なる条件がスペックルパターンの特性と表面粗さ検出に及ぼす影響を定量的に比較する。

2. 実験概要

2.1 実験装置

スペックルパターンと偏光の影響を調査するため、SUJ2 製のディスクに対してレーザを照射する実験装置を用いた。Figure 1 に実験装置の概要を示す。実験装置には波長 632.8 nm、出力 5 mW の偏光 He-Ne レーザを用いた。レーザは初期径 0.81 mm のビームを生成し、20 倍のビームエキスパンダを使用して 16.2 mm に拡大し、ディスクに照射している。ビーム径はディスクの幅に合わせて約 3×3 mm とした。レーザ光のディスク表面への入射角度は 45 deg とした。カメラのレンズには偏光フィルタを取り付け、偏光の方向を調整可能とした。試験片ホルダは自軸回転が可能であり、固定されたディスクを半径方向に回転させることで、任意の角度でのスペックルパターン取得が可能である。Figure 2 にスペックルパターンを取得するための光学系を示す。

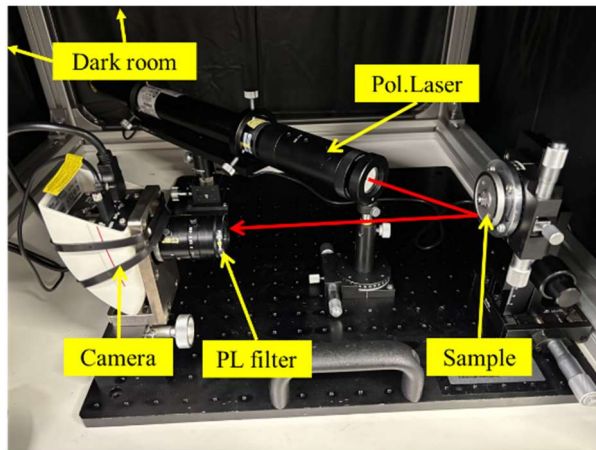


Fig.1 Schematic of experimental equipment

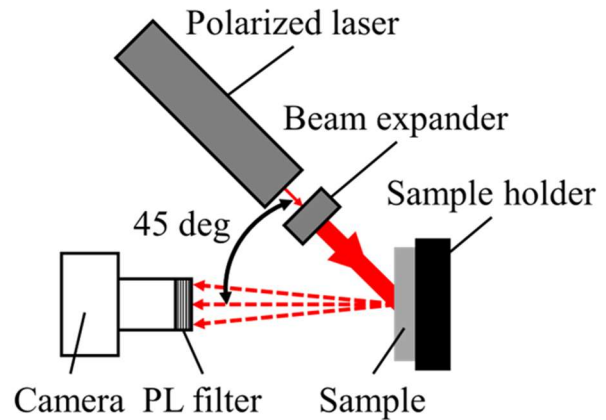


Fig.2 Optics of experimental equipment

2.2 実験方法

異なる偏光条件下におけるスペックルパターンの特性を分析するため、#120, #320, #1200 の研磨紙を用いて一方向に粗さを付与し、異なる粗さを有する 3 種類の試験片を作製した。また、表面粗さの方向性を評価するため、Fig. 3 に示すように試験片を 0° から 45° 刻みで試験片を回転させ、各角度における算術平均粗さ(Ra)ならびにスペックルパターン測定を行った。算術平均粗さ Ra の測定には、共焦点レーザ顕微鏡(VK-X150, KEYENCE, JP)を用い、スペックルパターンの取得には、自作の光学系を用いた。Figure 4 にレーザ顕微鏡により取得された Ra の結果を示す。また、スペックルパターンの測定においては、光源として使用するレーザの偏光状態 (P 偏光と S 偏光の 2 条件)、カメラの偏光フィルタ (P 偏光と S 偏光、偏光フィルタなしの 3 条件) を組み合わせた計 6 条件で測定を行った。取得したスペックルパターンの評価には、偏光なしの条件では輝度標準偏差を平均輝度で除したスペックルコントラストを用い、偏光ありの条件では式(1)で定義される交差偏光比 (Cross Polarization Ratio, CPR) を用いた。

$$CPR = \frac{I_{\perp}}{I_{\text{total}}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

