

外観検査のための光沢表面の法線と粗さの推定

大森 涼平 川原 僚 岡部 孝弘
九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

物体表面上の傷や異物などの異常を外観から検知することを外観検査という。目視による外観検査が抱える、検査結果のばらつきや専門知識をもつ検査員の不足などといった問題の解決に、外観検査の自動化は重要な課題である。

外観検査の手がかりとして、表面粗さが挙げられる。一般に、鏡面反射光は、表面が平滑であれば正反射方向のみで観測され、表面に微細な凹凸があるほど、すなわち表面が粗いほど正反射方向の周囲に広がる。この性質を利用し、鏡面反射光の拡がりを観測することにより、物体の表面粗さを推定することができる。

鏡面反射光の拡がりから物体の表面粗さを推定する手法の先行研究として、Ariedaらによる手法 [1] がある。Ariedaらは、半透明の平面物体を偏光カメラで撮影した画像から鏡面反射成分を抽出し、それを鏡面反射モデルにあてはめることによって表面粗さを推定している。しかしながら、この手法では平面物体を仮定し、法線を既知としていることから、形状が未知の物体には適用できないという問題点がある。

そこで本稿では、撮影画像から抽出した鏡面反射成分を鏡面反射モデルにあてはめ、表面粗さと鏡面反射率と同時に法線方向も推定することにより、形状が未知の物体にも適用できる手法を提案する。提案手法で仮定する鏡面反射モデルは非線形であり、推定結果は初期値に依存する。そこで提案手法では、鏡面反射モデルを変形し線形とみなして解くことで、非線形最適化のための初期値を得る。また、液晶ディスプレイをプログラマブル光源として用いることで、光源やカメラを機械的に回転することなく効率的に画像を撮影する。

2 提案手法

鏡面反射を表現するモデルのひとつに、表面粗さによる鏡面反射の拡がりを表現した Torrance-Sparrow モデル [2] がある。本研究では、簡略化した Torrance-Sparrow モデル

$$i = \frac{k}{n \cdot v} e^{-\frac{\beta^2}{\sigma^2}} \quad (1)$$

を用いる。ここで、 i は鏡面反射成分の輝度値、 k は鏡面反射率、 n は物体の法線、 v は視線方向、 β は光源方向 l と視線方向 v の二等分方向と法線方向 n のなす角、 σ は表面粗さである。このうち、 i は撮影画像から鏡面反射成分を抽出することにより、 v と l は幾何

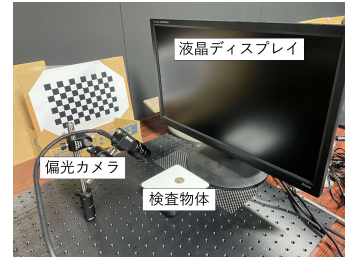


図 1: 実験装置の配置

学的校正によりそれぞれ既知とし、その他のパラメータは未知とする。

提案手法では、偏光光源として液晶ディスプレイを利用し、物体表面上の各点を様々な方向から照らす光を実現する。そして、物体表面上で反射する光を偏光カメラで撮影し、得られた画像から栗田らの手法 [3] により鏡面反射成分を抽出する。抽出した鏡面反射成分をもとに、物体の鏡面反射が Torrance-Sparrow モデルに従うと仮定し、画素ごとに法線、表面粗さおよび鏡面反射率を推定する。

具体的には、式 (1) の n, σ, k の各パラメータを最小二乗法により求めることにより推定する。式 (1) の非線形性から、推定結果は初期値に依存する。したがって、妥当な推定結果を得るためには、良い初期値を推定に用いる必要がある。そこで提案手法では、様々な光源方向で撮影した複数の画像から、画素ごとに鏡面反射成分の輝度値が最大となる画像を検索し、そのときの光源方向と画素ごとの視線方向の二等分方向を求めることにより法線の初期値を得る。表面粗さと鏡面反射率については、式 (1) の両辺に対数をとって整理した式

$$\ln(n \cdot v)i = \ln k - \frac{\beta^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

を、 $1/\sigma^2$ と $\ln k$ を変数とみなして線形最小二乗法により求める。

3 実験

実際に形状が未知である物体の法線と表面粗さを推定するため、図 1 に示す実験装置により実験を行った。1920×1080 の解像度のディスプレイ上に 1 辺 120 ピクセルの白色の正方形を左上からラスタスキャン順に表示させ、検査対象からの反射光を偏光カメラで撮影した。この実験では、偏光カメラに FLIR 社製 BFS-U3-51S5PC-C を使用した。また、液晶ディスプレイの光漏れの影響を除去するために、無表示下で撮影した画

