

表面凹凸からの反射光の光学的シミュレーション手法の検討

Study on optical simulation methods for light reflection from surface topography

岩手大・院（学）*小坂 大樹 岩手大・院（学）伊藤 涼祐 岩手大・理工（正）内館 道正

Daiki Kosaka*, Ryosuke Ito*, Michimasa Uchida*

*Iwate University

1. 緒言

機械製品における加工表面は一般的に三次元的な凹凸形状を有しており、近年では表面にナノメートルオーダーの規則的な微細凹凸パターンを加工することにより、部品に高度な機能を与えることも多くなってきている¹⁾。そのような物体表面の微細凹凸によって生じる反射光の特性を評価するための技術は自動車、半導体、電子部品などの様々な分野において、製品の研究開発や不具合解析といった目的で活用されており、製品の性能や品質向上に寄与している²⁾。

現在、光のさまざまな現象を理論的に扱うことのできる解析手法が多く存在する。中でも光を波として捉え、電場をスカラー量として考える理論体系を波動光学といい、表面凹凸からの反射、回折、干渉など波動光学で記述できる現象はさまざまである。また、媒質中の光の伝搬および散乱は多くの分野で重要な研究テーマとなっている³⁾。そこで本研究では、表面凹凸からの反射光特性を評価するために、波動光学に基づくシミュレーション手法を構築した。さらに、反射光特性について実験とシミュレーションにて比較、検討した。

2. シミュレーション

2.1 実験条件

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。この光学系では、試験片にレーザ光を斜入射させ、反射した光を 2 枚のレンズと絞りを通してイメージセンサで読み取り、画像の明暗を得る仕組みとなっている。試験片に平行な方向を x 方向とし、直交する方向を z 方向とした。試験片として波長 $100\ \mu\text{m}$ 、両振幅 $10\ \mu\text{m}$ の正弦波形状の粗さ標準片を用いた。レーザ光は波長 $635\ \text{nm}$ 、スポット径は $1\ \text{mm}$ である。レーザ光の入射角 θ を $26^\circ\sim 40^\circ$ まで変化させて実験を行った。2 枚のレンズは焦点距離 $150\ \text{mm}$ で直径は $25\ \text{mm}$ である。絞りは直径 $5\ \text{mm}$ でそれぞれの部品間の距離は焦点距離と同じになるように配置されている。また、イメージセンサの画素サイズは $3.5\ \mu\text{m}$ 、ピクセル数は 3000×2208 である。

2.2 シミュレーション方法

シミュレーションのフローチャートを Fig.2 に示す。本研究では、2 次元の正弦波表面に斜入射した光の伝搬特性を波動光学に基づいて解析した。シミュレーションでは斜入射された光波の反射による位相変調、レンズや絞りを通過する光の干渉過程を角スペクトル法によって計算した。この方法では、伝搬関数 H 、フーリエ変換処理、行列計算によって伝搬後の光電場を求めることができる⁴⁾。また、電場の絶対値を 2 乗して強度分布 I を求め、角度ごとに評価した。シミュレーションの条件は実験に合わせて設定したが、二次元 (x 方向 1 ライン) で行った。なお、プログラミング言語は Python を用いた。

3. 結果

3.1 実験結果

実験によって得られたイメージセンサの出力画像の例を Fig. 3 に示す。入射角 $\theta = 26^\circ\sim 31^\circ, 33^\circ, 35^\circ$ では明線が中割れしている画像が得られた。また、入射角を 26° から 40° まで変えていくと 37° 付近まで明るくなっていき、 38° からは減少傾向であった。なお、イメージセンサ上の明線の間隔は試験片の周期と同じ約 $100\ \mu\text{m}$ であった。

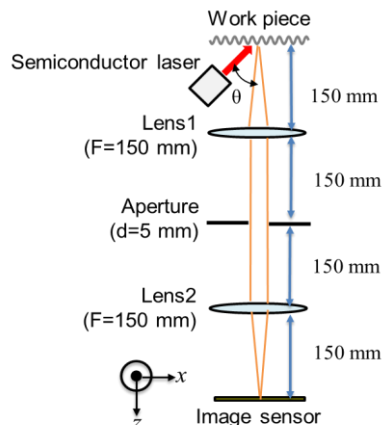


Fig.1 Experimental device schematics

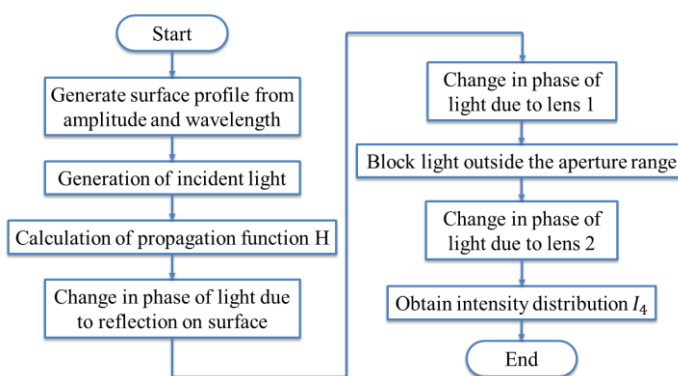


Fig.2 Flowchart of the simulation

3.2 シミュレーション結果

シミュレーションにおける入射角 28° , 37° のときのイメージセンサ上の強度分布を Fig.4 に示す. 強度分布は実験で得られた画像の中央付近に相当する. 強度分布のピークごとの間隔は約 $100\ \mu\text{m}$ であり実験と一致していた. しかし, 明線の中割れ現象は再現できた場合と再現できなかった場合があった. これは実験での角度の設定にわずかな誤差があったことが原因と考えられる. また, 実験とシミュレーションでの強度変化の比較を Fig.5 に示す. 実験値は画像内の輝度値の合計をピクセル総数で割った平均輝度を正規化した値であり, シミュレーション値は強度分布の積分値を正規化した値である. 実験とシミュレーションの角度に対する強度の変化は同様の傾向であり, 37° で最大の明るさとなり 38° からは減少する傾向であった.