ここで、 I_{\perp} は入射偏光に対する直行成分の散乱強度、 I_{total} は散乱光全体の強度である。

これらのデータ解析に基づき、スペックルコントラストならびに交差偏光比と Ra の相関関係を決定係数(R^2)により調査した。

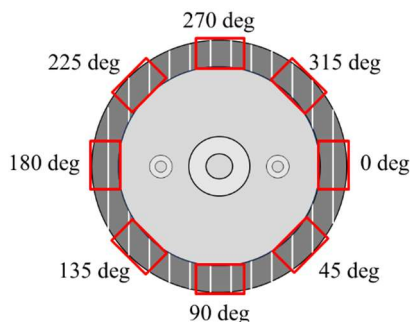


Fig.3 Laser irradiation position

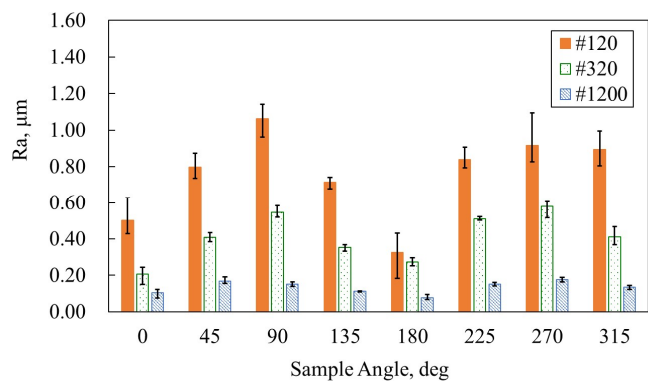


Fig.4 Ra measured by a confocal laser microscope

3. 実験結果および考察

3.1 取得したスペックルパターン

Figure 5 に、各偏光条件下で取得したスペックルパターン画像の一例として、レーザ S 偏光・カメラ S 偏光 (S-S 条件) およびレーザ S 偏光・カメラ P 偏光 (S-P 条件) の条件下で、0 deg, 45 deg, 90 deg, 135 deg の角度における画像を示す。S-S 条件では、全ての角度で高い輝度を示し、90 deg で最大値の 254.97 に達した。一方で、0 deg では 82.15 と最も低い値を記録した。この結果は、カメラの偏光フィルタがレーザ偏光と一致する場合、散乱光全体の成分が検出されることを示している。S-P 条件では、全ての角度で輝度が低く、0 deg で 17.52、最大値は 90 deg の 39.22 であった。この結果は、レーザ偏光方向とカメラ偏光方向が直交しているため、散乱光中の直交成分のみが検出され、全体的に輝度が抑制されることを反映している。

角度依存性の比較では、P-P 条件が角度に応じて輝度の変化が顕著であり、特に 90 deg で極大値を示した。一方で、P-S 条件は角度に対する輝度変動が小さく、一貫して低い値を示した。

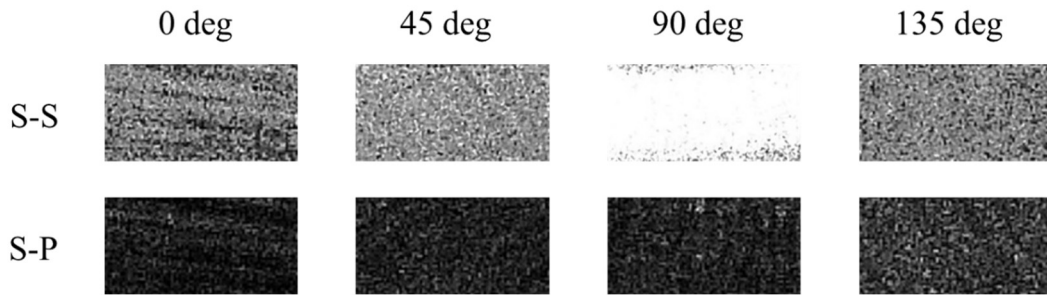


Fig.5 Speckle Pattern Images under S-Polarized Laser and Camera Conditions at Different Angles (0 deg, 45 deg, 90 deg, 135 deg)

3.2 取得したスペックルパターン

Figure 6 に、試験片角度 0 deg, 180 deg の場合における偏光なしのスペックルパターンから算出されたスペックルコントラストと R_a の関係を示す。結果として、スペックルコントラストと粗さには負の相関関係が存在することが確認された。また、レーザが P 偏光と S 偏光の条件において、スペックルコントラストの値にはほとんど差が見られなかった。

3.3 交差偏光比と R_a の関係

Figure 7 に、試験片角度 0 deg, 180 deg における偏光フィルタを用いたスペックルパターンから算出された交差偏光比と R_a の関係を示す。交差偏光比と R_a の間には正の相関関係が見られ、粗さが大きいほど交差偏光比も高くなる傾向が明らかとなった。特に、レーザが P 偏光の場合では、S 偏光に比べて交差偏光比が約 5%程度高くなる傾向が見られた。この傾向は他の角度においても一貫して確認された。また、最も粗い面では交差偏光比が初期の偏光状態から約 25%程度変化することが明らかとなった。

3.4 決定係数の比較

決定係数の算出には、線形回帰を用いて回帰分析を行い、予測値と実測値の一致度を評価した。Figure 8 に、レーザが P 偏光の場合におけるスペックルコントラストと R_a 、交差偏光比と R_a の決定係数を比較した結果を示す。スペックルコントラストについては、決定係数は約 0.3 程度と低い相関にとどまる一方で、交差偏光比では決定係数 0.6~0.7 程度とスペックルコントラストに比べて高い相関を示していることがわかった。