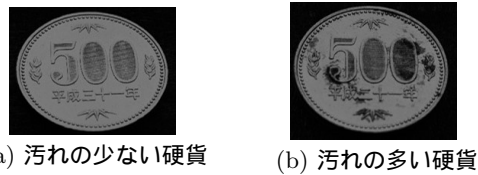


図 2: 検査物体

像を差し引くダーク補正を行った。

図 1 の実験環境下で撮影した 2 種類の光沢物体 (500 円硬貨) を図 2 に示す。図 2(a) の、汚れの少ない硬貨の推定結果を図 3(a), (b), (c), その際に用いた初期値を図 3(d), (e), (f), 表面粗さと鏡面反射率の初期値をランダムにして推定した結果を図 3(g), (h), (i) に、初期値をランダムにして 10 回推定した際の結果の標準偏差を図 3(k), (l) にそれぞれ示す。また、図 2(b) の、汚れの多い硬貨の推定結果を図 4 に示す。図 3 と図 4 の可視化で用いた法線と色の対応が分かるように、球の法線マップを図 3(j) に示す。

まず、図 3 の (a), (b), (c) および (d), (e), (f) より、初期値と最終的な推定結果の推定精度について議論する。法線については、図 3(a) と (d) のいずれも平滑な部分では一様に法線が z 軸上向きになっているほか、図 3(a) の文字や図形のふちに注目すると、起伏のない部分と比較して法線の向きが変化しており、図 3(a) の方が定性的により良好な結果が得られている。また、500 円硬貨は、文字の内部や図形に凹凸が多いため、表面粗さは大きく、鏡面反射率は小さくなることが予想される。図 3(b) および (e) を比較すると、図 3(b) の方が文字の内部や図形の部分において、表面粗さが大きいという結果が顕著に出ており、図 3(c) および (f) の鏡面反射率についても同様に図 3(c) の方が文字の内部や図形の部分において、鏡面反射率がより小さいという結果となっている。したがって、最終的な推定結果は初期値より高精度であると考えられる。

次に、図 3 の (a), (b), (c) および (g), (h), (i) より、初期値の違いによる推定精度の差異について議論する。図 3 の (a), (b), (c) と (g), (h), (i) を比較すると、特に物体の文字の内部や図形の部分において、Torrance-Sparrow モデルを変形し、線形とみなした式から求めた初期値で推定した提案手法の結果のほうが、ランダムな初期値を用いた結果より定性的に良好な結果となっている。また、図 3 の (k), (l) より、標準偏差は大きく、初期値によって推定結果が大きく変わることから、提案手法による初期値の選択が適切であると考えられる。

最後に、図 3 の (a), (b), (c) と図 4 より、物体の汚れ具合による推定結果の差異について議論する。図 4 の結果に着目すると、汚れのない部分の推定結果は、図 3 と同様に良好であるが、汚れのある部分の推定結果は比較的差が大きい結果となった。これは、汚れのあ

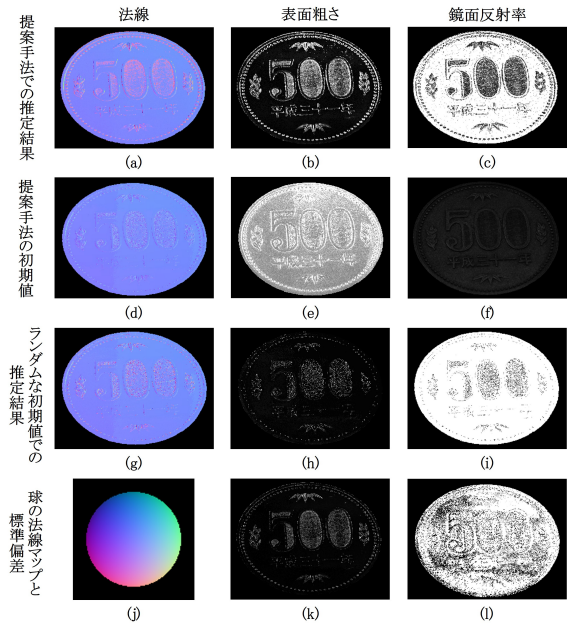


図 3: 汚れの少ない硬貨の推定結果



図 4: 汚れの多い硬貨の推定結果

る部分では、鏡面反射成分がほとんど観測されなかったことが原因として考えられる。このような鏡面反射成分がほとんど観測できない部分における推定精度の向上については、今後の課題としたい。

4 むすび

本稿では、偏光および鏡面反射光の性質を利用して、形状未知の光沢物体の法線や表面粗さを頑健に推定する手法を提案した。また、実画像実験を通して提案手法の定性的な有効性を確認した。

今後の課題として、手法の定量的評価による有効性の確認や、光源のパターンを工夫することによる計測時間の短縮、拡散反射成分も併用することによる推定精度の向上、被写体を全方位から照明することによる任意の形状の物体への拡張などが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H00612 の助成を受けた。

参考文献

- [1] K. Arieda, T. Okabe, “Illumination Planning for Measuring Per-Pixel Surface Roughness”, In Proc. MVA2021, P2-13, 2021.
- [2] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory for off-specular reflection from roughened surfaces”, Journal of the Optical Society of America, Vol.57, pp.1104-1114, 1967
- [3] 栗田 哲平ほか, “裏面照射型 4 方向偏光 CMOS イメージセンサを利用したリアルタイム反射成分分離・応用信号処理技術”, SSI2018 予稿集, IS1-34, 2018.