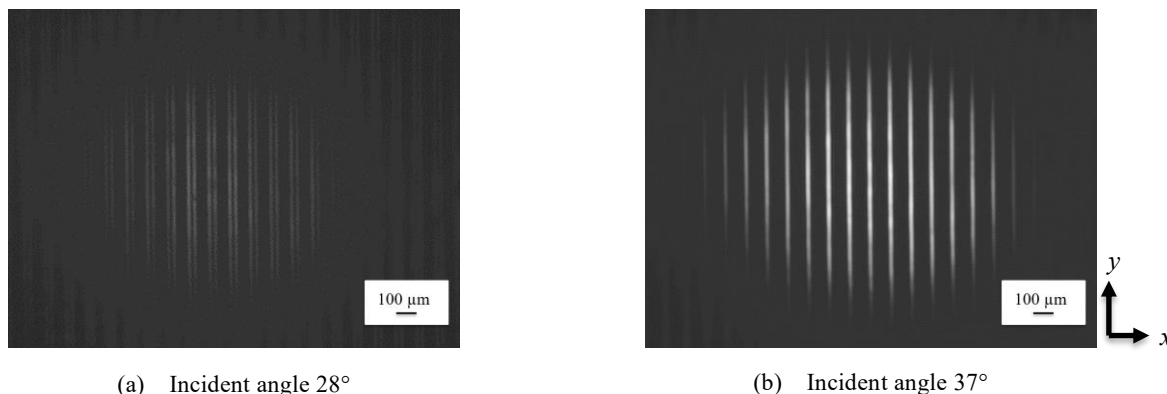


Fig. 3 Intensity distribution of light at image sensor obtained by the experiment

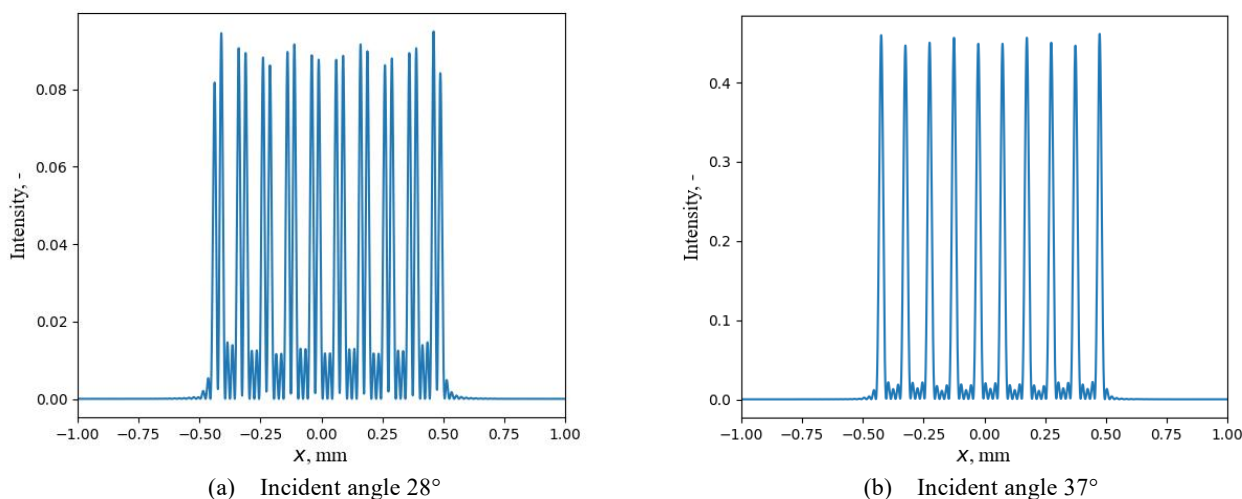


Fig. 4 Intensity distribution of light at image sensor obtained by the simulation

4. 結言

本研究では, 波動光学に基づいたシミュレーションを行い, 正弦波形状の凹凸面からの反射光について実験結果との比較検討を行った. 得られた結果を以下のように要約する.

- ・入射角を増加させたときのイメージセンサ上での光強度の変化の傾向はおおよそ一致していた.
- ・イメージセンサ上の明線の間隔は一致したが, 明線の中割れは再現できる条件とできない条件があった.

文献

- 1) 高谷裕浩: 精密工学会誌, 73 (2007) 1308.
- 2) 白江智弘: 表面技術, 57, 8 (2006) 559.
- 3) 岡本卓: 色材協会誌, 89 (2016) 93.
- 4) 高木康博: 光学, 30 (2001) 270.

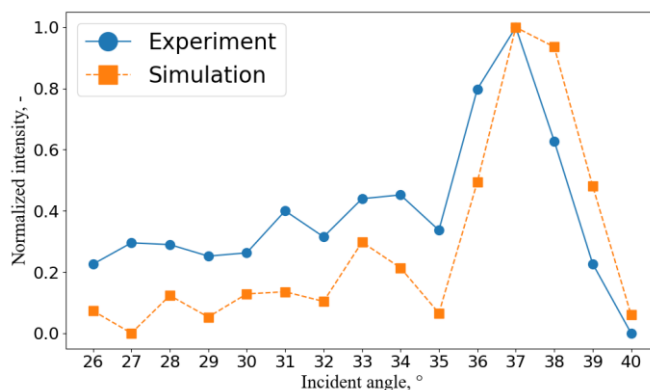


Fig.5 Comparison of experimental and simulated intensity