同様に、Fig. 9 にはレーザが S 偏光の場合の結果を示す。スペックルコントラストと R_a の決定係数に関して、試験片角度が 45 deg および 225 deg, 135 deg および 315 deg の場合には 0.7~0.8 程度と高い相関が得られたが、0 deg および 180 deg, 90 deg および 270 deg の場合には 0.4 程度と低い相関にとどまった。一方、交差偏光比と R_a の決定係数については、すべての角度において 0.8 程度と一貫して高い相関が得られた。

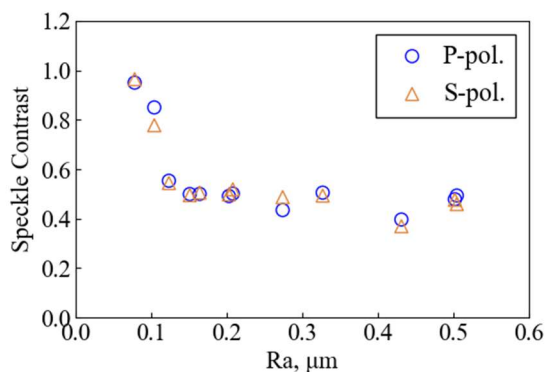


Fig.6 The relationship between Speckle Contrast and Ra index (Sample Angle: 0 deg, 180 deg)

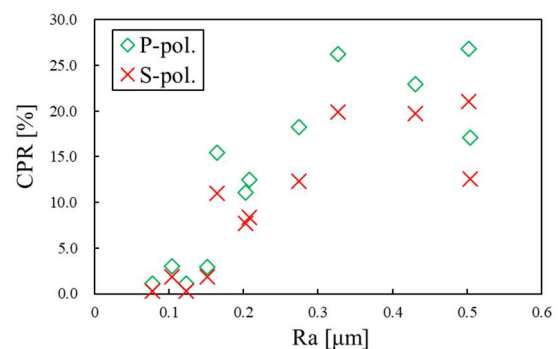


Fig.7 The relationship between Speckle Contrast and Ra index (Sample Angle: 0 deg, 180 deg)

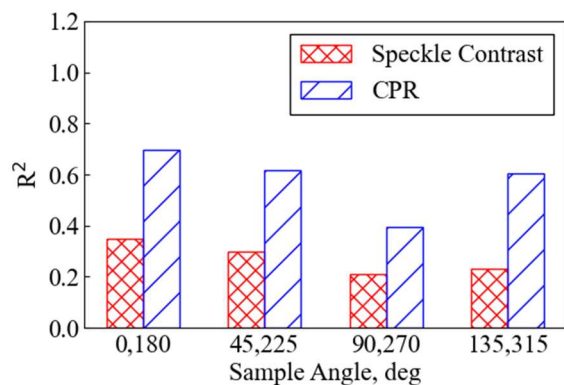


Fig.8 R² for P-polarized laser

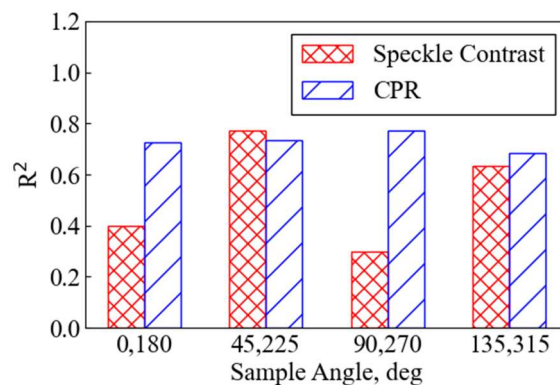


Fig.9 R² for S-polarized laser

4. 結言

レーザ光の偏光角が可変なスペックルパターン計測装置を開発し、スペックルコントラストと交差偏光比を用いて表面粗さの推定精度向上を試みた結果、以下の知見が得られた。

- (1) スペックルコントラストと R_a には負の相関が見られるが、偏光条件や角度により決定係数が異なり、一部では低い決定係数を示した。
- (2) 交差偏光比と R_a には正の相関があり、特に S 偏光ではどの角度でも高い決定係数を示した。
- (3) 交差偏光比は、スペックルコントラストと比較して全体的に高い決定係数を示し、表面粗さの推定において優れた指標となる可能性が示唆された。

文献

- 1) Ouahabi A, and Serra R, “Vibratory analysis for tool wear monitoring during machining (turning, milling)”, SURVEILLANCE 5 CRTIM Senlis (2004) pp. 11-13.
- 2) Wataru M, and Yuji Y, Kaisei S, Shinya S, “A Study on Prediction Characteristics for Speckle Patterns of Friction Surfaces Using Machine Learning” Tribology Online, Vol. 19, No. 4 (2024) pp. 334-344.
- 3) L. Liu, X. Li, K. Nonaka, “Light depolarization in off-specular reflection on submicro rough metal surfaces with imperfectly random roughness”, Rev. Sci. Instrum. (2015), pp. 86.